

ประสบการณ์ การศึกษา และผลงานการทดลอง

3.1 บทนำ

ความรุนแรงของปัญหาการกัดเซาะที่เกิดขึ้นต่อตอม่อสะพาน ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของ
ธรรมชาติแต่สามารถแก้ไขป้องกันหรือลดความรุนแรงลงได้ในขบวนการออกแบบ การกัดเซาะไม่ได้
เกิดขึ้นเฉพาะในประเทศไทย ประเทศอื่น ๆ ก็ประสบปัญหานี้เช่นกัน โดยเฉพาะประเทศในซีกโลก
ตะวันตกมีการศึกษาค้นคว้ากันตั้งแต่ปี 1950 ผลงานวิจัยปรากฏออกมามากมายในช่วงปี
1950-1975 เน้นหนักไปในด้านการศึกษาหาพฤติกรรมการกัดเซาะ และการคาดคะเนความลึก
การกัดเซาะ ส่วนประเทศในซีกโลกตะวันออกโดยเฉพาะประเทศญี่ปุ่น เริ่มทำการศึกษาวิจัยปัญหา
นี้ในช่วงปี 1970-1980 แต่เน้นหนักไปในด้านการศึกษาป้องกันการกัดเซาะ

สำหรับประเทศไทย ความสนใจในการสร้างผลงานวิชาการเกี่ยวกับการกัดเซาะยังมีน้อย
ไม่สมดุลงกับปริมาณโครงการที่ได้รับความเสียหายจากการกัดเซาะ หากจะรวบรวมผลงานวิจัยการ
ศึกษา การทดลอง หรือประสบการณ์ด้านการปฏิบัติของนักวิชาการต่างประเทศไว้ด้วยกัน เพื่อเป็น
แนวทางสำหรับดำเนินวิทยานิพนธ์นี้ อีกประการหนึ่งเพื่อให้ผู้สนใจนำไปศึกษาปฏิบัติสร้างประโยชน์
แก่ประเทศไทยโดยส่วนรวม

3.2 การศึกษาทั่วไปเกี่ยวกับกลศาสตร์กัดเซาะ

นักวิชาการหลายท่านเช่น Tison (1940), Keutner (1932), Posey
(1949), Laursen (1956), Neil (1964), Bata (1960) และ Roper
(1967) เป็นต้น ต่างให้ความเห็นว่าจุดเด่นของกระแสน้ำที่ไหลผ่านตอม่อจะปรากฏเป็นกระแส
น้ำวน (Eddy) ขนาดใหญ่ ปรับตัวไปตามรูปทรงของตอม่อ น้ำวนเหล่านี้เป็นจุดเริ่มของกลศาสตร์
แห่งการกัดเซาะขั้นพื้นฐาน ก่อให้เกิดเปลี่ยนแปลงแรงดัน (Pressure) ในกรณีที่แรงดันมาก
กระแสน้ำใน Boundary Layer จะแยกออกไป 3 ทิศทาง ตามแนวแกน X, Y, Z หนึ่ง
ในสามทิศทางคือทิศทางตามแกน Z กระแสน้ำมีแนวโน้มตัวลงไปตามผิวตอม่อในแนวตั้ง เกิดกระแสน้ำวน

ในรูปเกือกม้าเรียกว่า Horseshoe-Vortex System (ดูรูป 2-7 ก ประกอบ)

Schwind (1962) ได้บันทึกในผลการทดลองของเขาว่าในกระแสน้ำที่มีค่า Reynolds Number บางช่วง Horseshoe Vortex ก่อตัวขึ้นและทิ้งห่างเป็นระยะ ๆ คล้ายหยอยหากจำนวนมากเกาะและคลานไปตามผิวตอม่อ

Shen and Other (1966) ทดลองศึกษาพฤติกรรมกระแสน้ำวนอันเกิดจากตอม่อ พบว่าตอม่อที่ไม่ปรากฏ Horseshoe Vortex หลุมกักเขาระอบตอม่อจะไม่ปรากฏ แต่กลับไปปรากฏหลุมกักเขาระอบขนาดใหญ่ด้านท้ายน้ำหลังตอม่อ ซึ่งเป็นผลของกระแสน้ำวนอีกระบบหนึ่ง เรียกว่า Wake-Vortex System ทำหน้าที่คล้ายเครื่องดูดท้าวสตุทองน้ำเคลื่อนออกไป (ดูรูป 2-7 ข ประกอบ)

3.2.1 การศึกษาทดลองความเร็วกระแสน้ำและแรงเฉือนที่มีผลต่อการกักเขาระอบ

การศึกษาเกี่ยวกับการกักเขาระอบในระยะแรก ได้มีความสนใจต่อผลของความเร็วการไหลของน้ำและแรงเฉือนหรือแรงดูดต่อขนาดหรือความรุนแรงของการกักเขาระอบ จึงได้มีการกำหนดหลักการของความเร็ววิกฤต (Critical Pick-up Velocity หรือ Critical Velocity) และแรงเฉือนหรือแรงดูดวิกฤต (Critical shear or tractive force) นิยามได้ว่าเป็นความเร็วหรือแรงต่ำสุดที่จะทำให้เม็ดวัสดุทองน้ำเริ่มลอยตัวและมีศักยภาพต่อการถูกพัดพา ซึ่งได้มีการศึกษาสรุปได้ดังต่อไปนี้

L.G. du Buat (1816) กำหนดค่าความเร็วกระแสน้ำวิกฤต (Critical Pick-up Velocity) ที่พอดีทำให้วัสดุทองน้ำเคลื่อนที่ ในวัสดุทองน้ำชนิดต่าง ๆ ดังตาราง 3-1

A. Brahms (1753) เป็นคนแรกที่กำหนดค่าความเร็วกระแสน้ำวิกฤตที่พอดีทำให้วัสดุทองน้ำเคลื่อนที่ ให้ออกมาในรูปของสมการโดยให้สัมพันธ์กับน้ำหนักวัสดุทองน้ำ คือ

$$V_c = KW^{1/6} \quad (3.1)$$

V_c = ความเร็ววิกฤตของกระแสน้ำที่พอดีทำให้วัสดุเคลื่อนตัว

W = น้ำหนักวัสดุในน้ำ (Submerge weight)

K = ค่าคงที่

W. Airy (1834) ให้ความสนใจกับสมการหาค่าความเร็ววิกฤตนี้เช่นกัน โดยศึกษาสมการจากความสัมพันธ์ของแรงพื้นฐานที่กระทำต่อวัสดุทรงกลมคือแรงกระทำ (Tractive force) และแรงเสียดทาน (Friction force) นำแรงสองชนิดนี้มาเข้าสมการจะให้ผลค่าความเร็ววิกฤตในรูปกำลังสองคือ

$$v_c^2 = 33.1 (\gamma_B - \gamma) D \quad (3.2)$$

γ_B = Specific weight of material

γ = Specific weight of water

D = รัศมีของวัสดุท่อน้ำ

Schoklitsch ทดลองเกี่ยวกับค่าการเคลื่อนตัวของวัสดุเช่นกัน แต่ทำออกมาในรูปของแรงเฉือน (Shear force) ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในตาราง 3-2 และได้กำหนดสมการของแรงเฉือนวิกฤตในระบบเมตริกคือ

$$\tau_c = \gamma_H S_c \quad (3.3)$$

$$= \sqrt{0.385 (\gamma_B - \gamma) W \zeta}$$

ζ = "Form factor" ของวัสดุลำนน้ำเช่น

ตาราง 3-1 ความเร็ววิกฤตที่ทำให้วัสดุชนิดต่างๆเคลื่อนที่

No.	Material	Velocity (cms./sec)
1.	Potter's Clay	10.6
2.	Coarse Sand	21.6
3.	Gravel and Sand abstracted from the channel of the seive:	
	a) Size of aniseed	10.8
	b) Size of peas	18.9
	c) Size of marsh-plants beans	32.5
4.	Sea pebbles, about ϕ 1" or more	65.0
5.	Sharp-edged flint of the size of an egg, and large	120

ตาราง 3-2 ค่าแรงเฉือนวิกฤต τ_c ที่ทำให้วัสดุต่างๆเคลื่อนที่

No.	Material	τ_c (kg./m ²)
1.	Ordinary quartz sand 0.2 to 0.4 mm.	0.18-0.20
2.	Ordinary quartz sand 0.4 to 1.0 mm.	0.25-0.30
3.	Ordinary quartz sand up to 2 mm.	0.4
4.	Rounded quartz gravel 0.5 to 1.5 cm.	1.25
5.	Clayish soil	1.0-1.2
6.	Coarse gravel 4.0 to 5.0 cm.	4.8
7.	Flat limestone gravel 1 to 2 cm. thick, & 4 to 6 cm. long	5.6

Form factor ทรงกลม = 1.0

ทราย = 1.15-1.35

หินแตก = 3.1

Flint = 4.4

γ_s = Specific weight of material

γ = Specific weight of water

จากสมการที่ 3.3 สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ของแรงเฉือนวิกฤต (τ_c) และขนาดเม็ดวัสดุ (D) ได้ดังในรูป 3-1

Shield (1936) วิเคราะห์ปัญหาแรงเฉือนในชั้น Laminar boundary ติดกับผิวท้องน้ำ ซึ่งเชื่อว่าเป็นชั้นการไหลของน้ำที่เป็น Laminar flow ทำให้พบว่า

$$\frac{\tau_o}{(\gamma_s - \gamma)D} = \phi(D/\delta) \quad (3.4)$$

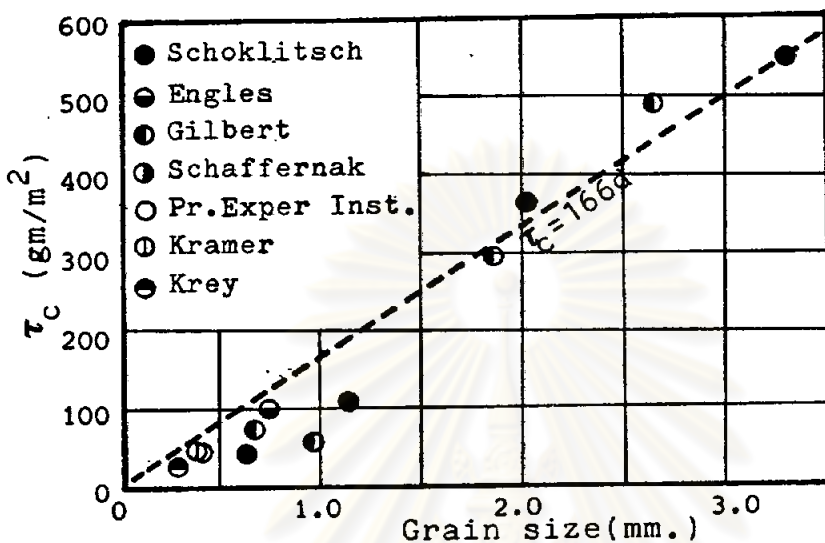
δ = ความหนาของชั้น Laminar boundary

τ_o = Drag force

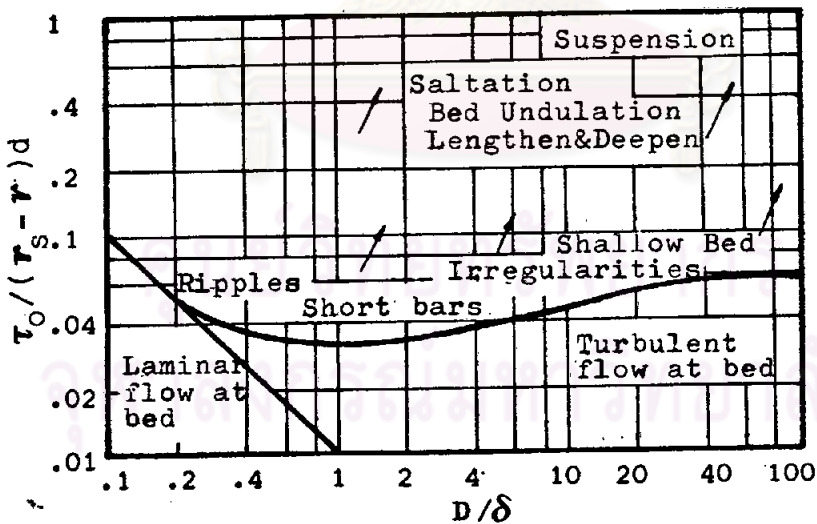
γ_s, γ = Specific weight of material, water

D = Size of material

จากสมการ 3.4 นี้ สามารถสร้างเส้นกราฟขึ้นมาเพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงเฉือนวิกฤตกับอัตราส่วนของขนาดวัสดุต่อความหนาของ Laminar layer (D/δ)



รูป 3-1 แสดงค่า τ_c ในสมการของเส้นผ่านศูนย์กลางวัสดุท้องน้ำ (จาก Leleavsky, 1955)



รูป 3-2 กราฟของShield แสดงค่า τ_c ในอัตราส่วนขนาดวัสดุต่อความหนาของLaminar layer (จากLeleavsky, 1955)

เรียกว่า Shields' diagram ตามที่ได้อธิบายไว้ในรูป 3-2

3.2.2 การศึกษาทดลองเกี่ยวกับความลึกกัดเซาะ

การกัดเซาะที่เกิดขึ้นในตำแหน่งตอม่อสะพาน ถูกจัดประเภทเป็นการกัดเซาะเฉพาะแห่ง (Local scour) และผลงานการศึกษาความลึกกัดเซาะ ส่วนใหญ่ไม่มีทฤษฎีอ้างอิงจึงต้องอาศัยข้อเท็จจริงจากธรรมชาติมาประยุกต์

Lacey (1931) ประมาณว่าค่าความลึกสูงสุดของหลุมกัดเซาะวัดจากผิวน้ำถึงก้นหลุมกัดเซาะ สามารถหาได้จากสมการที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกัดเซาะกับความลึกน้ำ ซึ่งเรียกว่า Lacey's regime depth (D_L) เป็นค่าที่ใช้เฉพาะในส่วนของลำน้ำที่เป็นส่วนตรงของคลองทรงเหลี่ยม (Prismatic canal) โดยเกี่ยวข้องกับปริมาณน้ำไหล คือ

$$D_L = 0.47(Q/f)^{1/3} \quad (3.5)$$

หรือ

$$D_L = 0.9(q^2/f)^{1/3} \quad (3.6)$$

Q = ปริมาณน้ำไหล (Total discharge)

q = ปริมาณน้ำไหลต่อหน่วยความกว้างของลำน้ำ

f = Lacey's silt factor = $1.76/D$

D = ขนาดวัสดุท้องน้ำ (มม.)

D_L เป็นสัดส่วนกับความลึกกัดเซาะสูงสุด ฉะนั้น ความลึกกัดเซาะสูงสุด จึงสามารถหาได้จากสมการของ Khosla (1936) คือ

$$S_m = K D_L \quad (3.7)$$

S_m = ความลึกกักเขาส่งสูงที่สุด

K = ค่าคงที่ตามชนิดของสิ่งก่อสร้าง

Inglis(1949) ให้เหตุผลในเวลาต่อมาว่า การที่ความลึกกักเขาส่งสูงที่สุดเป็นสัดส่วนกับ Lacey's regime depth (D_L) เป็นผลมาจากการหักเหของกระแสน้ำที่ไหลมากระทบตอม่อสะพาน ลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิต ทำให้มุมหักเหแตกต่างกันไปเป็นที่มาในความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์ (K) และค่า K ที่สำคัญ ได้แก่

ก. ความลึกกักเขาส่งสูงที่สุด (S_m) ด้านท้ายน้ำของตอม่อ ค่าคงที่ K มีค่าเท่ากับ 4 สมการ 3.7 จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$S_m = 4 D_L \quad (3.8)$$

ข. ความลึกกักเขาส่งรอบ ๆ ตอม่อสะพาน ค่าคงที่ K มีค่าเท่ากับ 2 สมการที่ 3.7 เขียนใหม่ได้เป็น

$$S_m = 2 D_L \quad (3.9)$$

กรณีลำน้ำธรรมชาติ ความลึกกักเขาส่งสูงที่สุดสามารถหาได้เมื่อทราบปริมาณการไหลในลำน้ำนั้น Inglis จึงได้ให้สมการไว้คือ

$$\frac{S_m}{b} = 1.7 \left(\frac{q^{2/3}}{b} \right)^{0.78} \quad (3.10)$$

b = ความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของตอม่อสะพาน

q = ปริมาณน้ำไหลต่อหน่วยความกว้างของลำน้ำ

นอกจากนี้ Lacey ยังได้คิดสูตรหาค่า $Openning$ ของลำน้ำในรูปความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำไหล ซึ่งมีผลต่อตำแหน่งที่ตั้งของสะพาน โดยมีค่า Lacey's Coefficient เป็นค่า คงที่ดังในสมการ 3.11

$$P = CQ^{1/2} \quad (3.11)$$

P = Wetted perimeter

Q = Discharge

C = $\frac{8}{3}$ สำหรับคลองที่มีทรายเป็นวัสดุท้องน้ำ

⇒ = 1.8 สำหรับคลองที่ประกอบด้วยวัสดุที่ค่อนข้างมั่นคง

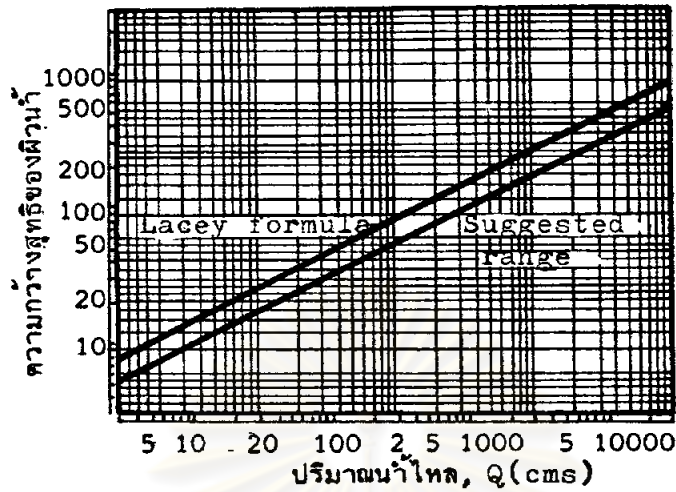
และจากสมการ 3.11 นี้สามารถนำมาสร้างเป็นกราฟเพื่อความสะดวกในการใช้ โดยสร้างกราฟระหว่างค่า Openning กับค่า Q ตามรูป 3-3

Chabert and Engledinger (1956) ศึกษาทดลองการกัดเซาะในสภาวะที่เป็นน้ำใส (Clear water condition) พบว่า ความลึกกัดเซาะสัมพันธ์กับแรงดูด (Tractive force) เป็นเส้นตรง หากกัดเซาะต่อไปจนถึงขั้นต้องอาศัยแรงดูดวัสดุให้ลอยตัว ค่าความลึกขณะนั้นนับเป็นค่าความลึกสูงสุด (Maximum Scour depth) ขณะเดียวกันแรงดูดที่มีความรุนแรงมากกว่านี้ ซึ่งสามารถย้ายคลื่นท้องน้ำ (Dune) จากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ นั้นหมายความว่าความลึกกัดเซาะเริ่มให้ค่าขึ้น ๆ ลง ๆ (Periodically) แต่ให้ค่าความลึกกัดเซาะสมดุล (Equilibrium) เพียงค่าเดียว

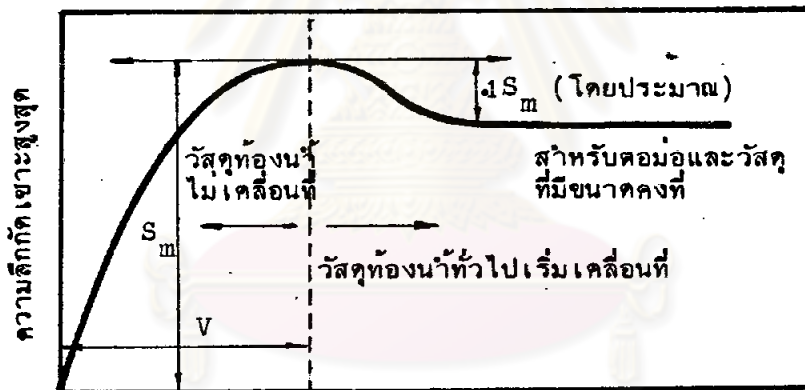
สรุปได้ว่า ความลึกของการกัดเซาะได้ค่าตามความเร็ว มีพฤติกรรมแตกต่างตามชนิดของการกัดเซาะดังแสดงในรูป 3-4, 3-5

Laurson (1960) ได้ทดลองการกัดเซาะในภาวะที่กระแสน้ำมีวัสดุปะปนมาด้วย พบว่า ความลึกกัดเซาะขึ้นอยู่กับความลึกน้ำ รูปทรงตอม่อ แต่ไม่เกี่ยวข้องกับความเร็วกระแสน้ำ และได้กราฟตามที่ได้แสดงไว้ในรูป 3-6 ขณะเดียวกัน Laurson ได้ศึกษาความลึกกัดเซาะในส่วนของหน้าตัดลำน้ำที่ตื้นเล็กน้อย เช่น ช่วงสะพาน สมการจากการวิเคราะห์หน่วย (Dimensional Analysis) ดังนี้ (หน่วยอังกฤษ)

$$\frac{h_2}{h_1} = \left(\frac{Q_t}{Q_c} \right)^{C_1} \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{C_2} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^{C_3} \quad (3.12)$$

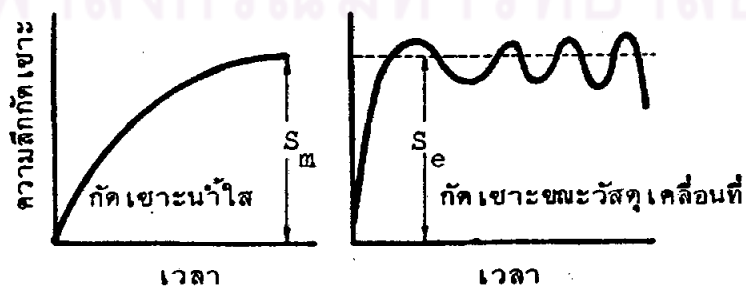


รูป 3-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Q ต่อความกว้างผิวหน้า (Lacey, 1931)

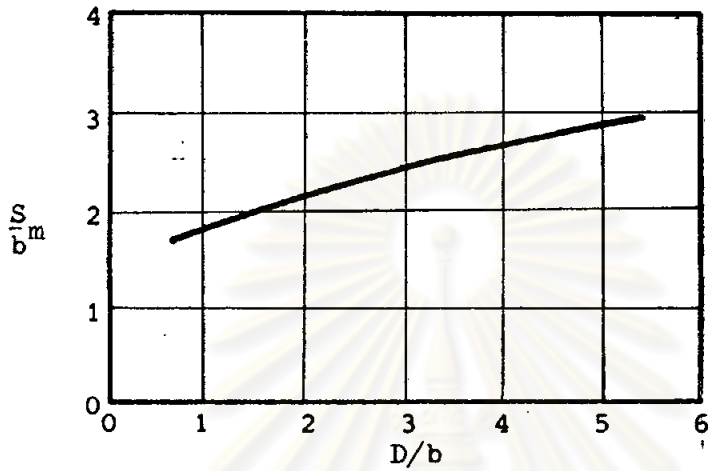


ความเร็วกระแสน้ำโดยเฉลี่ย, V

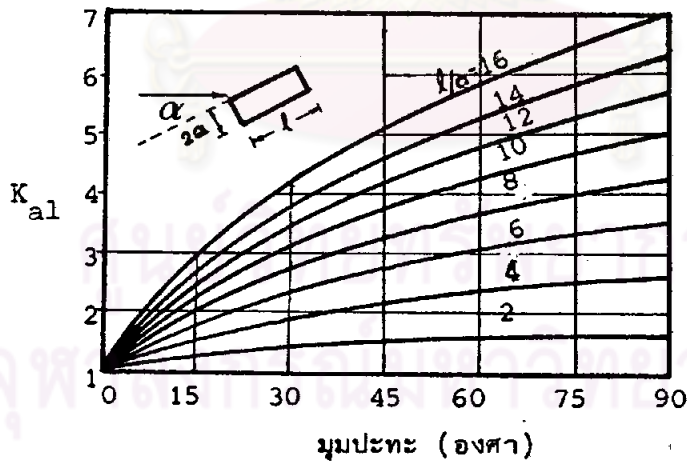
รูป 3-4 ความสัมพันธ์ความลึกการกักเขาะกับความเร็วกระแสน้ำ (Chabert & Engeldinger, 1956)



รูป 3-5 ความลึกกักเขาะแปรเปลี่ยนตามเวลา (Chabert & Engeldinger, 1956)



รูป 3-6 ความลึกกักเขาะสมมูลย์ ณ คอม่อสะพาน (Laurson, E.M., 1960)



รูป 3-7 ค่าคงที่สำหรับออกแบบของคอม่อที่ไม่ได้วางอยู่ในแนวทิศทางการไหลของกระแส (Laurson & Toch, 1956)

$$C_1 = \frac{6}{7}$$

$$C_2 = \frac{6(2+f)}{7(3+f)}$$

$$C_3 = \frac{6f}{7(3+f)}$$

Q_c = อัตราการไหลของน้ำด้านเหนือน้ำ

Q_t = อัตราการไหลของน้ำช่วงจุดตั้งสะพาน

B = ความกว้างของลำน้ำ

n = Manning roughness coefficient

f = 0.25 สำหรับ $U^*/\omega < 0.5$

= 1.0 สำหรับ $U^*/\omega = 1.0$

= 2.25 สำหรับ $U^*/\omega > 2.0$

U^* = Shear Velocity

ω = Fall velocity ของวัสดุขนาด D_{50}

ต่อมาในปี 1963 Laursen ได้ทำการทดลองใหม่ แต่จำกัดภาวะกระแสน้ำเป็นชนิดน้ำใส (Clear water) โดยใช้วัสดุในการทดลองเป็นทรายขนาด 3.0 มม. ทำให้เขาพบว่าความเร็วกระแสน้ำและขนาดของตอม่อมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อผลการกัดเซาะในการนี้ เขาได้สร้างสมการความสัมพันธ์ขึ้นใหม่คือ

$$\frac{S}{h_1} = \left[\frac{B_1}{B_2} \right]^{6/7} \left[\frac{v_1^2}{120h_1^{1/3} D_{50}^{2/3}} \right]^{3/7} - 1 \quad (3.13)$$

S = ความลึกจุดกัดเซาะ (ft)

h_1 = ความลึกน้ำ (ft)

B_1, B_2 = ความกว้างของลำน้ำในแต่ละจุด (ft)

D_{50} = ค่าเฉลี่ยของขนาดวัสดุท้องน้ำ (ft)

V_1 = ความเร็วกระแสน้ำด้านหน้า (fps)

ในปีเดียวกันนั้นเอง Larras ก็ได้พบว่าความลึกกัดเซาะสามารถหาได้จากสมการ
ในรูปของความกว้างตอม่อ

$$S_m = 1.42 K b^{0.75} \quad (3.14)$$

b = ขนาดตอม่อ

K = 1 สำหรับตอม่อรูปวงกลม

= 1.4 สำหรับตอม่อรูปทรงเหลี่ยม

โดยตำแหน่งของตอม่อจะวางขนานกับกระแสน้ำ ข้อคิดเห็นของ Larras
ตรงกับความคิดของ Breusers (1965) ซึ่งกำหนดไว้ว่า

$$S_e = 1.4 b \quad (3.15)$$

ส่วน Neil (1973) สรุปสูตรทั่วไปสำหรับตอม่อรูปทรงต่าง ๆ ไว้ในสมการที่ 3.16

$$S_e = K b \quad (3.16)$$

ค่า K เปลี่ยนแปลงตามรูปทรงของตอม่อตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 3-3

Maza Alvarez และ Sanchez (1964) ศึกษาสมมติฐานของ Laursen
และ Yaroslavtsev (1960) พร้อมทั้งทำการทดลอง จนสรุปได้ว่าการคำนวณความลึกกัด
เซาะสูงสุด สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1. วิธีที่หนึ่ง ใช้สมการที่วิเคราะห์ได้จากสมการของ Yaroslavtsev

คือ

$$\frac{S}{b^e} = K_1 K_2 \frac{V^2}{gb} - \frac{30 D}{b} S \quad (3.17)$$

b = ขนาดของคอม่อ

K_1, K_2 = ค่าสัมประสิทธิ์ของมุมปะทะและความเร็วกระแสน้ำ
หาได้จากตาราง 3-4 และ 3-5

2. วิธีที่สอง ใช้สมมุติฐานของ Laursen โดยคอม่อทำมุมกับกระแสน้ำในค่า
ต่าง ๆ ค่าความลึกกัดเซาะเป็นผลคูณของ $K_{\alpha 1}$ ในรูป 3-7 กับค่า S_e ในรูป 3-8

Carstens (1966) ศึกษาความลึกกัดเซาะโดยอาศัยสูตรพื้นฐาน คือ

$$t = \int_0^{S_m} \frac{dV}{Q_s} \quad (3.18)$$

t = เวลา

V = ปริมาตรของหลุมกัดเซาะ

S_m = ความลึกกัดเซาะ

Q_s = ปริมาณวัสดุที่ถูกพัดพาออกจากหลุมกัดเซาะ

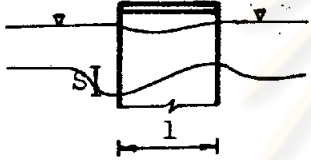
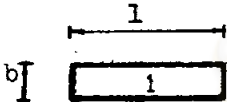
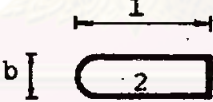

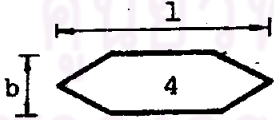
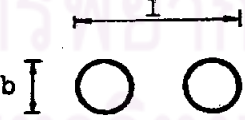
ผลการวิเคราะห์ ได้ให้สมการ 3.19 ดังนี้

$$4.10 \times 10^{-6} (N_s^2 - N_{se}^2)^{5/2} \left(\frac{D}{bg}\right) \left(\frac{U_t}{b}\right) =$$

$$\frac{\left[\frac{S}{b}\right]^5}{\text{tg} \phi} + \frac{\left[\frac{S}{b}\right]^4}{16} - \frac{\tan \phi \left[\frac{S}{b}\right]^3}{24} + \frac{\tan \phi \left[\frac{S}{b}\right]^2}{32} - \frac{(\tan \phi)^3 \frac{S}{b}}{32}$$

$$+ \frac{(\tan \phi)^4}{64} \times \ln \left[\frac{2 \left[\frac{S}{b}\right]}{\tan \phi} + 1 \right] \quad (3.19)$$

ตาราง 3-3 ค่าสัมประสิทธิ์ K สำหรับตอม่อรูปทรงต่างๆ ที่ตั้งขนานกับทิศทางการไหลของกระแสน้ำ (Neil, 1973)

มิติรูปทรงตอม่อ	สัมประสิทธิ์ K สำหรับการกัดเซาะเฉพาะ
	<p>ตอม่อรูปทรง 1 = 2.0 ตอม่อรูปทรง 2 = 1.5 ตอม่อรูปทรง 3 = 1.5 ตอม่อรูปทรง 4 = 1.2</p>
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>ก) ตอม่อมุมเหลี่ยม</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>ข) ตอม่อมุมกลม</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>3) ตอม่อทรงกระบอก</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start; margin-top: 20px;"> <div style="text-align: center;">  <p>4) ตอม่อมุมแหลม</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>5) กลุ่มตอม่อทรงกระบอก</p> </div> </div>	

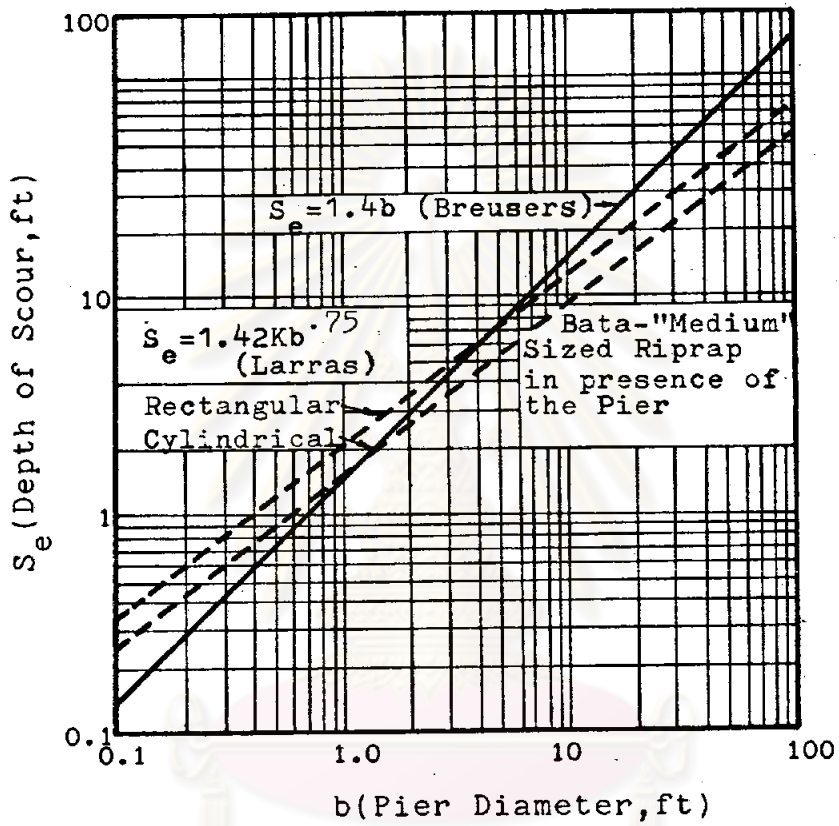
ตาราง 3-4 ค่าสัมประสิทธิ์ K สำหรับตอม่อรูปทรงต่างๆที่ตั้งท่ามุมกับทิศทางการไหล

รูปทรงตอม่อ	β (องศา)				
	0	10	20	30	40
รูปทรงวงกลม	10.0				
รูปทรงเหลี่ยม	8.5	8.7	9.0	10.3	11.3

ตาราง 3-5 ค่าสัมประสิทธิ์ K_2 ที่สัมพันธ์กับค่าความเร็ว ขนาดตอม่อ ความลึกน้ำ

h_1/b	v^2/gb			
	0.25	0.15	0.10	0.04
1.8	0.75	0.95	1.15	1.40
2.2	0.75	0.95	1.10	1.35
2.6	0.75	0.90	1.10	1.30
3.0	0.75	0.90	1.10	1.30

หมายเหตุ V = ความเร็วกระแสน้ำ, b = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตอม่อ, h = ความสูงน้ำ



รูป 3-8 ความลึกกัดเซาะสมมูลในค่าของความกว้างของตอม่อ
โดยสมมุติให้วางในแนวทิศทางกระแสน้ำ (จาก Shen,
1971)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

N_s = Sediment number

N_{se} = N_s ที่จุด Sediment transport = 0

b = เส้นผ่านศูนย์กลางของตอม่อ

ϕ = Angle of repose

S = ความลึกลับเกาะ

ซึ่งสมการที่ 3.19 นี้ สามารถเขียนเป็นกราฟได้ ตามที่แสดงไว้ในรูป 3-9 ส่วนความลึกลับเกาะสมมูล จะได้จากสมการ

$$\frac{S_e}{b} = 0.546 \left[\frac{N_s^2 - 1.64}{N_s^2 - 5.02} \right]^{5/6} \quad (3.20)$$

$$N_s = \frac{V}{\sqrt{\left[\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right] g D_g}}$$

D_g = ค่าเฉลี่ยของขนาดวัสดุท้องน้ำ

Liu et al (1961) ศึกษาทดลองการกัดเซาะ เฉพาะที่เกิดกับตอม่อริมฝั่ง ในกรณีที่ตอม่อริมฝั่งมีตอม่ออื่นอยู่ใกล้เคียง จะก่อจุดกัดเซาะอยู่ในตำแหน่งดังแสดงไว้ในรูปที่ 3-10

และค่าความลึกลับเกาะสมมูลที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากสมการ

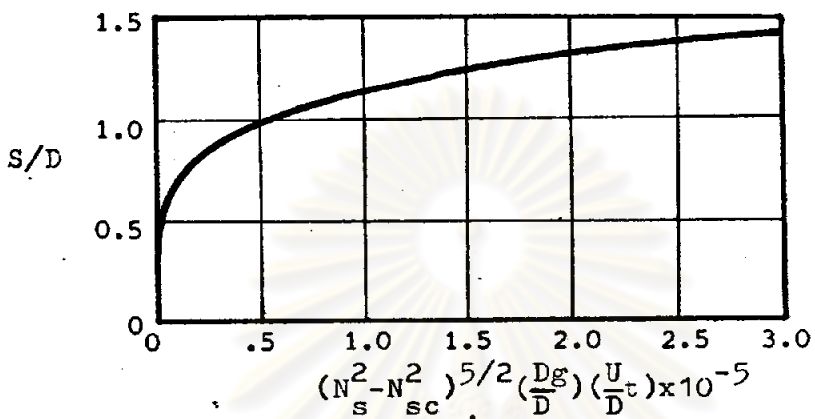
$$\frac{S_e}{h_1} = 1.1 \left[\frac{b}{h_1} \right]^{0.4} Fr^{0.33} \quad 0 < \frac{b}{h_1} < 25 \quad (3.21)$$

b = ความยาวของตอม่อริมฝั่ง

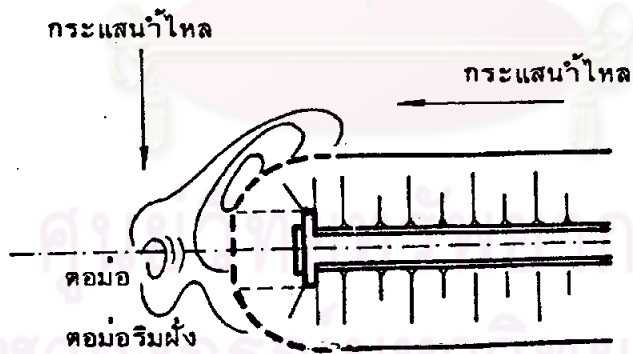
h_1 = ความลึกน้ำด้านเหนือหน้า

$Fr = \frac{V_1}{\sqrt{gh_1}}$ = Froude number ด้านเหนือหน้า

ถ้าตอม่อริมฝั่งมีลักษณะ เป็นกำแพงตั้งลงติดพื้นท้องน้ำ ความลึกลับเกาะจะให้ค่าเกือบ



รูป 3-9 ความลึกลับเขาระยะต่อเวลา



รูป 3-10 การกัดเขาระยะจุดที่ตั้งตอม่อริมฝั่งและตอม่อใกล้เคียง

เป็น 2 เท่า ของค่าที่ได้จากสมการที่ 3.21 คือ

$$\frac{S_e}{h_1} = 2.15 \left[\frac{b}{h_1} \right]^{0.4} Fr_1^{0.33} \quad (3.22)$$

สำหรับสมการที่เป็นผลวิเคราะห์จากข้อมูลที่ได้จากสนามจริงนั้นหาได้ยาก แต่ก็มีข้อมูลที่คล้ายคลึงกันรวบรวมไว้ เป็นข้อมูลจากคันกันน้ำ (Dikes) ในแม่น้ำ Mississippi สามารถให้ค่าเปรียบเทียบได้ว่า

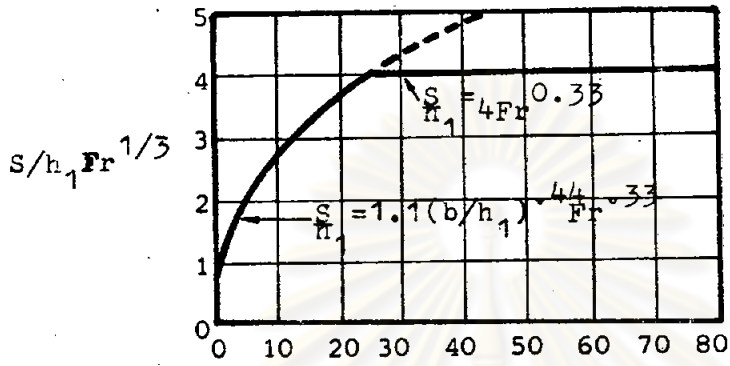
$$\frac{S}{h_1} = 4 Fr_1^{0.33} \quad \frac{b}{h_1} > 25 \quad (3.23)$$

จากสมการ 3.21, 3.23 สามารถเขียนเป็นกราฟสำหรับหาความสัมพันธ์ในคอม่อริมฝั่งตามรูป 3-11 สำหรับคอม่อริมฝั่งที่มีด้านข้างเอียงเป็นมุม ให้ค่าที่แตกต่างไปจากค่าอื่น ซึ่งจะได้ค่าตามในรูป 3-12

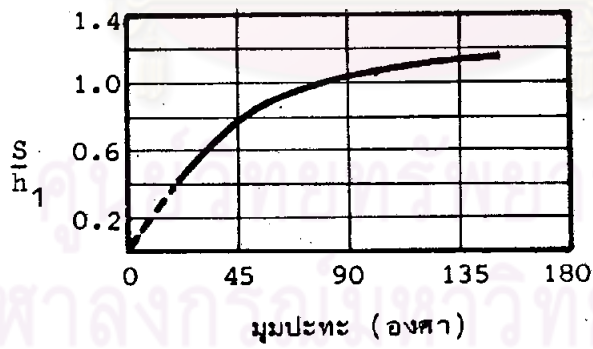
3.3 การศึกษาทดลองการป้องกันการกัดเซาะ

ผลการศึกษาพฤติกรรมการกัดเซาะและหลักการเพื่อคาดคะเนความลึกกัดเซาะ ทำให้สามารถรู้ถึงแนวทางกัดเซาะที่อาจเกิดขึ้น เพื่อให้การออกแบบสะพานสามารถปลอดภัยจากการกัดเซาะ จึงได้มีการศึกษาทดลองในเวลาต่อมาถึงการออกแบบคอม่อสะพานในรูปแบบที่จะช่วยให้การกัดเซาะลดลง โดยเฉพาะประเทศญี่ปุ่นมีนักวิชาการหลายท่านได้ให้ความสนใจค้นคว้าเรื่องนี้อย่างเอาจริงเอาจังและปรากฏผลงานดังนี้

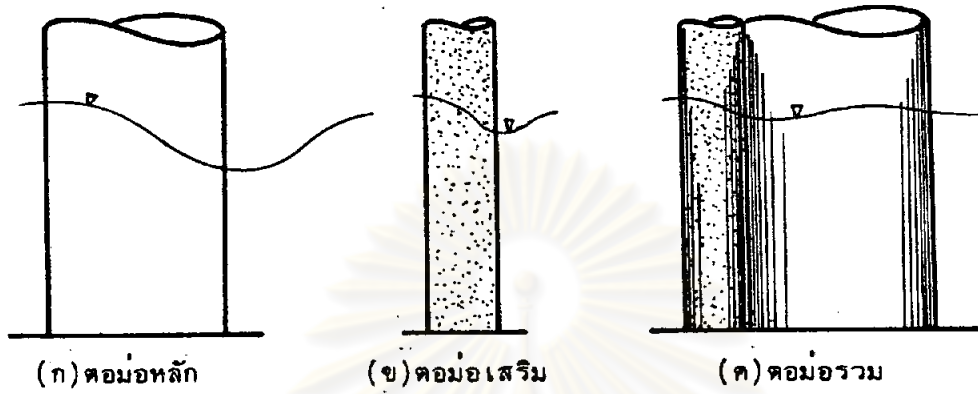
Hiroyoshi Shi-Igai (1973) ทำการศึกษารูปทรงของคอม่อสะพานโดยอาศัยความรู้ด้านสถาปัตยกรรมเกี่ยวกับการออกแบบรูปทรงเรือเดินสมุทรขนาดใหญ่ ที่ใช้ส่วนมนของสันหัวเรือแหวกฝ่าคลื่นน้ำที่เข้ามาปะทะ โดยให้ข้อสังเกตว่าขณะที่กระแสน้ำปะทะคอม่อ จะเกิด Standing wave มีความสูงคลื่นระดับหนึ่งแตกต่างไปตามขนาดของคอม่อ ดังปรากฏในรูป 3-13 (ก) และ 3-13 (ข) คือ คอม่อใหญ่ ความสูงคลื่นของ Standing wave จะมาก ถ้าคอม่อเล็ก ความสูงคลื่นของ Standing wave จะน้อย เมื่อนำคอม่อสองขนาดมาไว้เรียงกันในแนวเดียวกับทิศทางกระแสน้ำไหล โดยให้คอม่อเล็กอยู่หน้าและคอม่อใหญ่อยู่หลัง Standing wave ที่เกิดในคอม่อแต่ละต้นจะรวมกันในลักษณะหักล้างซึ่งกันและกัน ความสูงคลื่นจะลดลง ตามที่ได้แสดงไว้ในรูป 3-13 (ค)



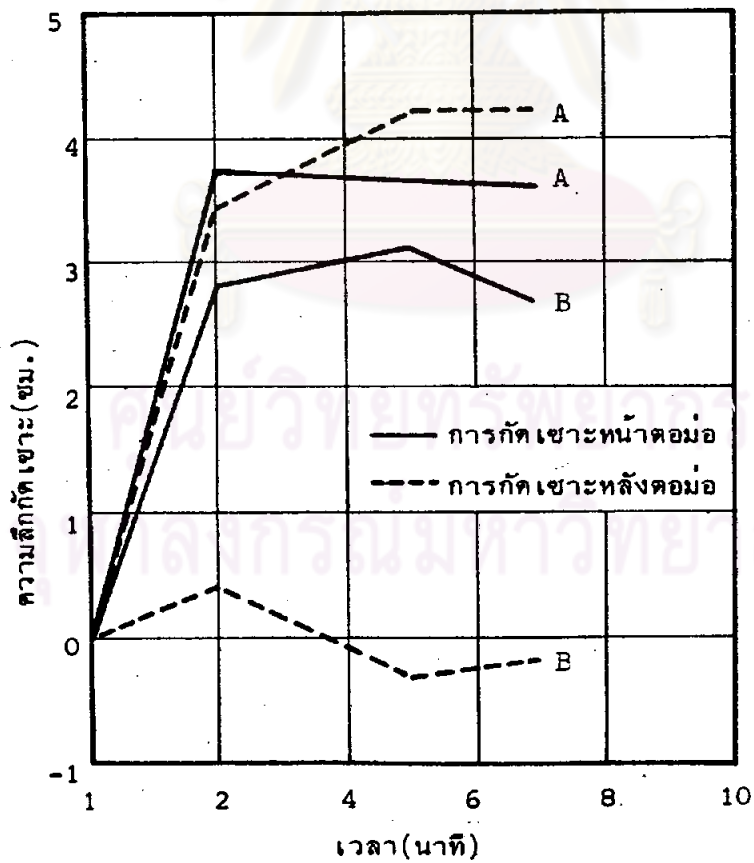
รูป 3-11 กราฟการคำนวณการกัดเซาะต่ออริมันต์
(Liu et al, 1961)



รูป 3-12 การลดค่ากัดเซาะสำหรับค่ามุมต่างๆ
(Ahmad, 1953)



รูป 3-13 ปรากฏการณ์การเกิด คลื่นเนื่องมาจากรูปทรงดอม่ต่อการไหล



รูป 3-14 การกักเซาะต่อเวลา

การทดลองได้ตั้งสมมุติฐานว่า การกัดเซาะเกิดจากคลื่นผิวน้ำ (Surface Wave) และคอม่อเล็กทำหน้าที่เป็นสันนมนของคอม่อใหญ่ ซึ่งเป็นคอม่อหลัก ผลการทดลองสรุปได้ว่า

1. ความลึกกัดเซาะ (S_m) ขึ้นอยู่กับขนาดคอม่อหลักและแปรผันตามขนาดของสันนมน (Bulb head) โดยกำหนดว่าสันนมนต้องมีขนาดเล็กกว่าคอม่อหลัก คอม่อที่มีสันนมนอยู่ด้วยการกัดเซาะลดลง

2. ในคอม่อที่มีสันนมนผสม (Deformed pier) จะไม่ปรากฏกัดเซาะทางด้านท้ายน้ำหรือมีก็น้อยมาก

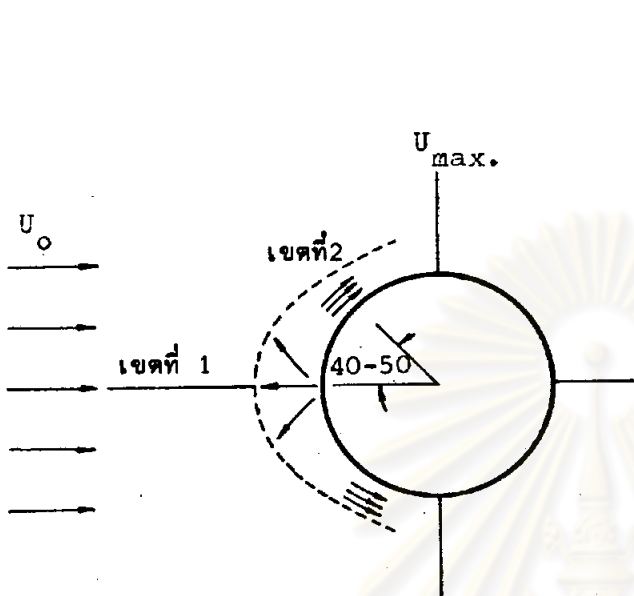
รูป 3-14 เป็นผลการทดลองที่เปรียบเทียบความลึกกัดเซาะทั้งบริเวณหน้าและหลังของคอม่อ โดยใช้ช่วงเวลาเป็นหลักแสดงความแตกต่างของคอม่อผสมกับคอม่อสันนมน (Deformed pier)

H. Kikkawa, S. Fukuoka, H. Sogawa (1973) กลุ่มผู้ศึกษามีความเห็นว่าการกัดเซาะเกิดขึ้น 2 ชั้นตอน โดยแยกเป็นกัดเซาะ 2 เมตร และกัดเซาะ 3 เมตร ซึ่งในชั้นตอน 2 เมตร ความเร็วสูงสุดเกิดที่ผิวคอม่อตำแหน่งจุดตั้งฉากกับน้ำไหล ถ้าเกิดการกัดเซาะ 3 เมตร จุดกัดเซาะที่รุนแรงจะปรากฏในบริเวณด้านหน้าของคอม่อ ช่วง $40^\circ - 50^\circ$ จากแนวศูนย์กลางทั้งซ้ายและขวา ตามรูป 3-15 สภาวะของน้ำจะมีค่า $Fr > 0.25$

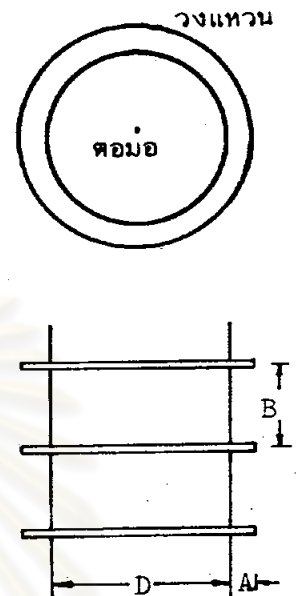
การศึกษาได้ทำทางแก้ปัญหาด้วยการออกแบบสิ่งป้องกันกัดเซาะรอบคอม่อ (Guard) โดยทำเป็นวงแหวนสวมลงที่คอม่อสกัดกันกระแสน้ำในมิติที่ 3 คือมิติตามแนวแกน Z เป็นหลัก สวมวงแหวนเป็นชั้น ๆ ท่างกันในระยะ B ตามที่ปรากฏในรูป 3-16 ผลการทดลองหาออกมาในค่า B/A ซึ่งผลการทดลองสรุปได้ว่า $B/A = 3$ ให้ผลการลดความลึกการกัดเซาะที่มีประสิทธิภาพที่สุดตามที่ได้แสดงไว้ในรูป 3-17 ส่วนในรูป 3-18 แสดงถึงความลึกกัดเซาะที่ลดลงเมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี

3.4 การศึกษาการกัดเซาะของท่อ (Culvert)

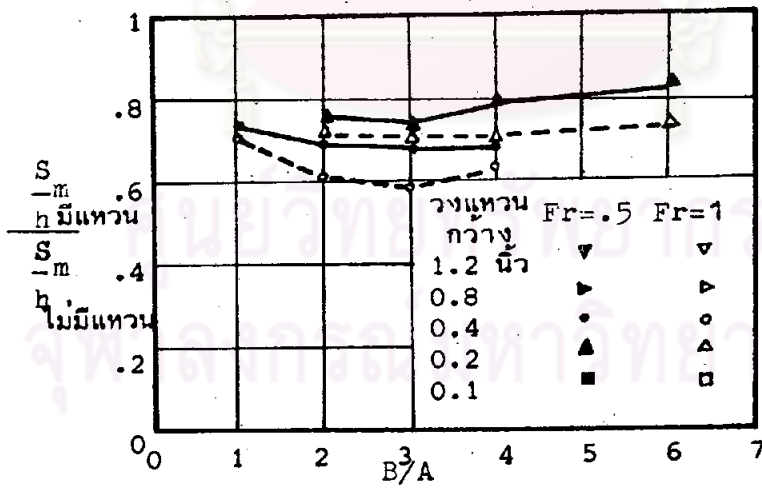
ปัญหาการกัดเซาะในท่อลอด ท่อเหลี่ยม มักเกิดกับบริเวณปากทางออกของน้ำไหลและลามเข้าไปถึงดินที่รองรับท่อ ทำให้ท่อทรุดตัวและพัง ตัวแปรสำคัญได้แก่ขนาดของท่อ (D) อัตราปริมาณน้ำไหล (Q) และวัสดุรองรับ การค้นคว้าเกี่ยวกับเรื่องนี้ มีทั้งดินที่เป็น Cohesive และ



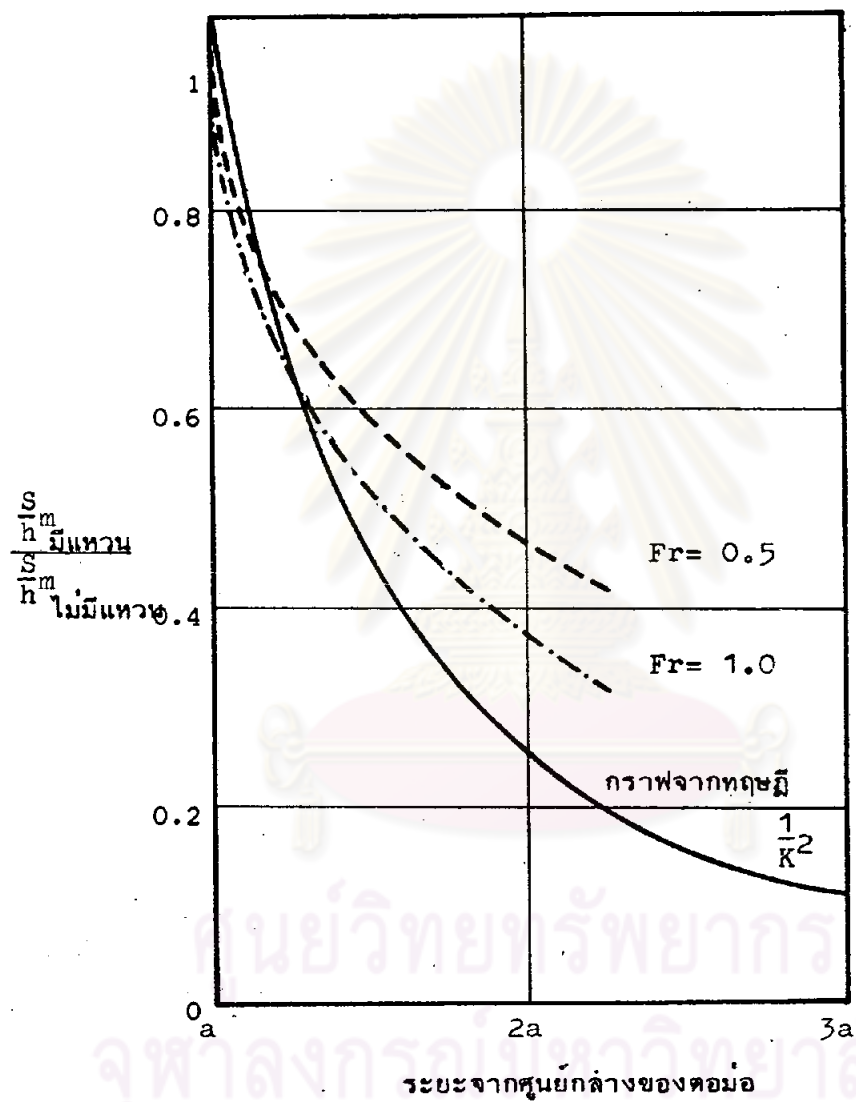
รูป 3-15 ผังการเคลื่อนที่ของทรายผ่านตอม่อ



รูป 3-16 รูปทรงของตอม่อที่สวมวงแหวนป้องกันการกัดเซาะ



รูป 3-17 กราฟแสดงผลของอัตราส่วนต่อความลึกกัดเซาะ



รูป 3-18 กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองความลึกกักเขาะ
สำหรับตอม่อที่มีแหวนกับทฤษฎี

Cohesiveless material

Bohan (1970) ทดลองท่อที่ยื่นออกและปล่อยน้ำลงบนวัสดุที่เป็นทราย (Sand bed) ทรายที่ใช้มีขนาดเฉลี่ย 0.22 มม. และมีความเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงเรขาคณิต $\sigma = (D_{84}/D_{16})^{1/2} = 1.31$ จุดมุ่งหมายของการทดลองคือสภาพและขนาดของการกัดเซาะด้านท้ายน้ำ ในคุณลักษณะต่าง ๆ ของน้ำเกี่ยวกับขนาดของท่อ ปริมาณน้ำไหล และ Froude number $(V^{-1/2} \cdot D^{-1/2})$ การทดลองให้ผลได้ทราบว่าขนาดของการกัดเซาะถูกจำกัดโดยสภาพน้ำด้านท้ายน้ำ และระดับน้ำด้านท้ายน้ำที่อยู่ต่ำกว่าจุดศูนย์กลางของท่อจะเป็นเหตุให้เกิดการกัดเซาะที่รุนแรง

Fletcher & Grance (1972) ทั้งสองร่วมกันทดลองต่อเนื่องในส่วนการทดลองของ Bohan โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความลึก ความกว้าง ความยาว และปริมาตรกัดเซาะกับเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ (D) อัตราส่วนของอัตราการไหลกับขนาดท่อ $(Q/D^{5/2})$ และเวลาของการไหล จุดประสงค์เพื่อศึกษาขอบเขตการกัดเซาะ และทำสูตรสำเร็จเพื่อคาดคะเนการกัดเซาะใน Cohesive material

Steven R. Abt และ James F. Ruff (1982) ได้ทดลองโดยใช้วัสดุที่เป็น Sand Clay material มี Liquid Limit = 34, Plastic Limit (PL) = 19, และ Plasticity Index (PI) = 15 ขนาดของวัสดุเฉลี่ย 0.15 มม. ความเร็วน้ำ 0.08 ฟุตต่อวินาที จากการทดลองพบว่ารูปทรง ของหลุมกัดเซาะจะปรากฏคล้ายคลึงกันคือเป็นวงกลม แต่จะเข้าใกล้วงรีเมื่ออัตราปริมาณการไหลเพิ่มขึ้น ผลประการต่อมา แสดงว่าความลึกกัดเซาะสูงสุดจะประมาณ $0.35L_m \pm 0.05 L_m$ ซึ่ง L_m เป็นความยาวสูงสุดของหลุมกัดเซาะ จากปากทางของท่อ อย่างไรก็ตามนักทดลองทั้งสองได้ให้ค่าคุณลักษณะของมิติ (Characteristic Dimension - CD) ไว้ในรูปที่สัมพันธ์กับแรงเฉือนของวัสดุท้องน้ำและความสัมพันธ์กับช่วงเวลากัดเซาะคือ

$$CD = a \left[\frac{\rho V^2}{\tau_c} \right]^b \quad (3.24)$$

และ

$$CD = a \left[\frac{1}{s_n} \right]^{b'} \left[\frac{t}{t_0} \right]^c \quad (3.25)$$

CD = Characteristic dimension ; $\frac{S}{D}$, $\frac{W}{D}$, $\frac{L}{D}$, $\frac{Vol}{D^3}$

S = ความลึกหลุมกักเขาะ

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ

W = ความกว้างหลุมกักเขาะ

L = ความยาวหลุมกักเขาะ

Vol = ปริมาตรหลุมกักเขาะ

a = a regression Coefficient

b' = The slope of the linearized plot

b = The slope of the desired characteristic curve

c = The slope of the desired time relationship

S_n = Shear number

ค่า a, b', c สามารถหาได้จากตาราง 3-6 ข้างล่างนี้

สมการที่ 3.24 และ 3.25 สามารถเขียนเป็นกราฟได้เป็นรูป 3-19 และ 3-20

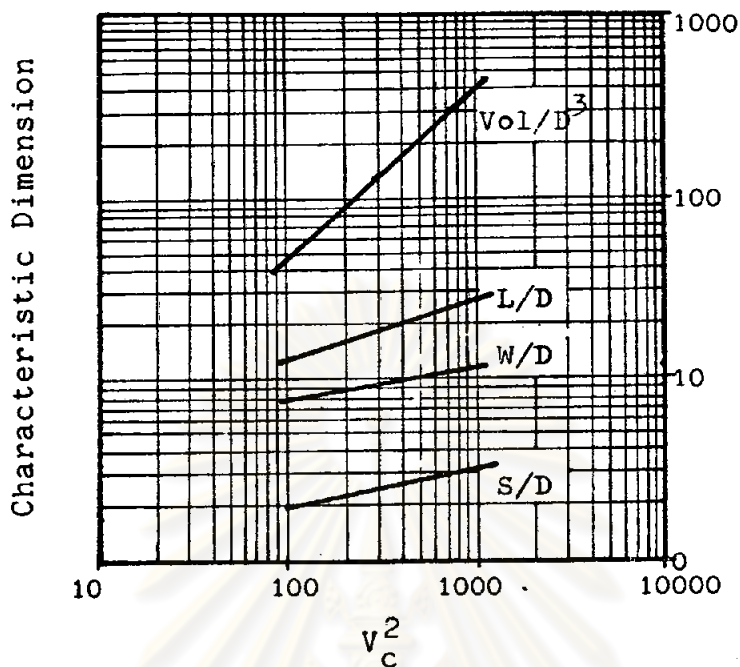
ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

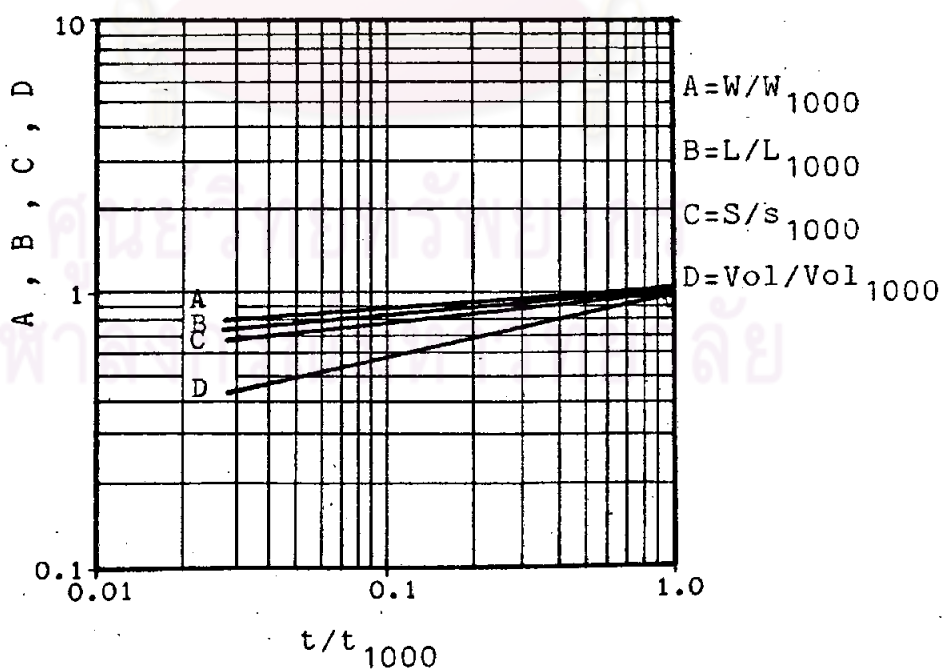
ตาราง 3-6 สัมประสิทธิ์ประกอบสมการ 3.24 , 3.25

Characteristic Dimension	a	b	c
S/D	0.86	0.18	0.10
W/D	3.55	0.17	0.07
L/D	2.82	0.33	0.09
Vol/D ³	0.62	0.93	0.23

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 3-19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ Shear number กับค่าของ $S/D, L/D, Vol/D^3$



รูป 3-20 กราฟแสดงการกัดเซาะต่อเวลา