# การกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็มภายใต้คลื่นและกระแสน้ำ

นายนัฐวุฒิ พัดไธสง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SCOUR AROUND A GROUP OF PILES WITH PILE CAP UNDER COMBINED WAVES AND CURRENT

Mr.Nattawut Pattaisong

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of Master of Engineering Program in Water Resources Engineering

Department of Water Resources Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็มภายใต้คลื่นและกระแสน้ำ |
| โดย | นายนัฐวุฒิ พัดไธสง |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมแหล่งน้ำ |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เสรี จันทรโยธา |

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

............................................... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

............................................... ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.ครรชิต ลิขิตเดชาโรจน์)

............................................... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เสรี จันทรโยธา)

............................................... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยพันธุ์ รักวิจัย)

............................................... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ทวนทัน กิจไพศาลสกุล)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นัฐวุฒิ พัดไธสง : การกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็มภายใต้คลื่นและกระแสน้ำ. (SCOUR AROUND A GROUP OF PILES WITH PILE CAP UNDER COMBINED WAVES AND CURRENT) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.เสรี จันทรโยธา, 199หน้า.

การศึกษานี้ ได้นำเสนอผลการทดลอง จากการศึกษาการกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็มขนาดความหนาต่างๆกันภายใต้การกระทำของคลื่นและกระแสน้ำร่วมกัน การทดลองได้ดำเนินการภายใต้เงื่อนไขการกัดเซาะของน้ำไหลที่ไม่มีตะกอนปนและการไหลของน้ำเป็นแบบคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลา คลื่นที่ใช้ในการทดลองเป็นคลื่นสม่ำเสมอเคลื่อนตัวไปทิศทางเดียวกันกับกระแสน้ำ และกระทำกับครอบหัวเข็มทางด้านแคบ แบบจำลองที่ใช้ในการทดลองมีรูปแบบเป็น เสาเข็มกลุ่มทรงกระบอกวงกลม วางตั้งตรงในแนวดิ่ง จัดเรียงแบบ 3 X 4 ระยะช่วงเสาเข็มเท่ากับ 3 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม และ มีครอบหัวเข็มรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าตัดมุม เพื่อศึกษาถึงผลของความหนาของครอบหัวเข็มต่อความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มกลุ่ม ได้ใช้ขนาดของครอบหัวเข็มที่มีอัตราส่วนของความหนาครอบหัวเข็มที่จมอยู่ในน้ำต่อความลึกของน้ำ ($t_s/y_0$) ที่แตกต่างกัน 9 ค่า ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 1.0

จากผลการทดลองพบว่า ความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มกลุ่ม เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำเทียบกับความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) และอัตราการเพิ่มขึ้นของหลุมกัดเซาะจะสูงในช่วงค่า $t_s/y_0$ น้อยๆ และค่อยๆลดลงตามการเพิ่มของ $t_s/y_0$ และจากการพิจารณาอิทธิพลของกระแสน้ำและคลื่นต่อความลึกหลุมกัดเซาะพบว่า ความลึกหลุมกัดเซาะเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงตามค่าพารามิเตอร์ที่แสดงถึงสัดส่วนของความเร็วกระแสน้ำในส่วนประกอบการไหล ($U_{cw}$) ในช่วงไม่เกิน 0.6 และอัตราการเพิ่มขึ้น เริ่มลดลงจนมีค่าเข้าใกล้สู่ความลึกหลุมกัดเซาะของกรณีที่กระทำโดยกระแสน้ำอย่างเดียว เมื่อ $U_{cw}$ มีค่ามากกว่า 0.6 นอกจากนี้ผลการศึกษายังพบว่าความลึกของหลุมกัดเซาะมีอัตราการเพิ่มที่สูงตามการเพิ่มค่าของกลุ่มตัวแปรที่แสดงถึงคุณลักษณะของคลื่นในรูปของค่า $KC$ ในช่วงที่มีค่าน้อยๆ และอัตราการเพิ่มขึ้นเริ่มลดลงจนมีค่าเข้าใกล้สู่ค่าความลึกหลุมกัดเซาะของกรณีที่กระทำโดยกระแสน้ำเพียงอย่างเดียวเมื่อ $KC$ มีค่ามากกว่า 300 จากการเปรียบเทียบระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะภายใต้การกระทำของคลื่นและกระแสน้ำร่วมกัน กับความลึกหลุมกัดเซาะภายใต้การกระทำของกระแสน้ำอย่างเดียว ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า ความลึกหลุมกัดเซาะภายใต้การกระทำของคลื่นและกระแสน้ำร่วมกันจะมีค่ามากกว่า ความลึกหลุมกัดเซาะภายใต้การกระทำของกระแสน้ำอย่างเดียว ประมาณ 1.2 เท่าโดยเฉลี่ย

ภาควิชา......วิศวกรรมแหล่งน้ำ...........  ลายมือชื่อนิสิต..........................................

สาขาวิชา......วิศวกรรมแหล่งน้ำ...........  ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..........................

ปีการศึกษา......2549..............................

# # 4670350821 : MAJOR WATER RESOURCES ENGINEERING

KEY WORD : SCOUR / PILE CAP / WAVES AND CURRENT / KEULEGAN-CARPENTER NUMBER

NATTAWUT PATTAISONG : SCOUR AROUND A GROUP OF PILES WITH PILE CAP UNDER COMBINED WAVES AND CURRENT. THESIS ADVISOR : ASST.PROF.SEREE CHANYOTHA, Ph.D., 199 pp.

This study presents the results of an experimental investigation on the scour around a group of piles with different pile cap thicknesses which were subjected to combined waves and current. The experiments were carried out under steady and clear water scour conditions. Regular waves were used in the experiments. The waves and current were codirectional and perpendicular to the narrow side of the pile cap. The 3 X 4 vertical circular piles with the pile spacing three-time pile diameter and the rectangular pile cap with chamfered corners were used in the experiments. Nine values of submerged pile cap thickness to water depth ratio ($t_s/y_0$) ranging from 0.2 to 1.0 were tested, in order to investigate the effect of pile cap thickness on the depth of the pile scour hole.

The experimental results showed that the maximum scour depth increased as the submerged pile cap thickness to water depth ratio ( $t_s/y_0$) increased. The rate of scouring decreased eventually as the $t_s/y_0$ ratio increased. In addition, the higher scouring rate was found at the smaller value of the $U_{cw}$ (the current component to the flow parameter) and the scouring depth attained its steady-current scour at the $U_{cw}$ greater than 0.6. The experiment also indicated that the scour depth increased as the Keulegan-Carpenter number (*KC*) increased. The increasing rate of the scouring decreased as the *KC* number increased and attained constant at the *KC* number greater than 300 which was the equilibrium scour depth of steady-current scour condition. In comparing between the scour depth under combined waves and current action and under current action solely, it was found that the scour depth under combined waves and current was larger than the scour depth under current only by the factor of about 1.2 on the average.

Department......Water Resources Engineering...... Student's signature..........

Field of study......Water Resources Engineering...... Advisor's signature..........

Academic year...2549..........

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์ การกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็มภายใต้คลื่นและกระแสน้ำนี้ สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากบุคคลต่างๆหลายท่านที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้การช่วยเหลือในด้านต่างๆ

ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณ ท่านอาจารย์ ดร.ครรชิต ลิขิตเดชาโรจน์ ท่านรองศาสตราจารย์ ดร.ทวนทัน กิจไพศาลสกุล ที่ได้สละเวลาของท่านในการให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น โดยเฉพาะท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสรี จันทรโยธา ท่านรองศาสตราจารย์ ดร.ชัยพันธ์ รักวิจัย ซึ่งได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ทั้งในด้านหลักวิชาการในภาคทฤษฎีและปฏิบัติตลอดจนปรัชญาการใช้ชีวิตอันเป็นประโยชน์แก่ข้าพเจ้า อย่างใกล้ชิดมาโดยตลอด จนสามารถดำเนินการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ลุล่วงด้วยดี อนึ่งข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา และอบรมสั่งสอนข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาการศึกษา

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนบางส่วนเพื่อใช้จ่ายในการทำวิจัย และขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อำนวยความสะดวกในเรื่องสถานที่ เครื่องมือในการทดลอง รวมทั้งสาธารณูปโภคต่างๆในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการชลศาสตร์และชายฝั่งทะเลทุกท่าน ตลอดจนท่านอื่นๆที่มิได้กล่าวนาม ณ ที่นี้ ซึ่งได้มีส่วนให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานด้านต่างๆแก่ข้าพเจ้าเป็นอย่างดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของข้าพเจ้า ผู้ซึ่งให้ความรักความอบอุ่นและยอมเหนื่อยยากเพื่อให้การสนับสนุนการศึกษาแก่ข้าพเจ้าตลอดมา รวมทั้งเป็นที่ยึดเหนี่ยวและแรงบัลดาลใจในการนำไปสู่ความสำเร็จทั้งหมดในชีวิตของข้าพเจ้า ประโยชน์จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ หากพึงมี ข้าพเจ้าขอมอบให้ผู้ที่สนใจ ซึ่งนำไปเป็นข้อคิดประกอบการปฏิบัติและแนวทางการศึกษาต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.......... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.......... จ

กิตติกรรมประกาศ.......... ฉ

สารบัญ.......... ช

สารบัญตาราง.......... ฌ

สารบัญรูป.......... ญ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.......... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.......... 3

1.3 ขอบข่ายการศึกษา.......... 3

1.4 การดำเนินงานศึกษา.......... 6

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.......... 6

บทที่ 2 หลักการและการศึกษาที่ผ่านมา 8

2.1 การกัดเซาะเฉพาะแห่ง.......... 8

2.2 กลศาสตร์การกัดเซาะ.......... 11

2.3 แนวทางการศึกษา.......... 13

2.4 การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร.......... 14

2.5 การศึกษาที่ผ่านมา.......... 16

บทที่ 3 แบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์และการทดลอง 23

3.1 แบบจำลองชลศาสตร์.......... 23

3.2 อุปกรณ์วัดและเก็บบันทึกข้อมูลการทดลอง.......... 24

3.3 การออกแบบการทดลอง.......... 26

3.4 ขั้นตอนการทดลอง.......... 29

บทที่ 4 ข้อมูลและผลการทดลอง 33

4.1 ข้อมูลการทดลอง.......... 33

4.2 วิธีการเก็บข้อมูล.......... 35

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า


4.3 ผลการทดลอง........................................................................................ 38

4.4 ข้อมูลตัวแปรการทดลอง............................................................................. 43

บทที่ 5 ผลการศึกษา 48

5.1 อิทธิพลของคลื่นและกระแสน้ำต่อความลึกหลุมกัดเซาะ.................................. 48

5.2 อิทธิพลของครอบหัวเข็มต่อความลึกหลุมกัดเซาะ.......................................... 56

5.3 การประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะ........................................................... 57

5.4 เปรียบเทียบอิทธิพลของความหนาครอบหัวเข็มจากผลการศึกษานี้ กับผลการศึกษาของ HEC-18.................................................................................... 61

5.5 เวลาเกิดการกัดเซาะสมดุล.......................................................................... 62

บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ 69

6.1 สรุปผลการศึกษา....................................................................................... 69

6.2 ข้อเสนอแนะ.............................................................................................. 82

รายการอ้างอิง.................................................................................................. 86

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก แบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์และอุปกรณ์การทดลอง............... 90

ภาคผนวก ข การหาค่าเบื้องต้นที่ใช้ในการทดลอง................................................ 106

ภาคผนวก ค การเตรียมการทดลองและปรับเทียบอุปกรณ์................................... 110

ภาคผนวก ง ตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง..................................................... 117

ภาคผนวก จ ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด-ต่ำสุด รอบเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็มภายใต้คลื่นและกระแสน้ำ........................................................... 122

ภาคผนวก ฉ การประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะจาก HEC-18 และการหาค่าปรับแก้เนื่องจากความหนาครอบหัวเข็ม......................................... 169

ภาคผนวก ช สรุปการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับปัญหาเรื่องการกัดเซาะรอบโครงสร้างฐานรากของอาคารชลศาสตร์....................................................... 178

ภาคผนวก ซ สรุปสัญลักษณ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.................................................. 197

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.................................................................................. 199

# สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 3-1 กรณีการทดลองต่างๆ ที่ทำการศึกษา จำนวน 81 กรณี.................................... 31

ตาราง 3-2 ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลอง................................................................ 32

ตาราง 4-1 เวลาการทดลองตั้งแต่เริ่มเกิดการกัดเซาะจนถึงการกัดเซาะสูงสุด ในแต่ละกรณีศึกษา........................................................................................ 45

ตาราง 4-2 เงื่อนไขและผลการกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็ม (คลื่นเคลื่อนที่ตามกระแสน้ำ)........................................................................................ 46

ตาราง 5-1 ค่าปรับแก้ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด ($K_{pc}$) เนื่องจาก ($t_s/y_0$)............................. 66

ตาราง 5-2 ค่าปรับแก้ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด ($K_{pc}$) เนื่องจาก ($t_s/y_0$) ของ HEC-18 กับการศึกษานี้........................................................................................ 68

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญรูป

หน้า

รูป 2-1 การพัดพาตะกอนเข้าและออกจากหลุมกัดเซาะ โดย Raudkivi และ Sutherland (1981)........ 10

รูป 2-2 ความลึกหลุมกัดเซาะสำหรับขนาดตอม่อและขนาดวัสดุท้องน้ำคงที่ โดย Raudkivi และ Sutherland (1981)........ 10

รูป 2-3 การไหลผ่านตอม่อสะพานและการเกิดการไหลหมุนวน โดย Raudkivi และ Sutherland (1981)........ 12

รูป 2-4 ความสัมพันธ์ของ Entrainment Function กับ Reynolds Number ตามที่ Shields ได้ทำการศึกษาไว้ โดย Raudkivi และ Sutherland (1981)........ 12

รูป 2-5 รูปแบบโครงสร้างตอม่อสะพาน แสดงส่วนประกอบต่างๆ........ 22

รูป 2-6 ความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะ กับค่า *KC* โดย Sumer (1992b, 1998)....... 22

รูป 3-1 รายละเอียดแบบจำลองชลศาสตร์กระแสน้ำและคลื่น........ 25

รูป 3-2 แบบรายละเอียดของแบบจำลองตอม่อ กรณีศึกษา P1-P9........ 27

รูป 5-1 ตัวอย่างภาพแสดงกลไกการกัดเซาะกรณี P3, *KC* = 14, $U_c$ = 4.8 ซม./วินาที......... 52

รูป 5-2 ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ $U_{cw}$ ต่อความลึกหลุมกัดเซาะ........ 53

รูป 5-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด กับค่า *KC*........ 54

รูป 5-4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $y_s/D$ กับค่า $U_{cw}$ และค่า *KC* แยกตามความหนา pile cap.... 64

รูป 5-5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $y_s/D$ กับค่า $U_{cw}$ และค่า *KC* กรณีเสาเข็มกลุ่มไม่มีครอบหัวเข็ม (Sumer และ Fredsoe, 2001)........ 65

รูป 5-6 ค่าปรับแก้ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด ($K_{pc}$) เนื่องจาก ($t_s/y_0$)........ 66

รูป 5-7 เปรียบเทียบค่า $y_s/D$ ที่ได้จากสมการ (5-11) และที่ได้จากการทดลองในการศึกษานี้. 67

รูป 5-8 ค่าปรับแก้ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด ($K_{pc}$) เนื่องจาก ($t_s/y_0$) ของ HEC-18 กับการศึกษานี้........ 68

รูป 6-1 เปรียบเทียบพฤติกรรมการไหล เนื่องจากความแตกต่างของความหนาครอบหัวเข็ม... 72

# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การกัดเซาะ (scouring) รอบโครงสร้างฐานรากของอาคารชลศาสตร์ (hydraulic structures) นับได้ว่าเป็นสาเหตุหลักของการวิบัติของโครงสร้างอาคารที่เป็นผลพวงจากปัญหาที่เกิดจากความผิดพลาดทางด้านชลศาสตร์ ซึ่งจากในอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการศึกษาและวิจัยอย่างกว้างขวางและต่อเนื่องจากนักวิจัยและผู้ที่สนใจจำนวนมาก ในปัญหาเรื่องการกัดเซาะรอบโครงสร้างฐานรากของอาคารทางชลศาสตร์ ไม่ว่าจะเป็นอาคารในแม่น้ำ ในทะเล หรือบริเวณชายฝั่งแม่น้ำและชายฝั่งทะเล อาคารทางชลศาสตร์ในทะเลและชายฝั่งทะเลที่พบเห็นโดยทั่วไปและมักจะประสบปัญหาดังกล่าวเช่น แท่นขุดเจาะ อาคารประภาคาร สะพานท่าเทียบเรือ เขื่อนกันคลื่น แนวท่อที่วางบนพื้นทะเล เป็นต้น เนื่องจากโครงสร้างฐานรากและตอม่อของอาคารชลศาสตร์กีดขวางการเคลื่อนตัวของน้ำก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของน้ำและเป็นผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของตะกอน ทำให้น้ำมีทิศทางและความเร็วการไหลซึ่งสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของตะกอนเปลี่ยนไป อันเป็นสาเหตุของการเกิดการกัดเซาะ ที่บริเวณรอบโครงสร้างตอม่อขึ้นในที่สุด ถ้าโครงสร้างฐานรากใดอยู่ได้ด้วยแรงเสียดทานของผิวฐานรากกับชั้นดินท้องน้ำ (friction piles) หากมีการกัดเซาะมากๆ และออกแบบไว้โดยไม่คำนึงถึงปัญหาดังกล่าวโครงสร้างของอาคารทั้งหมด อาจสูญเสียเสถียรภาพและวิบัติได้ในที่สุด ซึ่งจากเหตุการณ์ทั้งในและต่างประเทศพบว่า มีหลายเหตุการณ์ก่อให้เกิดความเสียหายรุนแรงถึงขั้นนำไปสู่การสูญเสียชีวิต และทรัพย์สิน จนเป็นเหตุให้เสียงบประมาณของประเทศเป็นจำนวนมากในการปรับปรุงซ่อมแซม หรือก่อสร้างใหม่ ซึ่งส่งผลกระทบต่อความมั่นคงทางเศรษฐกิจของประเทศ

จากความรุนแรงของปัญหาการกัดเซาะที่เกิดขึ้นกับอาคารชลศาสตร์หลายๆชนิดดังกล่าวในข้างต้น พบว่ามีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับรูปแบบของโครงสร้างตลอดจนขนาดของโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นจึงถือได้ว่ารูปแบบและขนาดของโครงสร้างตอม่อเป็นส่วนหนึ่งที่มีผลต่อสภาวะการกัดเซาะ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการกำหนดการออกแบบให้โครงสร้างมีเสถียรภาพ เนื่องจากการกัดเซาะจะค่อยลดความแข็งแรงของโครงสร้างฐานรากในระยะยาวจนเกิดการวิบัติในที่สุด ดังปรากฏในรายงานการศึกษาที่ผ่านมา สำหรับตอม่อหลายรูปแบบ เช่น โครงสร้างตอม่อแบบเสาเข็มเดี่ยว หรือรูปแบบการจัดกลุ่มของเสาเข็มกลุ่ม เป็นต้น สำหรับกรณีฐานรากที่เป็นแบบเสาเข็มกลุ่ม (pile group) เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในโครงสร้างทางชลศาสตร์หลายชนิด

เช่น โครงสร้างตอม่อสะพานในทะเล โครงสร้างตอม่อท่าเทียบเรือ และโครงสร้างตอม่ออาคารประภาคารในทะเล เป็นต้น นอกเหนือจากเหตุผลของความเหมาะสมตามสภาพของลักษณะทางธรณีเทคนิคที่มีความจำเป็นจะต้องใช้ฐานรากแบบเสาเข็มกลุ่มแล้ว ฐานรากเสาเข็มกลุ่มยังมีราคาค่าก่อสร้างที่ถูกกว่าฐานรากแบบแผ่ (spread footing) ที่มีขนาดใหญ่และต้องการปริมาณวัสดุที่จะก่อสร้างมากกว่า โดยเฉพาะปัญหาของการกัดเซาะรอบฐานรากตอม่อของโครงสร้างดังกล่าวมีมากอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งฐานรากแบบเสาเข็มกลุ่มก็พบว่ามีความเหมาะสมกว่าเพราะว่าให้ขนาดความลึกหลุมกัดเซาะที่น้อยกว่า

อย่างไรก็ตามฐานรากแบบเสาเข็มกลุ่มของโครงสร้างทางชลศาสตร์บางชนิด เช่น สะพานในทะเล มักจะต้องมีครอบหัวเข็ม (pile cap) เพื่อใช้เป็นฐานของโครงสร้างตอม่อ และครอบหัวเสาเข็มดังกล่าวก็มีรูปแบบและขนาดที่แตกต่างกันไปตามเหตุผลการออกแบบทางโครงสร้าง (structural reason) จากผลการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ฐานรากแบบเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็ม มีผลต่อการกัดเซาะรอบฐานรากเสาเข็มกลุ่ม เพิ่มขึ้นจากฐานรากเสาเข็มกลุ่มที่ไม่มีครอบหัวเข็ม [Federal Highway Administration, FHWA (2001)] ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจว่าถ้าขนาดของความหนาของครอบหัวเข็มมีขนาดต่างๆที่เปลี่ยนแปลงไป จะส่งผลต่อพฤติกรรมของชลศาสตร์การไหลของน้ำและการกัดเซาะรอบฐานรากเสาเข็มกลุ่มอย่างไร โดยเฉพาะถ้าฐานรากของโครงสร้างดังกล่าว ตั้งอยู่ในทะเลหรือบริเวณชายฝั่งทะเลที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของคลื่นและกระแสน้ำร่วมกัน (combined waves and current) จะส่งผลต่อพฤติกรรมการกัดเซาะรอบฐานรากเสาเข็มกลุ่มอย่างไร เพื่อให้ ก่อเกิดความเข้าใจในกระบวนการและกลไกของการเคลื่อนตัวของน้ำที่เกิดจากคลื่นและกระแสน้ำ ที่สัมพันธ์กับกระบวนการการเกิดการกัดเซาะรอบฐานรากเสาเข็มได้ดีขึ้น และอาจเป็นประโยชน์ต่อการนำผลการศึกษาดังกล่าวไปพิจารณาประกอบการออกแบบโครงสร้างฐานรากในทะเลที่มีความอ่อนไหวต่อการเกิดการกัดเซาะ ให้มีความเหมาะสมและถูกต้องมากขึ้น

เนื่องจากกระบวนการและกลไกของการกัดเซาะรอบโครงสร้างฐานรากแบบเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็ม มีความสลับซับซ้อนอย่างมาก และกลไกของการกัดเซาะดังกล่าว ก็มีความเกี่ยวสัมพันธ์กับการเคลื่อนตัวของน้ำ (อันเนื่องมาจากกระแสน้ำและคลื่น) อย่างลึกล้ำเกินกว่าจะสามารถวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ดังกล่าวด้วยการวิเคราะห์ทางทฤษฎี (analytical) ได้โดยง่าย การหาคำตอบจากปัญหาดังกล่าว จึงมีความจำเป็นต้องใช้การวิเคราะห์จากแบบจำลองทางกายภาพ (physical model) ดังนั้นจุดประสงค์ของการศึกษานี้ จึงมุ่งประเด็นไปที่การศึกษาถึงอิทธิพลของครอบหัวเข็มของเสาเข็มกลุ่ม ที่มีต่อความลึกของหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่ม ภายใต้คลื่นและกระแสน้ำร่วมกัน โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์

และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้น

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1) เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลและความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นและกระแสน้ำต่อความลึกของหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่ม ของโครงสร้างตอม่อที่มีรูปแบบโครงสร้างเป็นเสาเข็มกลุ่มและมีครอบหัวเข็ม (a group of piles with pile cap)

2) เพื่อให้ทราบถึงผลกระทบของ อัตราส่วนของความหนาครอบหัวเข็มที่จมอยู่ในน้ำเทียบกับความลึกน้ำ ของโครงสร้างตอม่อที่มีรูปแบบเป็นโครงสร้างเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็มต่อความลึกของหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่ม

3) เพื่อใช้เป็นแนวทางเบื้องต้น สำหรับการประมาณค่าความลึกของหลุมการกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็ม เนื่องจากอิทธิพลต่างๆดังกล่าวในข้างต้น มาใช้ประกอบการพิจารณาเพิ่มเติมในการกำหนดเกณฑ์การออกแบบทางชลศาสตร์ ในกรณีตอม่อที่มีรูปแบบเป็นโครงสร้างเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็มให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น

4) เพื่อเสริมสร้างประสบการณ์ในการใช้แบบจำลองทางกายภาพ ในการศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาทางชลศาสตร์การไหลและการกัดเซาะรอบตอม่อ รวมถึงการนำไปสู่การประยุกต์ใช้กับงานวิศวกรรมโครงสร้างทางชลศาสตร์อื่นๆ

### 1.3 ขอบข่ายการศึกษา

ในการดำเนินการศึกษานี้ ใช้แบบจำลองกายภาพเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลและความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นและกระแสน้ำต่อความลึกของหลุมการกัดเซาะรอบๆเสาเข็มกลุ่มของโครงสร้างตอม่อที่มีรูปแบบโครงสร้างเป็นเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็ม โดยทำการจำลองการทดลองในรางกระแสน้ำและคลื่น (wave and current open channel) ขนาดยาว 18 ม. กว้าง 0.6 ม. และลึก 0.75 ม. ใช้เครื่องกำเนิดคลื่นแบบกระดานพัดน้ำ (paddle type) สร้างคลื่นไม่สม่ำเสมอไปในทิศทางตามกระแสน้ำ ทำการจำลองการศึกษา ณ บริเวณห้องปฏิบัติการชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยลักษณะของแบบจำลองประกอบไปด้วยรายละเอียดและขอบข่ายการศึกษาดังต่อไปนี้

1) รูปแบบตอม่อในการจำลองการศึกษา มีลักษณะเป็นตอม่อแบบที่ประกอบด้วยโครงสร้าง 2 ส่วนจมอยู่ในน้ำ คือ เสาเข็มกลุ่ม (pile group) แบบ 3X4 รูปทรงกระบอกตั้งตรงในแนวดิ่ง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 14.0 มม.ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์กลางเสาเข็มเป็น 3 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม (42 มม.) และครอบหัวเข็ม (pile cap) รูปทรงสี่เหลี่ยมมุมตัด ขนาดกว้าง 122.0 มม. ยาว 166.0 มม. เพื่อศึกษาถึงผลของความหนาของครอบหัวเข็มต่อความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่ม ได้ใช้ขนาดของครอบหัวเข็มที่มีอัตราส่วนของความหนาครอบหัวเข็มที่จมอยู่ในน้ำต่อความลึกของน้ำที่แตกต่างกัน 9 ค่า ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 1.0 เหตุผลที่ศึกษาตอม่อรูปแบบดังกล่าวแยกเป็นประเด็นดังนี้

- การจัดกลุ่มของเสาเข็มรูปทรงกระบอกแบบสี่เหลี่ยม 3X4 พบว่า ไม่ว่าจะเป็นกลุ่มเสาเข็มที่เล็กกว่าหรือใหญ่กว่าการศึกษานี้ การกัดเซาะสูงสุดจะเกิดขึ้นที่เสาเข็มแถวแรกที่ปะทะการไหลเสมอ และขนาดของกลุ่มเสาเข็มต่อความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดสามารถวิเคราะห์ออกมาในรูปแฟกเตอร์ตัวคูณ [HEC-18, FHWA (2001)]

- ระยะช่วงเสาเข็ม จากการศึกษานี้ใช้ระยะช่วงเสาเข็มเท่ากับ 3 เท่าของขนาดเสาเข็มเพื่อจำกัดอิทธิพลของระยะช่วงเสาเข็มต่อความลึกหลุมกัดเซาะ เนื่องจากระยะช่วงเสาเข็มดังกล่าวนี้ เป็นระยะที่อิทธิพลของระยะช่วงเสาเข็มไม่ส่งผลต่อความลึกการกัดเซาะเลย [Sumer B.M. และ Fredsoe J. (1998)]

- การศึกษานี้ ศึกษาเฉพาะอิทธิพลของครอบหัวเข็ม (pile cap) รูปทรงสี่เหลี่ยมมุมตัดที่ส่วนมากนิยมใช้ในทางปฏิบัติ

2) ทำการศึกษาลักษณะของหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่ม โดยดำเนินการทดลองภายใต้เงื่อนไขการกัดเซาะของน้ำไหลแบบคงที่ไม่เปลี่ยนตามเวลา และไม่มีตะกอนปน (steady clear-water scour conditions) สภาพท้องน้ำในแบบจำลองเป็นทรายทะเลละเอียดขนาดเฉลี่ย $d_{50}$ เท่ากับ 0.25 มม. ความหนาวัสดุท้องน้ำประมาณ 150 มม. จากท้องรางน้ำ และปรับทรายท้องน้ำให้ผิวท้องน้ำเรียบและไม่บดอัด

3) ทำการทดลองการกัดเซาะรอบตอม่อแต่ละกรณี ในรางน้ำที่มีอัตราการไหลเฉลี่ยจำนวน 3 อัตราการไหลคือ 9, 18 และ 27 ลิตรต่อวินาที และทุกอัตราการไหลมีความลึกการไหล ณ ตำแหน่งหน้าตัดการไหลที่ติดตั้งแบบจำลองตอม่อเท่ากันคือมีค่าเท่ากับ 30 ซม. ดังนั้นความเร็วการไหลของน้ำในรางน้ำ ณ ตำแหน่งดังกล่าว จะเปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลที่เปลี่ยนไปในแต่ละกรณี และจากที่กำหนดใช้วัสดุท้องน้ำที่มีในห้องปฏิบัติการ ขนาดเฉลี่ย $d_{50}$ เท่ากับ 0.25 มม.จึง

ได้ว่า เพื่อให้เกิดการไหลของน้ำในสภาวะที่ไม่มีตะกอนปน ดังนั้นจึงปรับความลาดเอียงของท้องรางน้ำตามความเร็วการไหลที่เปลี่ยนไป

4) จากการศึกษาที่ผ่านมา เรื่องการกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มเนื่องจากคลื่น [Sumer (1998)] พบว่าความลึกหลุมกัดเซาะจะเปลี่ยนตามค่า Keulegan-Carpenter number (*KC*) และเริ่มเกิดการกัดเซาะที่ค่า *KC* ค่าหนึ่งๆ ซึ่งมีความสัมพันธ์ของตัวแปรดังต่อไปนี้คือ

$$KC = \frac{U_m}{f_s D} \tag{1.1}$$

โดยที่ $U_m$ = ความเร็วอนุภาคหมุนวนของคลื่นใกล้ท้องทะเล สภาวะไม่ถูกรบกวน

$f_s$ = ความถี่คลื่นนัยสำคัญ

$D$ = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม

ดังนั้นการศึกษานี้จึงกำหนดสภาพคลื่นตามความสัมพันธ์ในข้างต้น เพื่อให้ได้ค่า *KC* ต่างๆ โดยการทดลองได้เปลี่ยนแปลงค่า *KC* จำนวน 3 ค่า ทดลองร่วมกับค่าความเร็วกระแสน้ำค่าต่างๆ ในข้างต้น ซึ่งค่า *KC* ที่ใช้มีค่าประมาณ 14, 30 และ 42 ตามลำดับ

5) คลื่นที่สร้างขึ้นเพื่อการทดลองนี้เป็นคลื่นสม่ำเสมอ (regular waves) [ตัวอย่างข้อมูลการวิเคราะห์ลักษณะของคลื่นแสดงในภาคผนวก ง] เคลื่อนตัวไปทิศทางเดียวกันกับกระแสน้ำ และกระทำกับครอบหัวเข็มทางด้านแคบ เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องกำเนิดคลื่นและรางน้ำ

6) ค่าความเร็วอนุภาคหมุนวนสูงสุดของคลื่น ณ สภาวะที่ไม่ถูกรบกวน ($U_m$) และความเร็วกระแสน้ำสภาวะที่ไม่ถูกรบกวน ($U_c$) วัดค่าโดยใช้เครื่องมือวัดความเร็วการไหลแบบ 3 ทิศทางของ OSK รุ่น ACM 300-D วัดค่า ณ ตำแหน่ง *D/2* จากท้องน้ำ โดยที่ *D* คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม และวิเคราะห์ลักษณะชุดกลุ่มคลื่นและความเร็วอนุภาคหมุนวนของคลื่น (orbital & wave spectrum) [ตัวอย่างข้อมูลการวิเคราะห์ลักษณะของคลื่นแสดงในภาคผนวก ง] โดยโปรแกรมสเปกตรัม [อาทิตยา (1997)]

7) ค่าความเร็วการไหลเฉลี่ย (*V*) ที่ใช้ทดลองร่วมกับคลื่นวัดค่าโดยฝายสันคมรูปตัววี (V-notch weir) ท้ายรางน้ำ และบันทึกการเปลี่ยนแปลงความลึกหลุมกัดเซาะด้วยกล้องวีดีโอเพื่ออ่านค่าจากสเกลที่ติดไว้ที่เสาเข็มแต่ละต้น

8) การศึกษานี้ เป็นการศึกษาใน 2 มิติ (plane) โดยพิจารณาการเคลื่อนที่ในแนวราบแนวเดียวของคลื่นและกระแสน้ำ

**1.4 การดำเนินงานศึกษา**

การศึกษานี้ได้แบ่งขั้นตอนการศึกษาทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติ เพื่อให้ครอบคลุมขอบข่ายและวัตถุประสงค์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) ศึกษาทฤษฎี หลักการ และสมมุติฐานต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการกัดเซาะรอบตอม่อสะพานเนื่องจากคลื่นและกระแสน้ำ

2) รวบรวมข้อมูลผลการทดลอง และเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง ที่เคยมีมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน รวมถึงการทบทวนทฤษฎีการสร้างแบบจำลองทางวิศวกรรมชลศาสตร์ เพื่อนำมาใช้วางแผนการทดลองและเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ผลการศึกษาในการศึกษานี้

3) ศึกษาวิธีการใช้อุปกรณ์การทดลอง เครื่องมือต่างๆ รวมทั้งปรับปรุงเครื่องมือและวิธีการเก็บข้อมูลให้มีความเหมาะสม สะดวกต่อการใช้งาน และเพื่อให้ผลการทดลองเป็นไปอย่างถูกต้อง

4) ออกแบบการทดลองและสร้างแบบจำลอง

5) ทำการทดลองในแบบจำลองในกรณีต่างๆ

6) ปรับปรุงการทดลอง การเก็บข้อมูล และเครื่องมือที่ใช้ให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น

7) รวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดลองแล้วทำการวิเคราะห์ข้อมูล แสดงผลการวิเคราะห์ในรูปของสมการและรูปแสดงความสัมพันธ์

8) สรุปและวิจารณ์ผล

9) เสนอแนะหลักการที่ได้และการศึกษาต่อ

10) จัดทำรายงานวิทยานิพนธ์

**1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ**

1) เกิดความเข้าใจในกระบวนการ และแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมทางชลศาสตร์ของกลไกการกัดเซาะรอบตอม่อที่มีส่วนประกอบของโครงสร้างเป็นเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็มและได้มาซึ่งความสัมพันธ์ของคุณลักษณะต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกลไกการกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็ม เช่น คุณลักษณะของการไหลของน้ำ (flow characteristics), คุณลักษณะของคลื่น (wave characteristics) และคุณลักษณะของตอม่อ (pier characteristics)

2) ใช้เป็นเงื่อนไขเพิ่มเติมในการพิจารณาออกแบบโครงสร้างตอม่อของอาคารชลศาสตร์ต่างๆ เช่น โครงสร้างตอม่อสะพานในทะเล โครงสร้างตอม่อท่าเทียบเรือ และโครงสร้างตอม่ออาคารประภาคารในทะเล เป็นต้น ให้มีความคงทน ปลอดภัย และประหยัดค่าก่อสร้างยิ่งขึ้น

3) เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการศึกษาขั้นต่อไปในอนาคตของผู้สนใจ เช่น วิศวกรแหล่งน้ำ วิศวกรชายฝั่ง วิศวกรออกแบบสะพาน วิศวกรโครงสร้างทั่วไป วิศวกรสิ่งแวดล้อม เพื่อให้ได้มาซึ่งโครงสร้างที่มั่นคงแข็งแรง ประหยัด และมีผลกระทบต่อสภาพสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุดหรือไม่มีเลย

4) เพิ่มประสบการณ์ และเป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัย โดยใช้แบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์ สำหรับผู้ทำการวิจัยตลอดจนผู้ที่สนใจ และสามารถทำการวิเคราะห์และสรุปผลปัญหาทางชลศาสตร์การไหลที่ตั้งขึ้นอย่างเป็นระบบได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 2

# หลักการและการศึกษาที่ผ่านมา

ในการศึกษาปัญหาเรื่องการกัดเซาะรอบตอม่อเนื่องจากอิทธิพลของคลื่นและกระแสน้ำ จำเป็นต้องมีการจำลองสภาพของลักษณะทางชลศาสตร์และสมุทรศาสตร์ และโครงสร้างของตอม่อดังกล่าว ด้วยแบบจำลองทางกายภาพ เพื่อศึกษาเป็นกรณีเฉพาะ โดยอาศัยการศึกษาที่ผ่านมาเป็นแนวทาง ดังนั้นต้องเข้าใจในทฤษฎีพื้นฐานของกระบวนการเกิดการกัดเซาะและการกำหนดตัวแปรการศึกษาต่างๆ เพื่อที่จะสามารถนำไปสู่การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่อกระบวนการเกิดการกัดเซาะ ซึ่งจะใช้เป็นแนวทางในการศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้น ในบทนี้จึงได้สรุปหลักการ ทฤษฎี และตัวแปรในการศึกษาต่างๆที่เกี่ยวข้องดังกล่าวต่อไป

## 2.1 การกัดเซาะเฉพาะแห่ง (Local scour)

การกัดเซาะเฉพาะแห่ง (local scour) คือ การลดระดับของท้องน้ำบริเวณใกล้ส่วนของโครงสร้าง อันเนื่องมาจากการถูกกัดเซาะของวัสดุท้องน้ำ ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลโดยส่วนของโครงสร้าง สามารถแบ่งประเภทของการกัดเซาะเฉพาะแห่งโดยอาศัยปริมาณการเคลื่อนที่เข้าและออกจากหลุมกัดเซาะของวัสดุท้องน้ำได้

กระบวนการกัดเซาะสามารถอธิบายได้ตามหลักการคงมวลของสสาร (conservation of mass) ได้ตามสมการความสัมพันธ์ (2-1) และแสดงความสัมพันธ์ในรูป 2-1

$$Q_S = Q_{OUT} - Q_{IN} \qquad (2\text{-}1)$$

โดยที่ $Q_S$ คือ อัตราการทับถม/กัดเซาะ ของหลุมกัดเซาะ ในหน่วยของปริมาตรต่อเวลา

$Q_{OUT}$ คือ อัตราการพัดพาตะกอนออกจากหลุมกัดเซาะ ในหน่วยของปริมาตรต่อเวลา

$Q_{IN}$ คือ อัตราการพัดพาตะกอนลงในหลุมกัดเซาะ ในหน่วยของปริมาตรต่อเวลา

ดังนั้นสามารถแบ่งประเภทของการกัดเซาะเฉพาะแห่งได้ดังนี้

1) การกัดเซาะเนื่องจากสภาวะไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (clear-water scour, $Q_{OUT} > 0$ และ $Q_{IN} = 0$) ซึ่งจะเกิดเมื่อไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำทางด้านเหนือน้ำของส่วนของโครงสร้าง เนื่องจากความเร็วเฉือน (shear velocity, $U_*$) ของการไหล มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ ความเร็วเฉือนวิกฤติ (critical shear velocity, $U_{*c}$) ของวัสดุที่เป็นตะกอนท้องน้ำ ซึ่งเป็นความเร็วเริ่มต้นที่ทำให้วัสดุท้องน้ำเริ่มเคลื่อนที่ การกัดเซาะในกรณีนี้จะทำให้เกิดความลึกการกัด

เซาะสูงสุด เมื่อความเร็วเฉือนของการไหลไม่สามารถทำให้ตะกอนท้องน้ำเกิดการเคลื่อนที่ออกจากหลุมกัดเซาะได้อีก

2) การกัดเซาะเนื่องจากสภาวะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (live-bed scour, $Q_{OUT}$ > 0 และ $Q_{IN}$ > 0) เป็นการกัดเซาะโดยมีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำทางด้านเหนือน้ำเข้าสู่หลุมกัดเซาะ ความลึกหลุมกัดเซาะสมดุล (equilibrium scour depth) จะเกิดเมื่อปล่อยให้เกิดการกัดเซาะจนกระทั่งอัตราการพัดพาตะกอนออกจากหลุมกัดเซาะเท่ากับอัตราการพัดพาตะกอนเข้าหลุมกัดเซาะ (Raudkivi และ Sutherland, 1981)

โดยจากการศึกษาของ Raudkivi และ Sutherland ปี 1981 ปรากฏการณ์การกัดเซาะสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ

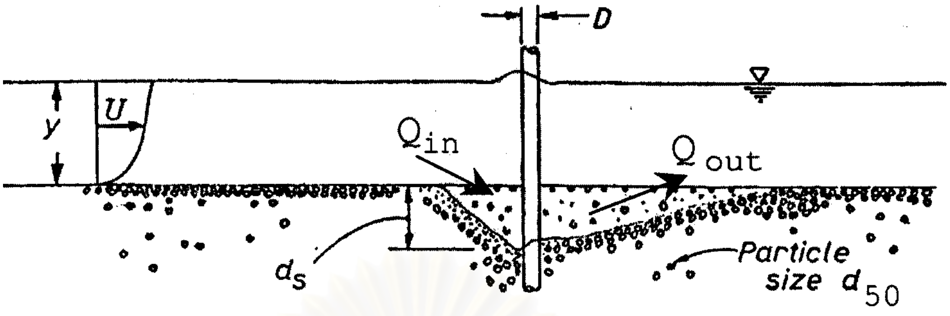
<u>ขั้นเริ่มแรก</u> (Initial Phase) จะปรากฏหลุมเล็กๆบนผิวราบเรียบของท้องน้ำ สามารถมองเห็นได้ชัดเจน และความลึกหลุมกัดเซาะจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

<u>ขั้นสมดุล</u> (Equilibrium Scour Depth) ในขั้นนี้ความลึกจะเข้าใกล้สภาวะสมดุลคือ มีการกัดเซาะที่มีการทับถมของเม็ดตะกอนเข้าสู่หลุมกัดเซาะ อัตราการกัดเซาะจึงลดลงและเข้าสู่สภาวะที่เกือบจะคงที่ ให้ค่าการกัดเซาะสูงสุดชั่วคราว

<u>ขั้นสูงสุด</u> (Maximum Scour Depth) หลุมกัดเซาะจะทรงตัวอยู่ในขั้นสภาวะสมดุลจนถึงเงื่อนไขหนึ่งจึงจะมีการกัดเซาะต่อ และถึงจุดความลึกกัดเซาะสูงสุดหรือเกิดเงื่อนไขที่ต้องยุติการกัดเซาะ ค่าความลึกสมดุลก็จะเป็นค่าความลึกการกัดเซาะสูงสุด

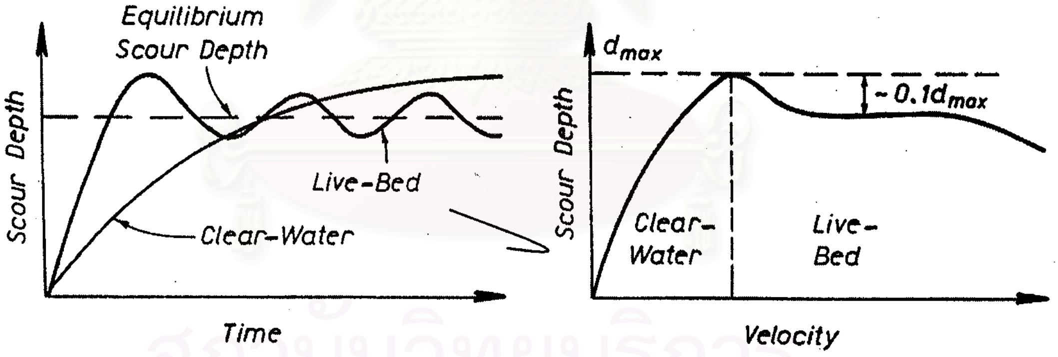
ในการอธิบายความลึกของหลุมกัดเซาะ (scour depth) สัมพันธ์กับเวลา (time) และความเร็วการไหล (velocity) จะแยกพิจารณาตามประเภทของการกัดเซาะ เนื่องจากความลึกหลุมกัดเซาะที่เกิดขึ้นแต่ละประเภทของการกัดเซาะมีความแตกต่างกัน ดังรูป 2-2 แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าว

เมื่อพิจารณาความลึกของหลุมกัดเซาะกับเวลา ในสภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ความลึกหลุมกัดเซาะจะค่อยๆเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเร็วเฉือนของการไหล ซึ่งทำให้ตะกอนท้องน้ำเกิดการเคลื่อนที่มีค่าน้อย และจะเกิดความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด เมื่อความเร็วเฉือนไม่สามารถทำให้ตะกอนท้องน้ำบริเวณหลุมการกัดเซาะเกิดการเคลื่อนที่ได้ ในส่วนของสภาวะมีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ความลึกหลุมกัดเซาะจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจาก




รูป 2-1 การพัดพาตะกอนเข้าและออกจากหลุมกัดเซาะ

โดย Raudkivi และ Sutherland (1981)




(a) (b)

รูป 2-2 ความลึกหลุมกัดเซาะสำหรับขนาดตอม่อและขนาดวัสดุท้องน้ำคงที่

(a) เป็นความสัมพันธ์กับเวลา และ(b) เป็นความสัมพันธ์กับความเร็วการไหล

โดย Raudkivi และ Sutherland (1981)

ความเร็วเฉือนของการไหลมีค่ามาก และในกรณีนี้จะมีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำเข้าสู่หลุมกัดเซาะด้วย ดังนั้นความลึกหลุมกัดเซาะจะเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกันไป โดยจะเกิดความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลเมื่ออัตราการพัดพาตะกอนเข้าสู่หลุมกัดเซาะเท่ากับอัตราการพัดพาตะกอนออกจากหลุมกัดเซาะ

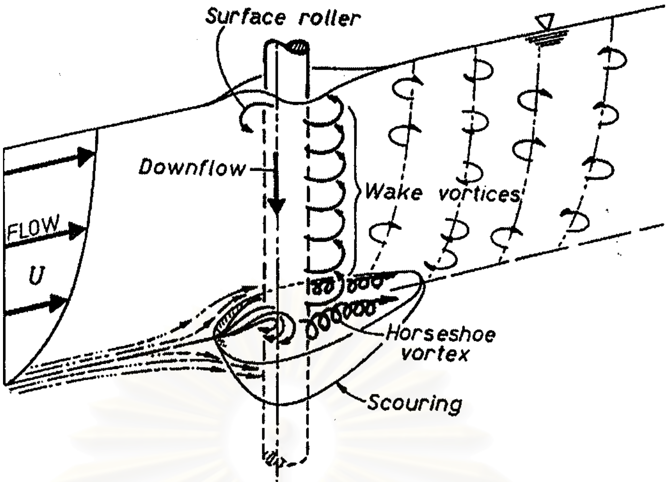
เมื่อพิจารณาความลึกหลุมกัดเซาะกับความเร็วการไหล ในสภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ความลึกหลุมกัดเซาะจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วการไหลเพิ่มขึ้น และความลึกหลุมกัดเซาะจะมากที่สุด เมื่อความเร็วการไหลเท่าความเร็วเฉือนวิกฤติ ในส่วนของสภาวะมีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ ความลึกของหลุมกัดเซาะจะน้อยลงเมื่อความเร็วการไหลเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำปริมาณมากขึ้น เข้าสู่หลุมกัดเซาะ (Raudkivi และ Sutherland, 1981)

## 2.2 กลศาสตร์การกัดเซาะ (Mechanics of scour)

การกัดเซาะรอบตอม่อสะพานเป็นผลมาจากการไหลหมุนวน (vortex system) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการไหลเกิดการหมุนวนรอบตอม่อ (surface roller) การไหลหมุนวนจะช่วยสนับสนุนให้เกิดการกัดเซาะ (scouring) ที่สันตอม่อด้านเหนือน้ำ เนื่องจากทิศทางการไหลจะพุ่งลงด้านล่าง (down flow) เมื่อกระทบกับผิวตอม่อ และเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดทิศทางการไหลวนกลับในแนวราบที่ท้องน้ำ วัสดุท้องน้ำจะเคลื่อนที่โดยการไหลกลิ้งวนภายในหลุมกัดเซาะและหมุนวนรอบด้านข้างตอม่อในแนวราบ โดยการไหลหมุนวนจะเป็นรูปเกือกม้า (horseshoe vortex) ดังแสดงในรูป 2-3

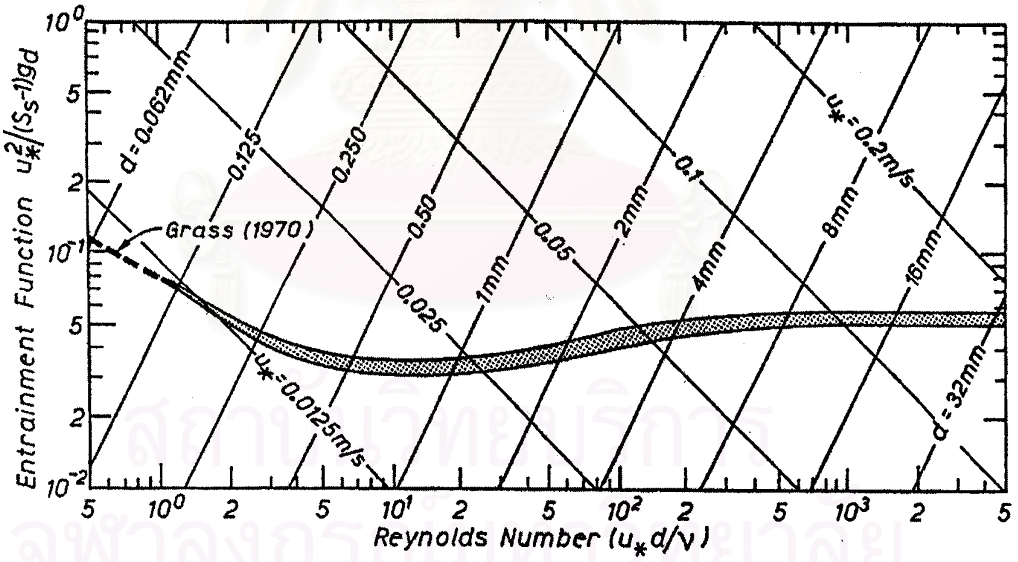
ความลึกการกัดเซาะสูงสุดของตอม่อสะพานจะเกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของสภาวะไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ และสภาวะมีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ เมื่อความเร็วเฉือนของการไหลบริเวณใกล้หลุมกัดเซาะเท่ากับความเร็วเฉือนวิกฤติของการเริ่มเคลื่อนที่ของวัสดุท้องน้ำ

รูป 2-4 แสดงความสัมพันธ์ของ Entrainment function กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของความเร็วเฉือน (Shear Reynolds Number) ซึ่งได้ทำการศึกษาโดย Shields (1936) จากรูปแบ่งการเคลื่อนตัวของตะกอนท้องน้ำเป็นสามส่วน คือ ส่วนที่อยู่เหนือเส้นทึบเป็นส่วนที่มีการเคลื่อนตัวของตะกอนท้องน้ำ ส่วนที่อยู่ใต้เส้นทึบเป็นส่วนที่ไม่มีการเคลื่อนตัวของตะกอนท้องน้ำ และบริเวณเส้นทึบคือส่วนที่วัสดุท้องน้ำกำลังจะเคลื่อนที่ (threshold of movement) โดยที่




รูป 2-3 การไหลผ่านตอม่อสะพานและการเกิดการไหลหมุนวน

โดย Raudkivi และ Sutherland (1981)




รูป 2-4 ความสัมพันธ์ของ Entrainment Function กับ Reynolds Number

ตามที่ Shields ได้ทำการศึกษาไว้โดย Raudkivi และ Sutherland (1981)

$$\text{Entrainment function} = \frac{U_*^2}{(S_S\text{-}1)gd} \tag{2-2}$$

$$\text{Shear Reynolds Number} = \frac{U_* d}{\nu} \tag{2-3}$$

เมื่อ $S_S$ คือ ความถ่วงจำเพาะของวัสดุท้องน้ำ

$g$ คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

$d$ คือ ขนาดเฉลี่ยของวัสดุท้องน้ำ

$\nu$ คือ ความหนืดจลน์ (kinematics viscosity) ของของไหล

$U_*$ คือ ความเร็วเฉือนของการไหล ซึ่งเท่ากับ $\sqrt{gS_f y_0}$

โดยที่ $S_f$ คือ ค่าความลาดชันของเส้นพลังงานการไหลของน้ำ

$y_0$ คือ ความลึกการไหล

## 2.3 แนวทางการศึกษา

สมมุติฐานเกี่ยวกับตัวแปรต่างๆที่คาดว่าเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเกิดปัญหาการกัดเซาะในประเด็นการศึกษานี้ ไม่ว่าจะเป็น คุณลักษณะของของไหล คุณลักษณะของวัสดุท้องน้ำ คุณลักษณะของคลื่นและกระแสน้ำ ตลอดจนคุณลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างฐานรากของอาคารชลศาสตร์ พบว่ายังไม่มีวิธีการหรือทฤษฎีที่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป ในการนำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาเรื่องการกัดเซาะที่เกิดขึ้นจากผลกระทบหรือความสัมพันธ์ของตัวแปรดังกล่าวข้างต้น เนื่องจากความสัมพันธ์กันของตัวแปรต่างๆทั้งหมดที่กล่าว มีความสัมพันธ์กันอย่างซับซ้อน ต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงการไหลที่ส่งผลต่อกลไกการกัดเซาะที่เกิดขึ้น ดังนั้นความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆเหล่านี้ จึงจำเป็นต้องมีวิธีการและขั้นตอนในการให้ได้มาซึ่งข้อมูล เพื่อนำมาทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดความง่ายและถูกต้องต่อการเข้าใจ และได้คำตอบจากปัญหา

ซึ่งในการศึกษาปัญหาเรื่องการกัดเซาะล้วนมีพื้นฐานมาจากการไหลของน้ำ หรือแรงที่กระทำโดยน้ำ การนำวิชาการทางชลศาสตร์มาช่วยวิเคราะห์แก้ไขปัญหา จะทำให้สามารถแก้ไขปัญหาได้ตรงจุดที่สุด โดยแนวทางที่ใช้ในการศึกษามี 2 แนวทางด้วยกันคือ การสังเกตและการวัดในภาคสนาม และการศึกษาโดยการใช้แบบจำลองชลศาสตร์ (hydraulic model) ไม่ว่าจะเป็นแบบจำลองทางกายภาพ (physical model) หรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) แม้ว่าในปัจจุบันมีความนิยมใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์กันมาก เนื่องจากความรวดเร็วในการแก้ปัญหา ประหยัดค่าใช้จ่าย และสามารถประยุกต์แบบจำลองคณิตศาสตร์กับพื้นที่ศึกษา

ต่างๆได้อย่างกว้างขวาง แต่อย่างไรก็ตามปัญหาเรื่องการกัดเซาะรอบตอม่อถือว่าเป็นปัญหาหนึ่งที่ยากจะอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์เนื่องจากความซับซ้อนของตัวแปรจำนวนมากที่มีความสัมพันธ์กันดังกล่าวในข้างต้น ดังนั้นวิธีการสังเกตและการวัดในภาคสนามน่าจะเป็นวิธีการศึกษาที่ให้ความถูกต้องของข้อมูลมากที่สุด แต่ข้อมูลบางอย่างก็ไม่สามารถเก็บได้ในภูมิประเทศจริง หรือถ้าเก็บได้ก็มีค่าใช้จ่ายสูงมาก และมีตัวแปรธรรมชาติอยู่มากจึงยากต่อการแปลความหมายข้อมูล ส่วนการศึกษาโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพที่มีขนาดเหมาะสม มักมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าและสามารถควบคุมและผันแปรตัวแปรได้อย่างเป็นระบบ ทำให้การแปลความหมายข้อมูลง่ายกว่าการศึกษาในภาคสนาม นอกจากนี้ยังสามารถที่จะจำลองสภาพตามธรรมชาติที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อย มาทำการศึกษาได้อีกด้วย

ดังนั้นจากสมมุติฐานเกี่ยวกับตัวแปรต่างๆ ที่คาดว่ามีผลต่อกระบวนการ การเกิดการกัดเซาะดังกล่าวในข้างต้น การศึกษานี้จึงได้เลือกใช้วิธีการและขั้นตอนในการหาคำตอบจากความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ โดยการใช้แบบจำลองทางกายภาพช่วยในการศึกษา และการพิจารณาความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรต่างๆภายใต้สมมุติฐานของการศึกษานี้ เพื่อนำมากำหนดขั้นตอนการศึกษา และการออกแบบแบบจำลองทางกายภาพ เพื่อใช้ในการทดลองการศึกษาตามเงื่อนไขที่กำหนด ได้แสดงรายละเอียดการกำหนดและการพิจารณากลุ่มตัวแปรต่างๆที่คาดว่าเกี่ยวข้องกับการศึกษานี้ ในหัวข้อต่อไป

## 2.4 การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ

ในการศึกษาเรื่องการกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็ม ภายใต้การกระทำของคลื่นและกระแสน้ำรวมกัน และเงื่อนไขการกัดเซาะภายใต้การไหลเริ่มต้นแบบคงที่ไม่มีตะกอนปน (steady clear-water scour conditions) พบว่าตัวแปรต่างๆที่คาดว่ามีอิทธิพลต่อการกัดเซาะมีดังนี้

1) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของของไหล (fluid characteristics)

- ความหนาแน่นของน้ำ (density of water, $\rho$)
- ความหนืดจลน์ของน้ำ (kinematics viscosity of water, $\nu$)
- ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก (acceleration due to gravity, $g$)

2) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของวัสดุท้องน้ำ (sediment characteristics)

- ขนาดเฉลี่ยของวัสดุท้องน้ำ (sediment size, $d_{50}$)
- ความหนาแน่นของวัสดุท้องน้ำ (density of the sediment, $\rho_s$)

- การกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ (size distribution)
- ลักษณะของวัสดุท้องน้ำ (grain form)
- แรงดึงดูดระหว่างวัสดุท้องน้ำ (cohesion of material)

3) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของคลื่นและกระแสน้ำ (flow characteristics)

- ความลึกการไหล (depth of approach flow, $y_0$)
- ความเร็วการไหลเฉลี่ย (mean velocity of undisturbed flow, $V$)
- ความเร็วกระแสน้ำที่ท้องน้ำ (undisturbed current velocity at bed, $U_C$)
- ความเร็วหมุนวนสูงสุดของอนุภาคน้ำที่ท้องน้ำ (maximum undisturbed orbital velocity at bed, $U_m$)
- ความถี่คลื่นนัยสำคัญ (significant wave frequency, $f_s$)
- ความสูงคลื่นนัยสำคัญ (significant wave height, $H_s$)
- ความลาดชันของเส้นพลังงานการไหล (energy slope, $S_f$)

4) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของตอม่อ (pier characteristic)

- รูปร่างตอม่อ (pier shape)
- ความหนาส่วนที่จมน้ำของครอบหัวเข็ม (thickness of submerge, $t_s$)
- เส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (pile diameter, $D$)
- รูปแบบการจัดกลุ่มเสาเข็ม (piles group characteristics)
- มุมปะทะกับทิศทางการไหล (pier angle of attack, $\alpha$)

และเพื่อเป็นการง่ายต่อการใช้แบบจำลองทางกายภาพ ในการวิเคราะห์ตัวแปรจำนวนมากตามที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น จึงได้ตั้งสมมุติฐานและข้อจำกัดดังนี้

1) วัสดุท้องน้ำ

วัสดุท้องน้ำที่ใช้เป็นทราย (non-cohesive) ขนาดเฉลี่ย $d_{50}$ สม่ำเสมอ

2) ตัวแปรการไหล

กำหนดความลึกการไหลในแบบจำลองให้มีค่าเท่ากันทุกๆอัตราการไหลและใช้วัสดุท้องน้ำมีขนาดคละเดียวกันตลอดการทดลอง ดังนั้นเพื่อก่อให้เกิดสภาวะการไหลเริ่มต้นเป็นแบบไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำจึงใช้วิธีปรับความลาดชันของรางน้ำตามค่าความเร็วการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละกรณีศึกษา

กำหนดลักษณะของคลื่นรวมอยู่ในกลุ่มตัวแปรไร้มิติ Keulegan–Carpenter number, $KC=U_m/f_sD$ ซึ่งมีค่า $KC$ ค่าต่างๆ ดังกล่าวในขอบเขตการศึกษา

3) คุณลักษณะของตอม่อ

กำหนดใช้รูปร่างตอม่อ ขนาดและรูปแบบเข็มกลุ่ม และมุมปะทะการไหล เหมือนกันทุกการทดลอง แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของตัวครอบหัวเข็ม สัมพัทธ์กับความลึกการไหล ดังนั้นจะเหลือตัวแปรที่นำมาใช้ในการพิจารณา ความสัมพันธ์ของตัวแปรดังนี้

- การไหล : $y_0$, $U_c$, $U_m$, $f_s$
- ตอม่อ : $t_s$, $D$

และจะได้ว่า ความลึกการกัดเซาะสูงสุด ($y_S$) ขึ้นกับตัวแปรดังต่อไปนี้

$$y_S = f\,(y_0, U_c, U_m, f_s, t_s, D) \qquad (2\text{-}4)$$

การกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็มเกี่ยวข้องกับหน่วยพื้นฐาน 3 หน่วย คือ มวล (mass), ความยาว (length) และเวลา (time) ดังนั้นตัวแปรอิสระทั้ง 6 ตัวในข้างต้น สามารถลดรูปเป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติได้ 3 กลุ่ม ตามทฤษฎีวิเคราะห์มิติ (dimensional analysis) โดยใช้ตัวแปร $D$, $U_m$ และ $y_0$ เป็นตัวแปรซ้ำ จะสามารถเขียนฟังก์ชันอธิบายความสัมพันธ์ความลึกการกัดเซาะในรูปกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (dimensionless parameter) ได้ดังนี้

$$\frac{y_s}{D} = \Phi\left[\frac{U_c}{(U_c + U_m)}, \frac{U_m}{f_s D}, \frac{t_s}{y_0}\right] \qquad (2\text{-}5)$$

ซึ่งกลุ่มตัวแปรเหล่านี้ใช้เป็นแนวทางในการอธิบาย ความสัมพันธ์ของรูปแบบหลุมกัดเซาะกับลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างตอม่อ พฤติกรรมการไหลของน้ำ และลักษณะของคลื่นน้ำที่ได้จากการทดลองโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ ในการศึกษานี้

## 2.5 การศึกษาที่ผ่านมา

จากความรุนแรงที่เกิดขึ้น เนื่องจากการวิบัติของอาคารชลศาสตร์หลายชนิด จึงได้เริ่มมีความสนใจจากนักวิจัยและหน่วยงานต่างๆ ดำเนินการศึกษาและวิจัยหาสาเหตุของการวิบัติ วิธีการป้องกัน และการออกแบบโครงสร้างที่สามารถรับกับปัญหาการกัดเซาะที่เกิดขึ้นได้ โดยพบว่า ได้มีการพัฒนาการศึกษาและวิจัยจากอดีตอย่างกว้างขวางและต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ดังเป็นที่ทราบกันแน่ชัดแล้วว่า พฤติกรรมชลศาสตร์ของคลื่น และกระแสน้ำ และพฤติกรรมการกัดเซาะรอบโครงสร้างตอม่อของอาคารชลศาสตร์ต่างๆ ภายใต้อิทธิพลของคลื่นและกระแสน้ำนั้นมีความสัมพันธ์กันอย่างๆสลับซับซ้อน ยากต่อการจำลองและวิเคราะห์โดยสมการทางคณิตศาสตร์

ล้วนๆนอกจากนี้ข้อมูลภาคสนามที่มีความสำคัญมากต่อการศึกษาก็มีอย่างจำกัดอันเนื่องมาจากความยากลำบากในการเก็บวัดข้อมูลและค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นผลการศึกษาที่ผ่านมาจึงมักอยู่บนพื้นฐานของการศึกษาจากแบบจำลองทางกายภาพในห้องปฏิบัติการ ดังปรากฏในรายงานการศึกษาของบุคคลต่าง ๆ เช่น Edie และ Herbich (1986), Salim และ Jones (1996 และ 1999), Jones และ Sheppard (1998), Sumer, et.al. (1992, 1993, 1997a, 1997b, 1998, 2000, และ 2001), Richardson (1987, 1993, 1995 และ 2001), Sheppard (1995 และ 2002), Bozkus, Z. and Yildiz, O. (2002) เป็นต้น และจะเห็นว่าการพัฒนาการศึกษาและวิจัยแบ่งตามความสนใจในแต่ละประเด็นของปัญหาแยกเป็น 3 ส่วนหลักๆ ได้ดังนี้

ในเบื้องต้นได้มีความสนใจศึกษาหาความสัมพันธ์ ระหว่างความลึกของหลุมการกัดเซาะกับลักษณะทางกายภาพของทางน้ำ ซึ่งได้มีการศึกษาและวิจัยทั้งการสำรวจเก็บข้อมูลในพื้นที่จริงและการทดลองใช้แบบจำลองในห้องปฏิบัติการ ดังเช่น การสำรวจโครงสร้างตอม่อสะพานที่ถูกกัดเซาะและขนาดของหลุมการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน ในประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อหาวิธีป้องกันต่อไป [Federal Highway Administration,FHWA (1988)], ผลการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับรูปตัดขวางของทางน้ำบริเวณสะพาน [Lacey (1929)], การคิดค้นและวิเคราะห์หาวิธีการและเครื่องมือใหม่ๆที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการสำรวจเก็บข้อมูลการกัดเซาะรอบตอม่อสะพานในประเทศญี่ปุ่น [Jiro Fukui และ Masahiro Otuka (1997, 2001)] เป็นต้น

และต่อมาได้มีผู้สนใจศึกษาปัญหาดังกล่าวในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความลึกหลุมกัดเซาะกับตัวแปรการไหลที่ซับซ้อนขึ้นเช่น ความลึกการไหล (Depth of flow), ค่าฟรูดนัมเบอร์ของการไหล (Froude number), ความเร็วการไหล (Flow velocity), และขนาดวัสดุท้องน้ำ, (Bed load) เพื่อใช้ในการพิจารณาออกแบบตอม่อสะพานให้มีความถูกต้อง เช่นการศึกษาความคงทนของชั้นกรวดป้องการกัดเซาะรอบตอม่อสะพานในแม่น้ำ [Chiew (2003)], การศึกษารูปแบบการไหลในหลุมกัดเซาะรอบตอม่อ [W.H.Graf (2001)], การศึกษาการกัดเซาะรอบตอม่อที่สภาวะการทดลอง ตะกอนท้องน้ำไม่มีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับตัวแปรการไหลต่างๆ [Sheppard (1999)] เป็นต้น

หลังจากมีการศึกษาในเรื่องต่างๆในข้างต้นเป็นจำนวนมาก ประกอบกับได้มีการพัฒนาในเรื่องของอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ให้มีความสัมพันธ์กับสภาพจริงตามธรรมชาติได้มากขึ้น ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาโดยใช้แบบจำลองกายภาพ เพื่อจำลองปัญหาในรูปแบบที่ซับซ้อนมากขึ้น โดยสนใจศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความลึกหลุมกัดเซาะกับลักษณะเฉพาะของโครงสร้างตอม่อ เช่น รูปร่างการออกแบบ ผิววัสดุตอม่อ ลักษณะแบบเดี่ยวหรือกลุ่ม การเรียงตัว การวางทำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มุมกับการไหล เป็นต้น เช่น การศึกษาผลของความเอียงของตอม่อสะพานต่อความลึกของหลุมการกัดเซาะ [Bozkus (2001)], การศึกษาการกัดเซาะเนื่องจากคลื่นของรูปแบบการจัดกลุ่มตอม่อในแนวดิ่งแบบต่างๆ [Sumer (1998)], การศึกษาผลของความขรุขระของผิวสะพานต่อความลึกของหลุมกัดเซาะ [เอกนันท์ (2001)], การกัดเซาะเนื่องจากส่วนประกอบต่างๆของตอม่อ [FHWA (2001)] เป็นต้น

สำหรับรายละเอียดการศึกษาและผลการศึกษาที่ได้ รวมทั้งผลการศึกษาของท่านอื่นๆ นอกเหนือจากที่กล่าวไว้ ได้รวบรวมและสรุปเรียงตามปีที่ศึกษาในตารางภาคผนวก ช

จากการทบทวนรายงานการศึกษาการกัดเซาะรอบโครงสร้างตอม่อของอาคารชลศาสตร์ทั้งหมดดังกล่าวในข้างต้น พบว่ามีรายงานการศึกษาบางส่วนที่มีประเด็นการศึกษาบางประการสอดคล้องกับการศึกษาการกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็ม ภายใต้การกระทำของคลื่นและกระแสน้ำรวมกัน ซึ่งเป็นประเด็นของการศึกษานี้ ดังนั้นจึงสามารถนำผลการศึกษาเหล่านี้ มาใช้เป็นแนวทางและประกอบการวิเคราะห์ร่วมกับผลการศึกษานี้ได้ โดยมีรายละเอียดที่สรุปไว้แต่ละผลการศึกษาดังต่อไปนี้

**Jones และ Sheppard, 1998 อ้างถึงใน Richardson et al. (FHWA,1993 และ1995)**

ทำการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับลักษณะ เฉพาะของโครงสร้างตอม่อ ภายใต้การกระทำของกระแสน้ำอย่างเดียวพอสรุปสาระสำคัญต่างๆ ได้ดังนี้คือ พฤติกรรมการกัดเซาะรอบเสาเข็มฐานรากตอม่อสะพาน ในกรณีที่ฐานรากสะพานมีส่วนประกอบต่างๆซึ่งประกอบไปด้วย ตอม่อ (pier stem) ครอบหัวเข็ม (pile cap) และเสาเข็มกลุ่ม (pile group) ดังแสดงในรูป 2-5 และรูปแสดงการกัดเซาะภายใต้อิทธิพลของส่วนประกอบต่างๆของโครงสร้างตอม่อตามสมการ (2-6) ดังแสดงในภาคผนวก (ฉ-1) สามารถประเมินค่าความลึกของหลุมกัดเซาะได้โดย ค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่เกิดขึ้นจะประกอบไปด้วยความลึกของหลุมกัดเซาะที่เกิดจาก ตอม่อ, ครอบหัวเข็ม และเสาเข็มกลุ่ม รวมกัน ดังสมการ

$$y_S = y_{Spier} + y_{Spc} + y_{Spg} \qquad (2\text{-}6)$$

โดยที่ $y_S$ หมายถึง ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด

$y_{Spier}$ หมายถึง ความลึกหลุมกัดเซาะเนื่องจากตอม่อส่วนที่จมน้ำ

$y_{Spc}$ หมายถึง ความลึกหลุมกัดเซาะเนื่องจากตัวครอบหัวเข็ม และ

$y_{Spg}$ หมายถึง ความลึกหลุมกัดเซาะเนื่องจากเสาเข็มกลุ่ม

ซึ่งสิ่งที่มีอิทธิพลต่อความลึกหลุมกัดเซาะจากตอม่อ, ครอบหัวเข็ม และเสาเข็มกลุ่มคือ ความกว้างของตอม่อ, ความหนาของตัวครอบหัวเข็ม, ระยะห่าง มุมปะทะการไหล และความยาวในน้ำของเสาเข็ม ตามลำดับ ดังเช่น ปรากฏในรายงานการศึกษาของ Richardson et al. [FHWA (1993,1995)] จากนั้น Richardson (2001) ได้พัฒนาการศึกษาต่อเนื่องจนสามารถสรุปได้สมการความสัมพันธ์เพื่อใช้ในการประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะได้ดังผลการศึกษาต่อไป

Richardson, 2001[FHWA (HEC-18)]

ศึกษาเพื่อทำนายความลึกหลุมกัดเซาะ ภายใต้การกระทำของกระแสน้ำ โดยทำการทดลองโดยใช้แบบจำลอง กรณีวัสดุท้องน้ำเป็นทราย ได้ความสัมพันธ์เป็นสมการเพื่อประมาณความลึกหลุมกัดเซาะซึ่งเรียกว่าสมการ HEC-18 equation โดยมีรูปสมการหลักดังนี้

$$\frac{y_S}{y} = 2.0K_1K_2K_3K_4\left[\frac{a}{y}\right]^{0.65} Fr^{0.43} \qquad (2\text{-}7)$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| โดยที่ | $y_s$ | = | ความลึกกัดเซาะสูงสุด |
| | $y$ | = | ความลึกการไหล |
| | $a$ | = | ขนาดความกว้างปะทะการไหลของตอม่อ |
| | $K_1$ | = | ค่าปรับแก้เนื่องจากรูปแบบของตอม่อ (แสดงในภาคผนวก ฉ) |
| | $K_2$ | = | ค่าปรับแก้เนื่องจากมุมปะทะการไหล (แสดงในภาคผนวก ฉ) |
| | $K_3$ | = | ค่าปรับแก้เนื่องจากเงื่อนไขสภาพท้องน้ำ (แสดงในภาคผนวก ฉ) |
| | $K_4$ | = | ค่าปรับแก้เนื่องจากการเกิดชั้นเกราะโดยขนาดวัสดุท้องน้ำ |
| | $Fr$ | = | ค่าฟรูดนัมเบอร์การไหล |

ซึ่งจากรูปสมการหลักดังกล่าวสามารถปรับเปลี่ยนตามเงื่อนไขการกัดเซาะแยกเป็นส่วนประกอบของแต่ละโครงสร้างฐานราก ซึ่งจะมีค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ต่างๆที่แตกต่างกันออกไป แต่ยังคงรูปสมการหลักเดิมไว้ ซึ่งสมการในการประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะแยกคำนวณในแต่ละส่วนประกอบโครงสร้างฐานราก ดังการศึกษาของ Jones และ Sheppard (1998) ในข้างต้นได้แสดงรายละเอียดการคำนวณและค่าปรับแก้ต่างๆที่ได้จากการศึกษา ในภาคผนวก ฉ และ ช

Sumer **และ** Fredsoe, 1992b

ทำการศึกษาเรื่อง การกัดเซาะรอบตอม่อทรงกระบอกตั้งตรงภายใต้คลื่น โดยทดลองในแบบจำลองรางคลื่น ใช้ทรายขนาด $d_{50}$ เท่ากับ 0.18 มม. และใช้ขนาดตอม่อตามการปรับค่า *KC*

จากการศึกษาพบว่า ค่า *KC* มีอิทธิพลต่อความลึกการกัดเซาะเป็นสำคัญ และเกิดการกัดเซาะที่ค่า *KC* มากกว่า 6 และมีค่าความลึกสูงสุดประมาณ 1.3*D* ที่ค่า *KC* ประมาณ 300 ซึ่งถือว่าเป็นสภาวะการกัดเซาะจากคลื่นที่คล้ายการกระทำของกระแสน้ำ ซึ่งผลการศึกษานี้ได้สมการความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะกับค่า *KC* ในรูปของฟังชันก์เอกซ์โปเนนเชียลดังรูป 2-6 และมีสมการดังนี้

$$\frac{y_s}{D} = 1.3\{1\text{-exp } [-0.03(KC\text{-}6)]\} \tag{2-8}$$

ซึ่งสรุปสาระสำคัญต่าง ๆ ได้ดังนี้คือ พฤติกรรมการกัดเซาะรอบเสาเข็มโครงสร้างฐานรากเป็นปรากฏการณ์เฉพาะที่ จะขึ้นกับขนาดของเสาเข็ม (*D*) และลักษณะของคลื่น โดยลักษณะของคลื่นได้รวมอยู่ในกลุ่มตัวแปรไร้มิติ Keulegan – Carpenter number (*KC*) ซึ่งก็คืออัตราส่วนของผลคูณ ค่าความเร็วสูงสุดของอนุภาคน้ำหมุนวนที่ท้องน้ำของคลื่น ($U_m$) กับคาบคลื่น (wave period, *T*) ต่อ เส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม (*D*) ดังนี้

$$KC = \frac{U_m T}{D} \tag{2-9}$$

ผลการศึกษาพบว่าความลึกสูงสุดของหลุมกัดเซาะจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามค่า *KC* ที่เพิ่มขึ้น และจะมีค่าสูงสุดที่ค่า *KC* เข้าใกล้ $\infty$ นั่นคือ ลักษณะของคลื่นจะเปลี่ยนไปสู่รูปแบบของกระแสน้ำ (steady current) ซึ่งในผลการศึกษาที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่า ค่าความลึกหลุมกัดเซาะล่าสุดภายใต้คลื่นที่มีคุณลักษณะคล้ายเป็นกระแสน้ำ สำหรับเสาเข็มทรงกระบอกวงกลมนั้นมีค่าประมาณ 1.3 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม และจะมีค่าลดลงตามค่า *KC* ที่ลดลง สัมพันธ์กันตามสมการ (2-8) และหลังจากนั้นก็ได้ศึกษาต่อเนื่องในเรื่องเดียวกัน แต่พิจารณาที่โครงสร้างฐานรากเป็นแบบเสาเข็มกลุ่มที่มีลักษณะต่างๆ กัน ดังผลการศึกษาต่อไป

Sumer และFredsoe, 1998

ทำการศึกษาการกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มแบบต่างๆในแนวตั้งตรงเนื่องจากการกระทำของคลื่น โดยทดลองภายใต้เงื่อนไขการกระทำของคลื่นขนาดต่างๆต่อเสาเข็มกลุ่มซึ่งมีการจัดเรียงกลุ่มรูปแบบต่างๆกันออกไป ผลการทดลองพบว่า ค่าความลึกการกัดเซาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า *KC* และกรณีเสาเข็มกลุ่มพบว่า การจัดกลุ่มที่มี spacing น้อยๆ จะเกิดการกัดเซาะได้มากกว่า โดยพฤติกรรมจะคล้ายกรณีเป็นเสาเข็มเดี่ยวขนาดใหญ่ นั่นคือความลึกของหลุมกัดเซาะสูงสุดที่สภาวะของคลื่นคล้ายเป็น steady current จะมีค่าประมาณ 4.5 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็มที่ค่า *KC* ประมาณ 300 ดังรูป 2-6 และมีค่าลดลงตามค่า *KC* ตามสมการความสัมพันธ์

(2-8) ดังเช่นผลการศึกษาเสาเข็มเดี่ยวของ Sumer และ Fredsoe (1992b) ดังนั้นจึงพอสรุปเบื้องต้นได้ว่า ขนาดความลึกของหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มฐานรากตอม่อที่วางเป็นกลุ่มนั้น จะขึ้นกับลักษณะการวางระยะห่างระหว่างเสาเข็ม ขนาดของเสาเข็ม และลักษณะของคลื่น

จากผลการศึกษาอีกประการหนึ่งก็พบว่า กรณีที่ระยะห่างระหว่างเสาเข็มในกรณีเสาเข็มกลุ่ม มีค่ามากกว่า 2 ขึ้นไป จะให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่า เท่ากับกรณีของเสาเข็มเดี่ยวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มเท่ากัน

Sumer และ Fredsoe, 2001

ศึกษาเรื่องการกัดเซาะรอบตอม่อรูปทรงกระบอกเนื่องจากการกระทำของคลื่นและกระแสน้ำรวมกัน ทำการทดลองโดยการจำลองคลื่นแบบ irregular waves ในแอ่งคลื่น โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 กรณี คือ 1.กรณีทิศทางของคลื่นตามกระแสน้ำ และ 2. กรณีทิศทางของคลื่นตั้งฉากกับกระแสน้ำ ได้นำเสนอรูปแสดง ค่าความลึกหลุมกัดเซาะสัมพันธ์กับฟังก์ชัน

$$U_{cw} = \left[\frac{U_c}{(U_c + U_m)}\right] \tag{2-10}$$

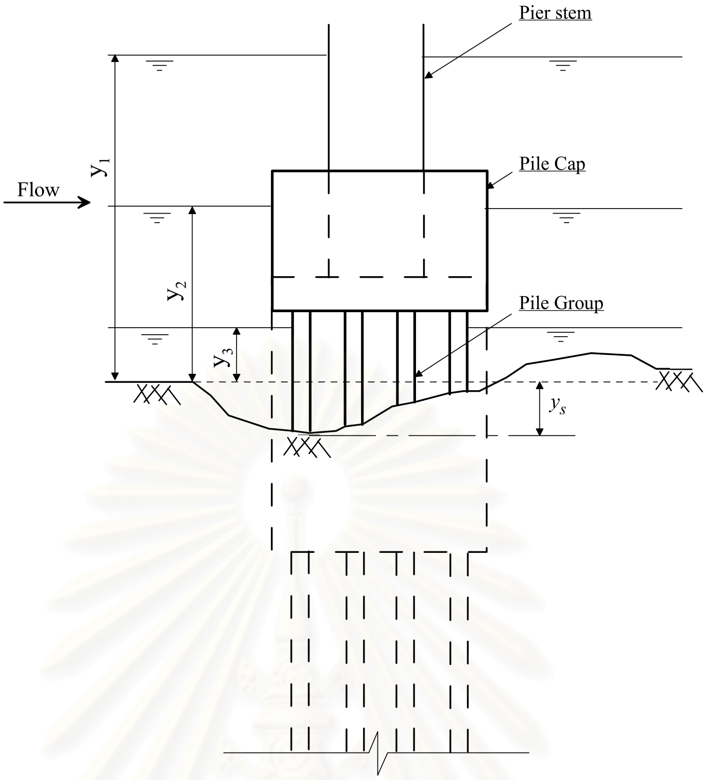
โดยที่ $U_c$ = undisturbed current velocity at bed และ

$U_m$ = maximum undisturbed orbital velocity at bed

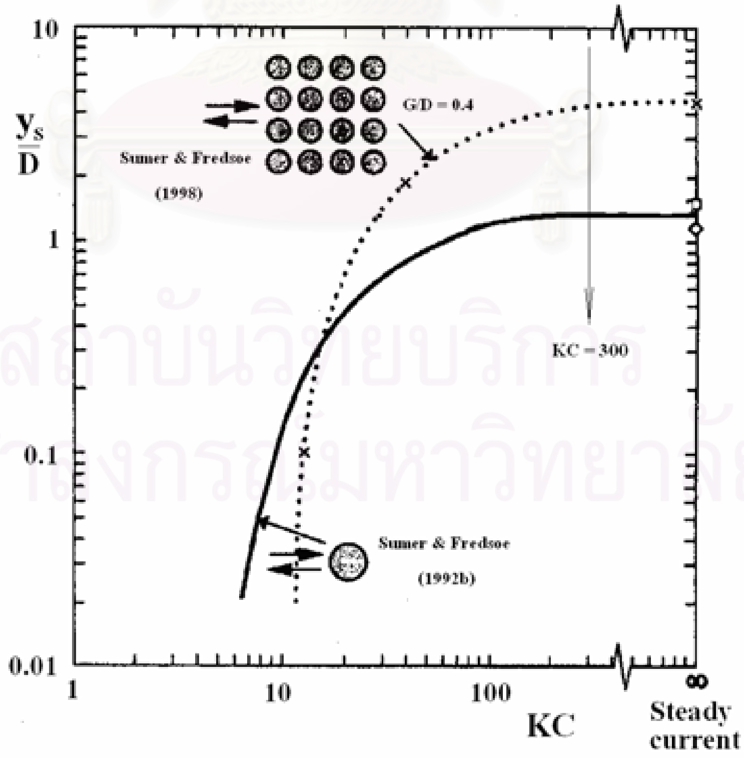
และสัมพันธ์กับค่า $KC$ ตามความสัมพันธ์ของตัวแปรคุณลักษณะของคลื่นดังนี้

$$KC = \frac{U_m T}{D} \tag{2-11}$$

จากผลการทดลอง เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่ค่า $KC$ เดียวกัน พบว่าที่ค่า $U_{cw}$ ต่ำๆ อิทธิพลของคลื่นค่อนข้างมีนัยสำคัญต่อค่าความลึกหลุมกัดเซาะ ซึ่งจากผลการศึกษาจะเห็นอัตราการเพิ่มความลึกหลุมกัดเซาะค่อนข้างชัดเชน และที่ค่า $U_{cw}$ เพิ่มขึ้นคลื่นจะมีอิทธิพลต่ออัตราการเพิ่มความลึกหลุมกัดเซาะแบบค่อยๆลดลงที่ค่า $U_{cw}$ สูงขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นที่ค่า $U_{cw}$ โดยประมาณตั้งแต่ 0.7 ขึ้นไป (โดยรายละเอียดของผลการศึกษาบางส่วนดังปรากฏในบทการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองจากการศึกษานี้ต่อไป)




รูป 2-5 รูปแบบโครงสร้างตอม่อสะพาน แสดงส่วนประกอบต่างๆ




รูป 2-6 ความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด กับค่า *KC* โดย Sumer (1992b,1998)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 3

# แบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์และการทดลอง

จากความซับซ้อนของปัญหา ที่มีความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆจำนวนมากดังกล่าวไว้ในบทที่ 2 และได้เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ปัญหาโดยการใช้แบบจำลองทางกายภาพ ดังนั้นในการศึกษาโดยวิธีการดังกล่าว จึงจำเป็นต้องทำการออกแบบการทดลอง ให้มีความเหมาะสมกับลักษณะของปัญหา ไม่ว่าจะเป็นรูปแบบของแบบจำลอง เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ ตลอดจนมีขั้นตอนการทดลองที่เหมาะสม ก่อนการเริ่มปฏิบัติงานจริง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการปฏิบัติงานและลดปัญหาที่อาจเกิดขึ้นขณะการปฏิบัติงานลงได้ ซึ่งการศึกษานี้ มีการออกแบบการทดลองในส่วนต่างๆ รวมทั้งขั้นตอนในการศึกษาดังกล่าวต่อไป

## 3.1 แบบจำลองชลศาสตร์

การศึกษานี้ใช้แบบจำลองชลศาสตร์กระแสน้ำและคลื่นในการศึกษาการกัดเซาะบริเวณรอบๆ เสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็ม ภายใต้การกระทำของกระแสน้ำและคลื่นร่วมกัน โดยแบบจำลองนี้ได้ออกแบบสร้างและดำเนินการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการแบบจำลองชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ของภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีรายละเอียดของแบบจำลองดังนี้คือ

1) แบบจำลองกระแสน้ำและคลื่น (wave and current open channel) เพื่อจำลองการไหลในรางน้ำเปิด หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 0.60 ม. ยาว 18 ม. สูง 0.75 ม. ผนังเป็นกระจกใสหนา 1.20 ซม. พื้นรางเป็นเหล็กหนา 6 มม. ยกระดับท้องรางด้วยวัสดุไม่มีการกัดเซาะ (rigid bed or false floor) โดยปูด้วยแผ่นอะคิลิกส์ยาวตลอดรางน้ำเปิด ยกเว้นส่วนที่ทำการศึกษาการกัดเซาะในช่วงตอนกลางของรางน้ำ สภาพท้องน้ำเป็นทรายละเอียดขนาดเฉลี่ย 0.25 มม. [ทำการวิเคราะห์การกระจายขนาดโดย ปิยะฉัตร เลิศอมรพงษ์ (2002) แสดงในภาคผนวก ข] ปูยาว 3 ม. ในระนาบเดียวกับพื้นวัสดุที่ไม่มีการกัดเซาะ ความลาดเอียงของท้องรางน้ำสามารถปรับได้โดยใช้แม่แรงยกซึ่งหมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ที่ด้านต้นน้ำติดตั้งเครื่องกำเนิดคลื่นและตะแกรงสลายพลังงานคลื่น ยกระดับน้ำด้วยบานระบายน้ำล้นที่ด้านท้ายรางน้ำ ดังรูป 3-1 และแสดงส่วนประกอบต่างๆของแบบจำลองพร้อมภาพประกอบโดยละเอียดในภาคผนวก ก-1

2) แบบจำลองตอม่อ (pier model) รูปแบบของแบบจำลองตอม่อในการจำลองการศึกษานี้ ได้กำหนดให้มีลักษณะเป็นตอม่อแบบที่ประกอบด้วยโครงสร้าง 2 ส่วนจมน้ำ คือ เสาเข็มกลุ่ม (pile group) แบบ 3X4 ทรงกระบอกตั้งตรงในแนวดิ่ง ขนาด 14.0 มม. ระยะห่างระหว่างเสาเข็มเป็น 3 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม ซึ่งเท่ากับ 42 มม. และครอบหัวเข็ม (pile cap) ขนาดกว้าง 122.0 มม. ยาว 166.0 มม. โดยมีอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกของน้ำ อยู่ในช่วง 0.2 – 1.0 ขนาดและรายละเอียดต่างๆของแบบจำลองแสดงไว้ในภาคผนวก ก-2

3) เครื่องกำเนิดคลื่น (wave generator) ที่ใช้ในแบบจำลองเป็นแบบกระดานพัดน้ำ (paddle type) ด้านบนของกระดานต่อกับส่วนขับเคลื่อน ซึ่งเคลื่อนกลับไป – มา ได้ตามระยะช่วงชัก (stroke) โดยความเร็วการเคลื่อนที่ขึ้นกับความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนได้ จึงสามารถสร้างคลื่นที่มีความสูงและคาบคลื่นได้แตกต่างกัน ส่วนประกอบต่างๆพร้อมภาพประกอบโดยละเอียดแสดงในภาคผนวก ก-3

## 3.2 อุปกรณ์วัดและเก็บบันทึกข้อมูลการทดลอง

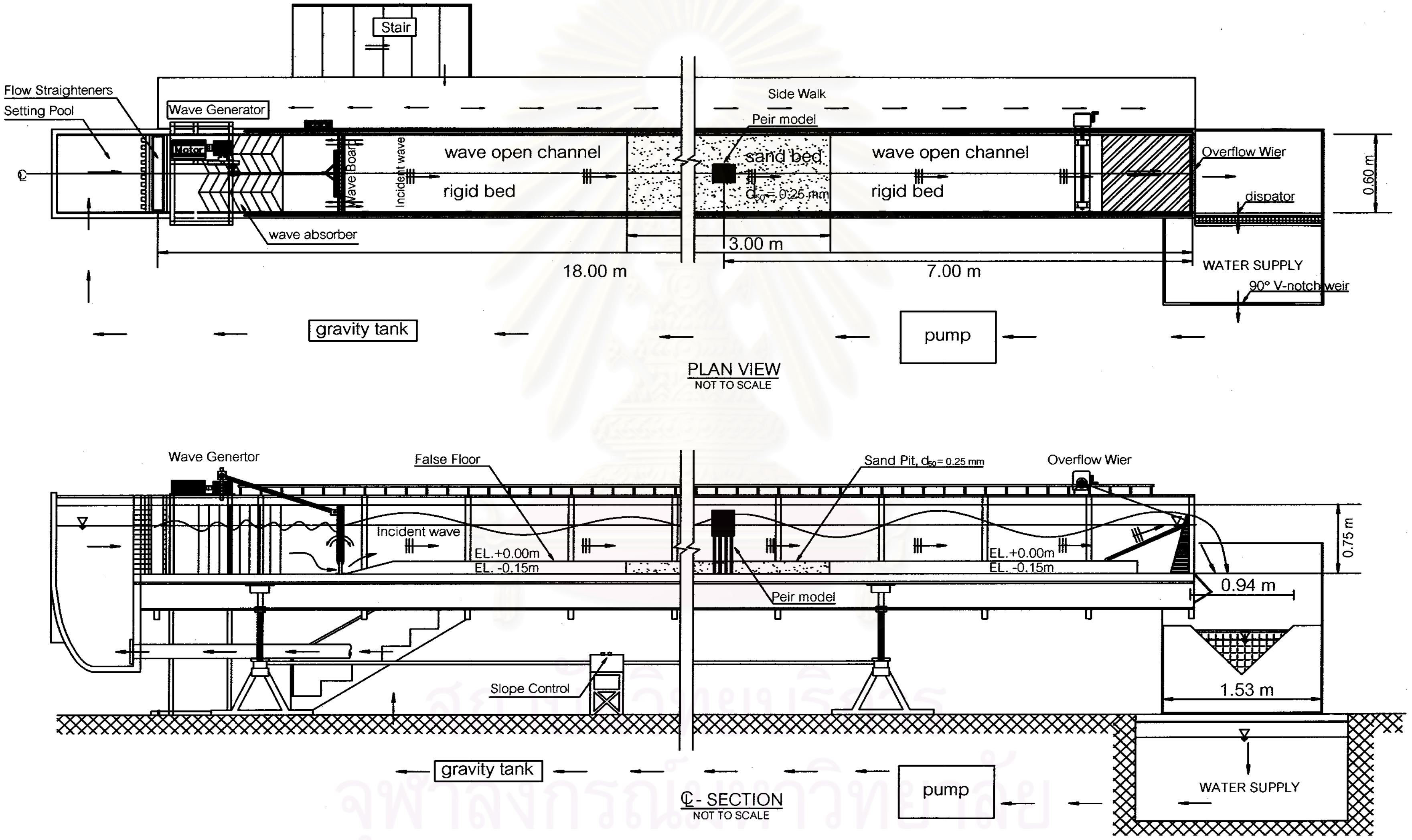
ในการศึกษานี้ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด เก็บบันทึกข้อมูล และประมวลผลข้อมูล ประกอบด้วย

1) เครื่องมือวัดระดับ (point gauge) ติดตั้งบนรางเลื่อนลูกล้อวิ่งบนรางน้ำเปิด เพื่อใช้วัดระดับท้องน้ำและผิวน้ำ ณ ตำแหน่งพื้นที่การทดลองที่ต้องการ

2) เครื่องวัดกระแสน้ำ (current meter) ติดตั้งบนรางเลื่อนลูกล้อวิ่งบนรางน้ำเปิด เพื่อใช้วัดความเร็วกระแสน้ำ และความเร็วอนุภาคหมุนวนของคลื่นที่ผ่านจุดตรวจวัด ทำการสอบเทียบเครื่องวัดกระแสน้ำโดย ปิยะ กุณาศล (2004) แสดงในภาคผนวก ค-1

3) เครื่องวัดความสูงคลื่น (wave height meter) ติดตั้งในรางคลื่นเพื่อวัดคลื่นที่ผ่านจุดตรวจวัด ทำการสอบเทียบเครื่องวัดความสูงคลื่นโดย ปิยะ กุณาศล (2004) แสดงในภาคผนวก ค-2

4) ฝายสามเหลี่ยมสันคม (90° V-notch weir) ติดตั้งที่ด้านท้ายน้ำของรางน้ำ เพื่อใช้วัดอัตราการไหลของน้ำ โดยการอ่านค่าระดับเหนือสันฝาย ($H$) และนำไปคำนวณอัตราการไหลจากสมการ $Q = 0.045H^{2.1}$ โดยที่ $Q$ คือ อัตราการไหลในหน่วยลิตรต่อวินาที




รูป 3-1 รายละเอียดแบบจำลองชลศาสตร์กระแสน้ำและคลื่น

H คือความสูงของน้ำเหนือสันฝายในหน่วยเซนติเมตร ซึ่งแสดงการสอบเทียบค่าในภาคผนวก ค-3

5) รางติดล้อเลื่อน ใช้สำหรับติดตั้งเครื่องมือวัดต่างๆ

6) แผงวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล รุ่น PCI-6024E ใช้รวมกับแผงวงจรรวมสัญญาณแบบสกรู รุ่น CB-68LP และสายต่อ รุ่น R6868 ของบริษัท National Instruments

7) อุปกรณ์รับสัญญาณอนาล็อกของเครื่องมือวัดระดับน้ำและความสูงคลื่น

8) คอมพิวเตอร์ Desktop “AMD Duron(tm) Processor” และโปรแกรม “LabVIEW” ใช้เก็บข้อมูลจากเครื่องวัดกระแสน้ำ และเครื่องวัดความสูงคลื่น

9) กล้องถ่ายรูป กล้องวีดีโอและเครื่องบันทึกภาพ ใช้บันทึกภาพพฤติกรรมการไหล และกลไกการเกิดการกัดเซาะรอบแบบจำลองตอม่อ ติดตั้งที่ด้านข้างและด้านบนของรางน้ำเปิด

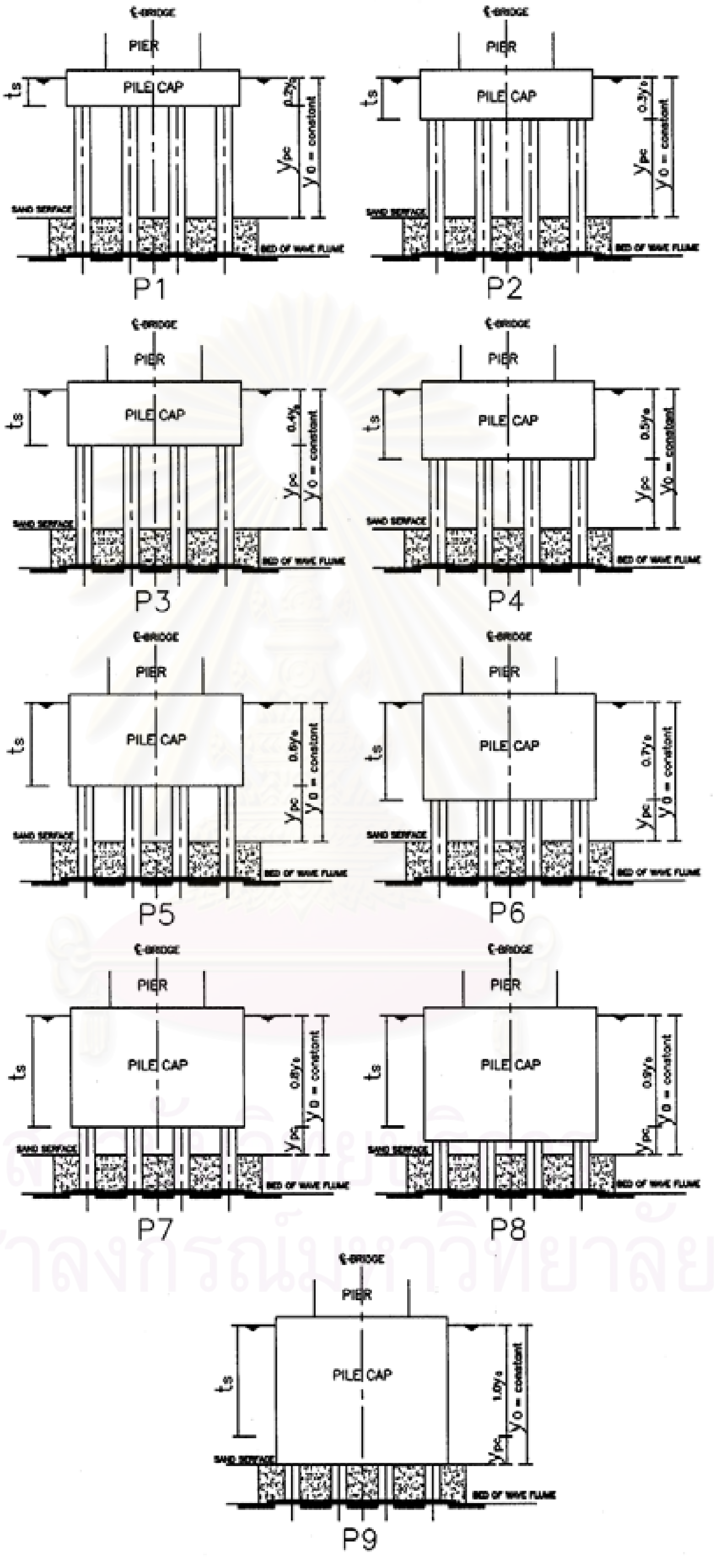
สำหรับรายละเอียด รูปเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองดังกล่าวไว้ในข้างต้นแสดงไว้ในภาคผนวก ก-4 และรายละเอียดเกี่ยวกับการใช้วงจรแปลงสัญญาณ และโปรแกรม “LabVIEW” รวบรวมไว้โดย ปิยะ กุณาศล (2004)

### 3.3 การออกแบบการทดลอง

1) แบบจำลองตอม่อ (pier model)

รูปแบบของแบบจำลองตอม่อในการจำลองการศึกษานี้ ทุกกรณีศึกษาจะมีรูปร่างและขนาดของแบบจำลองตอม่อเท่ากัน ขนาดและรายละเอียดต่างๆของแบบจำลองแสดงไว้ในภาคผนวก ก-2 แต่จะแตกต่างกันที่ขนาดอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกของน้ำ ($t_s/y_0$) ดังรูป 3-2 รวมแบบจำลองตอม่อที่ใช้ทดลองทุกกรณีศึกษาทั้งหมด 9 ตัว ดังนี้

| ตอม่อตัวที่ | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $t_s/y_0$ | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 |




รูป 3-2 แบบรายละเอียดของแบบจำลองตอม่อ กรณีศึกษา P1-P9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) สภาพการไหลของน้ำ

ในการศึกษานี้ได้กำหนดเงื่อนไขสภาพการไหลของน้ำเริ่มต้นในสภาวะสมดุลของน้ำที่ไม่มีตะกอนปน (clear-water) ซึ่งต้องทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การไหลในรางน้ำเปิดด้วยสภาวะที่ตะกอนเริ่มมีการเคลื่อนที่ ในการศึกษานี้ได้ใช้ไดอะแกรมของชิลด์ (Shield's diagram) เป็นแนวทางในการกำหนดเงื่อนไขดังกล่าวเบื้องต้น โดยพารามิเตอร์การไหลที่สำคัญคือ หน่วยแรงเฉือนวิกฤต ($\tau_o$) และขนาดเฉลี่ยของตะกอนท้องน้ำ ($d_{50}$) ซึ่งความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองต้องอยู่บนเส้นกราฟของ Shield's diagram กล่าวได้ว่า ความเร็วการไหล ($V$) ความลึกการไหล ($y_0$) และความลาดชันพลังงานการไหล ($S_f$) ต้องสัมพันธ์กันเพื่อให้ได้ค่า $\tau_o$ กับ $d_{50}$ อยู่บนเส้นกราฟของ Shield's diagram จึงเป็นสภาวะที่ตะกอนขนาดใด ๆ เริ่มมีการเคลื่อนที่

ตัวอย่างการคำนวณเพื่อหาสภาพการเริ่มต้นเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ (initiation of sediment motion) ในการทดลองนี้ ภายใต้ขอบเขตการศึกษาที่กำหนดใช้วัสดุท้องน้ำเป็นทรายขนาดสม่ำเสมอเท่ากับ 0.25 มม. ความเร็วการไหลเฉลี่ยจำนวน 3 ค่าคือ 5, 10 และ 15 ซม./วินาที และความลึกการไหล ณ ตำแหน่งหน้าตัดการไหลที่ติดตั้งแบบจำลองตอม่อสะพานเท่ากับ 30 ซม. ดังแสดงรายละเอียดการคำนวณไว้ในภาคผนวก ข-1

3) สภาพคลื่นในการทดลอง

การกำหนดคุณลักษณะของคลื่นที่ใช้ทดลอง ได้ทำการกำหนดคลื่นที่ใช้ในการทดลอง 3 ขนาด เพื่อนำคุณลักษณะของคลื่นที่ได้แต่ละขนาดมาทำการคำนวณหาค่า Keulegan-Carpenter number (*KC*) จะได้ค่า *KC* ของคลื่นแต่ละขนาดแตกต่างกัน 3 ค่า ซึ่งจากการศึกษานี้ได้กำหนดใช้ค่าประมาณ 14, 30 และ 42 ตามลำดับ โดยทดลองคลื่นที่ได้ค่า *KC* จำนวน 3 ค่าร่วมกับค่าความเร็วกระแสน้ำค่าต่างๆในข้างต้น ซึ่งในการศึกษานี้กำหนดขนาดของคลื่นและกระแสน้ำที่ใช้ในการทดลองเพียงอย่างละ 3 ค่า เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านเวลาที่ใช้ในการทดลอง ในแต่ละกรณีศึกษา จะใช้เวลาค่อนข้างนานมาก (รายละเอียดคุณลักษณะของคลื่นที่ใช้ในการทดลองตามค่า *KC* ต่างๆ แสดงไว้ในภาคผนวก ข-2)

จากรายละเอียดการออกแบบการทดลองทั้งหมดในข้างต้นสามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

<u>ส่วนที่</u> 1 : ให้ความเร็วการไหลคงที่ ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดคลื่นที่ได้ค่า *KC* ตามที่กำหนด 3 ค่า ทดลองกับแบบจำลองตอม่อทั้ง 9 กรณี

<u>ส่วนที่</u> 2 : ให้ขนาดคลื่นที่ได้ค่า *KC* ตามที่กำหนดคงที่ ทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วการไหลตามที่กำหนด 3 ค่า ทดลองกับแบบจำลองตอม่อทั้ง 9 กรณี

ดังนั้นในการศึกษานี้ทำการศึกษาทั้งสิ้นจำนวน 81 การทดลอง แบ่งเป็นกรณีต่างๆดังแสดงไว้ในตาราง 3-1

## 3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การเตรียมการก่อนการทดลอง

1) เสริมระดับท้องรางน้ำเดิมให้สูงขึ้นเท่ากับระดับความหนาของทรายที่จะใช้เป็นวัสดุท้องน้ำโดยการใช้แผ่นอะคิลิกส์ ณ ตำแหน่งต้นน้ำและท้ายน้ำของรางน้ำ และเว้นระยะประมาณ 3 เมตร เพื่อเติมทรายในตำแหน่งพื้นที่ทดลอง ดังรูป 3-1

2) เติมทรายขนาด $d_{50}$ เท่ากับ 0.25 มม. ซึ่งเป็นทรายละเอียดจากทะเล ที่มีการจัดเตรียมไว้ก่อนแล้วในห้องปฏิบัติการ ลงไปในตำแหน่งท้องรางน้ำที่เว้นไว้จากการยกระดับด้วยแผ่นอะคิลิกส์ และปรับผิวทรายให้เรียบแบบไม่บดอัด ดังรูป 3-1

3) ติดตั้งเครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงท้องน้ำ ความเร็วการไหล เข้ากับถาดติดล้อเลื่อน และต่อสายส่งสัญญาณเข้ากับอุปกรณ์เก็บข้อมูล

4) ติดตั้งเครื่องมือวัดความสูงคลื่น ณ ตำแหน่งด้านหน้าและหลังแบบจำลองตอม่อ ด้านละ 1.5 ม. และต่อสายส่งสัญญาณเข้ากับอุปกรณ์เก็บข้อมูล

5) ทดสอบหาค่าความลาดเอียงของรางและระดับน้ำในรางที่ต้องการในแต่ละกรณีศึกษา โดยการปล่อยน้ำและปรับระดับท้องรางด้วยแม่แรงยกเพื่อให้ได้สภาพการไหลของน้ำ เป็นการไหลแบบไม่มีตะกอนปน และควบคุมตำแหน่งการเปิดบานระบายน้ำล้นให้ได้ระดับน้ำที่ต้องการ พร้อมบันทึกข้อมูล

6) เปิดเครื่องกำเนิดคลื่นเพื่อทดสอบหาค่าลักษณะของคลื่นน้ำที่ต้องการเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่า *KC* ที่ใช้ในการทดลองร่วมกับค่าความเร็วการไหลในการปล่อยน้ำในรางน้ำ พร้อมบันทึกข้อมูล

7) ติดตั้งกล้องวีดีโอเพื่อบันทึกข้อมูลการกัดเซาะและลักษณะการไหลของน้ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.2 การทดลอง

1) ติดตั้งแบบจำลองตอม่อเข้าไปในตำแหน่งทรายที่เตรียมไว้ ดังรูป 3-1

2) ปรับค่าความลาดชันของท้องรางน้ำเปิดให้ได้ขนาดใกล้เคียงกับที่ได้จากการคำนวณความลาดชันท้องน้ำในสภาวะเงื่อนไขเริ่มต้นของสภาวะสมดุล

3) เปิดวาล์วน้ำเข้ารางน้ำอย่างช้าๆ เพื่อให้ได้ค่าความเร็วการไหล และความลึกการไหลเข้าสู่แบบจำลองตอม่อ (approach depth) ที่ต้องการในตำแหน่งการเปิดวาล์วและบานระบายน้ำล้นที่กำหนดไว้ในเบื้องต้นของแต่ละกรณีศึกษา และปรับระดับท้องน้ำบริเวณแบบจำลองตอม่อใหม่ ให้ได้ระดับเดิมจากการทดลองหาสภาวะตะกอนเริ่มเคลื่อนที่ เนื่องจากอาจถูกน้ำกัดเซาะตอนเริ่มต้นปล่อยน้ำเข้าราง จากนั้นจึงเปิดเครื่องกำเนิดคลื่นในระดับการสร้างคลื่นแต่ละลักษณะของแต่ละกรณีศึกษาเช่นกัน

4) บันทึกข้อมูลการไหลของแต่ละกรณีศึกษา พร้อมทั้งวัดอุณหภูมิของน้ำในรางทดลอง

5) ปล่อยให้เกิดการกัดเซาะรอบแบบจำลองตอม่อ จนเกิดการกัดเซาะสูงสุด โดยการบันทึกข้อมูลด้วยกล้องวีดีโอ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 15 – 24 ชั่วโมง ดังแสดงเวลาที่ใช้ในการทดลองจนเกิดการกัดเซาะสูงสุดในแต่ละกรณีศึกษาในบทที่ 4 (ตาราง 4-1)

6) บันทึกความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดจากการอ่านสเกลผ่านทางภาพวีดีโอ พร้อมทั้งบันทึกข้อมูลผลการทดลองต่างๆในข้างต้น ดังแสดงในตาราง 3-2 และแสดงข้อมูลจากการบันทึกผลการทดลอง บางช่วงกรณีศึกษาที่สามารถเห็นแนวโน้มตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาผลกระทบของครอบหัวเข็มต่อความลึกหลุมกัดเซาะในภาคผนวก จ-2 และหากผู้สนใจข้อมูลบันทึกผลการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้ (รวมทั้งวีดีโอบันทึกการทดลองการกัดเซาะทุกกรณีศึกษา) สามารถค้นคว้าได้จากข้อมูลที่ผู้ทำการศึกษานี้ได้บันทึกเก็บไว้ในแผ่นดีวีดี ซึ่งได้มอบไว้ให้ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้าสำหรับผู้ที่สนใจต่อไป

7) เปลี่ยนแบบจำลองตอม่อตัวอื่นๆจนครบตามกรณีศึกษา

8) เปลี่ยนแปลงคลื่นขนาดอื่นๆตามเงื่อนไขการทดลองจนครบ

9) ทำการทดลองซ้ำตามขั้นตอนทั้งหมดนี้อีกครั้ง สำหรับสภาพเริ่มต้นการไหลในกรณีศึกษาความเร็วการไหลอื่นๆทั้งหมด

ตาราง 3-1 กรณีการทดลองต่างๆที่ทำการศึกษา จำนวน 81 กรณี

| Current velocity ($U_c$) | Keulegan Carpenter number (KC) | Submerged pile cap thickness to water depth ratio ($t_s/y_0$) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | P1 = 0.20 | P2 = 0.30 | P3 = 0.40 | P4 = 0.50 | P5 = 0.60 | P6 = 0.70 | P7 = 0.80 | P8 = 0.90 | P9 = 1.00 |
| U1 | KC1 | U1KC1P1 | U1KC1P2 | U1KC1P3 | U1KC1P4 | U1KC1P5 | U1KC1P6 | U1KC1P7 | U1KC1P8 | U1KC1P9 |
| | KC2 | U1KC2P1 | U1KC2P2 | U1KC2P3 | U1KC2P4 | U1KC2P5 | U1KC2P6 | U1KC2P7 | U1KC2P8 | U1KC2P9 |
| | KC3 | U1KC3P1 | U1KC3P2 | U1KC3P3 | U1KC3P4 | U1KC3P5 | U1KC3P6 | U1KC3P7 | U1KC3P8 | U1KC3P9 |
| U2 | KC1 | U2KC1P1 | U2KC1P2 | U2KC1P3 | U2KC1P4 | U2KC1P5 | U2KC1P6 | U2KC1P7 | U2KC1P8 | U2KC1P9 |
| | KC2 | U2KC2P1 | U2KC2P2 | U2KC2P3 | U2KC2P4 | U2KC2P5 | U2KC2P6 | U2KC2P7 | U2KC2P8 | U2KC2P9 |
| | KC3 | U2KC3P1 | U2KC3P2 | U2KC3P3 | U2KC3P4 | U2KC3P5 | U2KC3P6 | U2KC3P7 | U2KC3P8 | U2KC3P9 |
| U3 | KC1 | U3KC1P1 | U3KC1P2 | U3KC1P3 | U3KC1P4 | U3KC1P5 | U3KC1P6 | U3KC1P7 | U3KC1P8 | U3KC1P9 |
| | KC2 | U3KC2P1 | U3KC2P2 | U3KC2P3 | U3KC2P4 | U3KC2P5 | U3KC2P6 | U3KC2P7 | U3KC2P8 | U3KC2P9 |
| | KC3 | U3KC3P1 | U3KC3P2 | U3KC3P3 | U3KC3P4 | U3KC3P5 | U3KC3P6 | U3KC3P7 | U3KC3P8 | U3KC3P9 |

หมายเหตุ : 1. P1 – P9 คือ รูปแบบของแบบจำลองตอม่อ กรณีศึกษาต่างๆ

2. ข้อมูลคลื่นในแต่ละกรณีศึกษาตามการเปลี่ยนแปลงค่า *KC* และ $U_c$ แสดงไว้ในภาคผนวก ข-2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 3-2 ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลอง

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U1KC1P1 ($t_s/y_0$ = 0.2) Date : 23/08/06 to 24/08/06

Scale Model : 1:100 Time : 20:40 pm to 13:20 pm

Equi. Time = 1000 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x $10^{-7}$ $m^2$/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

**Flow Rate & Depth above wier**

| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
|---|---|
| H = 13.2 cm. | H = 13.3 cm. |
| Q = 9 l/sec. | Q = 9.1 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.01 |
| 2.5 | 30.09 | 0.02 |
| 3 | 30.09 | 0.03 |
| 3.5 | 30.09 | 0.03 |
| 4 | 30.09 | 0.04 |
| 4.5 | 30.09 | 0.04 |
| 5 | 30.08 | 0.04 |
| 5.5 | 30.08 | 0.05 |
| 6 | 30.08 | 0.05 |
| 6.5 | 30.08 | 0.06 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.07 | 0.08 |

**CAL. For clear-water condition**

| Initial Conditions | Exp. Set up |
|---|---|
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.01 | So = 0.01 |

**Water depth at test section**

| Initial Conditions | Exp. Set up |
|---|---|
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

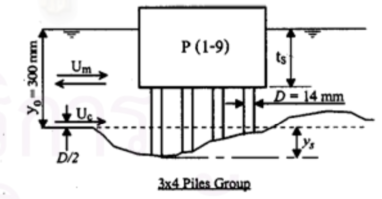
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter D,(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx,(mm) | Ly,(mm) |
| 1 | 14 | 7 | 20 | 5 |
| 2 | 14 | 9 | 15 | - |
| 3 | 14 | 7 | 15 | 10 |
| 4 | 14 | 4 | - | 5 |
| 5 | 14 | 7 | - | - |
| 6 | 14 | 4 | - | 5 |
| 7 | 14 | 8 | - | 5 |
| 8 | 14 | 7 | - | - |
| 9 | 14 | 4 | - | 5 |
| 10 | 14 | 4 | 4 | 5 |
| 11 | 14 | 5 | 5 | - |
| 12 | 14 | 3 | 3 | 5 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $KC=U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 25.00 | 0.91 | 17.80 | 14.00 |

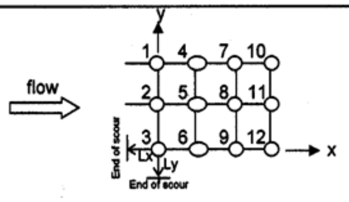
**Definition sketch of Test Condition**




**Remark :** ....................

**Note** :
1. Open over flow wier = 25.5 (From scale bar)
2. Open valve = 2+00 r (From scale bar)
3. 90° v - notch wier, H = 13.3 (From manometer)
4. Flume slope = 0.5 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**




สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 4

# ข้อมูลและผลการทดลอง

การศึกษานี้ใช้แบบจำลองทางกายภาพของรางกระแสน้ำและคลื่นหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อทำการศึกษาถึงอิทธิพลของครอบหัวเข็มของเสาเข็มกลุ่ม ที่มีต่อความลึกของหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่ม ภายใต้คลื่นและกระแสน้ำร่วมกัน โดยทำการทดลองทั้งสิ้น 81 การทดลอง ซึ่งเนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง ลักษณะและรูปแบบของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง วิธีการและขั้นตอนในการเก็บข้อมูล และผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาโดยใช้แบบจำลองชลศาสตร์ทางกายภาพ รวมถึงลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ทำการพิจารณา

## 4.1 ข้อมูลการทดลอง

4.1.1 <u>ข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม LabVIEW</u>

ในขั้นตอนการทดลอง ทำการเก็บข้อมูลต่างๆ โดยใช้โปรแกรม LabVIEW ช่วยในการบันทึกข้อมูลลงในคอมพิวเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลต่างๆดังนี้

1. ความเร็วกระแสน้ำที่ใกล้ท้องน้ำ (current velocity at bed; $U_c$)
2. ความเร็วอนุภาคหมุนวนของคลื่นที่ใกล้ท้องน้ำ (bed orbital velocity; $U_m$)
3. ความสูงคลื่นนัยสำคัญ (significant wave height; $H_s$)
4. คาบคลื่นนัยสำคัญ (significant wave period; $T_s$)

ซึ่งลักษณะข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม LabVIEW มีลักษณะข้อมูลแบบดิจิตอล ในขั้นตอนการเก็บบันทึกข้อมูล โปรแกรมสามารถกำหนดได้ว่าจะทำการเก็บบันทึกข้อมูลในรูปแบบใด เช่น เก็บข้อมูลในลักษณะของไฟล์ข้อมูล (data file,*.dat) หรือจัดเก็บในรูปแบบสเปรทชีส (spread sheet,*.xls) ในการศึกษาครั้งนี้กำหนดรูปแบบในการเก็บบันทึกข้อมูลในรูปแบบสเปรทชีสเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ต่อไป

การเก็บข้อมูล เนื่องจากลักษณะข้อมูลคลื่นในการทดลองทุกๆกรณีศึกษามีลักษณะเป็นคลื่นสั้น จึงเก็บข้อมูลที่ค่าความถี่ในการเก็บข้อมูลสูง ในการศึกษาครั้งนี้ กำหนดใช้ค่าความถี่ในการเก็บข้อมูลเท่ากับ 250 ค่าต่อ 1 วินาที ทุกๆการทดลอง

4.1.2 ข้อมูลจากการจดบันทึก

ในการทดลอง ทำการเก็บข้อมูลส่วนควบคุมการไหลต่างๆ โดยการจดบันทึกค่าข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัด ลงในตารางบันทึกข้อมูลการทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลต่างๆดังนี้

1. ความลึกการไหล (depth of flow; $y_0$)

2. ค่าอัตราการไหล (discharge;$Q$)

3. ความเร็วกระแสน้ำเฉลี่ย (averaged current velocity;$V$)

4. อุณหภูมิของน้ำ (water temperature: $T$)

5. ความหนืดจลน์ของน้ำ (kinematics viscosity; $\nu$)

4.1.3 ข้อมูลจากการบันทึกด้วยกล้องวีดีโอ

การทดลองการกัดเซาะทุกกรณีศึกษา ทำการเก็บข้อมูล โดยการบันทึกผลด้วยกล้องวีดีโอ ซึ่งบันทึกเป็น MPEG.File ลงในคอมพิวเตอร์ และแต่ละกรณีศึกษาแบ่งเป็น File ย่อยๆ ขนาดความจุต่อ File ประมาณ 3-4 GB เพื่อบันทึกข้อมูลวีดีโอเก็บลงในแผ่นดีวีดี โดยมีความยาวประมาณ 6-7 ชั่วโมงต่อแผ่น ซึ่งในแต่ละกรณีศึกษาจะได้ข้อมูลวีดีโอที่เก็บลงในแผ่นดีวีดีประมาณ 2-4 แผ่น (ข้อมูลวีดีโอทั้งหมด ได้มอบไว้ให้แด่ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อประโยชน์ในการค้นคว้าของผู้ที่สนใจในอนาคตต่อไป) โดยข้อมูลที่ได้จากภาพวีดีโอประกอบไปด้วย

1. ค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด (maximum scour depth; $y_s$)

2. ลักษณะพฤติกรรมและเวลาที่เกิดกระบวนการกัดเซาะ

3. การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหล

ซึ่งรายละเอียดวิธีการเก็บข้อมูลและผลการทดลองต่างๆดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 4.2 วิธีการเก็บข้อมูล

1. ความเร็วกระแสน้ำที่ใกล้ท้องน้ำ (current velocity at bed; $U_c$)

ข้อมูลความเร็วกระแสน้ำ สามารถเก็บบันทึกข้อมูลได้โดยใช้โปรแกรม LabVIEW ดังตัวอย่างข้อมูลแสดงในภาคผนวก ง-1 ซึ่งควบคุมการวัด และบันทึกข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดความเร็วกระแสน้ำ (current meter) จำนวน 1 เครื่อง โดยเครื่องมือสามารถวัดและเก็บบันทึกข้อมูลความเร็วการไหลได้ 3 ทิศทาง แต่ในการศึกษาครั้งนี้ พิจารณาความเร็วการไหลในทิศทางตามกระแสน้ำเพียงทิศทางเดียว ในการติดตั้งเครื่องมือวัดความเร็วการไหลของกระแสน้ำ ทำการติดตั้งในรางน้ำบริเวณตำแหน่งที่จะทำการติดตั้งแบบจำลองตอม่อ และความลึกในการวัดอยู่ที่ระยะประมาณครึ่งหนึ่งของเส้นผ่าศูนย์กลางของแบบจำลองเสาเข็ม สูงขึ้นเหนือท้องน้ำ และทำการวัดข้อมูลในขณะที่ปล่อยน้ำให้ไหลในรางน้ำโดยที่ยังไม่มีการสร้างคลื่นในรางน้ำ ดังแสดงตำแหน่งการวัดข้อมูลในรูป ง-1

2. ความเร็วอนุภาคหมุนวนของคลื่นที่ใกล้ท้องน้ำ (bed orbital velocity; $U_m$)

ข้อมูลความเร็วอนุภาคหมุนวนของคลื่นที่ใกล้ท้องน้ำ สามารถเก็บบันทึกข้อมูลได้โดยใช้โปรแกรม LabVIEW ดังตัวอย่างข้อมูลแสดงในภาคผนวก ง-2 ซึ่งควบคุมการวัด และบันทึกข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดชนิดเดียวกันกับเครื่องวัดความเร็วกระแสน้ำ โดยเครื่องมือสามารถวัดและเก็บบันทึกข้อมูลความเร็วการเคลื่อนที่ของอนุภาคคลื่นในทิศทางตามการไหลทั้งทางบวกและลบ ในการติดตั้งเครื่องมือวัด ทำการติดตั้งในรางน้ำบริเวณตำแหน่งที่จะทำการติดตั้งแบบจำลองตอม่อ และความลึกในการวัดอยู่ที่ระยะประมาณครึ่งหนึ่งของเส้นผ่าศูนย์กลางของแบบจำลองเสาเข็มสูงขึ้นเหนือท้องน้ำเช่นเดียวกับการวัดความเร็วกระแสน้ำที่ตำแหน่งใกล้ท้องน้ำ ดังแสดงตำแหน่งการวัดข้อมูลในรูป ง-1 แต่จะทำการวัดในขณะที่เดินเครื่องกำเนิดคลื่นไปพร้อมๆกับการไหลของกระแสน้ำในรางน้ำ ซึ่งค่าของข้อมูลที่ได้ จะมีขนาดการเสริมและหักล้างกัน ของความเร็วการไหลของกระแสน้ำที่ปล่อยให้ไหลเข้าสู่รางน้ำ กับขนาดของความเร็วการไหลไปกลับ ของอนุภาคหมุนวนของคลื่นน้ำ ดังนั้นเมื่อได้ข้อมูลจากการเก็บบันทึกในการวัดดังกล่าว จะต้องนำค่าความเร็วการไหลของกระแสน้ำที่ได้ในหัวข้อ 1) มาทำการคำนวณหักลบออกจากข้อมูลดังกล่าว จึงจะได้ข้อมูลความเร็วอนุภาคหมุนวนของคลื่นที่ใกล้ท้องน้ำที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

3) ข้อมูลคุณลักษณะของคลื่น

ข้อมูลความสูงคลื่น และคาบคลื่น สามารถเก็บบันทึกข้อมูลได้โดยการใช้โปรแกรม LabVIEW ดังตัวอย่างชุดข้อมูลแสดงในภาคผนวก ง-3 ซึ่งควบคุมการวัด และบันทึกข้อมูลจากเครื่องวัดความสูงคลื่น (wave height meter) จำนวน 2 เครื่อง โดยเครื่องมือสามารถวัดและเก็บบันทึกข้อมูลความสูงคลื่น และคาบคลื่นได้ ในการติดตั้งเครื่องมือวัดความสูงคลื่น ทำการติดตั้งในรางน้ำบริเวณตำแหน่งด้านหน้าและด้านหลัง ห่างจากตำแหน่งที่ติดตั้งแบบจำลองตอม่อด้านละ 1.5 เมตร ดังแสดงตำแหน่งการวัดข้อมูลในรูป ง-1 ซึ่งข้อมูลจากเครื่องมือวัดความสูงคลื่นจะถูกส่งสัญญาณเข้าสู่เครื่องรับสัญญาณแบบอนาล็อก และแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นข้อมูลดิจิตอลด้วยโปรแกรม LabVIEW ซึ่งจัดเก็บข้อมูลลงคอมพิวเตอร์ดังกล่าวไว้ในข้างต้น จากนั้นจึงนำชุดข้อมูลข้อมูลคลื่นที่ได้จากการบันทึกด้วยโปรแกรม LabVIEW มาทำการวิเคราะห์โดยการใช้โปรแกรมสเปกตรัมของ อาทิตยา เกศมาริษ (1997) เพื่อหาคุณลักษณะของคลื่นต่างๆต่อไป

4. อัตราการไหลของน้ำ (discharge;*Q*)

ทำการวัดอัตราการไหลของน้ำในรางน้ำ โดยการใช้ฝายสามเหลี่ยมสันคม (90° V-notch weir) ที่ติดตั้งที่ด้านท้ายน้ำของรางน้ำ (ซึ่งทำการสอบเทียบค่า ดังแสดงในภาคผนวก ค-3) เพื่อใช้วัดอัตราการไหลของน้ำ โดยการอ่านค่าระดับเหนือสันฝาย (*H*) และนำไปคำนวณอัตราการไหลจากสมการ $Q = 0.045H^{2.1}$ โดยที่ *Q* คือ อัตราการไหลในหน่วยลิตรต่อวินาที และ *H* คือความสูงของน้ำเหนือสันฝายในหน่วยเซนติเมตร ในแต่ละแบบจำลองตอม่อใช้อัตราการไหลจำนวน 3 อัตราการไหล โดยการควบคุมอัตราการไหลที่ต้องการในการทดลองด้วยวาล์วปิด-เปิดน้ำ เข้าสู่รางน้ำที่ด้านต้นน้ำของรางน้ำ

5. ความลึกการไหล (depth of flow; $y_0$)

ทำการวัดความลึกการไหลด้วยเครื่องมือวัดระดับ (point gage) ที่ติดตั้งบนถาดล้อเลื่อนเหนือรางน้ำ ทุกๆ 1.0 เมตร ใน 2.0 เมตรแรกจากบานระบายน้ำ และวัดทุกๆ 0.5 เมตร จนถึงตำแหน่งด้านเหนือน้ำห่างจากจากจุดติดตั้งแบบจำลองตอม่อ 1.0 ม. ซึ่งในการวัด จะทำการวัดระดับท้องน้ำและระดับผิวน้ำ ณ ตำแหน่งการวัดต่างๆดังกล่าว แล้วจึงนำมาหักลบเพื่อให้ได้ค่าความลึกการไหล ณ ตำแหน่งนั้นๆ โดยความลึกการไหล ณ ตำแหน่งติดตั้งแบบจำลองตอม่อที่ใช้ในการทดลองกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.3 เมตร เท่ากันทุกการทดลอง ดังนั้นจึงต้องทำการปรับระดับปิด-เปิดบานระบายน้ำล้น ควบคู่กับการปรับความชันรางน้ำภายใต้เงื่อนการไหลเริ่มต้นแบบไม่มีตะกอนปน เพื่อให้ได้ค่าระดับน้ำตามค่าที่ต้องการในข้างต้น

6. <u>ความเร็วกระแสน้ำเฉลี่ย</u> (averaged current velocity; *V*)

ความเร็วกระแสน้ำเฉลี่ยหาได้จากอัตราการไหล ซึ่งทำการวัดโดยฝายสามเหลี่ยมสันคม (90° V-notch weir) ในการทดลองเดียวกัน ความเร็วการไหลเฉลี่ยของกระแสน้ำที่ปะทะกับแบบจำลองตอม่อแต่ละกรณีศึกษามีค่าเท่ากัน เนื่องจากความลึกการไหลที่หน้าตัดการไหลตรงตำแหน่งที่ติดตั้งแบบจำลองตอม่อทุกกรณีศึกษากำหนดให้มีค่าเท่ากัน แต่จะเปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขของอัตราการไหลที่กำหนดในการทดลอง 3 ค่าดังกล่าวในข้างต้น

7. <u>อุณหภูมิของน้ำ</u> (water temperature: *T*)

ระหว่างทำการทดลองทำการวัดอุณหภูมิของน้ำ โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทในการวัดค่าอุณหภูมิของน้ำ โดยทำการสุ่มวัดค่าเป็นช่วงๆ ตลอดระยะเวลาที่ทำการการวัดอัตราการไหลของน้ำจากฝายสันคม และวัดเพื่อตรวจสอบว่าอุณหภูมิของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงไปหรือไม่ในขณะทำการทดลองการกัดเซาะ เนื่องจากการทดลองใช้เวลาค่อนข้างนานครอบคลุมเวลาช่วงกลางวันและกลางคืน อุณหภูมิของน้ำอาจเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของอากาศในช่วงหนึ่งวัน สาเหตุที่ต้องตรวจสอบเนื่องจากอัตราการไหลที่ได้จากการอ่านค่าจากฝายสันคมอาจไม่ถูกต้อง หากอุณหภูมิของน้ำเปลี่ยนไปจากค่าที่วัดได้ในขณะทำการสอบเทียบค่าการวัดของฝายสันคม

8. <u>ความหนืดจลน์ของน้ำ</u> (kinematics viscosity; $\nu$)

ได้จากการคำนวณปรับเทียบจากอุณหภูมิของน้ำที่วัดได้ เพื่อนำไปคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำในรางน้ำผ่านฝายสามเหลี่ยมสันคมต่อไป

9. <u>ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด</u> (maximum scour depth; $y_s$)

ทำการวัดความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด โดยการอ่านค่าจากสเกลที่ติดไว้ที่แบบจำลองเสาเข็มแต่ละต้น ผ่านทางภาพที่บันทึกจากกล้องวีดีโอและจากการสังเกตที่แบบจำลองในบางกรณี โดยจะทำการจดบันทึกค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด เมื่อสังเกตว่า ค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่เกิดขึ้นจากการอ่านสเกล ไม่มีการเปลี่ยนแปลงนานติดต่อกันประมาณ 2 ชั่วโมง

10. <u>ลักษณะพฤติกรรมและเวลาที่เกิดกระบวนการกัดเซาะ</u>

การทดลองนี้พิจารณาความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด ในสภาวะการไหลในรางน้ำที่ไม่มีตะกอนปน โดยการเฝ้าสังเกตพฤติกรรมการกัดเซาะอย่างต่อเนื่องจากแบบจำลอง และจากภาพ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วีดีโอ แล้วทำการจดบันทึกพฤติกรรมการกัดเซาะในแต่ละช่วงเวลาที่มีลักษณะพฤติกรรมที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

11. การเปลี่ยนแปลงสภาวะการไหล

จากการศึกษานี้ ได้ทำการทดลองหาค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดรอบเสาเข็มกลุ่ม กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของครอบหัวเสาเข็มในน้ำ ภายใต้การกระทำของคลื่นและกระแสน้ำร่วมกัน ซึ่งการทดลอง ได้บันทึกผลการทดลอง สภาพการไหล กลไกการกัดเซาะ และขนาดความลึกหลุมกัดเซาะ โดยใช้กล้องวีดีโอในการบันทึกภาพ เพื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลองในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงสภาพการไหลของน้ำผ่านแบบจำลองเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็ม เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความหนาของครอบหัวเข็ม โดยการเฝ้าสังเกตจากแบบจำลองขณะทำการทดลองและจากภาพวีดีโอที่บันทึกอย่างต่อเนื่อง จนเข้าสู่สภาวะสมดุลของการกัดเซาะตามเงื่อนไขในหัวข้อที่ 9)

## 4.3 ผลการทดลอง

1. ความเร็วกระแสน้ำที่ใกล้ท้องน้ำ (current velocity at bed; $U_c$)

จากการทดลองที่ได้ มีค่าความเร็วกระแสน้ำที่ตำแหน่งใกล้ท้องน้ำเฉลี่ยจากข้อมูลที่เก็บบันทึกจากโปรแกรม LabVIEW จำนวน 3 ค่า ตามการกำหนดเงื่อนไขการทดลอง คือ มีค่าประมาณ 4.8, 9.5 และ 14.5 ซม./วินาที ตามลำดับ

2. ความเร็วอนุภาคหมุนวนของคลื่นที่ใกล้ท้องน้ำ (bed orbital velocity; $U_m$)

จากการทดลองที่ได้ มีค่าความเร็วอนุภาคหมุนวนของคลื่นที่ใกล้ท้องน้ำ เฉลี่ยจากค่าความเร็วการเคลื่อนที่ไปกลับสูงสุดจากข้อมูลที่เก็บบันทึกจากโปรแกรม LabVIEW จำนวน 3 ค่า ตามการกำหนดเงื่อนไขการทดลอง คือ มีค่าประมาณ 18, 33 และ 37 ซม./วินาที ตามลำดับ

3. ข้อมูลคุณลักษณะของคลื่น

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลคลื่นโดยโปรแกรมวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

ได้ค่าความสูงคลื่นนัยสำคัญ (significant wave height; $H_s$) จำนวน 3 ค่าตามการออกแบบการทดลอง คือ มีค่า $H_s$ เท่ากับ 14, 18 และ 25 เซนติเมตร ตามลำดับ

ได้ค่าคาบคลื่นนัยสำคัญ (significant wave period; $T_s$) จำนวน 3 ค่าตามการออกแบบการทดลอง คือ 1.6, 1.3 และ 1.1 วินาที ตามลำดับความสูงคลื่นจากน้อยไปมาก และ

ได้ค่าความถี่คลื่นนัยสำคัญ (significant wave frequency; $f_s$) คำนวณจากคาบคลื่นจำนวน 3 ค่าตามการออกแบบการทดลอง คือ 0.63, 0.77 และ 0.91 วินาที$^{-1}$ ตามลำดับคาบคลื่น

4. <u>อัตราการไหลของน้ำ</u> (discharge;$Q$)

ในการทดลองนี้ ใช้อัตราการไหลเท่ากับ 9, 18 และ 27 ลิตรต่อวินาที ซึ่งขีดจำกัดของอัตราการไหลขึ้นกับอัตราการสูบน้ำของเครื่องสูบน้ำในระบบหมุนเวียนน้ำ เนื่องจากเงื่อนไขการทดลองกำหนดให้มีความลึกการไหลคงที่เท่ากันทุกการทดลอง

5. <u>ความลาดชันของรางน้ำ</u> (bed slope of flume; $S_0$)

จากการควบคุมความลึกการไหลให้คงที่ทุกการทดลอง ภายใต้ขอบเขตการทดลองในข้างต้น จึงต้องปรับความชันท้องน้ำในแต่ละอัตราการไหลให้มีสภาพการไหลเป็นการไหลที่ไม่มีตะกอนปน และสัมพันธ์กับการปรับบานระบายเพื่อให้ได้ค่าความลึกการไหลที่กำหนด ดังนั้นค่าความชันท้องน้ำที่ปรับตามอัตราการไหลทั้ง 3 ค่าในข้างต้นมีค่าเท่ากับ 0.011000, 0.000123 และ 0.000122 ตามลำดับ

6. <u>ความเร็วกระแสน้ำเฉลี่ย</u> (averaged current velocity;$V$)

จากผลการทดลองที่ได้มีความเร็วการไหลเฉลี่ยของกระแสน้ำ ตามการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเท่ากับ 5, 10 และ 15 ซม.ต่อวินาที ตามลำดับ

7. <u>อุณหภูมิของน้ำ</u> (water temperature: $T$) และ <u>ความหนืดจลน์ของน้ำ</u> (kinematics viscosity; $\nu$)

ในการทดลองนี้มีอุณหภูมิของน้ำเฉลี่ยประมาณ 30°C และมีค่าความหนืดจลน์ของน้ำ (kinematics viscosity; $\nu$) เท่ากับ 8X10$^{-7}$เมตร$^2$/วินาที

8. ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด (maximum scour depth; $y_s$)

ในการทดลองนี้มีค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด ที่ได้จากทุกกรณีศึกษามีค่าอยู่ระหว่าง 0.64 – 3.64 เท่าของขนาดเสาเข็ม ดังแสดงในภาคผนวก จ

9. ลักษณะพฤติกรรมและเวลาที่เกิดกระบวนการกัดเซาะ

ช่วงต้นของการกัดเซาะพบว่าความลึกหลุมกัดเซาะเพิ่มขึ้นในอัตราที่เร็ว และจากการสังเกตจากภาพวีดีโอ จะเห็นได้ว่าเกิดการปั่นป่วนของตะกอนและฟุ้งกระจายออกจากรอบๆเสาเข็มเป็นปริมาณมาก (ประมาณ 12 ชั่วโมงแรก) หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นของความลึกหลุมกัดเซาะจะค่อยๆลดลง ปรากฏดังปริมาณการฟุ้งกระจายของตะกอนรอบๆเสาเข็มก็ค่อยๆเบาบางลงด้วย ซึ่งการกัดเซาะดำเนินไปเช่นนี้จนสังเกตได้ว่าไม่เพิ่มความลึกหลุมกัดเซาะใช้เวลาในช่วงนี้อีกประมาณ 3 - 12 ชั่วโมง รวมเวลาที่ใช้ในการทดลองประมาณ 15 – 24 ชั่วโมง ซึ่งสามารถสรุประยะเวลาที่ใช้ในการทดลองในแต่ละกรณีศึกษา จากเริ่มต้นการกัดเซาะจนถึงค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด ดังแสดงในตาราง 4-1

10. การเปลี่ยนแปลงสภาวะการไหล

ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นพฤติกรรมการไหล 2 ลักษณะตามตัวแปรการไหลที่กระทำคือ กระแสน้ำและคลื่น ดังผลการทดลองต่อไปนี้

1) ผลการทดลองตามความเร็วกระแสน้ำที่ทดลอง

จากการสังเกต การเปลี่ยนแปลงสภาพการไหลขณะทำการทดลอง กรณีศึกษาที่ค่า *KC* เดียวกัน แต่ทดลองเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วกระแสน้ำ โดยการพิจารณาตามเงื่อนไขดังนี้

(A) = ความเร็วการไหลของกระแสน้ำต่ำ คือ $U_c$ เท่ากับ 4.8 – 9.5 ซม. /วินาที

(B) = ความเร็วการไหลของกระแสน้ำสูง คือ $U_c$ เท่ากับ 9.5 – 14.5 ซม. /วินาที

(C) = ความหนาครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำมีค่าน้อยๆ คือ $t_s/y_0$ เท่ากับ 0.2 – 0.5

(D) = ความหนาครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำมีค่ามากๆ คือ $t_s/y_0$ เท่ากับ 0.5 – 1.0

ซึ่งจากเงื่อนไขข้างต้นพบว่า

<u>กรณีศึกษา "AC"</u> พบว่า ลักษณะของสภาวะการไหลผ่านกลุ่มเสาเข็ม มีลักษณะการไหลเกิดการปั่นป่วนเล็กน้อยที่ตำแหน่งใกล้ท้องน้ำ และเกิดการหมุนวนของกระแสน้ำผ่านรอบผิวเสาเข็ม ผลเนื่องจากคลื่นเข้ากระทำ ทำให้เกิดสภาวะการปั่นป่วนของการไหลที่ตำแหน่งใกล้กับท้องน้ำไม่มากนัก แต่จะเกิดการสะท้อนกลับและการไหลหมุนวนที่ตำแหน่งใกล้กับผิวน้ำและเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างครอบหัวเข็มไปทางด้านท้ายน้ำ

<u>กรณีศึกษา "AD"</u> พบว่า ลักษณะของสภาวะการไหลผ่านกลุ่มเสาเข็ม มีลักษณะการไหลเกิดการปั่นป่วนที่ตำแหน่งใกล้ท้องน้ำมากขึ้นกว่ากรณีศึกษา "AC" และเกิดการไหลหมุนวนของกระแสน้ำรอบผิวเสาเข็มในลักษณะที่รุนแรงขึ้น และผลของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้ากระทบกับครอบหัวเข็ม ส่งผลให้เกิดสภาวะการไหลหมุนวนและปั่นป่วนผ่านตำแหน่งใกล้กับท้องน้ำมากขึ้น

<u>กรณีศึกษา "BC"</u> พบว่า ลักษณะของสภาวะการไหลผ่านกลุ่มเสาเข็ม มีลักษณะการไหลเกิดการปั่นป่วนที่ตำแหน่งใกล้ท้องน้ำมากขึ้นกว่ากรณี "AC" และเกิดการหมุนวนของกระแสน้ำผ่านรอบผิวเสาเข็มไปทางด้านท้ายน้ำรุนแรงขึ้นกว่ากรณี "AC" ผลจากการกระทำของคลื่น เกิดการสะท้อนกลับและการไหลหมุนวนเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างครอบหัวเข็มไปทางด้านท้ายน้ำ ยังเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใกล้กับผิวน้ำเหมือนเดิม

<u>กรณีศึกษา "BD"</u> พบว่า ลักษณะของสภาวะการไหลผ่านกลุ่มเสาเข็ม มีลักษณะการไหลเกิดการปั่นป่วนที่ตำแหน่งใกล้ท้องน้ำมากขึ้นกว่ากรณีศึกษา "BC" และการไหลปะทะครอบหัวเข็มเกิดการไหลลงสู่ท้องน้ำด้านล่างวนไปทางด้านท้ายน้ำรวมกับผลของการไหลวนรอบความกว้างครอบหัวเข็ม ก่อให้เกิดการไหลแบบหมุนวนและปั่นป่วนมากขึ้น และผลของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้ากระทบกับครอบหัวเข็ม ส่งผลให้เกิดสภาวะการไหลหมุนวนและปั่นป่วนผ่านตำแหน่งใกล้กับท้องน้ำมากขึ้นกว่ากรณีศึกษา "BC"

2) ผลการทดลองตามค่า *KC* ที่ทดลอง

จากการสังเกต การเปลี่ยนแปลงสภาพการไหลขณะทำการทดลองกรณีศึกษาที่ค่าความเร็วกระแสน้ำเดียวกัน แต่ทดลองเปลี่ยนแปลงค่า *KC* โดยการวิเคราะห์พิจารณาตามเงื่อนไขดังนี้

(a) = ค่า *KC* ต่ำๆ คือ *KC* เท่ากับ 14 – 30, ความสูงคลื่นมาก

(b) = ค่า *KC* สูงๆ คือ *KC* เท่ากับ 30 – 42, ความสูงคลื่นน้อย

(c) = ความหนาครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำมีค่าน้อยๆ คือ $t_s/y_0$ เท่ากับ 0.2 – 0.5

(d) = ความหนาครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำมีค่ามากๆ คือ $t_s/y_0$ เท่ากับ 0.5 – 1.0 ซึ่งจากเงื่อนไขข้างต้นพบว่า

<u>กรณีศึกษา “ac”</u> พบว่า ลักษณะของสภาวะการไหลผ่านกลุ่มเสาเข็มเนื่องจากคลื่น ส่งผลให้เกิดการไหลหมุนวนและปั่นป่วนเคลื่อนที่ขึ้นลงตามระดับน้ำที่ตำแหน่งดังกล่าว และเคลื่อนที่ไปทางด้านท้ายน้ำตามทิศทางกระแสน้ำต่อไปจนถึงระยะหนึ่งสภาพการไหลจึงเข้าสู่สภาวะปกติ

<u>กรณีศึกษา “ad”</u> พบว่า ลักษณะของสภาวะการไหล ที่ตำแหน่งท้องน้ำบริเวณกลุ่มเสาเข็มจะมีลักษณะคล้ายกับกรณีศึกษา “ac” แต่สภาวะการไหลมีลักษณะปั่นป่วนกระจายขึ้นจากท้องน้ำที่ค่อนข้างสูงกว่าในกรณีศึกษา “ac” และถูกบีบอัดให้การปั่นป่วนรุนแรงขึ้นและกระจายไปทางด้านท้ายน้ำหลังตอม่อมากขึ้นตามทิศทางของความเร็วกระแสน้ำที่มากขึ้นด้วย

<u>กรณีศึกษา “bc”</u> พบว่า ลักษณะของสภาวะการไหลผ่านกลุ่มเสาเข็ม เนื่องจากคลื่น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันน้ำตลอดเวลาตามการขึ้น-ลงของระดับน้ำในช่วงที่ต่ำกว่ากรณีศึกษา “ac” ที่ตำแหน่งท้องน้ำบริเวณกลุ่มเสาเข็ม ทำให้อนุภาคน้ำบริเวณดังกล่าวเกิดการปั่นป่วนในทิศทางขึ้น-ลงตามระดับน้ำน้อยลง แต่จะมีพฤติกรรมการไหลเสริมกันกับกระแสน้ำ โดยเกิดการเสริมกันของความเร็วการไหลผ่านรอบผิวด้านข้างของเสาเข็มแบบหมุนวนที่รุนแรงขึ้นกว่ากรณีศึกษา “ac” ไปทางด้านท้ายน้ำ และไปพบกับบริเวณตำแหน่งท้องน้ำด้านหลังเสาเข็มตรงจุดที่เป็นพื้นที่อับกระแสน้ำจึงก่อให้เกิดการไหลหมุนวนและปั่นป่วนเคลื่อนที่ขึ้นลงตามระดับน้ำเล็กน้อยที่ตำแหน่งดังกล่าว และเคลื่อนที่ไปทางด้านท้ายน้ำตามทิศทางกระแสน้ำต่อไปจนถึงระยะหนึ่งสภาพการไหลจึงเข้าสู่สภาวะปกติ

<u>กรณีศึกษา “bd”</u> พบว่า ลักษณะของสภาวะการไหล ที่ตำแหน่งท้องน้ำบริเวณกลุ่มเสาเข็มจะมีลักษณะคล้ายกับกรณีศึกษา “bc” แต่จะเกิดการเสริมความเร็วการไหลที่เพิ่มขึ้นจากกรณีศึกษา “bc” ขึ้นไปอีก ส่งผลให้สภาวะการไหลเกิดการปั่นป่วนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดันตามการขึ้น-ลงของระดับน้ำสูงขึ้นจากกรณีศึกษา “bc” และสภาวะการไหลหมุนวนผ่านผิวเสาเข็มไปทางด้านท้ายน้ำมีก็ความรุนแรงขึ้นด้วย รวมทั้งการไหลปะทะครอบหัวเข็มเกิดการไหลลงสู่ท้องน้ำด้านล่างวนไปทางด้านท้ายน้ำรวมกับผลของการไหลวนรอบความกว้างครอบหัวเข็ม ก่อให้เกิดการไหลแบบหมุนวนและปั่นป่วนที่มุมของกลุ่มเสาเข็ม กระจายไปทางด้านข้าง ในลักษณะที่รุนแรงขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการทดลอง อิทธิพลของความหนาครอบหัวเข็มในน้ำต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะการไหลทั้งหมดในข้างต้น เมื่อนำผลการทดลองในสองส่วนย่อยๆมารวมกัน กล่าวคือ นำผลการทดลองตามความเร็วกระแสน้ำที่ทดลอง และผลการทดลองตามค่า *KC* ที่ทดลอง มารวมกัน ก็จะสามารถเห็นถึงลักษณะของการเปลี่ยนแปลงสภาพการไหลทั้งหมด เมื่อมีการกระทำกับตอม่อร่วมกันระหว่างคลื่นและกระแสน้ำของกรณีศึกษานั้นๆ ได้ ยกตัวอย่าง เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพการไหลเนื่องจากกรณีศึกษาตอม่อที่มีความหนาของครอบหัวเข็มน้อยๆ เช่น $t_s/y_0$ เท่ากับ 0.2 ลักษณะสภาพการเปลี่ยนแปลงการไหลที่เกิดขึ้นทั้งหมดคือ นำผลการทดลอง “AC”, “BC” และ “ac”, “bc” มารวมกันแบบจับคู่กันระหว่างสองผลการทดลอง

## 4.4 ข้อมูลตัวแปรการทดลอง

1. <u>ฟรูดนัมเบอร์ของการไหล</u> (Froude Number, $F_r$)

ฟรูดนัมเบอร์เป็นค่าที่บอกถึงสภาวะการไหลของน้ำ โดยพิจารณาถึงอิทธิพลของแรงโน้มถ่วง (gravity force) ในทางน้ำเปิดแบ่งเป็นสภาวะต่างๆดังนี้

- การไหลต่ำกว่าวิกฤติ (subcritical flow, $F_r$<1)
- การไหลวิกฤติ (critical flow, $F_r$ =1)
- การไหลเหนือวิกฤติ (supercritical flow, $F_r$ >1)

โดยที่

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gy}} \tag{4.1}$$

เมื่อ $V$ คือ ความเร็วการไหล (เมตร/วินาที), $g$ คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (9.81เมตร/วินาที$^2$) และ $y$ คือ ความลึกการไหล (เมตร)

การทดลองนี้ทดลองในสภาวะการไหลต่ำกว่าวิกฤติ ฟรูดนัมเบอร์อยู่ระหว่าง 0.029 – 0.087

2. <u>เรย์โนลด์นัมเบอร์</u> (Reynolds Number, $R_e$)

เรย์โนลด์นัมเบอร์ของการไหล คือ อัตราส่วนของแรงเฉื่อย (inertia force) ต่อแรงหนืด (viscous force) ของการไหล ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงผลของความหนืดของของไหลต่อการไหล แบ่งสภาวะการไหลเป็นดังนี้

- laminar flow, $R_e \leq 500$
- transition flow, $500 \leq R_e \leq 12{,}500$

- turbulent flow, 12,500 ≤ $R_e$

โดยที่

$$R_e = \frac{Vy}{\nu} \tag{4.2}$$

เมื่อ $V$ คือ ความเร็วการไหล (เมตร/วินาที), $y$ คือ ค่าความลึกการไหล (เมตร) และ $\nu$ คือ ความหนืดจลน์ของน้ำ (เมตร$^2$/วินาที)

ในการทดลองนี้การไหลเป็นแบบ turbulent flow โดยมีเรย์โนลด์นัมเบอร์อยู่ระหว่าง 18,750 – 56,250

3. Keulegan-Carpenter number ($KC$)

เป็นการกำหนดลักษณะของคลื่นรวมอยู่ในรูปกลุ่มตัวแปรไร้มิติ Keulegan – Carpenter number, $KC$ โดยที่

$$KC = \frac{U_m}{f_s D} \tag{4.3}$$

เมื่อ $U_m$ คือ ความเร็วอนุภาคหมุนวนของคลื่นที่ใกล้ท้องน้ำ (เมตร/วินาที), $f_s$ คือ ความถี่คลื่นนัยสำคัญ (วินาที$^{-1}$) และ $D$ คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม (เมตร)

โดยให้ค่า $KC$ อยู่ในช่วงของการเกิดการกัดเซาะได้ ตามค่าที่กำหนดใช้ทดสอบตามการออกแบบการทดลอง ในการทดลองนี้มีค่า $KC$ จำนวน 3 ค่า ตามการออกแบบการทดลองคือ มีค่าประมาณ 14, 30 และ 42 ตามลำดับความเร็วอนุภาคคลื่นในข้างต้น

4. พารามิเตอร์ $U_{cw}$

เป็นการกำหนดลักษณะของคลื่นร่วมกับกระแสน้ำในรูปฟังชันก์ของพารามิเตอร์ $U_{cw}$ ซึ่งจะมีค่าต่ำสุดและสูงสุดอยู่ระหว่าง 0 กับ 1 ที่กรณีมีคลื่นอย่างเดียว และกระแสน้ำอย่างเดียว ตามลำดับ โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$U_{cw} = \frac{U_c}{(U_c + U_m)} \tag{4.4}$$

โดยที่ $U_c$ = ความเร็วกระแสน้ำที่สภาวะไม่ถูกรบกวน ณ ตำแหน่ง $D/2$ จากท้องน้ำ
$U_m$ = ความเร็วอนุภาคคลื่นหมุนวนที่สภาวะไม่ถูกรบกวนบริเวณใกล้ท้องทะเล

ในการทดลองนี้มีค่า $U_{cw}$ ตามการออกแบบการทดลองอยู่ระหว่าง 0.12 – 0.44

จากผลการทดลองที่กล่าวมาทั้งหมดในข้างต้น ได้แสดงประกอบผลการศึกษาการกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็มในแต่ละกรณีการศึกษาดังตาราง 4-2

ตาราง 4-1 เวลาการทดลองตั้งแต่เริ่มเกิดการกัดเซาะจนถึงการกัดเซาะสูงสุด ในแต่ละกรณีศึกษา

| Current velocity ($U_c$) | Keulegan Carpenter number (KC) | The time of scouring process to maximum scour depth (hrs.) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | P1 = 0.20 | P2 = 0.30 | P3 = 0.40 | P4 = 0.50 | P5 = 0.60 | P6 = 0.70 | P7 = 0.80 | P8 = 0.90 | P9 = 1.00 |
| U1 | KC1 | (16 hrs) U1KC1P1 | (19 hrs) U1KC1P2 | (15 hrs) (U1KC1P3) | (17 hrs) U1KC1P4 | (20 hrs) U1KC1P5 | (22 hrs) U1KC1P6 | (19 hrs) U1KC1P7 | (20 hrs) U1KC1P8 | (20 hrs) U1KC1P9 |
| | KC2 | (18 hrs) U1KC2P1 | (20 hrs) U1KC2P2 | (20 hrs) (U1KC2P3) | (23 hrs) U1KC2P4 | (20 hrs) U1KC2P5 | (23 hrs) U1KC2P6 | (18 hrs) U1KC2P7 | (22 hrs) U1KC2P8 | (22 hrs) U1KC2P9 |
| | KC3 | (20 hrs) U1KC3P1 | (22 hrs) U1KC3P2 | (24 hrs) U1KC3P3 | (19 hrs) U1KC3P4 | (24 hrs) U1KC3P5 | (24 hr) U1KC3P6 | (27 hrs) U1KC3P7 | (24 hrs) U1KC3P8 | (24 hrs) U1KC3P9 |
| U2 | KC1 | (20 hrs) U2KC1P1 | (18 hrs) U2KC1P2 | (19 hrs) U2KC1P3 | (18 hrs) U2KC1P4 | (19 hrs) U2KC1P5 | (16 hrs) U2KC1P6 | (15 hrs) U2KC1P7 | (22 hrs) U2KC1P8 | (20 hrs) U2KC1P9 |
| | KC2 | (19 hrs) U2KC2P1 | (20 hrs) U2KC2P2 | (20 hrs) U2KC2P3 | (18 hrs) U2KC2P4 | (21 hrs) U2KC2P5 | (18 hrs) U2KC2P6 | (20 hrs) U2KC2P7 | (22 hrs) U2KC2P8 | (22 hrs) U2KC2P9 |
| | KC3 | (14 hrs) U2KC3P1 | (21 hrs) U2KC3P2 | (15 hrs) U2KC3P3 | (24 hrs) U2KC3P4 | (15 hrs) U2KC3P5 | (27 hrs) U2KC3P6 | (23 hrs) U2KC3P7 | (24 hrs) U2KC3P8 | (24 hrs) U2KC3P9 |
| U3 | KC1 | (23 hrs) U3KC1P1 | (18 hrs) U3KC1P2 | (19 hrs) U3KC1P3 | (22 hrs) U3KC1P4 | (24 hrs) U3KC1P5 | (19 hrs) U3KC1P6 | (19 hrs) U3KC1P7 | (20 hrs) U3KC1P8 | (20 hrs) U3KC1P9 |
| | KC2 | (22 hrs) U3KC2P1 | (20 hrs) U3KC2P2 | (15 hrs) U3KC2P3 | (19 hrs) U3KC2P4 | (23 hrs) U3KC2P5 | (15 hrs) U3KC2P6 | (20 hrs) U3KC2P7 | (22 hrs) U3KC2P8 | (22 hrs) U3KC2P9 |
| | KC3 | (24 hrs) U3KC3P1 | (23 hrs) U3KC3P2 | (24 hrs) U3KC3P3 | (24 hrs) U3KC3P4 | (24 hrs) U3KC3P5 | (18 hrs) U3KC3P6 | (24 hrs) U3KC3P7 | (24 hrs) U3KC3P8 | (24 hrs) U3KC3P9 |

หมายเหตุ : 1. P1 – P9 คือ รูปแบบของแบบจำลองตอม่อ กรณีศึกษาต่างๆ

2. ข้อมูลคลื่นในแต่ละกรณีศึกษาตามการเปลี่ยนแปลงค่า *KC* และ $U_c$ แสดงไว้ในภาคผนวก ข-2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง4-2 เงื่อนไขและผลการกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็ม (คลื่นเคลื่อนที่ตามกระแสน้ำ)

| Test[1] serie of $t_s$ ($x\,y_0$) | Run No. | $H_s$ (cm | Significa frequenc of wave $f_s$ ($s^{-1}$) | Bed[2] orbital velocity $U_m$ (cm/s) | Undisturbed depth-current $V$ (cm/s) | Undisturbed[3] current velocity at distance $D/2$ from bed $U_c$ (cm/s) | Keulegan Carpenter number $KC$ | $U_c/(U_c+U_m)$ $U_{cw}$ | Nondimensional equilibrium scour depth $y_s/D$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 25 | 0.91 | 17.8 | 5.1 | 4.8 | 14.0 | 0.21 | 0.64 |
| | 2 | 25 | 0.91 | 18.2 | 10.1 | 9.5 | 14.3 | 0.34 | 1.71 |
| | 3 | 25 | 0.91 | 18.0 | 15.0 | 14.2 | 14.2 | 0.44 | 2.18 |
| | 4 | 18 | 0.77 | 32.6 | 5.0 | 4.6 | 30.3 | 0.12 | 1.00 |
| 0.2 | 5 | 18 | 0.77 | 32.9 | 10.1 | 9.4 | 30.6 | 0.22 | 2.00 |
| | 6 | 18 | 0.77 | 32.5 | 15.1 | 14.5 | 30.2 | 0.31 | 2.70 |
| | 7 | 14 | 0.63 | 36.9 | 5.0 | 4.8 | 42.2 | 0.12 | 1.28 |
| | 8 | 14 | 0.63 | 37.2 | 10.0 | 9.5 | 42.5 | 0.20 | 2.43 |
| | 9 | 14 | 0.63 | 37.3 | 15.0 | 14.4 | 42.6 | 0.28 | 3.25 |
| | 10 | 25 | 0.91 | 17.8 | 5.1 | 4.8 | 14.0 | 0.21 | 0.71 |
| | 11 | 25 | 0.91 | 18.2 | 10.1 | 9.5 | 14.3 | 0.34 | 1.86 |
| | 12 | 25 | 0.91 | 18.0 | 15.0 | 14.2 | 14.2 | 0.44 | 2.20 |
| | 13 | 18 | 0.77 | 32.6 | 5.0 | 4.6 | 30.3 | 0.12 | 1.13 |
| 0.3 | 14 | 18 | 0.77 | 32.9 | 10.1 | 9.4 | 30.6 | 0.22 | 2.29 |
| | 15 | 18 | 0.77 | 32.5 | 15.1 | 14.5 | 30.2 | 0.31 | 2.72 |
| | 16 | 14 | 0.63 | 36.9 | 5.0 | 4.8 | 42.2 | 0.12 | 1.34 |
| | 17 | 14 | 0.63 | 37.2 | 10.0 | 9.5 | 42.5 | 0.20 | 2.50 |
| | 18 | 14 | 0.63 | 37.3 | 15.0 | 14.4 | 42.6 | 0.28 | 3.28 |
| | 19 | 25 | 0.91 | 17.8 | 5.1 | 4.8 | 14.0 | 0.21 | 0.93 |
| | 20 | 25 | 0.91 | 18.2 | 10.1 | 9.5 | 14.3 | 0.34 | 2.14 |
| | 21 | 25 | 0.91 | 18.0 | 15.0 | 14.2 | 14.2 | 0.44 | 2.36 |
| | 22 | 18 | 0.77 | 32.6 | 5.0 | 4.6 | 30.3 | 0.12 | 1.20 |
| 0.4 | 23 | 18 | 0.77 | 32.9 | 10.1 | 9.4 | 30.6 | 0.22 | 2.36 |
| | 24 | 18 | 0.77 | 32.5 | 15.1 | 14.5 | 30.2 | 0.31 | 2.75 |
| | 25 | 14 | 0.63 | 36.9 | 5.0 | 4.8 | 42.2 | 0.12 | 1.41 |
| | 26 | 14 | 0.63 | 37.2 | 10.0 | 9.5 | 42.5 | 0.20 | 2.57 |
| | 27 | 14 | 0.63 | 37.3 | 15.0 | 14.4 | 42.6 | 0.28 | 3.29 |
| | 28 | 25 | 0.91 | 17.8 | 5.1 | 4.8 | 14.0 | 0.21 | 1.14 |
| | 29 | 25 | 0.91 | 18.2 | 10.1 | 9.5 | 14.3 | 0.34 | 2.21 |
| | 30 | 25 | 0.91 | 18.0 | 15.0 | 14.2 | 14.2 | 0.44 | 2.43 |
| | 31 | 18 | 0.77 | 32.6 | 5.0 | 4.6 | 30.3 | 0.12 | 1.41 |
| 0.5 | 32 | 18 | 0.77 | 32.9 | 10.1 | 9.4 | 30.6 | 0.22 | 2.50 |
| | 33 | 18 | 0.77 | 32.5 | 15.1 | 14.5 | 30.2 | 0.31 | 2.80 |
| | 34 | 14 | 0.63 | 36.9 | 5.0 | 4.8 | 42.2 | 0.12 | 1.70 |
| | 35 | 14 | 0.63 | 37.2 | 10.0 | 9.5 | 42.5 | 0.20 | 2.71 |
| | 36 | 14 | 0.63 | 37.3 | 15.0 | 14.4 | 42.6 | 0.28 | 3.36 |
| | 37 | 25 | 0.91 | 17.8 | 5.1 | 4.8 | 14.0 | 0.21 | 1.29 |
| | 38 | 25 | 0.91 | 18.2 | 10.1 | 9.5 | 14.3 | 0.34 | 2.29 |
| | 39 | 25 | 0.91 | 18.0 | 15.0 | 14.2 | 14.2 | 0.44 | 2.50 |
| | 40 | 18 | 0.77 | 32.6 | 5.0 | 4.6 | 30.3 | 0.12 | 1.43 |
| 0.6 | 41 | 18 | 0.77 | 32.9 | 10.1 | 9.4 | 30.6 | 0.22 | 2.64 |
| | 42 | 18 | 0.77 | 32.5 | 15.1 | 14.5 | 30.2 | 0.31 | 2.87 |
| | 43 | 14 | 0.63 | 36.9 | 5.0 | 4.8 | 42.2 | 0.12 | 1.80 |
| | 44 | 14 | 0.63 | 37.2 | 10.0 | 9.5 | 42.5 | 0.20 | 2.79 |
| | 45 | 14 | 0.63 | 37.3 | 15.0 | 14.4 | 42.6 | 0.28 | 3.50 |
| | 46 | 25 | 0.91 | 17.8 | 5.1 | 4.8 | 14.0 | 0.21 | 1.93 |
| | 47 | 25 | 0.91 | 18.2 | 10.1 | 9.5 | 14.3 | 0.34 | 2.43 |
| | 48 | 25 | 0.91 | 18.0 | 15.0 | 14.2 | 14.2 | 0.44 | 2.71 |
| | 49 | 18 | 0.77 | 32.6 | 5.0 | 4.6 | 30.3 | 0.12 | 2.29 |
| 0.7 | 50 | 18 | 0.77 | 32.9 | 10.1 | 9.4 | 30.6 | 0.22 | 2.79 |
| | 51 | 18 | 0.77 | 32.5 | 15.1 | 14.5 | 30.2 | 0.31 | 3.20 |
| | 52 | 14 | 0.63 | 36.9 | 5.0 | 4.8 | 42.2 | 0.12 | 2.50 |
| | 53 | 14 | 0.63 | 37.2 | 10.0 | 9.5 | 42.5 | 0.20 | 3.00 |
| | 54 | 14 | 0.63 | 37.3 | 15.0 | 14.4 | 42.6 | 0.28 | 3.79 |

หมายเหตุ : ความลึกการไหล ($y_0$) = 300 มม. [1]ความหนาที่จมน้ำของ pile cap ($t_s$) [3]ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม ($D$) = 14 มม.

ขนาดเม็ดทรายท้องน้ำเฉลี่ย ($d_{50}$) = 0.25 มม. [2]ค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของอนุภาคคลื่น ระหว่างค่าในทิศทางไปและกลับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง4-2 (ต่อ) เงื่อนไขและผลการกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็ม (คลื่นเคลื่อนที่ตามกระแสน้ำ)

| Test[1] serie of $t_s$ (x $y_0$) | Run No. | $H_s$ (cm | Significa frequenc of wave $f_s$ ($s^{-1}$) | Bed[2] orbital velocity $U_m$ (cm/s) | Undisturbed depth-current $V$ (cm/s) | Undisturbed[3] current velocity at distance *D/2* from bed $U_c$ (cm/s) | Keulegan Carpenter number *KC* | $U_c/(U_c+U_m)$ $U_{cw}$ | Nondimensional equilibrium scour depth $y_s/D$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 55 | 25 | 0.91 | 17.8 | 5.1 | 4.8 | 14.0 | 0.21 | 1.53 |
| | 56 | 25 | 0.91 | 18.2 | 10.1 | 9.5 | 14.3 | 0.34 | 2.36 |
| | 57 | 25 | 0.91 | 18.0 | 15.0 | 14.2 | 14.2 | 0.44 | 2.57 |
| | 58 | 18 | 0.77 | 32.6 | 5.0 | 4.6 | 30.3 | 0.12 | 1.82 |
| 0.8 | 59 | 18 | 0.77 | 32.9 | 10.1 | 9.4 | 30.6 | 0.22 | 2.71 |
| | 60 | 18 | 0.77 | 32.5 | 15.1 | 14.5 | 30.2 | 0.31 | 3.00 |
| | 61 | 14 | 0.63 | 36.9 | 5.0 | 4.8 | 42.2 | 0.12 | 2.10 |
| | 62 | 14 | 0.63 | 37.2 | 10.0 | 9.5 | 42.5 | 0.20 | 2.86 |
| | 63 | 14 | 0.63 | 37.3 | 15.0 | 14.4 | 42.6 | 0.28 | 3.51 |
| | 64 | 25 | 0.91 | 17.8 | 5.1 | 4.8 | 14.0 | 0.21 | 2.00 |
| | 65 | 25 | 0.91 | 18.2 | 10.1 | 9.5 | 14.3 | 0.34 | 2.50 |
| | 66 | 25 | 0.91 | 18.0 | 15.0 | 14.2 | 14.2 | 0.44 | 2.86 |
| | 67 | 18 | 0.77 | 32.6 | 5.0 | 4.6 | 30.3 | 0.12 | 2.21 |
| 0.9 | 68 | 18 | 0.77 | 32.9 | 10.1 | 9.4 | 30.6 | 0.22 | 2.79 |
| | 69 | 18 | 0.77 | 32.5 | 15.1 | 14.5 | 30.2 | 0.31 | 3.14 |
| | 70 | 14 | 0.63 | 36.9 | 5.0 | 4.8 | 42.2 | 0.12 | 2.43 |
| | 71 | 14 | 0.63 | 37.2 | 10.0 | 9.5 | 42.5 | 0.20 | 2.93 |
| | 72 | 14 | 0.63 | 37.3 | 15.0 | 14.4 | 42.6 | 0.28 | 3.57 |
| | 73 | 25 | 0.91 | 17.8 | 5.1 | 4.8 | 14.0 | 0.21 | 2.14 |
| | 74 | 25 | 0.91 | 18.2 | 10.1 | 9.5 | 14.3 | 0.34 | 2.71 |
| | 75 | 25 | 0.91 | 18.0 | 15.0 | 14.2 | 14.2 | 0.44 | 2.93 |
| | 76 | 18 | 0.77 | 32.6 | 5.0 | 4.6 | 30.3 | 0.12 | 2.36 |
| 1.0 | 77 | 18 | 0.77 | 32.9 | 10.1 | 9.4 | 30.6 | 0.22 | 2.86 |
| | 78 | 18 | 0.77 | 32.5 | 15.1 | 14.5 | 30.2 | 0.31 | 3.29 |
| | 79 | 14 | 0.63 | 36.9 | 5.0 | 4.8 | 42.2 | 0.12 | 2.57 |
| | 80 | 14 | 0.63 | 37.2 | 10.0 | 9.5 | 42.5 | 0.20 | 3.29 |
| | 81 | 14 | 0.63 | 37.3 | 15.0 | 14.4 | 42.6 | 0.28 | 3.64 |

หมายเหตุ : ความลึกการไหล ($y_0$) = 300 มม. [1]ความหนาที่จมน้ำของ pile cap ($t_s$) [3]ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม (*D*) = 14 มม.

ขนาดเม็ดทรายท้องน้ำเฉลี่ย ($d_{50}$) = 0.25 มม. [2]ค่าเฉลี่ยของความเร็วสูงสุดของอนุภาคคลื่น ระหว่างค่าในทิศทางไปและกลับ

# บทที่ 5

# ผลการศึกษา

ดังกล่าวมาข้างต้นแล้วว่า การศึกษานี้มุ่งเน้นถึงผลของความหนาของครอบหัวเข็มของฐานรากเข็มกลุ่ม ที่มีระดับน้ำอยู่ในระยะความหนาของครอบหัวเข็ม ต่อความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่ม ภายใต้การกระทำของคลื่นและกระแสน้ำร่วมกัน ดังนั้นจากเทคนิคการวิเคราะห์มิติ (dimensional analysis) ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์กันต่างๆ คือ

$$\frac{y_s}{D},\ \frac{U_c}{(U_c+U_m)},\ \frac{U_m}{f_s D}\ \text{และ}\ \frac{t_s}{y_0}$$

กลุ่มตัวแปร ($U_m/f_sD$) ก็คือ Keulegan-Carpenter number ($KC$) ซึ่งเป็นกลุ่มตัวแปรที่แสดงถึงคุณลักษณะของคลื่น ส่วนกลุ่มตัวแปร [$U_m/(U_C+U_m)$] หรือ $U_{cw}$ เป็นกลุ่มตัวแปรที่แสดงถึง สัดส่วนของการเคลื่อนตัวของน้ำ เนื่องจากคลื่นและกระแสน้ำ กลุ่มตัวแปร ($y_S/D$) แสดงถึงค่าความลึกหลุมกัดเซาะสัมพัทธ์กับขนาดเสาเข็ม และ ($t_s/y_0$) เป็นกลุ่มตัวแปรแสดงถึงความหนาครอบหัวเข็มในน้ำสัมพัทธ์กับความลึกน้ำ โดยเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรดังสมการ (2-5) ได้เป็น

$$\frac{y_s}{D} = \Phi\left[U_{cw}, KC, \frac{t_s}{y_0}\right] \tag{5-1}$$

โดยมีตัวแปรของปัญหา ซึ่งเป็นตัวแปรตามคือ ($y_S/D$) และตัวแปรอิสระคือ $U_{cw}$, $KC$ และ ($t_s/y_0$) ดังนั้นในการวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรของปัญหา ($y_S/D$) และตัวแปรที่เกี่ยวข้อง [$U_{cw}$, $KC$ และ ($t_s/y_0$)] ได้พิจารณาตามแนวทางการวิเคราะห์มิติดังกล่าว โดยแยกการวิเคราะห์แต่ละตัวแปร และหาความสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปร และความสัมพันธ์รวมทั้งหมดในขั้นสุดท้าย นอกจากนี้ ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนี้ ยังได้ใช้ข้อมูลที่ได้จากการเฝ้าสังเกตพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของน้ำ และพฤติกรรมการกัดเซาะรอบฐานรากเสาเข็มกลุ่ม ประกอบด้วย

## 5.1 อิทธิพลของคลื่นและกระแสน้ำต่อความลึกหลุมกัดเซาะ

ในหัวข้อนี้ ได้วิเคราะห์ถึงกลไกการกัดเซาะเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลและความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวกับคุณลักษณะของคลื่นและกระแสน้ำที่มีผลต่อการกัดเซาะ โดยรายละเอียดในการพิจารณากล่าวถึงผลของ คลื่น กระแสน้ำ และคลื่นรวมกับกระแสน้ำ ต่อลักษณะและขนาดของการกัดเซาะ ดังกล่าวต่อไปนี้

5.1.1 <u>กลไกการกัดเซาะเนื่องจากคลื่นและกระแสน้ำ</u>

จากการเฝ้าสังเกตกลไกการกัดเซาะที่เกิดขึ้นตามการศึกษานี้อย่างต่อเนื่อง ด้วยกล้องวีดีโอและกล้องถ่ายภาพนิ่ง จะเห็นการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลเป็น 2 ลักษณะหลักๆตามตัวแปรการไหลที่กระทำ คือ คลื่นและกระแสน้ำ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดรูปแบบการกัดเซาะเป็นสองรูปแบบที่เสริมกันดังผลการศึกษาพบว่า

กรณีการกัดเซาะเกิดขึ้นจากอิทธิพลของกระแสน้ำหรืออิทธิพลของคลื่นที่ค่า *KC* สูงๆ เป็นผลมาจากการไหลหมุนวน (vortex system) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการไหลแบบกลิ้งม้วนตัวรอบเสาเข็ม (surface roller) และไหลพุ่งลงด้านล่าง (down flow) ช่วยสนับสนุนให้เกิดการกัดเซาะ (scouring) ที่ผิวเสาเข็มด้านเหนือน้ำขณะกระทบกับผิวเสาเข็ม และเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดทิศทางการไหลวนกลับในแนวราบที่ท้องน้ำ วัสดุท้องน้ำจะเคลื่อนที่โดยการไหลกลิ้งวนภายในหลุมกัดเซาะและหมุนวนรอบด้านข้างเสาเข็มในแนวราบ โดยสังเกตเห็นลักษณะการไหลแบบม้วนวนรูปเกือกม้า (horseshoe vortex) เคลื่อนที่ผ่านด้านข้างเสาเข็มไปทางด้านท้ายน้ำ และ

กรณีการกัดเซาะเกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของคลื่นที่ค่า *KC* ต่ำๆ ซึ่งจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งด้านหลังของเสาเข็ม เนื่องจากผลของวงโคจรของอนุภาคคลื่นเคลื่อนที่ผ่านเสาเข็ม ทำให้เกิดน้ำวนบริเวณอับกระแสน้ำจากการบดบังของเสาเข็ม (lee wake vortices) ซึ่งเป็นพฤติกรรมการไหลที่มีลักษณะเป็นน้ำวนเคลื่อนที่ขึ้น-ลงในแนวดิ่งจากท้องน้ำ เกิดการกวนเม็ดตะกอนท้องน้ำบริเวณด้านอับกระแสน้ำทางด้านหลัง (downstream) ของเสาเข็ม ทำให้ตะกอนท้องน้ำหมุนวนฟุ้งกระจาย ยกตัวลอยขึ้น – ลง จากท้องน้ำ และเคลื่อนที่หมุนวนไปตามทิศการไหลของกระแสน้ำในลักษณะการคืบไปทีละน้อยตามจังหวะการเคลื่อนที่หมุนวนของอนุภาคน้ำ ตัวอย่างรูปภาพแสดงพฤติกรรมการกัดเซาะจากการศึกษานี้ดังแสดงในรูป 5-1

5.1.2 <u>ผลของการรวมกันระหว่างคลื่นและกระแสน้ำ</u> (พารามิเตอร์ $U_{cw}$)

ผลจากการรวมกันระหว่างคลื่นและกระแสน้ำต่อค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด ($y_s$) รอบเสาเข็มกลุ่มที่มีความหนาของครอบหัวเข็ม (pile cap) ต่างกัน 9 กรณีศึกษา สามารถอธิบายได้ตามการนำเสนอผลจากการทดลองในรูปของกราฟความสัมพันธ์ตามรูป 5-2 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของฟังชันก์ของค่าพารามิเตอร์ $U_{cw}$ ต่อความลึกหลุมกัดเซาะ ในรูปประกอบด้วยเส้นกราฟจุดข้อมูลโปร่ง 9 ชุดตามการเปลี่ยนแปลงความหนาของครอบหัวเข็มที่ได้จากการศึกษานี้ และจุดทึบเป็นข้อมูลที่ได้จากการคำนวณตามสมการ HEC-18 ในกรณีศึกษาผลการกัดเซาะเนื่องจากกระแสน้ำอย่างเดียว [Federal Highway Administration, FHWA (2001)] เพื่อเพิ่มเติมข้อมูลจาก

การศึกษานี้ ให้สามารถเห็นแนวโน้มของผลการทดลองได้ชัดเจนขึ้น กรณีพิจารณาถึงแนวโน้มทางด้านค่า $U_{cw}$ เข้าใกล้ค่าเท่ากับ 1.0 (current-alone) จากความสัมพันธ์ในรูป 5-2 แสดงให้เห็นอิทธิพลต่างๆตามการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้ (การวิเคราะห์พิจารณาเปรียบเทียบผลของการรวมกันระหว่างคลื่นและกระแสน้ำตามพารามิเตอร์ $U_{cw}$ ที่ค่าความหนาของครอบหัวเข็มเดียวกัน)

1) ในรูป 5-2 ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ $U_{cw}= U_c/(U_c+U_m)$ กำหนดให้ค่า $U_m$ คงที่ค่าหนึ่ง และเปลี่ยนแปลงค่า $U_c$ ขนาดต่างๆ ซึ่งตามความสัมพันธ์นี้แสดงให้เห็นถึงกรณีเมื่อ $U_{cw} \rightarrow 0$ หมายถึง สภาวะการกัดเซาะที่เข้าสู่สภาวะที่เกิดจากอิทธิพลของคลื่นอย่างเดียว (wave-alone) ซึ่งจากรูปความสัมพันธ์พบว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงตามความลึกหลุมกัดเซาะมีลักษณะลดลงในอัตราที่สูงตามการลดลงของค่า $U_{cw}$ และในทางตรงกันข้ามกรณีที่ $U_{cw} \rightarrow 1$ ก็จะเห็นถึงนัยสำคัญของสภาวะที่คล้ายมีอิทธิพลของกระแสน้ำอย่างเดียว (current-alone) ซึ่งจากรูปความสัมพันธ์พบว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงตามความลึกหลุมกัดเซาะมีลักษณะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ค่อยๆลดลงเรื่อยๆ ตามการเพิ่มของค่า $U_{cw}$ จนเข้าสู่ค่าความลึกหลุมกัดเซาะค่าหนึ่งที่สภาวะ steady-current ซึ่ง $U_{cw}$ มีค่าเท่ากับ 1.0

2) ตามรูป 5-2 ชี้ให้เห็นว่าที่ค่า $U_{cw}$ ต่ำๆ อิทธิพลของคลื่นค่อนข้างมีนัยสำคัญต่อค่าความลึกหลุมกัดเซาะ ซึ่งจากข้อมูลในรูปจะเห็นอัตราการเพิ่มความลึกหลุมกัดเซาะค่อนข้างชัดเชน และที่ค่า $U_{cw}$ เพิ่มขึ้น คลื่นจะมีอิทธิพลต่ออัตราการเพิ่มความลึกหลุมกัดเซาะแบบค่อยๆลดลงที่ค่า $U_{cw}$ สูงขึ้น ซึ่งมีค่าโดยประมาณตั้งแต่ 0.6 ขึ้นไป ดังจะเห็นลักษณะความชันของเส้นกราฟค่อยๆลดลง

3) จากรูป 5-2 พบว่าความลึกหลุมกัดเซาะที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของกระแสน้ำในส่วนประกอบของการไหลเป็นสำคัญนั้น เกิดขึ้นที่ค่า $U_{cw}$ มีค่าตั้งแต่ 0.6 ขึ้นไปโดยพิจารณาจากค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่ค่า $U_{cw}$ ตั้งแต่ค่าดังกล่าวขึ้นไปนั้น มีค่าความลึกหลุมกัดเซาะเริ่มเข้าใกล้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่กรณีกระแสน้ำอย่างเดียว (current – alone) ซึ่งจะเห็นว่ามีแนวโน้มของค่าความลึกหลุมกัดเซาะโดยประมาณใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดย HEC-18 ที่สภาวะการกัดเซาะภายใต้กระแสน้ำอย่างเดียว

5.1.3 <u>อิทธิพลของคลื่นในรูปของ Keulegan-Carpenter number</u> (*KC*)

ผลการศึกษาดังรูป 5-3 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของ Keulegan-Carpenter number (*KC*) ต่อความลึกหลุมกัดเซาะ ($y_s$) รอบเสาเข็มกลุ่มที่มีความหนาของ pile cap ต่างกัน 9 ขนาด ในรูปประกอบด้วยเส้นกราฟจุดข้อมูลโปร่ง 3 ชุดตามการเปลี่ยนแปลงความเร็วของกระแสน้ำที่ได้จาก

การศึกษานี้ และจุดทึบเป็นข้อมูลที่ได้จากการคำนวณตามสมการ HEC-18 ในกรณีศึกษาผลการกัดเซาะเนื่องจากกระแสน้ำอย่างเดียว อ้างอิง [Federal Highway Administration, FHWA (2001)] เพื่อเพิ่มเติมข้อมูลจากการศึกษานี้ ให้สามารถเห็นแนวโน้มของผลการทดลองได้ชัดเจนขึ้น กรณีพิจารณาถึงแนวโน้มทางด้านค่า *KC* มากๆ จนเข้าสู่สภาวะ steady –current ($KC \rightarrow \infty$) ซึ่งจากรูปความสัมพันธ์แสดงให้เห็นอิทธิพลต่างๆตามการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้ (การวิเคราะห์พิจารณาเปรียบเทียบอิทธิพลของคลื่นในรูปของ Keulegan-Carpenter number (*KC*) ที่ค่าความหนาของครอบหัวเข็มเดียวกัน)

1) จากการวิเคราะห์ตามกระบวนการ การเกิดการกัดเซาะเนื่องจากอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงสภาวะการไหล 3 ส่วนหลักๆ ดังกล่าวในข้างต้น คือ

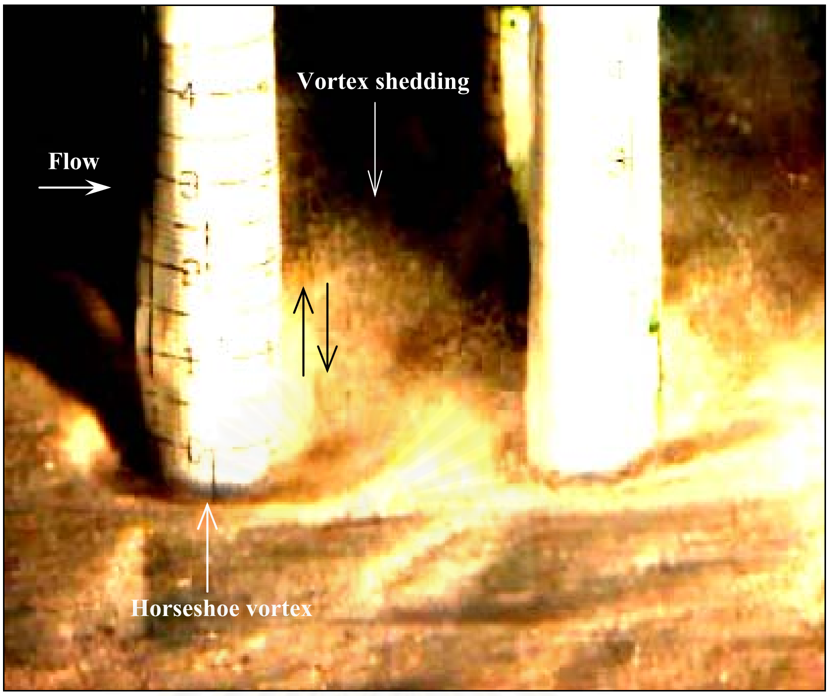
- horseshoe vortex combined with the downflow
- contraction of streamlines และ
- vortex shedding

ผลการทดลองพบว่าในสองส่วนแรกเกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของกระแสน้ำหรืออิทธิพลของคลื่นที่ค่า *KC* สูงๆ และส่วนสุดท้าย (vortex shedding) เกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของคลื่นที่ค่า *KC* ต่ำๆ

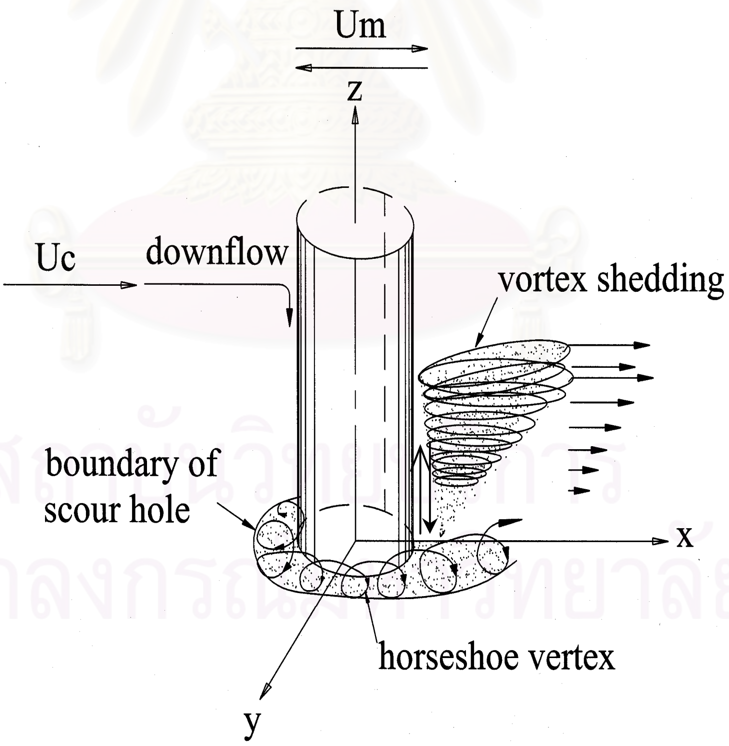
จากรูป 5-3 จะเห็นว่า อิทธิพลของสภาวะการไหลแบบ vortex shedding (อิทธิพลของคลื่น) ต่อการกัดเซาะรอบตอม่อสะพานแบบที่ 1-9 อยู่ในช่วงค่า *KC* ต่ำกว่า 300 และที่ค่า *KC* มากขึ้น อิทธิพลของคลื่นจะค่อยๆลดลงเรื่อยๆจนคงเหลือแต่อิทธิพลของสภาวะการไหลแบบ horseshoe vortex รวมกับ downflow และ contraction of streamlines (อิทธิพลของกระแสน้ำ)

2) พิจารณาแนวโน้มของค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดตามการเปลี่ยนแปลงค่า *KC* จากรูป 5-3 พบว่าแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความลึกหลุมกัดเซาะรอบตอม่อสะพานแบบที่ 1-9 ตามการเปลี่ยนแปลงค่า *KC* ที่ได้จากการวัดในการศึกษานี้ มีแนวโน้มอัตราการเพิ่มขึ้นค่อนข้างสูงในช่วงค่า *KC* ต่ำกว่า 300 และอัตราการเพิ่มค่อยๆลดลงจนมีค่าความลึกหลุมกัดเซาะเกือบคงที่ที่ค่า *KC* มากกว่า 300 ขึ้นไป

3) จุดเริ่มการกัดเซาะ สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของค่า *KC* กับรูปแบบตอม่อตามกรณีศึกษา จากรูปที่ 5-3 พบว่า จากข้อมูลการวัดในแบบจำลองกรณีตอม่อที่มีความหนาของครอบหัวเข็ม (pile cap) น้อยๆ จะมีแนวโน้มเริ่มเกิดการกัดเซาะที่ค่า *KC* สูงกว่ากรณีที่มีความหนาของครอบหัวเข็มมากๆ

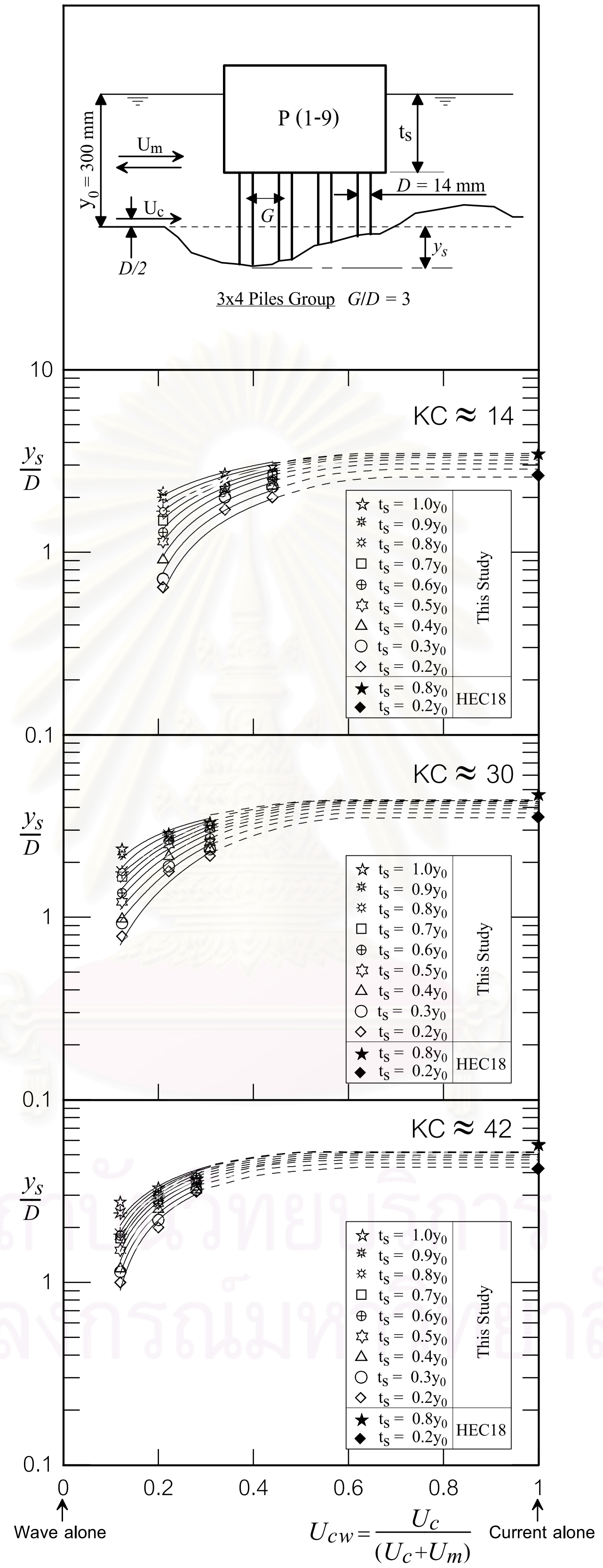



(a) รูปแบบการกัดเซาะจากการบันทึกวีดีโอ

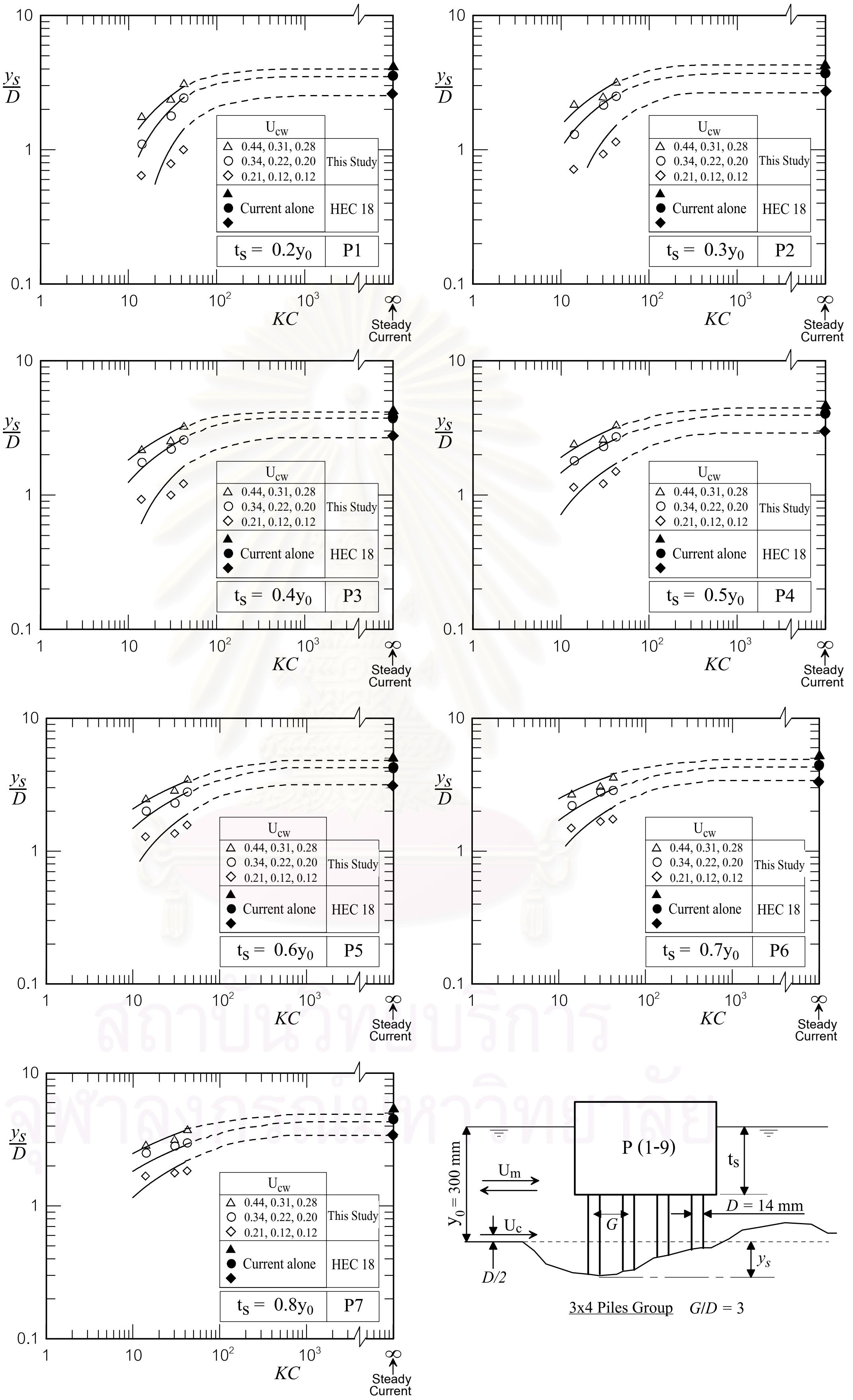



(b) ภาพสเกต รูปแบบการกัดเซาะ

รูป 5-1 ตัวอย่างภาพแสดงกลไกการกัดเซาะเนื่องจากอิทธิพลของคลื่น และกระแสน้ำที่กรณีศึกษา P3, $KC$ = 14, $U_C$ = 4.8 ซม./วินาที

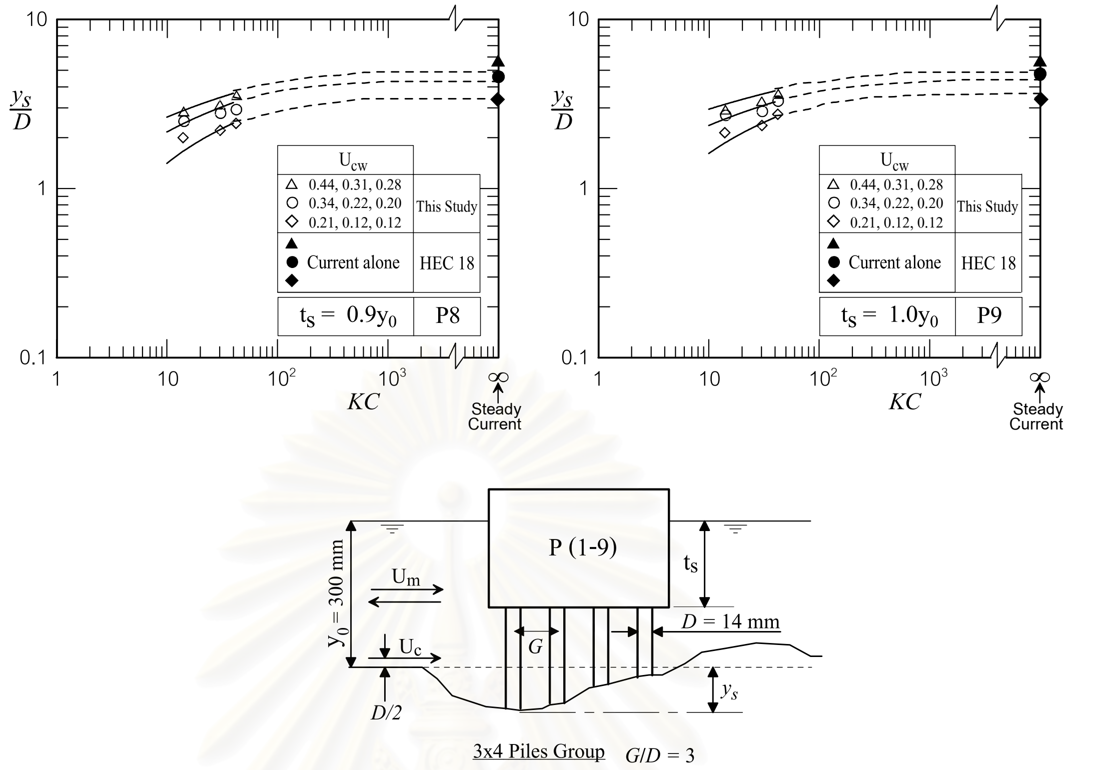



รูป 5-2 ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ $U_{cw}$ ต่อความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด ที่ค่า *KC* ต่างๆ




รูป 5-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดกับ Keulegan-Carpenter number (*KC*)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




รูป 5-3 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับ Keulegan-Carpenter number (*KC*)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการทดลองการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาครอบหัวเข็มของตอม่อเทียบกับความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) เท่ากับ 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 พบว่ามีแนวโน้มเริ่มเกิดการกัดเซาะที่ช่วงค่า *KC* เท่ากับ (20 – 9), (15 – 7), (10 – 5), (9 – 4), (8– 3), (7 – 2.5), (5 – 2), (4 -1.5) และ (3.0 -1.0) ตามลำดับการเปลี่ยนแปลงความหนาครอบหัวเข็ม

4) ที่กรณีลักษณะคลื่นเข้าใกล้สภาวะ steady–current ($KC \rightarrow \infty$) ค่าความลึกการกัดเซาะจะมีค่าเข้าใกล้ค่าสูงสุดค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่เกิดจากความเร็วกระแสน้ำค่าหนึ่งรวมกับความเร็วอนุภาคหมุนวนของคลื่นที่มีพฤติกรรมคล้ายกระแสน้ำค่าหนึ่ง ซึ่งมีค่าโดยประมาณใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดย HEC-18 ที่สภาวะการกัดเซาะภายใต้กระแสน้ำอย่างเดียว (ตัวอย่างการคำนวณดังแสดงในภาคผนวก ฉ)

จากการทดลองการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาครอบหัวเข็มของตอม่อเทียบกับความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) เท่ากับ 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 ตามกรณีศึกษาดังรูป 5-3 พบว่ากรณีที่ค่า $KC \rightarrow \infty$ ค่า $y_s/D$ จะเข้าใกล้ค่าโดยประมาณที่อยู่ในช่วง (2.6- 4.2), (2.7 – 4.3), (2.8 – 4.4), (3.0 – 4.7), (3.1- 5.0), (3.3 – 5.3), (3.4 – 5.4), (3.45 – 5.6) และ (3.5 – 5.7) ตามลำดับ

## 5.2 อิทธิพลของครอบหัวเข็มต่อความลึกหลุมกัดเซาะ

ในหัวข้อนี้ ได้วิเคราะห์ถึงผลการศึกษา จากการแบ่งการทดลองออกเป็นการทดลองย่อยๆ 9 กรณีศึกษา ตามการเปลี่ยนแปลงความหนาของครอบหัวเข็ม เพื่อศึกษาถึงผลของอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำเทียบกับความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) ต่อความลึกหลุมกัดเซาะ ตามการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

### 5.2.1 <u>ผลของครอบหัวเข็มต่อการเริ่มเกิดการกัดเซาะ</u>

จากผลการศึกษานี้พบว่า ครอบหัวเข็มที่มีความหนาในน้ำน้อยๆ จะส่งผลให้เริ่มเกิดการกัดเซาะได้ ที่คุณลักษณะของคลื่นตามความสัมพันธ์ในรูปของค่า *KC* ที่มีค่าสูงกว่ากรณีที่ครอบหัวเข็มมีความหนามากๆ ดังค่า *KC* ที่ทำให้เริ่มเกิดการกัดเซาะได้ในการศึกษานี้ แสดงไว้ในการวิเคราะห์อิทธิพลของคลื่นในรูปของค่า *KC* หัวข้อ (5.1.3)

นอกจากอิทธิพลของครอบหัวเข็มที่มีผลต่อค่า *KC* ที่ทำให้เริ่มเกิดการกัดเซาะได้แล้ว อีกตัวแปรหนึ่งที่มีผลนั่นก็คือ ค่าความเร็วกระแสน้ำที่เป็นส่วนประกอบของการไหล ที่ประกอบด้วยคลื่นและกระแสน้ำ ซึ่งเมื่อพิจารณาในรูปของฟังก์ชั่นการรวมกันระหว่างคลื่นและกระแสน้ำ ($U_{cw}$)

พบว่ากรณีการไหลที่มีค่า $U_{cw}$ มากซึ่งหมายถึง มีค่าความเร็วการไหลของกระแสน้ำในส่วนประกอบคลื่นและกระแสน้ำมาก จะทำให้เริ่มเกิดการกัดเซาะรอบเสาเข็มได้ที่ค่า *KC* ต่ำกว่ากรณีการไหลที่มีค่า $U_{cw}$ ต่ำๆ

5.2.2 <u>อัตราการเพิ่มความลึกหลุมกัดเซาะเนื่องจากความหนาครอบหัวเข็ม</u>

จากผลการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) พบว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงความลึกหลุมกัดเซาะ จะมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความลึกหลุมกัดเซาะ ในอัตราการเพิ่มที่สูงในช่วงค่าอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) น้อยๆ และอัตราการเพิ่มความลึกหลุมกัดเซาะจะมีอัตราการเพิ่มที่ค่อยๆลดลงเรื่อยๆ เมื่ออัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) เพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนมีค่าเท่ากับ 1.0

## 5.3 การประมาณความลึกหลุมกัดเซาะ

การคาดคะเนหาค่าความลึกหลุมกัดเซาะโดยประมาณ สามารถพิจารณาตามตัวแปรการไหลและรูปแบบโครงสร้างตอม่อที่ทำการออกแบบ การหาค่าความลึกหลุมกัดเซาะโดยประมาณจากผลการทดลองในการศึกษานี้ เพื่อประกอบการพิจารณาออกแบบโครงสร้างตอม่อในรูปแบบต่างๆ ที่กำหนดตามการศึกษานี้ สามารถพิจารณาแยกตามความสัมพันธ์ของค่าความลึกหลุมกัดเซาะ กับตัวแปรต่างๆดังอธิบายไว้ข้างต้น ตามสมการความสัมพันธ์ (5-1) ซึ่งค่าความลึกหลุมกัดเซาะเทียบกับขนาดเสาเข็มมีความสัมพันธ์กับตัวแปรต่างๆดังนี้คือ

$$\frac{y_s}{D} = \Phi\left[U_{cw}, KC, \frac{t_s}{y_0}\right] \qquad (5\text{-}2)$$

ดังนั้นจากความสัมพันธ์ 5-2 สามารถพิจารณา เพื่อประมาณหรือคาดคะเนค่าความลึกหลุมกัดเซาะ ตามรูปความสัมพันธ์ที่แสดงถึงแนวโน้มของค่าความลึกหลุมกัดเซาะกับตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการศึกษานี้ได้ดังนี้

5.3.1 <u>เงื่อนไขในการประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะ</u>

ผลการศึกษานี้ใช้ในการประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะ กรณีของการกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มแบบ 3 X 4 รูปทรงกระบอกตั้งตรงในแนวดิ่ง ระยะช่วงเสาเข็มเท่ากับ 3 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม และ ครอบหัวเข็มรูปทรงสี่เหลี่ยมตัดมุม และเพื่อศึกษาถึงผลของความ

หนาของครอบหัวเข็มต่อความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มกลุ่ม ได้ใช้ขนาดของครอบหัวเข็มที่มีอัตราส่วนของความหนาครอบหัวเข็มที่จมอยู่ในน้ำต่อความลึกของน้ำ ($t_s/y_0$) ที่แตกต่างกัน 9 ค่า ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 1.0 ทดลองภายใต้คลื่นและกระแสน้ำกระทำร่วมกัน โดยมีเงื่อนไขของสภาวะการไหลเริ่มต้นของกระแสน้ำเป็นการไหลแบบคงที่ไม่มีตะกอนปน และคลื่นที่กระทำเป็นคลื่นไม่สม่ำเสมอเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับกระแสน้ำ

5.3.2 <u>การประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะจากผลการศึกษานี้</u>

จากผลการศึกษานี้ ได้ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการกัดเซาะ เพื่อนำมาใช้ในการคาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่เกิดขึ้นรอบเสาเข็มกลุ่มกรณีความหนาขนาดต่างๆ ของครอบหัวเข็มส่วนที่จมในน้ำ โดยตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกัดเซาะดังแสดงตามสมการความสัมพันธ์ของตัวแปร (5-2) ซึ่งคำนวณหาค่าก่อนที่จะนำไปใช้ในการคาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะได้ดังนี้

1) ค่าพารามิเตอร์ $U_{cw}$ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดมาวิเคราะห์ในการศึกษานี้ เพื่อแสดงถึงลักษณะของสัดส่วนการรวมกันระหว่างคลื่นและกระแสน้ำ โดยคำนวณได้จาก

$$U_{cw} = \left[\frac{U_c}{(U_c + U_m)}\right] \tag{5-3}$$

โดยที่ $U_c$ = ความเร็วกระแสน้ำที่ใกล้ท้องน้ำ (bed current velocity)

$U_m$ = ความเร็วหมุนวนของอนุภาคคลื่นที่ใกล้ท้องน้ำ (bed orbital velocity)

2) ค่า $KC$ (Keulegan-Carpenter number) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงลักษณะของคลื่นจากคลื่นที่เป็นคลื่นคาบเวลาสั้นๆ ไปสู่กรณีที่ คลื่นมีค่าคาบเวลาของคลื่นยาวขึ้น ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าคลื่นจะมีลักษณะของการไหลของอนุภาคน้ำหมุนวนไปสู่สภาวะการไหลที่คล้ายการไหลของกระแสน้ำ โดยค่า $KC$ คำนวณได้จาก

$$KC = \frac{U_m T}{D} \tag{5-4}$$

โดยที่ $U_m$ = ความเร็วหมุนวนของอนุภาคคลื่นที่ใกล้ท้องน้ำ (bed orbital velocity)

$T$ = คาบคลื่น (wave period)

$D$ = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็มที่คลื่นกระทำ

3) ค่าอัตราส่วนของความหนาครอบหัวเข็มที่จมอยู่ในน้ำต่อความลึกของน้ำ ($t_s/y_0$) เป็นอีกหนึ่งตัวแปรจากการศึกษานี้ที่พบว่า มีอิทธิพลต่อสภาวะการกัดเซาะ ดังนั้นจึงต้องนำค่าดังกล่าวนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ที่ได้จากการพิจารณาออกแบบโครงสร้างตามเงื่อนไขและวิธีการออกแบบโครงสร้างอื่นๆ (structure design) มาทำการวิเคราะห์ร่วมในการประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่จะเกิดขึ้น เพื่อย้อนกลับไปพิจารณาการออกแบบโครงสร้างหรือแนวทางการป้องกันการกัดเซาะเพื่อให้เกิดความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างใหม่อีกครั้ง

จากตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกัดเซาะทั้งหมดในข้างต้น สามารถนำตัวแปรต่างๆเหล่านี้มาเขียนเป็นรูปแนวโน้มความสัมพันธ์จากผลการศึกษาในการทดลองแบบจำลองทางกายภาพ เพื่อใช้ในการประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดตามกรณีศึกษาความหนาของครอบหัวเข็มขนาดต่างๆกันดังกล่าวในเงื่อนไข (5.3.1) ดังในรูป 5-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดต่อขนาดเสาเข็ม กับค่า $U_{cw}$ และค่า *KC* แยกตามความหนาครอบหัวเข็ม (pile cap) ต่อความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) ขนาดต่างๆตามลำดับจาก 0.2 ถึง 1.0 ได้ความสัมพันธ์ของค่าความลึกหลุมกัดเซาะกับตัวแปรต่างๆ คือ

$$\frac{y_s}{D} = \Phi\left[U_{cw}, KC, \frac{t_s}{y_0}\right] \qquad (5\text{-}5)$$

และรูป 5-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดต่อขนาดเสาเข็มกับค่า $U_{cw}$ และค่า *KC* กรณีเสาเข็มเดี่ยวไม่มีครอบหัวเข็มจากผลการศึกษาของ Sumer & Fredsoe (2001) เมื่อพิจารณาจากผลการศึกษาของ Sumer & Fredsoe (1998) พบว่าที่ค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่อขนาดเสาเข็ม *G/D* ตั้งแต่ 2 ขึ้นไป จะให้ผลของค่าความลึกหลุมกัดเซาะมีแนวโน้มเท่ากันกับกรณีเสาเข็มเดี่ยว ดังนั้นจึงนำผลการศึกษาดังกล่าวนี้มาพิจารณาใช้กับการวิเคราะห์ กรณีเสาเข็มกลุ่มในการศึกษานี้ ที่มีค่าระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่อขนาดเสาเข็ม *G/D* เท่ากับ 3 จะได้ว่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มกรณีที่ไม่มีครอบหัวเข็มมีความสัมพันธ์กับตัวแปรต่างๆคือ

$$\frac{y_{spg}}{D} = \Phi[U_{cw}, KC] \qquad (5\text{-}6)$$

เมื่อทำการวิเคราะห์โดยการพิจารณากราฟแสดงความสัมพันธ์ (graphical method) จะเห็นว่าเส้นกราฟยกตัวสูงขึ้นเรื่อยๆจากกรณีที่ไม่มีครอบหัวเข็มเป็นสัดส่วนตามการเพิ่มความหนาของครอบหัวเข็มตามลำดับ โดยจากรูปความสัมพันธ์ดังกล่าว จะได้สมการประมาณหาค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดในกรณีความหนาของครอบหัวเข็มขนาดต่างๆ จากการศึกษานี้คือ

$$\frac{y_s}{D} = K_{pc}\left[\frac{y_{spg}}{D}\right] \qquad (5\text{-}7)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่ $y_s$ = ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่เกิดขึ้นทั้งหมด

$y_{spg}$ = ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดกรณีไม่มีครอบหัวเข็ม

$D$ = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม และ

$K_{pc}$ = ค่าปรับแก้เนื่องจากความหนาครอบหัวเข็มในน้ำ

ซึ่งค่า $K_{pc}$ มีความสัมพันธ์กับตัวแปรต่างๆคือ

$$K_{pc} = \Phi\left[\frac{t_s}{y_0}\right] \tag{5-8}$$

โดยที่ $t_s$ = ความหนาครอบหัวเข็มส่วนที่จมอยู่ในน้ำ

$y_0$ = ความลึกน้ำ ณ ตำแหน่งตอม่อ

ซึ่งจากสมการ 5-7 ค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดกรณีไม่มีครอบหัวเข็ม ($y_{spg}$) หาได้จาก รูป 5-5 ความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดของเสาเข็มกลุ่มกรณีไม่มีครอบหัวเข็มกับค่า $U_{cw}$ และค่า $KC$ ต่างๆ เมื่อทราบค่า $U_{cw}$ และค่า $KC$ จากการคำนวณหาค่าตัวแปรเบื้องต้นเพื่อการคาดคะเนค่าความลึกหลุมกัดเซาะ จากสมการ 5-3 และ 5-4 ตามลำดับ และในส่วนของค่าปรับแก้เนื่องจากความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำ ($K_{pc}$) (ดังแสดงการคำนวณในภาคผนวก ฉ) มีความสัมพันธ์กับค่าความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำตามสมการดังนี้คือ

$$K_{pc} = 2.23\left[\frac{t_s}{y_0}\right]^{0.27} \quad ;\text{ ใช้กรณีที่ } t_s > 0 \tag{5-9}$$

$$K_{pc} = 1 \quad ;\text{ ใช้กรณีที่ } t_s = 0 \tag{5-10}$$

และรูปความสัมพันธ์ดังแสดงในรูป 5-6 ซึ่งจะเห็นว่ามีอัตราเพิ่มขึ้น มากในช่วงอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำน้อยๆ และมีอัตราการเพิ่มขึ้น ลดลงในช่วงของอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำที่มากขึ้นเรื่อยๆจนถึงค่า 1.0

ค่าปรับแก้ความลึกหลุมกัดเซาะเนื่องจากอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำ ที่ขนาดต่างๆตามการศึกษานี้ ดังแสดงในตาราง 5-1 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่ออัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำเพิ่มขึ้น ค่าปรับแก้เนื่องจากความหนาของครอบหัวเข็ม ($K_{pc}$) ก็จะเพิ่มขึ้นด้วยในลักษณะตามสมการความสัมพันธ์ 5-9 นั่นคือ ความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็ม ($y_s/D$) มีค่าเพิ่มขึ้นจากกรณีเสาเข็มกลุ่มไม่มีครอบหัวเข็ม ประมาณ 20, 44, 61, 74, 85, 94, 103, 110, 117 และ 123 เปอร์เซ็นต์ สำหรับอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) เท่ากับ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 ตามลำดับ

ดังนั้นอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำจะมีอิทธิพลต่อความลึกหลุมกัดเซาะ โดยพิจารณาตามความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งหมด จะได้สมการในการประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะจากการศึกษานี้ กรณีเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็มคือ

$$\frac{y_s}{D} = 2.23\left[\frac{t_s}{y_0}\right]^{0.27}\left[\frac{y_{spg}}{D}\right] \qquad (5\text{-}11)$$

โดยที่ $\frac{y_{spg}}{D}$ หาค่าได้จากกราฟประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะตามรูป 5-5 กรณีเสาเข็มกลุ่มที่ไม่มีครอบหัวเข็ม

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็มที่ได้จากสมการ (5-11) และที่ได้จากการทดลองกรณีศึกษาขนาดความหนาในน้ำสัมพัทธ์ ของความหนาครอบหัวเข็ม เทียบกับความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) ที่ขนาดต่างๆ ได้ดังรูป 5-7 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า จุดข้อมูลส่วนมากอยู่บนเส้น 45 องศา (เส้นค่าแกนนอน เท่ากับค่าแกนตั้ง) ดังนั้นความสัมพันธ์ที่ได้ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดี จึงสามารถนำสมการความสัมพันธ์นี้มาใช้ในการประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะตามเงื่อนไขต่างๆในการศึกษานี้ได้

## 5.4 เปรียบเทียบอิทธิพลของความหนาครอบหัวเข็มจากผลการศึกษานี้ กับผลการศึกษาของ HEC-18

จากการวิเคราะห์ผลของอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) ต่อความลึกหลุมกัดเซาะภายใต้การกระทำของคลื่นและกระแสน้ำ จากการศึกษานี้ ซึ่งพบว่า อัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) มีอิทธิพลต่อการเพิ่มความลึกหลุมกัดเซาะ โดยสามารถพิจารณาผลของอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) ออกมาในรูปของแฟกเตอร์ตัวคูณเพิ่มค่าความลึกหลุมกัดเซาะจากกรณีผลการกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มที่ไม่มีครอบหัวเข็มภายใต้เงื่อนไขการไหลเดียวกัน ดังแสดงในหัวข้อ (5.3) ซึ่งอยู่ในรูปค่าปรับแก้ความลึกหลุมกัดเซาะจากความหนาของครอบหัวเข็ม ($K_{pc}$)

เมื่อนำมาพิจารณาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาอิทธิพลของความหนาของครอบหัวเข็มต่อความลึกหลุมกัดเซาะภายใต้การกระทำของกระแสน้ำอย่างเดียว จากการศึกษาของ HEC-18 ได้ผลการวิเคราะห์ดังรูป 5-8 ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มของการเพิ่มความลึกหลุมกัดเซาะตามการเพิ่มของอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) ตามการศึกษานี้และผลการศึกษาของ HEC-18 พบว่าทั้งสองผลการศึกษามีอัตราการเพิ่มขึ้นของความลึกหลุมกัดเซาะมากในช่วงของอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำมีค่าน้อยๆ และมีอัตรา

การเพิ่มขึ้นค่อยๆลดลงในช่วงของอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำที่มากขึ้นเรื่อยๆจนถึงค่า 1.0

ค่าปรับแก้ความลึกหลุมกัดเซาะเนื่องจากอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำที่ค่าต่างๆ ตามการศึกษานี้และผลการศึกษาของ HEC-18 ดังแสดงในตาราง 5-2 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่ออัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำเพิ่มขึ้น ค่าปรับแก้เนื่องจากความหนาของครอบหัวเข็ม ($K_{pc}$) ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย นั่นคือ จากผลการศึกษานี้ ความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็ม ($y_s/D$) มีค่าเพิ่มขึ้นจากกรณีเสาเข็มกลุ่มไม่มีครอบหัวเข็ม ประมาณ 20, 44, 61, 74, 85, 94, 103, 110, 117 และ 123 เปอร์เซ็นต์ และผลการศึกษาของ HEC-18 เพิ่มขึ้นประมาณ 18, 26, 40, 49, 56, 63, 69, 75, 80 และ 85 เปอร์เซ็นต์ สำหรับอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) เท่ากับ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 ตามลำดับ ดังนั้นอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำจึงมีอิทธิพลต่อความลึกหลุมกัดเซาะทั้งสองการศึกษา

และจากตาราง 5-2 พบว่า ค่าปรับแก้เนื่องจากความหนาของครอบหัวเข็ม ($K_{pc}$) จากการศึกษานี้มีค่ามากกว่าผลการศึกษาของ HEC-18 ทุกกรณีของ $t_s/y_0$ โดยเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่า $K_{pc}$ จากการศึกษานี้เทียบกับผลการศึกษาของ HEC-18 มีค่ามากขึ้นตามค่า $t_s/y_0$ ที่มากขึ้น ซึ่งค่า $K_{pc}$ จากการศึกษานี้มีค่าเพิ่มขึ้นจากผลการศึกษาของ HEC-18 โดยประมาณในช่วง 13 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับค่า $t_s/y_0$ จากน้อยไปหามาก และมีแนวโน้มของเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่า $K_{pc}$ จากการศึกษานี้เทียบกับผลการศึกษาของ HEC-18 เริ่มจะคงที่ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ค่า $t_s/y_0$ มีค่าตั้งแต่ 0.7 ขึ้นไป หรือกล่าวได้ว่า ค่า $K_{pc}$ จากการศึกษานี้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก HEC-18 โดยเฉลี่ยประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะภายใต้การกระทำของคลื่นและกระแสน้ำร่วมกัน(ผลการศึกษานี้) กับความลึกหลุมกัดเซาะภายใต้การกระทำของกระแสน้ำอย่างเดียว (HEC-18) พบว่า ความลึกหลุมกัดเซาะภายใต้การกระทำของคลื่นและกระแสน้ำร่วมกัน มีค่ามากกว่า ความลึกหลุมกัดเซาะภายใต้การกระทำของกระแสน้ำอย่างเดียว ประมาณ 1.2 เท่าโดยเฉลี่ย

### 5.5 เวลาเกิดการกัดเซาะสมดุล

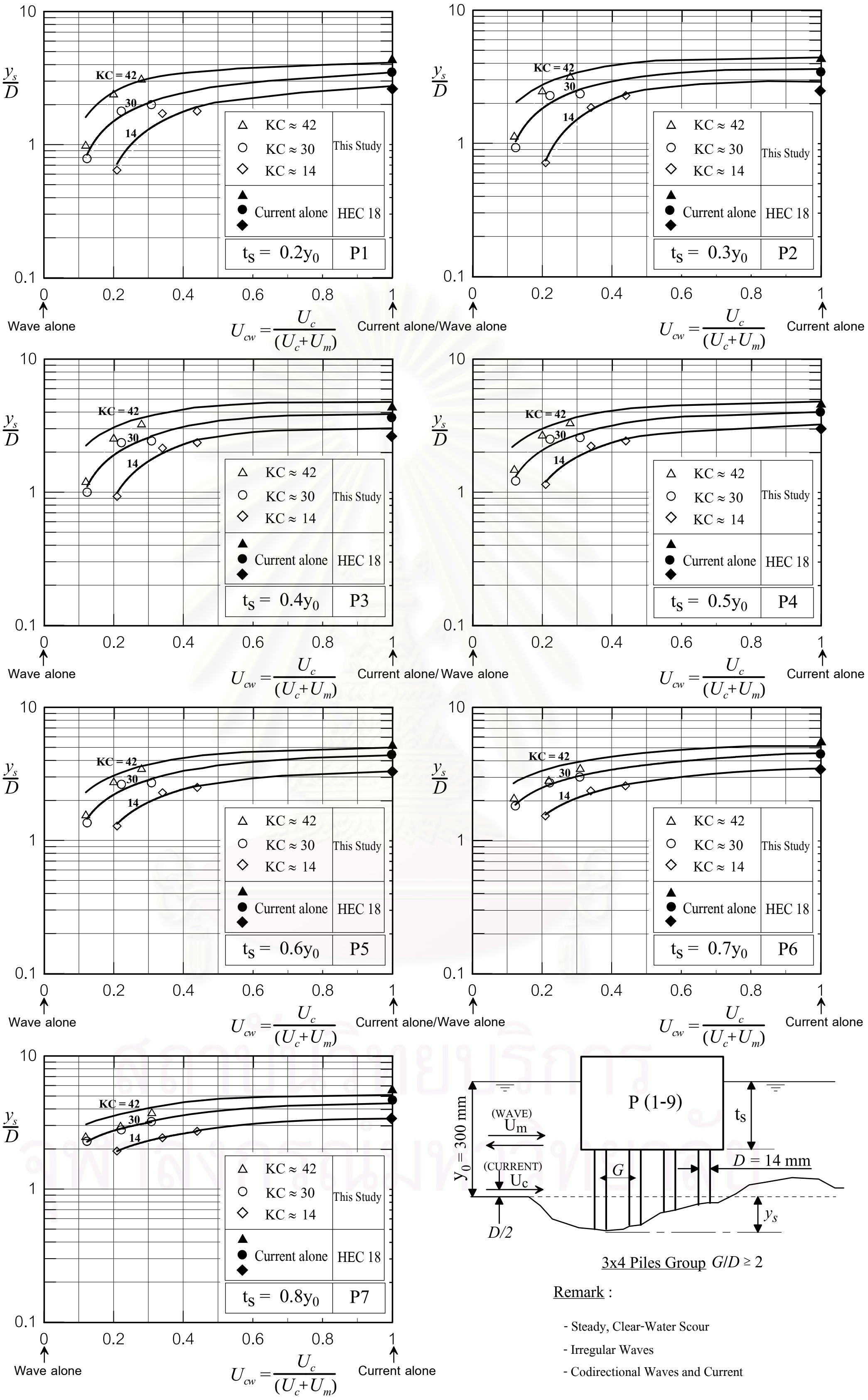
จากผลการทดลองในการบันทึกค่าเวลาการกัดเซาะเข้าสู่สมดุล หรือระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มเกิดการกัดเซาะจนถึงเกิดค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด ดังแสดงในตาราง 4-1 พบว่า กรณีที่มีค่าอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำเทียบกับความลึกน้ำน้อยที่สุด จะใช้เวลาในการเกิด

การกัดเซาะสมดุลน้อยที่สุด และกรณีที่มีค่าอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำเทียบกับความลึกน้ำมากที่สุด จะใช้เวลาในการเกิดการกัดเซาะสมดุลมีแนวโน้มที่มากที่สุดด้วย โดยในการศึกษานี้ใช้เวลาในการเกิดการกัดเซาะสมดุลน้อยที่สุดที่กรณีศึกษาตอม่อ P1 ใช้เวลาเท่ากับ 14 ชั่วโมงโดยประมาณ และใช้เวลาในการเกิดการกัดเซาะสมดุลมากที่สุดที่กรณีศึกษาตอม่อ P9 ใช้เวลาเท่ากับ 24 ชั่วโมงโดยประมาณ

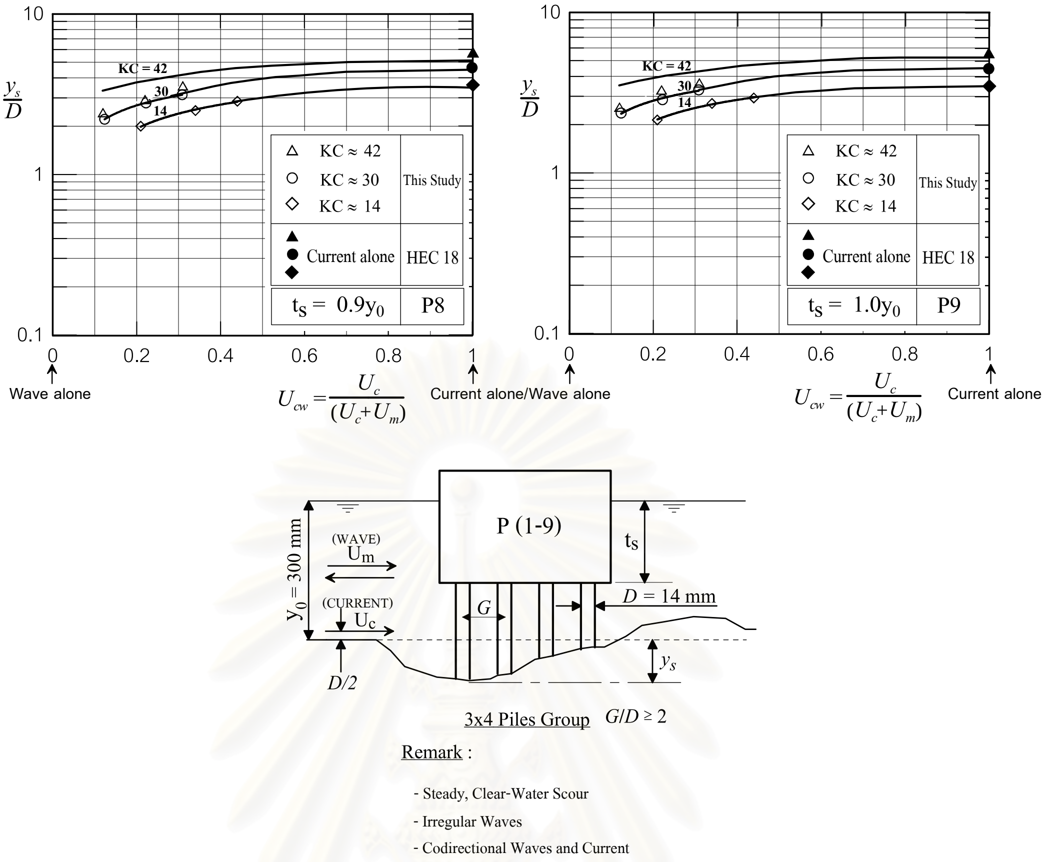
และเมื่อเปรียบเทียบเวลาเกิดการกัดเซาะสมดุลตามเงื่อนไขการไหลในการทดลอง ได้ผลการศึกษาดังนี้ กรณีที่มีค่าความเร็วการไหลของกระแสน้ำที่ใกล้ท้องน้ำน้อยที่สุด จะใช้เวลาในการเกิดการกัดเซาะสมดุลน้อยที่สุด และกรณีที่มีค่าความเร็วการไหลของกระแสน้ำที่ใกล้ท้องน้ำมากที่สุด จะใช้เวลาในการเกิดการกัดเซาะสมดุลมีแนวโน้มที่มากที่สุดด้วย โดยในการศึกษานี้ใช้เวลาในการเกิดการกัดเซาะสมดุลน้อยที่สุดที่กรณีศึกษาความเร็วกระแสน้ำ U1 ใช้เวลาเท่ากับ 15 ชั่วโมงโดยประมาณ และใช้เวลาในการเกิดการกัดเซาะสมดุลมากที่สุดที่กรณีศึกษาความเร็วกระแสน้ำ U3 ใช้เวลาเท่ากับ 24 ชั่วโมงโดยประมาณ

กรณีที่มีค่าคุณลักษณะของคลื่นตามความสัมพันธ์ของค่า *KC* น้อยที่สุด จะใช้เวลาในการเกิดการกัดเซาะสมดุลน้อยที่สุด และกรณีที่มีค่าคุณลักษณะของคลื่นตามความสัมพันธ์ของค่า *KC* มากที่สุด จะใช้เวลาในการเกิดการกัดเซาะสมดุลมีแนวโน้มที่มากที่สุดด้วย โดยในการศึกษานี้ใช้เวลาในการเกิดการกัดเซาะสมดุลน้อยที่สุดที่กรณีศึกษาคุณลักษณะของคลื่นตามความสัมพันธ์ของค่า *KC* ที่ KC1 ใช้เวลาเท่ากับ 15 ชั่วโมงโดยประมาณ และใช้เวลาในการเกิดการกัดเซาะสมดุลมากที่สุดที่กรณีศึกษาคุณลักษณะของคลื่นตามความสัมพันธ์ของค่า *KC* ที่ KC3 ใช้เวลาเท่ากับ 24 ชั่วโมงโดยประมาณ

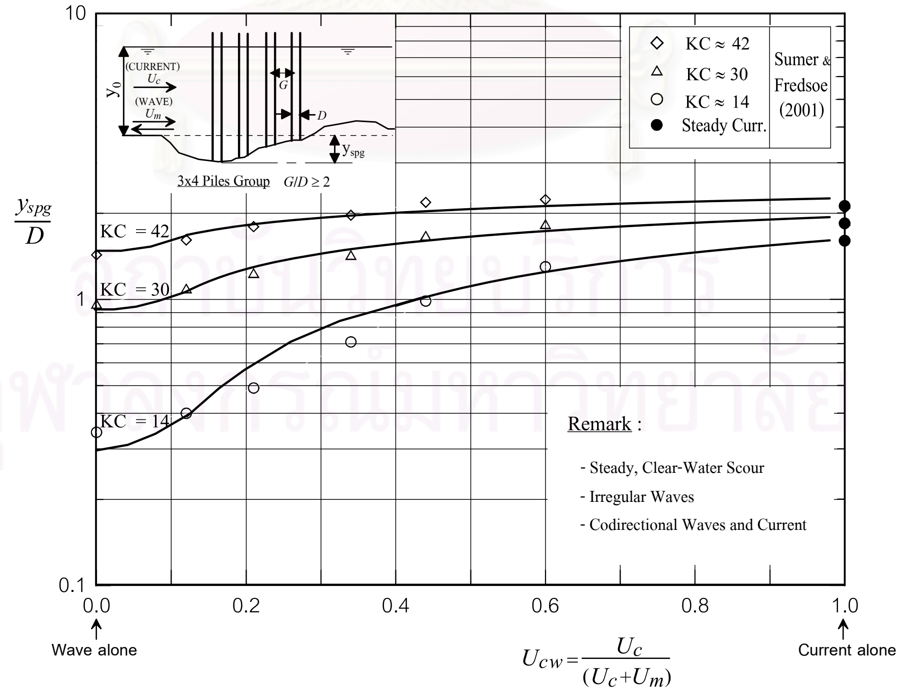
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



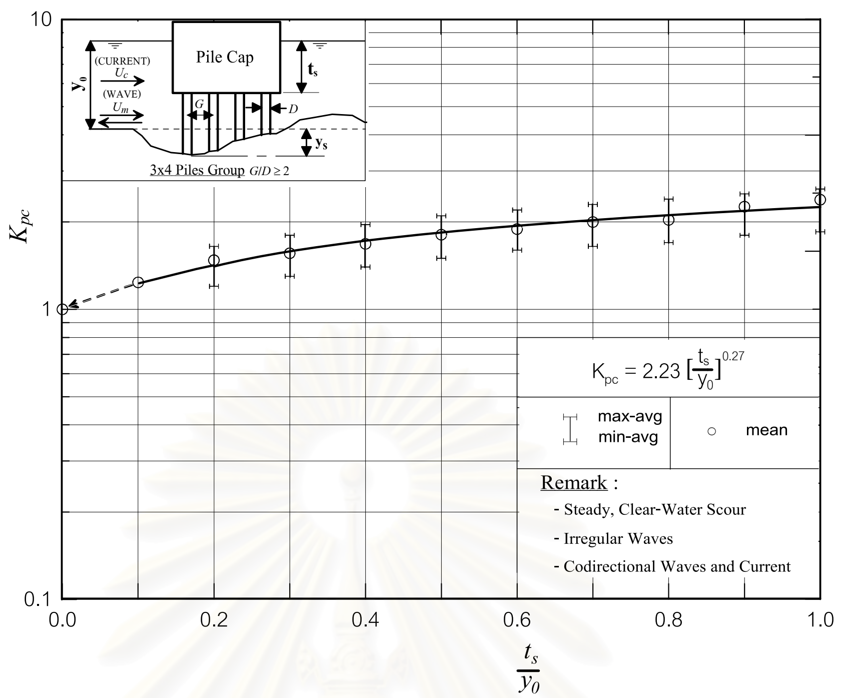

รูป 5-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดต่อขนาดเสาเข็มกับค่า $U_{cw}$ และค่า *KC* แยกตามความหนาครอบหัวเข็ม (pile cap) ขนาดต่างๆ จากการศึกษานี้




รูป 5-4 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดต่อขนาดเสาเข็มกับค่า $U_{cw}$ และค่า *KC* แยกตามความหนาครอบหัวเข็ม (pile cap) ขนาดต่างๆ จากการศึกษานี้




รูป 5-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดต่อขนาดเสาเข็มกับค่า $U_{cw}$ และค่า *KC* กรณีเสาเข็มกลุ่มไม่มีครอบหัวเข็ม (Sumer & Fredsoe, 2001)



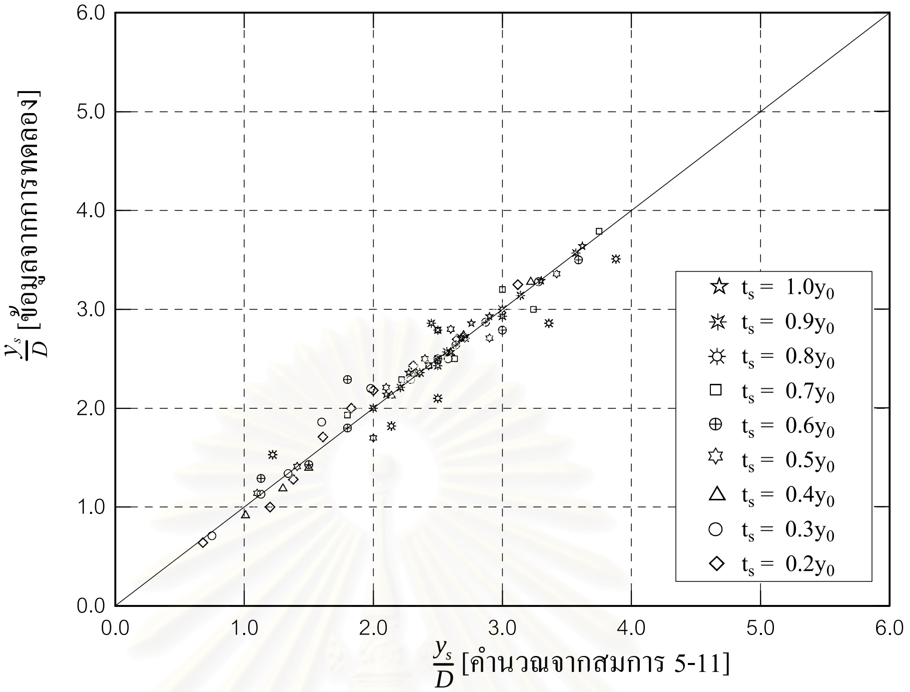

รูป 5-6 ค่าปรับแก้ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด ($K_{pc}$) เนื่องจากความหนาครอบหัวเข็มส่วนที่จมน้ำต่อความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) จากการศึกษานี้

ตาราง 5-1 ค่าปรับแก้ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด ($K_{pc}$) เนื่องจาก ($t_s/y_0$) จากการศึกษานี้

| กรณีศึกษา ตอม่อสะพาน | ความหนาครอบหัวเข็ม ต่อความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) | $K_{pc}$ |
|---|---|---|
| [1]กรณีไม่มีครอบหัวเข็ม | - | 1 |
| [2]P0 | 0.1 | 1.20 |
| P1 | 0.2 | 1.44 |
| P2 | 0.3 | 1.61 |
| P3 | 0.4 | 1.74 |
| P4 | 0.5 | 1.85 |
| P5 | 0.6 | 1.94 |
| P6 | 0.7 | 2.03 |
| P7 | 0.8 | 2.10 |
| P8 | 0.9 | 2.17 |
| P9 | 1.0 | 2.23 |

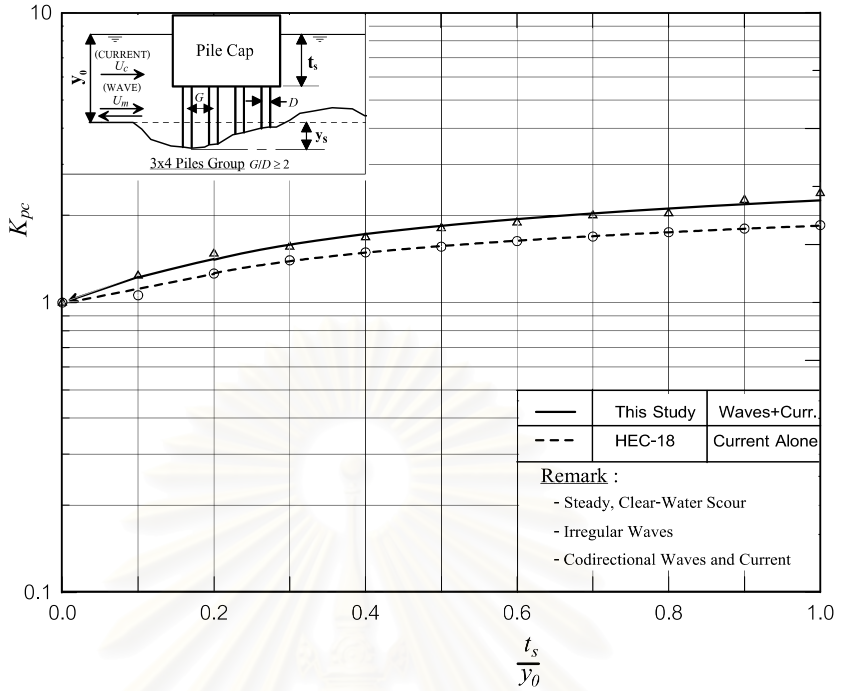
หมายเหตุ : [1] จากผลการศึกษาของ (Sumer & Fredsoe, 2001)

[2] เพิ่มเติมจากแนวโน้มการวิเคราะห์ผลการทดลอง




รูป 5-7 เปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็มที่ได้จากสมการ (5-11) และที่ได้จากการทดลองในการศึกษานี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




รูป 5-8 ค่าปรับแก้เนื่องจากความหนาครอบหัวเข็ม($K_{pc}$) ของ HEC-18 กับการศึกษานี้

ตาราง 5-2 ค่าปรับแก้เนื่องจากความหนาครอบหัวเข็ม ($K_{pc}$) ของ HEC-18 กับการศึกษานี้

| กรณีศึกษา รูปแบบตอม่อ | ความหนาครอบหัวเข็ม ต่อความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) | $K_{pc}$ (HEC-18) | $K_{pc}$ (การศึกษานี้) | เปอร์เซ็นต์ เพิ่ม(+) /ลด(-) |
|---|---|---|---|---|
| [1]กรณีไม่มีครอบหัว | - | 1 | [1]1 | 0.00 |
| [2]P0 | 0.1 | 1.18 | [2]1.20 | +1.70 |
| P1 | 0.2 | 1.26 | 1.44 | +14.3 |
| P2 | 0.3 | 1.40 | 1.61 | +15.0 |
| P3 | 0.4 | 1.49 | 1.74 | +16.8 |
| P4 | 0.5 | 1.56 | 1.85 | +18.6 |
| P5 | 0.6 | 1.63 | 1.94 | +19.0 |
| P6 | 0.7 | 1.69 | 2.03 | +20.1 |
| P7 | 0.8 | 1.75 | 2.10 | +20.0 |
| P8 | 0.9 | 1.80 | 2.17 | +20.6 |
| P9 | 1.0 | 1.85 | 2.23 | +20.5 |
| ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง | | | | +15 |
| ค่าเฉลี่ยผลการศึกษานี้เทียบกับ HEC-18 | | | | 1.2 เท่า |

หมายเหตุ : [1] จากผลการศึกษาของ (Sumer & Fredsoe, 2001)

[2] เพิ่มเติมจากแนวโน้มการวิเคราะห์ผลการทดลอง

# บทที่ 6

# สรุปและข้อเสนอแนะ

## 6.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้ ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มภายใต้คลื่นและกระแสน้ำกับการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของความหนาครอบหัวเข็มที่จมอยู่ในน้ำต่อความลึกของน้ำ ($t_s/y_0$) โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพรางคลื่นและกระแสน้ำหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าในการศึกษา

แนวทางในการศึกษา เพื่อศึกษาถึงผลของความหนาของครอบหัวเข็มต่อความลึกหลุมกัดเซาะของเสาเข็มกลุ่ม ได้ใช้ขนาดของครอบหัวเข็มที่มีอัตราส่วนของความหนาครอบหัวเข็มที่จมอยู่ในน้ำต่อความลึกของน้ำ ($t_s/y_0$) แตกต่างกัน 9 ค่า ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 1.0 ทำการทดลองการกัดเซาะรอบตอม่อแต่ละกรณี ในรางน้ำที่มีอัตราการไหลเฉลี่ยจำนวน 3 อัตราการไหลคือ 9, 18 และ 27 ลิตรต่อวินาที และทดลองเปลี่ยนแปลงค่า *KC* จำนวน 3 ค่า ทดลองร่วมกับค่าอัตราการไหลต่างๆในข้างต้น ซึ่งค่า *KC* ที่ใช้มีค่าประมาณ 14, 30 และ 42 ตามลำดับ รวมกรณีศึกษาในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้เท่ากับ 81 กรณีศึกษา

ในการวิเคราะห์อิทธิพลของอัตราส่วนของความหนาครอบหัวเข็มที่จมอยู่ในน้ำเทียบกับความลึกน้ำ ที่มีผลต่อค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มภายใต้การกระทำของคลื่นและกระแสน้ำร่วมกัน แบ่งเป็นประเด็นการวิเคราะห์ออกเป็น 4 ประเด็นหลักๆ คือ อิทธิพลของคลื่นและกระแสน้ำต่อค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่ม อิทธิพลของความหนาครอบหัวเข็มต่อการกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่ม การคาดคะเนค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่ได้จากผลการศึกษานี้โดยประมาณ และการเปรียบเทียบผลการศึกษานี้กับผลการศึกษาโดย HEC-18 จากประเด็นการวิเคราะห์ผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าว เป็นการวิเคราะห์ภายใต้การใช้ข้อมูล ที่ได้จากการเฝ้าสังเกตพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของน้ำ และพฤติกรรมการกัดเซาะรอบฐานรากเสาเข็มกลุ่มประกอบการวิเคราะห์ด้วย ซึ่งสรุปได้ดังนี้

### 6.1.1 <u>อิทธิพลของความหนาครอบหัวเข็มในน้ำต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะการไหล</u>

การกัดเซาะเนื่องจากคลื่นและกระแสน้ำรวมกัน เกิดขึ้นเนื่องจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงการไหลทั้งในรูปแบบ vortex shedding และ horseshoe vortex ซึ่งรูปแบบไหนจะส่งผลต่อการกัดเซาะ มาก – น้อย กว่ากันนั้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนการรวมกันของคลื่นและกระแสน้ำ และลักษณะ

ของคลื่นน้ำ ดังการศึกษากรณีเสาเข็มเดี่ยวและกลุ่มที่ไม่มีครอบหัวเข็มภายใต้การกระทำทั้งกรณีที่กระทำโดยคลื่นอย่างเดียว และกรณีที่กระทำโดยคลื่นร่วมกับกระแสน้ำ ในผลการศึกษาที่ผ่านมาโดย Sumer และ Fredsoe (1992, 1998, 2001) ก็พบว่า การกัดเซาะเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงสภาวะการไหลในรูปแบบดังกล่าว

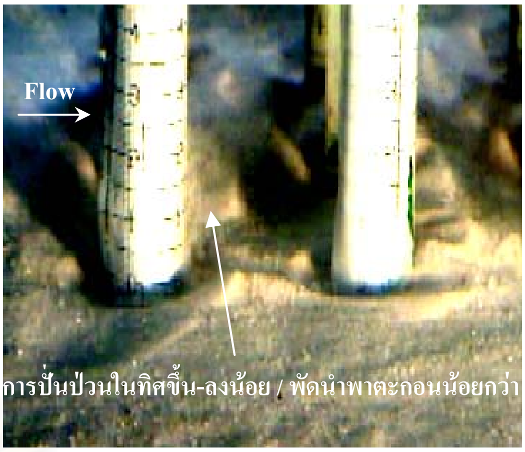
แต่สำหรับการศึกษานี้ มีผลของความหนาของครอบหัวเข็มที่จมอยู่ในน้ำ ที่ตำแหน่งส่วนบนของเสาเข็ม สูงจากระดับท้องน้ำที่ระยะต่างๆกันตามความหนาของครอบหัวเข็มในแต่ละกรณีศึกษา เข้ามารบกวนสภาวะการไหลให้แตกต่างไปจากกรณีโครงสร้างที่มีเพียงเสาเข็มกลุ่มอย่างเดียว ซึ่งจากผลการศึกษาสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงสภาวะการไหลของคลื่นและกระแสน้ำรวมกันนั้น มีการเปลี่ยนแปลงการไหลทั้งในรูปแบบ vortex shedding และ horseshoe vortex คล้ายกรณีเสาเข็มที่ไม่มีครอบหัวเข็ม เพียงแต่อิทธิพลของครอบหัวเข็มจะส่งผลให้รูปแบบการไหลระหว่างสภาวะการเปลี่ยนแปลงการไหลแบบ vortex shedding และ horseshoe vortex มีอิทธิพลต่อการกัดเซาะที่ท้องน้ำรอบเสาเข็มกลุ่มมากขึ้น และแตกต่างกันออกไป ตามความหนาของครอบหัวเข็มที่แทนที่ในน้ำจากผิวน้ำถึงท้องน้ำ หรือกล่าวได้ว่าครอบหัวเข็มเป็นตัวกำหนดอิทธิพลต่อการกัดเซาะของคลื่นและกระแสน้ำให้มีอิทธิพลต่อการกัดเซาะมากขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของความหนาของครอบหัวเข็มไปเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลบางประการของกระแสน้ำและคลื่น ให้แตกต่างไปจากกรณีเสาเข็มกลุ่มที่ไม่มีครอบหัวเข็ม โดยลักษณะของการรบกวนการไหลเนื่องจากครอบหัวเข็ม ที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงการไหลของคลื่นและกระแสน้ำมีลักษณะแยกเป็น 2 ส่วนตามการกระทำของคลื่นและกระแสน้ำ ดังรูป 6-1 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลระหว่างกรณีที่มีความหนาครอบหัวเข็มมากๆและกรณีที่มีความหนาครอบหัวเข็มน้อย ซึ่งสรุปตามรูปได้ดังนี้คือ

1) ผลกระทบต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคหมุนวนของคลื่น เป็นผลจากความหนาของครอบหัวเข็มแทนที่ในน้ำ ทำให้มีพื้นที่จากท้องน้ำถึงผิวด้านล่างของครอบหัวเข็มลดลง ดังนั้นการเคลื่อนที่ของอนุภาคหมุนวนของคลื่นจึงถูกรบกวน โดยถูกจำกัดพื้นที่ของวงโคจรในลักษณะที่ถูกบีบอัดจากอิทธิพลของครอบหัวเข็ม ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะการไหลที่ตำแหน่งด้านหลังของเสาเข็ม ซึ่งปกติที่ไม่มีอิทธิพลของครอบหัวเข็ม พบว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลเนื่องจากผลของวงโคจรของอนุภาคคลื่นเคลื่อนที่ผ่านเสาเข็ม ทำให้เกิดน้ำวนบริเวณอับกระแสน้ำจากการบดบังของเสาเข็ม (lee wake vortices) ซึ่งเป็นพฤติกรรมการไหลที่มีลักษณะเป็นน้ำหมุนวนในระนาบเดียวกับท้องน้ำเคลื่อนที่ขึ้น-ลงในแนวดิ่งจากท้องน้ำหรือที่เรียกสภาวะการไหลว่า “vortex shedding” และเมื่อมีอิทธิพลของครอบหัวเข็มเข้ามารบกวนสภาวะการไหลดังกล่าว จึงทำให้สภาวะการไหลเปลี่ยนแปลงไปโดย มีลักษณะหมุนวนในระนาบเดียวกับท้องน้ำด้วยความเร็วหมุน

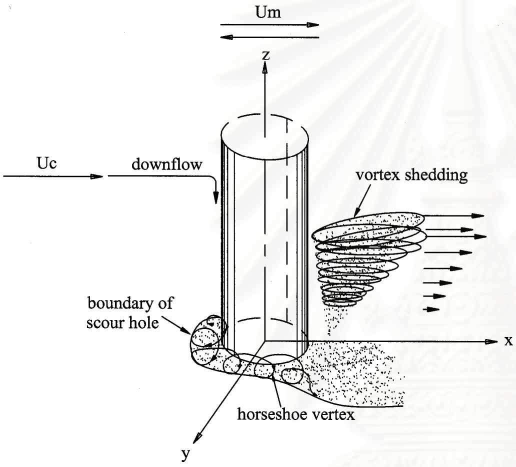
วนที่สูงขึ้น และเคลื่อนที่ขึ้น-ลงในแนวดิ่งจากท้องน้ำในช่วงระยะการเคลื่อนที่ ที่สูงขึ้น ก่อเกิดการกวนตะกอนท้องน้ำให้ฟุ้งกระจายขึ้นจากท้องน้ำในปริมาณที่ค่อนข้างสูงกว่าในกรณีที่ไม่มีครอบหัวเข็ม และถูกบีบอัดให้กระจายไปทางด้านท้ายน้ำหลังตอม่อมากขึ้นตามทิศทางของความเร็วกระแสน้ำ ซึ่งสภาวะการรบกวนการไหลเนื่องจากครอบหัวเข็มจะมีความรุนแรงมากขึ้นแปรผันตรงกับการเพิ่มความหนาของครอบหัวเข็มที่มากขึ้นเรื่อยๆ

2) ผลกระทบต่อการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำ เป็นผลจากการบีบคอดของทางน้ำผ่านด้านล่างของครอบหัวเข็ม ซึ่งปกติที่ไม่มีอิทธิพลของครอบหัวเข็ม พบว่า การเปลี่ยนแปลงสภาวะการไหล มีลักษณะเป็นแบบกลิ้งม้วนตัวรอบเสาเข็ม (surface roller) และไหลพุ่งลงด้านล่าง (down flow) ช่วยสนับสนุนให้เกิดการกัดเซาะ (scouring) ที่ผิวเสาเข็มด้านเหนือน้ำขณะกระทบกับผิวเสาเข็ม และเกิดทิศทางการไหลวนกลับในแนวราบที่ท้องน้ำ วัสดุท้องน้ำจะเคลื่อนที่โดยการไหลกลิ้งวนภายในหลุมกัดเซาะและหมุนวนรอบด้านข้างเสาเข็มในแนวราบ โดยสังเกตเห็นการไหลมีลักษณะม้วนวนรูปเกือกม้า (horseshoe vortex) เคลื่อนที่ผ่านด้านข้างเสาเข็มไปทางด้านท้ายน้ำ และเมื่อมีอิทธิพลของครอบหัวเข็มเข้ามารบกวนสภาวะการไหลดังกล่าว จากการบีบคอดของทางน้ำผ่านด้านล่างของครอบหัวเข็ม จึงทำให้สภาวะการไหลเปลี่ยนแปลงไปโดย การไหลกลิ้งม้วนตัวรอบเสาเข็ม (surface roller) และไหลพุ่งลงด้านล่าง (down flow) มีความเร็วการไหลที่สูงขึ้น และช่วยสนับสนุนให้เกิดการกัดเซาะ (scouring) ที่ผิวเสาเข็มด้านเหนือน้ำขณะกระทบกับผิวเสาเข็มมากขึ้น ทิศทางการไหลวนกลับในแนวราบที่ท้องน้ำยังมีทิศทางการไหลเหมือนเดิม แต่ความเร็วการไหลและการพัดพาวัสดุท้องน้ำให้เคลื่อนที่ โดยการไหลกลิ้งวนภายในหลุมกัดเซาะและหมุนวนรอบด้านข้างเสาเข็มในแนวราบ มีลักษณะที่เร็วขึ้นและม้วนวนขุดเอาตะกอนท้องน้ำมากขึ้น โดยสังเกตเห็นการไหลมีลักษณะม้วนวนรูปเกือกม้า (horseshoe vortex) ที่พื้นท้องน้ำมีลักษณะขอบเขตของหลุมกัดเซาะกว้างออกไปทางด้านข้างและเยื้องไปด้านหลังของผิวเสาเข็มในลักษณะที่กว้างมากขึ้นไปทางด้านท้ายน้ำ และเมื่อถึงความหนาของครอบหัวเข็มที่ระยะหนึ่งสภาวะการไหลที่เกิดการกลิ้งม้วนตัวรอบเสาเข็ม (surface roller) และไหลพุ่งลงด้านล่าง (down flow) มีความเร็วการไหลน้อยลง ส่งผลต่อการเพิ่มความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มน้อยลง แต่สภาวะการไหลบริเวณด้านข้างครอบหัวเข็มในลักษณะม้วนวนรูปเกือกม้า (horseshoe vortex) ที่พื้นท้องน้ำด้านข้าง มีลักษณะขอบเขตของหลุมกัดเซาะกว้างออกไปทางด้านข้างมากขึ้นและเยื้องไปด้านหลังของบริเวณขอบเขตของครอบหัวเข็มในลักษณะที่กว้างมากขึ้นและมีขอบเขตการกัดเซาะที่ห่างจากครอบหัวเข็มไปทางด้านท้ายน้ำมากขึ้น

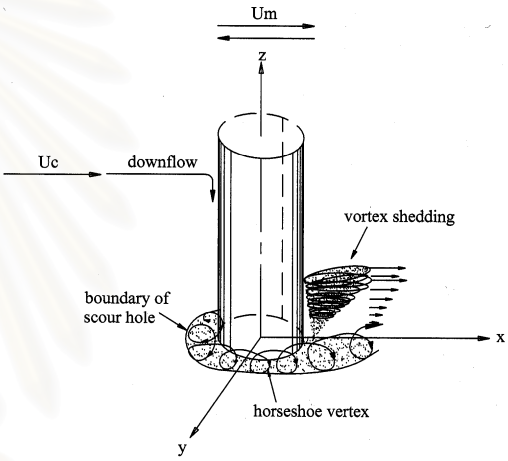
(ก) รูปแบบการไหลจากการบันทึกวีดีโอ



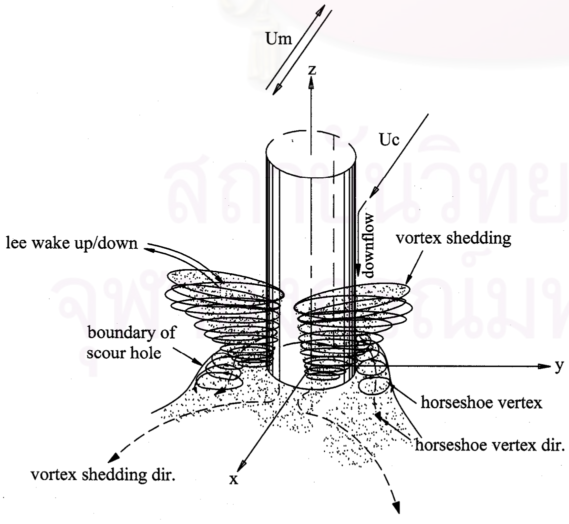

(ง) รูปแบบการไหลจากการบันทึกวีดีโอ



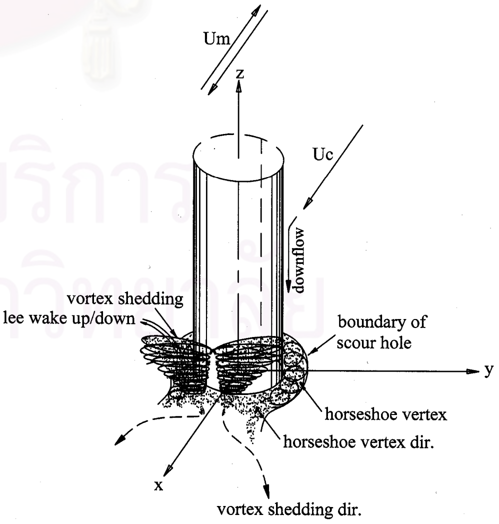

(ข) รูปสเกต (ด้านข้าง)




(จ) รูปสเกต (ด้านข้าง)




(ค) รูปสเกต (ด้านหลัง)




(ฉ) รูปสเกต (ด้านหลัง)

รูป 6-1 เปรียบเทียบพฤติกรรมการไหล เนื่องจากความแตกต่างของความหนาครอบหัวเข็มระหว่าง (ก-ค) กรณีศึกษา U3KC1P7 (ณ เวลา 3 ชม.) กับ (ง-ฉ) กรณีศึกษา U3KC1P1 (ณ เวลา 3 ชม.)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.1.2 อิทธิพลของคลื่นและกระแสน้ำต่อความลึกหลุมกัดเซาะ

ในการศึกษา การกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็มภายใต้คลื่นและกระแสน้ำนี้ พบว่า ค่าความลึกของหลุมกัดเซาะสูงสุดสำหรับทุกๆกรณีศึกษาเป็นฟังชันก์ของ Keulegan-Carpenter number (*KC*) และพารามิเตอร์ $U_{cw}= U_c/(U_c+U_m)$ ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะกับฟังชันก์ดังกล่าวในกรณีเสาเข็มเดี่ยวที่ไม่มีครอบหัวเข็ม อ้างอิง Sumer และ Fredsoe (2001) และมีลักษณะของกลไกการกัดเซาะเป็นไปตามการทบทวนการศึกษาที่ผ่านมา อ้างอิง Sumer และ Fredsoe (1992, 1998, 2001) โดยการกัดเซาะรอบเสาเข็มส่วนใหญ่เกิดจากอิทธิพลการเปลี่ยนแปลงการไหลหลักๆ 3 ประการคือ

- horseshoe vortex รวมกับ downflow
- contraction of streamlines และ
- vortex shedding

โดยลักษณะของการเปลี่ยนแปลงการไหลที่เกิดจากการรบกวนสภาวะการไหล 3 ประการดังกล่าวในข้างต้น เนื่องจากโครงสร้างเสาเข็มกลุ่ม มีครอบหัวเข็มเพิ่มเติมเข้าไปในโครงสร้าง พบว่ามีลักษณะการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลแยกเป็น 2 ส่วนตามการกระทำของคลื่นและกระแสน้ำ ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อข้างต้น ดังนั้นจากการพิจารณาอิทธิพลของคลื่นและกระแสน้ำต่อความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่ม สามารถสรุปผลของ พารามิเตอร์ $U_{cw}= U_c/(U_c+U_m)$ และ Keulegan-Carpenter number (*KC*) ต่อความลึกหลุมกัดเซาะ ตามการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลและกลไกการกัดเซาะได้ดังนี้

1) ผลของ พารามิเตอร์ $U_{cw}$ โดยการกัดเซาะเนื่องจากคลื่นและกระแสน้ำรวมกัน เกิดขึ้นเนื่องจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงการไหลทั้งในรูปแบบ vortex shedding (เนื่องจากคลื่น) และ horseshoe vortex (เนื่องจากกระแสน้ำ) ซึ่งรูปแบบไหนจะส่งผลต่อการกัดเซาะ มาก – น้อย กว่ากันนั้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนการรวมกันของลักษณะของคลื่นน้ำ ($U_m$) และกระแสน้ำ ($U_c$) ตามความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ $U_{cw}= U_c/(U_c+U_m)$

จากการศึกษากลไกการไหลที่มีผลต่อการกัดเซาะในกรณีผลการทดลองนี้ พบว่า ที่ค่า $U_{cw}$ ต่ำๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงความลึกหลุมกัดเซาะตามการเปลี่ยนแปลงค่า $U_{cw}$ ค่อนข้างชัดเจน เนื่องจากการพัฒนาความลึกหลุมกัดเซาะในช่วงนี้ได้รับอิทธิพลของคลื่นโดยเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะการไหลแบบ vortex shedding ซึ่งมีส่วนสำคัญต่อการเพิ่มความลึกหลุมกัดเซาะ โดยเสริมการกัดเซาะเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะการไหลแบบ horseshoe vortex เนื่องจากกระแสน้ำ และที่ค่า $U_{cw}$ เท่ากับ 0.6 จะเป็นจุดที่อิทธิพลต่อการกัดเซาะเนื่องจากการไหล

แบบ lee wake vortices ที่ด้านหลัง (downstream) ของเสาเข็มมีอิทธิพลน้อย และจะน้อยลงจนไม่เกิดขึ้นเลยที่ค่า $U_{cw}$ มากๆ ซึ่งจะคงเหลือแต่การกัดเซาะเนื่องจากอิทธิพลการไหลแบบ horseshoe vortices คล้ายมีกระแสน้ำในส่วนประกอบการไหลกระทำต่อตอม่อเพียงอย่างเดียว ซึ่งความลึกการกัดเซาะภายใต้คลื่นและกระแสน้ำรวมกัน จะเริ่มมีค่าเข้าใกล้ค่าความลึกการกัดเซาะที่สภาวะการไหลคล้ายมีกระแสน้ำเพียงอย่างเดียว เมื่อพารามิเตอร์ $U_{cw}$ มีค่ามากกว่า 0.6 ซึ่งคล้ายกับผลการศึกษา อ้างอิง Sumer และ Fredsoe (2001) กรณีที่ไม่มีครอบหัวเข็มพบว่า ความลึกการกัดเซาะภายใต้คลื่นและกระแสน้ำรวมกัน จะเริ่มมีค่าเข้าใกล้ค่าความลึกการกัดเซาะที่สภาวะการไหลคล้ายมีกระแสน้ำเพียงอย่างเดียว เมื่อพารามิเตอร์ $U_{cw}$ มีค่าตั้งแต่ 0.7 ขึ้นไป เนื่องจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงความลึกหลุมกัดเซาะคงเหลือแต่การเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะการไหลของกระแสน้ำแบบ horseshoe vortex เท่านั้น

2) ผลของ *KC* number จะมีอิทธิพลต่อความลึกหลุมกัดเซาะมากในช่วงที่มีค่าไม่เกิน 300 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในกรณีเสาเข็มกลุ่มและเดี่ยวที่ไม่มีครอบหัวเข็มภายใต้คลื่นอย่างเดียว พบว่าผลของค่า *KC* มีอิทธิพลต่อความลึกหลุมกัดเซาะมากในช่วงที่มีค่าไม่เกิน 300 เช่นกัน อ้างอิง Sumer และ Fredsoe (1992b,1998) ดังแสดงในรูป 2-6 และ จากรูปจะเห็นว่าที่ค่า *KC* ประมาณ 300 ขึ้นไป ค่าความลึกหลุมกัดเซาะจะเข้าใกล้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะกรณีที่กระทำโดยคลื่นที่มีพฤติกรรมคล้ายกระแสน้ำ (สภาวะการไหลแบบ horseshoe vortex) ซึ่งก็คือ กรณีที่ค่า *KC* สูงมากๆ ตามความสัมพันธ์ของค่า *KC* ในเทอมของ $KC = (U_m/f_sD)$ ที่ค่า *KC* สูงๆ ซึ่งหมายถึงคลื่นมีลักษณะ ความถี่น้อยๆ (คาบคลื่นยาวๆ) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า คลื่นมีลักษณะพฤติกรรมคล้ายกับกระแสน้ำ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งยืนยันได้ว่า อิทธิพลต่อการกัดเซาะในกรณีเกิดจากการกระทำของคลื่นที่มีค่า *KC* สูงๆ ร่วมกับกระแสน้ำ จึงเกิดจากอิทธิพลหรือการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลของกระแสน้ำเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดค่าหนึ่งตามการกระทำของขนาดความเร็วของกระแสน้ำรวมกับความเร็วอนุภาคหมุนวนของคลื่นที่มีพฤติกรรมคล้ายกระแสน้ำค่านั้นๆ

เมื่อพิจารณาถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความลึกหลุมกัดเซาะตามค่า *KC* พบว่ามีแนวโน้มอัตราการเพิ่มขึ้นค่อนข้างสูงในช่วงค่า *KC* ต่ำกว่า 300 และอัตราการเพิ่มค่อยๆลดลงจนมีค่าความลึกหลุมกัดเซาะเกือบคงที่ที่ค่า *KC* มากกว่า 300 ขึ้นไป ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดแนวโน้มในรูปแบบดังกล่าวพิจารณาได้จาก ส่วนประกอบของคลื่นและกระแสน้ำกระทำกับตอม่อร่วมกัน โดยกรณีการรวมกันระหว่างกระแสน้ำที่มีความเร็วค่าหนึ่งกับคลื่นที่มีค่า *KC* ต่างกัน จะเห็นว่าคลื่นในช่วงที่มีค่า *KC* ต่ำๆในช่วงหนึ่ง สิ่งที่มีอิทธิพลต่อการกัดเซาะก็คือ wake vortex shedding ซึ่งเป็นสภาวะการไหลที่เกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของคลื่น ดังนั้นการรวมกันระหว่างกระแสน้ำและ

คลื่นในช่วงนี้ ทำให้เกิดสภาวะการกัดเซาะที่เกิดจากการเสริมกันระหว่างอิทธิพลของคลื่นและกระแสน้ำ จึงทำให้อัตราการเพิ่มความลึกของหลุมกัดเซาะในช่วงของกระแสน้ำรวมกับคลื่นที่มีค่า *KC* ต่ำๆ มีอัตราการเพิ่มที่สูง แต่กรณีคลื่นที่มีค่า *KC* สูงขึ้น อิทธิพลของคลื่นจะค่อยๆลดลง จนไปสู่สภาวะการกัดเซาะที่คล้ายมีอิทธิพลของกระแสน้ำเพียงอย่างเดียว ดังนั้นอัตราการเพิ่มความลึกของหลุมกัดเซาะในช่วงของกระแสน้ำที่รวมกับคลื่นที่มีค่า *KC* สูงๆ จึงมีอัตราการเพิ่มที่ค่อยๆลดลงเรื่อยๆตามอิทธิพลของคลื่นที่เสริมการกัดเซาะกับกระแสน้ำค่อยๆหมดไป คงเหลือแต่การกัดเซาะที่เกิดจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงการไหลที่เกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของกระแสน้ำค่าหนึ่งๆที่กระทำกับตอม่อร่วมกับคลื่นที่มีพฤติกรรมการกัดเซาะคล้ายกระแสน้ำ โดยเสริมความเร็วการไหลเล็กน้อยตามการเพิ่มขึ้นของค่า *KC* ณ เวลานั้นเท่านั้น ซึ่งจะให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่ค่าหนึ่งๆ สำหรับแต่ละค่าความเร็วของกระแสน้ำสุทธิ ดังนั้นเนื่องจากการกัดเซาะส่วนใหญ่เกิดจากอิทธิพลของกระแสน้ำที่มีค่าความเร็วกระแสน้ำตามการเพิ่มขึ้นของค่า *KC* แตกต่างกันไม่มาก ความแตกต่างของความลึกหลุมกัดเซาะที่กรณีค่า *KC* สูงๆจึงมีไม่มากด้วย

6.1.3 <u>อิทธิพลของครอบหัวเข็มต่อความลึกหลุมกัดเซาะ</u>

1) อิทธิพลต่อค่า *KC* ที่ก่อให้เกิดการกัดเซาะรอบโครงสร้างฐานรากได้ จากผลการศึกษาพบว่าความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำ ส่งผลต่อการเริ่มเกิดการกัดเซาะได้เนื่องจากอิทธิพลของคลื่นที่มีคุณลักษณะตามความสัมพันธ์ของค่า *KC* ค่าหนึ่งๆ ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมา กรณีศึกษาการกัดเซาะรอบเสาเข็มภายใต้คลื่น ไม่ว่าจะเป็นกรณีศึกษาเสาเข็มเดี่ยว หรือเสาเข็มที่เป็นกลุ่มแบบต่างๆ พบว่าอิทธิพลของคลื่น ที่ทำให้เกิดการ กัดเซาะรอบเสาเข็มได้นั้น มีคุณลักษณะของคลื่นตามความสัมพันธ์ของค่า *KC* ที่ค่า *KC* ต่างๆ แตกต่างกันออกไปขึ้นกับลักษณะจำนวน และรูปแบบการจัดกลุ่มของเสาเข็ม และผลการศึกษานี้ก็เช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาโดยการออกแบบการทดลองให้มีลักษณะของกลุ่มเสาเข็มแบบเดียวกันทุกกรณีการทดลอง ผลการศึกษาจึงพบว่า นอกจากอิทธิพลของจำนวน และรูปแบบของการจัดกลุ่มเสาเข็ม ที่มีต่อสภาวะคุณลักษณะของคลื่นตามความสัมพันธ์ของค่า *KC* ที่ทำให้เริ่มเกิดการกัดเซาะรอบเสาเข็มได้แล้ว ครอบหัวเข็มอันเป็นองค์ประกอบของโครงสร้างตอม่ออีกส่วนที่เชื่อมต่อจากปลายด้านบนของเสาเข็มโดยมีความหนาอยู่ในน้ำลึกจากผิวน้ำที่ระยะต่างๆตามการออกแบบโครงสร้างก็เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่กำหนดสภาวะของคลื่นดังกล่าวเช่นกัน เนื่องจากความสัมพันธ์กันระหว่างคุณลักษณะของคลื่นกับลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างฐานราก ซึ่งในการศึกษานี้ คือ ครอบหัวเข็ม ซึ่งพบว่ามีอิทธิพลต่อการกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพการไหลให้มีความรุนแรงขึ้น

ตามการเพิ่มขึ้นของความหนาในน้ำ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความหนาของครอบหัวเข็ม มีความสัมพันธ์กันอย่างชัดเจน กับจุดเริ่มต้นของค่า *KC* ที่ก่อให้เกิดการกัดเซาะได้ แบบแปรผกผันกัน

2) อิทธิพลของอัตราส่วนความหนาครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำ จากผลการศึกษานี้ พบว่าครอบหัวเข็มส่งผลให้เกิดความลึกหลุมกัดเซาะเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ไม่มีครอบหัวเข็ม โดยค่าความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็ม ($y_s/D$) มีค่าเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ไม่มีครอบหัวเข็มประมาณ 20, 44, 61, 74, 85, 94, 103, 110, 117 และ 123 เปอร์เซ็นต์ สำหรับอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) เท่ากับ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 ตามลำดับ ซึ่งจากความสัมพันธ์ของอัตราการเพิ่มขึ้นของความลึกหลุมกัดเซาะตามการเพิ่มของอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) พบว่าจะมีอัตราการเพิ่มความลึกหลุมกัดเซาะตามการเพิ่มของอัตราส่วนความหนาครอบหัวเข็มส่วนที่จมน้ำต่อความลึกน้ำ ในอัตราที่สูงในช่วงแรก (ช่วงความหนาครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำน้อยๆ ที่ค่า $t_s/y_0$ ประมาณ 0.1-0.6) และจะมีอัตราการเพิ่มขึ้น ลดลงเรื่อยๆตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนความหนาครอบหัวเข็มส่วนที่จมน้ำต่อความลึกน้ำจนถึงค่าของ $t_s/y_0$ มีค่าเท่ากับ 1.0 อัตราการเพิ่มความลึกหลุมกัดเซาะ เนื่องจากความหนาของครอบหัวเข็ม สามารถอธิบายได้ตามพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงการไหล ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำที่พัดนำพาตะกอนท้องน้ำหลุดออกจากหลุมกัดเซาะ โดยแยกพิจารณาและเปรียบเทียบกับพฤติกรรมการไหลและการกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มกรณีที่ไม่มีครอบหัวเข็มดังการอธิบายต่อไปนี้

2.1 พฤติกรรมการไหลและกลไกการกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่ม กรณีไม่มีครอบหัวเข็ม เนื่องจากอิทธิพลของคลื่นและกระแสน้ำรวมกัน จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะการไหล ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมา (Sumer และ Fredsoe, 2001) ดังกล่าวไว้ในข้างต้น พบว่า การเปลี่ยนแปลงความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะการไหลของคลื่นและกระแสน้ำ แยกเป็นผลการกัดเซาะที่เกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลการเปลี่ยนแปลงการไหล 2 ส่วน คือ อิทธิพลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงการไหลของกระแสน้ำ และอิทธิพลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงการไหลของคลื่น ซึ่งความลึกหลุมกัดเซาะสุทธิสูงสุดที่เกิดขึ้น เกิดจากการรวมกัน (superimpose) ของค่าความลึกหลุมกัดเซาะจากอิทธิพลสองส่วนดังกล่าว หรือกล่าวได้ว่า การกัดเซาะจากอิทธิพลของคลื่นและกระแสน้ำ เกิดขึ้นในลักษณะที่เสริมกันโดยตรง

โดยลักษณะของกลไกการกัดเซาะที่เกิดขึ้น พิจารณาแยกเป็นส่วนที่เกิดจากอิทธิพลของคลื่น และส่วนที่เกิดจากอิทธิพลของกระแสน้ำ ซึ่งกรณีที่เกิดจากอิทธิพลของคลื่นจะมีลักษณะ

กลไกการกัดเซาะเกิดขึ้นในรูปแบบที่มีการปั่นป่วนหมุนวนของอนุภาคน้ำ และการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำจะพัดนำพาตะกอนไปในทิศขึ้น-ลง จากหลุมกัดเซาะ ตามการเปลี่ยนแปลงความดันน้ำเนื่องจากการขึ้น-ลงของระดับน้ำ และเคลื่อนที่ห่างออกไปจากหลุมกัดเซาะในลักษณะการคืบไปทีละน้อยตามจังหวะการหมุนวนในหนึ่งรอบของอนุภาคคลื่น โดยตำแหน่งที่เกิดการกัดเซาะ จะเกิดขึ้นบริเวณด้านหลังเสาเข็มบริเวณที่เป็นจุดอับของกระแสน้ำ ส่วนกรณีที่เกิดจากอิทธิพลของกระแสน้ำ จะมีลักษณะกลไกการกัดเซาะในรูปแบบขุดตะกอนที่ด้านหน้าของเสาเข็มเนื่องจากการไหลปะทะเสาเข็ม และหมุนวนรอบเสาเข็มในแนวราบ เกิดการกัดเซาะรอบๆด้านข้างเสาเข็ม โดยลักษณะพฤติกรรมและกลไกการกัดเซาะในลักษณะต่างๆ ได้กล่าวรายละเอียดไว้แล้วใน (5.1.1)

2.2 พฤติกรรมการไหลและกลไกการกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่ม กรณีที่มีครอบหัวเข็ม ดังได้อธิบายพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงสภาวะการไหลที่เกิดขึ้นไว้แล้วใน (4.2.3) แสดงผลการทดลองที่ได้จากการเฝ้าสังเกตพฤติกรรมการไหลและกลไกการกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มขณะทำการทดลองในการศึกษานี้อย่างต่อเนื่อง โดยบันทึกการเปลี่ยนแปลงด้วยกล้องบันทึกวีดีโอ ซึ่งพบว่าลักษณะของพฤติกรรมการไหลและกลไกการกัดเซาะมีลักษณะหลักๆ เหมือนกับกรณีไม่มีครอบหัวเข็ม คือเกิดกระบวนการการกัดเซาะขึ้นภายใต้การกระทำของคลื่นและกระแสน้ำรวมกัน (ดังกล่าวข้างต้นในกรณีไม่มีครอบหัวเข็ม) แต่จะแตกต่างกันในส่วนของความรุนแรงที่เกิดขึ้นดังการวิเคราะห์จากการเฝ้าสังเกต การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลอย่างต่อเนื่อง พบว่า อิทธิพลของอัตราส่วนความหนาส่วนที่จมน้ำของครอบหัวเข็มต่อความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลที่ทำให้เกิดการกัดเซาะท้องน้ำรอบๆเสาเข็มกลุ่มมีลักษณะที่รุนแรงมากกว่ากรณีไม่มีครอบหัวเข็ม โดยพิจารณาแยกพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงการไหลของคลื่นและกระแสน้ำเนื่องจากอิทธิพลของครอบหัวเข็มออกเป็น 2 ส่วนคือ

- กรณีอิทธิพลของครอบหัวเข็มต่อพฤติกรรมการกัดเซาะเนื่องจากคลื่น พบว่า ผลของความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำ จะส่งผลให้เกิดความรุนแรงในการกัดเซาะมากกว่ากรณีไม่มีครอบหัวเข็ม กล่าวคือ ครอบหัวเข็มจะทำให้สภาวะการกัดเซาะเนื่องจากคลื่นถูกรบกวน โดยสภาวะการปั่นป่วนหมุนวนเนื่องจากคลื่นถูกจำกัดพื้นที่ไว้ในพื้นที่การไหลของน้ำภายใต้ครอบหัวเข็มถึงท้องน้ำ ทำให้เกิดการอัดกระแทกเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดันน้ำที่ขึ้นลงตามระดับน้ำสลับไป-มา ตามการเคลื่อนที่ผ่านตอม่อของสันและท้องคลื่น จึงส่งผลให้สภาวะการปั่นป่วนเนื่องจากคลื่นมีความรุนแรงขึ้น และมีความรุนแรงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนความหนาส่วนที่จมน้ำของครอบหัวเข็มต่อความลึกน้ำ ($t_s/y_0$)

- กรณีอิทธิพลของครอบหัวเข็มต่อพฤติกรรมการกัดเซาะเนื่องจากกระแสน้ำ พบว่า ผลของความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำ ทำให้เกิดการบีบคอดของทางน้ำ ส่งผลต่อสภาวะการเปลี่ยนแปลงการไหลลอดผ่านด้านล่างครอบหัวเข็มที่มีผลต่อสภาวะการกัดเซาะในอัตราที่สูงขึ้นถึงค่าความหนาหนึ่งๆ ก็จะไม่ส่งผลต่อสภาวะการเปลี่ยนแปลงการไหลลอดผ่านด้านล่างครอบหัวเข็มที่มีผลต่อสภาวะการกัดเซาะอย่างมีนัยสำคัญ เพราะการพัดพาตะกอนไหลลอดผ่านน้อยลงเนื่องจากที่ความหนาครอบหัวเข็มดังกล่าวส่งผลให้การไหลลอดผ่านเป็นไปอย่างลำบากเนื่องจากความทึบน้ำของลักษณะโครงสร้างโดยรวม แต่กรณีที่ครอบหัวเข็มมีความหนามาก สภาวะการกัดเซาะจะเกิดขึ้นเนื่องจากการไหลปะทะครอบหัวเข็มเกิดการไหลลงสู่ท้องน้ำด้านล่างวนไปทางด้านท้ายน้ำรวมกับผลของการไหลวนรอบความกว้างครอบหัวเข็ม ก่อให้เกิดการไหลแบบหมุนวนและปั่นป่วน ซึ่งสภาวะดังกล่าวเป็นสภาวะที่ก่อให้เกิดการกัดเซาะเนื่องจากกระแสน้ำของครอบหัวเข็มที่มีความหนามากๆ โดยความลึกหลุมกัดเซาะจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ไม่มีครอบหัวเข็มและกรณีที่มีความหนาครอบหัวเข็มน้อยๆ ในอัตราที่ลดลง แต่การกัดเซาะจะพัฒนาเพิ่มความกว้างของหลุมกัดเซาะมากขึ้น

สรุป อัตราการเพิ่มความลึกหลุมกัดเซาะเนื่องจากความหนาของครอบหัวเข็ม เมื่อพิจารณารวมกันระหว่างผลจากการกระทำของคลื่นและผลจากการกระทำของกระแสน้ำแล้ว พบว่า จะมีอัตราการเพิ่มความลึกหลุมกัดเซาะตามการเพิ่มของอัตราส่วนความหนาครอบหัวเข็มส่วนที่จมน้ำต่อความลึกน้ำ ในอัตราที่สูงในช่วงแรก และจะมีอัตราการเพิ่มขึ้น ลดลงเรื่อยๆตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนความหนาครอบหัวเข็มส่วนที่จมน้ำต่อความลึกน้ำ

6.1.4 การประมาณความลึกหลุมกัดเซาะ

จากผลการทดลองในการศึกษานี้สามารถสรุป การประมาณหาค่าความลึกหลุมกัดเซาะได้ จากสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการเพิ่มความลึกหลุมกัดเซาะ ซึ่งเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งหมด จะได้สมการในการประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่ม กรณีที่มีครอบหัวเข็มได้ดังนี้คือ

$$\frac{y_s}{D} = 2.23\left[\frac{t_s}{y_0}\right]^{0.27}\left[\frac{y_{spg}}{D}\right] \qquad (6\text{-}1)$$

ซึ่งสามารถประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดต่อขนาดเสาเข็ม ($y_s/D$) ได้โดยการแทนค่าความหนาส่วนที่จมน้ำของครอบหัวเสาเข็มที่ได้จากการออกแบบ และค่าความลึกการไหล ณ ตำแหน่งที่จะทำการก่อสร้างตอม่อเข้าไปในสมการ เพื่อคำนวณค่าตามสมการ และคูณกับค่า

$\frac{y_{spg}}{D}$ ที่หาค่าได้จากกราฟประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะกรณีเสาเข็มกลุ่มที่ไม่มีครอบหัวเข็มตามรูป 5-5 โดยแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของค่าความลึกหลุมกัดเซาะตามสมการ (6-1) พบว่ามีลักษณะการเพิ่มในอัตราที่สูงในช่วงของอัตราส่วนความหนาส่วนที่จมน้ำของครอบหัวเข็มต่อความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) มีค่าน้อยๆ และอัตราการเพิ่มจะค่อยๆลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนความหนาส่วนที่จมน้ำของครอบหัวเข็มต่อความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) ที่มีค่ามากขึ้นไปอีก เนื่องจากค่าความลึกหลุมกัดเซาะมีความสัมพันธ์กับลักษณะทางกายภาพของครอบหัวเข็ม ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหล ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความลึกหลุมกัดเซาะในลักษณะของแนวโน้มดังกล่าว ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อ (6.1.3)

### 6.1.5 เปรียบเทียบอิทธิพลของความหนาครอบหัวเข็มจากผลการศึกษานี้กับผลการศึกษาของ HEC-18

จากการวิเคราะห์ผลของอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) ต่อความลึกหลุมกัดเซาะภายใต้การกระทำของคลื่นและกระแสน้ำจากการศึกษานี้ เปรียบเทียบกับผลการศึกษาอิทธิพลของความหนาของครอบหัวเข็มต่อความลึกหลุมกัดเซาะภายใต้การกระทำของกระแสน้ำอย่างเดียว จากการศึกษาโดย HEC-18 ดังผลการวิเคราะห์ จากการศึกษานี้ พบว่าความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดเสาเข็ม ($y_s/D$) มีค่าเพิ่มขึ้นจากกรณีเสาเข็มกลุ่มไม่มีครอบหัวเข็มประมาณ 20, 44, 61, 74, 85, 94, 103, 110, 117 และ 123 เปอร์เซ็นต์ และผลการศึกษาของ HEC-18 เพิ่มขึ้นประมาณ 18, 26, 40, 49, 56, 63, 69, 75, 80 และ 85 เปอร์เซ็นต์ สำหรับอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) เท่ากับ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่า ความสัมพันธ์ของอัตราการเพิ่มขึ้นของความลึกหลุมกัดเซาะตามการเพิ่มของอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) ของทั้งสองผลการศึกษามีลักษณะแนวโน้มที่คล้ายกันคือ จะมีอัตราการเพิ่มความลึกหลุมกัดเซาะตามการเพิ่มของอัตราส่วนความหนาครอบหัวเข็มส่วนที่จมน้ำต่อความลึกน้ำ ในอัตราที่สูงในช่วงแรก (ช่วงความหนาครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำน้อยๆ ที่ค่า $t_s/y_0$ ประมาณ 0.1-0.6) และจะมีอัตราการเพิ่มขึ้น ลดลงเรื่อยๆตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนความหนาครอบหัวเข็มส่วนที่จมน้ำต่อความลึกน้ำ จนถึงค่าของ $t_s/y_0$ มีค่าเท่ากับ 1.0

แต่ทั้งสองผลการศึกษา มีความแตกต่างกันของขนาดของค่าปรับแก้ความลึกหลุมกัดเซาะจากความหนาของครอบหัวเข็ม ($K_{pc}$) โดยพบว่า ค่าปรับแก้ความลึกหลุมกัดเซาะเนื่องจากความหนาของครอบหัวเข็ม ($K_{pc}$) จากการศึกษานี้มีค่ามากกว่าผลการศึกษาของ HEC-18 ทุกกรณีของขนาดอัตราส่วนความหนาในน้ำของครอบหัวเข็มต่อความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) โดยเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้น

ของค่า $K_{pc}$ จากการศึกษานี้เทียบกับผลการศึกษาของ HEC-18 มีค่ามากขึ้นตามค่า $t_s/y_0$ ที่มากขึ้น ซึ่งค่า $K_{pc}$ จากการศึกษานี้มีค่าเพิ่มขึ้นจากผลการศึกษาของ HEC-18 โดยประมาณในช่วง 13 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับค่า $t_s/y_0$ จากน้อยไปหามาก และมีแนวโน้มของเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่า $K_{pc}$ จากการศึกษานี้เทียบกับผลการศึกษาของ HEC-18 เริ่มจะคงที่ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ค่า $t_s/y_0$ มีค่าตั้งแต่ 0.7 ขึ้นไป หรือกล่าวได้ว่า ค่า $K_{pc}$ จากการศึกษานี้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก HEC-18 โดยเฉลี่ยประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะภายใต้การกระทำของคลื่นและกระแสน้ำร่วมกัน(ผลการศึกษานี้) กับความลึกหลุมกัดเซาะภายใต้การกระทำของกระแสน้ำอย่างเดียว (HEC-18) พบว่า ความลึกหลุมกัดเซาะภายใต้การกระทำของคลื่นและกระแสน้ำร่วมกัน มีค่ามากกว่า ความลึกหลุมกัดเซาะภายใต้การกระทำของกระแสน้ำอย่างเดียว ประมาณ 1.2 เท่าโดยเฉลี่ย

ซึ่งจากการพิจารณาสาเหตุของความแตกต่างที่เกิดขึ้นจากสองผลการศึกษาสามารถอธิบายได้ตามพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงการไหลจากผลของความหนาครอบหัวเข็ม ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำและการพัดนำพาตะกอนท้องน้ำหลุดออกจากหลุมกัดเซาะ โดยพบว่ากรณีผลจากการศึกษานี้ ซึ่งเป็นการศึกษาภายใต้อิทธิพลของคลื่นและกระแสน้ำร่วมกัน แต่ผลการศึกษาโดย HEC-18 เป็นการศึกษาภายใต้กระแสน้ำอย่างเดียว ดังนั้นความแตกต่างของอัตราการเปลี่ยนแปลงความลึกหลุมกัดเซาะ จึงเกิดจากอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของอนุภาคหมุนวนของคลื่นผ่านตอม่อที่มีความหนาของครอบหัวเข็มขนาดต่างๆกัน เนื่องจากอัตราส่วนความหนาส่วนที่จมน้ำของครอบหัวเข็มต่อความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของอนุภาคหมุนวนของคลื่นน้ำในลักษณะที่ก่อให้เกิดความรุนแรงของการปั่นป่วนของอนุภาคน้ำและตะกอนท้องน้ำแปรผันตรงกับความหนาของครอบหัวเข็มที่เพิ่มขึ้น (พิจารณาจากการสังเกตพฤติกรรมการไหลด้วยกล้องวีดีโอขณะทำการทดลอง) และเมื่อถูกกระทำร่วมกับกระแสน้ำ จึงเกิดการกัดเซาะในลักษณะที่เสริมกัน แบบพึ่งพากันในอัตราที่สูงขึ้นเรื่อยๆของอิทธิพลการไหลทั้งสองส่วน ซึ่งผลของการปั่นป่วนของอนุภาคน้ำและตะกอนท้องน้ำเนื่องจากคลื่น ทำให้มีปริมาณตะกอนท้องน้ำที่อยู่ในสภาวะที่พร้อมจะหลุดลอยหรือเคลื่อนที่ออกไปจากตำแหน่งรอบโครงสร้างตามการกระทำของกระแสน้ำ มีปริมาณมากขึ้นกว่า กรณีที่เกิดจากการกระทำของกระแสน้ำอย่างเดียว และมีปริมาณตะกอนดังกล่าวเพิ่มในอัตราที่มากขึ้นตามการเพิ่มของความหนาของครอบหัวเข็ม หรือ

<u>สรุปได้ว่า</u> การกัดเซาะเนื่องจากอิทธิพลของครอบหัวเข็มภายใต้การกระทำของคลื่นและกระแสน้ำร่วมกันเกิดจากกลไกการกัดเซาะ 3 ส่วน คือ เกิดจากกลไกการกัดเซาะเนื่องจากคลื่น ในลักษณะการคืบของตะกอนท้องน้ำตามการเคลื่อนที่ของอนุภาคหมุนวนของคลื่น เกิดจากการกัด

เซาะพัดนำพาตะกอนท้องน้ำเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงการไหลของกระแสน้ำผ่านโครงสร้าง และส่วนสุดท้ายเกิดจากการพัดนำพาไปตามกระแสน้ำ ของตะกอนท้องน้ำส่วนที่ฟุ้งกระจายเนื่องจากอิทธิพลคลื่น ซึ่งมีการฟุ้งกระจายในอัตราที่มากขึ้นตามความหนาของครอบหัวเข็ม (ซึ่งส่วนสุดท้ายนี้จะเป็นส่วนที่ทำให้เกิดความแตกต่างของอัตราการเพิ่มความลึกหลุมกัดเซาะ ระหว่างการกัดเซาะที่เกิดขึ้นภายใต้การกระทำคลื่นและกระแสน้ำร่วมกัน และที่เกิดขึ้นภายใต้การกระทำของกระแสน้ำอย่างเดียว) ดังนั้นจึงเป็นเหตุให้อัตราการเพิ่มความลึกหลุมกัดเซาะตามการเพิ่มของอัตราส่วนความหนาในน้ำต่อความลึกน้ำ ($t_s/y_0$) จากการศึกษานี้ มีอัตราการเพิ่มที่สูงกว่าจากการศึกษาของ HEC-18

6.1.6 <u>เปรียบเทียบอิทธิพลของคลื่นและกระแสน้ำต่อความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด</u>

จากความสัมพันธ์ของค่า $U_{cw}$ และค่า $KC$ กับค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่เกิดขึ้นตามผลการศึกษานี้ พบว่าสิ่งที่เห็นได้อย่างชัดเจนในผลการศึกษานี้คือ ความลึกการกัดเซาะภายใต้การกระทำจากกระแสน้ำอย่างเดียว จะให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะ มีค่าสูงสุด และถ้ามีคลื่นเข้ามากระทำร่วมกันกับกระแสน้ำ หลุมกัดเซาะจะมีความลึกน้อยลงตามขนาด/อิทธิพลของคลื่น และจะมีค่าความลึกหลุมกัดเซาะลดลงต่ำสุด ที่กรณีเกิดจากการกัดเซาะภายใต้การกระทำจากคลื่นเพียงอย่างเดียว ซึ่งสาเหตุที่ก่อให้เกิดผลการกัดเซาะดังกล่าว สามารถพิจารณาได้ตามลักษณะพฤติกรรมทางกายภาพของคลื่น กล่าวคือ เนื่องจากกรณีสภาวะการกัดเซาะภายใต้อิทธิพลของคลื่น จะเกิดการกัดเซาะภายใต้พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของอนุภาคน้ำในลักษณะที่ไหลในทิศทางกลับไปกลับมา ดังนั้นจึงก่อให้เกิดการกัดเซาะและถมกลับ สลับกันไปมาตามทิศทางการไหลไปและย้อนกลับ ซึ่งขนาดความลึกของหลุมกัดเซาะจะมีลักษณะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามขนาดความแตกต่างของค่าความเร็วการไหลที่มีทิศทางตรงข้ามกัน จึงก่อให้เกิดค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่มีค่าไม่มากนักเมื่อเทียบกับกรณีการไหลไปในทิศทางเดียว ดังกรณีที่เกิดจากการกระทำภายใต้อิทธิพลของกระแสน้ำเพียงอย่างเดียว

แต่ผลการศึกษานี้อีกประการ ได้ข้อสรุปในลักษณะที่อาจมองว่าตรงกันข้ามกับบทสรุปดังกล่าวข้างต้น ซึ่งอาจก่อให้เกิดความสับสนได้ ดังนั้นเพื่อความเข้าใจที่ชัดเจนยิ่งขึ้น จึงขอกล่าวความแตกต่างของสองผลการศึกษาดังนี้ กล่าวคือ เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของครอบหัวเข็มร่วมด้วย พบว่า กรณีที่เกิดการกัดเซาะภายใต้การกระทำของคลื่นและกระแสน้ำร่วมกัน จะให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ไม่มีครอบหัวเข็ม มีค่าสูงกว่ากรณีที่เกิดการกัดเซาะภายใต้การกระทำจากกระแสน้ำอย่างเดียว ตามเหตุผลที่กล่าวไว้แล้วในบทสรุปการเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ HEC-18 ซึ่งในผลการศึกษาส่วนนี้หมายความถึง อิทธิพลของครอบหัวเข็มต่อความ

ลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดรอบเสาเข็มกลุ่ม ส่วนผลการศึกษาในส่วนแรก จะหมายความถึง อิทธิพลของคลื่นและกระแสน้ำต่อความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่เกิดขึ้น

6.1.7 <u>เวลาเกิดการกัดเซาะสมดุล</u>

จากผลการทดลองในการบันทึกค่าเวลาการกัดเซาะเข้าสู่สมดุล หรือระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มเกิดการกัดเซาะจนถึงเกิดค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด ในการศึกษานี้ พบว่า ใช้เวลาในการเกิดการกัดเซาะสมดุลน้อยที่สุดเท่ากับ 15 ชั่วโมงโดยประมาณ และใช้เวลาในการเกิดการกัดเซาะสมดุลมากที่สุดเท่ากับ 24 ชั่วโมงโดยประมาณ โดยปัจจัยหรือตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการเกิดการกัดเซาะจนเข้าสู่สภาวะค่าความลึกหลุมกัดเซาะสมดุล จากผลการศึกษาพบว่ามีดังนี้คือ อิทธิพลจากครอบหัวเข็ม, อิทธิพลจากความเร็วกระแสน้ำที่กระทำ และอิทธิพลจากคุณลักษณะของคลื่นที่กระทำ ซึ่งทั้งสามปัจจัยจะมีลักษณะที่ส่งผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดการกัดเซาะสมดุล ในลักษณะที่มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือ มีแนวโน้มของระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดการกัดเซาะเข้าสู่สมดุล ตามอิทธิพลของทั้งสามปัจจัยต่อการเกิดค่าสูงสุด ของความลึกหลุมกัดเซาะ กล่าวคือ ถ้าอิทธิพลของทั้งสามปัจจัยก่อให้เกิดความลึกหลุมกัดเซาะมีค่าความลึกหลุมกัดเซาะมากๆ ก็จะส่งผลให้มีการใช้เวลาในการกัดเซาะสู่สภาวะการกัดเซาะสมดุลมากตามไปด้วย และในทางตรงข้ามกัน ถ้าอิทธิพลของทั้งสามปัจจัยส่งผลให้เกิดความลึกหลุมกัดเซาะ ที่มีค่าความลึกหลุมกัดเซาะน้อย ก็จะส่งผลให้มีการใช้เวลาในการกัดเซาะสู่สภาวะการกัดเซาะสมดุลน้อยตามไปด้วย

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

1) ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า ความลึกหลุมกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มของโครงสร้างฐานราก (foundation structure) ที่มีครอบหัวเข็ม (pile cap) ภายใต้การกระทำของคลื่นและกระแสน้ำร่วมกันนั้น จะมีค่ามากกว่าความลึกหลุมกัดเซาะ ภายใต้กระแสน้ำอย่างเดียวอย่างมีนัยสำคัญ (มากกว่าประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์)

อย่างไรก็ตามผลการศึกษานี้ ได้จำกัดอยู่เฉพาะ การศึกษาถึงผลของความหนาของครอบหัวเข็ม (pile cap thickness) ต่อความลึกของหลุมกัดเซาะรอบๆฐานรากแบบเสาเข็มกลุ่ม โดยกำหนดให้ลักษณะทางกายภาพหรือตัวแปรอื่นๆของโครงสร้างฐานราก เช่น ความกว้างของครอบหัวเข็ม (pile cap width) และระยะห่างและการวางตัวของกลุ่มเสาเข็ม (pile spacing and pile arrangement) ที่มีความเฉพาะอันหนึ่ง (ตามเหตุผลที่ได้กล่าวมาเบื้องต้น ในขอบเขตของ

การศึกษาแล้ว) จึงได้จำกัดกรณีศึกษาเฉพาะ กรณีของระดับน้ำอยู่ในช่วงความหนาของครอบหัวเข็มเท่านั้น แต่ในข้อเท็จจริง โครงสร้างฐานรากมีส่วนประกอบของโครงสร้างตอม่อ (pier) ที่วางอยู่บนครอบหัวเข็ม ที่อาจจะมีบางส่วนในบางโอกาสที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำดังแสดงในรูป 2-5 ดังนั้น การศึกษาผลของตอม่อ ต่อพฤติกรรมการกัดเซาะรอบโครงสร้างฐานรากเสาเข็มภายใต้คลื่นและกระแสน้ำร่วมกันดังกล่าว จึงควรจะมีการศึกษา เพื่อจะให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์ครอบคลุมเงื่อนไขต่างๆ

2) ผลการทดลองทั้งหมดในการศึกษานี้ ใช้สำหรับอธิบายพฤติกรรมการกัดเซาะของน้ำไหลคงที่และไม่มีตะกอนปน (steady clear-water scour conditions) และคลื่นที่ทดลองเป็นคลื่นชนิดไม่สม่ำเสมอเคลื่อนตัวไปในทิศทางเดียวกันกับกระแสน้ำ ผู้ที่สนใจในงานวิจัยนี้อาจทำการศึกษาเพิ่มเติมในกรณีทิศทางของคลื่นอื่นๆ อาทิเช่น ทิศทางตั้งฉาก ทิศทางย้อนกลับ หรือทิศทางที่ทำมุมต่างๆกับทิศทางการไหลของกระแสน้ำ และกรณีการไหลของกระแสน้ำในสภาวะที่มีตะกอนปน เพื่อก่อเกิดผลการศึกษาเพิ่มเติมตามกรณีต่างๆและมีความสมบูรณ์ของเงื่อนไขการศึกษายิ่งขึ้น

3) เนื่องจากข้อจำกัดของเวลา และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา ทำให้ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ยังจำกัดอยู่ในช่วงหนึ่ง ไม่ครอบคลุมเงื่อนไขที่กว้าง ไม่ว่าจะเป็น คุณลักษณะของคลื่น (ที่ปรากฏในรูปของ *KC* number) หรือ สัดส่วนการรวมกันของคลื่นและกระแสน้ำ (ที่ปรากฏอยู่ในค่า $U_{cw}$ number) ควรจะมีการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มากขึ้น เพื่อให้ได้ความชัดเจนของความสัมพันธ์ของหลุมกัดเซาะ กับตัวแปรคลื่นและกระแสน้ำดังกล่าว ชัดเจนขึ้น

4) เนื่องจากข้อจำกัดของคุณสมบัติของแบบจำลองกระแสน้ำและคลื่น ที่ได้ออกแบบใช้ในการศึกษานี้ ไม่สามารถที่จะทำการทดลองในกรณีการกัดเซาะภายใต้อิทธิพลของคลื่นเพียงอย่างเดียวได้ จึงทำให้การศึกษานี้จึงขาดผลการศึกษาในกรณีดังกล่าว ดังนั้นจึงควรมีการออกแบบการทดลองเพื่อให้สามารถศึกษาในเงื่อนไขนี้ได้เพิ่มเติม เพื่อความสมบูรณ์ของข้อมูลผลการศึกษายิ่งขึ้น

5) ในการศึกษานี้ยังขาดการพิจารณาอิทธิพลของความสูงคลื่น ความยาวคลื่น รวมทั้งความสัมพันธ์ของค่าความเร็วการไหลเฉลี่ยกับความเร็วการไหลที่ตำแหน่งใกล้กับท้องน้ำ ต่อค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด เนื่องด้วยเหตุผลของข้อจำกัดทางด้านเวลาในการศึกษา ดังนั้น จึงควรมีการพิจารณาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ดังกล่าวในข้างต้น เพิ่มเติม เพื่อให้ได้ผลการศึกษาที่ครอบคลุมตัวแปรต่างๆยิ่งขึ้น

6) ในการศึกษานี้ได้พิจารณาถึงเฉพาะอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด ซึ่งยังขาดการพิจารณาถึงผลของตัวแปรต่างๆต่อขนาดความกว้างของหลุมกัดเซาะ เนื่องด้วยเหตุผลของข้อจำกัดทางด้านเวลาในการศึกษา หากพิจารณาในประเด็นนี้แล้ว จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการนำผลการศึกษาไปปรับเทียบหาค่าปริมาตรของหลุมกัดเซาะที่เกิดขึ้นได้ เพื่อนำไปสู่การพิจาณาออกแบบการป้องกันโครงสร้างฐานรากต่อการกัดเซาะที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น โดยในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดลองและวัดค่าดังกล่าวไว้แล้วในทุกกรณีศึกษา ซึ่งได้รวบรวมข้อมูลการทดลองทั้งหมดไว้ในรูปแผ่นซีดี ที่มอบไว้ที่ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังนั้นหากมีผู้สนใจในงานวิจัยนี้ จึงควรที่จะศึกษาและพิจารณาในประเด็นดังกล่าวเพิ่มเติม เพื่อความสมบูรณ์ของผลการศึกษายิ่งขึ้น

7) ในการทดลองนี้ไม่ได้ออกแบบการทดลองให้มีการสลายพลังงานคลื่นด้านท้ายน้ำ ซึ่งจากการทดลองได้ใช้เพียงบานระบายน้ำล้นข้ามที่ลดสภาวะการสะท้อนกลับของคลื่นน้ำที่ด้านท้ายน้ำได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น ผลการศึกษาที่ได้จึงอาจมีผลกระทบที่เกิดจากสภาวะการสะท้อนกลับของคลื่นด้านท้ายน้ำด้วย เนื่องจากแบบจำลองรางน้ำในการศึกษามีความยาวไม่มากนัก ดังนั้น ผู้ที่สนใจในการพัฒนาการศึกษานี้ต่อไป จึงควรคำนึงถึงผลกระทบดังกล่าวนี้ด้วย ซึ่งหากมีการศึกษาต่อไป ควรที่จะออกแบบการทดลองในส่วนดังกล่าวให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น เช่น อาจสร้างหรือติดตั้งโครงสร้างสลายพลังงานคลื่นในส่วนดังกล่าวเพิ่มเติมเข้าไป หรือปรับเปลี่ยนบานระบายน้ำด้านท้ายน้ำให้เป็นแบบบานระบายลอดผ่าน โดยในส่วนด้านบนของบานระบายที่ปะทะกับคลื่นน้ำก็ให้ออกแบบในลักษณะที่เป็นพื้นที่ปะทะแบบลาดเอียงรับการเคลื่อนที่เข้ากระทำจากคลื่นน้ำ เพื่อลดการสะท้อนกลับ หรือเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการสลายพลังงานคลื่นยิ่งขึ้น ก็อาจจะติดตั้งโครงสร้างสลายพลังงานคลื่น เช่น ออกแบบเป็นตะแกรงสลายพลังงานคลื่นเหมือนกับด้านต้นน้ำในการศึกษานี้ เข้าไปในส่วนดังกล่าวของบานระบายน้ำด้วย เป็นต้น

8) จากการศึกษาพบว่ามาตราส่วนที่ใช้ในการจำลองแบบจำลองตอม่อค่อนข้างเล็ก เนื่องจากข้อจำกัดของขนาดของแบบจำลองรางคลื่นและกระแสน้ำ ในการศึกษานี้ได้ทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขมาตราส่วนของแบบจำลองตอม่อตามความจำกัดของแบบจำลองรางคลื่นและกระแสน้ำ โดยมีขนาดความกว้างสูงสุดของแบบจำลองตอม่อเท่ากับ 1 ใน 3 ของขนาดความกว้างของรางน้ำทุกกรณีศึกษา จากขนาดของแบบจำลองที่มีขนาดเล็กจึงส่งผลให้การติดตั้งแบบจำลอง การปรับแบบจำลองตามการออกแบบการทดลอง รวมทั้งการวัดข้อมูลการทดลองการกัดเซาะที่ต้องการความละเอียดมากถึงระดับมิลลิเมตร ค่อนข้างที่จะทำการติดตั้ง ปรับ และวัดข้อมูลลำบาก ซึ่งอาจทำให้ข้อมูลที่ได้เกิดความคลาดเคลื่อน

9) อุปกรณ์และเครื่องมือวัด รวมทั้งแบบจำลองรางคลื่นและกระแสน้ำ แบบจำลองตอม่อและเครื่องกำเนิดคลื่น ล้วนมีส่วนที่จมหรือสัมผัสกับน้ำที่ทดลองในขณะทำการทดลอง ซึ่งในการทดลองแต่ละกรณีศึกษาค่อนข้างที่จะใช้เวลาในการทดลองนาน ดังนั้นอุปกรณ์หรือแบบจำลองดังกล่าวในข้างต้นอาจเกิดการผุพัง ชำรุดเสียหายได้ในขณะทำการทดลอง หรือในภายหลังการทดลอง ดังนั้นจึงควรมีการตรวจเช็ค และบำรุงรักษาอยู่บ่อยๆ ในขณะทำการทดลอง เช่น เคลือบสีกันสนิม เช็ดทำความสะอาจให้แห้ง โดยเฉพาะเครื่องกำเนิดคลื่น ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่แช่อยู่ในน้ำตลอดเวลา และขณะเดียวกันก็มีการเคลื่อนไหวไปมาตลอดเวลาด้วย จึงเสี่ยงต่อการชำรุดเสียหายได้ง่าย ดังนั้นจึงควรเติมน้ำมันหล่อลื่น หรือทาจาระบีหล่อลื่น ตามจุดหมุนหรือข้อเหวี่ยงต่างๆ รวมทั้งเคลือบสารกันสนิมตามตำแหน่งที่สัมผัสหรือจมอยู่ในน้ำเสมอๆ เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่ สร้างขึ้นจากเหล็กซึ่งง่ายต่อการเกิดสนิม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# รายการอ้างอิง

## ภาษาไทย


ธรรมวัฒน์ การุณธนกุล. (2541). การกัดเซาะรอบตอม่อสะพานที่เรียงเป็นตับ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พรมงคล ชิดชอบ. (2540). การกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สมรักษ์ ต่อวงศ์ไพชยนต์. (2527). การกัดเซาะของน้ำต่อโครงสร้างสะพานและท่อ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อาทิตยา เกศมาริษ. (2540). เกณฑ์การออกแบบเขื่อนกันคลื่นแยกในงานป้องกันชายฝั่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เอกนันท์ ตั้งธีระสุนันท์. (2544). ผลของความขรุขระของผิวตอม่อสะพานต่อหลุมกัดเซาะ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.


## ภาษาอังกฤษ


Bozkus, Z. and Yildiz, O. (2004). Effects of Inclination of Bridge Piers on Scouring Depth. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. 130, 8:827-832.

Bayram, A. and Larson, M. (2000). Analysis of Scour Around a Group of Vertical Piles in The Field. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE. 126, 4 : 215-220.

Chang, Sin Zee. (1987). The Area of Scour Hole Around Bridge Piers. Master's Thesis, Asian Institude of Technology, Bangkok, Thailand.

Chiew, Y. M. (1995). Mechanics of Riprap Failure at Bridge Piers. Journal of Hydraulics Engineering, ASCE. 121, 9:635-643.

Chiew, Y.M. (2004). Local Scour and Riprap Stability at Bridge Piers in a Degrading Channel. Journal of Hydraulics Engineering, ASCE. 130, 3:218-226.

Eadie, R.W., and Herbich, J.B. (1986). Scour about a Single Cylindrical Pile due to Combined Random Waves and Current. Proc, $20^{th}$ Coastal Engineering Conference. ASCE., New York, 1858-1870.

Federal Highway Administration, FHWA. (2001). Evaluating Scour at Bridges.4 th ed. Hydraulic Engineering Circular No.18, U.S. Department of Transportation, May.

FHWA Technical Advisory (1988). Scour at Bridge. U.S. Department of Transportation, (September).

Francis et al. (2001). Flume Test for Scour in Clay at Circular Piers. Journal of Hydraulics Engineering, ASCE. 127, 11:969-978.

Fukui, J. and Otuka, M. (2001). Present State of Investigation Technique for Scouring, The Foundation Engineering and Equipment 9, 29 : 19-21.

Johnson, P.A. and Jones, J.S. (1993). Merging Laboratory and Field Data in Bridge Scour. Journal of Hydraulics Engineering, ASCE.119, 10:1176-1181.

Jones, J.S. and Max Sheppard, D. (1998). Local Scour at Complex Pier Geometries. ASCE Water Resources Engineering Conference, United States.

Jones, J.S. and Max Sheppard, D. (2004). Scour at Wide Bridge Piers. ASCE Water Resources Engineering Conference, United States.

Max Sheppard, D., Odeh, M. and Glasser, T. (2004). Large Scale Clear-Water Local Pier Scour Experiments. Journal of Hydraulics Engineering, ASCE.130, 10:957-963.

Melville, B. W. and Chiew, Y. M. (1999). Time Scale for Local Scour at Bridge Piers. Journal of Hydraulics Engineering, ASCE. 125, 1:59-65.

Melville, B.W., and Dongol, D.M. (2004). Bridge Pier Scour with Debris Accumulation. Journal of Hydraulics Engineering, ASCE.118, 9:1306-1310.

Murillo, J.A. (1987). The Scourge of Scour. Civil Engineer (New York). 57, 7.

Nandana Vittal, Kothyari,U.C. and Morteza Haghighat.(1994). Clear-Water Scour Around Bridge Pier Group. Journal of Hydraulics Engineering,ASCE.120, 11:338-350.

Palmer, H.D. (1969). Wave Induced Scour on The Sea Floor. Proc,Civil Engineering in the Ocean, ASCE., New York: 703.

Rahman, M. and Anisul Haque, M. (2001). Local Scour at Sloped-Wall Spur-Dike-Like Structures in Alluvial Rivers. Journal of Hydraulics Engineering, ASCE. 130, 1 : 70-74.

Raudkivi, A.J. and Sutherland, A.J. (1981). Scour at Bridge Crossings. Willington New Zealand: National Road Board.

Richardson, E.V. et Al. (1993). Evaluating Scour at Bridges.2 nd ed.HEC 18 FHWA NHI - 001, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington. D.C.

Richardson, E.V. et Al. (1995). Evaluating Scour at Bridges.3 rd ed. HEC 18 FHWA NHI - 001, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington. D.C.

Richardson, E.V. et Al. (2001). Evaluating Scour at Bridges.4 th ed. HEC 18 FHWA NHI - 001, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington. D.C.

Salim. and Jones (1999). Scour Around Exposed Pile Foundations. ASCE North American Water and Environment Conference: 335-346.

Sumer, B.M., Fredsoe, J., and Christiansen, N. (1992b). Scour Around a Vertical Pile in Wave. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE. 118,1 : 15-31.

Sumer, B.M., Fredsoe, J., and Christiansen, N. (1993). Influence of Cross Section on Wave Scour Around Piles. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE. 119, 5 : 477-495.

Sumer, B.M. and Fredsoe, J.(1998). Wave Scour Around a Group of Vertical Piles. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE. 124,5 : 248-256.

Sumer, B.M. and Fredsoe, J. (1999). Wave Scour Around Structures. Advances in Coastal and Ocean Engineering, Vol 4, World Scientific Publishing Co: 191-249.

Sumer, B.M. and Fredsoe, J. (2001). Wave Scour Around a Large Vertical Circular Cylinder. Journal of Waterway,Port,Coastal and Ocean Engineering, ASCE.131,5 :125-134.

Sumer, B.M. and Fredsoe, J.(2001). Scour Around Pile in Combined Waves and Current. Journal of Hydraulics Engineering, ASCE.127, 5 :403-411.

Sumer, B.M. and Fredsoe, J. (2001). Control of Scour at Vertical Circular Piles under Waves and Current. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE.132, 3 :270-279.

Sumer, B.M., Hatipoglu, F. and Fredsoe, J. (2007). Wave Scour Around a Pile in Sand, Medium Dense, and Dense Silt. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE.133, 1 :14-27.

Ting, F.C.K. (2001). Flume Test for Scour in Clay at Circular Piers. Journal of Hydraulics Engineering, ASCE. 127, 11:288-300.

Umbrell, E. R. et al. (1998). Clear-Water Contraction Scour under Bridges in Pressure Flow. Journal of Hydraulics Engineering, ASCE. 124, 2 : 236-240.

Yovanni, A.C.L., Garcia, M.H. (2005). Burial of Short Cylinders Induced by Scour and Bedforms under Waves Plus Current. ASCE Water Resources Engineering Conference, USA.

Yovanni, A.C.L., Garcia, M.H. (2006). Burial of Short Cylinders Induced by Scour under Combined Waves and Current. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE.132, 6 :439-449.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก

ภาคผนวก ก แบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์และอุปกรณ์การทดลอง

ภาคผนวก ข การหาค่าเบื้องต้นที่ใช้ในการทดลอง

ภาคผนวก ค การเตรียมการทดลองและการปรับเทียบอุปกรณ์

ภาคผนวก ง ตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง

ภาคผนวก จ ภาพถ่ายผลการศึกษาและตารางบันทึกผลการทดลองใน
กรณีศึกษาต่างๆ

ภาคผนวก ฉ การประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะภายใต้กระแสน้ำจากสมการ
HEC-18 (FHWA, 2001) และการหาค่าปรับแก้ความลึกหลุมกัด
เซาะเนื่องจากความหนาครอบหัวเข็ม

ภาคผนวก ช สรุปการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับปัญหาเรื่องการกัดเซาะรอบ
โครงสร้างฐานรากของอาคารชลศาสตร์

ภาคผนวก ซ สรุปสัญลักษณ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก ก

## แบบจำลองกายภาพทางชลศาสตร์
## และอุปกรณ์การทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก ก

# แบบจำลองชลศาสตร์การกัดเซาะรอบตอม่อ

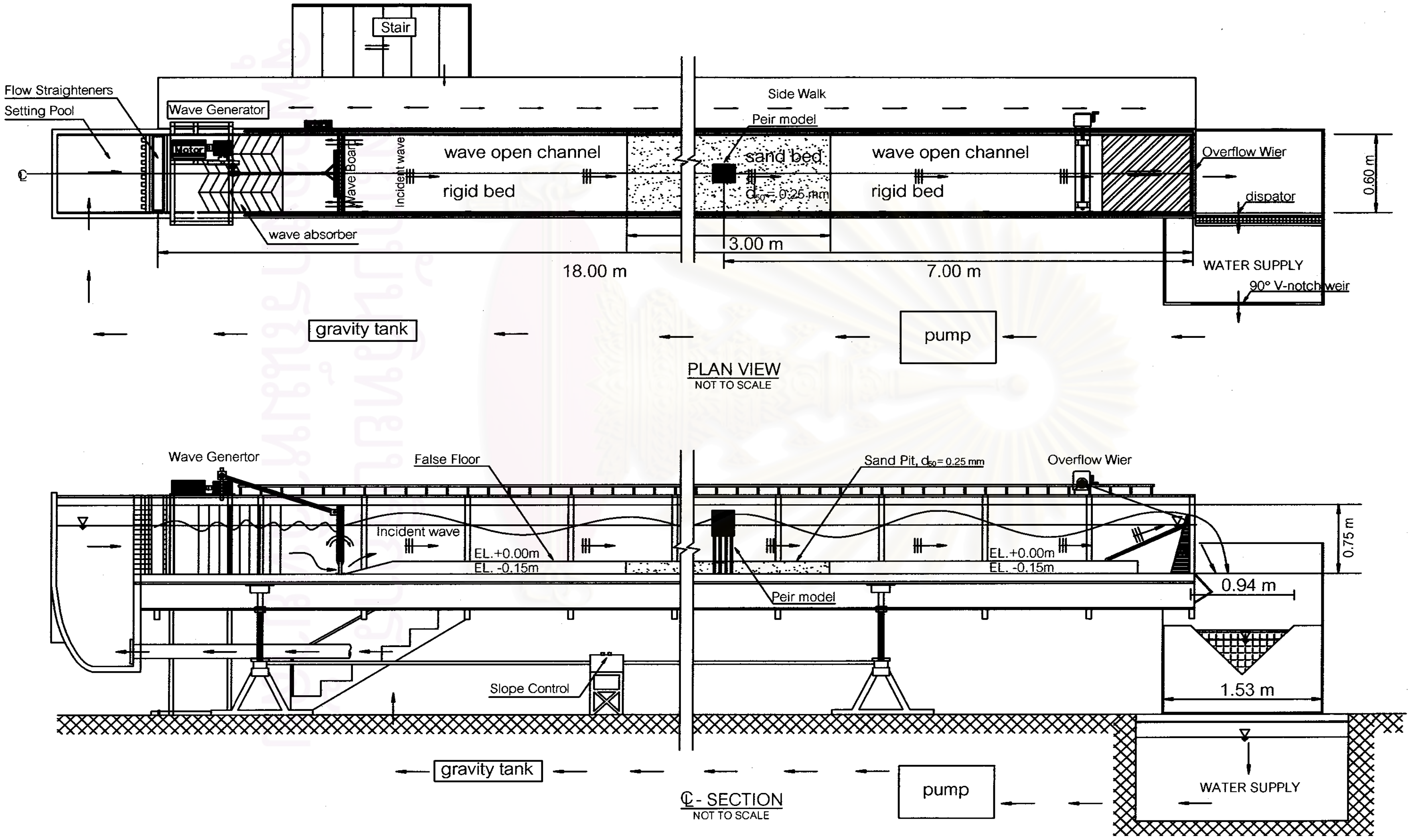
## ก-1 การจัดเตรียมแบบจำลองชลศาสตร์

การทดลองการกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็มภายใต้คลื่นและกระแสน้ำ ได้จำลองการศึกษาในรางน้ำเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ณ ห้องปฏิบัติการชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังแบบรายละเอียดรูป ก-1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) แบบจำลองกระแสน้ำและคลื่น (wave and current open channel) เพื่อจำลองการไหลในรางน้ำเปิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 0.60 ม. ยาว 18 ม. สูง 0.75 ม. ผนังเป็นกระจกใส หนา 1.20 ซม. พื้นรางเป็นโลหะหนา 6.00 มม. ยกระดับท้องรางด้วยวัสดุไม่มีการกัดเซาะ (rigid bed or false floor) โดยปูด้วยแผ่นอะคิลิกส์ยาวตลอดรางน้ำเปิด ยกเว้นส่วนที่ทำการศึกษาการกัดเซาะในช่วงตอนกลางของรางน้ำ สภาพท้องน้ำเป็นทรายละเอียดขนาดเฉลี่ย 0.25 มม. ปูยาว 3 ม. ในระนาบเดียวกับพื้นวัสดุที่ไม่มีการกัดเซาะ ความลาดเอียงของท้องรางน้ำสามารถปรับได้โดยใช้แม่แรงยกซึ่งหมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ที่ด้านต้นน้ำติดตั้งเครื่องกำเนิดคลื่นและตระแกรงสลายพลังงานคลื่น พร้อมระบบนำน้ำเข้าสู่รางโดยท่อขนาด ∅ - 6 นิ้ว ควบคุมอัตราการไหลของน้ำด้วยวาล์วปิด - เปิด จากถังน้ำขนาดความจุประมาณ 30 ลูกบาศก์เมตร บนชั้นดาดฟ้าของตึกที่ทำการทดลอง (ตึกวิศวกรรม 5) ซึ่งมีความสูงจากรางน้ำประมาณ 30 ม. ที่ท้ายรางน้ำเปิดติดตั้งบานระบายน้ำล้น (over flow weir) ทำหน้าที่ควบคุมความลึกการไหลของน้ำในรางน้ำเพื่อกำหนดให้สภาพการไหลเป็นการไหลแบบต่ำกว่าวิกฤต (subcritical flow) น้ำไหลลงสู่ถังเหล็กรับน้ำใช้เป็นตัววัดอัตราการไหลแบบฝายสันคมรูปตัววี (V-notch weir) แล้วปล่อยน้ำลงไปที่บ่อเก็บน้ำด้านล่างของรางและใช้เครื่องสูบน้ำ 4 ตัวในการสูบน้ำกลับขึ้นไปบนถังสูง ซึ่งต้องรักษาระดับน้ำในถังสูงให้คงที่เพื่อให้เป็นระบบหมุนเวียนน้ำที่มีอัตราการปล่อยน้ำออกจากถังคงที่ รูปแสดงส่วนประกอบต่างๆของรางกระแสน้ำและคลื่นดังรูป ก-2 ถึง ก-9

2) ระบบหมุนเวียนของน้ำ ประกอบด้วย ถังเก็บน้ำ (constant head tank) ความจุ 30 ลูกบาศก์เมตร เครื่องสูบน้ำขนาด 25 แรงม้า จำนวน 4 เครื่อง แต่ละเครื่องสามารถสูบน้ำได้สูงสุดประมาณ 25 ลิตรต่อวินาที การหมุนเวียนของน้ำจะเริ่มจากการปล่อยน้ำจากถังเก็บน้ำผ่านท่อเหล็กกล้าผ่านวาล์วควบคุมการเปิด-ปิดท่อ จนกระทั่งถึงบ่อพักด้านเหนือน้ำ น้ำจะไหลผ่านรางน้ำและไหลลงสู่บ่อพักน้ำ (sump) และถูกสูบกลับไปสู่ถังเก็บน้ำโดยเครื่องสูบน้ำอีกครั้ง ดังรูป ก-1 แสดงเส้นทางการไหลเวียนของน้ำตามทิศทางของลูกศร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




รูป ก-1 รายละเอียดแบบจำลองชลศาสตร์กระแสน้ำและคลื่น

ก) มองจากต้นรางน้ำ

ข) มองจากต้นรางน้ำ

ค) มองจากท้ายรางน้ำ

ง) มองจากท้ายรางน้ำ

รูป ก-2 รางน้ำเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular flume)

ก) เตรียมชิ้นงาน

ข) ประกอบชิ้นงาน

ค) ชิ้นงานสมบูรณ์

ง) ติดตั้งในรางน้ำ

รูป ก-3 ท้องรางน้ำทำจากวัสดุไม่มีการกัดเซาะ (rigid bed or false floor)

รูป ก-4 เว้นตำแหน่งท้องรางไว้เติมทรายที่ช่วงกึ่งกลางรางน้ำ

ก) ด้านหน้า

ข) ด้านหลัง

รูป ก-5 กระดานสร้างคลื่นน้ำ

ก) ประกอบชิ้นงาน

ข) ประกอบสมบูรณ์

ค) ติดตั้งในรางน้ำ

ง) ติดตั้งหลังกระดานสร้างคลื่น

รูป ก-6 ตะแกรงสลายพลังงานคลื่น ที่ด้านหลังกระดานพัดคลื่น

ก) เครื่องสูบน้ำ

ข) ระบบท่อจากถังเก็บน้ำ

รูป ก-7 ระบบจ่าย – ส่งน้ำ

ก) สเกลปรับอัตราการปล่อยน้ำแบบหยาบ

ข) สเกลปรับอัตราการปล่อยน้ำแบบละเอียด

รูป ก-8 วาล์วปิด-เปิดน้ำเข้าสู่รางน้ำ

ก) ชุดปรับระดับบานระบาย (เฟืองทดรอบ)

ข) บานระบายทำจากโครงเหล็กและแผ่นอะคิลิกส์

ค) ลวดสลิงยกระดับ

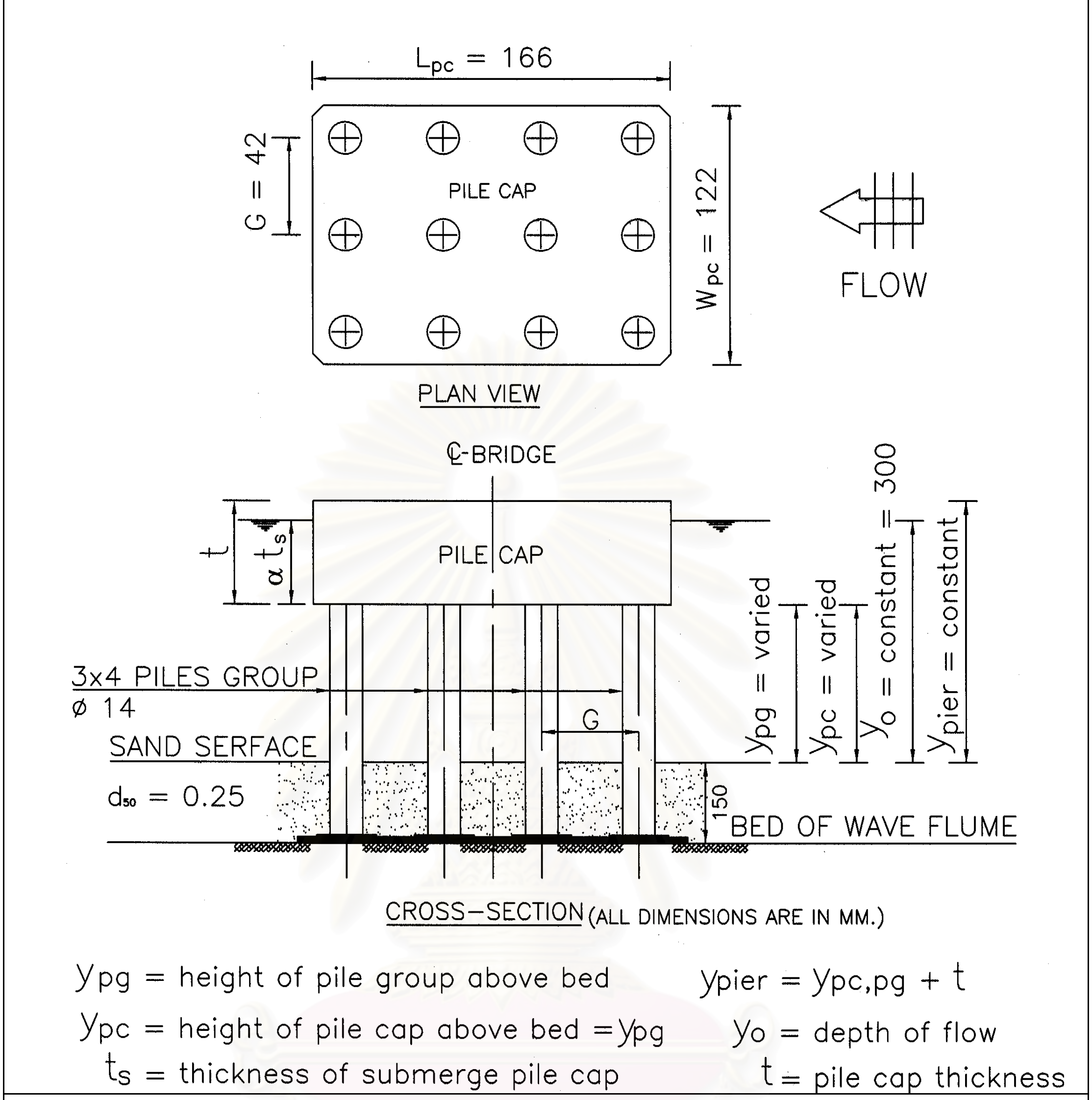
ง) สเกลวัดระดับน้ำไหลล้นข้าม

รูป ก-9 บานระบายน้ำล้น ควบคุมระดับน้ำที่ท้ายรางน้ำ

**ก-2 แบบจำลองตอม่อสะพาน**

รูปแบบตอม่อในการจำลองการศึกษา มีลักษณะเป็นตอม่อแบบที่ประกอบด้วยโครงสร้าง 2 ส่วนจมน้ำ คือ เสาเข็มกลุ่ม (pile group) แบบ 3X4 รูปทรงกระบอกตั้งตรงในแนวดิ่ง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 14.0 มม. ระยะห่างระหว่างเสาเข็มเป็น 3 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็มและครอบหัวเข็ม (pile cap) ขนาดกว้าง 122.0 มม. ยาว 166.0 มม. โดยอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกของน้ำอยู่ในช่วง 0.2 – 1.0 ดังแบบรายละเอียดในรูป ก-10 ทั้งนี้การกำหนดขนาดส่วนประกอบต่างๆ ของแบบจำลองตอม่อดังกล่าวในข้างต้น บางส่วนถูกกำหนดตามวัสดุที่ใช้สร้างแบบจำลองที่มีจำหน่ายในท้องตลาด และบางส่วนถูกกำหนดตามข้อจำกัดของแบบจำลองกระแสน้ำและคลื่น สำหรับวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองตอม่อนั้น ครอบหัวเข็มทำด้วยแผ่นอะคิลิกส์ เสาเข็มทำด้วยท่อพีวีซี โดยปลายเสาเข็มส่วนที่ไม่มีครอบหัวเข็มยึดติดกับแผ่นอะคิลิกส์ เพื่อให้เสาเข็มได้ระยะตามแบบ ดังรูป ก-11 ถึงรูป ก-19

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

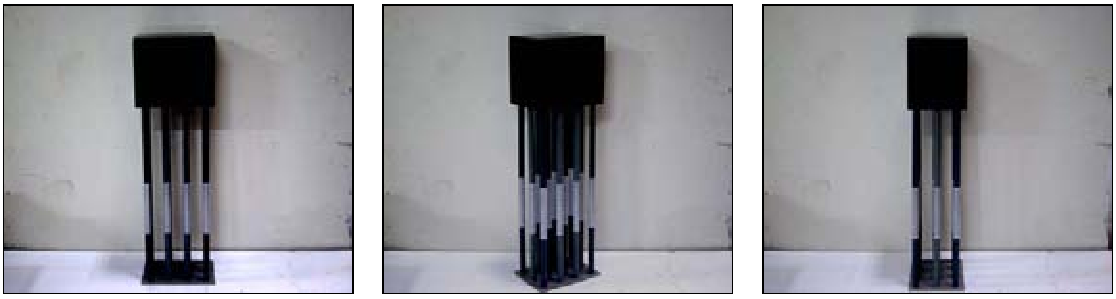



หมายเหตุ : แบ่งการทดลองออกเป็น 9 กรณี ตามการเปลี่ยนแปลง $t_s$ ในช่วง $0.2y_0 – 1.0y_0$

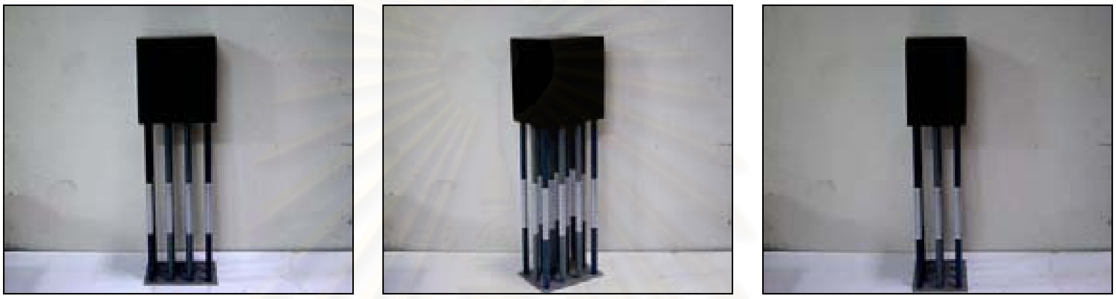
รูป ก-10 รายละเอียดแบบจำลองตอม่อ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูป ก-11 แบบจำลองตอม่อ กรณีศึกษา P1 : $t_s = 0.2y_0$



รูป ก-12 แบบจำลองตอม่อ กรณีศึกษา P2 : $t_s = 0.3y_0$



รูป ก-13 แบบจำลองตอม่อ กรณีศึกษา P3 : $t_s = 0.4y_0$

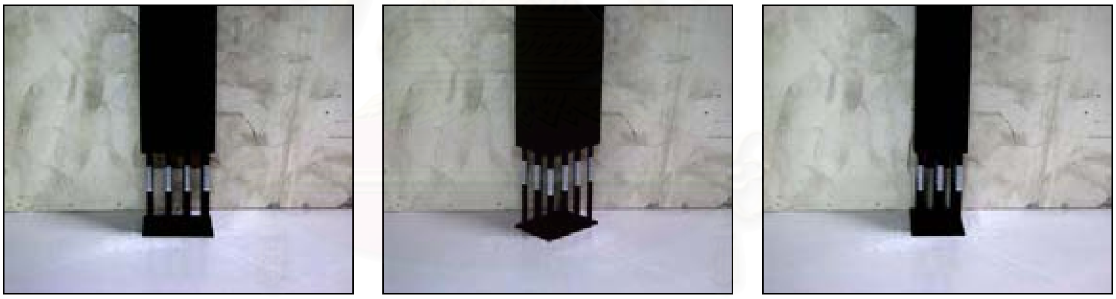
รูป ก-14 แบบจำลองตอม่อ กรณีศึกษา P4 : $t_s = 0.5y_0$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

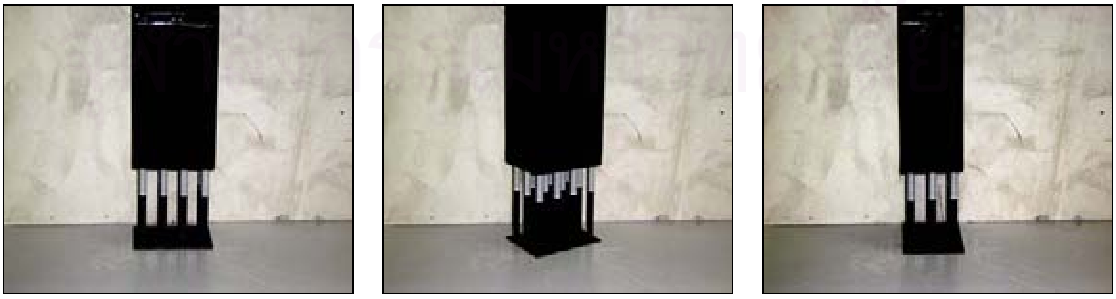
รูป ก-15 แบบจำลองตอม่อ กรณีศึกษา P5 : $t_s = 0.6y_0$

รูป ก-16 แบบจำลองตอม่อ กรณีศึกษา P6 : $t_s = 0.7y_0$

รูป ก-17 แบบจำลองตอม่อ กรณีศึกษา P7 : $t_s = 0.8y_0$



รูป ก-18 แบบจำลองตอม่อ กรณีศึกษา P8 : $t_s = 0.9y_0$



รูป ก-19 แบบจำลองตอม่อ กรณีศึกษา P10 : $t_s = 1.0y_0$

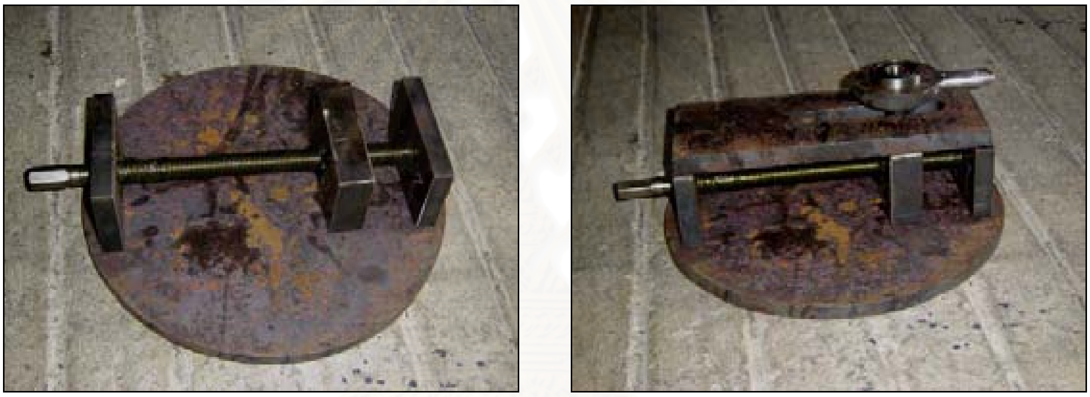
## ก-3 เครื่องกำเนิดคลื่น

เครื่องกำเนิดคลื่น (wave generator) ที่ใช้ในแบบจำลองเป็นแบบกระดานพัดน้ำ (paddle type) ด้านล่างของกระดานพัดน้ำเป็นแบบ Hinge Connection ด้านบนของกระดานต่อกับส่วนขับเคลื่อน ซึ่งเคลื่อนกลับไป–มา ได้ตามระยะช่วงชัก (stroke) โดยความเร็วการเคลื่อนที่ขึ้นกับความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนได้ จึงสามารถสร้างคลื่นที่มีความสูงและคาบคลื่นได้แตกต่างกัน ซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้ (ดังรูป ก-20 ถึงรูป ก- 24 ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องกำเนิดคลื่น)

1. แท่นเหล็กติดตั้งเครื่องกำเนิดคลื่นเหนือตำแหน่งบ่อพักน้ำด้านต้นน้ำของรางน้ำ
2. มอเตอร์ไฟฟ้า TYPE : IMB3-100L, กำลังขับเคลื่อน 2.2 KW 3HP 50 Hz, ความเร็วรอบ 1452 rpm, ใช้กับกระแสไฟฟ้า 220/380 V – 9.13/5.28 A
3. ชุดเฟืองทดรอบมอเตอร์ TYPE : P, ขนาดการทดรอบ (RATIO) เท่ากับ 1 : 20
4. ชุดปรับระยะชักโยก ทำจากเหล็กแผ่น และแท่งเกลียวใช้ปรับระยะตามสเกล
5. ชุดเชื่อมต่อเพลา ระหว่างมอเตอร์ – ชุดเฟืองทดรอบ – ชุดปรับระยะชักโยก
6. ชุดพวงลูกปืนที่ตำแหน่งจุดหมุนต่างๆ เช่น ปลายก้านชักโยก ฐานกระดานพัดน้ำ
7. ก้านเหล็กชักโยกกระดานพัดน้ำ
8. กระดานพัดน้ำทำจากอะคิลิกส์ติดเข้ากับโครงเหล็กฉาก
9. ชุดปรับความเร็วรอบมอเตอร์ พร้อมสวิทซ์ ปิด – เปิด การทำงานของเครื่องกำเนิดคลื่น
10. หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า พร้อมสวิทซ์ ปิด – เปิด การจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าชุดปรับความเร็วรอบมอเตอร์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

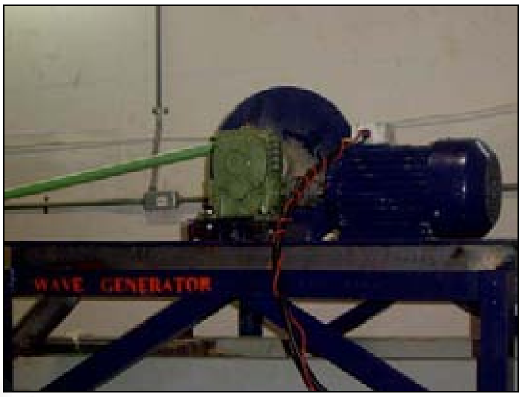
รูป ก-20 ชุดพวงลูกปืนที่ตำแหน่งจุดหมุนต่างๆ



รูป ก-21 ชุดปรับระยะชักโยก

รูป ก-22 ก้านโยกกระดานสร้างคลื่น และมอเตอร์ไฟฟ้า

ด้านบน




ด้านข้าง

ด้านหน้า

กระดานสร้างคลื่น

รูป ก-23 การประกอบ มอเตอร์ – ชุดเฟืองทดรอบ – ชุดปรับระยะชักโยก-กระดานพัดน้ำ

ชุดปรับความเร็วรอบมอเตอร์

หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า

รูป ก-24 ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดคลื่น

## ก-4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1) เครื่องมือวัดระดับ (point gauge) ติดตั้งบนรางเลื่อนลูกล้อวิ่งบนรางน้ำเปิด เพื่อใช้วัดระดับท้องน้ำและผิวน้ำ ณ ตำแหน่งพื้นที่การทดลองที่ต้องการ ดังรูป ก-25

2) เครื่องมือวัดกระแสน้ำ (current meter) ติดตั้งบนรางเลื่อนลูกล้อวิ่งบนรางน้ำเปิด เพื่อใช้วัดความเร็วกระแสน้ำ และความเร็วอนุภาคหมุนวนของคลื่นที่ผ่านจุดตรวจวัด ดังรูป ก-26

3) เครื่องวัดความสูงคลื่น (wave height meter) ติดตั้งในรางคลื่นเพื่อวัดคลื่นที่ผ่านจุดตรวจวัดได้ ดังรูป ก-27

4) ฝายสามเหลี่ยมสันคม (90° V-notch weir) ติดตั้งที่ท้ายน้ำของรางน้ำ เพื่อใช้วัดอัตราการไหลของน้ำ โดยการอ่านค่าระดับน้ำเหนือสันฝาย ($H$) และนำไปคำนวณอัตราการไหลจากสมการ $Q = 0.045H^{2.1}$ โดยที่ $Q$ คือ อัตราการไหลในหน่วยลิตรต่อวินาที $H$ คือ ความสูงของน้ำเหนือสันฝายในหน่วยเซนติเมตร ดังรูป ก-28

5) ถาดติดล้อเลื่อน สามารถเลื่อนขนานไปตามความยาวรางน้ำ ใช้สำหรับติดตั้งเครื่องมือเก็บวัดข้อมูลการทดลองต่างๆ เช่น เครื่องมือวัดกระแสน้ำ (current meter) และเครื่องมือวัดระดับ (point gauge) ดังรูป ก-29

6) กล้องถ่ายรูป กล้องวีดีโอและเครื่องบันทึกภาพ ใช้บันทึกภาพพฤติกรรมการไหล และกระบวนการกัดเซาะและตกตะกอนรอบแบบจำลองตอม่อ ติดตั้งที่ด้านข้างและด้านบนของรางน้ำเปิด ดังรูป ก-30

7) อุปกรณ์รับสัญญาณอนาลอกของเครื่องมือวัดความเร็วกระแสน้ำและความสูงคลื่น ดังรูป ก-31(ก-ข)

8) แผงวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล รุ่น PCI-6024E ใช้ร่วมกับแผงวงจรรวมสัญญาณแบบสกรู รุ่น CB-68LP และสายต่อ รุ่น R6868 ของบริษัท National Instruments ดังรูป ก-31(ค)

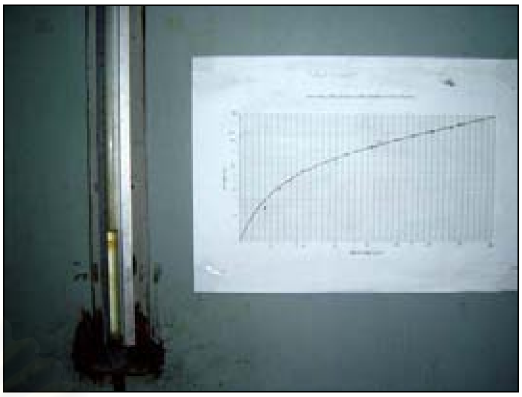
9) คอมพิวเตอร์ Desktop “AMD Duron(tm) Processor” และโปรแกรม “LabVIEW 6.1” ใช้เก็บข้อมูลจากเครื่องวัดกระแสน้ำ และเครื่องวัดความสูงคลื่น ดังรูป ก-31 (ง)

รูป ก-25 เครื่องมือวัดระดับ (point gauge)

รูป ก-26 เครื่องมือวัดกระแสน้ำ (current meter)

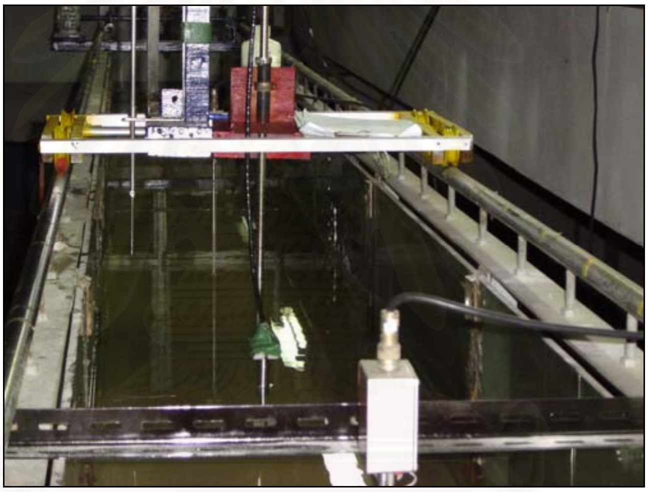
รูป ก-27 เครื่องวัดความสูงคลื่น (wave height meter)

ก) 90° V-notch weir



ข) เครื่องวัดอัตราการไหลจากระดับน้ำ

รูป ก-28 ชุดเครื่องมือวัดอัตราการไหลท้ายรางน้ำ



รูป ก-29 ถาดติดล้อเลื่อน ใช้สำหรับติดตั้งเครื่องมือเก็บวัดข้อมูลการทดลองต่างๆ

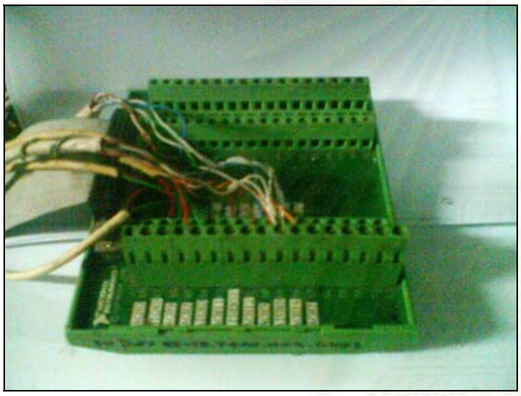
ก) กล้องถ่ายวีดีโอ

ข) คอมพิวเตอร์เก็บบันทึกวีดีโอ

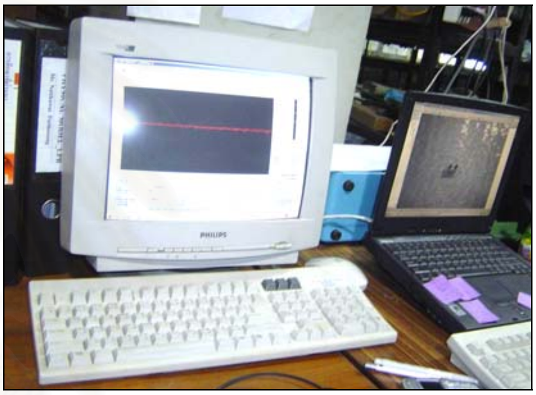
รูป ก-30 ชุดอุปกรณ์บันทึกการทดลองการกัดเซาะ

ก) อุปกรณ์รับสัญญาณอนาล็อกเครื่องวัดระดับน้ำ

ข) อุปกรณ์รับสัญญาณอนาล็อกเครื่องวัดกระแสน้ำ



ค)  แผงวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล



ง) คอมพิวเตอร์ Desktop และโปรแกรม “LabVIEW”

รูป ก-31 ชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูลการทดลองต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก ข

## การหาค่าเบื้องต้นที่ใช้ในการทดลอง

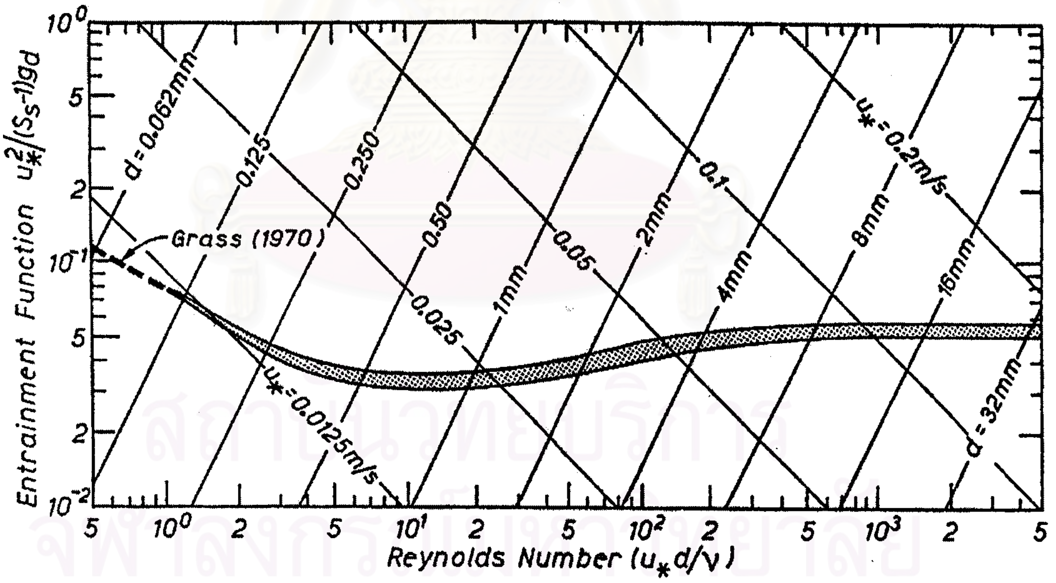
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

## การหาค่าเบื้องต้นที่ใช้ในการทดลอง

### ข-1 การคำนวณเพื่อหาสภาพการเริ่มต้นเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ

ในการศึกษานี้ได้กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นในสภาวะสมดุลของน้ำไม่มีตะกอนปน (clear water) ซึ่งต้องคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การไหลในรางน้ำเปิดด้วยสภาวะที่ตะกอนเริ่มมีการเคลื่อนที่ โดยใช้ไดอะแกรมของชิลด์ (Shield's diagram) เป็นแนวทางในการกำหนดเงื่อนไขดังกล่าวเบื้องต้น มีพารามิเตอร์การไหลที่สำคัญ คือ ความสัมพันธ์ของค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตกับขนาดเฉลี่ยของวัสดุท้องน้ำ ($d_{50}$) ในรูปของ Entrainment Function และ Shear Reynolds Number ดังรูป ข-1 เพื่อกำหนดสภาพของตะกอนท้องน้ำ โดยความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองต้องอยู่บนเส้นกราฟของ Shield's diagram หรือกล่าวได้ว่าถ้าความเร็วการไหลของน้ำเท่ากับ 5 ซม./วินาที ความลึกการไหล และความลาดชันพลังงานการไหล ($S_f$) ต้องสัมพันธ์กันเพื่อให้ค่า $\tau_0$ กับ $d_{50}$ อยู่บนเส้นกราฟของ Shield's diagram จึงเป็นสภาวะที่ตะกอนขนาดใดๆ เริ่มมีการเคลื่อนที่ ซึ่งมีตัวอย่างการคำนวณดังนี้




รูป ข-1 ความสัมพันธ์ของ Entrainment Function กับ Reynolds Number
ตามที่ Shields ได้ทำการศึกษาไว้ โดย Raudkivi และ Sutherland (1981)

จากกราฟความสัมพันธ์ของค่าหน่วยแรงเฉือนวิกฤตกับขนาดเฉลี่ยของตะกอนที่มีขนาดสม่ำเสมอเสนอโดย Shields (1936) (ดูรูป ข-1) สำหรับขนาดวัสดุท้องน้ำในแบบจำลองเท่ากับ 0.25 มม. ซึ่งผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดโดย ปิยะฉัตร เลิศอมรพงษ์ (2002) แสดงใน รูป ข-2 และตาราง ข-1 เมื่อนำมาอ่านกราฟบนเส้นที่ตะกอนเริ่มเคลื่อนที่ได้เท่ากับ 0.45

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\frac{\tau_*}{(\rho_s - \rho_w)gd} = 0.45 \qquad (ข\text{-}1)$$

เมื่อ $\rho_s$ = ความหนาแน่นของวัสดุท้องน้ำเท่ากับ 2650 kg/m$^3$

$\rho_w$ = ความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1000 kg/m$^3$

$g$ = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกเท่ากับ 9.81 m/s$^2$

$d$ = ขนาดเฉลี่ยของตะกอนท้องน้ำเท่ากับ 0.25 mm

จากสมการของหน่วยแรงฉุด

$$\tau_* = \gamma R S_f \qquad (ข\text{-}2)$$

เมื่อ $\gamma$ = หน่วยน้ำหนักของน้ำเท่ากับ 9810 N/m$^3$

$R$ = รัศมีชลศาสตร์ $A/P$ เท่ากับ 0.15 m

$S_f$ = ความลาดชันพลังงาน

จะได้

$$S_f = \frac{\tau_*}{\gamma R} \qquad (ข\text{-}3)$$

จากสมการที่ (ข-1) และ (ข-3) หาค่าความลาดชันพลังงานได้เท่ากับ 0.000123 m./m. และหาความลาดชันท้องน้ำจาก

$$S_0 = \frac{E_2 - E_1}{\Delta x} + S_f \qquad (ข\text{-}4)$$

โดยที่การทดลองเพื่อหาสภาวะตะกอนเริ่มเคลื่อนที่ต้องทำการวัดความลึกน้ำ ณ ตำแหน่งที่ห่างจากจุดที่วางเสาเข็มกลุ่ม 0.5 เมตร ทั้งหน้า (หน้าตัด 1) และหลัง (หน้าตัด 2) ตามความยาวของรางน้ำ มีความลึกหน้าตัด 1 เท่ากับ 0.299 เมตร และหน้าตัด 2 เท่ากับ 0.300 เมตร คำนวณหาค่าพลังงาน ณ หน้าตัด 1 และ 2 แล้วคำนวณหาค่าความลาดชันท้องน้ำ ดังนี้

$$E_1 = 0.299 + \frac{0.05^2}{2x9.81} = 0.299$$

$$E_2 = 0.30 + \frac{0.0499^2}{2x9.81} = 0.300$$

จะได้ความลาดชันท้องน้ำ

$$S_0 = \frac{0.299 - 0.300}{0.1} + 0.000123 = 0.011$$

เมื่อได้ค่าความลาดชันพลังงานที่สภาพเริ่มต้นเคลื่อนที่ของตะกอนและค่าความลาดชันท้องน้ำแล้ว ในส่วนการทดลองแบบจำลองบริเวณที่วางเสาเข็มกลุ่ม จะต้องได้ความลึกการไหลเท่ากับ 30 ซม. เพื่อให้ตรงตามเงื่อนไขที่กำหนด

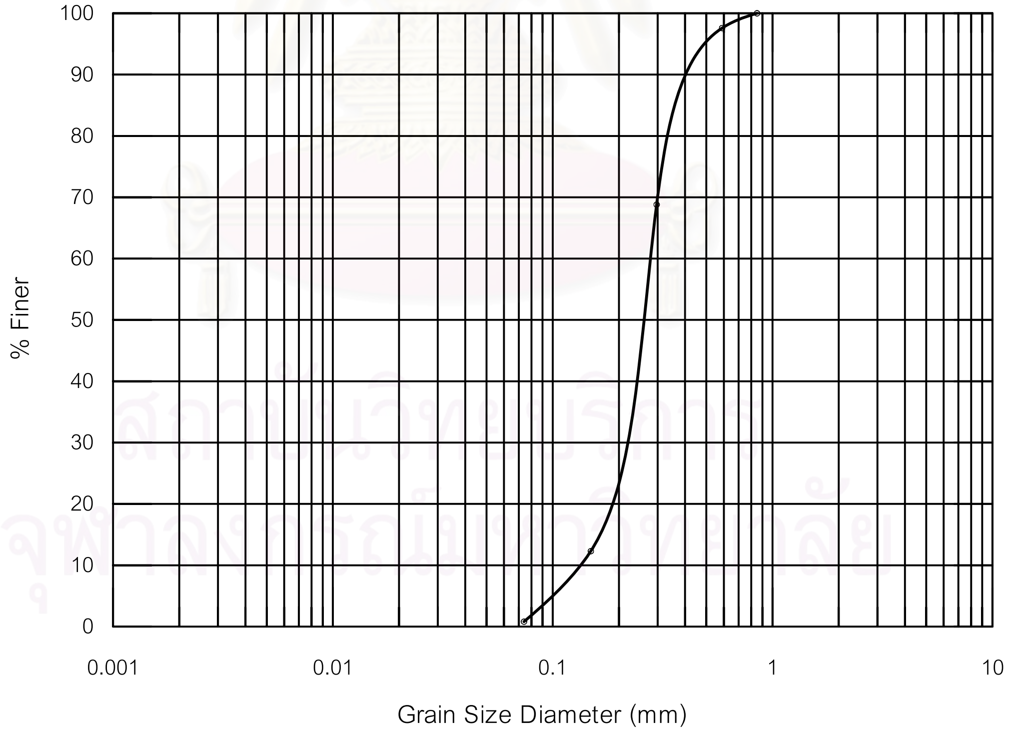
ตาราง ข-1 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของทรายในแบบจำลอง

Weight of container + Dry sand 734.8 gm.

Weight of container 95.0 gm.

Weight of Dry sand 639.8 gm.

| Sieve No. | Sieve Opening (mm) | Weight of Sieve (gm) | Weight of sieve+sand (gm) | Weight of Sand (gm) | Weight of Sand (%) | Cumulative Retained (%) | Percent Finer (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 30 | 0.59 | 318.4 | 333.3 | 15.1 | 2.4 | 2.4 | 97.6 |
| 50 | 0.297 | 299.2 | 483.5 | 184.3 | 28.8 | 31.2 | 68.8 |
| 100 | 0.149 | 289.1 | 650.6 | 361.5 | 56.5 | 87.7 | 12.3 |
| 200 | 0.074 | 269.0 | 342.6 | 73.6 | 11.5 | 99.2 | 0.8 |
| pan | 0 | 264.6 | 270.0 | 5.3 | 0.8 | 100.0 | 0.0 |




รูป ข-2 โค้งการกระจายขนาด (grain size distribution curve)

โดย ปิยะฉัตร เลิศอมรพงษ์ (2002)

**ข-2 สภาพคลื่นในการทดลอง**

คลื่นในการทดลองถูกสร้างโดยเครื่องกำเนิดคลื่น ซึ่งปลายด้านล่างของกระดานสร้างคลื่นเป็นแบบยึดหมุน (hinge) ส่วนปลายด้านบนต่อกับส่วนขับเคลื่อนที่สามารถปรับความเร็วช่วงชักได้ ซึ่งสามารถผันแปรขนาดและคาบคลื่นในการทดลองได้ โดยแสดงลักษณะคลื่นที่สร้างโดยเครื่องกำเนิดคลื่นดังแสดงในตาราง ข-2

ตาราง ข-2 ลักษณะคลื่นจากเครื่องกำเนิดคลื่น เมื่อระดับน้ำในรางคลื่นเท่ากับ 0.30 เมตร

| ความเร็วรอบมอเตอร์ (เฮิร์ทซ) | ระยะช่วงชักกระดานพัดคลื่น (ซม.) | ความเร็วกระแสน้ำ ($U_c$) (ซม./วินาที) | Orbital Velocity, ($U_m$) (ซม./วินาที) | ความสูงคลื่น ($H_s$) (ซม.) | ความถี่คลื่น ($f_s$) (วินาที$^{-1}$) | *KC* Number ($U_m/f_sD$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 25 | 15 | 5 | 36.9 | 14 | 0.63 | 42.2 |
| 25 | 15 | 10 | 37.2 | 14 | 0.63 | 42.5 |
| 25 | 15 | 15 | 37.3 | 14 | 0.63 | 42.6 |
| 30 | 15 | 5 | 32.5 | 18 | 0.77 | 30.2 |
| 30 | 15 | 10 | 32.6 | 18 | 0.77 | 30.3 |
| 30 | 15 | 15 | 32.9 | 18 | 0.77 | 30.6 |
| 35 | 15 | 5 | 17.8 | 25 | 0.91 | 14.0 |
| 35 | 15 | 10 | 18.0 | 25 | 0.91 | 14.2 |
| 35 | 15 | 15 | 18.2 | 25 | 0.91 | 14.3 |

หมายเหตุ : D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม เท่ากับ 0.14 ซม.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก ค

## การเตรียมการทดลองและการปรับเทียบอุปกรณ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก ค

# การเตรียมการทดลองและการปรับเทียบอุปกรณ์

## ค-1 การปรับเทียบเครื่องมือวัดความเร็วกระแสน้ำ

เครื่องวัดความเร็วการไหล รุ่น ACM 300-D ใช้วัดความเร็วกระแสน้ำในแบบจำลอง สามารถวัดความเร็วการไหลได้ 3 แกน คือ แกน X แกน Y และ แกน Z โดยที่ความเร็วในแกน X หมายถึง ความเร็วการไหลในแนวแกนตั้งฉากกับทิศทางการไหล ความเร็วในแกน Y หมายถึง ความเร็วการไหลในแนวแกนขนานกับทิศทางการไหล และความเร็วการไหลในแกน Z หมายถึง ความเร็วการไหลในแนวดิ่งของหน้าตัด แต่ในการทดลองครั้งนี้จะทำการเก็บบันทึกเฉพาะข้อมูลความเร็วการไหลในแนวแกนขนานกับทิศทางการไหลเท่านั้น

ขั้นตอนการทำงานของเครื่องมือวัดความเร็วการไหลดังกล่าว จะทำการส่งสัญญาณไปยังเครื่องแสดงผลให้แปลค่าสัญญาณเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งสามารถส่งสัญญาณเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อบันทึกและประมวลผลข้อมูล ผลการปรับเทียบโดย ปิยะ กุณาศล (2004) แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วเปลี่ยนแปลงไป 1 เซนติเมตร/วินาที ค่าความต่างศักย์จะเปลี่ยนไปเท่ากับ 0.02 โวลต์ ตาราง ค-1 และ ค-2 แสดงข้อมูลในการปรับเทียบเครื่องวัดความเร็วการไหล รุ่น ACM 300-D รูป ค-1 ผลการปรับเทียบเครื่องวัดความเร็วการไหล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

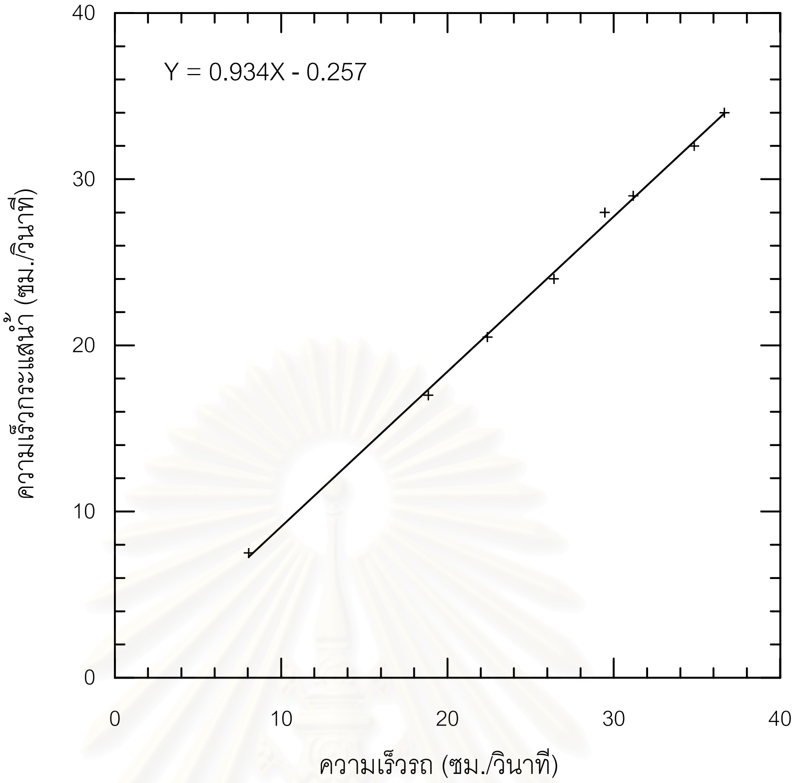
ตาราง ค-1 การปรับเทียบเครื่องมือวัดความเร็วกระแสน้ำ รุ่น ACM 300-D แกน X

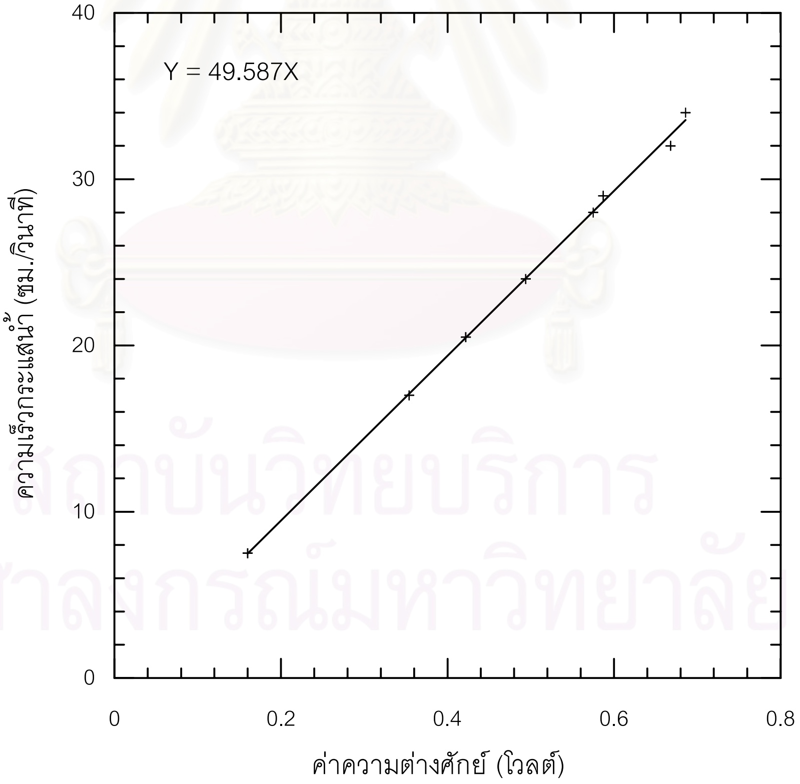
| เครื่องมือวัดความเร็วกระแสน้ำ ALEC แกน X | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ระยะทาง (ซม.) | เวลา (วินาที) | ความเร็วรถ (ซม./วินาที) | ความเร็ว Current Meter (ซม./วินาที) | ค่าความต่างศักย์ (โวลต์) |
| 1200 | 159.66 | 7.52 | 8.50 | 0.176 |
| 1200 | 91.53 | 13.11 | 14.00 | 0.256 |
| 1200 | 64.56 | 18.59 | 21.50 | 0.432 |
| 1200 | 62.94 | 19.07 | 23.00 | 0.455 |
| 1200 | 55.09 | 21.78 | 25.00 | 0.514 |
| 1200 | 48.78 | 24.60 | 28.00 | 0.572 |
| 1200 | 40.58 | 29.57 | 34.00 | 0.682 |
| 1200 | 36.13 | 33.21 | 39.00 | 0.773 |

ตาราง ค-2 การปรับเทียบเครื่องมือวัดความเร็วกระแสน้ำ รุ่น ACM 300-D แกน Y

| เครื่องมือวัดความเร็วกระแสน้ำ ALEC แกน Y | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ระยะทาง (ซม.) | เวลา (วินาที) | ความเร็วรถ (ซม./วินาที) | ความเร็ว Current Meter (ซม./วินาที) | ค่าความต่างศักย์ (โวลต์) |
| 1200 | 148.98 | 8.05 | 7.50 | 0.160 |
| 1200 | 63.66 | 18.85 | 17.00 | 0.354 |
| 1200 | 53.56 | 22.40 | 20.50 | 0.422 |
| 1200 | 45.46 | 26.40 | 24.00 | 0.494 |
| 1200 | 40.73 | 29.46 | 28.00 | 0.575 |
| 1200 | 38.50 | 31.17 | 29.00 | 0.587 |
| 1200 | 34.45 | 34.83 | 32.00 | 0.668 |
| 1200 | 32.74 | 36.65 | 34.00 | 0.686 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




รูป ค-1 การปรับเทียบเครื่องมือวัดความเร็วกระแสน้ำแกน Y รุ่น ACM-300

โดย ปิยะ กุณาศล (2004)

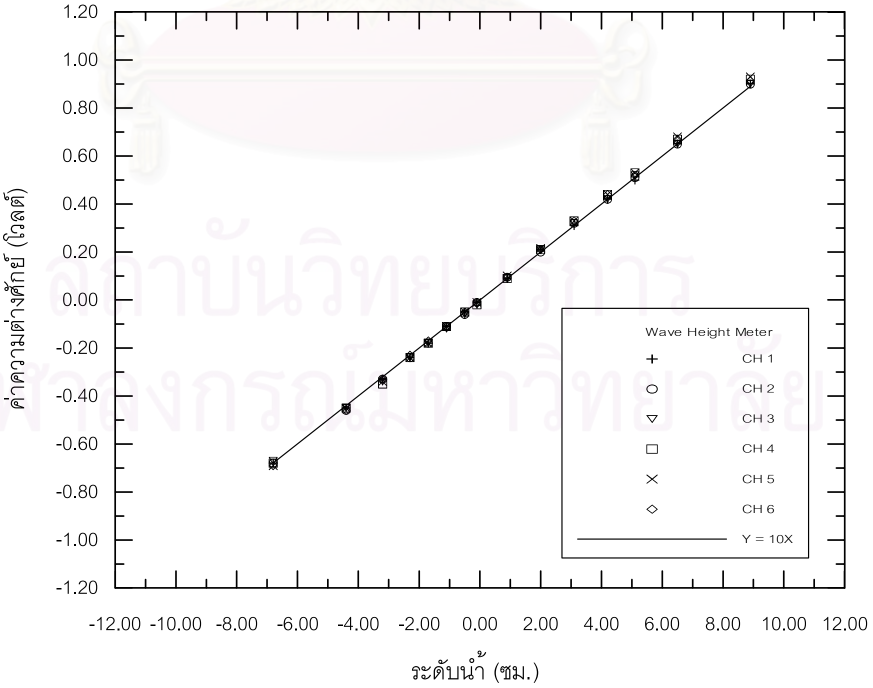
## ค-2 การปรับเทียบเครื่องมือวัดความสูงคลื่น

เครื่องมือวัดความสูงคลื่น (wave height meter) ในการศึกษาครั้งนี้ใช้เครื่องมือวัดความสูงคลื่นในแบบจำลอง ของบริษัท Kennek รุ่น K-281 A พร้อมชุดบันทึกข้อมูล ใช้วัดความสูงคลื่นในแบบจำลอง ในการทดลองใช้เครื่องมือวัดความลึกการไหล 6 ตัว สำหรับหลักการ คือ วัดความจุไฟฟ้าบนเส้นลวดรับสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามระดับน้ำ แล้วส่งสัญญาณไปยังเครื่องแสดงผลให้แปลงค่าสัญญาณเป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งสามารถส่งสัญญาณไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกและประมวลผลข้อมูล ช่วงข้อมูลที่เครื่องทำการประมวลผลได้อยู่ระหว่างช่วง ± 2.5 โวลต์ การปรับเทียบเครื่องมือวัดความสูงคลื่น ซึ่งปรับเทียบโดย ปิยะ กุณาศล (2004) แสดงในตาราง ค-3 และ รูป ค-2 จากผลการปรับเทียบสรุปได้ว่า เมื่อระดับน้ำเปลี่ยนแปลงไป 1 ซม. ค่าความต่างศักย์จะเปลี่ยนไปเท่ากับ 0.1 โวลต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-3 การปรับเทียบเครื่องมือวัดความสูงคลื่น (wave height meter)

| ระดับน้ำ (ซม.) | ค่าความต่างศักย์ของเครื่องมือวัดความสูงคลื่น (โวลต์) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | CH 1 | CH 2 | CH 3 | CH 4 | CH 5 | CH 6 |
| -6.8 | -0.68 | -0.68 | -0.67 | -0.68 | -0.69 | -0.69 |
| -4.4 | -0.45 | -0.46 | -0.45 | -0.45 | -0.45 | -0.46 |
| -3.2 | -0.33 | -0.33 | -0.34 | -0.35 | -0.34 | -0.33 |
| -2.3 | -0.24 | -0.24 | -0.24 | -0.24 | -0.24 | -0.23 |
| -1.7 | -0.18 | -0.18 | -0.18 | -0.18 | -0.18 | -0.17 |
| -1.1 | -0.11 | -0.11 | -0.12 | -0.11 | -0.11 | -0.11 |
| -0.5 | -0.05 | -0.06 | -0.06 | -0.05 | -0.05 | -0.05 |
| -0.1 | -0.01 | -0.01 | -0.02 | -0.02 | -0.01 | -0.01 |
| 0.9 | 0.09 | 0.095 | 0.09 | 0.09 | 0.10 | 0.095 |
| 2.0 | 0.21 | 0.20 | 0.21 | 0.21 | 0.215 | 0.21 |
| 3.1 | 0.31 | 0.32 | 0.32 | 0.33 | 0.33 | 0.33 |
| 4.2 | 0.42 | 0.42 | 0.42 | 0.44 | 0.44 | 0.44 |
| 5.1 | 0.50 | 0.51 | 0.52 | 0.53 | 0.53 | 0.52 |
| 6.5 | 0.65 | 0.65 | 0.65 | 0.67 | 0.68 | 0.67 |
| 8.9 | 0.90 | 0.9 | 0.90 | 0.92 | 0.93 | 0.915 |




รูป ค-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับน้ำที่อ่านได้จากเครื่องวัดความลึกการไหล

โดย ปิยะ กุณาศล (2004)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ค-3 การปรับเทียบฝายสามเหลี่ยมสันคม

การปรับเทียบฝายสามเหลี่ยมวัดน้ำสันคม (90° V-notch weir calibration) ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการชลศาสตร์และชายฝั่งทะเล ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้ถังเหล็กรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดกว้าง 0.90 ม. ยาว 0.90 ม. สูง 0.90 ม. และมีความจุทั้งหมดประมาณ 729 ลิตร ซึ่งมีขั้นตอนการปรับเทียบดังนี้

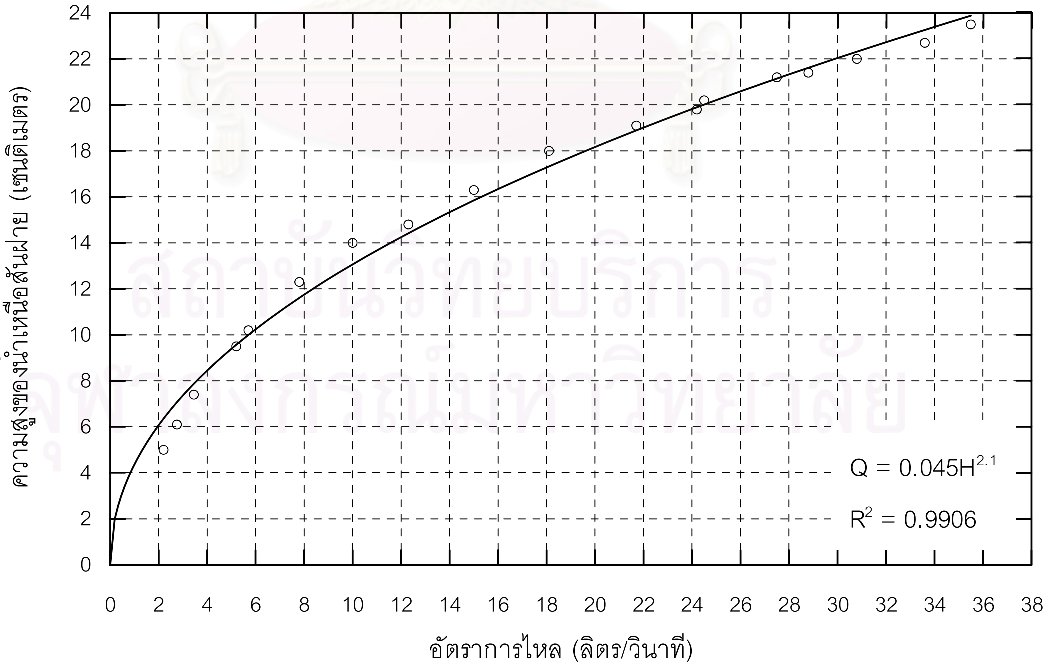
1. เปิดวาล์วน้ำให้น้ำไหลผ่านรางน้ำมายังบ่อด้านท้ายน้ำซึ่งมีฝายสามเหลี่ยมสันคมติดตั้งอยู่
2. วัดอุณหภูมิน้ำในบ่อท้ายรางน้ำ
3. ทำการอ่านค่าระดับน้ำเหนือสันฝาย (H)
4. นำถังเหล็กที่เตรียมไว้ มารองน้ำที่ไหลผ่านฝายสามเหลี่ยมสันคม เพื่อวัดปริมาตรน้ำ ซึ่งถังเหล็กนี้จะถูกวางไว้บนตาชั่ง พร้อมทั้งจับเวลาตั้งแต่เริ่มรองน้ำ จนเลื่อนถังเหล็กออก แล้วคำนวณหาอัตราการไหล
5. ในการปรับเทียบ จะทำการทดลอง 3 ครั้ง ต่อหนึ่งอัตราการไหล แล้วนำค่าที่ได้มาทำการคำนวณหาอัตราการไหลเฉลี่ย
6. นำอัตราการไหลที่ได้ มาหาความสัมพันธ์กับค่าระดับน้ำเหนือสันฝาย (Q-H) แล้วนำมาเขียนกราฟ Rating curve ของฝายวัดน้ำสามเหลี่ยมสันคม

ข้อมูลการสอบเทียบ และโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับน้ำเหนือสันฝายกับอัตราการไหล (Q-H curve) แสดงในตาราง ค-4 และรูป ค-3 ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค-4 ผลการปรับเทียบฝายสามเหลี่ยมวัดน้ำสันคม (90° V-notch weir calibration)

| ลำดับที่ | ความสูงระดับน้ำ (cm) | อัตราการไหล (l/s) |
|---|---|---|
| 1 | 5.00 | 2.20 |
| 2 | 6.10 | 2.75 |
| 3 | 7.40 | 3.45 |
| 4 | 9.50 | 5.20 |
| 5 | 10.2 | 5.70 |
| 6 | 12.3 | 7.80 |
| 7 | 14.0 | 10.0 |
| 8 | 14.8 | 12.3 |
| 9 | 16.3 | 15.0 |
| 10 | 18.0 | 18.1 |
| 11 | 19.1 | 21.7 |
| 12 | 19.8 | 24.2 |
| 13 | 20.2 | 24.5 |
| 14 | 21.2 | 27.5 |
| 15 | 21.4 | 28.8 |
| 16 | 22.0 | 30.8 |
| 17 | 22.7 | 33.6 |
| 18 | 23.5 | 35.5 |




รูป ค-3 ผลการปรับเทียบฝายสามเหลี่ยมวัดน้ำสันคม (90° V-notch weir calibration)

# ภาคผนวก ง

# ตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก ง

# ตัวอย่างข้อมูลการทดลองจากการบันทึก ผ่านโปรแกรม LabVIEW

## ง-1 ข้อมูลความเร็วกระแสน้ำที่ใกล้ท้องน้ำ ($U_c$)

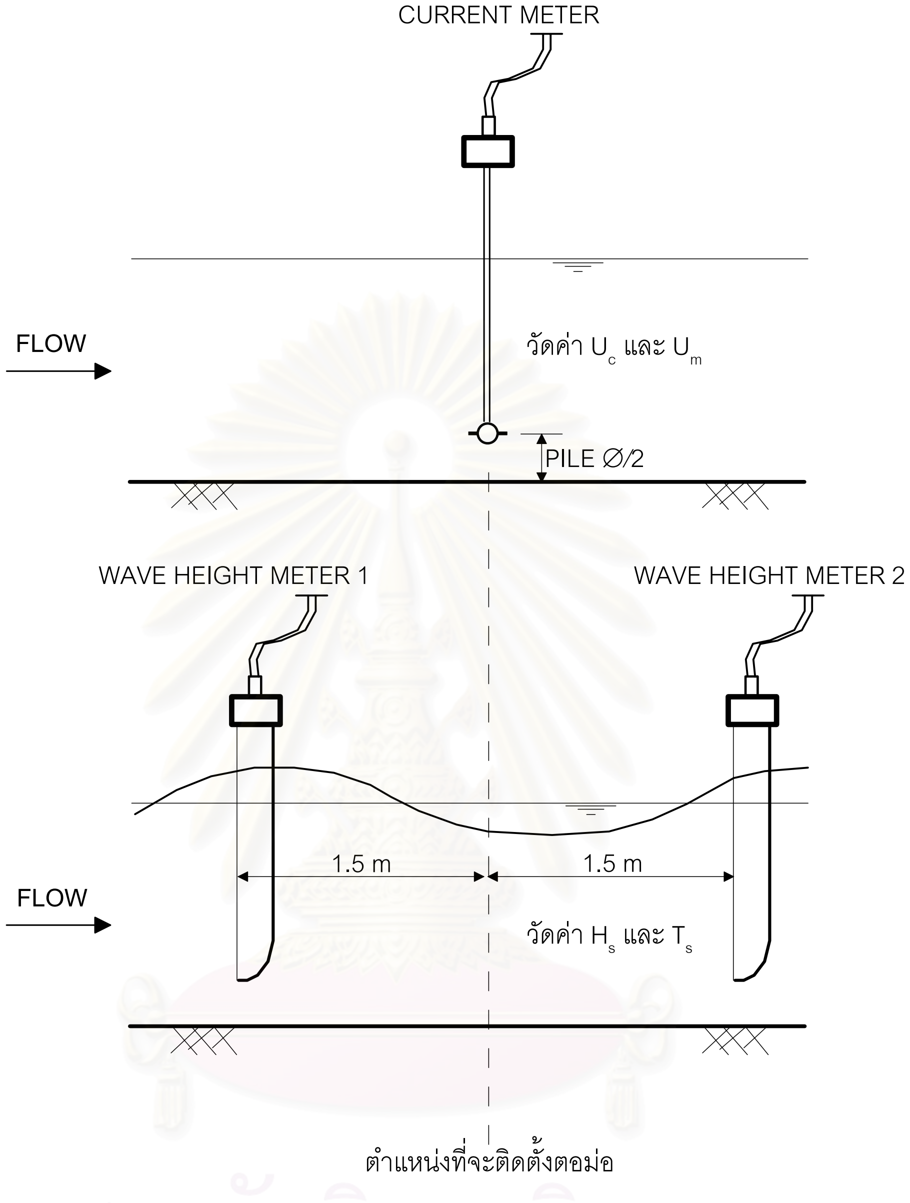
การวัดความเร็วกระแสน้ำใกล้ท้องน้ำ มีความลึกในการวัดอยู่ที่ระยะประมาณครึ่งหนึ่งของเส้นผ่าศูนย์กลางของแบบจำลองเสาเข็มสูงขึ้นเหนือท้องน้ำ ดังแสดงตำแหน่งการวัดข้อมูลในรูป ง-1 กระทำโดยมีเครื่องมือวัดความเร็วกระแสน้ำ (current meter) ดังรูป ก-26 ติดตั้ง ณ ตำแหน่งใกล้ท้องน้ำก่อนมีแบบจำลองตอม่อ เครื่องวัดตรวจวัดค่าความเร็วกระแสน้ำแล้วแปลงเป็นสัญญาณอนาล็อก (analog) ส่งไปตามสายสัญญาณเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์พีซี ที่มีการ์ดแปลงสัญญาณ (A/D converter) และซอฟท์แวร์ LabVIEW 6.1 ของบริษัท National Instrument ทำการบันทึกข้อมูลด้วยความถี่ 250 ข้อมูลต่อวินาที ทุกๆ การทดลอง

## ง-2 ข้อมูลความเร็วอนุภาคหมุนวนของคลื่นที่ใกล้ท้องน้ำ ($U_m$)

การวัดความเร็วอนุภาคหมุนวนของคลื่นใกล้ท้องน้ำ มีความลึกในการวัดอยู่ที่ระยะประมาณครึ่งหนึ่งของเส้นผ่าศูนย์กลางของแบบจำลองเสาเข็มสูงขึ้นเหนือท้องน้ำ ดังแสดงตำแหน่งการวัดข้อมูลในรูป ง-1 ซึ่งควบคุมการวัดและบันทึกข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดชนิดเดียวกันกับเครื่องวัดความเร็วกระแสน้ำ เครื่องวัดตรวจวัดค่าความเร็วอนุภาคหมุนวนของคลื่นแล้วแปลงเป็นสัญญาณอนาล็อก (analog) ส่งไปตามสายสัญญาณเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์พีซี ที่มีการ์ดแปลงสัญญาณ (A/D converter) และซอฟท์แวร์ LabVIEW 6.1 ของบริษัท National Instrument ทำการบันทึกข้อมูลด้วยความถี่ 250 ข้อมูลต่อวินาที ทุกๆ การทดลอง

## ง-3 ข้อมูลความสูงคลื่นนัยสำคัญและคาบคลื่นนัยสำคัญ ($H_s$, $T_s$)

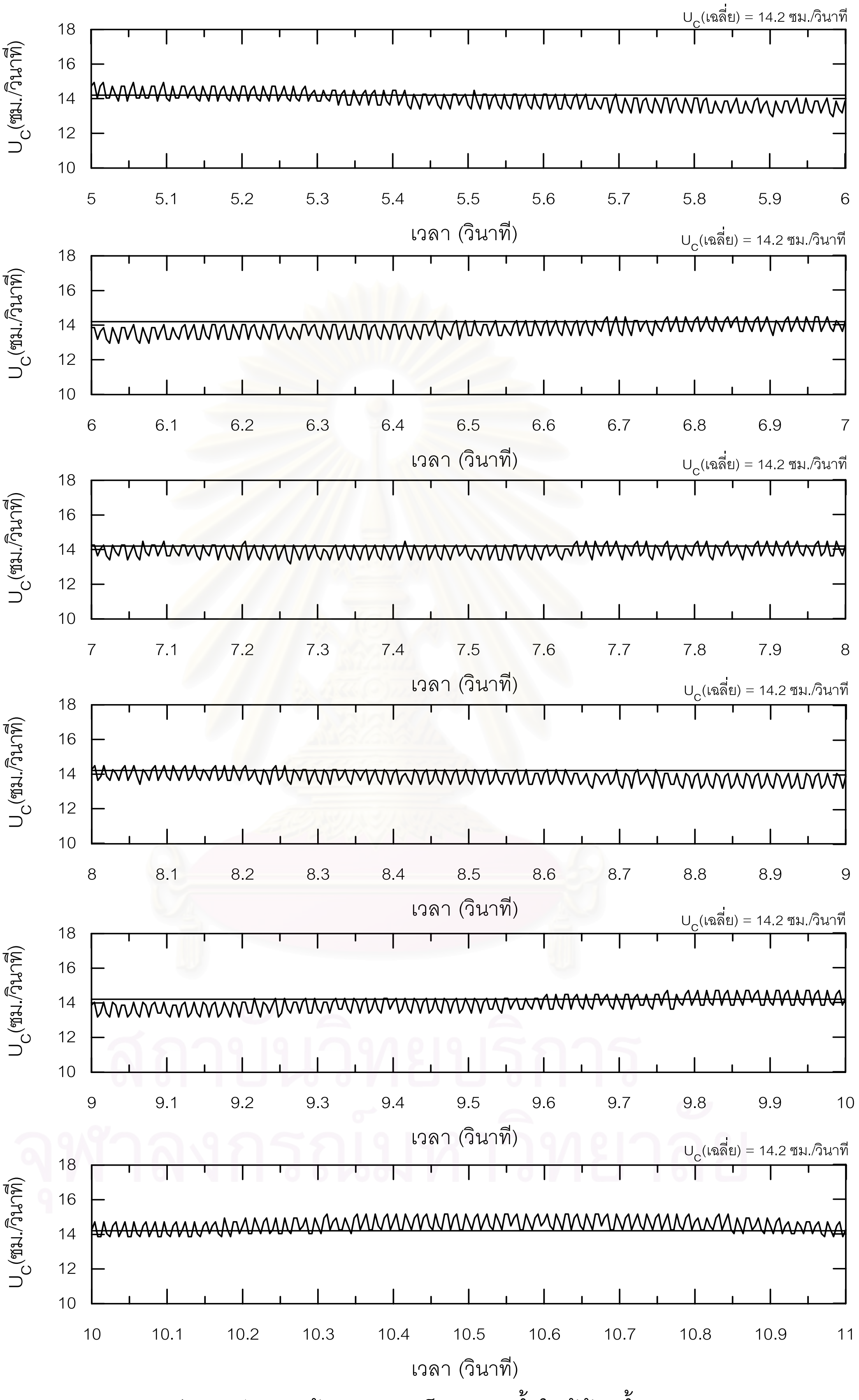
การวัดข้อมูลคลื่นที่ถูกสร้างด้วยเครื่องกำเนิดคลื่นในรางกระแสน้ำและคลื่นหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า กระทำโดยมีเครื่องวัดความสูงคลื่น (wave height meter) 2 เครื่อง ดังมีตำแหน่งติดตั้งแสดงดังรูป ง-1 เครื่องวัดตรวจวัดความสูงคลื่นแล้วแปลงสัญญาณอนาล็อก (analog) ส่งไปตามสายไฟฟ้าเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์พีซีที่มีการ์ดแปลงสัญญาณ (A/D converter) และซอฟท์แวร์ LabVIEW 6.1 ของบริษัท National Instrument ทำการบันทึกข้อมูลด้วยความถี่ 250 ข้อมูลต่อวินาที ทุกๆ การทดลอง ทุกครั้งเมื่อเริ่มเดินเครื่องกำเนิดคลื่น




<u>รูปตัดตามความยาวของรางน้ำ</u>

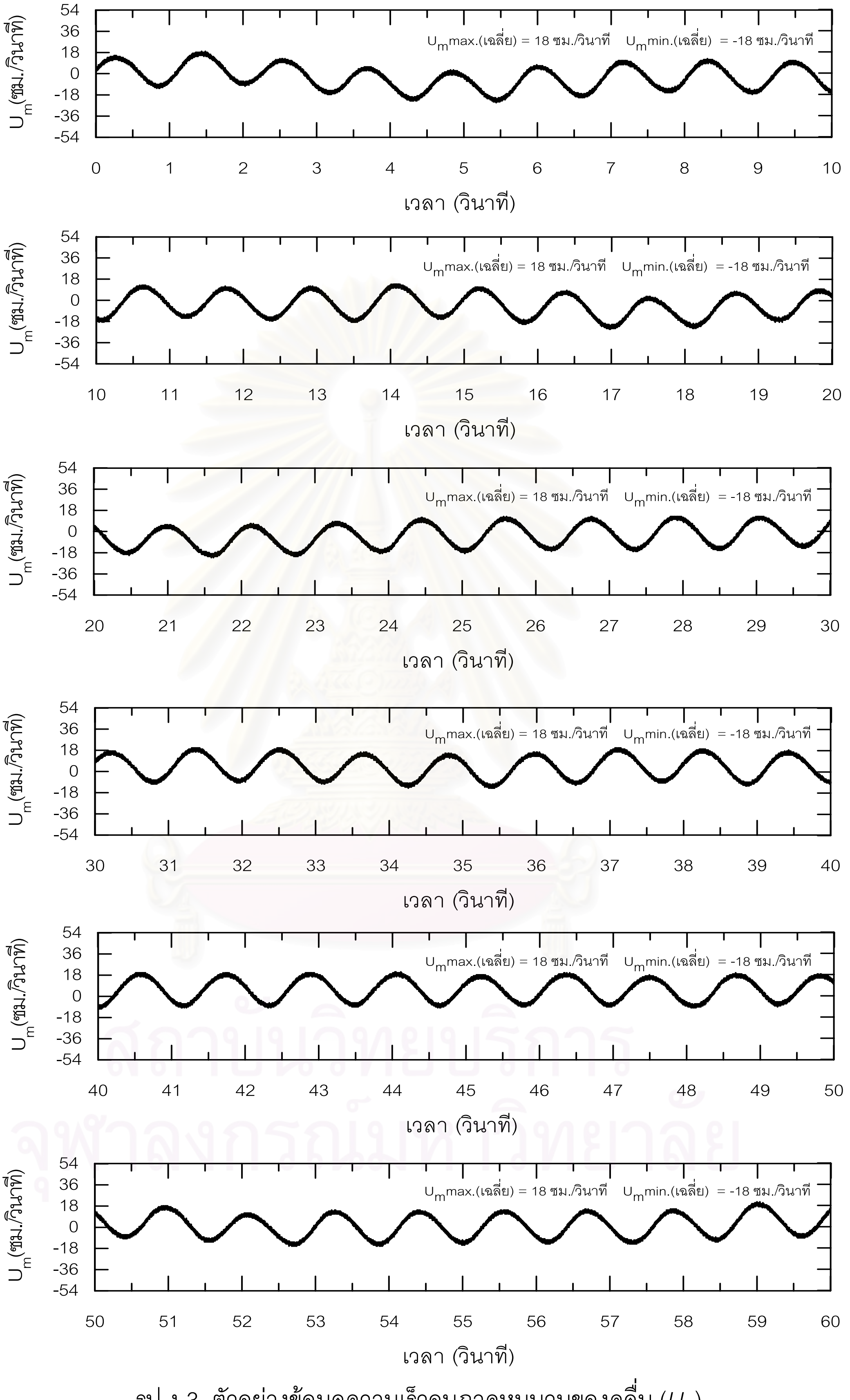
รูป ง-1 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดกระแสน้ำและระดับน้ำ ในแบบจำลองรางน้ำ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



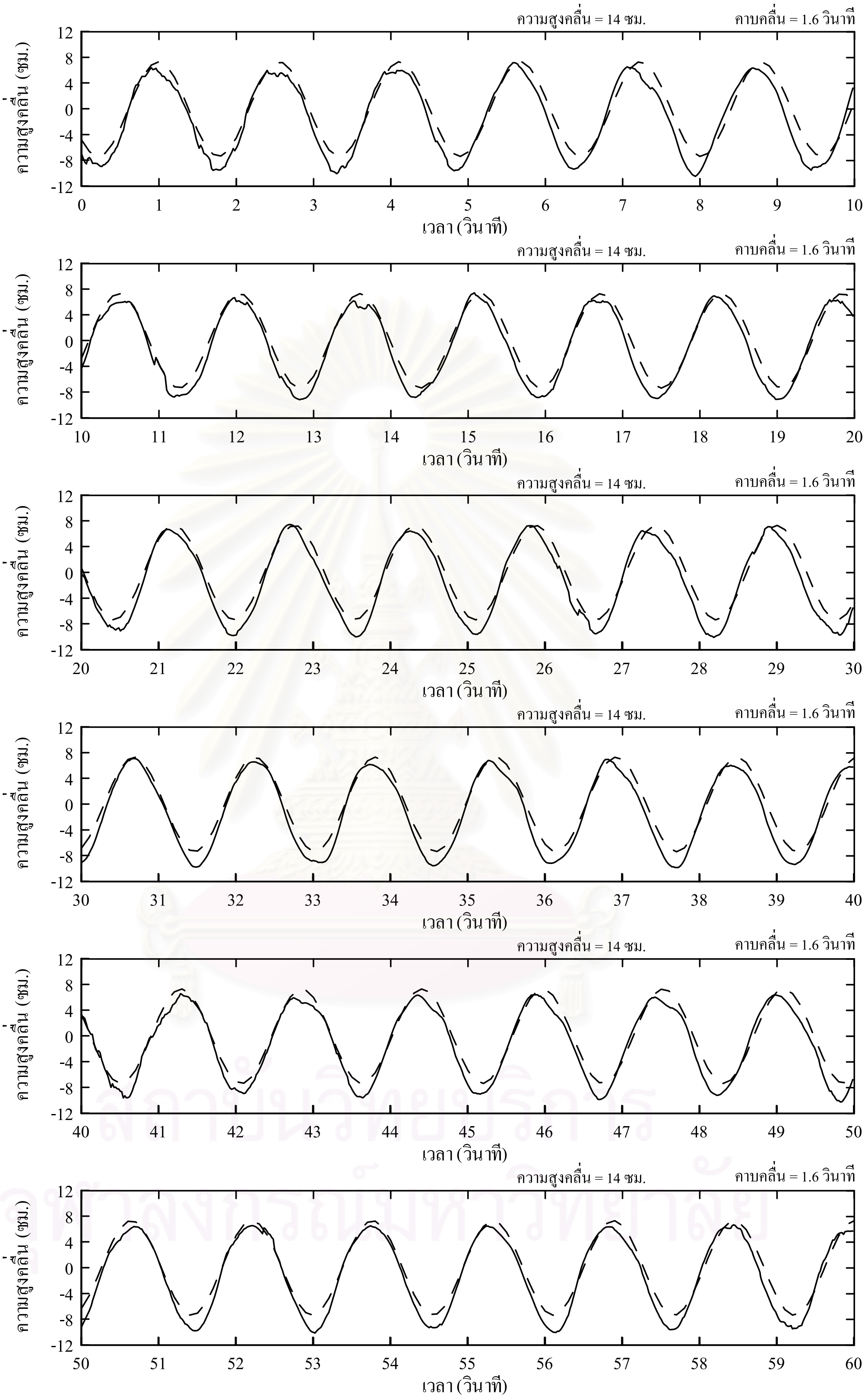

รูป ง-2 ตัวอย่างข้อมูลความเร็วกระแสน้ำใกล้ท้องน้ำ ($U_c$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




รูป ง-3 ตัวอย่างข้อมูลความเร็วอนุภาคหมุนวนของคลื่น ($U_m$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




— — ลักษณะคลื่นจาก spectrum analysis

มีลักษณะเป็นคลื่นสม่ำเสมอ (regular wave)

——— ข้อมูลคลื่นจากการบันทึก

รูป ง-4 ตัวอย่างข้อมูลคลื่นที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Spectrum Analysis เทียบกับข้อมูลบันทึก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

ภาพถ่ายผลการศึกษาและตารางบันทึกผลการทดลอง
ในกรณีศึกษาต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก จ-1

# ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด-ต่ำสุด รอบเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็มภายใต้คลื่นและกระแสน้ำ

จากการทดลองทุกกรณีศึกษามีรายละเอียดพอสรุปได้ดังนี้

- จำลองให้ระดับความลึกการไหลในแบบจำลองเท่ากับ 30 ซม.
- กำหนดให้กระแสน้ำเฉลี่ยกระทำ 3 ขนาด คือ 5, 10 และ 15 ซม./วินาที
- กำหนดให้คลื่นกระทำในรูปของค่า *KC* 3 ค่าโดยประมาณ คือ 14, 30 และ 42
- ขนาดตะกอนท้องน้ำเท่ากับ 0.25 มม.
- ความลาดชันท้องน้ำเท่ากับ 0.011, 0.000123 และ 0.000122 ตามลำดับของค่าความเร็วกระแสน้ำ
- ความลาดชันของเส้นลาดพลังงานมีค่าเท่ากับ 0.000123 โดยประมาณ เท่ากันทุกกรณี
- เวลาที่ใช้ในการทดลองโดยประมาณ 15 – 24 ชม.

**จ-1 ความลึกหลุมกัดเซาะต่ำสุดที่เกิดขึ้นในแต่ละค่า $t_s/y_0$**

ผลการทดลองการกัดเซาะพบว่า เกิดความลึกหลุมกัดเซาะต่ำสุดที่ กรณีความเร็วกระแสน้ำ และค่า *KC* ต่ำสุด สำหรับทุกๆกณีศึกษาความหนาครอบหัวเข็ม ได้ผลการทดลองดังตาราง จ-1 และรูป จ-1 ถึง จ-9 จากการบันทึกภาพลักษณะหลุมกัดเซาะสูงสุดตามลำดับ $t_s/y_0$

ตาราง จ-1 ผลการศึกษากรณี ความเร็วกระแสน้ำเท่ากับ 5 ซม./วินาที และค่า *KC* เท่ากับ 14

| $t_s/y_0$ | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_s/D$ | 0.64 | 0.71 | 0.93 | 1.14 | 1.29 | 1.53 | 1.93 | 2.0 | 2.14 |

**จ-2 ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่เกิดขึ้นในแต่ละค่า $t_s/y_0$**

2) ผลการทดลองการกัดเซาะพบว่า เกิดความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดที่ กรณีความเร็วกระแสน้ำ และค่า *KC* สูงสุด สำหรับทุกๆกณีศึกษาความหนาครอบหัวเข็ม ได้ผลการทดลองดังตาราง จ-2 และรูป จ-10 ถึง จ-18 จากการบันทึกภาพลักษณะหลุมกัดเซาะสูงสุดตามลำดับ $t_s/y_0$

ตาราง จ-2 ผลการศึกษากรณี ความเร็วกระแสน้ำเท่ากับ 15 ซม./วินาที และค่า *KC* เท่ากับ 42

| $t_s/y_0$ | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_s/D$ | 3.25 | 3.28 | 3.29 | 3.36 | 3.50 | 3.53 | 3.55 | 3.57 | 3.64 |

ด้านบน

ด้านข้าง

ด้านหน้า

ด้านหลัง

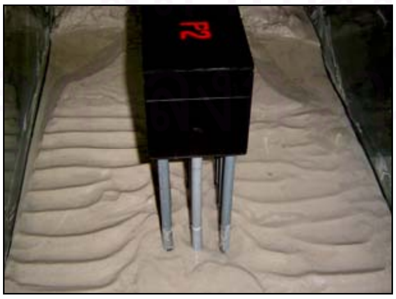
หมายเหตุ : U1 คือ ความเร็วกระแสน้ำขนาด 5 ซม./วินาที KC1 มีค่าเท่ากับ 14 P1 : $t_s/y_0$ เท่ากับ 0.2

$y_s/D$ คือ ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดต่อขนาดเสาเข็ม มีค่าเท่ากับ 0.64

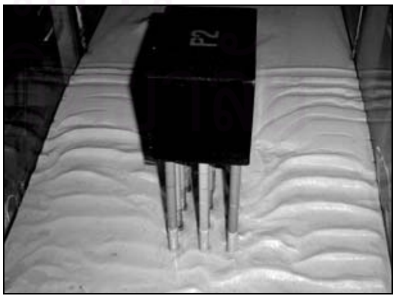
รูป จ-1 หลุมกัดเซาะสูงสุดรอบเสาเข็มกลุ่มกรณีศึกษา U1KC1P1

ด้านบน

ด้านข้าง



ด้านหน้า



ด้านหลัง

หมายเหตุ : U1 คือ ความเร็วกระแสน้ำขนาด 5 ซม./วินาที KC1 มีค่าเท่ากับ 14 P2 : $t_s/y_0$ เท่ากับ 0.3

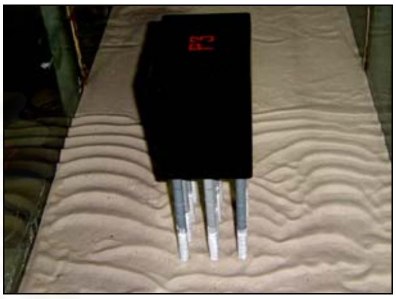
$y_s/D$ คือ ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดต่อขนาดเสาเข็ม มีค่าเท่ากับ 0.71

รูป จ-2 หลุมกัดเซาะสูงสุดรอบเสาเข็มกลุ่มกรณีศึกษา U1KC1P2

ด้านบน

ด้านข้าง

ด้านหน้า

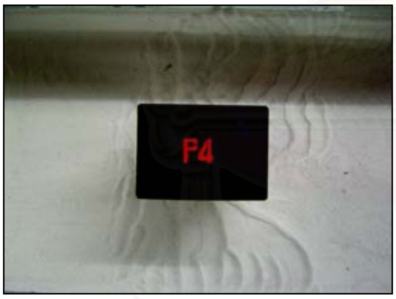


ด้านหลัง

หมายเหตุ : U1 คือ ความเร็วกระแสน้ำขนาด 5 ซม./วินาที KC1 มีค่าเท่ากับ 14 P3 : $t_s/y_0$ เท่ากับ 0.4

$y_s/D$ คือ ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดต่อขนาดเสาเข็ม มีค่าเท่ากับ 0.93

รูป จ-3 หลุมกัดเซาะสูงสุดรอบเสาเข็มกลุ่มกรณีศึกษา U1KC1P3




ด้านบน

ด้านข้าง

ด้านหน้า

ด้านหลัง

หมายเหตุ : U1 คือ ความเร็วกระแสน้ำขนาด 5 ซม./วินาที KC1 มีค่าเท่ากับ 14 P4 : $t_s/y_0$ เท่ากับ 0.5

$y_s/D$ คือ ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดต่อขนาดเสาเข็ม มีค่าเท่ากับ 1.14

รูป จ-4 หลุมกัดเซาะสูงสุดรอบเสาเข็มกลุ่มกรณีศึกษา U1KC1P4

ด้านบน

ด้านข้าง

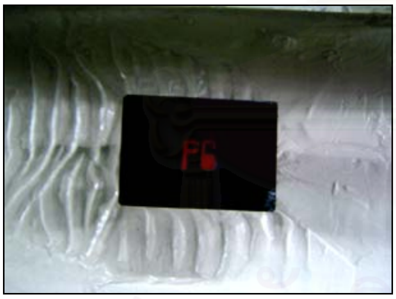
ด้านหน้า

ด้านหลัง

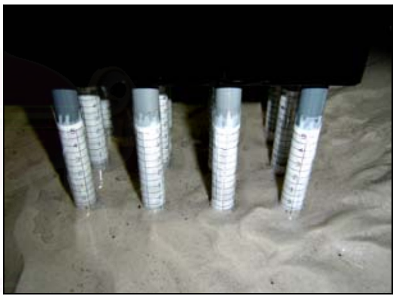
หมายเหตุ : U1 คือ ความเร็วกระแสน้ำขนาด 5 ซม./วินาที KC1 มีค่าเท่ากับ 14 P5 : $t_s/y_0$ เท่ากับ 0.6

$y_s/D$ คือ ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดต่อขนาดเสาเข็ม มีค่าเท่ากับ 1.29

รูป จ-5 หลุมกัดเซาะสูงสุดรอบเสาเข็มกลุ่มกรณีศึกษา U1KC1P5




ด้านบน



ด้านข้าง

ด้านหน้า

ด้านหลัง

หมายเหตุ : U1 คือ ความเร็วกระแสน้ำขนาด 5 ซม./วินาที KC1 มีค่าเท่ากับ 14 P6 : $t_s/y_0$ เท่ากับ 0.7

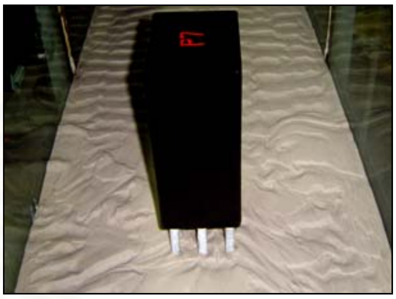
$y_s/D$ คือ ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดต่อขนาดเสาเข็ม มีค่าเท่ากับ 1.53

รูป จ-6 หลุมกัดเซาะสูงสุดรอบเสาเข็มกลุ่มกรณีศึกษา U1KC1P6

ด้านบน

ด้านข้าง

ด้านหน้า



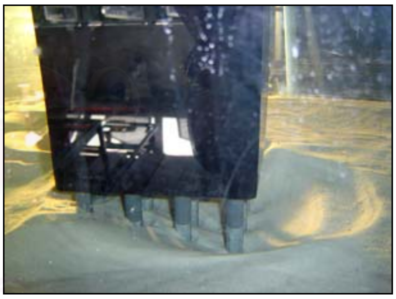
ด้านหลัง

หมายเหตุ : U1 คือ ความเร็วกระแสน้ำขนาด 5 ซม./วินาที KC1 มีค่าเท่ากับ 14 P7 : $t_s/y_0$ เท่ากับ 0.8

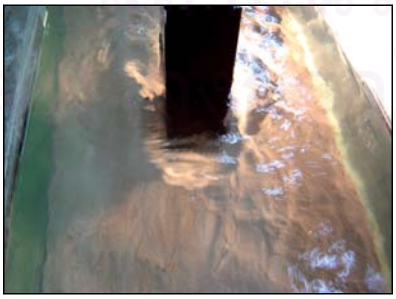
$y_s/D$ คือ ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดต่อขนาดเสาเข็ม มีค่าเท่ากับ 1.93

รูป จ-7 หลุมกัดเซาะสูงสุดรอบเสาเข็มกลุ่มกรณีศึกษา U1KC1P7

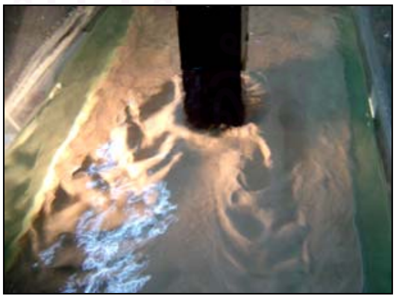
ด้านบน



ด้านข้าง



ด้านหน้า

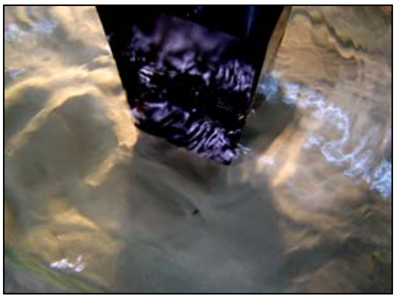


ด้านหลัง

หมายเหตุ : U1 คือ ความเร็วกระแสน้ำขนาด 5 ซม./วินาที KC1 มีค่าเท่ากับ 14 P8 : $t_s/y_0$ เท่ากับ 0.9

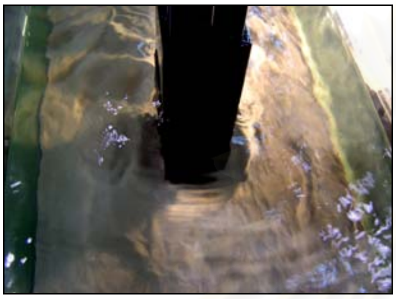
$y_s/D$ คือ ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดต่อขนาดเสาเข็ม มีค่าเท่ากับ 2.00

รูป จ-8 หลุมกัดเซาะสูงสุดรอบเสาเข็มกลุ่มกรณีศึกษา U1KC1P8



ด้านบน

ด้านข้าง



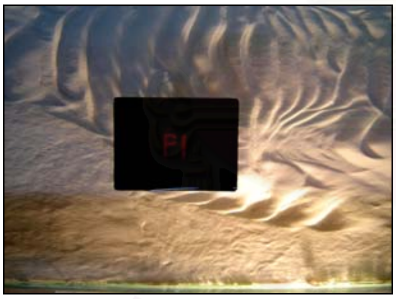
ด้านหน้า

ด้านหลัง

หมายเหตุ : U1 คือ ความเร็วกระแสน้ำขนาด 5 ซม./วินาที KC1 มีค่าเท่ากับ 14 P9 : $t_s/y_0$ เท่ากับ 1.0

$y_s/D$ คือ ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดต่อขนาดเสาเข็ม มีค่าเท่ากับ 2.14

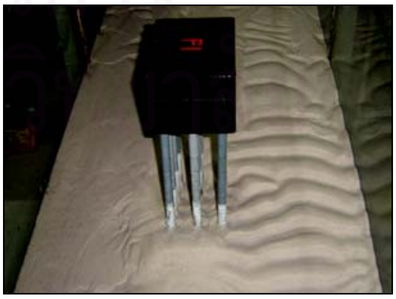
รูป จ-9 หลุมกัดเซาะสูงสุดรอบเสาเข็มกลุ่มกรณีศึกษา U1KC1P9



ด้านบน

ด้านข้าง

ด้านหน้า

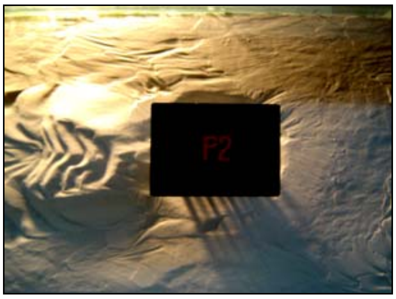


ด้านหลัง

หมายเหตุ : U1 คือ ความเร็วกระแสน้ำขนาด 15 ซม./วินาที KC1 มีค่าเท่ากับ 42 P1 : $t_s/y_0$ เท่ากับ 0.2

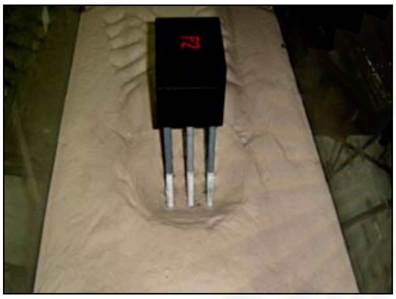
$y_s/D$ คือ ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดต่อขนาดเสาเข็ม มีค่าเท่ากับ 3.25

รูป จ-10 หลุมกัดเซาะสูงสุดรอบเสาเข็มกลุ่มกรณีศึกษา U3KC3P1

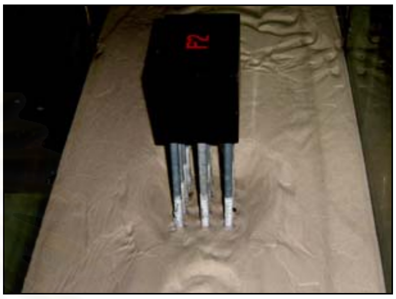



ด้านบน

ด้านข้าง



ด้านหน้า



ด้านหลัง

หมายเหตุ : U1 คือ ความเร็วกระแสน้ำขนาด 15 ซม./วินาที KC1 มีค่าเท่ากับ 42 P2 : $t_s/y_0$ เท่ากับ 0.3

$y_s/D$ คือ ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดต่อขนาดเสาเข็ม มีค่าเท่ากับ 3.28

รูป จ-11 หลุมกัดเซาะสูงสุดรอบเสาเข็มกลุ่มกรณีศึกษา U3KC3P2

ด้านบน

ด้านข้าง

ด้านหน้า

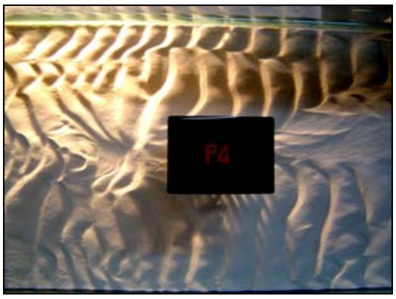
ด้านหลัง

หมายเหตุ : U1 คือ ความเร็วกระแสน้ำขนาด 15 ซม./วินาที KC1 มีค่าเท่ากับ 42 P3 : $t_s/y_0$ เท่ากับ 0.4

$y_s/D$ คือ ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดต่อขนาดเสาเข็ม มีค่าเท่ากับ 3.29

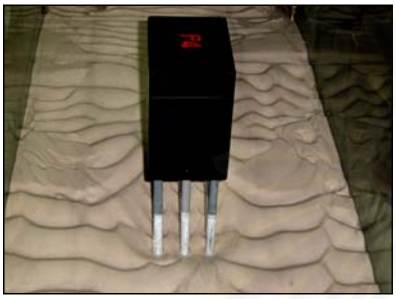
รูป จ-12 หลุมกัดเซาะสูงสุดรอบเสาเข็มกลุ่มกรณีศึกษา U3KC3P3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




ด้านบน

ด้านข้าง




ด้านหน้า

ด้านหลัง

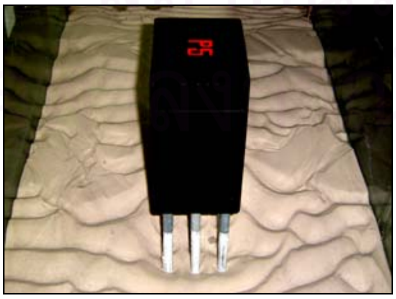
หมายเหตุ : U1 คือ ความเร็วกระแสน้ำขนาด 15 ซม./วินาที KC1 มีค่าเท่ากับ 42 P4 : $t_s/y_0$ เท่ากับ 0.5

$y_s/D$ คือ ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดต่อขนาดเสาเข็ม มีค่าเท่ากับ 3.36

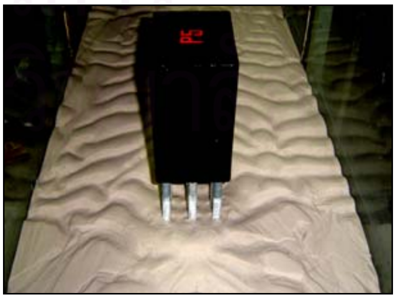
รูป จ-13 หลุมกัดเซาะสูงสุดรอบเสาเข็มกลุ่มกรณีศึกษา U3KC3P4

ด้านบน

ด้านข้าง




ด้านหน้า

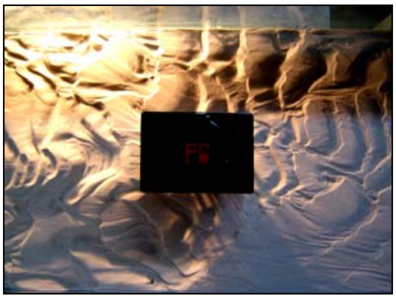



ด้านหลัง

หมายเหตุ : U1 คือ ความเร็วกระแสน้ำขนาด 15 ซม./วินาที KC1 มีค่าเท่ากับ 42 P5 : $t_s/y_0$ เท่ากับ 0.6

$y_s/D$ คือ ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดต่อขนาดเสาเข็ม มีค่าเท่ากับ 3.50

รูป จ-14 หลุมกัดเซาะสูงสุดรอบเสาเข็มกลุ่มกรณีศึกษา U3KC3P5


ด้านบน

ด้านข้าง

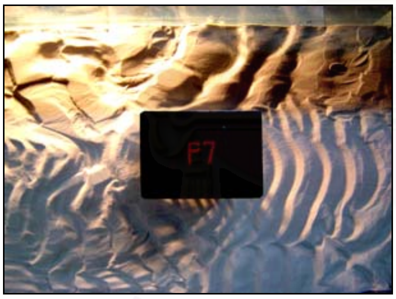
ด้านหน้า

ด้านหลัง

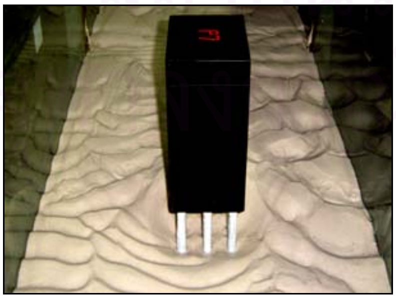
หมายเหตุ : U1 คือ ความเร็วกระแสน้ำขนาด 15 ซม./วินาที KC1 มีค่าเท่ากับ 42 P6 : $t_s/y_0$ เท่ากับ 0.7

$y_s/D$ คือ ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดต่อขนาดเสาเข็ม มีค่าเท่ากับ 3.53

รูป จ-15 หลุมกัดเซาะสูงสุดรอบเสาเข็มกลุ่มกรณีศึกษา U3KC3P6


ด้านบน

ด้านข้าง

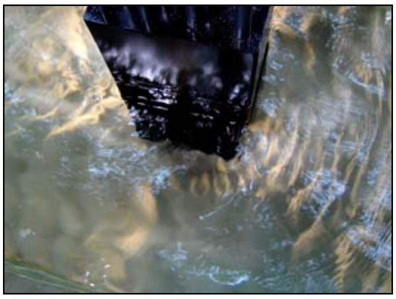

ด้านหน้า

ด้านหลัง

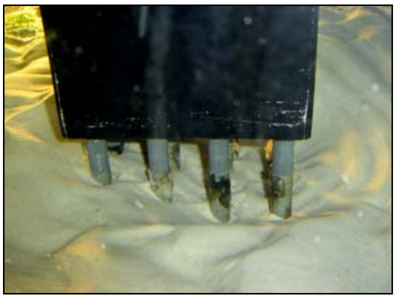
หมายเหตุ : U1 คือ ความเร็วกระแสน้ำขนาด 15 ซม./วินาที KC1 มีค่าเท่ากับ 42 P7 : $t_s/y_0$ เท่ากับ 0.8

$y_s/D$ คือ ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดต่อขนาดเสาเข็ม มีค่าเท่ากับ 3.55

รูป จ-16 หลุมกัดเซาะสูงสุดรอบเสาเข็มกลุ่มกรณีศึกษา U3KC3P7



ด้านบน



ด้านข้าง

ด้านหน้า

ด้านหลัง

หมายเหตุ : U1 คือ ความเร็วกระแสน้ำขนาด 15 ซม./วินาที KC1 มีค่าเท่ากับ 42 P8 : $t_s/y_0$ เท่ากับ 0.9

$y_s/D$ คือ ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดต่อขนาดเสาเข็ม มีค่าเท่ากับ 3.57

รูป จ-17 หลุมกัดเซาะสูงสุดรอบเสาเข็มกลุ่มกรณีศึกษา U3KC3P8

ด้านบน

ด้านข้าง

ด้านหน้า

ด้านหลัง

หมายเหตุ : U1 คือ ความเร็วกระแสน้ำขนาด 15 ซม./วินาที KC1 มีค่าเท่ากับ 42 P9 : $t_s/y_0$ เท่ากับ 1.0

$y_s/D$ คือ ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดต่อขนาดเสาเข็ม มีค่าเท่ากับ 3.64

รูป จ-18 หลุมกัดเซาะสูงสุดรอบเสาเข็มกลุ่มกรณีศึกษา U3KC3P9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก จ-2

## ตารางบันทึกผลการทดลองในกรณีศึกษาต่าง ๆ

ในที่นี้ ได้แสดงข้อมูลจากการบันทึกผลการทดลอง บางช่วงกรณีศึกษาแบบจำลองตอม่อที่สามารถเห็นแนวโน้มตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาผลกระทบของครอบหัวเข็มต่อความลึกหลุมกัดเซาะ ซึ่งได้เลือกแสดงตารางบันทึกผลการทดลองในกรณีศึกษาแบบจำลองตอม่อ P1, P3, P5, และ P7 ตามลำดับ ดังนี้

1. ตาราง จ-1 ถึง จ-9 กรณีศึกษาแบบจำลองตอม่อ P1 ($t_s/y_0$ = 0.2) ที่เงื่อนไขสภาวะการไหลต่างๆ ของคลื่นรวมกับกระแสน้ำ

2. ตาราง จ-10 ถึง จ-18 กรณีศึกษาแบบจำลองตอม่อ P3 ($t_s/y_0$ = 0.4) ที่เงื่อนไขสภาวะการไหลต่างๆ ของคลื่นรวมกับกระแสน้ำ

3. ตาราง จ-19 ถึง จ-27 กรณีศึกษาแบบจำลองตอม่อ P5 ($t_s/y_0$ = 0.6) ที่เงื่อนไขสภาวะการไหลต่างๆ ของคลื่นรวมกับกระแสน้ำ

4. ตาราง จ-28 ถึง จ-36 กรณีศึกษาแบบจำลองตอม่อ P7 ($t_s/y_0$ = 0.8) ที่เงื่อนไขสภาวะการไหลต่างๆ ของคลื่นรวมกับกระแสน้ำ

หากมีผู้สนใจข้อมูลบันทึกผลการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้ (รวมทั้งวีดีโอบันทึกการทดลองการกัดเซาะทุกกรณีศึกษา) สามารถค้นคว้าเพิ่มเติมได้จากข้อมูลที่ผู้ทำการศึกษานี้ได้บันทึกเก็บไว้ในแผ่นดีวีดี ซึ่งได้มอบไว้ให้ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้าสำหรับผู้ที่สนใจต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง จ-1 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U1KC1P1

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U1KC1P1 ($t_s/y_0$ = 0.2) Date : 23/08/06 to 24/08/06

Scale Model : 1:100 Time : 20:40 pm to 13:20 pm

Equi. Time = 1000 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x 10$^{-7}$ m$^2$/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

**Flow Rate & Depth above wier**

| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
|---|---|
| H = 13.2 cm. | H = 13.3 cm. |
| Q = 9 l/sec. | Q = 9.1 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.01 |
| 2.5 | 30.09 | 0.02 |
| 3 | 30.09 | 0.03 |
| 3.5 | 30.09 | 0.03 |
| 4 | 30.09 | 0.04 |
| 4.5 | 30.09 | 0.04 |
| 5 | 30.08 | 0.04 |
| 5.5 | 30.08 | 0.05 |
| 6 | 30.08 | 0.05 |
| 6.5 | 30.08 | 0.06 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.07 | 0.08 |

**CAL. For clear-water condition**

| Initial Conditions | Exp. Set up |
|---|---|
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.01 | So = 0.01 |

**Water depth at test section**

| Initial Conditions | Exp. Set up |
|---|---|
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

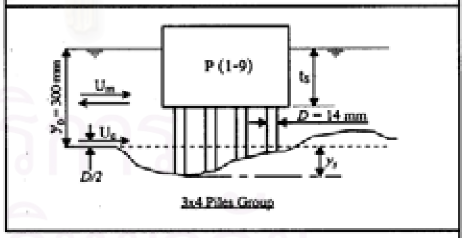
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter D.(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$ . (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx.(mm) | Ly.(mm) |
| 1 | 14 | 7 | 20 | 5 |
| 2 | 14 | 9 | 15 | - |
| 3 | 14 | 7 | 15 | 10 |
| 4 | 14 | 4 | - | 5 |
| 5 | 14 | 7 | - | - |
| 6 | 14 | 4 | - | 5 |
| 7 | 14 | 8 | - | 5 |
| 8 | 14 | 7 | - | - |
| 9 | 14 | 4 | - | 5 |
| 10 | 14 | 4 | 4 | 5 |
| 11 | 14 | 5 | 5 | - |
| 12 | 14 | 3 | 3 | 5 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $KC=U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 25.00 | 0.91 | 17.80 | 14.00 |

**Definition sketch of Test Condition**




Remark :

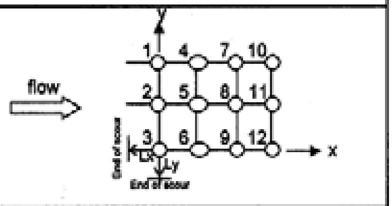
Note : 1. Open over flow wier = 25.5 (From scale bar)

2. Open valve = 2+00 r (From scale bar)

3. 90° v - notch wier, H = 13.3 (From manometer)

4. Flume slope = 0.5 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**



ตาราง จ-2 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U1KC2P1

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U1KC2P1 ($t_s/y_0$ = 0.2) Date : 25/08/06 to 26/08/06

Scale Model : 1:100 Time : 12:50 am to 07:30 am

Equi. Time = 1128 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x $10^{-7}$ $m^2$/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

**Flow Rate & Depth above wier**

| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
|---|---|
| H = 13.2 cm. | H = 13.3 cm. |
| Q = 9 l/sec. | Q = 9.1 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.01 |
| 2.5 | 30.09 | 0.02 |
| 3 | 30.09 | 0.03 |
| 3.5 | 30.09 | 0.03 |
| 4 | 30.09 | 0.04 |
| 4.5 | 30.09 | 0.04 |
| 5 | 30.08 | 0.04 |
| 5.5 | 30.08 | 0.05 |
| 6 | 30.08 | 0.05 |
| 6.5 | 30.08 | 0.06 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.07 | 0.08 |

**CAL. For clear-water condition**

| Initial Conditions | Exp. Set up |
|---|---|
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.01 | So = 0.01 |

**Water depth at test section**

| Initial Conditions | Exp. Set up |
|---|---|
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

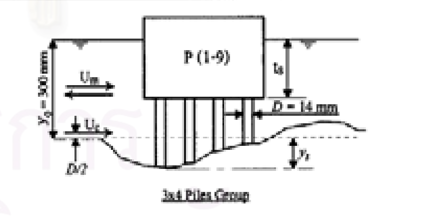
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter D,(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx,(mm) | Ly,(mm) |
| 1 | 14 | 9 | 22 | 13 |
| 2 | 14 | 14 | 8 | - |
| 3 | 14 | 6 | 5 | 10 |
| 4 | 14 | 8 | 10 | 15 |
| 5 | 14 | 8 | 11 | - |
| 6 | 14 | 7 | 9 | 15 |
| 7 | 14 | 6 | 9 | 15 |
| 8 | 14 | 11 | 9 | - |
| 9 | 14 | 9 | 7 | 15 |
| 10 | 14 | 6 | 8 | 10 |
| 11 | 14 | 10 | 10 | - |
| 12 | 14 | 9 | 5 | 10 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $KC=U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 18.00 | 0.77 | 32.50 | 30.20 |

**Definition sketch of Test Condition**




Remark : ..........

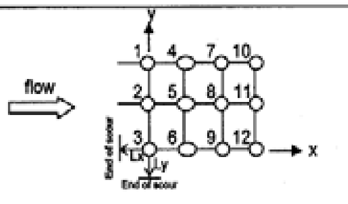
Note : 1. Open over flow wier = 25.5 (From scale bar)

2. Open valve = 2+00 r (From scale bar)

3. 90° v - notch wier, H = 13.3 (From manometer)

4. Flume slope = 0.5 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**



ตาราง จ-3 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา <u>U1KC3P1</u>

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U1KC3P1 ($t_s/y_0$ = 0.2) Date : 26/08/06 to 27/08/06

Scale Model : 1:100 Time : 14:00 pm to 04:00 am

Equi. Time = 1200 min.

Water Temp. = 30 C°, v = 8 x 10⁻⁷ m²/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

**Flow Rate & Depth above wier**

| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
|---|---|
| H = 13.2 cm. | H = 13.3 cm. |
| Q = 9 l/sec. | Q = 9.1 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.01 |
| 2.5 | 30.09 | 0.02 |
| 3 | 30.09 | 0.03 |
| 3.5 | 30.09 | 0.03 |
| 4 | 30.09 | 0.04 |
| 4.5 | 30.09 | 0.04 |
| 5 | 30.08 | 0.04 |
| 5.5 | 30.08 | 0.05 |
| 6 | 30.08 | 0.05 |
| 6.5 | 30.08 | 0.06 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.07 | 0.08 |

**CAL. For clear-water condition**

| Initial Conditions | Exp. Set up |
|---|---|
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.01 | So = 0.01 |

**Water depth at test section**

| Initial Conditions | Exp. Set up |
|---|---|
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

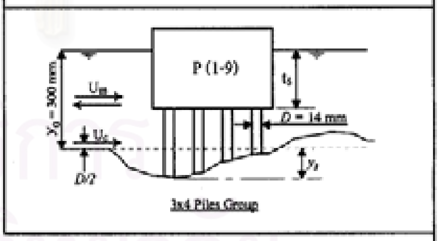
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter $D_i$(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx,(mm) | Ly,(mm) |
| 1 | 14 | 10 | 18 | 12 |
| 2 | 14 | 18 | 25 | - |
| 3 | 14 | 10 | 17 | 16 |
| 4 | 14 | 14 | 10 | 11 |
| 5 | 14 | 5 | 11 | - |
| 6 | 14 | 11 | 10 | 10 |
| 7 | 14 | 10 | 8 | 10 |
| 8 | 14 | 11 | 10 | - |
| 9 | 14 | 14 | 8 | 10 |
| 10 | 14 | 9 | 10 | 8 |
| 11 | 14 | 10 | 15 | - |
| 12 | 14 | 12 | 11 | 9 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $KC=U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 14.00 | 0.63 | 36.90 | 42.20 |

**Definition sketch of Test Condition**




Remark : ..........

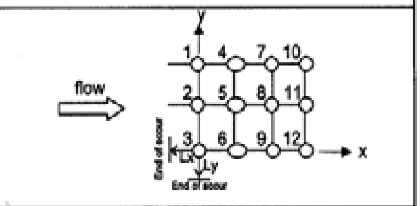
Note : 1. Open over flow wier = 25.5 (From scale bar)

2. Open valve = 2+00 r (From scale bar)

3. 90° v - notch wier, H = 13.3 (From manometer)

4. Flume slope = 0.5 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**




ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง จ-4 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U2KC1P1

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U2KC1P1 ($t_e/y_0$ = 0.2) Date : 13/12/06 to 14/12/06

Scale Model : 1:100 Time : 10:00 am to 06:00 am

Equi. Time = 1200 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x 10$^{-7}$ m²/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 17.7 cm. | H = 17.7 cm. |
| Q = 18 l/sec. | Q = 18 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.01 |
| 2.5 | 30.09 | 0.02 |
| 3 | 30.09 | 0.03 |
| 3.5 | 30.09 | 0.04 |
| 4 | 30.09 | 0.04 |
| 4.5 | 30.08 | 0.05 |
| 5 | 30.08 | 0.05 |
| 5.5 | 30.08 | 0.05 |
| 6 | 30.08 | 0.05 |
| 6.5 | 30.08 | 0.08 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.07 | 0.08 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.0001 | So = 0.0001 |

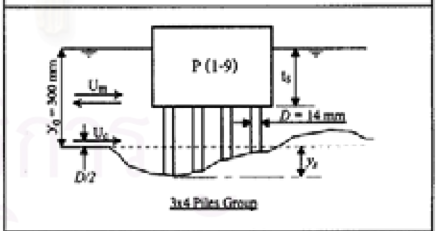
| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter $D_i$(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | $Lx_i$(mm) | $Ly_i$(mm) |
| 1 | 14 | 22 | 45 | 50 |
| 2 | 14 | 24 | 49 | - |
| 3 | 14 | 23 | 34 | 49 |
| 4 | 14 | 20 | - | 52 |
| 5 | 14 | 21 | - | - |
| 6 | 14 | 22 | - | 48 |
| 7 | 14 | 14 | - | 35 |
| 8 | 14 | 22 | - | - |
| 9 | 14 | 21 | - | 25 |
| 10 | 14 | 2 | 50 | 20 |
| 11 | 14 | 2 | 53 | - |
| 12 | 14 | 4 | 52 | 15 |

| Wave Characteristics / KC | | | |
|---|---|---|---|
| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | KC=$U_m/f_sD$ |
| 25.00 | 0.91 | 18.00 | 14.20 |

**Definition sketch of Test Condition**




Remark :

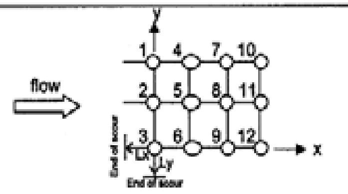
Note : 1. Open over flow wier = 22.5 (From scale bar)

2. Open valve = 3+0.3 r (From scale bar)

3. 90° v - notch wier, H = 17.7 (From manometer)

4. Flume slope = 0.49 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**




สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง จ-5 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U2KC2P1

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U2KC2P1 ($t_s/y_0$ = 0.2)

Date : 16/12/06 to 17/12/06

Scale Model : 1:100

Time : 11:00 am to 06:00 am

Equi. Time = 1140 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x 10⁻⁷ m²/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

**Flow Rate & Depth above wier**

| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
|---|---|
| H = 17.7 cm. | H = 17.7 cm. |
| Q = 18 l/sec. | Q = 18 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.01 |
| 2.5 | 30.09 | 0.02 |
| 3 | 30.09 | 0.03 |
| 3.5 | 30.09 | 0.04 |
| 4 | 30.09 | 0.04 |
| 4.5 | 30.08 | 0.05 |
| 5 | 30.08 | 0.05 |
| 5.5 | 30.08 | 0.05 |
| 6 | 30.08 | 0.05 |
| 6.5 | 30.08 | 0.08 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.07 | 0.08 |

**CAL. For clear-water condition**

| Initial Conditions | Exp. Set up |
|---|---|
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.0001 | So = 0.0001 |

**Water depth at test section**

| Initial Conditions | Exp. Set up |
|---|---|
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

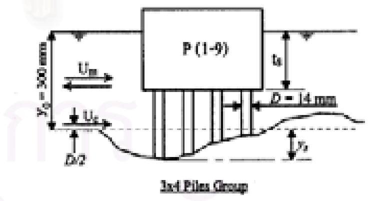
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter D,(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx,(mm) | Ly,(mm) |
| 1 | 14 | 25 | 65 | 55 |
| 2 | 14 | 28 | 65 | - |
| 3 | 14 | 25 | 55 | 45 |
| 4 | 14 | 16 | - | 50 |
| 5 | 14 | 25 | - | - |
| 6 | 14 | 22 | - | 50 |
| 7 | 14 | 12 | - | 30 |
| 8 | 14 | 20 | - | - |
| 9 | 14 | 12 | - | 30 |
| 10 | 14 | 0 | 15 | 20 |
| 11 | 14 | 0 | 20 | - |
| 12 | 14 | 0 | 25 | 15 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $KC=U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 18.00 | 0.77 | 32.60 | 30.30 |

**Definition sketch of Test Condition**




Remark : ...

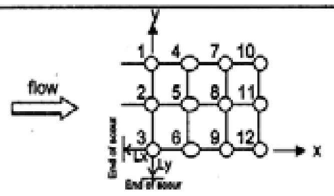
Note : 1. Open over flow wier = 22.5 (From scale bar)

2. Open valve = 3+0.3 r (From scale bar)

3. 90° v - notch wier, H = 17.7 (From manometer)

4. Flume slope = 0.49 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**



ตาราง จ-6 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U2KC3P1

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U2KC3P1 ($t_s/y_0$ = 0.2) Date : 17/12/06 to 18/12/06

Scale Model : 1:100 Time : 11:00 pm to 09:00 am

Equi. Time = 840 min.

Water Temp. = 30 C°, v = $8 \times 10^{-7}\ m^2$/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 17.7 cm. | H = 17.7 cm. |
| Q = 18 l/sec. | Q = 18 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.01 |
| 2.5 | 30.09 | 0.02 |
| 3 | 30.09 | 0.03 |
| 3.5 | 30.09 | 0.04 |
| 4 | 30.09 | 0.04 |
| 4.5 | 30.08 | 0.05 |
| 5 | 30.08 | 0.05 |
| 5.5 | 30.08 | 0.05 |
| 6 | 30.08 | 0.05 |
| 6.5 | 30.08 | 0.08 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.07 | 0.08 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.0001 | So = 0.0001 |

| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

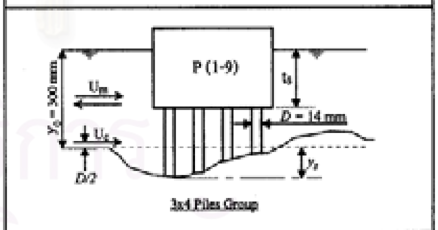
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter D,(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx,(mm) | Ly,(mm) |
| 1 | 14 | 31 | 61 | 59 |
| 2 | 14 | 34 | 67 | - |
| 3 | 14 | 34 | 70 | 55 |
| 4 | 14 | 29 | - | 57 |
| 5 | 14 | 34 | - | - |
| 6 | 14 | 34 | - | 50 |
| 7 | 14 | 19 | - | 44 |
| 8 | 14 | 29 | - | - |
| 9 | 14 | 25 | - | 40 |
| 10 | 14 | 1 | 60 | 28 |
| 11 | 14 | 5 | 63 | - |
| 12 | 14 | 8 | 64 | 30 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $KC=U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 14.00 | 0.63 | 37.20 | 42.50 |

**Definition sketch of Test Condition**




Remark : ....................................................................

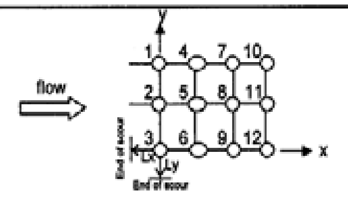
Note : 1. Open over flow wier = 22.5 (From scale bar)

2. Open valve = 3+0.3 r (From scale bar)

3. 90° v - notch wier, H = 17.7 (From manometer)

4. Flume slope = 0.49 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**



ตาราง จ-7 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U3KC1P1

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U3KC1P1 ($t_s/y_0$ = 0.2) Date : 18/12/06 to 19/12/06

Scale Model : 1:100 Time : 12:00 am to 11:00 am

Equi. Time = 1380 min.

Water Temp. = 30 C°, $\nu$ = 8 x $10^{-7}$ $m^2$/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 20.8 cm. | H = 20.78 cm. |
| Q = 27 l/sec. | Q = 26.9 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.03 |
| 2.5 | 30.09 | 0.03 |
| 3 | 30.09 | 0.04 |
| 3.5 | 30.09 | 0.04 |
| 4 | 30.09 | 0.05 |
| 4.5 | 30.08 | 0.05 |
| 5 | 30.08 | 0.06 |
| 5.5 | 30.08 | 0.06 |
| 6 | 30.08 | 0.07 |
| 6.5 | 30.08 | 0.08 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.08 | 0.08 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.0001 | So = 0.0001 |

| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

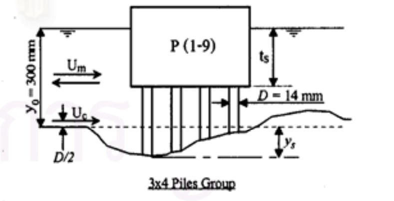
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter D,(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx,(mm) | Ly,(mm) |
| 1 | 14 | 31 | 74 | 70 |
| 2 | 14 | 30 | 72 | - |
| 3 | 14 | 30 | 72 | 60 |
| 4 | 14 | 20 | - | 60 |
| 5 | 14 | 24 | - | - |
| 6 | 14 | 22 | - | 50 |
| 7 | 14 | 14 | - | 50 |
| 8 | 14 | 23 | - | - |
| 9 | 14 | 14 | - | 35 |
| 10 | 14 | 0 | 74 | 25 |
| 11 | 14 | 3 | 74 | - |
| 12 | 14 | 3 | 74 | 15 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | KC=$U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 25.00 | 0.91 | 18.20 | 14.30 |

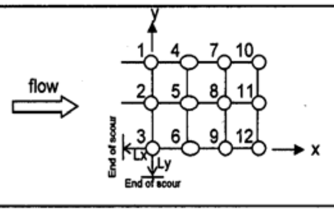
**Definition sketch of Test Condition**




**Remark :** ......

**Note** :
1. Open over flow wier = 22 (From scale bar)
2. Open valve = 6+00 r (From scale bar)
3. 90° v - notch wier, H = 20.78 (From manometer)
4. Flume slope = 0.48 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**




สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง จ-8 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U3KC2P1

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U3KC2P1 ($t_s/y_0$ = 0.2) Date : 19/12/06 to 20/12/06

Scale Model : 1:100 Time : 13:00 pm to 11:00 am

Equi. Time = 1320 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x $10^{-7}$ m²/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

**Flow Rate & Depth above wier**

| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
|---|---|
| H = 20.8 cm. | H = 20.78 cm. |
| Q = 27 l/sec. | Q = 26.9 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.03 |
| 2.5 | 30.09 | 0.03 |
| 3 | 30.09 | 0.04 |
| 3.5 | 30.09 | 0.04 |
| 4 | 30.09 | 0.05 |
| 4.5 | 30.08 | 0.05 |
| 5 | 30.08 | 0.06 |
| 5.5 | 30.08 | 0.06 |
| 6 | 30.08 | 0.07 |
| 6.5 | 30.08 | 0.08 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.08 | 0.08 |

**CAL. For clear-water condition**

| Initial Conditions | Exp. Set up |
|---|---|
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.0001 | So = 0.0001 |

**Water depth at test section**

| Initial Conditions | Exp. Set up |
|---|---|
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

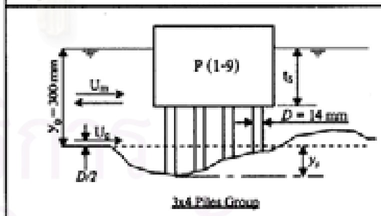
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter D,(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx,(mm) | Ly,(mm) |
| 1 | 14 | 35 | 56 | 62 |
| 2 | 14 | 38 | 50 | - |
| 3 | 14 | 35 | 45 | 72 |
| 4 | 14 | 25 | - | 35 |
| 5 | 14 | 28 | - | - |
| 6 | 14 | 26 | - | 50 |
| 7 | 14 | 15 | - | 25 |
| 8 | 14 | 23 | - | - |
| 9 | 14 | 15 | - | 35 |
| 10 | 14 | 0 | 75 | 15 |
| 11 | 14 | 2 | 70 | - |
| 12 | 14 | 2 | 72 | 14 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | KC=$U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 18.00 | 0.77 | 32.90 | 30.60 |

**Definition sketch of Test Condition**




Remark : ........................................

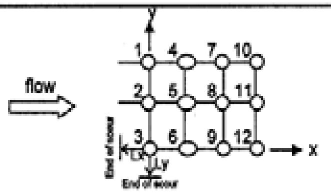
Note : 1. Open over flow wier = 22 (From scale bar)

2. Open valve = 6+00 r (From scale bar)

3. 90° v - notch wier, H = 20.78 (From manometer)

4. Flume slope = 0.48 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**




สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง จ-9 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U3KC3P1

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U3KC3P1 ($t_s/y_0$ = 0.2) Date : 20/12/06 to 21/12/06

Scale Model : 1:100 Time : 12:00 am to 12:00 am

Equi. Time = 1440 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x $10^{-7}$ $m^2$/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 20.8 cm. | H = 20.78 cm. |
| Q = 27 l/sec. | Q = 26.9 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.03 |
| 2.5 | 30.09 | 0.03 |
| 3 | 30.09 | 0.04 |
| 3.5 | 30.09 | 0.04 |
| 4 | 30.09 | 0.05 |
| 4.5 | 30.08 | 0.05 |
| 5 | 30.08 | 0.06 |
| 5.5 | 30.08 | 0.06 |
| 6 | 30.08 | 0.07 |
| 6.5 | 30.08 | 0.08 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.08 | 0.08 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.0001 | So = 0.0001 |

| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

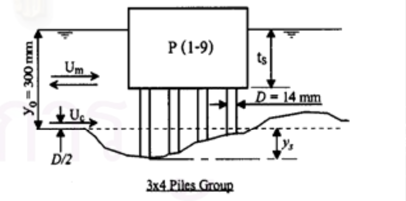
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter $D_i$(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | $Lx_i$(mm) | $Ly_i$(mm) |
| 1 | 14 | 40 | 75 | 60 |
| 2 | 14 | 39 | 80 | - |
| 3 | 14 | 46 | 75 | 65 |
| 4 | 14 | 39 | - | 65 |
| 5 | 14 | 43 | - | - |
| 6 | 14 | 44 | - | 75 |
| 7 | 14 | 39 | - | 60 |
| 8 | 14 | 38 | - | - |
| 9 | 14 | 34 | - | 50 |
| 10 | 14 | 11 | 70 | 45 |
| 11 | 14 | 16 | 65 | - |
| 12 | 14 | 15 | 70 | 30 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $KC=U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 14.00 | 0.63 | 37.30 | 42.60 |

**Definition sketch of Test Condition**




Remark : ...........................................

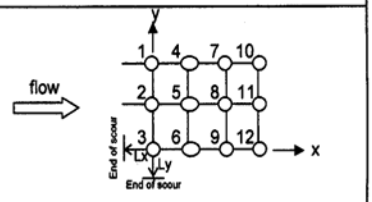
Note : 1. Open over flow wier = 22 (From scale bar)

2. Open valve = 6+00 r (From scale bar)

3. 90° v - notch wier, H = 20.78 (From manometer)

4. Flume slope = 0.48 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**



ตาราง จ-10 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U1KC1P3

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U1KC1P3 ($t_s/y_0$ = 0.4)    Date : 15/09/06 to 15/09/06

Scale Model : 1:100    Time : 08:00 am to 23:00 pm

Equi. Time = 900 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x $10^{-7} m^2$/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 13.2 cm. | H = 13.3 cm. |
| Q = 9 l/sec. | Q = 9.1 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.01 |
| 2.5 | 30.09 | 0.02 |
| 3 | 30.09 | 0.03 |
| 3.5 | 30.09 | 0.03 |
| 4 | 30.09 | 0.04 |
| 4.5 | 30.09 | 0.04 |
| 5 | 30.08 | 0.04 |
| 5.5 | 30.08 | 0.05 |
| 6 | 30.08 | 0.05 |
| 6.5 | 30.08 | 0.06 |
| (Pier) | 30.08 | 0.06 |
| 8 | 30.07 | 0.06 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.01 | So = 0.01 |

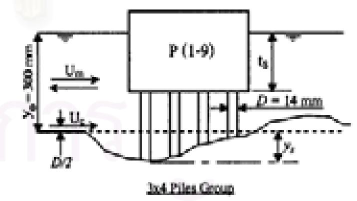
| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter D,(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx,(mm) | Ly,(mm) |
| 1 | 14 | 10 | 20 | 20 |
| 2 | 14 | 11 | 30 | - |
| 3 | 14 | 10 | 19 | 15 |
| 4 | 14 | 12 | 15 | 17 |
| 5 | 14 | 13 | 18 | - |
| 6 | 14 | 10 | 15 | 15 |
| 7 | 14 | 9 | 10 | 5 |
| 8 | 14 | 11 | 12 | - |
| 9 | 14 | 9 | 9 | 15 |
| 10 | 14 | 4 | 7 | 4 |
| 11 | 14 | 9 | 8 | - |
| 12 | 14 | 7 | 5 | 5 |

| Wave Characteristics / KC | | | |
|---|---|---|---|
| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $KC=U_m/f_sD$ |
| 14.00 | 0.91 | 17.80 | 14.00 |

**Definition sketch of Test Condition**




Remark : ..........

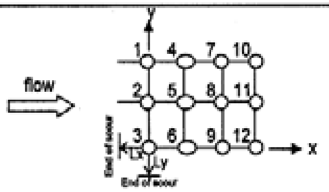
Note : 1. Open over flow wier = 25.5 (From scale bar)

2. Open valve = 2+00 r (From scale bar)

3. 90° v - notch wier, H = 13.3 (From manometer)

4. Flume slope = 0.5 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**



ตาราง จ-11 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U1KC2P3

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U1KC2P3 ($t_s/y_0$ = 0.4)

Date : 16/09/06 to 17/09/06

Scale Model : 1:100

Time : 09:00 am to 05:00 am

Equi. Time = 1200 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x 10$^{-7}$ m$^2$/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 13.2 cm. | H = 13.3 cm. |
| Q = 9 l/sec. | Q = 9.1 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.01 |
| 2.5 | 30.09 | 0.02 |
| 3 | 30.09 | 0.03 |
| 3.5 | 30.09 | 0.03 |
| 4 | 30.09 | 0.04 |
| 4.5 | 30.09 | 0.04 |
| 5 | 30.08 | 0.04 |
| 5.5 | 30.08 | 0.05 |
| 6 | 30.08 | 0.05 |
| 6.5 | 30.08 | 0.06 |
| (Pier) | 30.08 | 0.06 |
| 8 | 30.07 | 0.06 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.01 | So = 0.01 |

| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

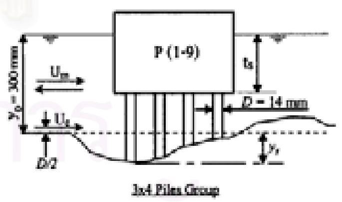
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter D,(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx,(mm) | Ly,(mm) |
| 1 | 14 | 12 | 35 | 25 |
| 2 | 14 | 17 | 38 | - |
| 3 | 14 | 10 | 35 | 25 |
| 4 | 14 | 6 | - | 5 |
| 5 | 14 | 9 | - | - |
| 6 | 14 | 9 | - | 10 |
| 7 | 14 | 5 | - | 5 |
| 8 | 14 | 11 | - | - |
| 9 | 14 | 10 | - | 10 |
| 10 | 14 | 4 | 8 | 10 |
| 11 | 14 | 4 | 5 | - |
| 12 | 14 | 8 | 10 | 10 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $KC=U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 18.00 | 0.77 | 32.50 | 30.20 |

**Definition sketch of Test Condition**

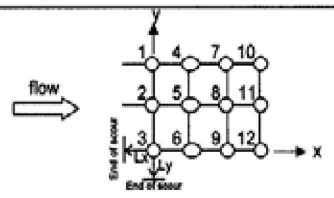



Remark : ..............................

Note :

1. Open over flow wier = 25.5 (From scale bar)
2. Open valve = 2+00 r (From scale bar)
3. 90° v - notch wier, H = 13.3 (From manometer)
4. Flume slope = 0.5 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**




สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง จ-12 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U1KC3P3

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U1KC3P3 ($t_s/y_0$ = 0.4) Date : 17/09/06 to 18/09/06

Scale Model : 1:100 Time : 12:00 am to 12:00 am

Equi. Time = 1440 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x $10^{-7}$ $m^2$/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 13.2 cm. | H = 13.3 cm. |
| Q = 9 l/sec. | Q = 9.1 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.01 |
| 2.5 | 30.09 | 0.02 |
| 3 | 30.09 | 0.03 |
| 3.5 | 30.09 | 0.03 |
| 4 | 30.09 | 0.04 |
| 4.5 | 30.09 | 0.04 |
| 5 | 30.08 | 0.04 |
| 5.5 | 30.08 | 0.05 |
| 6 | 30.08 | 0.05 |
| 6.5 | 30.08 | 0.06 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.07 | 0.08 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.01 | So = 0.01 |

| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

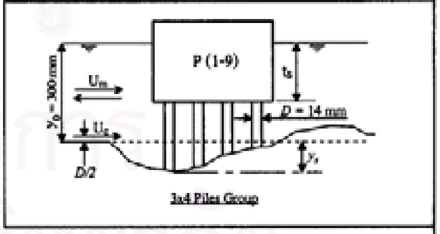
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter $D_i$(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole Lx,(mm) | Ly,(mm) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 14 | 16 | 15 | 20 |
| 2 | 14 | 20 | 20 | - |
| 3 | 14 | 14 | 25 | 30 |
| 4 | 14 | 17 | - | 17 |
| 5 | 14 | 18 | - | - |
| 6 | 14 | 16 | - | 10 |
| 7 | 14 | 15 | - | 15 |
| 8 | 14 | 15 | - | - |
| 9 | 14 | 17 | - | 10 |
| 10 | 14 | 14 | 17 | 10 |
| 11 | 14 | 12 | 25 | - |
| 12 | 14 | 12 | 40 | 15 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $KC=U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 14.00 | 0.63 | 36.90 | 42.20 |

**Definition sketch of Test Condition**




Remark : ......

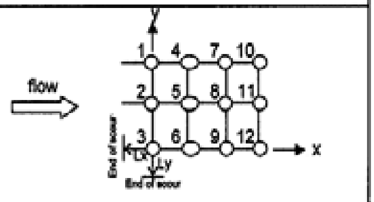
Note : 1. Open over flow wier = 25.5 (From scale bar)

2. Open valve = 2+00 r (From scale bar)

3. 90° v - notch wier, H = 13.3 (From manometer)

4. Flume slope = 0.5 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**



ตาราง จ-13 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U2KC1P3

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U2KC1P3 ($t_s/y_0$ = 0.4) — Date : 27/11/06 to 28/11/06

Scale Model : 1:100 — Time : 23:00 pm to 18:00 pm

Equi. Time = 1140 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x 10⁻⁷ m²/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

**Flow Rate & Depth above wier**

| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
|---|---|
| H = 17.7 cm. | H = 17.7 cm. |
| Q = 18 l/sec. | Q = 18 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.01 |
| 2.5 | 30.09 | 0.02 |
| 3 | 30.09 | 0.03 |
| 3.5 | 30.09 | 0.04 |
| 4 | 30.09 | 0.04 |
| 4.5 | 30.08 | 0.05 |
| 5 | 30.08 | 0.05 |
| 5.5 | 30.08 | 0.05 |
| 6 | 30.08 | 0.05 |
| 6.5 | 30.08 | 0.08 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.07 | 0.08 |

**CAL. For clear-water condition**

| Initial Conditions | Exp. Set up |
|---|---|
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.0001 | So = 0.0001 |

**Water depth at test section**

| Initial Conditions | Exp. Set up |
|---|---|
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

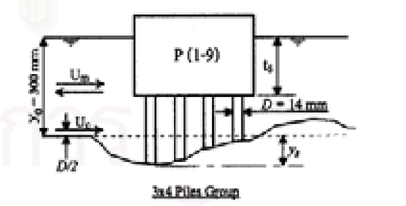
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter $D_i$(mm) | Maximum Scour Depth $y_{s,i}$ (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | $Lx_i$(mm) | $Ly_i$(mm) |
| 1 | 14 | 27 | 40 | 45 |
| 2 | 14 | 30 | 45 | - |
| 3 | 14 | 28 | 35 | 55 |
| 4 | 14 | 24 | - | 43 |
| 5 | 14 | 29 | - | - |
| 6 | 14 | 27 | - | 40 |
| 7 | 14 | 16 | - | 30 |
| 8 | 14 | 24 | - | - |
| 9 | 14 | 19 | - | 20 |
| 10 | 14 | 0 | 60 | 25 |
| 11 | 14 | 3 | 65 | - |
| 12 | 14 | 4 | 66 | 10 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $KC=U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 25.00 | 0.91 | 18.00 | 14.20 |

**Definition sketch of Test Condition**




Remark :

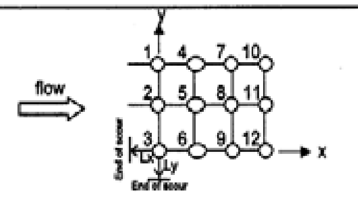
Note : 1. Open over flow wier = 22.5 (From scale bar)

2. Open valve = 3+0.3 r (From scale bar)

3. 90° v - notch wier, H = 17.7 (From manometer)

4. Flume slope = 0.49 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**




สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง จ-14 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U2KC2P3

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U2KC2P3 ($t_s/y_0$ = 0.4)  Date : 28/11/06 to 29/11/06

Scale Model : 1:100  Time : 11:00 am to 07:00 am

Equi. Time = 1200 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x $10^{-7}$ $m^2$/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 17.7 cm. | H = 17.7 cm. |
| Q = 18 l/sec. | Q = 18 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.01 |
| 2.5 | 30.09 | 0.02 |
| 3 | 30.09 | 0.03 |
| 3.5 | 30.09 | 0.04 |
| 4 | 30.09 | 0.04 |
| 4.5 | 30.08 | 0.05 |
| 5 | 30.08 | 0.05 |
| 5.5 | 30.08 | 0.05 |
| 6 | 30.08 | 0.05 |
| 6.5 | 30.08 | 0.08 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.07 | 0.08 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.0001 | So = 0.0001 |

| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

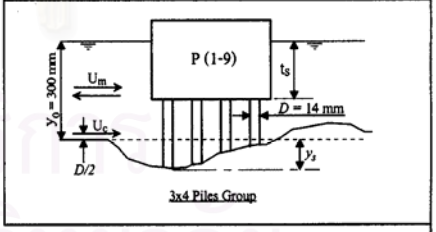
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter $D_i$(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole Lx,(mm) | Ly,(mm) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 14 | 33 | 60 | 55 |
| 2 | 14 | 32 | 76 | - |
| 3 | 14 | 33 | 61 | 60 |
| 4 | 14 | 32 | - | 52 |
| 5 | 14 | 30 | - | - |
| 6 | 14 | 32 | - | 55 |
| 7 | 14 | 27 | - | 43 |
| 8 | 14 | 32 | - | - |
| 9 | 14 | 31 | - | 50 |
| 10 | 14 | 20 | 50 | 22 |
| 11 | 14 | 18 | 65 | - |
| 12 | 14 | 19 | 52 | 20 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $KC=U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 18.00 | 0.77 | 32.60 | 30.30 |

**Definition sketch of Test Condition**




Remark : ...

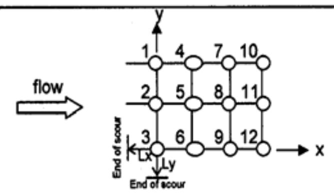
Note : 1. Open over flow wier = 22.5 (From scale bar)

2. Open valve = 3+0.3 r (From scale bar)

3. 90° v - notch wier, H = 17.7 (From manometer)

4. Flume slope = 0.49 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**




สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง จ-15 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U2KC3P3

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U2KC3P3 ($t_s/y_0$ = 0.4)    Date : 29/11/06 to 29/11/06

Scale Model : 1:100    Time : 08:00 am to 23:00 pm

Equi. Time = 900 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = $8 \times 10^{-7}\ m^2$/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 17.7 cm. | H = 17.7 cm. |
| Q = 18 l/sec. | Q = 18 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.01 |
| 2.5 | 30.09 | 0.02 |
| 3 | 30.09 | 0.03 |
| 3.5 | 30.09 | 0.04 |
| 4 | 30.09 | 0.04 |
| 4.5 | 30.08 | 0.05 |
| 5 | 30.08 | 0.05 |
| 5.5 | 30.08 | 0.05 |
| 6 | 30.08 | 0.05 |
| 6.5 | 30.08 | 0.08 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.07 | 0.08 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.0001 | So = 0.0001 |

| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

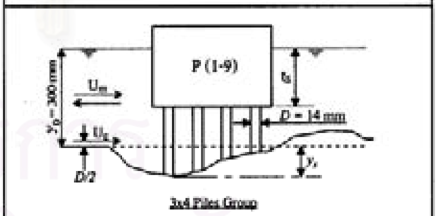
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter D,(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$ , (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx,(mm) | Ly,(mm) |
| 1 | 14 | 34 | 78 | 60 |
| 2 | 14 | 35 | 75 | - |
| 3 | 14 | 33 | 75 | 65 |
| 4 | 14 | 32 | - | 60 |
| 5 | 14 | 36 | - | - |
| 6 | 14 | 35 | - | 60 |
| 7 | 14 | 21 | - | 45 |
| 8 | 14 | 31 | - | - |
| 9 | 14 | 25 | - | 44 |
| 10 | 14 | 5 | 50 | 35 |
| 11 | 14 | 6 | 70 | - |
| 12 | 14 | 9 | 70 | 35 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | KC=$U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 14.00 | 0.63 | 37.20 | 42.50 |

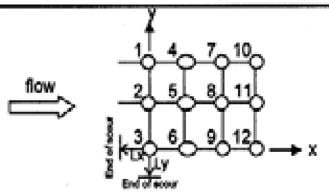
**Definition sketch of Test Condition**




**Remark** :

**Note** :
1. Open over flow wier = 22.5 (From scale bar)
2. Open valve = 3+0.3 r (From scale bar)
3. 90° v - notch wier, H = 17.7 (From manometer)
4. Flume slope = 0.49 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**



ตาราง จ-16 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U3KC1P3

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U3KC1P3 ($t_s/y_0$ = 0.4) Date : 29/11/06 to 30/11/06

Scale Model : 1:100 Time : 14:00 pm to 09:00 am

Equi. Time = 1140 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x 10⁻⁷ m²/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 20.8 cm. | H = 20.78 cm. |
| Q = 27 l/sec. | Q = 26.9 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.03 |
| 2.5 | 30.09 | 0.03 |
| 3 | 30.09 | 0.04 |
| 3.5 | 30.09 | 0.04 |
| 4 | 30.09 | 0.05 |
| 4.5 | 30.08 | 0.05 |
| 5 | 30.08 | 0.06 |
| 5.5 | 30.08 | 0.06 |
| 6 | 30.08 | 0.07 |
| 6.5 | 30.08 | 0.08 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.08 | 0.08 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.0001 | So = 0.0001 |

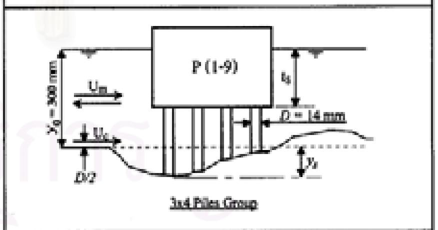
| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter $D_i$(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx,(mm) | Ly,(mm) |
| 1 | 14 | 30 | 75 | 75 |
| 2 | 14 | 33 | 72 | - |
| 3 | 14 | 30 | 70 | 70 |
| 4 | 14 | 27 | - | 70 |
| 5 | 14 | 32 | - | - |
| 6 | 14 | 28 | - | 65 |
| 7 | 14 | 20 | - | 50 |
| 8 | 14 | 27 | - | - |
| 9 | 14 | 20 | - | 50 |
| 10 | 14 | 4 | 80 | 30 |
| 11 | 14 | 8 | 80 | - |
| 12 | 14 | 6 | 80 | 30 |

| Wave Characteristics / KC | | | |
|---|---|---|---|
| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | KC=$U_m/f_sD$ |
| 25.00 | 0.91 | 18.00 | 14.20 |

**Definition sketch of Test Condition**




Remark :

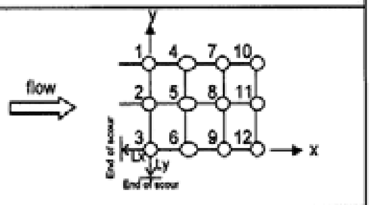
Note : 1. Open over flow wier = 22 (From scale bar)

2. Open valve = 6+00 r (From scale bar)

3. 90° v - notch wier, H = 20.78 (From manometer)

4. Flume slope = 0.48 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**



ตาราง จ-17 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U3KC2P3

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U3KC2P3 ($t_s/y_0$ = 0.4) Date : 30/11/06 to 01/12/06

Scale Model : 1:100 Time : 14:00 pm to 05:00 am

Equi. Time = 900 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x $10^{-7}$ m²/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 20.8 cm. | H = 20.78 cm. |
| Q = 27 l/sec. | Q = 26.9 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.03 |
| 2.5 | 30.09 | 0.03 |
| 3 | 30.09 | 0.04 |
| 3.5 | 30.09 | 0.04 |
| 4 | 30.09 | 0.05 |
| 4.5 | 30.08 | 0.05 |
| 5 | 30.08 | 0.06 |
| 5.5 | 30.08 | 0.06 |
| 6 | 30.08 | 0.07 |
| 6.5 | 30.08 | 0.08 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.08 | 0.08 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.0001 | So = 0.0001 |

| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

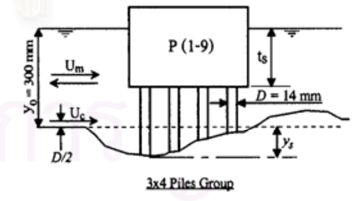
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter D,(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole Lx,(mm) | Ly,(mm) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 14 | 37 | 80 | 75 |
| 2 | 14 | 39 | 80 | - |
| 3 | 14 | 38 | 75 | 70 |
| 4 | 14 | 29 | - | 55 |
| 5 | 14 | 34 | - | - |
| 6 | 14 | 28 | - | 55 |
| 7 | 14 | 19 | - | 25 |
| 8 | 14 | 25 | - | - |
| 9 | 14 | 19 | - | 35 |
| 10 | 14 | 5 | 75 | 30 |
| 11 | 14 | 5 | 75 | - |
| 12 | 14 | 4 | 70 | 25 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $KC=U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 18.00 | 0.77 | 32.90 | 30.60 |

**Definition sketch of Test Condition**




Remark : ...

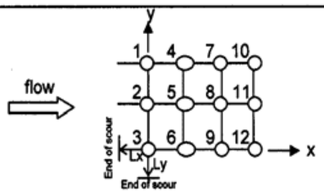
Note : 1. Open over flow wier = 22 (From scale bar)

2. Open valve = 6+00 r (From scale bar)

3. 90° v - notch wier, H = 20.78 (From manometer)

4. Flume slope = 0.48 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**



ตาราง จ-18 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U3KC3P3

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U3KC3P3 ($t_s/y_0$ = 0.4) Date : 01/12/06 to 02/12/06

Scale Model : 1:100 Time : 07:00 am to 07:00 am

Equi. Time = 1440 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x $10^{-7}$ $m^2$/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 20.8 cm. | H = 20.78 cm. |
| Q = 27 l/sec. | Q = 26.9 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.03 |
| 2.5 | 30.09 | 0.03 |
| 3 | 30.09 | 0.04 |
| 3.5 | 30.09 | 0.04 |
| 4 | 30.09 | 0.05 |
| 4.5 | 30.08 | 0.05 |
| 5 | 30.08 | 0.06 |
| 5.5 | 30.08 | 0.06 |
| 6 | 30.08 | 0.07 |
| 6.5 | 30.08 | 0.08 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.08 | 0.08 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.0001 | So = 0.0001 |

| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

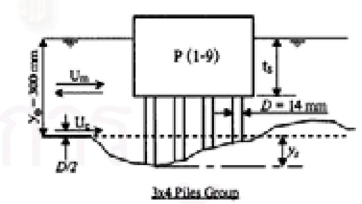
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter $D_i$(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx,(mm) | Ly,(mm) |
| 1 | 14 | 43 | 80 | 70 |
| 2 | 14 | 46 | 90 | - |
| 3 | 14 | 43 | 80 | 70 |
| 4 | 14 | 45 | - | 75 |
| 5 | 14 | 45 | - | - |
| 6 | 14 | 46 | - | 70 |
| 7 | 14 | 37 | - | 80 |
| 8 | 14 | 41 | - | - |
| 9 | 14 | 41 | - | 60 |
| 10 | 14 | 24 | 85 | 61 |
| 11 | 14 | 27 | 85 | - |
| 12 | 14 | 28 | 90 | 45 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $KC=U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 14.00 | 0.63 | 37.30 | 42.60 |

**Definition sketch of Test Condition**




Remark :

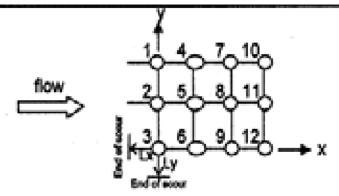
Note : 1. Open over flow wier = 22 (From scale bar)

2. Open valve = 6+00 r (From scale bar)

3. 90° v - notch wier, H = 20.78 (From manometer)

4. Flume slope = 0.48 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**




สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง จ-19 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา <u>U1KC1P5</u>

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U1KC1P5 ($t_s/y_0$ = 0.6)

Date : 24/09/06 to 25/09/06

Scale Model : 1:100

Time : 03:00 am to 22:00 pm

Equi. Time = 1200 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x $10^{-7}$ m²/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 13.2 cm. | H = 13.3 cm. |
| Q = 9 l/sec. | Q = 9.1 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.01 |
| 2.5 | 30.09 | 0.02 |
| 3 | 30.09 | 0.03 |
| 3.5 | 30.09 | 0.03 |
| 4 | 30.09 | 0.04 |
| 4.5 | 30.09 | 0.04 |
| 5 | 30.08 | 0.04 |
| 5.5 | 30.08 | 0.05 |
| 6 | 30.08 | 0.05 |
| 6.5 | 30.08 | 0.06 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.07 | 0.08 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.01 | So = 0.01 |

| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

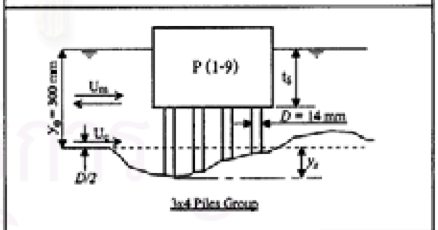
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter D,(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx,(mm) | Ly,(mm) |
| 1 | 14 | 12 | 28 | 25 |
| 2 | 14 | 16 | 29 | - |
| 3 | 14 | 18 | 33 | 20 |
| 4 | 14 | 12 | - | 10 |
| 5 | 14 | 14 | - | - |
| 6 | 14 | 18 | - | 15 |
| 7 | 14 | 14 | - | 8 |
| 8 | 14 | 15 | - | - |
| 9 | 14 | 16 | - | 14 |
| 10 | 14 | 8 | 10 | 7 |
| 11 | 14 | 10 | 8 | - |
| 12 | 14 | 15 | 10 | 15 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $KC=U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 14.00 | 0.91 | 17.80 | 14.00 |

**Definition sketch of Test Condition**




Remark : ...

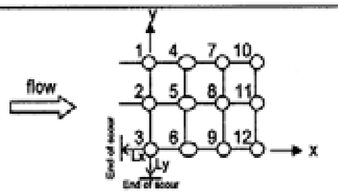
Note : 1. Open over flow wier = 25.5 (From scale bar)

2. Open valve = 2+00 r (From scale bar)

3. 90° v - notch wier, H = 13.3 (From manometer)

4. Flume slope = 0.5 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**



ตาราง จ-20 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U1KC2P5

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U1KC2P5 ($t_s/y_0$ = 0.6) Date : 01/09/06 to 02/09/06

Scale Model : 1:100 Time : 12:00 am to 08:00 am

Equi. Time = 1200 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x 10$^{-7}$ m²/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 13.2 cm. | H = 13.3 cm. |
| Q = 9 l/sec. | Q = 9.1 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.01 |
| 2.5 | 30.09 | 0.02 |
| 3 | 30.09 | 0.03 |
| 3.5 | 30.09 | 0.03 |
| 4 | 30.09 | 0.04 |
| 4.5 | 30.09 | 0.04 |
| 5 | 30.08 | 0.04 |
| 5.5 | 30.08 | 0.05 |
| 6 | 30.08 | 0.05 |
| 6.5 | 30.08 | 0.06 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.07 | 0.08 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.01 | So = 0.01 |

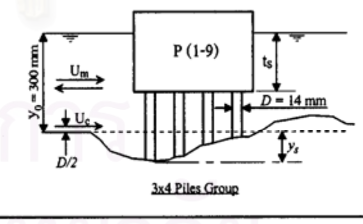
| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter $D_i$(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx,(mm) | Ly,(mm) |
| 1 | 14 | 15 | 40 | 15 |
| 2 | 14 | 20 | 45 | - |
| 3 | 14 | 16 | 40 | 30 |
| 4 | 14 | 15 | - | 15 |
| 5 | 14 | 15 | - | - |
| 6 | 14 | 14 | - | 15 |
| 7 | 14 | 13 | - | 10 |
| 8 | 14 | 10 | - | - |
| 9 | 14 | 11 | - | 12 |
| 10 | 14 | 8 | 14 | 8 |
| 11 | 14 | 6 | 18 | - |
| 12 | 14 | 5 | 13 | 12 |

| Wave Characteristics / KC | | | |
|---|---|---|---|
| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $KC=U_m/f_sD$ |
| 18.00 | 0.77 | 32.50 | 30.20 |

**Definition sketch of Test Condition**




**Remark** :

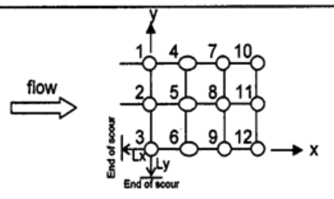
**Note** : 1. Open over flow wier = 25.5 (From scale bar)

2. Open valve = 2+00 r (From scale bar)

3. 90° v - notch wier, H = 13.3 (From manometer)

4. Flume slope = 0.5 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**



ตาราง จ-21 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U1KC3P5

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U1KC3P5 ($t_s/y_0$ = 0.6) Date : 03/09/06 to 04/09/06

Scale Model : 1:100 Time : 12:00 am to 12:00 am

Equi. Time = 1440 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x $10^{-7}$ $m^2$/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 13.2 cm. | H = 13.3 cm. |
| Q = 9 l/sec. | Q = 9.1 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.01 |
| 2.5 | 30.09 | 0.02 |
| 3 | 30.09 | 0.03 |
| 3.5 | 30.09 | 0.03 |
| 4 | 30.09 | 0.04 |
| 4.5 | 30.09 | 0.04 |
| 5 | 30.08 | 0.04 |
| 5.5 | 30.08 | 0.05 |
| 6 | 30.08 | 0.05 |
| 6.5 | 30.08 | 0.06 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.07 | 0.08 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.01 | So = 0.01 |

| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

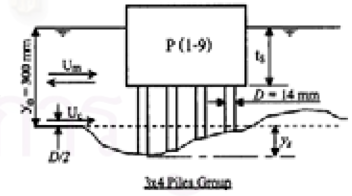
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter $D_i$(mm) | Maximum Scour Depth $y_{s,i}$ (mm) | Plan View Extent of Scour Hole Lx,(mm) | Ly,(mm) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 14 | 19 | 49 | 35 |
| 2 | 14 | 25 | 40 | - |
| 3 | 14 | 18 | 40 | 30 |
| 4 | 14 | 17 | - | 15 |
| 5 | 14 | 21 | - | - |
| 6 | 14 | 17 | - | 18 |
| 7 | 14 | 16 | - | 12 |
| 8 | 14 | 22 | - | - |
| 9 | 14 | 15 | - | 15 |
| 10 | 14 | 15 | 15 | 10 |
| 11 | 14 | 17 | 20 | - |
| 12 | 14 | 14 | 15 | 14 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | KC=$U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 14.00 | 0.63 | 36.90 | 42.20 |

**Definition sketch of Test Condition**




Remark :

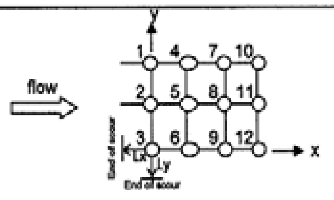
**Note** : 1. Open over flow wier = 25.5 (From scale bar)

2. Open valve = 2+00 r (From scale bar)

3. 90° v - notch wier, H = 13.3 (From manometer)

4. Flume slope = 0.5 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**



ตาราง จ-22 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U2KC1P5

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U2KC1P5 ($t_e/y_0$ = 0.6)

Scale Model : 1:100

Date : 13/11/06 to 14/11/06

Time : 20:00 pm to 15:00 pm

Equi. Time = 1140 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = $8 \times 10^{-7}$ $m^2$/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 17.7 cm. | H = 17.7 cm. |
| Q = 18 l/sec. | Q = 18 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.01 |
| 2.5 | 30.09 | 0.02 |
| 3 | 30.09 | 0.03 |
| 3.5 | 30.09 | 0.04 |
| 4 | 30.09 | 0.04 |
| 4.5 | 30.08 | 0.05 |
| 5 | 30.08 | 0.05 |
| 5.5 | 30.08 | 0.05 |
| 6 | 30.08 | 0.05 |
| 6.5 | 30.08 | 0.08 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.07 | 0.08 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.0001 | So = 0.0001 |

| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

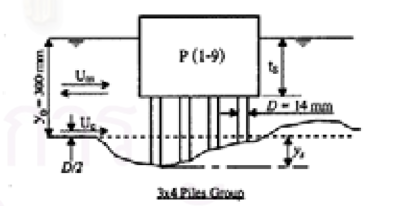
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter $D_i$(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx,(mm) | Ly,(mm) |
| 1 | 14 | 27 | 60 | 65 |
| 2 | 14 | 32 | 70 | - |
| 3 | 14 | 27 | 60 | 50 |
| 4 | 14 | 26 | - | 55 |
| 5 | 14 | 29 | - | - |
| 6 | 14 | 25 | - | 45 |
| 7 | 14 | 16 | - | 40 |
| 8 | 14 | 20 | - | - |
| 9 | 14 | 21 | - | 30 |
| 10 | 14 | 2 | 55 | 10 |
| 11 | 14 | 7 | 55 | - |
| 12 | 14 | 3 | 60 | 10 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $KC=U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 25.00 | 0.91 | 18.00 | 14.20 |

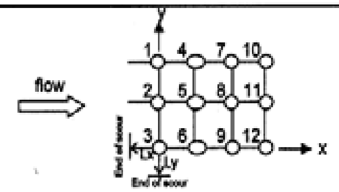
**Definition sketch of Test Condition**




Remark : ..........

Note :
1. Open over flow wier = 22.5 (From scale bar)
2. Open valve = 3+0.3 r (From scale bar)
3. 90° v - notch wier, H = 17.7 (From manometer)
4. Flume slope = 0.49 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**



ตาราง จ-23 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U2KC2P5

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U2KC2P5 ($t_e/y_0$ = 0.6) Date : 14/11/06 to 15/11/06

Scale Model : 1:100 Time : 20:30 pm to 17:30 pm

Equi. Time = 1260 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x $10^{-7}$ m²/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 17.7 cm. | H = 17.7 cm. |
| Q = 18 l/sec. | Q = 18 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.01 |
| 2.5 | 30.09 | 0.02 |
| 3 | 30.09 | 0.03 |
| 3.5 | 30.09 | 0.04 |
| 4 | 30.09 | 0.04 |
| 4.5 | 30.08 | 0.05 |
| 5 | 30.08 | 0.05 |
| 5.5 | 30.08 | 0.05 |
| 6 | 30.08 | 0.05 |
| 6.5 | 30.08 | 0.08 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.07 | 0.08 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.0001 | So = 0.0001 |

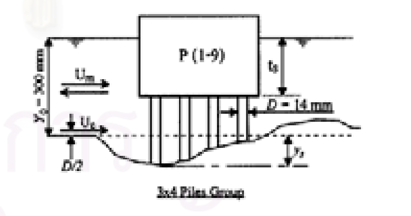
| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter $D_i$(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | $Lx_i$(mm) | $Ly_i$(mm) |
| 1 | 14 | 32 | 80 | 65 |
| 2 | 14 | 31 | 90 | - |
| 3 | 14 | 33 | 77 | 65 |
| 4 | 14 | 37 | - | 70 |
| 5 | 14 | 37 | - | - |
| 6 | 14 | 37 | - | 70 |
| 7 | 14 | 34 | - | 80 |
| 8 | 14 | 33 | - | - |
| 9 | 14 | 36 | - | 55 |
| 10 | 14 | 14 | 80 | 55 |
| 11 | 14 | 16 | 75 | - |
| 12 | 14 | 19 | 80 | 40 |

| Wave Characteristics / KC | | | |
|---|---|---|---|
| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $KC=U_m/f_sD$ |
| 18.00 | 0.77 | 32.60 | 30.30 |

**Definition sketch of Test Condition**




Remark : ...

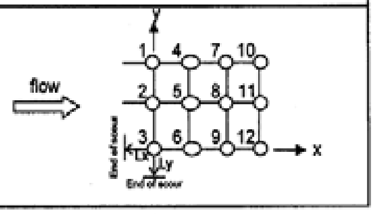
Note : 1. Open over flow wier = 22.5 (From scale bar)

2. Open valve = 3+0.3 r (From scale bar)

3. 90° v - notch wier, H = 17.7 (From manometer)

4. Flume slope = 0.49 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**




สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง จ-24 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U2KC3P5

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U2KC3P5 ($t_e/y_0$ = 0.6) Date : 15/11/06 to 16/11/06

Scale Model : 1:100 Time : 19:00 pm to 10:00 am

Equi. Time = 900 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x 10⁻⁷ m²/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 17.7 cm. | H = 17.7 cm. |
| Q = 18 l/sec. | Q = 18 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.01 |
| 2.5 | 30.09 | 0.02 |
| 3 | 30.09 | 0.03 |
| 3.5 | 30.09 | 0.04 |
| 4 | 30.09 | 0.04 |
| 4.5 | 30.08 | 0.05 |
| 5 | 30.08 | 0.05 |
| 5.5 | 30.08 | 0.05 |
| 6 | 30.08 | 0.05 |
| 6.5 | 30.08 | 0.08 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.07 | 0.08 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.0001 | So = 0.0001 |

| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

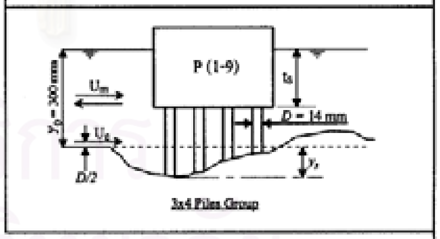
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter $D_i$(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx,(mm) | Ly,(mm) |
| 1 | 14 | 33 | 85 | 80 |
| 2 | 14 | 35 | 80 | - |
| 3 | 14 | 36 | 84 | 85 |
| 4 | 14 | 33 | - | 80 |
| 5 | 14 | 39 | - | - |
| 6 | 14 | 36 | - | 65 |
| 7 | 14 | 20 | - | 50 |
| 8 | 14 | 32 | - | - |
| 9 | 14 | 28 | - | 50 |
| 10 | 14 | 2 | 90 | 40 |
| 11 | 14 | 8 | 90 | - |
| 12 | 14 | 12 | 92 | 40 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $KC=U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 14.00 | 0.63 | 37.20 | 42.50 |

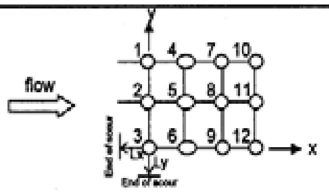
**Definition sketch of Test Condition**




Remark : ..............................

**Note** :
1. Open over flow wier = 22.5 (From scale bar)
2. Open valve = 3+0.3 r (From scale bar)
3. 90° v - notch wier, H = 17.7 (From manometer)
4. Flume slope = 0.49 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**



ตาราง จ-25 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา <u>U3KC1P5</u>

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U3KC1P5 ($t_s/y_0$ = 0.6)  Date : 16/11/06 to 17/11/06

Scale Model : 1:100  Time : 14:00 pm to 14:00 pm

Equi. Time = 1440 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x $10^{-7}$ m²/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 20.8 cm. | H = 20.78 cm. |
| Q = 27 l/sec. | Q = 26.9 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.03 |
| 2.5 | 30.09 | 0.03 |
| 3 | 30.09 | 0.04 |
| 3.5 | 30.09 | 0.04 |
| 4 | 30.09 | 0.05 |
| 4.5 | 30.08 | 0.05 |
| 5 | 30.08 | 0.06 |
| 5.5 | 30.08 | 0.06 |
| 6 | 30.08 | 0.07 |
| 6.5 | 30.08 | 0.08 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.08 | 0.08 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.0001 | So = 0.0001 |

| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

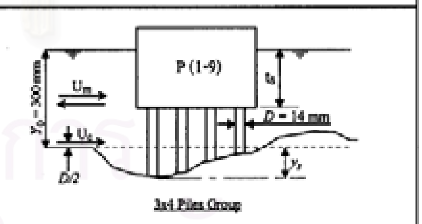
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter $D_i$(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx,(mm) | Ly,(mm) |
| 1 | 14 | 35 | 85 | 82 |
| 2 | 14 | 35 | 80 | - |
| 3 | 14 | 35 | 85 | 70 |
| 4 | 14 | 34 | - | 60 |
| 5 | 14 | 35 | - | - |
| 6 | 14 | 30 | - | 60 |
| 7 | 14 | 23 | - | 50 |
| 8 | 14 | 30 | - | - |
| 9 | 14 | 22 | - | 30 |
| 10 | 14 | 6 | 95 | 30 |
| 11 | 14 | 9 | 95 | - |
| 12 | 14 | 8 | 95 | 40 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $KC=U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 25.00 | 0.91 | 18.00 | 14.20 |

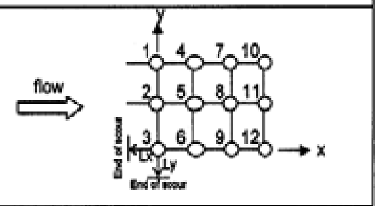
**Definition sketch of Test Condition**




Remark : ..........

Note :
1. Open over flow wier = 22 (From scale bar)
2. Open valve = 6+00 r (From scale bar)
3. 90° v - notch wier, H = 20.78 (From manometer)
4. Flume slope = 0.48 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**




สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง จ-26 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U3KC2P5

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U3KC2P5 ($t_s/y_0$ = 0.6) Date : 18/11/06 to 19/11/06

Scale Model : 1:100 Time : 01:00 am to 00:00 am

Equi. Time = 1380 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x $10^{-7}$ $m^2$/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

**Flow Rate & Depth above wier**

| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
|---|---|
| H = 20.8 cm. | H = 20.78 cm. |
| Q = 27 l/sec. | Q = 26.9 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.03 |
| 2.5 | 30.09 | 0.03 |
| 3 | 30.09 | 0.04 |
| 3.5 | 30.09 | 0.04 |
| 4 | 30.09 | 0.05 |
| 4.5 | 30.08 | 0.05 |
| 5 | 30.08 | 0.06 |
| 5.5 | 30.08 | 0.06 |
| 6 | 30.08 | 0.07 |
| 6.5 | 30.08 | 0.08 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.08 | 0.08 |

**CAL. For clear-water condition**

| Initial Conditions | Exp. Set up |
|---|---|
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.0001 | So = 0.0001 |

**Water depth at test section**

| Initial Conditions | Exp. Set up |
|---|---|
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

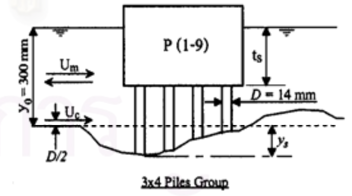
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter D,(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx,(mm) | Ly,(mm) |
| 1 | 14 | 39 | 100 | 90 |
| 2 | 14 | 40 | 95 | - |
| 3 | 14 | 40 | 85 | 80 |
| 4 | 14 | 33 | - | 55 |
| 5 | 14 | 35 | - | - |
| 6 | 14 | 33 | - | 55 |
| 7 | 14 | 19 | - | 50 |
| 8 | 14 | 29 | - | - |
| 9 | 14 | 20 | - | 35 |
| 10 | 14 | 5 | 80 | 45 |
| 11 | 14 | 10 | 75 | - |
| 12 | 14 | 7 | 70 | 40 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | KC=$U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 18.00 | 0.77 | 32.90 | 30.60 |

**Definition sketch of Test Condition**




Remark : ...

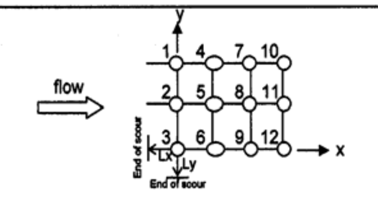
Note : 1. Open over flow wier = 22 (From scale bar)

2. Open valve = 6+00 r (From scale bar)

3. 90° v - notch wier, H = 20.78 (From manometer)

4. Flume slope = 0.48 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**



ตาราง จ-27 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U3KC3P5

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U3KC3P5 ($t_s/y_0$ = 0.6)

Date : 19/11/06 to 20/11/06

Scale Model : 1:100

Time : 03:00 am to 03:00 am

Equi. Time = 1440 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x.10$^{-7}$ m²/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 20.8 cm. | H = 20.78 cm. |
| Q = 27 l/sec. | Q = 26.9 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.03 |
| 2.5 | 30.09 | 0.03 |
| 3 | 30.09 | 0.04 |
| 3.5 | 30.09 | 0.04 |
| 4 | 30.09 | 0.05 |
| 4.5 | 30.08 | 0.05 |
| 5 | 30.08 | 0.06 |
| 5.5 | 30.08 | 0.06 |
| 6 | 30.08 | 0.07 |
| 6.5 | 30.08 | 0.08 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.08 | 0.08 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.0001 | So = 0.0001 |

| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

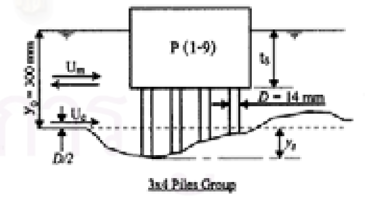
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter D,(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx,(mm) | Ly,(mm) |
| 1 | 14 | 45 | 80 | 70 |
| 2 | 14 | 47 | 85 | - |
| 3 | 14 | 47 | 90 | 95 |
| 4 | 14 | 48 | - | 75 |
| 5 | 14 | 49 | - | - |
| 6 | 14 | 48 | - | 90 |
| 7 | 14 | 38 | - | 70 |
| 8 | 14 | 42 | - | - |
| 9 | 14 | 40 | - | 85 |
| 10 | 14 | 21 | 105 | 50 |
| 11 | 14 | 26 | 90 | - |
| 12 | 14 | 28 | 102 | 65 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ (s$^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | KC=$U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 14.00 | 0.63 | 37.30 | 42.60 |

**Definition sketch of Test Condition**




Remark : ..............................

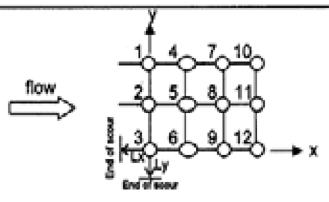
Note : 1. Open over flow wier = 22 (From scale bar)

2. Open valve = 6+00 r (From scale bar)

3. 90° v - notch wier, H = 20.78 (From manometer)

4. Flume slope = 0.48 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**



ตาราง จ-28 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U1KC1P7

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U1KC1P7 ($t_s/y_0$ = 0.8)  Date : 06/10/06 to 07/10/06

Scale Model : 1:100  Time : 12:00 am to 06:00 am

Equi. Time = 1140 min.

Water Temp. = 30 C°, v = 8 x $10^{-7}$ $m^2$/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 13.2 cm. | H = 13.3 cm. |
| Q = 9 l/sec. | Q = 9.1 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.01 |
| 2.5 | 30.09 | 0.02 |
| 3 | 30.09 | 0.03 |
| 3.5 | 30.09 | 0.03 |
| 4 | 30.09 | 0.04 |
| 4.5 | 30.09 | 0.04 |
| 5 | 30.08 | 0.04 |
| 5.5 | 30.08 | 0.05 |
| 6 | 30.08 | 0.05 |
| 6.5 | 30.08 | 0.06 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.07 | 0.08 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.01 | So = 0.01 |

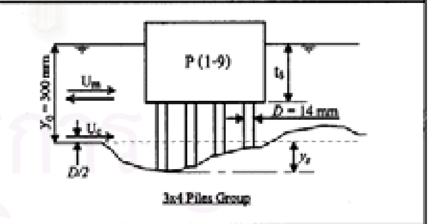
| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter D,(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx,(mm) | Ly,(mm) |
| 1 | 14 | 13 | 40 | 20 |
| 2 | 14 | 21 | 40 | - |
| 3 | 14 | 19 | 40 | 30 |
| 4 | 14 | 13 | - | 20 |
| 5 | 14 | 20 | - | - |
| 6 | 14 | 19 | - | 30 |
| 7 | 14 | 14 | - | 20 |
| 8 | 14 | 18 | - | - |
| 9 | 14 | 17 | - | 30 |
| 10 | 14 | 11 | 70 | 20 |
| 11 | 14 | 13 | 70 | - |
| 12 | 14 | 12 | 70 | 30 |

| Wave Characteristics / KC | | | |
|---|---|---|---|
| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $KC=U_m/f_sD$ |
| 14.00 | 0.91 | 17.80 | 14.00 |

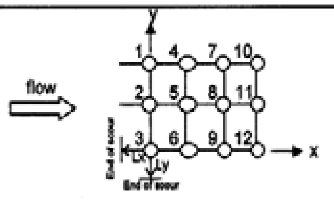
**Definition sketch of Test Condition**




Remark : ....................

Note :
1. Open over flow wier = 25.5 (From scale bar)
2. Open valve = 2+00 r (From scale bar)
3. 90° v - notch wier, H = 13.3 (From manometer)
4. Flume slope = 0.5 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**



ตาราง จ-29 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U1KC2P7

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U1KC2P7 ($t_s/y_0$ = 0.8)

Date : 08/10/06 to 09/10/06

Scale Model : 1:100

Time : 03:00 am to 21:00 pm

Equl. Time = 1080 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x $10^{-7}$ m²/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 13.2 cm. | H = 13.3 cm. |
| Q = 9 l/sec. | Q = 9.1 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.01 |
| 2.5 | 30.09 | 0.02 |
| 3 | 30.09 | 0.03 |
| 3.5 | 30.09 | 0.03 |
| 4 | 30.09 | 0.04 |
| 4.5 | 30.09 | 0.04 |
| 5 | 30.08 | 0.04 |
| 5.5 | 30.08 | 0.05 |
| 6 | 30.08 | 0.05 |
| 6.5 | 30.08 | 0.06 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.07 | 0.08 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.01 | So = 0.01 |

| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

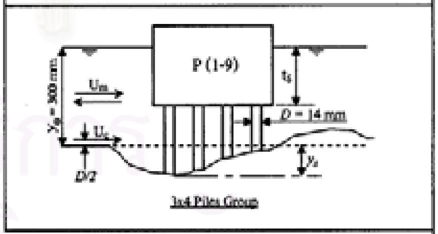
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter D,(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx,(mm) | Ly,(mm) |
| 1 | 14 | 15 | 20 | 37 |
| 2 | 14 | 25 | 30 | - |
| 3 | 14 | 15 | 20 | 35 |
| 4 | 14 | 15 | - | 25 |
| 5 | 14 | 15 | - | - |
| 6 | 14 | 15 | - | 20 |
| 7 | 14 | 19 | - | 10 |
| 8 | 14 | 18 | - | - |
| 9 | 14 | 15 | - | 15 |
| 10 | 14 | 16 | 80 | 10 |
| 11 | 14 | 17 | 85 | - |
| 12 | 14 | 15 | 60 | 10 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | KC=$U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 18.00 | 0.77 | 32.50 | 30.20 |

**Definition sketch of Test Condition**




Remark : ...

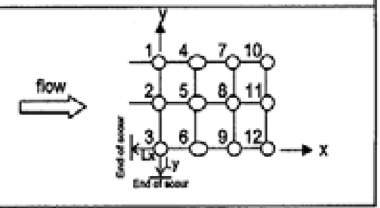
Note : 1. Open over flow wier = 25.5 (From scale bar)

2. Open valve = 2+00 r (From scale bar)

3. 90° v - notch wier, H = 13.3 (From manometer)

4. Flume slope = 0.5 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**



ตาราง จ-30 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U1KC3P7

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U1KC3P7 ($t_p/y_0$ = 0.8)

Date : 10/10/06 to 12/10/06

Scale Model : 1:100

Time : 24:00 pm to 04:00 am

Equi. Time = 1620 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x $10^{-7}$ m²/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 13.2 cm. | H = 13.3 cm. |
| Q = 9 l/sec. | Q = 9.1 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.01 |
| 2.5 | 30.09 | 0.02 |
| 3 | 30.09 | 0.03 |
| 3.5 | 30.09 | 0.03 |
| 4 | 30.09 | 0.04 |
| 4.5 | 30.09 | 0.04 |
| 5 | 30.08 | 0.04 |
| 5.5 | 30.08 | 0.05 |
| 6 | 30.08 | 0.05 |
| 6.5 | 30.08 | 0.06 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.07 | 0.08 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.01 | So = 0.01 |

| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

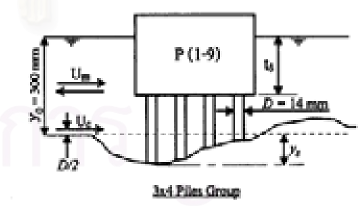
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter $D_i$(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx,(mm) | Ly,(mm) |
| 1 | 14 | 20 | 65 | 40 |
| 2 | 14 | 29 | 70 | - |
| 3 | 14 | 20 | 90 | 37 |
| 4 | 14 | 19 | - | 20 |
| 5 | 14 | 22 | - | - |
| 6 | 14 | 24 | - | 23 |
| 7 | 14 | 17 | - | 5 |
| 8 | 14 | 19 | - | - |
| 9 | 14 | 20 | - | 15 |
| 10 | 14 | 17 | 31 | 25 |
| 11 | 14 | 22 | 36 | - |
| 12 | 14 | 22 | 35 | 25 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | KC=$U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 14.00 | 0.63 | 36.90 | 42.20 |

**Definition sketch of Test Condition**




Remark : ..............................

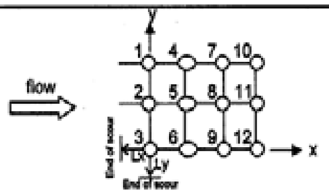
Note : 1. Open over flow wier = 25.5 (From scale bar)

2. Open valve = 2+00 r (From scale bar)

3. 90° v - notch wier, H = 13.3 (From manometer)

4. Flume slope = 0.5 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**



ตาราง จ-31 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U2KC1P7

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U2KC1P7 ($t_s/y_0$ = 0.8) Date : 18/10/06 to 19/10/06

Scale Model : 1:100 Time : 13:00 pm to 04:00 am

Equi. Time = 900 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x $10^{-7}$ $m^2$/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 17.7 cm. | H = 17.7 cm. |
| Q = 18 l/sec. | Q = 18 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.01 |
| 2.5 | 30.09 | 0.02 |
| 3 | 30.09 | 0.03 |
| 3.5 | 30.09 | 0.04 |
| 4 | 30.09 | 0.04 |
| 4.5 | 30.08 | 0.05 |
| 5 | 30.08 | 0.05 |
| 5.5 | 30.08 | 0.05 |
| 6 | 30.08 | 0.05 |
| 6.5 | 30.08 | 0.08 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.07 | 0.08 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.0001 | So = 0.0001 |

| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

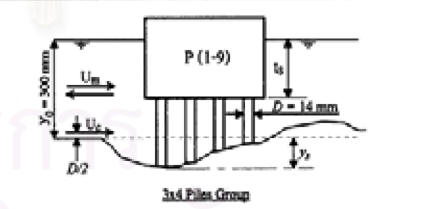
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter $D_i$(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx,(mm) | Ly,(mm) |
| 1 | 14 | 32 | 60 | 60 |
| 2 | 14 | 31 | 68 | - |
| 3 | 14 | 30 | 60 | 70 |
| 4 | 14 | 31 | - | 80 |
| 5 | 14 | 33 | - | - |
| 6 | 14 | 31 | - | 85 |
| 7 | 14 | 21 | - | 70 |
| 8 | 14 | 25 | - | - |
| 9 | 14 | 19 | - | 70 |
| 10 | 14 | 5 | 90 | 40 |
| 11 | 14 | 8 | 94 | - |
| 12 | 14 | 5 | 95 | 50 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | KC=$U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 25.00 | 0.91 | 18.00 | 14.20 |

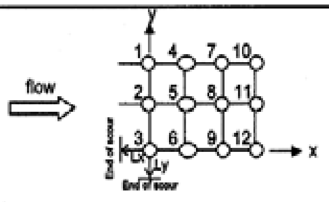
**Definition sketch of Test Condition**




Remark : ...

**Note** :
1. Open over flow wier = 22.5 (From scale bar)
2. Open valve = 3+0.3 r (From scale bar)
3. 90° v - notch wier, H = 17.7 (From manometer)
4. Flume slope = 0.49 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**



ตาราง จ-32 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U2KC2P7

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U2KC2P7 ($t_e/y_0$ = 0.8) Date : 19/10/06 to 20/10/06

Scale Model : 1:100 Time : 07:00 am to 03:00 am

Equi. Time = 1200 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x $10^{-7}$ m²/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 17.7 cm. | H = 17.7 cm. |
| Q = 18 l/sec. | Q = 18 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.01 |
| 2.5 | 30.09 | 0.02 |
| 3 | 30.09 | 0.03 |
| 3.5 | 30.09 | 0.04 |
| 4 | 30.09 | 0.04 |
| 4.5 | 30.08 | 0.05 |
| 5 | 30.08 | 0.05 |
| 5.5 | 30.08 | 0.05 |
| 6 | 30.08 | 0.05 |
| 6.5 | 30.08 | 0.08 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.07 | 0.08 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.0001 | So = 0.0001 |

| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

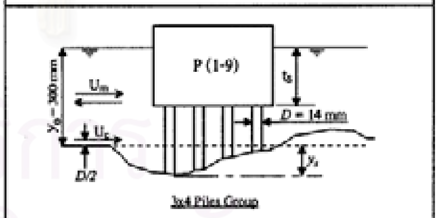
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter $D_i$(mm) | Maximum Scour Depth $y_{s,i}$ (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | $Lx_i$(mm) | $Ly_i$(mm) |
| 1 | 14 | 33 | 78 | 88 |
| 2 | 14 | 38 | 100 | - |
| 3 | 14 | 38 | 60 | 85 |
| 4 | 14 | 30 | - | 80 |
| 5 | 14 | 35 | - | - |
| 6 | 14 | 35 | - | 60 |
| 7 | 14 | 20 | - | 60 |
| 8 | 14 | 30 | - | - |
| 9 | 14 | 22 | - | 60 |
| 10 | 14 | 5 | 50 | 40 |
| 11 | 14 | 7 | 50 | - |
| 12 | 14 | 5 | 60 | 30 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $KC=U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 18.00 | 0.77 | 32.60 | 30.30 |

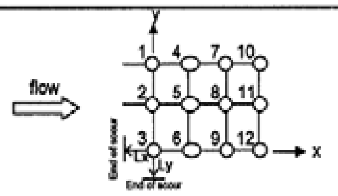
**Definition sketch of Test Condition**




**Remark :**

**Note** :
1. Open over flow wier = 22.5 (From scale bar)
2. Open valve = 3+0.3 r (From scale bar)
3. 90° v - notch wier, H = 17.7 (From manometer)
4. Flume slope = 0.49 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**



ตาราง จ-33 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U2KC3P7

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U2KC3P7 ($t_s/y_0$ = 0.8)

Date : 20/10/06 to 21/10/06

Scale Model : 1:100

Time : 06:00 am to 05:00 am

Equi. Time = 1380 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x $10^{-7}$ $m^2$/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

**Flow Rate & Depth above wier**

| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
|---|---|
| H = 17.7 cm. | H = 17.7 cm. |
| Q = 18 l/sec. | Q = 18 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.01 |
| 2.5 | 30.09 | 0.02 |
| 3 | 30.09 | 0.03 |
| 3.5 | 30.09 | 0.04 |
| 4 | 30.09 | 0.04 |
| 4.5 | 30.08 | 0.05 |
| 5 | 30.08 | 0.05 |
| 5.5 | 30.08 | 0.05 |
| 6 | 30.08 | 0.05 |
| 6.5 | 30.08 | 0.08 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.07 | 0.08 |

**CAL. For clear-water condition**

| Initial Conditions | Exp. Set up |
|---|---|
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.0001 | So = 0.0001 |

**Water depth at test section**

| Initial Conditions | Exp. Set up |
|---|---|
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

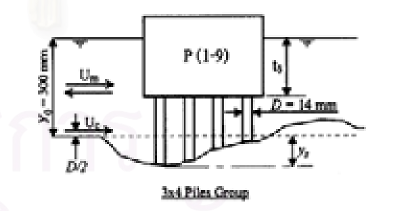
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter D,(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx,(mm) | Ly,(mm) |
| 1 | 14 | 33 | 85 | 90 |
| 2 | 14 | 35 | 85 | - |
| 3 | 14 | 35 | 120 | 85 |
| 4 | 14 | 34 | - | 80 |
| 5 | 14 | 40 | - | - |
| 6 | 14 | 36 | - | 90 |
| 7 | 14 | 22 | - | 65 |
| 8 | 14 | 33 | - | - |
| 9 | 14 | 27 | - | 60 |
| 10 | 14 | 6 | 75 | 40 |
| 11 | 14 | 11 | 70 | - |
| 12 | 14 | 11 | 60 | 45 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $KC=U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 14.00 | 0.63 | 37.20 | 42.50 |

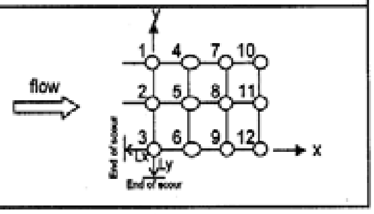
**Definition sketch of Test Condition**




Remark :

**Note** :
1. Open over flow wier = 22.5 (From scale bar)
2. Open valve = 3+0.3 r (From scale bar)
3. 90° v - notch wier, H = 17.7 (From manometer)
4. Flume slope = 0.49 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**



ตาราง จ-34 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U3KC1P7

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U3KC1P7 ($t_s/y_0$ = 0.8) Date : 22/10/06 to 23/10/06

Scale Model : 1:100 Time : 23:00 pm to 18:00 pm

Equi. Time = 1140 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x $10^{-7}$ $m^2$/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 20.8 cm. | H = 20.78 cm. |
| Q = 27 l/sec. | Q = 26.9 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.03 |
| 2.5 | 30.09 | 0.03 |
| 3 | 30.09 | 0.04 |
| 3.5 | 30.09 | 0.04 |
| 4 | 30.09 | 0.05 |
| 4.5 | 30.08 | 0.05 |
| 5 | 30.08 | 0.06 |
| 5.5 | 30.08 | 0.06 |
| 6 | 30.08 | 0.07 |
| 6.5 | 30.08 | 0.08 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.08 | 0.08 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.0001 | So = 0.0001 |

| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

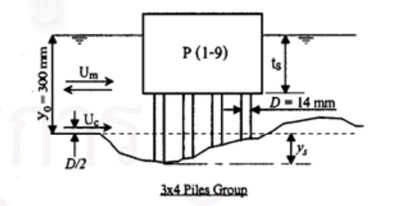
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter D,(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx,(mm) | Ly,(mm) |
| 1 | 14 | 32 | 95 | 90 |
| 2 | 14 | 36 | 110 | - |
| 3 | 14 | 33 | 90 | 90 |
| 4 | 14 | 31 | - | 55 |
| 5 | 14 | 32 | - | - |
| 6 | 14 | 31 | - | 80 |
| 7 | 14 | 22 | - | 55 |
| 8 | 14 | 25 | - | - |
| 9 | 14 | 22 | - | 50 |
| 10 | 14 | 8 | 95 | 40 |
| 11 | 14 | 10 | 95 | - |
| 12 | 14 | 8 | 100 | 55 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $KC=U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 25.00 | 0.91 | 18.00 | 14.20 |

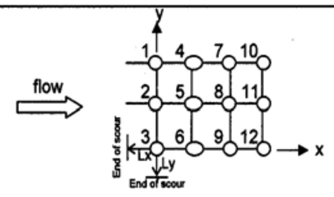
**Definition sketch of Test Condition**




Remark :

Note : 1. Open over flow wier = 22 (From scale bar)
2. Open valve = 6+00 r (From scale bar)
3. 90° v - notch wier, H = 20.78 (From manometer)
4. Flume slope = 0.48 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**



ตาราง จ-35 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U3KC2P7

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U3KC2P7 ($t_s/y_0$ = 0.8)

Date : 23/10/06 to 24/10/06

Scale Model : 1:100

Time : 19:00 pm to 15:00 pm

Equi. Time = 1200 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x $10^{-7}$ $m^2$/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 20.8 cm. | H = 20.78 cm. |
| Q = 27 l/sec. | Q = 26.9 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.03 |
| 2.5 | 30.09 | 0.03 |
| 3 | 30.09 | 0.04 |
| 3.5 | 30.09 | 0.04 |
| 4 | 30.09 | 0.05 |
| 4.5 | 30.08 | 0.05 |
| 5 | 30.08 | 0.06 |
| 5.5 | 30.08 | 0.06 |
| 6 | 30.08 | 0.07 |
| 6.5 | 30.08 | 0.08 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.08 | 0.08 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.0001 | So = 0.0001 |

| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

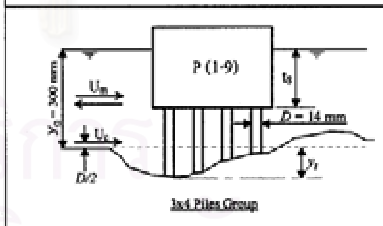
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter $D_i$(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | $Lx_i$(mm) | $Ly_i$(mm) |
| 1 | 14 | 42 | 88 | 90 |
| 2 | 14 | 39 | 90 | - |
| 3 | 14 | 40 | 95 | 76 |
| 4 | 14 | 33 | - | 75 |
| 5 | 14 | 35 | - | - |
| 6 | 14 | 33 | - | 79 |
| 7 | 14 | 19 | - | 76 |
| 8 | 14 | 29 | - | - |
| 9 | 14 | 23 | - | 100 |
| 10 | 14 | 4 | 112 | 45 |
| 11 | 14 | 6 | 104 | - |
| 12 | 14 | 8 | 120 | 55 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $KC=U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 18.00 | 0.77 | 32.90 | 30.60 |

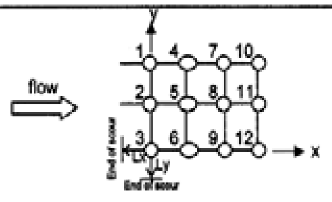
**Definition sketch of Test Condition**




Remark : ....................

**Note** :
1. Open over flow wier = 22 (From scale bar)
2. Open valve = 6+00 r (From scale bar)
3. 90° v - notch wier, H = 20.78 (From manometer)
4. Flume slope = 0.48 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**



ตาราง จ-36 ข้อมูลบันทึกผลการทดลองกรณีศึกษา U3KC3P7

**Test Conditions and Results of Scour Experiments**

Case Run. : U3KC3P7 ($t_s/y_0$ = 0.8) Date : 25/10/06 to 26/10/06

Scale Model : 1:100 Time : 06:00 am to 06:00 am

Equi. Time = 1440 min.

Water Temp. = 30 C°, ν = 8 x $10^{-7}$ $m^2$/sec.

$d_{50}$ = 0.25 mm.

| Flow Rate & Depth above wier | |
|---|---|
| Initial Conditions | 90° V - Notch Wier |
| H = 20.8 cm. | H = 20.78 cm. |
| Q = 27 l/sec. | Q = 26.9 l/sec. |

**Bed Slope & Energy Slope**

| Distance from D/S (m) | Exp. Set up | |
|---|---|---|
| | Water Surface EL. (cm) | Bed EL. (cm) |
| 1 | 30.10 | 0.00 |
| 2 | 30.10 | 0.03 |
| 2.5 | 30.09 | 0.03 |
| 3 | 30.09 | 0.04 |
| 3.5 | 30.09 | 0.04 |
| 4 | 30.09 | 0.05 |
| 4.5 | 30.08 | 0.05 |
| 5 | 30.08 | 0.06 |
| 5.5 | 30.08 | 0.06 |
| 6 | 30.08 | 0.07 |
| 6.5 | 30.08 | 0.08 |
| (Pier) | 30.08 | 0.08 |
| 8 | 30.08 | 0.08 |

| CAL. For clear-water condition | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| Sf = 0.000123 | Sf = 0.000123 |
| So = 0.0001 | So = 0.0001 |

| Water depth at test section | |
|---|---|
| Initial Conditions | Exp. Set up |
| $y_0$ = 30 cm. | $y_0$ = 30 cm. |

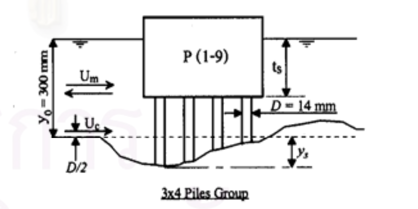
**Scour depth**

| Pile No. | Pile Diameter $D_i$(mm) | Maximum Scour Depth $y_s$, (mm) | Plan View Extent of Scour Hole | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Lx,(mm) | Ly,(mm) |
| 1 | 14 | 48 | 140 | 135 |
| 2 | 14 | 48 | 135 | - |
| 3 | 14 | 49 | 115 | 77 |
| 4 | 14 | 46 | - | 135 |
| 5 | 14 | 48 | - | - |
| 6 | 14 | 46 | - | 80 |
| 7 | 14 | 37 | - | 95 |
| 8 | 14 | 45 | - | - |
| 9 | 14 | 36 | - | 70 |
| 10 | 14 | 22 | 70 | 80 |
| 11 | 14 | 21 | 60 | - |
| 12 | 14 | 19 | 70 | 50 |

**Wave Characteristics / KC**

| $H_s$ (cm) | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $KC=U_m/f_sD$ |
|---|---|---|---|
| 14.00 | 0.63 | 37.30 | 42.60 |

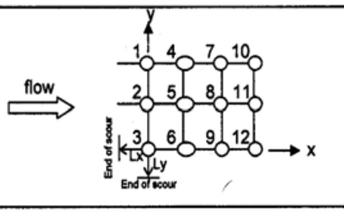
**Definition sketch of Test Condition**




**Remark :** ..........

**Note** :
1. Open over flow wier = 22 (From scale bar)
2. Open valve = 6+00 r (From scale bar)
3. 90° v - notch wier, H = 20.78 (From manometer)
4. Flume slope = 0.48 mm (From scale bar)

**Plan view of Pile Group**




สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก ฉ

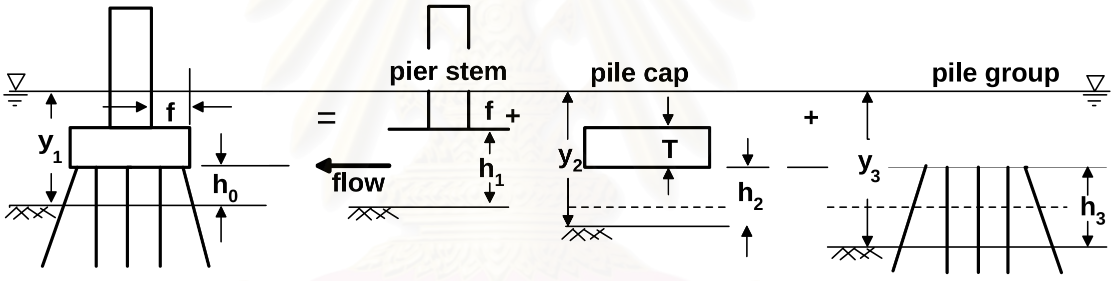
# การประมาณค่าความลึกหลุมกัดเซาะภายใต้กระแสน้ำ
# จากสมการ HEC-18 (FHWA, 2001)
# และ
# การหาค่าปรับแก้ความลึกหลุมกัดเซาะเนื่องจาก
# ความหนาครอบหัวเข็ม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก ฉ-1

## ตัวอย่างการคำนวณความลึกหลุมกัดเซาะภายใต้กระแสน้ำ จากสมการ HEC-18 (FHWA, 2001)

การคำนวณเพื่อหาค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดรอบๆเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็มขนาดต่างๆ (เปลี่ยนแปลงตามความหนา) ภายใต้กระแสน้ำ คำนวณโดยการใช้สมการคาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะ (HEC-18) จาก FHWA (2001) ซึ่งหลักการคำนวณแยกเป็นผลขององค์ประกอบโครงสร้างส่วนต่างๆ ต่อขนาดความลึกหลุมกัดเซาะ (ดังรูป ฉ-1 แสดงภาพสเกต ความลึกหลุมกัดเซาะแยกตามส่วนประกอบของโครงสร้างตอม่อ) แล้วจึงนำผลการกัดเซาะแต่ละส่วนมารวมกันเพื่อสรุปเป็นผลการกัดเซาะรอบโครงสร้างทั้งหมดที่เกิดขึ้น ดังตัวอย่างการคำนวณ “กรณีการกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มที่มีครอบหัวเข็มภายใต้กระแสน้ำ” ตามเงื่อนไขต่างๆ ดังแสดงไว้ในเบื้องต้นของรายการคำนวณต่อไปนี้




$$y_s = y_{spier} + y_{spc} + y_{spg}$$

รูป ฉ-1 ภาพสเกตความลึกหลุมกัดเซาะแยกตามส่วนประกอบของโครงสร้างตอม่อ

<u>ค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นจากการศึกษานี้</u>

| | | | |
|---|---|---|---|
| ความลึกน้ำ ($y_1$) | = | 300 | มม. |
| ความเร็วการไหลเฉลี่ย ($V_1$) | = | 150 | มม./วินาที |
| ความกว้าง pile cap ด้านปะทะการไหล ($a_{pc}$) | = | 122 | มม. |
| ความยาวเสาเข็มเหนือท้องน้ำ ($h_0$) | = | 240 | มม. |
| ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม (S) | = | 42 | มม. |
| ความหนา pile cap ในน้ำ (T) | = | 60 | มม. |

<u>ผลการกัดเซาะเนื่องจากอิทธิพลของ pier stem</u>

จากการศึกษานี้ โครงสร้างส่วนที่เป็น pier stem อยู่เหนือผิวน้ำขึ้นไป ดังนั้นอิทธิพลต่อการกัดเซาะของโครงสร้างส่วนนี้จึงไม่มี แต่หากผู้สนใจหลักการคำนวณตาม HEC-18 สามารถคำนวณได้ดังนี้

1. คำนวณหา $f/a_{pier}$ โดยที่ $a_{pier}$ คือ ความกว้างของ pier stem ด้านที่ปะทะการไหล
2. คำนวณหา $h_1/a_{pier}$
3. จาก (1) และ (2) นำค่าที่ไปไปอ่านกราฟ จากรูป ฉ-2 เพื่อหาค่า $K_{h\,pier}$
4. รายละเอียดค่า K ต่างๆในสมการ (ฉ-1) หาได้จากตารางท้ายการคำนวณ
5. แทนค่าที่ได้ในสมการประมาณความลึกหลุมกัดเซาะจากผลของ pier stem ดังนี้

$$\frac{y_{s\,pier}}{y_1} = K_{hpier}\, 2.0 K_1 K_2 K_3 K_4 K_w \left[\frac{a_{pier}}{y_1}\right]^{0.65} \left[\frac{V_1}{\sqrt{g y_1}}\right]^{0.43} \qquad (ฉ\text{-}1)$$

<u>ผลการกัดเซาะเนื่องจากอิทธิพลของ pile cap</u>

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $h_2$ | = | $h_0 + y_{s\,pier}/2$ | = | 240 + 0 | = | 240 | มม. |
| $y_2$ | = | $y_1 + y_{s\,pier}/2$ | = | 300 + 0 | = | 300 | มม. |
| $V_2$ | = | $V_1 \times (y_1/y_2)$ | = | 150 x 1 | = | 150 | มม./วินาที |

หาค่า $y_{2\,(max)} = 3.5a_{pc} = 3.5 \times 122 = 427 > 300$

ดังนั้นใช้ $y_2 = 300$ มม.

จะได้ $h_2/y_2 = 240 / 300 = 0.8$ ; $T/y_2 = 60 / 300 = 0.2$

จากรูป ฉ-3 จะได้ค่า

$a^*_{pc} / a_{pc} = 0.015$ ; $a^*_{pc} = 0.015 \times 122 = 1.83$ มม.

จากสมการ HEC-18

$$\frac{y_{spc}}{y_2} = 2.0 K_1 K_2 K_3 K_4 K_w \left[\frac{a^*_{pc}}{a_{pc}}\right]^{0.65} \left[\frac{V_2}{\sqrt{g y_2}}\right]^{0.43} \qquad (ฉ\text{-}2)$$

$y_2 / a^*_{pc} = 163.93$ ( > 0.8)

ค่า $K_1$ ถึง $K_3$ ได้จากตาราง ฉ-2 ถึง ฉ-4 ส่วนค่า $K_w = 1.0$ และ $K_4 = 1.0$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดังนั้น $y_{s\,pc}$ = $300 \times [2 \times 1.1 \times 1 \times 1.1 \times 1 \times 1]\,(0.0061)^{0.65}\,(0.029)^{0.43}$

= 5.8 มม.

<u>ผลการกัดเซาะเนื่องจากอิทธิพลของเสาเข็มกลุ่ม</u>

$h_3 = h_0 + (y_{s\,pier} + y_{s\,pc}) / 2 = 240 + (0 + 5.8) = 242.8$ มม.

$y_3 = y1 + (y_{s\,pier} + y_{s\,pc}) / 2 = 300 + (0 + 5.8) = 302.8$ มม.

$V_3 = V1 \times (y_1 / y_3) = 50 \times (300 / 302.8) = 49.5$ มม./วินาที

$a_{proj} = 3 \times 14 = 42$ มม.

$a_{proj} / a = 42 / 14 = 3.0$

$S / a = 56 / 14 = 4$

จากรูป ฉ-4 $K_{sp} = 0.58$ และจากรูป ฉ-5 $K_m = 1.3$

$a^*_{pg} = K_{sp} \times K_m \times a_{proj} = 0.49 \times 1.35 \times 42 = 27.8$ มม.

$y_{3\,max} = 3.5\,a^*_{pg} = 3.5 \times 27.8 = 97.24 < 302.8$ มม.

ดังนั้นใช้ค่า $y_3 = 302.8$ มม.

$h_3 / y_3 = 242.8 / 302.8 = 0.8$

จากรูป ฉ-6 $K_{hpg} = 0.6$

จากสมการ HEC-18

$$\frac{y_{spg}}{y_3} = K_{hpg}\,2.0 K_1 K_2 K_3 K_4 \left[\frac{a^*_{pg}}{y_3}\right]^{0.65} \left[\frac{V_3}{\sqrt{g y_3}}\right]^{0.43} \qquad (ฉ\text{-}3)$$

$Y_{spg}$ = 31 มม.

$Y_s$ = 31 + 5.8 = 36.8 มม.

$Y_s/D$ = 36.8 / 14 = <u>2.63</u>

จากผลการคำนวณที่ได้ ได้แสดงผลในกรณีการเปลี่ยนแปลงความหนาของ pile cap ขนาดต่างๆ ดังสรุปไว้ในตาราง ฉ-1 เพื่อนำผลการคำนวณดังกล่าวไปใช้ประกอบการวิเคราะห์ร่วมกับผลการศึกษานี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ฉ-1 ผลของ pile cap ต่อความลึกหลุมกัดเซาะ จากการคำนวณด้วยสมการ HEC-18

| ความหนา | ความเร็วการไหลเฉลี่ย (มม./วินาที) | | |
|---|---|---|---|
| Pile cap | 150 | 200 | 250 |
| 0.2 | 2.63 | 3.54 | 4.21 |
| 0.3 | 2.69 | 3.68 | 4.30 |
| 0.4 | 2.71 | 3.80 | 4.34 |
| 0.5 | 3.00 | 4.00 | 4.67 |
| 0.6 | 3.10 | 4.17 | 5.04 |
| 0.7 | 3.26 | 4.36 | 5.26 |
| 0.8 | 3.33 | 4.54 | 5.44 |

ตาราง ฉ-2 ค่าปรับแก้เนื่องจากรูปแบบของตอม่อ

| Correction Factor, for Pier Nose Shape | |
|---|---|
| Shape of Pier Nose | $K_1$ |
| (a) Square nose | 1.1 |
| (b) Round nose | 1.0 |
| (c) Circular nose | 1.0 |
| (d) Group of cylinders | 1.0 |
| (e) Sharp nose | 0.9 |

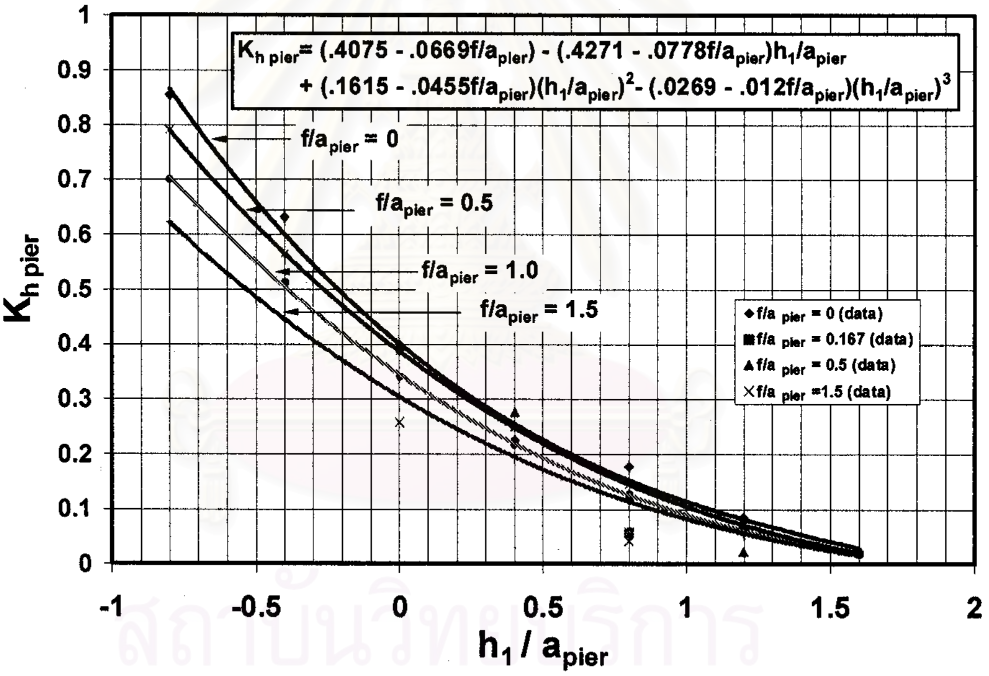
ตาราง ฉ-3 ค่าปรับแก้เนื่องจากมุมปะทะการไหล

| Correction Factor, $K_2$, for angle of attack | | | |
|---|---|---|---|
| Angle | L/a = 4 | L/a = 8 | L/a = 12 |
| 0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 15 | 1.5 | 2.0 | 2.5 |
| 30 | 2.0 | 2.75 | 3.5 |
| 45 | 2.3 | 3.3 | 4.3 |
| 90 | 2.5 | 3.9 | 5.0 |
| Angle = skew angle of flow<br>L = length of pier , m | | | |

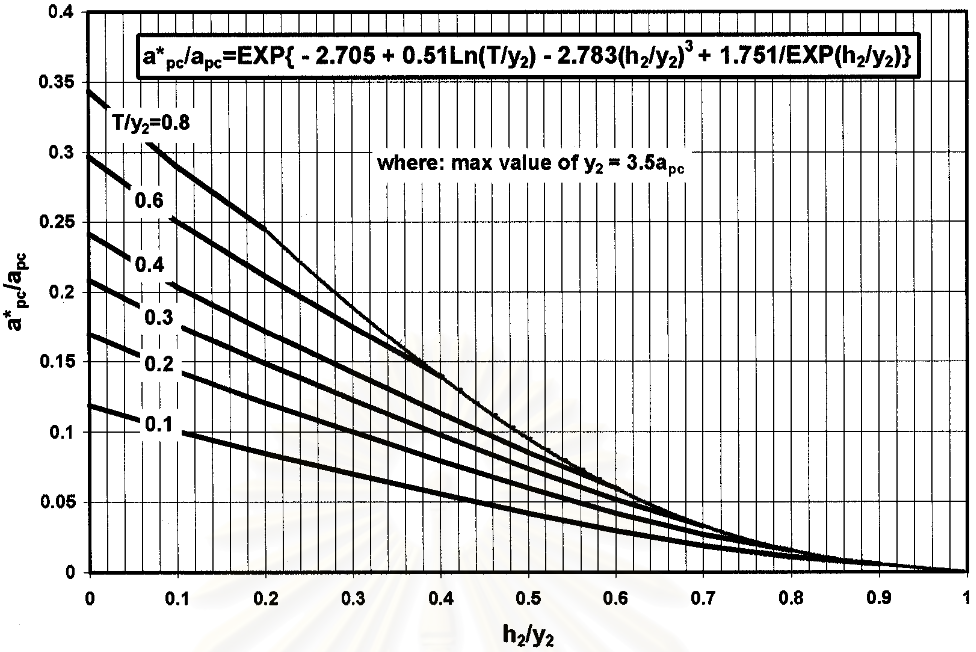
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ฉ-4 ค่าปรับแก้เนื่องจากเงื่อนไขท้องน้ำ

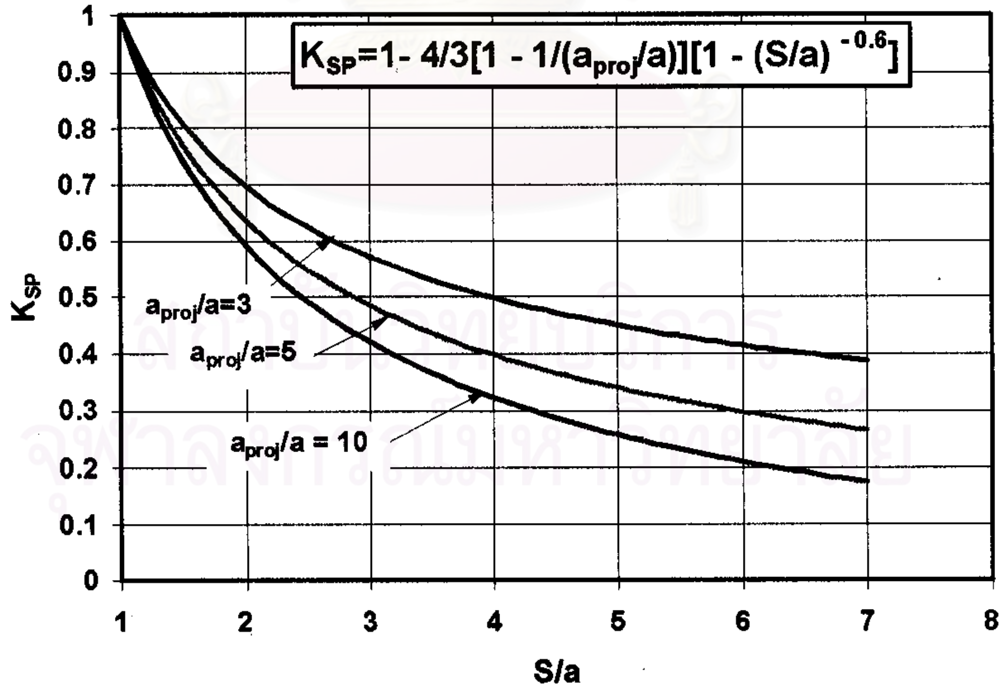
| Increase in Equilibrium Pier Scour Depths , $K_3$ , for Bed Condition. | | |
|---|---|---|
| Bed Condition | Dune Height (H) | $K_3$ |
| Clear-Water Scour | N/A | 1.1 |
| Plane Bed and Antidune flow | N/A | 1.1 |
| Small Dunes | 3 > H ≥0.6 | 1.1 |
| Medium Dunes | 9 > H ≥ 3 | 1.2 to 1.1 |
| Large Dunes | H ≥ 9 | 1.3 |



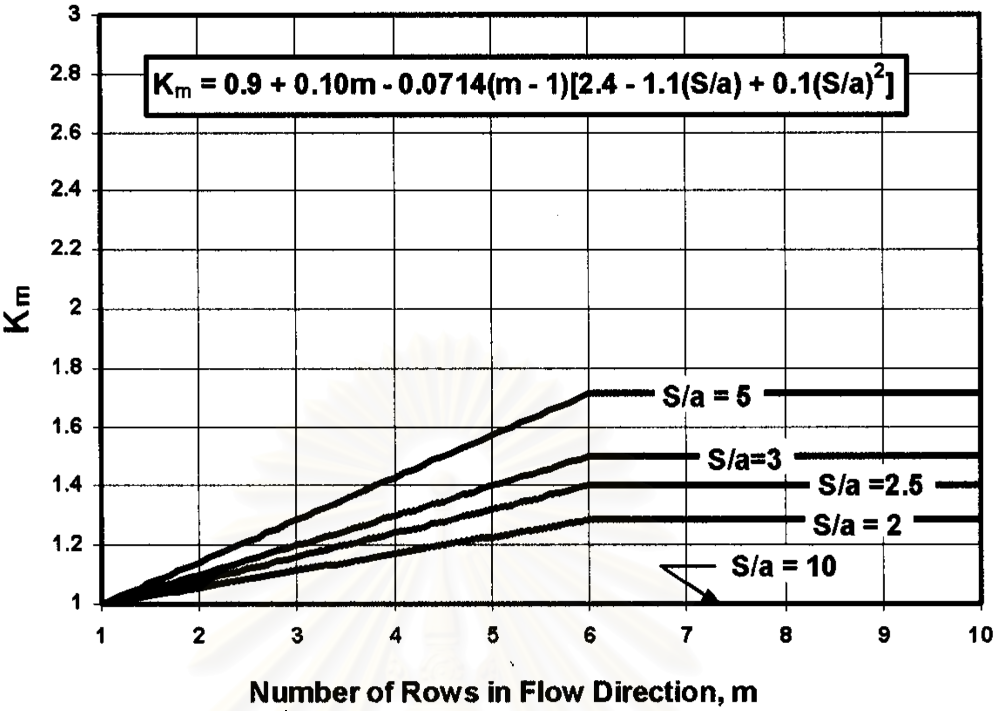

รูป ฉ-2 ค่าปรับแก้เนื่องจากความกว้างตอม่อ (pier stem) [FHWA, HEC-18 (2001)]



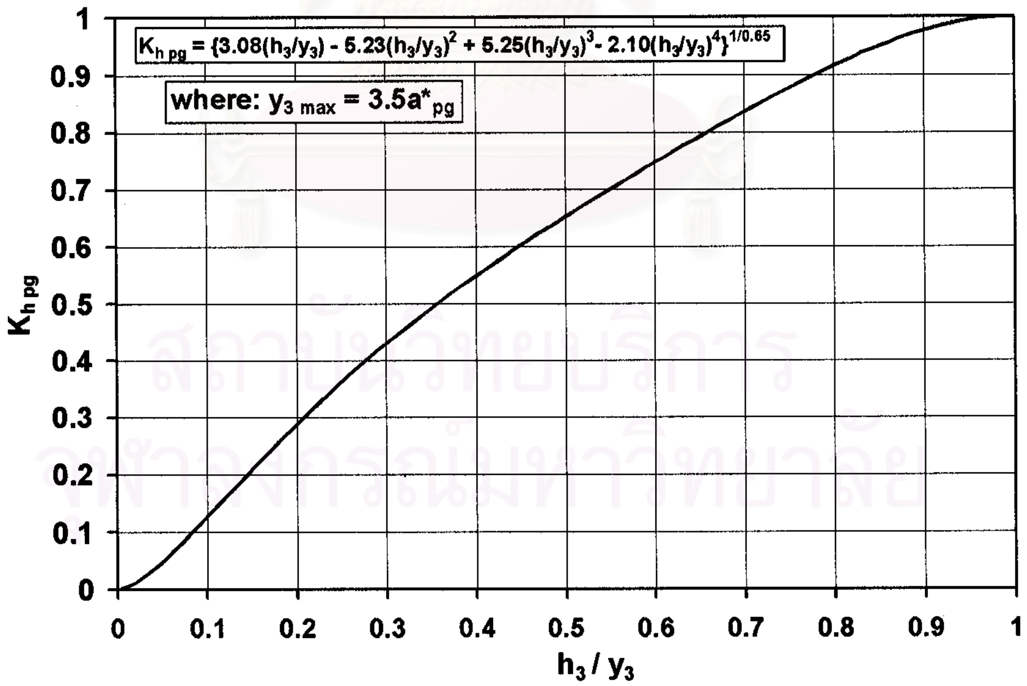

รูป ฉ-3 ความกว้างเทียบเท่าของครอบหัวเข็ม [FHWA, HEC-18 (2001)]




รูป ฉ-4 ค่าปรับแก้เนื่องจากระยะห่างระหว่างเสาเข็ม [FHWA, HEC-18 (2001)]




รูป ฉ-5 ค่าปรับแก้เนื่องจากจำนวนแถวของเข็มกลุ่ม [FHWA, HEC-18 (2001)]




รูป ฉ-6 ค่าปรับแก้เนื่องจากความสูงของเข็มกลุ่ม [FHWA, HEC-18 (2001)]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ฉ-2

# การหาค่าปรับแก้ความลึกหลุมกัดเซาะเนื่องจากความหนาครอบหัวเข็ม

ตาราง ฉ-5 แสดงการหาค่าปรับแก้เนื่องจากความหนาครอบหัวเข็ม ($K_{pc}$) จากสมการ 5-6

| $t_s$ (x $y_0$) | Run No. | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $U_c$ (cm/s) | KC | $U_{cw}$ | $y_s$/D | $y_{spg}$/D | $K_{pc}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.2 | 1 | 0.91 | 17.8 | 4.8 | 14.0 | 0.21 | 0.64 | 0.59 | 1.09 |
| | 2 | 0.91 | 18.2 | 9.5 | 14.3 | 0.34 | 1.71 | 0.85 | 2.02 |
| | 3 | 0.91 | 18.0 | 14.2 | 14.2 | 0.44 | 2.18 | 1.00 | 2.18 |
| | 4 | 0.77 | 32.6 | 4.6 | 30.3 | 0.12 | 1.00 | 1.09 | 0.91 |
| | 5 | 0.77 | 32.9 | 9.4 | 30.6 | 0.22 | 2.00 | 1.26 | 1.59 |
| | 6 | 0.77 | 32.5 | 14.5 | 30.2 | 0.31 | 2.70 | 1.60 | 1.69 |
| | 7 | 0.63 | 36.9 | 4.8 | 42.2 | 0.12 | 1.28 | 1.70 | 0.75 |
| | 8 | 0.63 | 37.2 | 9.5 | 42.5 | 0.20 | 2.43 | 1.80 | 1.35 |
| | 9 | 0.63 | 37.3 | 14.4 | 42.6 | 0.28 | 3.25 | 1.90 | 1.71 |
| 0.3 | 10 | 0.91 | 17.8 | 4.8 | 14.0 | 0.21 | 0.71 | 0.59 | 1.21 |
| | 11 | 0.91 | 18.2 | 9.5 | 14.3 | 0.34 | 1.86 | 0.85 | 2.18 |
| | 12 | 0.91 | 18.0 | 14.2 | 14.2 | 0.44 | 2.20 | 1.00 | 2.20 |
| | 13 | 0.77 | 32.6 | 4.6 | 30.3 | 0.12 | 1.13 | 1.09 | 1.03 |
| | 14 | 0.77 | 32.9 | 9.4 | 30.6 | 0.22 | 2.29 | 1.26 | 1.81 |
| | 15 | 0.77 | 32.5 | 14.5 | 30.2 | 0.31 | 2.72 | 1.60 | 1.70 |
| | 16 | 0.63 | 36.9 | 4.8 | 42.2 | 0.12 | 1.34 | 1.70 | 0.79 |
| | 17 | 0.63 | 37.2 | 9.5 | 42.5 | 0.20 | 2.50 | 1.80 | 1.39 |
| | 18 | 0.63 | 37.3 | 14.4 | 42.6 | 0.28 | 3.28 | 1.90 | 1.73 |
| 0.4 | 19 | 0.91 | 17.8 | 4.8 | 14.0 | 0.21 | 0.93 | 0.59 | 1.57 |
| | 20 | 0.91 | 18.2 | 9.5 | 14.3 | 0.34 | 2.14 | 0.85 | 2.52 |
| | 21 | 0.91 | 18.0 | 14.2 | 14.2 | 0.44 | 2.36 | 1.00 | 2.36 |
| | 22 | 0.77 | 32.6 | 4.6 | 30.3 | 0.12 | 1.20 | 1.09 | 1.10 |
| | 23 | 0.77 | 32.9 | 9.4 | 30.6 | 0.22 | 2.36 | 1.26 | 1.87 |
| | 24 | 0.77 | 32.5 | 14.5 | 30.2 | 0.31 | 2.75 | 1.60 | 1.72 |
| | 25 | 0.63 | 36.9 | 4.8 | 42.2 | 0.12 | 1.41 | 1.70 | 0.83 |
| | 26 | 0.63 | 37.2 | 9.5 | 42.5 | 0.20 | 2.57 | 1.80 | 1.43 |
| | 27 | 0.63 | 37.3 | 14.4 | 42.6 | 0.28 | 3.29 | 1.90 | 1.73 |
| 0.5 | 28 | 0.91 | 17.8 | 4.8 | 14.0 | 0.21 | 1.14 | 0.59 | 1.94 |
| | 29 | 0.91 | 18.2 | 9.5 | 14.3 | 0.34 | 2.21 | 0.85 | 2.61 |
| | 30 | 0.91 | 18.0 | 14.2 | 14.2 | 0.44 | 2.43 | 1.00 | 2.43 |
| | 31 | 0.77 | 32.6 | 4.6 | 30.3 | 0.12 | 1.41 | 1.09 | 1.29 |
| | 32 | 0.77 | 32.9 | 9.4 | 30.6 | 0.22 | 2.50 | 1.26 | 1.98 |
| | 33 | 0.77 | 32.5 | 14.5 | 30.2 | 0.31 | 2.80 | 1.60 | 1.75 |
| | 34 | 0.63 | 36.9 | 4.8 | 42.2 | 0.12 | 1.70 | 1.70 | 1.00 |
| | 35 | 0.63 | 37.2 | 9.5 | 42.5 | 0.20 | 2.71 | 1.80 | 1.51 |
| | 36 | 0.63 | 37.3 | 14.4 | 42.6 | 0.28 | 3.36 | 1.90 | 1.77 |

หมายเหตุ : ความลึกการไหล ($y_0$) = 300 มม. / $t_s$ คือ ความหนาที่จมน้ำของ pile cap / ขนาดเสาเข็ม ($D$) = 14 มม.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ฉ-5 (ต่อ) แสดงการหาค่าปรับแก้เนื่องจากความหนาครอบหัวเข็ม ($K_{pc}$) จากสมการ 5-6

| $t_s$ ($x\ y_0$) | Run No. | $f_s$ ($s^{-1}$) | $U_m$ (cm/s) | $U_c$ (cm/s) | KC | $U_{cw}$ | $y_s/D$ | $y_{spg}/D$ | $K_{pc}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 37 | 0.91 | 17.8 | 4.8 | 14.0 | 0.21 | 1.29 | 0.59 | 2.18 |
| | 38 | 0.91 | 18.2 | 9.5 | 14.3 | 0.34 | 2.29 | 0.85 | 2.69 |
| | 39 | 0.91 | 18.0 | 14.2 | 14.2 | 0.44 | 2.50 | 1.00 | 2.50 |
| | 40 | 0.77 | 32.6 | 4.6 | 30.3 | 0.12 | 1.43 | 1.09 | 1.31 |
| 0.6 | 41 | 0.77 | 32.9 | 9.4 | 30.6 | 0.22 | 2.64 | 1.26 | 2.10 |
| | 42 | 0.77 | 32.5 | 14.5 | 30.2 | 0.31 | 2.87 | 1.60 | 1.79 |
| | 43 | 0.63 | 36.9 | 4.8 | 42.2 | 0.12 | 1.80 | 1.70 | 1.06 |
| | 44 | 0.63 | 37.2 | 9.5 | 42.5 | 0.20 | 2.79 | 1.80 | 1.55 |
| | 45 | 0.63 | 37.3 | 14.4 | 42.6 | 0.28 | 3.50 | 1.90 | 1.84 |
| | 46 | 0.91 | 17.8 | 4.8 | 14.0 | 0.21 | 1.93 | 0.59 | 3.27 |
| | 47 | 0.91 | 18.2 | 9.5 | 14.3 | 0.34 | 2.43 | 0.85 | 2.86 |
| | 48 | 0.91 | 18.0 | 14.2 | 14.2 | 0.44 | 2.71 | 1.00 | 2.71 |
| | 49 | 0.77 | 32.6 | 4.6 | 30.3 | 0.12 | 2.29 | 1.09 | 2.09 |
| 0.7 | 50 | 0.77 | 32.9 | 9.4 | 30.6 | 0.22 | 2.79 | 1.26 | 2.21 |
| | 51 | 0.77 | 32.5 | 14.5 | 30.2 | 0.31 | 3.20 | 1.60 | 2.00 |
| | 52 | 0.63 | 36.9 | 4.8 | 42.2 | 0.12 | 2.50 | 1.70 | 1.47 |
| | 53 | 0.63 | 37.2 | 9.5 | 42.5 | 0.20 | 3.00 | 1.80 | 1.67 |
| | 54 | 0.63 | 37.3 | 14.4 | 42.6 | 0.28 | 3.79 | 1.90 | 1.99 |
| | 55 | 0.91 | 17.8 | 4.8 | 14.0 | 0.21 | 1.53 | 0.59 | 2.59 |
| | 56 | 0.91 | 18.2 | 9.5 | 14.3 | 0.34 | 2.36 | 0.85 | 2.77 |
| | 57 | 0.91 | 18.0 | 14.2 | 14.2 | 0.44 | 2.57 | 1.00 | 2.57 |
| | 58 | 0.77 | 32.6 | 4.6 | 30.3 | 0.12 | 1.82 | 1.09 | 1.66 |
| 0.8 | 59 | 0.77 | 32.9 | 9.4 | 30.6 | 0.22 | 2.71 | 1.26 | 2.15 |
| | 60 | 0.77 | 32.5 | 14.5 | 30.2 | 0.31 | 3.00 | 1.60 | 1.88 |
| | 61 | 0.63 | 36.9 | 4.8 | 42.2 | 0.12 | 2.10 | 1.70 | 1.24 |
| | 62 | 0.63 | 37.2 | 9.5 | 42.5 | 0.20 | 2.86 | 1.80 | 1.59 |
| | 63 | 0.63 | 37.3 | 14.4 | 42.6 | 0.28 | 3.51 | 1.90 | 1.85 |
| | 64 | 0.91 | 17.8 | 4.8 | 14.0 | 0.21 | 2.00 | 0.59 | 3.39 |
| | 65 | 0.91 | 18.2 | 9.5 | 14.3 | 0.34 | 2.50 | 0.85 | 2.94 |
| | 66 | 0.91 | 18.0 | 14.2 | 14.2 | 0.44 | 2.86 | 1.00 | 2.86 |
| | 67 | 0.77 | 32.6 | 4.6 | 30.3 | 0.12 | 2.21 | 1.09 | 2.02 |
| 0.9 | 68 | 0.77 | 32.9 | 9.4 | 30.6 | 0.22 | 2.79 | 1.26 | 2.21 |
| | 69 | 0.77 | 32.5 | 14.5 | 30.2 | 0.31 | 3.14 | 1.60 | 1.96 |
| | 70 | 0.63 | 36.9 | 4.8 | 42.2 | 0.12 | 2.43 | 1.70 | 1.43 |
| | 71 | 0.63 | 37.2 | 9.5 | 42.5 | 0.20 | 2.93 | 1.80 | 1.63 |
| | 72 | 0.63 | 37.3 | 14.4 | 42.6 | 0.28 | 3.57 | 1.90 | 1.88 |
| | 73 | 0.91 | 17.8 | 4.8 | 14.0 | 0.21 | 2.14 | 0.59 | 3.63 |
| | 74 | 0.91 | 18.2 | 9.5 | 14.3 | 0.34 | 2.71 | 0.85 | 3.19 |
| | 75 | 0.91 | 18.0 | 14.2 | 14.2 | 0.44 | 2.93 | 1.00 | 2.93 |
| | 76 | 0.77 | 32.6 | 4.6 | 30.3 | 0.12 | 2.36 | 1.09 | 2.16 |
| 1 | 77 | 0.77 | 32.9 | 9.4 | 30.6 | 0.22 | 2.86 | 1.26 | 2.27 |
| | 78 | 0.77 | 32.5 | 14.5 | 30.2 | 0.31 | 3.29 | 1.60 | 2.06 |
| | 79 | 0.63 | 36.9 | 4.8 | 42.2 | 0.12 | 2.57 | 1.70 | 1.51 |
| | 80 | 0.63 | 37.2 | 9.5 | 42.5 | 0.20 | 3.29 | 1.80 | 1.83 |
| | 81 | 0.63 | 37.3 | 14.4 | 42.6 | 0.28 | 3.64 | 1.90 | 1.92 |

หมายเหตุ : ความลึกการไหล ($y_0$) = 300 มม. / $t_s$ คือ ความหนาที่จมน้ำของ pile cap / ขนาดเสาเข็ม ($D$) = 14 มม.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ช

สรุปการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับปัญหาเรื่องการกัดเซาะรอบโครงสร้างฐานรากของอาคารชลศาสตร์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก ซ

## สรุปผลการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับปัญหาการกัดเซาะ
## รอบโครงสร้างฐานรากของอาคารชลศาสตร์

1) <u>การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับลักษณะทางกายภาพของทางน้ำและการสำรวจสภาพการกัดเซาะในพื้นที่จริง</u>

จากการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับลักษณะทางกายภาพของทางน้ำ และการออกสำรวจสภาพการกัดเซาะในพื้นที่จริง สามารถสรุปเรียงตามปีที่ศึกษา ดังรายละเอียดในตาราง ซ-1

2) <u>การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่าง ความลึกหลุมกัดเซาะ กับตัวแปรการไหล</u>

จากการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับตัวแปรการไหล สามารถสรุปเรียงตามปีที่ศึกษา ดังรายละเอียดในตาราง ซ-2

3) <u>การศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับลักษณะเฉพาะของโครงสร้าง</u>

จากการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะกับลักษณะเฉพาะของโครงสร้าง สามารถสรุปเรียงตามปีที่ศึกษา ดังรายละเอียดในตาราง ซ-3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ซ-1 การทบทวนการศึกษาความลึกหลุมกัดเซาะกับลักษณะทางกายภาพของทางน้ำ

| ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา | เรื่องที่ศึกษา | รูปแบบและวิธีการศึกษา | ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ |
|---|---|---|---|
| Lacey, 1929 | ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด ที่บริเวณสะพาน และบริเวณพื้นที่อื่นที่คอดลง | ทำการสำรวจและเก็บข้อมูลในสนาม | ได้ความสัมพันธ์ของพื้นที่รูปตัดขวางของแม่น้ำบริเวณสะพาน และรัศมีชลศาสตร์ของรูปตัดขวางบริเวณสะพาน |
| Laursen และ Toch, 1954 | เกณฑ์การออกแบบสำหรับการกัดเซาะสูงสุดของทางน้ำ | ทดลองภายใต้สภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ | ได้ความสัมพันธ์เพื่อใช้เป็นเกณฑ์การออกแบบสำหรับการกัดเซาะดังนี้ $\frac{d_s}{D} = 1.35\left[\frac{y}{D}\right]^{0.3}$ เมื่อ $d_s$ คือความลึกกัดเซาะสูงสุด ; $y$ คือ ความลึกการไหล ; $D$ คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตอม่อ |
| Laursen, 1954 | ผลกระทบของทางน้ำและลักษณะของวัสดุท้องน้ำต่อการกัดเซาะ | ทำการศึกษาในแบบจำลองทางน้ำเปิดที่ความลึกการไหล ความเร็วการไหล และขนาดวัสดุท้องน้ำต่างๆ | พบว่า หลังเวลาผ่านไปจนกระทั่งการกัดเซาะเข้าสู่สมดุลได้วัดค่าความลึกการกัดเซาะ โดยความลึกการกัดเซาะสมดุลไม่ขึ้นกับความเร็วการไหลหรือขนาดวัสดุท้องน้ำ แต่ขึ้นกับรูปทรงเรขาคณิตของตอม่อและความลึกการไหล |
| สมรักษ์ ต่อวงศ์ไพชยนต์, 1984 | การกัดเซาะของน้ำต่อตอม่อสะพานและท่อลอด | เก็บข้อมูลการวิบัติของสะพานและท่อลอดที่เกิดขึ้นจริงในประเทศไทย ช่วงปี 2520-2526 อันประกอบด้วยวิบัติของสะพาน 4 แห่ง และการวิบัติของท่อลอด 57 แห่ง | การวิบัติของสะพานส่วนใหญ่มีสาเหตุหลักจากการกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน อันเนื่องมาจากการศึกษาออกแบบด้านชลศาสตร์และอุทกวิทยาไม่เพียงพอ |
| Johnson และ Jones, 1993 | การวิเคราะห์การกัดเซาะรอบตอม่อสะพานจากข้อมูลสำรวจภาคสนามและข้อมูลจากการทดลอง | ทำการสำรวจภาคสนามในพื้นที่สะพานแต่ละแห่งในอเมริกาเพื่อนำมาตรวจสอบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง | จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ข้อมูลจากการทดลองในห้องปฏิบัติการของ FHWA ให้ค่าการประมาณขนาดความลึกหลุมกัดเซาะไม่ตรงกับผลการสำรวจในพื้นที่ต่างๆ ซึ่งบางแห่งมีค่าสูงกว่า และบางแห่งต่ำกว่า เนื่องจากผลของ scale effect ของแบบจำลอง ดังนั้นจึงปรับแก้ค่าโดยการคูณกับเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดของแต่ละพื้นที่ และพบว่าสิ่งที่มีผลมากในเรื่อง scale effect คือความลึกน้ำในแบบจำลอง |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ช-1 (ต่อ) การทบทวนการศึกษาความลึกหลุมกัดเซาะกับลักษณะทางกายภาพของทางน้ำ

| ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา | เรื่องที่ศึกษา | รูปแบบและวิธีการศึกษา | ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ |
|---|---|---|---|
| Jiro Fukui และ Masahiro Otuka,1997 | การคิดค้น วิเคราะห์หาวิธีการและเครื่องมือใหม่ๆที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการสำรวจเก็บข้อมูลการกัดเซาะรอบตอม่อสะพานในประเทศญี่ปุ่น | ทำการออกสำรวจในภาคสนามโดยทดลองและออกแบบเครื่องมือต่างๆเพื่อใช้ในการวัดให้ได้ข้อมูลที่ละเอียดถูกต้องและสะดวกต่อการสำรวจ ดังแสดงในรูป ช-1 | ได้นำเสนอตำแหน่งที่เหมาะสมในการวัดกระแสน้ำรวมทั้งเทคนิคและโปรแกรมการวัดข้อมูลต่างซึ่งได้พัฒนาขึ้นโดย PWRI |
| Bayram และ Larson, 2000 | วิเคราะห์ข้อมูลการกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มเนื่องจากคลื่นในภาคสนาม | สำรวจข้อมูลในภาคสนามเพื่อนำมาอธิบายถึงผลของคลื่นต่อความลึกหลุมกัดเซาะ | พบว่าสิ่งที่มีผลต่อการเกิดการกัดเซาะเนื่องจากคลื่นอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ *KC* ซึ่งจะขึ้นกับขนาดคาบคลื่นและความเร็วอนุภาคน้ำ โดยมีความสัมพันธ์คล้ายกับผลการทดลองของ Sumer et al. (1992) ซึ่งความลึกหลุมกัดเซาะสัมพันธ์กับ *KC* ในรูปของฟังชันก์ Exponential |

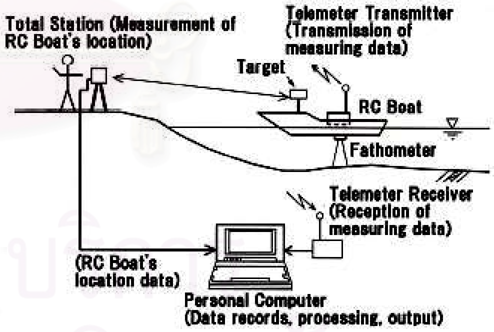
(a) Conventional investigation technique
for scour from a footing

(b) Conventional investigation technique
for scour from a boat

(c) Scour investigation technique by divers

(d) Outline of investigation using a RC boat

(e) Measurement of RC boat's location
by total station




(f) Outline of RC boat system

รูป ช-1 เทคนิคและวิธีการตรวจวัดข้อมูลการกัดเซาะ
โดย Jiro Fukui and Masahiro Otuka (1997,2001)

ตาราง ซ-2 การทบทวนการศึกษาความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะกับตัวแปรการไหล

| ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา | เรื่องที่ศึกษา | รูปแบบและวิธีการศึกษา | ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ |
|---|---|---|---|
| Chitale, 1941 | อิทธิพลของการกัดเซาะทางด้านเหนือน้ำและขนาดของทรายต่อการกัดเซาะตอม่อ | ใช้แบบจำลอง ตอม่อรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้ายาว 0.925 ฟุต กว้าง 0.6 ฟุต และรูปทรงครึ่งวงกลม ใช้วัสดุท้องน้ำเป็นทรายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.16, 0.24, 0.32, 0.68, และ 0.51 มม.ใช้อัตราการไหลคงที่ 1 ลูกบาศก์ฟุตต่อวินาที และความลึกของน้ำ0.5-1.45 ฟุต ทดลองในสภาวะไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ | 1. การไหลตามแกนนอน ความลึกการกัดเซาะสูงสุดเกิดขึ้นที่สันตอม่อ การกัดเซาะที่ด้านข้างของตอม่อจะน้อยกว่าที่สันตอม่อ ประมาณ 5-15%<br>2. อัตราส่วนระหว่างความลึกกัดเซาะสูงสุดกับความลึกการไหลในรางน้ำแสดงด้วยความสัมพันธ์อย่างง่ายของความเร็วใกล้หลุมกัดเซาะของรางน้ำ<br>3. ความลึกหลุมกัดเซาะสมดุลที่ได้ เป็นความสัมพันธ์ของความลึกการไหล (*y*) และฟรูดนัมเบอร์ของการไหล (*Fr*) ดังสมการ<br>$\frac{d_{se}}{y} = 0.51 + 6.65F_r - 5.49F_r^2$<br>$d_{se}$ คือ ความลึกกัดเซาะสมดุลภายใต้ท้องน้ำปกติ *y* คือ ความลึกของน้ำในหลุมกัดเซาะ $F_r$ คือ ฟรูดนัมเบอร์ของการไหล |
| Chabert และ Engeldinger, 1956 | พฤติกรรมการกัดเซาะรอบตอม่อต่อตัวแปรการไหลต่างๆ | โดยกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลองดังนี้คือ ความเร็วการไหล, ขนาดวัสดุท้องน้ำ และลักษณะต่างๆของตอม่อ | เกิดพฤติกรรมการกัดเซาะเป็นสองช่วง คือ ช่วงที่ความเร็วเฉือนของการไหลน้อยกว่าความเร็วเฉือนวิกฤติ และช่วงที่ความเร็วเฉือนของการไหลมากกว่าความเร็วเฉือนวิกฤติ และความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดจะเกิดเมื่อความเร็วเฉือนของการไหลเท่ากับความเร็วเฉือนวิกฤติ |
| Shen et al., 1966 | พฤติกรรมการกัดเซาะโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพของตอม่อรูปทรงกระบอก | ใช้ขนาดตอม่อ 0.15-0.9 ม. วัสดุท้องน้ำเป็นทรายขนาดสม่ำเสมอ 0.24-0.46 มม. | โดยได้ความลึกหลุมกัดเซาะเป็นความสัมพันธ์กับเรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ<br>$R_p = \frac{UD}{\nu}$<br>ดังนี้ $d_s = 0.022R_p^{0.619}$ โดยที่<br>$d_S$ คือความลึกหลุมกัดเซาะในหน่วยเซนติเมตร<br>$R_p$ คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์ของตอม่อ |

ตาราง ช-2 (ต่อ) การทบทวนการศึกษาความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะกับตัวแปรการไหล

| ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา | เรื่องที่ศึกษา | รูปแบบและวิธีการศึกษา | ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ |
|---|---|---|---|
| Chen, A-Han, 1980 | ทดลองหาขนาดของหลุมกัดเซาะรอบตอม่อสะพานทรงกระบอก | ใช้ทราย 2 ขนาด ได้แก่ $d_{50}$ = 0.30 และ 1.12 มม. และใช้ตอม่อรูปทรงกระบอก 3 ขนาด | แสดงให้เห็นว่าขนาดวัสดุท้องน้ำมีผลกระทบต่อความลึกหลุมกัดเซาะซึ่งขัดแย้งกับผลการศึกษาของผู้ทำการศึกษาหลายๆท่านที่ผ่านมา เช่น Palmer (1969), Ting (2001) |
| Ruadkivi และ Ettema, 1983 | การกัดเซาะรอบตอม่อทรงกระบอกโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ | ใช้วัสดุท้องน้ำเป็นทรายขนาด 0.24-0.78 มม. ใช้ความลึกการไหล 600 มม. ขนาดตอม่อ 28.5, 50.8, 101.6 , 150.0 และ 240.0 มม. | ความลึกหลุมกัดเซาะขึ้นอยู่กับการกระจายขนาดวัสดุท้องน้ำ, ขนาดเฉลี่ยวัสดุท้องน้ำ, ขนาดตอม่อและความลึกการไหล |
| Jones, 1983 | เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อ($d_s/D$) และความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อ($y/D$) | ได้ทำการรวบรวมข้อมูลของผู้วิจัยหลายๆท่าน ไว้ในรูปเดียวกัน ดังแสดงในรูป ช-2 | จากการศึกษานี้ เนื่องจากสมการเพื่อทำนายความลึกแต่ละสมการไม่เหมือนกัน บางสมการมีความเร็วการไหลซึ่งอยู่ในรูปของฟรูดนัมเบอร์ ในขณะที่บางสมการไม่มีความเร็วการไหล ในการเปรียบเทียบจึงใช้ค่าฟรูดนัมเบอร์เท่ากับ 0.3 สำหรับสมการที่มีความเร็วการไหลเป็นตัวแปร |
| Chang Sin Zee, 1987 | ขนาดของหลุมกัดเซาะกับรูปแบบการไหลรอบตอม่อในรางน้ำเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า | โดยทำการกัดเซาะในสภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ โดยใช้วัสดุท้องน้ำเป็นทรายสม่ำเสมอ 3 ขนาด และใช้รูปทรงตอม่อ 2 แบบ | พื้นที่หลุมกัดเซาะรอบตอม่อสะพานขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหล, ลักษณะการไหล, ลักษณะตอม่อ และขนาดของวัสดุท้องน้ำ |
| Chiew, 1995 | การกัดเซาะและความคงทนของชั้นกรวดรอบๆ ตอม่อสะพานในแม่น้ำที่วัสดุท้องน้ำถูกกัดเซาะ | ทำการทดลองในแบบจำลองรางน้ำยาว 18 ม. กว้าง 0.60 ม. ลึก 0.60 ม.และใช้ตอม่อทรงกระบอกปิดท้องน้ำรอบตอม่อด้วยชั้นกรวดขนาดต่างๆ | ผลการทดลองพบว่าชั้นกรวดรอบๆตอม่อจะช่วยลดทั้งขนาดและอัตราการกัดเซาะที่เวลาเดียวกันและขนาดของการกัดเซาะสมดุลจะขึ้นกับขนาดวัสดุป้องกันและความเร็วการไหล |

ตาราง ช-2 (ต่อ) การทบทวนการศึกษาความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะกับตัวแปรการไหล

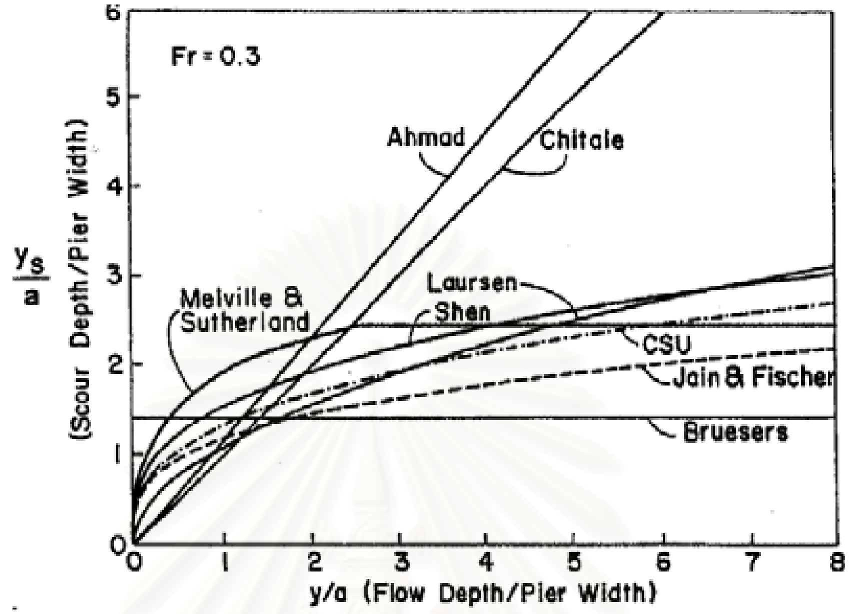
| ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา | เรื่องที่ศึกษา | รูปแบบและวิธีการศึกษา | ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ |
|---|---|---|---|
| Francis et al.,2001 | การกัดเซาะรอบตอม่อสะพานในกรณีวัสดุท้องน้ำเป็นดินเหนียว | ทำการทดลองแบบจำลองกายภาพ โดยใช้วัสดุท้องน้ำเป็นดินเหนียวและทราย | ผลการศึกษาพบว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของความลึกหลุมกัดเซาะของวัสดุท้องน้ำจำพวกดินเหนียว น้อยกว่าวัสดุท้องน้ำจำพวกทราย แต่เมื่อพิจารณาหลุมกัดเซาะสมดุลจะมีความลึกเท่ากันทั้งดินเหนียวและทราย |
| Kato,2001 | ผลกระทบของขนาดวัสดุท้องน้ำต่อการกัดเซาะรอบโครงสร้างทรงกระบอกเนื่องจากการกระทำของคลื่นซึนามิ | ทำการทดลองใช้แบบจำลองในห้องปฏิบัติการโดยใช้ทรายและกรวดขนาดต่างๆกันออกไป และเก็บข้อมูลการกัดเซาะด้วยกล้อง CCD โดยใช้ตัวแปรการทดลองคือ ความลึกการไหล, ความเร็วการไหล และความดันที่เกิดขึ้น | ผลการทดลองพบว่า กรวดที่ใช้ป้องกันรอบๆโครงสร้างทรงกระบอกจะช่วยลดพื้นที่ของการกัดเซาะลงได้ แต่ก็ไม่สามารถสรุปได้ว่ากรวดช่วยลดความลึกการกัดเซาะสูงสุด |
| Sumer และ Fredsoe, 2001 | การกัดเซาะรอบตอม่อรูปทรงกระบอกเนื่องจากการกระทำของคลื่นและกระแสน้ำ | ทดลองโดยจำลองคลื่นแบบ irregular waves ในแอ่งคลื่น โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 กรณี คือ 1. กรณีทิศทางของคลื่นตามกระแสน้ำ 2. กรณีทิศทางของคลื่นตั้งฉากกับกระแสน้ำ | ได้นำเสนอค่าความลึกหลุมกัดเซาะสัมพันธ์กับฟังก์ชัน<br>$U_{cw} = U_d/(U_c+U_m)$<br>$U_d$ = disturbed current velocity<br>$U_c$ = undisturbed current velocity<br>$U_m$ = maximum undisturbed orbital velocity<br>ซึ่งค่า $U_{cw}$ จะกำหนดโดยค่า $KC$<br>จากผลการทดลองพบว่าความลึกหลุมกัดเซาะจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วที่เพิ่มขึ้นของกระแสน้ำเป็นสำคัญและมีค่ามากที่สุดที่กรณีมีกระแสน้ำอย่างเดียว ที่ค่า $U_{cw}$ เท่ากับ 0.7 |
| Graft,2002 | ศึกษารูปแบบการไหลในหลุมกัดเซาะรอบๆ โครงสร้างทรงกระบอก | ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยการใช้เครื่องมือแบบ 3 มิติในการวัดตัวแปรการไหลต่างๆ | จากผลการศึกษาพบว่า ณ ตำแหน่งรอบๆโครงสร้างทรงกระบอกที่เกิดการกัดเซาะจะมีลักษณะการไหลเป็นแบบปั่นป่วนมาก และมีการหมุนวน เกิดการม้วนตัวลงในแนวดิ่ง ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดการกัดเซาะ ลักษณะการไหลดังแสดงในรูป ช-3 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

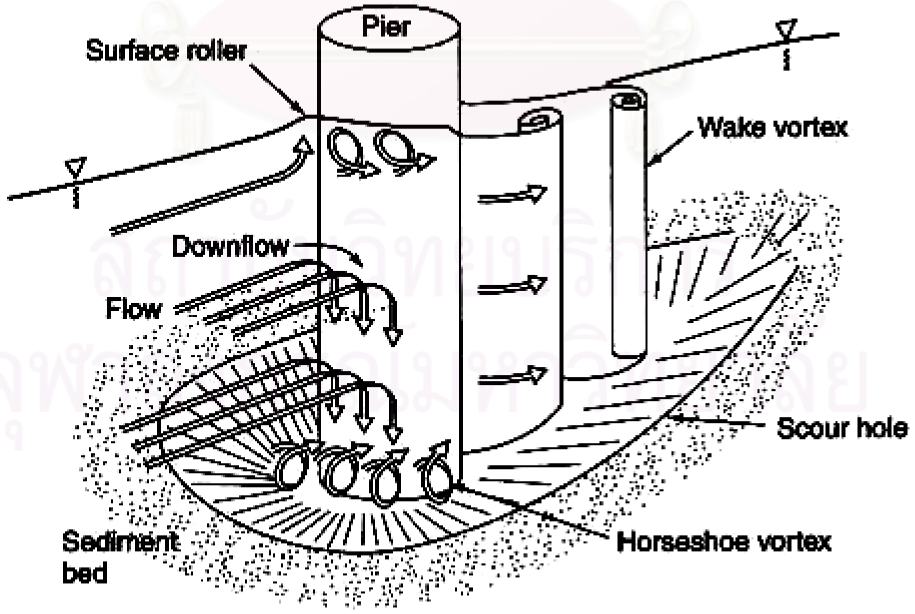
ตาราง ช-2 (ต่อ) การทบทวนการศึกษาความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะกับตัวแปรการไหล

| **ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา** | **เรื่องที่ศึกษา** | **รูปแบบและวิธีการศึกษา** | **ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ** |
|---|---|---|---|
| Sumer,<br>Fredsoe และ<br>Hatipoglu, 2007 | การกัดเซาะรอบ<br>เสาเข็มเนื่องจาก<br>คลื่นที่สภาพท้อง<br>น้ำเป็นทราย,<br>ตะกอนหลวม และ<br>ตะกอนแน่น | ทำการทดลองที่ความหนาแน่น<br>ของตะกอน 3 ค่า คือ Dense silt:<br>$Dr$ = 0.74<br>Medium silt: $Dr$ = 0.38 และ<br>sand: $Dr$ = 0.23 ภายใต้คลื่นที่มี<br>ค่า $KC$ ในช่วง 0-20 | สรุปผลการศึกษาพบว่า<br>1.สิ่งที่มีอิทธิพลต่อการกัดเซาะ คือ ความ<br>แน่นของตะกอนท้องน้ำ, Shields<br>parameter และ $KC$<br>2.ความลึกหลุมกัดเซาะเพิ่มขึ้นตั้งแต่ค่า<br>1.6 – 2.0 เมื่อท้องน้ำเปลี่ยนจากตะกอน<br>หลวมเป็นทราย และจากทรายเป็น<br>ตะกอนแน่น ตามลำดับ<br>3.ระยะเวลาการกัดเซาะถึงสภาวะสมดุล<br>พบว่ากรณีทรายจะใช้เวลาน้อยที่สุด และ<br>ตะกอนแน่นจะใช้เวลามากที่สุด<br>4.ความลึกหลุมกัดเซาะมากเมื่อมุมเสียด<br>ทานของวัสดุท้องน้ำมาก และความแน่น<br>ของวัสดุท้องน้ำมาก |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




รูป ช-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกหลุมกัดเซาะต่อขนาดตอม่อกับความลึกการไหลต่อขนาดตอม่อเพิ่มเติมจาก Jones (1983) โดย FHWA (2001)




รูป ช-3 รูปแบบการไหลในหลุมกัดเซาะ โดย Graft (2002)

ตาราง ซ-3 การทบทวนผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างต่อความลึกหลุมกัดเซาะ

| ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา | เรื่องที่ศึกษา | รูปแบบและวิธีการศึกษา | ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ |
|---|---|---|---|
| Durang-Claye, 1873 | การศึกษาความลึกหลุมกัดเซาะรอบตอม่อรูปทรงต่างๆ | ทำการจำลองการศึกษาตอม่อรูปทรงกระบอก, ตอม่อรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน และตอม่อรูปทรงสามเหลี่ยมปลายมนเพื่อเปรียบเทียบความลึกหลุมกัดเซาะ | ตอม่อรูปทรงกลมให้ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด และตอม่อรูปทรงสามเหลี่ยมปลายมนให้ความลึกหลุมกัดเซาะน้อยสุด |
| Inglis, 1948 | ความลึกหลุมกัดเซาะของตอม่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายมน ที่มีมุมปะทะการไหล 0° | ใช้วัสดุท้องน้ำเป็นทรายขนาด 0.3 มม. และ 0.13 มม. | ได้เสนอสมการทำนายความลึกหลุมกัดเซาะดังนี้<br>$\frac{y+d_s}{b} = 1.70\left[\frac{q^{2/3}}{b}\right]^{0.78}$ เมื่อ y คือความลึกในหน่วยฟุต, $d_s$ คือความลึกหลุมกัดเซาะในหน่วยฟุต, $b$ คือความกว้างตอม่อในหน่วยฟุต และ $q$ คืออัตราการไหลในหน่วยฟุตต่อวินาทีต่อฟุต และในปี 1949 ได้พัฒนาสูตรเป็น<br>$\frac{d_s}{y} = 4.19F_r^{0.52}\left[\frac{L}{y}\right]^{0.22} - 1$<br>เมื่อ $y$ คือความลึกการไหล, $d_s$ คือความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุด<br>$L$ คือ projected length $F_r$ คือ ค่าฟรูดนัมเบอร์ของการไหลใกล้หลุมกัดเซาะ |
| Richardson, 1987 | การศึกษาเพื่อคาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะรอบตอม่อ | ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบตอม่อกับความลึกหลุมกัดเซาะ | ได้เสนอสมการเพื่อคาดคะเนความลึกหลุมกัดเซาะ ดังนี้<br>$\frac{d_s}{y} = 2.0K_1K_2\left[\frac{D}{y}\right]^{0.65}Fr^{0.43}$<br>โดยที่ $d_s$ คือความลึกกัดเซาะ ; $y$ คือ ความลึกการไหล ; $D$ คือ ขนาดตอม่อ ; $Fr$ คือ ค่าฟรูดนัมเบอร์ของการไหล ; $K_1$ คือ ค่าปรับแก้เนื่องจากรูปแบบของตอม่อ ; $K_2$ คือ ค่าปรับแก้เนื่องจากมุมปะทะการไหลดังตาราง ซ-4 และรูป ซ-4 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ช-3 (ต่อ) การทบทวนผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างต่อความลึกหลุมกัดเซาะ

| ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา | เรื่องที่ศึกษา | รูปแบบและวิธีการศึกษา | ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ |
|---|---|---|---|
| Melville และ Dongol ,1992 | หาความลึกหลุมกัดเซาะในกรณีที่มีสวะมาเกาะอยู่เหนือตอม่อสะพาน | ทำการทดลองบนรางน้ำสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 1.52 ม. สูง 1.22 ม. ยาว 45 ม. ใช้ทรายขนาด $d_{50}$ = 1.65 มม. ความลึกการไหล 100-130 มม. ตอม่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 58 มม.ดังรูป ช-5 | ความลึกหลุมกัดเซาะจะมากกว่าในกรณีที่ไม่มีสวะมาเกาะเหนือตอม่อสะพาน จากการทดลองได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $d_s/D$ และ $y/D$ กับ $d_s/D_c$ และ $y/D_c$ ดังแสดงในรูป ช-6 และรูป ช-7 |
| Sumer และ Fredsoe, 1992b | การกัดเซาะรอบตอม่อทรงกระบอกตั้งตรงภายใต้คลื่น | ทำการทดลองในแบบจำลองรางคลื่น ใช้ทรายขนาด $d_{50}$ = 0.18 มม. ใช้ขนาดตอม่อตามการปรับค่า *KC* | จากการศึกษาพบว่า ค่า *KC* มีอิทธิพลต่อความลึกการกัดเซาะเป็นสำคัญ และเกิดการกัดเซาะที่ค่า *KC* มากกว่า 6 และมีค่าความลึกสูงสุดประมาณ 1.3*D* ที่ค่า *KC* = 100 ซึ่งถือว่าเป็นสภาวะการกัดเซาะจากคลื่นที่คล้ายการกระทำของกระแสน้ำ ซึ่งผลการศึกษานี้ได้สมการความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะกับค่า *KC* ในรูปของฟังชันก์เอกซ์โปเนนเชียลดังนี้ $\frac{S}{D} = 1.3\{1-\exp[-0.03(KC-6)]\}$ |
| Sumer, Christiansen และ Fredsoe, 1993 | ผลของรูปร่างหน้าตัดที่ปะทะการไหลของเสาเข็มต่อความลึกหลุมกัดเซาะภายใต้คลื่น | ทำการทดลองในรางคลื่นที่มีท้องน้ำเป็นทรายขนาด $d_{50}$ = 0.18 มม. ความลึกการไหล 40 ซม. ใช้เสาเข็ม 3 แบบคือ<br>1. ทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 20-40 มม.<br>2.หน้าตัดสี่เหลี่ยมขนาด ก.x ย. = 9x9 ถึง 40x40 มม. ด้านกว้างตั้งฉากกับการไหล และ<br>3. หน้าตัดสี่เหลี่ยมแต่ทำมุม 45ํ กับการไหล | ผลการศึกษาพบว่ารูปแบบของหลุมกัดเซาะจะแตกต่างกันตามรูปร่างของเสาเข็ม และขนาดความลึกสูงสุดจะขึ้นกับค่า *KC* ซึ่งพบว่าเสาเข็มรูปสี่เหลี่ยมทั้ง 2 กรณีศึกษาจะให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดเท่ากัน แต่กรณีทำมุม 45ํ กับการไหลจะเกิดขึ้นได้ที่ค่า *KC* ที่ต่ำกว่า ส่วนกรณีเสาเข็มทรงกระบอกจะให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดต่ำกว่าแบบสี่เหลี่ยมทั้ง 2 กรณี และมีสมการความสัมพันธ์ความลึกหลุมกัดเซาะกับค่า *KC* ดังนี้<br>1.กรณีเสาเข็มสี่เหลี่ยมทำมุม 90ํ<br>$\frac{S}{D} = 1.3\{1-\exp[-0.03(KC-11)]\}$<br>2.กรณีเสาเข็มสี่เหลี่ยมทำมุม 45ํ<br>$\frac{S}{D} = 1.3\{1-\exp[-0.03(KC-3)]\}$<br>3.กรณีเสาเข็มทรงกระบอก<br>$\frac{S}{D} = 1.3\{1-\exp[-0.03(KC-6)]\}$ |

ตาราง ช-3 (ต่อ) การทบทวนผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างต่อความลึกหลุมกัดเซาะ

| ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา | เรื่องที่ศึกษา | รูปแบบและวิธีการศึกษา | ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ |
|---|---|---|---|
| พรมงคล ชิดชอบ, 1997 | การกัดเซาะรอบตอม่อสะพานในรางน้ำเปิด สี่เหลี่ยมผืนผ้า | ใช้วัสดุท้องน้ำเป็นทรายธรรมชาติคละกัน โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 กรณี คือ 1.สภาวะเงื่อนไขไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ 2.สภาวะเงื่อนไขมีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ โดยใช้แบบจำลองตอม่อทรงกระบอกขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5, 5.0 และ 7.5 ซม. รูปทรง สี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดกว้างต่อยาว 2/7.5, 2.5/12.5 และ 5/15 และมุมปะทะการไหล 0, 30, 60 องศา | ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อหลุมกัดเซาะ ได้แก่ รูปร่าง ขนาดตอม่อ มุมการไหลปะทะตอม่อ และขนาดวัสดุท้องน้ำ |
| Jones และ Sheppard, 1998 (พัฒนาต่อจาก Richardson et al., cited in FHWA, (1993), (1995)) | การกัดเซาะรอบตอม่อที่มีโครงสร้างประกอบที่ซับซ้อนเนื่องจากการกระทำของกระแสน้ำ | ทำการออกแบบการทดลองออกเป็น 3 กรณีคือ 1.กรณีผลของ pier stem 2.กรณีผลของ pile group 3. กรณีผลของ pile cap ภายใต้การกระทำของกระแสน้ำอย่างเดียว | ได้ความสัมพันธ์ของความลึกหลุมกัดเซาะของแต่ละส่วนโครงสร้าง ดังสมการ $y_S = y_{Spier} + y_{Spc} + y_{Spg}$ และได้ค่าปรับแก้ต่างๆ ดังแสดงในรูป ช-8 รูป ช-9 รูป ช-10 เพื่อคำนวณการออกแบบโครงสร้างตอม่อส่วนต่างๆตามสมการจากผลการศึกษาของ FHWA หรือที่เรียกว่า HEC-18 equation |
| Sumer และ Fredsoe, 1998 | การกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มแบบต่างๆในแนวตั้งตรงเนื่องจากการกระทำของคลื่น | ทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขการกระทำของคลื่นขนาดต่างๆต่อเสาเข็มกลุ่มซึ่งมีการจัดเรียงกลุ่มรูปแบบต่างๆกันออกไป | ผลการทดลองพบว่าค่าความลึกการกัดเซาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า *KC* ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของ $U_m$, *T* และ *D* โดย $KC = \frac{U_m T}{D}$ และกรณีเสาเข็มกลุ่มพบว่า การจัดกลุ่มที่มี spacing น้อยๆ จะเกิดการกัดเซาะได้มากกว่า โดยพฤติกรรมจะคล้ายกรณีเป็นเสาเข็มเดี่ยวขนาดใหญ่ |

ตาราง ช-3 (ต่อ) การทบทวนผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างต่อความลึกหลุมกัดเซาะ

| ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา | เรื่องที่ศึกษา | รูปแบบและวิธีการศึกษา | ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ |
|---|---|---|---|
| ธรรมวัฒน์ การุณธนกุล, 1998 | การกัดเซาะรอบตอม่อสะพานที่เรียงเป็นตับ ในรางน้ำเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า | ใช้ทราย 3 ขนาด ได้แก่ ทรายละเอียด $d_{50}$ = 0.36 มม. ทรายปานกลาง $d_{50}$ = 1.20 มม. และทรายหยาบ $d_{50}$ = 2.20 มม. เป็นวัสดุท้องน้ำ ทำการศึกษาในสภาวะที่มีและไม่มีการเคลื่อนที่ของวัสดุท้องน้ำ ใช้ตอม่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.8 ซม. วางเรียงกัน 3 ตัวระยะห่าง $L/D$ = 1, 2, 3 วางทำมุมกับการไหลเท่ากับ 0, 20 และ 40 องศา | ความลึกหลุมกัดเซาะของตอม่อตัวแรกจะมากที่สุด และความลึกหลุมกัดเซาะของตอม่อตัวที่ 2 และ 3 จะลดลงตามลำดับ และขนาดของวัสดุท้องน้ำมีผลต่อความลึกหลุมกัดเซาะ โดยวัสดุท้องน้ำขนาดใหญ่จะมีความลึกหลุมกัดเซาะน้อยกว่า สำหรับเงื่อนไขชลศาสตร์เดียวกัน |
| Melville และ Chiew, 1999 | ศึกษาเวลาที่ใช้ทำให้เกิดความลึกหลุมกัดเซาะสมดุล | หลักการทดลอง กำหนดให้เวลาที่ทำให้ความลึกหลุมกัดเซาะไม่เกิน 5 % ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตอม่อใน 24 ชั่วโมงคือ equilibrium time: $t_e$ โดยการศึกษาในกรณีที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของวัสดุท้องน้ำและวัสดุท้องน้ำมีขนาดสม่ำเสมอ | ได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้ $\frac{d(d_{sc})}{dt} \leq \frac{0.05D}{24h}$ และจากการศึกษาสรุปได้ดังนี้<br>1. ความลึกสมดุลของหลุมกัดเซาะเมื่อเทียบกับเวลาแสดงได้ดังรูป ช-11<br>2. ความลึกหลุมกัดเซาะเมื่อทำการทดลองผ่าน 10 % ของเวลาที่ทำให้เกิดความลึกหลุมกัดเซาะสมดุล จะอยู่ระหว่าง 50% ถึง 80% ของความลึกหลุมกัดเซาะสมดุล โดยขึ้นกับความเร็วการไหล |
| Sheng และ Wei, 1999 | ผลของความลาดเอียงของกำแพงกันคลื่นต่อความลึกหลุมกัดเซาะเนื่องจากการกระทำของคลื่น | ทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขของคลื่นที่กระทำขนาดต่างๆ และการเปลี่ยนแปลงความลาดเอียงของผนังกันคลื่น | ผลการทดลองพบว่า ผนังกันคลื่น ที่มี slope = 1/4 มีความลึกของหลุมกัดเซาะน้อยกว่า 1/2 และ 1/3 แต่ที่ค่าความลาดเอียงมากกว่า 1/4 จะได้ความลึกของหลุมกัดเซาะไม่ต่างจากความลาดเอียง 1/4 จึงสรุปได้ว่าค่าความลาดเอียงผนังด้านหน้าของกำแพงกันคลื่นที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 1/4 |

ตาราง ช-3 (ต่อ) การทบทวนผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างต่อความลึกหลุมกัดเซาะ

| **ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา** | **เรื่องที่ศึกษา** | **รูปแบบและวิธีการศึกษา** | **ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ** |
|---|---|---|---|
| **เอกนันท์ ตั้งธีระสุนันท์**, 2001 | ผลของความขรุขระของผิวตอม่อที่มีต่อหลุมกัดเซาะ | ใช้แบบจำลองทางกายภาพศึกษา ผลของความขรุขระของผิวตอม่อที่มีต่อหลุมกัดเซาะ โดยใช้แบบจำลองตอม่อทรงกระบอก 3 ขนาด ได้แก่ 3.40 ซม., 4.80 ซม. และ 6.00 ซม. กับวัสดุท้องน้ำเป็นทรายขนาดสม่ำเสมอ 3 ขนาด คือ 0.36 มม., 1.20 มม. และ 2.20 มม. โดยจำลองลักษณะความขรุขระของตอม่อ 3 ขนาด คือ 0.0883 มม., 0.1178 มม. และ 0.4416 มม. ในสภาวะไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ และมีสภาพการไหลใต้วิกฤติ | จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความลึกกัดเซาะมีความสัมพันธ์กับความลึกการไหล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตอม่อ เรย์โนลนัมเบอร์ของตอม่อ ฟรูดนัมเบอร์ และค่าความขรุขระของตอม่อ โดยที่ขนาดหลุมกัดเซาะของตอม่อที่ผิวมีความขรุขระมาก จะมากกว่าขนาดหลุมกัดเซาะของตอม่อที่ผิวมีความขรุขระน้อย |
| Sumer และ Fredsoe,<br>2001 | การกัดเซาะรอบตอม่อ<br>ทรงกระบอก<br>ขนาดใหญ่ | ทำการทดลองในแบบจำลองแอ่งคลื่น<br>และใช้ตอม่อขนาด 1 ม. | จากการศึกษาพบว่าความลึกการกัดเซาะจะเพิ่มขึ้นตามค่า *KC* และอัตราส่วนระหว่างขนาดตอม่อกับความยาวคลื่น (*D/L*) และมีค่าความลึกสูงสุดประมาณ 1.3*D* |
| Richardson,<br>2001<br>(FHWA HEC- 18) | ศึกษาเพื่อทำนายความลึกหลุมกัดเซาะ | ทำการทดลองโดยใช้แบบจำลอง กรณีวัสดุท้องน้ำเป็นทราย | ได้ความสัมพันธ์เป็นสมการเพื่อประมาณความลึกหลุมกัดเซาะซึ่งเรียกว่าสมการ HEC-18 equation ดังนี้<br>$\frac{d_s}{D} = 2.0K_1K_2K_3K_4\left[\frac{y}{D}\right]^{0.35} Fr^{0.43}$<br>โดยที่ $d_S$ ความลึกหลุมกัดเซาะ $y$ คือความลึกการไหล $D$ คือขนาดตอม่อ $Fr$ คือฟรูดนัมเบอร์การไหล $K_1$ คือ ค่าปรับแก้เนื่องจากรูปแบบของตอม่อ $K_2$ คือค่าปรับแก้เนื่องจากมุมปะทะการไหล $K_3$ คือค่าปรับแก้เนื่องจากสภาพท้องน้ำ $K_4$ คือค่าปรับแก้เนื่องจาก armoring effect |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ช-3 (ต่อ) การทบทวนผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างต่อความลึกหลุมกัดเซาะ

| ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา | เรื่องที่ศึกษา | รูปแบบและวิธีการศึกษา | ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ |
|---|---|---|---|
| Rahman, 2001 | การกัดเซาะที่ผนังเอียงของโครงสร้าง Spur-Dike-Like | ทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองในแบบจำลองกายภาพและแบบจำลองคณิตศาสตร์ | พบว่าผลจากการจำลองในแบบจำลองคณิตศาสตร์มีค่าความลึกของหลุมกัดเซาะมากกว่าค่าที่ได้จากการวัดเล็กน้อย |
| Zafer และ Osman, 2002 | ผลของความเอียงของตอม่อต่อการความลึกการกัดเซาะ | ทำการทดลองโดยใช้แบบจำลองกายภาพโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความชันของตอม่อ 4 ค่าดังนี้ 2, 5, 10 และ 15 องศา โดยใช้วัสดุท้องน้ำ 2 ขนาดคือ 0.5 และ 1.0 มม. | ผลการทดลองพบว่า ค่าความลึกการกัดเซาะจะมีค่ามากที่สุดที่ค่าความเอียงของตอม่อเท่ากับ 2 จากแนวดิ่งและลดลงตามลำดับความเอียงที่เพิ่มขึ้น |
| Sheppard, 2004 | การกัดเซาะรอบตอม่อในสภาวะไม่มีการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ | ทำการทดลองในรางน้ำขนาด 6.1 x 6.4 x 38.4 ม. โดยใช้แบบจำลองตอม่อทรงกระบอกขนาด 0.114, 0.305. และ 0.914 ม. และใช้วัสดุท้องน้ำขนาด 0.22, 0.8 และ 2.9 ม. และเปลี่ยนแปลงความลึกการไหลและความเร็วการไหล | พบว่าได้ความสัมพันธ์ของหลุมกัดเซาะกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตอม่อ ดังสมการ<br>$\frac{d_{se}}{D^*} = 2.5 f_1\left[\frac{y_0}{D^*}\right] f_2\left[\frac{V}{V_c}\right] f_3\left[\frac{D^*}{D_{50}}\right]$<br>โดยที่ $D^*$ คือขนาดประสิทธิผลของตอม่อ |
| Sterling Jones และ Max Sheppard 2004 | การกัดเซาะรอบตอม่อสะพาน ที่มีความกว้างมากๆ | รวบรวมข้อมูลการศึกษาจากการทดลองของนักวิจัยหลายๆคน มาทำการวิเคราะห์ เปรียบเทียบและสรุป | เนื่องจากสมการ HEC-18 ให้ค่าที่สูงเกินไป ดังนั้นการวิเคราะห์จึงเริ่มต้นจากสมการ HEC-18 คือ<br>$\frac{d_s}{D} = 2.0K_1K_2K_3K_4\left[\frac{y}{D}\right]^{0.35} Fr^{0.43}$<br>เมื่อตอม่อมีความกว้าง y/b<0.8 และ Fr<0.8 พบว่ารูปสมการเดิมจะเปลี่ยนไปเป็น<br>$\frac{d_s}{D} = 2.08K_1K_2K_3K_4\left[\frac{y}{D}\right]^{0.35} Fr^{0.43}$<br>และจากนั้นมีการพัฒนาสมการใหม่ โดยเพิ่มตัวคูณลดค่าความลึกหลุมกัดเซาะ<br>$Kw = 1.04\left[\frac{b}{y}\right]^{0.15} Fr^{0.21}$<br>เข้าไปในสมการเดิมข้างต้น สรุปคือ เมื่อตอม่อมีความกว้างเทียบกับความลึกน้ำ (*y/b*) มีค่าน้อยๆ จะส่งผลให้เกิดการกัดเซาะลดลง |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ซ-3 (ต่อ) การทบทวนผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างต่อความลึกหลุมกัดเซาะ

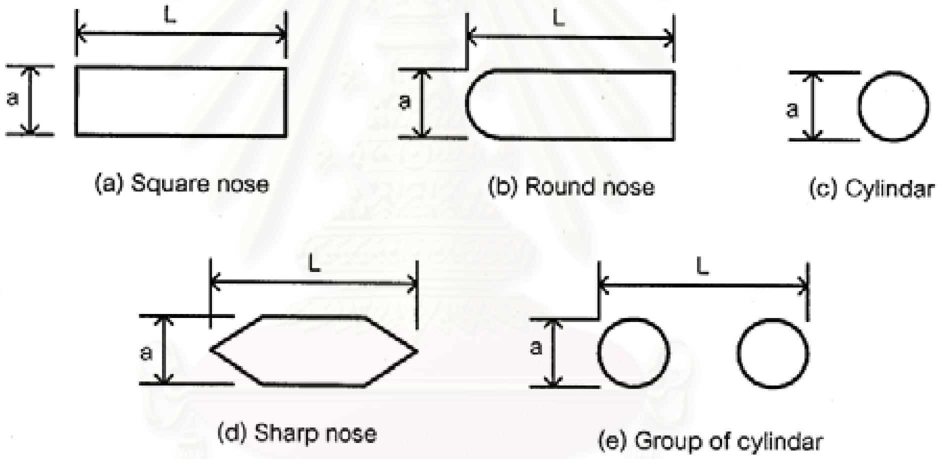
| **ผู้ศึกษา, ปีที่ศึกษา** | **เรื่องที่ศึกษา** | **รูปแบบและวิธีการศึกษา** | **ผลการศึกษา สรุป และหมายเหตุ** |
|---|---|---|---|
| Yovanni A.Catano-Lopera และ Marcelo H.Garcia, 2005, 2006 | การกัดเซาะรอบท่อทรงกระบอกสั้นๆ ที่ฝังอยู่ท้องน้ำ ภายใต้คลื่นและกระแสน้ำ | ทำการทดลองในท้องน้ำที่เป็นทราย ภายใต้เงื่อนไข $10<Re<9.1 \times 10^4$, $2<KC<26$ และ $U_{c1}$= 6.5 ซม./วินาที $U_{c2}$= 10.3 ซม./วินาที $U_{c3}$= 15.2 ซม./วินาที ตามลำดับ | ผลการศึกษาที่ได้เป็นไปตามการศึกษาของ Sumer และ Fredsoe (2001,2002) ซึ่งพบว่ากรณีการไหลรวมกันของคลื่นและกระแสน้ำ อาจให้ค่าความลึกหลุมกัดเซาะที่ลึกหรือตื้นกว่ากรณีคลื่นอย่างเดียวซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดสัดส่วนของคลื่นและกระแสน้ำที่รวมกัน และได้ความสัมพันธ์กับค่า *KC* ดังนี้<br>$\frac{B_d}{D} = \frac{13}{41}\sqrt{\theta KC}$<br>โดยที่ $B_d$ = Burial Depth, $D$= pile diameter และในปี 2006 ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมในกรณีที่ทดลองภายใต้การกระทำจากคลื่นและกระแสน้ำรวมกัน ซึ่งได้ความสัมพันธ์ใหม่ดังนี้<br>$\frac{B_d}{D} = \frac{6}{25}\left[\frac{U_m}{U_m + U}\right](\theta KC)^{2/5}$<br>ซึ่ง $U_m$= orbital velocity<br>$U$ = current velocity<br>$\theta$ = Shields parameter<br>$KC$= Keulegan – Carpenter number |
| Ashtiani และ Beheshti, 2006 | การกัดเซาะรอบเสาเข็มกลุ่มแบบต่างๆในสภาวะการไหลไม่มีตะกอนปน | ทำการทดลองภายใต้การไหลคงที่ไม่มีตะกอนปน แบ่งการทดลองตามรูปแบบกลุ่มเสาเข็ม และเปลี่ยนแปลงระยะห่างของเสาเข็มในแต่ละรูปแบบทดลองที่อัตราการไหลต่างๆ และขนาดตะกอนต่างๆ | ผลการทดลองพบว่าความลึกหลุมกัดเซาะรอบกลุ่มเสาเข็มบางกรณีศึกษามีความลึกถึงสองเท่าของกรณีเสาเข็มเดี่ยวๆ จากผลการทดลองที่ได้นำมาหาค่าแฟกเตอร์เพิ่มเติมจากสมการของ HEC-18 และ New Zealand เนื่องจากผลของการจัดกลุ่มเสาเข็ม ซึ่งได้ผลดังนี้<br>1.กรณีสมการ HEC-18 มีสมการเดิมคือ<br>$\frac{d_s}{D} = 2.0K_1K_2K_3K_4\left[\frac{y}{D}\right]^{0.35} Fr^{0.43}$<br>ค่าแฟกเตอร์จากการทดลองนี้ นำไปเพิ่มเติมในสมการ HEC-18 คือ<br>$K_{Gmn} = 1.11\frac{m^{0.0396}}{n^{0.5225}[G/D]^{0.1153}}$<br>2.กรณีสมการ New Zealand มีสมการเดิมคือ<br>$S = K_{hD}K_1K_dK_sK_\alpha K_t$<br>ค่าแฟกเตอร์จากการทดลองนี้ นำไปเพิ่มเติมในสมการ New Zealand คือ<br>$K_{Gmn} = 1.118\frac{m^{0.0895}}{n^{0.8949}[G/D]^{0.1195}}$<br>โดยที่ $G$= ระยะระหว่างเสาเข็ม, $m$= จำนวนแถวของเสาเข็มตามทิศการไหล และ $n$= จำนวนแถวของเสาเข็มตามทิศตั้งฉากการไหล |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ซ-4 ค่าปรับแก้ $K_1$ และ $K_2$ ในสมการของ Richardson (1987)

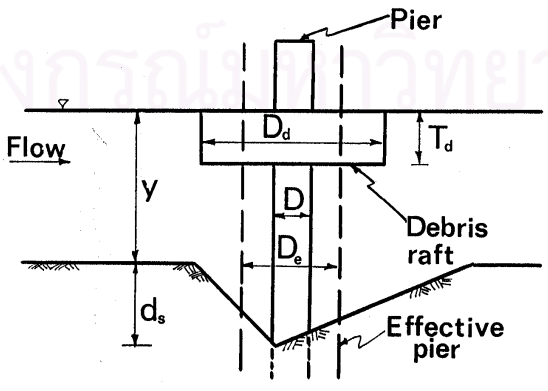
| Correction Factor, $K_1$, for Pier Nose Shape | |
|---|---|
| Shape of Pier Nose | $K_1$ |
| (a) Square nose | 1.1 |
| (b) Round nose | 1.0 |
| (c) Circular nose | 1.0 |
| (d) Group of cylinders | 1.0 |
| (e) Sharp nose | 0.9 |

| Correction Factor, $K_2$, for angle of attack | | | |
|---|---|---|---|
| Angle | L/a = 4 | L/a = 8 | L/a = 12 |
| 0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 15 | 1.5 | 2.0 | 2.5 |
| 30 | 2.0 | 2.75 | 3.5 |
| 45 | 2.3 | 3.3 | 4.3 |
| 90 | 2.5 | 3.9 | 5.0 |
| Angle = skew angle of flow<br>L = length of pier | | | |

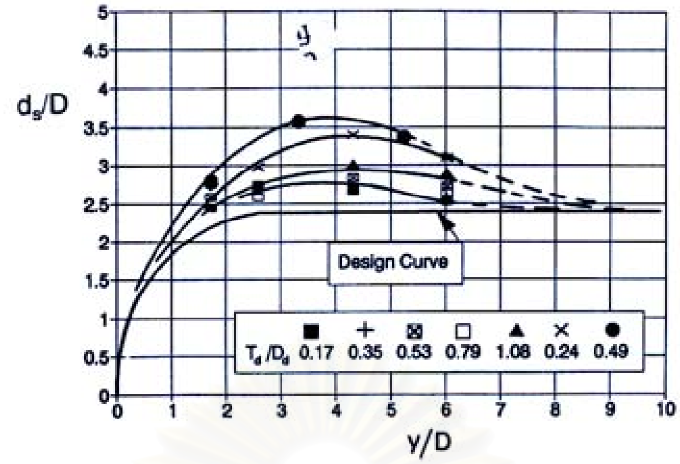



รูป ซ-4 รูปแบบของตอม่อในสมการของ Richardson (1987)

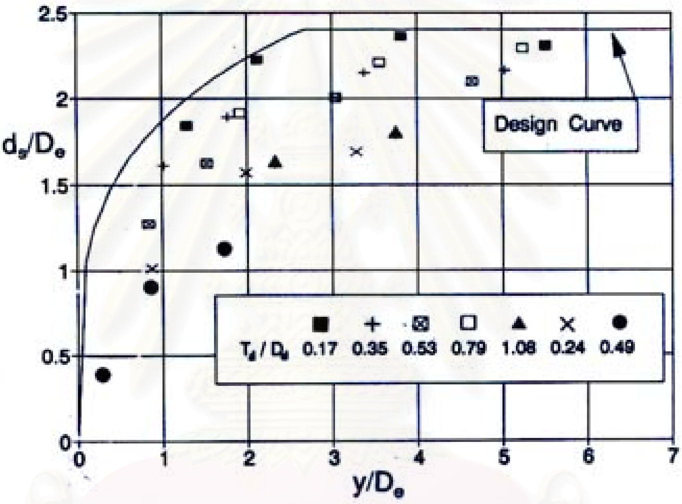
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



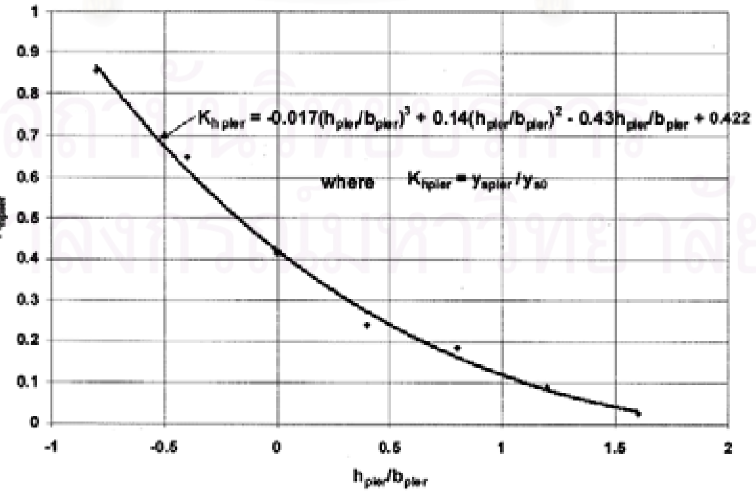

รูป ซ-5 ตอม่อในการทดลองของ Melville และ Dongol (1992)




รูป ช-6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{d_s}{D}$ และ $\frac{y}{D}$ จาก Melville และ Dongol (1992)

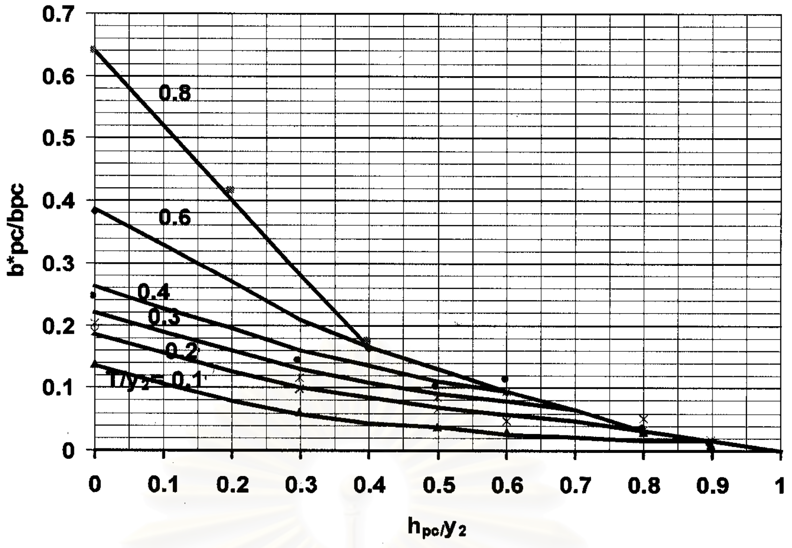



รูป ช-7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{d_s}{D_c}$ และ $\frac{y}{D_c}$ จาก Melville และ Dongol (1992)

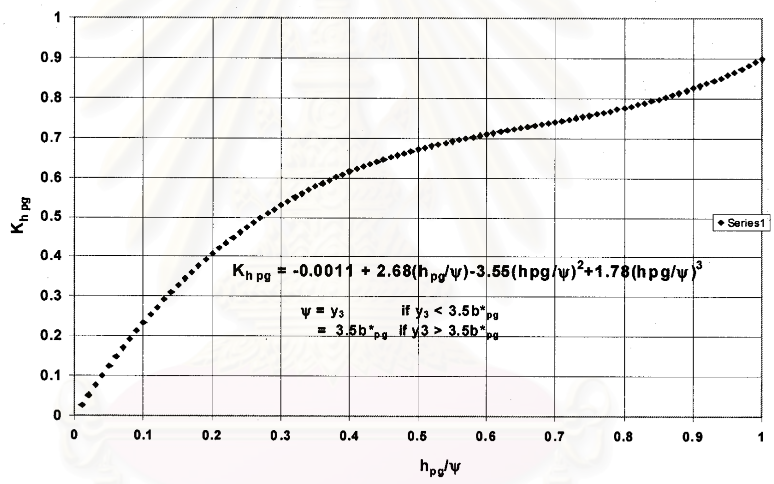



รูป ช-8 Suspended Pier Height Factor จาก Jones และ Sheppard (1998)

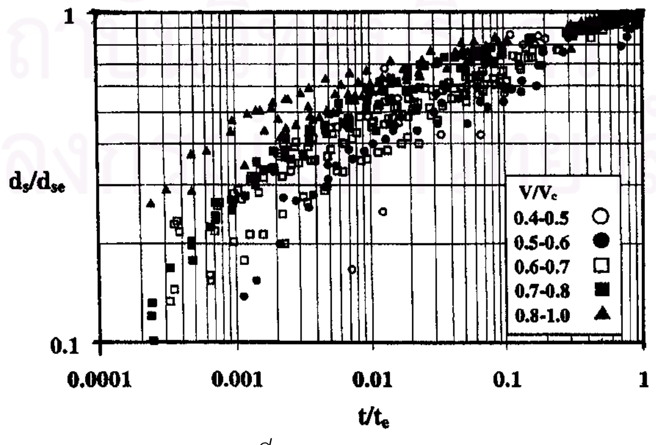
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




รูป ช-9 Pile Cap Equivalent Solid Pier Ratio ของ Jones และ Sheppard (1998)




รูป ช-10 Pile Group Height Factor ของ Jones และ Sheppard (1998)




รูป ช-11 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{d_s}{d_{sc}}$ และ $\frac{t}{t_c}$ จาก Melville และ Chiew (1999)

## ภาคผนวก ซ

## สรุปสัญลักษณ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก ซ

# สรุปสัญลักษณ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ตาราง ซ-1 สัญลักษณ์และคำอธิบาย ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

| สัญลักษณ์ | คำอธิบาย |
|---|---|
| $D$ | ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม |
| $d_{50}$ | ขนาดเฉลี่ยของวัสดุท้องน้ำ |
| $f_s$ | ความถี่คลื่นนัยสำคัญ |
| $F_r$ | ฟรูดนัมเบอร์ของการไหลของน้ำ (Frude number) |
| $g$ | ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก |
| $G$ | ระยะจากจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์กลางของเสาเข็ม |
| $H$ | ค่าระดับน้ำเหนือสันฝายสามเหลี่ยม |
| $H_s$ | ความสูงคลื่นนัยสำคัญ |
| $KC$ | Keulegan-Carpenter number |
| $K_{pc}$ | ค่าปรับแก้ความลึกหลุมกัดเซาะเนื่องจากอัตราส่วนความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำต่อความลึกน้ำ |
| $P$ | แบบจำลองตอม่อ |
| $Q$ | อัตราการไหลของน้ำ |
| $Q_{in}$ | อัตราการพัดพาตะกอนลงในหลุมกัดเซาะ |
| $Q_{out}$ | อัตราการพัดพาตะกอนออกจากหลุมกัดเซาะ |
| $Q_s$ | อัตราการทับถม/กัดเซาะ |
| $R$ | รัศมีชลศาสตร์ |
| $R_e$ | เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number) |
| $S_0$ | ความลาดชันของท้องน้ำ |
| $S_f$ | ความลาดชันของเส้นพลังงานการไหลของน้ำ |
| $S_s$ | ความถ่วงจำเพาะของวัสดุท้องน้ำ |
| $t$ | เวลา |
| $t_s$ | ความหนาของครอบหัวเข็มในน้ำ |
| $T$ | อุณหภูมิ $C^o$ |
| $T_s$ | คาบคลื่นนัยสำคัญ |

ตาราง ซ-1 (ต่อ) สัญลักษณ์และคำอธิบาย ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

| สัญลักษณ์ | คำอธิบาย |
|---|---|
| $U_c$ | ความเร็วกระแสน้ำที่ระยะ $D/2$ จากท้องน้ำ |
| $U_{cw}$ | $U_c / (U_c+U_m)$ |
| $U_m$ | ความเร็วอนุภาคน้ำหมุนวนสูงสุดของคลื่นที่ตำแหน่ง $D/2$ จากท้องน้ำ |
| $U_*$ | ความเร็วเฉือนของการไหล (shear velocity) |
| $U_{*c}$ | ความเร็วเฉือนวิกฤตของการไหล (critical shear velocity) |
| $V$ | ความเร็วกระแสน้ำเฉลี่ย |
| $y_s$ | ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดกรณีเสาเข็มกลุ่มมีครอบหัวเข็ม |
| $y_{spg}$ | ความลึกหลุมกัดเซาะสูงสุดกรณีเสาเข็มกลุ่มไม่มีครอบหัวเข็ม |
| $y_0$ | ความลึกการไหล |
| $\nu$ | ความหนืดจลน์ของน้ำ (kinematics viscosity) |
| $\propto$ | มุมปะทะระหว่างตอม่อกับทิศทางการไหล |
| $\rho$ | ความหนาแน่นของน้ำ |
| $\rho_s$ | ความหนาแน่นของวัสดุท้องน้ำ |
| $\tau_0$ | หน่วยแรงเฉือนวิกฤต |
| <u>บันทึก</u> | ..............................................................................................................<br>..............................................................................................................<br>..............................................................................................................<br>..............................................................................................................<br>..............................................................................................................<br>..............................................................................................................<br>..............................................................................................................<br>..............................................................................................................<br>..............................................................................................................<br>..............................................................................................................<br>..............................................................................................................<br>.............................................................................................................. |

# ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

**ชื่อ** นายนัฐวุฒิ พัดไธสง

**เกิด** 26 พฤษภาคม 2522 จังหวัด บุรีรัมย์

**การศึกษา** ปีการศึกษา 2545 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.โยธา) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ใน

ปีการศึกษา 2546 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ประสบการณ์** 2545 - 2546 วิศวกรโยธา (โครงการปรับปรุงและขยายกิจการประปาเทศบาล ตำบลหัวหิน อ.หัวหิน จ.ประจวบคีรีขันธ์)

2547 – 2548 ได้รับทุนผู้ช่วยสอน ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2548 – 2549 เป็นนิสิตช่วยวิจัย โครงการเส้นทางลัดสู่ภาคใต้ (สมุทรสาคร – แหลมผักเบี้ย- ชะอำ) หน่วยงานย่อย 3.5 - 3.6

2548 – 2549 ได้รับทุนวิจัย ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย