คุณสมบัติทางวิศวกรรมของกากของเสียจากอุตสาหกรรมกระดาษ

นางสาวกฤติยา ไชยม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-1158-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ENGINEERING PROPERTIES OF WASTES FROM PAPER MILLED INDUSTRY

Miss.Krittiya Chaiyom

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2002
ISBN 974-17-1158-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์ คุณสมบัติทางวิศวกรรมของกากของเสียจากอุตสาหกรรมกระดาษ
โดย นางสาวกฤติยา ไชยม
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวี ธนะเจริญกิจ)

.... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรฉัตร สัมพันธารักษ์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กฤติยา ไชยม : คุณสมบัติทางวิศวกรรมของกากของเสียจากอุตสาหกรรมกระดาษ. (ENGINEERING PROPERTIES OF WASTES FROM PAPER MILLED INDUSTRY) อ. ที่ปรึกษา: ผศ.ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล, 83 หน้า. ISBN 974-17-1158-1.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของกากของเสียจากอุตสาหกรรมกระดาษ เพื่อใช้เป็นคุณสมบัติเบื้องต้นในการวิเคราะห์หาลักษณะการจัดวางกากของเสียในหลุมฝังกลบ ที่ทำให้เกิดผลกระทบในระยะยาวต่อหลุมฝังกลบกากของเสียน้อยที่สุด

กากของเสียที่ใช้ในการทดสอบเป็นกากของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมกระดาษ จำนวน 3 ชนิด คือ Lime Mud, Dreg และ Power boiler ash โดยทำการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้านกำลังรับน้ำหนัก, สมบัติทางด้านการไหลซึม และสมบัติทางด้านการเคลื่อนตัวของกากของเสียบดอัด ในห้องปฏิบัติการ และนำคุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบไปวิเคราะห์ เพื่อประมาณการทรุดตัวที่เกิดขึ้นหลังการฝังกลบด้วยโปรแกรมไฟไนท์อีลีเมนต์

ผลการทดสอบคุณสมบัติของกากของเสียบดอัดในห้องปฏิบัติการ พบว่า Lime Mud มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 13 kN/m^3 ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม 33% ไม่มีค่าความเชื่อมแน่นแต่มีค่ามุมต้านทานความเสียดทาน 44.8° มีค่า Drained Young's Modulus แปรผันตาม σ'_{vo} ดังสมการ $E' = -0.0214(\sigma'_{vo})^2 + 37.202(\sigma'_{vo}) + 1011.8$ สัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน 1×10^{-5} ซม./วินาที ส่วน Dreg มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 11 kN/m^3 ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม 43% มีค่าความเชื่อมแน่น 15.3 kN/m^2 ค่ามุมต้านทานความเสียดทาน 43.7° มีค่า Drained Young's Modulus แปรผันตาม σ'_{vo} ดังสมการ $E' = -0.014(\sigma'_{vo})^2 + 25.771(\sigma'_{vo}) + 707.05$ สัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน 8×10^{-6} ซม./วินาที และ Power boiler ash มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 5.6 kN/m^3 ที่ปริมาณความชื้นเหมาะสม 83% มีค่าความเชื่อมแน่น 16.8 kN/m^2 ค่ามุมต้านทานความเสียดทาน 42.2° มีค่า Drained Young's Modulus แปรผันตาม σ'_{vo} ดังสมการ $E' = -0.0176(\sigma'_{vo})^2 + 19.201(\sigma'_{vo}) + 1176.7$ สัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน 6.5×10^{-4} ซม./วินาที

ผลการวิเคราะห์ Vertical settlement และ Differential settlement ด้วยโปรแกรมไฟไนท์อีลีเมนต์ในสภาวะ Drained พบว่าลักษณะการจัดเรียงกากของเสียที่เหมาะสมที่สุด ได้แก่ การเรียงตามแนวนอน โดยให้ Dreg อยู่ด้านบนสุด รองลงมาคือ Lime Mud และ Power boiler ash ตามลำดับ ซึ่งวิธีนี้จะให้ค่า Maximum differential settlement น้อยที่สุด

ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา	ลายมือชื่อนิสิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา	2545		

4370210321 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: ENGINEERING PROPERTIES / VERTICAL SETTLEMENT / DIFFERENTIAL SETTLEMENT.

KRITTIYA CHAIYOM: THESIS TITLE. ENGINEERING PROPERTIES OF WASTES FROM PAPER MILLED INDUSTRY. THESIS ADVISOR: ASST..PROF.DR.SUPOT TEACHAVORASINSKUN, 83 pp. ISBN 974-17-1158-1.

The aim of this thesis is to study the engineering properties of wastes from the paper milled industry. This will be used for preliminary waste arrangement which causes the least differential settlement on landfill

Three types of wastes from paper milled industry, i.e., lime mud, dreg and power boiler ash, were used as the samples in this study. The engineering properties of the wastes, which are strength, permeability and deformation modulus, were obtained from the laboratory. Then, the properties were used in the analysis, using a computer program, so as to determine the vertical settlement and differential settlement under several wastes disposal arrangement.

Lime mud gains the maximum dry density of 13 kN/m^3 at the optimum moisture content of 33%. There is no cohesion intercept, but there is the friction angle of 44.8°. The Drained Young's Modulus of lime mud depends on σ'_{vo} followed $E' = -0.0214(\sigma'_{vo})^2 + 37.202(\sigma'_{vo}) + 1011.8$. The permeability of the lime mud is 1x10^{-5} cm./sec. Dreg gains the maximum dry density of 11 kN/m^3 at the optimum moisture content of 43%. The cohesion intercept of dreg is 15.3 kN/m^2 and the friction angle is 43.7°. The Drained Young's Modulus of dreg depends on σ'_{vo} followed $E' = -0.014(\sigma'_{vo})^2 + 25.771(\sigma'_{vo}) + 707.05$. The permeability of the dreg is 8x10^{-6} cm./sec. Power boiler ash gains the maximum dry density of 5.6 kN/m^3 at the optimum moisture content of 83%. The cohesion intercept of power boiler ash is 16.8 kN/m^2 and the friction angle is 42.2°. The Drained Young's Modulus of dreg depends on σ'_{vo} followed $E' = -0.0176(\sigma'_{vo})^2 + 19.201(\sigma'_{vo}) + 1176.7$. The permeability of the power boiler ash is 6.5x10^{-4} cm./sec.

The result of the analysis for the vertical settlement indicates that the most proper way to arrange the wastes is to lay them in layer with the dreg, the lime mud, the power boiler ash sequentially.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Civil Engineering Student's signature ____________

Field of study Civil Engineering Advisor's signature ____________

Academic year 2002

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาในหัวข้อวิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลงได้ ต้องขอกราบขอบพระคุณ ความเอาใจใส่ของบิดา มารดา และครอบครัว ที่ช่วยเหลือทั้งแรงกาย แรงใจ ทุนทรัพย์ และความห่วงใยเสมอมา

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้โอกาสในการทำวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้ความรู้ คำแนะนำ และให้คำปรึกษา ในปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นอย่างมากมาย ในการปฏิบัติงาน จนสามารถจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาสละเวลา และให้คำแนะนำ รวมทั้งให้ข้อคิดที่เป็นประโยชน์ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องวิจัยปฐพีกลศาสตร์ ทุกท่าน ที่ให้ความร่วมมือ และให้ความช่วยเหลือในการวิจัย ซึ่งต้องใช้ทั้งอุปกรณ์ และสถานที่ ในการปฏิบัติงาน จนงานสำเร็จได้ด้วยดี

และสุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ รุ่นพี่ และเพื่อน ๆ ทุกท่าน ในความเป็นเพื่อนร่วมงาน ในความช่วยเหลือ ในการเป็นผู้รับฟัง และให้คำแนะนำดี ๆ เสมอมา รวมทั้งผู้ที่ไม่ได้เอ่ยถึงในที่นี้ ที่มีส่วนร่วมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... จ
กิตติกรรมประกาศ .... ฉ
สารบัญ .... ช
สารบัญตาราง .... ญ
สารบัญรูป .... ฏ

บทที่ 1
บทนำ
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2.1 บทนำ 4
2.2 สมบัติทางด้านกำลังรับน้ำหนักของกากของเสีย 7
2.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด 7
2.2.2 ทฤษฎีการวิบัติ 7
2.2.3 การศึกษาที่ผ่านมาในอดีต 8
2.3 สมบัติในการไหลซึมของกากของเสีย 10
2.3.1 ทฤษฎีการไหลของน้ำกับการทดสอบสมบัติการไหลซึมในห้องปฏิบัติการ 10
2.3.2 การศึกษาที่ผ่านมาในอดีต 14
2.4 สมบัติทางด้านการเคลื่อนตัวของกากของเสีย 15
2.4.1 สาเหตุของการทรุดตัวของหลุมฝังกลบกากของเสีย 16
2.4.2 การทรุดตัวของหลุมฝังกลบเนื่องจากน้ำหนักของตัวเอง 16

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.3 การทรุดตัวช่วง primary compression 17
2.4.4 การทรุดตัวช่วง secondary compression 18
2.4.5 การศึกษาที่ผ่านมาในอดีต 19

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย
3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย 20
3.1.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ 20
3.1.2 การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของกากของเสียที่ใช้ในการทดสอบ 23
3.1.2.1 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ 23
3.1.2.2 การทดสอบการบดอัด 23
3.1.2.3 การทดสอบกำลังรับน้ำหนัก 25
3.1.2.4 การทดสอบความสามารถในการซึมผ่าน 29
3.1.2.5 การทดสอบคุณสมบัติที่เกี่ยวกับการเคลื่อนตัว 35
3.1.3 การวิเคราะห์ Vertical settlement และ Differential settlement ของหลุมฝังกลบกากของเสียด้วยวิธีการทางไฟไนท์อีลีเมนต์ (Finite element analysis) 36
3.1.3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับโปรแกรม PLAXIS 37
3.1.3.2 ขั้นตอนการศึกษา 39
3.2 แผนผังขั้นตอนการศึกษาวิจัย 42

บทที่ 4
ผลการทดสอบและการวิเคราะห์
4.1 ผลการทดสอบหาความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสมของกากของเสียด้วยวิธี Standard Proctor Compaction Test 43
4.2 ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของกากของเสียบดอัด 44
4.2.1 ผลการทดสอบหาค่า cohesion และ angle of friction โดยการทดสอบ Direct shear 44

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของกากของเสียบดอัด 49

4.4 ผลการทดสอบสมบัติด้านการเคลื่อนตัวของกากของเสียบดอัด 50

4.5 ผลการวิเคราะห์ Vertical settlement และ Differential settlement ของหลุมฝังกลบกากของเสียบดอัด ด้วยโปรแกรม PLAXIS 54

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา 76

รายการอ้างอิง 89

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 83

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

ตารางที่ 2.1 การจำแนกดินตามค่าความสามารถในการไหลซึมผ่าน (Terzaghi and Peck, 1967)....11
ตารางที่ 3.1 สรุปคุณสมบัติเบื้องต้นของกากของเสียที่ใช้ในการทดสอบ....21
ตารางที่ 3.2 แสดง parameter ที่ได้มาจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและที่มา เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางไฟไนท์อีลีเมนต์....40
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบบดอัดกากของเสียด้วยวิธี Standard Proctor Compaction Test....44
ตารางที่ 4.2 สรุปผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของกากของเสียทั้ง 3 ชนิด....45
ตารางที่ 4.3 สรุปค่า cohesion intercept และ friction angle ของกากของเสียบดอัดที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุดจากการทดสอบการบดอัด....48
ตารางที่ 4.4 สรุป parameter ที่ได้จากการทดสอบ Consolidation Test....51
ตารางที่ 4.5 สรุป parameter นำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PLAXIS....55
ตารางที่ 4.6 สรุปค่า Maximum vertical settlement และ Maximum differential settlement ในแต่ละวิธีการเรียงกากของเสีย....55

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูป หน้า

รูปที่ 2.1 ผลสำรวจสถานที่เก็บขยะมูลฝอยภายในประเทศไทย 114 แหล่ง (Ashford et al., 2000) 6
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบที่สำคัญของหลุมฝังกลบขยะมูลฝอย 7
รูปที่ 2.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของ municipal waste (Del Greco and Offeri ,1994) 9
รูปที่ 2.4 ผลจากการทดสอบ triaxial test ของกากของเสียบดอัดชนิดหนึ่ง (Fang and Slutter ,1976) 9
รูปที่ 2.5 การทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน (a) แบบแรงดันคงที่ (b) แบบแรงดันเปลี่ยน 13
รูปที่ 2.6 การทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านแบบผนังไม่ยืดหยุ่น (rigid wall,fixed wall) 14
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับการทรุดตัวของหลุมฝังกลบกากของเสียภายใต้น้ำหนักบรรทุก (S.Oweis and P.Khera,1998) 17
รูปที่ 3.1 Lime Mud 21
รูปที่ 3.2 Power Boiler Ash 22
รูปที่ 3.3 Dreg 22
รูปที่ 3.4 แบบ (Standard Mold) ที่ใช้ในการทดสอบการบดอัด ,Compaction (ASTM,1996) 24
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง dry unit weight กับ water content (Lambe,1951) 24
รูปที่ 3.6 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังรับแรงเฉือน 25
รูปที่ 3.7 รายละเอียดในการติดตั้งตัวอย่างก่อนเริ่มทดสอบกำลังรับแรงเฉือน 26
รูปที่ 3.8 การติดตั้งตัวอย่างก่อนเริ่มการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน 26
รูปที่ 3.9 รายละเอียดของเครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือน 27
รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress กับ shear displacement ของ dense sand และ loose sand (Manual of Soil Lab.V2,1982) 28
รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress กับ normal stress (Manual of Soil Lab.V2,1982) 28
รูปที่ 3.12 แผนภาพของชุดทดลองหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน 29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป หน้า

รูปที่ 3.13 กระบอกตัวอย่าง 30
รูปที่ 3.14 แผ่นให้แรงดันกดทับพร้อมแกนส่งน้ำ 31
รูปที่ 3.15 แผ่นพรุน 31
รูปที่ 3.16 แผ่นปิดบน 32
รูปที่ 3.17 แผ่นปิดล่าง 33
รูปที่ 3.18 ระบบแรงดันอากาศ 33
รูปที่ 3.19 การติดตั้งตัวอย่างก่อนเริ่มการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่าน 34
รูปที่ 3.20 ตัวอย่างที่นำไปประกอบเข้ากับระบบแรงดันอากาศ 35
รูปที่ 3.21 ขนาดของหลุมฝังกลบกากของเสียที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 41
รูปที่ 3.22 ขนาดของ mesh ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 41
รูปที่ 3.23 สรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 42
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นในการทดสอบบดอัด กากของเสียด้วยวิธี Standard Proctor Compaction Test 43
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress และ normal stress ของ Lime Mud ที่ความหนาแน่นแห้งต่าง ๆ ทั้งอัตราการเฉือน 0.5 มม./นาที และอัตราการเฉือนที่ทำให้เกิดการระบายน้ำ 45
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress และ normal stress ของ Dreg ที่ความหนาแน่นแห้งต่าง ๆ ทั้งอัตราการเฉือน 0.5 มม./นาที และอัตราการเฉือนที่ทำให้เกิดการระบายน้ำ 46
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress และ normal stress ของ Power boiler ash ที่ความหนาแน่นต่าง ๆ ทั้งอัตราการเฉือน 0.5 มม./นาที และอัตราการเฉือนที่ทำให้เกิดการระบายน้ำ 46
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง dry unit weight กับ friction angle ของกากของเสียทั้ง 3 ชนิด 48
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง dry unit weight กับ cohesion intercept ของกากของเสียทั้ง 3 ชนิด 49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป หน้า

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง permeability กับ pore volume ของกากของเสียทั้ง 3 ชนิด.......50
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง ε' กับ σ'_{vo} ของ Lime Mud ที่ความหนาแน่นแห้งต่าง ๆ 52
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง ε' กับ σ'_{vo} ของ Dreg ที่ความหนาแน่นแห้งต่าง ๆ 52
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง ε' กับ σ'_{vo} ของ Power boiler ash ที่ความหนาแน่นแห้งต่าง ๆ ...53
รูปที่ 4.11 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 1 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ........................58
รูปที่ 4.12 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 2 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ........................59
รูปที่ 4.13 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 3 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ........................60
รูปที่ 4.14 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 4 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ........................61
รูปที่ 4.15 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 5 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ........................62
รูปที่ 4.16 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 6 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ........................63
รูปที่ 4.17 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 7 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ........................64
รูปที่ 4.18 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 8 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ........................65
รูปที่ 4.19 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 9 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ........................66
รูปที่ 4.20 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 10 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ........................67
รูปที่ 4.21 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 11 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ........................68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป หน้า

รูปที่ 4.22 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 12 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ........................69
รูปที่ 4.23 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 13 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ........................70
รูปที่ 4.24 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 14 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ........................71
รูปที่ 4.25 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 15 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ........................72
รูปที่ 4.26 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 16 (ก), Vertical settlement (ข) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ..73
รูปที่ 4.27 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 17 (ก), Vertical settlement (ข) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ..74
รูปที่ 4.28 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 18 (ก), Vertical settlement (ข) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ..75

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน เนื่องจากมีจำนวนประชากรเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ของเสียที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์มีมากขึ้นและเป็นปัญหาที่สำคัญต่อสิ่งแวดล้อม เพราะของเสียเหล่านี้ก่อให้เกิดมลพิษต่อแหล่งน้ำ มลพิษทางอากาศ สุขอนามัยที่ไม่สมบูรณ์ของประชาชน รวมทั้งเกิดสภาพความไม่เป็นระเบียบเรียบร้อยของสังคม กากของเสียเกิดจากแหล่งกำเนิดใหญ่ ๆ 3 แหล่ง คือ แหล่งชุมชน พื้นที่เกษตรกรรม และโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งกากของเสียที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ มูลฝอย เศษวัตถุดิบ เศษผลิตภัณฑ์ สารเคมี น้ำเสีย เป็นต้น ซึ่งมีแนวโน้มสูงขึ้นทุกวัน

สำหรับการกำจัดกากของเสียที่เป็นของแข็ง มีวิธีการกำจัดอยู่ 3 วิธีหลัก ๆ คือ การเผา (Incineration), การนำกลับมาใช้ประโยชน์อีก (Recycle) และ การฝังกลบ (Landfill) การกำจัดของเสียด้วยวิธีการเผานั้นจะมีผลิตภัณฑ์ที่เหลือจากการกำจัด นั่นคือ เถ้าถ่าน ซึ่งจำเป็นจะต้องนำไปกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบต่อไป ส่วนการนำกลับมาใช้ประโยชน์อีกในทางปฏิบัติแล้วมีของเสียไม่กี่ชนิดที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์อีก เนื่องจากมีการปนเปื้อนมากเกินไป การฝังกลบจึงเป็นที่นิยมมาก เพราะทำได้ไม่ยาก การลงทุนครั้งแรกและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการถูก นอกจากนี้ ที่ดินที่ใช้ในการฝังกลบยังสามารถใช้ประโยชน์ได้ต่อไป เช่น ก่อสร้างสนามเด็กเล่น สวนสาธารณะ ที่จอดรถ เป็นต้น แต่เนื่องจากการทำหลุมฝังกลบกากของเสียนั้นมักมีปัญหาด้านการทรุดตัวไม่เท่ากันบริเวณผิวบนของหลุมฝังกลบ ซึ่งปัญหานี้ทำให้เกิดอันตรายต่อโครงสร้างที่อยู่ด้านบนหลุมฝังกลบได้ โดยเฉพาะความเสียหายที่เกิดขึ้นกับวัสดุปกคลุม (Cap) ซึ่งทำหน้าที่สำคัญหลายอย่าง เช่น ป้องกันไม่ให้น้ำผิวดินซึมผ่านลงไปภายในหลุมฝังกลบ ควบคุมแก๊สที่เกิดจากกากของเสียไม่ให้ระบายสู่อากาศซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มทัศนียภาพของพื้นที่ดินที่ใช้ทำหลุมฝังกลบกากของเสียอีกด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาถึงสมบัติทางวิศวกรรมของกากของเสียบดอัด เพื่อนำไปวิเคราะห์ Vertical settlement และ Differential settlement ที่เกิดขึ้น จากการจัดเรียงกากของเสียแบบต่าง ๆ ภายในหลุมฝังกลบ เพื่อให้ทราบถึงวิธีการจัดเรียงกากของเสียที่เหมาะสมที่สุดที่

สามารถนำมาใช้จริงในสนาม ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้างต่าง ๆ ที่อยู่ด้านบนหลุมฝังกลบน้อยที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของกากของเสียบดอัดเพื่อเป็นคุณสมบัติพื้นฐาน ในการวิเคราะห์หาลักษณะการจัดวางกากของเสียในหลุมฝังกลบที่เหมาะสม ที่ทำให้เกิดการทรุดตัวบริเวณผิวบนของหลุมฝังกลบกากของเสียน้อยที่สุด ซึ่งในการศึกษานี้ได้นำกากของเสียจากอุตสาหกรรมกระดาษมาใช้เป็นตัวแทนการศึกษา

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 เลือกใช้กากของเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ บริษัทแอ๊ดวานซ์ อะโกร จำกัด (มหาชน) ซึ่งตั้งอยู่ที่ ตำบลท่าตูม อำเภอ ศรีมหาโพธิ จังหวัด ปราจีนบุรี จำนวน 3 ชนิด คือ Lime Mud, Power boiler ash และ Dreg มาใช้เป็นตัวแทนการศึกษา

1.3.2 ศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของกากของเสียบดอัด 3 ด้านคือ สมบัติทางด้านกำลังการรับน้ำหนัก สมบัติด้านการไหลซึมผ่านของน้ำ และสมบัติด้านการเคลื่อนตัว ซึ่งทั้งหมดเป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการ

1.3.3 การวิเคราะห์ Vertical settlement และ Differential settlement ของหลุมฝังกลบกากของเสีย ใช้โปรแกรม PLAXIS 7.2 โดยมีสมมุติฐานคือ ระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าก้นหลุม 6 ม. ชั้นดินใต้หลุมฝังกลบไม่เกิดการเคลื่อนตัว และขั้นตอนการก่อสร้างรวดเร็วมาก กากของเสียมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogenous) เกิดการทรุดตัวด้วยน้ำหนักของตัวเอง จนกระทั่ง excess pore pressure เท่ากับศูนย์ โดยในการวิเคราะห์จะใช้ขนาดของหลุมฝังกลบเท่ากันตลอด

1.3.4 การศึกษาผลของลักษณะการจัดวางกากของเสียในหลุมฝังกลบที่มีต่อ Vertical settlement และ Differential settlement นั้น สมมุติให้กากของเสียมีคุณสมบัติสอดคล้องกับผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และ ถูกบดอัดที่ maximum dry density จากการทดสอบการบดอัดแบบ Standard Proctor Compaction Test

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นแนวทางการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของกากของเสียบดอัด เพื่อนำไปใช้ในการกำหนดลักษณะการจัดเรียงกากของเสียในหลุมฝังกลบ เพื่อทำให้ Differential settlement น้อยที่สุด และเป็นผลทำให้เกิดอันตรายต่อโครงสร้างด้านบนหลุมฝังกลบน้อยที่สุด

1.4.2 เพื่อใช้เป็นข้อมูลร่วมกับงานวิจัยอื่นที่ศึกษาในทำนองเดียวกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีบทและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การกำจัดขยะมูลฝอยด้วยวิธีฝังกลบเป็นการนำขยะมูลฝอยมาเทกองในพื้นที่ที่จัดเตรียมไว้ แล้วใช้เครื่องจักรกลเกลี่ยและบดอัดให้ยุบตัวลง หลังจากนั้นใช้ดินกลบทับและบดอัดให้แน่นอีกครั้งหนึ่งในลักษณะของเซลล์ (cell) และจะทำอย่างนี้เรื่อยไปเป็นชั้น ๆ จนเต็มพื้นที่ เพื่อเป็นการป้องกันปัญหาทางด้านกลิ่น แมลง น้ำฝนชะล้าง และอื่น ๆ อินทรีย์สารที่อยู่ในหลุมฝังกลบจะถูกย่อยสลายตามธรรมชาติด้วยจุลินทรีย์ในสภาพไร้อากาศ (Anaerobic Decomposition) พื้นที่ในการฝังกลบนี้จะต้องมีการสำรวจตรวจสอบแล้วว่าเหมาะสมทั้งทางด้านการใช้ที่ดินและความปลอดภัยต่อสภาพแวดล้อม โดยวิธีการฝังกลบสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. วิธีฝังกลบแบบกลบบนพื้นที่ (Area Method) เป็นวิธีฝังกลบที่เริ่มจากระดับดินเดิม โดยไม่มีการขุดดิน ซึ่งจะทำการบดอัดมูลฝอยตามแนวราบก่อนแล้วค่อยบดอัดทับในชั้นถัดไปสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนได้ระดับตามที่กำหนด การฝังกลบกากของเสียโดยวิธีนี้จำเป็นต้องทำคันดิน (Embankment or Berm) ตามแนวขอบพื้นที่จำกัด เพื่อทำหน้าที่เป็นผนังหรือขอบยันขณะมีการบดอัด นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ป้องกันน้ำเสียที่เกิดขึ้นขณะบดอัดและฝังกลบไม่ให้ซึมออกมาด้านนอกเพราะจะทำให้เกิดสภาพไม่น่าดู และเกิดมลภาวะน้ำเสียได้ ลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ที่จำเป็นต้องใช้วิธีนี้คือ ที่ราบลุ่มหรือพื้นที่ที่มีระดับน้ำใต้ดินสูงหรือน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าผิวดินเล็กน้อย (ไม่เกิน 1 เมตร) การกำจัดด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องจัดหาดินมาจากที่อื่นเพื่อมาทำคันดิน ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง

2. วิธีฝังกลบแบบขุดร่อง (Trench Method) เป็นวิธีฝังกลบที่เริ่มจากระดับที่ต่ำกว่าระดับดินเดิม โดยทำการขุดดินลึกลงไปให้ได้ระดับตามที่กำหนด แล้วจึงเริ่มบดอัดกากของเสียให้เป็นชั้นบาง ๆ ทับกันหนาขึ้นเรื่อย ๆ จนได้ระดับตามที่กำหนด โดยทั่วไปความลึกของการขุดร่องจะถูกกำหนดด้วยระดับน้ำใต้ดิน อย่างน้อยระดับก้นร่องควรจะอยู่สูงกว่าระดับน้ำใต้ดินไม่น้อยกว่า 1 เมตร โดยยึดระดับน้ำในฤดูฝนเป็นเกณฑ์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการปนเปื้อนต่อน้ำใต้ดิน การฝังกลบแบบขุดร่องไม่จำเป็นต้องทำคันดินเพราะสามารถใช้ผนังของร่องขุดเป็นกำแพงยันมูลฝอยที่จะบดอัดได้โดยตรง ทำให้ไม่จำเป็นต้องขนดินมาจากข้างนอก และยังสามารถใช้ดินที่ขุดออกแล้วนั้นนำกลับมาใช้กลบกากของเสียได้อีก

โดยทั่วไป หลุมฝังกลบขยะจะต้องมีส่วนประกอบที่สำคัญ ๆ โดยเรียงลำดับจากชั้นล่างสุด ดังรูปที่ 2.1 คือ

1. ชั้นวัสดุกันซึม (Liner) เป็นชั้นที่อยู่ด้านล่างสุดทำหน้าที่ป้องกันการแพร่กระจายของสารปนเปื้อนที่มีลักษณะเป็นของเหลวออกสู่น้ำใต้ดินและสภาพแวดล้อมภายนอกขอบเขตของหลุมฝังกลบขยะ โดยอาจจะประกอบด้วยชั้นดินเหนียวบดอัดที่มีความหนาอย่างน้อย 60 ซม.เพียงอย่างเดียว (Clayey Liner) หรือชั้นดินเหนียวบดอัดร่วมกับแผ่นวัสดุสังเคราะห์ประเภท HDPE หนา 1.5 มม.ขึ้นไป (Composite Liner) ซึ่งตามมาตรฐานทั่วไป ชั้นดินเหนียวบดอัดนี้จะต้องมีค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านน้อยกว่า 1.0×10^{-7} ซม./วินาทีและมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อมต่ำเนื่องจากจะต้องสัมผัสกับน้ำชะมูลฝอยอยู่ตลอดเวลา

2. ชั้นระบบรวบรวมและสูบน้ำชะมูลฝอย (Leachate Collection System) โดยมีหน้าที่รวบรวมน้ำชะมูลฝอยเพื่อสูบออกจากหลุมฝังกลบขยะก่อนที่จะไหลซึมผ่านชั้นวัสดุกันซึมออกสู่ภายนอก ชั้นนี้จะประกอบด้วย ท่อ PVC หรือ HDPE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 4 นิ้ว เจาะรู หุ้มด้วยแผ่นกรองใยสังเคราะห์ และฝังอยู่ในชั้นกรวดทรายที่มีค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านสูงกว่า 1.0×10^{-3} ซม./วินาที หนาอย่างน้อย 30 ซม. ซึ่งระยะห่างและความลาดเอียงของท่อจะถูกกำหนดโดยแรงดันน้ำชะมูลฝอยเหนือชั้นวัสดุกันซึม (Hydraulic Head) ค่าที่ยอมให้ในการออกแบบจะต้องไม่เกิน 30 ซม. นอกจากนี้การออกแบบยังจะต้องคำนึงถึงการอุดตันและวิธีการทำความสะอาดท่ออีกด้วย

3. ชั้นขยะมูลฝอย (Waste) ประกอบไปด้วยขยะมูลฝอยบดอัดในลักษณะของเซลล์ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งขยะมูลฝอยนี้ สามารถแบ่งตามการออกแบบหลุมฝังกลบได้เป็น 2 ประเภทคือ ประเภทที่ 1 ขยะมูลฝอยทั่วไป และประเภทที่ 2 ขยะมูลฝอยที่ย่อยสลายยากหรือไม่เกิดการเน่าเสียง่าย เช่น พลาสติก ยาง ท่อนไม้ แก้ว เศษวัสดุก่อสร้าง เป็นต้น ขยะทั้งสองประเภทนี้จะมีผลต่อการออกแบบชั้นปิดทับสุดท้าย (Final Cover) ที่จะกล่าวถึงในข้อต่อไป

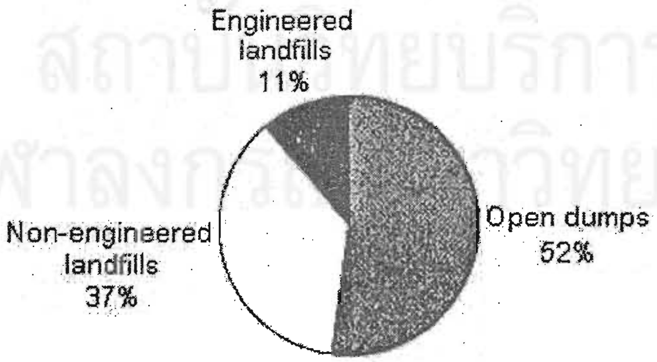
4. ชั้นปิดทับสุดท้าย (Final Cover) เป็นชั้นบนสุดซึ่งจะทำหน้าที่ป้องกันการซึมผ่านของน้ำจากภายนอกเข้าสู่หลุมฝังกลบขยะไม่ว่าจะเป็นน้ำฝน หรือน้ำจากแหล่งอื่น โดยในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงประเภทของขยะมูลฝอยที่จะฝังกลบและสภาพน้ำท่วมที่อาจจะเกิดขึ้นได้ ดังนั้นชั้นนี้จึงมีส่วนประกอบของวัสดุกันซึมและชั้นดินปกคลุมเพื่อปลูกพืชคลุมดินกันการพังทลายของดิน ซึ่งในกรณีที่มีการฝังกลบขยะประเภทที่ 1 จะต้องมีการออกแบบป้องกันการซึมที่มีคุณภาพสูงกว่าในกรณีฝังกลบขยะประเภทที่ 2

ในประเทศไทย หลุมฝังกลบขยะมูลฝอยยังถือว่าอยู่ในยุคเริ่มแรกกล่าวคือจากหลักฐานการสำรวจสถานที่เก็บขยะมูลฝอยจำนวน 114 แหล่ง (78% ของทั้งหมด) ในปี พ.ศ.2543 โดย Scott A. Ashford และคณะพบว่า สามารถแบ่งลักษณะของสถานที่เก็บขยะมูลฝอยออกเป็น 3 ประเภทคือ

1. ประเภทเปิดโล่ง (Open Dumps) เป็นการเก็บขยะมูลฝอยที่ไม่ได้คำนึงถึงสภาพแวดล้อมใด ๆ ซึ่งอาจจะมีการเลือกสถานที่ที่มีเนื้อที่กว้างพอและไกลจากแหล่งชุมชนมากพอหรือไม่ก็ได้ ลักษณะทั่วไปคือ ไม่มีการปรับพื้นที่ ไม่มีการปิดคลุมด้วยดิน สถานที่เก็บขยะมูลฝอยประเภทนี้มีอยู่เป็นจำนวนมากและจากผลสำรวจมีอยู่ถึง 52% ของ 114 แหล่ง ดังรูปที่ 2.1

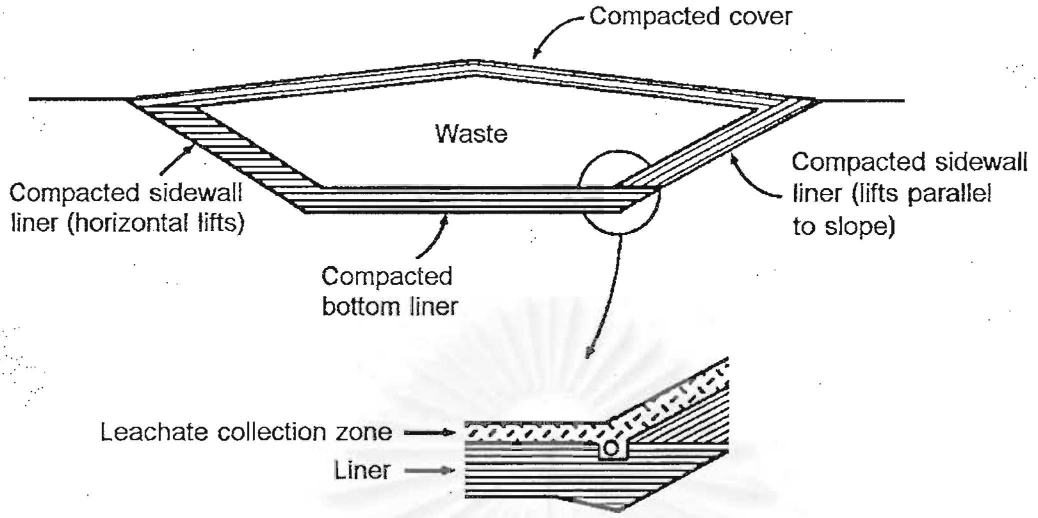
2. ประเภทไม่มีการออกแบบทางวิศวกรรม (Non-Engineered Landfills) เป็นการเก็บขยะมูลฝอยที่อิงกับกฎเกณฑ์การดำเนินการคือ มีการปกคลุมขยะรายวัน (Daily Cover) เพื่อเป็นการกำจัดปัญหาเรื่องกลิ่นและสัตว์อันตราย และมีการปกคลุมชั้นสุดท้ายเมื่อขยะเต็มพื้นที่ แต่ในบางแห่งก็ไม่มีงบประมาณในการปรับปรุงการดำเนินการใด ๆ เลย จากผลสำรวจพบว่าสถานที่เก็บขยะแบบนี้มีอยู่ถึง 37% ของ 114 แห่ง

3. ประเภทมีการออกแบบทางวิศวกรรม (Engineered Landfills) เป็นการเก็บขยะมูลฝอยที่มีส่วนประกอบที่สำคัญ ๆ ของหลุมกลบขยะดังกล่าวไว้แล้วอย่างครบถ้วน จากผลสำรวจพบว่าสถานที่เก็บขยะแบบนี้มีอยู่เพียง 11% ของ 114 แห่ง หรือเป็นจำนวน 12 แห่ง โดยที่ 10แห่งในจำนวนนี้ถูกสร้างภายใน4ปีที่ผ่านมา ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 แสดงผลสำรวจสถานที่เก็บขยะมูลฝอยภายในประเทศไทย 114 แหล่ง

(Ashford et al., 2000)



รูปที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของหลุมฝังกลบขยะมูลฝอย

2.2 สมบัติทางด้านกำลังรับน้ำหนักของกากของเสีย

กำลังรับน้ำหนัก เป็นค่าที่สำคัญสำหรับการประเมินเสถียรภาพของโครงสร้าง ซึ่งได้มาจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ หรือการทดสอบในสนาม หรือจากการคำนวณกลับเมื่อสังเกตเห็นรอยแตกของโครงสร้าง

2.2.1. ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) และความเครียด (strain) มีความสัมพันธ์แบบ non-linear และขึ้นกับเวลา การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (volume) หรือความดันน้ำในกากของเสีย (pore water pressure) ซึ่งเกิดจาก การเพิ่มขึ้นของ normal stress และ shear stress ที่มากระทำกับกากของเสีย (Oweis and Kera, 1998)

2.2.2. ทฤษฎีการวิบัติ

กฎการวิบัติของ Mohr Coulomb อธิบายกำลังรับแรงเฉือนที่จุดวิบัติ (shear stress at failure, τ_f) ได้โดยเขียนเป็นสมการอยู่ในรูปของ cohesion intercept, c และ friction angle, ϕ ดังสมการที่ 2.1

$$\tau_f = c + \sigma_f \tan\phi \qquad .....(2.1)$$

โดย τ_f = shear stress at failure

σ_f = normal stress at failure

c = cohesion intercept

ϕ = friction angle

หรือสมการในรูป effective stress ได้ดัง สมการที่ 2.2

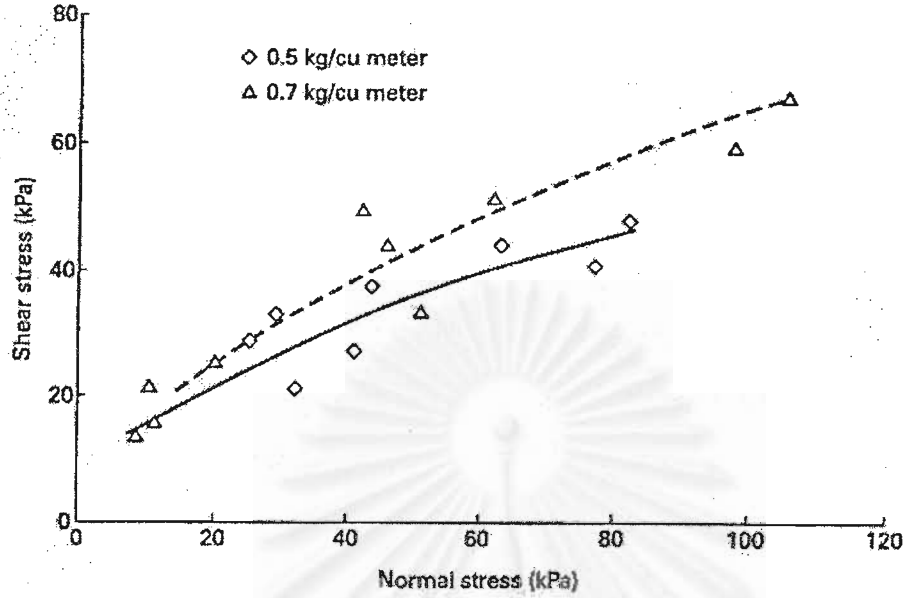
$$\tau_f = c' + \sigma'_f \tan\phi' \qquad .....(2.2)$$

สำหรับสมการที่ 2.1 เป็นการหากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (undrained shear strength) ซึ่งหมายถึง กำลังรับหน่วยแรงเฉือนของกากของเสียที่อิ่มตัวในลักษณะที่ถูกหน่วยแรงมากระทำจนเกิดการวิบัติในขณะที่ปริมาณความชื้นของกากของเสียไม่เปลี่ยนแปลง ทำให้ความดันน้ำในโพรง (void) ของกากของเสียเปลี่ยนแปลง

สำหรับสมการที่ 2.2 เป็นการหากำลังรับแรงเฉือน แบบระบายน้ำ (drained shear strength) ซึ่งหมายถึงกำลังรับหน่วยแรงเฉือนของกากของเสียในลักษณะที่ถูกหน่วยแรงมากระทำจนกระทั่งเกิดการวิบัติ ปริมาณความชื้นและปริมาตรของกากของเสียจะเปลี่ยนแปลง แต่ความดันน้ำในโพรงจะมีค่าคงที่ (สุรฉัตร, 2540)

2.2.3. การศึกษาที่ผ่านมาในอดีต

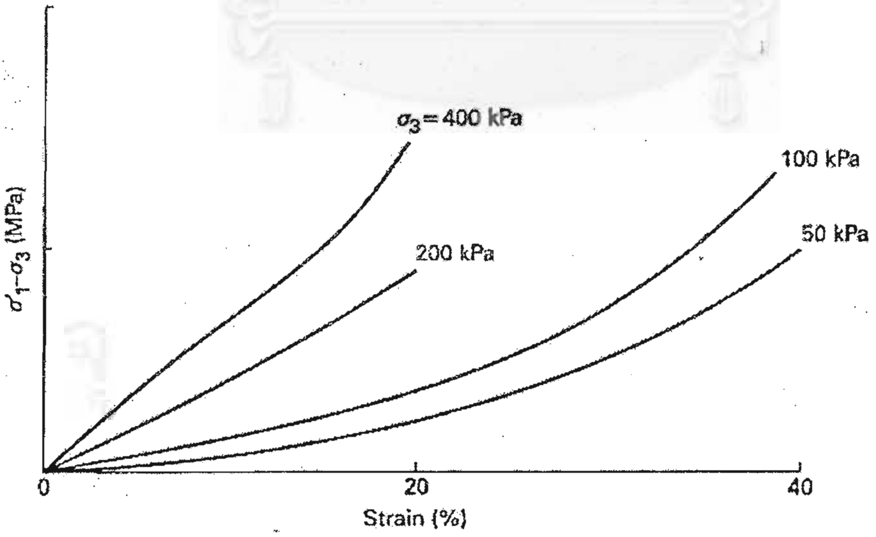
Del Greco and Oggeri (1994) ทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของ municipal waste พบว่า fricition angle , ϕ และ cohesion intercept ,c จะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของกากของเสียเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ normal stress ต่ำกว่า จะให้ค่า friction angle สูงกว่าที่ normal stress สูงกว่า ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Kavazanjian et.al (1995) คือ ได้ค่า c = 24 kPa. , ϕ = 0 ที่ normal stress ต่ำกว่า 30 kPa. และ c=0 , ϕ = 33 ที่ normal stress สูง ๆ ขึ้นไป และจากการวัดค่าในสนาม โดยใช้ Standard Penetration Test (N) และ Cone Penetration Test (CPT) พบว่าไม่มีความสัมพันธ์ระหว่าง Penetration resistance และ shear strength ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของ municipal waste

(Del Greco and Oggeri ,1994)

Fang and Slutter (1976) ได้ทำการทดสอบ Unconfined compression test โดยใช้กากของเสียบดอัดชนิดหนึ่ง พบว่า ไม่มีการวิบัติเกิดขึ้นแม้ว่า strain จะสูงก็ตาม ส่วนรูปที่ 2.4 เป็นผลจาการทดสอบ triaxial พบว่า ยังคงไม่เกิดการวิบัติแม้ที่ 20-40% strain ก็ตาม



รูปที่ 2.4 ผลจากการทดสอบ triaxial test ของกากของเสียบดอัดชนิดหนึ่ง

(Fang and Slutter ,1976)

Cooper and Clark Engineers (1982) ทำการทดสอบ triaxial เก็บตัวอย่างในสนามโดยใช้ Shelby tube จากของเสียที่เกิด strain hardening พบว่า ที่strain สูงกว่า 20% แล้วเพิ่ม load ขึ้นไปอีกก็ยังคงไม่พบสิ่งที่จะชี้ให้เห็นว่าจะเกิดการวิบัติ แต่ก็ได้กำหนดค่า cohesion ไว้ที่ 35 kPa.

Siegel et.al (1990) ทำการทดสอบ direct shear test โดยใช้ตัวอย่างกากของเสียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 130 มม.นำมาจากความลึก 4.6-25 ม. พบว่าแต่ละตัวอย่างมีส่วนประกอบที่แตกต่างกันมากซึ่งส่งผลต่อ shear strength ส่วน peak strength ที่เกิดขึ้น อยู่ในช่วง 16-39 % strain แต่ได้เลือกใช้เพียง 10% strain เท่านั้น ถ้ากากของเสียนั้นไม่มี cohesion , friction angle จะมีมากถึง 81° แต่ถ้ามีการนำวัสดุชิ้นใหญ่ออกไป friction angle จะตกลงเหลือ 39° เท่านั้น

Singh and Murphy (1990) ได้รวบรวมข้อมูลที่ได้จากห้องปฏิบัติการของกากของเสียจากแหล่งต่างๆ พบว่า fiction angle มีค่าอยู่ระหว่าง $0^\circ - 42^\circ$

Landva and Clark (1990) ได้ทำการทดสอบ direct shear มีพื้นที่หน้าตัดขนาด 0.434x0.287 ม.^{2} ตามแนวราบ โดยใช้กากของเสียชนิดต่างๆ และมีอัตราการเฉือน 1.5 มม./นาที พบว่า กากของเสียจากบ่อฝังกลบเก่าในสภาพธรรมชาติและแห้ง มีลักษณะเป็นเม็ดและเส้นใยธรรมชาติ ค่า cohesion อยู่ระหว่าง 19-23 kPa. และ friction angle อยู่ระหว่าง $36^\circ - 43^\circ$ กากของเสียสดที่เป็นชิ้นและแผ่นพลาสติกได้ค่า cohesion เท่ากับ 23 kPa., Friction angle เท่ากับ 24° กากของเสียประเภทไม้ cohesion เท่ากับ 0, friction angle เท่ากับ 36° ส่วนกากของเสียประเภทถุงพลาสติก cohesion เท่ากับ 0, friction angle เท่ากับ 9° ส่วนการเปลี่ยนแปลง shear strength เมื่อเวลาผ่านไป ยังมีการกล่าวถึงไม่ชัดเจนนัก แต่เมื่อมีการย่อยสลายเกิดขึ้น จุด weak ก็เกิดและขยายตัวออกไปกว้างขึ้นส่งผลทำให้ shear strength โดยรวมลดลง

2.3 สมบัติในการไหลซึมของกากของเสีย

2.3.1 ทฤษฎีการไหลของน้ำกับการทดสอบสมบัติการไหลซึมในห้องปฏิบัติการ

การเคลื่อนตัวของน้ำผ่านดินในเชิงมหภาคเป็นที่ยอมรับกันว่าสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของ Darcy (Darcy's law) ดังสมการที่ 2.3

$$Q = kiA \qquad .....(2.3)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อ Q = อัตราการไหล

k = ความสามารถในการไหลซึมผ่าน (Hydraulic conductivity)

i = ความชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic gradient)

$= \frac{\Delta H}{L}$

ΔH = ความแตกต่างของแรงดันน้ำที่เทียบเป็นความสูง

L = ระยะทางการไหลในเชิงมหภาค

A = หน้าตัดการไหล

Darcy's law ถูกจำกัดไว้กับการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) หรือเป็นการไหลที่ค่อนข้างช้า ดังนั้นการนำไปใช้จึงถูกจำกัดไว้กับดินที่มีขนาดอนุภาคเล็กซึ่งมีอัตราการไหลซึมผ่านที่ต่ำ

ดินแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติในการไหลซึมผ่านที่แตกต่างกัน ซึ่งค่านี้จะบ่งบอกได้ถึงความสามารถในการยอมให้น้ำหรือของเหลวไหลซึมผ่านและบอกได้ถึงอัตราการระบายน้ำออกจากมวลดินในขณะที่ถูกหน่วยแรงภายนอกมากระทำ Terzaghi และ Peck (1967) ได้จำแนกดินโดยใช้ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การจำแนกดินตามค่าความสามารถในการไหลซึมผ่าน (Terzaghi and Peck, 1967)

Degree of Permeability	Value of k (cm/sec)
High	Over 10^{-1}
Medium	10^{-1}-10^{-3}
Low	10^{-3}-10^{-5}
Very low	10^{-5}-10^{-7}
Practically impermeable	Less than 10^{-7}

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองหาค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง และสามารถทำได้ทั้งในภาคสนามและในห้องปฏิบัติการ แต่เนื่องจากในภาคสนามมีความยุ่งยากจากสภาพภูมิประเทศและค่าใช้จ่ายในการทดลองที่สูงจึงเป็นเหตุให้การทดลองในห้องปฏิบัติการเป็นที่

นิยมมากกว่า อย่างไรก็ตามการทดลองในห้องปฏิบัติการจะต้องคำนึงถึงปัจจัยอีกหลายอย่างที่เป็นผลให้ค่าความสามารถในการไหลซึมผ่านที่ได้มีค่าใกล้เคียงความจริงอีกด้วย

การทดลองในห้องปฏิบัติการได้นำเอา Darcy's law มาประยุกต์ใช้ และสามารถแบ่งประเภทของการทดลองได้ตามสภาพของแรงดันน้ำ ที่เหนี่ยวนำให้เกิดความชันทางชลศาสตร์ดังนี้

1. แบบแรงดันคงที่ (constant head) เป็นการทดลองที่ควบคุมแรงดันน้ำที่เหนี่ยวนำให้เกิดการไหลคงที่ (ความชันทางชลศาสตร์คงที่) ดังรูปที่ 2.5 (a) ซึ่งเหมาะกับการทดลองในดินทรายซึ่งมีความสามารถในการไหลซึมผ่านสูง ข้อมูลที่ได้จากการทดลองคือปริมาตรของน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างดินภายในเวลาที่กำหนด (Q) ซึ่งจะสอดคล้องกับค่า i และ A ในสมการของ Darcy สมการที่ใช้ในการคำนวณคือ

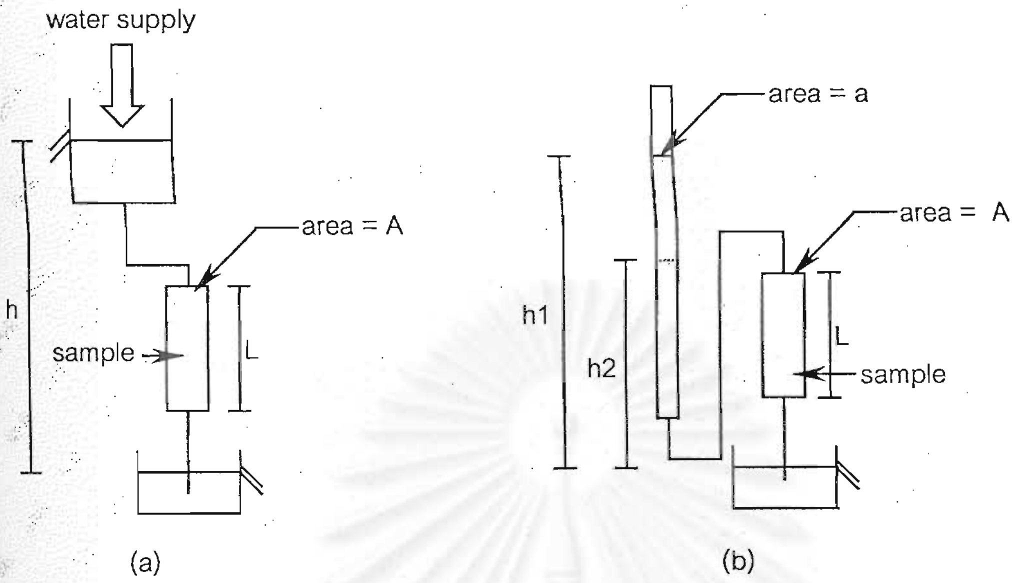
$$k = \frac{QL}{thA} \qquad .....(2.4)$$

เมื่อ	Q	=	ปริมาตรของน้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างดินในเวลา t
	h	=	ความต่างของระดับด้านต้นน้ำกับด้านปลายน้ำ

2. แบบแรงดันเปลี่ยน (variable head, falling head) เป็นการทดลองที่มีการลดลงของแรงดันน้ำที่เหนี่ยวนำให้เกิดการไหล (ความชันชลศาสตร์ไม่คงที่) ดังรูปที่ 2.5 (b) ซึ่งเหมาะกับการทดลองในดินเหนียวหรือดินที่ความสามารถในการไหลซึมผ่านต่ำ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองคือค่าระดับน้ำทางด้านต้นน้ำขณะที่เริ่มทดลองและที่เวลาที่กำหนด ($h1, h2$) ในเวลาที่สอดคล้องกัน (t) สมการที่ใช้ในการคำนวณคือ

$$k = 2.3\frac{aL}{At}\log(\frac{h1}{h2}) \qquad .....(2.5)$$

เมื่อ	a	=	พื้นที่หน้าตัดของหลอดวัดน้ำเข้าตัวอย่าง
	$h1$	=	ระดับน้ำทางต้นน้ำ ณ จุดเริ่มการทดลอง
	$h2$	=	ระดับน้ำทางต้นน้ำ ณ จุดสิ้นสุดการทดลอง

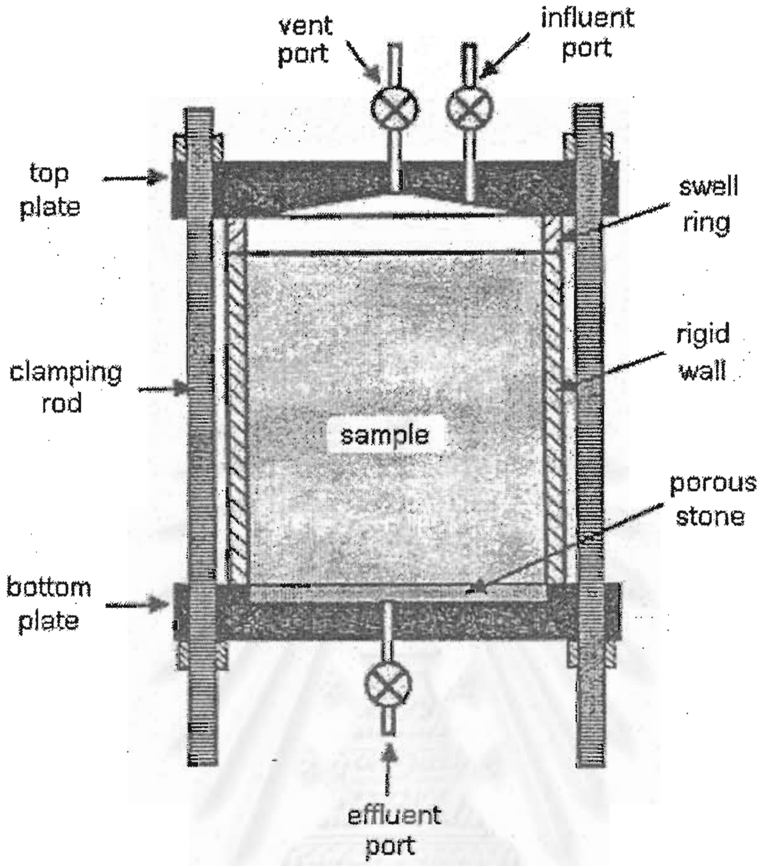


รูปที่ 2.5 การทดลองหาความสามารถในการไหลซึมผ่านแบบแรงดันคงที่ (a) และแบบแรงดันเปลี่ยน (b)

ยิ่งไปกว่านั้น การทดลองหาความสามารถในการไหลซึมผ่านของตัวอย่างบดอัดยังสามารถจำแนกการทดลองออกไปได้อีกตามลักษณะของผนังตัวอย่างดังนี้

1. แบบผนังไม่ยืดหยุ่น (fixed wall, rigid wall) เป็นการทดลองในกระบอกบดอัด (compacting mold) ดังรูปที่ 2.6 และสามารถประยุกต์ใช้ได้กับทั้งแบบแรงดันคงที่และแบบแรงดันเปลี่ยน สิ่งที่สำคัญในการทดลองคือการป้องกันการไหลข้างที่เกิดขึ้นระหว่างตัวอย่างกับผนังที่ไม่มีความยืดหยุ่น โดยที่การให้แรงดันกดทับกับตัวอย่างเป็นหนทางหนึ่งของการลดปัญหานี้ ดังนั้นการทดลองวิธีนี้ ที่แรงดันกดทับที่เหมาะสม เป็นที่ยอมรับกันว่าให้ผลการทดลองใกล้เคียงกับความจริงและน่าเชื่อถือกว่าวิธีผนังยืดหยุ่น

2. แบบผนังยืดหยุ่น (flexible wall) เป็นการทดลองใน triaxial cell โดยจะมีการห่อหุ้มตัวอย่างไว้ด้วยถุงยาง (membrane) ซึ่งจะมีข้อดีที่ว่าสามารถทำให้ตัวอย่างอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำเพิ่มขึ้นได้ด้วยการให้แรงดันด้านท้ายน้ำเพื่อละลายอากาศที่มีอยู่ในตัวอย่าง โดยปกติแล้วตัวอย่างที่สภาพอิ่มตัวด้วยน้ำอย่างเต็มที่จะให้ค่าที่มากที่สุดที่เป็นไปได้ ของความสามารถในการไหลซึมผ่าน



รูปที่ 2.6 การทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่านแบบผนังไม่ยืดหยุ่น (rigid wall, fixed wall)

2.3.2 การศึกษาที่ผ่านมาในอดีต

Holubec (1976) ทดสอบหาค่า k ของ coarse coal waste ซึ่งมีช่วงค่อนข้างกว้าง ขึ้นอยู่กับขนาดการกระจายตัวของอนุภาค และ unit weight ในสนาม ส่วนค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ อยู่ในช่วง 10^{-3} – 10^{-6} cm./sec. ส่วน fine coal waste มีค่าอยู่ในช่วง 10^{-3} – 10^{-7} cm./sec. ถ้าเป็นกากของเสียพวก fresh uncompacted waste ค่า k จะสูงถึง 10^{-1} cm./sec. แต่ถ้ามีการบดอัดอย่างดี ค่า k จะต่ำมากถึง 10^{-8} cm./sec.

McLaren and Digioia (1987) ทดสอบหาค่า k ของ fly ash ได้ค่าอยู่ระหว่าง 10^{-4} – 10^{-7} cm./sec. และได้เสนอค่ากลางของ class F fly ash (ASTM C 618) เท่ากับ 1.32×10^{-5}

cm./sec. และ class C fly ash (ASTM C 168) เท่ากับ 1.13x10^{-5} cm./sec. นอกจากนี้ยังพบว่า ค่า k จะมีค่ามากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของเวลาและความหนาแน่น

Andersland and Mathew (1973) ค่า k ของกากของเสียจำพวก pulp and paper mill sludges อยู่ระหว่าง 10^{-7} - 10^{-8} cm./sec. แต่ถ้ามีการเพิ่ม fly ash ประมาณ 10% จะทำให้ค่า k ของ sludges นี้ เพิ่มขึ้นอีก 10-100 เท่าเมื่อมี effective stress ต่ำ ๆ แต่ถ้ามีการเพิ่ม effective stress ค่า k ก็จะลดลงอย่างมาก

2.4 สมบัติทางด้านการเคลื่อนตัวของกากของเสีย

ทฤษฎีการทรุดตัวของดินสามารถใช้ได้กับกากของเสียด้วยเช่นกัน โดยอธิบายด้วยสมการที่ 2.6

$$\delta_t = \delta_i + \delta_c + \delta_s \qquad .....(2.6)$$

เมื่อ

δ_t = total settlement

δ_c = primary consolidation settlement

δ_s = secondary consolidation settlement

หลุมฝังกลบกากของเสียเกิดการทรุดตัวเนื่องจากน้ำหนักของตัวเอง initial settlement มีน้อยมากเมื่อเทียบกับ total settlement สำหรับกากของเสียที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ initial settlement จะมากขึ้น เนื่องจากการอัดตัวของช่องว่างของอากาศ สำหรับ primary consolidation settlement สามารถคำนวณจาก ทฤษฎี consolidation ส่วน secondary consolidation settlement นั้นเกิดจาก Ceep และสาเหตุอื่น ๆ และเป็นการยากที่จะคำนวณ

สำหรับค่า undrained modulus, E_u ของดินเหนียวอ่อนที่มีน้ำหนักกดทับ มีค่าประมาณ 100 S_u ถึง 200 S_u ซึ่ง S_u คือ undrained shear strength และถ้าน้ำหนักกดทับน้อยกว่า $\frac{1}{3}$ ของ failure stress E_u มีค่าตั้งแต่ 500 S_u ถึง 1000 S_u สำหรับ municipal waste ไม่สามารถเลือกค่า E_u ได้ เนื่องจากว่าการทดสอบในสนามโดยการหาค่า N และ q_c มีค่าไม่แน่นอน (Oweis and Khera, 1998)

สำหรับค่า drained modulus, E เป็นการยากที่จะคำนวณได้แต่ก็ยังหาได้จากการทดสอบ triaxial test หรือ direct shear test ในสภาพ drained condition ซึ่งทำให้รู้ค่าแรงดันน้ำทำให้สามารถหาค่า E ได้

2.4.1 สาเหตุของการทรุดตัวของหลุมฝังกลบกากของเสีย

การทรุดตัวของหลุมฝังกลับกากของเสีย (Oweis and Khera,1998) มีสาเหตุสำคัญดังนี้ คือ

1. การลดช่องว่าง และการอัดตัวของวัสดุอย่างหลวม ๆ เนื่องจากน้ำหนักของตัวเองและน้ำหนักของวัสดุปกคลุม
2. การเคลื่อนตัวที่เกิดจากอนุภาคเล็ก ๆ เคลื่อนที่เข้าไปในช่องว่างเป็นผลทำให้เกิดการยุบตัวลงของส่วนที่ใหญ่กว่า ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจาก การซึมของน้ำ การลดลงของระดับน้ำใต้ดิน และเกิดการสั่นสะเทือน การเคลื่อนตัวลักษณะนี้จะทำให้ผิวของ surface ลดต่ำลง
3. การเปลี่ยนแปลง volume จากการย่อยสลายทางชีวภาพ และปฏิกิริยาเคมี การทรุดตัวในลักษณะนี้จะเกิดมากขึ้นเมื่อมีสภาพ moisture content และอุณหภูมิสูง ในกรณีที่มีการบดอัดที่ไม่ดี และมี organic content สูง
4. การละลายจากการไหลของน้ำและ leachate
5. การทรุดตัวของชั้นดินอ่อนใต้หลุมฝังกลบ

2.4.2 การทรุดตัวของหลุมฝังกลบเนื่องจากน้ำหนักของตัวเอง

การทรุดตัวของหลุมฝังกลบเนื่องจากน้ำหนักของตัวเอง (Oweis and Khera, 1998) จะเกิดขึ้นในระหว่างก่อสร้างหลุมฝังกลบกากของเสีย stress increment, $\Delta\sigma$ คือ vertical effective stress ที่กึ่งกลางความสูง มีค่าเท่ากับ $\frac{\gamma H}{2}$ โดย γ คือ unit weight และ H คือ ความหนาของชั้นกากของเสีย การทรุดตัวคำนวณได้จาก

$$\delta = \sum \frac{H.\Delta\sigma'}{D} \qquad .....(2.7)$$

ซึ่ง $D = \frac{1}{m_v}$ และ $m_v = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta\sigma'}$

โดย $\Delta\varepsilon$ คือ การเปลี่ยนแปลง strain ที่เกิดขึ้นในช่วง $\Delta\sigma'$

2.4.3 **การทรุดตัวช่วง** primary compression

จากความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับการทรุดตัวของหลุมฝังกลบกากของเสียภายใต้น้ำหนักบรรทุก ดังรูปที่ 2.7 การทรุดตัวจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง primary consolidation (Oweis and Khera, 1998) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.8

$$\delta_c = H(RR.\log\frac{\sigma'_p}{\sigma'_o} + CR.\log\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma}{\sigma'_p}) \quad .....(2.8)$$

โดย H = layer of thickness

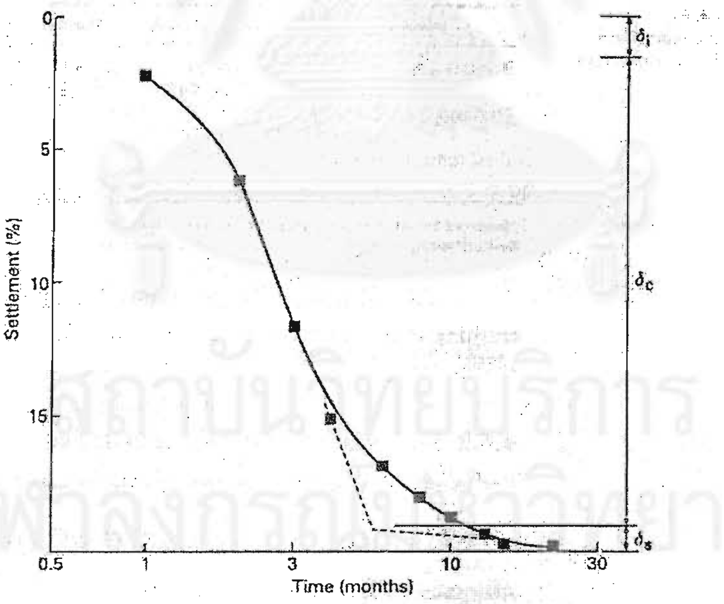
CR = Compression Ratio

RR = Recompression Ratio

σ'_o = Effective overburden stress

σ'_p = Maximum past consolidation stress

$\Delta\sigma$ = stress increment



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับการทรุดตัวของหลุมฝังกลบกากของเสียภายใต้น้ำหนักบรรทุก (S.Oweis and P.Khera,1998)

สำหรับกากของเสียที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ การทรุดตัวที่เกิดขึ้นในช่วงแรก ๆ ไม่ได้เกิดจากการอัดตัวคายน้ำ แต่เกิดขึ้นเนื่องจากการอัดตัวของช่องว่างของอากาศ Sewers (1973) กล่าวว่า การทรุดตัวนี้จะเกิดขึ้นไม่ถึง 1 เดือน และ Sherus and Khera (1980) รวบรวมข้อมูลการวัดค่าในสนามของหลุมฝังกลบกากของเสียในที่ต่าง ๆ พบว่า ประมาณ 70-80 % ของการทรุดตัวทั้งหมดเกิดขึ้นใน 3 เดือนแรก และค่า c_v มีค่าอยู่ระหว่าง 0.15 ถึง 5 ตารางฟุต/วัน

2.4.4 **การทรุดตัวช่วง** secondary compression

การทรุดตัวในช่วง secondary compression เกิดขึ้นหลังช่วง primary compression เป็น long term settlement (Oweis and Khera, 1998) สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 2.9 และ 2.10

$$\delta_s = C'_\alpha . H . \log \frac{t}{t_p} \qquad (t > t_p) \qquad .....(2.9)$$

$$C'_\alpha = \frac{\Delta \varepsilon}{\log t_2 - \log t_1} \qquad .....(2.10)$$

โดย $\Delta\varepsilon$ = การเปลี่ยนแปลง strain ระหว่างเวลา t_1-t_2

C'_α = Secondary compression ratio

t = เวลาที่ต้องการหาการทรุดตัวในช่วง secondary compression

t_p = เวลาสิ้นสุดการเกิด primary compression

ซึ่ง โดยเฉลี่ย ค่า C'_α มีค่าเท่ากับ 0.2 (upper bound=0.32, lower bound=0.13) และหลังจาก 10 ปีไปแล้ว C'_α จะมีค่าคงที่ประมาณ 0.01-0.02 และถ้ามี soil content สูง C'_α จะน้อยกว่า 0.01 Stulgis et.al.(1995) พบว่าในสภาพที่มีการย่อยสลายทางชีวภาพและทางเคมีเกิดขึ้น ส่งผลให้ rate of secondary compression สูงตามมาด้วย

2.4.5 การศึกษาที่ผ่านมาในอดีต

Yen and Scanlon (1975) กล่าวว่า ถ้าอายุและความสูงของชั้นกากของเสียมาก อัตราการทรุดตัวเนื่องจากน้ำหนักของตัวเองจะลดลง และที่ความลึกมาก ๆ จุลินทรีย์ในสภาพไร้อากาศ (anaerobic) จะน้อยลง อัตราการย่อยสลายตัวก็ย่อมลดลง แล้วจะเริ่มคงที่ค่าหนึ่ง ที่ระดับความลึกประมาณ 100 ฟุต (30 ม.)

Newman et al. (1987) ทำการทดสอบเพื่อหา parameter ที่เกี่ยวกับการเคลื่อนตัวของ poned fly ash จากรัฐเวอร์จิเนีย ซึ่งเป็นตัวอย่าง undisturbed พบว่ามีค่า void ratio เท่ากับ 1.6, C_c เท่ากับ 0.65, C'_α เท่ากับ 0.07 และ c_v เท่ากับ 2.25 ซม.^{2}/นาที

Cunnigham el al. (1977) ทำการทดสอบเพื่อหา parameter ที่เกี่ยวกับการเคลื่อนตัวของ poned fly ash จากอิลลินอยส์ ซึ่งเป็นตัวอย่าง undisturbed พบว่ามีค่า void ratio ประมาณ 1.26-1.40 และ C_c ประมาณ 0.32-0.46

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

การศึกษาวิจัยในห้องปฏิบัติการมีวัตถุประสงค์คือ การหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของกากของเสียจากอุตสาหกรรมกระดาษ เพื่อใช้เป็นคุณสมบัติเบื้องต้นในการวิเคราะห์หาลักษณะการจัดวางกากของเสียในหลุมฝังกลบ ที่ทำให้เกิดผลกระทบในระยะยาวต่อหลุมฝังกลบกากของเสียน้อยที่สุด โดยศึกษาถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของกากของเสียทางด้านต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ สมบัติทางด้านกำลังรับน้ำหนัก สมบัติทางด้านการไหลซึม และสมบัติทางด้านการเคลื่อนตัวของกากของเสียบดอัด เพื่อประมาณปริมาณการทรุดตัวที่เกิดขึ้นหลังการฝังกลบด้วยโปรแกรมไฟไนท์อีลีเมนต์

3.1.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดสอบ เป็นกากของเสียที่ได้จากโรงงานผลิตกระดาษ และนำมาทดสอบจำนวน 3 ชนิดคือ

ชนิดที่ 1 Lime Mud เป็นของแข็ง มีลักษณะเป็นผงสีขาวอมเทา ไม่มีกลิ่น มีค่า pH 10.11 ซึ่งเกิดจากการนำสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตผสมกับโซเดียมซัลไฟด์ หลังจากผ่าน Clarifier แล้ว ผสมกับแคลเซียมออกไซด์ในถังปฏิกิริยา (slacker) ได้เป็นโซเดียมไฮครอกไซด์กับโซเดียมซัลไฟด์ที่ยังมีตะกอนอยู่ แล้วนำไปผ่านเครื่องกรองที่ Silter จะได้ส่วนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับโซเดียมซัลไฟด์ที่ใส เรียกว่า white Liquor นำไปใช้ในการต้มเยื่อ ตะกอนที่แยกออกมาเรียก โคลนหินปูน หรือ Lime Mud ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมี คือ $CaCO_3$ เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 3.1

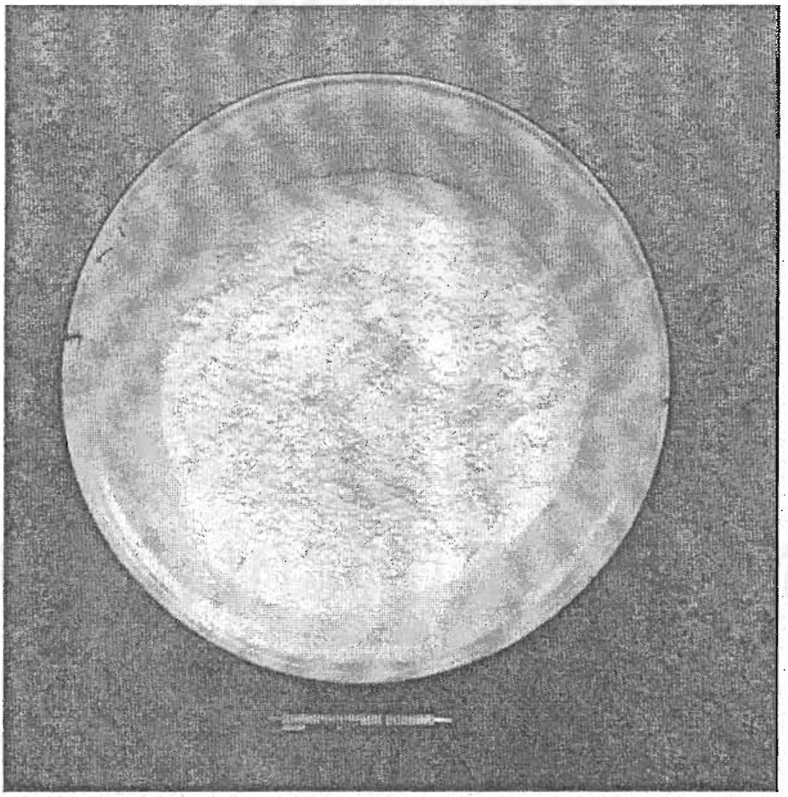
ชนิดที่ 2 Power Boiler Ash เป็นของแข็ง แห้งและร่วน ไม่มีกลิ่น มีค่า pH 7.5 เกิดจากกระบวนการผลิตเยื่อ จะถูกเผาไหม้เพื่อให้พลังงานกับ Recover Boiler องค์ประกอบที่เป็นสารอินทรีย์จะถูกเผาไหม้และให้พลังงาน ดังรูปที่ 3.2

ชนิดที่ 3 Dreg เป็นของแข็ง สีเทาดำ มีกลิ่นเล็กน้อย มีค่า pH 12 เกิดจาก การนำของเหลวสีดำที่ได้จากการต้มเยื่อเผาในหม้อไอน้ำ แล้วผสมกับ weak wash liquor ในถัง dissolving

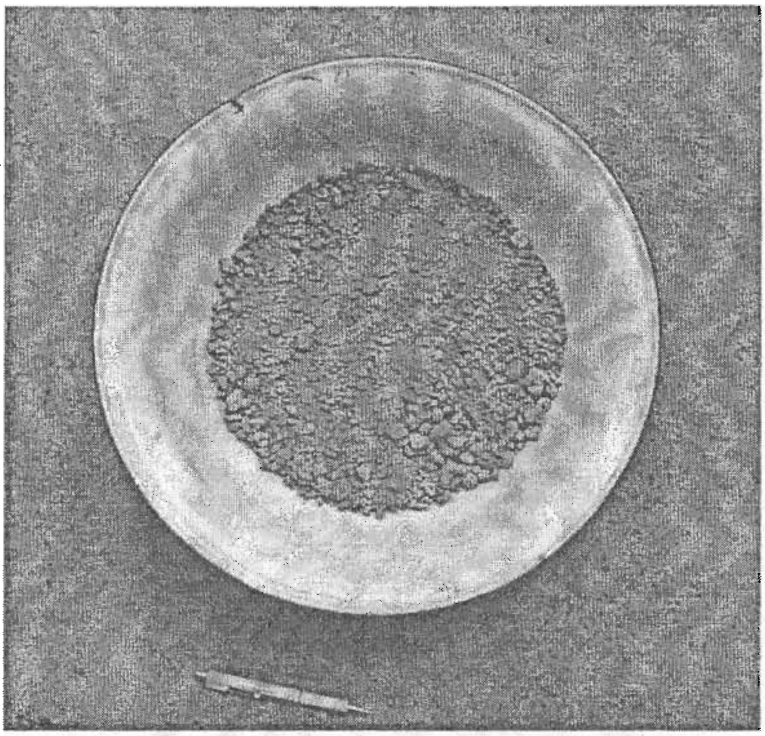
tank ได้เป็น ของเหลวสีเขียว (Na_2CO_3+Na_2S) แล้วส่งไปยังถังตกตะกอน (Clarifier) เพื่อแยกตะกอนออกจากของเหลวสีเขียว ตะกอนเหลวที่แยกถูกส่งไปยังเครื่องกรอง กากที่ไม่ผ่านเครื่องกรองเรียกว่า Dreg ดังรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.1 สรุปคุณสมบัติเบื้องต้นของกากของเสียที่ใช้ในการทดสอบ

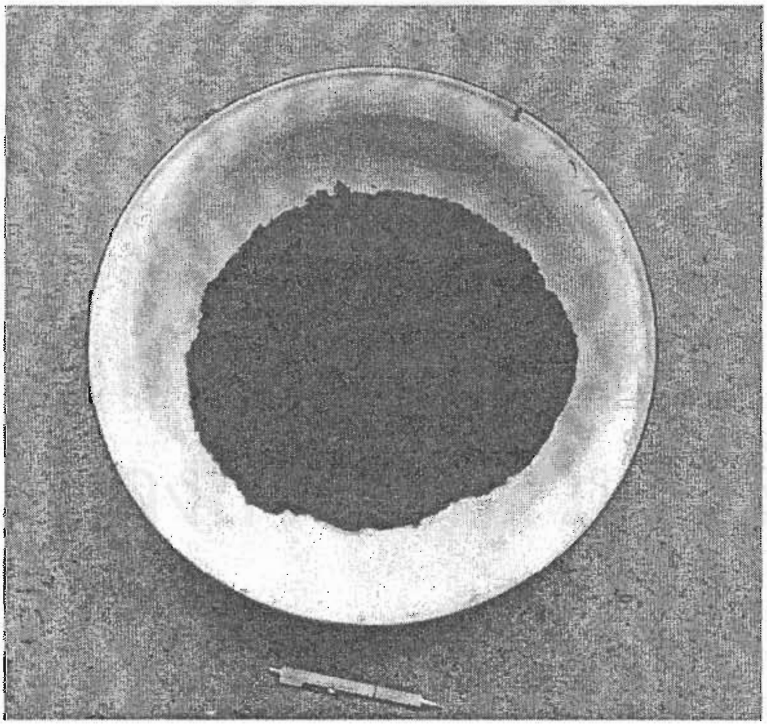
ชนิดของกากของเสีย	สี	กลิ่น	pH	Solid content, %
Lime	ขาวอมเทา	ไม่มี	10.11	70
Dreg	ดำ-เทา	มี	12	55
Power boiler ash	ดำ	ไม่มี	7.5	99



รูปที่ 3.1 Lime Mud



รูปที่ 3.2 Power Boiler Ash



รูปที่ 3.3 Dreg

3.1.2 การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของกากของเสียที่ใช้ในการทดสอบ

เพื่อศึกษาสมบัติของกากของเสียบดอัดในด้านต่าง ๆ อันได้แก่ สมบัติทางด้านกำลังรับน้ำหนัก สมบัติทางด้านการไหลซึม และสมบัติทางด้านการเคลื่อนตัว

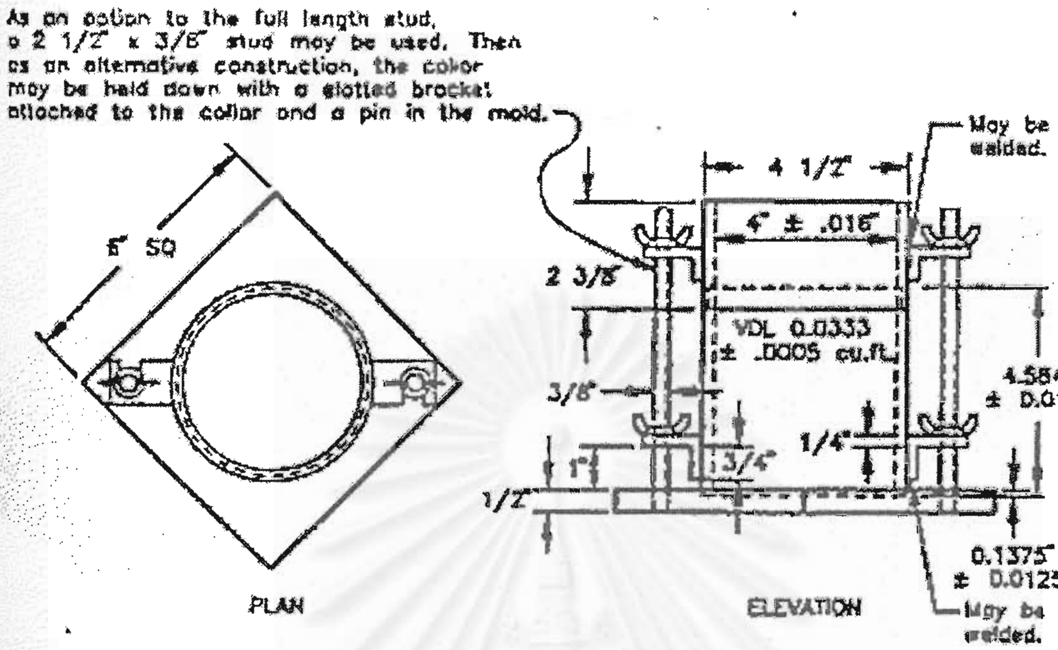
3.1.2.1 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ

การทดสอบกระทำตามมาตรฐาน ASTM D 854: Test Method Gravity of Soils โดยทำการทดสอบ 2 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

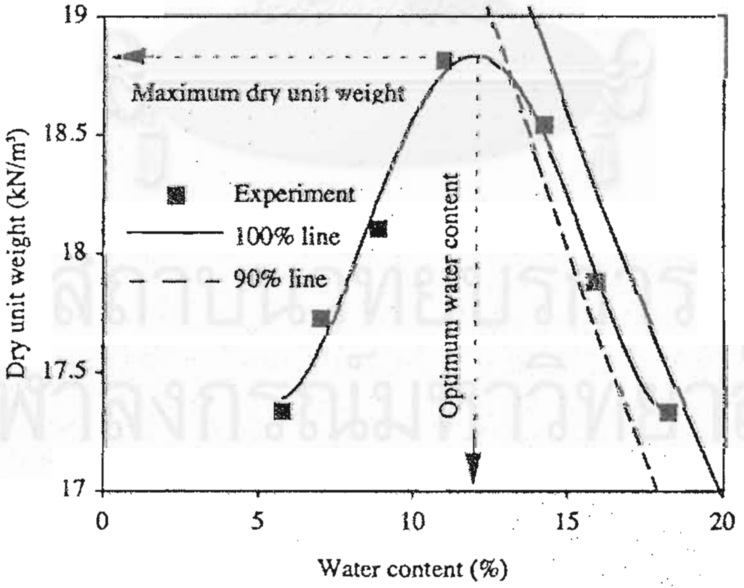
3.1.2.2 การทดสอบการบดอัด

การทดสอบการบดอัด (Compaction Test) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง และ ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของกากของเสียทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบการบดอัด (Compaction Test) กระทำตามมาตรฐาน ASTM D 698 : Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort เริ่มด้วยการคลุกส่วนผสมระหว่างกากของเสียกับน้ำ แล้วตักใส่ลงในแบบ (mold) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 4 นิ้ว สูง 4.584 นิ้ว ดังรูปที่ 3.4 บดอัดเป็นจำนวน 3 ชั้น ใช้ค้อน (hammer) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว หนัก 5.5 ปอนด์ ยกสูง 12 นิ้วปล่อยลงเป็นจำนวน 25 ครั้งต่อชั้น การทดสอบจะค่อย ๆ เพิ่มปริมาณน้ำในตัวอย่างจนกระทั่งถึงปริมาณน้ำที่ทำให้หน่วยน้ำหนักลดลงหรือไม่เพิ่มขึ้นมากนัก นำผลการทดสอบที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและประมาณความชื้นหลังบดอัด (Compaction Curve) ดังรูป 3.5 ซึ่งทำให้ทราบถึงความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) ของกากของเสียแต่ละชนิดที่ทำการทดสอบ



รูปที่ 3.4 แบบ (standard Mold) ที่ใช้ในการทดสอบการบดอัด compaction (ASTM,1996)



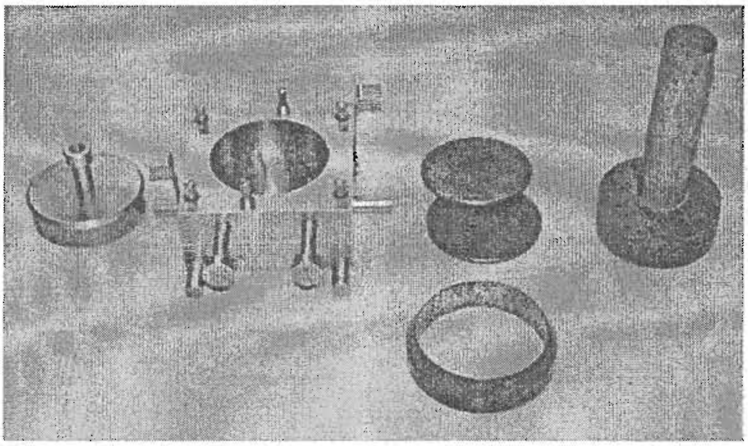
รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง dry unit weight กับ water content (Lambe,1951)

3.1.2.3 การทดสอบกำลังรับน้ำหนัก

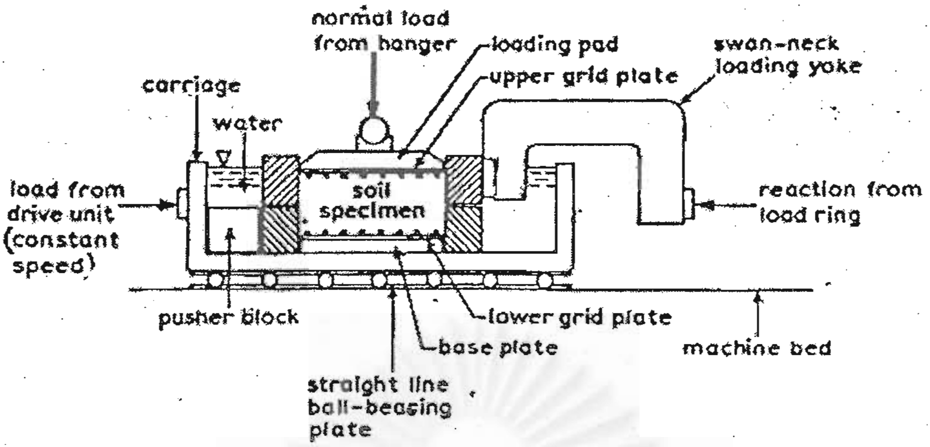
การทดสอบกำลังรับน้ำหนัก โดยวิธี Direct Shear Test เป็นการหาค่า cohesion intercept, c และ friction angle, ϕ ของกากของเสียบดอัดทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ในการทดสอบ ความหนาแน่นที่ใช้ในการทดสอบได้มาจากการทดสอบการบดอัด โดยใช้ความหนาแน่นแห้งแตกต่างกัน 3 ค่า นั่นคือ ที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density, γ_d) ที่ความหนาแน่นแห้งมากกว่าและน้อยกว่า maximum dry density ประมาณ 3-5 % โดยกำหนดให้ปริมาณความชื้นเดียวกันในกากของเสียชนิดเดียวกัน คือ Optimum Moisture Content, OMC

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Direct Shear Test) กระทำตามมาตรฐาน ASTM D 3060-90 : Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions เมื่อทดสอบแบบสภาพ Consolidated Drained ซึ่งขั้นตอนการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกคือการเตรียมตัวอย่างบดอัด และขั้นตอนที่สอง คือการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

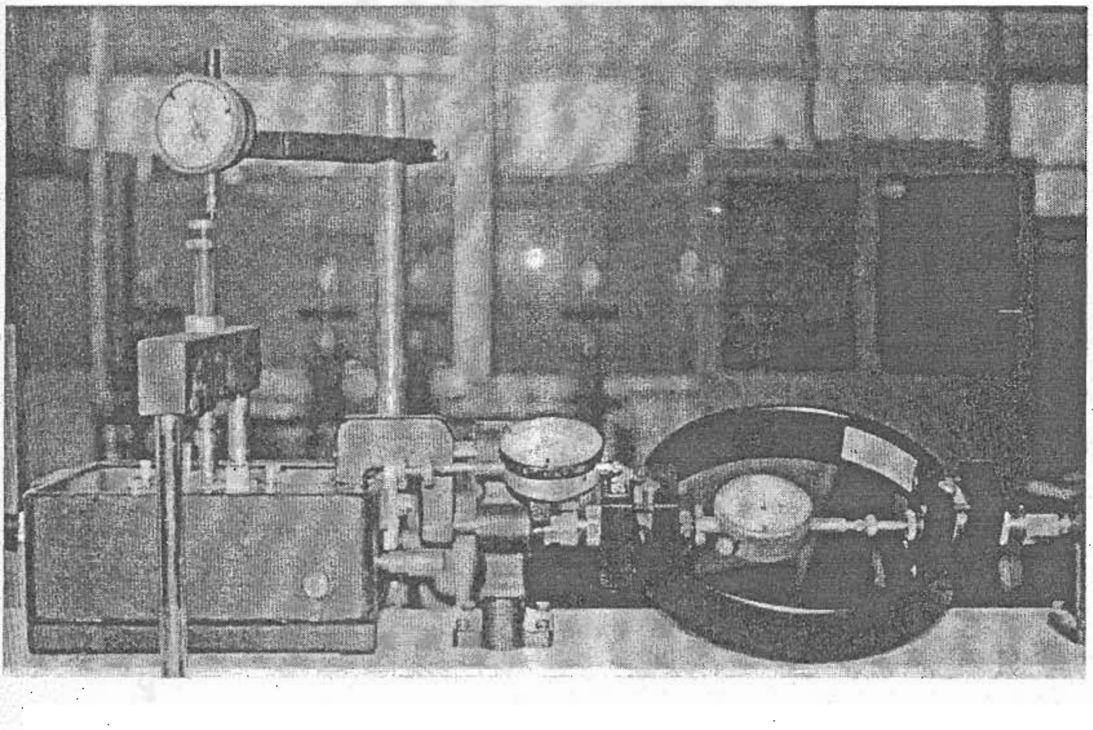
ขั้นตอนที่หนึ่ง เริ่มด้วยการคำนวณหาปริมาณน้ำที่จะนำมาผสมกับกากของเสียให้อยู่ที่ OMC และคำนวณหาน้ำหนักของส่วนผสมของกากของเสีย ที่ความหนาแน่นแห้งที่ต้องการเมื่อทราบปริมาตรของ sample ring ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 6.3 ซม. สูง 2 ซม โดยเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.6 จากนั้น คลุกส่วนผสมนั้นให้เค้ากัน แล้วบดอัดใส่ sample ring ให้ได้น้ำหนักตามที่ได้คำนวณไว้ กดตัวอย่างที่จาก sample ring ลงไปใน shear box ที่มีแผ่น porous stone และกระดาษกรองอยู่ด้านใต้ตามลำดับ แล้วปิดด้วยกระดาษกรองและ porous stone ด้านบนอีกครั้งจากนั้นติดตั้งตัวอย่างเพื่อเตรียมทดสอบในขั้นต่อไป ดังรูปที่ 3.7-3.8



รูปที่ 3.6 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบกำลังรับแรงเฉือน



รูปที่ 3.7 รายละเอียดในการติดตั้งตัวอย่างก่อนเริ่มทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

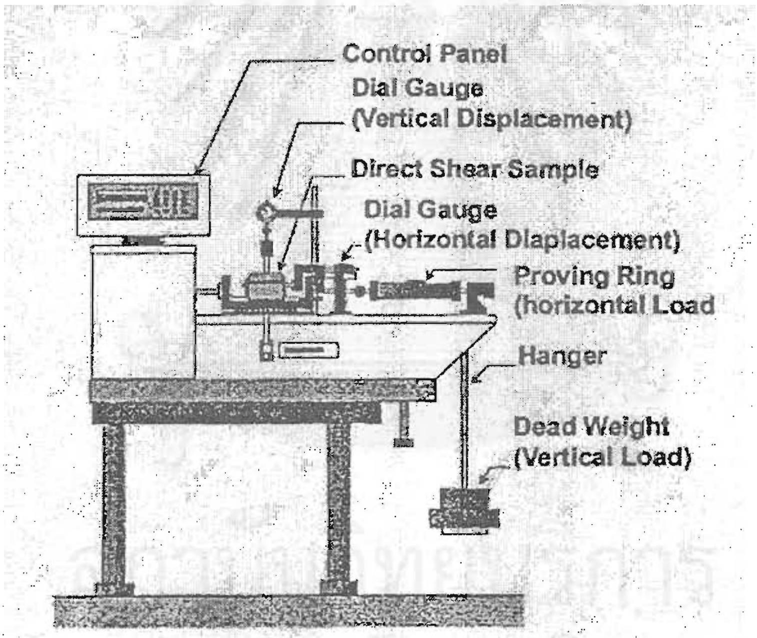


รูปที่ 3.8 การติดตั้งตัวอย่างก่อนเริ่มการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

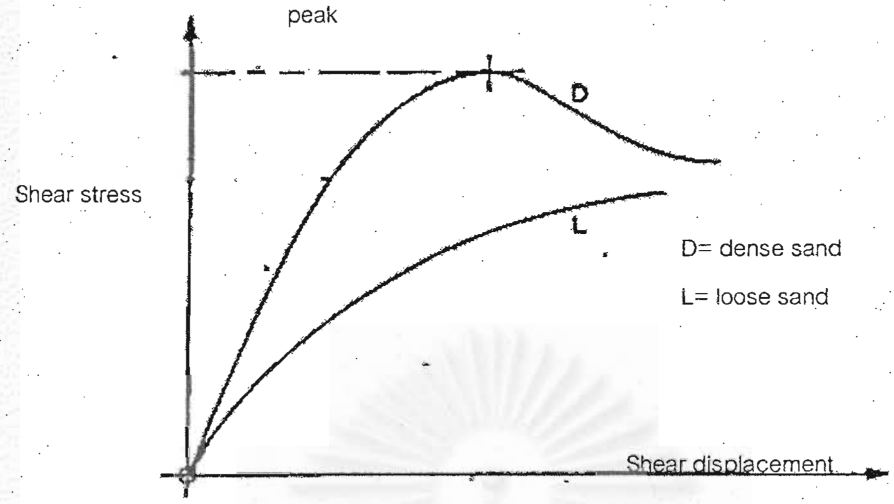
ขั้นตอนที่สอง คือ การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนด้วยเครื่อง Direct shear testing ดังรูปที่ 3.9 โดยทำการทดสอบแบบ consolidated condition โดยมี 2 อัตราการเฉือน คือ

1. Drained Condition โดย Displacement rate คำนวณจากมาตรฐาน ASTM D 3080-90
2. Displacement rate เท่ากับ 0.5 มม./นาที

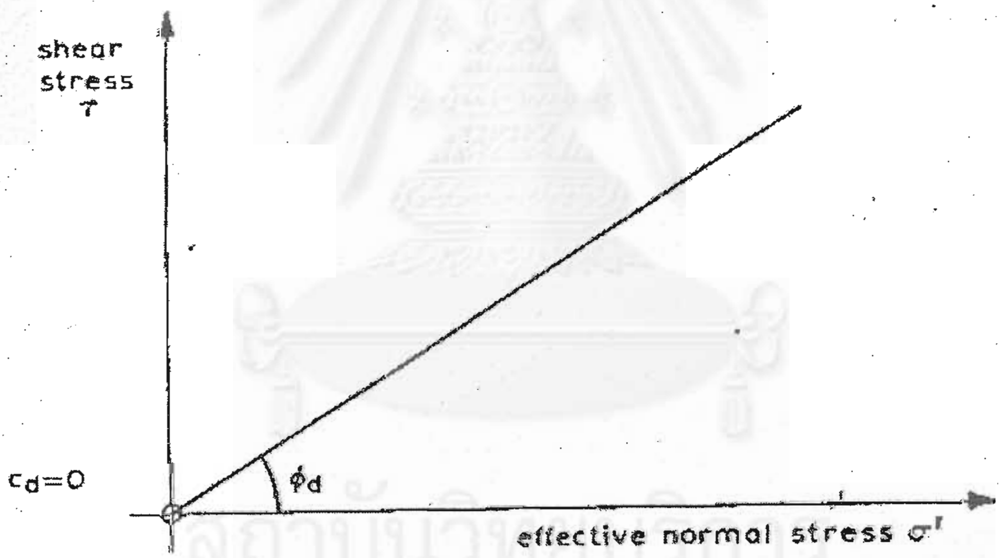
ในการทดสอบแต่ละความหนาแน่นแห้งทั้ง 2 อัตราการเฉือนจะใช้ normal load 3 ค่า คือ 1, 2, และ 4 kg. บันทึกค่า shear displacement และ normal displacement ที่เวลาต่าง ๆ หาความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress กับ shear displacement ดังรูปที่ 3.10 และความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress กับ normal stress ดังรูปที่ 3.11 ซึ่งทำให้ทราบถึง cohesion intercept, c และ friction angle, ϕ ของกากของเสียแต่ละชนิดที่ความหนาแน่นแห้งต่าง ๆ



รูปที่ 3.9 รายละเอียดของเครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือน



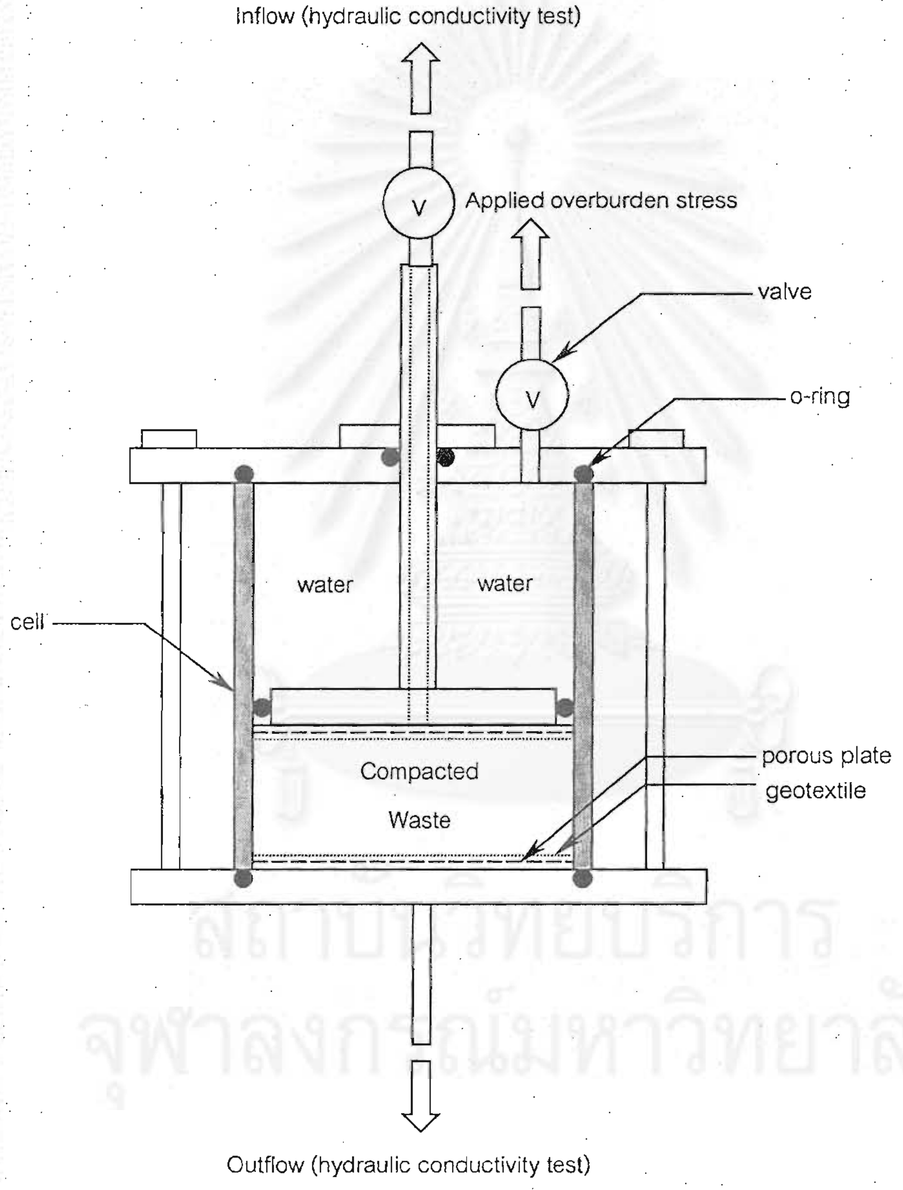
รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress กับ shear displacement ของ dense sand และ loose sand (Manual of Soil Lab.V2,1982)



รูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress กับ normal stress (Manual of Soil Lab.V2,1982)

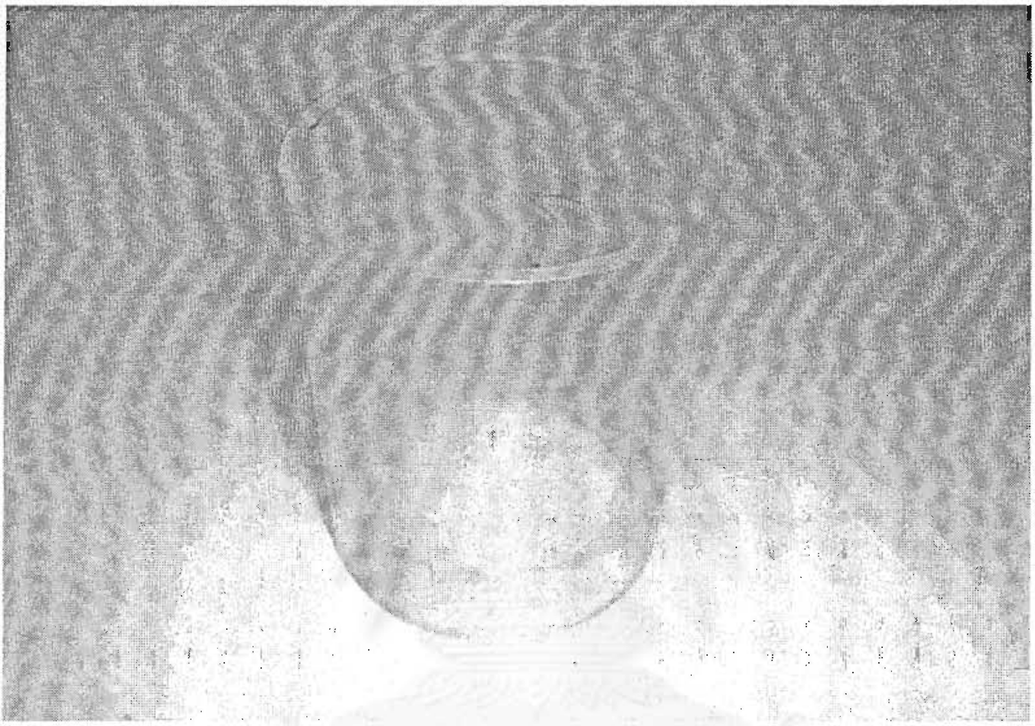
3.1.2.4 การทดสอบความสามารถในการซึมผ่าน

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบจะต้องสามารถเตรียมตัวอย่างด้วยการบดอัด ดังนั้น เครื่องมือนี้จึงถูกปรับปรุงจากเซลล์การทดสอบการบดอัดแบบ Stand Proctor Compaction Test (เครื่องมือการทดลองแบบผนังไม่ยืดหยุ่น) แผนภาพลักษณะของชุดทดลองแสดงไว้ดังรูปที่ 3.12 และส่วนประกอบแต่ละชิ้นมีรายละเอียดดังนี้



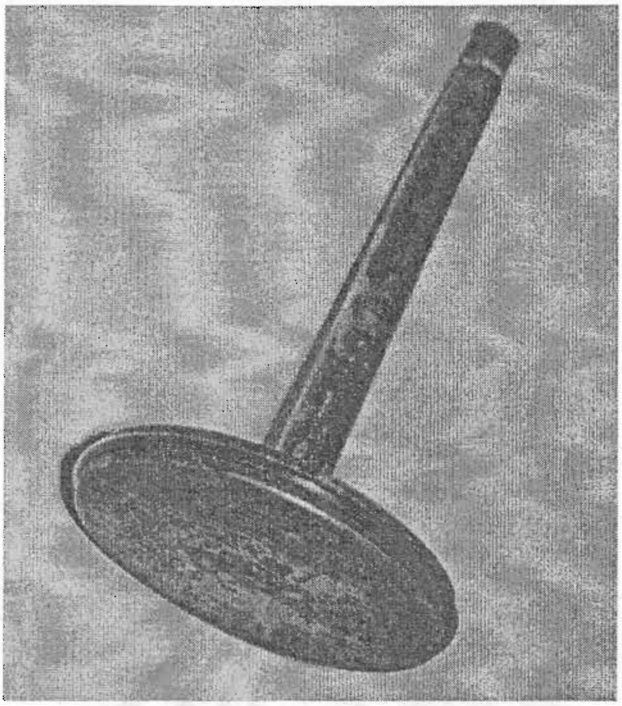
รูปที่ 3.12 แผนภาพของชุดทดลองหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน

1. กระบอกตัวอย่าง (Cell) มีลักษณะดังรูปที่ 3.13 เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 10.0 ซม. สูง 13.0 ซม. และหนา 0.5 ซม.ทำจากพลาสติกที่ทนแรงดันได้สูง กระบอกนี้จะต้องประกอบกับ collar ของ standard compaction mold ทางด้านบนในขณะทำการบดอัด โดยที่ด้านล่างจะถูกยึดกับแผ่นปิดล่างและรองใต้ตัวอย่างด้วยแผ่น geotextile และแผ่นพรุนให้น้ำผ่านตามลำดับ



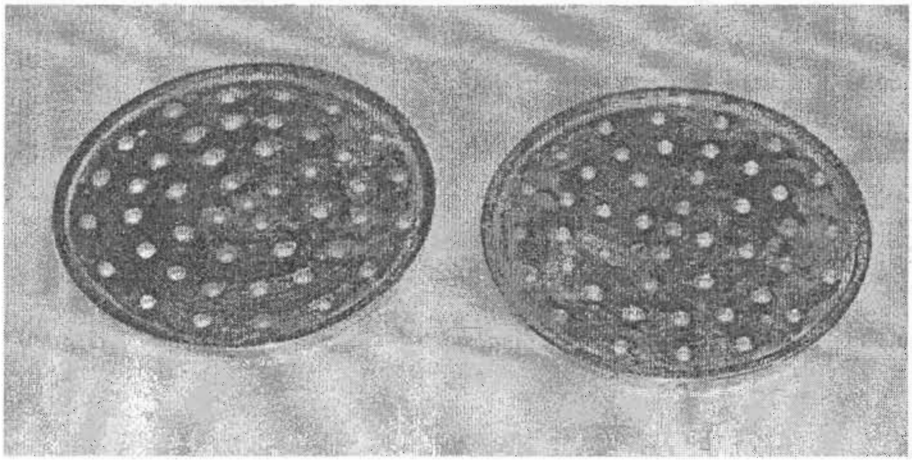
รูปที่ 3.13 กระบอกตัวอย่าง

2. แผ่นให้แรงดันกดทับพร้อมแกนส่งน้ำ (Applied stress plate) มีลักษณะดังรูปที่ 3.14 โดยส่วนที่เป็นแท่ง ภายในจะกลวงเพื่อเป็นทางผ่านของของเหลวที่ต้องการจะให้ไหลซึมผ่านตัวอย่าง และที่ส่วนแผ่นจานกลม บริเวณขอบจะมีร่องไว้รองรับ O ring โดยรอบเพื่อเป็นการกั้นระบบให้แรงดันกดทับ (overburden stress system) กับระบบการไหลซึมผ่าน (permeability test system) ให้แยกออกจากกัน อีกทั้งยังช่วยในการลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผนังกระบอกตัวอย่างกับขอบของจานให้แรงดันกดทับ



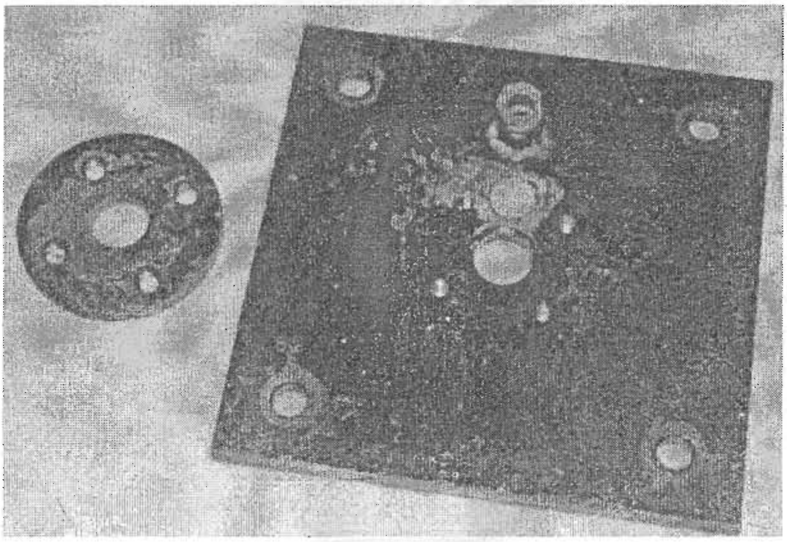
รูปที่ 13.14 แผ่นให้แรงดันกดทับพร้อมแกนส่งน้ำ

3. แผ่นพรุน (Porous plate) มีลักษณะดังรูปที่ 3.15 จะอยู่ที่ด้านบนของตัวอย่าง ซึ่งจะทำหน้าที่กระจายการไหลของน้ำจากแกนส่งน้ำให้ไหลได้อย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัดของตัวอย่างและอยู่ที่ด้านล่างของตัวอย่างเพื่อรองรับการไหลตลอดทั้งหน้าตัดก่อนที่จะรวมเอาของเหลวออกทางรูระบายที่แผ่นปิดล่าง



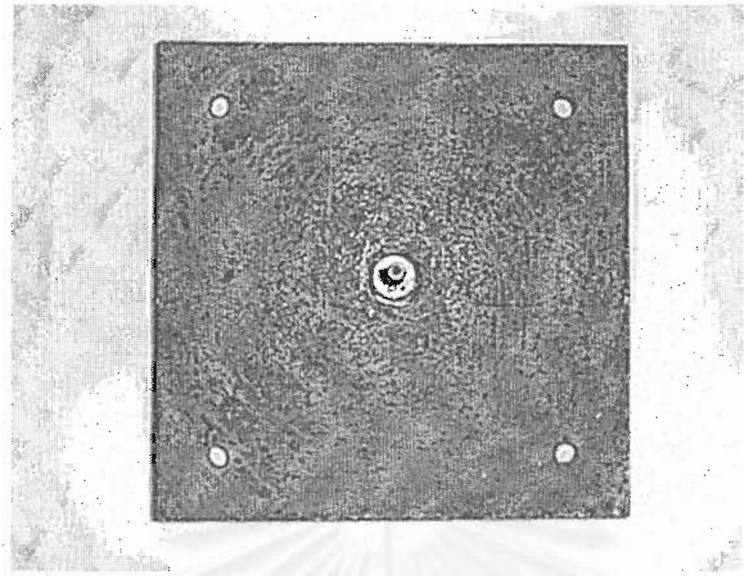
รูปที่ 13.15 แผ่นพรุน

4. แผ่นปิดบน (Top plate) มีลักษณะดังรูปที่ 3.16 ซึ่งจะประกอบด้วย รู 4 รูที่มุมของแผ่นเพื่อเตรียมไว้ยึดกับเสา 4 ต้นเมื่อประกอบกับกระบอกตัวอย่าง รูกลางพร้อมแผ่นครอบและ O ring เพื่อเป็นทางผ่านของแกนส่งน้ำและจะต้องมีระบบกันการรั่วของแรงดันที่ใช้ในการให้แรงดันกดทับ รูเจาะที่เตรียมไว้สำหรับเป็นทางผ่านให้แรงดันจากระบบแรงดันภายนอกเข้าสู่กระบอกตัวอย่างเพื่อใช้เป็นแรงดันกดทับแก่ตัวอย่าง และร่องวงกลมเพื่อรองรับการยึดกับกระบอกตัวอย่างพร้อมทั้งกันการรั่วของแรงดันด้วย O ring ที่หน้าสัมผัสระหว่างแผ่นปิดบนกับกระบอกตัวอย่าง



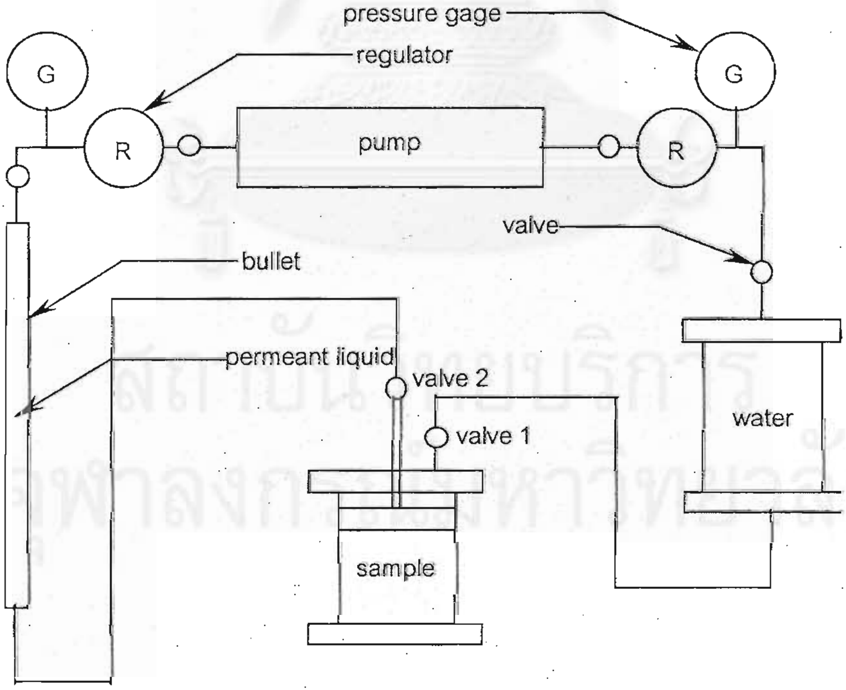
รูปที่ 3.16 แผ่นปิดบน

5. แผ่นปิดล่าง (Bottom plate) มีลักษณะดังรูปที่ 3.17 ซึ่งจะประกอบด้วย รู 4 รูที่มุมของแผ่นเพื่อเตรียมไว้ยึดกับเสา 4 ต้นเมื่อประกอบกับกระบอกตัวอย่าง รูกลางเพื่อใช้เป็นทางระบายออกของน้ำที่ไหลซึมออกจากตัวอย่าง และร่องวงกลมเพื่อรองรับกับการยึดกับกระบอกตัวอย่างพร้อมทั้งกันการรั่วของแรงดันด้วย O ring ที่หน้าสัมผัสระหว่างแผ่นปิดล่างกับกระบอกตัวอย่าง



รูปที่ 3.17 แผ่นปิดล่าง

6. ระบบแรงดันอากาศซึ่งประกอบด้วย pump regulator gauge และระบบท่อแรงดัน เพื่อใช้เป็นระบบให้แรงดันกดทับกับตัวอย่างดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ระบบแรงดันอากาศ

ขั้นตอนการทดสอบหาความสามารถในการไหลซึม

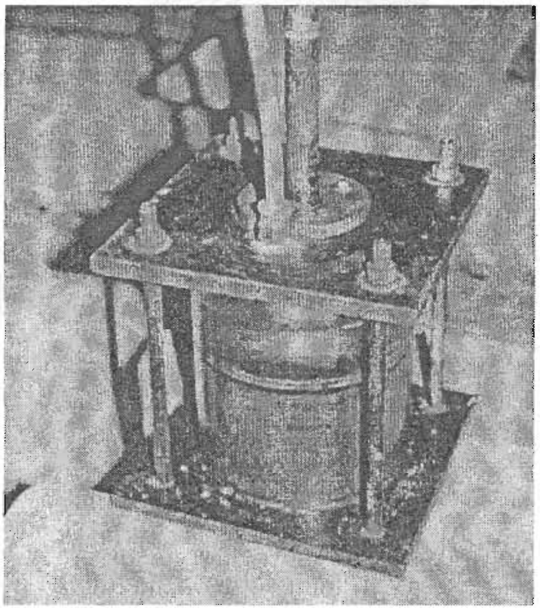
ขั้นตอนการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกันคือ ขั้นตอนแรก คือการเตรียมตัวอย่างบดอัด และขั้นตอนที่สอง คือการทดสอบโดยการปล่อยให้น้ำไหลซึมผ่านตัวอย่าง

ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างบดอัด

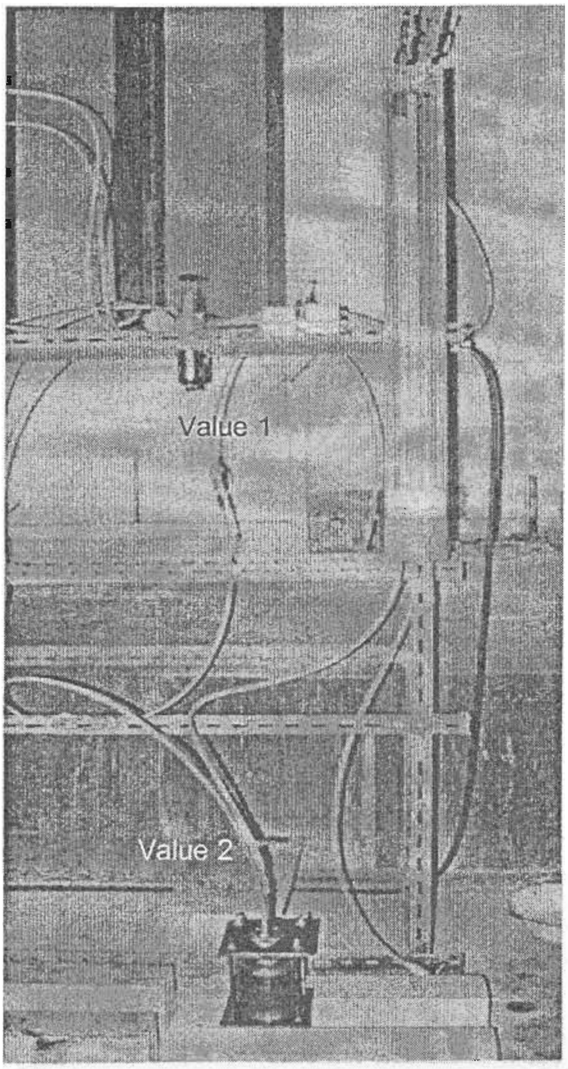
บดอัดกากของเสียที่ความหนาแน่นแห้งที่ต้องการ คือ maximum dry density ที่ได้จากการทดสอบการบดอัดโดยควบคุมน้ำหนักและความสูงของตัวอย่างที่ 5 ซม. ซึ่งจะมีการเผื่อในส่วนผิวหน้าที่ไม่เรียบ การบดอัดจะกระทำเสมือนกับการบดอัดใน standard compaction mold หลังจากบดอัดแล้ว ต้องทำการปาดดินส่วนเกินออกเพื่อให้ผิวหน้าเรียบและได้ความสูงของตัวอย่าง 5 ซม.

ขั้นตอนที่ 2 การทดสอบโดยการปล่อยให้น้ำไหลซึมผ่านตัวอย่าง

ประกอบกระบอกตัวอย่างเข้ากับอุปกรณ์อื่น ๆ ดังรูปที่ 3.19 และนำไปประกอบเข้ากับระบบแรงดันอากาศ ดังรูปที่ 3.20 เริ่มด้วยการเปิด valve 1 เพื่อให้แรงดันกดทับ 1 กก./ซม^2 กับตัวอย่าง และตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการทรุดตัวจนหยุดและแน่ใจว่ามีแรงดันด้านข้าง (lateral stress) ระหว่างตัวอย่างกับผนังกระบอกเต็มที่แล้ว จากนั้นเปิด valve 2 เพื่อทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน พร้อมทั้งจดค่าระดับของน้ำใน bullet ที่เวลาต่าง ๆ จนระดับของน้ำลดลงได้ประมาณ 40 ซม.หลังจากเริ่มการทดลอง



รูปที่ 3.19 การติดตั้งตัวอย่างก่อนเริ่มการทดสอบความสามารถในการไหลซึมผ่าน



รูปที่ 3.20 ตัวอย่างที่นำไปประกอบเข้ากับระบบแรงดันอากาศ

3.1.2.5 การทดสอบคุณสมบัติที่เกี่ยวกับการเคลื่อนตัว

การทดสอบคุณสมบัติที่เกี่ยวกับการเคลื่อนตัว โดยการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) ซึ่งเป็นการหาค่า parameter ของกากของเสียบดอัดทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ Coefficient of Consolidation(C_v), Compression Ratio(CR), Recompression Ratio(RR) และหน่วยแรงสูงสุดในอดีต (Maximum stress history($\bar{\sigma}_{vm}$) และ Drained Young's Modulus, E' ความหนาแน่นที่ใช้ในการทดสอบได้มาจากการทดสอบการบดอัด โดยใช้ความหนาแน่นแห้งแตกต่างกัน 3 ค่า นั่นคือ ที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density, γ_d) และที่

I 20470 71X

ความหนาแน่นแห้งมากกว่าและน้อยกว่า maximum dry density ประมาณ 3-5 % โดยใช้ปริมาณความชื้นเดียวกันในกากของเสียชนิดเดียวกัน คือ OMC

การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) กระทำตามมาตรฐาน ASTM D 2435-90 : One-Dimensional Consolidation Properties of Soils ซึ่งขั้นตอนการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรก คือการเตรียมตัวอย่างบดอัด และขั้นตอนที่สอง คือการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ

ขั้นตอนที่หนึ่ง เริ่มด้วยการคำนวณหาปริมาณน้ำที่จะนำมาผสมกับกากของเสียให้อยู่ที่ OMC และคำนวณหาน้ำหนักของส่วนผสมของกากของเสีย ที่ความหนาแน่นแห้งที่ต้องการ เมื่อทราบปริมาตรของ sample ring ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 5 ซม. สูง 2 ซม จากนั้น คลุกส่วนผสมนั้นให้เข้ากัน แล้วบดอัดใส่ sample ring ให้ได้น้ำหนักตามที่ได้คำนวณไว้

ขั้นตอนที่สอง คือ การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ

ติดตั้งตัวอย่างเข้ากับเครื่องทดสอบการอัดตัวคายน้ำ สำหรับทุกตัวอย่างในการทดสอบมีการเพิ่มหน่วยน้ำหนัก โดยใช้ $\frac{\Delta P}{P}=1$ เริ่มตั้งแต่ 0.5, 1, 2, 4, 8 จนกระทั่งถึง 16 kg. แล้ว unload ที่ 4 และ 1 kg. ตามลำดับ และค้างน้ำหนักทิ้งไว้ 24 ชม. ในแต่ละหน่วยน้ำหนัก บันทึกค่า vertical displacement ที่เวลา $\frac{5}{60}$, $\frac{15}{60}$, $\frac{30}{60}$, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 60, 120, 240, 480 และ 1440 นาที ตามลำดับ นำผลการทดสอบที่ได้มาคำนวณหาค่า void ratio, e แล้วเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง void ratio กับ vertical effective stress เพื่อวิเคราะห์หาค่า Recompression Ratio(RR), Compression Ratio(CR) และหาค่า Constrain Modulus, D แล้วปรับแก้ด้วย Poisson's ratio จะได้ค่า E'

3.1.3 การวิเคราะห์ Vertical settlement และ Differential settlement ของหลุมฝังกลบกากของเสียด้วยวิธีการทางไฟไนท์อีลีเมนต์ (Finite element analysis)

เป็นการวิเคราะห์การทรุดตัวด้วยน้ำหนักตัวเองของหลุมฝังกลบกากของเสีย เป็นการศึกษาผลของ Vertical settlement และ Differential settlement ของ ground surface ของหลุมฝังกลบกากของเสียที่มีการจัดวางที่แตกต่างกัน เพื่อหาวิธีการจัดวางกากของเสียเหมาะสมที่สุด ที่ทำให้เกิด Differential settlement น้อยที่สุดโดยโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ ก็คือ โปรแกรม PLAXIS 7.2

3.1.3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับโปรแกรม PLAXIS

โปรแกรม PLAXIS คือโปรแกรมที่ใช้ในการหาค่าการเสียรูปและเสถียรภาพของสิ่งก่อสร้างในด้านเทคนิคธรณี ซึ่งบางครั้งการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงการที่ต้องการความแม่นยำถูกต้องสูง จำเป็นจะต้องใช้แบบจำลองแบบไม่เป็นเส้นตรง และมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกับเวลา นอกจากนี้โปรแกรม PLAXIS ก็สามารถใช้จำลองรูปแบบในกรณีที่ดินมีหลายเฟส (phase) คือ ในช่วงที่มีแรงดันน้ำ และในช่วงที่ไม่มีแรงดันน้ำได้อีกด้วย แบบจำลองทางด้านเทคนิคธรณีนั้นจะมีความสำคัญในตัวของมันเองแล้ว แต่ทว่าโครงสร้างทางเทคนิคธรณีก็ยังต้องเกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางด้านโครงสร้าง และแรงกระทำระหว่างโครงสร้างกับดิน ซึ่งโปรแกรม PLAXIS จะมีคำสั่งที่ครอบคลุมกรณีต่างๆ ของโครงสร้างทางเทคนิคธรณีที่ซับซ้อนได้ ซึ่งได้สรุปสิ่งที่ควรรู้เกี่ยวกับโปรแกรม PLAXIS ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ โดยรายละเอียดของแต่ละหัวข้ออ้างอิงมาจากคู่มือโปรแกรม PLAXIS , Version 7 (Brinkgreve et al, 1998) ซึ่งได้แก่

การป้อนข้อมูลเกี่ยวกับรูปร่าง (Geometry) ของแบบจำลอง: การกรอกข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะชั้นดิน, ลักษณะโครงสร้าง, ขั้นตอนการก่อสร้างและเงื่อนไขของขอบเขตจะใช้วิธีการวาดรูปเป็นหลักซึ่งจะทำให้ได้รายละเอียด และความถูกต้องของแบบจำลอง ซึ่งเมื่อได้รูปร่างของแบบจำลองแล้ว การแบ่งเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ (mesh) จะกระทำได้โดยอัตโนมัติ

การสร้างชิ้นส่วนย่อยๆ (Mesh) โดยอัตโนมัติ: โปรแกรม PLAXIS จะแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ โดยอัตโนมัติโดยการแบ่งแบบทั้งหมด (global mesh refinement) หรือแบ่งแบบเฉพาะจุด (local mesh refinement) การแบ่งชิ้นส่วนย่อยๆ นี้จะแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นสามเหลี่ยม ซึ่งการวิเคราะห์นี้ถูกวิจัยและพัฒนาโดย Sepra

พื้นผิวร่วม (Interfaces): ชิ้นส่วนที่เป็นข้อต่อ (joint element) จำเป็นต้องใช้สำหรับคำนวณแรงปฏิกิริยาระหว่างโครงสร้างกับดิน ซึ่งชิ้นส่วนที่เป็นข้อต่อนี้อาจจะจำลองพฤติกรรมโดยพิจารณาเป็นชั้นบางๆ ที่สัมผัสกับฐานราก เสาเข็ม แผ่นใยสังเคราะห์ และกำแพงกันดินเป็นต้น ค่ามุมเสียดทานของพื้นผิวร่วม (interface friction angle) และแรงยึดหน่วง (adhesion) ซึ่งค่าไม่จำเป็นต้องเท่ากับค่ามุมเสียดทานและแรงยึดเกาะ (cohesion) และจะใช้ค่าตัวแปรเหล่านี้ใส่ในชิ้นส่วนที่จำลองไว้

แบบจำลองของมอร์คูลอม (Mohr-Coulomb Model): แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองอย่างง่ายที่เป็นแบบไม่เป็นเส้นตรง (non-linear model) และใช้ค่าตัวแปรต่างๆ ของดินซึ่งนิยมใช้โดยทั่วๆ ไป อย่างไรก็ตามแบบจำลองนี้จะไม่สามารถจำลองพฤติกรรมของดินที่เป็นแบบไม่เป็นเส้นตรงได้ทั้งหมด แบบจำลองของมอร์คูลอมนี้ใช้คำนวณหาค่าน้ำหนักประลัยในโครงสร้างฐาน

รากที่เป็นวงกลม เสาเข็มสั้น เป็นต้น และสามารถใช้คำนวณหาอัตราส่วนความปลอดภัยโดยใช้วิธีการลดค่ามุมเสียดทานและแรงยึดเกาะ (phi-c reduction) ได้อีกด้วย

แบบจำลองขั้นสูง: นอกจากแบบจำลองของมอร์คูลอมแล้ว โปรแกรม PLAXIS ยังมีแบบจำลองอื่นๆ ให้สามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับพฤติกรรมของดินแต่ละประเภทอีกด้วย เช่น ดินเหนียวอ่อนประเภท normally consolidated ควรจะเลือกใช้แบบจำลอง cam clay ซึ่งแบบจำลองนี้ใช้ชื่อเรียกในโปรแกรม PLAXIS ว่า "แบบจำลองในชั้นดินอ่อน (soft soil model)" ในชั้นดินที่แข็งขึ้น เช่น ดินเหนียวประเภท overconsolidated และดินทราย ควรจะเลือกแบบจำลองแบบไฮเปอร์โบลิก (hyperbolic model) ซึ่งเรียกในโปรแกรม PLAXIS ว่า "แบบจำลองในชั้นดินแข็ง (hardening soil model)" ซึ่งรายละเอียดของแบบจำลองเหล่านี้ แสดงไว้ในคู่มือโปรแกรม PLAXIS ส่วนที่เป็นแบบจำลองเกี่ยวกับวัสดุ (material model)

ความดันน้ำในโพรงขณะสมดุล (Steady state pore pressure): มีวิธีการ 2 วิธีด้วยกันที่จะกรอกข้อมูลเกี่ยวกับแรงดันน้ำในสภาพปกติ ถ้าแรงดันน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างซับซ้อน ก็ควรใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ และค่าแรงดันน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างง่าย ก็สามารถใช้วิธีการวิเคราะห์แบบใช้เส้นระดับน้ำใต้ดิน (phreatic lines)

แรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess pore pressure): โปรแกรม PLAXIS สามารถที่จะจำลองพฤติกรรมของดินซึ่งน้ำสามารถซึมผ่านได้และน้ำไม่สามารถซึมผ่านได้ ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะเกิดขึ้นในดินที่น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้ ซึ่งสภาพของดินในลักษณะนี้ใช้ในการตัดสินใจเพื่อวิเคราะห์หาเสถียรภาพของโครงสร้างทางเทคนิคธรณี หลังจากที่ทำการวิเคราะห์แล้วพบว่า โครงสร้างไม่มีเสถียรภาพก็จะต้องใช้วิธีการอัดตัวคายน้ำ (consolidation) เพื่อที่จะลดค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้น

ขั้นตอนการก่อสร้าง (Stage construction): โปรแกรม PLAXIS สามารถจำลองขั้นตอนการก่อสร้างและทำการขุดได้โดยการเลือกและไม่เลือกชิ้นส่วน (cluster) ที่เขียนไว้ได้ รูปแบบนี้จะทำให้การวิเคราะห์สอดคล้องกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

การอัดตัวคายน้ำ (Consolidation): การวิเคราะห์การอัดตัวคายน้ำจะใช้คำนวณในกรณีที่ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินมีค่าลดลง ซึ่งในการวิเคราะห์จำเป็นจะต้องใส่ข้อมูลเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (permeability coefficient) ในชั้นดินแต่ละชั้น

การนำเสนอผลงาน: โปรแกรม PLAXIS สามารถนำเสนอผลงานการวิเคราะห์ในด้านค่าของความเค้น การเคลื่อนตัว ค่าแรงในโครงสร้าง ในรูปแบบของรูปภาพ กราฟ และตาราง

ทิศของเครื่องหมาย (Sign convention): โปรแกรม PLAXIS จะใช้ทิศของเครื่องหมายไม่เหมือนที่ใช้ในวิชาทางด้านเทคนิคธรณี กล่าวคือ ในโปรแกรม PLAXIS ค่าความเค้นที่เป็น

แรงดึง (tensile stress) จะให้เครื่องหมายเป็นบวก ในขณะที่ค่าความเค้นที่เป็นแรงอัด (compression stress) จะใช้เครื่องหมายเป็นลบ ซึ่งทิศของเครื่องหมายนี้ครอบคลุมไปถึงค่าแรงดันของน้ำด้วยเช่นกัน

3.1.3.2 ขั้นตอนการศึกษา

แบ่งขั้นตอนการศึกษาเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกัน

ขั้นตอนแรกเป็นการวิเคราะห์ผลการทดสอบ เพื่อให้ได้ค่า parameter ต่างๆ ที่ต้องนำมาใช้ในการวิเคราะห์การทรุดตัวด้วยโปรแกรม ทางไฟไนท์อีลีเมนต์ซึ่งประกอบด้วยค่าต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ขั้นตอนที่สอง เป็นการวิเคราะห์การทรุดตัวด้วยน้ำหนักตัวเอง ด้วยโปรแกรมทางไฟไนท์อีลีเมนต์ และในการวิเคราะห์แต่ละครั้งนั้น กำหนดให้หลุมฝังกลบถูกจำลองด้วยวิธีการทางไฟไนท์อีลีเมนต์ โดยวิเคราะห์แบบ plane strain analysis และโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ก็คือโปรแกรม PLAXIS 7.2

การวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์ทั้งในสภาพที่ไม่มีการระบายน้ำและในสภาพที่เกิดกระบวนการอัดตัวคายน้ำ โดยไม่พิจารณาถึงผลกระทบของขั้นตอนในการก่อสร้าง กำหนดให้ขนาดของหลุมฝังกลบนั้นมีขนาดเดียวกันทั้งหมด ดังรูปที่ 3.21 โดยมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าก้นหลุม 6 เมตร เพื่อไม่ให้มีผลต่อการวิเคราะห์ และกำหนดให้ชั้นดินที่อยู่ก้นหลุมฝังกลบมีความแข็งแรงมาก เพื่อให้การทรุดตัวทั้งหมดเกิดขึ้นเนื่องจากกากของเสียเพียงอย่างเดียวเท่านั้น สำหรับรูปการแบ่งชิ้นส่วนย่อยๆ (mesh) ทางไฟไนท์อีลีเมนต์แสดงใน รูปที่ 3.22

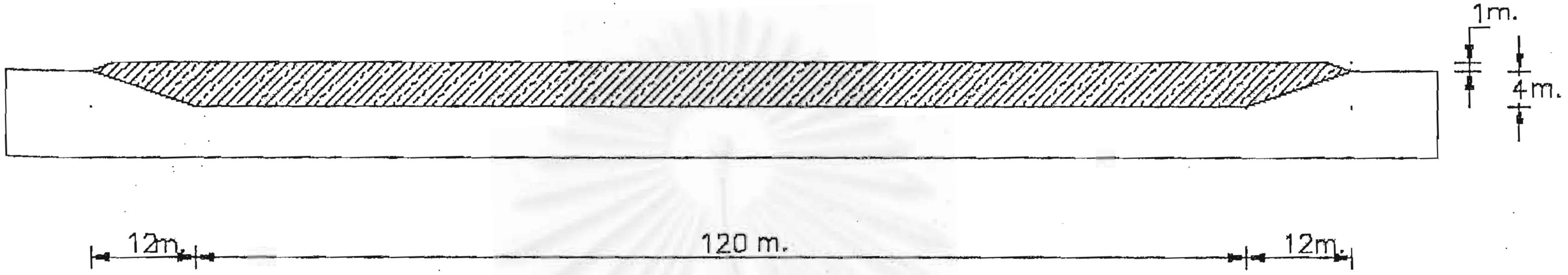
ในการวิเคราะห์ สมมุติให้แบบจำลองของกากของเสียบดอัด เป็น Mohr Coulomb model ซึ่งเป็นแบบจำลองนี้เรียกอีกอย่างว่า แบบจำลองที่มีความเป็นพลาสติกสูง (perfect-plasticity model) ความเป็นพลาสติกจะเกี่ยวข้องกับค่าของความเครียดซึ่งไม่เกิดการคืนตัว เพื่อที่จะหาค่าความเป็นพลาสติกว่าเกิดขึ้นหรือไม่ในการคำนวณจึงจำเป็นต้องกำหนด ฟังก์ชันของยีวด์ (yield function, f) ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ฟังก์ชันของยีวด์ คือ พื้นที่ผิวของบริเวณความเค้นหลัก (principal stress) แบบจำลองที่มีความเป็นพลาสติกสูง คือ แบบจำลองที่มีพื้นที่ผิวที่เกิดยีวด์ที่แน่นอน ซึ่งพื้นผิวที่เกิดยีวด์นี้เกิดขึ้นโดยใช้ค่าตัวแปรต่างๆ ในดินในการคำนวณหา และไม่มีผลกระทบเนื่องมาจากความเครียด สำหรับกรณีที่พิจารณาถึงความเค้น ซึ่งแทนที่ด้วยจุดต่างๆ ภายในพื้นผิวที่เกิดยีวด์ ค่าพฤติกรรมของดินก็จะเกิดความยืดหยุ่นเพียงอย่างเดียว (purly elastic) และความเครียดสามารถคืนตัวได้ แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่รู้จักกัน

อย่างแพร่หลายในการจำลองพฤติกรรมของดินโดยทั่วๆ ไป แบบจำลองนี้มีตัวแปร 5 ค่าด้วยกัน คือ โมดูลัสของยัง (Young's modulus, E) อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio. ν) ค่าแรงยึดเกาะ (Cohesion, c) ค่ามุมเสียดทาน (friction angle, ϕ) และค่า dilantancy angle, ψ

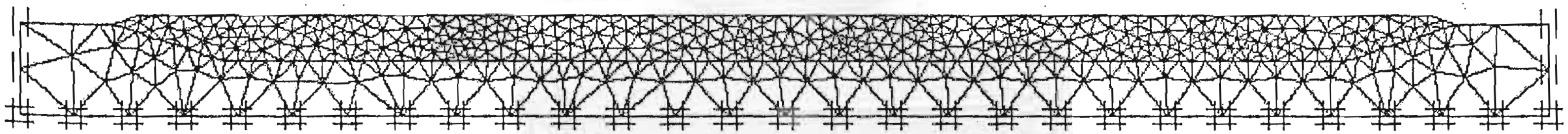
ตารางที่ 3.2 แสดง parameter ที่ได้มาจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและที่มาเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางไฟไนท์อีลีเมนต์

ลำดับที่	Parameter	ที่มา
1	Dry unit weight, γ_{dry}	การทดสอบการบดอัด (Compaction Test) โดยเลือกใช้ Maximum dry unit weight
2	Wet unit weight, γ_{wet}	การทดสอบการบดอัด (Compaction Test)
3	Cohesion intercept, c	การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Direct Shear Test)
4	Friction angle, ϕ	การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน (Direct Shear Test)
5	Permeability, k	การทดสอบความสามารถในการไหลซึม (Permeability Test)
6	Drained Young's Modulus, E'	การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) โดยหาค่า Constrain Modulus, D แล้วปรับแก้ด้วย Poisson's ratio จะได้ Drained Young's Modulus, E'

ส่วนดินที่รองรับกากของเสียอยู่ใต้หลุมฝังกลบนั้น เป็นแบบจำลองแบบ Linear elastic model ซึ่งในการวิเคราะห์แบบจำลองนี้ใช้กฎของฮุค (Hooke's law) ในช่วงที่มีความยืดหยุ่นเป็นเส้นตรง แบบจำลองจะใช้ค่าตัวแปร 2 ค่าด้วยกัน คือ ค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus, E) และค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio, ν) การประยุกต์ใช้แบบจำลองนี้มีข้อจำกัดมากในการจำลองพฤติกรรมของดิน ซึ่งจะนิยมใช้มากในโครงสร้างของดินที่มีความแข็งแรงพอสมควร



รูปที่ 3.21 ขนาดของหลุมฝังกลบกากของเสียที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PLAXIS



รูปที่ 3.22 ขนาดของ mesh ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PLAXIS

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 แผนผังขั้นตอนการศึกษาวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการ

↓

Compaction Test

Maximum dry density, Optimum moisture content

↓

Direct Shear Test	Permeability Test	Consolidation Test
ϕ', c'	k	c_v, CR, RR, E'
3 densities	1 density	3 densities
$(95-97)\%\text{Max.}\gamma_d$	$Max.\gamma_d$	$(95-97)\%\text{Max.}\gamma_d$
$Max.\gamma_d$	at vertical stress	$Max.\gamma_d$
$(103-105)\%\text{Max.}\gamma_d$	1 ksc.	$(103-105)\%\text{Max.}\gamma_d$
2 rates shear		โดยใช้
drained condition		$\frac{\Delta P}{P} = 1$
0.5 mm./min		

↓

วิเคราะห์ vertical settlement **และ** differential settlement **ด้วยโปรแกรมไฟไนท์อีลีเมนต์เพื่อหาการจัดเรียงกากของเสียภายในหลุมฝังกลบที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้เกิด** differential settlement **น้อยที่สุด**

รูปที่ 3.23 สรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

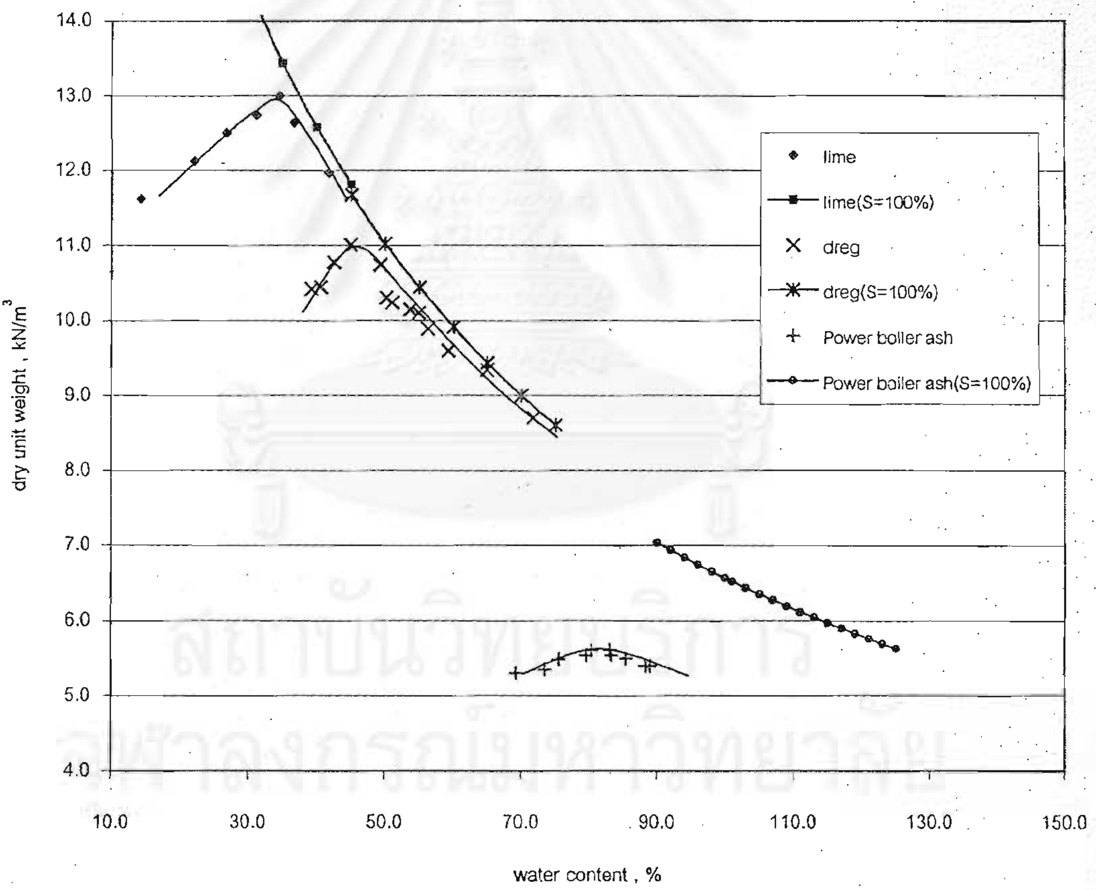
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

4.1 ผลการทดสอบหาความหนาแน่นแห้งสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสมของกากของเสีย ด้วยวิธี Standard Proctor Compaction Test

การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อต้องการหาความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของกากของเสีย โดยจะนำไปใช้ในการเตรียมตัวอย่างทดลองในหัวข้อถัดไป ผลารทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นในการทดสอบบดอัดกากของเสียด้วยวิธี Standard Proctor Compaction Test

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบบดอัดกากของเสียด้วยวิธี Standard Proctor Compaction Test

ชนิดของ กากของเสีย	G_s	ความหนาแน่นแห้ง สูงสุด , kN/m^3	ปริมาณความชื้น ที่เหมาะสม , %	เปอร์เซ็นต์ การอิ่มตัวด้วยน้ำ
Lime Mud	2.631	13.0	33	86
Dreg	2.565	11.0	43	90
Power boiler ash	2.024	5.6	83	65

จากผลการทดสอบ พบว่า Lime Mud มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด มากกว่า Dreg และ power boiler ash ตามลำดับ ส่วนเปอร์เซ็นต์การอิ่มตัวด้วยน้ำนั้น power boiler ash มีค่าน้อยมากเนื่องมาจาก power boiler มีลักษณะคล้ายเถ้าแกลบ น้ำหนักค่อนข้างเบา ขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่เท่า ๆ กัน ดังนั้นเมื่อบดอัดแล้ว ก็ยังคงมีช่องว่างอยู่มาก และน้ำไม่สามารถเข้าไปแทนที่ช่องว่างได้ทั้งหมดเนื่องจากน้ำจะไหลออกจากตัวอย่างเวลาที่ทำการบดอัด ทำให้กราฟการบดอัดค่อนข้างห่างจากเส้น zero air void

4.2 ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของกากของเสียบดอัด

การทดสอบกำลังรับน้ำหนัก โดย Direct Shear Test เพื่อหาค่า cohesion intercept และ friction angle โดยในการทดสอบแต่ละตัวอย่าง ใช้ความหนาแน่นแห้งแตกต่างกัน 3 ค่าซึ่งได้มาจากการทดสอบการบดอัด โดยใช้อัตราการเฉือน 2 ค่า ค่าแรกเป็นค่าที่ทำให้ตัวอย่างอยู่ในสภาพระบายน้ำ ซึ่งคำนวณได้จากมาตรฐาน ASTM D: 3060-90 ส่วนอีกค่าหนึ่ง คือ 0.5 มม./นาที

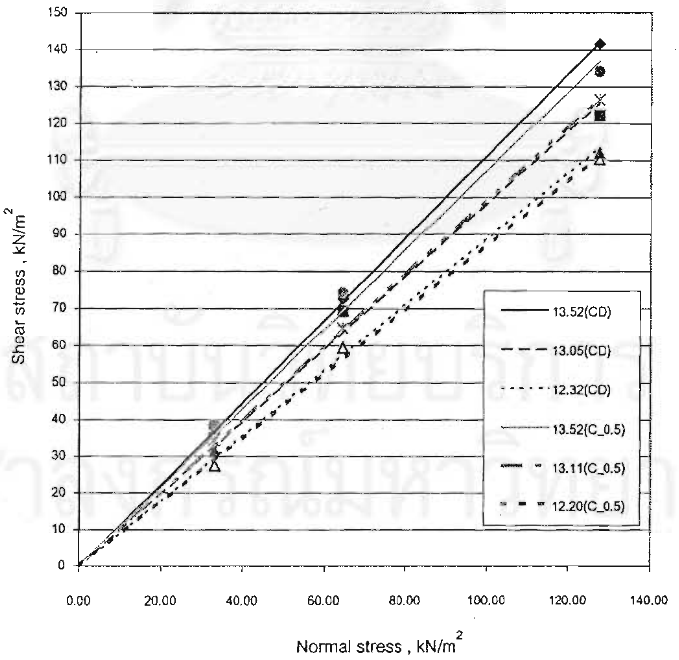
4.2.1 ผลการทดสอบหาค่า cohesion intercept และ friction angle โดยการทดสอบ Direct shear

ผลการทดสอบแสดงค่า cohesion intercept และค่า friction angle ของแต่ละตัวอย่างทั้ง 3 ความหนาแน่นแห้งทั้ง 2 อัตราการเฉือน สรุปได้ดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2,4.3 และ 4.4

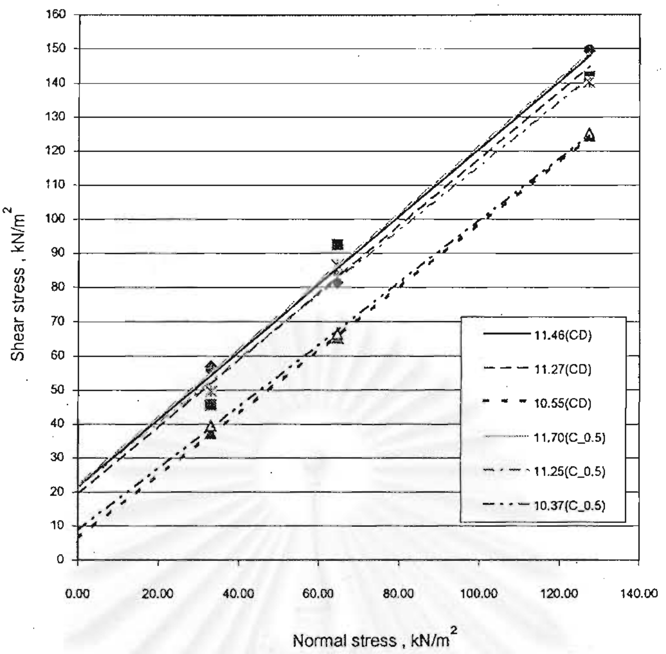
ตารางที่ 4.2 สรุปผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของกากของเสียทั้ง 3 ชนิด

type of sample	Ave.dry unit weight , (kN/m^3)	Ave.moisture content , %	Cohesion intercept (kN/m^2) / Friction angle			
			C_0.5*		CD	
Lime	13.52	33.00	0.00	47.12°	0.00	48.14°
	13.12	31.91	0.00	44.94°	0.00	44.61°
	12.24	32.01	0.00	41.19°	0.00	41.72°
Dreg	11.53	42.18	22.15	44.88°	21.52	44.75°
	11.18	43.05	21.39	43.36°	19.39	44.61°
	10.33	39.46	8.82	42.33°	6.25	42.79°
Power boiler ash	5.84	81.83	23.01	44.69°	26.31	43.85°
	5.60	82.11	11.17	43.56°	16.01	42.21°
	5.16	81.85	10.07	39.01°	9.21	37.63°

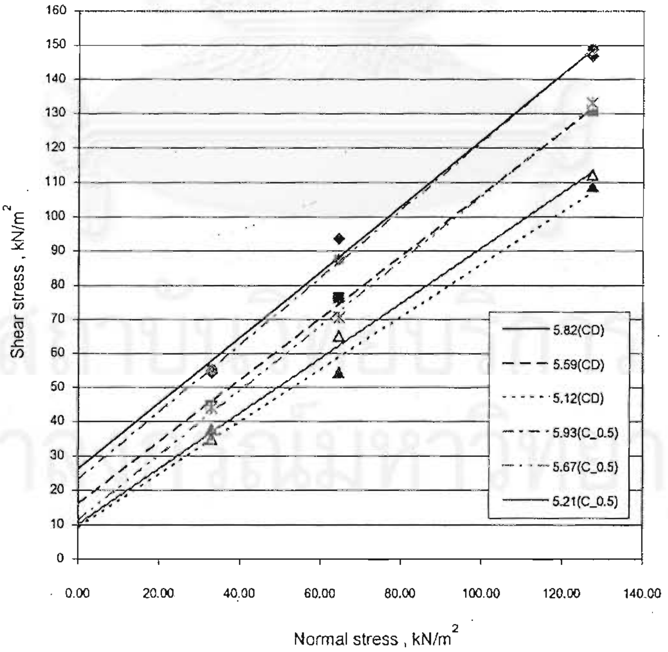
* หมายเหตุ ทดสอบในสภาพ consolidation ด้วยอัตราการเฉือน 0.5 มม./นาที



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress และ normal stress ของ Lime Mud ที่ความหนาแน่นแห้งต่าง ๆ ทั้งอัตราการเฉือน 0.5 มม./นาที และอัตราการเฉือนที่ทำให้เกิดการระบายน้ำ



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress และ normal stress ของ Dreg ที่ความหนาแน่น แห้งต่าง ๆ ทั้งอัตราการเฉือน 0.5 มม./นาที และอัตราการเฉือนที่ทำให้เกิดการระบายน้ำ



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress และ normal stress ของ Power boiler ash ที่ความหนาแน่นแห้งต่าง ๆ ทั้งอัตราการเฉือน 0.5 มม./นาที และอัตราการเฉือนที่ทำให้เกิดการระบายน้ำ

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบกำลังการรับน้ำหนักของ Lime Mud ที่ความหนาแน่นแห้งต่าง ๆ โดยใช้อัตราการเฉือน 2 ค่า คือ 0.0143 มม./นาที ซึ่งเป็นอัตราการเฉือนที่ทำให้เกิดสภาพระบายน้ำทัน (คำนวณ rate shear จากมาตรฐาน ASTM D: 3060-90) และ 0.5 มม./นาที พบว่า Lime Mud ไม่มีค่า cohesion intercept และเมื่อความหนาแน่นมากขึ้นจะทำให้ค่า friction angle มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการทดสอบที่อัตราการเฉือน 0.0143 มม./นาที และ 0.5 มม./นาที แทบไม่ได้ให้ผลที่ต่างกันเลย นั่นแสดงว่าอัตราการเฉือนไม่มีผลต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักของกากของเสียชนิดนี้ จึงหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งทั้งหมด กับ friction angle ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เพื่อหาค่า friction angle ในการนำไปวิเคราะห์การทรุดตัวของหลุมฝังกลบกากของเสียในหัวข้อ 4.5 ต่อไป โดยสมมุติว่า Lime Mud ถูกบดอัดที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด คือ 13 kN/m^3 ที่ปริมาณความชื้น 33% และจากกราฟรูปที่ 4.5 ทำให้สามารถประมาณค่า friction angle ได้เท่ากับ 44.8 °

จากผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของ Dreg ที่มีความหนาแน่นแห้ง ต่าง ๆ โดยใช้อัตราการเฉือน 2 ค่า คือ 0.0083 มม./นาที ซึ่งเป็นอัตราการเฉือนที่ทำให้เกิดสภาพระบายน้ำทัน (คำนวณ rate shear จากมาตรฐาน ASTM D: 3060-90) และ 0.5 มม./นาที พบว่า เมื่อความหนาแน่นมากขึ้นจะทำให้ค่า cohesion intercept และ friction angle มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการทดสอบที่อัตราการเฉือน 0.0083 มม./นาที และ 0.5 มม./นาที แทบไม่ได้ให้ผลที่ต่างกันเลย นั่นแสดงว่า อัตราการเฉือนไม่มีผลต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักของกากของเสียชนิดนี้ จึงหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งทั้งหมด กับ friction angle ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และความหนาแน่นแห้งทั้งหมด กับ cohesion intercept แสดงในรูปที่ 4.6 เพื่อหาค่า friction angle และ cohesion intercept ในการนำไปวิเคราะห์การทรุดตัวของหลุมฝังกลบกากของเสียในหัวข้อ 4.5 ต่อไป โดยสมมุติว่า Dreg ถูกบดอัดที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด คือ 11 kN/m^3 ที่ปริมาณความชื้น 43% และจากกราฟรูปที่ 4.5 และ 4.6 ทำให้สามารถประมาณค่า friction angle ได้เท่ากับ 43.7 ° cohesion intercept เท่ากับ 15.3 kN/m^3

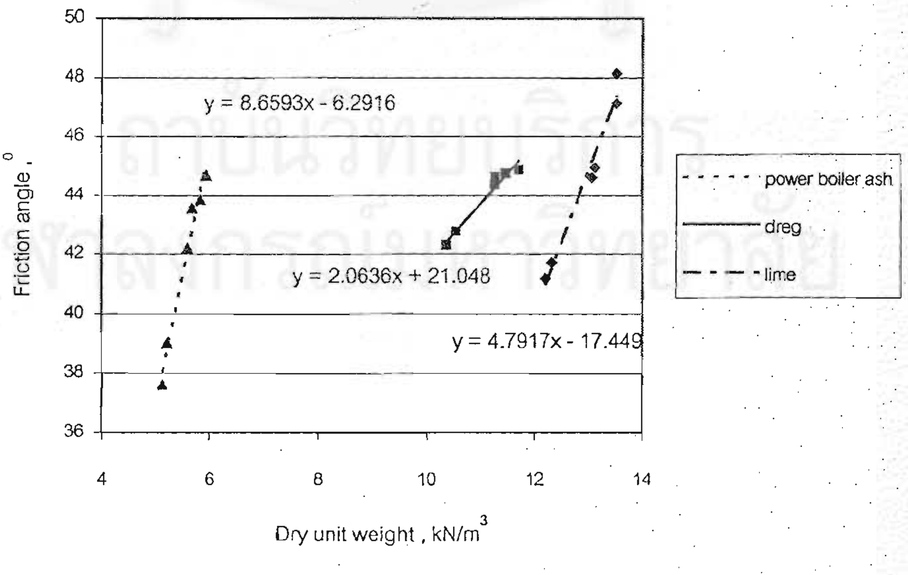
จากผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของ Power boiler ash ที่มีความหนาแน่นแห้งต่าง ๆ โดยใช้อัตราการเฉือน 2 ค่า คือ 0.0221 มม./นาที ซึ่งเป็นอัตราการเฉือนที่ทำให้เกิดสภาพระบายน้ำทัน (คำนวณ rate shear จากมาตรฐาน ASTM D: 3060-90) และ 0.5 มม./นาที พบว่า เมื่อความหนาแน่นมากขึ้นจะทำให้ค่า cohesion interceptและ friction angle มากขึ้น และการทดสอบที่อัตราการเฉือน 0.0221 มม./นาที และ 0.5 มม./นาที แทบไม่ได้ให้ผลที่ต่างกันเลย นั่นแสดง

ว่า อัตราการเฉือนไม่มีผลต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักของกากของเสียชนิดนี้ เช่นเดียวกับ Lime Mud และ Dreg จึงหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งทั้งหมด กับ friction angle ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และความหนาแน่นแห้งทั้งหมด กับ cohesion intercept ดังแสดงในรูปที่ 4.6 เพื่อหาค่า friction angle และ cohesion intercept ในการนำไปวิเคราะห์การทรุดตัวของหลุมฝังกลบกากของเสียในหัวข้อ 4.5 ต่อไป โดยสมมุติว่า Power boiler ash ถูกบดอัดที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด คือ 5.6 kN/m^3 ที่ปริมาณความชื้น 83% และจากกราฟรูปที่ 4.5 และ 4.6 ทำให้สามารถประมาณค่า friction angle ได้เท่ากับ 42.2 ° cohesion intercept เท่ากับ 16.8 kN/m^2

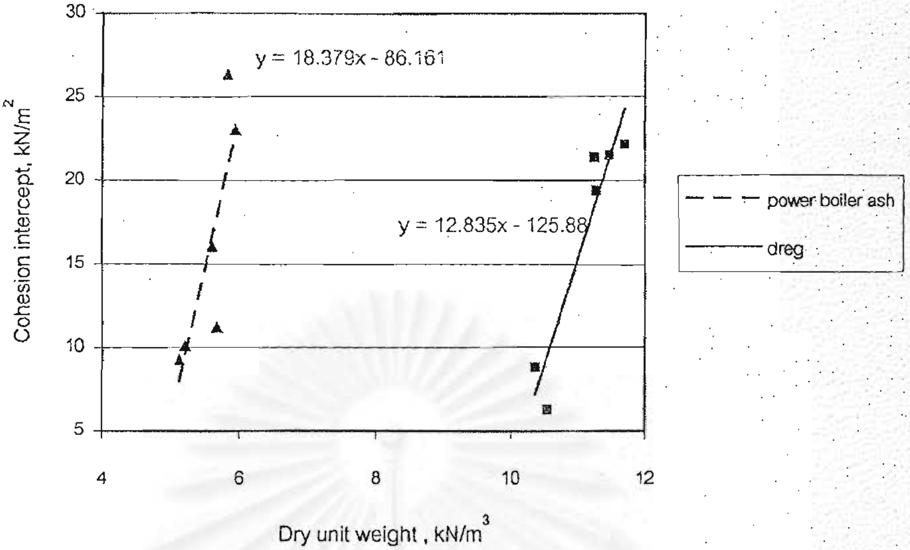
ดังนั้นสรุปได้ว่าPower boiler ash ให้ค่า cohesion intercept มากทีสุดคือ 16.8 kN/m^2 รองลงมาคือ Dreg ส่วน Lime Mud นั้นไม่มีค่า cohesion intercept เลย และกากของเสียทั้ง 3 ชนิดมีค่า friction angle ไม่ต่างกันมากนัก โดย Lime Mud มีค่า friction angle มากกว่า Dreg และ Power boiler ash ตามลำดับ โดยสรุปไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สรุปค่า cohesion intercept และ friction angle ของกากของเสียบดอัดที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุดจากการทดสอบการบดอัด

Type of sample	Cohesion intercept, kN/m^2	Friction angle
Lime Mud	0	44.8 °
Dreg	15.3	43.7°
Power boiler ash	16.8	42.2°



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง dry unit weight กับ friction angle ของกากของเสียทั้ง 3 ชนิด



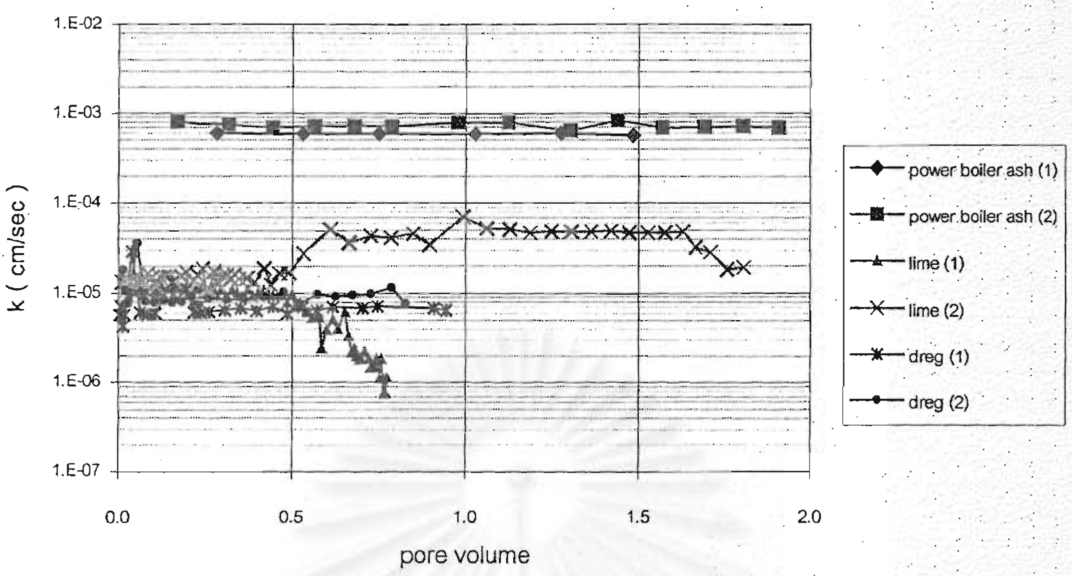
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง dry unit weight กับ cohesion intercept ของกากของเสียทั้ง 3 ชนิด

4.3 ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของกากของเสียบดอัด

การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของกากของเสียบดอัด เพื่อหาค่า permeability , k โดยทำการทดสอบตัวอย่างละ 2 ครั้ง โดยใช้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบการบดอัด และให้ vertical stress เท่ากับ 1 กก./ซม.^{2} นำผลการทดสอบมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง permeability กับ pore volume ดังรูปที่ 4.7

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบ พบว่า Power boiler ash ให้ค่า permeability สูงที่สุดประมาณ 6.5x10^{-4} cm./sec ซึ่งถือว่ามีอัตราการซึมผ่านค่อนข้างสูง ส่วน Dreg มีค่า permeability ประมาณ 8x10^{-6} cm./sec ส่วน Lime Mud นั้นในช่วงแรกของการทดสอบมีอัตราการซึมผ่านคงที่ประมาณ 1x10^{-5} cm./sec แต่หลังจากนั้นกลับมีค่าลดลงหรืออาจมากขึ้น ในกรณีที่ค่า k ลดลง อาจเนื่องมาจากมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นส่วนในกรณีที่ค่า k มากขึ้น อาจเนื่องมาจากเกิดช่องทางเดินของน้ำขึ้น



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง permeability กับ pore volume ของกากของเสียทั้ง 3 ชนิด

ในการเลือกค่า k เพื่อนำมาวิเคราะห์การทรุดตัวของหลุมฝังกลบกากของเสียนั้น เลือกใช้ ค่า k ที่ได้จากการทดสอบที่อยู่ในช่วงคงที่ นั่นคือ 6.5×10^{-4}, 8×10^{-6} และ 1×10^{-5} ของ Power boiler ash, Dreg และ Lime Mud ตามลำดับ โดยถูกกดทับด้วย vertical stress เท่ากับ 1 กก./ซม.^{2} ซึ่งในการวิเคราะห์การทรุดตัวแรงดันกดทับอาจไม่เท่ากับ 1 กก./ซม.^{2} ก็ตาม เนื่องจากค่า k ไม่ได้มีผลต่อปริมาณการทรุด แต่จะมีผลต่อระยะเวลาการทรุดตัวเท่านั้น จึงใช้ค่า k ที่ได้จากการทดสอบนี้ถือว่าเพียงพอและสามารถใช้ได้โดยไม่ทำให้ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวผิดพลาดไป

4.4 ผลการทดสอบสมบัติด้านการเคลื่อนตัวของกากของเสียบดอัด

การทดสอบสมบัติด้านการเคลื่อนตัว โดยการทดสอบ Consolidation Test เพื่อหาค่า parameter ต่าง ๆ ได้แก่ Coefficient of Consolidation (C_v), Compression Ratio(CR), Recompression Ratio(RR) และ หน่วยแรงสูงสุดในอดีต (Maximum stress history($\bar{\sigma}_{vm}$) และ Drained Young's Modulus ในการทดสอบแต่ละตัวอย่าง ใช้ความหนาแน่นแตกต่างกัน 3 ค่าซึ่งได้มาจากการทดสอบการบดอัด แล้วนำ parameter ต่าง ๆ นำมาสรุปได้ดังตารางที่ 4.4

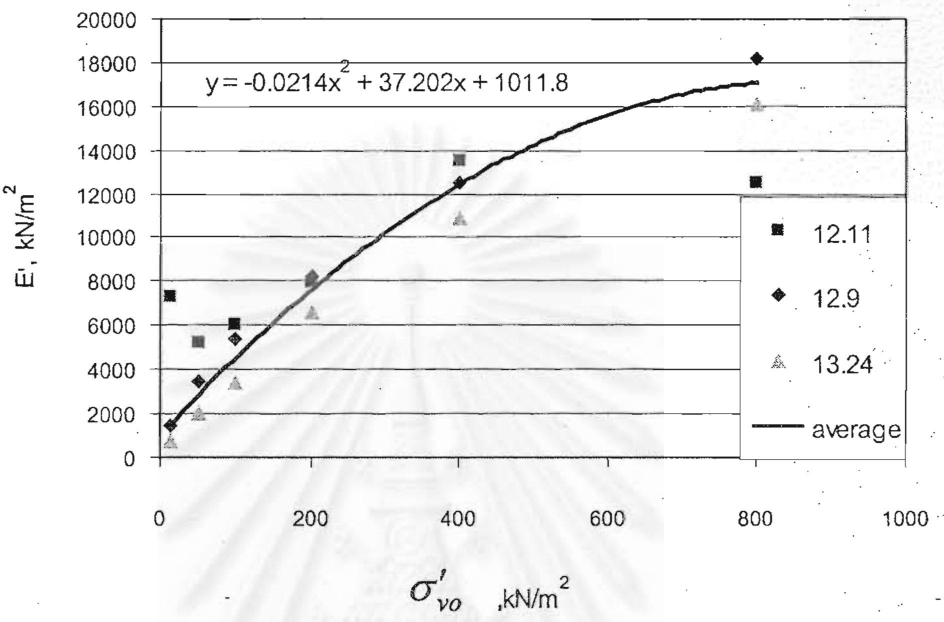
ตารางที่ 4.4 สรุป parameter ที่ได้จากการทดสอบ Consolidation Test

Type of sample	Dry unit weight kN/m^3	e_0	$\bar{\sigma}_{vm}$ kN/m^2	RR	CR	C_v x10^{-4} cm^2/sec
Lime Mud	13.238	0.9493	400	0.0341	0.0534	0.807-1.626
	12.900	1.0003	340	0.0392	0.0539	0.455-1.723
	12.113	1.1304	300	0.0365	0.0782	0.703-1.190
Dreg	11.315	1.2235	410	0.0299	0.0771	0.588-0.829
	11.023	1.2825	350	0.0351	0.0644	0.597-1.339
	10.522	1.3910	420	0.0320	0.0861	0.822-1.407
Power boiler ash	5.929	2.5159	380	0.0142	0.0822	5.829-7.960
	5.638	2.6973	370	0.0414	0.1723	5.052-7.932
	5.264	2.9600	260	0.0671	0.2288	5.892-7.960

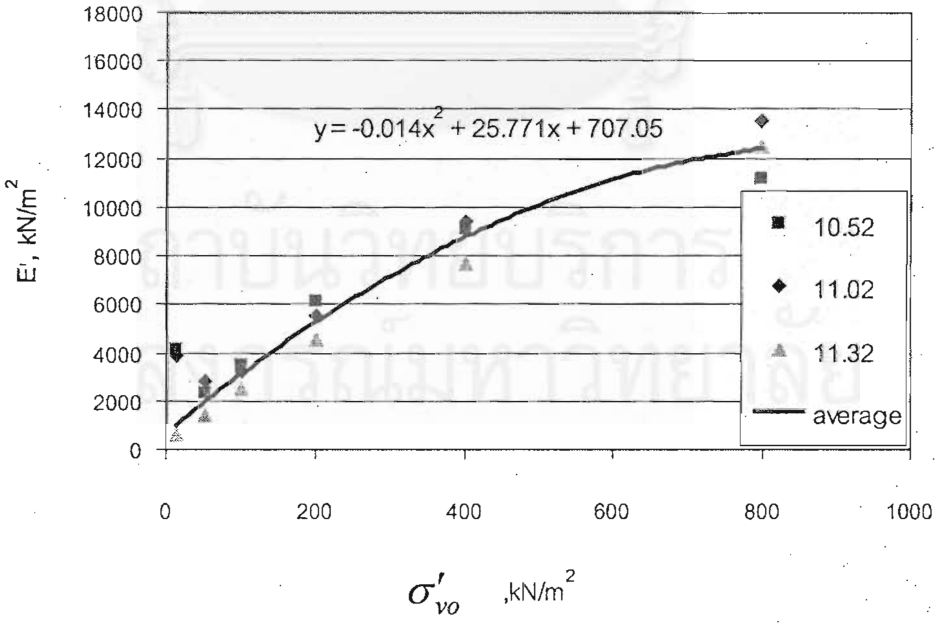
วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบพบว่า ในช่วงที่ vertical stress น้อย ๆ (ช่วง OC) Power boiler มีการทรุดตัวน้อยที่สุด (เปรียบเทียบที่ vertical stress เดียวกัน) เนื่องจากมีค่า RR ต่ำที่สุด ส่วนในช่วงที่ vertical stress สูงขึ้น (ช่วง NC) Power boiler ash กลับมีค่าสูงขึ้น และสูงมากกว่า Lime Mud และ Dreg อย่างมาก (เปรียบเทียบที่ vertical stress เดียวกัน) สังเกตจากค่า CR สูงมากเนื่องมาจากว่า Power boiler ash มีช่องว่างอยู่มากและจะต้องมี vertical stress สูงเท่านั้นมากระทำจึงจะทำให้ช่องว่างลดลงได้ เพราะฉะนั้น การวาง Power boiler ash ไว้ที่ก้นหลุมฝังกลบ จะทำให้เกิด vertical settlement สูง ส่วน Lime Mud และ Dreg นั้น ในช่วงที่ vertical stress น้อย ๆ น่าจะเกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันเล็กน้อยโดยที่ Lime Mud เกิดการทรุดตัวมากกว่า Dreg (เปรียบเทียบที่ vertical stress เดียวกัน) แต่การทรุดตัวที่เกิดขึ้น ในช่วงที่ vertical stress สูง ๆ นั้น Dreg น่าจะเกิดการทรุดตัวมากกว่า Lime Mud (เปรียบเทียบที่ vertical stress เดียวกัน) เนื่องจากมีค่า CR สูงกว่าดังนั้น Dreg หรือ Lime Mud น่าจะอยู่ก้นหลุมจึงจะเหมาะสมที่สุด แต่การทรุดตัวยังขึ้นกับ vertical stress ด้วย ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์ต่อไปในหัวข้อ 4.5

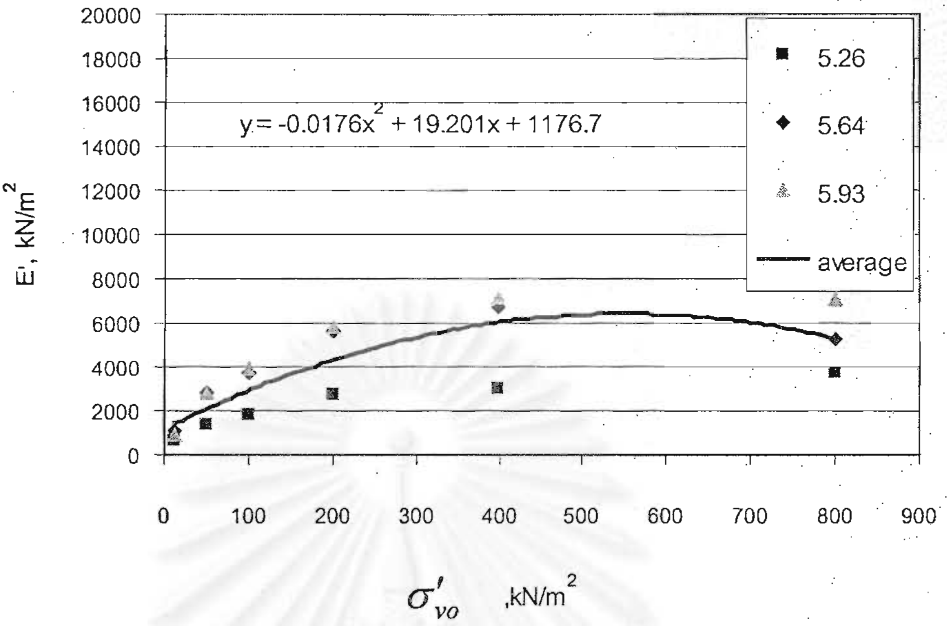
ส่วนผลการทดสอบเพื่อหาค่า Drained Young's Modulus ซึ่งขึ้นกับค่า σ'_{vo} แล้วนำค่าที่ได้มาสรุปดังรูปที่ 4.8, 4.9 และ 4.10 เพื่อสำหรับประมาณค่า E' ที่ใช้การวิเคราะห์การทรุดตัวในข้อ 4.5 ต่อไป



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง E' กับ σ'_{vo} ของ Lime Mud ที่ความหนาแน่นแห้งต่าง ๆ กัน



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง E' กับ σ'_{vo} ของ Dreg ที่ความหนาแน่นแห้งต่าง ๆ กัน



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง E' กับ σ'_{vo} ของ Power boiler ash ที่ความหนาแน่นแห้งต่าง ๆ กัน

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบ เพื่อหาค่า ของ Lime Mud ที่มีความหนาแน่นต่าง ๆ พบว่า เมื่อ σ'_{vo} มากขึ้นส่งผลให้ค่า E' มีค่าเพิ่มมากขึ้นเหมือนดินทั่วไป และจากกราฟรูปที่ 4.8 พบว่า ค่า E' ของ Lime Mud ที่ใช้อยู่ในช่วง 12.11 – 13.24 kN/m^3 แต่ค่า E' ของ Lime Mud ที่ต้องการใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนอิลีเมนต์นั้นต้องบดอัดที่ความหนาแน่นแห้ง 13 kN/m^3 จึงใช้ค่ากลาง ๆ ที่มาจากการเฉลี่ยที่ความหนาแน่นแห้งในช่วง 12.11 – 13.24 kN/m^3 ได้เป็นสมการ 4.1 เพื่อสะดวกต่อการนำไปใช้

$$y = -0.0214x^2 + 37.202x + 1011.8 \quad .....(4.1)$$

โดยที่ y คือ E' ส่วน x คือ σ'_{vo}

สำหรับค่า E_{50} ของ Dreg และ Power boiler ash นั้นก็มีลักษณะคล้ายกับ Lime Mud เช่นกัน ดือค่า E' ของ Dreg ที่มีความหนาแน่นแห้ง 11 kN/m^3 ใช้ค่ากลาง ๆ ที่มาจากการ

เฉลี่ยที่ความหนาแน่นแห้งในช่วง 10.52-11.32 kN/m^3 ซึ่งได้สมการ 4.2 เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้

$$y = -0.014x^2 + 25.771x + 707.05 \quad .....(4.2)$$

โดยที่ y คือ E' ส่วน x คือ σ'_{vo}

ส่วน ค่า E' ของ Power boiler ash ที่มีความหนาแน่นแห้ง 5.6 kN/m^3 ใช้ค่ากลาง ๆ ที่มาจากการเฉลี่ยที่ความหนาแน่นแห้งในช่วง 5.26-5.93 kN/m^3 ได้สมการ 4.3 ซึ่งพบว่า Power boiler ash มีค่าต่ำที่สุด และ Lime Mud จะให้ค่า E' สูงกว่า Dreg ที่ σ'_{vo} เดียวกัน

$$y = -0.0176x^2 + 19.201x + 1176.7 \quad .....(4.3)$$

โดยที่ y คือ E' ส่วน x คือ σ'_{vo}

4.5 ผลการวิเคราะห์ vertical settlement และ differential settlement ของหลุมฝังกลบกากของเสียบดอัด ด้วยโปรแกรม PLAXIS

ขั้นแรกเป็นการสรุป parameter ต่าง ๆ ที่ต้องนำมาใช้ในการวิเคราะห์ vertical settlement และ differential settlement จากการทดสอบในหัวข้อ 4.1-4.3 นำมาสรุปได้ดังตารางที่ 4.5 ส่วนขั้นที่สองเป็นการวิเคราะห์ vertical settlement และ differential settlement ของกากของเสียที่มีวิธีการเรียงต่าง ๆ กันไป เพื่อหาวิธีการเรียงกากของเสีย ที่มี Maximum Differential settlement น้อยที่สุดเพื่อนำไปใช้จริงในสนามให้เกิดความเหมาะสมที่สุดและไม่ให้เกิดอันตรายต่อโครงสร้างต่าง ๆ ด้านบนหลุมฝังกลบกากของเสีย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 สรุป parameter นำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PLAXIS

Parameter	Lime Mud	Dreg	Power boiler ash
Dry unit weight, γ_{dry} (kN/m^3)	13.00	11.00	5.6
Wet unit weight, γ_{wet} (kN/m^3)	17.29	15.84	10.24
Cohesion intercept, c (kN/m^2)	1	15.3	16.8
Friction angle, ϕ °	44.8	43.7	42.2
Permeability, k (cm/sec)	$1x10^{-5}$	$8x10^{-6}$	$6.5x10^{-4}$
Drained Young's modulus, (kN/m^2)	สมการ 4.1	สมการ 4.2	สมการ 4.3

จากผลการวิเคราะห์ วิธีการเรียงกากของเสียโดยการทดลองสุ่มการจัดเรียงด้วยวิธีต่าง ๆ คือ เรียงด้วยกากของเสียชนิดเดียวทั้งหลุมฝังกลบ, เรียงสลับกันตามแนวนอน และเรียงสลับกันตามแนวตั้ง สำหรับการเรียงสลับกันตามแนวนอนนั้นทดลองเรียง 2 แบบ คือ เรียงโดยใช้ความหนาเท่ากันทุกชั้น และ เรียงแบบความหนาไม่เท่ากัน (ชั้นแรก 1ม., ชั้นที่สอง 2 ม.และชั้นที่สาม 2 ม.) รวม 18 วิธี และผลการการวิเคราะห์แสดงไว้ในรูปที่ 4.11 – 4.28 และสรุปค่า Maximum Vertical settlement และ Maximum Differential settlement ในแต่ละแบบไว้ในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 สรุปค่า Maximum vertical settlement และ Maximum differential settlement ในแต่ละวิธีการเรียงกากของเสีย

แบบที่	Maximum Vertical settlement (m.)	Maximum Differential settlement
1	0.04717	0.002327
2	0.06019	0.009360
3	0.03157	0.003737
4	0.03897	0.003512
5	0.03563	0.003506
6	0.04207	0.00386
7	0.04933	0.00234
8	0.04910	0.00237
9	0.05435	0.004641

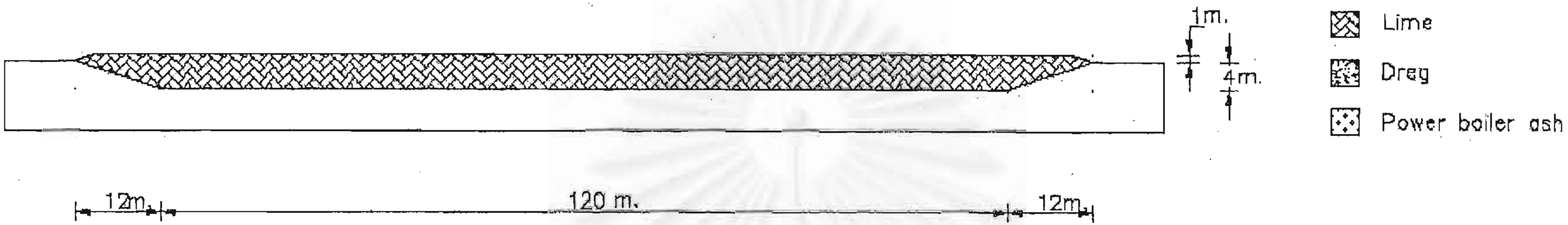
10	0.004415	0.00235
11	0.03916	0.00361
12	0.03733	0.00374
13	0.04862	0.00233
14	0.04556	0.00364
15	0.06583	0.00950
16	0.06013	0.00972
17	0.06011	0.00960
18	0.06015	0.00815

จากผลการวิเคราะห์พบว่า เมื่อทำการฝังกลบกากของเสียเพียงชนิดเดียวในหนึ่งหลุมฝังกลบ (แบบที่ 1-3) โดย Power boiler ash (แบบที่ 3) มีค่า Maximum Vertical settlement และ Differential settlement น้อยที่สุด รองลงมาคือ Lime Mud (แบบที่ 1) และ Dreg (แบบที่ 2) ตามลำดับ และยังพบว่า Differential settlement เกิดมากที่สุดบริเวณขอบของหลุมฝังกลบ จากนั้นทำการเรียงกากของเสียตามแนวนอนโดยใช้กากของเสียทั้ง 3 ชนิด และให้แต่ละชั้นมีความหนาเท่ากัน (แบบที่ 4-9) โดยเรียงสลับกันได้ทั้งหมด 6 แบบ พบว่าเมื่อให้ Dreg อยู่ด้านบนสุด รองลงมาคือ Lime Mud และ Power boiler ash ตามลำดับ (แบบที่ 7) มีค่า Maximum Differential settlement น้อยที่สุด.และ ส่วน Maximum Vertical settlement กลับมีการเรียงแบบที่ 5 คือให้ Power boiler ash อยู่ด้านบนสุด รองลงมาคือ Dreg และ Lime mud ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าน้อยทีสุด แสดงให้เห็นว่าการที่หลุมฝังกลบมี Maximum Vertical settlement น้อย ไม่จำเป็นที่จะต้องมี Maximum Differential settlement น้อยตามไปด้วย จากนั้นทดลองสุ่มเรียงกากของเสียตามแนวนอน โดยเปลี่ยนความหนาของแต่ละชั้นเป็น ชั้นบนสุดหนา 1 เมตร ชั้นรองลงมาหนา 2 เมตร และชั้นล่างสุดหนา 2 เมตร (แบบที่ 10-15) พบว่า เมื่อให้ Dreg อยู่ด้านบนสุด รองลงมาคือ Lime Mud และ Power boiler ตามลำดับ (แบบที่ 13) มีค่า Maximum Differential settlement น้อยทีสุด เหมือนการเรียงแบบเท่ากันทุกชั้น จากนั้นทำการเรียงกากของเสียตามแนวตั้ง (แบบที่ 16-18) โดยใช้ของเสียทั้ง 3 ชนิด สลับกันไปตามตำแหน่งต่าง ๆ พบว่า Maximum Differential settlement ค่อนข้างสูง และไม่ได้อยู่ด้านข้าง แต่จะอยู่ระหว่างกากของเสียแต่ละชนิด โดย Maximum Differential settlement เกิดมากที่สุดบริเวณรอยต่อของ Power boiler ash และ Lime Mud ซึ่งเกิดประมาณ 0.00965 รองลงมาคือ รอยต่อระหว่าง Power boiler ash และ Dreg ซึ่งเกิดประมาณ 0.00820 ซึ่งใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องมากจาก ความแตกต่างกันระหว่างการทรุดตัวของกากของเสียทั้งสองชนิด ส่วนบริเวณรอย

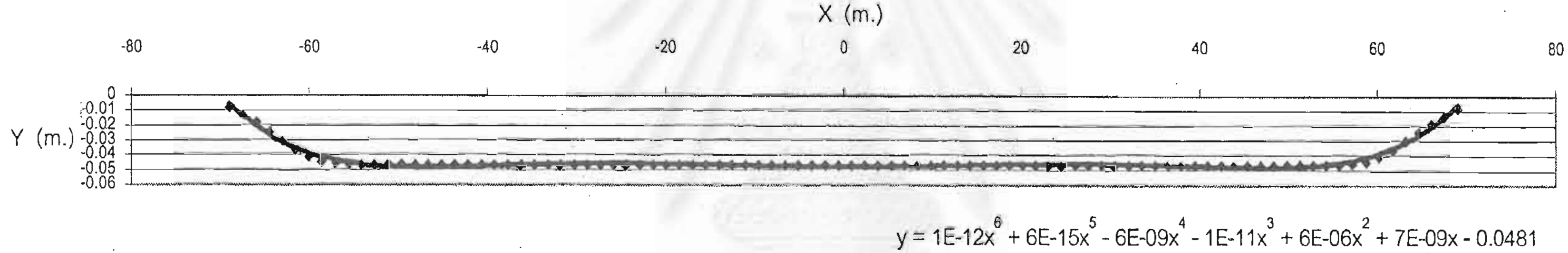
ต่อของ Lime Mud กับ Dreg นั้น Maximum Differential settlement ค่อนข้างต่ำ คือประมาณ 0.0026 เนื่องจากความแตกต่างของการทรุดตัวต่ำนั่นเอง

ในการจัดเรียงกากของเสียที่เหมาะสมที่สุดจากทั้งหมดที่ทำการทดลองสุ่ม คือ การเรียงตามแนวนอน แล้วให้ Dreg อยู่ด้านบนสุด รองลงมาคือ Lime Mud และ Power boiler ash ตามลำดับ ซึ่งวิธีนี้จะให้ Maximum Differential settlement น้อยที่สุด ทำให้โครงสร้างด้านบนหลุมฝังกลบได้รับอันตรายน้อยที่สุด

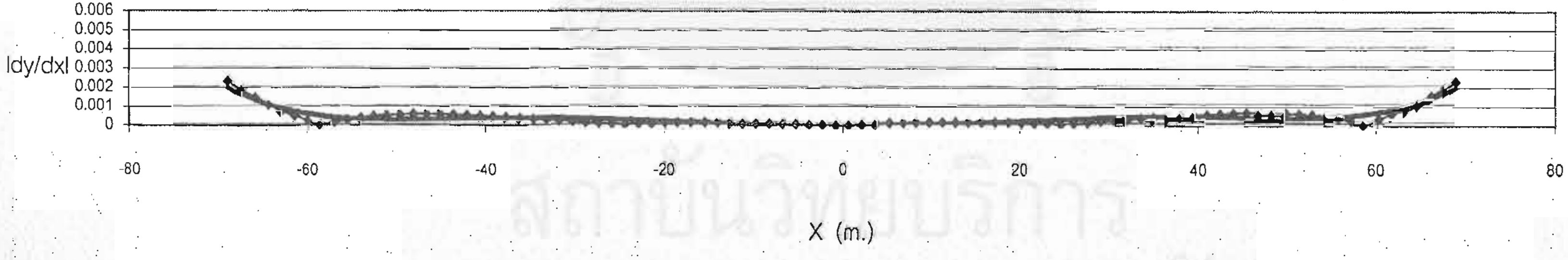
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



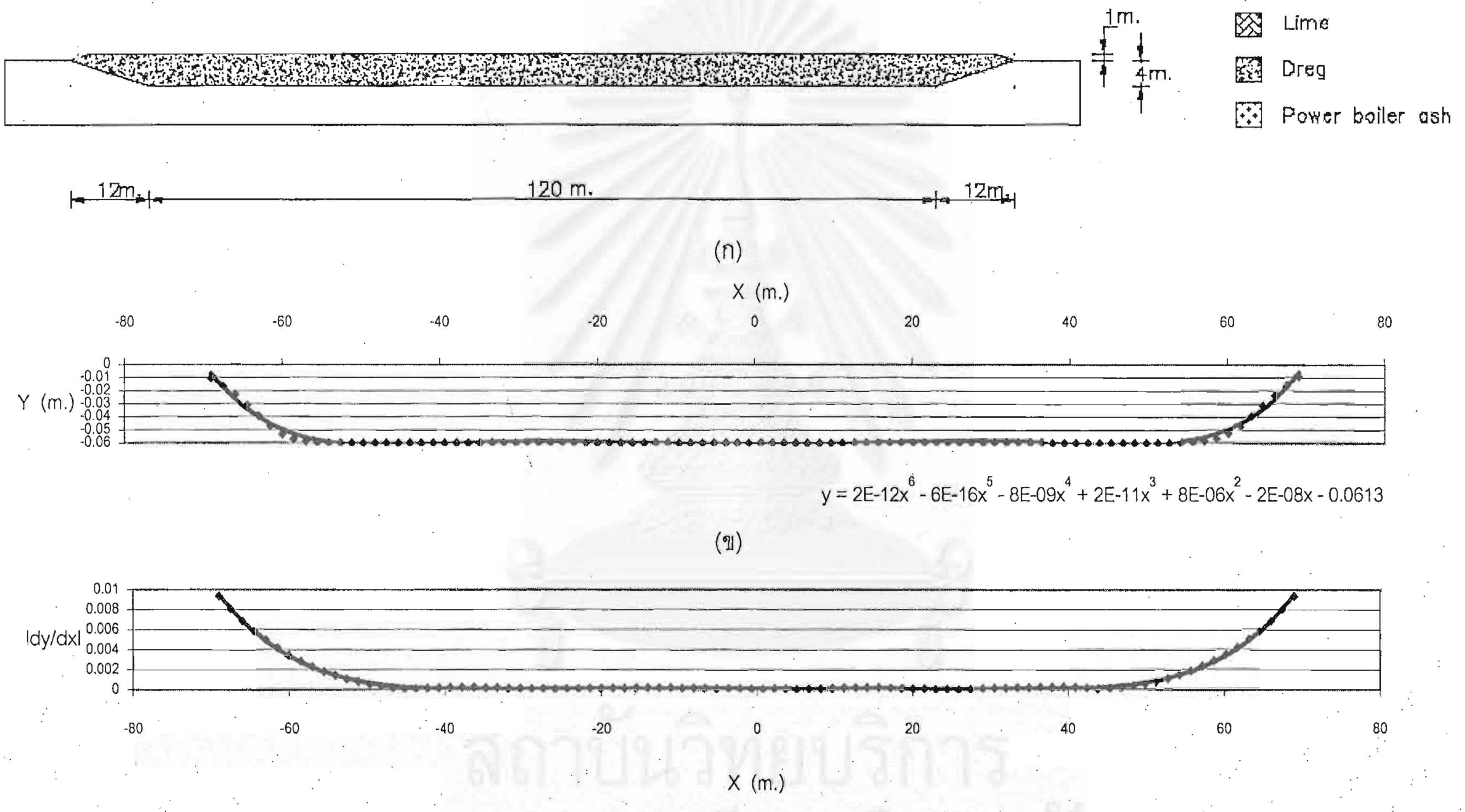
(ข)



(ค)

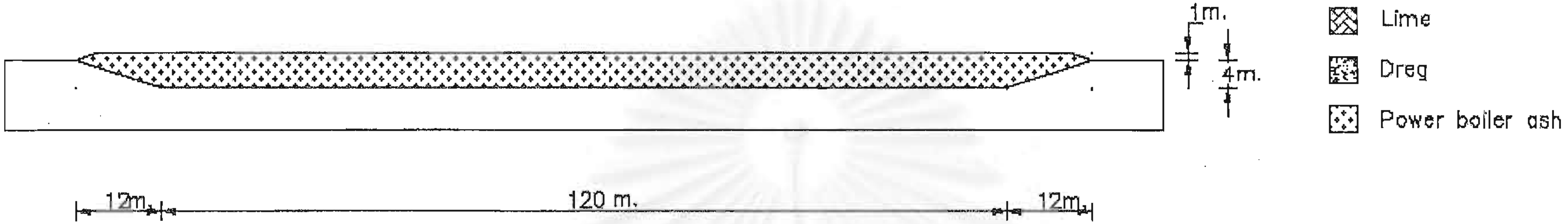
รูปที่ 4.11 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 1 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

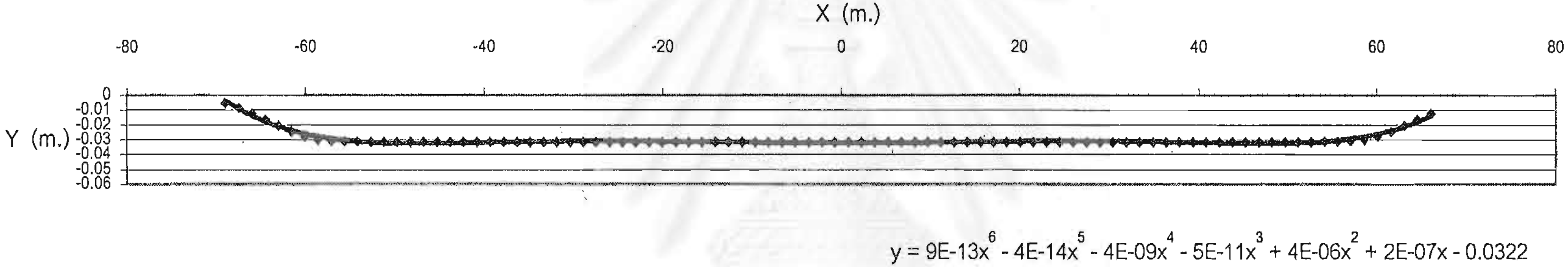


(ค)

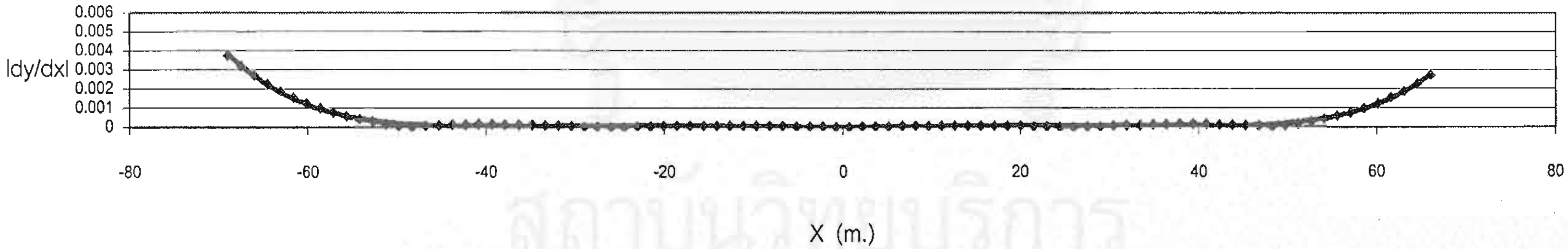
รูปที่ 4.12 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 2 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ



(ก)



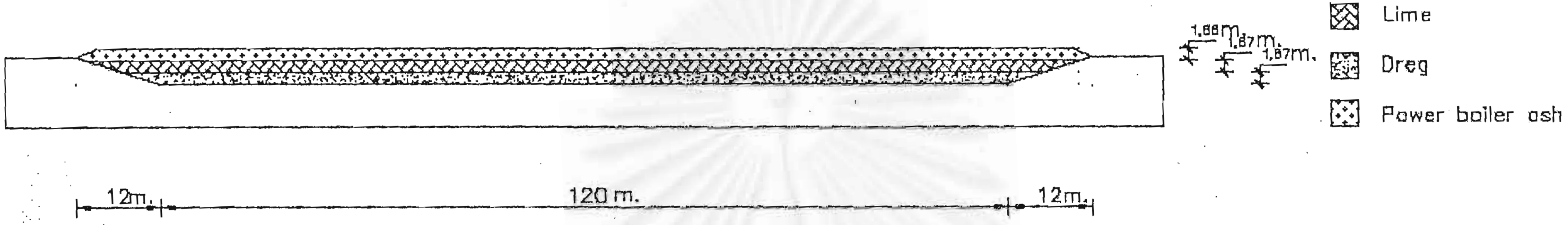
(ข)



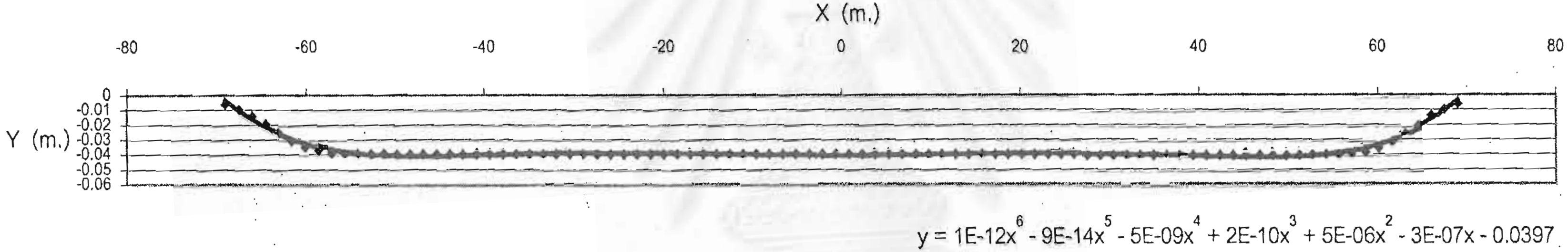
(ค)

รูปที่ 4.13 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 3 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ

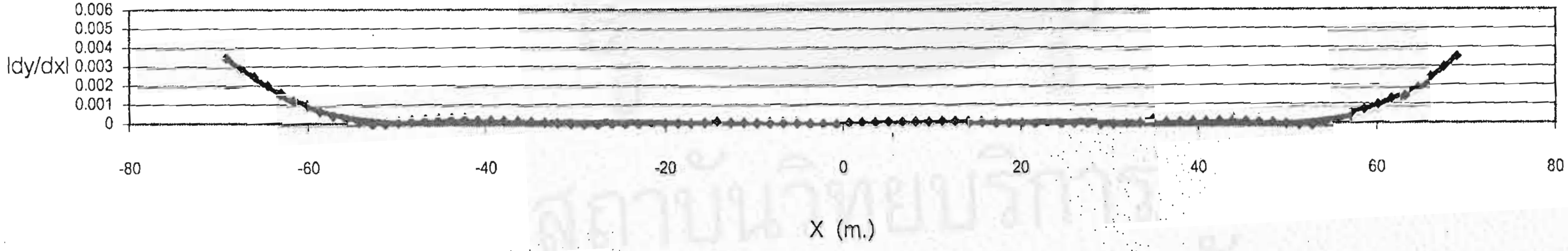
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



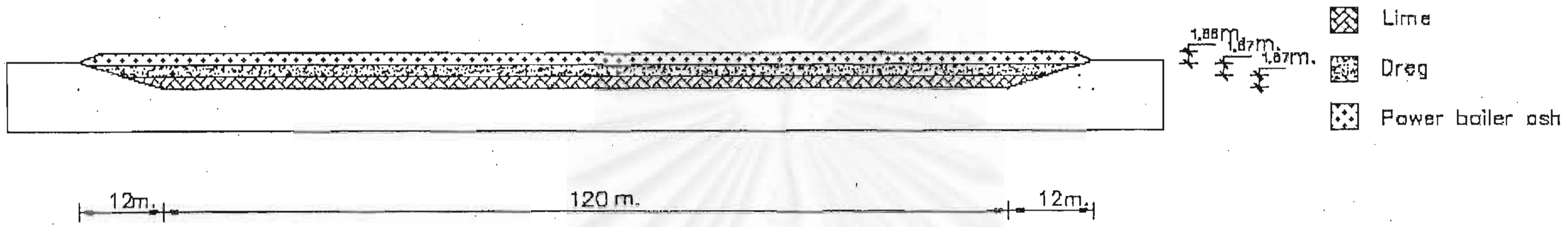
(ข)



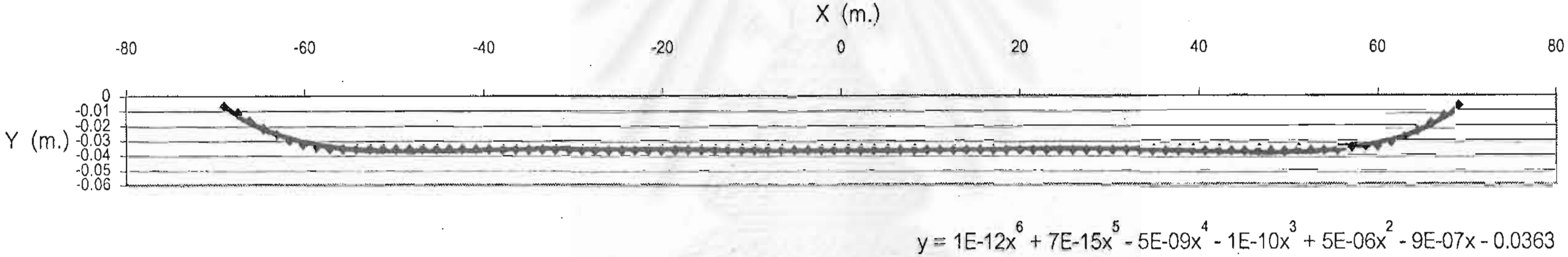
(ค)

รูปที่ 4.14 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 6 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ

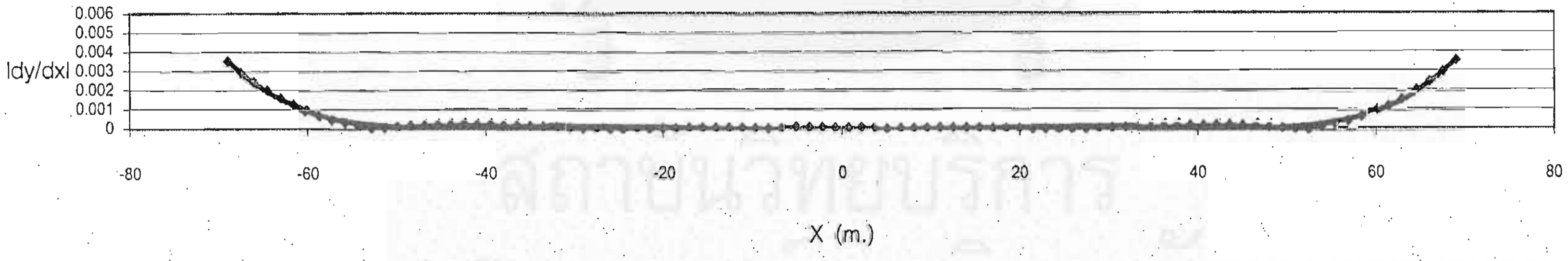
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)

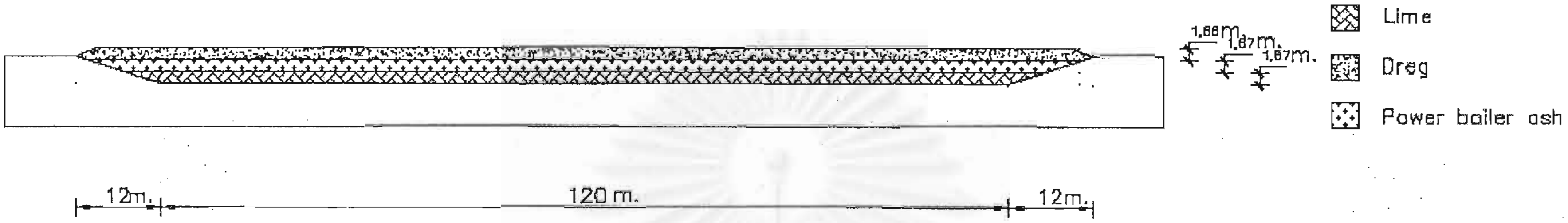


(ข)

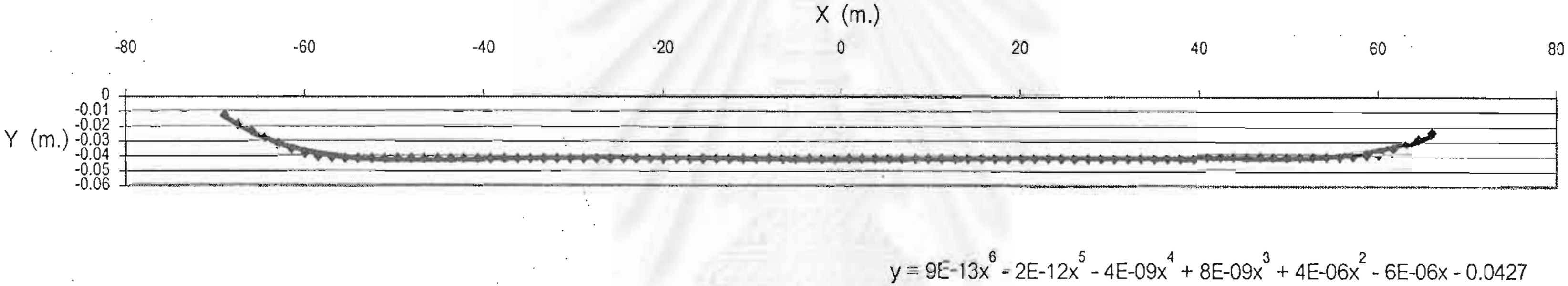


(ค)

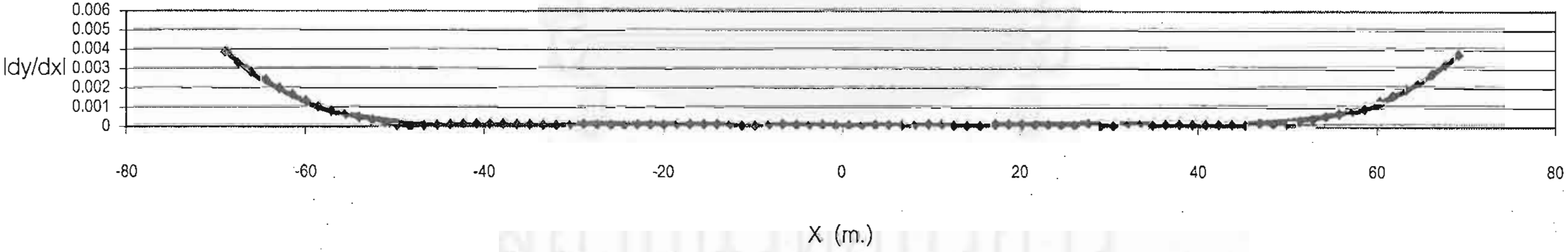
รูปที่ 4.15 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 7 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ



(ก)

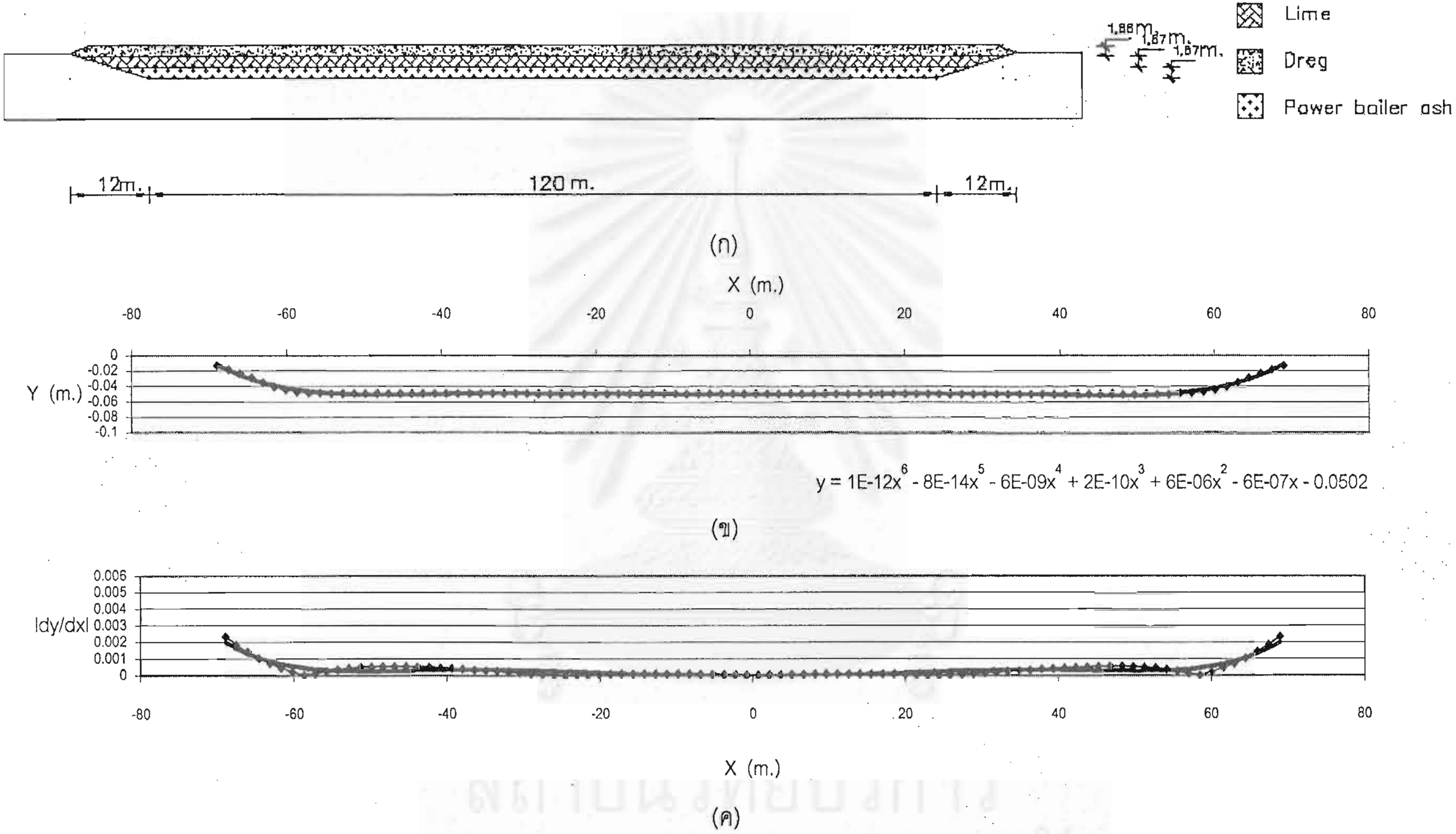


(ข)

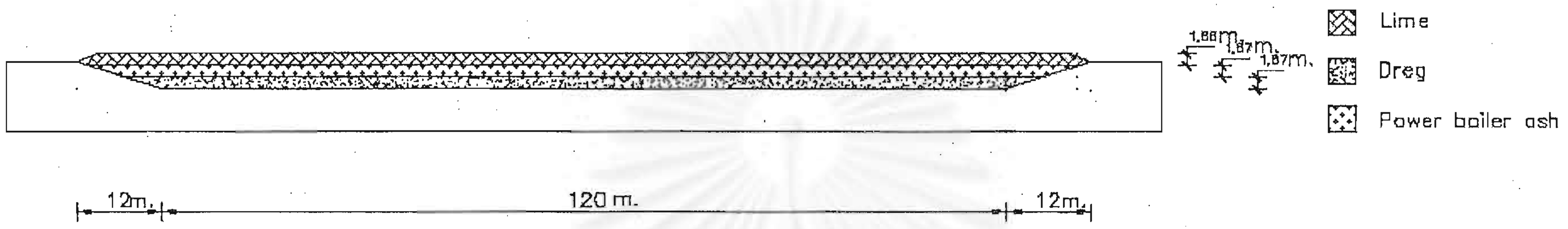


(ค)

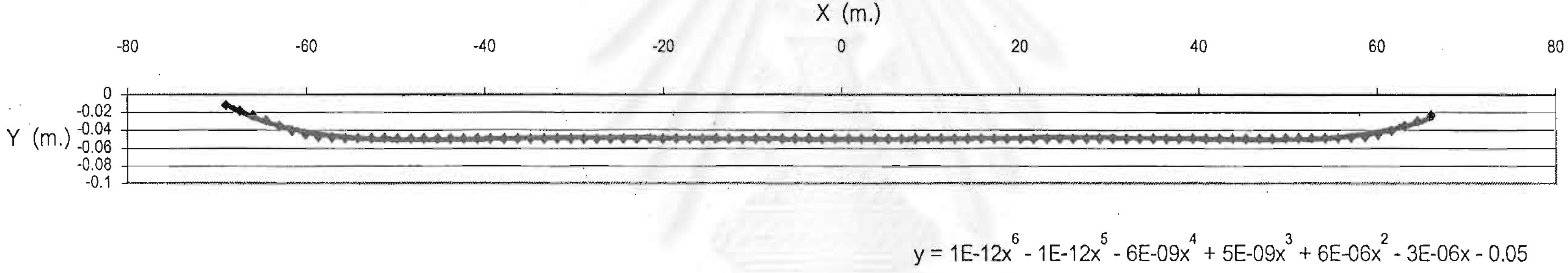
รูปที่ 4.16 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 8 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ



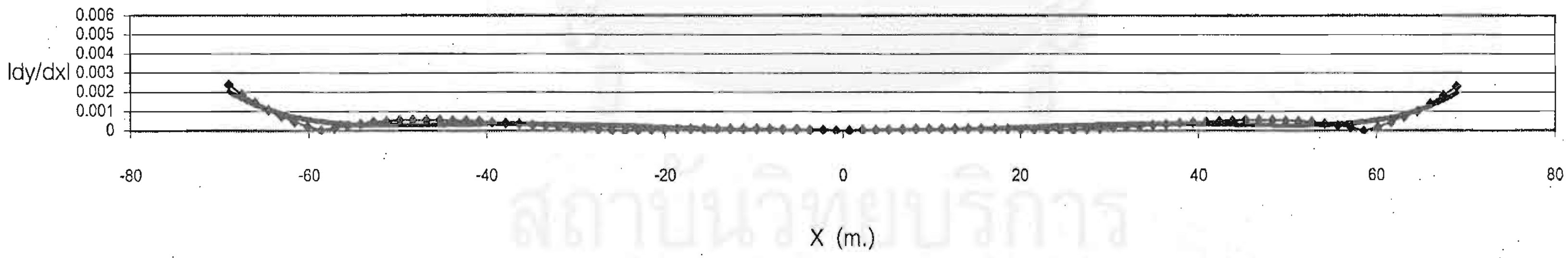
รูปที่ 4.17 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 9 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ



(ก)



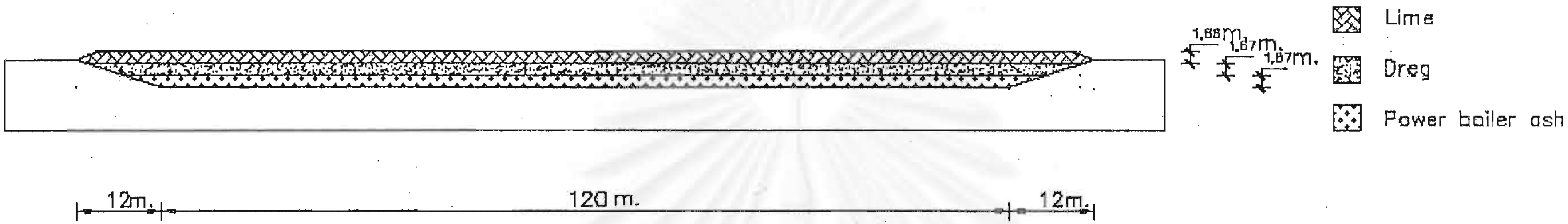
(ข)



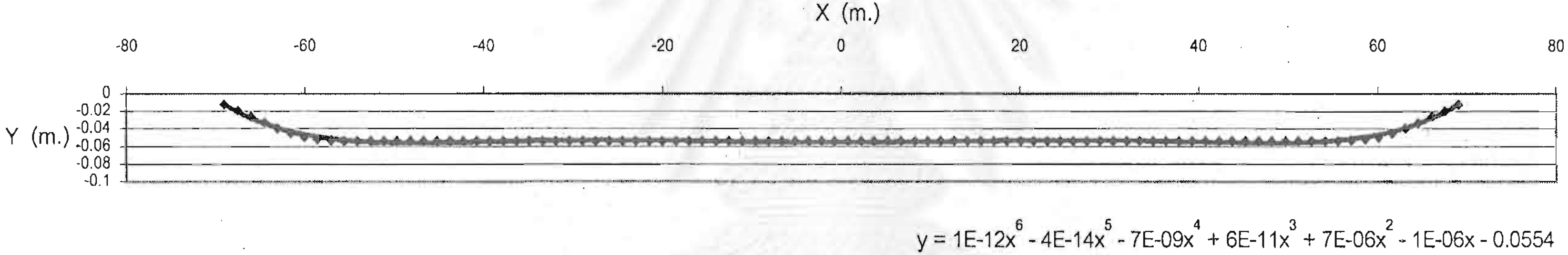
(ค)

รูปที่ 4.18 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 10 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ

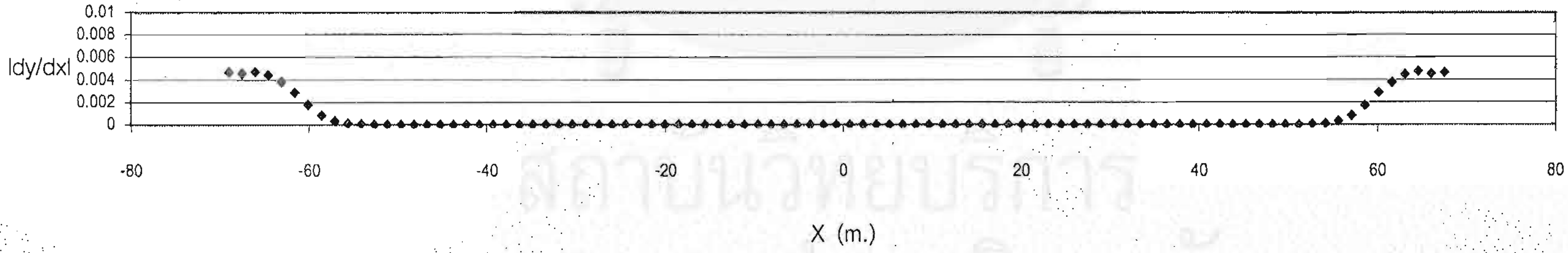
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)

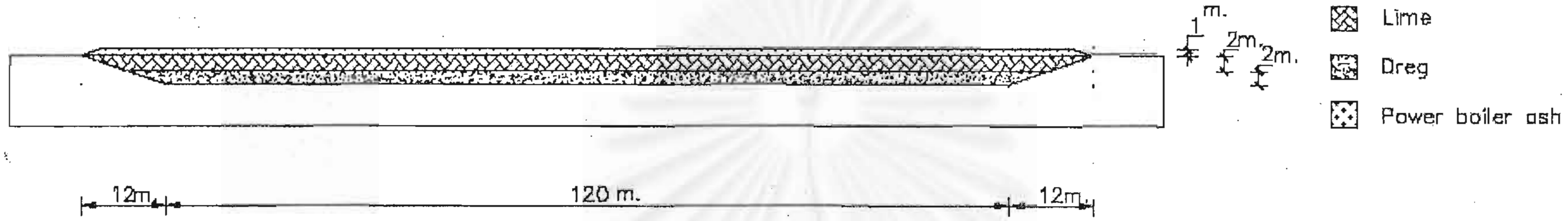


(ข)

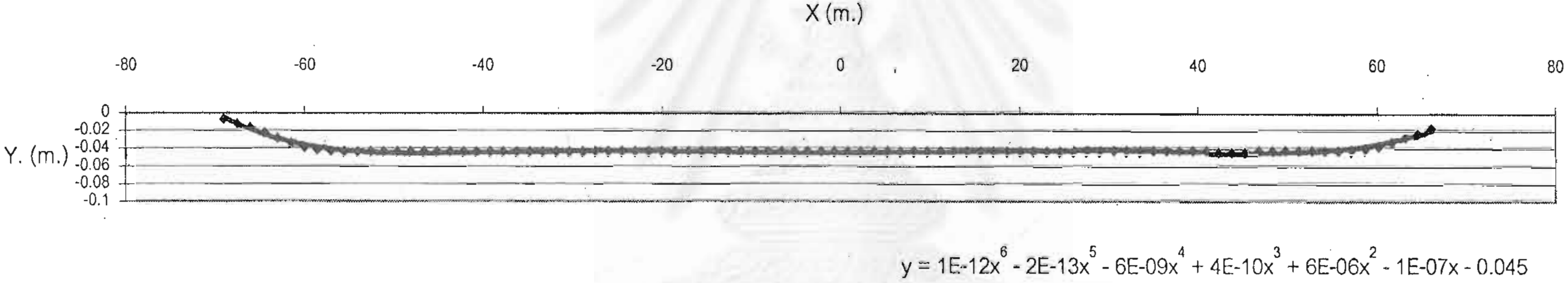


(ค)

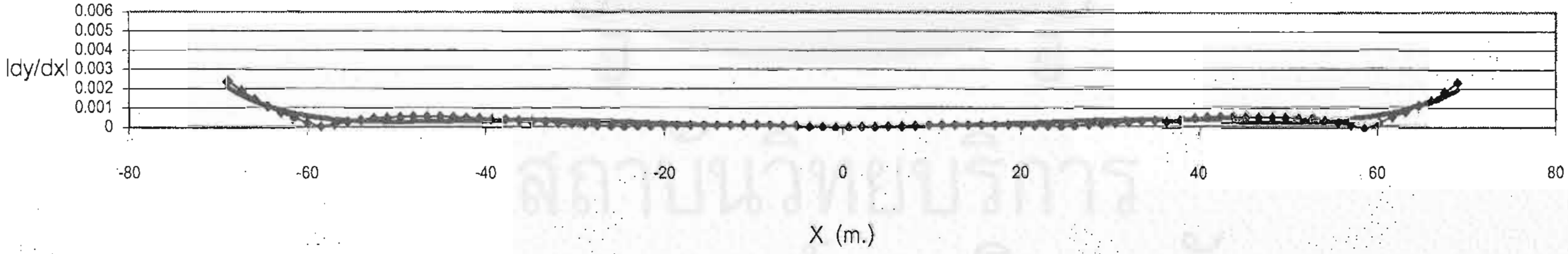
รูปที่ 4.19 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 11 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ



(ก)

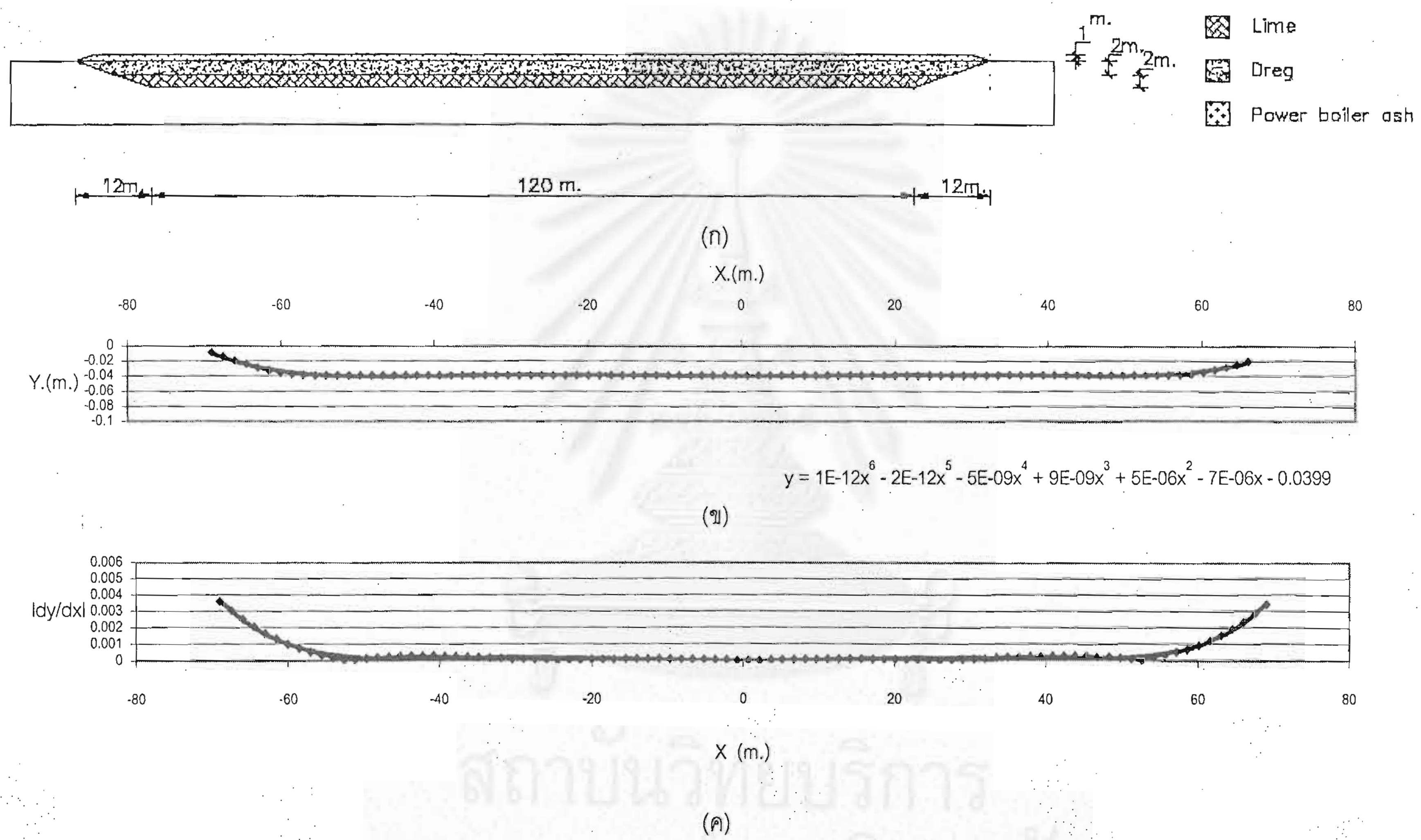


(ข)



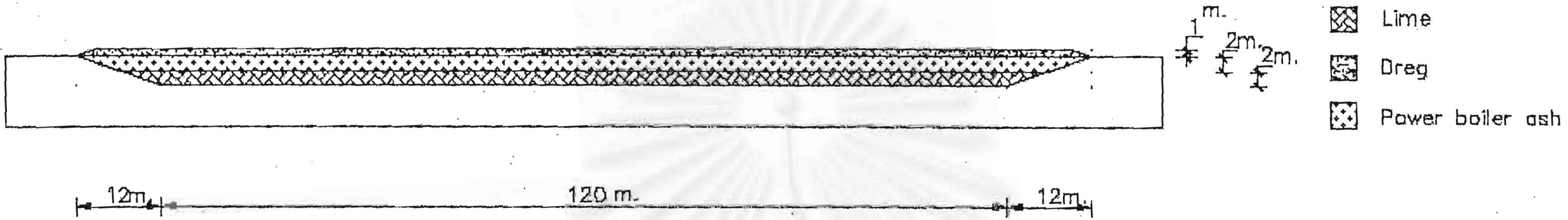
(ค)

รูปที่ 4.20 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 12 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ

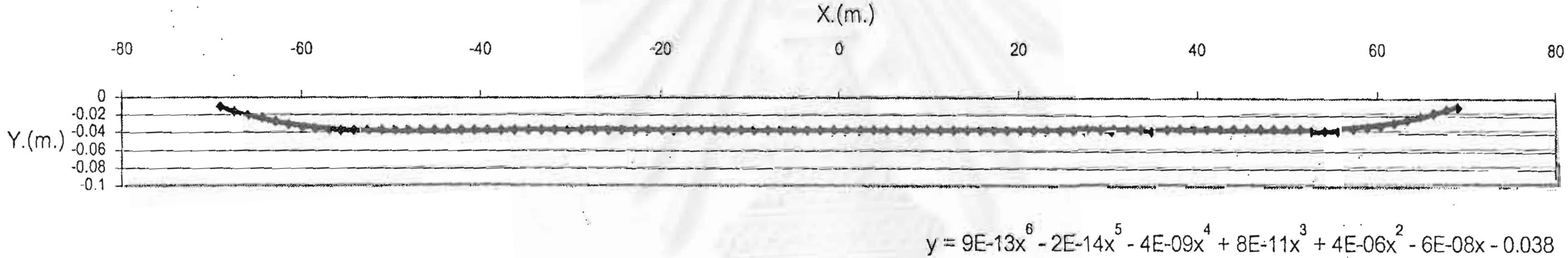


รูปที่ 4.21 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 13 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ

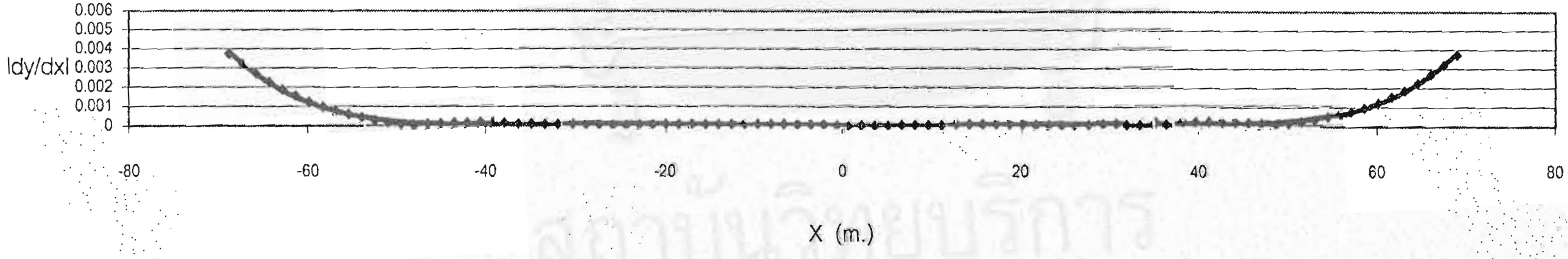
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)

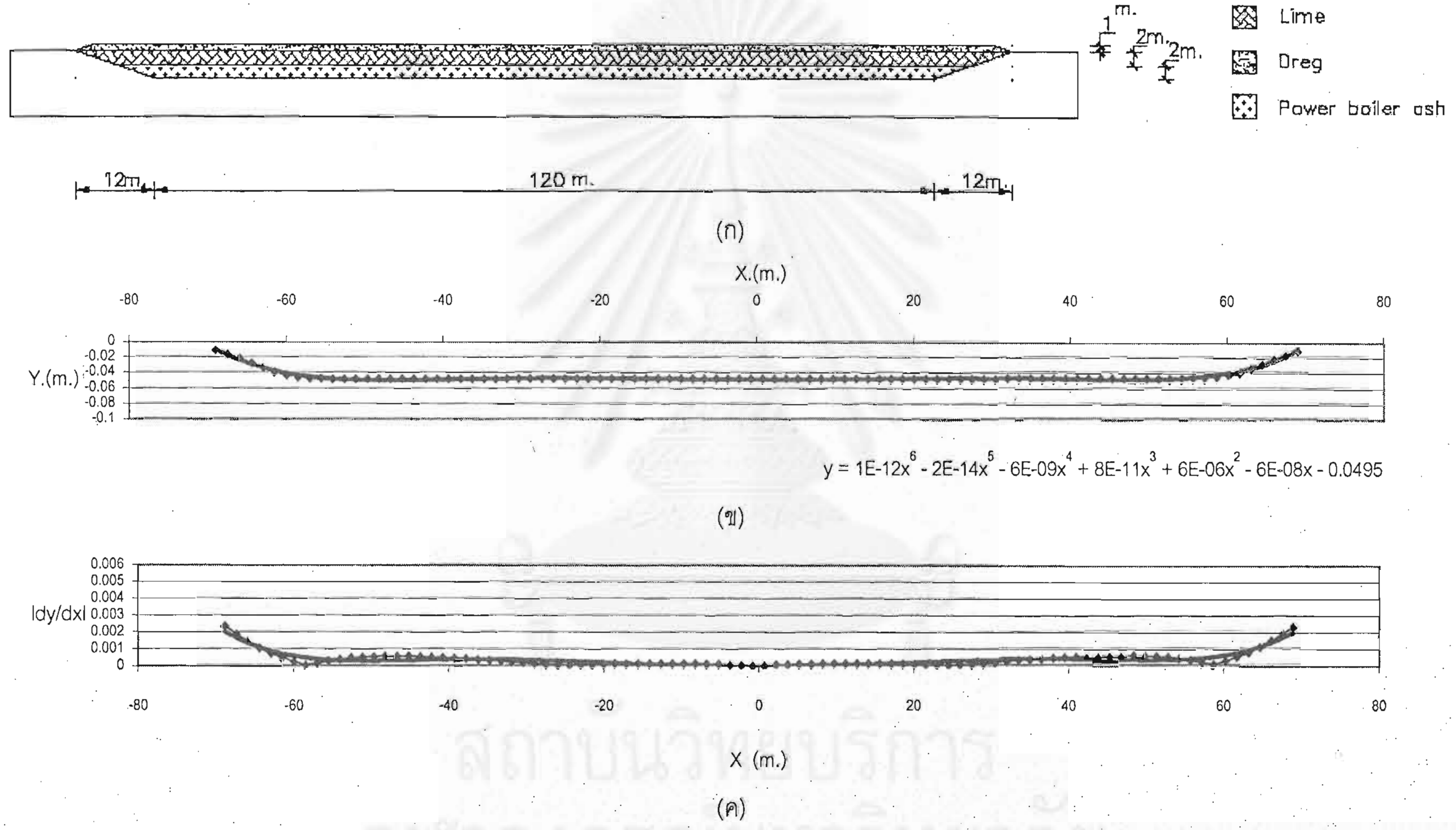


(ข)

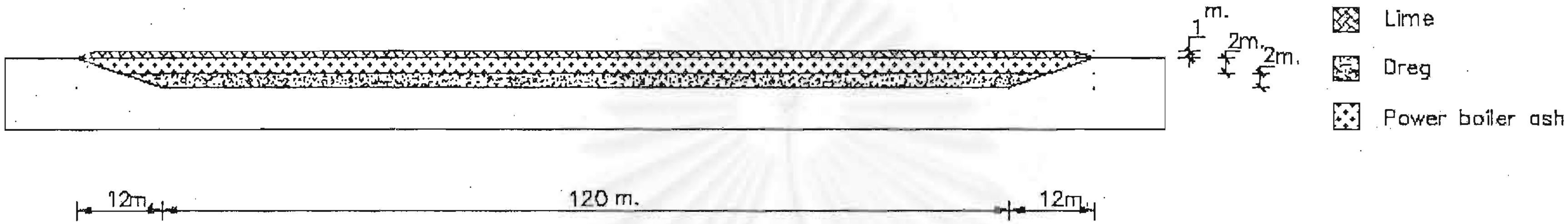


(ค)

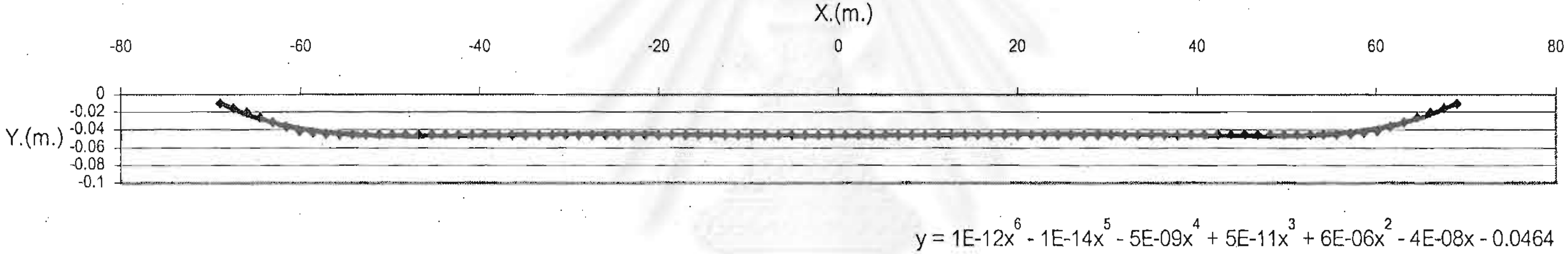
รูปที่ 4.22 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 14 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ



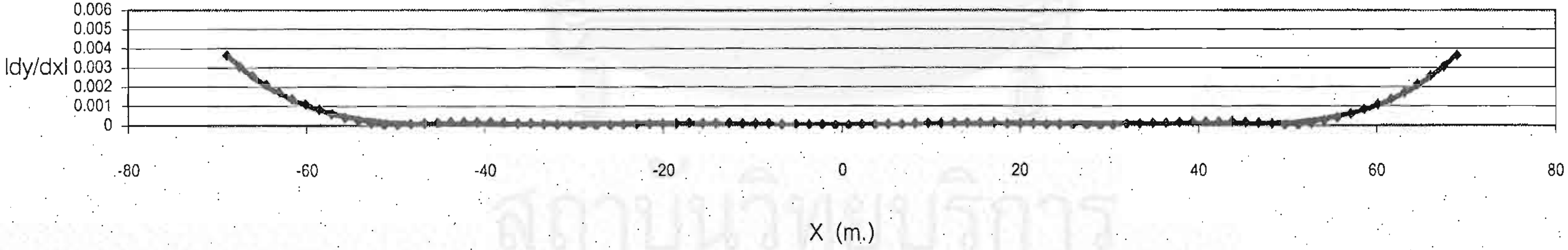
รูปที่ 4.23 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 15 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ



(ก)

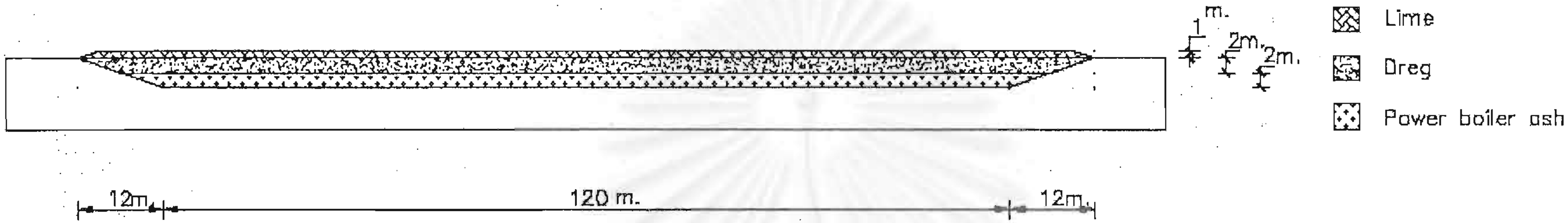


(ข)

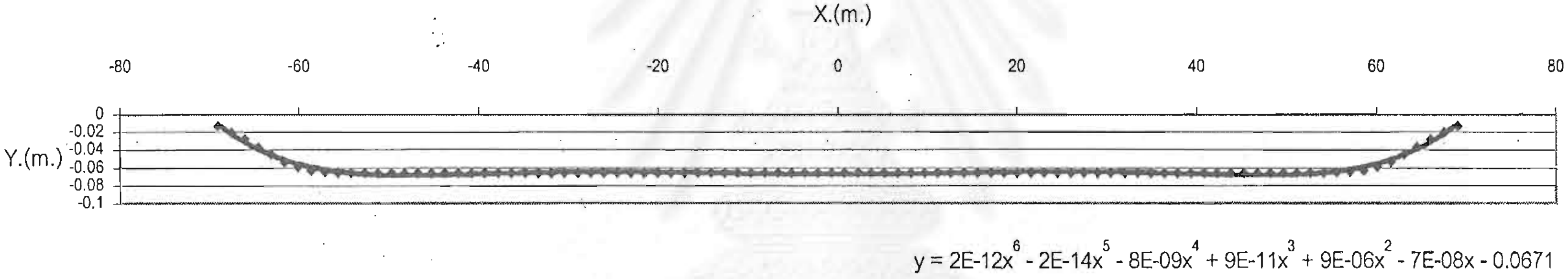


(ค)

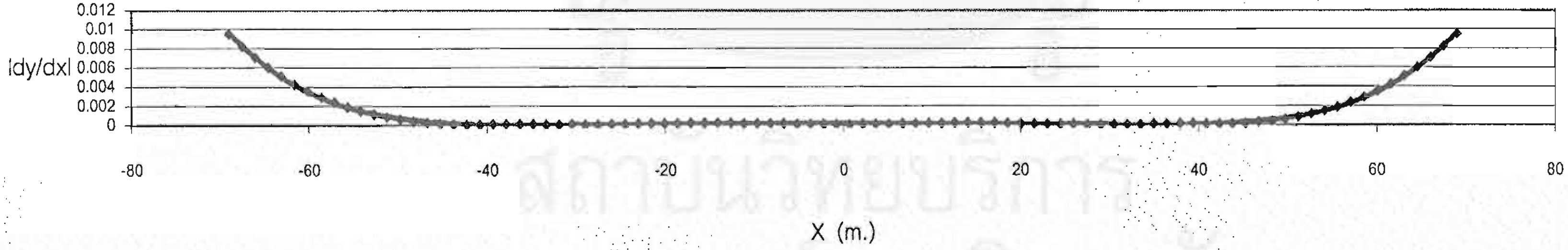
รูปที่ 4.24 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 16 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ



(ก)



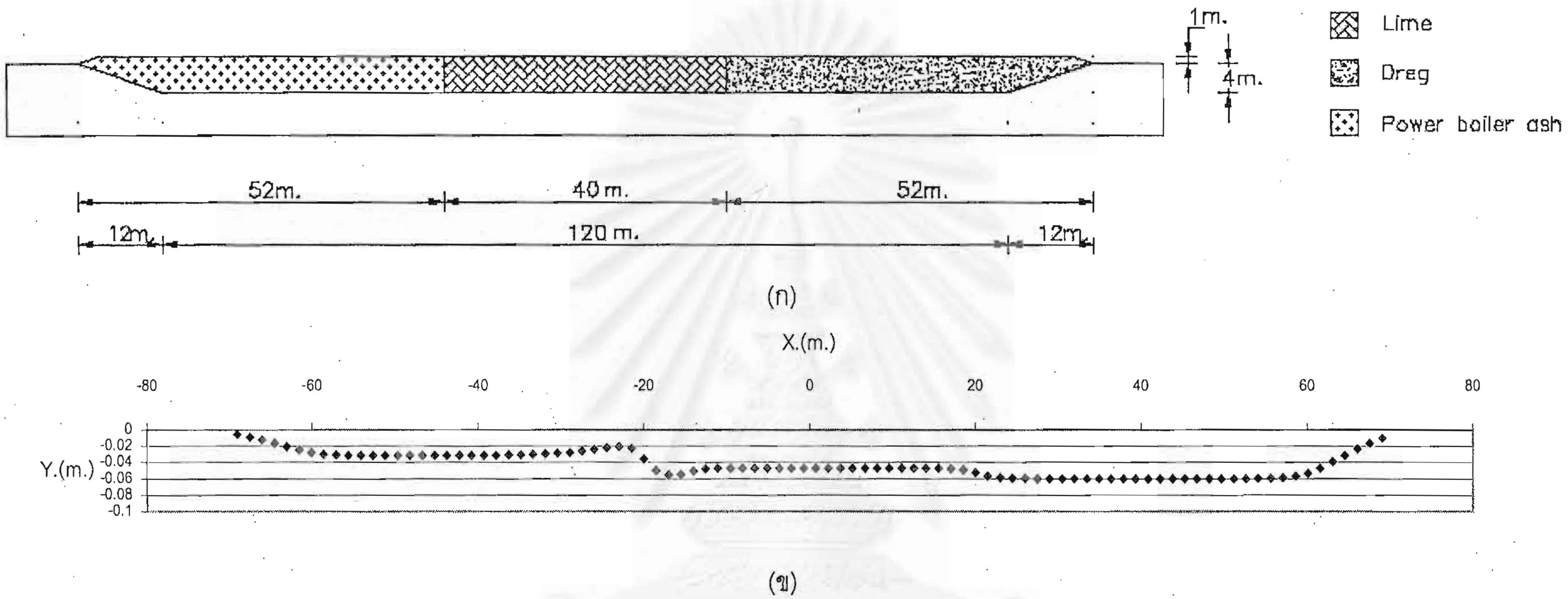
(ข)



(ค)

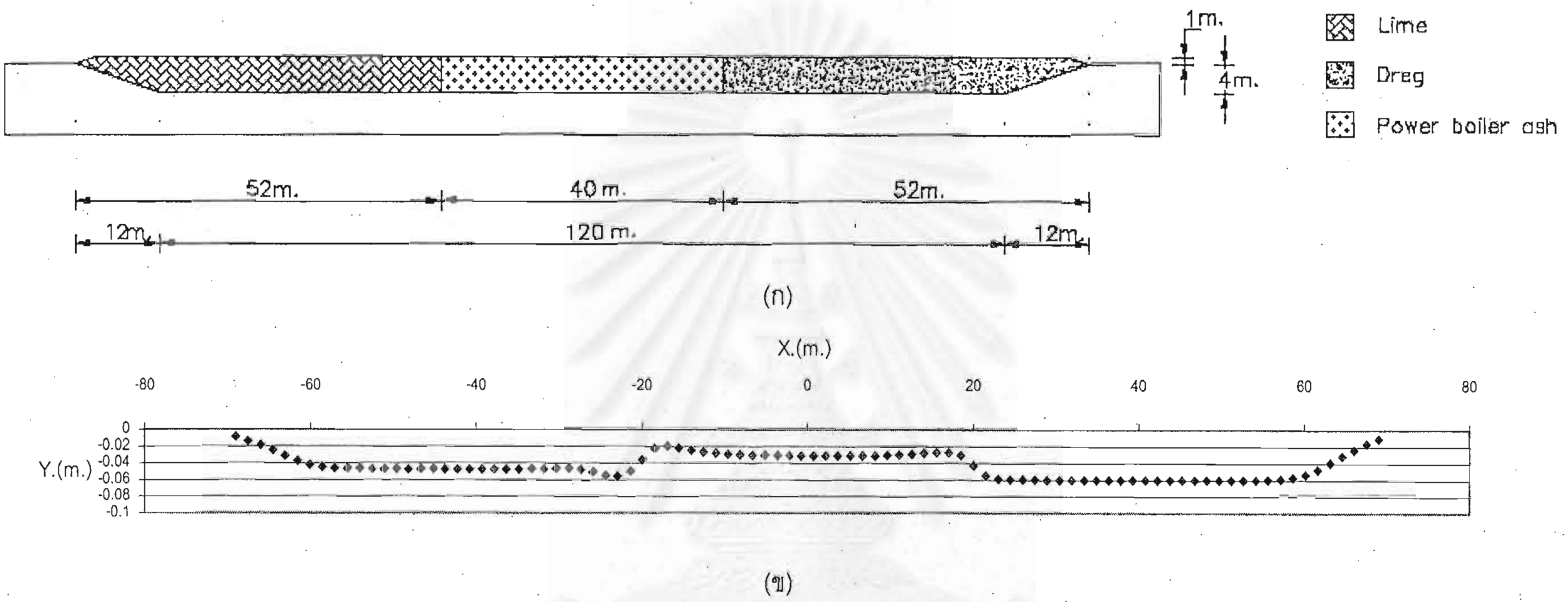
รูปที่ 4.25 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 17 (ก), Vertical settlement (ข), Differential settlement (ค) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



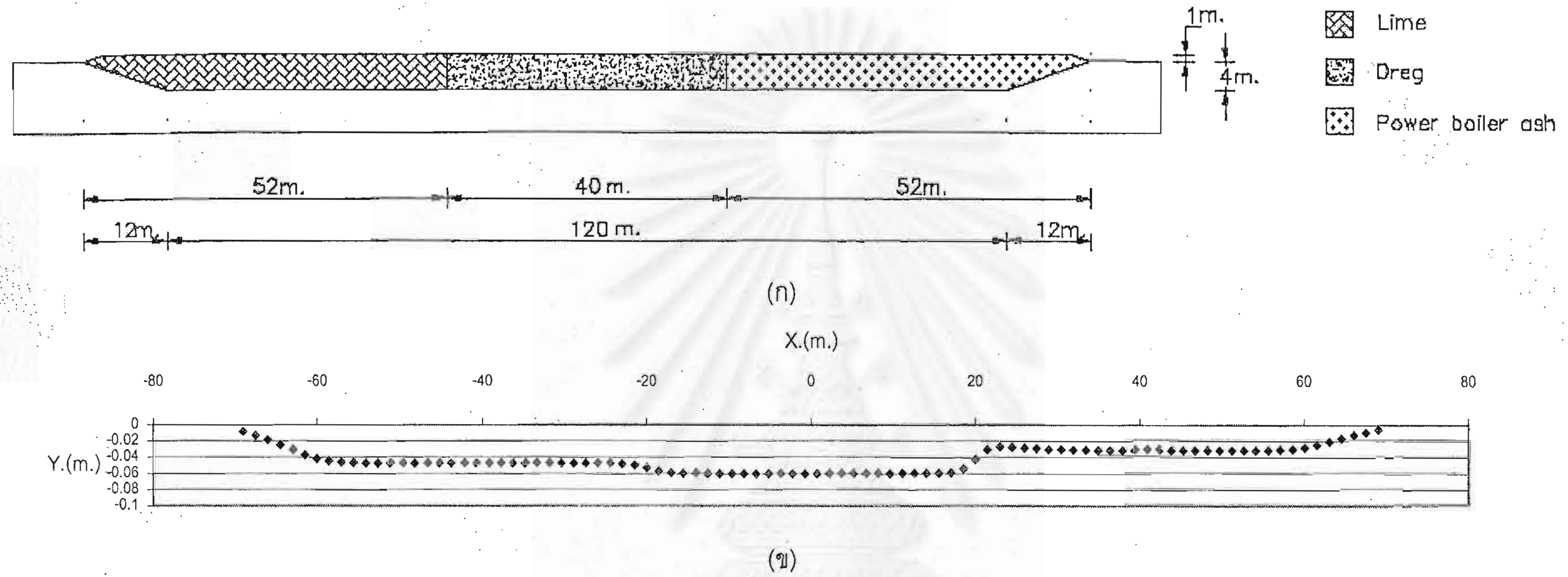
รูปที่ 4.26 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 18 (ก), Vertical settlement (ข) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.27 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 18 (ก), Vertical settlement (ข) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.28 รูปแบบการจัดวางกากของเสียแบบที่ 18 (ก), Vertical settlement (ข) ที่ Ground surface ของหลุมฝังกลบ

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของกากของเสียบดอัดจากอุตสาหกรรมกระดาษ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาลักษณะการจัดวางกากของเสียในหลุมฝังกลบเหมาะสมที่สุด ที่ทำให้เกิด Differential settlement บริเวณผิวบนของหลุมฝังกลบน้อยที่สุด ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 7.2 โดยเลือกใช้กากของเสียจากโรงงานผลิตกระดาษจำนวน 3 ชนิด คือ Lime Mud, Power boiler ash และ Dreg มาใช้เป็นตัวแทนการศึกษา และศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของกากของเสียบดอัด 3 ด้านได้แก่ สมบัติทางด้านกำลังรับน้ำหนัก ด้วยการทดสอบ Direct shear test, สมบัติด้านการไหลซึมผ่านของน้ำ ด้วยการทดสอบ Permeability test, และสมบัติด้านการเคลื่อนตัว ด้วยการทดสอบ Consolidation test ในห้องปฏิบัติการ และในการวิเคราะห์ Vertical settlement และ Differential settlement นั้นสมมุติให้กากของเสียมีคุณสมบัติสอดคล้องกับผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เกิดการทรุดตัวจนกระทั่ง excess pore pressure เท่ากับ 0 โดยสมมุติให้ไม่เกิดการทรุดตัวของชั้นดินใต้หลุมฝังกลบ และกากของเสียถูกบดอัดที่ maximum dry density ที่ปริมาณน้ำ Optimum moisture content ที่ได้จากการทดสอบการบดอัดแบบ Standard Proctor Compaction Test โดยผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

1. กากของเสียที่นำมาฝังกลบในหลุมฝังกลบประกอบด้วย Lime Mud ซึ่งมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด เท่ากับ 13 kN/m^3 ที่ประมาณความชื้น 33 % , Dreg ซึ่งมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด เท่ากับ 11 kN/m^3 ที่ประมาณความชื้น 43 % และ power boiler ash ซึ่งมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด เท่ากับ 5.6 kN/m^3 ที่ประมาณความชื้น 83 %

2. ในการทดสอบสมบัติด้านกำลังรับน้ำหนักของกากของเสียบดอัดเพื่อหาค่า cohesion intercept และ friction angle พบว่า Lime Mud ให้ค่า friction angle เท่ากับ 44.8° cohesion intercept เท่ากับ 0 kN/m^2 และ Dreg ให้ค่า friction angle เท่ากับ 43.7° cohesion intercept เท่ากับ 15.3 kN/m^2 และ Power boiler ash ให้ค่า friction angle เท่ากับ 42.2° cohesion intercept เท่ากับ 16.8 kN/m^2

3. ในการทดสอบสมบัติด้านกำลังรับน้ำหนักของกากของเสียบดอัดเพื่อหาค่า Elastic Young's Modulus (E_{50}) พบว่า Power boiler ash มีค่าต่ำที่สุดคือ 655 kN/m^2 แล้วค่อยเพิ่มขึ้น 37.45 kN/m^2 ทุก ๆ Vertical stress เท่ากับ 1 kN/m^2 ส่วน Lime Mud มีค่า E_{50} ตั้งแต่ 920 kN/m^2 แล้วค่อยเพิ่มขึ้น 55.96 kN/m^2 ทุก ๆ Vertical stress เท่ากับ 1 kN/m^2 และ Dreg มีค่า E_{50} ตั้งแต่ 887 kN/m^2 แล้วค่อยเพิ่มขึ้น 76.92 kN/m^2 ทุก ๆ Vertical stress เท่ากับ 1 kN/m^2 จะเห็นว่า Lime Mud จะให้ค่า E_{50} สูงกว่า Dreg ในช่วง Vertical stress ต่ำกว่า 1.58 kN/m^2 เท่านั้น หลังจากนั้น Dreg ให้ค่าสูงกว่า

4. ในการทดสอบสมบัติด้านความสามารถในการซึมผ่านของน้ำของกากของเสียบดอัดพบว่า Lime Mud มีค่า k เท่ากับ 1x10^{-5} cm/sec, Dreg มีค่า k เท่ากับ 8x10^{-6}cm/sec, Power boiler ash มีค่า k เท่ากับ 6.5x10^{-4}cm/sec และ จะเห็นว่า Power boiler ash มีค่า k สูงสุด ส่วน Lime Mud นั้นมีค่า k สูงกว่า Dreg ไม่มากนัก

5. ในการทดสอบสมบัติด้านการเคลื่อนตัวของกากของเสียบดอัด พบความสัมพันธ์ระหว่างค่า Drained Young's Modulus และ σ'_{vo} เป็นสมการดังนี้ สมการของ Lime Mud คือ $y = -0.0214x^2 + 37.202x + 1011.8$ สมการของ Dreg คือ $y = -0.014x^2 + 25.771x + 707.05$ และสมการของ Power boiler ash คือ $y = -0.0176x^2 + 19.201x + 1176.7$ โดยที่ y คือ E' ส่วน x คือ σ'_{vo}

6. ในการวิเคราะห์ Vertical settlement และ Differential settlement จากการจัดเรียงกากของเสียต่าง ๆ กันด้วยโปรแกรม PLAXIS โดยเป็นการวิเคราะห์แบบ Plan strain analysis พบว่า ในการจัดเรียงกากของเสียที่เหมาะสมที่สุดจากทั้งหมดที่ทำการทดลองสุ่ม คือ การเรียงตามแนวนอน แล้วให้ Dreg อยู่ด้านบนสุด รองลงมาคือ Lime Mud และ Power boiler ash ตามลำดับ ซึ่งวิธีนี้จะให้ Maximum Differential settlement น้อยที่สุด ทำให้โครงสร้างด้านบนหลุมฝังกลบได้รับอันตรายน้อยที่สุด และในการเรียงกากของเสียตามแนวตั้ง พบว่า Maximum Differential settlement ค่อนข้างสูงซึ่งเกิดขึ้นระหว่างกากของเสียแต่ละชนิด โดย Maximum Differential settlement เกิดมากที่สุดบริเวณรอยต่อของ Power boiler ash และ Lime Mud ซึ่งใกล้เคียงกับ รอยต่อระหว่าง Power boiler ash และ Dreg เนื่องมาจาก ความแตกต่างกันระหว่างการทรุดตัวของกากของเสียทั้งสองชนิด ส่วนบริเวณรอยต่อของ Lime Mud กับ Dreg นั้น Maximum Differential settlement ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากความแตกต่างของการทรุดตัวต่ำนั่นเอง ดังนั้นในการเรียงตามแนวตั้ง ต้องระมัดระวังเรื่องความแตกต่างของการทรุดตัว

ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของกากของเสียจากอุตสาหกรรมกระดาษเท่านั้น แต่เนื่องจากในประเทศไทย ยังมีกากของเสียอีกหลายประเภทที่ต้องนำมาฝังกลบ ซึ่งควรมีการศึกษาคุณสมบัติของกากของเสียประเภทอื่น ๆ ด้วย

2. การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของกากของเสียบดอัดในห้องปฏิบัติการ อาจจะได้ค่าที่ใกล้เคียงของจริงในสนามหรือไม่ก็ได้ ดังนั้นจึงควรมีการตรวจสอบคุณบัติในสนามหลังจากก่อสร้างหลุมฝังกลบเสร็จสิ้นลงแล้ว

3. การศึกษาในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นเฉพาะ Vertical settlement และ Differential settlement ที่เกิดจากน้ำหนักของกากของเสียเองจนกระทั่ง excess pore pressure เท่ากับ 0 เท่านั้น ซึ่งในความเป็นจริง การทรุดตัวที่เกิดขึ้นในสนามที่เกิดขึ้นจริงยังคงมีการทรุดตัวต่อไป ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายตามธรรมชาติ และอาจมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น นอกจากนี้ควรพิจารณาถึงน้ำหนักบรรทุกด้านบนหลุมฝังกลบ ซึ่งสิ่งเหล่านี้มีผลทำให้การทรุดตัวมีค่ามากขึ้น

4. การศึกษาในงานวิจัยนี้มีสมมุติฐานหลายอย่าง ทำให้ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ Vertical settlement และ Differential settlement อาจไม่ตรงกับค่าที่เกิดขึ้นจริงในสนาม เช่น สมมุติฐาน ให้กากของเสียถูกบดอัดที่ Maximum dry density ที่ประมาณน้ำ Optimum moisture content จากการทดสอบการบดอัด, สมมุติฐานให้กากของเสียมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และสมมุติฐานให้ชั้นดินใต้หลุมฝังกลบแข็งมากจนไม่มีการทรุดตัวเกิดขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

โกวิทย์ ทศศิริ. 2544. คุณสมบัติการไหลซึมของของไหลที่มีสารปนเปื้อนผ่านวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์บดอัด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สถาพร คูวิจิตรจารุ. 2541. ทดลองปฐพีกลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 1, ไลบรารี่ นาย: กรุงเทพฯ.

สุรฉัตร สัมพันธารักษ์. 2540. วิศวกรรมปฐพี. พิมพ์ครั้งที่ 1, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์: กรุงเทพฯ.

ภาษาอังกฤษ

Amalendu Bagchi. 1994. Design,Construction,and Moitoring of Landfills. 2nd Edition, John Wiley & Sons: New York.

American Society for Testing Material. 1996. Annual Book of ASTM Standards. Vol. 04.08.

Andersland, O.B., and Mathew, P.J. 1973. Consolidation of High Ash Papermill Sludge. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Div., ASCE, 99(SM5), pp. 365-374.

Ashford, S. A., Visvanathan, C., Husain, N., and Chomsurin, C. 2000. Design and Construction of Engineered Municipal Solid Waste Landfills in Thailand. Waste Management & Research 18: pp. 462-470.

Belfiore, F., Manassero, M., and Viola, C. 1990. Geotechnical Analysis of Some Industrial Sludges. Geot. of Waste Fills-Theory and Practice, ASTM STP 1070, A. Landva and G.D. Knowles, Eds., ASTM, Philadelphia, pp. 317-330.

Brinkgreve, R.B.J., and Vermeer, P.A. 1998. Finite Element Code for Soil and Rock Analyses. Version 7, A.A. Balkema: Rotterdam.

Bromwell, L.G.1978. Properties,Behavior and Treatment of Waste Fills. ASCE, Met. Section, Seminar-Improving Poor Soil Conditions: New York.

Cooper and Clark Consulting Engineering. 1982. Stability Evaluation of Sunnyvale Sanitary Landfill. Report to the City of Sunnyvale: Calif.

Cunnigham, J.A., Lukas, R.G., and Anderson, T.C. 1977. Impoundment of Fly Ash and Slag-A Case Study. Proc. Geot. Pract. for Disp. of Solid Waste Mat., ASCE, Ann Arbor, pp. 227-245.

Das, B.M. 1994. Principles of Geotechnical Engineering. 3rd Edition, PWS: Massachusetts.

Del Greco, O., and Oggeri, C. 1994. Shear Resistance Test on Solid Municipal Wastes. 1st Int. Congress on Eng. Geot., Alberta: Canada, pp. 643-651.

Dodt, M.E., Sweatman, M.B., and Bergstrom, W.R. 1987. Field Measurement of Landfill Surface Settlement. Geot. Practice for Waste Disp.'87, Geot. Special Publ. No.13, R.D. Woods, Ed., ASCE, Ann Arbor, pp. 406-417.

Fang, H.Y., and Slutter, R.G. 1976. Stress-Strain Characteristic of Compacted Waste Disposal Material. in New Horizontal in Construction Materials, Vol. 1, H.Y. Fang, Ed., Envo Publishing: Bethlehem, Penn., pp. 127-137.

Head,K.H. 1982. Manual of Soil Laboratory Testing. Vol.2

Holubec, I. 1976. Geotechnical Aspects of Coal Waste Embankments. Canadian Geot. J.,13(1): pp. 27-39.

Issa S. Oweis and Raf P. Khera. 1990. Geotechnology of Waste Management. 1st Edition, Butterworth: London.

Issa S. Oweis and Raf P. Khera, 1998. Geotechnology of Waste Management. 2nd Edition, PWS: Boston.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

James K. Mitchell. 1993. Fundamentals of Soil Behavior. 2nd Edition, John Wiley & Sons: New York.

Kavazanjian Jr., N., Matasovit, R., Bonaparte, G.R.,and Schmertmazin, E. 1995. Evaluation of MSW Properties for Seismic Analysis, Geoenvironment 2000. Geot. Special Publ. No.64, Y.B. Acar and D.E. Daniel, Eds., ASCE: New Orleans, pp.1126-1141.

Keene, P. 1977. Sanitary Landfill Treatment, Interstate Highway 84. Proc. Geot. Pract. for Disp. of Solid Waste Mat., ASCE: Ann Arbor, pp.632-644.

Lambe, T. W., and Whitman, R. V. 1969. Soil Mechanics, SI Version. John Wiley & Sons: New York.

Landva, A.,and Clark, J.I. 1990. Geotechics of waste. in Geotechics of Waste Fills-Theory and Practice, ASTM STP 1070, A. Landva and G.D. Knowles, Eds., ASTM: Philadelphia, pp. 86-106.

McLaren, R.J., and DiGioia, A.M. 1987. The Typical Engineering Properties of Fly Ash. Geot. Practice for Waste Diposal'87, Geot. Special Publ. No.13, R.D. Woods, Ed., ASCE: Ann Arbor, pp. 683-697.

Means, R.E., and Parcher, J.V. 1963. Physical Properties of Soils. Charles E. Merrill Books Inc.: Ohio.

Mitchell, J. K. 1993. Fundamentals of Soil Behavior. 2nd Edition, John Wiley & Sons: Singapore.

Newman, F.B., McGee, J., and Burns, D. 1987. Embankment over Fly Ash Pond at Ports mouth Power Station. Geot. Practice for Waste-Disposal'87, Geot. Special Publ. No. 13, R.C. Woods, Ed., ASCE: Ann Arbor, pp. 713-727.

Sheurs, R.E., and Khera, R.P. 1980. Stabilization of a Sanitary Landfill to Support a Highway. National Academy of Science, TRR 754, pp. 46-53

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Siegel, R.A.,Robertson, R.J.,and Anderson, D.G.1990. Slope Stability Investigations at a Landfill in Southern California. In Geotechnics of Waste Fills-Theory and Practice, ASTM STP 1070, A. Landva and G.D. Knowles, Eds., ASTM Philadelphia, pp. 259-284.

Singh, S.,and Murphy, B. 1990. Evaluation of the Stability of Sanitary Landfills. in Geotechics of Waste Fills-Theory and Practice, ASTM STP 1070, A. Landva and G.D. Knowles, Eds., ASTM Philadelphia, pp. 240-58.

Sowers, G.F. 1973. Settlement of Waste Disposal Fills. 8th Int. CSMFE, Moscow: Russia, pp. 207-210.

Stone, K.F.L., Randolph, M.F., Toh, S., and Sales, A.A. 1994. Evaluation of Consolidation Behavior of Mine Tailings. J. of Geot. Eng. Div., ASCE, 120(3): pp. 473-490.

Stulgis, R.P., Soydemir. C., and Telgener, R.J. 1995. Predicting Landfill Settlement. Geo-environment 2000, Geot. Special Tech. Publ. No. 46, Y.B. Acar and D.E. Daniel, Eds.,ASCE: New Orleans, pp. 980-994.

Terzaghi K., and Peck, R.B. 1967. Soil Mechanics in Engineering Practice. 2nd. Edit., John Wiley & Sons.

Yen, B.C., and Scanlon, B., 1975. Sanitary Landfill Settlement Rates. J. of Geot. Eng. Div., ASCE, 101(GT5), pp. 475-490.

York, D., Lesser, N., Bellatty, T., Israi, E., and Patel, A., 1977. Terminal Development on a Refuse Fill Site. Geot. Pract. For Disp. of Solid Waste Mat., ASCE: Ann Arbor, pp. 810-830.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกฤติยา ไชยม เกิดวันที่ 19 กันยายน พ. ศ. 2520 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีในปีพ.ศ. 2543 และเข้าศึกษาต่อในระดับมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิชาวิศวกรรมปฐพีในปีเดียวกัน จนจบหลักสูตรในปีการศึกษา 2545

สถาบันวิทยบริการ
าลงกรณ์มหาวิทยาลัย