

อิทธิพลของระยะห่างต่อกำลังรับแรงทางข้าง
ของกำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องสำหรับงานชุดห้องใต้ดินลึก

นายวินิตย์ แหมา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2553

**INFLUENCE OF PILE SPACING ON LATERAL
RESISTANCE OF CONTIGUOUS BORED
PILE WALL FOR DEEP EXCAVATION**

Winit Haema

**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 2010**

อิทธิพลของระยะห่างต่อกำลังรับแรงทางข้างของกำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง
สำหรับงานชุดห้องใต้ดินลึก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.พรพจน์ ตันเส็ง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วินิตย์ แหมา : อิทธิพลของระยะห่างต่อกำลังรับแรงทางข้างของกำแพงเสาเข็มเจาะเรียง
ต่อเนื่องสำหรับงานขุดห้องใต้ดินลึก (INFLUENCE OF PILE SPACING ON LATERAL
RESISTANCE OF CONTIGUOUS BORED PILE WALL FOR DEEP EXCAVATION)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ตันเส็ง, 87 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนออิทธิพลของช่องว่างระหว่างเสาเข็มต่อกำลังรับแรงทางข้าง
ของกำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง ในการวิจัยได้จำลองเสาเข็มในเครื่องมือทดสอบเพื่อจำลอง
สภาพเมื่อกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องรับแรงดันดินด้านข้างในสถานะไม่ระบายน้ำ โดยให้มีระยะ
ช่องว่าง (s_g) ระหว่าง 10 ถึง 50 เซนติเมตร ซึ่งในการออกแบบโดยทั่วไปมักจะใช้ระยะช่องว่าง
เท่ากับ 10 เซนติเมตร งานวิจัยนี้จะทำการทดสอบโดยแปรผันอัตราส่วนระยะห่างระหว่างเสาเข็ม
ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (s_g/d) เท่ากับ 0.1 0.3 0.5 0.7 1.2 1.6 2.0 2.5 และ 3.0 ตัวอย่างดิน
จะเป็นดินเหนียวอ่อนแบบคงสภาพคุณภาพสูง ที่ได้จากการขุดเปิดหน้าดินเพื่อเก็บตัวอย่าง
ขนาดใหญ่ที่ระดับความลึกต่าง ๆ และได้ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน ทดสอบกำลังรับแรงอัด
แกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) การทดสอบได้พิจารณาแบบจำลองทางกายภาพ
แบบความเครียดในระนาบ (Plane strain) และออกแรงกระทำต่อดินจนกระทั่งเกิดการวิบัติของดิน
ในแบบจำลองอย่างสมบูรณ์ โดยในการทดสอบจะได้ตรวจสอบการเคลื่อนตัวของดินโดยใช้เทคนิค
การถ่ายภาพเชิงซ้อนควบคู่กันไปด้วย

จากผลการทดสอบสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน s_g/d ต่อ P_h/S_u โดย
ผลจากแบบจำลองทางกายภาพให้ค่าสูงกว่าแนวคิดที่เสนอ (ประจิด จิรปภา, 2539) ทุกอัตราส่วน
และมีแนวโน้มของความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับผลการทดสอบทางไฟไนท์อิเลเมนต์ ผลการ
วิเคราะห์ภาพถ่ายในขณะที่ทดสอบทำให้พบ ช่วงการวิบัติ 2 ช่วง คือ ช่วงเริ่มต้น เป็นช่วงพัฒนาของ
แนวโค้งรับแรง (Arching effect) เกิดขึ้นขณะที่แรงประมาณ 30-80% ของแรงกดประลัย เมื่อเพิ่ม
แรงต่อจะพบช่วงสุดท้าย ณ จุดวิบัติเป็นช่วงที่แนวโค้งรับแรง (Arching effect) ถึงขีดสุดและ
ไม่สามารถรับแรงต่อไปได้อีก จากกลไกการวิบัติสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ได้ซึ่งให้ผล
ใกล้เคียงกับผลการทดสอบทางกายภาพ

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2553

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

WINIT HAEMA : INFLUENCE OF PILE SPACING ON LATERAL
RESISTANCE OF CONTIGUOUS BORED PILE WALL FOR DEEP
EXCAVATION. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. PORNPOT
TANSENG, Ph.D., 87 PP.

CONTIGUOUS PILE WALL/BORED PILE/GAP SPACING/DEEP EXCAVATION/
ARCHING EFFECT/FINITE ELEMENT ANALYSIS/PHYSICAL MODEL TEST/
SOFT CLAY

This thesis presents influence of pile spacing on lateral resistance of contiguous bored pile wall. Soil arching formed between gaps is considered to be a major influence on resistance of horizontal earth pressure. In current practice, as a rule of thumb, gap between piles is normally 10 centimeters. However, using of this gap size is not often economic. In this research, the effect of wider gap size of between contiguous bored pile wall is studied with the reduced scale model. The ratio of spacing per diameter (s_g / d) of 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.2, 1.6, 2.0, 2.5 and 3.0 is used. High quality of fresh undisturbed natural soil samples are used in the physical model. The soil sample in the model is loaded until ultimate stage. During testing, the digital photograph of soil movement is recorded and used to define failure mode of soil between piles.

The test results shows that the normalized ultimate soil resistance (P_h / S_u) reduces hyperbolically as the normalized gap (s_g / d) increases. The ultimate soil resistance obtained from physical model test is higher than that obtained with the existing theoretical equation. The arching in the physical model can be clearly

observed when the shear band is formed. Failure mechanism is separate into two stages; firstly, at 30 to 80 percent of the ultimate pressure, the arching is formed. Secondly, at ultimate pressure, the shear bands are propagate deep into the sample. From the observed shear band, the new failure mechanism is propped for prediction the ultimate soil resistance between contiguous bore pile. The predicted ultimate resistance, with the proposed mechanism, agrees well with the physical test results. The simulation of the physical test with finite element also agree well with the field test results. The slightly reduced Poisson's ratio is more appropriate than the theoretical value due to slightly changing in volume during extruding of the soil in the test.

School of Civil Engineering

Academic Year 2010

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ต้นเส็ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้การอบรม สั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือในการทำการศึกษาค้นคว้า ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไข วิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการเขียน และช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ กรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์

คุณไพบุลย์ เบญจประกายรัตน์ ผู้จัดการโครงการ บริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวล็อปเม้นท์ จำกัด(มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทำการวิจัย

บุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยนี้

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ตลอดจนส่งเสริมการศึกษา และให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

วินิตย์ แหมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ปรัชญาวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ระบบกำแพงกันดินในงานขุดดินลึก.....	4
2.1.1 ระบบกำแพงแบบยึดหุ่น.....	4
2.1.2 ระบบกำแพงแบบแครง.....	5
2.2 กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง.....	5
2.3 กำแพงเสาเข็มเจาะหล่อในที่เรียงต่อเนื่อง.....	7
2.4 การก่อสร้างกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องในอดีต.....	9
2.4.1 บันทึกเกี่ยวกับการใช้เสาเข็มเรียงต่อเนื่องในกรุงเทพฯ.....	9
2.4.2 บันทึกการก่อสร้างอาคารสมเด็จพระเทพรัตน์.....	10
2.5 ปัญหาที่พบในระบบกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง.....	10
2.5.1 กรณีเรื่องน้ำไหลซึมขณะขุดดิน.....	11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.2	กรณีเรื่องดินไหลออกขณะขุดดิน.....	11
2.6	ข้อดีและข้อด้อยของเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง.....	12
2.6.1	ประโยชน์การใช้งาน.....	12
2.6.2	การเคลื่อนตัวของดินรอบข้าง.....	12
2.6.3	ราคาและระยะเวลาในการก่อสร้าง.....	12
2.6.4	ขอบเขตจำกัดอื่น ๆ.....	12
2.7	วิธีการก่อสร้างกำแพงเสาเข็มเจาะหล่อในที่เรียงต่อเนื่อง.....	12
2.8	การออกแบบระยะห่างระหว่างเข็มหน้าตัดทรงกลม.....	16
2.9	พฤติกรรมแนวโค้งรับแรง (Archig effect).....	23
2.10	การวิเคราะห์แบบจำลองทางกายภาพด้วยวิธีไฟไนต์อิลเมนต์.....	37
2.10.1	การกำหนดลักษณะของปัญหา.....	38
2.10.2	ลักษณะของอิลเมนต์.....	38
2.10.3	แบบจำลองพฤติกรรมสำหรับดิน.....	38
2.10.4	ค่าพัวซอง.....	39
2.10.5	ลักษณะของการวิเคราะห์ปัญหา.....	40
2.11	ลักษณะของตัวอย่างดิน.....	40
2.11.1	ตัวอย่างดินคงสภาพ.....	40
2.11.2	ตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพ.....	40
3	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	41
3.1	บทนำ.....	41
3.2	การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่าง.....	42
3.3	แหล่งดินที่นำมาทดสอบ.....	42
3.4	วิธีการเก็บตัวอย่างดิน.....	44
3.5	ความยาวของระยะห่างระหว่างเสาเข็ม.....	46
3.6	วิธีเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน.....	47

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7 การทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบ.....	51
3.8 การบันทึกภาพการเคลื่อนตัว.....	52
3.9 การทดสอบหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน.....	53
3.10 การทดสอบด้วยวิธีไฟในท้อเลเมนต์.....	54
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	55
4.1 ลักษณะชั้นดินของโครงการ.....	55
4.2 ผลการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ.....	57
4.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบทางกายภาพกับทฤษฎีประจิด.....	58
4.4 กลไกการวิบัติของดินจากการทดสอบ.....	58
4.5 แนวคิดกลไกการวิบัติ.....	63
4.6 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างดินกับคอนกรีตในแบบจำลองทางกายภาพ.....	67
4.7 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟในท้อเลเมนต์.....	68
4.8 ค่าพิวชอง.....	72
4.9 การเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพกับทฤษฎีต่าง ๆ.....	73
5 บทสรุป.....	75
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	75
5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยต่อไป.....	76
รายการอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	79
ประวัติผู้เขียน.....	87

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	บันทึกการก่อสร้างกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องในกรุงเทพฯ.....10
2.2	กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง ขนาดทั่วไปของหน้าตัดเข็ม และระยะห่างช่องว่าง.....17
2.3	แสดงค่าอัตราส่วนฟังก์ชันของดิน (Bowles J.E., 1996).....39
3.1	แสดงขนาดของเสาเข็มและระยะห่างที่ใช้ในการจำลอง.....46
4.1	แสดงคุณสมบัติของดินที่ใช้ทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ.....55
4.2	แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....68
4.3	แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบทางกายภาพและ FEM.....69

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แสดงลักษณะของกำแพงเสาเข็มเจาะหล่อในที่เรียงต่อเนื่อง.....2
2.1	งานขุดดิน โดยใช้ระบบกำแพงกันดินแบบเข็มพืดเหล็ก.....4
2.2	งานขุดดิน โดยใช้ระบบกำแพงกันดินแบบเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง.....5
2.3	การใช้กำแพงเสาเข็มไม่เรียงต่อเนื่องในอดีต.....6
2.4	ลักษณะของกำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง.....7
2.5	กำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง.....8
2.6	Contiguous pile อุโมงค์ลอดทางแยกเกษตร (อรรถสิทธิ์ และคณะ, 2551).....9
2.7	ลักษณะของดินที่ไหลออกตามซอกเข็ม.....11
2.8	การกำหนดตำแหน่งของเสาเข็มเจาะ.....13
2.9	แสดงการลงปลอกเหล็กกันดินชั่วคราว.....13
2.10	แสดงการเจาะดินออกจากหลุม.....14
2.11	แสดงการลงเหล็กเสริม.....14
2.12	การเทคอนกรีตเสาเข็มเจาะ.....15
2.13	การดึงปลอกเหล็กกันดินชั่วคราวออก.....15
2.14	กำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องเมื่อเสร็จสมบูรณ์.....16
2.15	หน้าตัดเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง.....16
2.16	แสดงสะพานดินระหว่างซอกเข็มสำหรับเข็มกลม.....18
2.17	แสดงรูปตัดแนว 1-1 ของรูปที่ 2.16.....19
2.18	เสาเข็มแฉวยในตำแหน่งที่เกิด plastic deformation ในดิน.....20
2.19	สถานะของ plastic deformation ในดินรอบ ๆ เสาเข็ม.....21
2.20	แสดงรูปภาพการเคลื่อนตัวของมวลดินเมื่อถูกปิดกั้นบางส่วนด้วย เสาเข็มเว้นระยะในกรณีทดสอบที่ $S/D = 4$22
2.21	วิสัยรับแรงธารของผนังเสาเข็มหน้าตัดกลม.....23
2.22	อุปกรณ์ทดสอบแบบจำลองอุโมงค์ (Atkinson et al., 1975).....24
2.23	ภาพถ่ายแบบจำลองจาก radiograph (Atkinson et al., 1975).....25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 การวิบัติเริ่มต้นของแบบจำลองอุโมงค์ (Atkinson et al., 1975).....	26
2.25 การวิบัติสุดท้ายของแบบจำลองอุโมงค์ (Atkinson et al., 1975).....	27
2.26 ผลจากการทดสอบแบบจำลองอุโมงค์ (Atkinson et al., 1975).....	28
2.27 ทฤษฎีพลาสติก ระบายไถลรอบวงกลมที่มีแรงเสียดทาน.....	29
2.28 การคาดเดาระนาบแรงเฉือนรอบวงกลม Heuer and Hendron.....	29
2.29 Active Arching การเคลื่อนตัวใต้แรงดัน Ps เมื่อโครงสร้างถูกแรงอัด มากกว่าดินรอบข้าง (Einstein, 1983).....	31
2.30 แสดงสถานะ Active Arching (Einstein, 1983).....	32
2.31 Passive Arching การเคลื่อนตัวใต้แรงดัน Ps เมื่อโครงสร้างถูกแรงอัด น้อยกว่าดินรอบข้าง (Einstein, 1983).....	32
2.32 แสดงสถานะ Active Arching (Einstein, 1983).....	33
2.33 พฤติกรรมทั่วไปของดิน Active Arching (Evans, 1983).....	33
2.34 ทิศทางหน่วยแรงหลัก Active Arching (Evans, 1983).....	34
2.35 พฤติกรรมทั่วไปของดิน Passive Arching (Evans, 1983).....	34
2.36 ทิศทางหน่วยแรงหลัก Passive Arching (Evans, 1983).....	35
2.37 การปรับปรุงดินโดยวิธีทั่วไป.....	35
2.38 ระบายแรงเฉือนเหนือเสาเข็มดินซีเมนต์และการทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน.....	36
2.39 การเกิด Arcing Effect บนหัวเสาเข็มดินซีเมนต์.....	37
2.40 ลักษณะของ Nodal point สำหรับอิลเมนต์ของดิน.....	38
3.1 ลักษณะของตำแหน่ง contiguous pile wall ในโครงการก่อสร้าง.....	41
3.2 แสดงรูปตัดของบ่อขุดแนว A-A.....	43
3.3 ผลการเจาะสำรวจดินของโครงการก่อสร้าง.....	43
3.4 แสดงตำแหน่งเก็บตัวอย่างจากการขุดเปิดหน้าดิน.....	44
3.5 การจำลองเพียงครั้งหนึ่งเนื่องจากตั้งอย่างมีความสมมาตร.....	45
3.6 แสดงอุปกรณ์เก็บดินตัวอย่างคงสภาพ.....	47
3.7 แสดงการเก็บดินตัวอย่างคงสภาพแบบก้อน.....	47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 แสดงการเจาะดินเพื่อติดตั้งแบบจำลองเสาเข็ม	48
3.9 แสดงการประกอบดินตัวอย่างกับแบบทดสอบ	49
3.10 แสดงการติดตั้งเครื่องหมายเพื่อบันทึกการเคลื่อนตัว	49
3.11 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบและตัวอย่างเข้าด้วยกัน	50
3.12 แสดงการติดตั้งกล้องถ่ายภาพเพื่อบันทึกการเคลื่อนตัว	51
3.13 แสดงลำดับเส้นการกำหนดเครื่องหมายเพื่อบันทึกภาพ	53
4.1 ผลการเจาะสำรวจดินเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของดินที่ใช้ในการวิจัย	56
4.2 ผลการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ	57
4.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบทางกายภาพกับผลทางทฤษฎีในปัจจุบัน	58
4.4 แสดงภาพการเคลื่อนตัวภายในของตัวอย่างทดสอบที่มี $S_g/d = 0.5$ (เมื่อพิจารณาจากจุดเริ่มต้นถึงจุดวิบัติ)	59
4.5 แสดงภาพถ่ายรอยแตกสุดท้าย (Final crack) ที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบ ขนาด $S_g/d = 0.5$	50
4.6 แสดงภาพร่างรอยแตกสุดท้าย (Final crack) ที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบ ขนาด $S_g/d = 0.5$	61
4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับการเคลื่อนตัวของดินตัวอย่าง	62
4.8 แสดงรอยแตกเริ่มต้น (First crack) และรอยแตกสุดท้าย (Final crack) ของขนาด $S_g/d = 0.5$	62
4.9 แสดงรอยแตกเริ่มต้น (First crack) และรอยแตกสุดท้าย (Final crack) ของขนาด $S_g/d = 0.7$	63
4.10 แสดงรอยแตกเริ่มต้น (First crack) และรอยแตกสุดท้าย (Final crack) ของขนาด $S_g/d = 1.2$	63
4.11 แนวคิดกลไกการวิบัติที่เกิดจากการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ	64
4.12 Free body diagram ของระนาบการวิบัติ	65
4.13 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับแนวคิดการวิบัติ	67
4.14 แสดงผลการทดสอบการหาค่าแรงเฉือนโดยตรง	68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15	แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบทางกายภาพกับ FEM.....69
4.16	แสดงผลการเปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวจากผลการทดสอบทางกายภาพ กับ FEM ในตัวอย่างทดสอบขนาด $S_g/d = 0.5$ เส้นที่ 5.....70
4.17	แสดงเส้นชั้นการเคลื่อนตัวที่ 25% ในตัวอย่างทดสอบ $s_g / d = 0.5$71
4.18	แสดงเส้นชั้นการเคลื่อนตัวที่ 95% ในตัวอย่างทดสอบ $s_g / d = 0.5$71
4.19	แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนปัวซอง ที่ขนาด $s_g / d = 0.1$72
4.20	แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนปัวซอง ที่ขนาด $s_g / d = 0.3$73
4.21	แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนปัวซอง ที่ขนาด $s_g / d = 0.5$73
4.22	แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ.....74

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ϕ	=	มุมเสียดทานของดิน
c	=	หน่วยแรงยึดเกาะ
S_u	=	กำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน
E	=	Young's Modulus
P_h	=	แรงต้านแรงดันดิน
s_g	=	ระยะห่างระหว่างผิวถึงผิวเสาเข็ม
s_c	=	ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์กลางเสาเข็ม
d	=	เส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม
α	=	สัมประสิทธิ์การเกาะตัวระหว่างดินกับผิวเสาเข็ม
r	=	รัศมีของแบบจำลองเสาเข็ม
γ	=	หน่วยน้ำหนักของดิน
ν	=	Poisson ratio
LL	=	Liquid Limit
PL	=	Plastic Limit
PI	=	Plastic Index

บทที่ 1

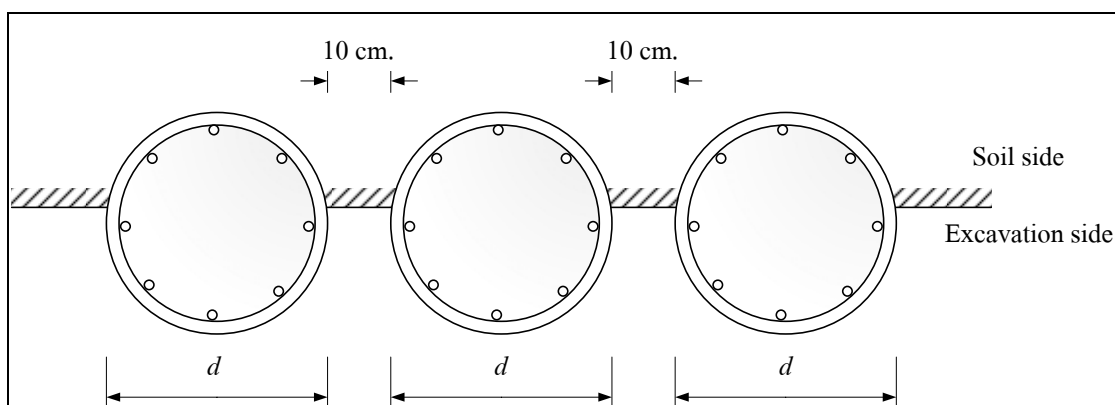
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันระบบกำแพงเสาเข็มเจาะหล่อในที่เรียงต่อเนื่อง (Contiguous bored pile wall) เป็นระบบกำแพงกันดินที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างห้องใต้ดินลึก เนื่องจากระบบกำแพงกันดินชนิดนี้ใช้เทคนิคการก่อสร้างเหมือนกับเสาเข็มเจาะธรรมดา สามารถก่อสร้างในพื้นที่จำกัดได้ ราคาค่าก่อสร้างถูกกว่าระบบกำแพงแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ (Diaphragm wall) และลดการ โกง แอนของโครงสร้างกันดินได้ดีกว่าเสาเข็มพืดเหล็ก (Steel sheet pile) (ประสพศิริ แสงภู, 2546) ในอดีตกรุงเทพมหานครเคยใช้เสาเข็มไม้ตอกเรียงกันเป็นแนวต่อเนื่องล้อมรอบบริเวณที่ต้องการขุดดิน แต่เนื่องจากไม้มีความยาวจำกัด ความแกร่ง (Stiffness) ของไม้ต่ำจึงทำให้ไม่สามารถขุดลึกได้ (ประจิด จีรปภา, 2539)

การออกแบบระบบกำแพงเสาเข็มเจาะหล่อในที่เรียงต่อเนื่อง (Contiguous bored pile wall) โดยทั่วไปจะใช้หลักการทางสถิตยศาสตร์และปฐพีกลศาสตร์ในการวิเคราะห์ โดยการตั้งสมมติฐานกลไกการวิบัติขึ้นมา เพื่อวิเคราะห์หาแรงต้านทานต่อแรงดันดินด้านข้าง โดยอาศัยระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดพฤติกรรมแนวโค้งรับแรง (Arching effect) ในดิน ปัจจุบันนิยมใช้ขนาดช่องว่างระหว่างเสาเข็มเท่ากับ 10 เซนติเมตรเพียงขนาดเดียว จึงทำให้ใช้เสาเข็มเจาะในปริมาณมาก เพื่อเป็นการลดจำนวนของเสาเข็มเจาะและศึกษาพฤติกรรมแนวโค้งรับแรง (Arching effect) ที่เกิดขึ้น จึงมีการศึกษาเกี่ยวกับระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่ระยะต่าง ๆ ในแบบจำลองทางกายภาพ

ขณะที่เริ่มงานวิจัยนี้ยังไม่มีผู้ใดทำการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกายภาพของกำแพงกันดินชนิดนี้ งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาพฤติกรรมของดินระหว่างเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องเชิงกายภาพ โดยการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพคุณภาพสูงมาทำการศึกษาพฤติกรรมแนวโค้งรับแรง (Arching Effect) ระหว่างช่องว่าง (Gap) ของกำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง (Contiguous pile wall) โดยที่มีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางเสาเข็มแตกต่างกัน การเก็บตัวอย่างดินจะเก็บขณะที่มีการขุดเปิดหน้าดินลงไปในแต่ละชั้นความลึกทำให้ได้ดินที่คงสภาพคุณภาพสูงมาทดสอบและนำค่าที่ได้จากการทดสอบทางกายภาพมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับแนวคิดที่เสนอ (ประจิด จีรปภา, 2539) และวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 1.1 แสดงลักษณะของกำแพงเสาเข็มเจาะหล่อในที่เรียงต่อเนื่อง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของระยะห่างระหว่างเสาเข็มของกำแพงเสาเข็มเจาะหล่อในที่เรียงต่อเนื่องต่อพฤติกรรมแนวโค้งรับแรง (Arching effect) ของดินระหว่างช่องว่างโดยที่มีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางเสาเข็มแตกต่างกัน

2) เพื่อนำผลการศึกษามาใช้เป็นแนวทางปรับปรุงการออกแบบและวิเคราะห์ระบบกำแพงกันดินเพื่อป้องกันผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียงให้มีความเหมาะสมทางด้านความปลอดภัยและความประหยัด

3) เพื่อเป็นการศึกษาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพกับแบบจำลองด้วยวิธีทางไฟไนต์อิเลเมนต์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างเสาเข็มของกำแพงเสาเข็มเจาะหล่อในที่เรียงต่อเนื่อง (Contiguous bored pile wall) ดังนั้นจึงทดสอบเฉพาะเสาเข็มคอนกรีตที่มีหน้าตัดเป็นวงกลมเท่านั้น เพื่อศึกษาพฤติกรรมของดินต่อระยะห่างระหว่างเสาเข็มโดยสร้างแบบจำลองทางกายภาพย่อส่วน และเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพคุณภาพสูง โดยการขุดเปิดหน้าดินและเก็บตัวอย่างขึ้นมาที่ความลึกต่าง ๆ เพื่อทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลตามวัตถุประสงค์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้ทราบถึงพฤติกรรมของดินเมื่อมีระยะห่างของจุดศูนย์กลางของเสาเข็มแตกต่างกัน
- 2) สามารถใช้ผลที่ได้จากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพมาปรับปรุงวิธีการออกแบบระยะห่างระหว่างเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องเพื่อให้ปลอดภัยและประหยัด

บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรมวิจัย

2.1 ระบบกำแพงกันดินในงานขุดดินลึก

ระบบกำแพงกันดินป้องกันการพังทลายของงานขุดดินสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทคือ ระบบกำแพงแบบยืดหยุ่น (Flexible wall) และระบบกำแพงแบบแข็ง (Rigid wall)

2.1.1 ระบบกำแพงแบบยืดหยุ่น (Flexible Wall)

ระบบกำแพงแบบนี้ได้แก่ ระบบเข็มพืด (Sheet pile) มีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กยาว กว้างประมาณ 30 ถึง 50 เซนติเมตร ใช้เป็นโครงสร้างชั่วคราวสำหรับโครงสร้างกันดิน เช่น งานวางท่อน้ำ งานโครงสร้างใต้ดิน และงานโครงสร้างกันดิน แต่กำแพงชนิดนี้เป็นแผ่นเหล็กที่มีความหนาไม่มากหากใช้เป็นโครงสร้างกันดินในงานขุดดินที่มีความลึกมากหรือใช้เป็นโครงสร้างกัน การเคลื่อนตัวของอาคารข้างเคียงที่มีขนาดใหญ่ อาจจะก่อให้เกิดการเสีรูปของเข็มพืดและส่งผลให้ เกิดการเคลื่อนตัวของดินอย่างมาก เนื่องจากกำแพงชนิดนี้มีค่าสติเฟนส์ต่ำ ดังนั้นจึงทำให้เกิด ปริมาณการเคลื่อนตัวของกำแพงค่อนข้างสูง โดยทั่วไปนิยมใช้มากเนื่องจากการก่อสร้างทำได้ง่าย รวดเร็ว ราคาถูก โดยจัดเป็นโครงสร้างชั่วคราว (Temporary structure) ทำการถอนออกเมื่อก่อสร้าง เสร็จแล้วสามารถนำกลับไปใช้ได้อีก



รูปที่ 2.1 งานขุดดิน โดยใช้ระบบกำแพงกันดินแบบเข็มพืดเหล็ก

2.1.2 ระบบกำแพงแบบแข็ง (Rigid Wall)

ระบบกำแพงกันดินชนิดนี้จะมีความแข็งแรงกว่าระบบเข็มพืด ทำให้ผลการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงมีค่าน้อย (ไม่เกิน 5 เซนติเมตรถ้ามีการขุดเป็นไปอย่างถูกต้อง) ระบบกำแพงกันดินชนิดนี้สามารถก่อสร้างเป็นโครงสร้างถาวร (Permanent structure) ได้ โดยค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างจะมีราคาสูงกว่าระบบกำแพงแบบยืดหยุ่น (Flexible wall) ระบบกำแพงกันดินแบบแข็ง (Rigid wall) ได้แก่ Diaphragm Wall, Secant Pile Wall และ Contiguous Pile Wall เป็นต้น



รูปที่ 2.2 งานขุดดินโดยใช้ระบบกำแพงกันดินแบบเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง

2.2 กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (Contiguous Pile Wall)

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

ประจित จีรปภา (2536) กล่าวว่ากำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (Contiguous pile wall) เคยใช้ก่อสร้างในประเทศไทย โดยใช้เสาเข็มไม้แต่ยังไม่มีความทันสมัยและปลอดภัย การก่อสร้างก็นำเสาเข็มมาทำเป็นแนวเรียงต่อเนื่องกันล้อมรอบบริเวณที่ต้องการขุดดิน จากนั้นติดตั้งค้ำยันภายในเพื่อทำการขุดหรือบริเวณที่ต้องการป้องกันการพังทลายของดิน อดีตในกรุงเทพมหานคร การขุดดินส่วนมากจะใช้เสาเข็มไม้ตอกเรียงกัน โดยเสาเข็มไม้มีความยาว 4 เมตร ถึง 12 เมตร ขึ้นกับความลึกที่จะขุด แต่เนื่องจากเสาเข็มไม้มีความยาวจำกัด กำลังของไม้ไม่สูงมากทำให้ขุดลึกมากไม่ได้

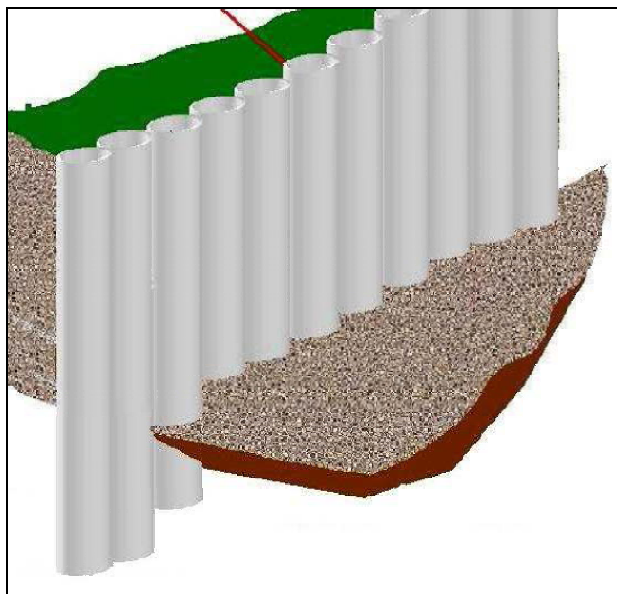
รวมถึงราคาไม้มีราคาสูงและหายาก จึงไม่เป็นที่นิยม กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องมีขั้นตอนการก่อสร้างเหมือนกับการตอกเสาเข็มไม้เรียงกันแต่จะเปลี่ยนจากไม้เป็นเสาเข็มชนิดต่าง ๆ เช่น เสาเข็มเจาะคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ เสาเข็มหน้าตัดสี่เหลี่ยมคอนกรีตหล่อสำเร็จ เสาเข็มคอนกรีตหน้าตัดรูปตัว I และ เสาเข็มเหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปตัว I การก่อสร้างจะเรียงเป็นแถวโดยจะทำการเว้นระยะระหว่างเสาเข็มอยู่ที่ 50 มิลลิเมตร ถึง 150 มิลลิเมตร ดังนั้นโครงสร้างกันดินนี้จึงไม่สามารถกันน้ำได้ ทั่วไปจะใช้ในดินเหนียวซึ่งมีอัตราการซึมผ่าน (Permeability) ต่ำ

ประจิด จีร์ปภา (2539) กล่าวว่ากำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (Contiguous pile wall) ถูกใช้กับดินเม็ดหยาบหรือดินถม อัตราการซึมผ่าน (Permeability) ไม่มีปัญหาต่อระยะห่างระหว่างเสาเข็ม เพราะสามารถปรับความยาวช่องว่างระหว่างเข็มได้เพื่อป้องกันการพังทลายของดิน ความลึกมากที่สุดที่กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (Contiguous pile wall) สามารถก่อสร้างได้ประมาณ 34 ถึง 55 เมตร อย่างไรก็ตามความกว้างของระยะห่างระหว่างเสาเข็มของความลึกนี้สำคัญมาก เสาเข็มจะทำหน้าที่เป็นกำแพงกันดินโดยรับทั้งแรงเฉือนและโมเมนต์คดที่เกิดจากแรงดันดินด้านข้างทั้งป้องกันการอูด (Heave) ของกันบ่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว และระยะห่างระหว่างเสาเข็มแต่ละต้นจะขึ้นกับชนิดของดิน ความลึกในการขุด และระบบค้ำยันภายใน



รูปที่ 2.3 การใช้กำแพงเสาเข็มไม้เรียงต่อเนื่องในอดีต (wikimedia. เว็บไซต์)

กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (Contiguous pile wall) ที่ใช้มีเสาเข็มเจาะคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ เสาเข็มหน้าตัดสี่เหลี่ยมคอนกรีตหล่อสำเร็จ เสาเข็มคอนกรีตหน้าตัดรูปตัว I และเสาเข็มเหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปตัว I



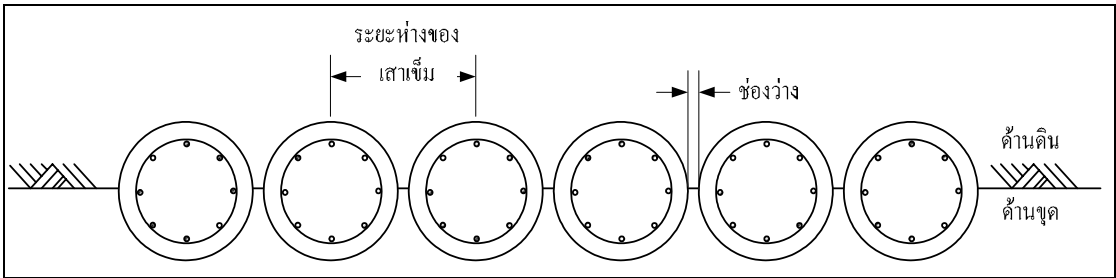
รูปที่ 2.4 ลักษณะของกำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง

2.3 กำแพงเสาเข็มเจาะหล่อในที่เรียงต่อเนื่อง (Contiguous bored piles wall)

ประวัติการก่อสร้างเสาเข็มเจาะหล่อในที่เรียงต่อเนื่อง (Contiguous in situ bored piles) ได้เริ่มนำมาใช้ครั้งแรกเมื่อ พ.ศ. 2534 ที่ถนนจันทน์ เขตยานนาวา กรุงเทพฯ ใช้เป็นกำแพงกันดินขุดดินลึก 15.5 เมตร ประจิด จิรัปปภา (2536) ในขณะนั้นราคาของเสาเข็มเจาะชนิดนี้จะมีราคาประมาณครึ่งหนึ่งของกำแพงแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ (Diaphragm Wall) เหตุผลในเรื่องนี้เป็นส่วนหนึ่งทำให้ระบบกันดินชนิดนี้ได้เกิดขึ้น

กำแพงเสาเข็มเจาะหล่อในที่เรียงต่อเนื่อง ลักษณะคือการก่อสร้างเสาเข็มเจาะหล่อในที่เรียงต่อกันตามแนวของกำแพงกันดิน หรือล้อมรอบบริเวณที่ขุดเปิดหน้าดินดังรูปที่ 2.5 การก่อสร้างจะใช้วิธีเดียวกับการก่อสร้างเสาเข็มเจาะทั่วไปโดยอาจใช้ปลอกเหล็ก (ถ้าจำเป็น) ขนาดช่องว่างระหว่างเสาเข็มสามารถปรับเปลี่ยนได้เพื่อความเหมาะสมกับสภาพหน้างานและสภาพดินในโครงการ โดยจะมีช่วงระยะห่างระหว่างผิวถึงผิวเสาเข็มเท่ากับ 50 ถึง 150 มิลลิเมตร ประจิด จิรัปปภา (2539) ความลึกมากที่สุดของการก่อสร้างกำแพงชนิดนี้จะขึ้นกับความยาวของก้านเจาะเสาเข็ม โดยปกติจะยาวสุดประมาณ 34 ถึง 55 เมตร ในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงค่ายอมให้ของ

ความเอียงจากแนวตั้ง เนื่องจากเสาเข็มอาจเอียงออกจากกันทำให้ระยะห่างของเสาเข็มเพิ่มขึ้นจนไม่สามารถยอมรับได้ หรืออีกกรณีหนึ่งคือเสาเข็มเอียงเข้าหากันทำให้เสาเข็มเหลื่อมเข้าไปในพื้นที่เสาเข็มอีกต้นทำให้เจาะไม่ได้ ในทางปฏิบัติจะไม่ใช่กำแพงเสาเข็มลึกเกินกว่า 25 เมตร แต่อาจออกแบบให้เสาเข็มบางต้นมีปลายลึกลงไปเพื่อใช้ต้านแรงกระทำในแนวตั้ง



รูปที่ 2.5 กำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง (Contiguous pile wall หรือ Tangent pile wall)

โดยทั่วไปเสาเข็มชนิดนี้จะถูกติดตั้งให้มีช่องว่างระหว่างเสาเข็มเท่ากับ 10 เซนติเมตร เพราะฉะนั้นการเกิดช่องว่างในโครงสร้างของกำแพงกันดิน ก็จะทำให้ดินได้รับอิทธิพลจากการขุดดิน ทางเลือกนี้เหมาะสมถ้าดินยังคงสภาพปกติหรือแน่น (ทั่วไปจะไม่ใช่ดินเม็ดหยาบ) และผลกระทบจากระดับน้ำใต้ดินด้านล่างที่ระดับการขุดลึกที่สุด การใช้กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (Contiguous pile wall) ในงานขุดดินกรุงเทพฯ ช่องว่างระหว่างเสาเข็มจะไม่มีการปิดกั้นซึ่งก็พบว่าใช้งานได้ดีไม่มีการรั่วไหลของดินและน้ำ จุดนี้เป็นเงื่อนไขสำคัญที่ทำให้ในอดีตไม่มีการใช้เสาเข็มในลักษณะนี้ และทำให้จำเป็นต้องใช้กำแพงกันดินชนิดอื่น เช่น เข็มพืดเหล็ก (Steel sheet pile) กำแพงแผ่นคอนกรีตหล่อในที่ (Diaphragm wall) กำแพงเสาเข็มเจาะซ้อน (Secant pile wall) ล้วนแล้วแต่เป็นวิธีการก่อสร้างที่ซับซ้อนและราคาค่าก่อสร้างสูงทั้งนั้น ถึงแม้ว่า เข็มพืดเหล็ก (Steel sheet pile) จะมีราคาค่าก่อสร้างที่ถูกกว่าแต่ความสามารถในการรับแรงดันดินก็น้อยกว่ากำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (Contiguous pile wall) ซึ่งมีวิธีการก่อสร้างที่ง่าย มีหลายวิธีการก่อสร้างสามารถทำงานในพื้นที่จำกัดได้ ไม่มีผลกระทบด้านแรงสั่นสะเทือน จึงคาดว่ากำแพงกันดินระบบนี้จะสามารถเข้ามาอยู่ในงานขุดดินอย่างกว้างขวางในอนาคต

ประสพศิริ แสงภู (2546) กล่าวถึงประโยชน์จากกำแพงกันดินระบบนี้มีข้อดีกว่าระบบกำแพงแผ่นคอนกรีตหล่อในที่โดยให้เหตุผลว่าเนื่องจากเทคนิคการก่อสร้างที่ง่ายกว่า ราคาค่าก่อสร้างต่ำกว่า และลดการ โกงแอนของโครงสร้างกันดินได้ดีกว่าระบบเสาเข็มพืด แต่พบว่าไม่เป็นที่ยอมรับเกิดจากความเชื่อมั่นในประสิทธิภาพ ขาดข้อมูลงานวิจัยที่เพียงพอ การเผยแพร่และ

ตัวอย่างการใช้งานจริงมีน้อย ระบบ โครงสร้างกันดินดังกล่าว อาศัยพฤติกรรมแนวโค้งรับแรง (Arching effect) คู่เสาเข็มโดยอาศัยระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่เหมาะสม กำลังต้านทานแรงเฉือน และสติเฟนสของดินเป็นปัจจัยสำคัญในการป้องกันการเคลื่อนตัวของดินผ่านระหว่างเสาเข็ม สำหรับตัวอย่างโครงการที่ใช้เสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องเป็นกำแพงกันดินได้แก่ โครงการก่อสร้าง อุโมงค์ลอดทางแยกเกษตร ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 Contiguous pile wall อุโมงค์ลอดทางแยกเกษตร (อรรถสิทธิ์ และคณะ, 2551)

2.4 การก่อสร้างกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องในอดีต

ลักษณะดินกรุงเทพมหานครส่วนบนเป็นดินเหนียวซึ่งการซึมน้ำต่ำมาก ทำให้สามารถใช้เสาเข็มเรียงต่อเนื่องได้โดยไม่มีปัญหาเรื่องน้ำ ทำให้สามารถเรียงเป็นกำแพงกันดินชั่วคราว ที่มีราคาถูก และทำได้ง่ายกว่ากำแพงกันดินชนิดอื่น

2.4.1 บันทึกเกี่ยวกับการใช้เสาเข็มเรียงต่อเนื่องในกรุงเทพฯ

ประจิด จีระปภา (2539) ได้บันทึกและรายงานเกี่ยวกับการใช้เสาเข็มเรียงต่อเนื่อง ชนิดต่าง ๆ เป็นกำแพงกันดินชั่วคราว และถาวรในกรุงเทพฯ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 บันทึกรากก่อสร้างกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องในกรุงเทพ

สถานที่	ชนิดเสาเข็ม	ขนาด (ม.)	ระยะห่าง C-C (m.)	Gap (m.)	จุดลึก (ม.)
ตรอกจันทร์	เข็มเจาะ	1.00 m dia.	1.10	0.10	15.50
สุริวงส์	เข็มเจาะ	1.00 m dia.	1.10	0.10	11.50
กิ่งแก้ว	เข็มเจาะ	0.40 m dia.	0.50	0.10	7.45
		0.40 m dia.	0.75	0.35	4.00
คลองถม	เข็มเจาะ	0.60 m dia.	0.70	0.10	6.00
คลองด่าน	เหล็กรูป H	WF300×300	0.45	0.15	4.25
ปทุมวัน	เหล็กรูป I	WF300×150	0.30	0	4.80
คลองจั่น	เหล็กรูป I	WF300×150	0.45	0.30	4.30
คลองถม	เหล็กรูป I	WF300×300	0.45	0.15	6.00
ศาลาแดง	เหล็กรูป H	WF300×300	0.45	0.15	8.70
ช.ศูนย์วิจัย	เข็ม คสล	0.35×0.35m	0.60	0.25	3.80

2.4.2 บันทึกรากก่อสร้างอาคารสมเด็จพระเทพรัตน์

อรรวินท์ อุบลเลิศ (2550) ได้บันทึกการก่อสร้างโครงการอาคารสมเด็จพระเทพรัตน์ คณะแพทยศาสตร์ โรงพยาบาลรามาธิบดี เป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 10 ชั้น มีชั้นใต้ดิน 3 ชั้น ที่ความลึก 8.10 เมตร ในการก่อสร้างมีการใช้ระบบกำแพงกันดินแบบ Contiguous bored pile wall ซึ่งใช้ระยะห่าง (s) เท่ากับ 1.10 เมตรมีปลายเสาเข็มอยู่ที่ความลึก 20 เมตร ซึ่งมีแนวของ Contiguous bored pile wall ล้อมรอบโครงการเพื่อกันดินบริเวณรอบโครงการพังทลายและเพื่อป้องกันความเสียหายของอาคารข้างเคียงเนื่องจากโครงการจำเป็นต้องขุดดินเพื่อทำที่จอดรถใต้ดินโครงการได้เลือกใช้ Contiguous bored pile wall เนื่องจากโครงการเป็นดินเหนียวที่มีการซึมผ่านต่ำมีความเหมาะสมที่จะเลือกใช้

2.5 ปัญหาที่พบในระบบกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง

ปัญหาที่สำคัญของระบบกำแพงกันดินชนิดนี้คือ ความทึบน้ำของกำแพง กำแพงชนิดนี้ จะไม่สามารถกั้นน้ำได้เนื่องจากมีช่องว่างอยู่ตรงกลางระหว่างเสาเข็ม โดยเสาเข็มจะมีขนาดตั้งแต่ 0.35 เมตร ถึง 1.20 เมตร ปัญหาในเรื่องดินและน้ำจะไหลออกจากช่องว่างระหว่างผิวเสาเข็มขึ้นอยู่กับ

กับปัจจัยต่าง ๆ และสภาพแวดล้อมรอบ ๆ บริเวณเขตก่อสร้าง ซึ่งเราสามารถแบ่งพิจารณาเป็น 2 กรณีได้ดังนี้

2.5.1 กรณีเรื่องน้ำไหลซึมขณะขุดดิน

ประจิด จีรปภา (2539) กล่าวว่าน้ำที่ไหลซึมออกมาขณะขุดดิน และไปชะนำพาให้ดินหลุดออกมาจนทำให้ดินบริเวณข้างเคียงทรุดหรือยุบลงจะไม่เกิดขึ้น เพราะไม่มีน้ำไหลแม้ว่าในดินจะมีปริมาณน้ำมากถึง 130 ถึง 140 เปอร์เซ็นต์ก็ตาม ทั้งนี้ความจริงแล้วไม่ใช่ น้ำดังกล่าวไม่ไหลมีการไหลเกิดขึ้น แต่อัตราการไหลช้ามาก โดยเฉพาะดินเหนียวกรุงเทพฯ มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำ (Coefficient of Permeability : K) ต่ำมาก คือประมาณ 10^{-8} ถึง 10^{-6} เซนติเมตรต่อวินาที

Jamshed et al. (1975) รายงานว่าดินบริเวณรังสิตและบริเวณหนองงูเห่า มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำมากในส่วนที่ตื้น และมีค่าน้อยในส่วนที่ลึกโดยทั่วไปแล้วค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำในระดับ 10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที ก็ถือว่าไม่ซึม (Impermeable) อัตราการไหลซึมของน้ำจะน้อยจนน้อยกว่าอัตราการระเหยในบรรยากาศ ผลก็คือส่วนที่สัมผัสกับอากาศจะแห้ง น้ำมีโอกาสไหลซึมได้บ้างในระดับตื้น ซึ่งจะไม่ใช่ในดินโดยตรงแต่จะเป็นน้ำใช้จากอาคารบ้านเรือนไหลจากท่อที่แตก หรือรางระบายน้ำ ผ่านลงไปดินถมหรือ ขยะ แล้วไหลออกตามซอกเข็ม

2.5.2 กรณีเรื่องดินไหลออกขณะขุดดิน

การไหลทลายของดินระหว่างเสาเข็มนั้นจะเกิดขึ้นได้แต่อยู่ในระดับที่ควบคุมได้ ประจิด จีรปภา (2539) ได้มีการออกแบบระยะห่างระหว่างเสาเข็มซึ่งระยะห่างระหว่างเสาเข็มนี้จะขึ้นอยู่กับขนาด และรูปร่างหน้าตัดของเสาเข็ม แรงดันดินด้านข้างและกำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน



รูปที่ 2.7 ลักษณะของดินที่ไหลออกตามซอกเข็ม

2.6 ข้อดีและข้อด้อยของเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง

ถ้านำกำแพงกันดินเสาเข็มเรียงต่อเนื่องชนิดต่าง ๆ มาเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยกันแล้ว ต้องพิจารณาถึงเรื่องประโยชน์การใช้งาน การเคลื่อนตัวของดินหรือความปลอดภัยในการขุด ราคา และระยะเวลาในการก่อสร้างและของซีเมนต์จกัคอย่างอื่นซึ่งเราสามารถวิจารณ์เปรียบเทียบเป็นลำดับ ดังนี้

2.6.1 ประโยชน์การใช้งาน

หมายถึง ประโยชน์ในการใช้งานเป็นกำแพงกันดินทั้งชั่วคราวและถาวร ประโยชน์ในการนำกลับมาใช้ซ้ำหลายครั้งหรือดัดแปลงใช้งานชนิดอื่น เช่น เข็มเหล็กรูป H หรือ I สามารถใช้เป็นคาน้ำยันหรือเสาได้เมื่อถูกตัดสั้น ๆ ก็ยังใช้ประโยชน์อื่น ๆ ได้ ในขณะที่กำแพงเสาเข็มคอนกรีตหล่อในที่หรือกำแพงเสาเข็มคอนกรีตตอกจะใช้ประโยชน์ได้คนเดียว คือเป็นกำแพงกันดินชั่วคราวหรือถาวรเท่านั้น และเมื่อใช้เป็นกำแพงถาวรก็จะมีน้ำหนักมากซึ่งไปเพิ่มภาระแก่ฐานราก

2.6.2 การเคลื่อนตัวของดินรอบข้าง

เสาเข็มคอนกรีตจะมีการเคลื่อนตัวน้อยเพราะมีความแกร่ง ในขณะที่เสาเข็มเหล็กหน้าตัดรูปตัว H หรือ I อาจจะทำให้ความแข็งแรงมาก แต่การถอนกลับมาใช้ทำให้ดินรอบข้างมีโอกาสเคลื่อนตัวมากกว่า

2.6.3 ราคาและระยะเวลาในการก่อสร้าง

ทั่วไปแล้วเสาเข็มเจาะมักจะมากกว่าทั้งด้านราคาและเวลา แต่เสาเข็มเหล็กก็จะแพงกว่าถ้าไม่สามารถถอนกลับมาได้

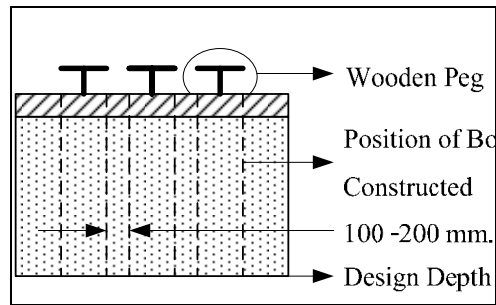
2.6.4 ขอบเขตจำกัดอื่น ๆ

เสาเข็มตอก หรือเสาเข็มเหล็กซึ่งต้องใช้การเขย่าลงจะมีแรงสั่นสะเทือนทำให้มีปัญหาข้างเคียง และเสาเข็มเหล่านี้อาจมีข้อจำกัดเรื่องความลึกด้วยเพราะยิ่งลึกมากการตอกก็ยากขึ้นแรงสั่นสะเทือนก็มากขึ้นการถอนกลับก็ยิ่งยากขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากดินกรุงเทพในส่วนที่อยู่ลึกจะเป็นดินที่แข็งมาก ยากแก่การตอกเสาเข็ม

2.7 วิธีการก่อสร้างกำแพงเสาเข็มเจาะหล่อในที่เรียงต่อเนื่อง

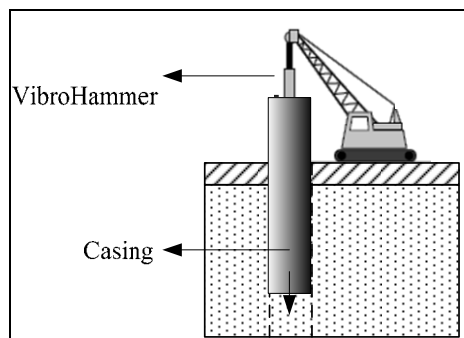
ขั้นตอนการก่อสร้างสามารถก่อสร้างได้ทั้งระบบแห้งและระบบเปียกขึ้นอยู่กับสภาพชั้นดิน และ ขนาดความยาวของเสาเข็ม โดยมีรายละเอียดในการก่อสร้างดังนี้

- กำหนดตำแหน่งของหลุมเจาะ โดยใช้หมุดกำหนดจุดที่กึ่งกลางของเสาเข็ม วางตำแหน่งโดยให้ระยะห่างระหว่างเสาเข็มห่างกันเท่ากับ 10 ถึง 20 เซนติเมตร



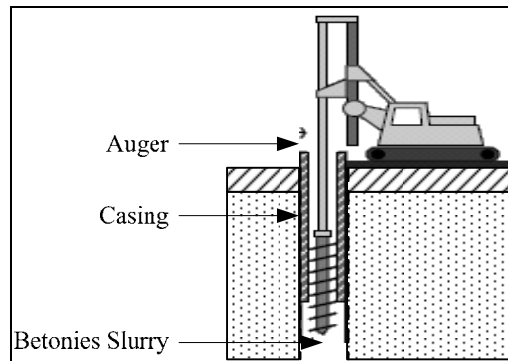
รูปที่ 2.8 การกำหนดตำแหน่งของเสาเข็มเจาะ

การลงปลอกเหล็กชั่วคราวกันดินอ่อน ปลอกเหล็กชั่วคราวกันดินพังที่ใช้ต้องมีความยาวลึกเพียงพอที่จะป้องกันชั้นดินอ่อน โดยปลาย ปลอกเหล็กต้องยาวถึงระดับบนของชั้นดินแข็งและปลอกเหล็กที่ตกลงไปต้องอยู่ในตำแหน่งที่กำหนด และได้ดังตามรายการปลอกเหล็กนอกจากจะเป็นตัวป้องกันดินอ่อนแล้วยังเป็นส่วนนำส่วนหัวเจาะให้เจาะได้ดังด้วย หากกดปลอกเอียงเสาเข็มก็จะเอียงด้วย



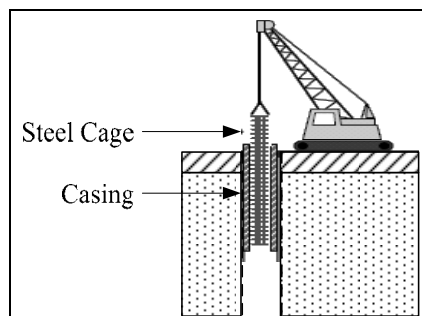
รูปที่ 2.9 แสดงการลงปลอกเหล็กกันดินชั่วคราว

การเจาะดินภายในปลอกเหล็กออก กระทำโดยใช้ส่วนเจาะดินเมื่อเจาะเกือบถึงระดับชั้นดินที่ไม่คงรูป ถ้าปลอกกันดินชั่วคราวยาวไม่พอกับความลึกที่ต้องการขุด จะใช้สารละลายเบนโทไนท์เติมลงไปในหลุมเจาะ เพื่อป้องกันการพังของหลุมเจาะแทนปลอกกันดินชั่วคราวในส่วนที่อยู่ต่ำกว่าปลอกกันดินชั่วคราว และสร้างแรงดันด้านทานแรงดันของชั้นดิน แล้วทำการเจาะดินภายใต้สารละลายเบนโทไนท์ เจาะหลุมเจาะด้วยเครื่องเจาะ โดยขุดดินออกจากปลอกกันดินชั่วคราว ดินที่อยู่รอบ ๆ หลุมเจาะจะเป็นตัวป้องกันปลอกกันดินชั่วคราว



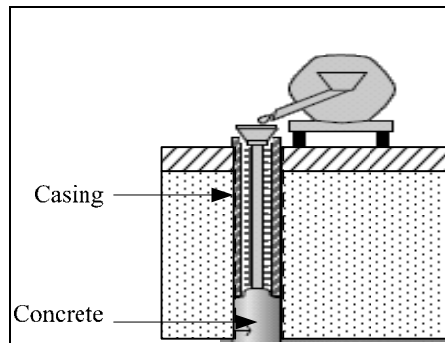
รูปที่ 2.10 แสดงการเจาะดินออกจากหลุม

การลงเหล็กเสริม ใช้เครนยกโครงเหล็กเสริมติดตั้งในหลุมเจาะ การติดตั้งโครงเหล็กเสริมเหล็กเสริมควรออกแบบให้มีความยาวตลอดทั้งต้น และโครงเหล็กเสริมต้องผูกให้แข็งแรง และมีระยะคอนกรีตหุ้ม 7.5 เซนติเมตร สำหรับเสาเข็มต้นที่มี Inclinator tube จะทำการผูกท่อไว้ที่ท่อนบนสุดแล้วทำการเติมน้ำปิดฝาให้แน่น



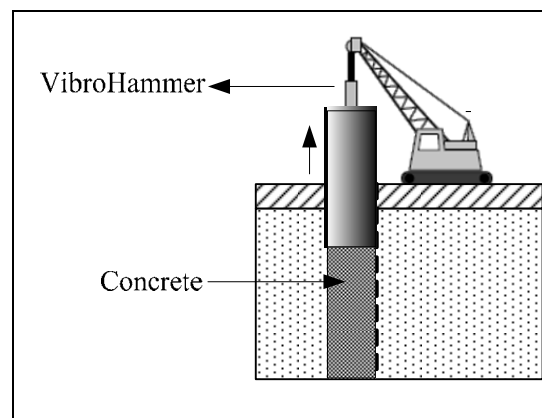
รูปที่ 2.11 แสดงการลงเหล็กเสริม

การเทคอนกรีตต้องทำการเทแบบเทได้น้ำ (Termie concrete) ก่อนทำการเทคอนกรีตชุดแรกลงไป ในท่อเท จะต้องวางตำแหน่งของปลายท่อเทให้ห่างจากก้นหลุมไม่เกิน 10 เซนติเมตร ใช้เม็ดโม่เทลงไปเพื่อกั้นระหว่างคอนกรีตกับสารละลายเบนโทไนท์ไม่ให้ผสมกัน เทคอนกรีตโดยปล่อยให้ไหลลงไปในหลุมเจาะ เมื่อเทคอนกรีตชุดแรกจนคอนกรีตไหลออกจากท่อหุ้มปลายท่อแล้ว จะต้องรักษาระดับปลายท่อให้ฝังอยู่ในคอนกรีตที่เทลงไว้ก่อนหน้าตลอดเวลา สารละลายเบนโทไนท์ที่ถูกแทนที่โดยคอนกรีตจะล้นออกมาจากปากหลุมจะถูกสูบกลับไปทำความสะอาดเพื่อปรับปรุงคุณภาพสำหรับการใช้งานซ้ำ



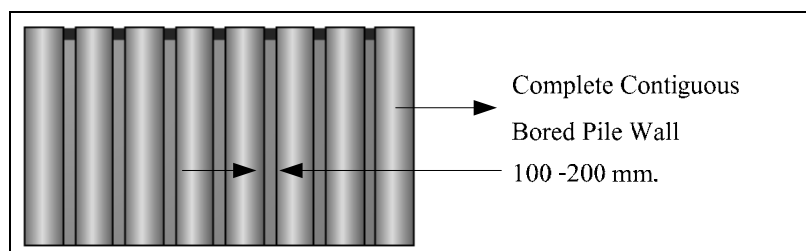
รูปที่ 2.12 การเทคอนกรีตเสาเข็มเจาะ

การถอนปลอกเหล็ก เมื่อเทคอนกรีตจนถึงระดับ Cut off เรียบร้อยแล้ว ให้ทำการถอนปลอกเหล็ก ออกโดยใช้เครื่องเขย่า (Vibro hammer) ดึงเขย่าปลอกเหล็ก (Casing) ขึ้นมาระดับหนึ่งแล้วถอด เครื่องเขย่า (Vibro hammer) ออกจากนั้นดึงปลอกเหล็ก (Casing) ออกโดยใช้เครนดึง เมื่อดึงปลอก เหล็ก (Casing) ออกอาจจะทำให้ดินบริเวณปากหลุมมีการยุบตัวลง จึงไม่ควรยื่นอยู่ใกล้ปากหลุม ขณะที่ยังดึงปลอกเหล็กออก



รูปที่ 2.13 การดึงปลอกเหล็กกันดินชั่วคราวออก

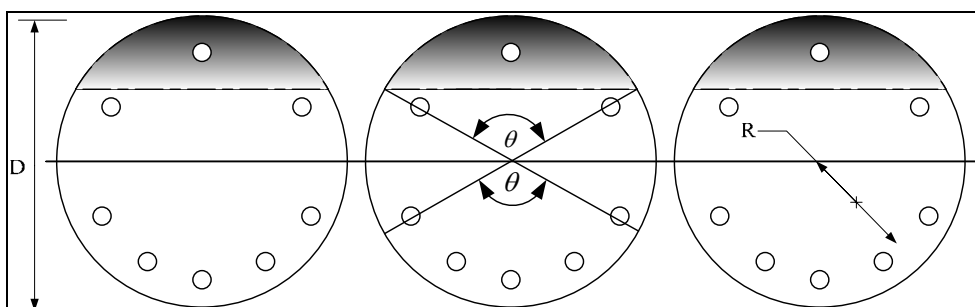
ทำซ้ำตามขั้นตอนทั้งหมดตามแนวความยาวของกำแพง หรือจนวนรอบบริเวณที่ต้องการขุด เปิดหน้าดินจนเสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 2.14 กำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องเมื่อเสร็จสมบูรณ์

2.8 การออกแบบระยะห่างระหว่างเข็มหน้าตัดทรงกลม

North, J.P., et al. (1975) กล่าวว่า การเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของกำแพงกันดิน โดยเสาเข็มเจาะหน้าตัดรูปทรงกลมจำเป็นที่จะต้องใช้เหล็กเสริมต่อเมตรมากกว่ากำแพงแบบ Diaphragm wall ในขณะที่มีการรับแรงต้านโมเมนต์เท่ากัน กำแพงเสาเข็มจะสามารถรับโมเมนต์มากที่สุดได้จากตำแหน่งการติดตั้งเหล็กเสริมและจำนวนเหล็กเสริม ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 หน้าตัดเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง (North, J.P., et al., 1975)

ณรงค์ ทักษณิพันธ์ และคณะ (2543) กล่าวว่า ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสำหรับ Diaphragm wall และ Contiguous bored pile ซึ่งเป็นกำแพงชนิดแรงแกร่งขึ้นอยู่กับ การออกแบบขนาด หน้าตัด และจำนวนค้ำยัน ซึ่งสามารถทำการออกแบบให้มี Stiffness ใกล้เคียงกันได้ เช่น การใช้ Diaphragm wall หนา 80 เซนติเมตร มี Stiffness ใกล้เคียงกับการใช้ สำหรับ Contiguous bored pile ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร เรียงกัน โดยมีระยะห่างประมาณ 1.1 เมตร แต่ทั้งนี้ การออกแบบระยะห่างของเสาเข็มแต่ละต้นสำหรับ Contiguous bored pile จะต้องคำนึงถึงพฤติกรรม Arching เพื่อป้องกันดินไหลและการรั่วซึมของน้ำใต้ดิน

กำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง ไม่เหมาะที่จะใช้กับชั้นดินเม็ดหยาบที่มีระดับน้ำใต้ดิน และมักจะใช้เป็นกำแพงกันดินชั่วคราวเท่านั้น ถ้าจะใช้กำแพงชนิดนี้เป็นกำแพงถาวรอาจจะใช้กำแพงโครงสร้างหล่อทับหน้าด้านบ่อขุดเพื่อปิดช่องว่างระหว่างเสาเข็ม และอาจจะมีการเชื่อมต่อเหล็กเข้ากับเสาเข็ม หรือใช้การพันคอนกรีตที่ทำให้อุดปิดช่องว่างระหว่างเสาเข็ม บริเวณกึ่งกลางเสาเข็ม ทำให้เกิดการยึดแน่นกับเสาเข็มและคอนกรีตที่ถูกพัน ขนาดและระยะห่างของเสาเข็มทั่วไปแสดงดังตารางที่ 2.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มที่ใหญ่กว่า 1200 มิลลิเมตรมักจะไม่ค่อยได้ใช้

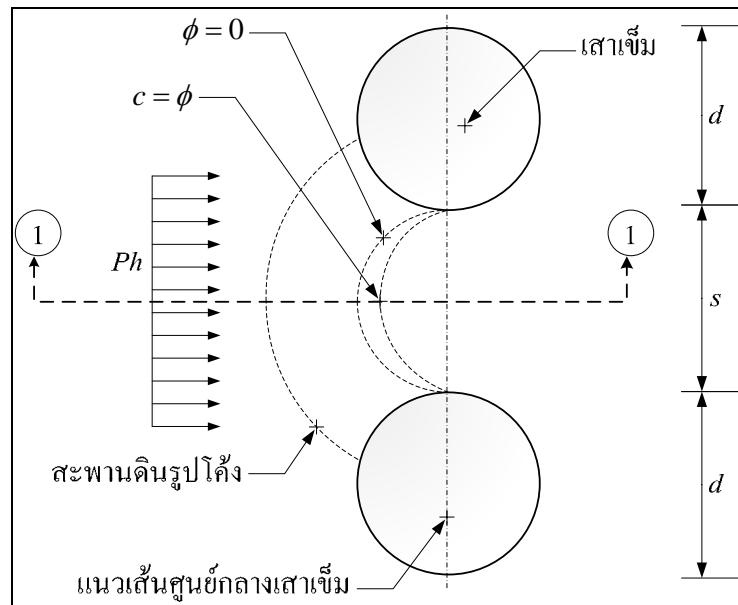
ตารางที่ 2.2 กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง ขนาดทั่วไปของหน้าตัดเข็มและระยะห่างช่องว่าง (Gaba, 2003)

Diameter mm.	Spacing mm.	Diameter mm.	Spacing mm.	Diameter mm.	Spacing mm.
300	400	900	1000	1800	1900
450	550	1050	1150	2100	2200
600	700	1200	1300	2400	2500
750	850	1500	1600		

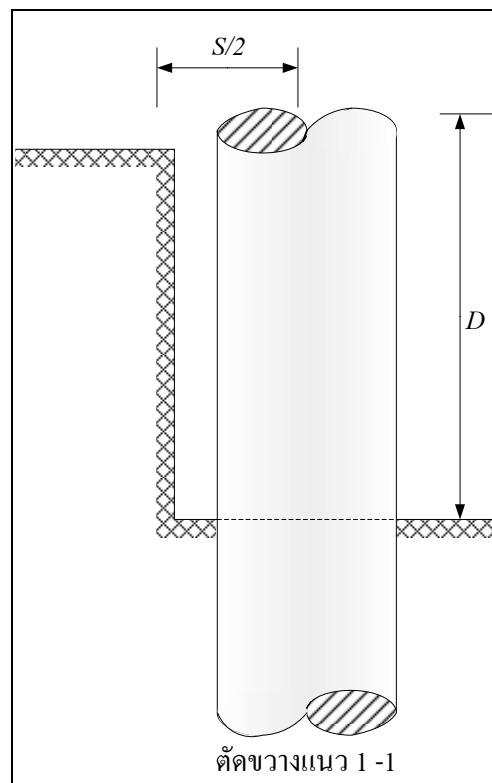
ประจิด จีรปภา (2539) เสนอว่าแรงดันดินที่มากกระทำซึ่งก็ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ความลึกที่ขุด ถ้าพิจารณาเข็ม 2 ต้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d ดังรูปที่ 2.16 และ รูปที่ 2.17 ดินส่วนที่จะหลุดออกมาจะเป็นส่วนที่อยู่ระหว่างเส้นโค้งอาร์ค กับแนวเส้นศูนย์กลางของเข็ม หากเป็นดินชนิดที่ ϕ เป็นศูนย์โค้งอาร์คนี้ก็จะเป็นส่วนของวงกลม มีรัศมี $s/2$ ที่สัมผัสผิวเข็มทั้งสองและมีศูนย์กลางอยู่ในแนวศูนย์กลางของเข็ม ดินที่อยู่เหนือโค้งอาร์คนี้ส่วนในจะเป็นส่วนที่ให้แรงดัน (P_h) กับอาร์ค ส่วนนอกจะเป็นส่วนที่รวมตัวกันเป็นสะพานรูปอาร์ค (Soil Arch Bridge) ในสถานะสมดุลที่สะพานรับแรงดันดินได้ ดินจะไม่ไหลออกมา จะมีหลายเฉพาในส่วนที่อยู่ใต้อาร์คเท่านั้น ดังนั้นจะเห็นว่าปริมาณดินส่วนที่จะไหลออกมานี้จะขึ้นกับสะพานรูปอาร์คนี้ และแรงดันดินที่มากกระทำซึ่งก็คือขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ($c - \phi$) ความลึกที่ขุด (d or P_h) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (d) และระยะระหว่างผิวของเสาเข็ม (s) ความสัมพันธ์ระหว่างแฟกเตอร์ต่าง ๆ แสดงดังสมการที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ของคุณสมบัติเหล่านี้กับกำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน ซึ่งสามารถนำไปคำนวณออกแบบระยะห่างของเสาเข็มได้

$$\frac{S_u}{P_h} = \frac{s}{\sqrt{\frac{d}{2}(d+s)}} \quad (2.1)$$

- เมื่อ d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม
 s คือ ระยะห่างผิวของเสาเข็ม
 S_u คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน
 P_h คือ แรงดันดินด้านข้าง



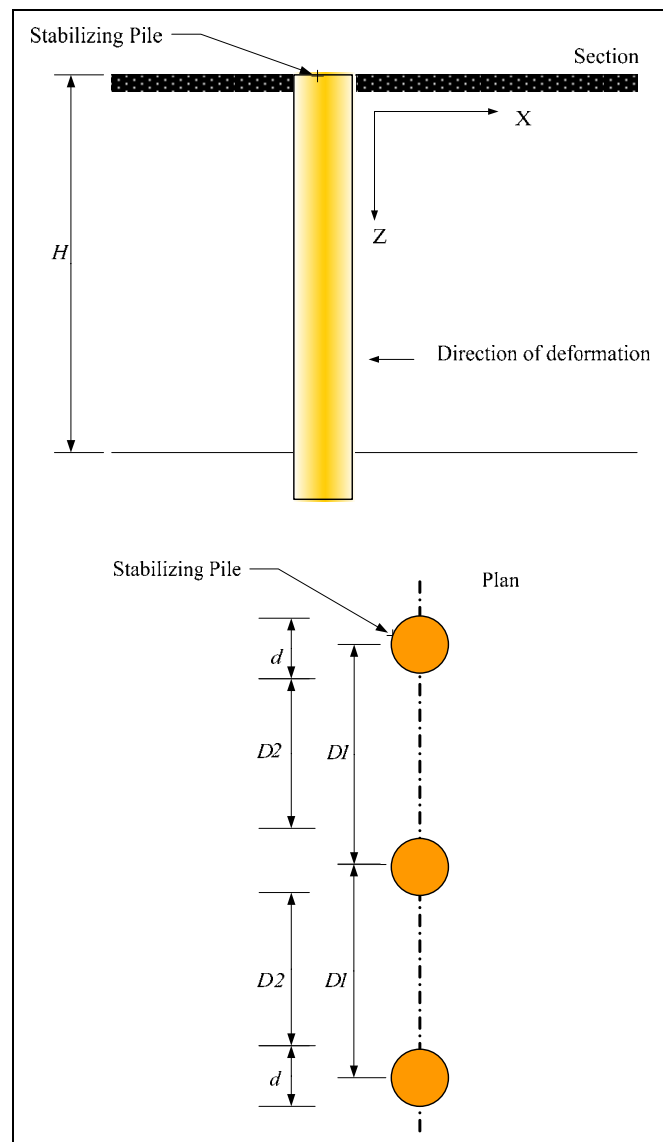
รูปที่ 2.16 แสดงสะพานดินระหว่างขอกเข็มสำหรับเข็มกลม (ประจิด จีรปภา, 2539)



รูปที่ 2.17 แสดงรูปตัดแนว 1-1 ของรูปที่ 2.16 (ประจิด จีรปภา, 2539)

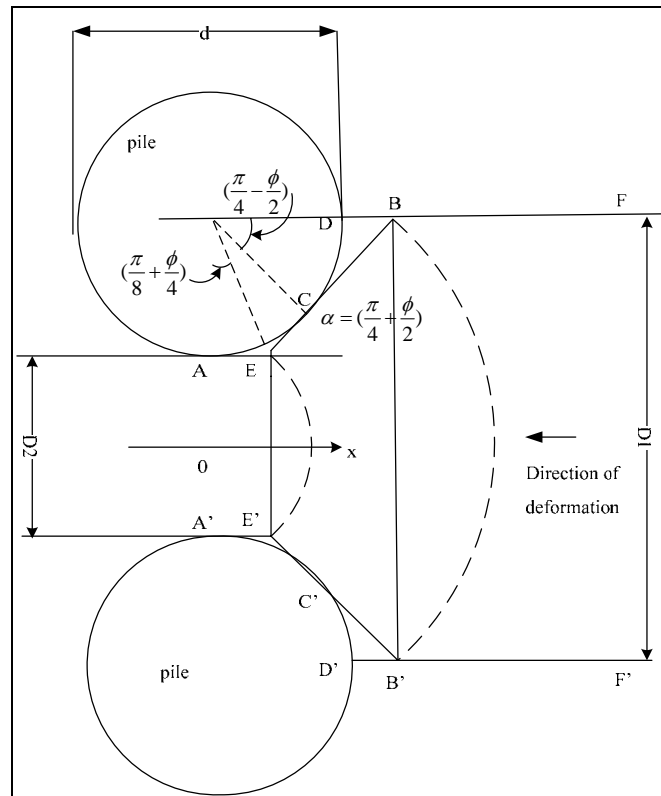
Ito and Matsui (1975) ได้กล่าวถึงทฤษฎีในการวิเคราะห์แรงที่กระทำทางด้านข้างของเสาเข็มแถวไว้ดังนี้

เมื่อกำหนดให้เสาเข็มแถวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d มีตำแหน่งอยู่ในลักษณะเป็นแถว (row) โดยมีระยะห่างเท่ากับ D_1 และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเสีรูปร่างทางด้านข้างเกิดขึ้นในชั้นดินที่มีความหนา H ในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางของแนวแถวของเสาเข็ม แรงทางด้านข้างที่มากระทำบนเสาเข็มเป็นแรงที่เกิดจากการส่งถ่ายแรง (Interaction) ระหว่างเสาเข็มกับชั้นดิน ในการวิเคราะห์นี้จำเป็นต้องรู้พฤติกรรมของชั้นดินระหว่างเสาเข็มสองต้น ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 เสาเข็มแถวในตำแหน่งที่เกิด plastic deformation ในดิน (Ito and Matsui, 1975)

ตามสมมติฐานของ Ito and Matsui (1975) ในการวิเคราะห์แรงทางด้านข้างโดยทฤษฎีของ Theory of Plastic Deformation จะพิจารณาดินระหว่างเสาเข็ม 2 ต้น ดังรูปที่ 2.19 ในส่วน ABCDFF'D'C'A'



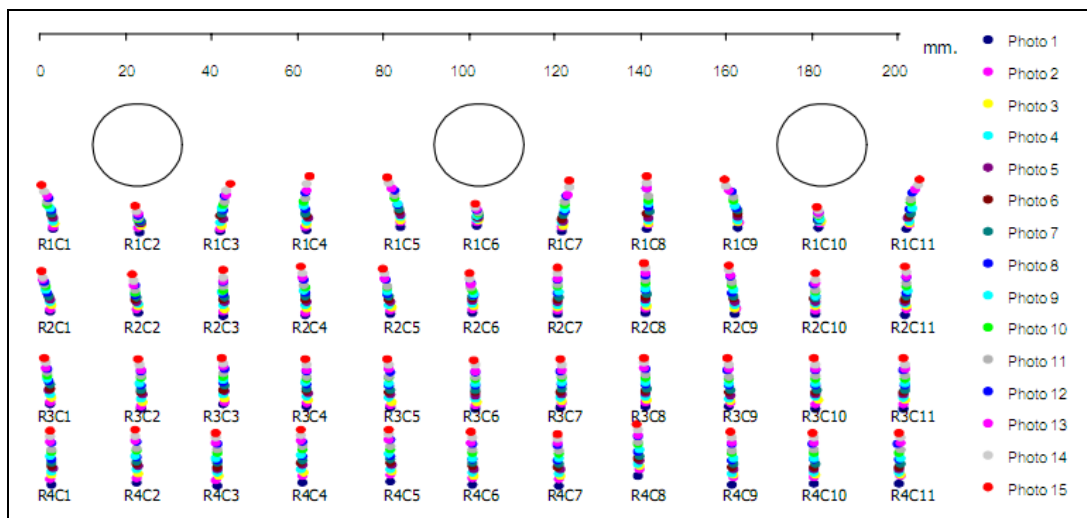
รูปที่ 2.19 สถานะของ Plastic deformation ในดินรอบ ๆ เสาเข็ม (Ito and Matsui, 1975)

สมมติฐานของ Ito and Matsui (1975)

1. เมื่อเกิดการเลื่อนตัว แนว Sliding Surface จะเกิดขึ้นตลอดตามแนว AEB และ A'E'B' โดยที่แนว EB และ E'B' จะทำมุมกับแกน x เท่ากับ $\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}$
2. ชั้นดินใน AEBA'E'B' รอบ ๆ เสาเข็มมีสถานะเป็น Plastic ซึ่งเป็นไปตาม Mohr-Colomb's Yield Criterion และดินในชั้นดินมีสถานะภาพเป็น Plastic solid ซึ่งมีทั้งค่ามุมเสียดทานภายใน (Angle of Internal Friction, ϕ) และค่าแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion, C)
3. ชั้นดินใน Plane - Strain อยู่ในทิศทางของความลึก
4. ในขณะที่แรงเสียดทานที่กระทำบน AEB และ A'E'B' ความเค้น (Stress) ที่กระจายกระทำทั่วในดิน AEBA'E'B' จะเป็นเหมือนกันกับในกรณีของไม่มีแรงเสียดทานบนผิวเหล่านั้น
5. เสาเข็มมีลักษณะเป็น Rigid

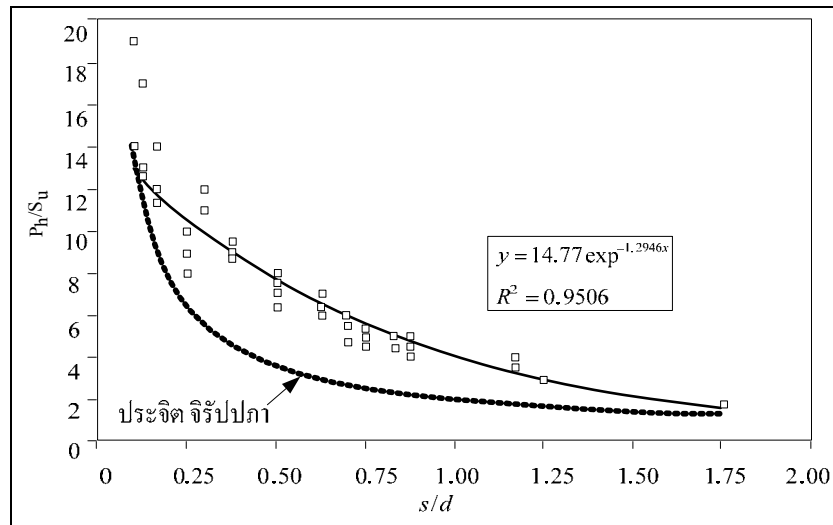
ประสพศิริ แสงภู (2546) ทำการวิจัยถึงพฤติกรรมแนวโค้งรับแรงระหว่างเสาเข็มของกำแพงเสาเข็มเว้นระยะในดินทราย เพื่อเสริมเสถียรภาพความลาดชัน โดยได้ทดสอบแบบจำลองทางกายภาพย่อส่วนและบันทึกภาพถ่ายการเคลื่อนตัวของหมุดสังเกตขณะทดสอบผลการทดสอบ

พบว่าเสาเข็มเว้นระยะสามารถต้านการเคลื่อนตัวของดินได้ โดยระยะห่างระหว่างเสาเข็มมีความสำคัญมาก ระยะที่สามารถต้านทานการเคลื่อนตัวได้มีระยะห่างระหว่างเสาเข็มไม่เกิน 4 เท่าของขนาดหน้าตัดเสาเข็ม ผลจากภาพถ่ายได้สรุปเป็น 3 ช่วงพฤติกรรม คือ ช่วงแรกเป็นช่วงเคลื่อนตัวของดิน ทำให้มีการยุบอัดตัวของดินเข้าสู่เสาเข็มโดยตรง ช่วงที่ 2 มีการพัฒนาการถ่ายแรง โดยพบการยุบอัดตัวด้านหน้าเสาเข็ม ช่วงที่ 3 การพัฒนากำลังถึงจุดสุดท้ายและเกิดการพังทลาย



รูปที่ 2.20 แสดงรูปภาพการเคลื่อนตัวของมวลดินเมื่อถูกปิดกั้นบางส่วนด้วยเสาเข็มเว้นระยะ
ในกรณีทดสอบที่ $S/D = 4$ (ประสพศิริ แสงภู, 2546)

วิชัย สวรรปทานกุล (2540) ได้จำลองไฟไนท์อิลเมนต์ของผนังเสาเข็มเรียงต่อเนื่องหน้าตัดวงกลม 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 อัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.47 โมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 75 เท่าของกำลังต้านทานแรงเฉือน



รูปที่ 2.21 วิสัยรับแรงธารของผนังเสาเข็มหน้าตัดกลม (วิชัย สัจวรปทานกุล, 2540)

โดยได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันดินด้านข้าง (P_h) กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม (s) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มกลม (d) จะแทนได้ด้วยสมการที่ 2.2

$$\frac{P_h}{S_u} = 14.775e^{-1.2946\left[\frac{s}{d}\right]} \quad (2.2)$$

โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9506

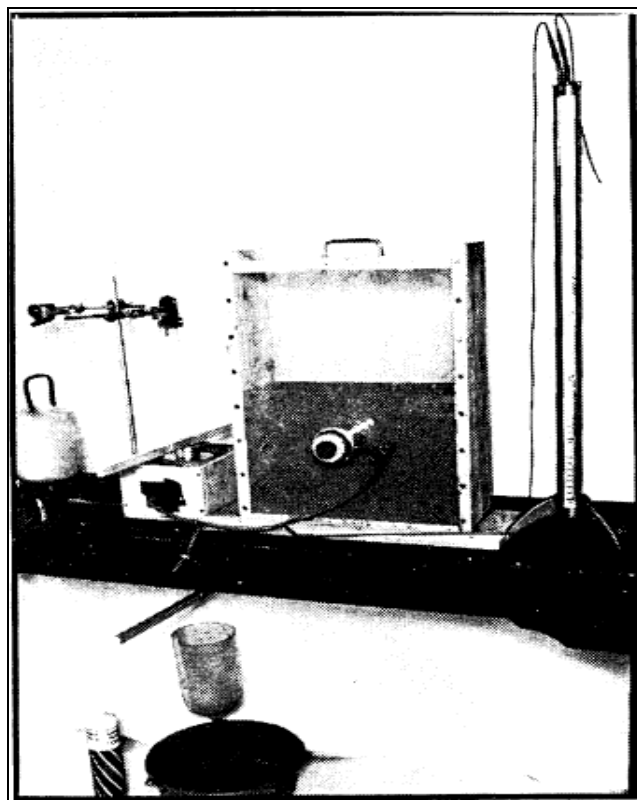
จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างเสาเข็มกับขนาดเสาเข็ม (s/d) และอัตราส่วนระหว่างแรงดันดินด้านข้างกับกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน (P_h/S_u) พบว่าเมื่อ s/d มีค่าประมาณ 0.1 จะให้ผลใกล้เคียงกันและเมื่อค่าอยู่ระหว่าง 0.25 ถึง 1.0 จะได้ P_h/S_u สูงกว่าที่ได้จากสมการ 2.1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

2.9 พฤติกรรมแนวโค้งรับแรง (Arching Behavior)

แนวโค้งรับแรง (Arching effect) คือโครงสร้างลักษณะโค้งที่ใช้รองรับน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างด้านบนเหนือแนวโค้งรับแรง เทคนิคการก่อสร้างแนวโค้งรับแรง (Arching effect) ถูกพัฒนาขึ้นในเมโสโปเตเมีย แอสซีเรีย อียิปต์ และ อิทรูเรีย เทคนิคการก่อสร้างถูกปรับปรุงและใช้

อย่างแพร่หลายในโรมันโบราณ จากนั้นแนวโค้งรับแรงกลายเป็น โครงสร้างสำคัญของอาคารโบสถ์ของศาสนาคริสต์ ปัจจุบันยังมีการใช้แนวโค้งรับแรงในส่วนของโครงสร้างของสะพาน ประโยชน์ของแนวโค้งรับแรงคือ ใช้เป็นโครงสร้างในการเชื่อมต่อบริเวณช่องของส่วนโครงสร้างต่าง ๆ ใช้ออกแบบเพื่อรับแรงอัดในแนวโค้ง โดยการเปลี่ยนแรงอัดในแนวโค้งเป็นแรงอัดในแนวระนาบของแนวโค้งรับแรงและถ่ายแรงลงสู่ฐานทั้งสองข้างของแนวโค้งรับแรง

Atkinson et al. (1975) ได้ออกแบบและทดลองเกี่ยวกับการเกิดแนวโค้งรับแรงจนได้ผลที่สามารถเชื่อถือได้ การทดลองของเขาใช้เครื่องมือที่มีลักษณะดังรูปที่ 2.22

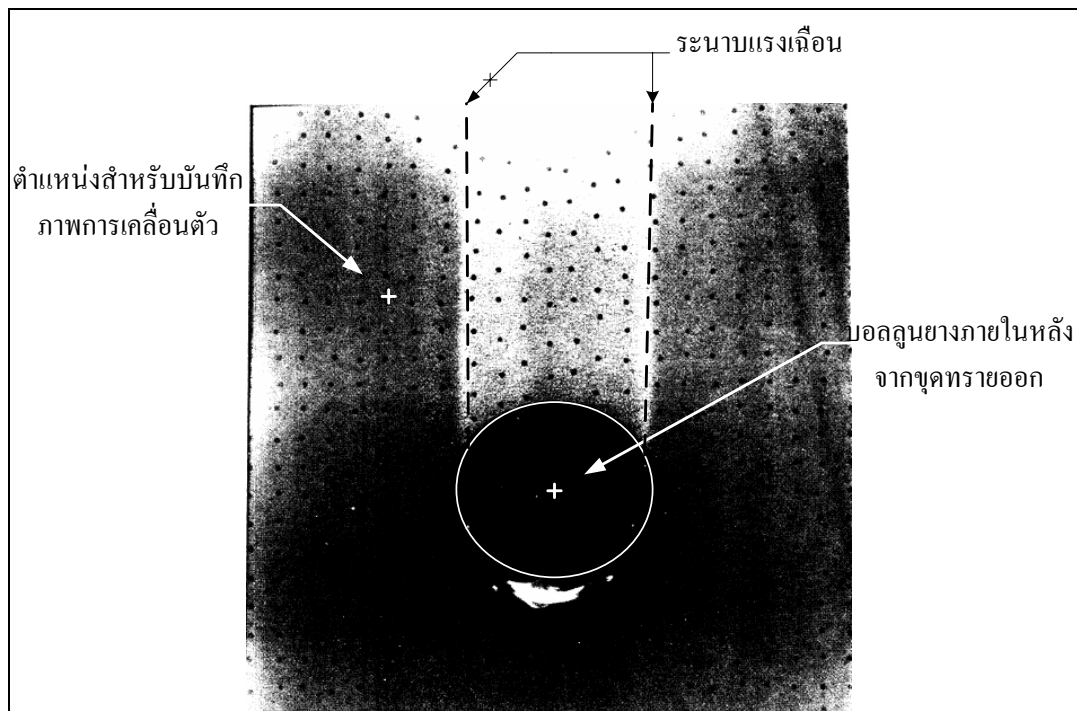


รูปที่ 2.22 อุปกรณ์ทดสอบแบบจำลองอุโมงค์ (Atkinson et al., 1975)

โดยใช้ทราย Leighton Buzzard ซึ่งมีอัตราส่วนโพรงเท่ากับ 0.52 เกล่งในกล่องทดสอบในทิศแนวแกนของอุโมงค์จำลองในระหว่างทรายได้วางหมุดเครื่องหมายในแนวระนาบกับแกนอุโมงค์ไปด้วย ภายในกล่องบรรจุบอลลูดยางทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 64 มิลลิเมตรซึ่งใช้เป็นอุโมงค์จำลอง ส่วนประกอบของอุโมงค์ประกอบด้วย บอลลูดยางทรงกระบอก 2 ชิ้น

ชั้นหนึ่งถูกซ้อนไว้ด้านใน ปลายของบอลลูนถูกยึดติดไว้กับกล่องทดสอบเพื่อให้เกิดผลกระทบน้อยที่สุดในระหว่างคินฟิง

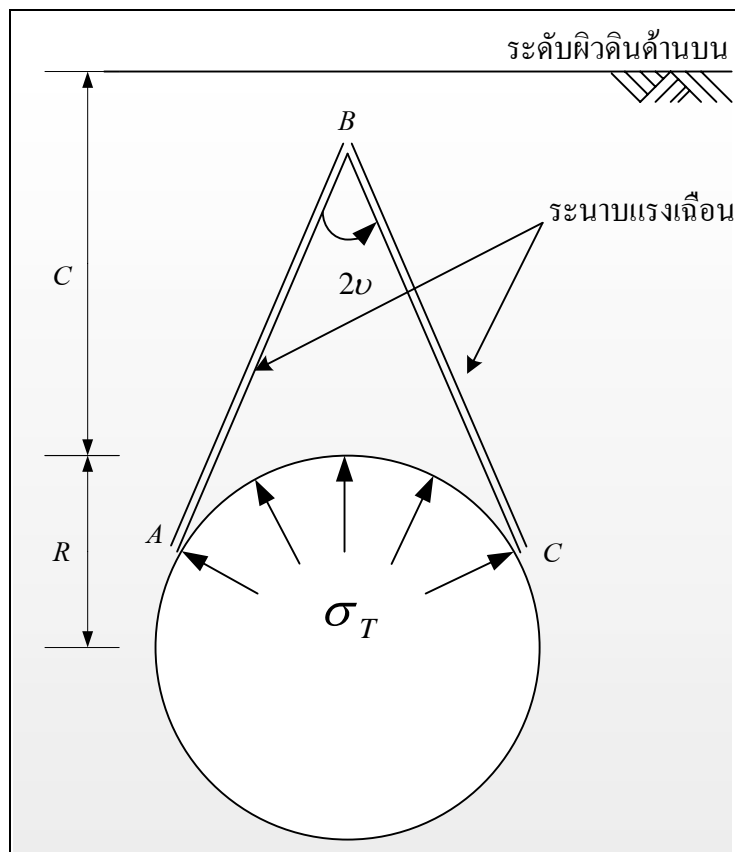
จากนั้นเติมทรายด้านในบอลลูนจนมีระดับเท่ากับด้านนอก ทรายด้านในบอลลูนถูกขุดโดยปั๊มดูดอากาศและอัดแรงดันอากาศไปที่บอลลูนด้านนอกเพื่อรักษาสมดุล ขณะดำเนินการบอลลูนด้านในจะพังลง บอลลูนด้านนอกจะเป็นระบบค้ำยันด้วยแรงดันอากาศ ทรายในอุโมงค์ขุดด้วยแรงดันเท่ากับแรงดันส่วนเกินจากด้านบน ($\sigma_T = \gamma C$ เมื่อ γ คือ หน่วยน้ำหนักของดิน และ C คือ ความลึกจากผิวดินถึงส่วนบนของอุโมงค์) การทดสอบจะลดแรงดันอากาศลงจนกระทั่งอุโมงค์พัง ขณะทดสอบจะบันทึกภาพในทุกระยะของการลดแรงดันอากาศดังรูปที่ 2.23 การบันทึกก่อนและหลังการขุดจะไม่พบระยะยืดตัว (Elastic zone) ของทราย



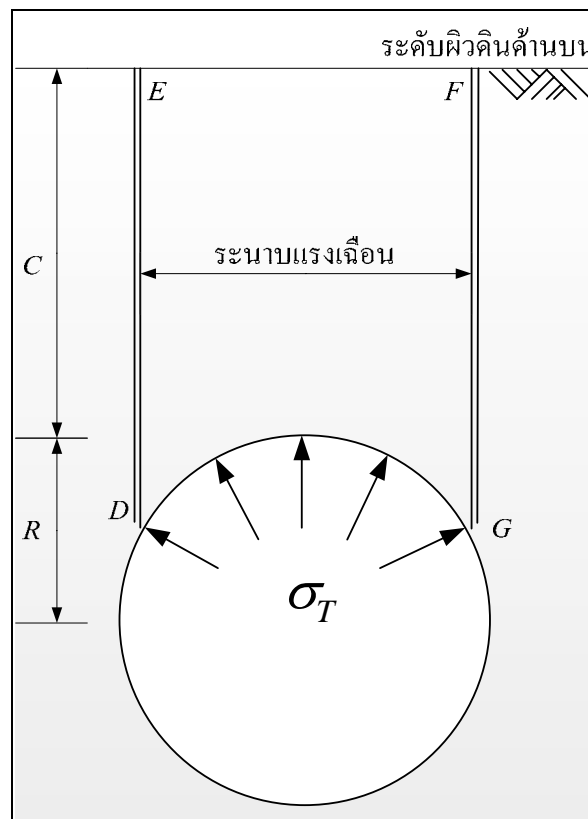
รูปที่ 2.23 ภาพถ่ายแบบจำลองจาลองจาก radiograph (Atkinson et al., 1975)

ผลการวิเคราะห์หมุดเครื่องหมายจากการบันทึกภาพก่อนและหลังการขุดทรายออกจากอุโมงค์ ช่วงอัตราส่วนความลึกต่อรัศมีที่ค่าต่าง ๆ ระหว่าง $C/R = 0.88$ ถึง $C/R = 3.97$ ภาพถ่ายระหว่างการทดสอบแสดงให้เห็นการเคลื่อนตัวครั้งแรกด้านบนยอดอุโมงค์ ก่อนอุโมงค์พัง คือ การเคลื่อนตัวเริ่มต้น มีขอบเขตจำกัดดัง รูปที่ 2.24 จากรูปแสดงถึงการเคลื่อนตัวเริ่มต้นซึ่งเป็นโซนที่เกิดขึ้นทันที (โซน ABC อยู่ด้านบนสัมผัสกับวงกลม) เมื่อลิ้ม ABC เคลื่อนที่ลง การขยายตัวของ

ทรายที่อัตราส่วนเหมาะสมจะช่วยป้องกันการแยกออกของระนาบ AB และ BC ได้ โดยระนาบ AB และ BC ต้องทำมุม 2ν ที่ B (เมื่อ ν คือมุมไคลเซชัน) เมื่อลดแรงดันในอุโมงค์ลง โชนเคลื่อนตัวได้ ขยายตัวไปทางผิวดินด้านบน ผลจากภาพถ่ายหลังจากการพังได้แสดงกลไกการวิบัติดังรูปที่ 2.25 ทรายด้านบนอุโมงค์จะเคลื่อนที่ลงตามระนาบ DE และ FG ตรงตามสมมติฐานว่า ทรายเมื่อมีการเคลื่อนตัวสูงจะเสียรูปที่สถานะวิบัติ

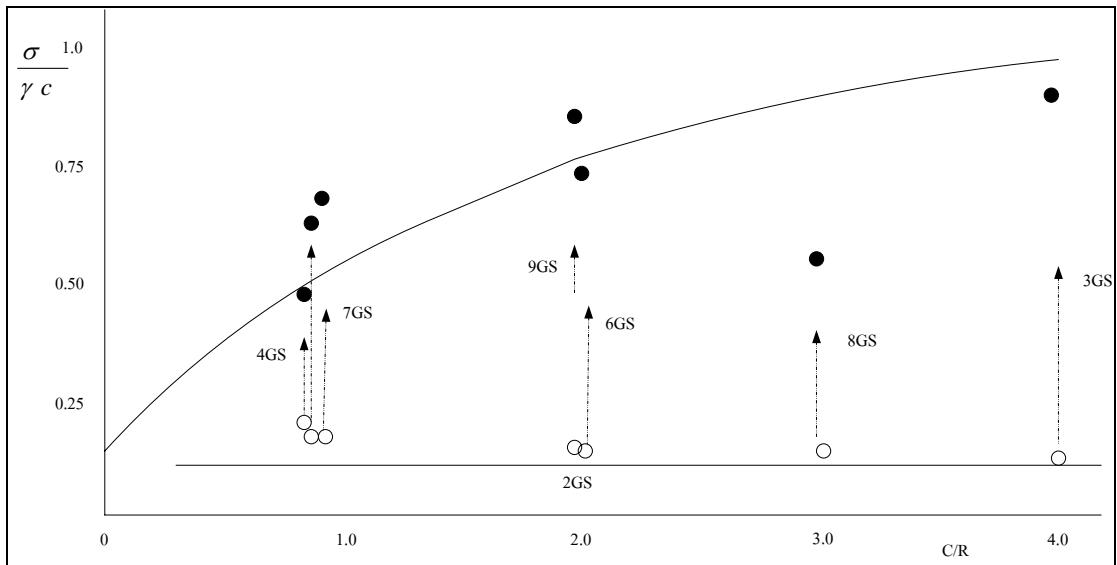


รูปที่ 2.24 การวิบัติเริ่มต้นของแบบจำลองอุโมงค์ (Atkinson et al., 1975)



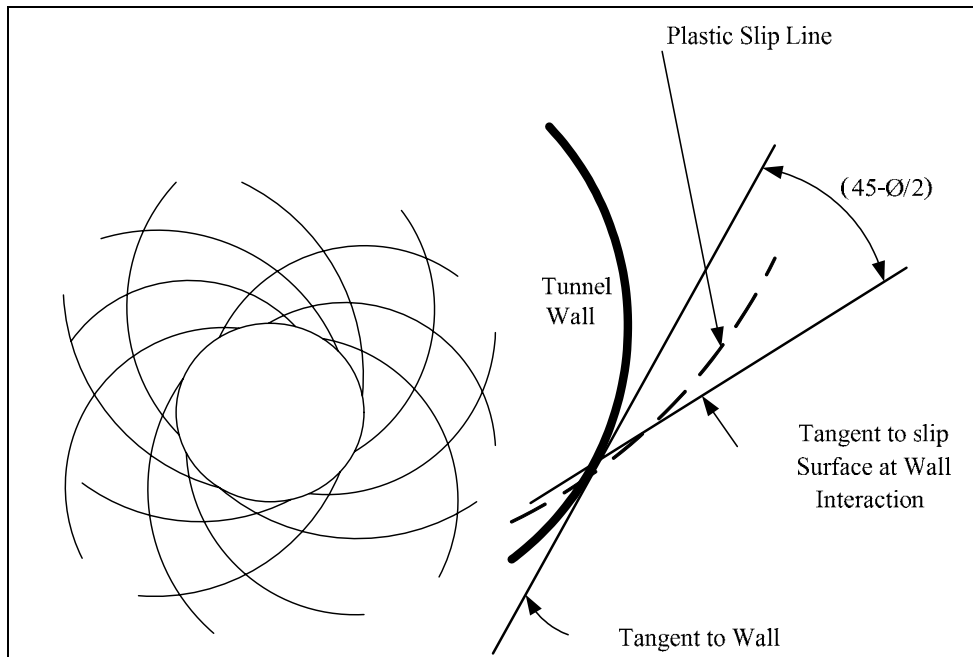
รูปที่ 2.25 การวิบัติสุดท้ายของแบบจำลองอุโมงค์ (Atkinson et al., 1975)

การพังที่เกิดขึ้นโดยทันทีที่สามารถอธิบายถึงการทดสอบทั้งหมด โดยการเคลื่อนตัวของทรายอย่างฉับพลัน เกิดจากการเพิ่มแรงดันอากาศเพื่อให้อุโมงค์อยู่ในสถานะสมดุล แรงดันที่ทำให้เกิดการพังและที่สถานะสมดุลสุดท้ายได้วิเคราะห์ไว้ดังรูปที่ 2.26 เมื่อ R คือรัศมีแบบจำลองอุโมงค์และวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่าง $\sigma_t/\gamma R$ กับ C/R เส้นความสัมพันธ์ด้านล่างแสดงให้เห็นแรงดันภายในอุโมงค์ที่จุดเริ่มต้นการพัง และเส้นความสัมพันธ์ด้านบนคือแรงดันที่จุดสมดุลสุดท้ายโดยจุด 8GS เป็นจุดที่อาจจะไม่ถึงจุดสมดุลสุดท้าย เนื่องจากแรงดันด้านในอุโมงค์ไม่คงที่ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การพังเริ่มต้นแทบจะไม่เกี่ยวกับอัตราส่วนความลึกต่อรัศมี ถ้าเกิดก็จะเกิดขึ้นน้อยมาก แรงดันอุโมงค์ที่จุดสมดุลเริ่มต้นมีค่าเกินกว่าที่ต้องการจึงเกิดการพัง โดยเสนอการป้องกันด้วยค่า Factor เท่ากับ 3 ที่ $C/R = 1$ และ ค่า Factor เท่ากับ 7 ที่ $C/R = 4$

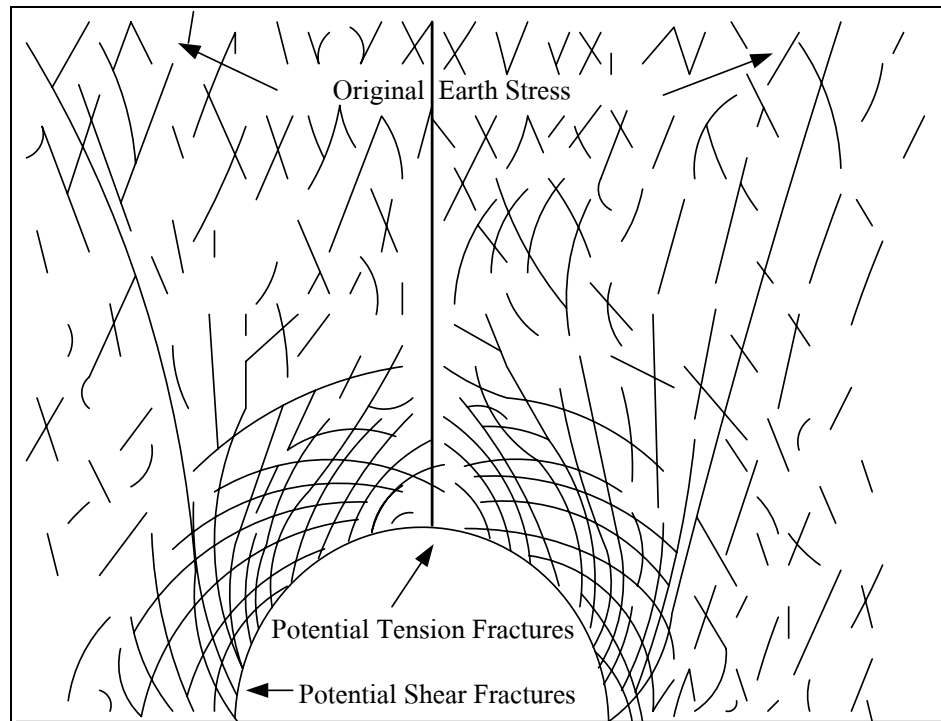


รูปที่ 2.26 ผลจากการทดสอบแบบจำลองอุโมงค์ (Atkinson et al., 1975)

ทฤษฎีพลาสติกที่ดีได้สมมติระนาบการไหลให้มีทิศทางตามทิศที่มีแรงเฉือนมากที่สุด สถานะพลาสติกสามารถอธิบายได้จากขอบเขตที่เกิดการไหล การหาเส้นระนาบการไหลที่แท้จริงเป็นปัญหาที่หาคำตอบได้ยาก โดยทั่วไปจะใช้การประมาณอย่างง่าย McCutcheon (1949) ได้สมมติเส้นระนาบการไหลให้เอียงที่ $\pm(45 - (\phi/2))$ Heuer and Hendron (1971) ได้ทดสอบแบบจำลองโดยสมมติขอบเขตเส้นการไหลของรัศมีแรงเฉือนขึ้นจากการสังเกตพื้นผิวการไหล ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นผิวการไหลและการคาดเดาการหันทิศทางของผิวการไหลได้ดังรูปที่ 2.27 และรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.27 ทฤษฎีพลาสติกสถานะนาบไถลรอบวงกลมเปิดที่มีแรงเสียดทาน McCutcheon (1949)



รูปที่ 2.28 ระบายแรงเฉือนรอบวงกลม Heuer and Hendron (1971)

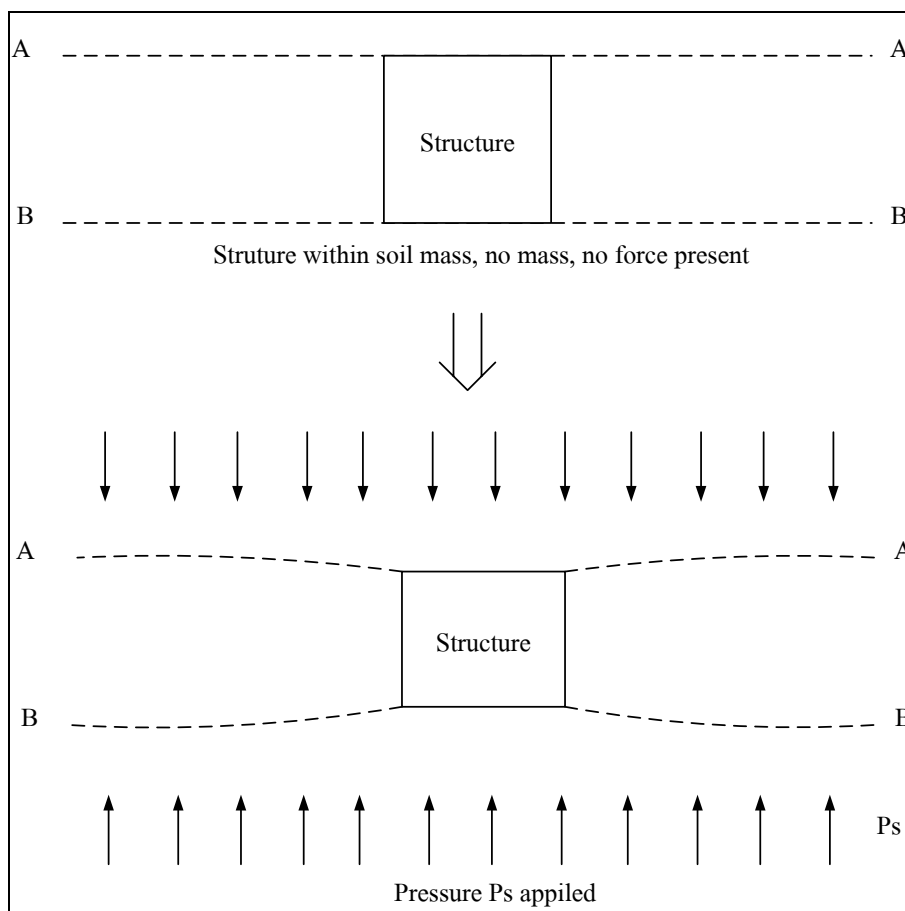
Bastien, C., Gael, C., and Pascal, V. (2007) กล่าวว่าพฤติกรรมแนวโค้งรับแรง (Arching Behavior) เป็นกลไกที่สำคัญและพบบ่อยในงานวิศวกรรมโยธาโดยเฉพาะวิศวกรรมด้านธรณีเทคนิค เช่น งานปรับปรุงดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ การทรุดตัวของดินคันทาง เป็นต้น

Terzaghi (1943) กล่าวว่าพฤติกรรมแนวโค้งรับแรง (Arching Behavior) เป็นปรากฏการณ์ทั่วไปที่เกิดขึ้นในดิน พบได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นมากในงานก่อสร้างได้ดิน เช่น โครงการท่อส่งน้ำใต้ดิน การก่อสร้างได้ดินจะใช้แนวโค้งรับแรงนี้ให้เป็นประโยชน์ โดยลดแรงดันดินส่วนเกินจากดินที่กระจายแรงไปสู่โครงสร้าง บางครั้งยังสามารถต้านแรงจากผิวดินและแรงดันดินด้านข้างอีกด้วย แนวโค้งรับแรงสามารถอธิบายได้ว่า เกิดการถ่ายแรงระหว่างมวลของวัสดุทางวิศวกรรมธรณีกับ โครงสร้างที่อยู่ข้าง การกระจายแรงในดินจะทำให้ดินเสีกรูป ในขณะที่ความต้านทานแรงเฉือนพยายามที่จะรักษาสภาพให้อยู่ในตำแหน่งเดิมโดยใช้ส่วนที่ติดกับโครงสร้างเป็นจุดรองรับ

Einstein (1980) ให้ความหมายของแนวโค้งรับแรง (Arching effect) คือ การถ่ายแรงลงด้านบนของโครงสร้าง โดยที่มีปลายทั้งสองข้างของโครงสร้างถูกยึดแน่น ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวที่ต่างกันจากคุณสมบัติของโครงสร้างและดิน ผลของแรงกระทำต่อแนวโค้งรับแรง (Arching effect) จะลดลงเมื่อมีระบบค้ำยันในงานก่อสร้าง ตัวอย่างเช่น การทดลอง Trap door แนวโค้งรับแรงจะพบเมื่อโครงสร้างรับแรงอัดมากหรือในการก่อสร้างงานอุโมงค์ เป็นต้น

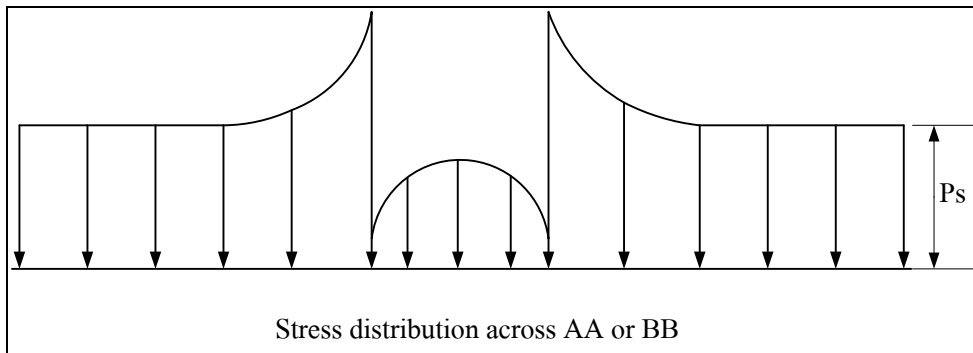
Evans (1983) เสนอแบบจำลองดินแบบอิลาสติกโดยสรุปว่า ถ้ามวลดินมีทิศทางการเคลื่อนที่พุ่งลงกำลังต้านทานแรงเฉือนจะกระทำในทางตรงกันข้าม แรงที่เกิดบนมวลดินจะลดลง ถ้ามวลดินมีทิศทางการเคลื่อนที่พุ่งขึ้นกำลังต้านทานแรงเฉือนจะมีทิศทางลง เพื่อต้านการเคลื่อนที่ เป็นผลให้แรงที่จุดรองรับเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่กล่าวมาทั้งหมดขึ้นอยู่กับความแกร่งของวัสดุ แนวโค้งรับแรงสามารถแสดงพฤติกรรมได้ทั้งสภาวะ Active และ Passive

แนวโค้งรับแรงในสภาวะ Active จะเกิดขึ้นเมื่อ โครงสร้างรับแรงมากกว่าดินที่อยู่โดยรอบ
 ดังรูปที่ 2.29



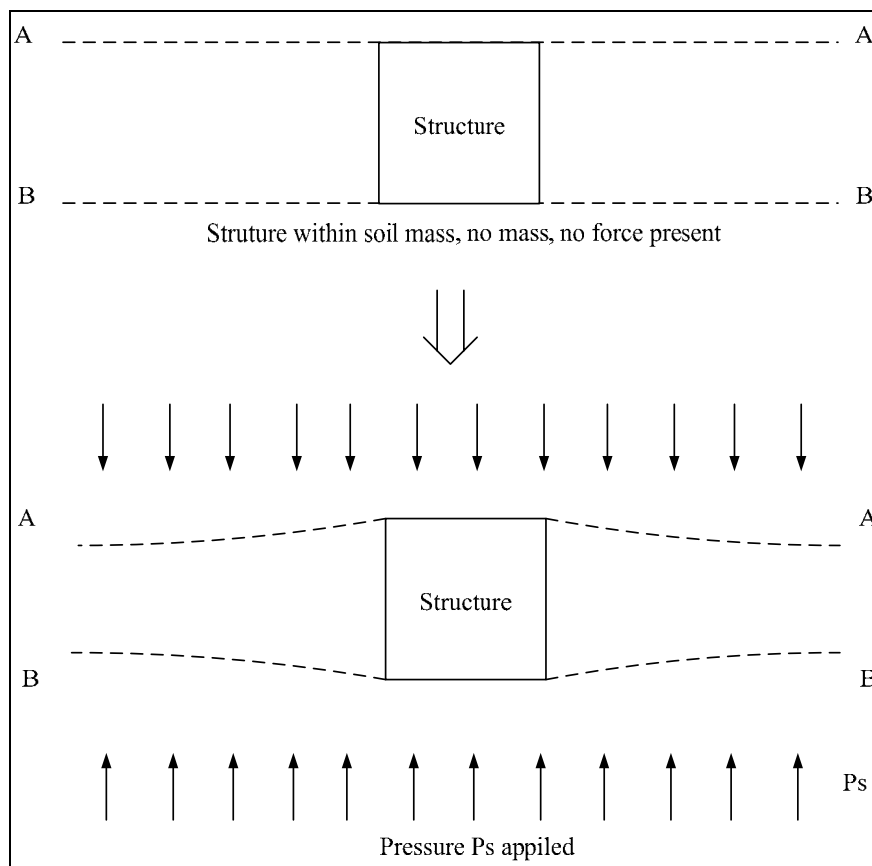
รูปที่ 2.29 Active Arching การเคลื่อนตัวได้แรงดัน P_s เมื่อ โครงสร้างถูกแรงอัดมากกว่าดินรอบข้าง (Einstein, 1983)

เมื่อทั้งระบบถูกแรงกระทำ ผลของแรงกระจายจะตัดผ่านตำแหน่งของโครงสร้างซึ่งรับแรงมากกว่าบริเวณรอบ ๆ (ระดับเริ่มต้นเท่ากัน ดังระนาบ AA และ BB) ดังรูปที่ 2.30 ถ้าโครงสร้างมีการเคลื่อนที่จนเสียรูปไปจากระนาบ AA และ BB แรงที่เกิดขึ้นจะมีแนวโน้มลดลงและเคลื่อนที่ไปที่ขอบของโครงสร้าง เกิดการรวมตัวกันของแรงก่อให้เกิดเป็นแรงเพิ่มขึ้นในดิน



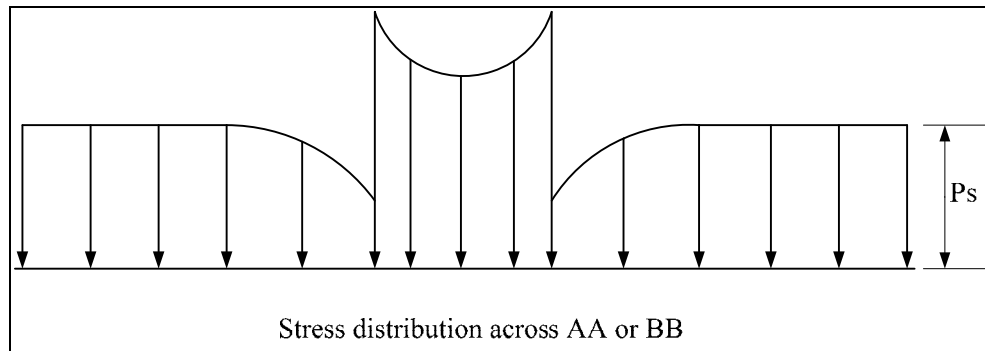
รูปที่ 2.30 แสดงสภาวะ Active Arching (Einstein, 1983)

แนวโค้งรับแรงในสภาวะ Passive เมื่อดินบริเวณรอบโครงสร้างรับแรงมากกว่าบริเวณ
โครงสร้างดังรูปที่ 2.31



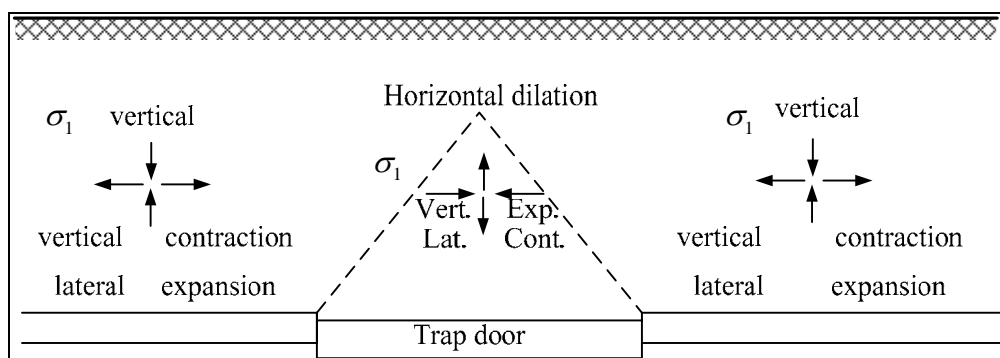
รูปที่ 2.31 Passive Arching การเคลื่อนตัวใต้แรงดัน P_s เมื่อโครงสร้างถูกแรงอัด
น้อยกว่าดินรอบข้าง (Einstein, 1983)

บริเวณคินรอบ โครงสร้างมีการเคลื่อนที่มาก แรงเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นจากแรงดันทั้งหมด ในขณะที่แรง ณ จุดเชื่อมต่อมีค่าลดลง ถ้าโครงสร้างยังคงสภาพอยู่เหมือนเดิม จะเกิดแรงสูงมากที่ขอบและเกิดแรงกระทำน้อยมากที่กึ่งกลางของแรงกระจายในสภาวะ passive ที่ระนาบ AA และ BB ดังรูปที่ 2.32



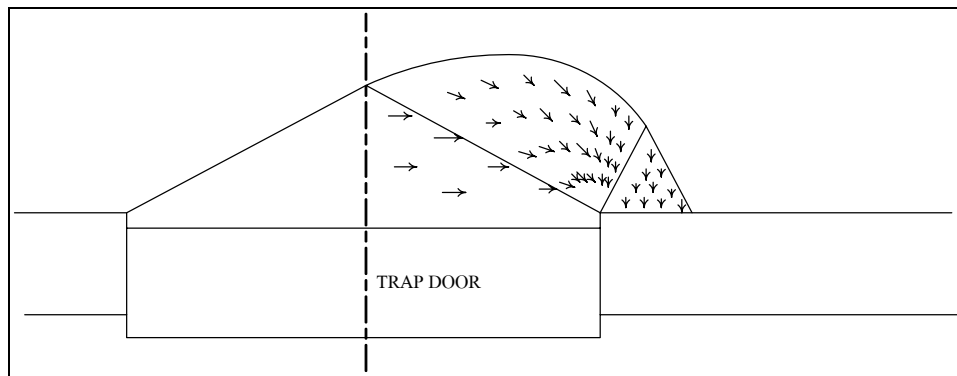
รูปที่ 2.32 แสดงสภาวะ Passive Arching (Einstein, 1983)

Evans (1983) กล่าวว่า การทดลอง Trap door สามารถสังเกตเห็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้เพียงเล็กน้อย โดยได้แสดงโซนสามเหลี่ยมที่ขยายตัวในแนวคิงเหนือช่องเปิดทั้งสภาวะ Active และ Passive ในสภาวะ Active arching แรงในแนวคิงบน Trap door จะลดลงเมื่อประตูของช่องเปิดเคลื่อนที่ในทิศทางลง ดังรูปที่ 2.33 แสดงพฤติกรรมทั่วไปของสภาวะ Active arching



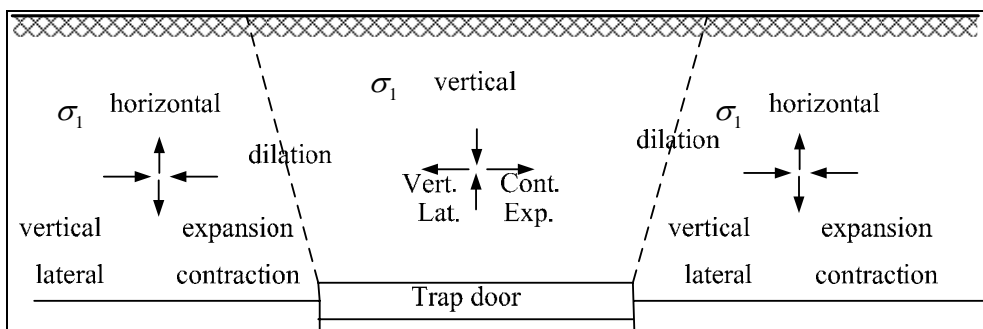
รูปที่ 2.33 พฤติกรรมทั่วไปของคิน Active Arching (Evans, 1983)

ขณะที่ด้านข้างของ โชนสามเหลี่ยมหดตัว เพื่อเป็นการปรับสมดุลให้เท่ากับการขยายตัวในแนวดิ่ง พื้นที่ทั้งสองฝั่งของ Trap door จะทำหน้าที่เป็นจุดรองรับของหน่วยแรงที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในทิศทางลงของ Trap door พื้นที่ในแนวดิ่งทั้งสองฝั่งจะเกิดการหดตัวเนื่องจากการขยายตัวทางด้านข้าง เมื่อประตูดกลงมากวัสดุก็ไหลออกมาทำให้การขยายตัวทางด้านข้างสูงขึ้น บริเวณที่ขอบทั้งสองฝั่งของ Trap door ด้านที่ติดประตูจะถูกแรงกระทำมากที่สุด ดังรูปที่ 2.34

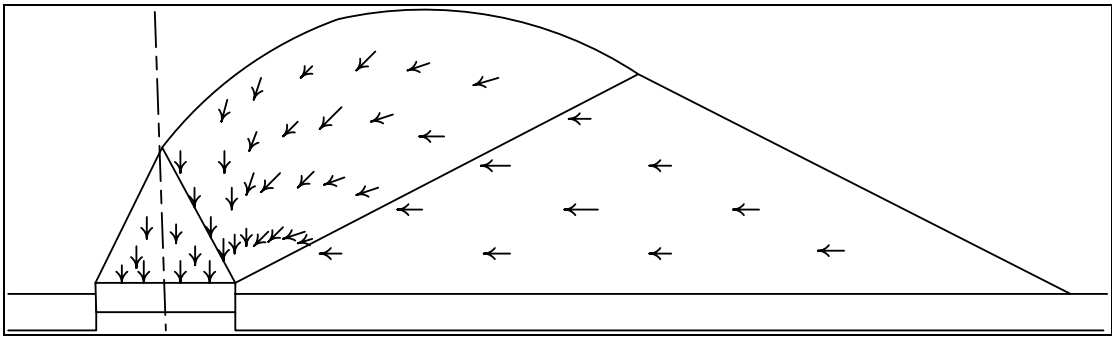


รูปที่ 2.34 ทิศทางของหน่วยแรงหลัก Active Arching (Evans, 1983)

สภาวะ Passive arching แสดงดังรูปที่ 2.35 เมื่อประตู Trap door เคลื่อนที่ในทิศขึ้น แรงในแนวดิ่งจะเพิ่มขึ้น โชนเหนือประตูจะเคลื่อนที่ขึ้นด้วยการหดตัวในแนวดิ่งและการขยายตัวทางด้านข้าง คล้ายกับ โชน Rankine passive earth pressure และหน่วยแรงหลักเหนือประตูจะอยู่ในแนวดิ่ง พื้นที่ด้านข้างทั้งสองฝั่งจะหดตัวในแนวราบและขยายตัวในแนวดิ่ง ทำให้แรงมารวมตัวอยู่ด้านบนประตู ดังรูปที่ 2.36

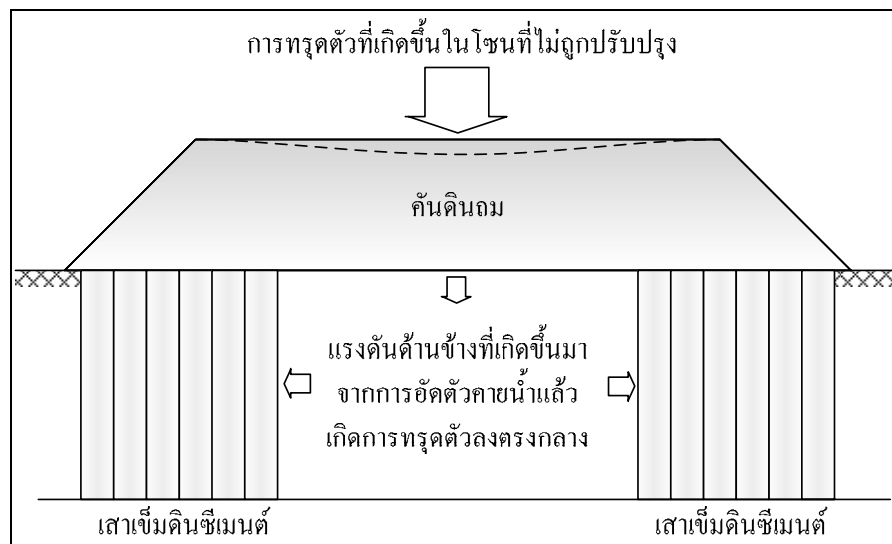


รูปที่ 2.35 พฤติกรรมทั่วไปของดิน Passive Arching (Evans, 1983)



รูปที่ 2.36 ทิศทางของหน่วยแรงหลัก Passive Arching (Evans, 1983)

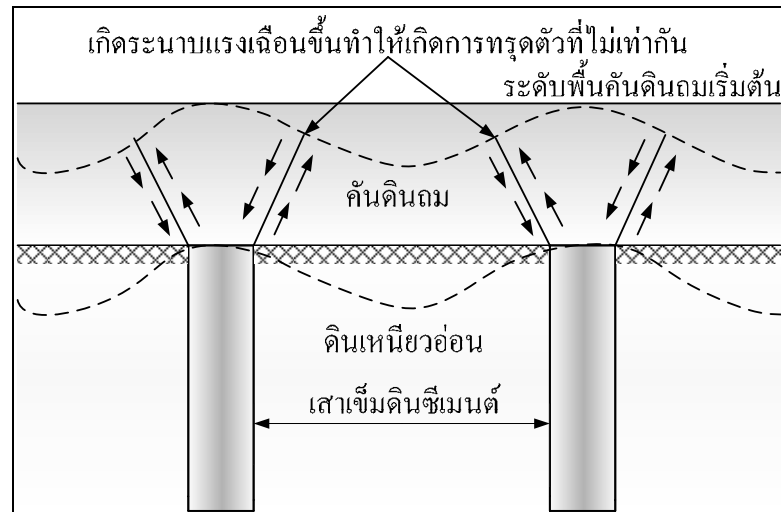
Hidetoshi, K., Kazushi, F., and Saiichi, S. (2008) ได้ศึกษาผลกระทบของแนวโค้งรับแรงจากการใช้จำนวนเสาเข็มดินซีเมนต์น้อยกว่าปกติ (Arching effect base low improvement ratio cement column method, Alicc) ซึ่งวิธีโดยทั่วไปที่นำมาจากประเทศญี่ปุ่นได้มีการปรับปรุงดินตั้งแต่ชั้นฐานรากโดยปรับปรุงเริ่มจากแนวลาดเอียงด้านข้างทั้งสองด้านของดินคันทาง โดยทำการปรับปรุงเป็นปริมาณ 50% ของพื้นที่ดินคันทางหรือมากกว่าดังรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 การปรับปรุงดินโดยวิธีทั่วไป

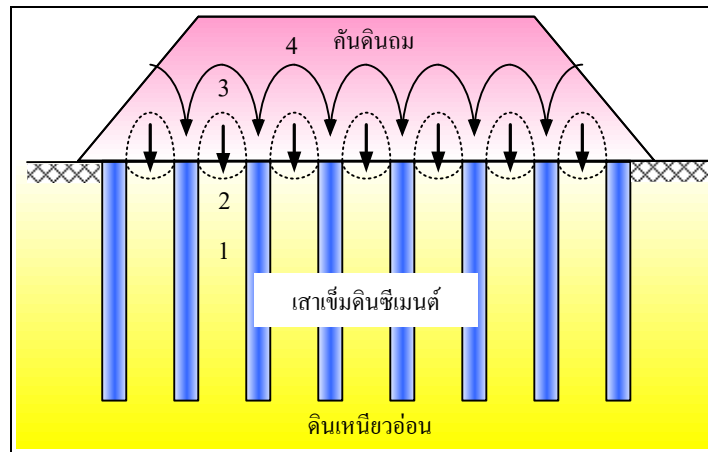
แรงบนชั้นดินคันทางเป็นสาเหตุให้เกิดการทรุดตัวลงในบริเวณที่ไม่ถูกปรับปรุงที่บริเวณตรงกลาง โดยเขาได้เสนอแนวทางเลือกคือวิธี แนวโค้งรับแรงจากการใช้จำนวนเสาเข็มดินซีเมนต์น้อยกว่าปกติ (Arching effect base low improvement ratio cement column method : Alicc) ซึ่งวิธีนี้

จะมีอัตราการใช้จำนวนของเสาเข็มดินซีเมนต์อยู่ที่ 10% - 30% ซึ่งลดลงจากวิธีโดยทั่วไป เพราะว่าวิธีนี้จะมีช่องว่างระหว่างเสาเข็มเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดการทรุดตัวระหว่างเสาเข็ม โดยความสูงของดินคันทางจะสัมพันธ์กับช่องว่าง โดยมีระนาบแรงเฉือนดังรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.38 ระนาบแรงเฉือนเหนือเสาเข็มดินซีเมนต์และการทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน

การทรุดตัวในบริเวณที่ไม่มีเสาเข็มดินซีเมนต์ได้มีการตรวจวัด โดยได้ผลจากการทดสอบพบว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนดินคันทางสามารถรับแรงได้มากกว่าแบบทั่วไป แรงที่กระทำบนบริเวณที่ไม่มีเสาเข็มมีค่าน้อยโดยมีสมมติฐานว่า เกิดแนวโค้งรับแรงระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์และแรงที่กระทำบริเวณที่ไม่มีเสาเข็มดินซีเมนต์จะมีค่าลดลงดังรูปที่ 2.39 โดยหมายเลข 1 คือการทรุดของบริเวณที่ไม่มีเสาเข็มดินซีเมนต์จากน้ำหนักของดินคันทาง หมายเลข 2 คือวัสดุของดินคันทางได้ไหลไปตามการทรุดของหมายเลข 1 หมายเลข 3 คือเกิดการปิดช่องการทรุดตัวเนื่องจากเกิดการก่อตัวในวัสดุดินคันทาง หมายเลข 4 คือแรงยังคงกระทำต่อดินคันทางได้โดยเกิดแนวโค้งรับแรงเหนือเสาเข็ม



รูปที่ 2.39 การเกิด Arcing Effect บนหัวเสาเข็มดินซีเมนต์

2.10 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมมีการเริ่มต้นตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ. 1950 โดยลักษณะของงานทางด้านวิศวกรรมปฐพีที่นิยมนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการแก้ปัญหาได้แก่ การวิเคราะห์ปัญหาของงานเขื่อน การก่อสร้างระบบกำแพงกันดิน การวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณการเคลื่อนตัวของดินสำหรับงานขุดดิน ฯลฯ

วิธีการวิเคราะห์โดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการประมาณรูปแบบของปัญหากับวัสดุที่มีขนาดและคุณสมบัติของวัสดุนั้น โดยจำลองวัสดุที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเอลิเมนต์ย่อย ๆ (Mesh) ซึ่งในแต่ละเอลิเมนต์ย่อย ๆ ที่อยู่ข้างเคียงกันจะมีการเชื่อมต่อกันด้วยจุด (Nodal Point) พร้อมทั้งมีความเกี่ยวเนื่องกันทั้งระบบและสามารถแสดงได้โดยระบบสมการที่อยู่ในรูปแบบของ Matrix ดังนี้

$$\{F\} = [K]\{U\} \quad 2.4$$

เมื่อ F = Vector of Applied Nodal Force

K = Stiffness Matrix

U = Unknown Nodal Displacements or Temperatures

2.10.1 การกำหนดลักษณะของปัญหา

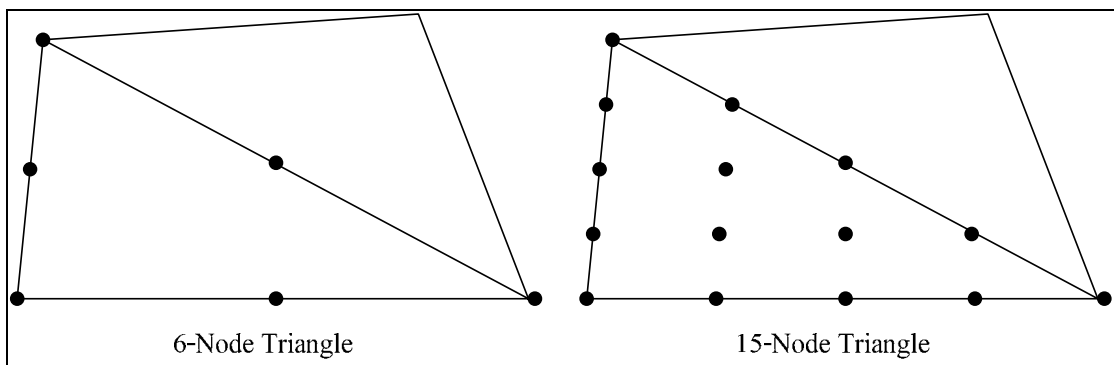
การวิเคราะห์โดยโปรแกรม PLAXIS สามารถพิจารณาเกี่ยวกับลักษณะของปัญหาที่มีรูปแบบเป็น 3 ชนิด

2.10.1.1 Plane strain เป็นการวิเคราะห์ปัญหาที่มีลักษณะของหน้าตัด (Cross section) สม่ำเสมอและมีความยาวมาก (2 มิติ) พร้อมทั้งสอดคล้องกับสภาพของหน่วยแรงที่อยู่ในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของปัญหาที่ใช้ในการพิจารณา โดยที่ค่าการเคลื่อนตัวในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบของปัญหาถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์

2.10.1.2 Axisymmetry เป็นการวิเคราะห์ปัญหาที่เหมาะสมกับลักษณะปัญหาที่มีความสมมาตร โดยมีรัศมีสม่ำเสมอ และเป็นรูปแบบของปัญหา 2 มิติ เช่น การวิเคราะห์ฐานรากที่เป็นรูปทรงกลม

2.10.2 ลักษณะของอิเลเมนต์

การวิเคราะห์ปัญหาโดยอาศัยวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์มีความจำเป็นต้องจำลองวัสดุที่อยู่ในขอบเขตของปัญหาที่ทำการพิจารณาด้วยอิเลเมนต์ต่าง ๆ โดยอิเลเมนต์สำหรับดิน (Soil element) มีรูปแบบเป็นโครงสร้างสามเหลี่ยมที่มีจำนวนของ Nodal Point ในแต่ละอิเลเมนต์จำนวน 6 จุด และ 15 จุด ดังรูปที่ 2.40



รูปที่ 2.40 ลักษณะของ Nodal Point สำหรับอิเลเมนต์ของดิน

2.10.3 แบบจำลองพฤติกรรมสำหรับดิน

โดยปกติลักษณะของดินจะมีพฤติกรรมเป็นแบบ Non linear stress strain และสามารถกำหนดการวิเคราะห์เพื่อพิจารณาได้หลายระดับ ซึ่งจะมีผลต่อจำนวนพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมของดิน โดยจำนวนพารามิเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามความซับซ้อนที่ใช้ในการพิจารณา เช่น Mohr Coulomb Model หรือ Elastic Perfectly Plastic Model เป็นแบบจำลองที่นิยมใช้

ในการจำลองพฤติกรรมของดินโดยมีค่าพารามิเตอร์ของดินที่ใช้กับแบบจำลองชนิดนี้จำนวน 5 ชนิด คือ (1) Young's Modulus (2) Poisson's Ratio (3) Cohesion (4) Friction angle และ (5) Dilatancy angle

2.10.4 ค่าพัวซอง

สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง (2550) อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของดินของดินได้ดังสมการ

$$\{\Delta\sigma\} = [D]\{\Delta\varepsilon\} \quad 2.5$$

กรณีไม่มีการระบายน้ำเกิดขึ้น เมทริกซ์ $[D]$ จะแสดงคุณสมบัติพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น รวมกับความเครียดตัวอย่างในกรณีที่ดินเป็นวัสดุอิลาสติกเชิงเส้นเท่ากันทุกทิศ ทางเมทริกซ์ $[D]$ จะขึ้นกับค่าโมดูลัสแบบไม่ระบายน้ำ E_u และค่าอัตราส่วนพัวซองแบบไม่ระบายน้ำ ν_u ในกรณีที่ดินไม่มีการระบายน้ำนั้น สำหรับดินอิ่มตัวด้วยน้ำปริมาตรของดินจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง สำหรับดินที่เป็นวัสดุเชิงอิลาสติกเชิงเส้นเท่ากันทุกทิศทางค่าอัตราส่วนพัวซองแบบไม่ระบายน้ำ ν_u จะมีค่าเท่ากับ 0.5 อย่างไรก็ตามในการคำนวณทางไฟไนต์อีเลเมนต์ ถ้าใช้ $\nu_u = 0.5$ จะทำให้การคำนวณเกิดข้อผิดพลาดได้อันเนื่องมาจากค่าโมดูลัสของการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (K) มีค่าไม่จำกัด ดังนั้นในการปฏิบัติจะกำหนดให้อยู่ในช่วง $0.49 < \nu_u < 0.5$

Bowles, J.E. (1996) ได้กล่าวว่าแรงตามแนวแกน จะเกิดการเปลี่ยนรูปตามแนวแกน และในขณะเดียวกันจะเกิดการเปลี่ยนแปลงตามแนวขวางด้วยในกรณีที่แรงกระทำมีขนาดไม่เกินขีดจำกัดยืดหยุ่นของวัสดุ โดยได้แนะนำค่าอัตราส่วนพัวซองของดินต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าอัตราส่วนพัวซองของดิน (Bowles, J.E., 1996)

Soil Type	Poisson's Ratio
Clay Saturated	0.4 -0.5
Clay Unsaturated	0.1-0.3
Sandy Clay	0.1-0.3
Sand Dense	0.2-0.4
Concrete	0.15

2.10.5 ลักษณะของการวิเคราะห์ปัญหา

การวิเคราะห์ปัญหาทางไฟไนท์อิลเมนต์ สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งวิธีการวิเคราะห์แบบหน่วยแรงรวม (Total Stress Analysis) และการวิเคราะห์แบบหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress Analysis) ในกรณีงานชุดดินใช้เวลาการก่อสร้างไม่นานจึงนิยมใช้วิธีการวิเคราะห์แบบหน่วยแรงรวม (Total Stress Analysis) การวิเคราะห์แบบนี้จะพิจารณามวลดินและแรงดันน้ำในดินแยกออกจากกันแต่อยู่รวมกันในขอบเขตของปัญหาที่ทำการวิเคราะห์ ส่วนวิธีการวิเคราะห์แบบหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress Analysis) การวิเคราะห์แบบนี้มวลดินและแรงดันน้ำในดินจะถูกพิจารณารวมเป็นส่วนเดียวกัน โดยอาศัยหลักการสมดุลแรง

2.11 ลักษณะของตัวอย่างดิน

ตัวอย่างดินจะเป็นตัวแทนของบริเวณนั้น ๆ ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ทางวิศวกรรมได้ การเก็บตัวอย่างจึงต้องการความระมัดระวังและความชำนาญที่จะให้ได้ตัวอย่างดินที่มีคุณภาพ ตัวอย่างดินมักแยกออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

2.11.1 ตัวอย่างดินคงสภาพ (Undisturbed Sample)

คือตัวอย่างดินที่ถูกเก็บขึ้นมาโดยมีสภาพใกล้เคียงสภาพธรรมชาติ ซึ่งมีการกระทบกระเทือนชั้นดินน้อยที่สุด คือ มีความชื้น ความหนาแน่น ลักษณะโครงสร้างไม่มีการเปลี่ยนแปลง เช่นเดียวกับเมื่ออยู่ในชั้นดินเดิม ถือว่าเป็นตัวอย่างดินที่มีคุณภาพดีที่สุด เพราะการวิเคราะห์ตัวอย่างดินคงสภาพจะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมที่แท้จริงของดินนั้นได้ กล่าวคือ การเกิดขึ้นของดินเป็นผลสืบเนื่องมาจากการกระทำร่วมกันของปัจจัยต่าง ๆ เช่น สภาพภูมิอากาศ พืช และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ต่อวัตถุดินกำเนิดของดิน ในสภาพพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่ง ตลอดช่วงระยะเวลาหนึ่ง ดังนั้นดินในที่แห่งหนึ่งจึงอาจเหมือนหรือต่างไปจากดินในที่อีกแห่งหนึ่งได้ ขึ้นอยู่กับอิทธิพลของปัจจัยเหล่านี้ ซึ่งมีความมากมายแตกต่างกันไปในแต่ละบริเวณส่งผลให้ดินมีลักษณะเด่นเฉพาะตัว และเมื่อปัจจัยเปลี่ยนไป ดินจะมีลักษณะหรือสมบัติต่าง ๆ เปลี่ยนแปลงไปด้วย

2.11.2 ตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพ (Disturbed Sample)

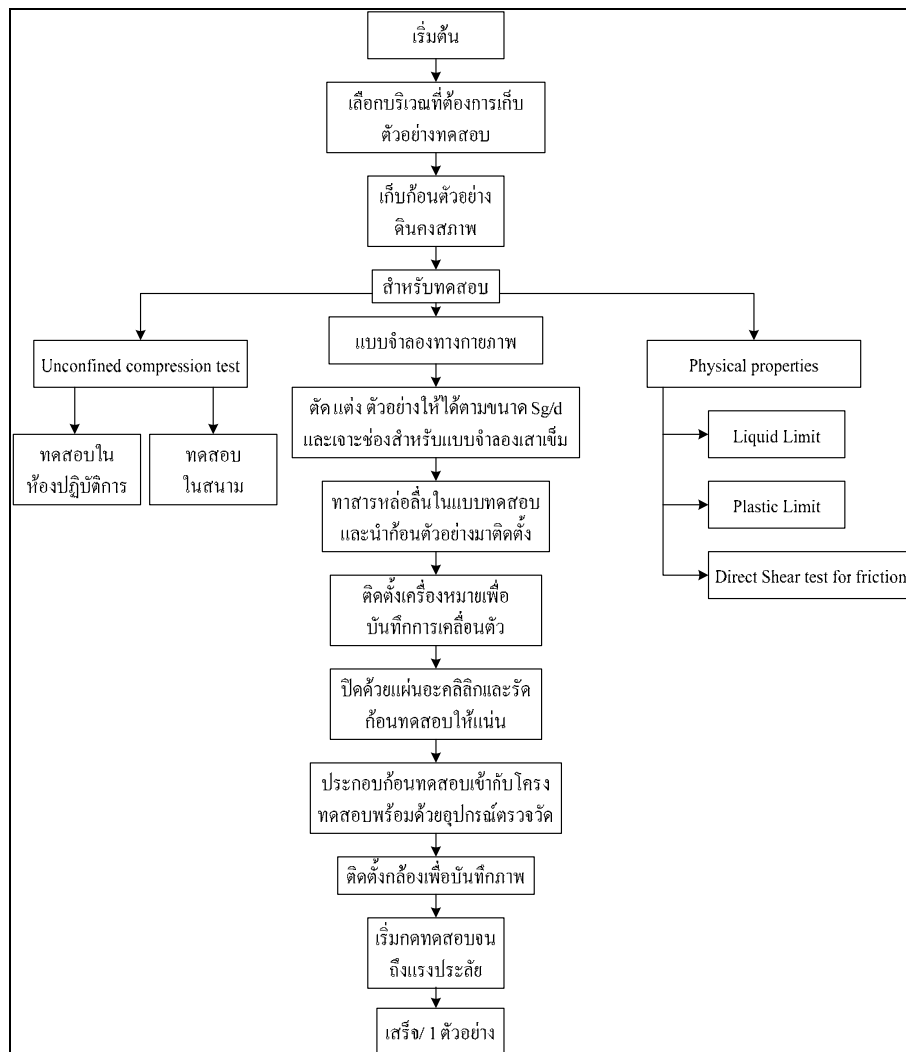
ตัวอย่างดินที่มีการเปลี่ยนสภาพไปบ้าง เช่น มีการอัดแน่นหรือการจับตัวตามธรรมชาติถูกทำลายเพราะแรงกระแทก Serge L., et al. (1990) กล่าวว่าโดยพฤติกรรมของดินเปลี่ยนสภาพจะไม่คำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากเวลาและโครงสร้างของการเกิดดิน ตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพสามารถสร้างขึ้นได้ในห้องปฏิบัติการ โดยจะมีปริมาณความชื้นเข้าใกล้ขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) เช่น การทดสอบอัดตัวคายน้ำของดินขาว

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาถึงพฤติกรรมแนวโค้งรับแรง (Arching effect) ระหว่างช่องว่าง (Gap) ของกำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง (Contiguous bored pile wall) โดยที่มีระยะห่างของจุดศูนย์กลางของเสาเข็ม (center to center) แตกต่างกัน การดำเนินงานวิจัยได้ทำการทดสอบดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ

โดยใช้การจำลองทางกายภาพแบบย่อส่วนกับดินคงสภาพคุณภาพสูง สาเหตุที่เลือกใช้ก้อนดินตัวอย่างคงสภาพคุณภาพสูง เนื่องจากการนำดินมาผสมน้ำและก่อตัวใหม่ (Remolded sample) จะทำให้ตัวอย่างดินสูญเสียโครงสร้างของดินธรรมชาติไป เนื่องจากการตกตะกอนและทับถมของดินมีลักษณะเป็นชั้น ๆ ซึ่งไม่สามารถสร้างขึ้นได้ สาเหตุอีกประการหนึ่งคือ ก้อนดินตัวอย่างมีขนาดใหญ่ต้องใช้เวลาานานกว่าที่ก้อนตัวอย่างจะมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ ซึ่งในงานวิจัยนี้จึงใช้ก้อนดินคงสภาพคุณภาพสูงที่ได้จากการขุดเปิดหน้าดินแทน เพื่อศึกษาถึงกลไกการวิบัติและศึกษาถึงพฤติกรรมในสภาวะก่อนแรงกดประลัยและสภาวะแรงกดประลัย

3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดิน

3.2.1 ขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4318

3.2.2 พิกัดพลาสติก (Plastic limit) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4318

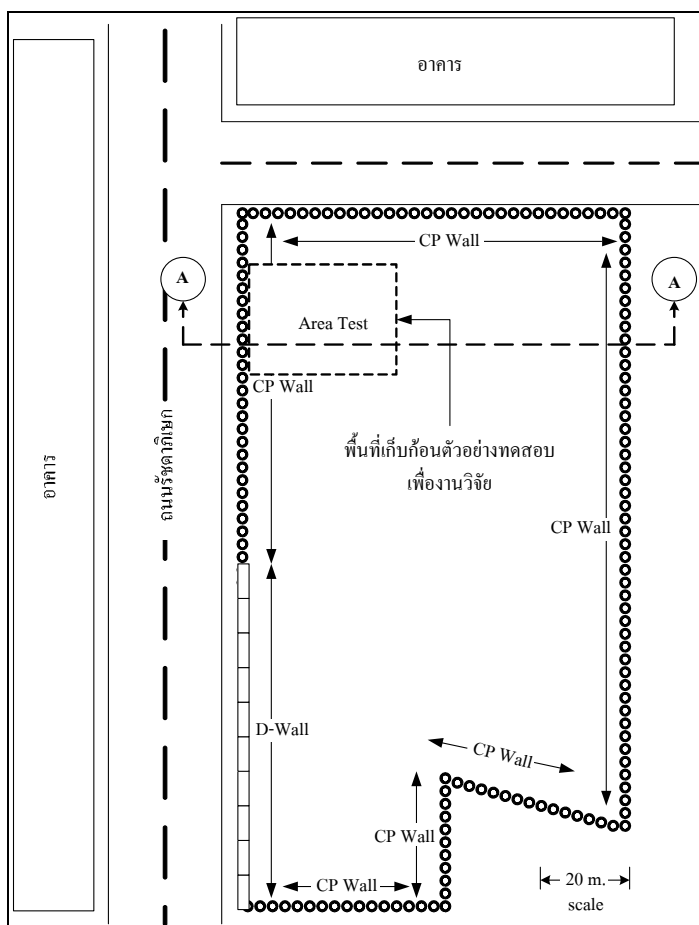
3.2.3 การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined compression test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2160

3.2.4 การทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนโดยวิธีแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3080-98

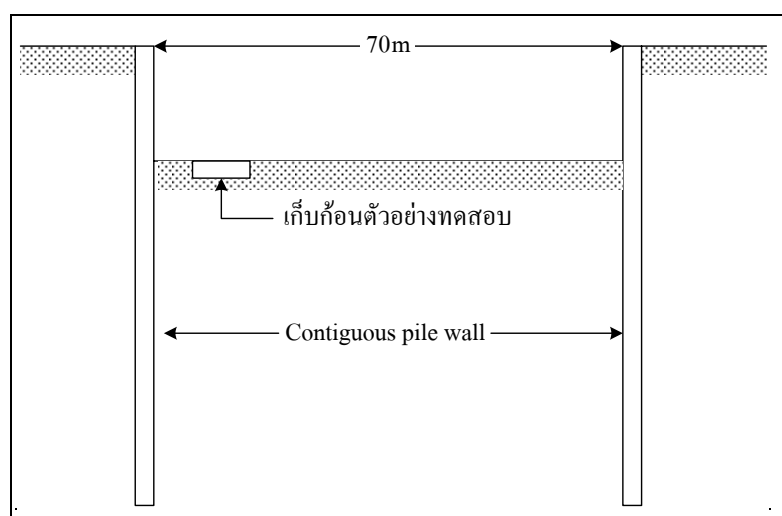
3.3 แหล่งดินที่นำมาทดสอบ

โครงการขุดดินลึกในชั้นดินกรุงเทพ

แหล่งดินที่ใช้เป็นตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยนี้ ใช้ตัวอย่างดินคงสภาพคุณภาพสูงที่ได้จากโครงการที่มีการขุดเปิดหน้าดินเป็นบริเวณกว้าง โครงการมีการขุดเปิดหน้าดินลึกหลายระดับทำให้สามารถลงไปเก็บก้อนดินตัวอย่างคงสภาพได้สะดวก โดยแผนผังของบ่อขุดและตำแหน่งของบริเวณเก็บตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3.2 ส่วนรูปที่ 3.3 แสดงรูปตัดของบ่อขุดที่ใช้เก็บก้อนตัวอย่าง



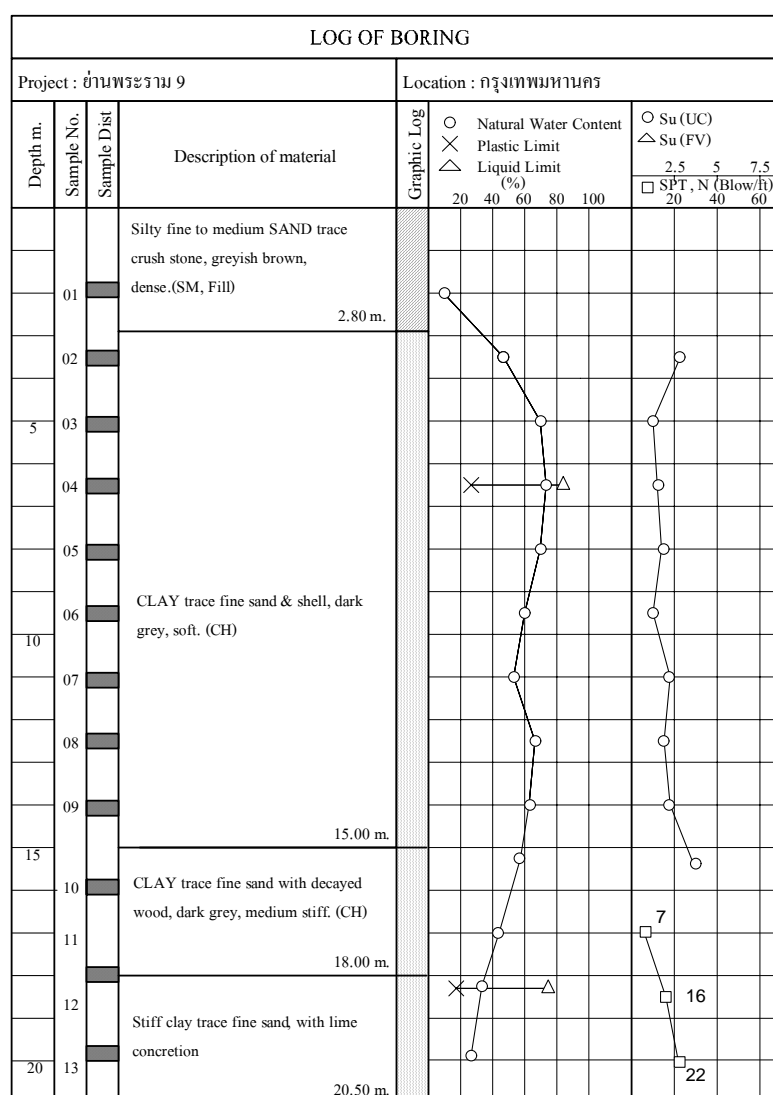
รูปที่ 3.2 ลักษณะของตำแหน่ง Contiguous Pile Wall ในโครงการก่อสร้าง



รูปที่ 3.3 แสดงรูปตัดของบ่อขุดแนว A-A

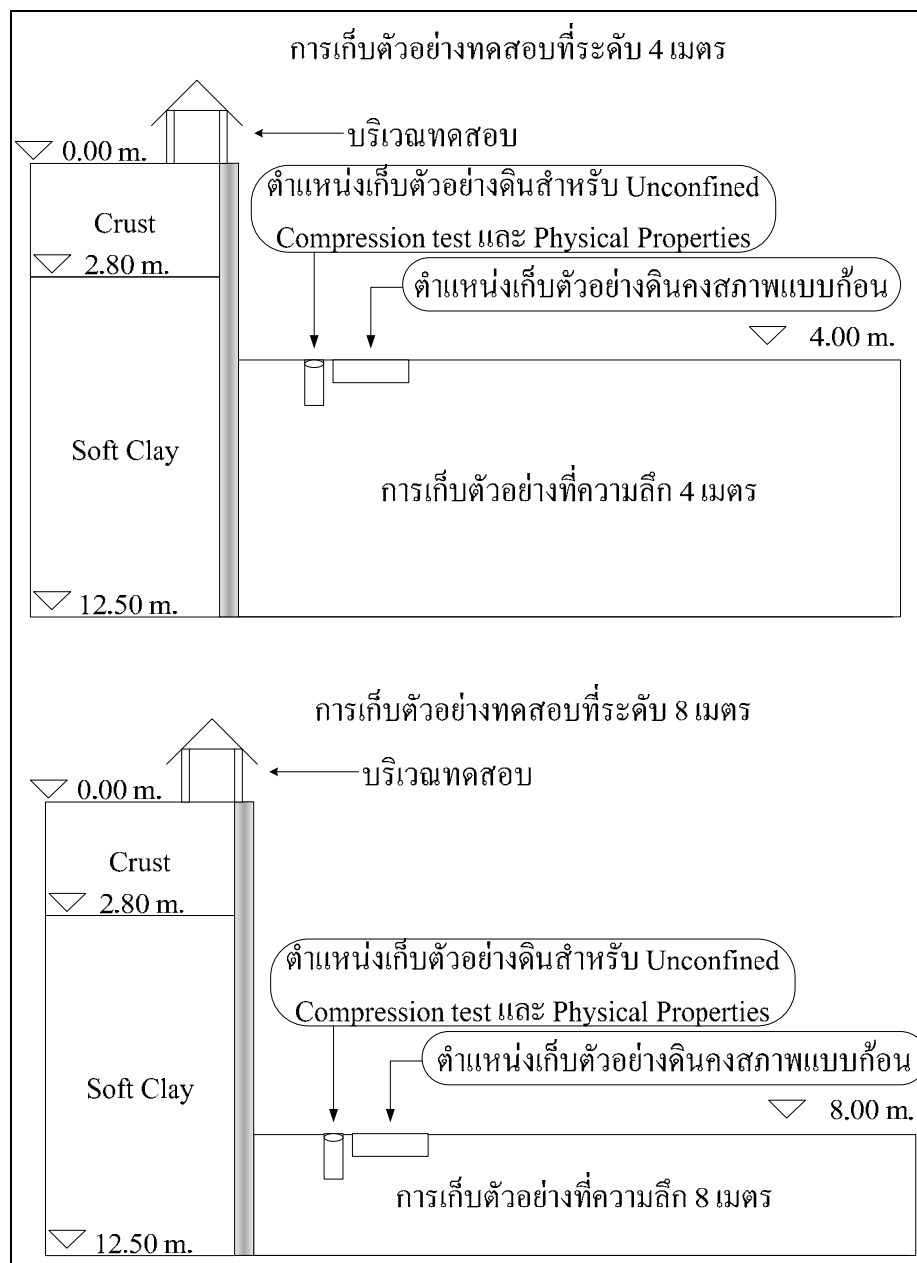
3.4 วิธีการเก็บตัวอย่างดิน

การเตรียมตัวอย่างจะเป็นการเก็บตัวอย่างคงสภาพคุณภาพสูง จากโครงการที่มีการขุดเปิดหน้าดินเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดิน ตัวอย่างที่ใช้มีขนาด 30×25×10 เซนติเมตร ก้อนตัวอย่างที่เก็บขึ้นมาจะนำมาทดสอบทันทีโดยใช้เวลาไม่เกิน 30 นาทีที่ความชื้นธรรมชาติ ทำให้ได้ตัวอย่างดินคงสภาพคุณภาพสูงทั้งทางด้านกำลังรับแรงเฉือนและคุณสมบัติทางกายภาพ ซึ่งมีคุณภาพดีกว่าดินที่นำมาผสมน้ำและก่อตัวใหม่ (Remolded sample) หรือดินที่เก็บไว้โดยไม่ทำการทดสอบทันที ในการก่อสร้างมีการเจาะสำรวจดินได้รูปตัดชั้นดินดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ผลการเจาะสำรวจดินของโครงการก่อสร้าง

ชั้นดินในบริเวณนี้เป็นดินถมหนา 2.8 เมตร ถัดลงไปเป็นชั้นดินอ่อนหนา 15 ถึง 18 เมตร ซึ่งวางตัวอยู่บนชั้นดินแข็ง จากชั้นดินจึงได้เลือกใช้ก้อนตัวอย่างในงานวิจัยที่ความลึก 2 ระดับ ได้แก่ ความลึก 4 เมตร และความลึก 8 เมตร ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงตำแหน่งเก็บตัวอย่างจากการขุดเปิดหน้าดิน

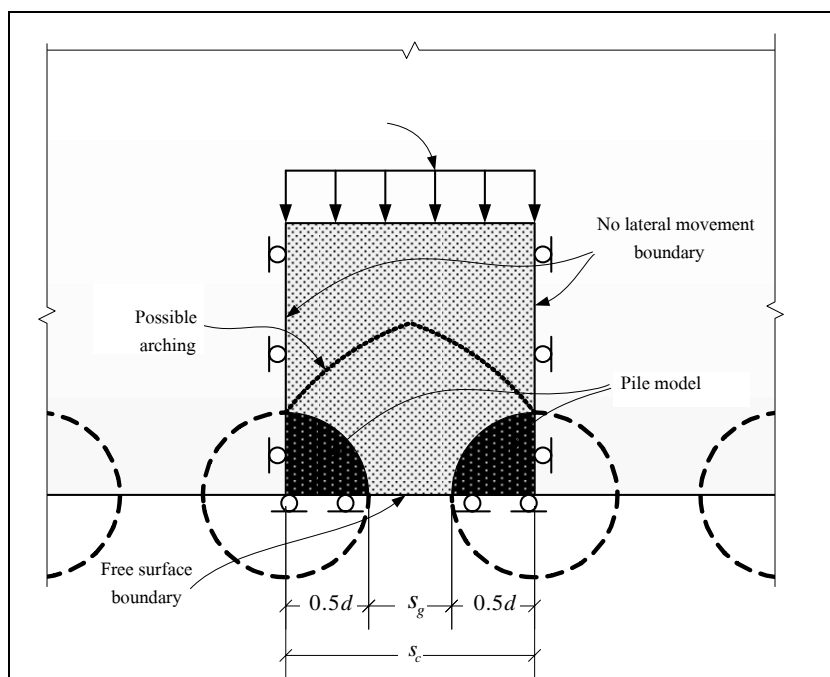
3.5 ความยาวของระยะห่างระหว่างเสาเข็ม

การทดสอบจะใช้อัตราส่วนระยะห่างต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (s_g / d) เท่ากับ 0.1 0.3 0.5 0.7 1.2 1.6 2.0 2.5 และ 3.0 การจำลองเสาเข็มขนาดเท่าจริงนั้น ทำให้ต้องสร้างเครื่องมือทดสอบที่มีขนาดใหญ่และมีประสิทธิภาพสูง เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการจำลองเสาเข็มขนาดจริง ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมในการปฏิบัติ งานวิจัยนี้จึงได้ใช้เสาเข็มลดขนาดลงเพื่อจำลองถึงพฤติกรรมของกำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องและเพื่อความสะดวกในการปฏิบัติงาน จึงได้เลือกใช้ขนาดของเสาเข็มและช่องว่างระหว่างเสาเข็ม ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงขนาดของเสาเข็มและระยะห่างที่ใช้ในการจำลอง

Pile Diameter Model (cm.)	Gap (cm.)	Spacing (cm.)	s_g / d	หมายเหตุ
80	10	90	0.125	มีใช้ในปัจจุบัน
100	10	110	0.10	มีใช้ในปัจจุบัน
14	1.40	15.40	0.10	ใช้ในการทดสอบ
14	3.50	17.50	0.30	ใช้ในการทดสอบ
14	7.00	21.00	0.50	ใช้ในการทดสอบ
14	9.75	23.75	0.70	ใช้ในการทดสอบ
8	9.50	17.50	1.20	ใช้ในการทดสอบ
8	13.00	21.00	1.60	ใช้ในการทดสอบ
8	15.75	23.75	2.00	ใช้ในการทดสอบ
6	15.00	21.00	2.50	ใช้ในการทดสอบ
6	17.75	23.75	3.00	ใช้ในการทดสอบ

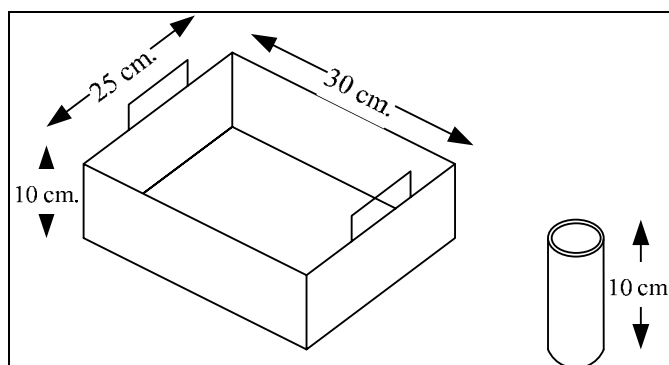
เนื่องจากเสาเข็มหน้าตัดกลมสมมาตร จึงได้จำลองแบบจำลองทางกายภาพเพียงครั้งหนึ่งของเสาเข็ม ในงานวิจัยนี้เป็นลักษณะของปัญหาแบบสมมาตรและกำหนดให้เสาเข็มมีความแกร่ง (Stiffness) มาก กำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องไม่มีการเคลื่อนตัว เนื่องจากมีระบบค้ำยันด้านข้าง โดยกำหนดให้อีกด้านหนึ่งของกำแพงเป็นลักษณะยึดแน่น การเคลื่อนตัวที่สามารถเกิดขึ้นได้จะเกิดเฉพาะกับดินตัวอย่างด้านหลังกำแพงเท่านั้น มีลักษณะการจำลองรูปแบบดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การจำลองเพียงครึ่งหนึ่งเนื่องจากความสมมาตรของตัวอย่าง

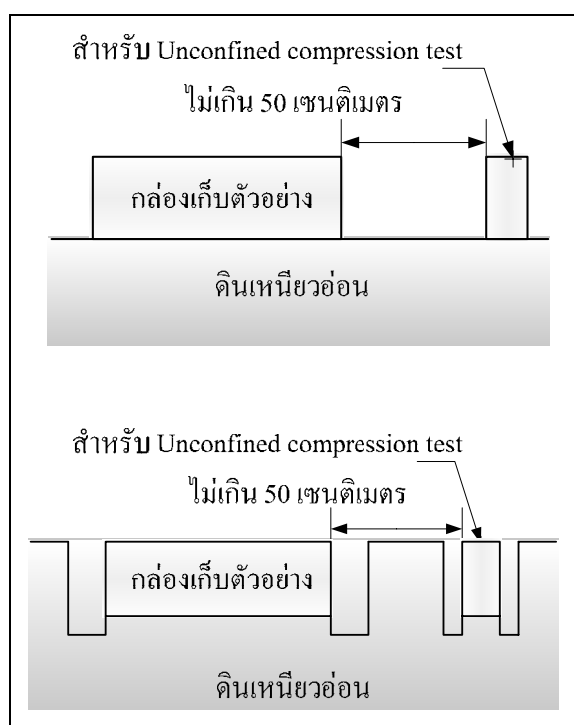
3.6 วิธีการเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน

3.6.1 เตรียมแบบเก็บตัวอย่างคงสภาพแบบก้อน มีลักษณะเป็นแบบเหล็ก ขนาด $30 \times 25 \times 10$ เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.6 มีด้านที่เจาะลงในดินลักษณะคมเพื่อเจาะลงไปชั้นดิน โดยรบกวนดินตัวอย่างให้น้อยที่สุด หลังจากดำเนินการเก็บตัวอย่างแบบก้อนเสร็จ ลำดับต่อไปเก็บตัวอย่างดินคงสภาพสำหรับ Unconfined compression test ในบริเวณใกล้เคียงกัน โดยที่จะเก็บในบริเวณที่อยู่บริเวณเดียวกัน ห่างจากจุดเก็บตัวอย่างคงสภาพแบบก้อนไม่เกิน 50 เซนติเมตร



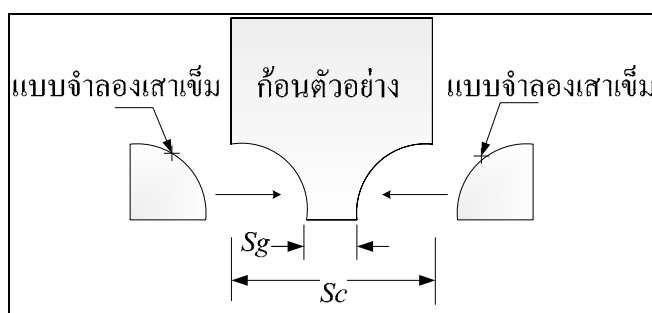
รูปที่ 3.7 แสดงอุปกรณ์เก็บดินตัวอย่างคงสภาพ

3.6.2 เลือกบริเวณที่ต้องการเก็บดินตัวอย่าง จากนั้นกดแบบเก็บตัวอย่างดินคงสภาพแบบ ก้อนลงไปบนดินจนกระทั่งจมนิดกล่องดังรูปที่ 3.8 ขณะที่กดแบบเก็บตัวอย่างลงบนชั้นดินควรรักษา แนวตั้งของกล่องให้ดีที่สุดที่สุด ลำดับต่อไปเปิดดินด้านข้างออกทุกด้านพยายามหลีกเลี่ยงการกระทบกับ กล่องเก็บตัวอย่าง ใช้ลวดตัดก่อนตัวอย่างด้วยความระมัดระวัง โดยที่ดินภายในกล่องเก็บตัวอย่าง ยังคงอยู่และไม่ถูกรบกวน



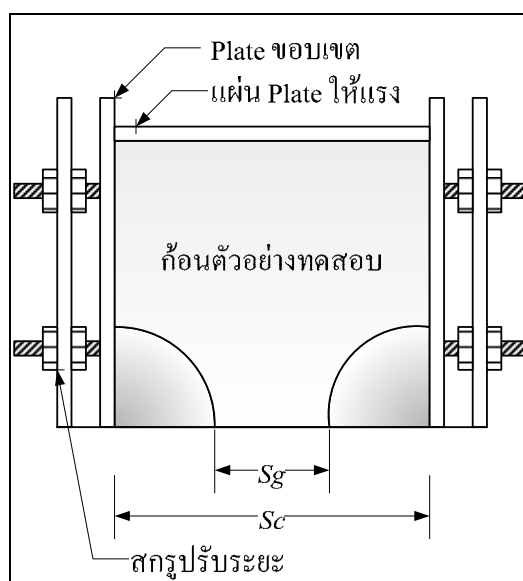
รูปที่ 3.8 แสดงการเก็บดินตัวอย่างคงสภาพแบบก้อน

3.6.3 นำแบบเก็บตัวอย่างที่มีตัวอย่างดินอยู่ใน ดำเนินการปาด ตัด แต่งดินตัวอย่างให้ ได้ขนาดตามที่ต้องการทำการทดสอบ และ เจาะก่อนดินตัวอย่างตามขนาดของแบบจำลองเสาเข็ม เพื่อนำแบบจำลองเสาเข็มมาใส่แทนที่ดังรูปที่ 3.9 (ตามระยะ s_g ที่กำหนด โดยให้เล็กกว่าขนาดจริง เล็กน้อยเพื่อให้ทั้งสองส่วนติดกันแน่น)



รูปที่ 3.9 แสดงการเจาะดินเพื่อติดตั้งแบบจำลองเสาเข็ม

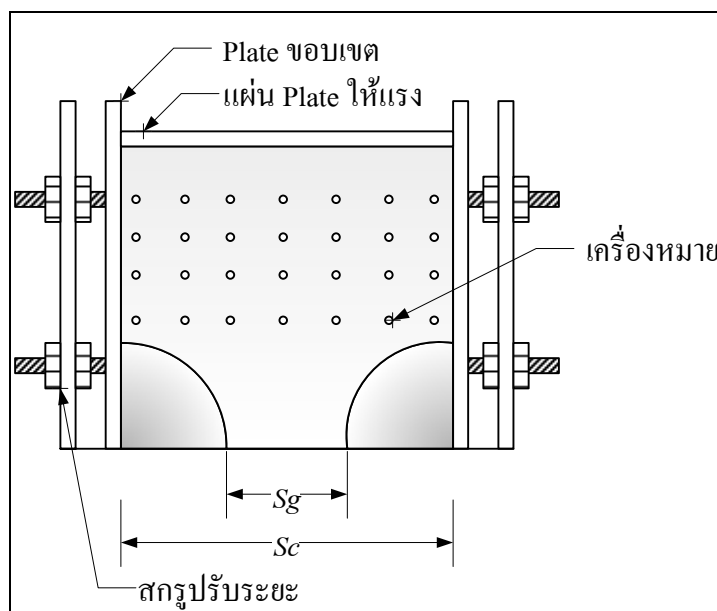
3.6.4 นำก้อนดินตัวอย่างที่เตรียมไว้ตามขนาดที่ต้องการ บรรจุในแบบทดสอบที่ปรับขนาดด้านข้างของกล่องทดสอบให้ได้ขนาดเท่ากับก้อนดินตัวอย่างพอดี โดยที่ภายในแบบทดสอบได้ทาสารหล่อลื่นไว้ทั้ง 3 ด้าน เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างก้อนดินตัวอย่างกับแบบทดสอบที่เป็นเหล็กดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงการประกอบดินตัวอย่างกับแบบทดสอบ

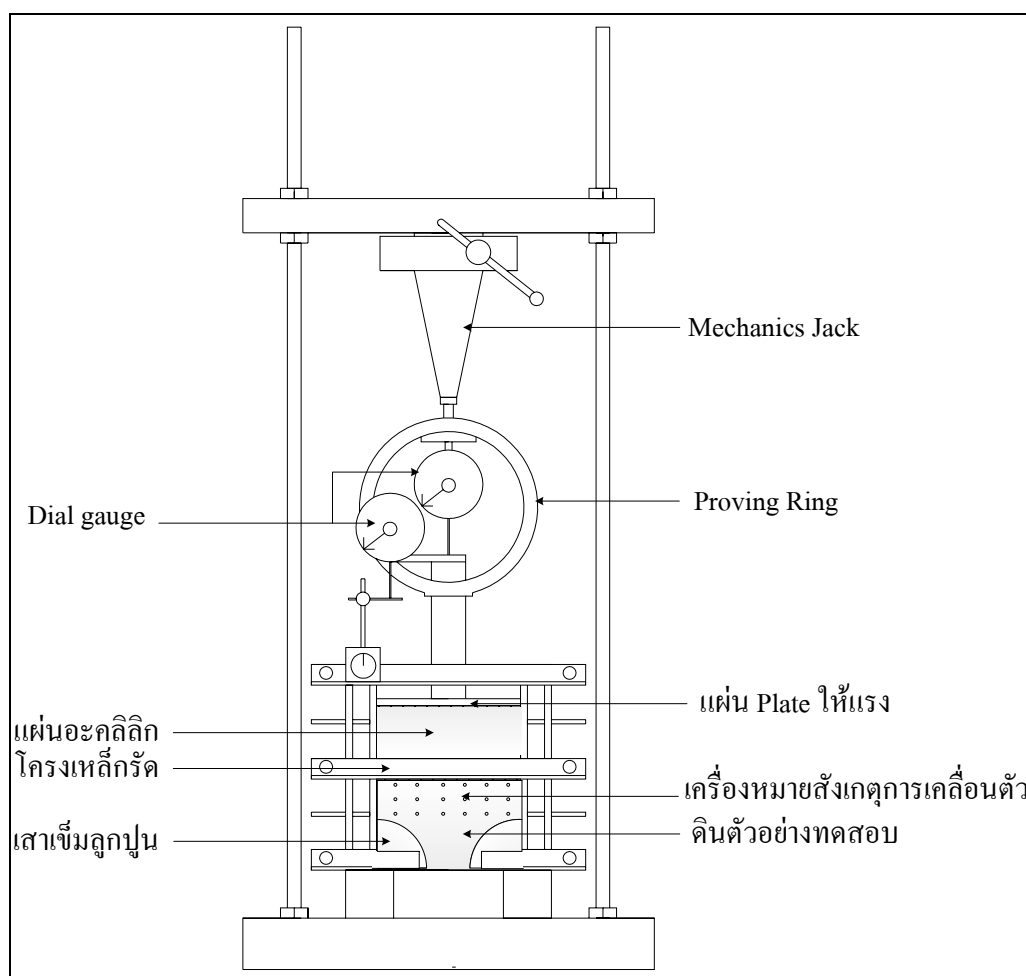
3.6.5 ดำเนินการติดหมุดเครื่องหมายบนผิวด้านหน้าดินตัวอย่างด้วยลูกปิดกลม ในลักษณะช่องตารางขนาด 2×2 เซนติเมตรบริเวณดินด้านบนตัวอย่างของแบบจำลองเสาเข็ม ดังรูปที่ 3.11 เพื่อทำการบันทึกภาพ (ทุก ๆ การเคลื่อนตัว 0.01 เซนติเมตรของดินตัวอย่าง) จากนั้น

นำแผ่นอะคลิลิกมีความหนา 5 มิลลิเมตร ทาสารหล่อลื่นด้านที่ประกบเข้ากับดินตัวอย่างไปประกบเข้ากับแบบกดทดสอบพร้อมทั้งรัดด้วยโครงเหล็กไว้ให้แน่น



รูปที่ 3.11 แสดงการติดตั้งเครื่องหมายเพื่อบันทึกการเคลื่อนตัว

3.6.6 นำแบบกดทดสอบไปประกบเข้ากับโครงกดทดสอบโดยจัดวางให้ได้ระดับดังรูปที่ 3.11 เพื่อทำการทดสอบจนถึงจุดวิบัติ การทดสอบจะต้องดำเนินการด้วยความรวดเร็วเพื่อให้ได้ตัวดินตัวอย่างที่มีความคงสภาพสูง โดยจะใช้เวลาไม่เกิน 30 นาทีนับตั้งแต่การเก็บดินตัวอย่างขึ้นมา



รูปที่ 3.12 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบและตัวอย่างเข้าด้วยกัน

3.7 การทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบ

เนื่องจากการทดสอบมีการสร้างเครื่องมือทดสอบขึ้นมาใหม่ดังรูปที่ 3.12 จึงอธิบายการทดสอบดังนี้

1) ประกอบเครื่องมือทดสอบ ซึ่งสามารถแยกชิ้นส่วนออกจากกันได้ ติดตั้งอุปกรณ์ให้แรงแบบมือหมุนเข้ากับโครงทดสอบ และติดตั้ง Proving Ring เพื่อวัดแรงที่เกิดขึ้น

2) จัดวางตัวอย่างลงบนเครื่องทดสอบ จัดให้ได้ศูนย์กลางของแนวกด สังเกตได้จากแผ่นเหล็กด้านบนของดินตัวอย่างทดสอบ หมุนเครื่องให้แรงแบบมือหมุนให้เป็นกดของเครื่องทดสอบสัมผัสกับแผ่นเหล็กกดตัวอย่างพอดี เพื่อลดความผิดพลาดที่ไม่ต้องการ ติดตั้ง dial gauge เพื่อวัดค่าการเคลื่อนตัวเริ่มต้นที่เลขศูนย์ เพื่อความสะดวกในการอ่านค่าเช่นเดียวกับ dial gauge ที่อยู่ใน Proving Ring

3) ก่อนเริ่มการทดสอบจะต้องตรวจสอบการติดตั้งดินตัวอย่าง และเครื่องมือให้เรียบร้อย เช่น เป็นกคของเครื่องทดสอบจะต้องสัมผัสกับแผ่นเหล็กด้านบนดินตัวอย่างพอดี dial gauge สำหรับวัดค่าการเคลื่อนตัวและวัดแรง (ใน Proving ring) ให้ตั้งอยู่ที่ศูนย์ เนื่องจากเครื่องทดสอบเป็นแบบมือหมุน ผู้ทดสอบจะต้องซ้อมหมุนให้ได้อัตราการกดตามต้องการ (ในขณะที่ยังไม่มีการเคลื่อนตัวอย่าง)

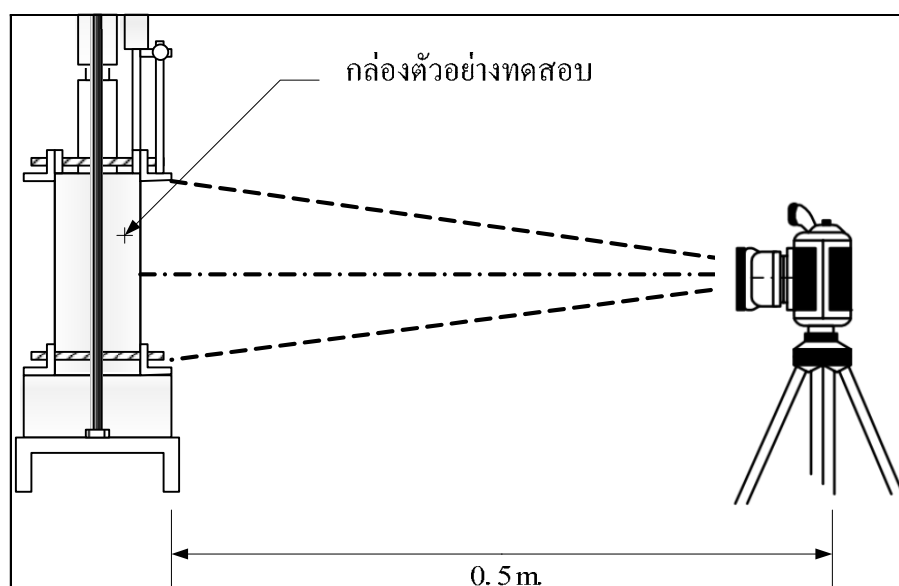
4) เริ่มการกดตัวอย่างทดสอบจากการเพิ่มแรงในแนวตั้งด้วยเครื่องกลให้แรงแบบมือหมุน อัตราการกดการเคลื่อนที่ทางแนวตั้งของเครื่องให้อยู่ในช่วง 2.24 มิลลิเมตรต่อนาที

5) บันทึกข้อมูลค่าจากวงแหวนวัดแรงและข้อมูลการเคลื่อนตัวของ dial gauge ทุก ๆ การเคลื่อนตัว 0.005 เซนติเมตรของตัวอย่างทดสอบ เมื่อแรงในวงแหวนวัดแรงเพิ่มขึ้นไปสูงสุดแล้วเริ่มจะลดลง ซึ่งแสดงว่าถึงจุดสูงสุดของกำลังของดิน ให้ยังคงอ่านผลต่อไปจนเห็นแนวเฉียง (Failure plane) บนดินตัวอย่างได้ชัดเจน ในบางกรณีที่ไม่มียอเยื่อปรากฏชัด ให้ทดสอบจนการเคลื่อนตัวถึงประมาณ 20% ของความสูงของตัวอย่าง

6) บันทึกภาพการเคลื่อนตัวขณะทำการทดสอบโดยบันทึกทุก ๆ การเคลื่อนตัวที่ 0.01 เซนติเมตรของตัวอย่างทดสอบ

3.8 การบันทึกภาพการเคลื่อนตัว

การบันทึกภาพการเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบจากเครื่องมือที่ติดตั้งไว้บนตัวอย่างด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัลธรรมดาติดตั้งบนขาตั้งกล้องสามขาที่มั่นคงแสดงดังรูปที่ 3.13 การบันทึกภาพด้วยกล้องดิจิทัลธรรมดา (Compact cameras) จะพบปัญหาเส้นตรงที่ขอบภาพจะเว้าเข้ามาตรกลาง (Pincushion distortion) วิธีแก้ปัญหานี้คือเลือกใช้ทางยาวโฟกัสที่สั้น (ไม่ใช้การซูม) แล้วจัดองค์ประกอบให้วัตถุอยู่ตรงกลางภาพ (บริษัท ฟุจิ โฟโต้ ฟิล์ม, 2552 : เว็บไซท์) เนื่องจากวัตถุที่ต้องการบันทึกภาพมีขนาด 30×25 เซนติเมตรซึ่งมีขนาดเล็กจึงเลือกใช้ความยาวโฟกัสเท่ากับ 50 เซนติเมตรคล้ายกับการทดสอบของ (ขนาดล คงสมบูรณ์ และประสพศิริ แสงภู, 2547) การบันทึกภาพจะบันทึกทุก ๆ การเคลื่อนตัวที่ 0.01 เซนติเมตรของตัวอย่างทดสอบทีละภาพ และนำภาพที่บันทึกได้มาเทียบกับสเกลระหว่างเครื่องมือที่ติดตั้งบนตัวอย่างทดสอบขณะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับมวลดินกับแถบบรรทัดในภาพถ่าย



รูปที่ 3.13 การติดตั้งกล้องถ่ายภาพเพื่อบันทึกการเคลื่อนตัว

3.9 การทดสอบหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

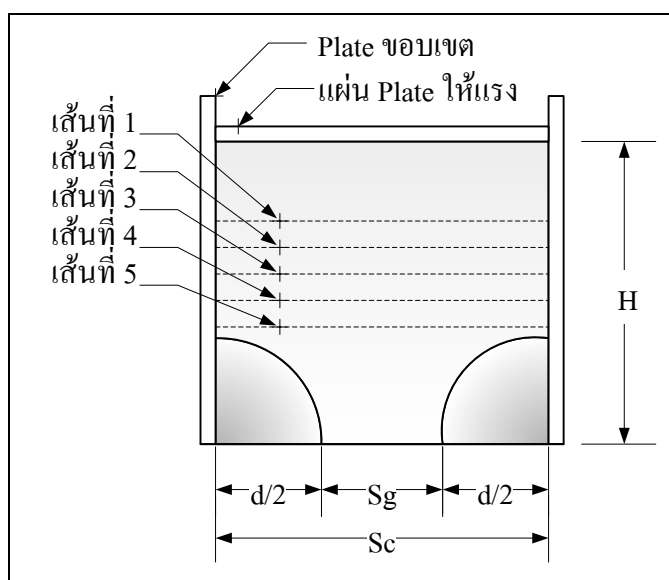
ตัวแปรหลักของการเคลื่อนตัวในมวลดิน คือ แฟกเตอร์ยึดเกาะระหว่างดินกับกำแพงกันดิน (α : Adhesion factor) ค่าแฟกเตอร์นี้จะมีค่าแปรผันตามประเภทของกำแพงและชนิดของดินเหนียว การเคลื่อนตัวของดินระหว่างช่องว่างในกำแพงระบบเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องจึงเกี่ยวข้องกับแรงยึดเกาะระหว่างกำแพงและดินด้วย ค่าแฟกเตอร์ยึดเกาะของดินเหนียวอ่อนจะมีค่าสูงมากและอาจมีค่ามากกว่า 1.0 สำหรับดินเหนียวอ่อนมากเกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินกับเวลา ในทางตรงกันข้าม ค่าแฟกเตอร์จะมีค่าน้อยลงตามกำลังต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากดินที่มีกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงเป็นดินที่แข็งและเปราะ การแปรปรวนของค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะทำให้ต้องทดสอบเพื่อให้ได้ค่าที่ตรงกับตัวอย่างแบบจำลองทางกายภาพ และนำไปใช้หาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจึงทำการทดสอบเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างคอนกรีตกับดินเหนียวอ่อนคงสภาพ ในวิธีปฏิบัติทำการทดสอบโดยใช้เครื่องมือทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนโดยวิธีแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test) โดยหล่อลูกปูนขนาดเท่ากับขนาดของวงแหวนเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test) จากนั้นนำมาประกอบในอุปกรณ์ทดสอบโดยมีชิ้นส่วนด้านบนเป็นดินเหนียวอ่อน จากนั้นเริ่มการทดสอบมีน้ำหนักกดทับเท่ากับ $0.5 \sigma_{v0}$ σ_{v0} และ $1.5 \sigma_{v0}$

3.10 การจำลองการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์

การวิเคราะห์เกี่ยวกับการเคลื่อนตัวและหน่วยแรงของดินด้วยวิธีทางไฟไนต์อิเลเมนต์โดยใช้โปรแกรม PLAXIS มีความจำเป็นที่จะต้องรู้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของดิน เช่นค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน ค่าโมดูลัสของดิน และค่ามุมต้านทานแรงเสียดทานของดิน ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของดินที่ใช้นั้นจะต้องหามาจากวิธีการทดสอบต่าง ๆ ตามมาตรฐานการทดสอบ

ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบจะกำหนดลักษณะของปัญหาโดยสมมติว่าเป็นลักษณะ 2 มิติ (Plane strain) และอาศัยแบบจำลองชนิด Mohr – Coulomb soil modeling สำหรับการจำลองมวลดิน การวิเคราะห์จะใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Non-porous behavior ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้จะอยู่ในรูปแบบของหน่วยแรงรวม

การเคลื่อนตัวจากวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์ (FEM) จะนำมาเปรียบเทียบกับผลการเคลื่อนตัวภายในตัวอย่างทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ โดยได้ทำเครื่องหมายไว้บนตัวอย่างทดสอบและบันทึกภาพตลอดการทดสอบ จากนั้นนำมาเข้ากระบวนการการแปรผลเป็นค่าการเคลื่อนตัวของแต่ละจุดที่ทำเครื่องหมายไว้ โดยการวิเคราะห์จะแบ่งเป็น 5 เส้นเรียงลำดับเส้นที่ 1 ถึง 5 จากด้านบนลงด้านล่าง ดังรูปที่ 3.14 และวิเคราะห์ทุกสถานะที่ 25% 50% 75% และ 95% ของแรงที่วิบัติ ทั้งการทดสอบทางกายภาพและวิธีทางไฟไนต์อิเลเมนต์



รูปที่ 3.14 แสดงลำดับเส้นการกำหนดเครื่องหมายเพื่อบันทึกภาพ

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 ลักษณะชั้นดินของโครงการ

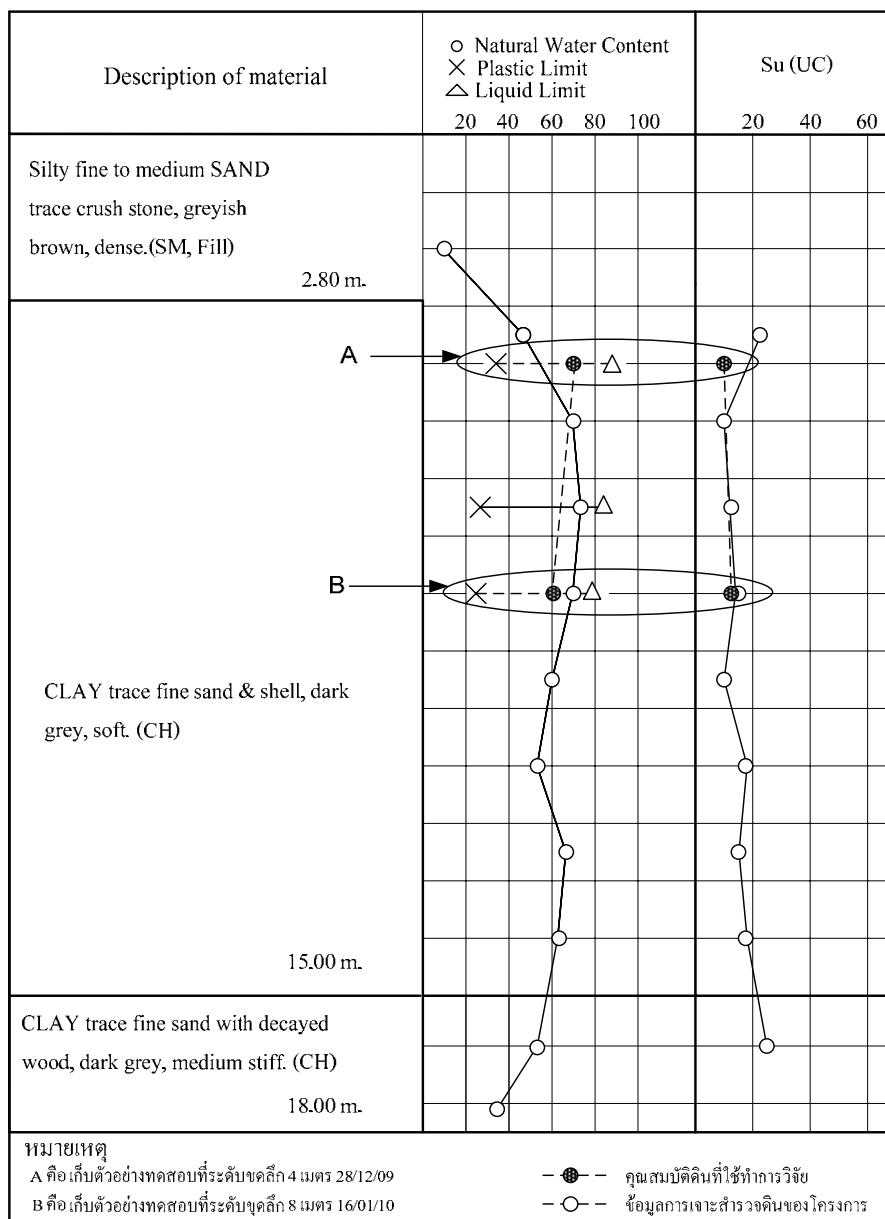
โครงการก่อสร้างมีการขุดเปิดหน้าดินลึกเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดิน โดยได้เลือกใช้ดินในระดับความลึก 4 เมตร และ 8 เมตร มีลักษณะของชั้นดินในบริเวณดังกล่าว คือ ลักษณะเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนสีเทาดำ (Soft dark grey clay) จำแนกตาม USCS ได้เป็น CH โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น (Water content : w) อยู่ระหว่าง 70 ถึง 78.30% และมีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength : S_u) อยู่ระหว่าง 17 ถึง 19 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร โดยมีค่า $LL = 85.40\%$ $PL = 32.60\%$ $PI = 52.80\%$ ตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบได้ใช้ดินจากโครงการก่อสร้างที่มีการขุดเปิดหน้าดินดังกล่าว ดินตัวอย่างที่นำมาจึงเป็นตัวอย่างที่คงสภาพคุณภาพสูง ดังนั้นจึงต้องหาคูณสมบัติของดินที่นำมาทดสอบเพื่อนำไปวิเคราะห์ถึงกำลังที่เกิดขึ้นของตัวอย่างดิน โดยแสดงคูณสมบัติของตัวอย่างดินไว้ดังตารางที่ 4.1 โดยตัวอย่างดินที่นำมาสำหรับ Unconfined compression test และ Physical properties นั้นจะทำการเก็บดินบริเวณเดียวกันกับการเก็บดินตัวอย่างคงสภาพแบบก้อน

ตารางที่ 4.1 แสดงคูณสมบัติของดินที่ใช้ทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ

คูณสมบัติ	ความลึก 4 เมตร	ความลึก 8 เมตร
Water content	78.38%	62.06%
Undrained Shear Strength	12.5 kN/m ²	15.6 kN/m ²
Liquid Limit	90.10%	72.75%
Plastic Limit	34.70%	30.9%
Plasticity Index	55.40%	41.85%

จากผลการเจาะสำรวจดินของโครงการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบดินตัวอย่างคงสภาพที่เก็บที่ระดับความลึกต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าคูณสมบัติของดินจากการเจาะสำรวจดินและการเก็บดินตัวอย่างคงสภาพแบบก้อนให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่าดินที่เก็บขึ้นมาทำการทดสอบกับ

แบบจำลองทางกายภาพยังมีคุณภาพสูง และไม่ถูกรบกวน ทำให้คุณสมบัติของดินที่นำมาทดสอบยังคงสภาพเดิมอยู่ในใกล้เคียงกับสภาพจริง แต่ผล Unconfined compression test บางจุดจากดินตัวอย่างที่เก็บมา มีค่าต่ำกว่าผลเจาะสำรวจของโครงการ เนื่องมาจากบริเวณที่ทำการเจาะสำรวจกับบริเวณที่เก็บตัวอย่างทดสอบอยู่ต่างบริเวณกัน

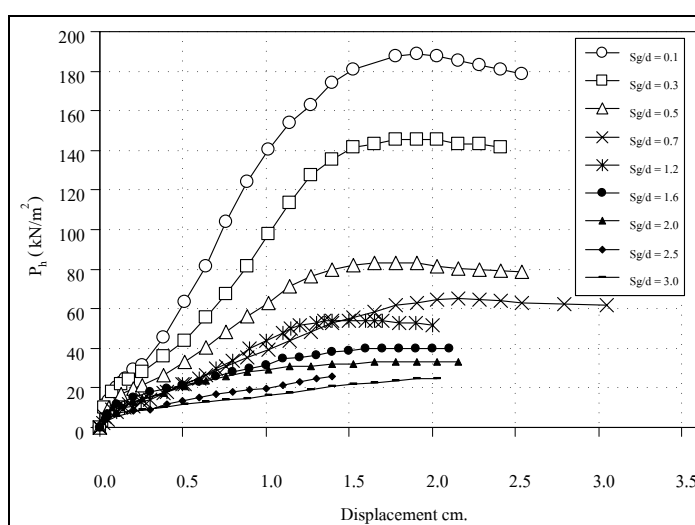


รูปที่ 4.1 ผลการเจาะสำรวจดินเปรียบเทียบกับกับคุณสมบัติของดินที่ใช้ในการทดลอง

บริเวณที่เก็บดินตัวอย่างทดสอบแบบก้อน ตัวอย่างสำหรับ Unconfined compression test และตัวอย่างสำหรับ Physical properties พบว่าดินมีความอ่อนตัวสูง ดินค่อนข้างที่จะเป็นเนื้อเดียวกันโดยจะไม่พบเปลือกหอยเล็ก ๆ และใบไม้ ตัวอย่างที่นำขึ้นมาทดสอบจึงเป็นตัวอย่างคุณภาพสูง และมีความคงสภาพสูงเพราะทำการเก็บจากการขุดเปิดหน้าดิน เมื่อนำมาทดสอบจะทำการทดสอบในทันทีที่นำขึ้นมา จึงทำให้ได้ผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกับสภาพจริงมากที่สุด

4.2 ผลทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ

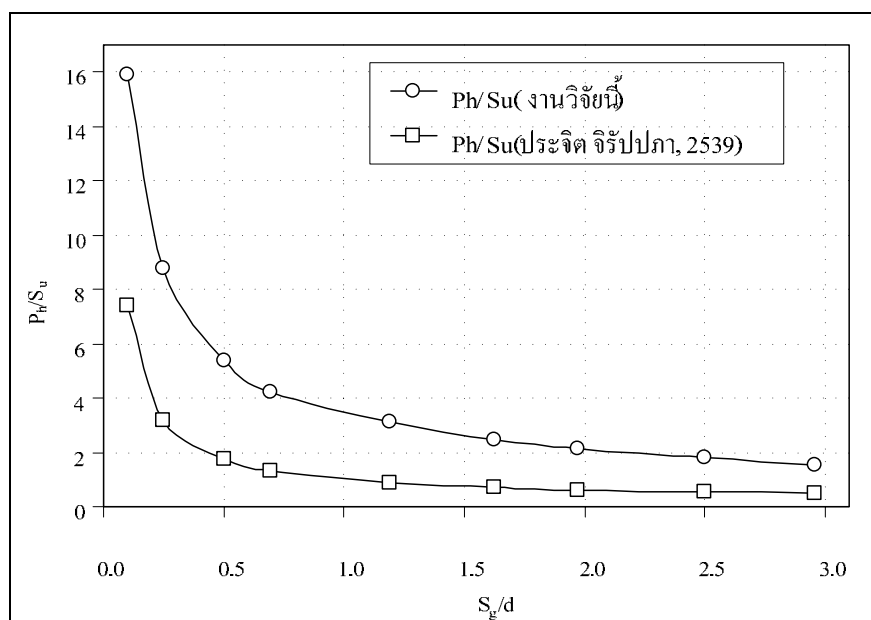
จากการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพในขนาดอัตราส่วนระยะห่างช่องเปิดต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (s_g / d) ขนาดต่าง ๆ โดยนำข้อมูลการเคลื่อนตัวของดินตัวอย่างและกำลังต้านทานต่อแรงดันดินด้านข้างมาทำการวิเคราะห์ บางครั้งอาจจะปรากฏว่า กราฟมีลักษณะโค้งงอในช่วงแรก ซึ่งจำเป็นจะต้องมีการแก้ไขให้ได้ค่าที่ถูกต้องด้วยการลากเส้นตรงให้สัมผัสกับกราฟตรงส่วนที่ชันที่สุดไปตัดกับแกนนอน เรียกว่า “Initial Correction” แสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.2 พบว่าที่ขนาดอัตราส่วนระยะห่างช่องเปิดต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อย กำลังต้านทานต่อแรงดันดินด้านข้างสูง และที่ขนาดอัตราส่วนระยะห่างช่องเปิดต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมาก กำลังต้านทานต่อแรงดันดินด้านข้างต่ำ เช่น ที่อัตราส่วนระยะห่างช่องเปิดต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $s_g / d = 0.1$ (ช่องเปิดแคบ) กำลังต้านทานต่อแรงดันดินด้านข้างเท่ากับ 188.9 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร และที่อัตราส่วนระยะห่างช่องเปิดต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $s_g / d = 3.0$ (ช่องเปิดกว้าง) กำลังต้านทานต่อแรงดันดินด้านข้างเท่ากับ 24.9 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร



รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ

4.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบทางกายภาพกับทฤษฎีประจิด

ผลการทดสอบทางกายภาพให้ค่าอัตราส่วนแรงต้านทานต่อแรงดันดินต่อกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำสูงกว่าค่าจากสมการที่ 2.1 ในทุกอัตราส่วน แรงต้านทานของดินระหว่างเสาเข็มแปรผกผันกับระยะห่างช่องเปิดในลักษณะไฮเปอร์โบลิก โดยมีแนวโน้มของเส้นกราฟที่คล้ายคลึงกับแนวคิดที่ถูกลำเสนอด้วยรูปที่ 4.3 โดยเส้นกราฟจากแนวคิดที่มีค่าต่ำกว่า อาจจะมาจากการสมมติกลไกการวิบัติขึ้นมาแล้วทำการคำนวณหาแรงที่เกิดขึ้น ซึ่งในการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพได้ทำการทดสอบจนสามารถแสดงให้เห็นแนวการวิบัติในดินตัวอย่าง ทำให้เห็นกลไกการวิบัติที่ชัดเจน สามารถนำไปใช้พัฒนาสมการเพื่อคำนวณแรงต้านของดินระหว่างเสาเข็ม ซึ่งอาจจะทำให้ได้สมการประมาณที่ใกล้เคียงกับสภาพจริงมากขึ้น

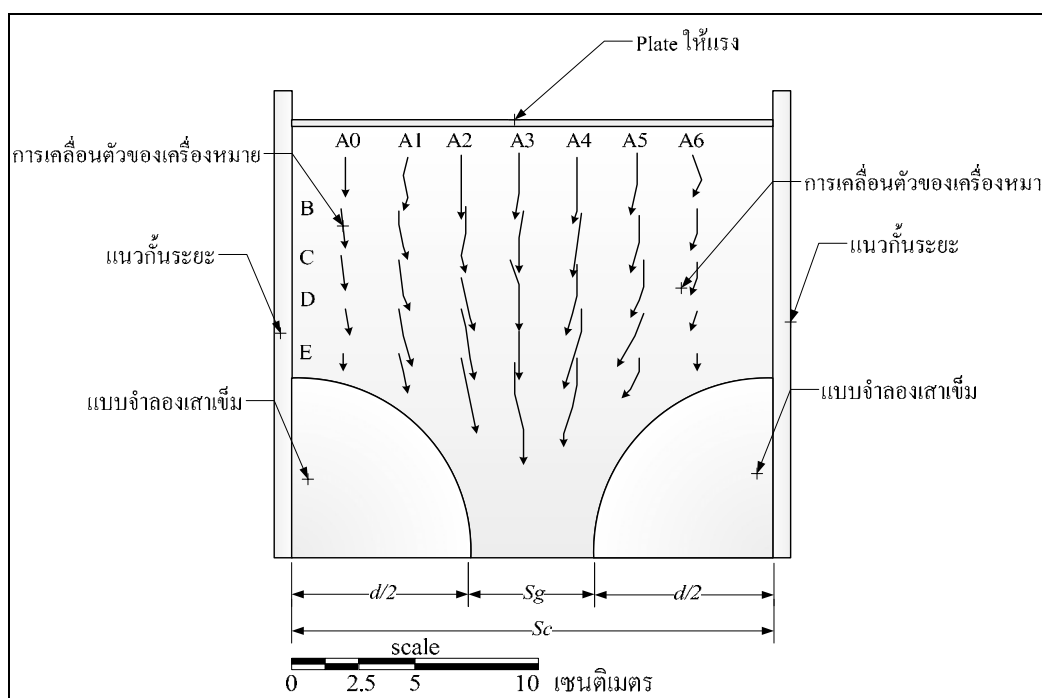


รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบทางกายภาพกับผลทางทฤษฎีในปัจจุบัน

4.4 กลไกการวิบัติของดินจากการทดสอบ

จากการบันทึกภาพถ่ายขณะทำการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ โดยทำการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของหมุดเครื่องหมายด้วยโปรแกรม Datacatcher version 1.20 ได้ผลการเคลื่อนตัวของดินตัวอย่างทดสอบจากหมุดเครื่องหมาย พบว่าการเคลื่อนตัวของดินตัวอย่างทดสอบเมื่อเขียนเป็นแนวเส้นทางการเคลื่อนที่ (trajectory path) แสดงดังรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของหมุดเครื่องหมาย ดินตัวอย่างบริเวณแนวช่องว่างระหว่างเสาเข็ม (s_g) จะมีการ

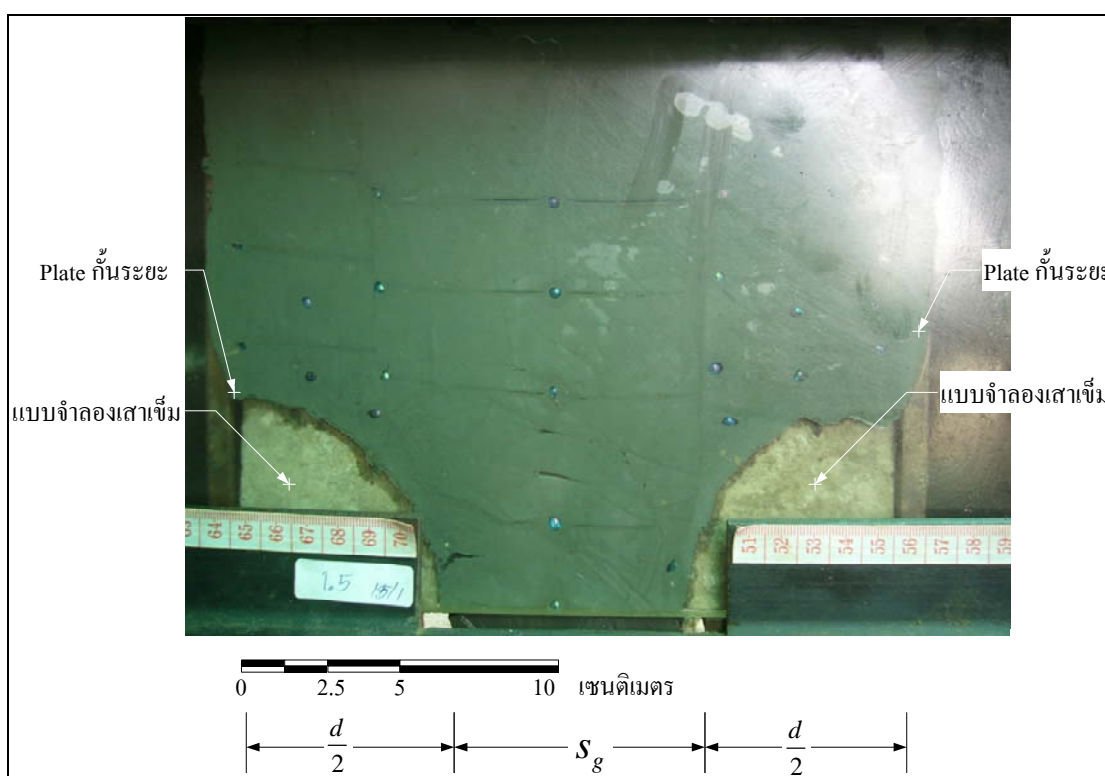
เคลื่อนตัวสูงที่สุดตั้งตำแหน่ง A3 B3 C3 D3 และ E3 ขณะที่ดินตัวอย่างบริเวณด้านบนของเสาเข็ม จะมีการเคลื่อนตัวน้อยดังตำแหน่ง E0 และ E6 บริเวณผิวเสาเข็มพบอัตราการเคลื่อนตัวลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดินตัวอย่างบริเวณผิวเสาเข็มจะเคลื่อนตัวทางด้านข้างในทิศทางช่องเปิดตั้งตำแหน่ง E1 และ E5 ทำให้เห็นแนวการเคลื่อนที่เป็นลักษณะที่เคลื่อนตามผิวเสาเข็ม



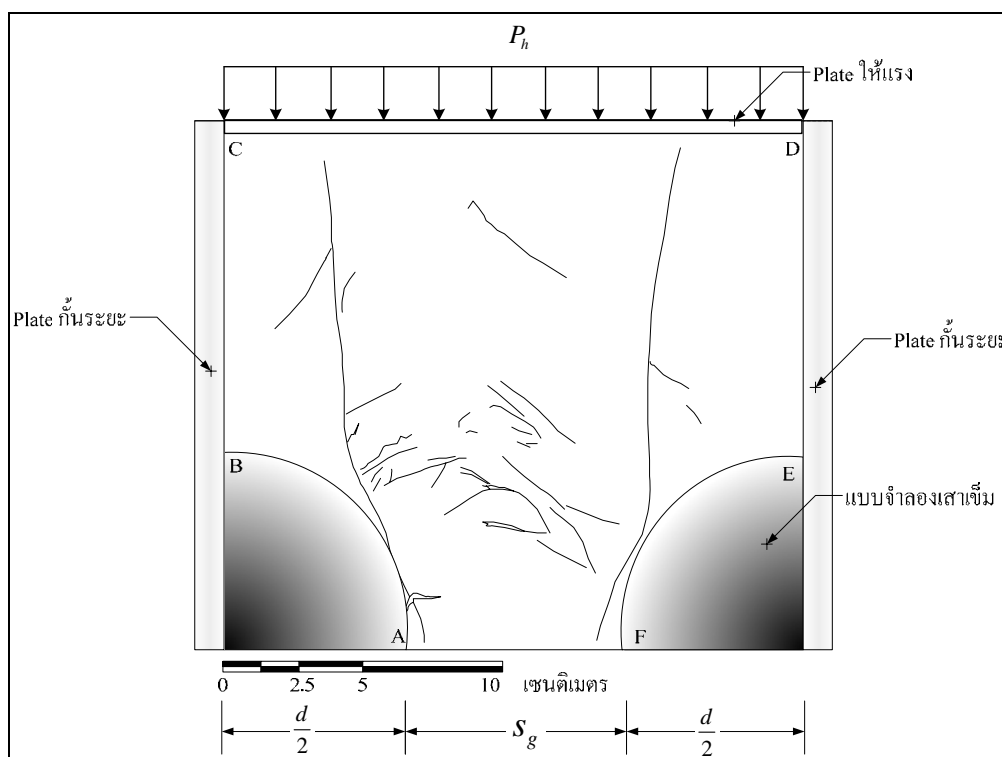
รูปที่ 4.4 แสดงภาพการเคลื่อนตัวภายในของตัวอย่างทดสอบที่มี $s_g / d = 0.5$
(เมื่อพิจารณาจากเริ่มต้นทดสอบจนถึงจุดวิบัติ)

จากผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินตัวอย่างด้วยภาพถ่าย เช่น ตัวอย่างที่มี $s_g / d = 0.5$ เมื่อเพิ่มแรงกดแบบจำลองทางกายภาพประมาณ 80% ของแรงกดประลัย พบว่าดินตัวอย่างเกิดแนวเนือ้นเห็นเป็นรอยแยกเริ่มต้น (First crack) บริเวณกึ่งกลางของเสาเข็มทั้งสองข้าง รอยแยกเริ่มต้น (First crack) ทำมุม 45 องศากับแนวราบ ลักษณะที่เกิดขึ้นอธิบายได้ว่า เกิดจากพฤติกรรมการปิดกันบางส่วนของดินระหว่างเสาเข็ม ซึ่งเป็นผลมาจากแนวโค้งรับแรง (Arching effect) สอดคล้องกับผลทดลองของ Atkinson et al. (1975) ที่เสนอช่วงกลไกการวิบัติเริ่มต้น (Initial failure) มีลักษณะเป็นลิ่มเหนือช่องเปิด อิทธิพลของการเกิดรอยแยกเริ่มต้น (First crack) ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระยะห่างช่องเปิดต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (s_g / d) กล่าวคือ เมื่อกดแบบจำลองทำให้ดินตัวอย่างเคลื่อนตัว ดินส่วนที่อยู่บริเวณช่องเปิดสามารถเคลื่อนตัวออกไปได้ ส่วนดินที่อยู่บริเวณ

แนวเสาเข็มเกิดการเคลื่อนตัวน้อย แรงที่กระทำต่อดินตัวอย่างสามารถถ่ายแรงเข้าสู่เสาเข็มได้ทั้งหมด เพราะฉะนั้นอัตราส่วนระยะห่างช่องเปิดต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (s_g / d) น้อย รอยแยกเริ่มต้น (First crack) จะพบที่แรงกระทำสูง ส่วนอัตราส่วนระยะห่างช่องเปิดต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (s_g / d) มาก รอยแยกเริ่มต้น (First crack) จะพบที่แรงกระทำต่ำ โดยมีการถ่ายแรงกระทำเข้าสู่เสาเข็มโดยตรง ทำให้เกิดการยุบอัดตัวบริเวณด้านหน้าเสาเข็มจนทำให้เกิดรอยแยกเริ่มต้น (First crack) และเกิดการยุบตัวบริเวณช่องเปิด ดินบางส่วนที่อยู่ใต้แนวรอยแยกสามารถหลุดออกมาได้ ดินที่อยู่เหนือรอยแยกจะรวมตัวกันเป็นสะพานรูปอาร์คต้านแรงดันดินไว้จนถึงจุดวิบัติ หลังจากพบรอยแยกเริ่มต้น (First crack) เมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อไป รอยแยกจะขยายตัวเพิ่มขึ้นตามแรงกดที่กระทำต่อแบบจำลอง เกิดรอยแยกเล็ก ๆ อีกหลายรอย จนกระทั่งถึงแรงกดประลัย พบว่าการถ่ายแรงกระทำเข้าสู่เสาเข็มถึงขีดสุด เกิดการพังของดินระหว่างเสาเข็ม



รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายรอยแยกสุดท้าย (Final crack) ที่เกิดขึ้น
ในตัวอย่างทดสอบขนาด $s_g / d = 0.5$

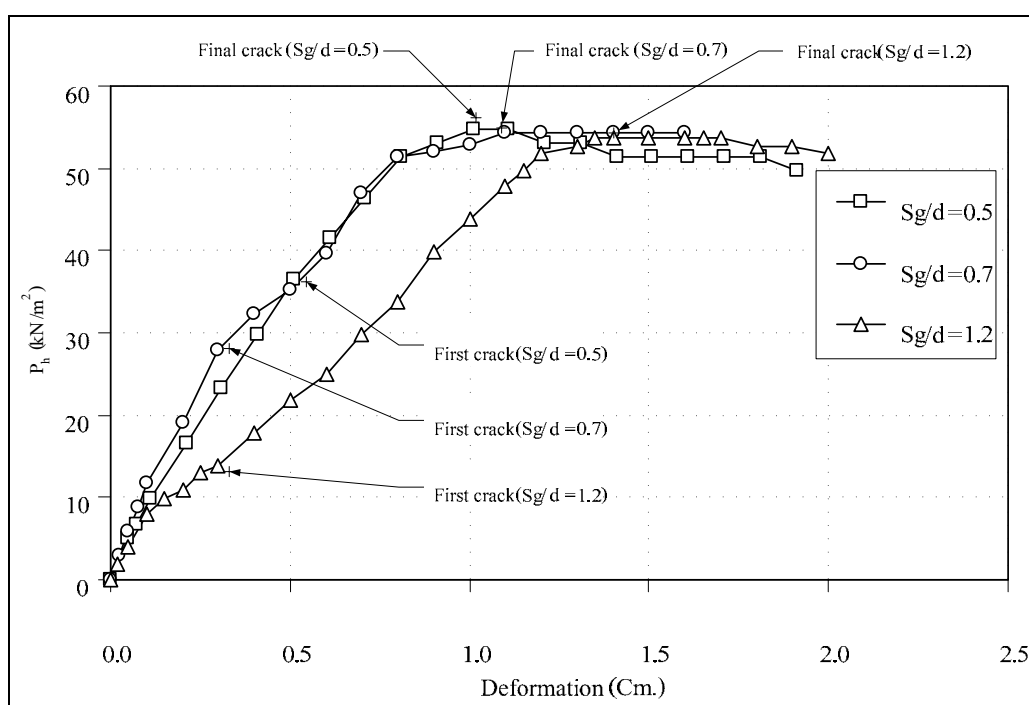


รูปที่ 4.6 แสดงภาพร่างรอยแยกสุดท้าย (Final crack) ที่เกิดขึ้น
 ในตัวอย่างทดสอบขนาด $s_g / d = 0.5$

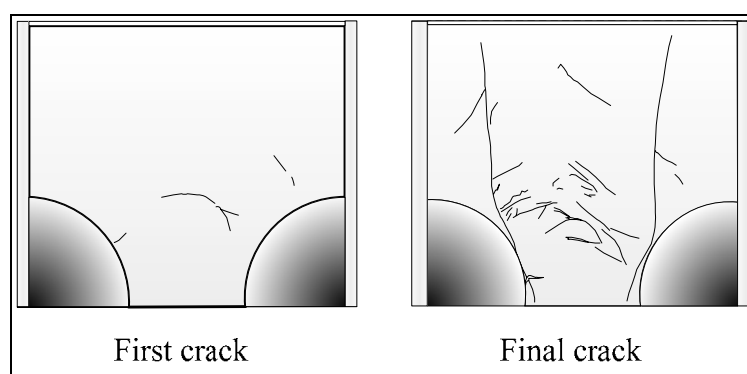
จากรูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.6 ตัวอย่างทดสอบที่มีขนาด $s_g / d = 0.5$ พบว่ารอยแยกสุดท้าย มีลักษณะเป็นรอยเหมือนรูปสามเหลี่ยม มีจุดยอดอยู่บริเวณกึ่งกลางแบบจำลอง ปลายทั้งสองข้าง มีทิศทางไปยังจุดศูนย์กลางเสาเข็ม ขณะเดียวกันพบรอยเหมือนตรงเกิดขึ้นทั้งสองข้าง มีทิศทางจากช่องเปิดไปยังผิวผิวดินด้านบนตัดรอยแยกสุดท้ายคล้ายกับกลไกการวิบัติสุดท้ายของ Atkinson et al. (1975) ที่เสนอว่าการวิบัติสุดท้าย (Final Failure) มีลักษณะเป็นรอยเหมือนตรง จากผิวผิวดินด้านบนถึงอุโมงค์ แสดงให้เห็นว่าแนวโค้งรับแรงที่เกิดขึ้นในดินตัวอย่างทดสอบแบบจำลองทางกายภาพไม่สามารถรับแรงดันดินต่อไปได้อีก ทำให้ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ

จากรูปที่ 4.7 พบว่ารอยแยกเริ่มต้นอยู่ในช่วง 30 - 80% ของแรงกดประลัย เป็นช่วงแรกของการเคลื่อนตัว และรอยแยกสุดท้าย (Final crack) เกิดขึ้นช่วงสุดท้ายก่อนการวิบัติของดินตัวอย่าง ดังบทสรุปการทดลองของ Atkinson et al. (1975) แรงดันที่การวิบัติเริ่มต้น (Initial failure) ไม่เกี่ยวข้องกับอัตราส่วนความลึกต่อขนาดรัศมีอุโมงค์ แต่การวิบัติสุดท้าย (Final Failure) จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความลึกต่อขนาดรัศมีอุโมงค์ สอดคล้องกับการทดลองแบบจำลองทางกายภาพ ช่วงรอยแยกเริ่มต้น (First crack) พบที่แรงกระทำต่อดินตัวอย่างต่ำและมีค่าใกล้เคียงกันใน

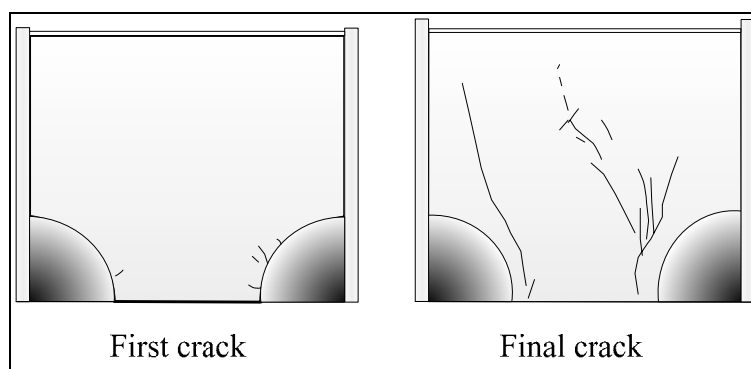
อัตราส่วนช่องเปิดต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ส่วนรอยแตกสุดท้าย (Final crack) พบที่แรงกระทำต่อดินตัวอย่างสูง อัตราส่วนช่องเปิดต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้น กำลังต้านทานต่อแรงดันดินด้านข้างจึงต่ำลง



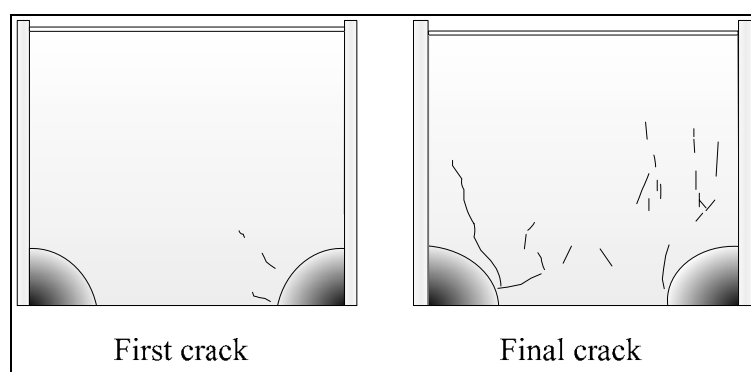
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันดินกับการเคลื่อนตัวของดินตัวอย่าง



รูปที่ 4.8 แสดงรอยแตกเริ่มต้น (First crack) และรอยแตกสุดท้าย (Final crack) ของขนาด $s_g / d = 0.5$



รูปที่ 4.9 แสดงรอยแตกเริ่มต้น (First crack) และรอยแตกสุดท้าย (Final crack)
ของขนาด $s_g / d = 0.7$

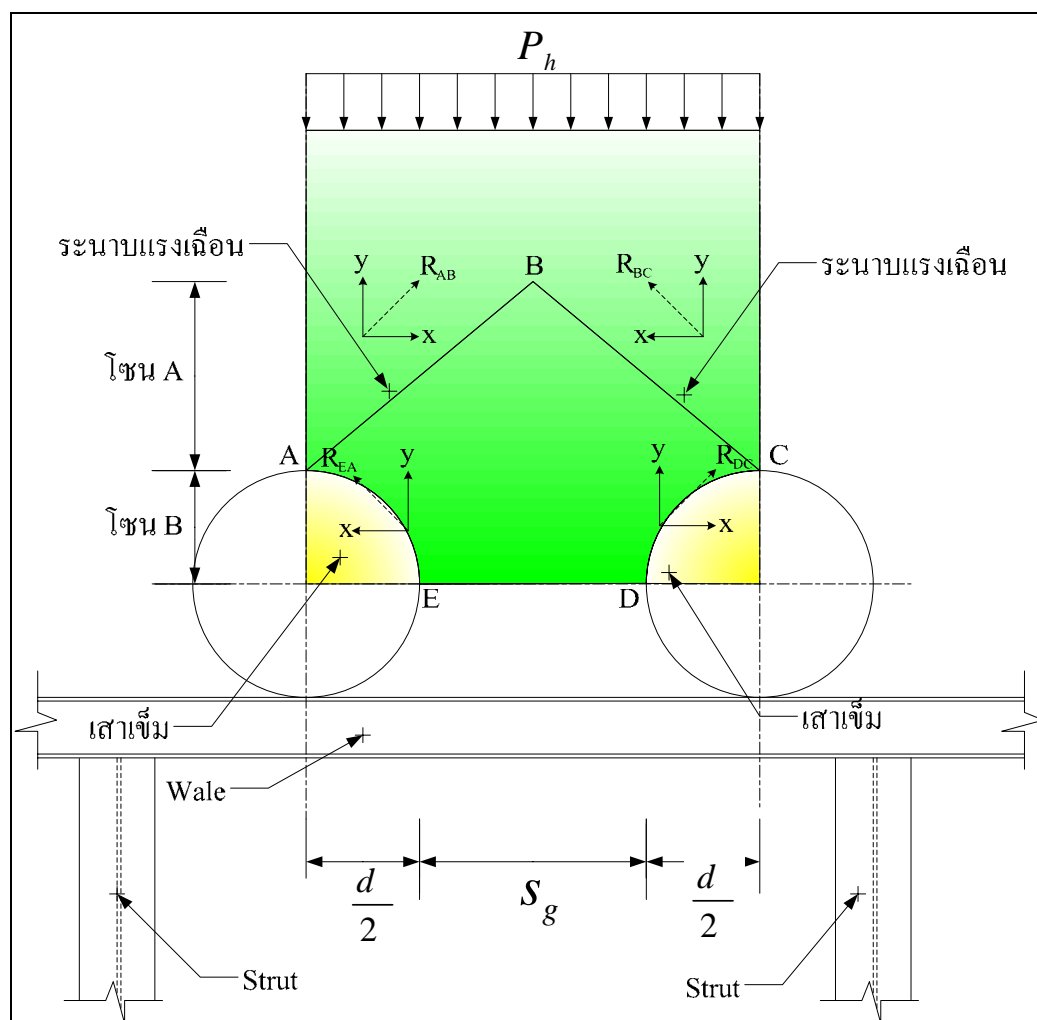


รูปที่ 4.10 แสดงรอยแตกเริ่มต้น (First crack) และรอยแตกสุดท้าย (Final crack)
ของขนาด $s_g / d = 1.2$

4.5 แนวคิดกลไกการวิบัติที่ได้จากการทดสอบทางกายภาพ

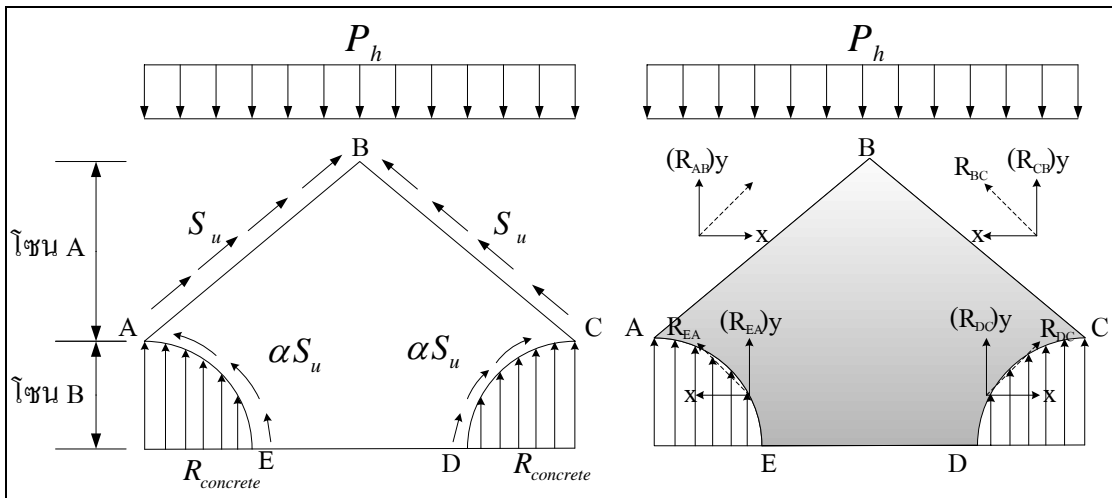
จากภาพถ่ายแนวการเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบสังเกตได้ว่า ดินตัวอย่างเกิดการวิบัติเป็นรูปสามเหลี่ยมเหนือแบบจำลองเสาเข็ม โดยแนวที่เป็นส่วนของเส้นตรงจะเป็นระนาบแรงเฉือน โดยรอยเฉือนจะเริ่มเคลื่อนตัวจากด้านหน้าแบบจำลองเสาเข็มทั้งสองข้างโดยทำมุม 45 องศากับแนวราบ จนเคลื่อนตัวมาบรรจบกันจากนั้นจะเกิดรอยเฉือนขึ้นอีกจำนวนมากตามมาที่บริเวณเหนือช่องเปิดขึ้นไป โดยสามารถลากเส้นแนวระนาบการวิบัติได้ดังรูปที่ 4.11 จากรูปจะแสดงบริเวณกล่องทดสอบโดยแบ่งเป็น 2 โซน ในโซน A พบว่าระนาบแรงเฉือนจะเกิดบริเวณด้านบนของแบบจำลองเสาเข็มและมาบรรจบกันที่กึ่งกลาง โดยมีแรงต้านทานเท่ากับกำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน ส่วนโซน B จะเกิดแรงต้านที่บริเวณผิวสัมผัสของแบบจำลองเสาเข็มกับผิวดินตัวอย่าง

ทดสอบ โดยแรงเกิดจากกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างคอนกรีตกับดิน โดยสามารถเขียน Free body diagram ของระนาบการวิบัติได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 แนวคิดกลไกการวิบัติที่เกิดจากการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ

จากแนวระนาบแรงเฉือนที่เสนอ เมื่อพิจารณาบริเวณ ABCDE สามารถเขียน Free-body diagram ของระนาบแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.12 Free body diagram ของระนาบการวิบัติ

ความยาวด้าน AB และ BC (โชน A)

$$AB \text{ and } BC = \sqrt{\left(\frac{s_g + d}{2}\right)^2 + \left(\frac{s_g + d}{2}\right)^2} = \sqrt{2} \left(\frac{s_g + d}{2}\right) \quad (4.1)$$

ความยาวส่วนโค้ง EA และ DC (โชน B)

$$EA \text{ and } DC = r\theta = \frac{d}{2} \times \frac{\pi}{2} = \frac{d\pi}{4} \quad (4.2)$$

วิเคราะห์แรงลัพธ์ต่อหนึ่งด้าน โดยใช้สมการความสมดุลของแรงในแนวแกน y ในการหาแรงที่เกิดขึ้นใน โชน A และ โชน B

แรงที่เกิดขึ้นในโชน A

$$R_{AB} = S_u \cdot \sqrt{2} \left(\frac{s_g + d}{2}\right) \quad (4.3)$$

$$(R_{AB})y = R_{AB} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (4.4)$$

แรงที่เกิดขึ้นในโซน B

$$R_{EA} = \alpha \cdot S_u \cdot \frac{d\pi}{4} \quad (4.5)$$

$$(R_{EA})y = R_{EA} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (4.6)$$

วิเคราะห์แรงดันประลัยต่อความกว้างของแนวโค้งรับแรง (Arching effect) โดยใช้สมการความสมดุลในแนวแกน y แรงดันดินด้านข้างที่นำมาวิเคราะห์ จะวิเคราะห์เฉพาะบริเวณช่องเปิดเนื่องจากบริเวณแบบจำลองเสาเข็มเป็นฐานรองรับจึงเกิดการรับแรงที่มากระทำไว้ทั้งหมดและเสาเข็มมีลักษณะ Rigid เมื่อดินเกิดการเคลื่อนตัวจากแรงดันดินด้านข้าง แนวการไหลจะเกิดขึ้นตลอดแนว ACDE ส่วนแรงดันดินด้านข้างที่อยู่ในแนวเดียวกับช่องเปิดจะเคลื่อนตัวมากที่สุดเกิดเป็นรอยเลื่อนตรงเห็นได้ชัด ในขณะที่แรงดันดินด้านข้างกระจายแรงทำให้ดินเสียรูปนั้น ความต้านทานแรงเฉือนพยายามที่จะรักษาสภาพให้อยู่ในตำแหน่งเดิมโดยใช้ส่วนที่ติดกับโครงสร้างเป็นจุดรองรับ เกิดโครงสร้างรับแรงขึ้น เพราะฉะนั้นการวิเคราะห์ถึงระนาบแรงเฉือนจึงต้องนำส่วนของระนาบแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมาวิเคราะห์ด้วย ดังนี้

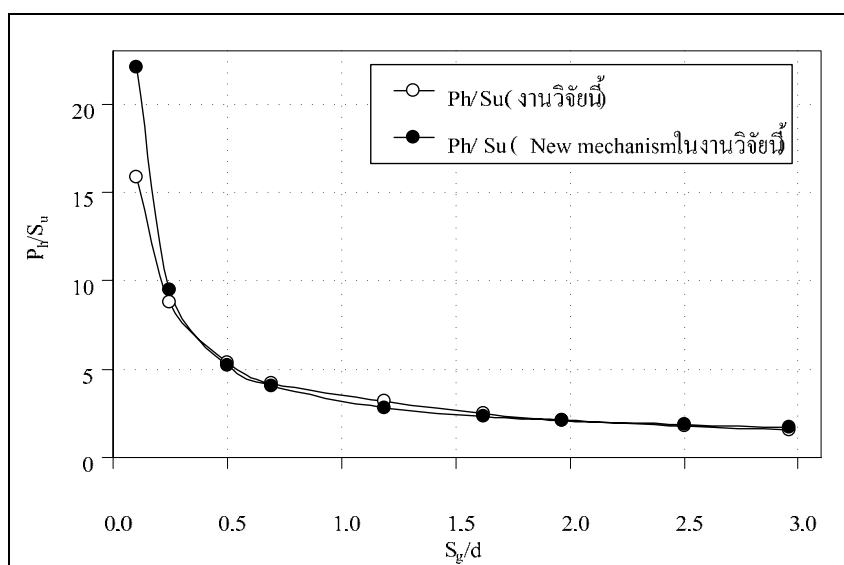
$$P_h \cdot s_g = 2[(R_{AB})y + (R_{EA})y] \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} &= 2 \left[\left(S_u \cdot \sqrt{2} \left(\frac{s_g + d}{2} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \right) + \left(S_u \cdot \alpha \cdot \frac{d\pi}{4} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \right] \\ &= 2 S_u \left(\frac{(s_g + d)}{2} + \frac{\alpha d\pi}{4} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \end{aligned}$$

$$\frac{P_h}{S_u} = \frac{\left((s_g + d) + \frac{\alpha d\pi}{2\sqrt{2}} \right)}{s_g} \quad (4.8)$$

โดยที่ s_g = ระยะห่างระหว่างผิวถึงผิวเสาเข็ม
 d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม
 S_u = กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ
 α = ค่าแรงเสียดทานระหว่างผิวของเสาเข็มกับดิน
 P_h = แรงดันดินด้านข้าง

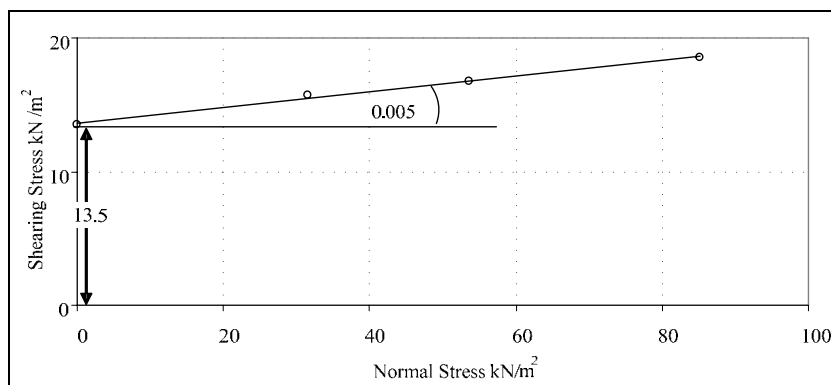
จากสมการข้างต้นที่เสนอเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับทฤษฎีที่ปรากฏในปัจจุบันพบว่าสมการที่ 4.1 ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบทางกายภาพโดยมีแนวโน้มของกราฟไปในทางเดียวกันดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับแนวคิดการวิบัติ

4.6 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างดินกับคอนกรีตในแบบจำลองทางกายภาพ

ผลการทดสอบแฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินกับผิวเสาเข็ม (Adhesion Factor : α) โดยการนำก้อนคอนกรีตและดินไปทำการทดสอบ เพื่อหาค่าแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear test) ได้ทำการทดลองแบบเร็ว (Quick test) โดยเทียบได้กับการทดลองไม่ยุบอัดตัวแบบไม่ระบายน้ำ (Unconsolidated – Undrained Test) ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.14 โดยผลของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคือ $\alpha = 0.87$



รูปที่ 4.14 แสดงผลการทดสอบการหาค่าแรงเฉือนโดยตรง

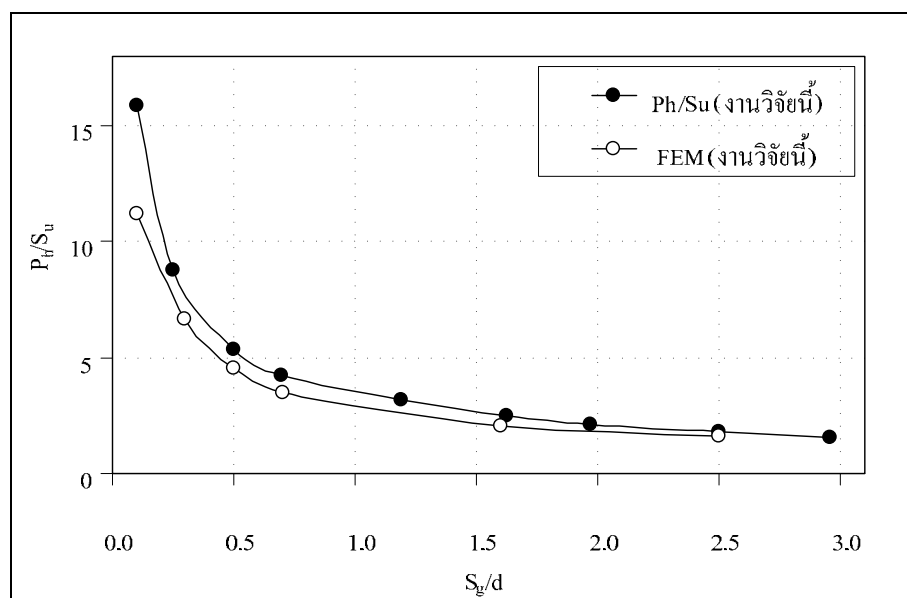
4.7 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ ที่ได้จากผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

E	$75su$
ν	0.4
γ	17.5 kN/m^2
su	c
Inter face	0.9
Element	15 node
Element Distribution	very coarse
Local Element size factor	2 at gap
$E_{concrete}$	$15200\sqrt{F_c'}$

จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างช่องว่างกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (s/d) และอัตราส่วนระหว่างแรงดันดินด้านข้างกับกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบระบายน้ำของดิน (P_h/S_u) พบว่า เมื่อ s/d มีค่าประมาณ 0.1 ผลจากแบบจำลองทางกายภาพจะให้ค่าที่สูงกว่าวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เล็กน้อย และค่าจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อ s/d มากขึ้น จนให้ผลใกล้เคียงกัน



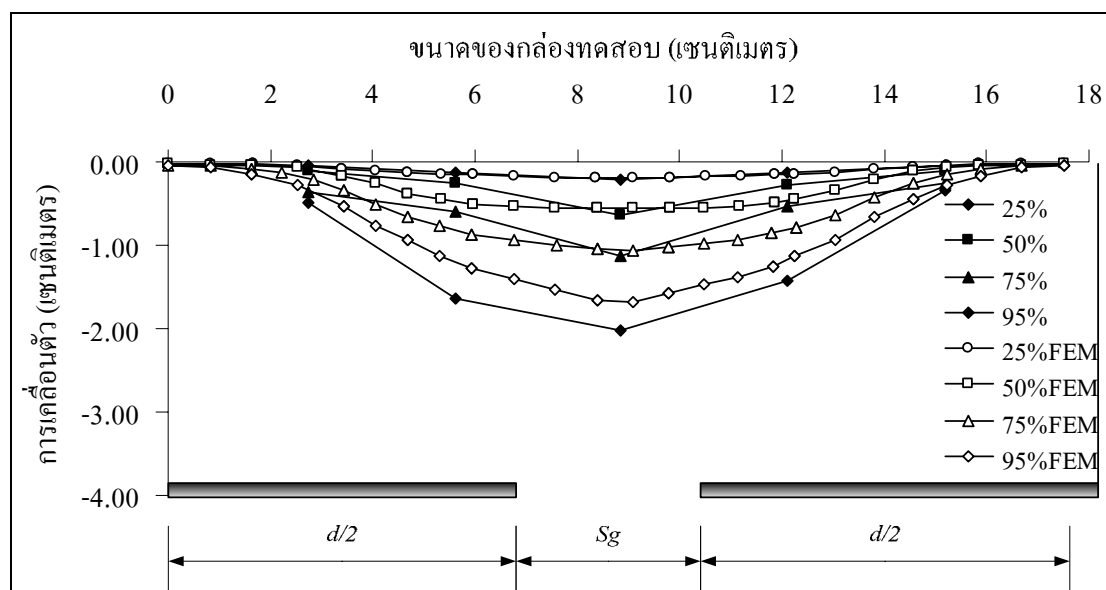
รูปที่ 4.15 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบทางกายภาพกับ FEM

การทดสอบแบบจำลองทางกายภาพจะให้ค่าการเคลื่อนตัวของมวลดินและค่าแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน โดยผลการทดสอบที่จุดวิบัติและผลการเคลื่อนตัวของมวลดินจากแบบจำลองทางกายภาพกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีเลเมนต์ได้แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบทางกายภาพและ FEM

s_g / d	การทดสอบทางกายภาพ		การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีเลเมนต์	
	P_h / S_u	Displacement (cm.)	P_h / S_u	Displacement (cm.)
0.1	11.108	2.0	11.222	2.1
0.3	6.255	1.5	6.674	1.4
0.5	4.821	1.5	4.481	1.5
0.7	3.464	1.6	3.482	1.4
1.6	2.488	1.6	2.100	1.3
2.5	2.069	1.7	1.625	1.5

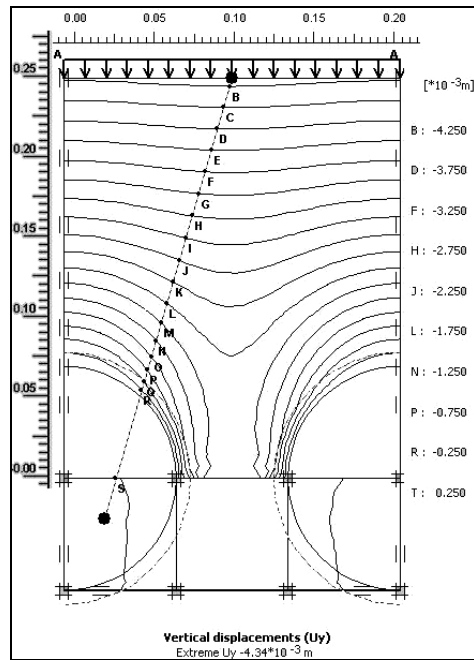
ผลการเคลื่อนตัวของการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ มีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันกับแบบจำลองทางกายภาพ โดยผลการทดสอบที่เห็นเด่นชัด จะพบที่เส้นที่ 5 ของหมุดเครื่องหมาย เมื่อนำมาเปรียบเทียบในสถานะ 25% 50% 75% และ 95% ของแรงกดประลัย พบว่ามีแนวโน้มการเคลื่อนตัวที่คล้ายคลึงกัน แสดงดังรูปที่ 4.16



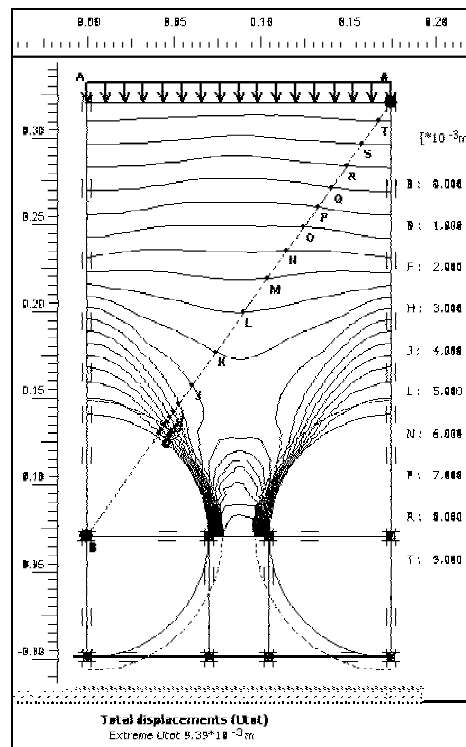
รูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวจากผลการทดสอบทางกายภาพกับ FEM ในตัวอย่างทดสอบ $s_g / d = 0.5$ เส้นที่ 5

การวิเคราะห์ผลด้วยวิธีไฟไนต์อิลเมนต์ได้จำลองลักษณะการเคลื่อนตัวภายในแบบจำลองที่สถานะของแรงกระทำเริ่มต้นและจุดวิกฤตสุดท้าย จากการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพโดยแสดงในรูปที่ 4.17 ถึงรูปที่ 4.18 เป็นลักษณะของเส้นชั้นการเคลื่อนตัวในระยะต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.17 จะแสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนตัวมีลักษณะเคลื่อนที่ลง โดยเริ่มจากด้านบนของตัวอย่างและมากที่สุดที่ช่องเปิดด้านล่าง โดยการเคลื่อนตัวในโซน A ถึง L จะเกิดเหนือบริเวณช่องเปิดและได้แผ่นให้แรงจะมีค่าน้อยกว่าโซน M ถึง T ในโซน P ถึง T มีการเคลื่อนตัวตามแนวเสาเข็มมีทิศทางไปด้านช่องเปิด เมื่อเพิ่มแรงจนถึงสถานะสุดท้ายโซนดังรูปที่ 4.18 โซน B ถึง J มีการเคลื่อนที่มากตรงช่องเปิดส่วนที่อยู่ด้านบนเสาเข็มมีการเคลื่อนที่น้อยซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์หมุดเครื่องหมาย ตรงส่วนกลางเกิดการเคลื่อนที่ลงอย่างมาก และด้านข้างทั้งสองฝั่งเหนือเสาเข็มมีการเคลื่อนที่น้อย



รูปที่ 4.17 แสดงเส้นชั้นการเคลื่อนตัวที่ 25% ในตัวอย่างทดสอบ $s_g / d = 0.5$

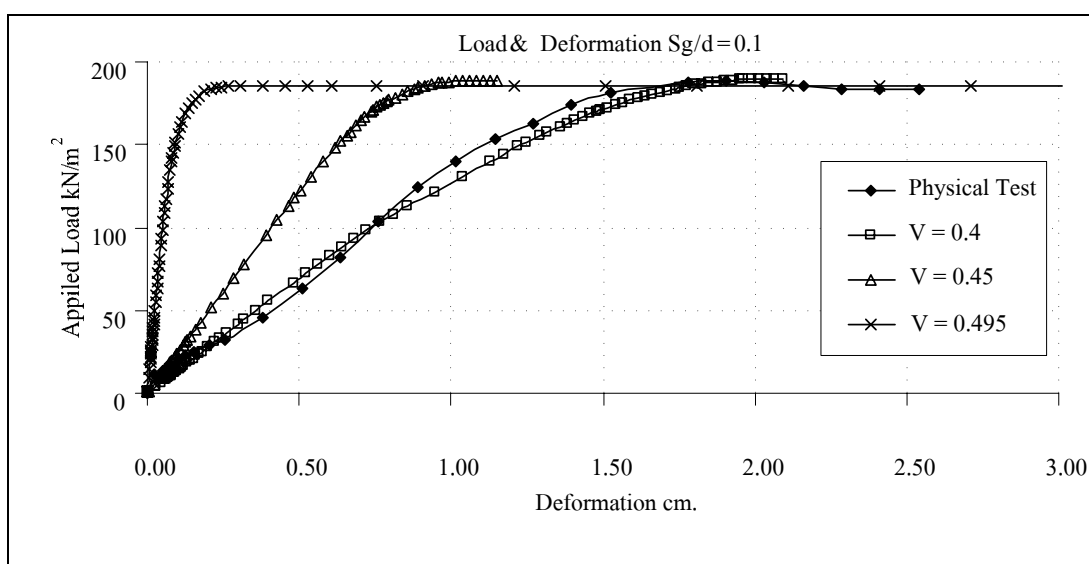


รูปที่ 4.18 แสดงเส้นชั้นการเคลื่อนตัวที่ 95% ในตัวอย่างทดสอบ $s_g / d = 0.5$

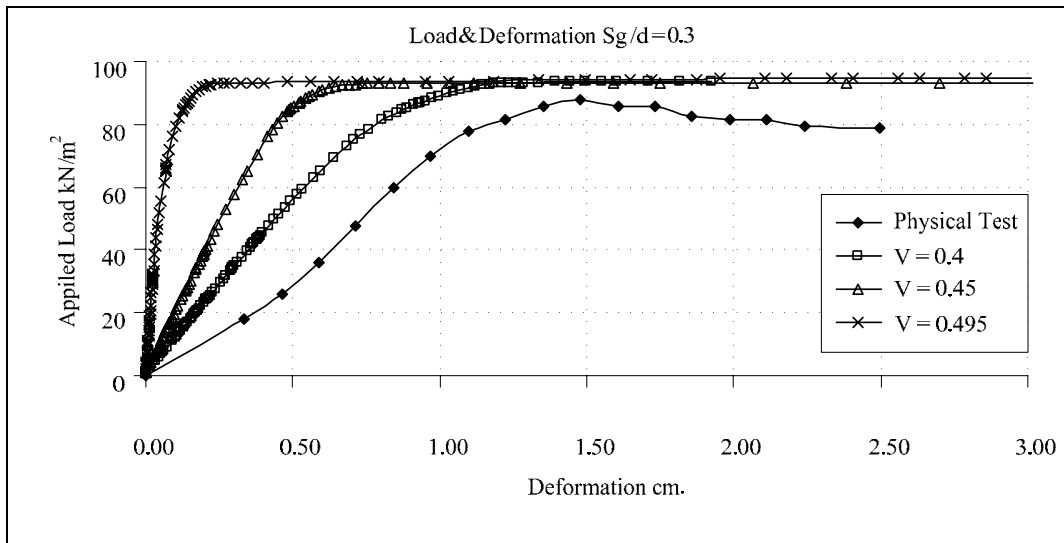
4.8 ค่าพิวของ

ข้อเสนอของ สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง (2550) ที่อธิบายกรณีไม่มีการระบายน้ำ และให้เลือกใช้ค่าอัตราส่วนพิวของแบบไม่ระบายน้ำ v_u เท่ากับ 0.5 นั้น สามารถใช้ได้กับการทดสอบวัสดุที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเกิดขึ้น ในงานวิจัยนี้ตัวอย่างทดสอบสามารถเคลื่อนตัวออกจากช่องเปิดได้ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อตัวอย่างถูกดันออกจากช่องเปิด จึงทำให้ไม่สามารถใช้ค่าอัตราส่วนพิวของแบบไม่ระบายน้ำ v_u เท่ากับ 0.5 ได้

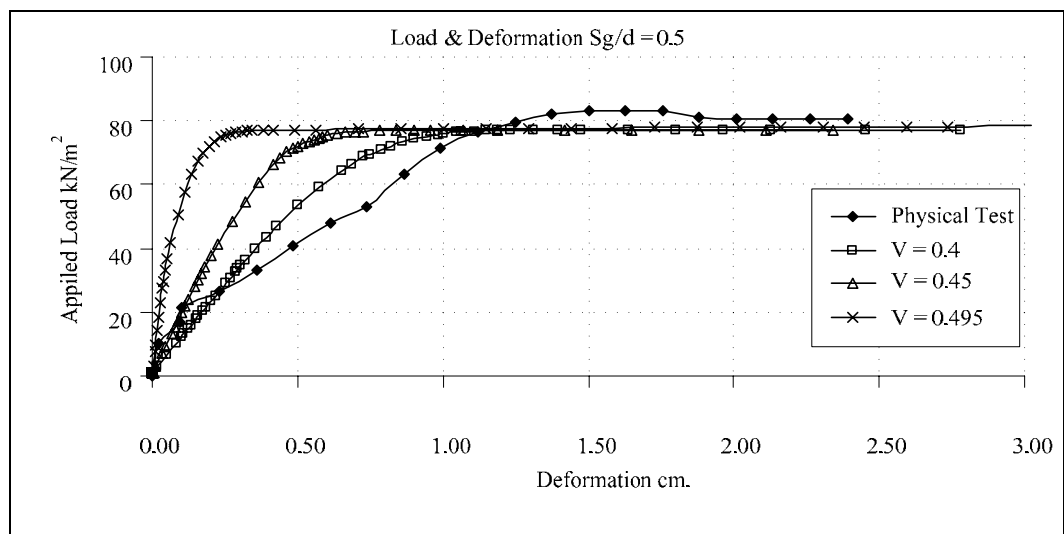
เนื่องจากแบบจำลองในงานวิจัยนี้ ดินตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจากรูปแบบของการทดสอบที่มีช่องว่างอยู่ด้านล่าง เมื่อให้แรงกับดินตัวอย่าง ดินจะเคลื่อนตัวออกจากด้านช่องเปิด ทำให้ดินเสียรูปไปจากเดิม ค่าอัตราส่วนพิวของแบบไม่ระบายน้ำ v_u จึงมีค่าลดลงจาก 0.5 โดยในที่นี้ได้เลือกใช้ค่าอัตราส่วนพิวของแบบไม่ระบายน้ำ $v_u = 0.4$ ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่เสนอโดย (Bowles, J.E., 1996) ตารางที่ 2.3 ใช้ค่าอัตราส่วนพิวของสำหรับดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำอยู่ในช่วง 0.4 - 0.5 โดยได้คำนวณเปรียบเทียบกับวิธีไฟไนท์อิลเมนต์ได้ผลดังรูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.21 จากผลการวิเคราะห์เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนพิวของแบบไม่ระบายน้ำ $v_u = 0.4$ ให้ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับผลการทดสอบทางกายภาพ แสดงให้เห็นว่าดินตัวอย่างทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร โดยการเคลื่อนตัวออกมาทางช่องเปิดทำให้ ทำให้วัสดุที่รับแรงตามแนวแกนเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกน และในขณะเดียวกันจะเกิดการเปลี่ยนแปลงตามขวางด้วยตามสมมติฐาน



รูปที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนพิวของ ที่ขนาด $s_g / d = 0.1$



รูปที่ 4.20 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนปัวซอง ที่ขนาด $s_g / d = 0.3$



รูปที่ 4.21 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนปัวซอง ที่ขนาด $s_g / d = 0.5$

4.9 การเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพกับทฤษฎีต่าง ๆ

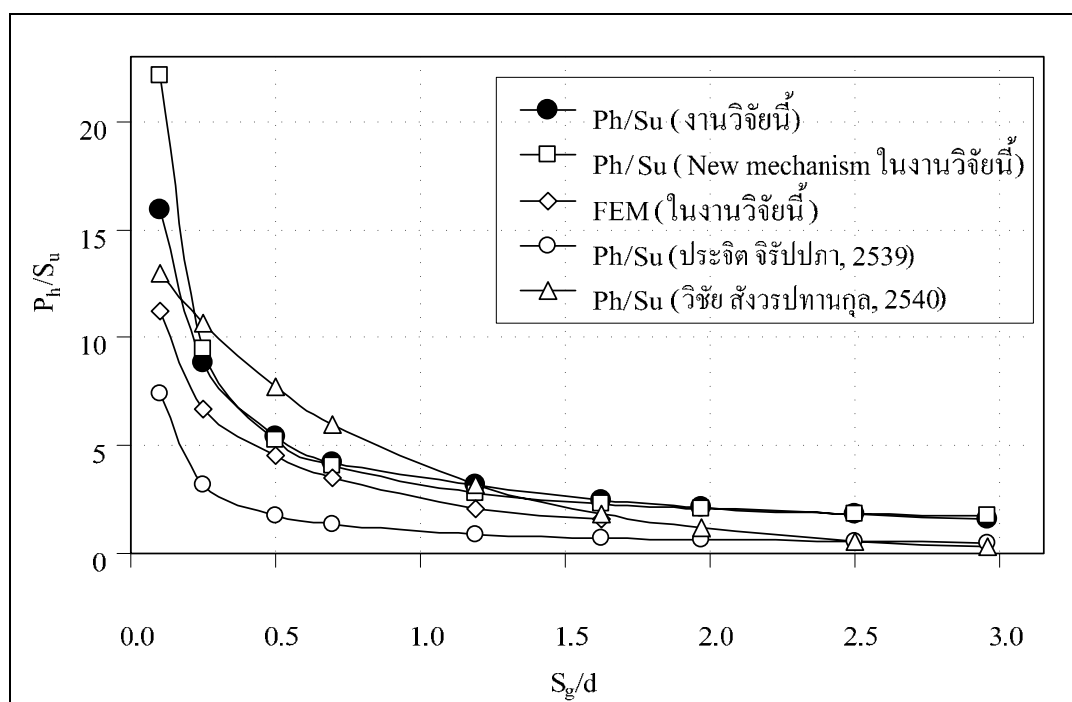
การเปรียบเทียบผลการทดสอบทางกายภาพกับแนวคิดและทฤษฎีต่าง ๆ ที่ถูกเสนอไว้แสดงดังรูป 2.22 เริ่มจากทฤษฎี ประจิด จีรปภา (2539) จะให้ค่า P_h / S_u ต่ำกว่าผลการทดสอบทางกายภาพในทุกอัตราส่วนที่ทำการทดสอบแต่ยังคงมีแนวโน้มของกราฟที่คล้ายคลึงกัน อาจจะมี

สาเหตุมาจากการตั้งสมมติฐานกลไกการวิบัติขึ้นก่อน ผลที่ได้จึงมีค่าต่ำกว่าผลการทดสอบทางกายภาพ

ผลการวิเคราะห์ของ วิชัย สัจวรปทานกุล (2540) จะมีค่า P_h / S_u ต่ำกว่าผลการทดสอบทางกายภาพในช่วงแรก $s_g / d = 0.1$ จากนั้นค่าจะสูงกว่าผลการทดสอบและลดลงต่ำกว่าผลการทดสอบทางกายภาพที่ $s_g / d = 1.2$ ค่าจะลดลงเรื่อย ๆ จนมีค่าเท่ากับผลทางทฤษฎีประจิด จีร์ปภา (2539) ที่ $s_g / d = 3.0$

ผลจากวิธีไฟไนท์อิลเมนต์จะให้ค่า P_h / S_u สูงกว่าผลทางทฤษฎีประจิด จีร์ปภา (2539) ในทุกอัตราส่วน มีแนวโน้มของข้อมูลที่คล้ายคลึงกันเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบทางกายภาพ ในช่วงแรก ผลการทดสอบทางกายภาพจะมีค่าสูงกว่าวิธีไฟไนท์อิลเมนต์เล็กน้อยที่ $s_g / d = 0.1$ จากนั้นค่อย ๆ ลดต่ำลงจนเท่ากันที่ $s_g / d = 3.0$

จากสมการที่ 4.8 กลไกการวิบัติที่เสนอ ผลการวิเคราะห์ให้ค่า P_h / S_u ก่อนข้างที่จะใกล้เคียงกับผลการทดสอบทางกายภาพมากที่สุดโดยมีเพียงค่าแรกที่ $s_g / d = 0.1$ จะให้ค่าสูงกว่าผลการทดสอบทางกายภาพเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4.22 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากผลการศึกษา วิจัย อิทธิพลของระยะห่างของเสาเข็มต่อกำลังรับแรงคั้นดินของกำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมจากกำลังกดประลัยพบว่าแรงต้านทานของดินระหว่างเสาเข็มแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างเข็ม ในลักษณะไฮเปอร์โบลิก กล่าวคือที่ระยะห่างของเสาเข็มน้อย (อัตราส่วน s_g / d ต่ำ) จะมีแรงต้านทานต่อการกดสูง และที่ระยะห่างของเสาเข็มมาก (อัตราส่วน s_g / d สูง) จะมีแรงต้านทานต่อการกดลดลง

2) ผลการทดสอบแบบจำลอง เช่น ที่ระยะ $s_g / d = 0.1$ ($s_c / d = 1.1$) กำลังต้านทานต่อแรงคั้นดินจะเท่ากับ 188.9 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร และที่ระยะ $s_g / d = 3.0$ ($s_c / d = 4.0$) กำลังต้านทานแรงคั้นดินจะเท่ากับ 24.9 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร สำหรับกรณีระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่นิยมใช้ในการขุดห้องใต้ดินในกรุงเทพมหานครจะมีระยะ $s_g / d = 0.125$ ($s_c / d = 1.125$) (เสาเข็มเจาะเส้นผ่านศูนย์กลาง 800 มิลลิเมตรเว้นระยะห่างระหว่างผิวเสาเข็มเท่ากับ 100 มิลลิเมตร) จะมีกำลังต้านทานแรงคั้นดินเท่ากับ 187.5 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

3) ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างเสาเข็มกับขนาดเสาเข็ม (s_g / d) และอัตราส่วนระหว่างแรงคั้นดินด้านข้างกับกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน (P_h / S_u) พบว่าสมการความสัมพันธ์ของ ประจิต จีร์ปภา (2539) ให้ค่าต่ำกว่าผลการทดสอบในสนามในทุกอัตราส่วน s_g / d อาจจะมาจากการวิเคราะห์ได้ตั้งสมมติกลไกการวิบัติขึ้นมาก่อน โดยแนวโน้มของกราฟจะมีรูปร่างที่คล้ายคลึงกันกับเส้นกราฟของ ประจิต จีร์ปภา (2539)

4) วิเคราะห์ผลจากการบันทึกภาพถ่ายพบว่าดินเกิดการวิบัติเป็น 2 ช่วง ช่วงแรก จะเกิดที่แรงกระทำประมาณ 30% ถึง 80% ของแรงกดประลัย โดยเกิดแนวโค้งรับแรง (Arching effect) ขึ้นเป็นโครงสร้างรับแรง มีลักษณะเป็นรอยแยกของดินบริเวณด้านหน้าเสาเข็มทำมุมประมาณ 45 องศา จากนั้นเมื่อเพิ่มแรงต่อไปจะพบการวิบัติช่วงสุดท้าย เกิดแรงเฉือนจากด้านบนพุ่งไปทางช่องเปิดตัดผ่านรอยแยกที่เกิดขึ้นในช่วงแรก ทำให้แนวโค้งรับแรงถึงขีดสุดที่จะรับแรงได้อีก ทำให้ดินตัวอย่างเกิดการวิบัติ

5) การเคลื่อนตัวของดิน พบว่าการเคลื่อนตัวจะเคลื่อนที่ออกจากช่องระหว่างเสาเข็ม โดยการเคลื่อนตัวจะมากที่สุดที่บริเวณช่องเปิดแบบจำลอง และที่บริเวณใกล้กับศูนย์กลางของเสาเข็มจะมีการเคลื่อนตัวน้อยมาก โดยบริเวณที่มีการเคลื่อนตัวน้อยจะเกิดการบีบอัดตัวของดิน ด้านหน้าเสาเข็ม ทำให้เกิดรอยแยกของดิน ส่วนที่อยู่ใต้แนวรอยแยกจะหลุดออกมาได้ ส่วนที่อยู่ด้านบนรอยแยกจะรวมตัวกันเป็นสะพานรูปอาร์ค รับแรงดันดินได้

6) ผลวิเคราะห์พฤติกรรมเมื่อเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ทางไฟไนต์อิเลเมนต์แล้วพบว่าผลทางไฟไนต์อิเลเมนต์ให้ผลใกล้เคียงกันกับผลการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ โดยที่ใช้ค่าอัตราส่วนตัวของแบบไม่ระนาบหน้า $\nu_u = 0.4$ เนื่องจากแบบจำลองทางกายภาพมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินภายในได้จากการเคลื่อนตัวออกจากช่องเปิด จึงได้มีการทดสอบที่ค่าต่าง ๆ และจากตารางที่ 2.3 ทำให้ได้ค่าที่วิเคราะห์ได้ใกล้เคียงและมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดสอบทางกายภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างเสาเข็มกับขนาดเสาเข็ม (s_g / d) และอัตราส่วนระหว่างแรงดันดินด้านข้างกับกำลังด้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน (P_h / S_u) กับสมการของประจิต จีระปกาศ (2539) โดยผลการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพให้ค่าที่สูงกว่าดังนั้นในการพัฒนาสมการที่ใช้คำนวณแรงดันของดินระหว่างเสาเข็มควรจะใช้กลไกการวิบัติที่สังเกตนี้เป็นพื้นฐาน ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอสมการที่ใช้คำนวณแรงดันของดินระหว่างเสาเข็ม ดังสมการที่ 4.8 เพื่อให้ได้ค่าแรงดันดินที่ใกล้เคียงกับสภาพจริง และในการศึกษาต่อในอนาคตแนะนำให้ศึกษาในลักษณะของเสาเข็มรูปแบบอื่น ๆ ของกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง

เอกสารอ้างอิง

- ทัศนนิพนธ์ ฌรงค์ (2543). ประสบการณ์และพัฒนาการก่อสร้างเสาเข็มเจาะลึกมากในชั้นดิน
กรุงเทพ. การสัมมนาทางวิชาการเรื่อง ฐานราก. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระ
บรมราชูปถัมภ์.
- ขนาดล คงสมบูรณ์ และ ประสพศิริ แสงภู (2547). การใช้เทคนิคภาพถ่ายในการศึกษาทาง
วิศวกรรมฐานราก. การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 9. วิศวกรรม
สถานแห่งประเทศไทย
- บริษัท ฟุจิ โฟโต้ ฟิล์ม (ประเทศไทย) จำกัด. 2552. รู้จักกล้อง ตอนที่ 10 : ปัญหาที่พบได้ทั่วไปใน
ภาพถ่าย [Online]. Available : <http://www.fujifilm.co.th/forum/archive/index.php?t-8958.html>
- ประจิด จิรัปปภา (2536). การใช้เข็มเจาะหล่อในที่เรียงต่อเนื่องเป็นกำแพงกันดินในงานขุดห้องใต้
ดินลึกมากในกรุงเทพฯ. การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2536 . วิศวกรรมสถานแห่ง
ประเทศไทยฯ. 66 – 78
- ประจิด จิรัปปภา (2539). กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องกับงานก่อสร้างใต้ดินในกรุงเทพฯ. การ
ประชุมสัมมนาทางวิชาการเรื่อง "งานก่อสร้างใต้ดิน 39". 36-54
- ประสพศิริ แสงภู (2546). การศึกษาพฤติกรรมการโค้งของแนวแรงในดินทรายระหว่างเสาเข็มเมื่อ
รับแรงส่งผ่านในแนวราบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- วิชัย สัจจพรปทานกุล (2540). วิสัยรับแรงธารด้านข้างของผนังเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง. การประชุมทาง
วิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 4. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยและสถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- สุเชษฐ ลิขิตเลอสรวง (2550). วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิค (FINITE
ELEMENT METHOD IN GEOTECHNICAL ENGINEERING), ปีที่ 1/2550, สำนักพิมพ์
แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ
- อรรถสิทธิ์ สวัสดิ์พานิช, จุฑา สุนิตย์สกุล และมนตรี เฉชาสกุลสม (2551). การศึกษาพฤติกรรม
ถ่ายภาพทางธรณีเทคนิคในระหว่างการก่อสร้างของทางลอดในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ
ทางลอดที่แยกมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, รายงานฉบับที่ วพ. 257, สำนักวิจัยและพัฒนา
งานทาง, กรมทางหลวง

- อรรวินท์ อุบลเลิศ (2550). การก่อสร้างห้องใต้ดินลึกมากโดยใช้ระบบกำแพงกันดินแบบ Contiguous Pile Wall ในชั้นดินกรุงเทพฯ. รายงานปัญหาเฉพาะทางวิศวกรรมโยธา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ 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, C., Gael, C., and Pascal, V. (2007). Load transfers and arching effects in granular soil layer, **18^{eme} Congres Francais de Mecanique**, Grenoble 27 – 31
- Bowles, J.E., (1996). **Foundation Analysis and Design**, McGraw – Hill, New York, 551
- Einstein, H.H., Schwartz, C.W., Steiner, W., Baligh, M.M., and Levitt, R.E. (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.
- Gaba, R.A., Simpson, B., et al. (2003). **Embedded retaining walls z guidance fro economic design**. London, CIRIA.
- Hidetoshi, K., Kazushi, F. and Saiichi, S., (2008). Arching effect base Low Improvement ratio Cement Column method. **The International seminar on bast practice in soft ground omprovement**. Thailand.
- Ito, T. and Matsui, T., (1975), Methods to Estimate Lateral Force Acting on Stabilizing Pile , **Soil and Foundations**, Vol.15, No. 4, 45-59
- Jamshed, A. and Danish, (1975). In Situ and Laboratory Permeability of Bangkok Clay at Nong Ngoo Hao and Rangsit. M.Eng Thesis .No. 765, AIT. Thailand.
- North, J.P., Lewis, and Lyons, G.H.A. (1975). Contiguous bored piles. London: Institution of Civil Engineers, 189 – 194.
- Sergge, L., Jean, P.M., Francois, T. (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
- Wikimedia [Online]. available : <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pile-drivers-by-Giovanni-grevembroch-from-goy-001>

ภาคผนวก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

วินิตย์ Һามา และ พรพจน์ ดันเสิ่ง (2553). อิทธิพลของระยะห่างของเสาเข็มต่อแรงดันดินของกำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15 (The 15th National Convention on Civil Engineering), GTE 026, โรงแรมสุนิยั แกรนด์ แอนด์ คอนเวนชันเซนเตอร์ จ. อุบลราชธานี. 12-14 พฤษภาคม 2553.



อิทธิพลของระยะห่างของเสาเข็มต่อกำลังรับแรงดันดินของกำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง
**INFLUENCE OF PILE SPACING ON SOIL RESISTANCE
 OF CONTIGUOUS BORED PILE WALL**

วินิตย์ แหมา (Winit Haema)¹

พรพจน์ ตันเส็ง (Pornpot Tanseng)²

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (winit_haema@yahoo.co.th)

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (Pornpot@sut.ac.th)

บทคัดย่อ : บทความนี้นำเสนอผลงานวิจัยเกี่ยวกับอิทธิพลของช่องว่างระหว่างเสาเข็มต่อกำลังรับแรงทางข้างของกำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง ในการวิจัยได้จำลองเสาเข็มในเครื่องมือทดสอบเพื่อจำลองสภาพเมื่อกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องรับแรงดันดินด้านข้างในสถานะไม่ระบายน้ำ โดยให้มีระยะช่องว่าง (s_g) ระหว่าง 10 ถึง 50 เซนติเมตร ซึ่งในการออกแบบโดยทั่วไปมักจะใช้ระยะช่องว่าง (s_g) เท่ากับ 10 เซนติเมตร ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบโดยแปรผันอัตราส่วนระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (s_g / d) เท่ากับ 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.2, 1.6, 2.0, 2.5 และ 3.0 โดยตัวอย่างดินจะเป็นดินเหนียวอ่อนแบบคงสภาพคุณภาพสูง ที่ได้จากการขุดเปิดหน้าดินเพื่อเก็บตัวอย่างขนาดใหญ่ที่ระดับความลึกต่างๆ และจะทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน, ทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) การทดสอบแบบจำลองเสาเข็มจะพิจารณาแบบจำลองทางกายภาพแบบความเครียดในระนาบ (plane strain) และออกแรงกระทำต่อดินจนกระทั่งเกิดการวิบัติของดินในแบบจำลองอย่างสมบูรณ์ โดยในการทดสอบจะได้ตรวจสอบการเคลื่อนตัวของดิน โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพเชิงซ้อนควบคู่กันไปด้วย จากผลการทดสอบสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน s_g / d และแรงดันดินที่จุดประลัย ซึ่งค่าแรงดันดินประลัยที่ได้จากการทดสอบทางกายภาพมีค่าสูงกว่าแรงดันดินประลัยทางทฤษฎี และจากภาพถ่ายของตัวอย่างขณะเกิดการวิบัติจะเห็นเส้นโค้งการวิบัติอย่างชัดเจน ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการสมมุติกลไกการวิบัติได้ดียิ่งขึ้นในอนาคต

ABSTRACT: This paper presents influence of pile spacing on lateral resistance of contiguous bored pile wall. Arching formed between gaps is considered to be a major influence on resistance of horizontal earth pressure. In current practice, gap between piles is normally 10 centimeters. However, in some case, gap between piles of 35 centimeter were adopted. In this research, we try to model contiguous bored pile with reduced scale model. Soil is assumed to be in undrained condition as the construction period is around two to three months. The ratio of spacing per diameter (s_g / d) of 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.2, 1.6, 2.0, 2.5 and 3.0 is used to study influence of gap size on lateral resistance. Highly fresh undisturbed soil samples are collected from the open pit excavation and use to model immediately at the site to minimized disturbance and prevent changing of water content in the sample. The soil sample is loaded until occurs. During testing, the digital photograph of soil movement will be recorded and used to define failure mode of soil between piles. The test results can establish relationship between s_g / d ratio and ultimate soil pressure. The ultimate soil pressure obtained from physical model test is higher than that obtained from theoretical equation. The arching in the soil sample can be clearly observed after applied load reaches ultimate soil pressure which can be used to improve failure mechanism of soil behind contiguous pile.

KEYWORDS: Arching effect, Contiguous bored pile, Spacing, Gap



1. บทนำ

ในการก่อสร้างชั้นใต้ดินลึกมากในชั้นดินอ่อนในเขตเมืองใหญ่เช่นกรุงเทพมหานครจำเป็นต้องใช้ระบบกำแพงกันดินที่สามารถต้านทานต่อแรงดันดินได้ และในขณะที่ก่อสร้างจะต้องมีการเคลื่อนตัวน้อย ระบบกำแพงกันดินที่ใช้นั้นมีหลายประเภท แต่กำแพงกันดินชนิดที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันได้แก่ กำแพงระบบเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (Contiguous pile wall, CP wall) กำแพงชนิดนี้เป็นกำแพงกันดินที่นำเสาเข็มมาตอกหรือเจาะเรียงต่อเนื่องกันตามแนวกำแพง โดยเว้นระยะห่างระหว่างเสาเข็มไว้เพื่อให้สามารถตอกหรือเจาะเสาเข็มต้นที่อยู่ติดกันได้โดยไม่มีภารกิจขวางด้วยเสาเข็มต้นที่อยู่ติดกัน ดัง

ภาพที่ 1 จะเห็นว่าดินที่อยู่ระหว่างเสาเข็มถูกต้านทานไว้และไม้ไหลออกมา



ภาพที่ 1 กำแพง CP wall ที่ใช้ในการก่อสร้างชั้นใต้ดินในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

ซึ่งระยะห่างที่นิยมใช้ตามที่ระบุโดย [1] ได้ระบุระยะห่างระหว่างเสาเข็มไว้เป็น 100 มิลลิเมตร สำหรับเสาเข็มทุกขนาด สำหรับในประเทศไทยได้มีการบันทึกและสรุปประสบการณ์การใช้เสาเข็ม CP wall ไว้โดย [2] ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นว่าได้มีการนำเอาเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องมาใช้ร่วมกันเป็นระยะเวลาหนึ่งแล้ว และเสาเข็มที่ใช้ก็มีทั้งเสาเข็มตอกที่เป็นเสาเข็มเหล็กรูปพรรณและเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก และเสาเข็มเจาะทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่

กำแพง CP wall นี้จะนิยมใช้สำหรับงานขุดในชั้นดินเหนียวเนื่องจากไม่มีปัญหาเนื่องจากน้ำใต้ดิน และดินที่อยู่ระหว่างผิว

เสาเข็มไม้ไหลออกมาตามช่องว่างเนื่องจากแรงต้านทานที่เกิดจากกำลังรับแรงเฉือนของดิน โดย [2] ได้เสนอแนวคิดทางทฤษฎีในการคำนวณแรงต้านทานต่อการไหลของดินระหว่างช่องว่างของเสาเข็ม โดยใช้หลักการพื้นฐานทางสถิติศาสตร์และปรูฟทีกัลศาสตร์เป็นหลัก และ [3] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดันดิน ของระบบกำแพง CP wall โดยใช้แบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์

ตารางที่ 1 บันทึกการก่อสร้างกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องในกรุงเทพ [2]

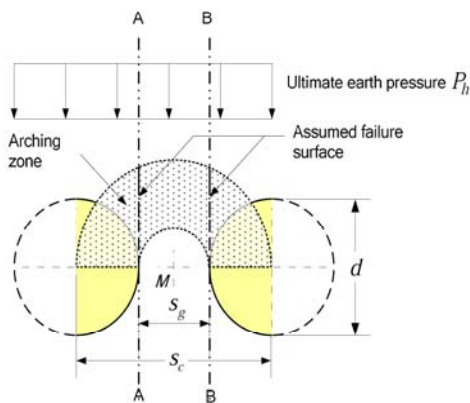
สถานที่	ชนิดเสาเข็ม	ขนาด (ม.)	ระยะห่าง C-C (ม.)	Gap (ม.)	ขุดลึก (ม.)	
ตราชธานี	เข็มเจาะ	1.00 m dia.	1.10	0.10	15.50	
	สูริวงค์	เข็มเจาะ	1.00 m dia.	1.10	0.10	11.50
	กิ่งแก้ว	เข็มเจาะ	0.40 m dia.	0.50	0.10	7.45
คลองถม	เข็มเจาะ	0.40 m dia.	0.75	0.35	4.00	
		0.60 m dia.	0.70	0.10	6.00	
คลองค่าน	เหล็กรูป H	WF300×300	0.45	0.15	4.25	
ปทุมวัน	เหล็กรูป I	WF300×150	0.30	0	4.80	
คลองจั่น	เหล็กรูป I	WF300×150	0.45	0.30	4.30	
คลองถม	เหล็กรูป I	WF300×300	0.45	0.15	6.00	
ศาลาแดง	เหล็กรูป H	WF300×300	0.45	0.15	8.70	
ช.ศูนย์วิจัย	เข็ม กสล	0.35×0.35m	0.60	0.25	3.80	

ในการศึกษาจนถึงปัจจุบันยังไม่มีการทำการทดสอบทางกายภาพของดินที่สามารถคงตัวอยู่ได้ระหว่างช่องว่างเสาเข็ม ซึ่งเป็นประโยชน์ในการคำนวณกำลังต้านทานของดินระหว่างช่องว่างต่อแรงดันดิน ในการวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการต้านทานต่อแรงดันดินระหว่างเสาเข็มของ CP wall โดยจะเป็นการศึกษาแบบจำลองย่อส่วนโดยใช้ดินที่คงสภาพทั้งทางด้านกำลัง และกายภาพ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรง และศึกษาการเกิด Arching ระหว่างช่องว่างของเสาเข็ม CP wall โดยในการวิจัยจะทำการเปรียบเทียบกับทฤษฎีที่เสนอไว้โดย [2] ซึ่งผลการวิจัยที่ได้นี้จะเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์กำแพง CP wall ให้ประหยัด และปลอดภัยต่อไปในอนาคต

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง



ในการศึกษาพฤติกรรมการต้านทานแรงดันดินระหว่างช่องว่างเสาเข็มนั้น ในทางทฤษฎีได้มีการเสนอไว้โดย [2] ซึ่งในทฤษฎีนี้แนวคิดว่ากำลังต้านทานต่อแรงดันดินระหว่างช่องเสาเข็มจะถูกต้านทานไว้โดยแรงเฉือนของดิน และแรงปฏิกิริยาที่ต้านแรงดันดินนั้นเกิดมาจากเสาเข็ม โดยได้สมมุติกลไกการวิบัติของดินระหว่างช่องว่างเสาเข็มดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 กลไกการวิบัติของดินระหว่างช่องว่างของเสาเข็ม CP wall ที่มีแรงดันดินกระทำจนถึงจุดวิบัติ

ซึ่งเมื่อพิจารณาเฉพาะของส่วนของเสาเข็มและดินที่อยู่ระหว่างแนว A-A กับ B-B สะพานรูปอาร์คจะเป็นส่วนโค้งของวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุด M และมีรัศมีเท่ากับ $s_c/2$ เมื่อกำลังต้านทานของ Arch สูงกว่าแรงดันดินก็จะไม่เกิดการไหลออกของดินและระบบจะอยู่ในสภาพสมดุล แรงดันดินที่มากระทำจะขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ความลึกที่จุด ถ้าพิจารณาเข็ม 2 ต้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d ดินส่วนที่จะหลุดออกมาจะเป็นส่วนที่อยู่ระหว่างเส้นโค้งอาร์ค กับแนวเส้นศูนย์กลางของเข็ม หากเป็นดินเหนียวอืดที่อยู่ในสภาวะไม่ระบายน้ำ ตรงส่วนกลางอาร์คนี้ก็จะเป็นส่วนของวงกลมมีรัศมี $s_c/2$ ที่สัมผัสผิวเข็มทั้งสองและมีศูนย์กลางอยู่ในแนวศูนย์กลางของเข็ม ดินที่อยู่เหนือโค้งอาร์คนี้ส่วนไหนจะเป็นส่วนที่ให้แรงดัน (P_h) กับอาร์ค ส่วนนอกจะเป็นส่วนที่รวมตัวกันเป็นสะพานรูปอาร์ค (Soil Arch Bridge) ดังภาพที่ 3 ในสภาวะสมดุลที่สะพานรับแรงดันดินได้ ดินจะไม่ไหลออกมา จะมีหลายเฉพาะในส่วนที่อยู่ใต้อาร์คเท่านั้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าปริมาณดินส่วนที่จะไหลออกมานี้จะขึ้นกับสะพานรูปอาร์ค และแรงดันดินที่มากระทำซึ่ง

ก็คือขึ้นอยู่กับค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน ($c-\phi$) ความลึกที่จุด (พิจารณาในเทอมของแรงดันดินด้านข้าง P_h) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม d และระยะห่างระหว่างผิวของเสาเข็ม s_g ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแฟกเตอร์ต่างๆแสดงดังสมการ

$$\frac{s_u}{P_h} = \frac{s_g}{\sqrt{\frac{d}{2}(d+s_g)}} \quad (1)$$

โดยที่

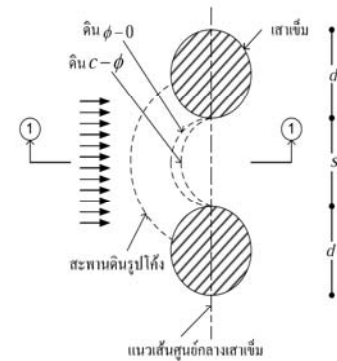
d = เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม

s_g = ระยะห่างระหว่างผิวของเสาเข็ม

s_u = กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ

P_h = แรงดันดินด้านข้างประลัย (Ultimate earth pressure)

ซึ่งสามารถนำไปคำนวณออกแบบระยะห่างของเสาเข็มได้



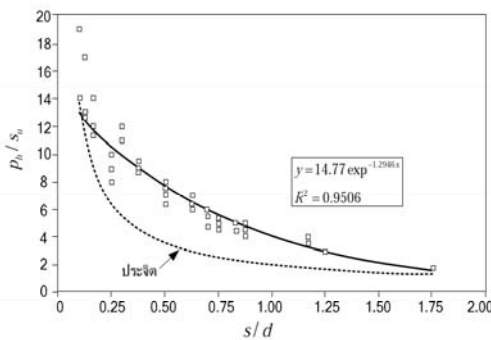
ภาพที่ 3 แสดงสะพานดินระหว่างช่องเข็มสำหรับเข็มกลม [2]

สำหรับผลการศึกษาพฤติกรรมการต้านทานแรงดันดินระหว่างช่องว่างเสาเข็มด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ได้เสนอไว้โดย [3] ในการศึกษาได้จำลองส่วนของกำแพง CP wall ในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯด้วยโปรแกรม STRAND6 โดยจำลองเป็นปัญหา 2 มิติ ในการวิเคราะห์จะกำหนดแรงดันดินด้านข้างด้วยการให้หน่วยแรงกดที่ขอบเขตของผิวดินด้านหลังกำแพง โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.5 ตันต่อตารางเมตรจนกระทั่งค่าหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในดินเท่ากับกำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน ผลการศึกษาได้แสดงอยู่ในรูปของสัดส่วนแรงดันดินด้านข้างประลัยต่อกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ P_h/s_u โดยได้แปรผันอัตราส่วนระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม s_g/d ซึ่งผลการวิเคราะห์จะค่อนข้างแปรปรวน จึงได้มีการใช้วิธีสร้างสมการเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2



$$\frac{P_h}{s_u} = 14.775e^{-1.2946\left[\frac{s}{d}\right]} \quad (2)$$

โดยในการศึกษามีค่า R^2 เท่ากับ 0.9506 จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างเสาเข็มกับขนาดเสาเข็ม และอัตราส่วนระหว่างแรงดันดินด้านข้างกับกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบระบายน้ำของดิน P_h/s_u พบว่าเมื่อ s_g/d มีค่าประมาณ 0.1 จะให้ผลใกล้เคียงกันและเมื่อค่าอยู่ระหว่าง 0.25 – 1.0 จะได้ P_h/s_u สูงกว่าที่ได้จากสมการที่ 1 ก่อนข้างมากและจะลดลงเรื่อยๆ จนมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากสมการที่ 1 เมื่อ s_g/d ประมาณ 1.75

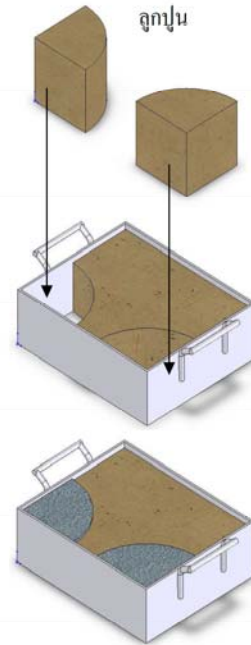


ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของเสาเข็มกับวิสัยรับแรงทรานของผนังเสาเข็มหน้าตัดกลม ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ [3]

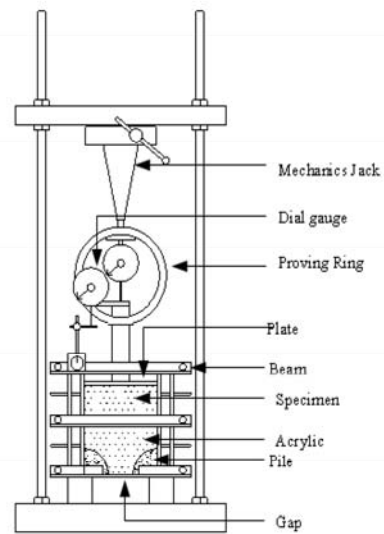
3. ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

ในการเตรียมตัวอย่างจะเป็นการเก็บตัวอย่างคงสภาพจากโครงการที่มีการขุดเปิดหน้าดินเพื่อก่อสร้างชั้นใต้ดิน โดยจะเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพที่ความลึก 4 เมตร และ 8 เมตร ตัวอย่างที่ใช้มีขนาด 30×25×10 เซนติเมตร โดยตัวอย่างที่เก็บขึ้นมาจะนำมาทดสอบทันทีที่ความชื้นธรรมชาติ ทำให้ได้ตัวอย่างดินคงสภาพทั้งทางด้านกำลังรับแรงเฉือนและคุณสมบัติทางกายภาพซึ่งมีคุณภาพดีกว่าดินที่นำมาผสมน้ำและก่อตัวใหม่ (Remolded sample) หรือดินที่เก็บไว้โดยไม่ทำการทดสอบทันที

จากนั้นบรรจุบรรจุตัวอย่างลงในแบบทดสอบที่หล่อขึ้นด้วยไข (Grease) จากนั้นตัดแต่งดินให้สามารถสอดเข็มลงได้พอดีดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

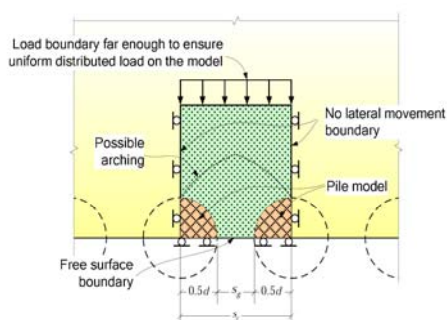


ภาพที่ 6 เครื่องมือทดสอบแบบจำลอง

โดยการทดสอบจะใช้อัตราส่วนระยะห่างต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (s_g/d) เท่ากับ 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.2, 1.6, 2.0, 2.5 และ 3.0 โดยมีกำหนดระยะห่างดังภาพที่ 7 โดยด้านข้างของแบบจำลองจะโอบรัดด้วยแผ่นเหล็กแกร่งเพื่อจำลองสภาพที่ดินไม่เคลื่อนตัวไปด้านข้าง และด้านที่ตั้งฉากกับระนาบจะประกบด้วยแผ่นอะคริลิกใสและแผ่นเหล็กและรัดด้วยเหล็กฉาก



เพื่อให้แน่ใจว่าสภาพของแบบจำลองเป็นแบบความเครียดระนาบ (plane strain) สำหรับความสูงของตัวอย่างนั้นได้เลือกใช้ความสูงของตัวอย่างให้เพียงพอที่จะเกิดหน่วยแรงในมวลดินแบบสม่ำเสมอก่อนที่จะถึงบริเวณที่จะเกิด arching



ภาพที่ 7 การจำลองตัวอย่างเพียงครึ่งหนึ่งเนื่องจากความสมมาตร

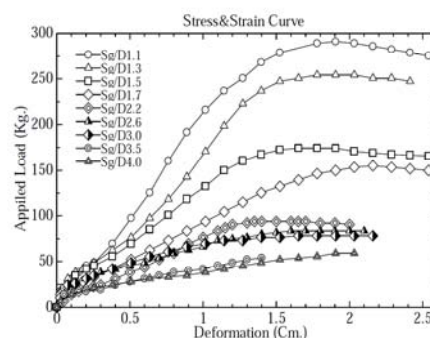
ก่อนที่จะปิดแผ่นอะคลิลิกจะวางลูกปิดบนตัวอย่างดินเพื่อใช้ในการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของดินโดยใช้การถ่ายภาพเชิงซ้อนจากภาพถ่าย ในการถ่ายภาพจะใช้ขาตั้งกล้องและตั้งตำแหน่งกล้องให้เหมาะสมที่สุดที่จะไม่ทำให้ภาพที่ถ่ายได้เกิดการบิดเบี้ยวเมื่อปิดแผ่นอะคลิลิกหนา 10 มิลลิเมตรแล้วตั้งตัวอย่างขึ้นและประกอบเข้ากับโครงทดสอบดังภาพที่ 6 สาเหตุที่ตั้งตัวอย่างขึ้นเนื่องจากการให้แรงกระทำในแนวตั้ง และการวัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งจะสะดวกกว่าการให้แรงกระทำในแนวราบ การให้แรงกดจะกดจนกระทั่งแรงกดถึงแรงกดปลาย

ในการเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาทดสอบในแบบจำลองจะทำการเก็บตัวอย่างดินมาทำการทดสอบจะเก็บตัวอย่างดินมาทำการทดสอบ Unconfined Compressive Strength, Atterberg limit, และ Water content ด้วย

4. ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินมีค่า Liquid limit = 85.40 %, Plastic limit = 32.60 %, Natural water content = 78.30% ภาพที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่กระทำต่อตัวอย่างกับระยะเคลื่อนตัวของมวลดิน จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะห่างระหว่างเสาเข็มเพิ่มขึ้น กำลังต้านทานต่อแรงดันดินจะมีค่าลดลง โดยที่ระยะ $s_g/d = 1.1$ กำลังต้านทานต่อแรงดันดินจะเท่ากับ 18.89 t/sq.m. และที่ระยะ $s_g/d = 4.0$ กำลังต้านทานต่อแรงดัน

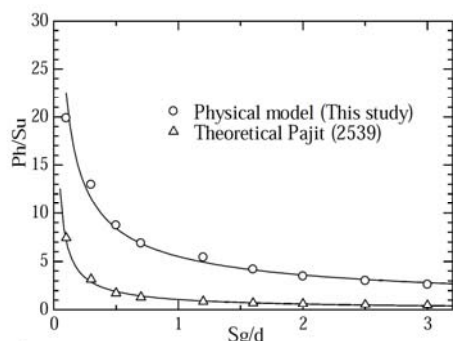
ดินจะเท่ากับ 2.49 t/sq.m. สำหรับกรณีระยะห่างเสาเข็มที่นิยมใช้ในการขุดห้องใต้ดินในกรุงเทพมหานครจะมีระยะ $s_g/d = 1.125$ (เสาเข็มเจาะเส้นผ่านศูนย์กลาง 800 มิลลิเมตร เว้นระยะห่างระหว่างผิวเสาเข็มเท่ากับ 100 มิลลิเมตร) จะมีกำลังต้านทานต่อแรงดันดินเท่ากับ 18.75 t/sq.m.



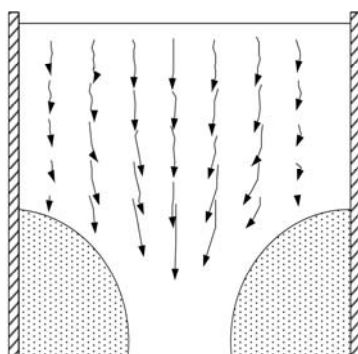
ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันดินที่กระทำแบบจำลองกับการเคลื่อนตัวของดิน

เมื่อนำแรงต้านทานประลัยที่ได้จากทดสอบมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงต้านทานประลัยต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ P_h/s_u ที่ระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่างๆ s_g/d ดังภาพที่ 9 จะเห็นว่าเส้นโค้งที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองภายในกรวยวิจัยนี้ให้ค่าที่สูงกว่าค่าจากทฤษฎีที่เสนอโดย [2] ในทุกระยะห่างระหว่างเสาเข็ม แต่เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มแล้วจะเห็นได้ว่า แนวโน้มของค่าจากทฤษฎีและค่าที่ได้จากการทดสอบมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน โดยที่ระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยจะมีแรงต้านทานประลัย P_h/s_u สูงกว่าที่ระยะห่างระหว่างเสาเข็มมาก และที่ระยะห่าง $s_g/d = 1.3$ ค่าที่ได้จากการทดสอบจะสูงกว่าค่าทางทฤษฎีประมาณ 3 เท่า

การเคลื่อนตัวของจุดอ้างอิงบนตัวอย่างที่บันทึกด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัลและนำมาผ่านกระบวนการหาระยะการเคลื่อนตัวในแต่ละแรงดันที่กระทำต่อตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเคลื่อนตัวจะเป็นแบบไหลออกจากช่องว่างระหว่างเสาเข็ม โดยการเคลื่อนตัวจะสูงสุดที่กึ่งกลางของแบบจำลอง และที่บริเวณใกล้กับศูนย์กลางของเสาเข็มจะมีการเคลื่อนตัวน้อยมาก

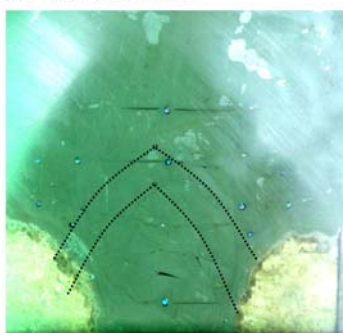


ภาพที่ 9 กราฟการเปรียบเทียบ s_g/d กับ P_h/s_v ของผลในสนามกับ ทฤษฎีที่มีอยู่ในปัจจุบัน



ภาพที่ 10 การเคลื่อนตัวของจุดอ้างอิงบนตัวอย่างดินขณะทำการทดสอบ ที่ ระยะ $s_g/d=1.5$

สำหรับรูปแบบการวิบัติของตัวอย่างนั้น ได้สังเกตเห็นรอย เกลื่อนเกิดขึ้นบนตัวอย่างดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างที่สังเกตพบ ระยะ $s_g/d=1.5$

5. สรุป

จากผลการทดสอบพบว่าที่ระยะห่างของเสาเข็มน้อย (อัตราส่วน s_g/d ต่ำ) จะมีแรงต้านทานต่อการกดสูง และเสาเข็ม

ที่ระยะห่างระหว่างเสาเข็มเพิ่มขึ้น (s_g/d มีค่าสูงขึ้น) แรงต้านทานต่อการกดจะลดลง ซึ่งสมการที่ได้จากการทดสอบทางกายภาพกับตัวอย่างดินคงสภาพสภาวะในงานวิจัยนี้คือ

$$\frac{P_h}{s_v} = 5.434 \left(\frac{s_g}{d} \right)^{-0.618} \quad (3)$$

การเปรียบเทียบผลการทดสอบในสนามกับทฤษฎีที่มีอยู่ในปัจจุบันพบว่าผลการทดสอบในสนามให้ค่าที่สูงกว่าในทุกอัตราส่วน s_g/d โดยแนวโน้มของกราฟจะมีรูปร่างที่คล้ายคลึงกันกับเส้นกราฟทางทฤษฎีที่ใช้การสมมุติระนาบวิบัติขึ้นมา

จากภาพถ่ายการวิบัติของตัวอย่างแสดงให้เห็นว่าดินเกิดการวิบัติเป็นรูปโค้ง โดยแนวที่เป็นส่วนโค้งจะเป็นระยะที่เกิดการเลื่อนขึ้น ดังนั้นในการพัฒนาสมการที่ใช้คำนวณแรงต้านของดินระหว่างเสาเข็มอาจจะใช้กลไกการวิบัติที่สังเกตนี้เป็นพื้นฐาน ซึ่งอาจจะทำให้ได้สมการประมาณที่ใกล้เคียงกับสภาพจริงมากกว่า

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณไพบุลย์ เบญจประกายรัตน์ ผู้จัดการโครงการ บริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวลอปเม้นต์ จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทำการวิจัย คุณเอกพล แก้วประเสริฐ และ คุณทศพล บุตรศิรินทร์ ที่มาเป็นผู้ช่วยงานวิจัยในครั้งนี้

7. บรรณานุกรม

1. Gaba, R.A., et al., Embedded retaining walls - guidance fro economic design. 2003, London: CIRIA.
2. ประจิด จิรีปภา. กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องกับงานก่อสร้างได้ดินในกรุงเทพฯ. งานก่อสร้างได้ดิน 39. 2539. กรุงเทพมหานคร.
3. วิชัย สัจวรปทานสกุล. วิสัยรับแรงรูดด้านข้างของผนังเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง. การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 4. 2540

ประวัติผู้เขียน

นายวินิตย์ แหมา เกิดวันอังคารที่ 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2528 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนขอนแก่นวิทยายน อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่นในปีการศึกษา 2546 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2550 ขณะที่ทำการศึกษาในระดับปริญญาตรีในภาคการเรียนสุดท้ายได้ร่วมสหกิจศึกษากับบริษัท ซีพีโก้ จำกัด มหาชน เป็นระยะเวลา 4 เดือนและเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2551 และมีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 1 เรื่องในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15 (The 15th National Convention on Civil Engineering). GTE 026