

การทดสอบแบบจำลองกายภาพเพื่อระบุกลไกการวิบัติของดินเหนียวอ่อน
ระหว่างกำแพงเสาเข็มรูปตัวแอลตอกเรียงต่อเนื่อง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2557

**DETERMINATION OF FAILURE MECHANISM OF
VERY SOFT CLAY BEHIND L-PILE WALL
WITH PHYSICAL MODEL TESTS**

Warayoot Chaiyasook



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2014**

การทดสอบแบบจำลองกายภาพเพื่อระบุกลไกการวิบัติของดินเหนียวอ่อนระหว่าง
กำแพงเสาเข็มรูปตัวแอลตอกเรียงต่อเนื่อง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.พรพจน์ ตันเส็ง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วรายุทธ ไชยสุข : การทดสอบแบบจำลองกายภาพเพื่อระบุกลไกการวิบัติของดินเหนียวอ่อนระหว่างกำแพงเสาเข็มรูปตัวแอลที่คอกเรียงต่อเนื่อง (DETERMINATION OF FAILURE MECHANISM OF VERY SOFT CLAY BEHIND L-PILE WALL WITH PHYSICAL MODEL TESTS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ตันเส็ง, 80 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการทดสอบแบบจำลองกายภาพแบบย่อส่วนเพื่อระบุกลไกการวิบัติของดินระหว่างกำแพงเสาเข็มรูปตัวแอลที่คอกเรียงต่อเนื่อง. ในงานวิจัยนี้ใช้ระยะห่างระหว่างเสาเข็มในเทอมของอัตราส่วนระหว่างช่องเปิดต่อความกว้างของเสาเข็ม (S_g / B) เป็น 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.2, 1.6, 2.0, 2.5 และ 3.0 ในการทดสอบใช้ดินเหนียวอ่อนแบบคงสภาพจากการขุดเปิดหน้าดินแปลงทดสอบที่อยู่ในจังหวัดสมุทรปราการ การทดสอบกระทำบริเวณใกล้กับจุดเก็บตัวอย่างเพื่อลดการรบกวนตัวอย่าง แบบจำลองเสาเข็มตัวแอลแบบย่อส่วนได้รับแรงกระทำโดยใช้แม่แรงชนิดให้แรงกระทำแบบสม่ำเสมอจนดินในแบบจำลองวิบัติ ในระหว่างทดสอบได้บันทึกภาพการเคลื่อนตัวของดินระหว่างการให้แรงกระทำ จากภาพถ่ายสามารถระบุการเคลื่อนตัวของดินได้จากลูกปัดที่ติดตั้งไว้บนผิวหน้าดินก่อนการทดสอบ

จากผลทดสอบชี้ให้เห็นว่าแรงวิบัติต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (P_h / S_u) แปรผกผันกับ (S_g / B) โดยมีความสัมพันธ์แบบไฮเปอร์โบล่า แรงวิบัติที่ได้จากการทดสอบทางกายภาพของเสาเข็มแอลมีค่าต่ำกว่าแรงวิบัติของเสาเข็มกลมที่เสนอโดยวินิตย์ แหมา (2553) เนื่องจากรูปร่างของอาร์คแตกต่างกัน ภาพถ่ายของตัวอย่างทดสอบขณะเกิดการวิบัติจะเห็นอาร์คอย่างชัดเจนเมื่อ S_g / B มีค่าระหว่าง 0.1 ถึง 1.2 และไม่เห็นอาร์คอย่างชัดเจนเมื่อ S_g / B มีค่าระหว่าง 1.6 ถึง 3.0 และจากกลไกการวิบัติที่เกิดขึ้นจริงสามารถใช้สร้างสมการรูปปิดจากสมมูลของแรงวิบัติ สมการที่ได้นี้สามารถทำนายแรงวิบัติได้ใกล้เคียงกับแรงวิบัติที่เกิดขึ้นจริงมาก

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

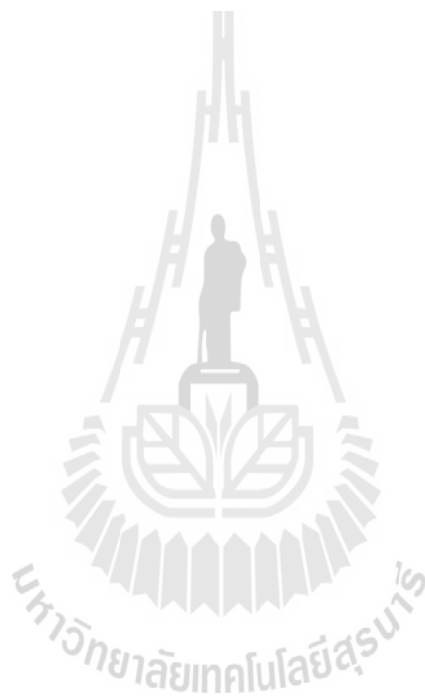
WARAYOOT CHAIYASOOK : DETERMINATION OF FAILURE
MECHANISM OF VERY SOFT CLAY BEHIND L-PILE WALL WITH
PHYSICAL MODEL TESTS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.
PORNPOT TANSENG, Ph.D., 80 PP.

CONTIGUOUS PILE WALL/EXCAVATION/GAP/SOIL ARCH

This thesis presents physical model test to verify the failure mechanism of soil behind the gap of contiguous L-pile retaining wall used to support the excavation in soft clay. The ratio of pile gap to pile width S_g/B of 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.2, 1.6, 2.0, and 3.0 are used. The undisturbed soft clay samples were obtained from an open cut in Samutprakarn province. The physical model tests were conducted in the vicinity of the soil sampling area to avoid the effect of sample disturbance. The pressures were applied to the physical model by screw jack until the failure of soil between the L-piles was observed. The digital photos were recorded during the test to monitor the failure mechanism.

The test results show that the normalized failure pressures reduce as the gap width ratio, S_g/B increase. The failure pressure of L-pile is lower than that of circular pile proposed by Winit (2010) due to soil arching size. The failure arches are clearly observed in the model with S_g/B between 0.1 and 1.2. The failure arches are not observed in the model with S_g/B between 1.6 and 3.0. Based on the observed failure mechanism, the close form equation is proposed for failure pressure prediction. The

failure pressures obtained from the proposed equation agree well with the actual failure pressure



School of Civil Engineering

Academic Year 2014

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ต้นเส็ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้การอบรมสั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือในการทำการศึกษาค้นคว้า ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการเขียน และช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ กรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพเข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

บุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยนี้

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ตลอดจนส่งเสริมการศึกษา และให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

วรายุทธ ไชยสุข

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	๗
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ปิทธิรศนั้วรณกรรณวิจัย.....	4
2.1 ระบบกำแพงกันดินในงานขุดดินลึก.....	4
2.1.1 ระบบกำแพงแบบยืดหยุ่น (flexible Wall).....	4
2.1.2 ระบบกำแพงแบบเกร็ง (rigid Wall).....	5
2.2 กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (contiguous Pile Wall).....	6
2.3 การก่อสร้างกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องในอดีต.....	7
2.3.1 บันทึกเกี่ยวกับการใช้เสาเข็มเรียงต่อเนื่องในกรุงเทพฯ.....	7
2.4 ปัญหาที่พบในระบบกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง.....	8
2.4.1 กรณีเรื่องน้ำไหลซึมขณะขุดดิน.....	8
2.4.2 กรณีเรื่องดินไหลออกขณะขุดดิน.....	9
2.5 ข้อดีและข้อด้อยของเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง.....	9

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.1	ประโยชน์การใช้งาน	10
2.5.2	การเคลื่อนตัวของดินรอบข้าง.....	10
2.5.3	ราคาและระยะเวลาในการก่อสร้าง	10
2.6	พฤติกรรมของกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องหน้าตัดวงกลม	10
2.7	พฤติกรรมของกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องหน้าตัดรูปตัวไอ.....	15
2.8	พฤติกรรมแนวโค้งรับแรง (arching behavior).....	17
2.9	ลักษณะของตัวอย่างดิน.....	29
2.9.1	ตัวอย่างดินคงสภาพ (undisturbed sample)	29
2.9.2	ตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพ (disturbed sample)	30
3	วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1	บทนำ.....	31
3.2	การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดิน	32
3.3	แหล่งดินที่นำมาทดสอบ.....	32
3.4	วิธีการเก็บตัวอย่างดิน	33
3.5	ความยาวของระยะห่างระหว่างเสาเข็ม	34
3.6	วิธีการเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน	36
3.7	การบันทึกภาพการเคลื่อนตัว	41
3.8	การประมวลผลภาพถ่าย.....	42
4	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	
4.1	แปลงตัวอย่างดินสำหรับการทดสอบแบบจำลอง	43
4.2	ผลทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ	45
4.3	การเปรียบเทียบแรงดันดินวิบัติผลการทดสอบกายภาพของเสาเข็มกลม ในงานวิจัยนี้กับผลทดสอบของวินิตย์และคณะ(2553).....	48
4.4	การเปรียบเทียบแรงดันดินวิบัติผลการทดสอบกายภาพของเสาเข็มไอ ในงานวิจัยนี้กับผลทดสอบของธีรศักดิ์และคณะ(2555).....	49

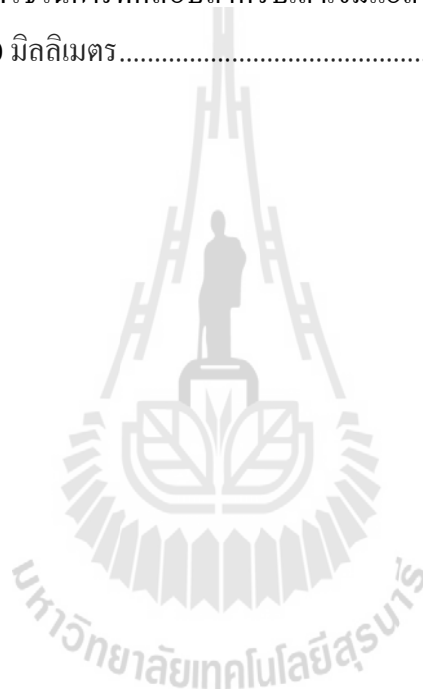
สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.1	แนวคิดกลไกการวิบัติที่ได้จากการทดสอบกายภาพของเสาเข็มรูปตัวไอ ที่นำเสนอขึ้นใหม่ในงานวิจัยนี้.....	51
4.5	กลไกการวิบัติของดินจากภาพถ่ายขณะทดสอบ.....	54
4.6	การสร้างสมการรูปแบบปิด (close form solution) จากผลการทดสอบแบบจำลอง กายภาพ	67
4.6.1	กลไกการวิบัติแบบโค้ง FM1	67
4.6.2	กลไกการวิบัติแบบลิ้ม (wedge failure mechanism) FM2	70
5	บทสรุป	
5.1	สรุปผลงานวิจัย.....	75
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	77
	รายการอ้างอิง	78
	ประวัติผู้เขียน	80

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	บันทึกการก่อสร้างกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องในกรุงเทพฯ8
3.1	สัดส่วนการจำลองที่ใช้ในการทดสอบสำหรับเสาเข็มแอส ขนาดจริง 300x300 มิลลิเมตร.....35



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงลักษณะของกำแพงเสาเข็มตอกหน้าตัดรูปตัวแอลเรียงต่อเนื่อง.....	2
2.1 งานขุดดินโดยใช้ระบบกำแพงกันดินแบบเข็มพีคเหล็ก.....	5
2.2 งานขุดดินโดยใช้ระบบกำแพงกันดินแบบเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง.....	5
2.3 งานขุดดินโดยใช้ระบบกำแพงกันดินแบบเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่อง.....	6
2.4 การใช้กำแพงเสาเข็มไม่เรียงต่อเนื่องสำหรับเป็นกำแพงกันดินในอดีต.....	7
2.5 ลักษณะของดินที่ไหลออกตามซอกเข็ม.....	9
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างต่อกำลังต้านทานแรงดันดินด้านข้าง จากผลการทดสอบกับแบบจำลองทางกายภาพย่อส่วน (วินิตย์และคณะ, 2553).....	11
2.7 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างที่สังเกตพบ ระยะ $s_g / d = 1.5$ (วินิตย์และคณะ, 2553).....	11
2.8 กลไกการวิบัติและแรงที่เกิดขึ้นบนระนาบวิบัติ (วินิตย์และคณะ, 2553).....	12
2.9 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับแนวความคิดการวิบัติ (วินิตย์และคณะ, 2553).....	12
2.10 วิสัยรับแรงธารของผนังเสาเข็มหน้าตัดกลม (วิชัย, 2540).....	13
2.11 แสดงรูปภาพการเคลื่อนตัวของมวลดินเมื่อถูกปิดกั้นบางส่วนด้วยเสาเข็มเว้นระยะในกรณีทดสอบที่ $S_g / D = 4$ (ประสพศิริ, 2546).....	14
2.12 สะพานดินระหว่างซอกเสาเข็มและระนาบวิบัติของดินสำหรับเสาเข็มตัวไอ (ประจิด, 2539).....	15
2.13 การเปรียบเทียบผลการทดสอบทางกายภาพกับค่าเชิงทฤษฎี.....	17
2.14 อุปกรณ์ทดสอบแบบจำลองอุโมงค์ (Atkinson et al., 1975).....	18
2.15 ภาพถ่ายแบบจำลองจาก radiograph (Atkinson et al., 1975).....	19
2.16 แนวระนาบเลื่อนในการวิบัติเริ่มต้นของแบบจำลองอุโมงค์ (Atkinson et al., 1975).....	20
2.17 การวิบัติสุดท้ายของแบบจำลองอุโมงค์ (Atkinson et al., 1975).....	20
2.18 ผลจากการทดสอบแบบจำลองอุโมงค์ (Atkinson et al., 1975).....	21

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19 ทฤษฎีพลาสติกกระนาบไถลรอบวงกลมเปิดที่มีแรงเสียดทาน (McCutcheon et al., 1949).....	22
2.20 ระบายแรงเฉือนรอบวงกลม (Heuer and Hendron et al.,1971).....	22
2.21 active arching การเคลื่อนตัวได้แรงดัน P_s เมื่อโครงสร้างถูกแรงอัด มากกว่าดินรอบข้าง (Einstein et al., 1983).....	24
2.22 แสดงสภาวะ active arching (Einstein et al., 1983).....	24
2.23 passive arching การเคลื่อนตัวได้แรงดัน P_s เมื่อโครงสร้างถูกแรงอัด น้อยกว่าดินรอบข้าง (Einstein et al.,1983).....	25
2.24 แสดงสภาวะ passive arching (Einstein et al.,1983).....	25
2.25 พฤติกรรมทั่วไปของดิน active arching (Evans et al.,1983).....	26
2.26 ทิศทางของหน่วยแรงหลัก active arching (Evans et al.,1983).....	26
2.27 พฤติกรรมทั่วไปของดิน passive arching (Evans et al.,1983).....	27
2.28 ทิศทางของหน่วยแรงหลัก passive arching (Evans et al.,1983).....	27
2.29 การปรับปรุงดินโดยวิธีทั่วไป (Kohashi, Furumoto and Sakajo et al.,2008).....	28
2.30 ระบายแรงเฉือนเหนือเสาเข็มดินซีเมนต์และการทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน (Kohashi, Furumoto and Sakajo et al.,2008).....	28
2.31 ตัวอย่างการเกิด arching effect บนหัวเสาเข็มดินซีเมนต์ (Kohashi, Furumoto and Sakajo et al.,2008).....	29
3.1 ขั้นตอนการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ.....	31
3.2 ผลการเจาะสำรวจดินโครงการนิคมอุตสาหกรรมเอเชีย ถนนหลวงแพ่ง จังหวัด สมุทรปราการ.....	33
3.3 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างจากการขุดเปิดหน้าดิน.....	34
3.4 การจำลองเพียงครั้งหนึ่งเนื่องจากความสมมาตรของตัวอย่าง.....	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 แสดงอุปกรณ์เก็บดินตัวอย่างคงสภาพ	36
3.6 การเก็บดินตัวอย่างคงสภาพแบบก้อน	37
3.7 การเจาะดินเพื่อติดตั้งแบบจำลองเสาเข็ม	38
3.8 การประกอบดินตัวอย่างกับแบบทดสอบ	38
3.9 การติดตั้งเครื่องหมายเพื่อบันทึกการเคลื่อนตัว	39
3.10 การติดตั้งตัวอย่างลงในเครื่องมือทดสอบและการติดตั้งระบบเครื่องมือวัด	40
3.11 การติดตั้งกล้องถ่ายภาพเพื่อบันทึกการเคลื่อนตัว	41
4.1 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับข้อมูลของหลุมเจาะในบริเวณใกล้เคียง	44
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดทดสอบกับค่ายุบตัวที่ได้จากการ ทดสอบแบบจำลอง	46
4.3 การเปรียบเทียบแรงดันดินวิบัติผลการทดสอบกายภาพ ของเสาเข็มทั้ง 3 รูปแบบ	47
4.4 การเปรียบเทียบแรงดันดินวิบัติผลการทดสอบกายภาพของเสาเข็มทั้ง 3 รูปแบบใน งานวิจัยนี้	47
4.5 เปรียบเทียบแรงวิบัติผลการทดสอบกายภาพเสาเข็มกลมงานวิจัยนี้ กับวินิตย์และคณะ (2553)	49
4.6 เปรียบเทียบแรงดันดินวิบัติผลการทดสอบกายภาพเสาเข็มโองานวิจัยนี้ กับธีรศักดิ์และคณะ (2555)	50
4.7 ภาพถ่ายรอยแยกสุดท้าย (final crack) ที่เกิดขึ้นของเสาเข็มตัวไอ (ระยะ $S_g / B = 1.2$) ในงานวิจัยนี้	50
4.8 แนวคิดกลไกการวิบัติที่เสนอขึ้นใหม่ที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองกายภาพ	51
4.9 free body diagram ของระนาบการวิบัติ	52
4.10 เปรียบเทียบแรงดันดินวิบัติผลการทดสอบกายภาพเสาเข็มไอ กับกลไกการวิบัติงานวิจัยนี้	54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ภาพการเคลื่อนตัวภายในของตัวอย่างทดสอบที่มี $S_g / B = 0.7$ (เมื่อพิจารณาจากเริ่มต้นทดสอบจนถึงจุดวิบัติ).....	56
4.12 เส้น contour line การเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบกับแบบจำลอง ขนาด $S_g / B = 0.7$	57
4.13 เวกเตอร์การเคลื่อนตัวในแบบจำลองขนาด $S_g / B = 0.7$	57
4.14 เส้น contour line การเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบกับแบบจำลอง ขนาด $S_g / B = 1.2$	58
4.15 เวกเตอร์การเคลื่อนตัวในแบบจำลองขนาด $S_g / B = 1.2$	58
4.16 เส้น contour line การเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบกับแบบจำลอง ขนาด $S_g / B = 2.5$	59
4.17 เวกเตอร์การเคลื่อนตัวในแบบจำลองขนาด $S_g / B = 2.5$	59
4.18 ภาพถ่ายรอยแยกสุดท้าย (final crack) ที่เกิดขึ้น (ระยะ $S_g / B = 0.7$)	60
4.19 ภาพร่างรอยแยกสุดท้าย (final crack) ที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบ ขนาด $S_g / B = 0.7$	61
4.20 ภาพถ่ายรอยแยกสุดท้าย (final crack) ที่เกิดขึ้น (ระยะ $S_g / B = 1.2$)	61
4.21 ภาพร่างรอยแยกสุดท้าย (final crack) ที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบ ขนาด $S_g / B = 1.2$	62
4.22 สะพานดินระหว่างชอกเสาเข็มและระนาบวิบัติของดิน สำหรับเสาเข็มตัวไอ (ประจติ, 2539)	63
4.23 ระยะการเกิดรอยแยกในแบบจำลองสำหรับ $S_g / B = 0.7, 1.2, 2.5$	64
4.24 รอยแยกเริ่มต้น (first crack) ที่พบและรอยแยกสุดท้าย (final crack) ของขนาด $S_g / B = 0.7$	64
4.25 รอยแยกเริ่มต้น (first crack) ที่พบและรอยแยกสุดท้าย (final crack) ของขนาด $S_g / B = 1.2$	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 รอยแยกเริ่มต้น (first crack) ที่พบและรอยแยกสุดท้าย (final crack) ของขนาด $S_g / B = 2.5$	66
4.27 แนวคิดกลไกการวิบัติแบบ FM1 ที่เกิดจากการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ.....	67
4.28 free body diagram ของระนาบการวิบัติ.....	68
4.29 แนวคิดกลไกการวิบัติแบบ FM2 ของแบบจำลองทางกายภาพประยุกต์จาก (วินิตและคณะ, 2553).....	71
4.30 free body diagram ของระนาบการวิบัติ.....	71
4.31 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับแนวคิดกลไกการวิบัติ.....	74

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

W	=	มุมเสียดทานของดิน
c	=	หน่วยแรงยึดเกาะ
S_u	=	กำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน
E	=	Young's Modulus
P_h	=	แรงต้านแรงคั่นดิน
S_g	=	ระยะห่างระหว่างผิวถึงผิวเสาเข็ม
S_c	=	ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์กลางเสาเข็ม
B	=	ความกว้างเสาเข็ม
Γ	=	สัมประสิทธิ์การเกาะตัวระหว่างดินกับผิวเสาเข็ม
r	=	รัศมีของแบบจำลองเสาเข็ม
X	=	หน่วยน้ำหนักของดิน
ϵ	=	Poisson ratio
LL	=	Liquid Limit
PL	=	Plastic Limit
PI	=	Plastic Index

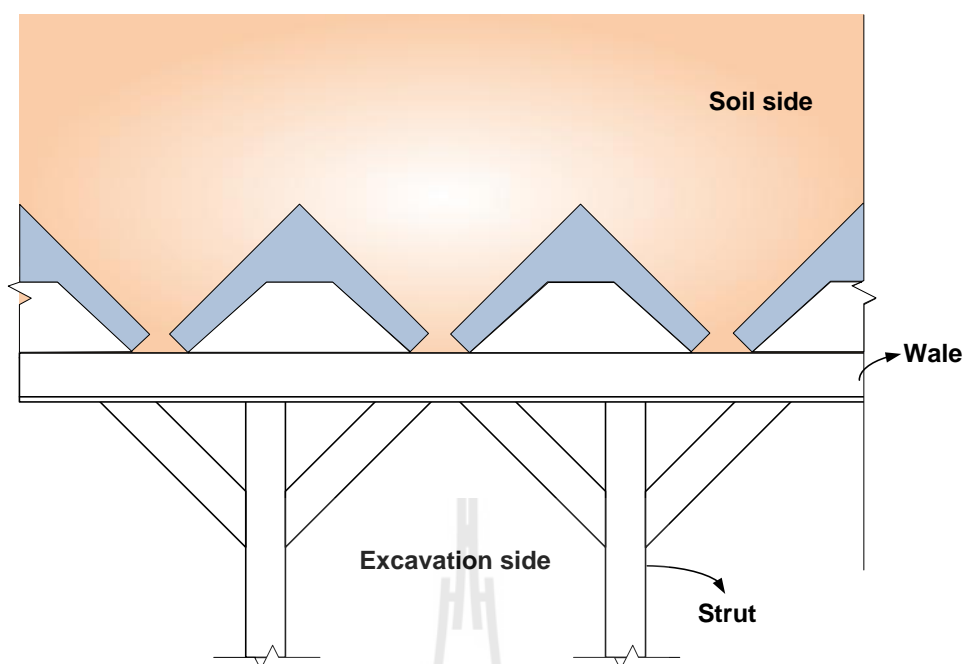
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในงานชุดเพื่อการก่อสร้างชั้นใต้ดินในชั้นดินเหนียวอ่อน จำเป็นจะต้องใช้โครงสร้างกันดินควบคู่กับระบบค้ำยัน ในปัจจุบันนิยมใช้ระบบกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (contiguous pile wall) เนื่องจากระบบกำแพงกันดินชนิดนี้มีกรรมวิธีการก่อสร้างที่ไม่ยุ่งยากและสามารถก่อสร้างได้ แม้ว่าจะมีพื้นที่จำกัด ราคาค่าก่อสร้างถูกกว่าระบบกำแพงแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ (diaphragm wall) และลดการโก่งแอ่นของโครงสร้างกันดินได้ดีกว่าเสาเข็มพืดเหล็ก (steel sheet pile) (ประสพศิริ, 2546) ในอดีตนั้นกรุงเทพมหานครเคยใช้เสาเข็มไม้ตอกเรียงกันเป็นแนวต่อเนื่องล้อมรอบบริเวณที่ต้องการขุดดิน แต่เนื่องจากไม่มีความยาวจำกัด ความแกร่ง (stiffness) ของไม้ต่ำและราคาคอนกรีตแพงจึงทำให้ไม่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน (ประจิต, 2539)

การออกแบบระบบกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (contiguous pile wall) สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่เหมาะสมที่จะไม่ทำให้ดินระหว่างเสาเข็มเกิดการวิบัติและไหลออกมาได้ ดังนั้นกำแพงชนิดนี้จึงใช้ได้เฉพาะดินที่มีค่า Cohesion ซึ่งได้แก่ดินเหนียว และดินทรายที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินซึ่งจะไม่ไหลตามน้ำออกมาระหว่างซอกเสาเข็ม โดยทั่วไปมักจะใช้หลักการทางสถิตยศาสตร์และปฐพีกลศาสตร์ในการวิเคราะห์ โดยใช้วิธีการตั้งสมมติฐานกลไกการวิบัติ เพื่อวิเคราะห์หาแรงดันดินวิบัติ โดยอาศัยระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดพฤติกรรมแนวอาร์คในดิน ปัจจุบันนิยมใช้อัตราส่วนระยะห่างของเสาเข็ม S_g / B อยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.5 ถึง 1.0 จึงทำให้ไม่ประหยัดเนื่องจากใช้เสาเข็มในปริมาณมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะได้กล่าวถึงการวิเคราะห์กำลังต้านทานของดินที่อยู่ระหว่างซอกเสาเข็มและการทดสอบเพื่อพิสูจน์รูปแบบการวิบัติที่มีผู้นำเสนอไว้ เพื่อใช้เป็นมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบกำแพงเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่องรูปตัวแอลต่อไป



รูปที่ 1.1 แสดงลักษณะของกำแพงเสาเข็มตอกหน้าตัดรูปตัวแอลเรียงต่อเนื่อง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของดินระหว่างเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่องหน้าตัดตัว L ในเชิงกายภาพ โดยการเก็บตัวอย่างดินเหนียวแบบคงสภาพมาทำการศึกษาพฤติกรรมแนวอาร์คระหว่างช่องว่าง (gap) ของกำแพงเสาเข็มรูปตัวแอลเรียงต่อเนื่อง (contiguous pile wall) โดยที่มีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางเสาเข็มแตกต่างกัน การเก็บตัวอย่างดินจะเก็บขณะที่มีการขุดเปิดหน้าดินลงไปทำให้ได้ดินที่คงสภาพมาทดสอบ และนำค่าที่ได้จากการทดสอบทางกายภาพมาวิเคราะห์เพื่อระบุกลไกการวิบัติ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของระยะห่างระหว่างเสาเข็มของกำแพงเสาเข็มรูปตัวแอลเรียงต่อเนื่องต่อพฤติกรรมแนวอาร์คของดินระหว่างช่องว่างโดยที่มีระยะห่างระหว่างเสาเข็มแตกต่างกัน
- 2) เพื่อนำผลการศึกษามาใช้เป็นแนวทางปรับปรุงการออกแบบและวิเคราะห์ระบบกำแพงกันดินเพื่อป้องกันผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียงให้มีความเหมาะสมทางด้านความปลอดภัยและความประหยัด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาแรงวิบัติของระยะห่างระหว่างเสาเข็มของกำแพงเสาเข็มตอกหน้าตัดตัวแอลเรียงต่อเนื่อง (contiguous pile wall) การทดลองจะใช้แบบจำลองทางกายภาพแบบย่อส่วน เพื่อศึกษาพฤติกรรมของดินต่อระยะห่างระหว่างเสาเข็ม โดยใช้ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนคงสภาพ ในการศึกษาจะใช้อัตราส่วนระยะห่างต่อความกว้างเสาเข็ม S_g / B เท่ากับ 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 ซึ่งเป็นระยะที่ใช้สำหรับเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง และระยะ 1.2, 1.6, 2.0, 2.5, 3.0 ซึ่งเป็นระยะที่ยังไม่เคยมีการนำไปใช้เป็นเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่องมาก่อน

2) ทำการทดสอบแบบจำลองกายภาพของเสาเข็มกลม (วินิตย์และคณะ, 2553) และเสาเข็มไอ (ธีรศักดิ์และคณะ, 2555) เพื่อนำมาเปรียบเทียบแรงดันดินวิบัติ และยืนยันว่าสมการจากการทดสอบสามารถใช้กับดินชนิดอื่นได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เพื่อที่จะได้ทราบถึงกลไกการต้านทานของดินระหว่างต้นเสาเข็มต่อแรงดันดินด้านข้างของเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่อง และนำกลไกที่ได้นี้มาพัฒนาเป็นสมการที่ใช้สำหรับวิเคราะห์และออกแบบระยะห่างระหว่างเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่องได้อย่างปลอดภัยและมีราคาที่เหมาะสม

บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรมวิจัย

2.1 ระบบกำแพงกันดินในงานขุดดินลึก

ระบบกำแพงกันดินป้องกันการพังทลายของงานขุดดินสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทคือ ระบบกำแพงแบบยืดหยุ่น (flexible wall) และ ระบบกำแพงแบบแข็ง (rigid wall)

2.1.1 ระบบกำแพงแบบยืดหยุ่น (flexible wall)

ระบบกำแพงแบบนี้ได้แก่ ระบบเข็มพีค (sheet pile) มีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กยาว กว้างประมาณ 30 ถึง 50 เซนติเมตร ใช้เป็นโครงสร้างชั่วคราวสำหรับโครงสร้างกันดิน เช่น งานวาง ท่อน้ำ งานโครงสร้างใต้ดิน และงานโครงสร้างกันดิน แต่กำแพงชนิดนี้เป็นแผ่นเหล็กที่มีความหนา ไม่มาก หากใช้เป็นโครงสร้างกันดินในงานขุดดินที่มีความลึกมาก หรือใช้เป็นโครงสร้างกันการ เคลื่อนตัวของอาคารข้างเคียงที่มีขนาดใหญ่ อาจจะทำให้เกิดการเสียรูปของเข็มพีคและส่งผลให้เกิด การเคลื่อนตัวของดินอย่างมาก เนื่องจากกำแพงชนิดนี้มีค่าสติเฟเนสต่ำ ดังนั้นจึงทำให้เกิดปริมาณ การเคลื่อนตัวของกำแพงค่อนข้างสูง โดยทั่วไปนิยมใช้มากเนื่องจากการก่อสร้างทำได้ง่าย รวดเร็ว ราคาถูก โดยจัดเป็นโครงสร้างชั่วคราว (temporary structure) ทำการถอนออกเมื่อก่อสร้างเสร็จแล้ว สามารถนำกลับไปใช้ได้



รูปที่ 2.1 งานขุดดิน โดยใช้ระบบกำแพงกันดินแบบเข็มพืดเหล็ก

2.1.2 ระบบกำแพงแบบเกร็ง (rigid wall)

ระบบกำแพงกันดินชนิดนี้จะมีความแข็งแรงกว่าระบบเข็มพืด ทำให้ผลการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงมีค่าน้อย (ไม่เกิน 5 เซนติเมตรถ้ามีการค้ำยันอย่างเหมาะสม) ระบบกำแพงกันดินชนิดนี้สามารถก่อสร้างเป็นโครงสร้างถาวร (permanent structure) ได้ โดยค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างจะมีราคาสูงกว่าระบบกำแพงแบบยืดหยุ่น (flexible wall) ระบบกำแพงกันดินแบบแข็ง (rigid wall) ได้แก่ diaphragm wall, secant pile wall, contiguous pile wall เป็นต้น



ค้ำยัน

รูปที่ 2.2 งานขุดดิน โดยใช้ระบบกำแพงกันดินแบบเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง

เสาเข็มรูปตัวแอล



รูปที่ 2.3 งานขุดดิน โดยใช้ระบบกำแพงกันดินแบบเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่อง

2.2 กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (contiguous pile wall)

J.P.North and G.H.A. Lyons (1975) กล่าวว่า contiguous ในพจนานุกรม shorter oxford english ให้ความหมายว่า สัมผัสประชิดติดกัน กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (contiguous pile wall) คือกำแพงชนิดหนึ่งที่ใช้เสาเข็มเรียงเป็นแถวต่อเนื่องกัน เป็นกำแพงกันดินที่ใช้ในงานขุดดิน

ประจิด (2536) กล่าวว่ากำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (contiguous pile wall) เคยใช้ก่อสร้างในประเทศไทย โดยในระยะแรกใช้เสาเข็มไม้แต่ยังไม่มีความทันสมัยและปลอดภัย การก่อสร้างก็นำเสาเข็มมาทำเป็นแนวเรียงต่อเนื่องกันล้อมรอบบริเวณที่ต้องการขุดดิน จากนั้นติดตั้งค้ำยันภายในเพื่อทำการขุดหรือบริเวณที่ต้องการป้องกันการพังทลายของดิน อดีตในกรุงเทพมหานครการขุดดินส่วนมากจะใช้เสาเข็มไม้ตอกเรียงกัน โดยเสาเข็มไม้มีความยาว 4 เมตร ถึง 12 เมตร ขึ้นกับความลึกที่จะขุด แต่เนื่องจากเสาเข็มไม้มีความยาวจำกัด กำลังของไม้ไม่สูงมากทำให้ขุดลึกมากไม่ได้ รวมถึงราคาไม้มีราคาสูงและหายาก จึงไม่เป็นที่นิยม กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องมีขั้นตอนการก่อสร้างเหมือนกับการตอกเสาเข็มไม้เรียงกันแต่จะเปลี่ยนจากไม้เป็นเสาเข็มชนิดต่างๆ เช่น เสาเข็มเจาะคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ เสาเข็มหน้าตัดสี่เหลี่ยมคอนกรีตหล่อสำเร็จ เสาเข็มคอนกรีตหน้าตัดรูปตัวไอ และเสาเข็มเหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปตัวไอ การก่อสร้างจะเรียงเป็นแถวโดยจะทำการเว้นระยะระหว่างเสาเข็มอยู่ที่ 50 มิลลิเมตร ถึง 150 มิลลิเมตร ดังนั้น โครงสร้างกันดินนี้จึงไม่สามารถกันน้ำได้ ทั่วไปจะใช้ในดินเหนียวซึ่งมีอัตราการซึมผ่าน (permeability) ต่ำ

ประจิด (2539) กล่าวว่า กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (contiguous pile wall) ถูกใช้กับดินเม็ดหยาบหรือดินถม อัตราการซึมผ่าน (permeability) ไม่มีปัญหาต่อระยะห่างระหว่างเสาเข็ม เพราะสามารถปรับความยาวช่องว่างระหว่างเข็ม ได้เพื่อป้องกันการพังทลายของดิน ความลึกมากที่สุดที่

กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (contiguous pile wall) สามารถก่อสร้างได้ประมาณ 34 ถึง 55 เมตร อย่างไรก็ตามความกว้างของระยะห่างระหว่างเสาเข็มนี้สำคัญมาก เสาเข็มจะทำหน้าที่เป็นกำแพงกันดินโดยรับทั้งแรงเฉือนและโมเมนต์คดที่เกิดจากแรงดันดินด้านข้างทั้งป้องกันการอูด (heave) ของกันบ่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว และระยะห่างระหว่างเสาเข็มแต่ละต้นจะขึ้นกับชนิดของดิน ความลึกในการขุด และระบบค้ำยันภายใน



รูปที่ 2.4 การใช้กำแพงเสาเข็มไม้เรียงต่อเนื่องสำหรับเป็นกำแพงกันดินในอดีต
(Wikimedia เว็บไซต์)

2.3 การก่อสร้างกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องในอดีต

ลักษณะดินกรุงเทพฯส่วนบนเป็นดินเหนียวซึ่งการซึมน้ำต่ำมาก ทำให้สามารถใช้เสาเข็มเรียงต่อเนื่องได้โดยไม่มีปัญหาเรื่องน้ำ ทำให้สามารถเรียงเป็นกำแพงกันดินชั่วคราว ที่มีราคาถูกและทำได้ง่ายกว่ากำแพงกันดินชนิดอื่น

2.3.1 บันทึกเกี่ยวกับการใช้เสาเข็มเรียงต่อเนื่องในกรุงเทพฯ

ประจิด (2539) ได้บันทึกและรายงานเกี่ยวกับการใช้เสาเข็มเรียงต่อเนื่องชนิดต่างๆ เป็นกำแพงกันดินชั่วคราว และถาวรในกรุงเทพฯ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 บันทึกการก่อสร้างกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องในกรุงเทพฯ

สถานที่	ชนิดเสาเข็ม	ขนาด (m.)	ระยะห่าง C-C (m.)	Gap (m.)	จุดลึก (m.)	S_g / B
ตราชันท์	เข็มเจาะ	1.00 m dia.	1.1	0.1	15.5	0.091
สุริวงส์	เข็มเจาะ	1.00 m dia.	1.1	0.1	11.5	0.091
กิ้งแก้ว	เข็มเจาะ	0.40 m dia.	0.5	0.1	7.45	0.200
		0.40 m dia.	0.75	0.35	4	0.467
คลองถม	เข็มเจาะ	0.60 m dia.	0.7	0.1	6	0.143
คลองด่าน	เหล็กรูป H	WF300×300	0.45	0.15	4.25	0.5
ปทุมวัน	เหล็กรูป I	WF300×150	0.3	0	4.8	0
คลองจั่น	เหล็กรูป I	WF300×150	0.45	0.3	4.3	1.0
คลองถม	เหล็กรูป I	WF300×300	0.45	0.15	6	0.5
ศาลาแดง	เหล็กรูป H	WF300×300	0.45	0.15	8.7	0.5
ช.ศูนย์วิจัย	เข็ม คสล	0.35×0.35m	0.6	0.25	3.8	0.714

2.4 ปัญหาที่พบในระบบกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง

ปัญหาหลักที่สำคัญของระบบกำแพงกันดินชนิดนี้คือ ความที่บ้น้ำของกำแพง กำแพงชนิดนี้จะไม่สามารถกั้นน้ำได้เนื่องจากมีช่องว่างอยู่ตรงกลางระหว่างเสาเข็ม โดยเสาเข็มจะมีขนาดตั้งแต่ 0.35 เมตร ถึง 1.20 เมตร ในส่วนของปัญหาในเรื่องดินและน้ำจะไหลออกจากช่องว่างระหว่างเสาเข็มขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆและสภาพแวดล้อมรอบๆบริเวณเขตก่อสร้าง ซึ่งเราสามารถแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 กรณีได้ดังนี้

2.4.1 กรณีรื่อน้ำไหลซึมขณะขุดดิน

ประจิต (2539) กล่าวว่าน้ำที่ไหลซึมออกมาขณะขุดดิน และไปชะนำพาให้ดินหลุดออกมาจนทำให้ดินบริเวณข้างเคียงทรุดหรือยุบลงจะไม่เกิดขึ้น เพราะไม่มีน้ำไหลแม้ว่าในดินจะมีปริมาณน้ำมากถึง 130 - 140 เปอร์เซ็นต์ก็ตาม ทั้งนี้ความจริงแล้วไม่ใช่ น้ำดังกล่าวไม่ไหล แต่มีการ

ไหลเกิดขึ้นในอัตราการไหลที่ช้ามาก โดยเฉพาะดินเหนียวกรุงเทพฯ มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำ (K , coefficient of permeability) ต่ำมาก คือประมาณ 10^{-8} ถึง 10^{-6} เซนติเมตรต่อวินาที

Jamshed et al. (1975) รายงานว่าดินบริเวณรังสิตและบริเวณหนองงูเห่า มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำมากในส่วนที่ตื้น และมีค่าน้อยในส่วนที่ลึก โดยทั่วไปแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำในระดับ 10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที ก็ถือว่าไม่ซึม (impermeable) อัตราการไหลซึมของน้ำจะน้อยจนน้อยกว่าอัตราการระเหยในบรรยากาศ ผลก็คือส่วนที่สัมผัสกับอากาศจะแห้ง น้ำมีโอกาสไหลซึมได้บ้างในระดับตื้น ซึ่งจะไม่ใช่ในดินโดยตรงแต่จะเป็นน้ำใช้จากอาคารบ้านเรือนไหลจากท่อที่แตก หรือารระบายน้ำ ผ่านลงไปดินถมหรือขยะ แล้วไหลออกตามซอกเข็ม

2.4.2 ปัญหาเนื่องจากดินไหลออกขณะขุดดิน

การไหลทลายของดินระหว่างเสาเข็มนั้นจะเกิดขึ้นได้แต่อยู่ในระดับที่ควบคุมได้ ประจิด (2539) ได้มีการออกแบบระยะห่างระหว่างเสาเข็มซึ่งระยะห่างระหว่างเสาเข็มนี้จะขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่างหน้าตัดของเสาเข็ม แรงดันดินด้านข้างและกำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน



รูปที่ 2.5 ลักษณะของดินที่ไหลออกตามซอกเข็ม

2.5 ข้อดีและข้อด้อยของเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง

ถ้านำกำแพงกันดินเสาเข็มเรียงต่อเนื่องชนิดต่างๆมาเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยกันแล้ว ต้องพิจารณาถึงเรื่องประโยชน์การใช้งาน การเคลื่อนตัวของดินหรือความปลอดภัยในการขุด ราคา ระยะเวลาในการก่อสร้างและขีดจำกัดอย่างอื่นซึ่งเราสามารถวิจารณ์เปรียบเทียบเป็นลำดับดังนี้

2.5.1 ประโยชน์การใช้งาน

ประโยชน์ในการใช้งานเป็นกำแพงกันดินทั้งชั่วคราวและถาวร ประโยชน์ในการนำกลับมาใช้ซ้ำหลายครั้งหรือดัดแปลงใช้งานชนิดอื่น เช่น เข็มเหล็กรูป H หรือ I สามารถใช้เป็นคาน้ำยันหรือเสาได้เมื่อถูกตัดสั้นๆ ก็ยังใช้ประโยชน์อื่นๆ ได้ ในขณะที่กำแพงเสาเข็มคอนกรีตหล่อในที่หรือกำแพงเสาเข็มคอนกรีตตอกจะใช้ประโยชน์ได้หมดเดียว คือเป็นกำแพงกันดินชั่วคราวหรือถาวรเท่านั้น และเมื่อใช้เป็นกำแพงถาวรก็จะมีน้ำหนักมากซึ่งไปเพิ่มภาระแก่ฐานราก

2.5.2 การเคลื่อนตัวของดินรอบข้าง

เสาเข็มคอนกรีตจะมีการเคลื่อนตัวน้อยเพราะมีความแกร่ง ในขณะที่เสาเข็มเหล็กหน้าตัดรูปตัว H หรือ I อาจจะทำให้ความแข็งแรงมาก แต่การถอนกลับมาใช้ทำให้ดินรอบข้างมีโอกาสเคลื่อนตัวมากกว่า

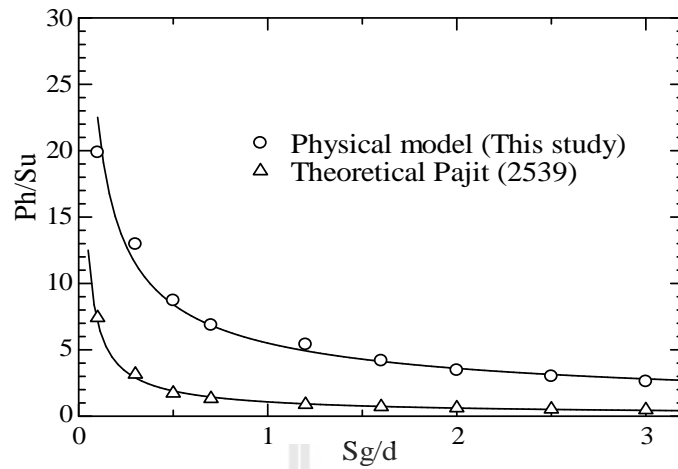
2.5.3 ราคาและระยะเวลาในการก่อสร้าง

ทั่วไปแล้วเสาเข็มตอกมักจะมากกว่าทั้งด้านราคาและเวลา แต่เสาเข็มเหล็กก็จะแพงกว่าถ้าไม่สามารถถอนกลับมาได้

2.6 พฤติกรรมของกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องหน้าตัดวงกลม

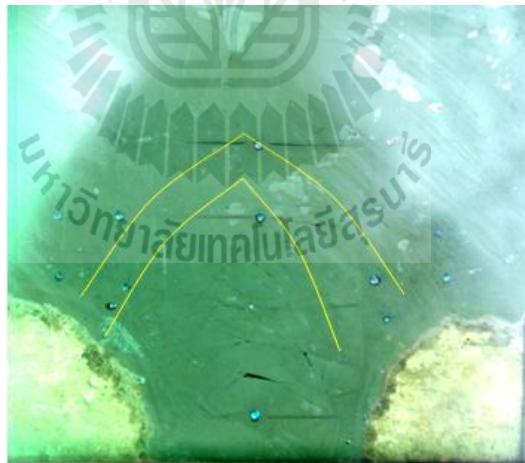
วินิตย์และคณะ (2553) ได้ทำการทดสอบศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของดินที่ถูกกักอยู่ระหว่างช่องว่างของเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องพบว่า กำลังต้านทานต่อการไหลของดินแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างช่องว่างในรูปแบบไฮเปอร์โบลิกดังสมการที่ 2.1

$$\frac{P_h}{S_u} = 3.3709(S_g / d)^{-0.68} \quad (2.1)$$



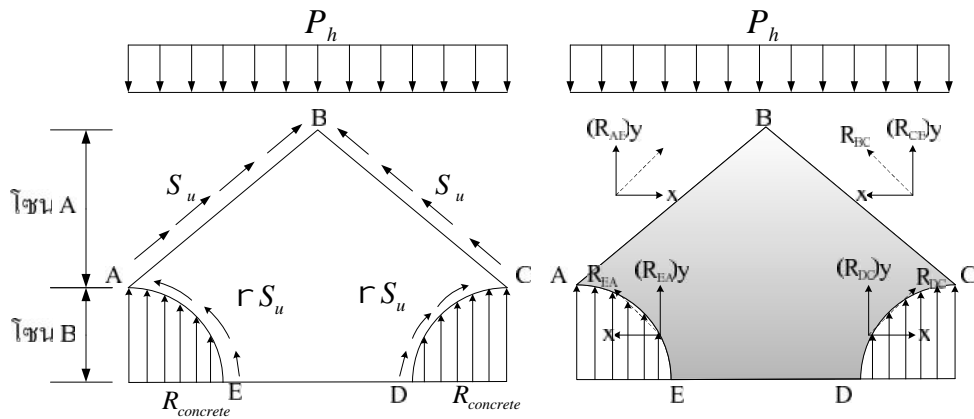
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างต่อกำลังต้านทานแรงดันดินด้านข้าง จากผลการทดสอบกับแบบจำลองทางกายภาพย่อส่วน (วินิตย์และคณะ, 2553)

จากการทดสอบ วินิตย์ยังได้พบรูปแบบการวิบัติของแบบจำลองจากภาพถ่ายเชิงซ้อน ในขณะที่ทดสอบมีลักษณะดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างที่สังเกตพบ ระยะ $s_g / d = 1.5$ (วินิตย์และคณะ, 2553)

ซึ่งวินิตย์ได้นำเสนอกลไกการวิบัติและคำนวณแรงวิบัติ โดยพิจารณาให้บริเวณแนววิบัติดินมีหน่วยแรงเฉือนด้านทานเท่ากับ undrain shear strength ดังรูปที่ 2.8

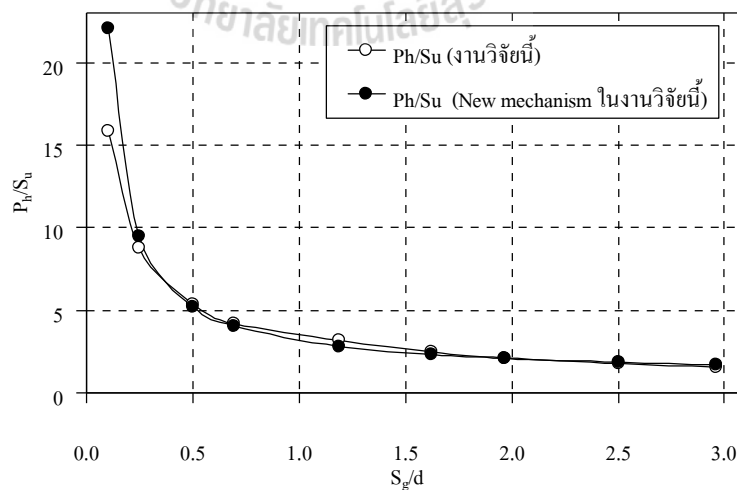


รูปที่ 2.8 กลไกการวิบัติและแรงที่เกิดขึ้นบนระนาบวิบัติ (วินิตย์และคณะ, 2553)

จากสมมูลของแรงต้านทานกับแรงกระทำสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูป close form solution ได้ ดังสมการที่ (2.2)

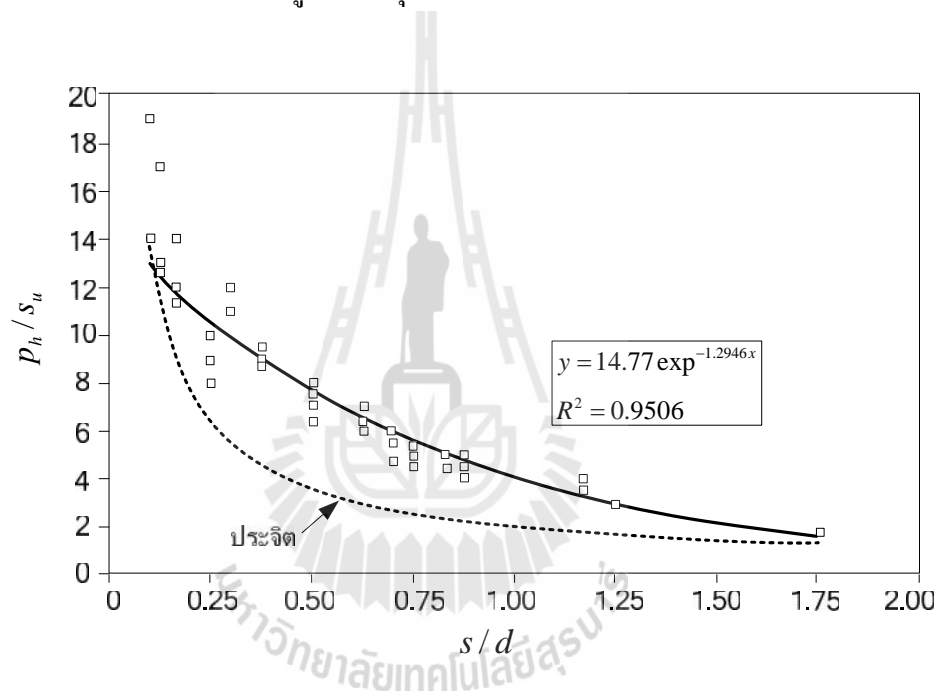
$$\frac{P_h}{S_u} = \frac{\left((s_g + d) + \frac{r df}{2\sqrt{2}} \right)}{s_g} \tag{2.2}$$

ซึ่งให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพมากดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับแนวคิดการวิบัติ (วินิตย์และคณะ, 2553)

วิชัย (2540) ได้จำลองไฟในท้อลิเมนต์ของผนังเสาเข็มเรียงต่อเนื่องหน้าตัดวงกลม เพื่อวิเคราะห์การก่อตัวเป็นสะพานโค้งของดินด้วยโปรแกรม strand 6 Release 6.16 โดยจำลองอยู่ในลักษณะปัญหา 2 มิติ การวิเคราะห์จะกำหนดแรงดันดินด้านข้างด้วยการให้หน่วยแรงกดที่ขอบของผิวดินด้านหลังกำแพง โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.5 ตันต่อตารางเมตร จนกระทั่งค่าหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในดินเท่ากับกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่กำหนด เพื่อหาค่าแรงดันดินด้านข้างสูงสุดที่กำแพงจะรับได้ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุคือ คุณสมบัติของดินเหนียวกรุงเทพฯ มีค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 ตันต่อตารางเมตร อัตราส่วนปัวซอง เท่ากับ 0.47 โมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 75 เท่าของกำลังต้านทานแรงเฉือน



รูปที่ 2.10 วิสัยรับแรงธารของผนังเสาเข็มหน้าตัดกลม (วิชัย, 2540)

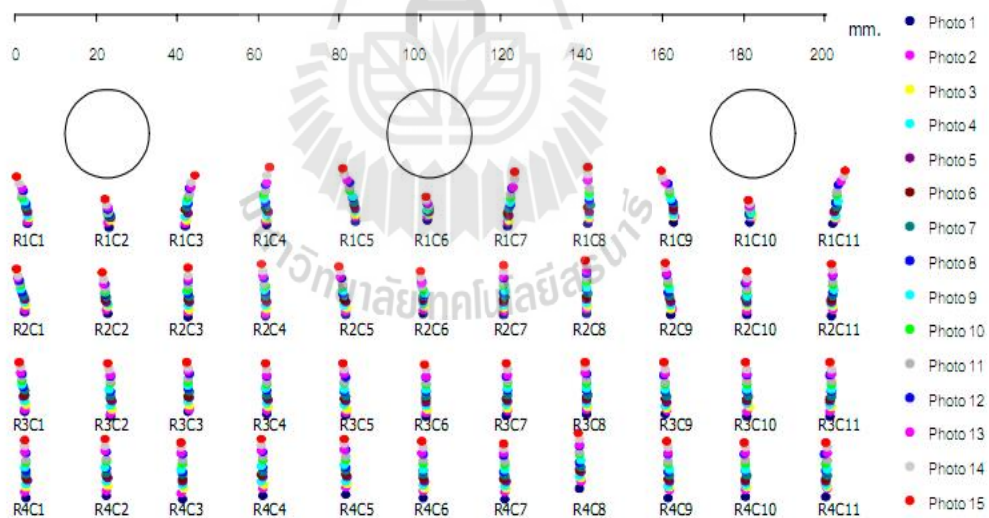
โดยได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันดินด้านข้าง (P_h) กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม (s) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มกลม (d) จะแทนได้ด้วยสมการที่ 2.3

$$\frac{P_h}{S_u} = 14.775e^{-1.2946\left[\frac{s}{d}\right]} \quad (2.3)$$

โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9506

จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างเสาเข็มกับขนาดเสาเข็ม (S/d) และอัตราส่วนระหว่างแรงดันดินด้านข้างกับกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน (P_h/S_u) พบว่าเมื่อ S/d มีค่าประมาณ 0.1 จะให้ผลใกล้เคียงกันและเมื่อค่าอยู่ระหว่าง 0.25 ถึง 1.0 จะได้ P_h/S_u สูงกว่าที่ได้จากสมการ 2.1 ค่อนข้างมากและจะมีความแตกต่างลดลงเรื่อยๆจนมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อ S/d ประมาณ 1.75

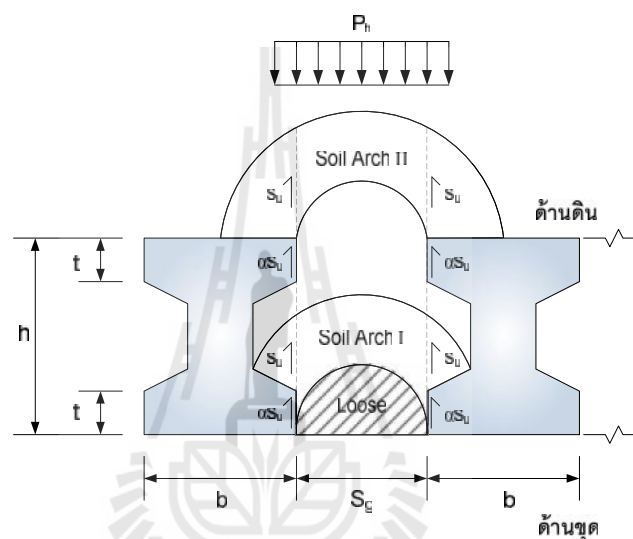
ประสพศิริ (2546) ทำการวิจัยถึงพฤติกรรมแนวอาร์คระหว่างเสาเข็มของกำแพงเสาเข็มเว้นระยะในดินทราย เพื่อเสริมเสถียรภาพความลาดชัน โดยได้ทดสอบแบบจำลองทางกายภาพย่อส่วนและบันทึกภาพถ่ายการเคลื่อนตัวของหมุดสังเกตขณะทดสอบ ผลการทดสอบ พบว่า เสาเข็มเว้นระยะสามารถต้านทานการเคลื่อนตัวของดินได้ โดยระยะห่างระหว่างเสาเข็มมีความสำคัญมาก ระยะที่สามารถต้านทานการเคลื่อนตัวได้มีระยะห่างระหว่างเสาเข็มไม่เกิน 4 เท่าของขนาดหน้าตัดเสาเข็ม ผลจากภาพถ่ายได้สรุปเป็น 3 ช่วงพฤติกรรม คือ ช่วงแรกเป็นช่วงเคลื่อนตัวของดิน ทำให้มีการยุบอัดตัวของดินเข้าสู่เสาเข็มโดยตรง ช่วงที่ 2 มีการพัฒนาการถ่ายแรง โดยพบการยุบอัดตัวด้านหน้าเสาเข็ม ช่วงที่ 3 การพัฒนากำลังถึงจุดสุดท้ายและเกิดการพังทลาย



รูปที่ 2.11 แสดงรูปภาพการเคลื่อนตัวของมวลดินเมื่อถูกปิดกั้นบางส่วนด้วยเสาเข็มเว้นระยะ
ในกรณีทดสอบที่ $S/D = 4$ (ประสพศิริ, 2546)

2.7 พฤติกรรมของกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องหน้าตัดรูปตัวไอ

ประจิด จีร์ปภา (2539) ได้อธิบายพฤติกรรมการรับน้ำหนักแรงของเสาเข็มเรียงต่อเนื่องหน้าตัดตัว I ว่า ดินที่อยู่บริเวณซอกเสาเข็มจะทำตัวเป็นสะพานโค้ง (soil arch bride) ซึ่งสะพานโค้งหรือสะพานดินดังกล่าวเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุลจะสามารถต้านทานแรงดันดินทางด้านข้างได้ โดยความสามารถต้านทานแรงดันดินทางด้านข้างจะขึ้นอยู่กับขนาดหน้าตัด ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม แรงดันดินด้านข้างและกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ



รูป 2.12 สะพานดินระหว่างซอกเสาเข็มและระนาบวิบัติของดินสำหรับเสาเข็มตัวไอ (ประจิด, 2539)

เสาเข็มคอนกรีตหน้าตัดรูปตัว I นี้เป็นเสาเข็มหล่อสำเร็จใช้ตอกลงไปในดิน ทางกรุงเทพมหานครได้ใช้เป็นกำแพงกันดินริมคลอง โดยมีแผงคอนกรีตระหว่างซอกของรูปตัว I เพื่อป้องกันดินที่เปิดสัมผัสกับน้ำไม่ให้ไหลออก หากใช้กำแพงกันดินโดยไม่ปิดช่องว่างนี้ก็สามารถวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 2.12 หลักการของการวิเคราะห์จะคล้ายกับเป็นการผสมกันของเข็มเหล็ก รูปพรรณปีกกว้างและของเข็มหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม ทั้งนี้เนื่องจากเข็มชนิดนี้จะมีปีกด้านข้างซึ่งมีความหนาพอสมควร ความฝืดหรือความยึดเกาะของดินกับคอนกรีตส่วนนี้ต้องนำมาคิดด้วย เราจึงได้สมการที่ (2.4) ซึ่งสามารถนำไปใช้ออกแบบระยะห่างของเสาเข็มได้

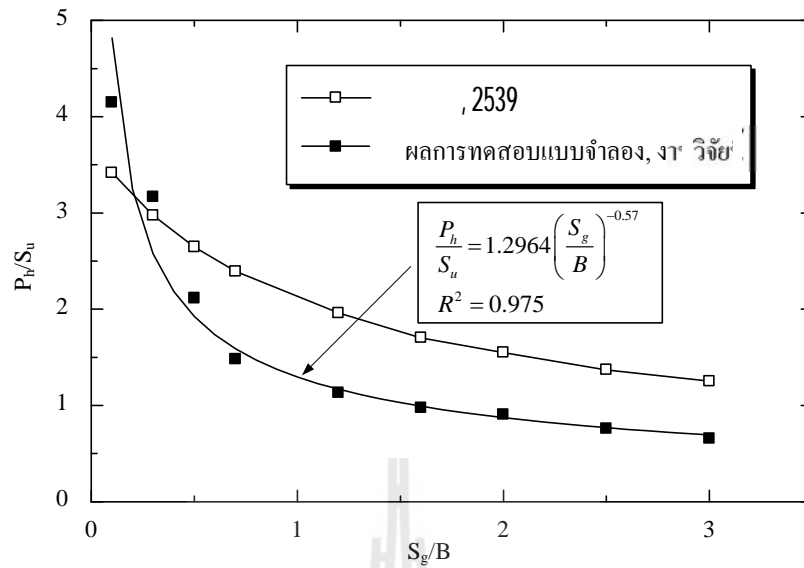
$$\frac{S_u}{P_h} = \frac{S_g}{2 \left(\sqrt{\frac{B}{2} \left(\frac{B}{2} + S \right)} + h + 2t(r-1) \right)} \quad (2.4)$$

- เมื่อ S_u คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนในสภาวะไร้การระบายน้ำของดิน (undrain shear strength)
- P_h คือ แรงดันดินด้านข้าง (lateral earth pressure)
- S_g คือ ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม
- B คือ ความกว้างของเสาเข็มรูปตัวไอ
- h คือ ความลึกของเสาเข็มรูปตัวไอ
- t คือ ความหนาของปีกเสาเข็มรูปตัวไอ
- r คือ สัมประสิทธิ์การเกาะตัวระหว่างดินกับผิวเสาเข็ม

ธีรศักดิ์และคณะ (2555) ได้อธิบายพฤติกรรมของเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่องรูปตัวไอ ไว้ว่า กำลังต้านทานต่อแรงในเทอม P_h / S_u ที่ได้จากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพ โดยใช้ ตัวอย่างดินเหนียวแบบคงคุณภาพสูง แปรผกผันกับอัตราส่วนระหว่างช่องว่างระหว่างเสาเข็มต่อความกว้างของเสาเข็ม S_g / B ดังสมการที่ 2.5

$$\frac{P_h}{S_u} = 1.2964 \left(\frac{S_g}{B} \right)^{-0.57} \quad (2.5)$$

จากสมการที่ 2.5 จะเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์แบบไฮเพอร์โบลาเหมือนกับสมการที่เสนอโดยประจิด (2539) แต่เมื่อได้เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎีแล้วจะพบว่า ค่า P_h / S_u ที่ได้จากสมการการทดสอบในงานวิจัยนี้จะมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีเกือบทั้งหมด มีเพียงช่วงที่อัตราส่วน S_g / B มีค่าต่ำกว่า 0.2 เท่านั้นที่ผลการทดสอบมีค่า P_h / S_u สูงกว่าค่าที่ได้จากทฤษฎี เนื่องจากช่องว่างเปิดที่แคบทำให้ดินบริเวณซอกเสาเข็มนั้นสามารถไหลออกมาได้น้อยมากขณะทดสอบ จึงทำให้ค่า P_h / S_u ที่ได้สูงกว่าทฤษฎีที่เสนอโดยประจิด (2539)

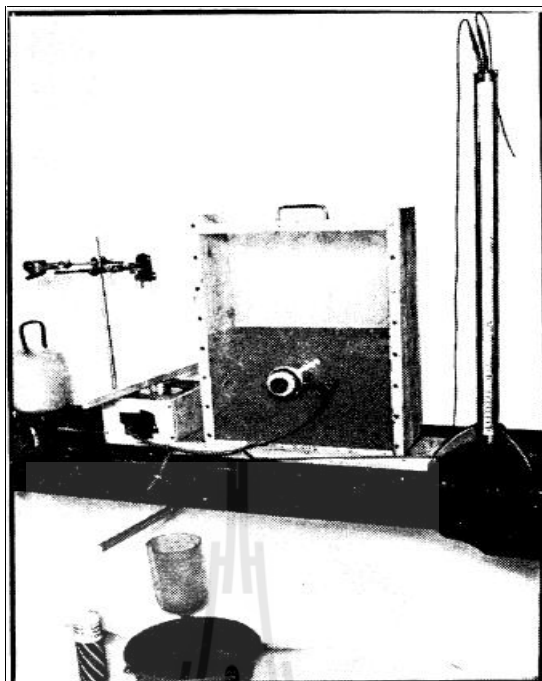


รูปที่ 2.13 การเปรียบเทียบผลการทดสอบทางกายภาพกับค่าเชิงทฤษฎี

2.8 พฤติกรรมแนวโค้งรับแรง (arching behavior)

แนวโค้งรับแรง (arching effect) คือโครงสร้างลักษณะโค้งที่ใช้รองรับน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างด้านบนเหนือแนวโค้งรับแรง เทคนิคการก่อสร้างแนวโค้งรับแรง (arching effect) ถูกพัฒนาขึ้นในเมโสโปเตเมีย แอสซีเรีย อียิปต์ และ อิทรูเรีย เทคนิคการก่อสร้างถูกปรับปรุงและใช้อย่างแพร่หลายในโรมันโบราณ จากนั้นแนวโค้งรับแรงกลายเป็นโครงสร้างสำคัญของอาคาร โบสถ์ของศาสนาคริสต์ ปัจจุบันยังมีการใช้แนวโค้งรับแรงในส่วนของโครงสร้างของ สะพาน ประโยชน์ของแนวโค้งรับแรงคือ ใช้เป็นโครงสร้างในการเชื่อมต่อบริเวณช่องของส่วนโครงสร้างต่างๆ ใช้ออกแบบเพื่อรับแรงอัดในแนวโค้ง โดยการเปลี่ยนแรงอัดในแนวโค้งเป็นแรงอัดในแนวระนาบของแนวโค้งรับแรงและถ่ายแรงลงสู่ฐานทั้งสองข้างของแนวโค้งรับแรง

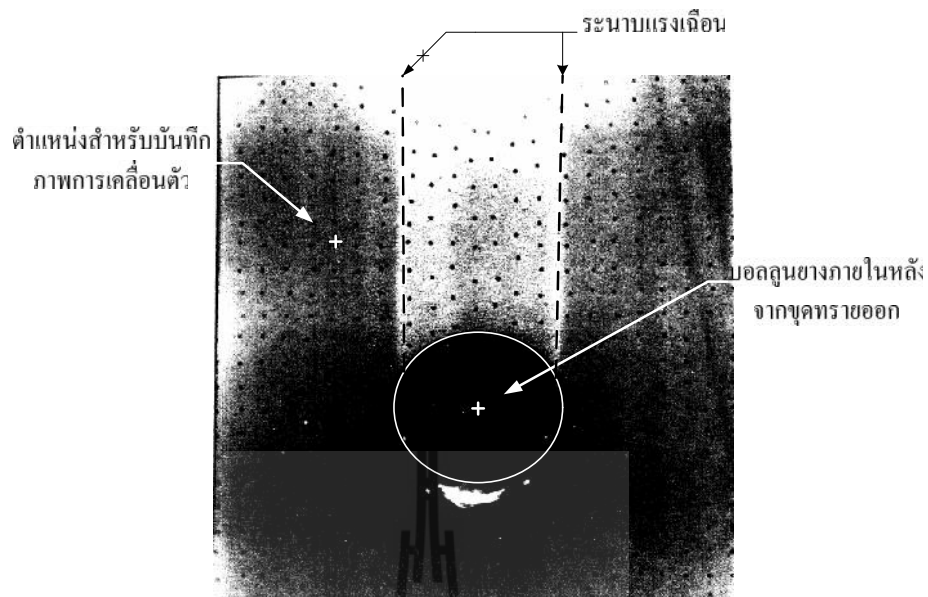
Atkinson et al. (1975) ได้ออกแบบและทดลองเกี่ยวกับการเกิดแนวโค้งรับแรงจนได้ผลที่สามารถเชื่อถือได้ การทดลองของเขาใช้เครื่องมือที่มีลักษณะดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 อุปกรณ์ทดสอบแบบจำลองอุโมงค์ (Atkinson et al., 1975)

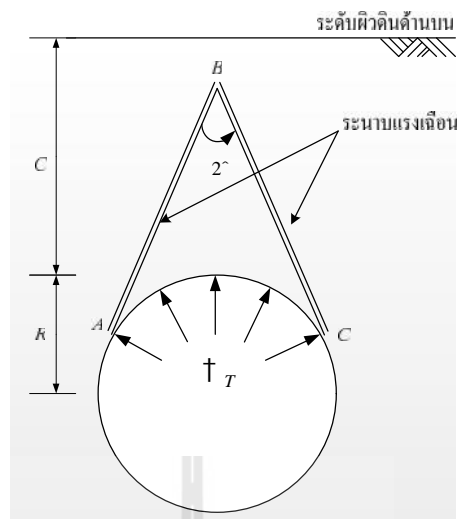
โดยใช้ทราย leighton buzzard ซึ่งมีอัตราส่วน โพร่งเท่ากับ 0.52 เกล่งในกล่องทดสอบในทิศแนวแกนของอุโมงค์จำลองในระหว่างทรายได้วางหมุดเครื่องหมายในแนวระนาบกับแกนอุโมงค์ไปด้วย ภายในกล่องบรรจุบอลลู่นยางทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 64 มิลลิเมตรซึ่งใช้เป็นอุโมงค์จำลอง ส่วนประกอบของอุโมงค์ประกอบด้วย บอลลู่นยางทรงกระบอก 2 ชิ้น ชิ้นหนึ่งถูกซ่อนไว้ด้านใน ปลายของบอลลู่นถูกยึดติดไว้กับกล่องทดสอบเพื่อให้เกิดผลกระทบน้อยที่สุดในระหว่างดินพัง

จากนั้นเติมทรายด้านในบอลลู่นจนมีระดับเท่ากับด้านนอก ทรายด้านในบอลลู่นถูกขูดโดยปั๊มดูดอากาศและอัดแรงดันอากาศไปที่บอลลู่นด้านนอกเพื่อรักษาสมดุล ขณะดำเนินการบอลลู่นด้านในจะพังลง บอลลู่นด้านนอกจะเป็นระบบค้ำยันด้วยแรงดันอากาศ ทรายในอุโมงค์ขูดด้วยแรงดันเท่ากับแรงดันส่วนเกินจากด้านบน ($t_r = \gamma C$ เมื่อ γ คือ หน่วยน้ำหนักของดิน และ C คือ ความลึกจากผิวดินถึงส่วนบนของอุโมงค์) การทดสอบจะลดแรงดันอากาศลงจนกระทั่งอุโมงค์พัง ขณะทดสอบจะบันทึกภาพในทุกๆระยะของการลดแรงดันอากาศดังรูปที่ 2.15 การบันทึกก่อนและหลังการขูดจะไม่พบระยะยืดตัว (elastic zone) ของทราย



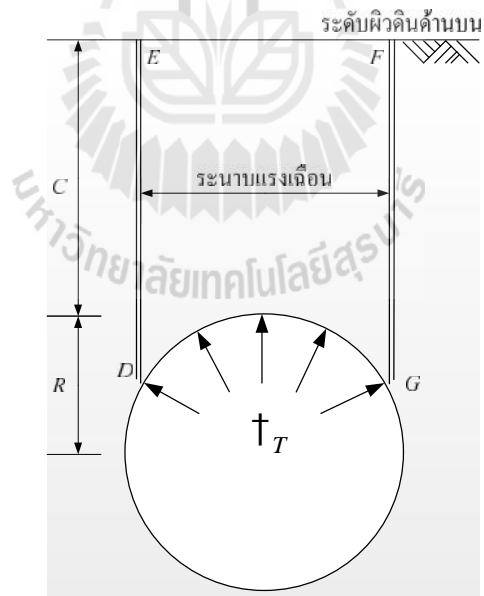
รูปที่ 2.15 ภาพถ่ายแบบจำลองจากรadiograph (Atkinson et al., 1975)

ผลการวิเคราะห์หมุดเครื่องหมายจากการบันทึกภาพก่อนและหลังการขุดทรายออกจากอุโมงค์ ช่วงอัตราส่วนความลึกต่อรัศมีที่ค่าต่างๆระหว่าง $C/R = 0.88$ ถึง $C/R = 3.97$ ภาพถ่ายระหว่างการทดสอบแสดงให้เห็นการเคลื่อนตัวครั้งแรกด้านบนยอดอุโมงค์ ก่อนอุโมงค์พัง คือ การเคลื่อนตัวเริ่มต้น มีขอบเขตจำกัดดังรูปที่ 2.16 จากรูปแสดงถึงการเคลื่อนตัวเริ่มต้นซึ่งเป็นโซนที่เกิดขึ้นทันที (โซน ABC อยู่ด้านบนสัมผัสกับวงกลม) เมื่อลิ่ม ABC เคลื่อนที่ลง การขยายตัวของทรายที่อัตราส่วนเหมาะสมจะช่วยป้องกันการแยกออกของระนาบ AB และ BC ได้ โดยระนาบ AB และ BC ต้องทำมุม 2ϵ ที่ B (เมื่อ ϵ คือมุมไคเลชัน) เมื่อลดแรงดันในอุโมงค์ลง โซนเคลื่อนตัวได้ขยายตัวไปทางผิวดินด้านบน ผลจากภาพถ่ายหลังจากการพังได้แสดงกลไกการวิบัติดังรูปที่ 2.17 ทรายด้านบนอุโมงค์จะเคลื่อนที่ลงตามระนาบ DE และ FG ตรงตามสมมติฐานว่า ทรายเมื่อมีการเคลื่อนตัวสูงจะเสียรูปที่สถานะวิบัติ



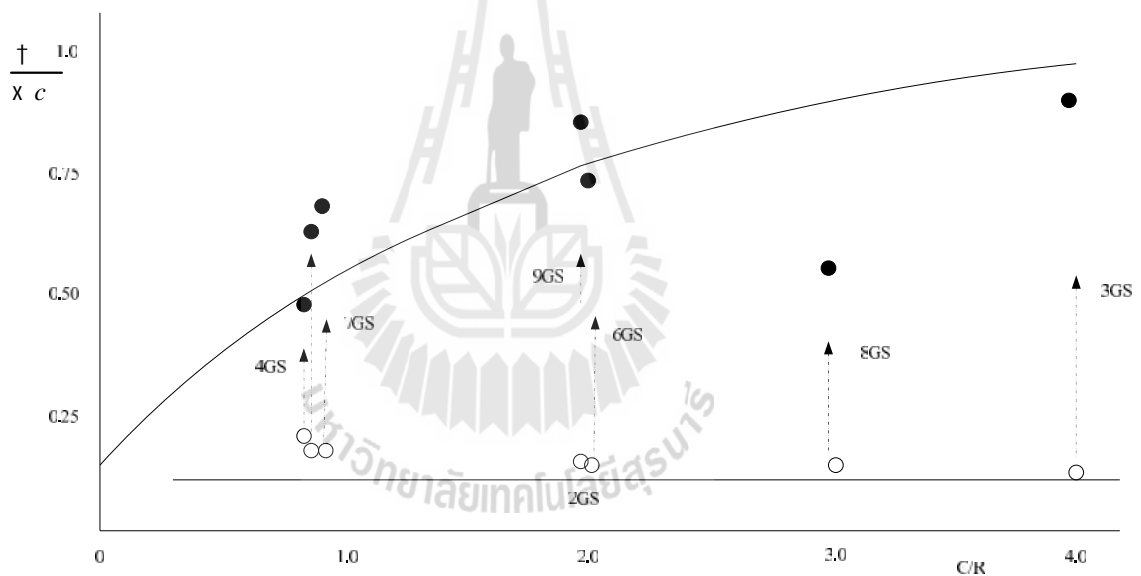
รูปที่ 2.16 แนวระนาบเงื่อนไขในการวิบัติเริ่มต้นของแบบจำลองอุโมงค์

(Atkinson et al., 1975)



รูปที่ 2.17 การวิบัติสุดท้ายของแบบจำลองอุโมงค์ (Atkinson et al., 1975)

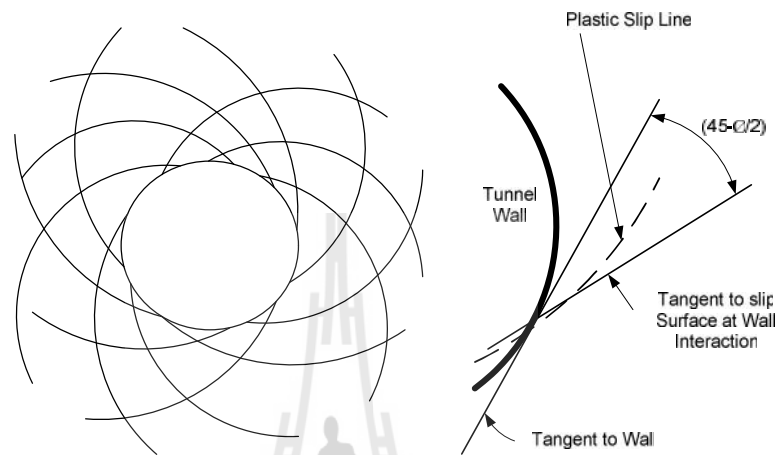
การพังที่เกิดขึ้นโดยทันทีที่สามารถอธิบายถึงการทดสอบทั้งหมด โดยการเคลื่อนตัวของทรายอย่างฉับพลัน เกิดจากการเพิ่มแรงดันอากาศเพื่อทำให้อุโมงค์อยู่ในสถานะสมดุล แรงดันที่ทำให้เกิดการพังและที่สถานะสมดุลสุดท้ายได้วิเคราะห์ไว้ดังรูปที่ 2.18 เมื่อ R คือรัศมีแบบจำลอง อุโมงค์และวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่าง t_1/xR กับ C/R เส้นความสัมพันธ์ด้านล่างแสดงให้เห็นแรงดันภายในอุโมงค์ที่จุดเริ่มต้นการพัง และเส้นความสัมพันธ์ด้านบนคือแรงดันที่จุดสมดุลสุดท้ายโดยจุด 8GS เป็นจุดที่อาจจะไปไม่ถึงจุดสมดุลสุดท้าย เนื่องจากแรงดันด้านในอุโมงค์ไม่คงที่ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การพังเริ่มต้นแทบจะไม่เกี่ยวกับอัตราส่วนความลึกต่อรัศมี ถ้าเกิดก็จะเกิดขึ้นน้อยมาก แรงดันอุโมงค์ที่จุดสมดุลเริ่มต้นมีค่าเกินกว่าที่ต้องการจึงเกิดการพัง โดยเสนอการป้องกันด้วยค่า factor เท่ากับ 3 ที่ $C/R = 1$ และ ค่า factor เท่ากับ 7 ที่ $C/R = 4$



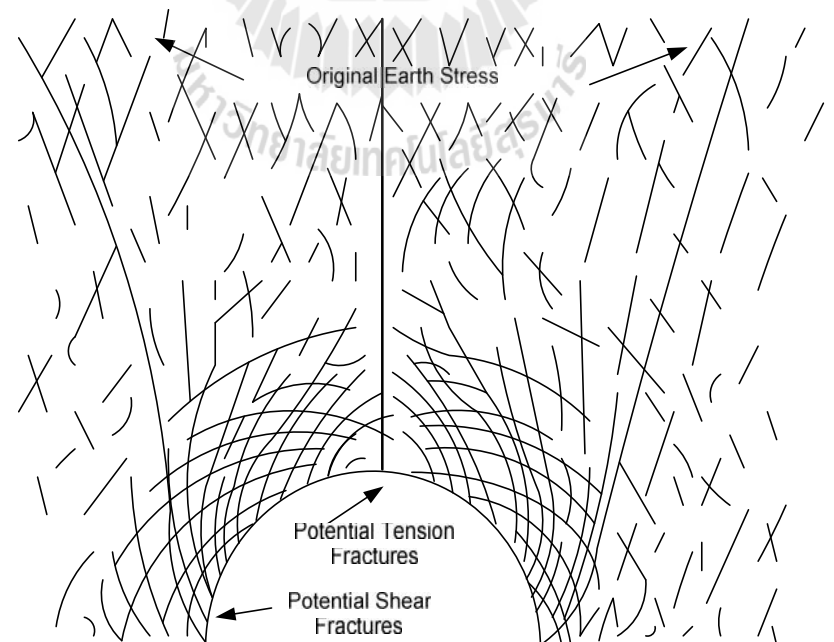
รูปที่ 2.18 ผลจากการทดสอบแบบจำลองอุโมงค์ (Atkinson et al., 1975)

ทฤษฎีพลาสติกที่ดีได้สมมติระนาบการไหลให้มีทิศทางตามทิศที่มีแรงเฉือนมากที่สุด สถานะพลาสติกสามารถอธิบายได้จากขอบเขตที่เกิดการไหล การหาเส้นระนาบการไหลที่แท้จริงเป็นปัญหาที่หาคำตอบได้ยาก โดยทั่วไปจะใช้การประมาณอย่างง่าย McCutcheon (1949) ได้สมมติเส้นระนาบการไหลให้เอียงที่ $\pm(45-w/2)$ Heuer and Hendron (1971) ได้ทดสอบแบบจำลอง โดยสมมติขอบเขตเส้นการไหลของรัศมีแรงเฉือนขึ้นมาจาก การสังเกตพื้นผิวการไหล

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นผิวการไหลและการคาดเดาการหันทิศทางการไหลได้ดังรูปที่ 2.19 และ รูปที่ 2.20



รูปที่ 2.19 ทฤษฎีพลาสติกีรณานบไถลรอบวงกลมเปิดที่มีแรงเสียดทาน
(McCutcheon et al., 1949)



รูปที่ 2.20 ระบายแรงเฉือนรอบวงกลม (Heuer and Hendron et al., 1971)

Bastien Chevalier, Gael Combe and Pascal Villard, (2007) กล่าวว่าพฤติกรรมแนวโค้งรับแรง (arching behavior) เป็นกลไกที่สำคัญและพบบ่อยในงานวิศวกรรมโยธาโดยเฉพาะวิศวกรรมด้านธรณีเทคนิค เช่น งานปรับปรุงดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ การทรุดตัวของดินคันทาง เป็นต้น

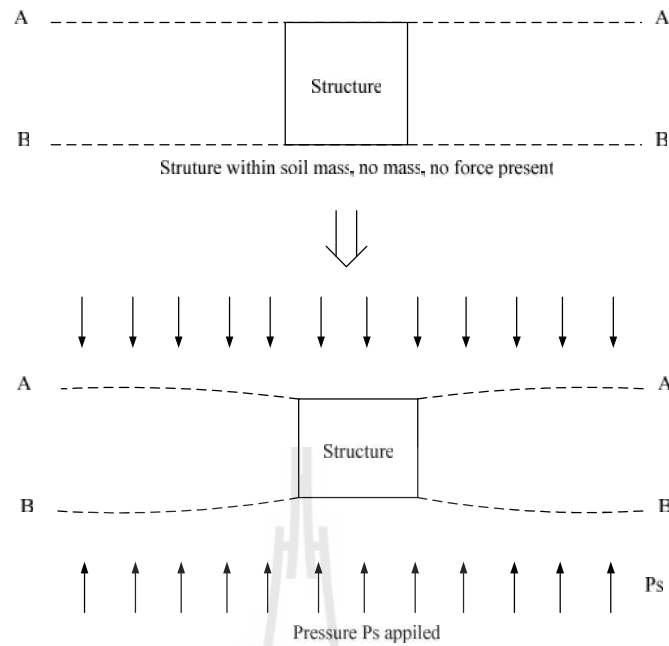
Terzaghi (1943) กล่าวว่าพฤติกรรมแนวโค้งรับแรง (arching behavior) เป็นปรากฏการณ์ทั่วไปที่เกิดขึ้นในดิน พบได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นมากในงานก่อสร้างได้ดิน เช่น โครงการท่อส่งน้ำใต้ดิน การก่อสร้างใต้ดินจะใช้แนวโค้งรับแรงนี้ให้เป็นประโยชน์ โดยลดแรงดันดินส่วนเกินจากดินที่กระจายแรงไปสู่โครงสร้าง บางครั้งยังสามารถต้านแรงจากผิวดินและแรงดันดินด้านข้างอีกด้วย แนวโค้งรับแรงสามารถอธิบายได้ว่าการถ่ายแรงระหว่างมวลของวัสดุทางวิศวกรรมธรณีกับโครงสร้างที่อยู่หนึ่ง การกระจายแรงในดินจะทำให้ดินเสียรูป ในขณะที่ความต้านทานแรงเฉือนพยายามที่จะรักษาสภาพให้อยู่ในตำแหน่งเดิม โดยใช้ส่วนที่ติดกับโครงสร้างเป็นจุดรองรับ

Einstein (1980) ให้ความหมายของแนวโค้งรับแรง (arching effect) คือ การถ่ายแรงลงด้านบนของโครงสร้าง โดยที่มีปลายทั้งสองข้างของโครงสร้างถูกยึดแน่น ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวที่ต่างกันจากคุณสมบัติของโครงสร้างและดิน ผลของแรงกระทำต่อแนวโค้งรับแรง (arching effect) จะลดลงเมื่อมีระบบค้ำยันในงานก่อสร้าง ตัวอย่าง เช่น การทดลอง trap door แนวโค้งรับแรงจะพบเมื่อโครงสร้างรับแรงอัดมากหรือในการก่อสร้างงานอุโมงค์ เป็นต้น

Evans (1983) เสนอแบบจำลองดินแบบอิลาสติกโดยสรุปว่า ถ้ามวลดินมีทิศทางการเคลื่อนที่พุ่งลงกำลังต้านทานแรงเฉือนจะกระทำในทางตรงกันข้าม แรงที่เกิดบนมวลดินจะลดลง ถ้ามวลดินมีทิศทางการเคลื่อนที่พุ่งขึ้นกำลังต้านทานแรงเฉือนจะมีทิศทางลง เพื่อด้านการเคลื่อนที่เป็นผลให้แรงที่จุดรองรับเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่กล่าวมาทั้งหมดขึ้นอยู่กับความแกร่งของวัสดุ แนวโค้งรับแรงสามารถแสดงพฤติกรรมได้ทั้งสภาวะ active และ passive

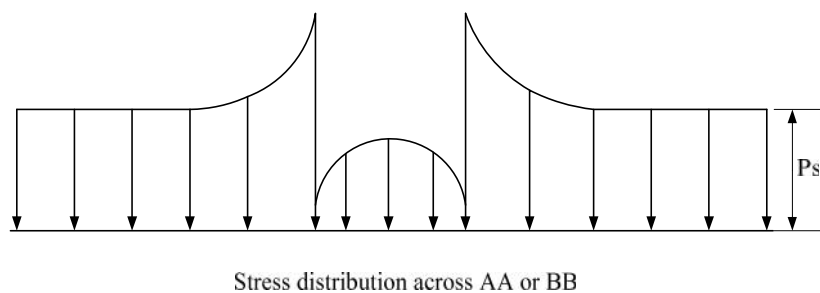
แนวโค้งรับแรงในสภาวะ active จะเกิดขึ้นเมื่อโครงสร้างรับแรงมากกว่าดินที่อยู่โดยรอบ

ดังรูปที่ 2.21



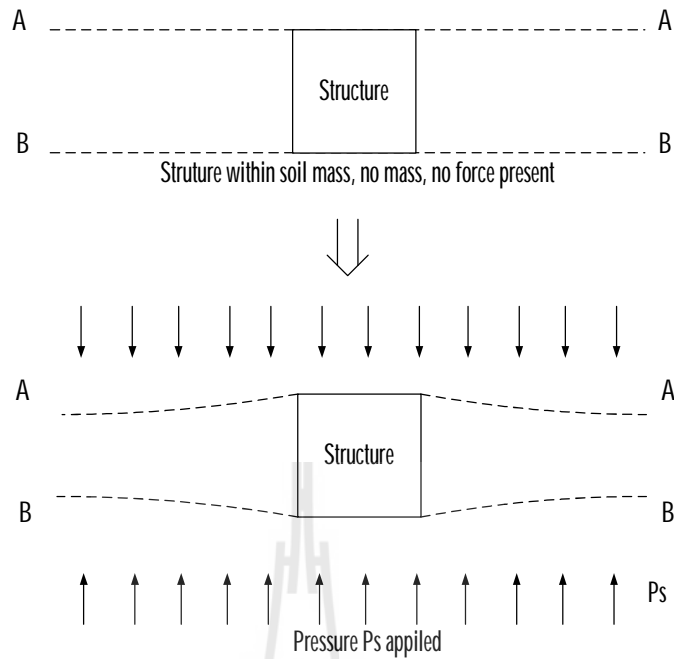
รูปที่ 2.21 active arching การเคลื่อนตัวใต้แรงดัน P_s เมื่อ โครงสร้างถูกแรงอัดมากกว่าดินรอบข้าง (Einstein et al., 1983)

เมื่อทั้งระบบถูกแรงกระทำ ผลของแรงกระจายจะตัดผ่านตำแหน่งของโครงสร้างซึ่งรับแรงมากกว่าบริเวณรอบๆ (ระดับเริ่มต้นเท่ากัน ดังระนาบ AA และ BB) ดังรูปที่ 2.22 ถ้าโครงสร้างมีการเคลื่อนที่จนเสีรูปไปจากระนาบ AA และ BB แรงที่เกิดขึ้นจะมีแนวโน้มลดลงและเคลื่อนที่ไปที่ขอบของโครงสร้าง เกิดการรวมตัวกันของแรงก่อให้เกิดเป็นแรงเพิ่มขึ้นในดิน



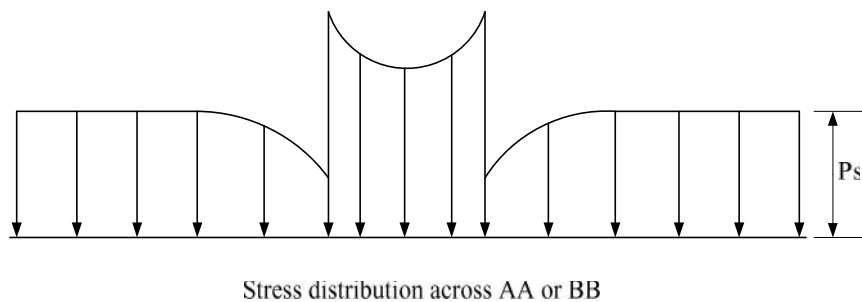
รูปที่ 2.22 แสดงสภาวะ active arching (Einstein et al.,1983)

แนวโค้งรับแรงในสภาวะ passive เมื่อดินบริเวณรอบโครงสร้างรับแรงมากกว่าบริเวณโครงสร้างดังรูปที่ 2.23



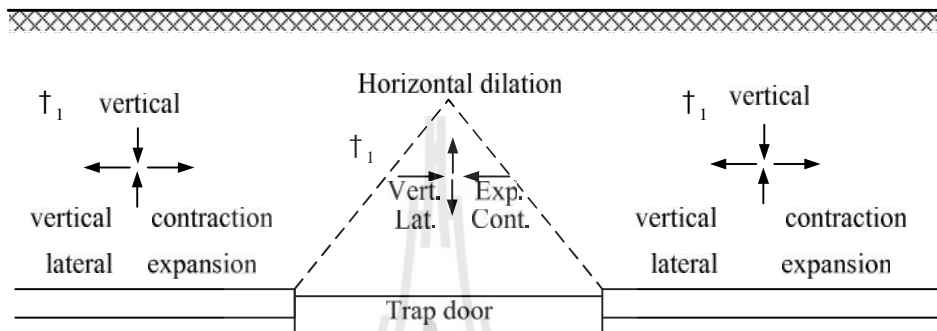
รูปที่ 2.23 passive arching การเคลื่อนตัวใต้แรงดัน P_s เมื่อโครงสร้างถูกแรงอัดน้อยกว่าดินรอบข้าง (Einstein et al.,1983)

บริเวณดินรอบ โครงสร้างมีการเคลื่อนที่มาก แรงเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นจากแรงดันทั้งหมด ในขณะที่แรง ณ จุดเชื่อมต่อมีค่าลดลง ถ้าโครงสร้างยังคงสภาพอยู่เหมือนเดิม จะเกิดแรงสูงมากที่ขอบและเกิดแรงกระทำน้อยมากที่กึ่งกลางของแรงกระจายในสภาวะ passive ที่ระนาบ AA และ BB ดังรูปที่ 2.24



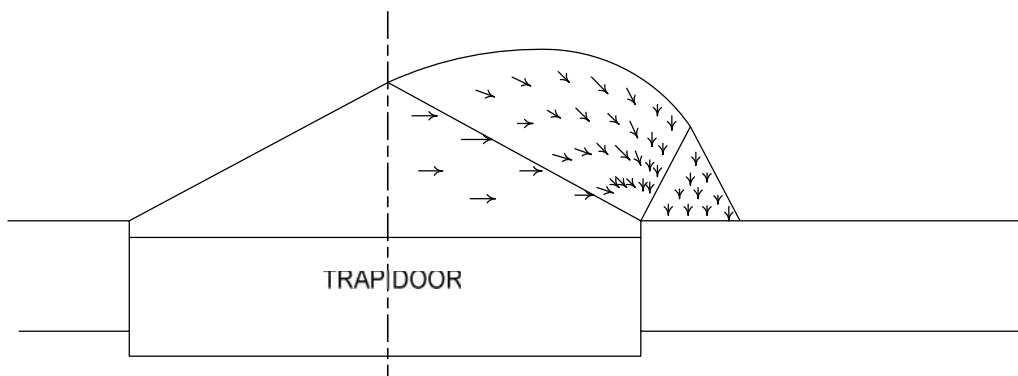
รูปที่ 2.24 แสดงสภาวะ passive arching (Einstein et al.,1983)

Evans (1983) กล่าวว่า การทดลอง trap door สามารถสังเกตเห็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้เพียงเล็กน้อย โดยได้แสดงโชนสามเหลี่ยมที่ขยายตัวในแนวตั้งเหนือช่องเปิดทั้งสภาวะ active และ passive ในสภาวะ active arching แรงในแนวตั้งบน trap door จะลดลงเมื่อประตูของช่องเปิดเคลื่อนที่ในทิศทางลง ดังรูปที่ 2.25 แสดงพฤติกรรมทั่วไปของสภาวะ active arching



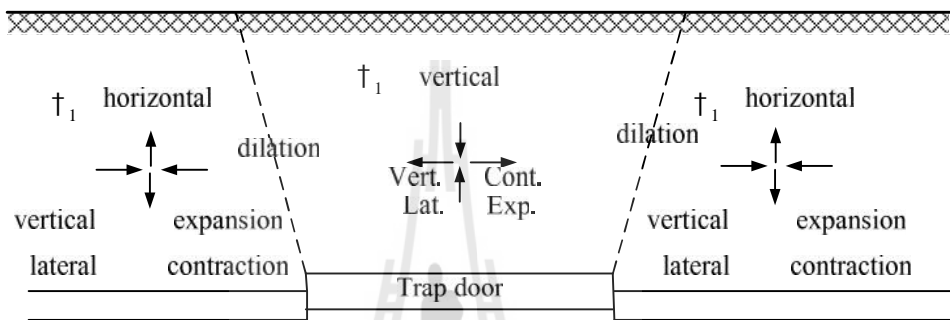
รูปที่ 2.25 พฤติกรรมทั่วไปของดิน active arching (Evans et al.,1983)

ขณะที่ด้านข้างของโชนสามเหลี่ยมหดตัว เพื่อเป็นการปรับสมดุลให้เท่ากับการขยายตัวในแนวตั้ง พื้นที่ทั้งสองฝั่งของ trap door จะทำหน้าที่เป็นจุดรองรับของหน่วยแรงที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในทิศทางลงของ trap door พื้นที่ในแนวตั้งทั้งสองฝั่งจะเกิดการหดตัวเนื่องจากการขยายตัวทางด้านข้าง เมื่อประตูลดลงมากวัสดุก็ไหลออกมาทำให้การขยายตัวทางด้านข้างสูงขึ้น บริเวณที่ขอบทั้งสองฝั่งของ trap door ด้านที่ติดประตูจะถูกแรงกระทำมากที่สุด ดังรูปที่ 2.26

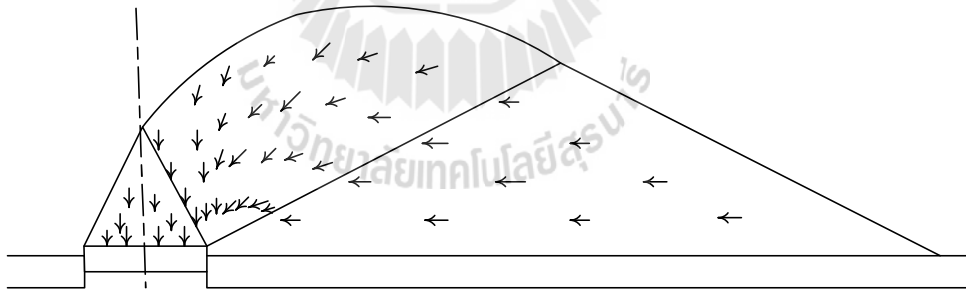


รูปที่ 2.26 ทิศทางของหน่วยแรงหลัก active arching (Evans et al.,1983)

สภาวะ passive arching แสดงดังรูปที่ 2.27 เมื่อประตู trap door เคลื่อนที่ในทิศขึ้น แรงในแนวตั้งจะเพิ่มขึ้น โชนเหนือประตูจะเคลื่อนที่ขึ้นด้วยการหดตัวในแนวตั้งและการขยายตัวทางด้านข้าง คล้ายกับโชน rankine passive earth pressure และหน่วยแรงหลักเหนือประตูจะอยู่ในแนวตั้ง พื้นที่ด้านข้างทั้งสองฝั่งจะหดตัวในแนวราบและขยายตัวในแนวตั้ง ทำให้แรงมารวมตัวอยู่ด้านบนประตู ดังรูปที่ 2.28

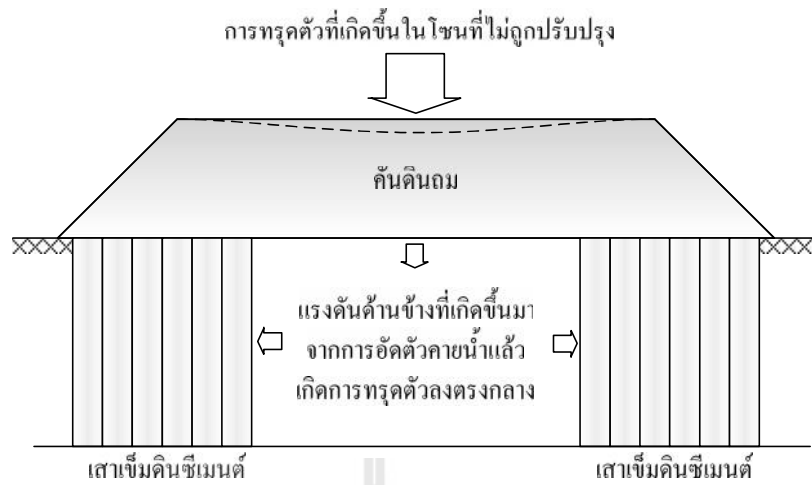


รูปที่ 2.27 พฤติกรรมทั่วไปของดิน passive arching (Evans et al.,1983)



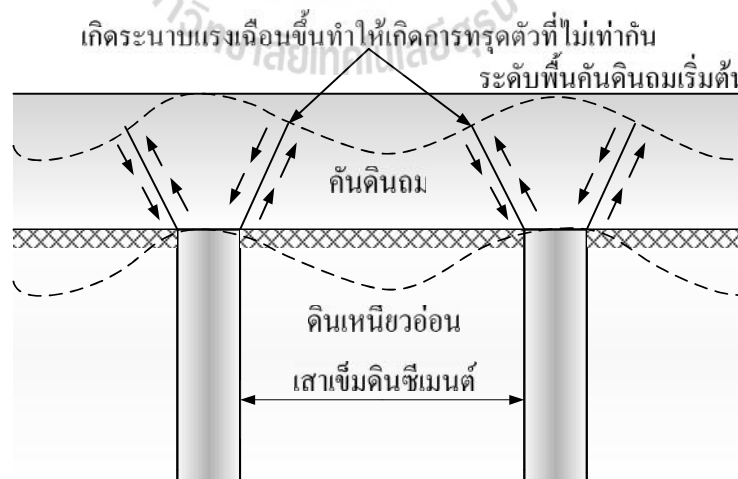
รูปที่ 2.28 ทิศทางของหน่วยแรงหลัก passive arching (Evans et al.,1983)

Kohashi, Furumoto and Sakajo (2008) ได้ศึกษาผลกระทบของแนวโค้งรับแรงจากการใช้จำนวนเสาเข็มดินซีเมนต์น้อยกว่าปกติ (arching effect base low improvement ratio cement column method, Alicc) ซึ่งวิธีโดยทั่วไปที่นำมาจากประเทศญี่ปุ่นได้มีการปรับปรุงดินตั้งแต่ชั้นฐานรากโดยปรับปรุงเริ่มจากแนวลาดเอียงด้านข้างทั้งสองด้านของดินคันทาง โดยทำการปรับปรุงเป็นปริมาณ 50% ของพื้นที่ดินคันทางหรือมากกว่าดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 การปรับปรุงดินโดยวิธีทั่วไป (Kohashi, Furumoto and Sakajo et al.,2008)

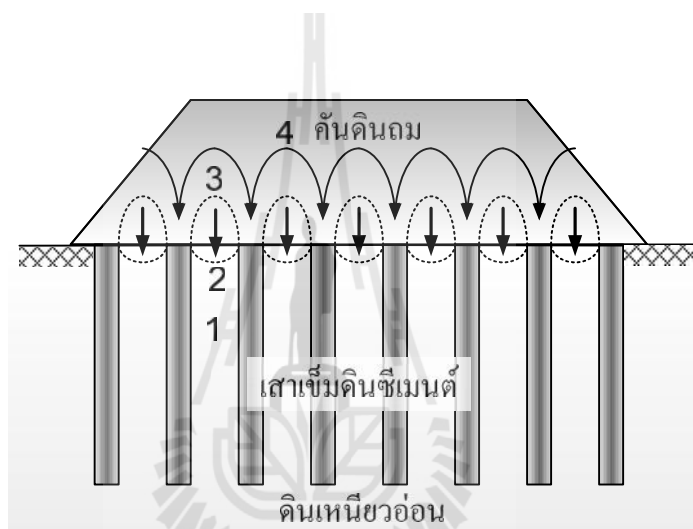
แรงบนชั้นดินคันทงเป็นสาเหตุให้เกิดการทรุดตัวลงในบริเวณที่ไม่ถูกปรับปรุงที่บริเวณตรงกลาง โดยเขาได้เสนอแนวทางเลือกคือวิธี แนวโค้งรับแรงจากการใช้จำนวนเสาเข็มดินซีเมนต์น้อยกว่าปกติ (arching effect base low improvement ratio cement column method, Alico) ซึ่งวิธีนี้จะมีอัตราการใช้จำนวนของเสาเข็มดินซีเมนต์อยู่ที่ 10% - 30% ซึ่งลดลงจากวิธีโดยทั่วไป เพราะว่าวิธีนี้จะมีช่องว่างระหว่างเสาเข็มเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดการทรุดตัวระหว่างเสาเข็ม โดยความสูงของดินคันทงจะสัมพันธ์กับช่องว่างโดยมีระนาบแรงเหมือนดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 ระนาบแรงเอียงเหนือเสาเข็มดินซีเมนต์และการทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน

(Kohashi, Furumoto and Sakajo et al.,2008)

การทรุดตัวในบริเวณที่ไม่มีเสาเข็มดินซีเมนต์ได้มีการตรวจวัดโดยได้ผลจากการทดสอบพบว่า หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนดินคันทางสามารถรับแรงได้มากกว่าแบบทั่วไป แรงที่กระทำบนบริเวณที่ไม่มีเสาเข็มมีค่าน้อยโดยมีสมมติฐานว่า เกิดแนวโค้งรับแรงระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์และแรงที่กระทำบริเวณที่ไม่มีเสาเข็มดินซีเมนต์จะมีค่าลดลงดังรูปที่ 2.31 โดยหมายเลข 1 คือการทรุดของบริเวณที่ไม่มีเสาเข็มดินซีเมนต์จากน้ำหนักของดินคันทาง หมายเลข 2 คือวัสดุของดินคันทางได้ไหลไปตามการทรุดของหมายเลข 1 หมายเลข 3 คือเกิดการปิดช่องการทรุดตัวเนื่องจากเกิดการก่อตัวในวัสดุดินคันทาง หมายเลข 4 คือแรงยังคงกระทำต่อดินคันทางได้โดยเกิดแนวโค้งรับแรงเหนือเสาเข็ม



รูปที่ 2.31 ตัวอย่างการเกิด arcing effect บนหัวเสาเข็มดินซีเมนต์

(Kohashi, Furumoto and Sakajo et al., 2008)

2.9 ลักษณะของตัวอย่างดิน

ตัวอย่างดินจะเป็นตัวแทนของบริเวณนั้นๆ ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ทางวิศวกรรมได้ การเก็บตัวอย่างจึงต้องการความระมัดระวังและความชำนาญที่จะให้ได้ตัวอย่างดินที่มีคุณภาพ ตัวอย่างดินมักแยกออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

2.9.1 ตัวอย่างดินคงสภาพ (undisturbed sample)

คือตัวอย่างดินที่ถูกเก็บขึ้นมาโดยมีสภาพใกล้เคียงสภาพธรรมชาติ ซึ่งมีการกระทบกระเทือนชั้นดินน้อยที่สุด คือ มีความชื้น ความหนาแน่น ลักษณะโครงสร้างไม่มีการเปลี่ยนแปลง เช่นเดียวกับเมื่ออยู่ในชั้นดินเดิม ถือว่าเป็นตัวอย่างดินที่มีคุณภาพดีที่สุด เพราะการ

วิเคราะห์ตัวอย่างดินคงสภาพจะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมที่แท้จริงของดินนั้นได้ กล่าวคือ การเกิดขึ้นของดินเป็นผลสืบเนื่องมาจากการกระทำร่วมกันของปัจจัยต่างๆ เช่น สภาพภูมิอากาศ พืช และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ต่อวัตถุดิบกำเนิดของดิน ในสภาพพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่ง ตลอดช่วงระยะเวลาหนึ่ง ดังนั้น ดินในที่แห่งหนึ่งจึงอาจเหมือนหรือต่างไปจากดินในที่อีกแห่งหนึ่งได้ ขึ้นอยู่กับอิทธิพลของปัจจัยเหล่านี้ ซึ่งมีความมากมายแตกต่างกันไปในแต่ละบริเวณส่งผลให้ดินมีลักษณะเด่นเฉพาะตัว และเมื่อปัจจัยเปลี่ยนไป ดินจะมีลักษณะหรือสมบัติต่างๆ เปลี่ยนแปลงไปด้วย

2.9.2 ตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพ (disturbed sample)

ตัวอย่างดินที่มีการเปลี่ยนสภาพไปบ้าง เช่น มีการอัดแน่น หรือ การจับตัวตามธรรมชาติถูกทำลายเพราะแรงกระแทก Serge Leroueil (1990) กล่าวว่าโดยพฤติกรรมของดินเปลี่ยนสภาพจะไม่คำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากเวลาและโครงสร้างของการเกิดดิน ตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพสามารถสร้างขึ้นได้ในห้องปฏิบัติการ โดยจะมีปริมาณความชื้นเข้าใกล้ขีดจำกัดเหลว (liquid limit) เช่น การทดสอบอัดตัวคายนํ้าของดินขาว

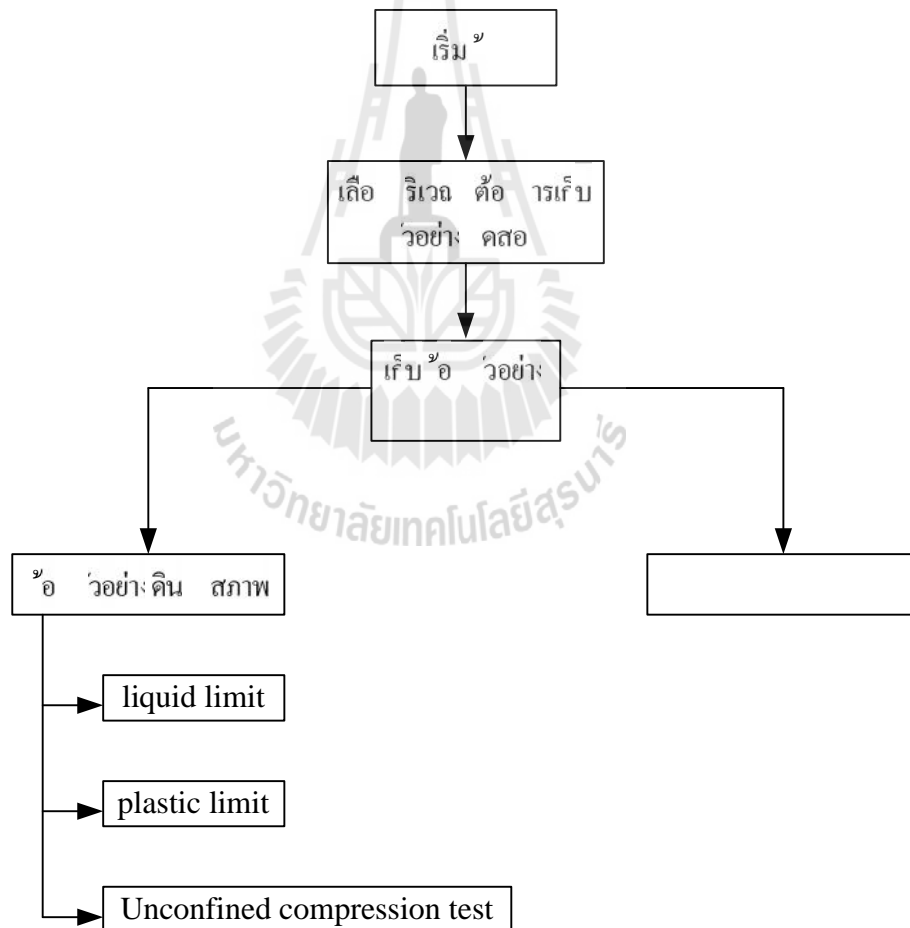


บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาถึงพฤติกรรมแนวอาร์ค ระหว่างช่องว่าง (gap) ของกำแพงเสาเข็ม ตอกเรียงต่อเนื่องหน้าตัดตัวแอล (contiguous pile wall) โดยมีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็ม (center to center) ที่แตกต่างกัน การดำเนินงานวิจัยได้ทำการทดสอบดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ

โดยใช้การจำลองทางกายภาพแบบย่อส่วนกับดินคงสภาพคุณภาพสูง สาเหตุที่เลือกใช้ก้อนดินตัวอย่างคงสภาพ เนื่องจากการนำดินมาผสมน้ำและก่อตัวใหม่ (remolded sample) จะทำให้ตัวอย่างดินสูญเสียโครงสร้างของดินธรรมชาติไป เนื่องจากการตกตะกอนและการทับถมของดินตามธรรมชาติมีลักษณะเป็นชั้นๆ ซึ่งไม่สามารถสร้างขึ้นได้ในห้องทดลอง สาเหตุอีกประการหนึ่งคือก้อนดินตัวอย่างมีขนาดใหญ่ต้องใช้เวลานานในการอัดตัวคายน้ำ กว่าที่ก้อนตัวอย่างจะมีคุณสมบัติทางกลตามที่ต้องการ ซึ่งในงานวิจัยนี้จึงใช้ก้อนดินคงสภาพที่ได้จากการขุดเปิดหน้าดินแทน เพื่อศึกษาถึงกลไกการวิบัติและศึกษาถึงพฤติกรรมในสภาวะก่อนแรงกดประลัยและสภาวะแรงกดประลัย

3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดิน

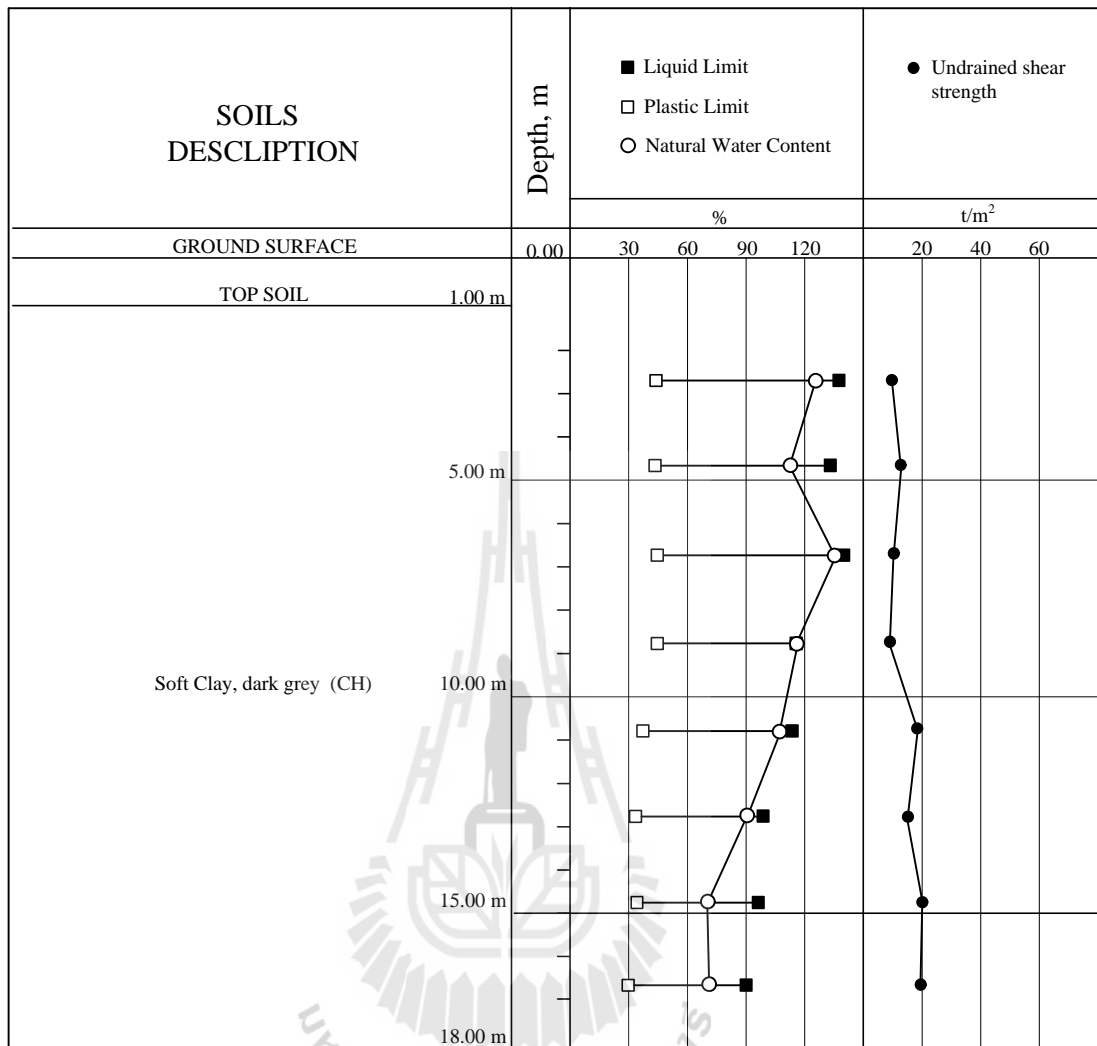
3.2.1 ซีดจำกัดเหลว (liquid limit) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4318

3.2.2 พิกัดพลาสติก (plastic limit) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4318

3.2.3 การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (unconfined compression test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2160

3.3 แหล่งดินที่นำมาทดสอบ

แหล่งดินที่ใช้เป็นตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยนี้ใช้ดินใน ตำบลบางบ่อ อำเภอบางบ่อ จังหวัดสมุทรปราการ ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนคงสภาพที่ได้จากการขุดเปิดหน้าดินเป็นบริเวณกว้างเพื่อนำดินชั้นผิวดินออกไป เพื่อที่จะสามารถลงไปเก็บก้อนดินตัวอย่างคงสภาพได้ โดยมีข้อมูลการเจาะสำรวจดินดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งเห็นได้ว่าถัดจากชั้นเปลือกดินลงไป ชั้นดิน 8 เมตรแรกเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนมากซึ่งจะเป็นชั้นดินที่ใช้ในการศึกษานี้

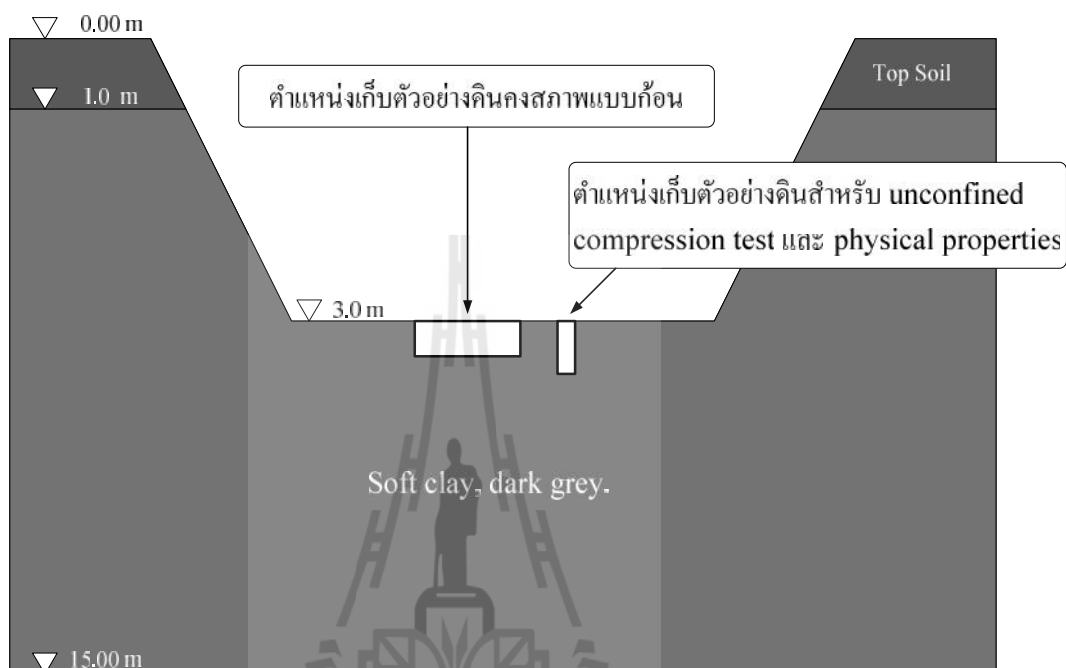


รูปที่ 3.2 ผลการเจาะสำรวจดิน โครงการนิคมอุตสาหกรรมเอเชีย ถนนหลวงแพ่ง จังหวัดสมุทรปราการ

3.4 วิธีการเก็บตัวอย่างดิน

การเตรียมตัวอย่างจะเป็นการเก็บตัวอย่างคงสภาพ ตัวอย่างที่ใช้มีขนาด 300×250×100 มิลลิเมตร ก่อนตัวอย่างที่เก็บขึ้นมา จะนำมาทดสอบทันทีโดยใช้เวลาไม่เกิน 30 นาทีที่ความชื้นธรรมชาติให้ได้ตัวอย่างดินคงสภาพทั้งทางด้านกำลังรับแรงเฉือนและคุณสมบัติทางกายภาพซึ่งมีคุณภาพดีกว่าดินที่นำมาผสมน้ำและก่อตัวใหม่ (remolded sample) หรือดินที่เก็บไว้โดยไม่ทำการทดสอบ

จากรูปที่ 3.3 ชั้นดินในบริเวณนี้เป็นชั้น top soil หนา 1 เมตร ถัดลงไปเป็นชั้น Soft clay, dark clay หนา 14 เมตร ซึ่งวางตัวอยู่บนชั้นดินแข็งปานกลาง จากชั้นดินจึงทำการขุดเปิดหน้าดินลงไป 2.0 เมตร เพื่อนำชั้น top soil ออกไป จากนั้นลงไปเก็บก้อนตัวอย่างเพื่อนำมาทดสอบ



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างจากการขุดเปิดหน้าดิน

3.5 ความยาวของระยะห่างระหว่างเสาเข็ม

การทดสอบจะใช้อัตราส่วนระยะห่างต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (S_g / B) เท่ากับ 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.2, 1.6, 2.0, 2.5 และ 3.0 การจำลองเสาเข็มขนาดเท่าจริงนั้น ทำให้ต้องสร้างเครื่องมือทดสอบที่มีขนาดใหญ่และมีประสิทธิภาพสูง เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการจำลองเสาเข็มขนาดจริง ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมในการปฏิบัติงานวิจัยนี้จึงได้ใช้เสาเข็มลดขนาดลงเพื่อจำลองถึงพฤติกรรมของกำแพงเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่องและเพื่อความสะดวกในการปฏิบัติงาน จึงได้เลือกใช้ขนาดของเสาเข็มและช่องว่างระหว่างเสาเข็ม ดังตารางที่ 3.1 เนื่องจากการทดลองเป็นการทดสอบกับดินเม็ดละเอียดภายใต้สภาวะไม่ระบายน้ำ การใช้แบบจำลองแบบย่อส่วนจึงไม่ส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของดิน

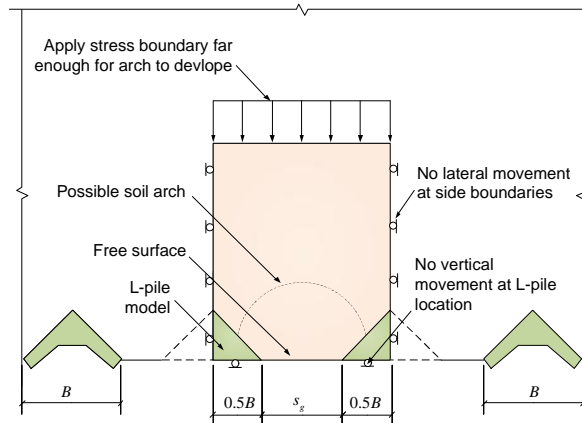
ตารางที่ 3.1 สัดส่วนการจำลองที่ใช้ในการทดสอบสำหรับเสาเข็มแอล

ขนาดจริง 300x300 มิลลิเมตร

ความยาวขา (mm)	ความยาวปีก (mm)	อัตรา ย่อส่วน	(mm)			
			B	Gap (mm)	spacing(mm)	S_g/B
300	424.26	1:4.24	100	10	110	0.1
300	424.26	1:4.24	100	30	130	0.3
300	424.26	1:4.24	100	50	150	0.5
300	424.26	1:4.24	100	70	170	0.7
300	424.26	1:5.3	80	95	175	1.2
300	424.26	1:5.3	80	130	210	1.6
300	424.26	1:5.3	80	157.5	237.5	2
300	424.26	1:7.1	60	150	210	2.5
300	424.26	1:7.1	60	177.5	237.5	3

เนื่องจากเสาเข็มหน้าตัดรูปตัวแอลสมมาตรจึงได้จำลองแบบจำลองทางกายภาพเพียงครึ่งหนึ่งของเสาเข็ม ในงานวิจัยนี้เป็นลักษณะของปัญหาแบบสมมาตรและกำหนดให้เสาเข็มมีความแข็งแรง (stiffness) มาก กำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องไม่มีการเคลื่อนตัว เนื่องจากมีระบบค้ำยันด้านข้าง โดยกำหนดให้อีกด้านหนึ่งของกำแพงเป็นลักษณะยึดแน่น การเคลื่อนตัวที่สามารถเกิดขึ้นได้จะเกิดเฉพาะกับดินตัวอย่างด้านหลังกำแพงเท่านั้น มีลักษณะการจำลองรูปแบบ ดังรูปที่

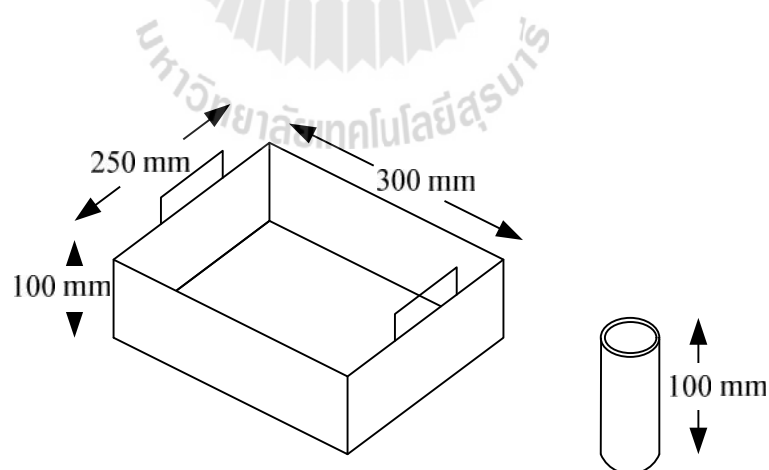
3.4



รูปที่ 3.4 การจำลองเพียงครั้งหนึ่งเนื่องจากความสมมาตรของตัวอย่าง

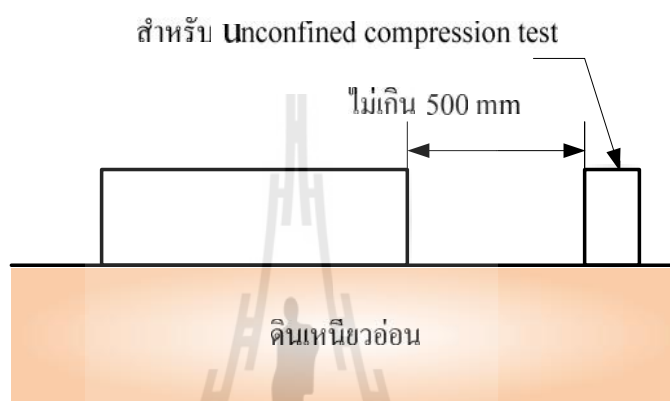
3.6 วิธีการเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน

3.6.1 เตรียมแบบเก็บตัวอย่างคงสภาพแบบก้อน มีลักษณะเป็นแบบเหลี่ยมขนาด $300 \times 250 \times 100$ มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.5 มีด้านที่เจาะลงในดินลักษณะคมเพื่อเจาะลงไปชั้นดินโดยรอบกวนดินตัวอย่างให้น้อยที่สุด หลังจากดำเนินการเก็บตัวอย่างแบบก้อนเสร็จ ลำดับต่อไปเก็บตัวอย่างดินคงสภาพสำหรับ unconfined compression test ในบริเวณใกล้เคียงกัน โดยที่จะเก็บในบริเวณที่อยู่บริเวณเดียวกัน ห่างจากจุดเก็บตัวอย่างคงสภาพแบบก้อนไม่เกิน 500 มิลลิเมตร



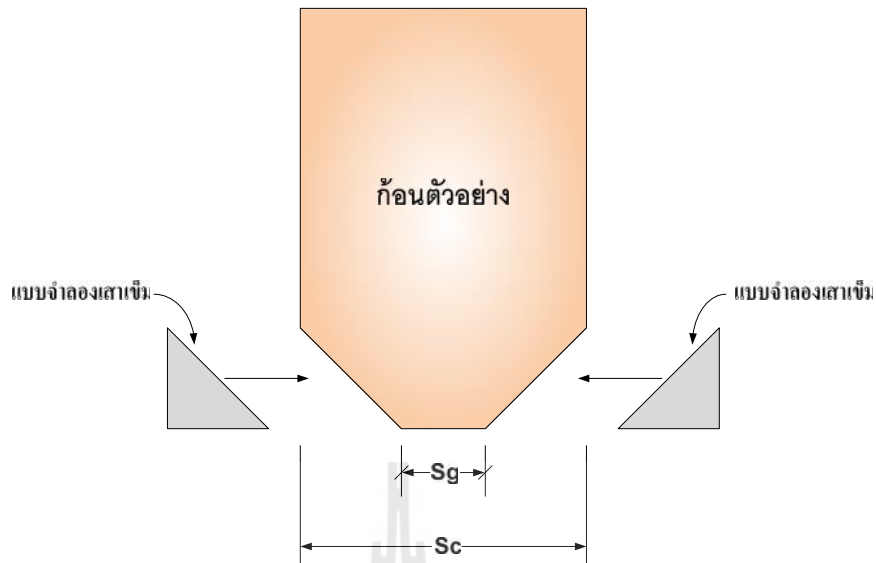
รูปที่ 3.5 แสดงอุปกรณ์เก็บดินตัวอย่างคงสภาพ

3.6.2 เลือกรบริเวณที่ต้องการเก็บดินตัวอย่าง จากนั้นกดแบบเก็บตัวอย่างดินคงสภาพแบบ ก้อนลงไปดินจนกระทั่งจมมีดกล่องดังรูปที่ 3.6 ขณะที่กดแบบเก็บตัวอย่างลงบนชั้นดินได้ทำการ รักษาแนวตั้งของกล่องไว้ตลอดการกด ลำดับต่อไปเปิดดินด้านข้างออกทุกด้านพยายามหลีกเลี่ยงการ กระแทกกับกล่องเก็บตัวอย่าง ใช้ลวดตัดก่อนตัวอย่างด้วยความระมัดระวัง โดยที่ดินภายในกล่องเก็บ ตัวอย่างยังคงอยู่และไม่ถูกรบกวน



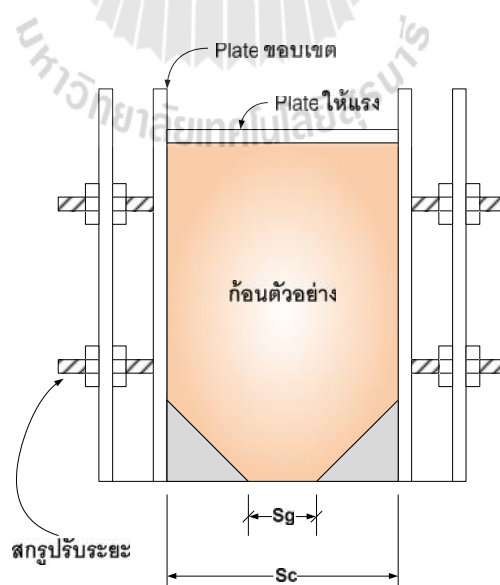
รูปที่ 3.6 การเก็บดินตัวอย่างคงสภาพแบบก้อน

3.6.3 นำแบบเก็บตัวอย่างที่มีตัวอย่างดินอยู่ใน ดำเนินการปาด ตัด แต่งดินตัวอย่าง ให้ได้ขนาดตามที่ต้องการทำการทดสอบ และเจาะก้อนดินตัวอย่างตามขนาดของแบบจำลอง เสาเข็มเพื่อนำแบบจำลองเสาเข็มมาใส่แทนที่ดังรูปที่ 3.7 (โดยเขาให้เล็กกว่าขนาดจริงเล็กน้อย เพื่อให้ทั้งสองส่วนติดกันแน่น)



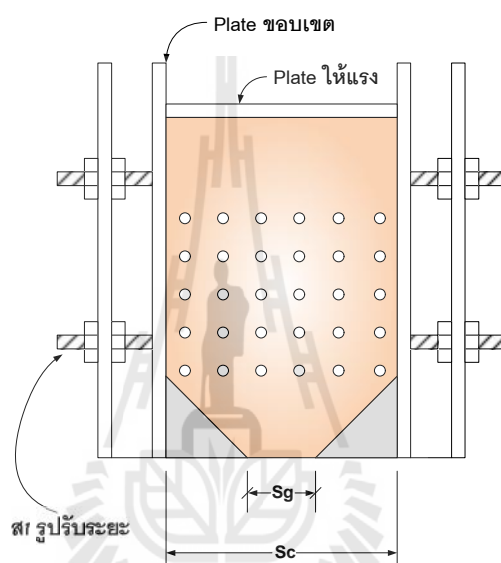
รูปที่ 3.7 การเจาะดินเพื่อติดตั้งแบบจำลองเสาเข็ม

3.6.4 นำก้อนดินตัวอย่างที่เตรียมไว้ตามขนาดที่ต้องการบรรจุในแบบทดสอบที่ปรับขนาดด้านข้างของกล่องทดสอบให้ได้ขนาดเท่ากับก้อนดินตัวอย่างพอดี โดยที่ภายในแบบทดสอบได้ทำไขปริมาตรเลียมไว้ทั้ง 3 ด้าน เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างก้อนดินตัวอย่างกับแบบทดสอบที่เป็นเหล็กดังรูปที่ 3.8



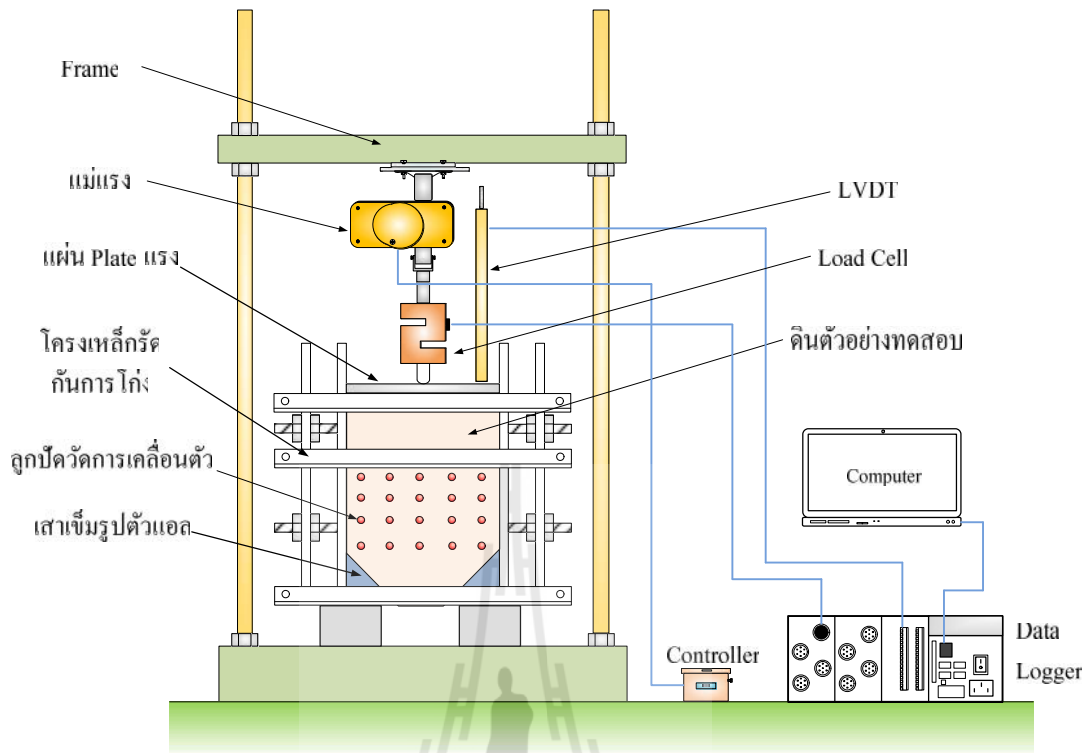
รูปที่ 3.8 การประกอบดินตัวอย่างกับแบบทดสอบ

3.6.5 ดำเนินการติดหมุดเครื่องหมายบนผิวด้านหน้าดินตัวอย่างด้วยหมุดเครื่องหมายทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 มิลลิเมตร โดยจัดเรียงเป็นแบบกริดจตุรัสที่มีระยะห่าง 30×30 มิลลิเมตร บนผิวดินของแบบจำลองด้านที่ติดกับแผ่นอะคลิลิกดังรูปที่ 3.9 เพื่อใช้เป็นหมุดเครื่องหมายบนตัวอย่างดินเพื่อตรวจสอบการเคลื่อนตัวของมวลดินในตัวอย่างระหว่างทดสอบ จากนั้นนำแผ่นอะคลิลิกมีความหนา 15 มิลลิเมตร ทาไขปิโตรเลียมด้านที่ประกบเข้ากับดินตัวอย่างไปประกอบเข้ากับแบบกดทดสอบพร้อมทั้งรัดด้วยโครงเหล็กยึดอย่างแน่นหนา



รูปที่ 3.9 การติดตั้งเครื่องหมายเพื่อบันทึกการเคลื่อนตัว

3.6.6 นำแบบกดทดสอบไปประกอบเข้ากับโครงกดทดสอบโดยจัดวางให้ได้ระดับดังรูปที่ 3.10 และทดสอบทันทีเพื่อให้ปริมาณน้ำในดินยังคงสภาพเดิม การเก็บตัวอย่างและการทดสอบจะใช้เวลาไม่เกิน 30 นาที



รูปที่ 3.10 การติดตั้งตัวอย่างลงในเครื่องมือทดสอบและการติดตั้งระบบเครื่องมือวัด

3.6.7 ติดตั้งอุปกรณ์ให้แรงแบบใช้แม่แรงไฟฟ้าต่อเข้ากับโครงกทดสอบและติดตั้ง load cell เพื่อวัดแรงที่เกิดขึ้น

3.6.8 จัดวางตัวอย่างลงในเครื่องทดสอบ จัดให้ได้ศูนย์กลางของแนวกด สังกะสีได้จากแผ่นเหล็กด้านบนของดินตัวอย่างทดสอบ ปรับให้แม่แรงไฟฟ้าเคลื่อนตัวลงมาให้เป็นกดของเครื่องทดสอบสัมผัสกับแผ่นเหล็กกดตัวอย่างพอดี เพื่อลดความผิดพลาดที่ไม่ต้องการ ติดตั้ง lvdt เพื่อวัดค่าการเคลื่อนตัว

3.6.9 ก่อนเริ่มการทดสอบจะต้องตรวจสอบการติดตั้งดินตัวอย่างและเครื่องมือให้เรียบร้อย เช่น เป็นกดของเครื่องทดสอบจะต้องสัมผัสกับแผ่นเหล็กด้านบนดินตัวอย่าง เนื่องจากเครื่องทดสอบเป็นแบบควบคุมด้วยกล่องควบคุมความเร็ว (Controller) ผู้ทดสอบจะต้องซ่อมปรับระดับความเร็วเพื่อให้ได้ความเร็วที่เหมาะสมที่จะใช้กดตัวอย่างทดสอบ

3.6.10 เริ่มการกดตัวอย่างทดสอบจากการให้แรงในแนวตั้งด้วยกล่องควบคุมความเร็ว (Controller) อัตราการกดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของเครื่องให้อยู่ในช่วง 5 มิลลิเมตรต่อนาที

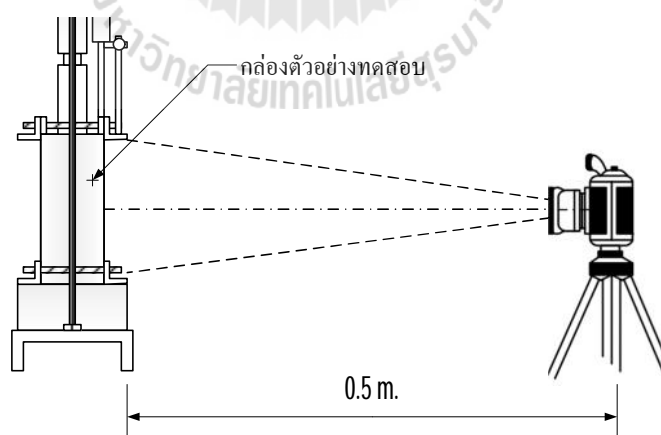
3.6.11 บันทึกข้อมูลค่าแรงกดจาก load cell และข้อมูลการเคลื่อนตัวจาก lvdt เมื่อแรงใน load cell เพิ่มขึ้นไปสูงสุดแล้วเริ่มจะลดลง ซึ่งแสดงว่าถึงจุดสูงสุดของกำลังของดิน ให้ยังคงอ่านผล

ต่อไปจนเห็นแนวเฉือน (failure plane) บนดินตัวอย่างได้ชัดเจน ในบางกรณีที่ไม่มีรอยเฉือนปรากฏชัด ให้ทดสอบจนการเคลื่อนตัวถึงประมาณ 20% ของความสูงของตัวอย่าง

3.6.12 บันทึกภาพการเคลื่อนตัวขณะทำการทดสอบโดยบันทึกทุกๆ 5 วินาที จนตัวอย่างวิบัติ

3.7 การบันทึกภาพการเคลื่อนตัว

การบันทึกภาพการเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบจากเครื่องหมายที่ติดตั้งไว้บนตัวอย่าง ด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัลตลอดจนติดตั้งบนขาตั้งกล้องสามขาที่มั่นคงแสดงดังรูปที่ 3.12 การบันทึกภาพด้วยกล้องดิจิทัลชนิดคอมแพค (compact cameras) จะพบปัญหาเส้นตรงที่ขอบภาพจะเว้าเข้ามาตรงกลาง (pincushion distortion) วิธีแก้ปัญหานี้คือเลือกใช้ทางยาวโฟกัสที่สั้น (ไม่ใช้การซูม) แล้วจัดองค์ประกอบให้วัตถุอยู่ตรงกลางภาพ (บริษัท ฟูจิ โฟโต้ ฟิล์ม, 2552 : เว็บไซท์) เนื่องจากวัตถุที่ต้องการบันทึกภาพมีขนาด 300×250 มิลลิเมตรเมตรซึ่งมีขนาดเล็กจึงเลือกใช้ความยาวโฟกัสเท่ากับ 500 มิลลิเมตรคล้ายกับการทดสอบของ (ขนาดล กงสมบูรณ และ ประสพศิริ แสง ภู, 2547) การบันทึกภาพจะบันทึกทุกๆ 3 วินาที ของการทดสอบทีละภาพ และนำภาพที่บันทึกได้มาเทียบกับสเกลระหว่างเครื่องหมายที่ติดตั้งบนตัวอย่างทดสอบขณะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับมวลดินกับแถบบรรทัดในภาพถ่าย



รูปที่ 3.11 การติดตั้งกล้องถ่ายภาพเพื่อบันทึกการเคลื่อนตัว

3.8 การประมวลผลภาพถ่าย

จากภาพถ่ายที่ได้จะนำมาประมวลผลโดยวิธีซ่อนภาพและวัฏระยะการเคลื่อนตัวของหมุดเครื่องหมายในบนมวดดินด้วยโปรแกรม datacatcher ซึ่งแต่ละภาพจะมีจุดอ้างอิงที่ใช้เป็นจุดเดียวกัน ซึ่งสามารถนำระยะการเคลื่อนตัวของมวดดินมาวาดเป็นเวกเตอร์การเคลื่อนตัวได้ และยังสามารถวาดเส้น contour line การเคลื่อนตัวของตัวของมวดดินได้ด้วยโปรแกรม surfer



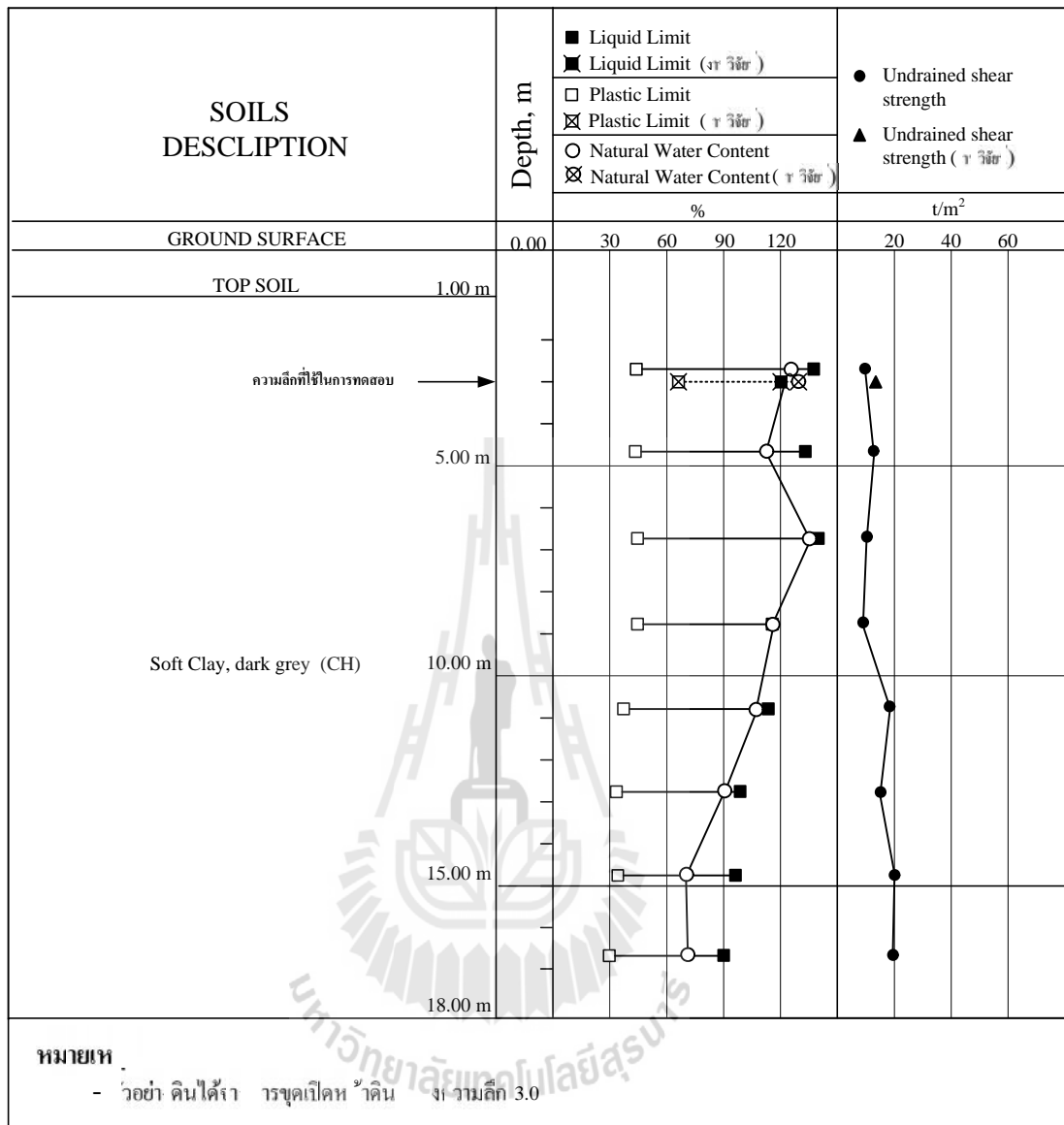
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 แปลงตัวอย่างดินสำหรับการทดสอบแบบจำลอง

งานวิจัยนี้ใช้พื้นที่เก็บตัวอย่างดินใน ตำบลบางบ่อ อำเภอบางบ่อ จังหวัดสมุทรปราการ ลักษณะของชั้นดินในบริเวณดังกล่าวเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนสีเทาเข้ม (soft dark grey clay) โดยมีปริมาณน้ำในดิน (water content, w) เท่ากับ 129 เปอร์เซ็นต์, มีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (undrained shear strength, S_u) เท่ากับ 14.7 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร, พิกัดเหลว = 120 เปอร์เซ็นต์, พิกัดพลาสติก = 65 เปอร์เซ็นต์, และดัชนีพลาสติก = 55 เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างดินได้จากการขุดเปิดหน้าดินจนถึงความลึกประมาณ 3.0 เมตร และเก็บตัวอย่างดินโดยใช้กล่องเหล็กบางขนาด $300 \times 250 \times 100$ มิลลิเมตร ดินตัวอย่างที่ใช้เป็นตัวอย่างที่คงสภาพ ตัวอย่างดินสำหรับทดสอบ unconfined compression test และ physical properties นั้นจะทำการเก็บดินบริเวณเดียวกันกับการเก็บดินตัวอย่างคงสภาพแบบก้อนเพื่อการทดสอบแบบจำลอง โดยมีระยะห่างจากจุดเก็บตัวอย่างทดสอบไม่เกิน 500 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.1 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับข้อมูลของหลุมเจาะในบริเวณใกล้เคียง พบว่า คุณสมบัติของดินจากการเจาะสำรวจดินและการเก็บดินตัวอย่างคงสภาพแบบก้อนมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่าดินที่เก็บขึ้นมาทำการทดสอบกับแบบจำลองทางกายภาพยังมีคุณภาพสูงและไม่ถูกรบกวน ทำให้คุณสมบัติของดินที่นำมาทดสอบยังคงสภาพเดิมอยู่จนใกล้เคียงกับสภาพจริงตามธรรมชาติ



4.1 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับข้อมูลของหลุมเจาะในบริเวณใกล้เคียง

ตัวอย่างทดสอบแบบก้อน unconfined compression test
 และตัวอย่างสำหรับ physical properties พบว่าดินมีความอ่อนตัวสูง ดินมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน
 จึงทำให้ตัวอย่างถูกรบกดนต่ำมาก ด้วย
 ระยะเวลาที่สั้นและไม่มีการขนย้ายตัวอย่างเป็นระยะทางไกลทำให้คุณภาพของดินตัวอย่างเป็นแบบ
 คงสภาพอย่างสูง

4.2

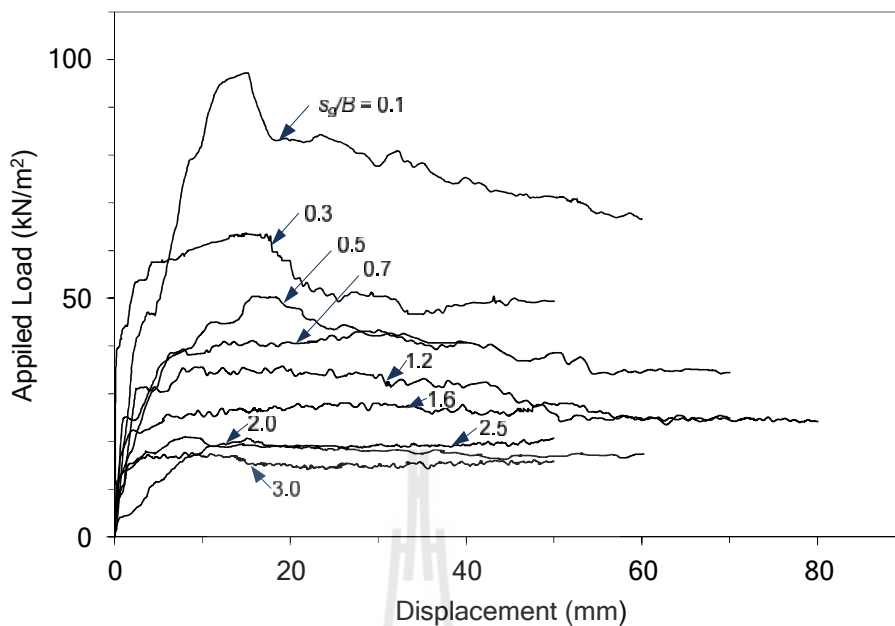
4.2 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันดินกับการเคลื่อนตัวของดินตัวอย่างในแบบจำลอง ซึ่งสามารถจัดแบ่งความสัมพันธ์ได้เป็นสองกลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มช่องเปิด (S_g / B) เท่ากับ 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.2 ซึ่งกลุ่มนี้หน่วยแรงต้านทานของดินระหว่างชอกเสาะเข็มพัฒนาจนถึงจุดประลัยแล้ว การอ่อนตัว (softening) เนื่องจากในช่วงแรงดันทำให้ดินระหว่างชอกเสาะเข็มทั้งสองต้นที่อยู่ไม่ห่างกันนัก เกิดเป็นรอยเลื่อนอาร์คขึ้น ซึ่งอาร์คดังกล่าวสามารถพัฒนาแรงต้านต่อการไหลออกของดินในชอกเสาะเข็มได้ เมื่อเพิ่มแรงกดทดสอบจนอาร์คเกิดการพังทลายกำลังของดินลดลงจนทำให้เกิดการอ่อน

กลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มช่องเปิดเสาะเข็มกว้าง (S_g / B) = 1.6, 2.0, 2.5, 3.0 สำหรับกลุ่มนี้กำลังต้านทานได้พัฒนาขึ้นจนถึงจุดประลัยแล้วไม่เกิดการอ่อนตัว สาเหตุเกิดจากการที่อาร์คมีระยะห่างระหว่างจุดรองรับกว้าง จึงมีกำลังต้านทานที่ต่ำและพังได้ง่ายกำลังต้านทานแรงดันดินที่เกิดขึ้นจากอาร์คจึงไม่แสดงอย่างเด่นชัดเหมือนกับกลุ่มแรก

จากการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพในขนาดอัตราส่วนระยะห่างช่องเปิดต่อขนาดความกว้างของเสาะเข็ม (S_g / B) ขนาดต่างๆ โดยนำข้อมูลการเคลื่อนตัวของดินตัวอย่าง

มาทำการวิเคราะห์ ปรากฏว่าตัวอย่างจะต้านทานแรงกดเพิ่มขึ้นในช่วงแรกซึ่งเห็นได้จากเส้นโค้งที่มีความชัน เมื่อออกแรงกระทำต่อแบบจำลองเพิ่มขึ้นเส้นโค้งมีความชันลดลง และเมื่อตัวอย่างในแบบจำลอง วิบัติ เส้นโค้งเกือบ อยู่ในแนวราบ และเมื่อพิจารณาในแง่ของระยะห่างระหว่างเสาะเข็มจะเห็นว่าแรงต้านทานต่อการกดจะแปรผกผันกับอัตราส่วน S_g / B ตัวอย่างเช่น อัตราส่วนระยะห่างช่องเปิดต่อขนาดความกว้างของเสาะเข็ม $S_g / B = 0.1$ (ช่องเปิด)) เท่ากับ 97.21 ต่อตารางเมตร อัตราส่วนระยะห่างช่องเปิดต่อขนาดความกว้างของเสาะเข็ม $S_g / B = 3.0$ (ช่องเปิดกว้าง) เท่ากับ 17.76 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร



4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดทดสอบกับค่าขยับตัวที่ได้จา

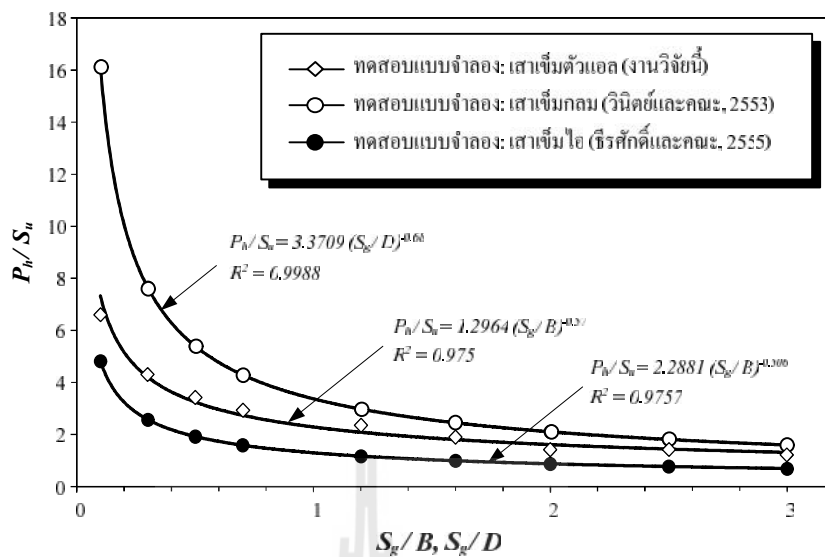
normalized ด้วยกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ จะได้ เป็น P_h / S_u เมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ กับ S_g / B จะได้เป็นสมการของไฮเพอร์โบลา ดัง สมการที่

$$\frac{P_h}{S_u} = 2.2881(S_g / B)^{-0.506} \tag{4.1}$$

(วินิตย์และคณะ, 2553), (

, 2555), ()

เหนียวอ่อนจากแหล่งที่ต พบว่า มีค่า กว่าเสาเข็ม



4.3

3

ได้ทำทดสอบแบบจำลอง

และยืนยันว่าสมการจากการทดสอบของวินิตย์และชีรศักดิ์สามารถใช้

ได้

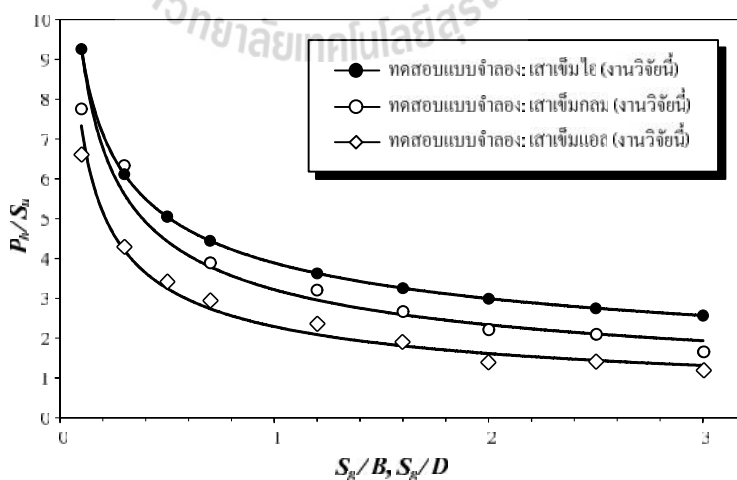
4.4 พบว่าแรงดันดี

ให้ค่าที่สูงกว่าเสาเข็ม

ดังกล่าว แตกต่างจาก

4.3

เป็นที่มาของการเปรียบเทียบ



4.4

3

4.3

ยี่ (2553)

4.1 ซึ่งเป็นสมการที่ได้จากการทดสอบแบบจำ

จะเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์แบบไฮเพอร์โบล่าเหมือนกับสมการที่ได้จากการทดสอบโดยวินิตย์

(2553) พบว่า ค่า P_h/S_u ที่ได้จากการทดสอบในงานวิ มีค่าต่ำกว่า P_h/S_u ได้จาก

ทดสอบด้วยแบบจำลองกายภาพของเข็มกลมทุกๆ S_g/B เนื่องด้วยลักษณะของเสาเข็ม

ที่สัมผัสดินมีความลาดชันมากกว่าเสาเข็มวงกลมที่มีด้านผิวที่สัมผัสดินที่โค้งมนมากกว่า จึงทำให้

เสาเข็มนั้นสามารถไหลออกมาได้เร็วกว่า ส่งผลให้ค่า P_h/S_u

ค่าที่ต่ำกว่า มีเพียงช่วงที่อัตราส่วน S_g/B ตั้งแต่ 1.2 3.0 ที่ผลการทดสอบมีค่า P_h/S_u

แนวโน้มใกล้เคียงกัน 4.5

4.5 พบอีกว่า

จากการเก็บตัวอย่าง

เหนียวอ่อนที่มีค่ากำลังรับ

ต่างกัน พบว่าค่า P_h/S_u

9 (วินิตย์และคณะ, 2553)

ต่ำลงบางบ่อ ()

ค่าที่ใกล้เคียง

S_g/B ตั้งแต่ 0.3 3.0 เพียงแต่ S_g/B เท่ากับ 0.1 เท่านั้นที่

ให้ค่า P_h/S_u กว่า เนื่องจากช่วงการทดสอบที่อัตราส่วน S_g/B แคบมาก ทำให้การทดสอบทำ

ได้ยาก ดินบางส่วนเกิดการทะลักออกทางด้านข้างของกล่องทดสอบเล็กน้อย

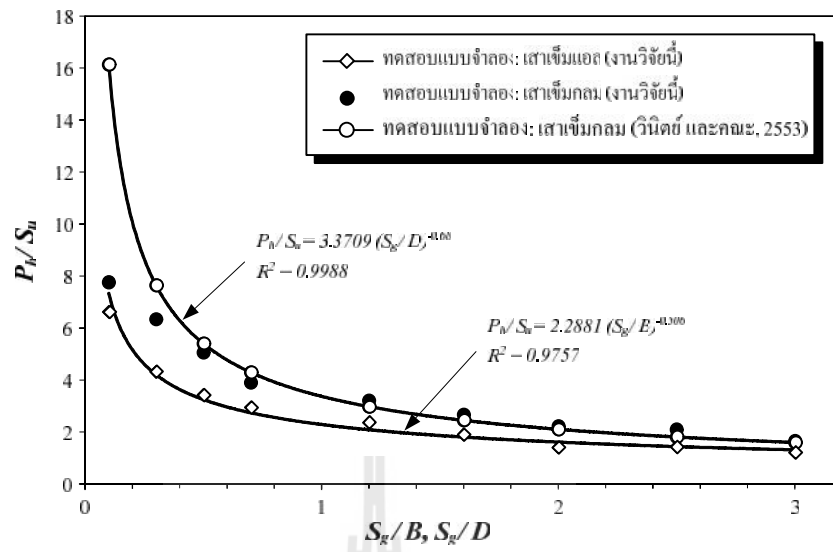
ให้ตัวได้เล็กน้อย ส่งผลให้ P_h/S_u มีค่าที่ต่ำกว่าในช่วงแรก แต่กราฟยังมีแนวโน้ม

จึงสามารถสรุปได้ว่า

ที่ได้จากการทดสอบแบบจำลอง

เหนียวอ่อน

กลมไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน



4.5

วินิตย์และคณะ (2553)

4.4

(2555)

2.5 ซึ่งเป็นสมการที่ได้จากการทดสอบแบบจำลอง

(2555) เมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเทอมของ P_h / S_u

แรงวิบัติที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองกายภาพในงานวิจัยนี้

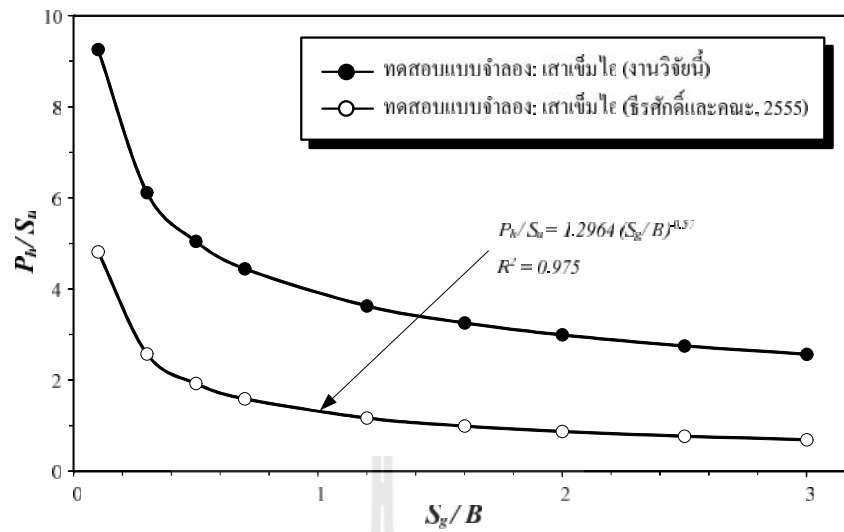
S_g / B

พบว่า P_h / S_u

ให้ค่าที่สูงกว่า

(2555)

4.6

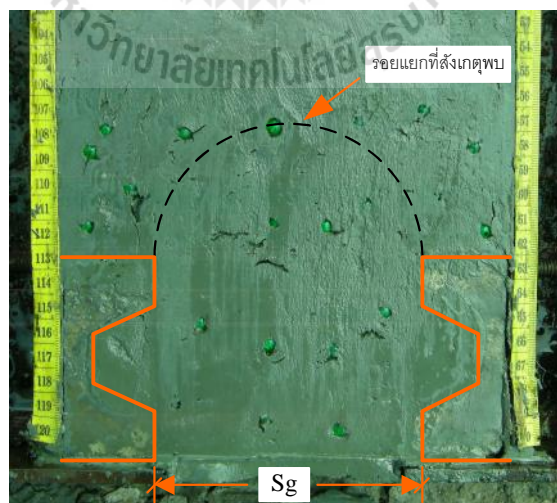


4.6

(2555)

ใหม่ที่แตกต่างกันจากกลไกการวิบัติที่เสนอ (2555) ซึ่งได้จากการสังเกตรอยแยกสุดท้าย (final crack) ของตัวอย่างคันท่ออย่างคันทดสอบที่ S_g/B เท่ากับ 1.2 ซึ่งเป็นระยะสุดท้ายได้อย่างชัดเจน

4.7



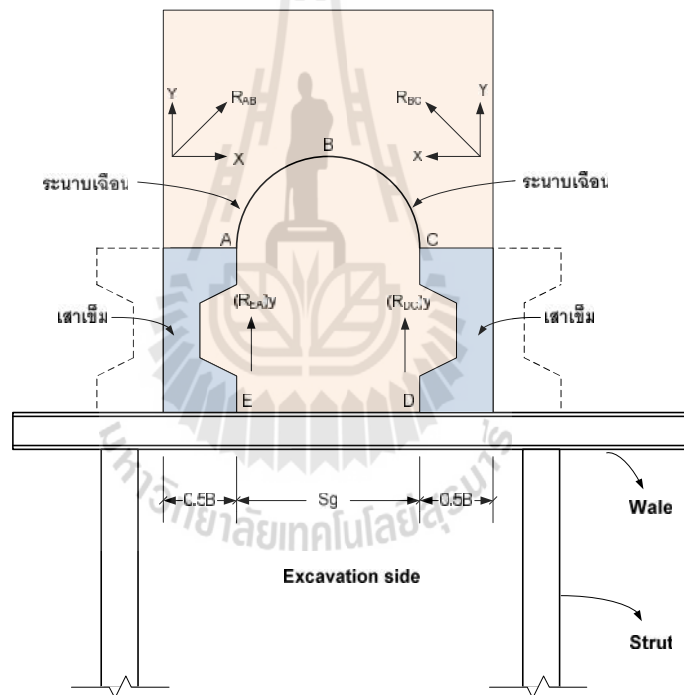
4.7 ภาพถ่ายรอยแยกสุดท้าย (final crack)

($S_g/B = 1.2$)

4.4.1 กลไกการวิบัติที่ได้จากการทดสอบ

นำเสนอขึ้นใหม่

จากภาพถ่ายแนวการเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบสังเกตได้ว่า ดินตัวอย่างเกิดการวิบัติเป็นรูปครึ่งวงกลมเหนือแบบจำลองเสาเข็ม โดยแนวส่วนโค้งจะเป็นระนาบเฉือนจะเกิดขึ้นระหว่างระยะห่างของเสาเข็มพอดี (S_g) จากทั้งสองข้างจนเคลื่อนตัวมาบรรจบกัน ซึ่งจะเกิดแรงเฉือนลัพธ์ทำมุม 45 มาที่บริเวณเหนือช่องเปิดขึ้นไป โดยสามารถลากเส้นแนวระนาบการวิบัติได้ดังรูปที่ 4.8 จากรูปจะแสดงบริเวณกล่องทดสอบพบว่าระนาบแรงเฉือนจะเกิดบริเวณด้านบนของแบบจำลองเสาเข็มและมาบรรจบกันที่กึ่งกลางระหว่างช่องว่างเสาเข็ม โดยมีแรงต้านทานเท่ากับกำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน



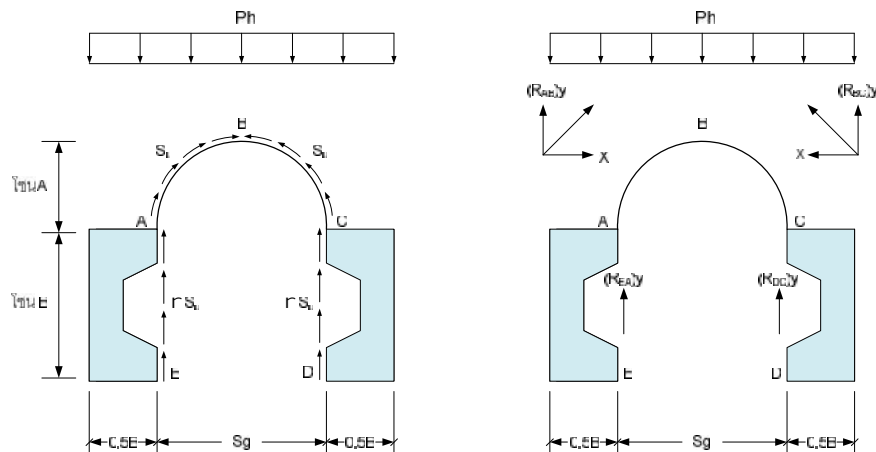
4.8

ที่เสนอขึ้นมาใหม่ที่ได้

ขึ้นมาใหม่

free-body diagram

ของระนาบแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 4.9



4.9 free body diagram

ความยาวส่วนโค้ง AB BC (A)

$$\begin{aligned} \text{Arch AB and BC} &= f \left(\frac{S_g}{2} \right) \\ &= \frac{f \cdot S_g}{2} \end{aligned} \quad (4.2)$$

วิเคราะห์แรงลัพธ์ต่อหนึ่งด้าน โดยใช้สมการความสมดุลของแรงในแนวแกน y ในการหาแรงลัพธ์ที่

$$R_{AB} = R_{BC} = S_u f \left(\frac{S_g}{2} \right) \quad (4.3)$$

$$(R_{AB})_y = (R_{BC})_y = \frac{f}{\sqrt{2}} S_u \left(\frac{S_g}{2} \right) \quad (4.4)$$

EA DC (B)

$$EA \text{ and } DC = B \quad (4.5)$$

$$R_{EA} \text{ and } R_{DC} = r S_u \cdot B$$

$$(R_{EA})_y \text{ and } (R_{DC})_y = r S_u \cdot B \quad (4.6)$$

ที่แรงดันดินวิบัติต่อความกว้างของอาร์ค โดยใช้สมการความสมดุลใน
 y เฉพาะบริเวณช่องเปิด เนื่องจากบริเวณแบบจำลองเสาเข็มเป็น
 ฐานรองรับจึงเกิดการรับแรงที่มากกว่าไว้ทั้งหมดและเสาเข็มแกร่งมาก (rigid)

จากแรงดันดินด้านข้าง แนวการไหล

ACDE

ด้านข้างกระจายแรงทำให้ดินเสียรูปนั้น ความต้านทานแรงเฉือนพยายามที่จะรักษาสภาพให้อยู่ใน
 ตำแหน่งเดิมโดยใช้ส่วนที่ติดกับโครงสร้างเป็นจุดรองรับ เกิดโครงสร้างรับแรงขึ้น เพราะฉะนั้น
 การวิเคราะห์ถึงระนาบแรงเฉือนจึงต้องนำส่วนของระนาบแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมาวิเคราะห์ด้วย ดังนี้

$$P_h \cdot S_g = 2[(R_{AB})_y + (R_{EA})_y] \quad (4.7)$$

$$= 2 \left[S_u \cdot \frac{f}{\sqrt{2}} \left(\frac{S_g}{2} \right) + r S_u \cdot B \right]$$

$$= 2 \cdot S_u \left[\frac{f}{\sqrt{2}} \left(\frac{S_g}{2} \right) + r \cdot B \right]$$

$$\frac{P_h}{S_u} = \frac{f}{\sqrt{2}} + \frac{2 \cdot r}{(S_g / B)} \quad (4.8)$$

S_g ระยะห่างระหว่างผิวถึงผิวเสาเข็ม

B ขนาดความกว้างเสาเข็มรูปตัวไอ

S_u กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

r เฟลคเตอร์ยึดเกาะระหว่างผิวของเสาเข็มกับดิน

P_h แรงดันดินด้านข้าง

4.10 แรงดันดินวิบัติ โดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง P_h / S_u

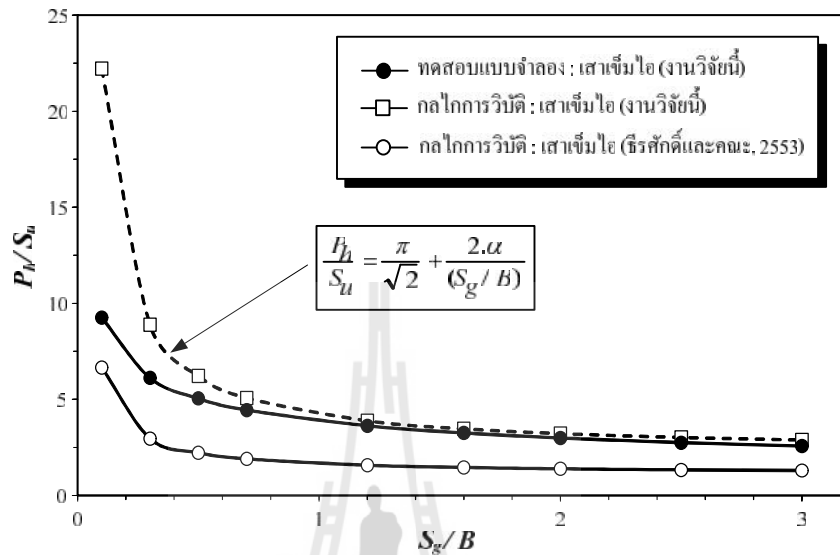
S_g / B ที่ได้จาก 4.8

พบว่าค่า มีค่าใกล้เคียง

S_g / B ตั้งแต่ 0.3 3

S_g / B เท่ากับ 0.1 เท่านั้น ค่าจากผลการทดสอบแบบจำลองกายภาพให้ค่าต่ำกว่า เนื่องจากช่วง
 ทดสอบที่อัตราส่วน S_g / B แคบมาก ทำให้การทดสอบทำได้ยาก ดินบางส่วนเกิดการทะลัก

ออกทางด้านข้างของกล่องทดสอบเล็กน้อยเนื่องจากแบบรัศอะคริลิกให้ตัวได้เล็กน้อย ส่งผลให้ P_h / S_u มีค่าที่ต่ำกว่าในช่วงแรก แต่กราฟยังมีแนวโน้มไปในทิศทาง



4.10

แรงวิบัติของเสาค้ำรูปตัวไอสามารถสรุปได้ดังนี้ สาเหตุที่ (2555) ให้ค่าที่ต่ำกว่า เนื่องจากการเก็บตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบในแบบจำลองกายภาพใน (2555) ได้จากการเก็บตัวอย่างดินที่ถูกรบกวน (disturbed) ส่งผลให้ค่าแรงดันดินวิบัติที่ได้้นั้นต่ำ แต่ในการเก็บตัวอย่างดินเพื่อนำมาหาค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ (unconfined compression test) เก็บตัวอย่างดินที่ไม่ถูกรบกวน (undisturbed) ทำให้ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำนั้นมีค่าที่สูงกว่าดินที่นำไปทดสอบในแบบจำลอง เมื่อนำค่าแรงดันดิน มาหารด้วยกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน ทำให้ค่าที่ได้ กว้างทั้งในด้านของผลการทดสอบและแนวคิด

4.5

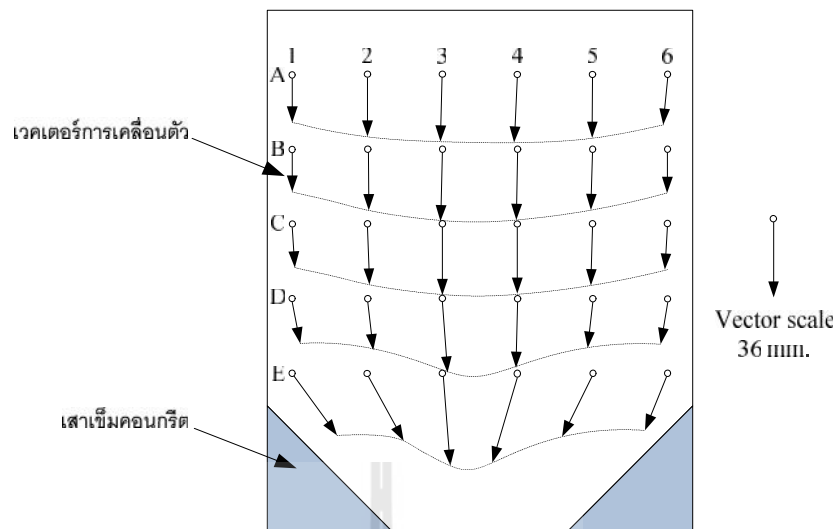
ภาพถ่ายขณะทดสอบ

การทดสอบในงานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนระยะห่างต่อความกว้าง (S_g / B) เท่ากับ 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.2, 1.6, 2.0, 2.5 3.0 แต่ในการใช้งานกำแพงเสาค้ำตอกเรียงต่อเนื่องโดยทั่วไป

นั้นมีค่า S_g/B ระหว่าง 0.5 - 1.0 (, 2539) เพื่อให้อัตราส่วน S_g/B อยู่ในช่วง
การใช้งานจริงผู้วิจัยจึงเลือกอัตราส่วน S_g/B เท่ากับ 0.7, 1.2, 2.5

โดยให้อัตราส่วน S_g/B เท่ากับ 2.5 เป็นตัวแทนของ ส่วน S_g/B
ส่วนอัตราส่วน S_g/B ที่สูงกว่านี้ผลการทดสอบ รอยแยกของดินได้ยากเนื่องจากดิน
วิบัติค่าทำให้เห็นรอยแตกในดินไม่ชัดเจน

จากการบันทึกภาพค่า โดยทำการวิเคราะห์
ด้วย datacatcher version 1.20 ได้ผลการเคลื่อนตัว
ของดินตัวอย่างทดสอบจากหมุดเครื่องหมาย พบว่า ตัวอย่างทดสอบ
เป็นเวกเตอร์การเคลื่อนตัว (displacement vector) จะได้ 4.11
มวลดินจากจุดเริ่มต้นการทดสอบจนถึงจุดที่ให้แรงกดที่ค่าล ดินตัวอย่าง
ช่องว่างระหว่างเสาเข็ม (S_g) ตำแหน่ง A3, A4, B3, B4, C3, C4, D3,
D4, E3 และ E4 ดินตัวอย่าง ด้านบน ซึ่จะมีการเคลื่อนตัวน้อย
ตำแหน่ง E1 E6 แต่ดินตัวอย่างเหนือเสาเข็มขึ้นไปตำแหน่ง
D1 D6 เวกเตอร์จะพบว่ามีทิศทางการเคลื่อนตัวเข้าหาช่องเปิด เส้นที่
ลากเชื่อมระหว่างปลายเวกเตอร์ทำให้เห็นแนวการเคลื่อนตัวเป็นลักษณะ โค้งกว่าจากขอบทั้งสอง
ข้างแล้วมาบรรจบเป็นโค้งหงายที่ตรงกลางบริเวณช่องเปิด ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก
เสาเข็มเกิดการกระจายแรงลงสู่เสาเข็มเมื่อ แน่ จึงเกิดการปิดกั้นการไหลทำให้
ดินสร้างแนวอาร์คขึ้นส่งผลทำให้เกิดเป็นแนวโค้งรับแรงที่ทำให้ดินด้านแรงที่มากระทำได้

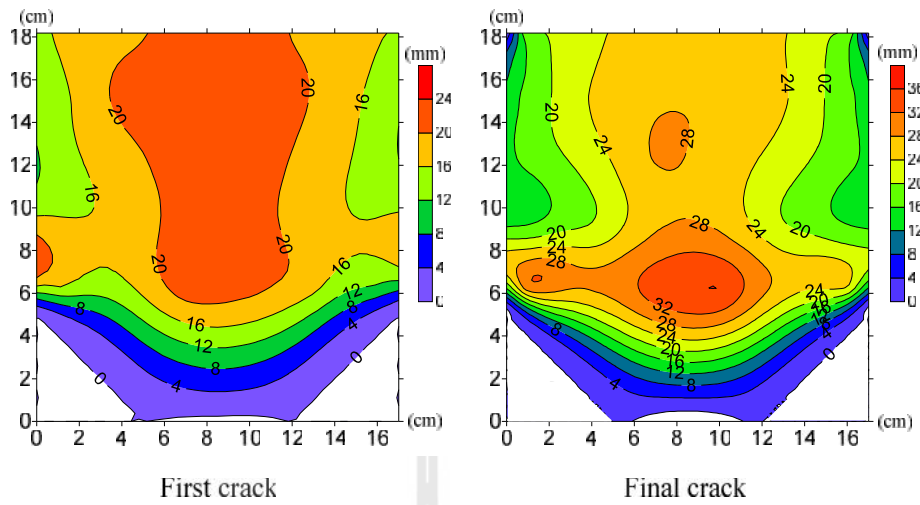


4.11 ภาพการเคลื่อนตัวของภายในของตัวอย่างทดสอบที่มี $S_g / B = 0.7$
(เมื่อพิจารณาจากเริ่มต้น)

ศึกษารูปแบบการเคลื่อนตัวของมวลดินได้นำเวกเตอร์การเคลื่อนตัวมาเขียนเส้นชั้นค่าการเคลื่อนตัวของหมุดเครื่องหมายทุกๆ ตำแหน่งของตัวอย่างทดสอบไว้ที่ละภาพทุกๆ 3 จนดินตัวอย่างวิบัติ วิเคราะห์ภาพเชิงซ้อน แล้วนำค่าการเคลื่อนตัวของทุกๆ ตำแหน่งมาวาดเป็นเส้น contour line

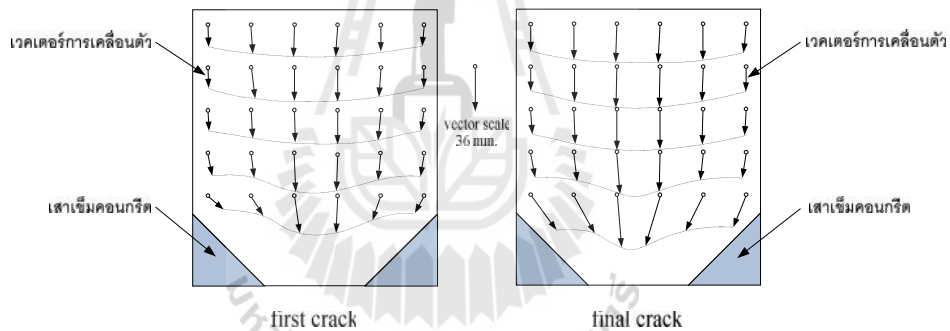
4.12 พบว่า ส่วน S_g / B เท่ากับ 0.7 เมื่อให้แรงกระทำกับตัวอย่างดินพบว่าที่เส้นการเคลื่อนตัวที่ 16 ดินเริ่มมีลักษณะส่งถ่ายแรงลงสู่เสาเข็มขึ้นจนกระทั่งเกิดการอัดแน่นตรงบริเวณเหนือเสาเข็มทำให้ดินเริ่มมีการสร้างแนวอาร์คขึ้นมาต้านทานแรงที่มาทำให้ พบรอยแยกเริ่มต้นเกิด (first crack) และที่จุดวิบัติค่าการเคลื่อนตัวที่ทำให้เกิดรอยแยกสุดท้ายขึ้นในมวลดินเท่ากับ 32 โดยที่ตำแหน่งดังกล่าวได้พบอาร์คที่เกิดขึ้นบนช่องเปิดอย่างชัดเจน อีกทั้งยังพบว่าดินตัวอย่างมีการเคลื่อนตัวสูงที่สุดที่บริเวณกึ่งกลางช่องว่างระหว่างแบบจำลองเสาเข็ม ขณะที่ดินตัวอย่างบริเวณด้านบนเหนือผิวของเสาเข็มขึ้นไปตลอดแนวจะมีการเคลื่อนตัวน้อยเมื่อเทียบกับดินบริเวณตรงกลางระหว่างเสาเข็ม

ตัวเข้าหาช่องเปิดระหว่างเสาเข็ม ดังรูปที่ 4.13



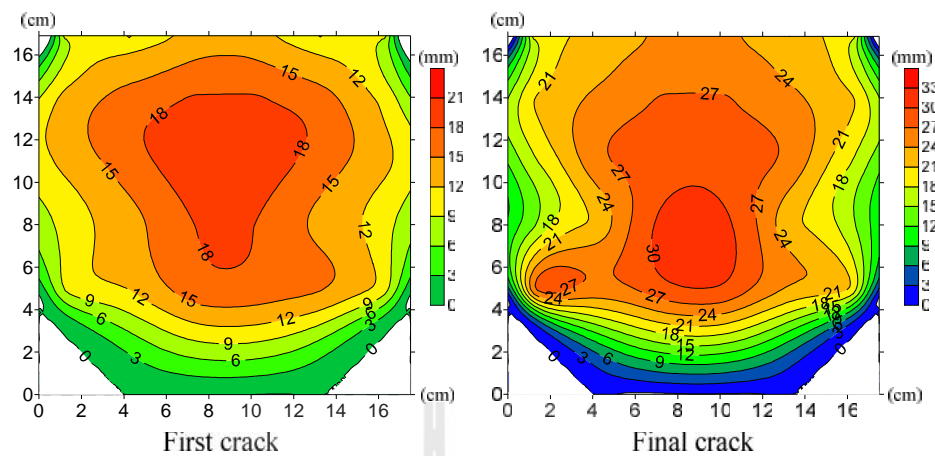
4.12 เส้น contour line การเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบ

$$S_g / B = 0.7$$



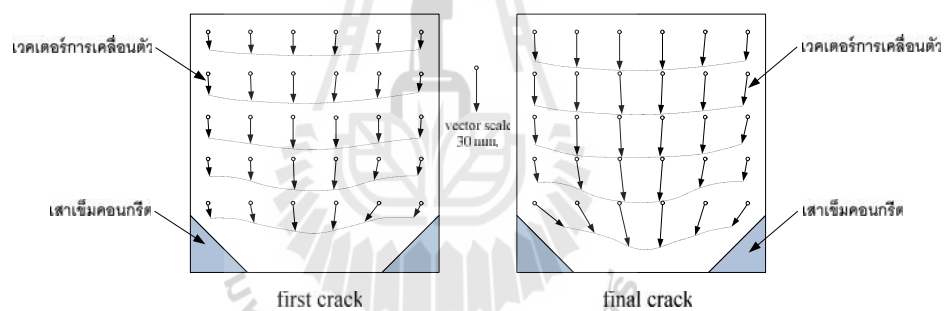
4.13 เวกเตอร์การเคลื่อนตัวในแบบจำลองขนาด $S_g / B = 0.7$

4.14 พบว่าที่อัตราส่วน S_g / B เท่ากับ 1.2 เมื่อให้แรงกระทำกับตัวอย่างดินพบว่าที่เส้นการเคลื่อนตัวที่ 9 ดินเริ่มมีลักษณะส่งถ่ายแรงลงสู่เสาเข็มขึ้นจนกระทั่งเกิดการอัดแน่นตรงบริเวณเหนือเสาเข็มทำให้ดินเริ่มมีการสร้างแนวอาร์คขึ้น ทำให้สังเกตเห็นต้นเกิดขึ้น (first crack) ควมิตค่าการเคลื่อนตัวที่ทำให้เกิดรอยแยกสุดท้ายขึ้นในมวลดินเท่ากับ 30 ที่ตำแหน่งดังกล่าวได้พบอาร์คที่เกิดขึ้นบนช่องเปิดอย่างชัดเจน พบว่าดินตัวอย่างมีการเคลื่อนตัวสูงที่สุดที่บริเวณกึ่งกลางช่องว่างระหว่างแบบจำลองเสาเข็ม ขณะช่วงบริเวณด้านบนเหนือผิวของเสาเข็มขึ้นไป จะมีการเคลื่อนตัวน้อยเมื่อเทียบกับดินบริเวณตรงกลางระหว่างเสาเข็มและยังมีทิศทางเคลื่อนตัวเข้าหาช่องเปิดระหว่างเสาเข็ม



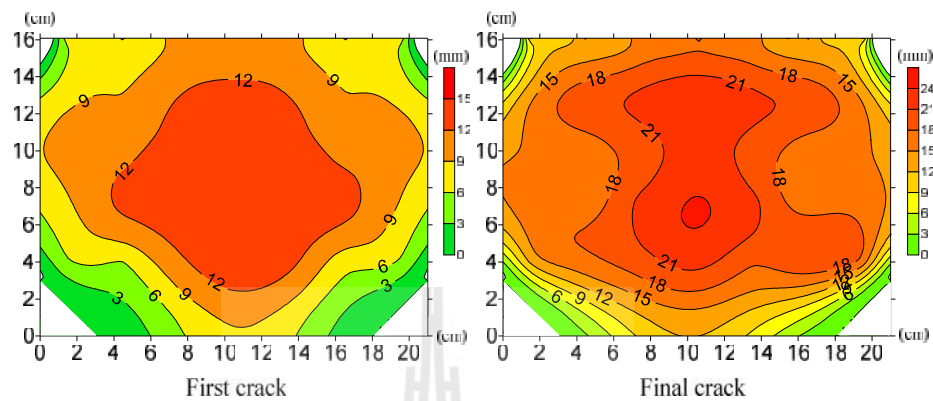
4.14 เส้น contour line การเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบ

$$S_g / B = 1.2$$

4.15 เวกเตอร์การเคลื่อนตัวในแบบจำลองขนาด $S_g / B = 1.2$

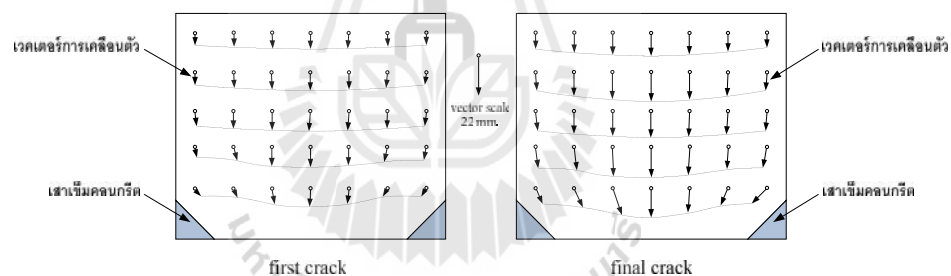
4.16 พบว่าที่อัตราส่วน S_g / B เท่ากับ 2.5 เมื่อให้แรงกระทำกับตัวอย่างดินพบว่าที่เส้นการเคลื่อนตัวที่ 6 ดินเริ่มมีลักษณะส่งถ่ายแรงลงสู่เสาเข็มขึ้นจนกระทั่งเกิดอัดแน่นตรงบริเวณเหนือเสาเข็ม ทำให้สังเกตพบรอยแยกเริ่มต้นเกิดขึ้น (first crack) แต่ไม่พบแนวของอาร์คขึ้นเป็นเพียงการไหลผ่านช่องเปิดเท่านั้น ออกจากระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่กว้างควมิตค่าการเคลื่อนตัวที่ทำให้เกิดรอยแยกสุดท้ายขึ้นในมวลดินเท่ากับ 18 เส้นการเคลื่อนตัวดังกล่าวไม่พบการเกิดขึ้นของอาร์คอย่างชัดเจน มีเพียงดินบางส่วนที่เกิดเป็นรอย (final crack) ส่วนการเคลื่อนตัวของดินพบว่า ช่องว่างระหว่างแบบจำลองเสาเข็ม ขณะที่ดินตัวอย่างบริเวณด้านบนเหนือผิวของเสาเข็มขึ้นไป

จะมีการเคลื่อนตัวใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับดินบริเวณกึ่งกลางระหว่างเสาเข็ม
ทางการเคลื่อนตัวเข้าหาช่องเปิดระหว่างเสาเข็ม ดังรูปที่ 4.17



4.16 เส้น contour line การเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบ

$$S_g / B = 2.5$$



4.17 เวกเตอร์การเคลื่อนตัวในแบบจำลองขนาด $S_g / B = 2.5$

จากผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินตัวอย่างด้วยภาพถ่ายเชิงซ้อน เช่น ตัวอย่างที่ S_g / B เท่ากับ 0.7, 1.2, 90 เปอร์เซ็นต์
แรงกดประลัย พบว่า ดินตัวอย่างเกิดแนวเงื่อนไขเป็นรอยแยกเริ่มต้น (first crack)

รอยแยกเริ่มต้น (first crack) 45

อธิบายได้ว่า จากอาร์คที่เกิดขึ้นบนช่องเปิด จึงก่อให้เกิดแรงต้านทานแรงดันดิน สอดคล้องกับ
รายงานผลทดสอบกับแบบจำลองทางกายภาพของอูโมงค์โดย Atkinson et al. (1975) ว่าช่วง

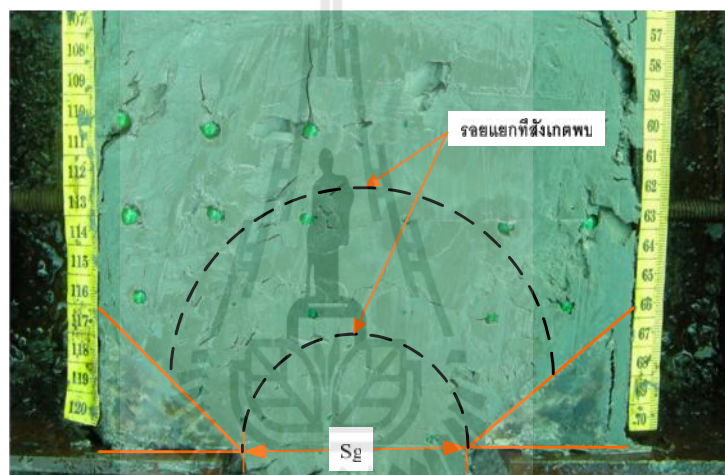
วิบัติเริ่มต้น (initial failure) มีลักษณะเป็นลิ่มเหนือช่องเปิด

นี้แรงดันดินบางส่วนถูกต้านทานโดยเสาเข็มโดยตรงและมีการถ่ายแรงกระทำเข้าสู่เสาเข็ม ทำให้

เกิดการยุบอัดตัวบริเวณด้านหน้าเสาเข็มจนทำให้เกิดรอยแตกเริ่มต้น (first crack)

บริเวณช่องเปิด บางส่วนที่อยู่ใต้แนวรอยแตกสามารถหลุดออกมาได้ ดินที่อยู่เหนือรอยแตกจะรวมตัวกันเป็นสะพานรูปอาร์คต้านแรงดันดินไว้จนถึงจุดวิกฤติ หลังจากพบรอยแตกเริ่มต้น (first crack) เมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อไป อาร์คที่เกิดขึ้นระหว่างเสาเข็มนี้สามารถพัฒนาแรงต้านทานต่อการดึงดินในซอกเสาเข็มได้

พบว่า การถ่ายแรงกระทำ เข้าสู่เสาเข็มถึงสิ้นสุดลง ทำให้อาร์คเกิดการพังทลาย ดินลดลงทำให้แรงต้านทานลดลงนับพัน ซึ่งแสดงให้เห็นจากการอ่อนตัวของแบบจำลอง (softening)



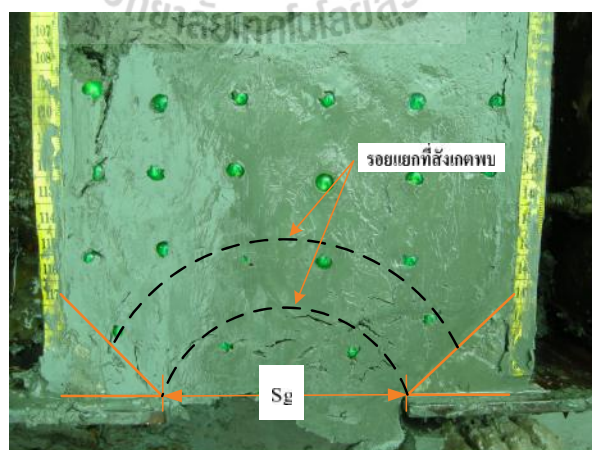
4.18 ภาพถ่ายรอยแตกสุดท้าย (final crack)
($S_g / B = 0.7$)



4.19 ภาพร่างรอยแยกสุดท้าย (final crack)

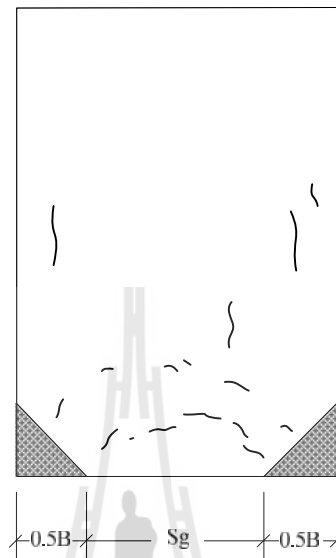
ในตัวอย่างทดสอบขนาด $S_g / B = 0.7$

4.18 4.19 พบว่า รอยแยกสุดท้าย มีลักษณะเป็นรอยเหมือนรูปครึ่งวงกลม เกิดขึ้นที่บริเวณเหนือเสาเข็มและบริเวณช่องเปิดอย่างชัดเจน มีจุดยอดอยู่บริเวณกึ่งกลางแบบจำลอง ปลายทั้งสองข้างมีทิศทางไปยังตำแหน่งประมาณ $1/4$ เท่าของความกว้างเสาเข็ม ขณะเดียวกันพบรอยแยกของดินเกิดขึ้นทั้งสองข้างเป็นบริเวณเล็กน้อย มีทิศทางจากช่องเปิดไปยังผิวดินด้านบน



4.20 ภาพถ่ายรอยแยกสุดท้าย (final crack)

($S_g / B = 1.2$)

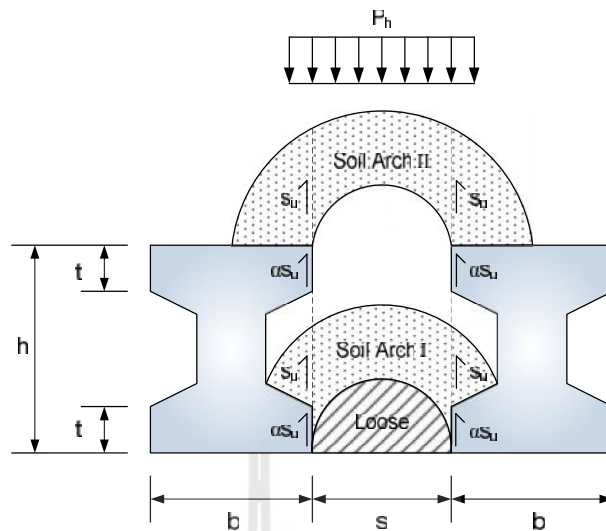


4.21 ภาพร่างรอยแตกสุดท้าย (final crack)

ในตัวอย่างทดสอบขนาด $S_g / B = 1.2$

4.20 4.21 พบว่า รอยแตกสุดท้ายมีลักษณะเป็นรอยเหมือนรูปครึ่งวงกลม เกิดขึ้นที่บริเวณเหนือเสาเข็มและบริเวณช่องเปิดอย่างชัดเจน มีจุดยอดอยู่บริเวณกึ่งกลางแบบจำลอง ปลายทั้งสองข้างมีทิศทางไปยังตำแหน่งประมาณ $1/4$ เท่าของความกว้าง

เกิดขึ้นทั้งสองข้างเป็นบริเวณเล็กน้อย มีทิศทางจากช่องเปิดไปยังผิวดินด้านบน เช่นเดียวกับที่ $S_g / B = 0.7$ ซึ่งลักษณะที่เกิดดังกล่าว คล้ายกับกลไกการวิบัติสุดท้ายของ Atkinson et al. (1975) ที่เสนอว่าการวิบัติสุดท้าย (final failure) มีลักษณะเป็นรอยเส้นตรง จากผิวดินด้านบนถึงอิมโงค์ และคล้ายกับกลไกการวิบัติของประจิด (2539) ที่เสนอไว้ดังรูปที่ 4.22 พบว่าเกิดอาร์ค บริเวณเหนือเสาเข็มและช่องว่างระหว่างเสาเข็ม แต่ไม่มี รวิบัติที่เลื่อนผ่านอาร์ค (2539)



4.22 สะพานดินระหว่างซอกเสาเข็มและระนาบวิบัติของดินสำหรับเสาเข็ม (, 2539)

4.23 พบว่ารอยแยกเริ่มต้นอยู่ในช่วง 50-90 เปอร์เซ็นต์

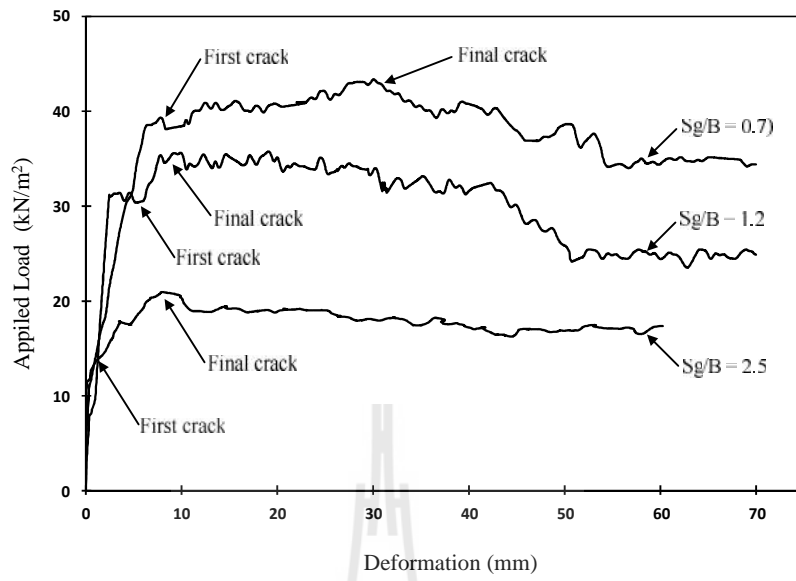
ละรอยแยกสุดท้าย (final crack) ช่วงสุดท้ายก่อนการวิบัติของดินตัวอย่าง ดัง
Atkinson et al. (1975) กล่าวว่า แรงดันที่การวิบัติเริ่มต้น (initial failure) ไม่

เกี่ยวข้องกับอัตราส่วนความลึกต่อขนาดรัศมีโมเมนต์ แต่การวิบัติสุดท้าย (final failure) จะขึ้นอยู่กับ

อัตราส่วนความลึกต่อขนาดรัศมีโมเมนต์ สอดคล้องกับการทดลองแบบจำลองทางกายภาพที่ว่า
ช่วงรอยแยกเริ่มต้น (first crack) พบที่แรงกระทำต่อดินตัวอย่างต่ำ ส่วนรอยแยกสุดท้าย (final
crack) พบที่แรงกระทำต่อดินตัวอย่างสูง อัตราส่วนช่องเปิดต่อขนาดความกว้างของเสาเข็ม
 S_g / B อิทธิพลของการเกิดรอยแยกเริ่มต้น (first crack) ขึ้นอยู่กับ

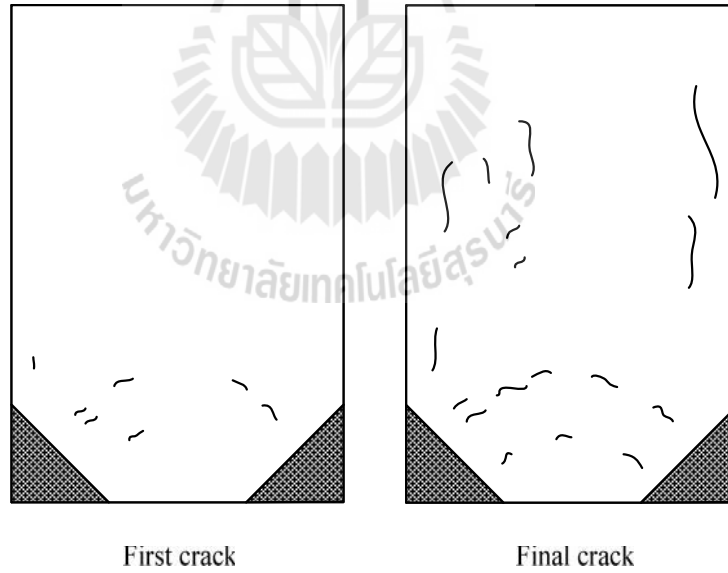
อัตราส่วนระยะห่างช่องเปิดต่อขนาดความกว้างเสาเข็ม (S_g / B) กล่าวคือ อัตราส่วนระยะห่างช่อง
เปิดต่อขนาดความกว้างเสาเข็ม (S_g / B) น้อย รอยแยกเริ่มต้น (first crack)

ส่วนอัตราส่วนระยะห่างช่องเปิดต่อขนาดความกว้างเสาเข็ม (S_g / B) รอยแยกเริ่มต้น (first
crack)



4.23

S_g / B เท่ากับ 0.7, 1.2, 2.5



4.24 รอยแตกเริ่มต้น (first crack) และรอยแตกสุดท้าย (final crack)
 $S_g / B = 0.7$

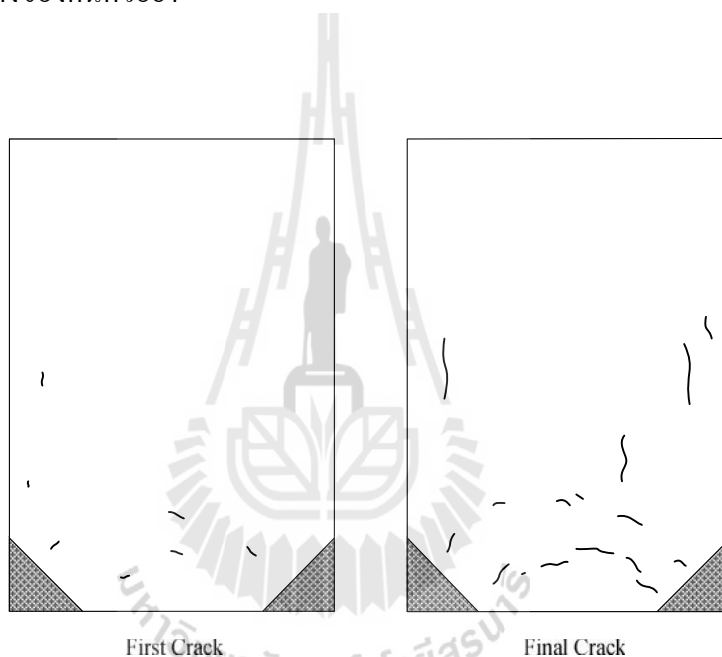
4.23 4.24 ตรวจพบรอยแยกเริ่มต้น $S_g / B = 0.7$

10 40 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

ได้สังเกตเห็นรอยร้าวเหมือนลักษณะครึ่งวงกลมเกิดขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่รอยแยกสุดท้าย (final crack)

30 45 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

พบว่ามึรอยร้าวเหมือนลักษณะครึ่งวงกลมเกิดขึ้นชัดเจน มีจุดยอดอยู่บริเวณกึ่งกลางแบบจำลอง ปลายทั้งสองข้างมีทิศทางไปยังตำแหน่งประมาณ $1/4$ เท่าของความกว้างเสาเข็ม ขณะเดียวกันพบรอยร้าวเกิดขึ้นด้านบนมีขนาดร้าวไม่ยาวมากไปบริเวณสองข้างของดินตัวอย่า



4.25 รอยแยกเริ่มต้น (first crack) และรอยแยกสุดท้าย (final crack)

$S_g / B = 1.2$

4.23 4.25 รอยแยกเริ่มต้น $S_g / B = 1.2$

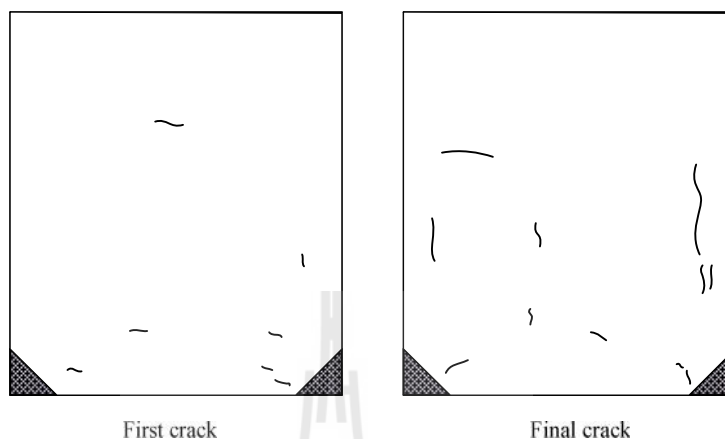
5 32 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

ได้ เกิดขึ้นเล็กน้อย รอยแยกสุดท้าย (final crack)

10 35 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

ว่ามีรอยร้าวเหมือนลักษณะครึ่งวงกลม มีจุดยอดอยู่บริเวณกึ่งกลางแบบจำลอง ปลายทั้งสองข้างมีทิศทางไปยังตำแหน่งประมาณ $1/4$ เท่าของความกว้างเสา

ขณะเดียวกันพบรอยร้าวเกิดขึ้นด้านบนมีขนาดร้าวไม่ยาวมากบริเวณเหนือเสาเข็มขึ้นไป
ไปบริเวณสองข้างของดินตัวอย่าง



4.26 รอยร้าวเริ่มต้น (first crack) และรอยร้าวสุดท้าย (final crack)

$$S_g / B = 2.5$$

4.23

4.26 ตรวจสอบรอยร้าวเริ่มต้น $S_g / B = 2.5$

2

12 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

ได้สังเกตพบรอยร้าวเกิดขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่รอยร้าวสุดท้าย (final crack)

10

21 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

พบว่ามียุทธวิธี ร้าวมากกว่าเดิม แต่ไม่พบว่ามีอาร์คที่ชัดเจนเป็นเพียงรอยร้าวของดินที่ขยาย
ใหญ่ขึ้นเท่านั้น สาเหตุเกิดจากการที่อาร์คมีระยะห่างระหว่างจตุรกรงรับกว้างจึงมีกำลังด้านที่ต่ำและ
พังได้ง่าย จึงทำให้อาร์คที่เกิดขึ้นไม่แสดงอย่างเด่นชัด $S_g / B = 0.7$

$S_g / B = 1.2$ ที่ปรากฏให้เห็นชัดเจน เนื่องจากระยะห่างของเสาเข็มที่มาก

ร้าวเกิดขึ้นด้านบนมีขนาดร้าวไม่ยาวมากบริเวณเหนือเสาเข็มขึ้นไปบริเวณสองข้างของดิน
ตัวอย่าง

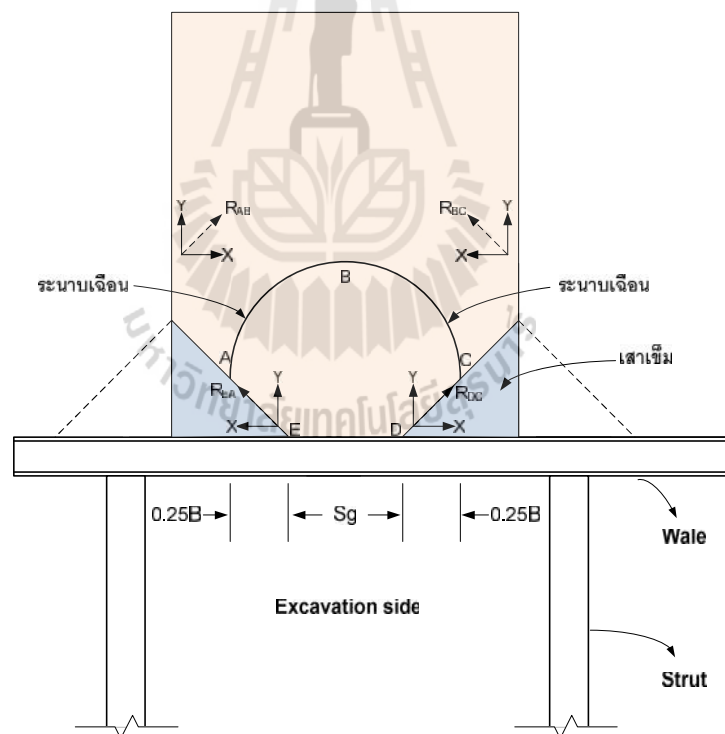
4.6 การสร้างสมการรูปแบบปิด (close form solution)

4.6.1 การวิบัติแบบโค้ง (FM1)

จากภาพถ่ายแนวการเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบสังเกตได้ว่า ดินตัวอย่างเกิด
 บัดเป็นรูปครึ่งวงกลมเหนือแบบจำลองเสาเข็ม โดยแนวส่วน โค้งจะเป็นระนาบแรง
 อนตัวจากด้านหน้าแบบจำลองที่ตำแหน่ง $1/4$ เท่าของความกว้าง

เกิดแรงเฉือนลัพธ์ทำมุม 45
 ขึ้นอีกจำนวนมากตามมาที่บริเวณเหนือช่องเปิดขึ้นไป โดยสามารถลากเส้นแนวระนาบการวิบัติได้

4.27 แสดงบริเวณกล่อง พบว่าระนาบแรงเฉือนจะเกิดบริเวณด้านบนของ
 ระหว่างช่องว่างเสาเข็ม โดยมีแรงต้านทานเท่ากับ
 ด้านทานแรงเฉือนของดิน

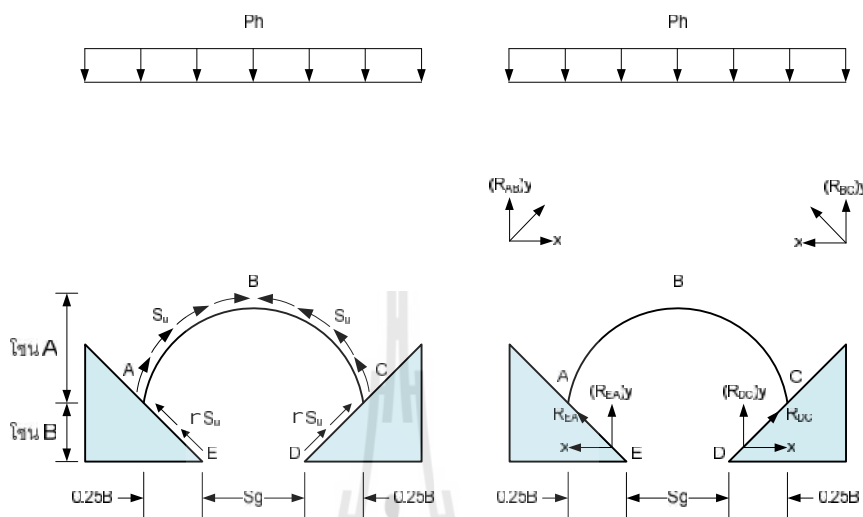


4.27

FM1

free-body diagram ของระนาบแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้

4.28



4.28 free body diagram

ส่วนโค้ง AB BC (A)

$$\text{Arch AB and BC} = \frac{f}{2} \left(\frac{B}{4} + \frac{S_g}{2} \right)$$

$$= f \left(\frac{B + 2S_g}{8} \right)$$

(4.9)

วิเคราะห์แรงลัพธ์ต่อหนึ่งด้าน โดยใช้สมการความสมดุลของแรงในแนวแกน y ลัพธ์

$$R_{AB} = R_{BC} = S_u f \left(\frac{B + 2S_g}{8} \right) \tag{4.10}$$

$$(R_{AB})_y = (R_{BC})_y = \frac{f}{\sqrt{2}} S_u \left(\frac{B + 2S_g}{8} \right) \tag{4.11}$$

ความยาวส่วนโค้ง EA DC (B)

$$EA \text{ and } DC = \sqrt{\left(\frac{B}{4}\right)^2 + \left(\frac{B}{4}\right)^2}$$

$$EA \text{ and } DC = \sqrt{2} \cdot \left(\frac{B}{4}\right) \quad (4.12)$$

$$R_{EA} \text{ and } R_{DC} = rS_u \cdot \sqrt{2} \cdot \left(\frac{B}{4}\right)$$

$$(R_{EA})_y \text{ and } (R_{DC})_y = rS_u \cdot \left(\frac{B}{4}\right) \quad (4.13)$$

วิเคราะห์แรงดันดินวิบัติต่อความกว้างข อาร์ค โดยใช้สมการความสมดุลใน
y เฉพาะบริเวณช่องเปิด เนื่องจากบริเวณแบบจำลองเสาเข็มเป็น
ฐานรองรับจึงเกิดการรับแรงที่มากกระทำไว้ทั้งหมดและเสาเข็มแกร่งมาก (rigid)

จากแรงดันดินด้านข้าง แนวการไหล ACDE
ด้านข้างกระจายแรงทำให้ดินเสียรูปนั้น ความต้านทานแรงเฉือนพยายามที่จะรักษาสภาพให้อยู่ใน
ตำแหน่งเดิม โดยใช้ส่วนที่ติดกับ โครงสร้างเป็นจุดรองรับ เกิดโครงสร้างรับแรงขึ้น เพราะฉะนั้น
การวิเคราะห์ถึงระนาบแรงเฉือนจึงต้องนำส่วนของระนาบแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมาวิเคราะห์ด้วย ดังนี้

$$P_h \cdot S_g = 2[(R_{AB})_y + (R_{EA})_y] \quad (4.14)$$

$$= 2 \left[\frac{Su \cdot f}{\sqrt{2}} \left(\frac{B + 2S_g}{8} \right) + rS_u \left(\frac{B}{4} \right) \right]$$

$$= S_u \left[\frac{f}{\sqrt{2}} \left(\frac{B + 2S_g}{4} \right) + r \left(\frac{B}{2} \right) \right]$$

$$\frac{P_h}{S_u} = \frac{1}{(S_g / B)} \left[\frac{f}{4\sqrt{2}} [1 + 2(S_g / B)] + \frac{r}{2} \right] \quad (4.15)$$

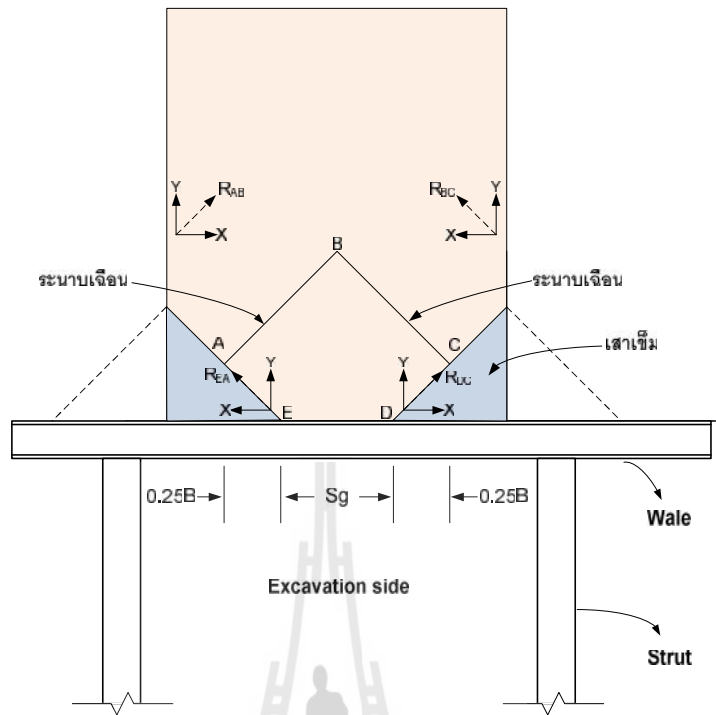
S_g	ระยะห่างระหว่างผิวถึงผิวเสาเข็ม
B	ขนาดความกว้างเสาเข็มรูปตัวไอ
S_u	คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ
c	คือ เฟลคเตอร์ซีดเกาะระหว่างผิวของเสาเข็มกับดิน
P_h	แรงดันดินด้านข้าง

4.6.2 (wedge failure mechanism) FM2

ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองใช้ระนาบการวิบัติที่เสนอไว้โดยวินิตย์และคณะ,2553
เสนอว่าดินตัวอย่างเกิดการวิบัติเป็นรูปสามเหลี่ยม แต่ในงานวิจัยนี้จะให้
รอยเลื่อนที่เป็นส่วนของเส้นตรงเริ่มเคลื่อนตัวจากด้านหน้าแบบจำลองที่ตำแหน่ง $1/4$ เท่าของ
กว้างเสาเข็ม จากทั้งสองข้างจนเคลื่อนตัวมาบรรจบกัน เกิดแรงเฉือนลัพธ์ทำมุม 45°
มาประยุกต์ใช้เป็นกลไกการวิบัติ

หน้าตัดรูปตัวแอล 4.29





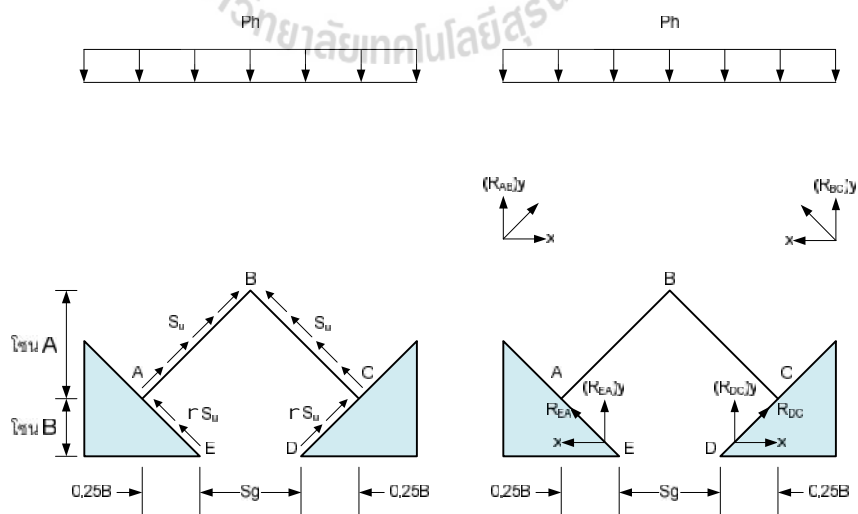
4.29

FM2

ประยุกต์จาก (ชัย, 2553)

free-body diagram

ที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 4.30



4.30 free body diagram

ด้าน AB BC

$$\begin{aligned} \text{Arch AB and BC} &= \sqrt{\left(\frac{B+2S_g}{4}\right)^2 + \left(\frac{B+2S_g}{4}\right)^2} \\ &= \sqrt{2}\left(\frac{B+2S_g}{4}\right) \end{aligned} \quad (4.16)$$

วิเคราะห์แรงลัพธ์ต่อหนึ่งด้าน โดยใช้สมการความสมดุลของแรงใน y
ในการหาแรงลัพธ์ที่เกิดขึ้น

$$R_{AB} = R_{BC} = S_u \left[\sqrt{2} \left(\frac{B+2S_g}{4} \right) \right] \quad (4.17)$$

$$(R_{AB})_y = (R_{BC})_y = S_u \left(\frac{B+2S_g}{4} \right) \quad (4.18)$$

วิเคราะห์แรงดันวิบัติต่อความกว้างของอาร์ค โดยใช้สมการความสมดุลใน y
เฉพาะบริเวณช่องเปิด เนื่องจากบริเวณแบบจำลองเสาเข็มเป็น
ฐานรองรับจึงเกิดการรับแรงที่มากกระทำไว้ทั้งหมดและเสาเข็มแกร่งมาก (rigid)

จากแรงดันดินด้านข้าง แนวการไหลเกิดขึ้นตลอดแนว ACDE

ด้านข้างกระจายแรงทำให้ดิน ความต้านทานแรงเฉือนพยายามที่จะรักษาสภาพให้อยู่ใน
ตำแหน่งเดิมโดยใช้ส่วนที่ติดกับโครงสร้างเป็นจุดรองรับ เกิดโครงสร้างรับแรงขึ้น เพราะฉะนั้น
การวิเคราะห์ถึงระนาบแรงเฉือนจึงต้องนำส่วนของระนาบแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมาวิเคราะห์ด้วย ดังนี้

$$P_h \cdot S_g = 2[(R_{AB})_y + (R_{EA})_y] \quad (4.19)$$

$$= 2 \left[S_u \left(\frac{B+2S_g}{4} \right) + r S_u \left(\frac{B}{4} \right) \right]$$

$$= S_u \left[\left(\frac{B + 2S_g}{2} \right) + r S_u \left(\frac{B}{2} \right) \right]$$

$$\frac{P_h}{S_u} = \left[\frac{(1+r) + 2(S_g/B)}{2(S_g/B)} \right]$$

$$\frac{P_h}{S_u} = \left[\frac{(1+r)}{2(S_g/B)} + 1 \right] \quad (4.20)$$

S_g คือ ระยะห่างระหว่างผิวถึงผิวเสาเข็ม

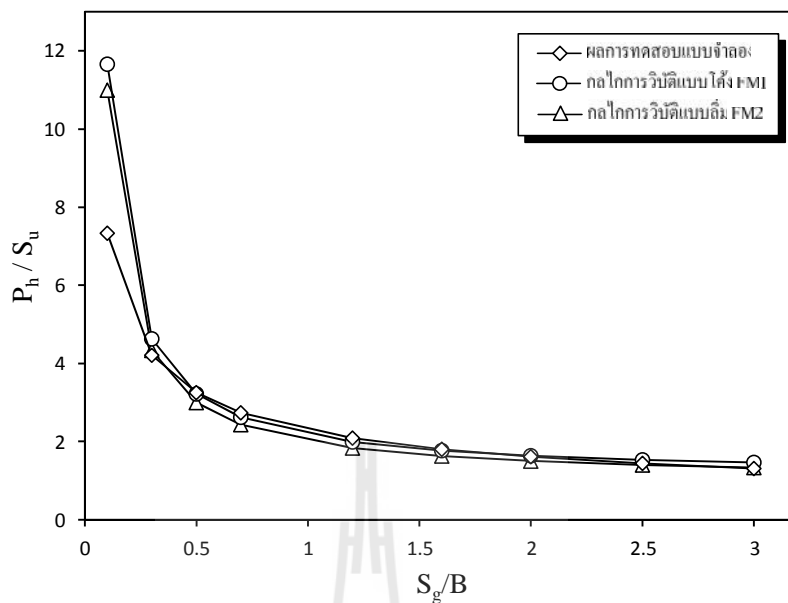
B คือ ขนาดความกว้างเสาเข็มรูปตัวไอ

S_u คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ร

r คือ เฟคเตอร์รีดเกาะระหว่างผิวของเสาเข็มกับดิน

P_h คือ แรงดันดินด้านข้าง

	4.31	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง P_h/S_u ต่อ S_g/B		
4.15	4.20	พบว่ากลไกวิบัติ	FM1	FM2
4.15	4.20	ให้ค่า P_h/S_u ไกล่ได้		



4.31

4.31 อีกกว่า ทดลองการวิบัติรูป
ให้ค่าอัตราส่วน P_h / S_u ที่ใกล้เคียงกันมาก ผู้วิจัยจึงเลือก
ว่า

โค้ง

4.15



บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากผลการศึกษาวิจัยสรุปได้ดังนี้

1) กรณีของเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่องรูปตัวแอล กำลังต้านทานต่อแรงกดในทอม P_h / S_u ที่ได้จากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพ โดยใช้ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนแบบคงสภาพคุณภาพสูง แปรผกผันกับอัตราส่วนระหว่างช่องว่างระหว่างเสาเข็มต่อความกว้างของเสาเข็ม S_g / B โดยมีความสัมพันธ์อยู่ในรูปไฮเพอร์โบล่าดังสมการ โดยมี $r^2 = 0.9757$

$$\frac{P_h}{S_u} = 2.2881 \left(\frac{S_g}{B} \right)^{-0.508}$$

จากกลไกการวิบัติที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพสามารถนำมาสร้างสมการรูปแบบปิดได้ โดยเมื่อใช้กลไกการวิบัติแบบโค้ง FM1 สมการรูปแบบปิดจะได้เป็น

$$\frac{P_h}{S_u} = \frac{1}{(S_g/B)} \left[\frac{f}{4\sqrt{2}} [1 + 2(S_g/B)] + \frac{r}{2} \right]$$

และหากสมการที่สร้างขึ้นโดยใช้กลไกการการวิบัติแบบลิ้มรูปสามเหลี่ยม (FM2) ตามรูปแบบเสาเข็มกลมเป็น

$$\frac{P_h}{S_u} = \left[\frac{(1+r)}{2(S_g/B)} + 1 \right]$$

2) เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบจำลองของเข็มแอลกับผลการทดสอบโดยวินิตซ์ และคณะ (2553) พบว่า ค่า P_h / S_u ที่ได้จากการทดสอบในงานวิจัยนี้จะให้ค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จาก

การคำนวณสมการที่ 2.1 ทั้งหมด โดยช่วงแรกที่ S_g / B ตั้งแต่ 0.1 ถึง 1.0 ค่า P_h / S_u จะต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัด แต่หลังจากที่ S_g / B ตั้งแต่ 1.2 – 3.0 ค่า P_h / S_u จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก

3) รูปแบบการวิบัติที่สังเกตได้เมื่อตัวอย่างทดสอบถูกกดจนวิบัติจะเป็นรอยแตกในดินที่มีแนวโน้มเป็นอาร์คซึ่งสอดคล้องกับกลไกการวิบัติที่เสนอโดยประจิด และยังพบว่าเกิดอาร์คขึ้นสองบริเวณ คือบริเวณเหนือเสาเข็มและบริเวณช่องว่างระหว่างเสาเข็ม แต่ไม่พบแนวการวิบัติที่เลื่อนผ่านอาร์คลงมาซึ่งได้เสนอไว้ในทฤษฎีของประจิด (2539)

4) การเคลื่อนตัวของดินพบว่า การเคลื่อนตัวจะเคลื่อนที่ออกจากช่องว่างระหว่างเสาเข็ม โดยการเคลื่อนตัวมากที่สุดที่บริเวณช่องว่างระหว่างแบบจำลองเสาเข็ม และที่บริเวณด้านบนของแบบจำลองเสาเข็มจะมีการเคลื่อนตัวน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับด้านบนของช่องเปิด โดยบริเวณที่มีการเคลื่อนตัวน้อยจะเกิดการบีบอัดตัวของดินด้านหน้าเสาเข็มทำให้เกิดรอยแยกของดิน ส่วนที่อยู่ใต้แนวรอยแยกจะหลุดออกมาได้ ส่วนที่อยู่ด้านบนรอยแยกจะรวมตัวกันเป็นสะพานรูปอาร์ค รับแรงดันดินได้

5) จากกลไกวิบัติเป็นรูปครึ่งวงกลมเหนือแบบจำลองเสาเข็มที่ได้เสนอไว้ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบทางกายภาพพบว่าให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมากที่สุดที่ S_g / B ตั้งแต่ 0.3 ถึง 3.0

6) เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานแรงดันดินวิบัติที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองกายภาพในงานวิจัยนี้ของเสาเข็มทั้งสามรูปแบบ พบว่าค่ากำลังต้านทานแรงดันดินวิบัติ เรียงจากสูงไปต่ำ ได้แก่ เสาเข็มรูปตัวไอ, เสาเข็มรูปวงกลมและเสาเข็มรูปตัวแอล ตามลำดับ โดยกราฟมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน

7) การก่อสร้างกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องหน้าตัดรูปตัวแอลนั้น จำเป็นต้องเลือกใช้อัตราส่วนระยะห่างของเสาเข็ม S_g / B อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ซึ่งส่วนมากมักนิยมให้ค่า S_g / B ที่ 0.5 ถึง 1.0 มาใช้ในการออกแบบ และพิจารณาจากรูปที่ 4.31 แล้วพบว่า ค่า S_g / B ที่ใกล้เคียงกันระหว่างการทดสอบแบบจำลองกายภาพกับที่ได้จากการคำนวณจากสมการ 4.8 นั้น ที่ S_g / B ตั้งแต่ 0.3 ถึง 3.0 จะให้ค่า P_h / S_u ที่ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นช่วงดังกล่าวจึงครอบคลุมกับช่วงที่นิยมใช้ในการออกแบบ ดังนั้น ผลการทดสอบทางกายภาพและกลไกการวิบัติที่เสนอในงานวิจัยนี้จึงอยู่ในช่วงที่ปลอดภัยในการออกแบบ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาต่อในอนาคตแนะนำให้ศึกษาในลักษณะของเสาเข็มรูปแบบอื่นๆของกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องและอาจศึกษาการเคลื่อนตัวเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับวิธีการวิเคราะห์แบบไฟไนท์อิเลเมนต์ เพื่อขยายผลการทดสอบให้สามารถนำไปใช้ในการทำนายพฤติกรรมของกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องรูปแบบอื่นๆ ต่อไป



รายการอ้างอิง

- ขนาดล คงสมบุญ และ ประสพศิริ แสงภู (2547). การใช้เทคนิคภาพถ่ายในการศึกษาทางวิศวกรรมฐานราก. การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 9. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
- ธีรศักดิ์ สีนาท (2555). อิทธิพลของระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่อกำลังต้านทานการไหลของดินระหว่างเสาเข็มรูปตัวไอในชั้นดินเหนียวอ่อนมาก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- บริษัท ฟุจิ โฟโต้ ฟิล์ม (ประเทศไทย) จำกัด. 2552. รู้จักกล้อง ตอนที่ 10 : ปัญหาที่พบได้ทั่วไปในภาพถ่าย [Online]. available : <http://www.fujifilm.co.th/forum/archive/index.php?t-8958.html>
- ประจิด จิรปภา (2536). การใช้เข็มเจาะหล่อในที่เรียงต่อเนื่องเป็นกำแพงกันดินในงานชุดห้องใต้ดินลึกมากในกรุงเทพฯ. การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2536 . วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. 66 – 78
- ประจิด จิรปภา (2539). กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องกับงานก่อสร้างใต้ดินในกรุงเทพฯ. การประชุมสัมมนาทางวิชาการเรื่อง "งานก่อสร้างใต้ดิน 39". 36-54
- ประสพศิริ แสงภู (2546). การศึกษาพฤติกรรมการโค้งของแนวแรงในดินทรายระหว่างเสาเข็มเมื่อรับแรงส่งผ่านในแนวราบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- วิชัย สัจวรปทานกุล (2540). วิสัยรับแรงรูดด้านข้างของผนังเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง. การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 4. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยและสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- วินิตย์ แหมา (2553). อิทธิพลของระยะห่างต่อกำลังรับแรงทางข้างของกำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องสำหรับงานชุดห้องใต้ดินลึก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- Atkinson, J.H., Brown, E.T. and Potts, D.M. (1975). Collapse of Shallow Unlined Tunnels in Dense Sand. **Tunnels and Tunneling**, Vol. 7, No 3, 81-87.

- Bastien Chevalier, Gael Combe and Pascal Villard. (2007). Load transfers and arching effects in granular soil layer, **18^{eme} Congres Francais de Mecanique**, Grenoble 27 – 31 about 2007
- Einstein, H.H., C.W. Schwartz, W. Steiner, M.M. Baligh, and R.E. Levitt. (1980). Improved Design for Tunnel Supports. **Analysis Method and Ground Structure Behavior**, Vol.II, MIT, DOT-05-60136.
- Evans, C.H. (1983). **An Examination of Arching in Granular Soils**, M.S. Thesis, MIT.
- Hidetoshi Kohashi, Kazushi Furumoto and Saiichi Sakajo, (2008). Arching effect base Low Improvement ratio Cement Column method. **The International seminar on bast practice in soft ground omprovement**. Thailand.
- Jamshed, Akhtar and Danish, (1975). In Situ and Laboratory Permeability of Bangkok Clay at Nong Ngoo Hao and Rangsit. M.Eng Thesis .No. 765, AIT. Thailand.
- J.P.North Lewis and G.H.A Lyons, (1975). Contiguous bored piles. London: Institution of Civil Engineers, 189 – 194.
- Sergge Leroueil, Jean – Pillerre Magnan, Francois Tavenas, (1990) **Embankment on soft clays**, Ellis horwood limited, England, 67-69
- Terzaghi, K (1943). **Theoretical Soil Mechanics**, John Wiley and Sons, New York, pp. 66-76

ประวัติผู้เขียน

นายวราวุธ ไชยสุข เกิดเมื่อวันที่ 8 กรกฎาคม พ.ศ. 2533 ที่อำเภอภูผินารายณ์ จังหวัดกาฬสินธุ์ เริ่มการศึกษาระดับอนุบาลถึงประถมที่โรงเรียนนาโกวิทวิทยาสง และสำเร็จการศึกษา ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจาก โรงเรียนบัวขาว อำเภอภูผินารายณ์ จังหวัดกาฬสินธุ์ ในปีการศึกษา 2551 ภายหลังได้เข้าศึกษาต่อปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2555 ระหว่างที่ทำการศึกษาในระดับปริญญาตรีในภาคการเรียนสุดท้ายได้ร่วมสหกิจศึกษา กับ บริษัท SWT จำกัด เป็นระยะเวลา 4 เดือน จากนั้นสมัครเข้าศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษาในสาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยระหว่างศึกษาระดับปริญญาโทมีประสบการณ์สอนเป็นผู้ช่วยสอนปฏิบัติการแลปปฐพีกลศาสตร์ ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจทางด้านปฐพีกลศาสตร์ ซึ่งช่วยให้ผู้วิจัยได้ความรู้และประสบการณ์จากการเป็นผู้ช่วยสอน มาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยได้เป็นอย่างดี

