อิทธิพลของระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่อกำลังต้านทานการไหลของดินระหว่างเสาเข็มรูปตัวไอ ในชั้นดินเหนียวอ่อนมาก

นายธีรศักดิ์ สีนาก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

INFLUENCE OF SPACING BETWEEN PILES ON FLOW RESISTANCE OF SOIL BETWEEN CONTIGUOUS I-SHAPED PILE WALL IN VERY SOFT CLAY

Theerasak Seenak

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 2012

อิทธิพลของระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่อกำลังต้านทานการไหลของดินระหว่างเสาเข็มรูปตัวไอ ในชั้นดินเหนียวอ่อนมาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

_____

(ศ. ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข)
ประธานกรรมการ

_____

(ผศ. ดร.พรพจน์ ตันเส็ง)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

_____

(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

_____

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

_____

(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ธีรศักดิ์ สีนาก : อิทธิพลของระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่อกำลังต้านทานการไหลของดินระหว่างเสาเข็มรูปตัวไอในชั้นดินเหนียวอ่อนมาก (INFLUENCE OF SPACING BETWEEN PILES ON FLOW RESISTANCE OF SOIL BETWEEN CONTIGUOUS I-SHAPED PILE WALL IN VERY SOFT CLAY) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ตันเส็ง, 80 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนออิทธิพลของช่องว่างระหว่างเสาเข็มต่อกำลังรับแรงทางข้างของกำแพงเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่องหน้าตัดรูปตัวไอ ในการวิจัยได้จำลองเสาเข็มในเครื่องมือทดสอบเพื่อจำลองสภาพเมื่อกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องรับแรงดันดินด้านข้างในสภาวะไม่ระบายน้ำ ซึ่งในการออกแบบทั่วไปนั้นมักใช้อัตราส่วนระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่อขนาดความกว้างเสาเข็ม (S_g / B) เท่ากับ 0.5 ถึง 1.0 โดยงานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่อขนาดความกว้างเสาเข็ม (S_g / B) เท่ากับ 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.2, 1.6, 2.0, 2.5 และ 3.0 ตัวอย่างดินที่ใช้เป็นดินเหนียวอ่อนแบบคงสภาพคุณภาพสูง ที่ได้โดยวิธีการขุดเปิดหน้าดินจนถึงระดับเก็บตัวอย่างที่ความลึก 1.8 เมตร และได้ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน, ทดสอบกำลังรับแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength) การทดสอบในแบบจำลองได้พิจารณาแบบจำลองทางกายภาพแบบความเครียดในระนาบ (Plane strain) และออกแรงกระทำต่อดินจนกระทั่งเกิดการวิบัติของดินในแบบจำลองอย่างสมบูรณ์ โดยในการทดสอบได้ตรวจสอบการเคลื่อนตัวของดินโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพเชิงซ้อนควบคู่กันไปด้วย

จากผลการทดสอบสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน S_g / B ต่อ P_h / S_u ได้ และชี้ให้เห็นว่าผลจากแบบจำลองทางกายภาพให้ค่า P_h / S_u ต่ำกว่าแนวคิดที่เสนอโดยประจิต(2539) เกือบทุกอัตราส่วน S_g / B ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายที่ได้บันทึกไว้ในขณะทดสอบทำให้พบช่วงการวิบัติ 2 ช่วง คือ ช่วงรอยแยกเริ่มต้น เป็นช่วงพัฒนาแนวโค้งรับแรงซึ่งเกิดขึ้นขณะที่มีหน่วยแรงกดประมาณ 20 – 60 เปอร์เซ็นต์ของหน่วยแรงกดประลัย และช่วงรอยแยกสุดท้าย ณ จุดวิบัติเป็นช่วงที่แนวโค้งรับแรงถึงขีดสุดและไม่สามารถรับแรงต่อไปได้อีก จึงเกิดการวิบัติแบบเฉือนในแนวดิ่ง จากกลไกการวิบัติที่ได้จากภาพถ่ายเชิงซ้อนสามารถสร้างสมการรูปแบบปิด (close form solution) ซึ่งเมื่อนำค่า P_h / S_u มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบทางกายภาพพบว่าให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมากที่

อัตราส่วน S_g / B ตั้งแต่ 0.3 ถึง1.0 ขณะที่อัตราส่วน S_g / B อื่นๆ นั้นให้ค่าที่สูงกว่าผลการทดสอบทางกายภาพเพียงเล็กน้อย

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนักศึกษา_____

ปีการศึกษา 2555 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา_____

THEERASAK SEENAK : INFLUENCE OF SPACING BETWEEN PILES ON FLOW RESISTANCE OF SOIL BETWEEN CONTIGUOUS I-SHAPED PILE WALL IN VERY SOFT CLAY. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. PORNPOT TANSENG, Ph.D., 80 PP.

CONTIGUOUS PILE WALL/EXCAVATION/GAP/SOIL ARCH

This thesis presents influence of pile spacing on lateral resistance of contiguous i-shaped 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 used the ratio of spacing per width (S_g / B) of 0.5 – 1.0. However, using of this gap size is not often economic. In this research, the effect of wider gap size of between contiguous I-shaped pile wall is studied with the reduced scale model. The ratio of spacing per diameter (S_g / B) of 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.2, 1.6, 2.0, 2.5 and 3.0 are used. High quality of fresh undisturbed natural soil samples are used in the physical model. The soil sample in the model is loaded until collapse stage. During testing, the digital photographs of soil movement are recorded and used to define failure mode of soil between piles.

The test results show that the normalized ultimate soil resistances (P_h / S_u) reduce hyperbolically as the normalized gap (S_g / B) increases. The ultimate soil resistance obtained from physical model test is lower 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 20 to 60 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 proposed for prediction the ultimate soil resistance between contiguous I-shaped pile wall. The predicted ultimate resistance, with the proposed mechanism, agrees well with the physical test results.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Civil Engineering Student's Signature_____

Academic Year 2012 Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ ตันเส็ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้การอบรม สั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือในการทำการศึกษาวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการเขียน และช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ กรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์

บุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยนี้

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ตลอดจนส่งเสริมการศึกษา และให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ธีรศักดิ์ สีนาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)……ก

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)……ค

กิตติกรรมประกาศ……ฉ

สารบัญ……ช

สารบัญตาราง……ญ

สารบัญรูป……ฎ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ……ฒ

บทที่

1 บทนำ

1.1 ปัญหาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบกำแพงกันดินในงานขุดดินลึก 4

2.1.1 ระบบกำแพงแบบยืดหยุ่น (Flexible Wall) 4

2.1.2 ระบบกำแพงแบบแกร่ง (Rigid Wall) 5

2.2 กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (Contiguous Pile Wall) 6

2.3 การก่อสร้างกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องในอดีต 8

2.3.1 บันทึกเกี่ยวกับการใช้เสาเข็มเรียงต่อเนื่องในกรุงเทพฯ 8

2.4 ปัญหาที่พบในระบบกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง 8

2.4.1 กรณีเรื่องน้ำไหลซึมขณะขุดดิน 9

2.4.2 กรณีเรื่องดินไหลออกขณะขุดดิน 9

2.5 ข้อดีและข้อด้อยของเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง 10

2.5.1 ประโยชน์การใช้งาน 10

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.2 การเคลื่อนตัวของดินรอบข้าง 10
2.5.3 ราคาและระยะเวลาในการก่อสร้าง 10
2.6 พฤติกรรมของกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องหน้าตัดวงกลม 10
2.7 พฤติกรรมของกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องหน้าตัดรูปตัวไอ 15
2.8 พฤติกรรมแนวโค้งรับแรง(arching behavior)..... 16
2.9 ลักษณะของตัวอย่างดิน..... 28
2.9.1 ตัวอย่างดินคงสภาพ (undisturbed sample) 28
2.9.2 ตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพ (disturbed sample) 29

3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ 30
3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดิน 31
3.3 แหล่งดินที่นำมาทดสอบ 31
3.4 วิธีการเก็บตัวอย่างดิน 32
3.5 ความยาวของระยะห่างระหว่างเสาเข็ม 33
3.6 วิธีการเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน 35
3.7 การบันทึกภาพการเคลื่อนตัว 40
3.8 การประมวลผลภาพถ่าย 41
3.9 การทดสอบหาสัมประสิทธ์ความเสียดทาน 41

4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 ดินตัวอย่างสำหรับทดสอบ 42
4.2 ผลทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ 44
4.3 การเปรียบเทียบผลทดสอบทางกายภาพกับค่าเชิงทฤษฎีของ ประจิต(2539) 45
4.4 กลไกการวิบัติของดินจากภาพถ่ายขณะทดสอบ 46
4.5 แนวคิดกลไกการวิบัติที่ได้จากการทดสอบทางกายภาพ 56
4.5.1 กลไกการวิบัติ FM1..... 56
4.5.2 กลไกการวิบัติ FM2 59
4.6 การเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบจำลองกับกลไกการวิบัติแบบFM1กับFM2 .. 63

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5 บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย..... 64

5.2 ข้อเสนอแนะ……...65

รายการอ้างอิง .....….66

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ .....….70

ประวัติผู้เขียน 80

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 บันทึกการก่อสร้างกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องในกรุงเทพฯ 8

3.1 แสดงขนาดของเสาเข็มตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.396-2549) และระยะห่างที่ใช้ในการจำลอง…….34

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

1.1 แสดงลักษณะของกำแพงเสาเข็มตอกหน้าตัดรูปตัวไอเรียงต่อเนื่อง……..……..2

2.1 งานขุดดินโดยใช้ระบบกำแพงกันดินแบบเข็มพืดเหล็ก……..…….4

2.2 งานขุดดินโดยใช้ระบบกำแพงกันดินแบบเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง……..……..5

2.3 งานขุดดินโดยใช้ระบบกำแพงกันดินแบบเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่อง……..……..5

2.4 การใช้เสาเข็มรูปตัวไอร่วมกับแผ่น คสล. เพื่อเป็นระบบกำแพงกันดิน……..…….6

2.5 การใช้กำแพงเสาเข็มไม้เรียงต่อเนื่องสำหรับเป็นกำแพงกันดินในอดีต……..…….7

2.6 ลักษณะของดินที่ไหลออกตามซอกเข็ม……..…….9

2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างต่อกำลังต้านทานแรงดันดินด้านข้าง จากผลการทดสอบกับแบบจำลองทางกายภาพย่อส่วน (วินิตย์และคณะ, 2553)…….....……...11

2.8 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างที่สังเกตุพบ ระยะ s_g / d =1.5 (วินิตย์และคณะ, 2553).....11

2.9 กลไกการวิบัติและแรงที่เกิดขึ้นบนระนาบวิบัติ (วินิตย์และคณะ, 2553)……..….12

2.10 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับแนวคิดการวิบัติ (วินิตย์และคณะ, 2553)……..…...12

2.11 วิสัยรับแรงธารของผนังเสาเข็มหน้าตัดกลม (วิชัย, 2540)……..……..13

2.12 แสดงรูปภาพการเคลื่อนตัวของมวลดินเมื่อถูกปิดกั้นบางส่วนด้วยเสาเข็มเว้นระยะในกรณีทดสอบที่ *S/D* = 4 (ประสพศิริ, 2546)…….…...14

2.13 สะพานดินระหว่างซอกเสาเข็มและระนาบวิบัติของดินสำหรับเสาเข็มตัวไอ (ประจิต, 2539)…….15

2.14 อุปกรณ์ทดสอบแบบจำลองอุโมงค์ (Atkinson et al., 1975)……..……...17

2.15 ภาพถ่ายแบบจำลองจาก radiograph (Atkinson et al., 1975)……..……18

2.16 แนวระนาบเฉือนในการวิบัติเริ่มต้นของแบบจำลองอุโมงค์ (Atkinson et al., 1975).……19

2.17 การวิบัติสุดท้ายของแบบจำลองอุโมงค์ (Atkinson et al., 1975)……..……19

2.18 ผลจากการทดสอบแบบจำลองอุโมงค์ (Atkinson et al., 1975).……..……...20

2.19 ทฤษฎีพลาสติกระนาบไถลรอบวงกลมเปิดที่มีแรงเสียดทาน(McCutcheon et al., 1949)…21

2.20 ระนาบแรงเฉือนรอบวงกลม (Heuer and Hendron et al.,1971)……..…...21

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

2.21 active arching การเคลื่อนตัวใต้แรงดัน *Ps* เมื่อโครงสร้างถูกแรงอัดมากกว่าดินรอบข้าง (Einstein et al., 1983)……...……...23
2.22 แสดงสภาวะ active arching (Einstein et al.,1983)……..……..23
2.23 passive arching การเคลื่อนตัวใต้แรงดัน *Ps* เมื่อโครงสร้างถูกแรงอัดน้อยกว่าดินรอบข้าง (Einstein et al.,1983)……...…….24
2.24 แสดงสภาวะ passive arching (Einstein et al.,1983)……..……...24
2.25 พฤติกรรมทั่วไปของดิน active arching (Evans et al.,1983)……..……25
2.26 ทิศทางของหน่วยแรงหลัก active arching (Evans et al.,1983)……..……...25
2.27 พฤติกรรมทั่วไปของดิน passive arching (Evans et al.,1983)……..…….26
2.28 ทิศทางของหน่วยแรงหลัก passive arching (Evans et al.,1983)……..…….26
2.29 การปรับปรุงดินโดยวิธีทั่วไป (Kohashi, Furumoto and Sakajo et al.,2008)……. 27
2.30 ระนาบแรงเฉือนเหนือเสาเข็มดินซีเมนต์และการทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน (Kohashi, Furumoto and Sakajo et al.,2008)……..……27
2.31 ตัวอย่างการเกิด arcing effect บนหัวเสาเข็มดินซีเมนต์ (Kohashi, Furumoto and Sakajo et al.,2008)……..……..28
3.1 ขั้นตอนการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ……...……..30
3.2 ผลการเจาะสำรวจดินโครงการก่อสร้างสะพานข้ามคลองบางไผ่ (ข้อมูลจาก www.dpt.go.th).....32
3.3 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างจากการขุดเปิดหน้าดิน……..……33
3.4 มิติหน้าตัดของเสาเข็มรูปตัว เตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.396-2549)…….34
3.5 การจำลองเพียงครึ่งหนึ่งเนื่องจากความสมมาตรของตัวอย่าง……...….35
3.6 แสดงอุปกรณ์เก็บดินตัวอย่างคงสภาพ……..……36
3.7 การเก็บดินตัวอย่างคงสภาพแบบก้อน……...……36
3.8 การเจาะดินเพื่อติดตั้งแบบจำลองเสาเข็ม……..……37
3.9 การประกอบดินตัวอย่างกับแบบกดทดสอบ……..……37
3.10 การติดตั้งเครื่องหมายเพื่อบันทึกการเคลื่อนตัว……..……..38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.11 การติดตั้งตัวอย่างลงในเครื่องมือทดสอบและการติดตั้งระบบเครื่องมือวัด…….....39
3.12 การติดตั้งกล้องถ่ายภาพเพื่อบันทึกการเคลื่อนตัว……...……..40
3.13 การทดสอบหาสัมประสิทธ์ความเสียดทาน……..……...41
4.1 ผลการทดสอบการหาค่าแรงเฉือนโดยตรง……..……..43
4.2 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับข้อมูลของหลุมเจาะในบริเวณใกล้เคียง……..…….43
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดทดสอบกับค่ายุบตัวที่ได้จากการทดสอบแบบจำลอง……..44
4.4 การเปรียบเทียบผลการทดสอบทางกายภาพกับค่าเชิงทฤษฎี……..……...45
4.5 ภาพการเคลื่อนตัวภายในของตัวอย่างทดสอบที่มี $S_g / B = 0.7$
(เมื่อพิจารณาจากเริ่มต้นทดสอบจนถึงจุดวิบัติ)……..……..46
4.6 เส้น contour line การเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบกับแบบจำลองขนาด $S_g / B = 0.7$……47
4.7 เวคเตอร์การเคลื่อนตัวในแบบจำลองขนาด $S_g / B = 0.7$……..……48
4.8 เส้น contour line การเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบกับแบบจำลองขนาด $S_g / B = 1.2$……48
4.9 เวคเตอร์การเคลื่อนตัวในแบบจำลองขนาด $S_g / B = 1.2$……...……49
4.10 เส้น contour line การเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบกับแบบจำลองขนาด $S_g / B = 2.0$…..49
4.11 เวคเตอร์การเคลื่อนตัวในแบบจำลองขนาด $S_g / B = 2.0$……...…….50
4.12 ภาพถ่ายรอยแยกสุดท้าย (final crack) ที่เกิดขึ้น(ระยะ $S_g / B = 1.2$)……..51
4.13 ภาพร่างรอยแยกสุดท้าย (final crack) ที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบขนาด $S_g / B = 1.2$.....51
4.14 สะพานดินระหว่างซอกเสาเข็มและระนาบวิบัติของดินสำหรับเสาเข็มตัวไอ(ประจิต, 2539)..52
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันดินกับการเคลื่อนตัวของดินตัวอย่าง……..……53
4.16 รอยแยกเริ่มต้น (first crack) ที่พบและรอยแยกสุดท้าย (final crack)
ของขนาด $S_g / B = 0.7$……..……53
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันดินกับการเคลื่อนตัวของดินตัวอย่างของขนาด $S_g / B = 0.7$…54
4.18 รอยแยกเริ่มต้น (first crack) ที่พบและรอยแยกสุดท้าย (final crack)
ของขนาด $S_g / B = 1.2$……...……54
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันดินกับการเคลื่อนตัวของดินตัวอย่างของขนาด $S_g / B = 1.2$…55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.20 รอยแยกเริ่มต้น (first crack) ที่พบและรอยแยกสุดท้าย (final crack)
ของขนาด $S_g / B = 2.0$……..……....55
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันดินกับการเคลื่อนตัวของดินตัวอย่างของขนาด $S_g / B = 2.0$…56
4.22 แนวคิดกลไกการวิบัติแบบ FM1 ที่เกิดจากการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ……...….57
4.23 free body diagram ของระนาบการวิบัติ……..…….57
4.24 แนวคิดกลไกการวิบัติแบบ FM2 ของแบบจำลองทางกายภาพ
ประยุกต์จาก (วินิตและคณะ, 2553)……..……...59
4.25 free body diagram ของระนาบการวิบัติ.....60
4.26 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับแนวคิดกลไกการวิบัติ……...…….62
4.27 การเปรียบเทียบทฤษฎีของประจิต (2539) กับแนวคิดการวิบัติ……62
4.28 การเปรียบเทียบผลการทดสอบทางกายภาพกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีต่างๆ……...……63

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ϕ	=	มุมเสียดทานของดิน
c	=	หน่วยแรงยึดเกาะ
S_u	=	กำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน
E	=	young's modulus
P_h	=	แรงต้านแรงดันดิน
S_g	=	ระยะห่างระหว่างผิวถึงผิวเสาเข็ม
S_c	=	ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์กลางเสาเข็ม
B	=	ความกว้างเสาเข็ม
α	=	สัมประสิทธิ์การเกาะตัวระหว่างดินกับผิวเสาเข็ม
r	=	รัศมีของแบบจำลองเสาเข็ม
γ	=	หน่วยน้ำหนักของดิน
ν	=	poisson ratio

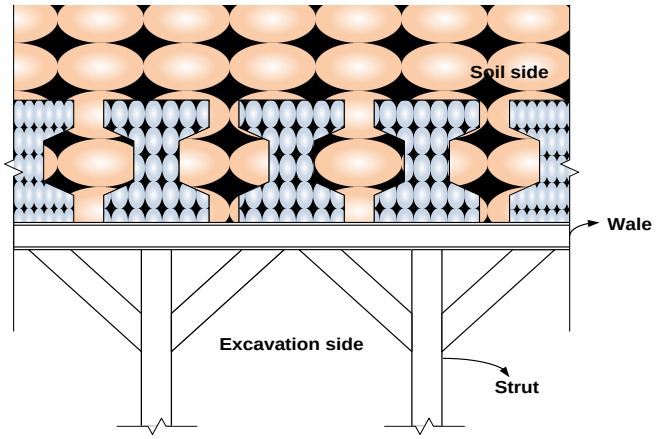
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันระบบกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (contiguous pile wall) เป็นระบบกำแพงกันดินที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างห้องใต้ดินลึก เนื่องจากระบบกำแพงกันดินชนิดนี้ใช้เทคนิคการก่อสร้างเหมือนกับเสาเข็มตอกธรรมดา สามารถก่อสร้างในพื้นที่จำกัดได้ ราคาค่าก่อสร้างถูกกว่าระบบกำแพงแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ (diaphragm wall) และลดการโก่งแอ่นของโครงสร้างกันดินได้ดีกว่าเสาเข็มพืดเหล็ก (steel sheet pile) (ประสพศิริ, 2546) ในอดีตนั้นกรุงเทพมหานครเคยใช้เสาเข็มไม้ตอกเรียงกันเป็นแนวต่อเนื่องล้อมรอบบริเวณที่ต้องการขุดดิน แต่เนื่องจากไม้มีความยาวจำกัด ความแกร่ง (stiffness) ของไม้ต่ำและราคาค่อนข้างแพงจึงทำให้ไม่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน (ประจิต, 2539)

การออกแบบระบบกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (contiguous pile wall) สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่เหมาะสมที่จะไม่ทำให้ดินระหว่างเสาเข็มเกิดการวิบัติและไหลออกมาได้ โดยทั่วไปมักจะใช้หลักการทางสถิตยศาสตร์และปฐพีกลศาสตร์ในการวิเคราะห์โดยใช้วิธีการตั้งสมติฐานกลไกการวิบัติ เพื่อวิเคราะห์หาแรงต้านทานต่อแรงดันดินด้านข้าง โดยอาศัยระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดพฤติกรรมแนวโค้งรับแรง (arching effect) ในดิน ปัจจุบันนิยมใช้ใช้อัตราส่วนระยะห่างของเสาเข็ม S_g / B อยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.5 ถึง 1.0 จึงทำให้ไม่ประหยัดเนื่องจากใช้เสาเข็มในปริมาณมาก เพื่อที่จะศึกษาถึงพฤติกรรมการรับแรงทางข้างของดินที่อยู่ระหว่างเสาเข็มตอกรูปตัวไอ จึงได้มีแนวคิดที่จะศึกษาถึงผลกระทบของระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่อกำลังรับแรงดันดินทางข้างในชั้นดินเหนียวอ่อนมาก โดยใช้แบบจำลองทางกายภาพแบบย่อส่วนของเสาเข็มหน้ารูปตัวไอตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.396-2549) และทดสอบที่ระยะห่างหลายๆระยะ



รูปที่ 1.1 แสดงลักษณะของกำแพงเสาเข็มตอกหน้าตัดรูปตัวไอเรียงต่อเนื่อง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของดินระหว่างเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่องหน้าตัดตัว I ในเชิงกายภาพ โดยการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพคุณภาพสูงมาทำการศึกษาพฤติกรรมแนวโค้งรับแรง (arching effect) ระหว่างช่องว่าง (gap) ของกำแพงเสาเข็มรูปตัวไอเรียงต่อเนื่อง (contiguous pile wall) โดยที่มีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางเสาเข็มแตกต่างกัน การเก็บตัวอย่างดินจะเก็บขณะที่มีการขุดเปิดหน้าดินลงไปทำให้ได้ดินที่คงสภาพคุณภาพสูงมาทดสอบและนำค่าที่ได้จากการทดสอบทางกายภาพมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับแนวคิดที่เสนอโดยประจิต (2539)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของระยะห่างระหว่างเสาเข็มของกำแพงเสาเข็มรูปตัวไอเรียงต่อเนื่องต่อพฤติกรรมแนวโค้งรับแรง (arching effect) ของดินระหว่างช่องว่างโดยที่มีระยะห่างระหว่างเสาเข็มแตกต่างกัน

2) เพื่อนำผลการศึกษามาใช้เป็นแนวทางปรับปรุงการออกแบบและวิเคราะห์ระบบกำแพงกันดินเพื่อป้องกันผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียงให้มีความเหมาะสมทางด้านความปลอดภัยและความประหยัด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างเสาเข็มของกำแพงเสาเข็มตอกหน้าตัดตัวไอเรียงต่อเนื่อง (contiguous pile wall) โดยจะศึกษาเฉพาะเสาเข็มคอนกรีตที่มีหน้าตัดเป็นรูปตัวไอตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.396-2549) ในชั้นดินเหนียวอ่อน การทดลอง

จะใช้แบบจำลองทางกายภาพแบบย่อส่วน โดยใช้ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนคงสภาพ ในการศึกษาจะใช้อัตราส่วนระยะห่างต่อความกว้างเสาเข็ม S_g / B เท่ากับ 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 ซึ่งเป็นระยะที่ใช้สำหรับเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง และระยะ 1.2, 1.6, 2.0, 2.5, 3.0 ซึ่งเป็นระยะที่ยังไม่เคยมีการนำไปใช้เป็นเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่องมาก่อน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เพื่อที่จะได้ทราบถึงกลไกการต้านทานของดินระหว่างต้นเสาเข็มต่อแรงดันดินด้านข้างของเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่อง และนำกลไกที่ได้นี้มาพัฒนาเป็นสมการที่ใช้สำหรับวิเคราะห์และออกแบบระยะห่างระหว่างเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่องได้อย่างปลอดภัยและมีราคาที่เหมาะสม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ปริทรรศน์วรรณกรรมวิจัย

2.1 ระบบกำแพงกันดินในงานขุดดินลึก

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

2.1.1 ระบบกำแพงแบบยืดหยุ่น (flexible wall)

ระบบกำแพงแบบนี้ได้แก่ ระบบเข็มพืด (sheet pile) มีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กยาว กว้างประมาณ 30 ถึง 50 เซนติเมตร ใช้เป็นโครงสร้างชั่วคราวสำหรับโครงสร้างกันดิน เช่น งานวางท่อน้ำ งานโครงสร้างใต้ดิน และงานโครงสร้างกันดิน แต่กำแพงชนิดนี้เป็นแผ่นเหล็กที่มีความหนาไม่มาก หากใช้เป็นโครงสร้างกันดินในงานขุดดินที่มีความลึกมาก หรือใช้เป็นโครงสร้างกันการเคลื่อนตัวของอาคารข้างเคียงที่มีขนาดใหญ่ อาจจะก่อให้เกิดการเสียรูปของเข็มพืดและส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินอย่างมาก เนื่องจากกำแพงชนิดนี้มีค่าสติฟเนสต่ำ ดังนั้นจึงทำให้เกิดปริมาณการเคลื่อนตัวของกำแพงค่อนข้างสูง โดยทั่วไปนิยมใช้มากเนื่องจากการก่อสร้างทำได้ง่าย รวดเร็ว ราคาถูก โดยจัดเป็นโครงสร้างชั่วคราว (temporary structure) ทำการถอนออกเมื่อก่อสร้างเสร็จแล้วสามารถนำกลับไปใช้ได้อีก

รูปที่ 2.1 งานขุดดินโดยใช้ระบบกำแพงกันดินแบบเข็มพืดเหล็ก

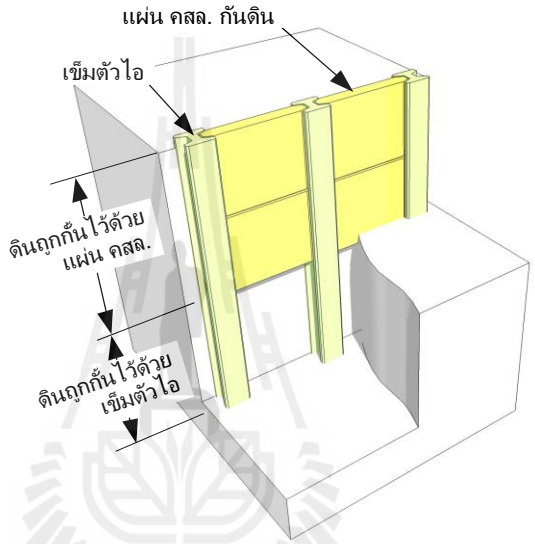
2.1.2 ระบบกำแพงแบบแกร่ง (rigid wall)

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

รูปที่ 2.2 งานขุดดินโดยใช้ระบบกำแพงกันดินแบบเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง

รูปที่ 2.3 งานขุดดินโดยใช้ระบบกำแพงกันดินแบบเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่อง

ตัวอย่างการใช้งานเสาเข็มตัวไอรูปแบบหนึ่งคือการใช้เสาเข็มตัวไอมาตอกเรียงกันให้มีระยะห่างมากกว่าในรูปที่ 2.3 เพื่อใช้เป็นกำแพงกันดินสำหรับดินถมชิดเขตที่ ดังรูปที่ 2.4 โดยใช้แผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กสอดไว้ในระหว่างเสาเข็มเพื่อป้องกันการไหลของดินลอดผ่านช่องว่างระหว่างเสาเข็ม ส่วนที่อยู่ใต้ดินลงไปจะไม่มีแผ่นคอนกรีตกั้นดิน ดังนั้นดินที่อยู่ระหว่างเสาเข็มจะถูกกั้นไว้ด้วยเสาเข็มเท่านั้น กำแพงชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้สำหรับเป็นกำแพงกันดินริมตลิ่งหรือกำแพงเพื่อกันดินในกรณีถมดินชิดเขตที่ดิน เป็นต้น



รูปที่ 2.4 การใช้เสาเข็มรูปตัวไอร่วมกับแผ่น คสล. เพื่อเป็นระบบกำแพงกันดิน

2.2 กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (contiguous pile wall)

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

ประจิต (2536) กล่าวว่ากำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (contiguous pile wall) เคยใช้ก่อสร้างในประเทศไทย โดยในระยะแรกใช้เสาเข็มไม้แต่ยังไม่มีความทันสมัยและปลอดภัย การก่อสร้างคือนำเสาเข็มมาทำเป็นแนวเรียงต่อเนื่องกันล้อมรอบบริเวณที่ต้องการขุดดิน จากนั้นติดตั้งค้ำยันภายในเพื่อทำการขุดหรือบริเวณที่ต้องการป้องกันการพังทลายของดิน อดีตในกรุงเทพมหานครการขุดดินส่วนมากจะใช้เสาเข็มไม้ตอกเรียงกัน โดยเสาเข็มไม้มีความยาว 4 เมตร

ถึง 12 เมตร ขึ้นกับความลึกที่จะขุด แต่เนื่องจากเสาเข็มไม้มีความยาวจำกัด กำลังของไม้ไม่สูงมาก ทำให้ขุดลึกมากไม่ได้ รวมถึงราคาไม้มีราคาสูงและหายาก จึงไม่เป็นที่นิยม กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องมีขั้นตอนการก่อสร้างเหมือนกับการตอกเสาเข็มไม้เรียงกันแต่จะเปลี่ยนจากไม้เป็นเสาเข็มชนิดต่างๆ เช่น เสาเข็มเจาะคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ เสาเข็มหน้าตัดสี่เหลี่ยมคอนกรีตหล่อสำเร็จ เสาเข็มคอนกรีตหน้าตัดรูปตัวไอ และเสาเข็มเหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปตัวไอ การก่อสร้างจะเรียงเป็นแถวโดยจะทำการเว้นระยะระหว่างเสาเข็มอยู่ที่ 50 มิลลิเมตร ถึง 150 มิลลิเมตร ดังนั้นโครงสร้างกันดินนี้จึงไม่สามารถกันน้ำได้ ทั่วไปจะใช้ในดินเหนียวซึ่งมีอัตราการซึมผ่าน (permeability) ต่ำ

ประจิต (2539) กล่าวว่า กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (contiguous pile wall) ถูกใช้กับดินเม็ดหยาบหรือดินถม อัตราการซึมผ่าน (permeability) ไม่มีปัญหาต่อระยะห่างระหว่างเสาเข็ม เพราะสามารถปรับความยาวช่องว่างระหว่างเข็มได้เพื่อป้องกันการพังทลายของดิน ความลึกมากที่สุดที่กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (contiguous pile wall) สามารถก่อสร้างได้ประมาณ 34 – 55 เมตร อย่างไรก็ตามความกว้างของระยะห่างระหว่างเสาเข็มนี้สำคัญมาก เสาเข็มจะทำหน้าที่เป็นกำแพงกันดินโดยรับทั้งแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่เกิดจากแรงดันดินด้านข้างทั้งป้องกันการอูด (heave) ของก้นบ่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว และระยะห่างระหว่างเสาเข็มแต่ละต้นจะขึ้นกับชนิดของดิน ความลึกในการขุด และระบบค้ำยันภายใน

รูปที่ 2.5 การใช้กำแพงเสาเข็มไม้เรียงต่อเนื่องสำหรับเป็นกำแพงกันดินในอดีต
(wikimedia.เว็บไซต์)

2.3 การก่อสร้างกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องในอดีต

ลักษณะดินกรุงเทพส่วนบนเป็นดินเหนียวซึ่งการซึมน้ำต่ำมาก ทำให้สามารถใช้เสาเข็มเรียงต่อเนื่องได้โดยไม่มีปัญหาเรื่องน้ำ ทำให้สามารถเรียงเป็นกำแพงกันดินชั่วคราว ที่มีราคาถูกและทำได้ง่ายกว่ากำแพงกันดินชนิดอื่น

2.3.1 บันทึกเกี่ยวกับการใช้เสาเข็มเรียงต่อเนื่องในกรุงเทพฯ

ประจิต (2539) ได้บันทึกและรายงานเกี่ยวกับการใช้เสาเข็มเรียงต่อเนื่องชนิดต่างๆ เป็นกำแพงกันดินชั่วคราว และถาวรในกรุงเทพ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 บันทึกการก่อสร้างกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องในกรุงเทพ

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

2.4 ปัญหาที่พบในระบบกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง

ปัญหาที่สำคัญของระบบกำแพงกันดินชนิดนี้คือ ความทึบน้ำของกำแพง กำแพงชนิดนี้จะไม่สามารถกั้นน้ำได้เนื่องจากมีช่องว่างอยู่ตรงกลางระหว่างเสาเข็ม โดยเสาเข็มจะมีขนาดตั้งแต่ 0.35 เมตร ถึง 1.20 เมตร ปัญหาในเรื่องดินและน้ำจะไหลออกจากช่องว่างระหว่างผิวเสาเข็มขึ้นอยู่กับ

ปัจจัยต่างๆและสภาพแวดล้อมรอบๆบริเวณเขตก่อสร้าง ซึ่งเราสามารถแบ่งพิจารณาเป็น 2 กรณีได้ดังนี้

2.4.1 กรณีเรื่องน้ำไหลซึมขณะขุดดิน

ประจิต (2539) กล่าวว่าน้ำที่ไหลซึมออกมาขณะขุดดิน และไปชะนำพาให้ดินหลุดออกมาจนทำให้ดินบริเวณข้างเคียงทรุดหรือยุบลงจะไม่เกิดขึ้น เพราะไม่มีน้ำไหลแม้ว่าในดินจะมีปริมาณน้ำมากถึง 130 -140 เปอร์เซ็นต์ก็ตาม ทั้งนี้ความจริงแล้วไม่ใช่น้ำดังกล่าวไม่ไหล แต่มีการไหลเกิดขึ้นในอัตราการไหลที่ช้ามาก โดยเฉพาะดินเหนียวกรุงเทพฯ มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำ (K , coefficient of permeability) ต่ำมาก คือประมาณ 10^{-8} ถึง 10^{-6} เซนติเมตรต่อวินาที

Jamshed et al. (1975) รายงานว่าดินบริเวณรังสิตและบริเวณหนองงูเห่า มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำมากในส่วนที่ตื้น และมีค่าน้อยในส่วนที่ลึก โดยทั่วไปแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำในระดับ 10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที ก็ถือว่าไม่ซึมน้ำ (impermeable) อัตราการไหลซึมของน้ำจะน้อยจนน้อยกว่าอัตราการระเหยในบรรยากาศ ผลก็คือส่วนที่สัมผัสกับอากาศจะแห้ง น้ำมีโอกาสไหลซึมได้บ้างในระดับตื้น ซึ่งจะไม่ใช่น้ำในดินโดยตรงแต่จะเป็นน้ำใช้จากอาคารบ้านเรือนไหลจากท่อที่แตก หรือรางระบายน้ำ ผ่านลงไปในดินถมหรือขยะ แล้วไหลออกตามซอกเข็ม

2.4.2 ปัญหาเนื่องจากดินไหลออกขณะขุดดิน

การไหลทลายของดินระหว่างเสาเข็มนั้นจะเกิดขึ้นได้แต่อยู่ในระดับที่ควบคุมได้ ประจิต (2539) ได้มีการออกแบบระยะห่างระหว่างเสาเข็มซึ่งระยะห่างระหว่างเสาเข็มนี้จะขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่างหน้าตัดของเสาเข็ม แรงดันดินด้านข้างและกำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน

รูปที่ 2.6 ลักษณะของดินที่ไหลออกตามซอกเข็ม

2.5 ข้อดีและข้อด้อยของเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง

ถ้านำกำแพงกันดินเสาเข็มเรียงต่อเนื่องชนิดต่างๆมาเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยกันแล้ว ต้องพิจารณาถึงเรื่องประโยชน์การใช้งาน การเคลื่อนตัวของดินหรือความปลอดภัยในการขุด ราคา ระยะเวลาในการก่อสร้างและขีดจำกัดอย่างอื่นซึ่งเราสามารถวิจารณ์เปรียบเทียบเป็นลำดับดังนี้

2.5.1 ประโยชน์การใช้งาน

ประโยชน์ในการใช้งานเป็นกำแพงกันดินทั้งชั่วคราวและถาวร ประโยชน์ในการนำกลับมาใช้ซ้ำหลายครั้งหรือดัดแปลงใช้งานชนิดอื่น เช่น เข็มเหล็กรูป H หรือ I สามารถใช้เป็นคานค้ำยันหรือเสาได้เมื่อถูกตัดสั้นๆ ก็ยังใช้ประโยชน์อื่นๆ ได้ ในขณะที่กำแพงเสาเข็มคอนกรีตหล่อในที่หรือกำแพงเสาเข็มคอนกรีตตอกจะใช้ประโยชน์ได้หนเดียว คือเป็นกำแพงกันดินชั่วคราวหรือถาวรเท่านั้น และเมื่อใช้เป็นกำแพงถาวรก็จะมีน้ำหนักมากซึ่งไปเพิ่มภาระแก่ฐานราก

2.5.2 การเคลื่อนตัวของดินรอบข้าง

เสาเข็มคอนกรีตจะมีการเคลื่อนตัวน้อยเพราะมีความแกร่ง ในขณะที่เสาเข็มเหล็กหน้าตัดรูปตัว H หรือ I อาจจะทำให้ความแข็งแกร่งมาก แต่การถอนกลับมาใช้ทำให้ดินรอบข้างมีโอกาสเคลื่อนตัวมากกว่า

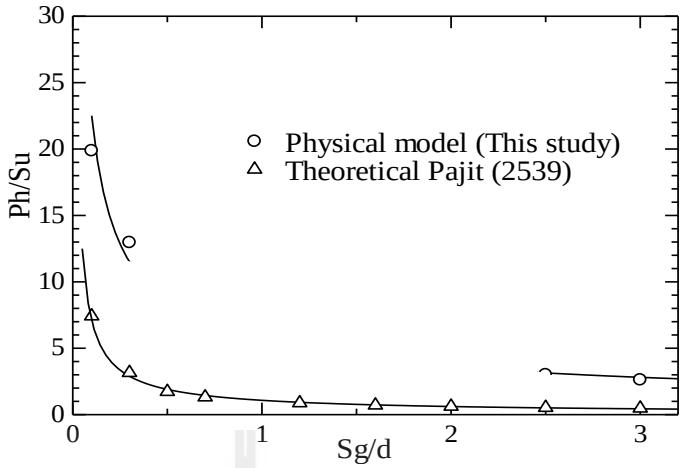
2.5.3 ราคาและระยะเวลาในการก่อสร้าง

ทั่วไปแล้วเสาเข็มตอกมักจะมากกว่าทั้งด้านราคาและเวลา แต่เสาเข็มเหล็กก็จะแพงกว่าถ้าไม่สามารถถอนกลับมาได้

2.6 พฤติกรรมของกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องหน้าตัดวงกลม

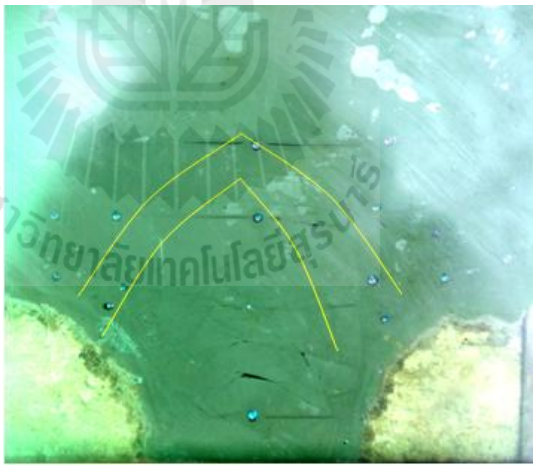
วินิตย์และคณะ (2553) ได้ทำการทดสอบศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของดินที่ถูกกักอยู่ระหว่างช่องว่างของเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องพบว่า กำลังต้านทานต่อการไหลของดินแปลผกผันกับระยะห่างระหว่างช่องว่างในรูปแบบไฮเปอร์โบลิกดังสมการที่ 2.1

$$\frac{P_h}{S_u} = 5.434\left(\frac{S_g}{d}\right)^{-0.618} \qquad (2.1)$$



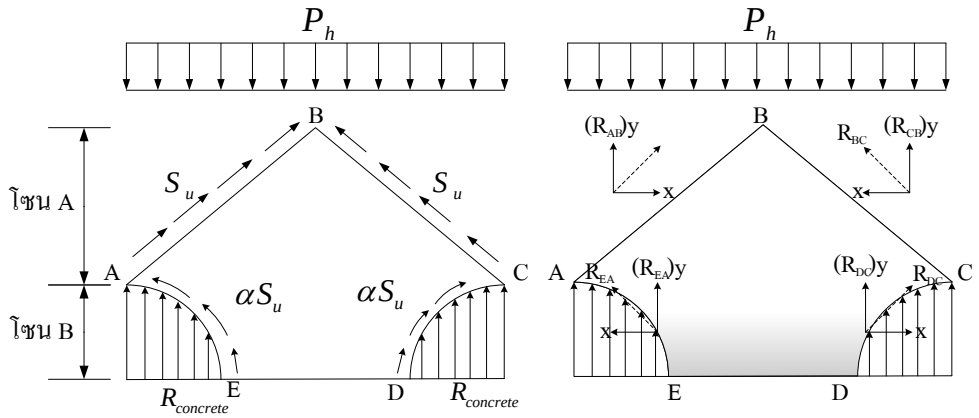
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างต่อกำลังต้านทานแรงดันดินด้านข้าง จากผลการทดสอบกับแบบจำลองทางกายภาพย่อส่วน (วินิตย์และคณะ, 2553)

จากการทดสอบ วินิตยังได้พบรูปแบบการวิบัติของแบบจำลองจากภาพถ่ายเชิงซ้อน ในขณะทดสอบมีลักษณะดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างที่สังเกตุพบ ระยะ s_g / d =1.5 (วินิตย์และคณะ, 2553)

ซึ่งวินิตได้นำเสนอกลไกการวิบัติและคำนวณแรงวิบัติ โดยพิจารณาให้บริเวณแนววิบัติดินมีหน่วยแรงเฉือนต้านทานเท่ากับ undrain shear strenght ดังรูปที่ 2.9

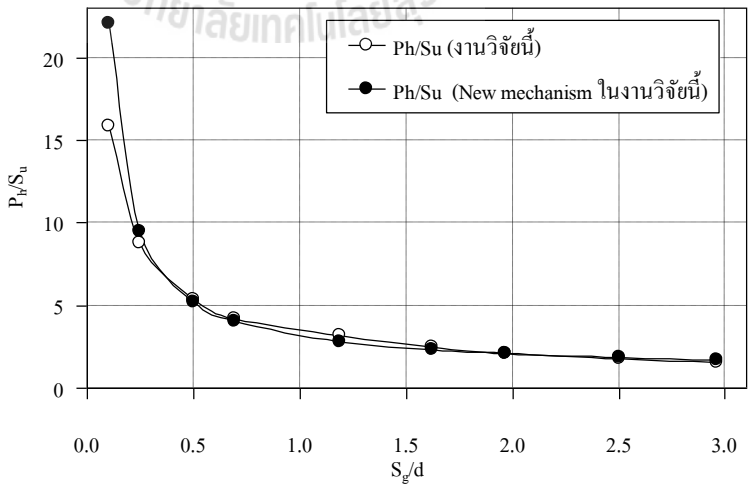


รูปที่ 2.9 กลไกการวิบัติและแรงที่เกิดขึ้นบนระนาบวิบัติ (วินิตย์และคณะ, 2553)

จากสมดุลของแรงต้านทานกับแรงกระทำสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูป close form solution ได้ดังสมการที่ (2.2)

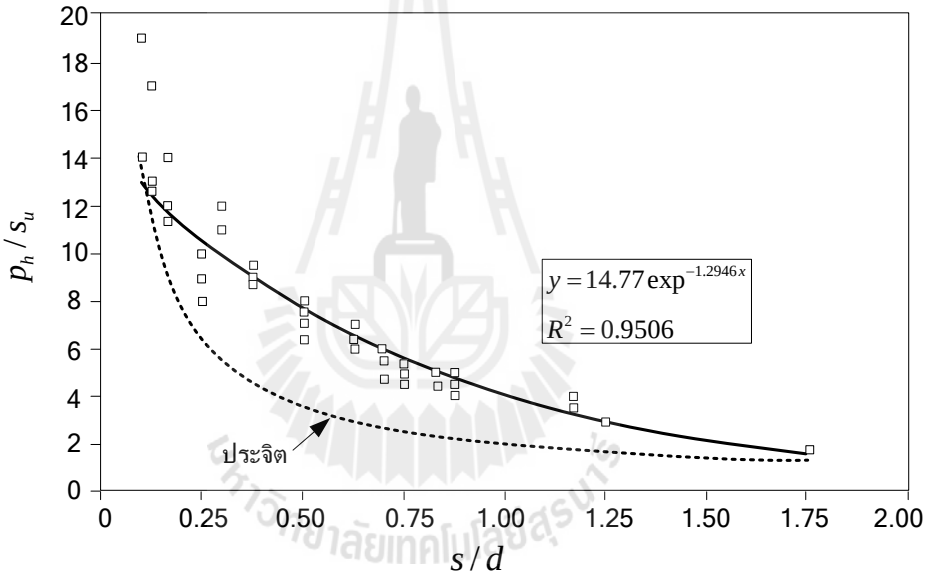
$$\frac{P_h}{S_u} = \frac{\left((s_g + d) + \frac{\alpha d \pi}{2\sqrt{2}}\right)}{s_g} \qquad (2.2)$$

ซึ่งให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพมากดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับแนวคิดการวิบัติ (วินิตย์และคณะ, 2553)

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



รูปที่ 2.11 วิสัยรับแรงธารของผนังเสาเข็มหน้าตัดกลม (วิชัย, 2540)

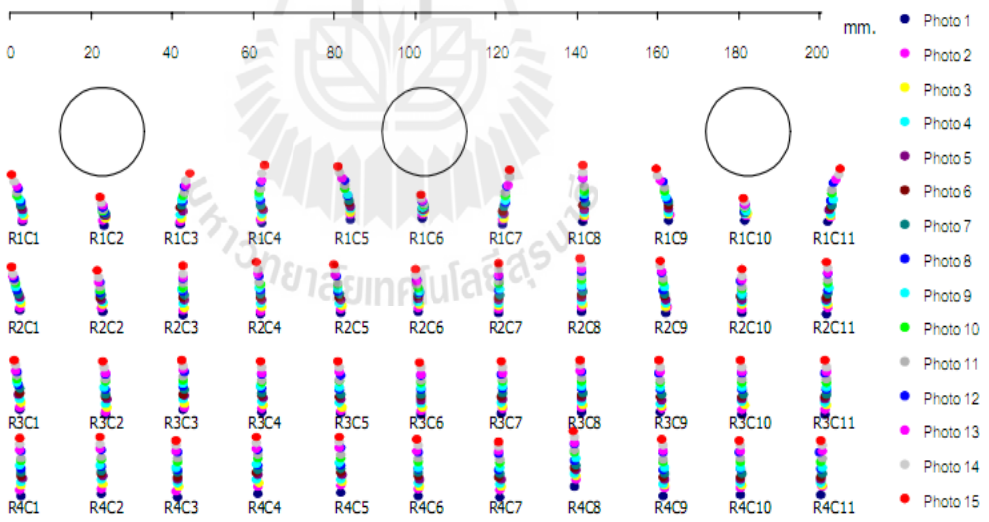
วิชัย (2540) ได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันดินด้านข้าง (P_h) กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม (s) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มกลม (d) จะแทนได้ด้วยสมการที่ 2.3

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

โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9506

จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างเสาเข็มกับขนาดเสาเข็ม (S/d) และอัตราส่วนระหว่างแรงดันดินด้านข้างกับกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน (P_h/S_u) พบว่าเมื่อ S/d มีค่าประมาณ 0.1 จะให้ผลใกล้เคียงกันและเมื่อค่าอยู่ระหว่าง 0.25 ถึง1.0 จะได้ P_h/S_u สูงกว่าที่ได้จากสมการ 2.1 ค่อนข้างมากและจะมีความแตกต่างลดลงเรื่อยๆจนมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อ S/d ประมาณ 1.75

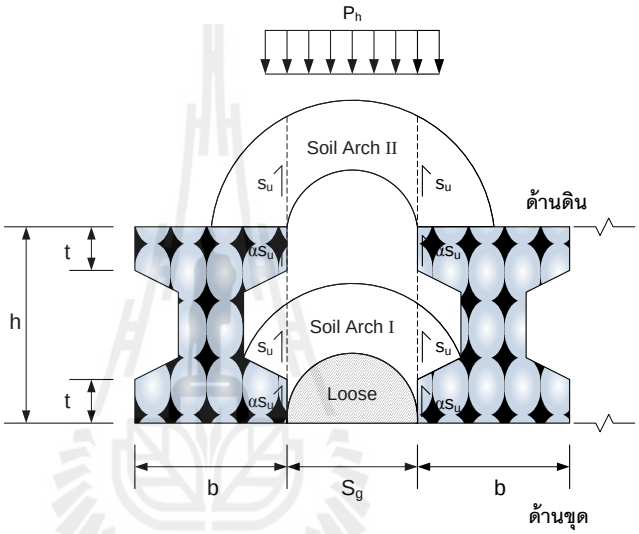
ประสพศิริ (2546) ทำการวิจัยถึงพฤติกรรมแนวโค้งรับแรงระหว่างเสาเข็มของกำแพงเสาเข็มเว้นระยะในดินทราย เพื่อเสริมเสถียรภาพความลาดชัน โดยได้ทดสอบแบบจำลองทางกายภาพย่อส่วนและบันทึกภาพถ่ายการเคลื่อนตัวของหมุดสังเกตุขณะทดสอบ ผลการทดสอบพบว่า เสาเข็มเว้นระยะสามารถต้านการเคลื่อนตัวของดินได้ โดยระยะห่างระหว่างเสาเข็มมีความสำคัญมาก ระยะที่สามารถต้านทานการเคลื่อนตัวได้มีระยะห่างระหว่างเสาเข็มไม่เกิน 4 เท่าของขนาดหน้าตัดเสาเข็ม ผลจากภาพถ่ายได้สรุปเป็น 3 ช่วงพฤติกรรม คือ ช่วงแรกเป็นช่วงเคลื่อนตัวของดิน ทำให้มีการยุบอัดตัวของดินเข้าสู่เสาเข็มโดยตรง ช่วงที่ 2 มีการพัฒนาการถ่ายแรง โดยพบการยุบอัดตัวด้านหน้าเสาเข็ม ช่วงที่ 3 การพัฒนากำลังถึงจุดสุดท้ายและเกิดการพังทลาย



รูปที่ 2.12 แสดงรูปภาพการเคลื่อนตัวของมวลดินเมื่อถูกปิดกั้นบางส่วนด้วยเสาเข็มเว้นระยะในกรณีทดสอบที่ S/D = 4 (ประสพศิริ, 2546)

2.7 พฤติกรรมของกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องหน้าตัดรูปตัวไอ

ประจิต จิรัปปภา (2539) ได้อธิบายพฤติกรรมการรับน้ำหนักแรงของเสาเข็มเรียงต่อเนื่องหน้าตัดตัว I ว่า ดินที่อยู่บริเวณซอกเสาเข็มจะทำตัวเป็นสะพานโค้ง (soil arc bride) ซึ่งสะพานโค้งหรือสะพานดินดังกล่าวเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุลจะสามารถต้านทานแรงดันดินทางด้านข้างได้ โดยความสามารถต้านทานแรงดันดินทางด้านข้างจะขึ้นอยู่กับขนาดหน้าตัด ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม แรงดันดินด้านข้างและกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ



รูปที่ 2.13 สะพานดินระหว่างซอกเสาเข็มและระนาบวิบัติของดินสำหรับเสาเข็มตัวไอ (ประจิต, 2539)

เสาเข็มคอนกรีตหน้าตัดรูปตัว I นี้เป็นเสาเข็มหล่อสำเร็จใช้ตอกลงไปในดิน ทางกรุงเทพมหานครได้ใช้เป็นกำแพงกันดินริมคลอง โดยมีแผงคอนกรีตระหว่างซอกของรูปตัว I เพื่อป้องกันดินที่เปิดสัมผัสกับน้ำไม่ให้ไหลออก หากใช้กำแพงกันดินโดยไม่ปิดช่องว่างนี้ก็สามารถวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 2.11 หลักการของการวิเคราะห์จะคล้ายกับเป็นการผสมกันของเข็มเหล็กรูปพรรณปีกกว้างและของเข็มหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม ทั้งนี้เนื่องจากเข็มชนิดนี้จะมีปีกด้านข้างซึ่งมีความหนาพอสมควร ความฝืดหรือความยึดเกาะของดินกับคอนกรีตส่วนนี้ต้องนำมาคิดด้วย เราจึงได้สมการที่ (2.4) ซึ่งสามารถนำไปใช้ออกแบบระยะห่างของเสาเข็มได้

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

เมื่อ S_u = กำลังต้านทานแรงเฉือนในสภาวะไร้การระบายน้ำของดิน (undrain shear strength)

P_h = แรงดันดินด้านข้าง (leteral earth pressure)

S_g = ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม

B = ความกว้างของเสาเข็มรูปตัวไอ

h = ความลึกของเสาเข็มรูปตัวไอ

t = ความหนาของปีกเสาเข็มรูปตัวไอ

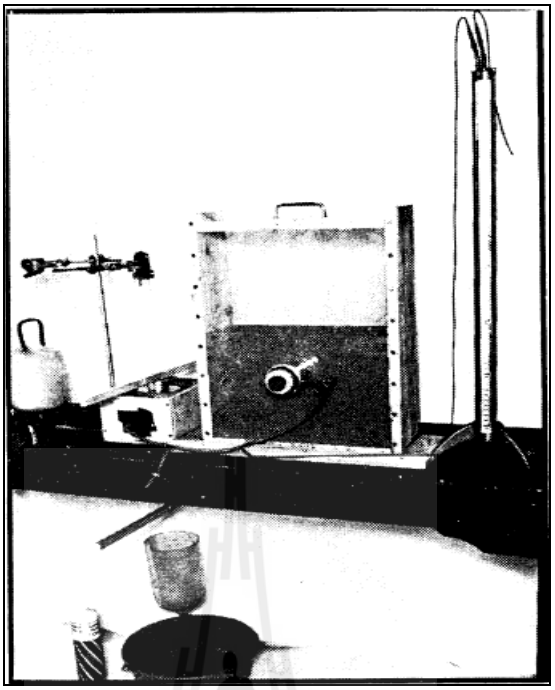
α = สัมประสิทธิ์การเกาะตัวระหว่างดินกับผิวเสาเข็ม

อย่างไรก็ตามยังไม่มีผลการศึกษาทางกายภาพเพื่อยืนยันตามสมการที่ (2.4) แต่อย่างใด ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จะทำการศึกษาพฤติกรรมของดินระหว่างเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องหน้าตัดตัว I ในเชิงกายภาพ และนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับสมการของ (ประจิต, 2539)

2.8 พฤติกรรมแนวโค้งรับแรง (arching behavior)

แนวโค้งรับแรง (arching effect) คือโครงสร้างลักษณะโค้งที่ใช้รองรับน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างด้านบนเหนือแนวโค้งรับแรง เทคนิคการก่อสร้างแนวโค้งรับแรง (arching effect) ถูกพัฒนาขึ้นในเมโสโปเตเมีย แอสซีเรีย อียิปต์ และ อีทรูเรีย เทคนิคการก่อสร้างถูกปรับปรุงและใช้อย่างแพร่หลายในโรมันโบราณ จากนั้นแนวโค้งรับแรงกลายเป็นโครงสร้างสำคัญของอาคารโบสถ์ของศาสนาคริสต์ ปัจจุบันยังมีการใช้แนวโค้งรับแรงในส่วนของโครงสร้างของสะพาน ประโยชน์ของแนวโค้งรับแรงคือ ใช้เป็นโครงสร้างในการเชื่อมต่อบริเวณช่องของส่วนโครงสร้างต่างๆ ใช้ออกแบบเพื่อรับแรงอัดในแนวดิ่ง โดยการเปลี่ยนแรงอัดในแนวดิ่งเป็นแรงอัดในแนวระนาบของแนวโค้งรับแรงและถ่ายแรงลงสู่ฐานทั้งสองข้างของแนวโค้งรับแรง

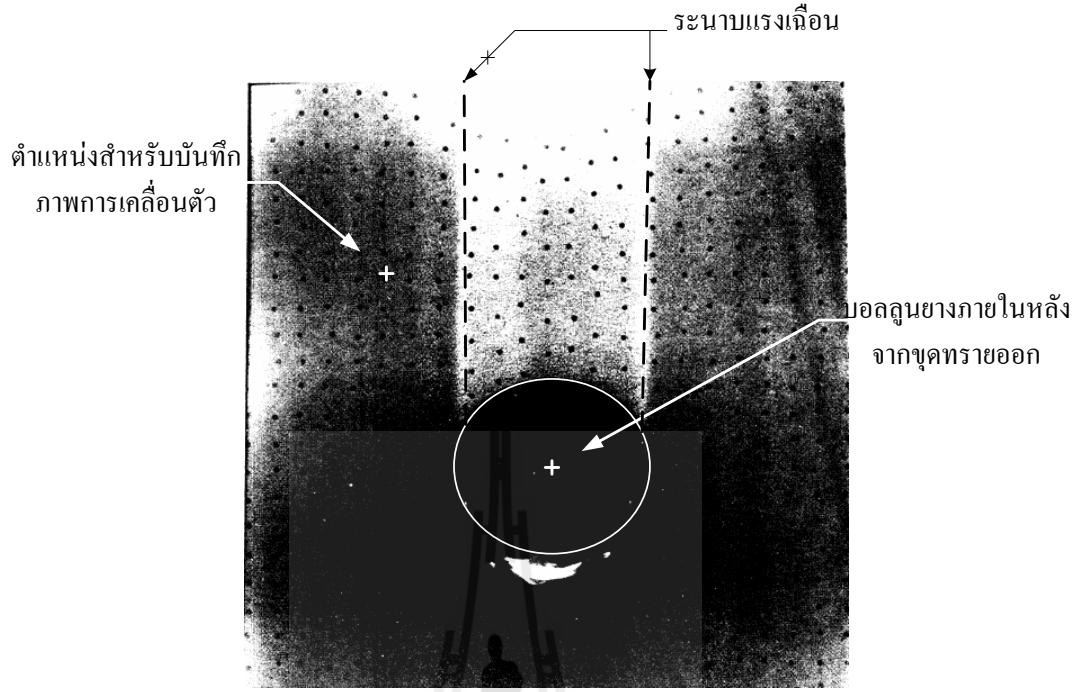
Atkinson et al. (1975) ได้ออกแบบและทดลองเกี่ยวกับการเกิดแนวโค้งรับแรงจนได้ผลที่สามารถเชื่อถือได้ การทดลองของเขาใช้เครื่องมือที่มีลักษณะดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 อุปกรณ์ทดสอบแบบจำลองอุโมงค์ (Atkinson et al., 1975)

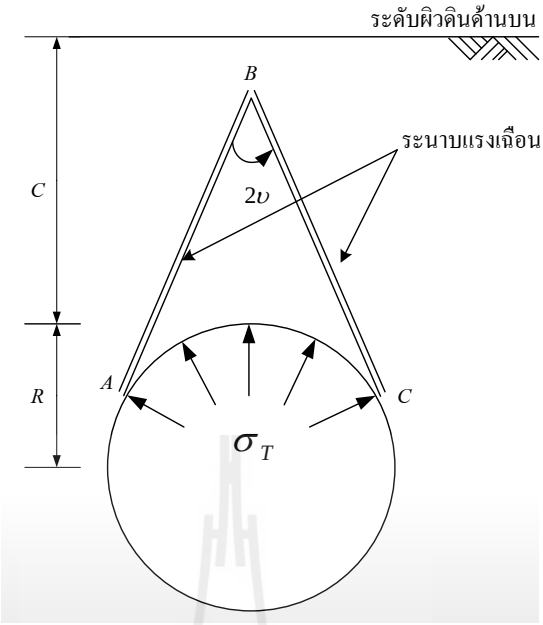
โดยใช้ทราย leighton buzzard ซึ่งมีอัตราส่วนโพรงเท่ากับ 0.52 เทลงในกล่องทดสอบในทิศแนวแกนของอุโมงค์จำลองในระหว่างเททรายได้วางหมุดเครื่องหมายในแนวระนาบกับแกนอุโมงค์ไปด้วย ภายในกล่องบรรจุบอลลูนยางทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 64 มิลลิเมตร ซึ่งใช้เป็นอุโมงค์จำลอง ส่วนประกอบของอุโมงค์ประกอบด้วย บอลลูนยางทรงกระบอก 2 ชิ้น ชิ้นหนึ่งถูกซ้อนไว้ด้านใน ปลายของบอลลูนถูกยึดติดไว้กับกล่องทดสอบเพื่อให้เกิดผลกระทบน้อยที่สุดในระหว่างดินพัง

จากนั้นเติมทรายด้านในบอลลูนจนมีระดับเท่ากับด้านนอก ทรายด้านในบอลลูนถูกขุดโดยปั๊มดูดอากาศและอัดแรงดันอากาศไปที่บอลลูนด้านนอกเพื่อรักษาสมดุล ขณะดำเนินการบอลลูนด้านในจะพังลง บอลลูนตัวนอกจะเป็นระบบค้ำยันด้วยแรงดันอากาศ ทรายในอุโมงค์ขุดด้วยแรงดันเท่ากับแรงดันส่วนเกินจากด้านบน ($\sigma_T = \gamma C$ เมื่อ γ คือ หน่วยน้ำหนักของดิน และ C คือ ความลึกจากผิวดินถึงส่วนบนของอุโมงค์) การทดสอบจะลดแรงดันอากาศลงจนกระทั่งอุโมงค์พัง ขณะทดสอบจะบันทึกภาพในทุกระยะของการลดแรงดันอากาศดังรูปที่ 2.15 การบันทึกก่อนและหลังการขุดจะไม่พบระยะยืดตัว (elastic zone) ของทราย

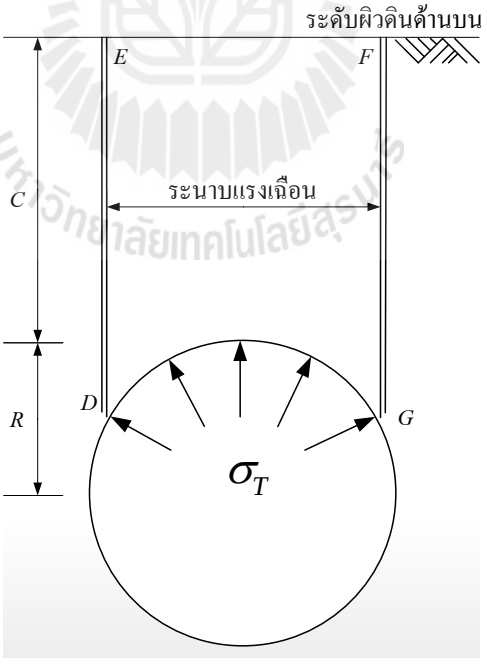


รูปที่ 2.15 ภาพถ่ายแบบจำลองจาก radiograph (Atkinson et al., 1975)

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

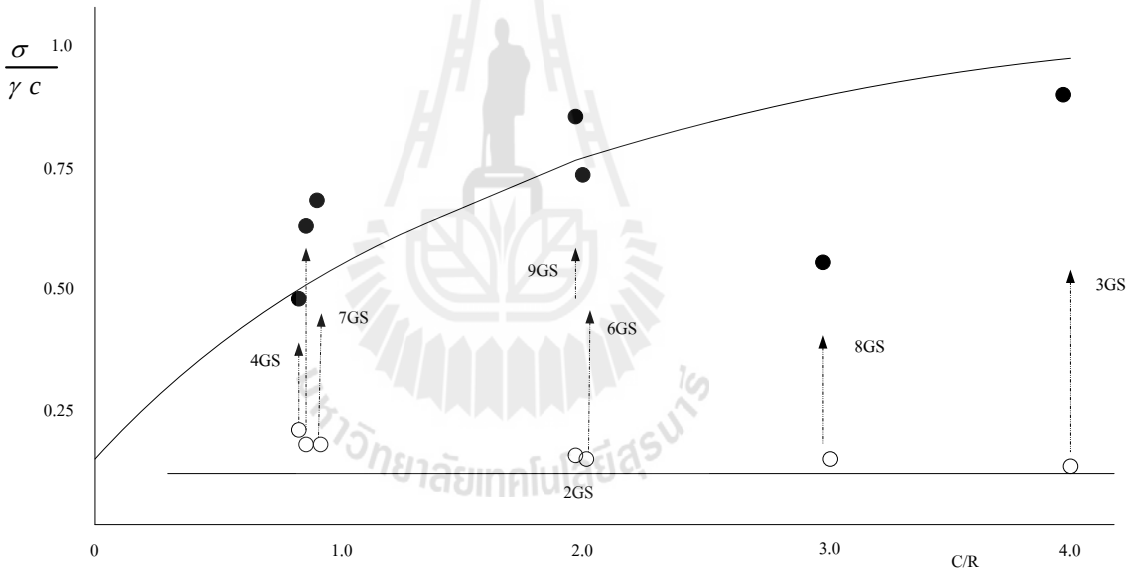


รูปที่ 2.16 แนวระนาบเฉือนในการวิบัติเริ่มต้นของแบบจำลองอุโมงค์ (Atkinson et al., 1975)



รูปที่ 2.17 การวิบัติสุดท้ายของแบบจำลองอุโมงค์ (Atkinson et al., 1975)

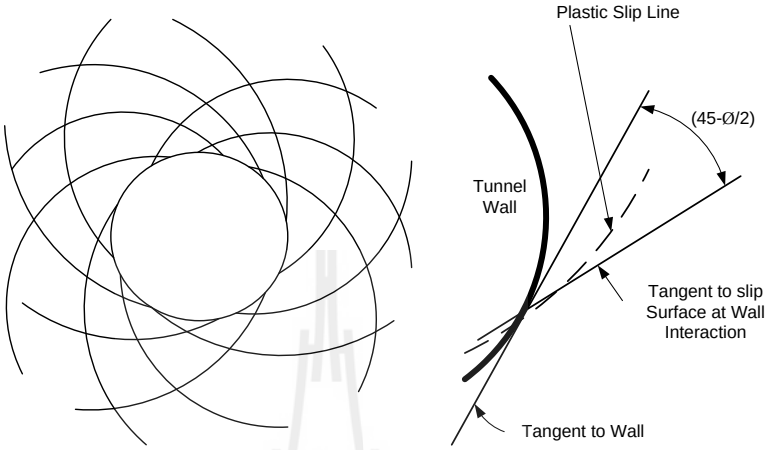
การพังที่เกิดขึ้นโดยทันทีสามารถอธิบายถึงการทดสอบทั้งหมด โดยการเคลื่อนตัวของทรายอย่างฉับพลัน เกิดจากการเพิ่มแรงดันอากาศเพื่อทำให้อุโมงค์อยู่ในสภาวะสมดุล แรงดันที่ทำให้เกิดการพังและที่สภาวะสมดุลสุดท้ายได้วิเคราะห์ไว้ดังรูปที่ 2.18 เมื่อ R คือรัศมีแบบจำลองอุโมงค์และวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่าง $\sigma_t/\gamma R$ กับ C/R เส้นความสัมพันธ์ด้านล่างแสดงให้เห็นแรงดันภายในอุโมงค์ที่จุดเริ่มต้นการพัง และเส้นความสัมพันธ์ด้านบนคือแรงดันที่จุดสมดุลสุดท้ายโดยจุด 8GS เป็นจุดที่อาจจะไปไม่ถึงจุดสมดุลสุดท้าย เนื่องจากแรงดันด้านในอุโมงค์ไม่คงที่ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การพังเริ่มต้นแทบจะไม่เกี่ยวกับอัตราส่วนความลึกต่อรัศมี ถ้าเกิดก็จะเกิดขึ้นน้อยมาก แรงดันอุโมงค์ที่จุดสมดุลเริ่มต้นมีค่าเกินกว่าที่ต้องการจึงเกิดการพัง โดยเสนอการป้องกันด้วยค่า factor เท่ากับ 3 ที่ $C/R = 1$ และ ค่า factor เท่ากับ7 ที่ $C/R = 4$



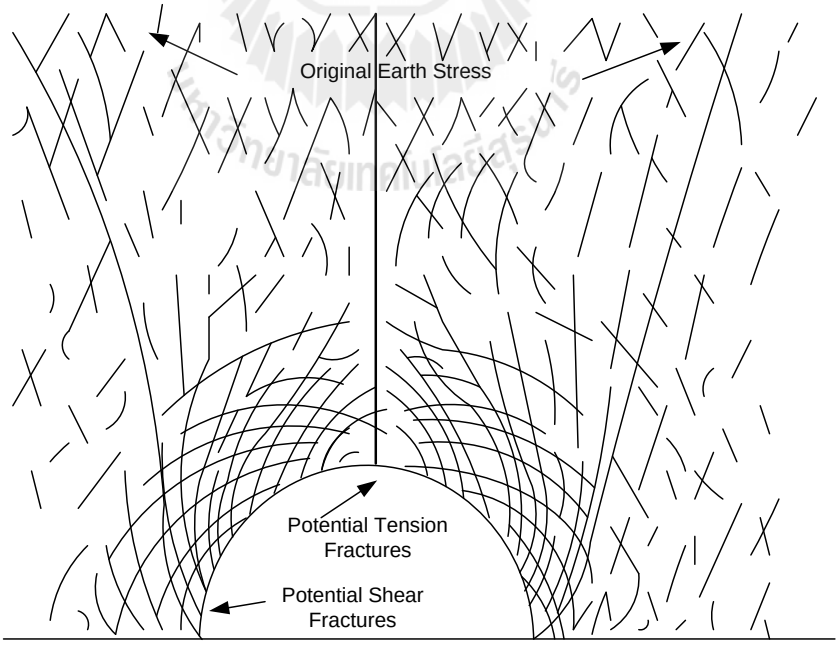
รูปที่ 2.18 ผลจากการทดสอบแบบจำลองอุโมงค์ (Atkinson et al., 1975)

ทฤษฎีพลาสติซิตี้ได้สมมติระนาบการไถลให้มีทิศทางตามทิศที่มีแรงเฉือนมากที่สุด สถานะพลาสติกสามารถอธิบายได้จากขอบเขตที่เกิดการไถล การหาเส้นระนาบการไถลที่แท้จริงเป็นปัญหาที่หาคำตอบได้ยาก โดยทั่วไปจะใช้การประมาณอย่างง่าย McCutcheon (1949) ได้สมมติเส้นระนาบการไถลให้เอียงที่ $\pm(45-\phi/2)$ Heuer and Hendron (1971) ได้ทดสอบแบบจำลอง โดยสมมติขอบเขตเส้นการไถลของรัศมีแรงเฉือนขึ้นมาจากการสังเกตพื้นผิวการไถล

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นผิวการไถลและการคาดเดาการหันทิศทางของผิวการไถลได้ดังรูปที่ 2.19 และ รูปที่ 2.20



รูปที่ 2.19 ทฤษฎีพลาสติกระนาบไถลรอบวงกลมเปิดที่มีแรงเสียดทาน (McCutcheon et al., 1949)



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

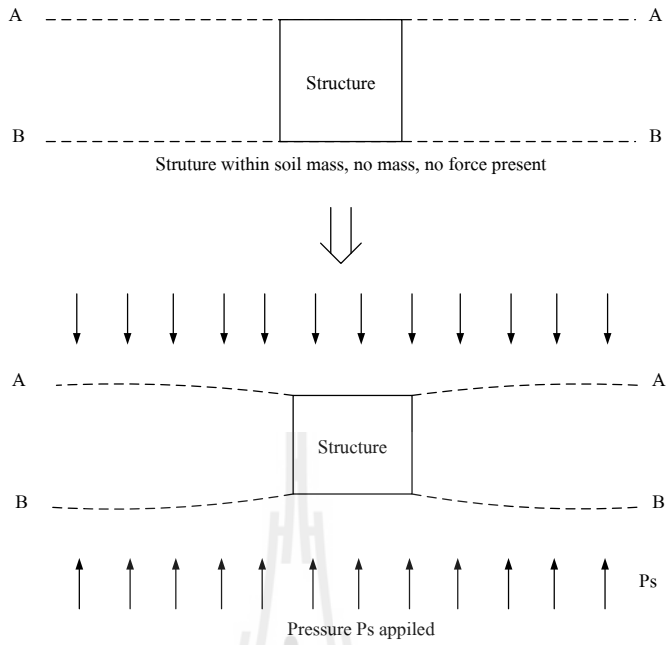
Bastien Chevalier, Gael Combe and Pascal Villard, (2007) กล่าวว่าพฤติกรรมแนวโค้งรับแรง (arching behavior) เป็นกลไกที่สำคัญและพบบ่อยในงานวิศวกรรมโยธาโดยเฉพาะวิศวกรรมด้านธรณีเทคนิค เช่น งานปรับปรุงดินด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ การทรุดตัวของดินคันทาง เป็นต้น

Terzaghi (1943) กล่าวว่าพฤติกรรมแนวโค้งรับแรง (arching behavior) เป็นปรากฏการณ์ทั่วไปที่เกิดขึ้นในดิน พบได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นมากในงานก่อสร้างใต้ดิน เช่น โครงการท่อส่งน้ำใต้ดิน การก่อสร้างใต้ดินจะใช้แนวโค้งรับแรงนี้ให้เป็นประโยชน์ โดยลดแรงดันดินส่วนเกินจากดินที่กระจายแรงไปสู่โครงสร้าง บางครั้งยังสามารถต้านแรงจากผิวดินและแรงดันดินด้านข้างอีกด้วย แนวโค้งรับแรงสามารถอธิบายได้ว่า เกิดการถ่ายแรงระหว่างมวลของวัสดุทางวิศวกรรมธรณีกับโครงสร้างที่อยู่นิ่ง การกระจายแรงในดินจะทำให้ดินเสียรูป ในขณะที่ความต้านทานแรงเฉือนพยายามที่จะรักษาสภาพให้อยู่ในตำแหน่งเดิมโดยใช้ส่วนที่ติดกับโครงสร้างเป็นจุดรองรับ

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

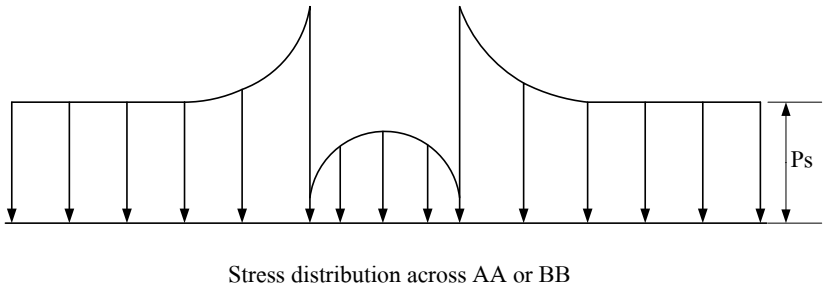
Evans (1983) เสนอแบบจำลองดินแบบอิลาสติกโดยสรุปว่า ถ้ามวลดินมีทิศทางการเคลื่อนที่พุ่งลงกำลังต้านทานแรงเฉือนจะกระทำในทางตรงกันข้าม แรงที่เกิดบนมวลดินจะลดลง ถ้ามวลดินมีทิศทางการเคลื่อนที่พุ่งขึ้นกำลังต้านทานแรงเฉือนจะมีทิศทางลง เพื่อต้านการเคลื่อนที่เป็นผลให้แรงที่จุดรองรับเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่กล่าวมาทั้งหมดขึ้นอยู่กับความแกร่งของวัสดุ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

แนวโค้งรับแรงในสภาวะ active จะเกิดขึ้นเมื่อโครงสร้างรับแรงมากว่าดินที่อยู่โดยรอบ ดังรูปที่ 2.21



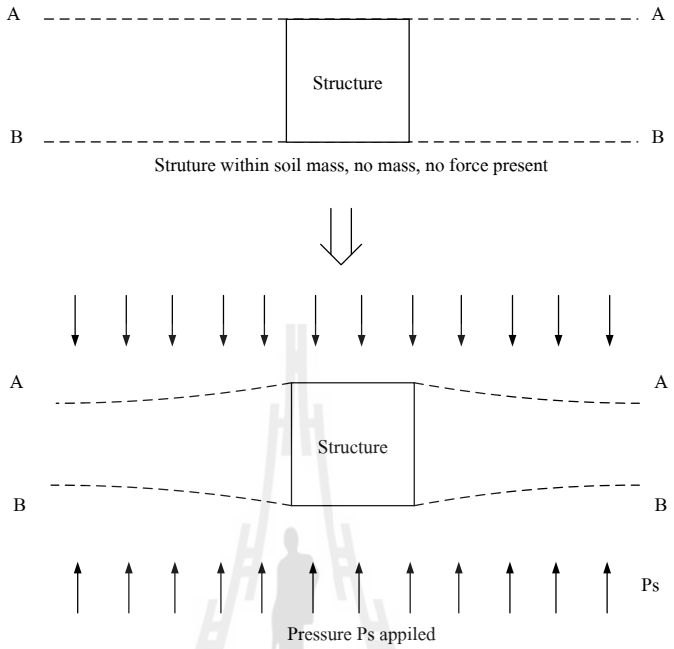
รูปที่ 2.21 active arching การเคลื่อนตัวใต้แรงดัน *Ps* เมื่อโครงสร้างถูกแรงอัดมากกว่าดินรอบข้าง (Einstein et al., 1983)

เมื่อทั้งระบบถูกแรงกระทำ ผลของแรงกระจายจะตัดผ่านตำแหน่งของโครงสร้างซึ่งรับแรงมากกว่าบริเวณรอบๆ (ระดับเริ่มต้นเท่ากัน ดังระนาบ AA และ BB) ดังรูปที่ 2.22 ถ้าโครงสร้างมีการเคลื่อนที่จนเสียรูปไปจากระนาบ AA และ BB แรงที่เกิดขึ้นจะมีแนวโน้มลดลงและเคลื่อนที่ไปที่ขอบของโครงสร้าง เกิดการรวมตัวกันของแรงก่อให้เกิดเป็นแรงเฉือนขึ้นในดิน



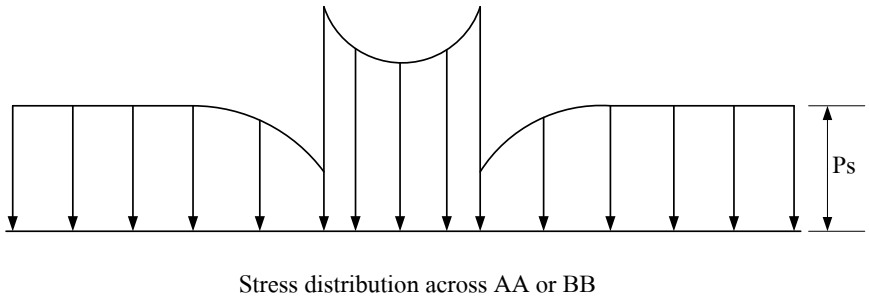
รูปที่ 2.22 แสดงสภาวะ active arching (Einstein et al.,1983)

แนวโค้งรับแรงในสภาวะ passive เมื่อดินบริเวณรอบโครงสร้างรับแรงมากกว่าบริเวณโครงสร้างดังรูปที่ 2.23



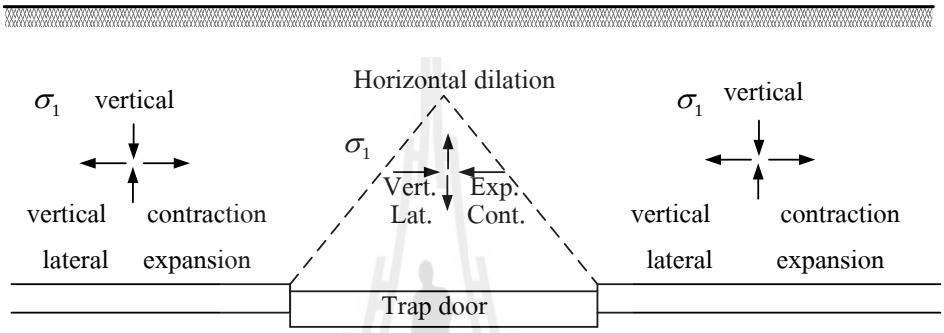
รูปที่ 2.23 passive arching การเคลื่อนตัวใต้แรงดัน *Ps* เมื่อโครงสร้างถูกแรงอัดน้อยกว่าดินรอบข้าง (Einstein et al.,1983)

บริเวณดินรอบโครงสร้างมีการเคลื่อนที่มาก แรงเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นจากแรงดันทั้งหมดในขณะที่แรง ณ จุดเชื่อมต่อมีค่าลดลง ถ้าโครงสร้างยังคงสภาพอยู่เหมือนเดิม จะเกิดแรงสูงมากที่ขอบและเกิดแรงกระทำน้อยมากที่กึ่งกลางของแรงกระจายในสภาวะ passive ที่ระนาบ AA และ BB ดังรูปที่ 2.24



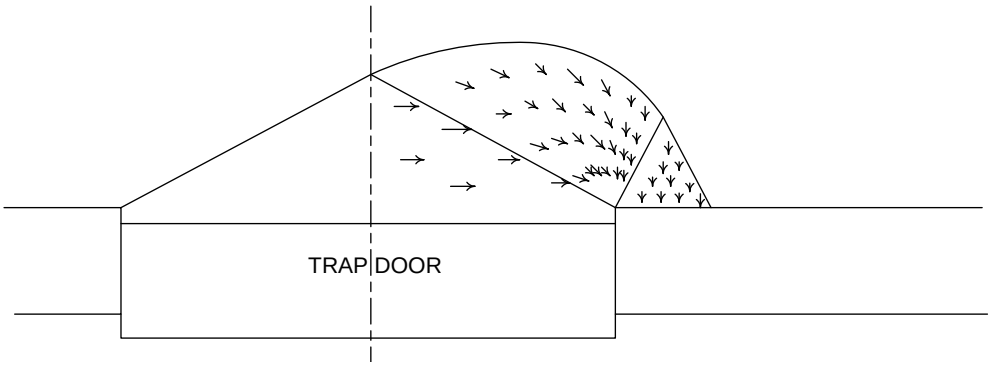
รูปที่ 2.24 แสดงสภาวะ passive arching (Einstein et al.,1983)

Evans (1983) กล่าวว่าการทดลอง trap door สามารถสังเกตุเห็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้เพียงเล็กน้อย โดยได้แสดงโซนสามเหลี่ยมที่ขยายตัวในแนวดิ่งเหนือช่องเปิดทั้งสภาวะ active และ passive ในสภาวะ active arching แรงในแนวดิ่งบน trap door จะลดลงเมื่อประตูของช่องเปิดเคลื่อนที่ในทิศทางลง ดังรูปที่ 2.25 แสดงพฤติกรรมทั่วไปของสภาวะ active arching



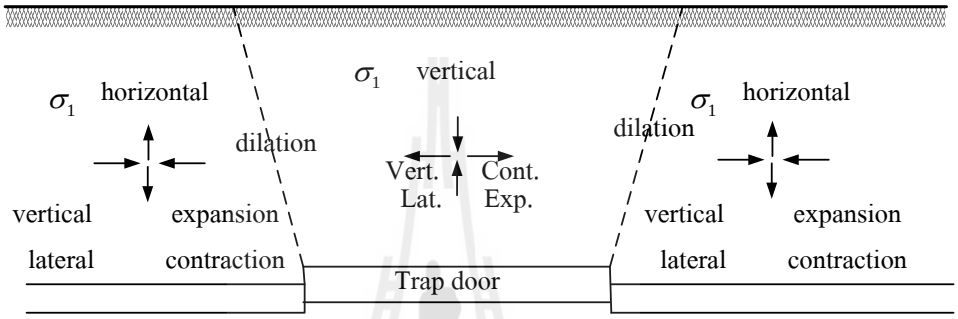
รูปที่ 2.25 พฤติกรรมทั่วไปของดิน active arching (Evans et al.,1983)

ขณะที่ด้านข้างของโซนสามเหลี่ยมหดตัว เพื่อเป็นการปรับสมดุลให้เท่ากับการขยายตัวในแนวดิ่ง พื้นที่ทั้งสองฝั่งของ trap door จะทำหน้าที่เป็นจุดรองรับของหน่วยแรงที่เกิดจากการเคลื่อนตัวในทิศทางลงของ trap door พื้นที่ในแนวดิ่งทั้งสองฝั่งจะเกิดการหดตัวเนื่องจากการขยายตัวทางด้านข้าง เมื่อประตูลดลงมากวัสดุก็ไหลออกมาทำให้การขยายตัวทางด้านข้างสูงขึ้น บริเวณที่ขอบทั้งสองฝั่งของ trap door ด้านที่ติดประตูจะถูกแรงกระทำมากที่สุด ดังรูปที่ 2.26

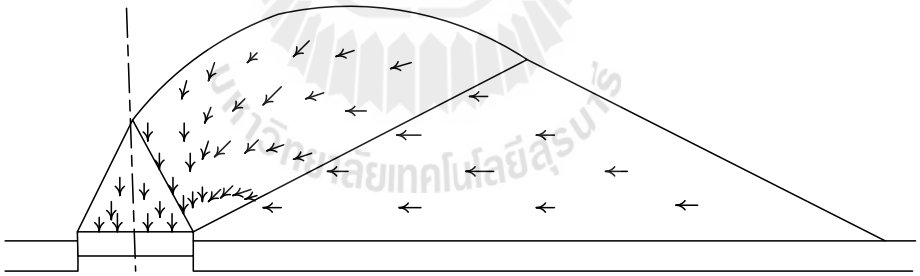


รูปที่ 2.26 ทิศทางของหน่วยแรงหลัก active arching (Evans et al.,1983)

สภาวะ passive arching แสดงดังรูปที่ 2.27 เมื่อประตู trap door เคลื่อนที่ในทิศขึ้น แรงในแนวดิ่งจะเพิ่มขึ้น โซนเหนือประตูจะเคลื่อนที่ขึ้นด้วยการหดตัวในแนวดิ่งและการขยายตัวทางด้านข้าง คล้ายกับโซน rankine passive earth pressure และหน่วยแรงหลักเหนือประตูจะอยู่ในแนวดิ่ง พื้นที่ด้านข้างทั้งสองฝั่งจะหดตัวในแนวราบและขยายตัวในแนวดิ่ง ทำให้แรงมารวมตัวอยู่ด้านบนประตู ดังรูปที่ 2.28

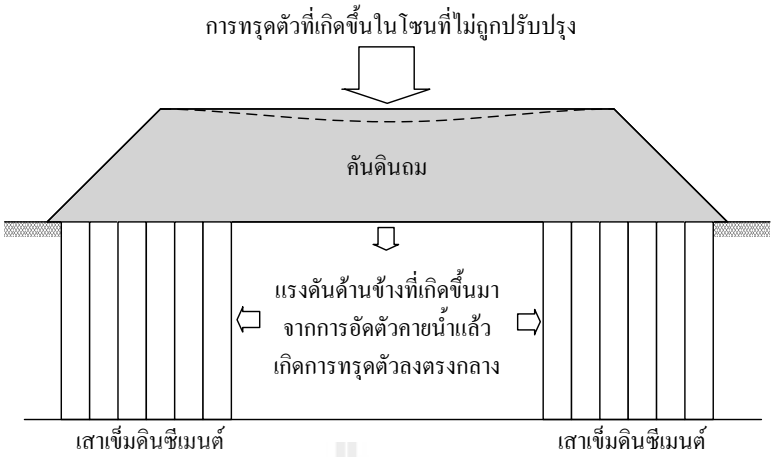


รูปที่ 2.27 พฤติกรรมทั่วไปของดิน passive arching (Evans et al.,1983)



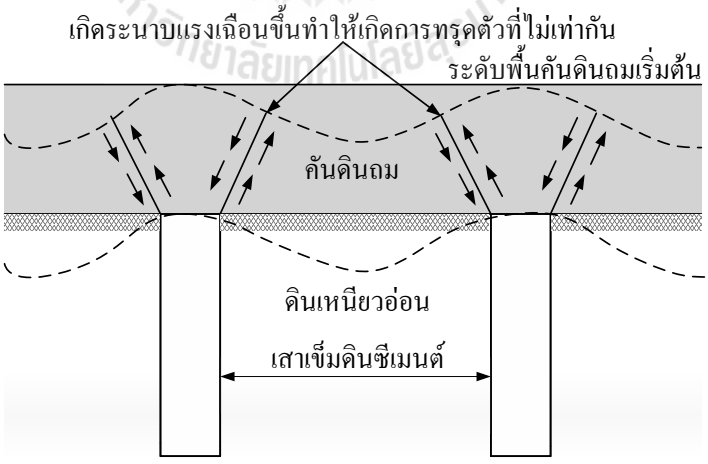
รูปที่ 2.28 ทิศทางของหน่วยแรงหลัก passive arching (Evans et al.,1983)

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



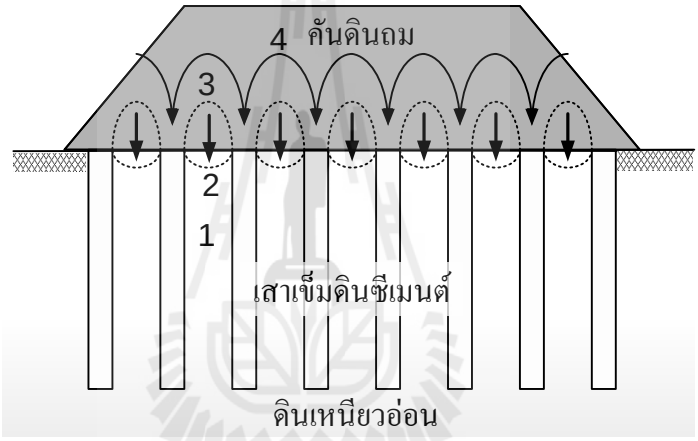
รูปที่ 2.29 การปรับปรุงดินโดยวิธีทั่วไป (Kohashi, Furumoto and Sakajo et al.,2008)

แรงบนชั้นดินคันทางเป็นสาเหตุให้เกิดการทรุดตัวลงในบริเวณที่ไม่ถูกปรับปรุงที่บริเวณตรงกลาง โดยเขาได้เสนอแนวทางเลือกคือวิธี แนวโค้งรับแรงจากการใช้จำนวนเสาเข็มดินซีเมนต์น้อยกว่าปกติ(arching effect base low improvment ratio cement column method, Alicc) ซึ่งวิธีนี้จะมีอัตราการใช้จำนวนของเสาเข็มดินซีเมนต์อยู่ที่ 10% - 30% ซึ่งลดลงจากวิธีโดยทั่วไป เพราะว่าวิธีนี้จะมีช่องว่างระหว่างเสาเข็มเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดการทรุดตัวระหว่างเสาเข็ม โดยความสูงของดินคันทางจะสัมพันธ์กับช่องว่างโดยมีระนาบแรงเฉือนดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 ระนาบแรงเฉือนเหนือเสาเข็มดินซีเมนต์และการทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน (Kohashi, Furumoto and Sakajo et al.,2008)

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



รูปที่ 2.31 ตัวอย่างการเกิด arcing effect บนหัวเสาเข็มดินซีเมนต์
(Kohashi, Furumoto and Sakajo et al.,2008)

2.9 ลักษณะของตัวอย่างดิน

ตัวอย่างดินจะเป็นตัวแทนของบริเวณนั้นๆ ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ทางวิศวกรรมได้ การเก็บตัวอย่างจึงต้องการความระมัดระวังและความชำนาญที่จะให้ได้ตัวอย่างดินที่มีคุณภาพ ตัวอย่างดินมักแยกออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

2.9.1 ตัวอย่างดินคงสภาพ (undisturbed sample)

คือตัวอย่างดินที่ถูกเก็บขึ้นมาโดยมีสภาพใกล้เคียงสภาพธรรมชาติ ซึ่งมีการกระทบกระเทือนชั้นดินน้อยที่สุด คือ มีความชื้น ความหนาแน่น ลักษณะโครงสร้างไม่มีการเปลี่ยนแปลง เช่นเดียวกับเมื่ออยู่ในชั้นดินเดิม ถือว่าเป็นตัวอย่างดินที่มีคุณภาพดีที่สุด เพราะการ

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

2.9.2 ตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพ (disturbed sample)

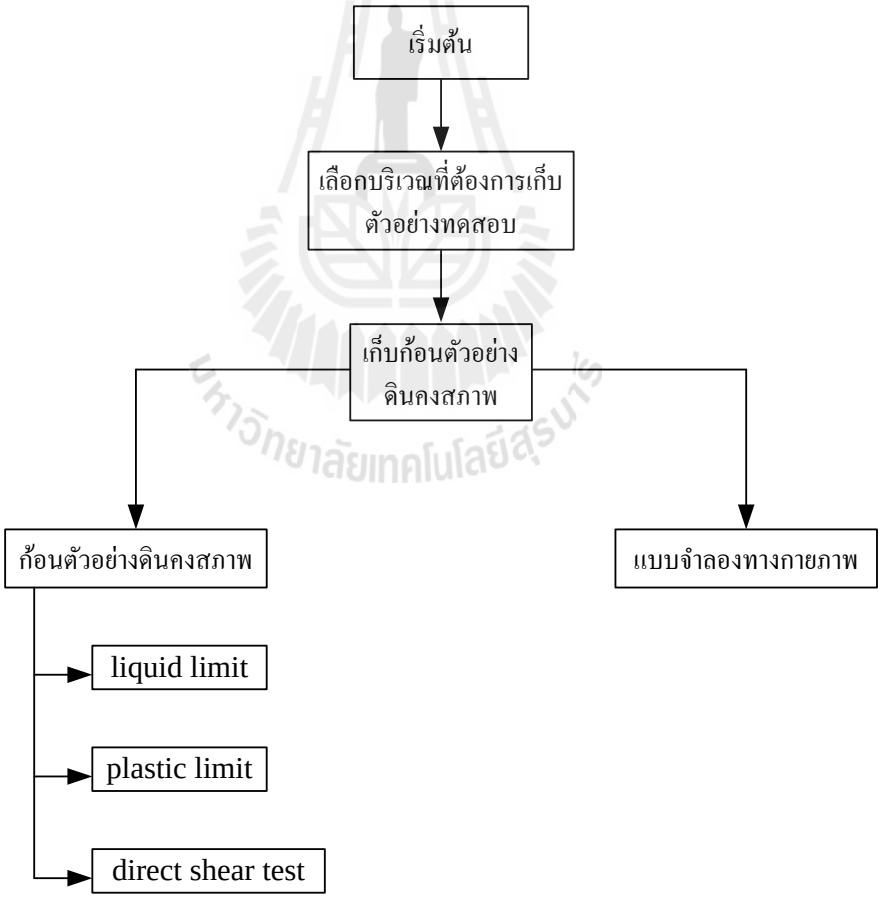
ตัวอย่างดินที่มีการเปลี่ยนสภาพไปบ้าง เช่นมีการอัดแน่น หรือ การจับตัวตามธรรมชาติถูกทำลายเพราะแรงกระแทก Serge Leroueil (1990) กล่าวว่าโดยพฤติกรรมของดินเปลี่ยนสภาพจะไม่คำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากเวลาและโครงสร้างของการเกิดดิน ตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพสามารถสร้างขึ้นได้ในห้องปฏิบัติการโดยจะมีปริมาณความชื้นเข้าใกล้ขีดจำกัดเหลว (liquid limit) เช่น การทดสอบอัดตัวคายน้ำของดินขาว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาถึงพฤติกรรมแนวโค้งรับแรง (arching effect) ระหว่างช่องว่าง (gap) ของกำแพงเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่องหน้าตัดตัวไอ (contiguous pile wall) โดยมีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็ม (center to center) ที่แตกต่างกัน การดำเนินงานวิจัยได้ทำการทดสอบดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ

โดยใช้การจำลองทางกายภาพแบบย่อส่วนกับดินคงสภาพคุณภาพสูง สาเหตุที่เลือกใช้ก้อนดินตัวอย่างคงสภาพคุณภาพสูง เนื่องจากการนำดินมาผสมน้ำและก่อตัวใหม่ (remolded sample) จะทำให้ตัวอย่างดินสูญเสียโครงสร้างของดินธรรมชาติไป เนื่องจากการตกตะกอนและการทับถมของดินตามธรรมชาติมีลักษณะเป็นชั้นๆ ซึ่งไม่สามารถสร้างขึ้นได้ในห้องทดลอง สาเหตุอีกประการหนึ่งคือ ก้อนดินตัวอย่างมีขนาดใหญ่ต้องใช้เวลานานในการอัดตัวคายน้ำกว่าที่ก้อนตัวอย่างจะมีคุณสมบัติทางกลตามที่ต้องการ ซึ่งในงานวิจัยนี้จึงใช้ก้อนดินคงสภาพคุณภาพสูงที่ได้จากการขุดเปิดหน้าดินแทน เพื่อศึกษาถึงกลไกการวิบัติและศึกษาถึงพฤติกรรมในสภาวะก่อนแรงกดประลัยและสภาวะแรงกดประลัย

3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดิน

3.2.1 ขีดจำกัดเหลว (liquid limit) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4318

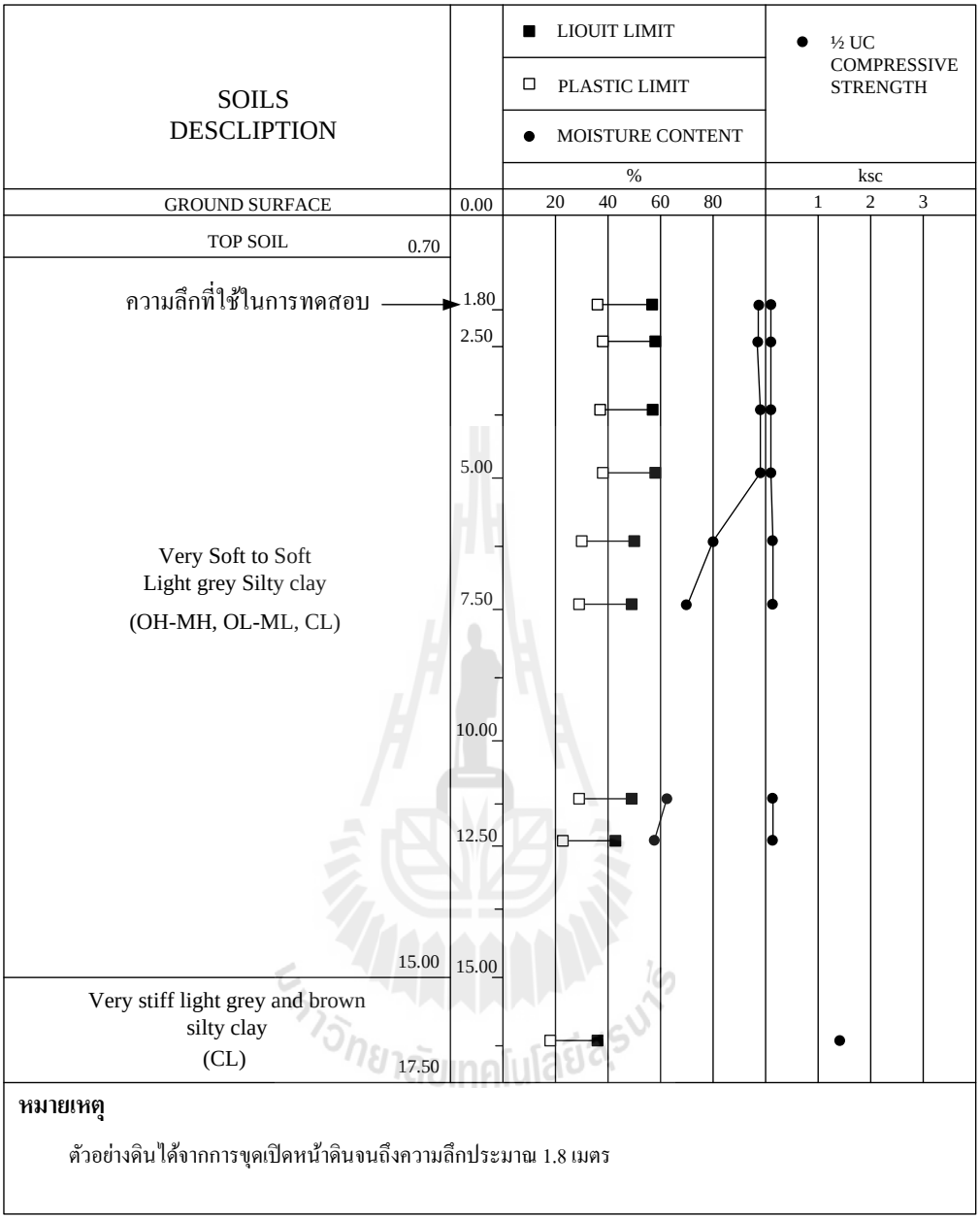
3.2.2 พิกัดพลาสติก (plastic limit) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4318

3.2.3 การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (unconfined compression test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2160

3.2.4 การทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนโดยวิธีแรงเฉือนโดยตรง (direct shear test) ทดสอบตามมาตราฐาน ASTM D3080-98

3.3 แหล่งดินที่นำมาทดสอบ

แหล่งดินที่ใช้เป็นตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยนี้ใช้ดินใน ต.บางตีนเป็ด อ.เมือง จ. ฉะเชิงเทรา ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนคงสภาพคุณภาพสูงที่ได้จากการขุดเปิดหน้าดินเป็นบริเวณกว้างเพื่อนำดินชั้นผิวดินออกไป เพื่อที่จะสามารถลงไปเก็บก้อนดินตัวอย่างคงสภาพได้ โดยมีข้อมูลการเจาะสำรวจดินในบริเวณใกล้เคียงดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าถัดจากชั้นเปลือกดินลงไป ชั้นดิน 8 เมตรแรกเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนมากซึ่งจะเป็นชั้นดินที่ใช้ในการศึกษานี้



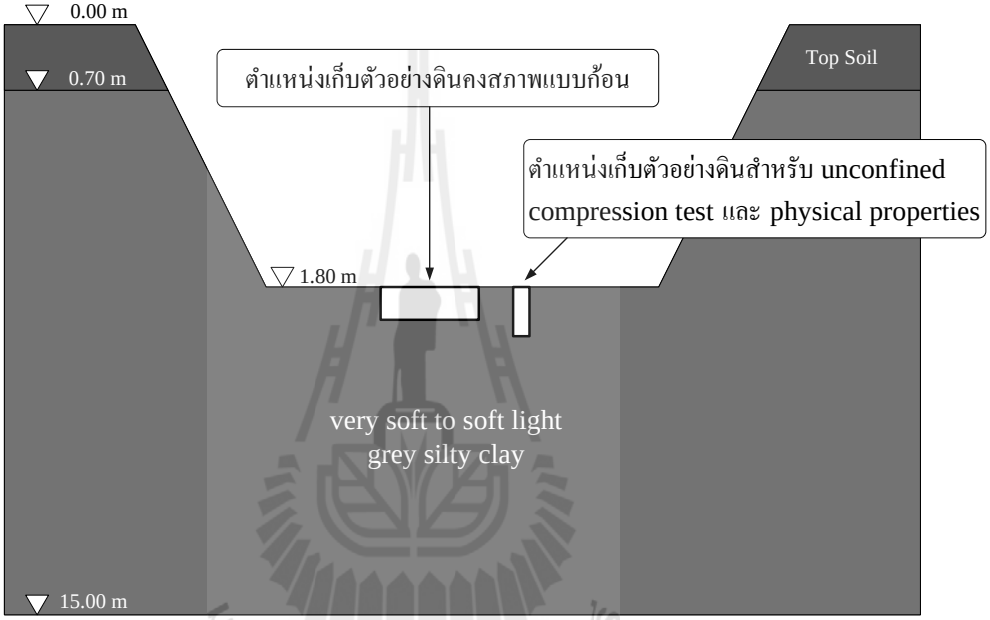
รูปที่ 3.2 ผลการเจาะสำรวจดินโครงการก่อสร้างสะพานข้ามคลองบางไผ่
(ข้อมูลจาก www.dpt.go.th)

3.4 วิธีการเก็บตัวอย่างดิน

การเตรียมตัวอย่างจะเป็นการเก็บตัวอย่างคงสภาพคุณภาพสูงตัวอย่างที่ใช้มีขนาด 300×250×100 มิลลิเมตร ก้อนตัวอย่างที่เก็บขึ้นมาจะนำมาทดสอบทันทีโดยใช้เวลาไม่เกิน 30 นาที ที่ความชื้นธรรมชาติทำให้ได้ตัวอย่างดินคงสภาพคุณภาพสูงทั้งทางด้านกำลังรับแรงเฉือนและ

คุณสมบัติทางกายภาพซึ่งมีคุณภาพดีกว่าดินที่นำมาผสมน้ำและก่อตัวใหม่ (remolded sample) หรือดินที่เก็บไว้โดยไม่ทำการทดสอบ

จากรูปที่ 3.3 ชั้นดินในบริเวณนี้เป็นชั้น top soil หนา 1.5 เมตร ถัดลงไปเป็นชั้น very soft to soft light grey silty clay หนา 13.5 เมตร ซึ่งวางตัวอยู่บนชั้นดินแข็ง จากชั้นดินจึงทำการขุดเปิดหน้าดินลงไป1.8 เมตร เพื่อนำชั้น top soil ออกไป จากนั้นลงไปเก็บก้อนตัวอย่างเพื่อนำมาทดสอบ



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างจากการขุดเปิดหน้าดิน

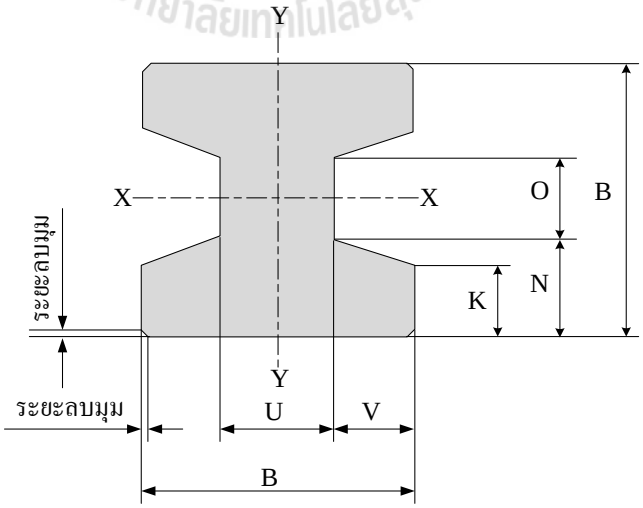
3.5 ความยาวของระยะห่างระหว่างเสาเข็ม

การทดสอบจะใช้อัตราส่วนระยะห่างต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (S_g / B) เท่ากับ 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 เนื่องจากเป็นระยะที่เคยถูกใช้เป็นกำแพงกันดินเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่องรูปตัวไอและ (S_g / B) เท่ากับ 1.2 , 1.6 ,2.0 ,2.5, 3.0 ซึ่งเป็นระยะที่ยังไม่เคยมีการายงานว่าได้ถูกนำไปใช้มาก่อน การจำลองเสาเข็มขนาดเท่าจริงนั้น ทำให้ต้องสร้างเครื่องมือทดสอบที่มีขนาดใหญ่และมีประสิทธิภาพสูง เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการจำลองเสาเข็มขนาดจริง ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมในการปฏิบัติ งานวิจัยนี้จึงได้ใช้เสาเข็มลดขนาดลงเพื่อจำลองถึงพฤติกรรมของกำแพงเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่องและเพื่อความสะดวกในการปฏิบัติงาน จึงได้เลือกใช้ขนาดของเสาเข็มและช่องว่างระหว่าง

เสาเข็ม ดังตารางที่ 3.1 เนื่องจากการทดลองเป็นการทดสอบกับดินเม็ดละเอียดภายใต้สภาวะไม่ระบายน้ำ การใช้แบบจำลองแบบย่อส่วนจึงไม่ส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของดิน

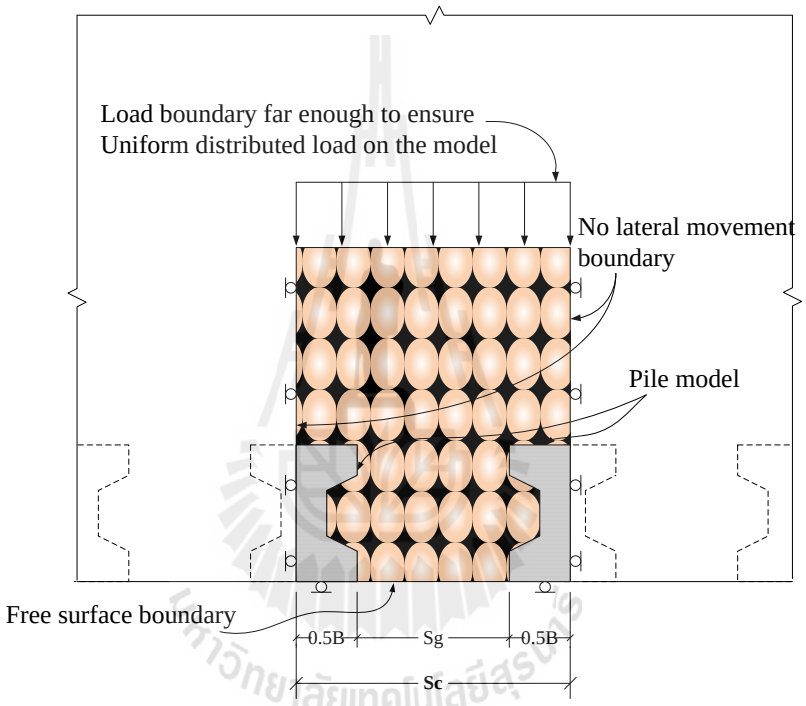
ตารางที่ 3.1 แสดงขนาดของเสาเข็มตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.396-2549) และระยะห่างที่ใช้ในการจำลอง

ขนาดตาม มอก.	อัตราการย่อส่วน	ขนาดในแบบจำลอง (mm)							
B(mm)		B	K	N	O	U	V	spacing(mm)	S_g/B
400	1:4	100	27.5	35	30	40	30	110	0.1
400	1:4	100	27.5	35	30	40	30	130	0.3
400	1:4	100	27.5	35	30	40	30	150	0.5
400	1:4	100	27.5	35	30	40	30	170	0.7
400	1:5	80	22	28	24	32	24	175	1.2
400	1:5	80	22	28	24	32	24	210	1.6
400	1:5	80	22	28	24	32	24	237.5	2
400	1:6.67	60	16.5	21	18	24	18	210	2.5
400	1:6.67	60	16.5	21	18	24	18	23.75	3



รูปที่ 3.4 มิติหน้าตัดของเสาเข็มรูปตัว Iตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.396-2549)

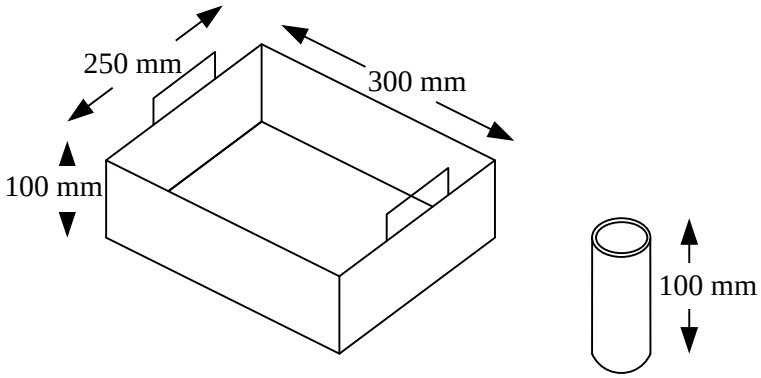
เนื่องจากเสาเข็มหน้าตัดรูปตัวไอสมมาตรจึงได้จำลองแบบจำลองทางกายภาพเพียงครึ่งหนึ่งของเสาเข็ม ในงานวิจัยนี้เป็นลักษณะของปัญหาแบบสมมาตรและกำหนดให้เสาเข็มมีความแกร่ง(stiffness) มาก กำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องไม่มีการเคลื่อนตัว เนื่องจากมีระบบค้ำยันด้านข้าง โดยกำหนดให้อีกด้านหนึ่งของกำแพงเป็นลักษณะยึดแน่น การเคลื่อนตัวที่สามารถเกิดขึ้นได้จะเกิดเฉพาะกับดินตัวอย่างด้านหลังกำแพงเท่านั้น มีลักษณะการจำลองรูปแบบดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การจำลองเพียงครึ่งหนึ่งเนื่องจากความสมมาตรของตัวอย่าง

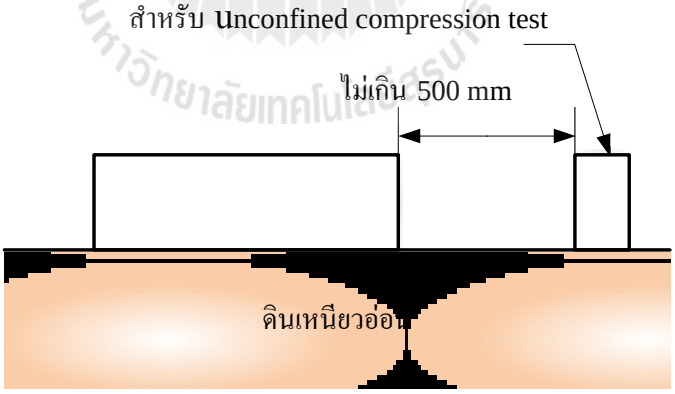
3.6 วิธีการเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน

3.6.1 เตรียมแบบเก็บตัวอย่างคงสภาพแบบก้อน มีลักษณะเป็นแบบเหล็กขนาด 300×250×100 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.6 มีด้านที่เจาะลงในดินลักษณะคมเพื่อเจาะลงไปในชั้นดินโดยรบกวนดินตัวอย่างให้น้อยที่สุด หลังจากดำเนินการเก็บตัวอย่างแบบก้อนเสร็จ ลำดับต่อไปเก็บตัวอย่างดินคงสภาพสำหรับ unconfined compression test ในบริเวณใกล้กันโดยที่จะเก็บในบริเวณที่อยู่บริเวณเดียวกัน ห่างจากจุดเก็บตัวอย่างคงสภาพแบบก้อนไม่เกิน 500 มิลลิเมตร



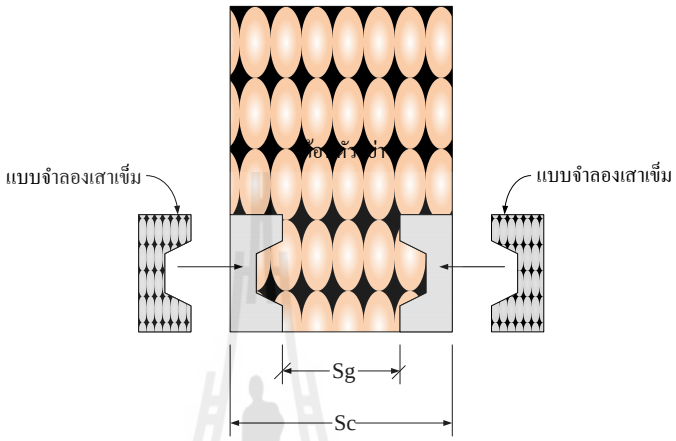
รูปที่ 3.6 แสดงอุปกรณ์เก็บดินตัวอย่างคงสภาพ

3.6.2 เลือกบริเวณที่ต้องการเก็บดินตัวอย่าง จากนั้นกดแบบเก็บตัวอย่างดินคงสภาพแบบก้อนลงไปในดินจนกระทั่งจมมิดกล่องดังรูปที่ 3.7 ขณะที่กดแบบเก็บตัวอย่างลงบนชั้นดินได้ทำการรักษาแนวดิ่งของกล่องไว้ตลอดการกด ลำดับต่อไปเปิดดินด้านข้างออกทุกด้านพยายามหลีกเลี่ยงการกระแทกกับกล่องเก็บตัวอย่าง ใช้ลวดตัดก้อนตัวอย่างด้วยความระมัดระวัง โดยที่ดินภายในกล่องเก็บตัวอย่างยังคงอยู่และไม่ถูกรบกวน



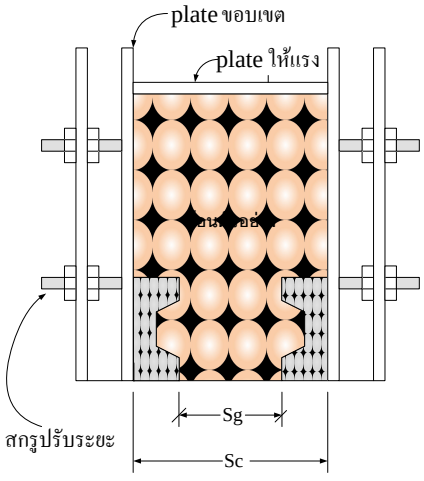
รูปที่ 3.7 การเก็บดินตัวอย่างคงสภาพแบบก้อน

3.6.3 นำแบบเก็บตัวอย่างที่มีตัวอย่างดินอยู่ภายใน ดำเนินการปาด ตัด แต่งดินตัวอย่างให้ได้ขนาดตามที่ต้องการทำการทดสอบ และเจาะก้อนดินตัวอย่างตามขนาดของแบบจำลองเสาเข็มเพื่อนำแบบจำลองเสาเข็มมาใส่แทนที่ดังรูปที่ 3.8 (โดยเซาะให้เล็กกว่าขนาดจริงเล็กน้อยเพื่อให้ทั้งสองส่วนติดกันแน่น)



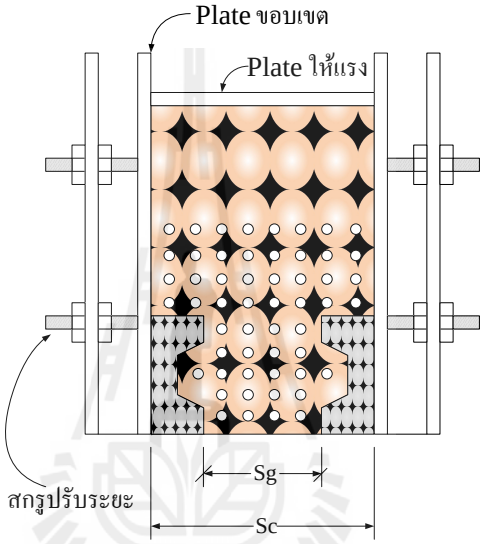
รูปที่ 3.8 การเจาะดินเพื่อติดตั้งแบบจำลองเสาเข็ม

3.6.4 นำก้อนดินตัวอย่างที่เตรียมไว้ตามขนาดที่ต้องการบรรจุในแบบกดทดสอบที่ปรับขนาดด้านข้างของกล่องกดทดสอบให้ได้ขนาดเท่ากับก้อนดินตัวอย่างพอดี โดยที่ภายในแบบกดทดสอบได้ทาไขปิโตรเลียมไว้ทั้ง 3 ด้าน เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างก้อนดินตัวอย่างกับแบบกดทดสอบที่เป็นเหล็กดังรูปที่ 3.9



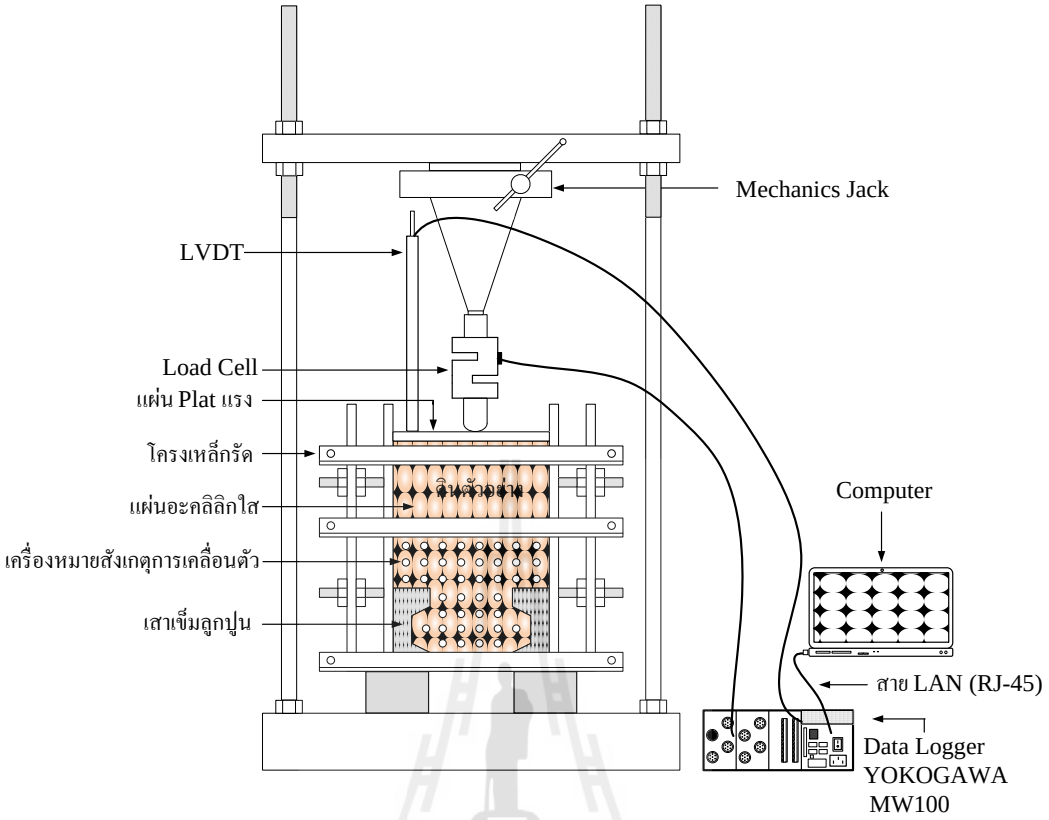
รูปที่ 3.9 การประกอบดินตัวอย่างกับแบบกดทดสอบ

3.6.5 ดำเนินการติดหมุดเครื่องหมายบนผิวด้านหน้าดินตัวอย่างด้วยหมุดเครื่องหมายทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 มิลลิเมตร โดยจัดเรียงเป็นแบบกริดจตุรัสที่มีระยะห่าง 30×30 มิลลิเมตร บนผิวดินของแบบจำลองด้านที่ติดกับแผ่นอะคลิลิกดังรูปที่ 3.10 เพื่อใช้เป็นหมุดเครื่องหมายบนตัวอย่างดินเพื่อตรวจสอบการเคลื่อนตัวของมวลดินในตัวอย่างระหว่างทดสอบ จากนั้นนำแผ่นอะคลิลิกมีความหนา 15 มิลลิเมตร ทาไขปิโตรเลียมด้านที่ประกบเข้ากับดินตัวอย่างไปประกอบเข้ากับแบบกดทดสอบพร้อมทั้งรัดด้วยโครงเหล็กรัดอย่างแน่นหนา



รูปที่ 3.10 การติดตั้งเครื่องหมายเพื่อบันทึกการเคลื่อนตัว

3.6.6 นำแบบกดทดสอบไปประกอบเข้ากับโครงกดทดสอบโดยจัดวางให้ได้ระดับดังรูปที่ 3.11 และทดสอบทันทีเพื่อให้ปริมาณน้ำในดินยังคงสภาพเดิม การเก็บตัวอย่างและการทดสอบจะใช้เวลาไม่เกิน 30 นาที



รูปที่ 3.11 การติดตั้งตัวอย่างลงในเครื่องมือทดสอบและการติดตั้งระบบเครื่องมือวัด

3.6.7 ติดตั้งอุปกรณ์ให้แรงแบบมือหมุนเข้ากับโครงกดทดสอบ และ ติดตั้ง load cell เพื่อวัดแรงที่เกิดขึ้น

3.6.8 จัดวางตัวอย่างลงบนเครื่องกดทดสอบ จัดให้ได้ศูนย์กลางของแนวกด สังเกตุได้จากแผ่นเหล็กด้านบนของดินตัวอย่างทดสอบ หมุนเครื่องให้แรงแบบมือหมุนให้แป้นกดของเครื่องกดทดสอบสัมผัสกับแผ่นเหล็กกดตัวอย่างพอดี เพื่อลดความผิดพลาดที่ไม่ต้องการ ติดตั้ง lvdt เพื่อวัดค่าการเคลื่อนตัว

3.6.9 ก่อนเริ่มการทดสอบจะต้องตรวจสอบการติดตั้งดินตัวอย่าง และเครื่องมือให้เรียบร้อย เช่น แป้นกดของเครื่องกดทดสอบจะต้องสัมผัสกับแผ่นเหล็กด้านบนดินตัวอย่าง เนื่องจากเครื่องกดทดสอบเป็นแบบมือหมุน ผู้ทดสอบจะต้องซ้อมหมุนให้ได้อัตราการกดตามต้องการ (ในขณะที่ยังไม่มีดินตัวอย่าง)

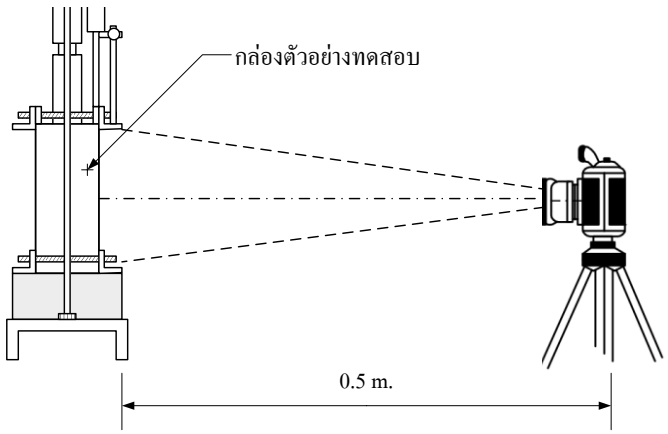
3.6.10 เริ่มการกดตัวอย่างทดสอบจากการเพิ่มแรงในแนวดิ่งด้วยเครื่องกลให้แรงแบบมือหมุนอัตราการกดการเคลื่อนที่ทางแนวดิ่งของเครื่องให้อยู่ในช่วง 2.24 มิลลิเมตรต่อนาที

3.6.11 บันทึกข้อมูลค่าแรงกดจาก load cell และข้อมูลการเคลื่อนตัวจาก lvdt เมื่อแรงใน load cell เพิ่มขึ้นไปสูงสุดแล้วเริ่มจะลดลง ซึ่งแสดงว่าถึงจุดสูงสุดของกำลังของดิน ให้ยังคงอ่านผลต่อไปจนเห็นแนวเฉือน (failure plane) บนดินตัวอย่างได้ชัดเจน ในบางกรณีที่ไม่มีรอยเฉือนปรากฏชัด ให้ทดสอบจนการเคลื่อนตัวถึงประมาณ 20% ของความสูงของตัวอย่าง

3.6.12 บันทึกภาพการเคลื่อนตัวขณะทำการทดสอบโดยบันทึกทุกๆ 10 วินาที จนตัวอย่างวิบัติ

3.7 การบันทึกภาพการเคลื่อนตัว

การบันทึกภาพการเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบจากเครื่องหมายที่ติดตั้งไว้บนตัวอย่างด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิตอลธรรมดาติดตั้งบนขาตั้งกล้องสามขาที่มั่นคงแสดงดังรูปที่ 3.12 การบันทึกภาพด้วยกล้องดิจิตอลชนิดคอมแพค (compact cameras) จะพบปัญหาเส้นตรงที่ขอบภาพจะเว้าเข้ามาตรงกลาง (pincushion distortion) วิธีแก้ปัญหานี้คือเลือกใช้ทางยาวโฟกัสที่สั้น (ไม่ใช้การซูม)แล้วจัดองค์ประกอบให้วัตถุอยู่ตรงกลางภาพ (บริษัท ฟูจิ โฟโต้ ฟิล์ม, 2552 : เว็บไซต์) เนื่องจากวัตถุที่ต้องการบันทึกภาพมีขนาด 300×250 มิลลิเมตรเมตรซึ่งมีขนาดเล็กจึงเลือกใช้ความยาวโฟกัสเท่ากับ 500 มิลลิเมตรคล้ายกับการทดสอบของ (ธนาดล คงสมบูรณ์ และ ประสพศิริ แสงภู่, 2547) การบันทึกภาพจะบันทึกทุกๆ 10 วินาที ของการทดสอบทีละภาพ และนำภาพที่บันทึกได้มาเทียบกับสเกลระหว่างเครื่องหมายที่ติดตั้งบนตัวอย่างทดสอบขณะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับมวลดินกับแถบบรรทัดในภาพถ่าย



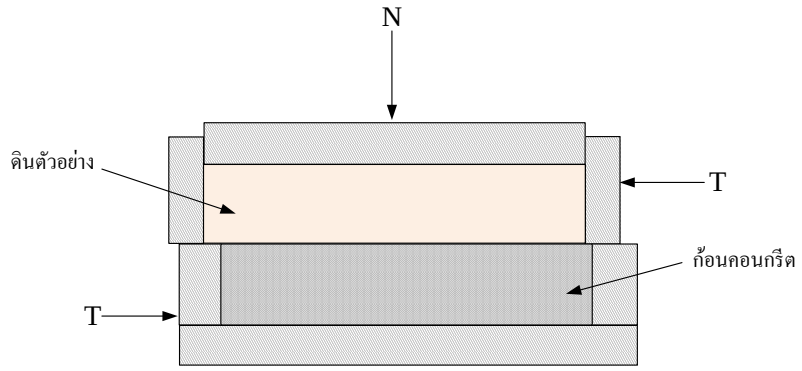
รูปที่ 3.12 การติดตั้งกล้องถ่ายภาพเพื่อบันทึกการเคลื่อนตัว

3.8 การประมวลผลภาพถ่าย

จากภาพถ่ายที่ได้จะนำมาประมวลผลโดยวิธีซ้อนภาพและวัดระยะการเคลื่อนตัวของหมุดเครื่องหมายในบนมวลดินด้วยโปรแกรม datacatcher ซึ่งแต่ละภาพจะมีจุดอ้างอิงที่ใช้เป็นจุดเดียวกัน ซึ่งสามารถนำระยะการเคลื่อนตัวของมวลดินมาวาดเป็นเวคเตอร์การเคลื่อนตัวได้ และยังสามารถวาดเส้น contour line การเคลื่อนตัวของตัวของมวดดินได้ด้วยโปรแกรม surfer

3.9 การทดสอบหาสัมประสิทธ์ความเสียดทาน

ตัวแปรหลักของการเคลื่อนตัวในมวลดิน คือ แฟกเตอร์ยึดเกาะระหว่างดินกับกำแพงกันดิน (α, adhesion factor) ค่าแฟกเตอร์นี้จะมีค่าแปรผันตามประเภทของกำแพงและชนิดของดินเหนียว การเคลื่อนตัวของดินระหว่างช่องว่างในกำแพงระบบเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องจึงเกี่ยวข้องกับแรงยึดเกาะระหว่างกำแพงและดินด้วย ค่าแฟกเตอร์ยึดเกาะของดินเหนียวอ่อนจะมีค่าสูงมากและอาจมีค่ามากว่า 1.0 สำหรับดินเหนียวอ่อนมากเกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมตรของดินกับเวลาในทางตรงกันข้าม ค่าแฟกเตอร์จะมีค่าน้อยลงตามกำลังต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากดินที่มีกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงเป็นดินที่แข็งและเปราะ การแปรปวนของค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะทำให้ต้องทดสอบเพื่อให้ได้ค่าที่ตรงกับตัวอย่างแบบจำลองทางกายภาพ และนำไปใช้หาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจึงทำการทดสอบเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างคอนกรีตกับดินเหนียวอ่อนคงสภาพ ในวิธีปฏิบัติทำการทดสอบโดยใช้เครื่องมือทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนโดยวิธีแรงเฉือนโดยตรง (direct shear test) โดยหล่อคอนกรีตขนาดเท่ากับขนาดของวงแหวนเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (direct shear test) จากนั้นนำมาประกอบในอุปกรณ์ทดสอบโดยมีชิ้นส่วนด้านบนเป็นดินเหนียวอ่อนจากนั้นเริ่มการทดสอบ มีน้ำหนักกดทับเท่ากับ $0.5\sigma_{v0}$, σ_{v0}, และ $1.5\sigma_{v0}$



รูปที่ 3.13 การทดสอบหาสัมประสิทธ์ความเสียดทาน

บทที่ 4

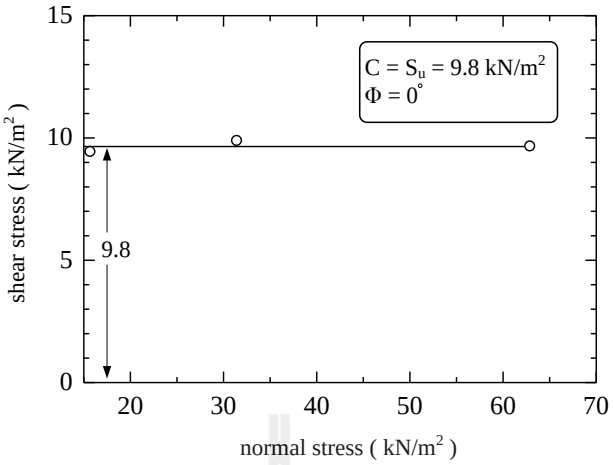
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 ดินตัวอย่างสำหรับทดสอบ

งานวิจัยนี้ใช้พื้นที่เก็บตัวอย่างดินในบริเวณ ตำบลบางตีนเป็ด อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา ซึ่งลักษณะของชั้นดินในบริเวณดังกล่าวเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนมากสีเทา (very soft to soft light grey silty clay) โดยมีปริมาณน้ำในดิน (water content, w) เท่ากับ 97.68 เปอร์เซ็นต์ และมีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (undrained shear strength, S_u) เท่ากับ 9.93 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร โดยมีค่าพิกัดเหลว = 57.86 เปอร์เซ็นต์ , พิกัดพลาสติก = 35.57 เปอร์เซ็นต์ และดัชนีพลาสติก = 22.29 เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างดินได้จากการขุดเปิดหน้าดินจนถึงความลึกประมาณ 1.8 เมตร และเก็บตัวอย่างดินโดยใช้กล่องเหล็กบางขนาด 300×250×100 มิลลิเมตร ดินตัวอย่างที่นำมาถือว่าเป็นตัวอย่างที่คงสภาพคุณภาพสูง ตัวอย่างดินสำหรับทดสอบ unconfined compression test และ physical properties นั้นจะทำการเก็บดินบริเวณเดียวกันกับการเก็บดินตัวอย่างคงสภาพแบบก้อน โดยมีระยะห่างจากจุดเก็บตัวอย่างทดสอบไม่เกิน 500 มิลลิเมตร

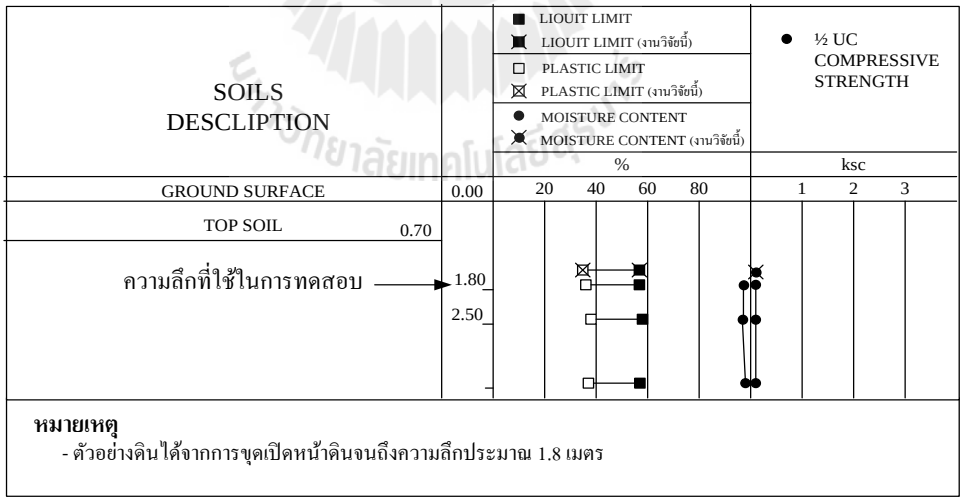
ผลการทดสอบกำลังการยึดเกาะระหว่างดินเหนียวกับผิวคอนกรีตด้วยวิธีเฉือนตรงแบบเร็ว (quick test) ได้ค่าเท่ากับ 9.8 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร (รูปที่ 4.1) โดยค่ากำลังการยึดเกาะไม่เพิ่มขึ้นตามแรงกดตั้งฉาก เมื่อคำนวณอัตราส่วนระหว่างกำลังการยึดเกาะระหว่างดินกับคอนกรีตต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ จะได้แฟคเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินกับผิวคอนกรีต (adhesion Factor, α) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.97

จากกำลังที่ไม่เพิ่มตามแรงกดตั้งฉากนี้จึงถือว่าดินเป็นดินเหนียวอิ่มตัวและสามารถใช้การวิเคราะห์แบบไม่ระบายน้ำโดยใช้หน่วยแรงรวมได้



รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบการหาค่าแรงเฉือนโดยตรง

รูปที่ 4.2 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับข้อมูลของหลุมเจาะในบริเวณใกล้เคียง พบว่า คุณสมบัติของดินจากการเจาะสำรวจดินและการเก็บดินตัวอย่างคงสภาพแบบก้อนให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่าดินที่เก็บขึ้นมาทำการทดสอบกับแบบจำลองทางกายภาพยังมีคุณภาพสูง และไม่ถูกรบกวน ทำให้คุณสมบัติของดินที่นำมาทดสอบยังคงสภาพเดิมอยู่จนใกล้เคียงกับสภาพจริงตามธรรมชาติ



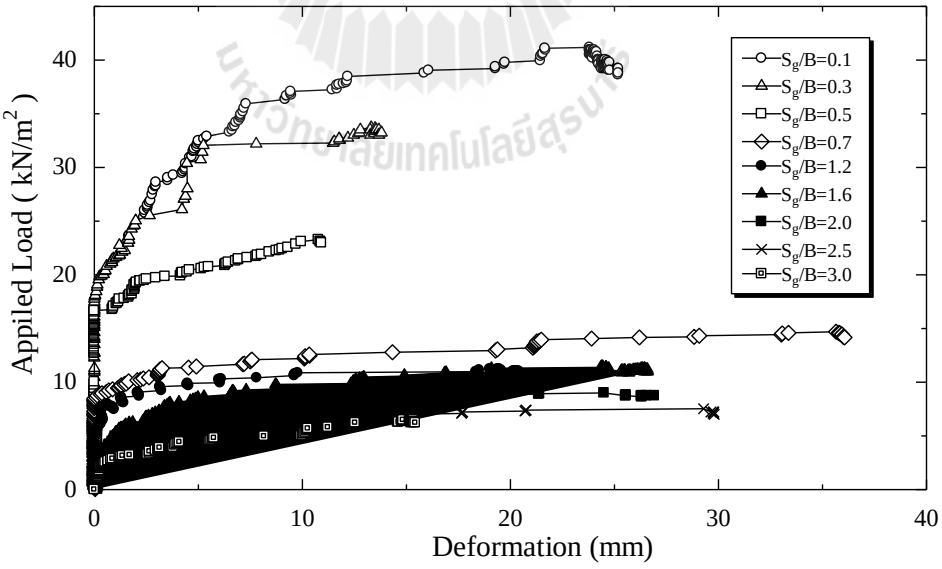
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับข้อมูลของหลุมเจาะในบริเวณใกล้เคียง

บริเวณที่เก็บดินตัวอย่างทดสอบแบบก้อนสำหรับทดสอบ unconfined compression test และตัวอย่างสำหรับ physical properties พบว่าดินมีความอ่อนตัวสูง ดินมีลักษณะเป็นเนื้อ

เดียวกัน เมื่อนำมาทดสอบจะทำการทดสอบทันทีที่นำขึ้นมาจึงทำให้ตัวอย่างถูกรบกวนต่ำมาก ด้วยระยะเวลาที่สั้นและไม่มีการขนย้ายตัวอย่างเป็นระยะทางไกลทำให้คุณภาพของดินตัวอย่างเป็นแบบคงสภาพอย่างสูง

4.2 ผลทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ

จากการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพในขนาดอัตราส่วนระยะห่างช่องเปิดต่อขนาดความกว้างของเสาเข็ม (S_g / B) ขนาดต่างๆ โดยนำข้อมูลการเคลื่อนตัวของดินตัวอย่างและกำลังต้านทานต่อแรงดันดินด้านข้างมาทำการวิเคราะห์ ปรากฏว่าตัวอย่างจะต้านทานแรงกดเพิ่มขึ้นในช่วงแรกซึ่งเห็นได้จากเส้นโค้งที่มีความชันสูง เมื่อออกแรงกระทำต่อแบบจำลองเพิ่มขึ้นเส้นโค้งมีความชันลดลง และเมื่อตัวอย่างในแบบจำลองเกิดการวิบัติ เส้นโค้งเกือบที่จะอยู่ในแนวราบ และเมื่อพิจารณาในแง่ของระยะห่างระหว่างเสาเข็มจะเห็นได้ว่าแรงต้านทานต่อการกดจะแปรผกผันกับอัตราส่วน S_g / B ตัวอย่างเช่น ที่อัตราส่วนระยะห่างช่องเปิดต่อขนาดความกว้างของเสาเข็ม $S_g / B = 0.1$ (ช่องเปิดแคบ) แรงกดทดสอบสูงสุดท่ากับ 41.18 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร และที่อัตราส่วนระยะห่างช่องเปิดต่อขนาดความกว้างของเสาเข็ม $S_g / B = 3.0$ (ช่องเปิดกว้าง) แรงกดทดสอบสูงสุดเท่ากับ 6.52 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร



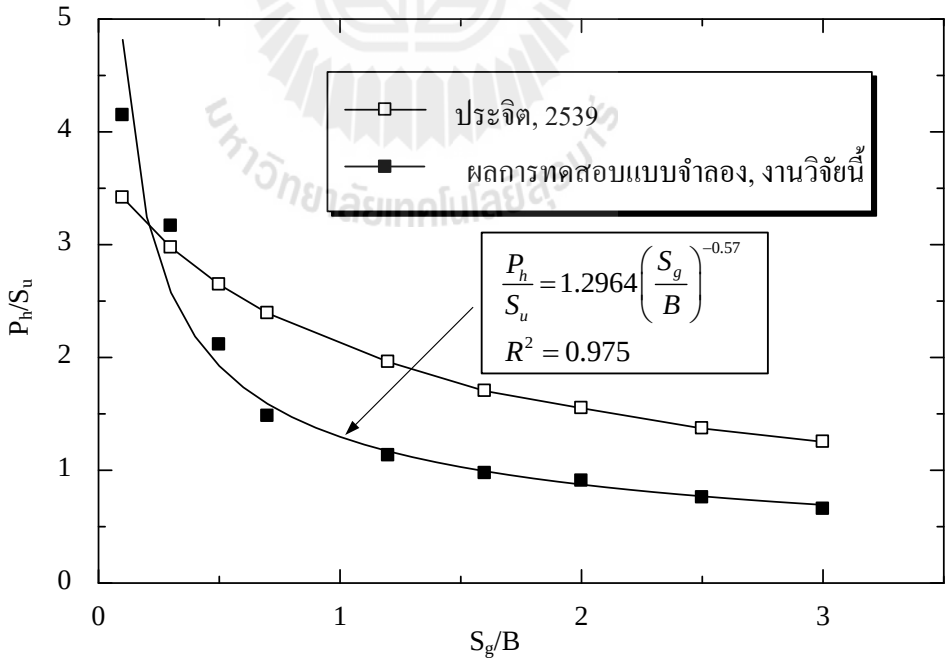
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดทดสอบกับค่ายุบตัวที่ได้จากการทดสอบแบบจำลอง

4.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบทางกายภาพกับค่าเชิงทฤษฎีของ ประจิต (2539)

เมื่อหารแรงต้านทานประลัยจากการทดสอบแบบจำลองด้วยกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ P_h / S_u จะเป็นอัตราส่วนไร้มิติ ซึ่งเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P_h / S_u กับอัตราส่วนระยะห่างของเสาเข็ม S_g / B จะได้ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากำลังต้านทานต่อแรงดันดิน P_h / S_u แปรผกผันกับอัตราส่วนระยะห่าง S_g / B ดังสมการที่ 4.1

$$\frac{P_h}{S_u} = 1.2964\left(\frac{S_g}{B}\right)^{-0.57} \tag{4.1}$$

จากสมการที่ 4.1 จะเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์แบบไฮเพอร์โบลาเหมือนกับสมการที่เสนอโดยประจิต (2539) แต่เมื่อได้พิจารณาแนวโน้มแล้วจะพบว่า ค่า P_h / S_u ที่ได้จากการทดสอบในงานวิจัยนี้จะมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้จากค่าเชิงทฤษฎีเกือบทั้งหมด มีเพียงช่วงที่อัตราส่วน S_g / B มีค่าต่ำกว่า 0.2 เท่านั้นที่ผลการทดสอบมีค่า P_h / S_u สูงกว่าค่าที่ได้จากค่าเชิงทฤษฎี เนื่องจากผลการทดสอบในกรณีที่ช่องเปิดแคบทำให้ดินบริเวณซอกเสาเข็มนั้นสามารถไหลออกมาได้น้อยมากขณะทดสอบ จึงทำให้ได้ค่า P_h / S_u ที่ได้สูงกว่าค่าเชิงทฤษฎี

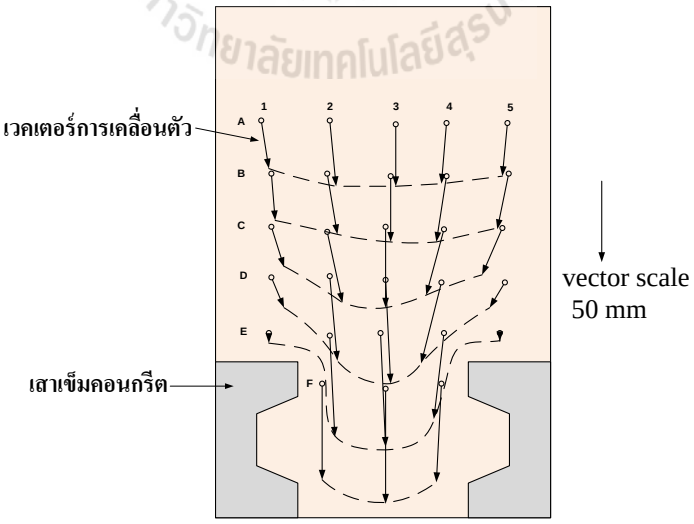


รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบผลการทดสอบทางกายภาพกับค่าเชิงทฤษฎี

4.4 กลไกการวิบัติของดินจากภาพถ่ายขณะทดสอบ

การทดสอบในงานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนระยะห่างต่อความกว้างเสาเข็ม (S_g / B) เท่ากับ 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.2, 1.6, 2.0, 2.5 และ 3.0 แต่ในการใช้งานกำแพงเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่องโดยทั่วไปนั้นมีค่า S_g / B ระหว่าง 0.5 – 1.0 (ประจิต, 2539) ดังนั้นเพื่อให้อัตราส่วน S_g / B อยู่ในช่วงของการใช้งานจริงผู้วิจัยจึงเลือกอัตราส่วน S_g / B เท่ากับ 0.7, 1.2, และ 2.0 มาแสดงรูปแบบกลไกการวิบัติในงานวิจัยนี้ โดยให้อัตราส่วน S_g / B เท่ากับ 2.0 เป็นตัวแทนของอัตราส่วน S_g / B ที่สูงมาก ส่วนอัตราส่วน S_g / B ที่สูงกว่านี้ผลการทดสอบเห็นแนวอาร์คไม่ชัดเจนจึงไม่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้

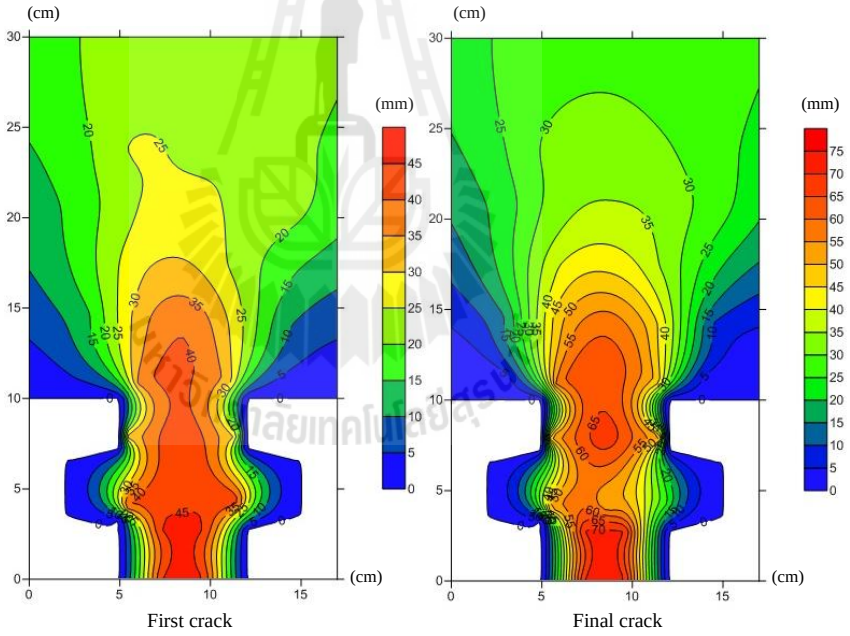
จากการบันทึกภาพถ่ายขณะทำการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ โดยทำการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของหมุดเครื่องหมายด้วยโปรแกรม datacatcher version 1.20 ได้ผลการเคลื่อนตัวของดินตัวอย่างทดสอบจากหมุดเครื่องหมาย พบว่า การเคลื่อนตัวของดินตัวอย่างทดสอบเมื่อเขียนเป็นเวคเตอร์การเคลื่อนตัว (displacement vector) จะได้ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงถึงการเคลื่อนตัวของมวลดินจากจุดเริ่มต้นการทดสอบจนถึงจุดที่ให้แรงกดที่กำลังพิจารณา ดินตัวอย่างบริเวณแนวช่องว่างระหว่างเสาเข็ม (S_g) จะมีการเคลื่อนตัวสูงที่สุดดังตำแหน่ง *A3, B3, C3, D3, E3* และ *F3* ขณะที่ดินตัวอย่างบริเวณด้านบนติดกับผิวของเสาเข็มจะมีการเคลื่อนตัวน้อยมากดังตำแหน่ง *E1* และ *E5* แต่ดินตัวอย่างเหนือเสาเข็มขึ้นไปที่ตำแหน่ง *D1, C1, D5* และ *C5* จะเกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างในทิศทางเข้าหาช่องเปิด ทำให้เห็นแนวการเคลื่อนตัวเป็นลักษณะการไหลของวัตถุหนืดผ่านช่องเปิด



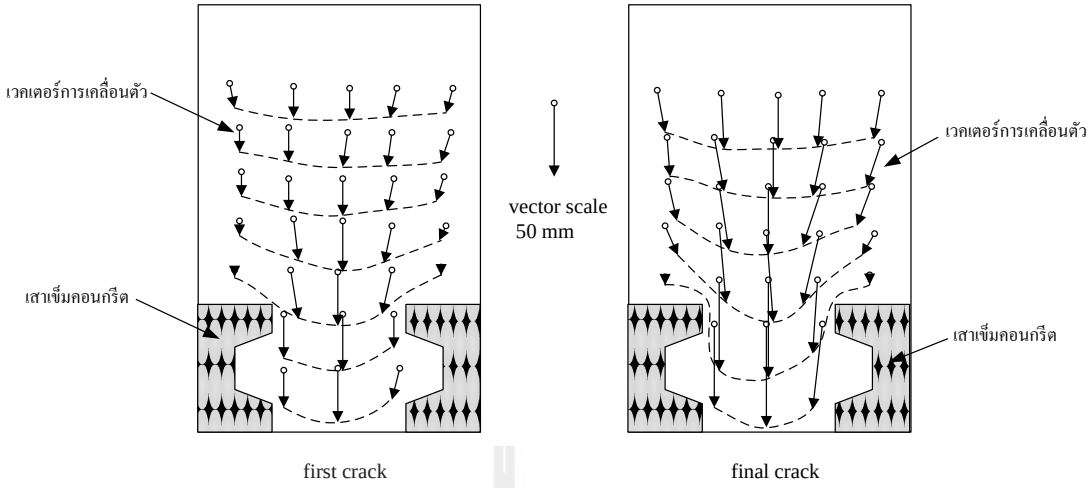
รูปที่ 4.5 ภาพการเคลื่อนตัวภายในของตัวอย่างทดสอบที่มี $S_g / B = 0.7$
(เมื่อพิจารณาจากเริ่มต้นทดสอบจนถึงจุดวิบัติ)

เพื่อศึกษารูปแบบการเคลื่อนตัวของมวลดินได้นำเวคเตอร์การเคลื่อนตัวมาเขียนเส้นชั้นความสูง และนำค่าการเคลื่อนตัวของหมุดเครื่องหมายทุกๆ ตำแหน่งของตัวอย่างทดสอบที่บันทึกไว้ทีละภาพทุกๆ 10 วินาที จนดินตัวอย่างวิบัติมาวิเคราะห์ภาพเชิงซ้อนการเคลื่อนตัวของหมุดเครื่องหมายด้วยโปรแกรม datacatcher version 1.20 แล้วนำค่าการเคลื่อนตัวของหมุดเครื่องหมายทุกๆตำแหน่งมาวาดเป็นเส้น contour line ด้วยโปรแกรม Surfer 11

จากรูปที่ 4.6 พบว่าที่อัตราส่วน S_g / B เท่ากับ 0.7 เมื่อตัวอย่างทดสอบเกิด first crack เส้นการเคลื่อนตัวที่ 35 mm เริ่มมีลักษณะเป็นสะพานโค้ง และที่จุดวิบัติค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดในมวลดินจะเป็น 75 mm โดยยังคงมีพฤติกรรมเป็นสะพานโค้งอยู่ อีกทั้งยังพบว่าดินตัวอย่างมีการเคลื่อนตัวสูงที่สุดที่บริเวณกึ่งกลางช่องว่างระหว่างแบบจำลองเสาเข็ม ขณะที่ดินตัวอย่างบริเวณด้านบนติดกับผิวของเสาเข็มจะมีการเคลื่อนตัวน้อยมากหรือไม่มีการเคลื่อนตัวเลย และที่บริเวณกึ่งกลางตัวอย่างทดสอบเหนือแบบจำลองเสาเข็มก็พบว่าดินมีการเคลื่อนตัวสูงเช่นกัน

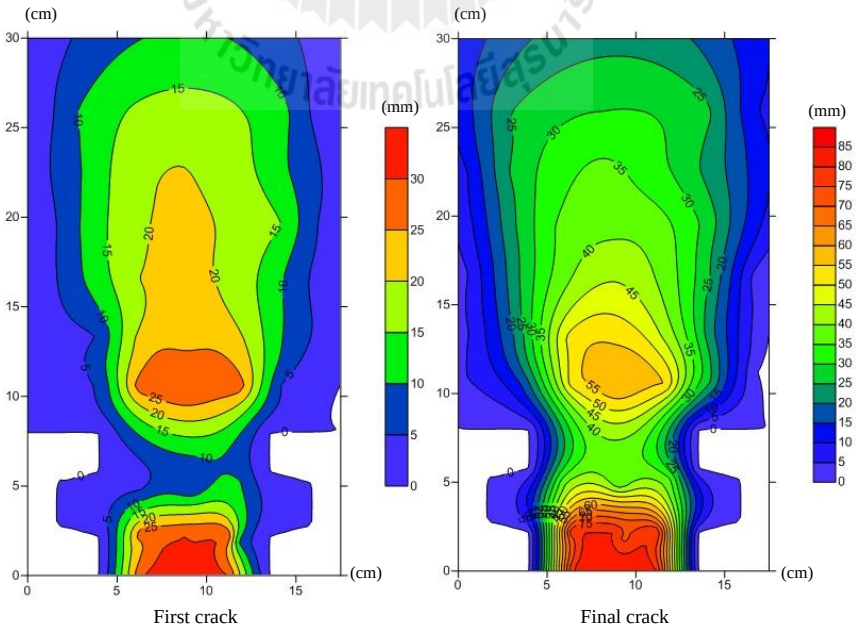


รูปที่ 4.6 เส้น contour line การเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบกับแบบจำลองขนาด $S_g / B = 0.7$

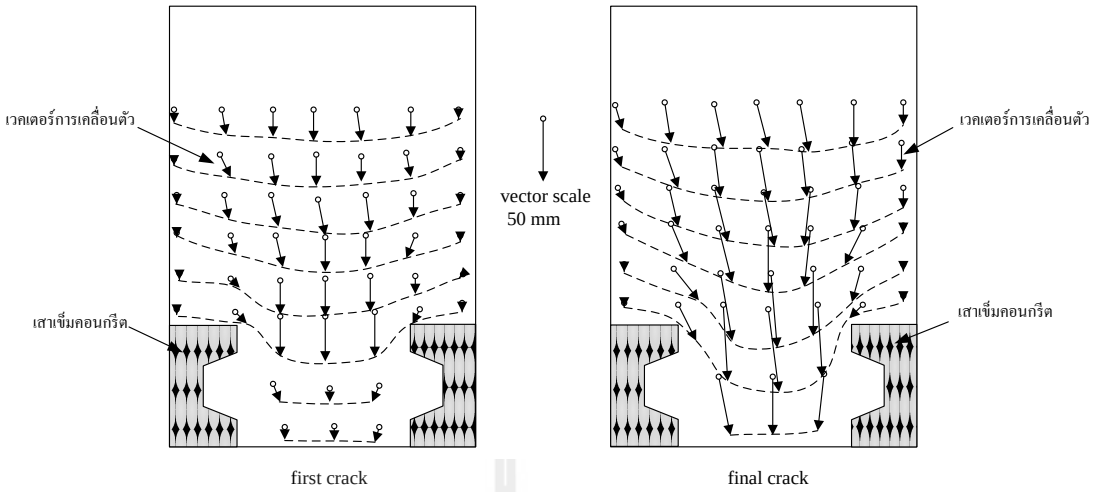


รูปที่ 4.7 เวคเตอร์การเคลื่อนตัวในแบบจำลองขนาด $S_g / B = 0.7$

จากรูปที่ 4.8 พบว่าที่อัตราส่วน S_g / B เท่ากับ 1.2 เมื่อตัวอย่างทดสอบเกิด first crack เส้นการเคลื่อนตัวที่ 20 mm เริ่มมีลักษณะเป็นสะพานโค้ง และที่จุดวิบัติค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดในมวลดินจะเป็น 85 mm โดยยังคงมีพฤติกรรมเป็นสะพานโค้งอยู่ อีกทั้งยังพบว่าดินตัวอย่างมีการเคลื่อนตัวสูงที่สุดที่บริเวณกึ่งกลางช่องว่างระหว่างแบบจำลองเสาเข็ม ขณะที่ดินตัวอย่างบริเวณด้านบนติดกับผิวของเสาเข็มจะมีการเคลื่อนตัวน้อยมากหรือไม่มีการเคลื่อนตัวเลย และที่บริเวณกึ่งกลางตัวอย่างทดสอบเหนือแบบจำลองเสาเข็มก็พบว่าดินมีการเคลื่อนตัวสูงเช่นกัน

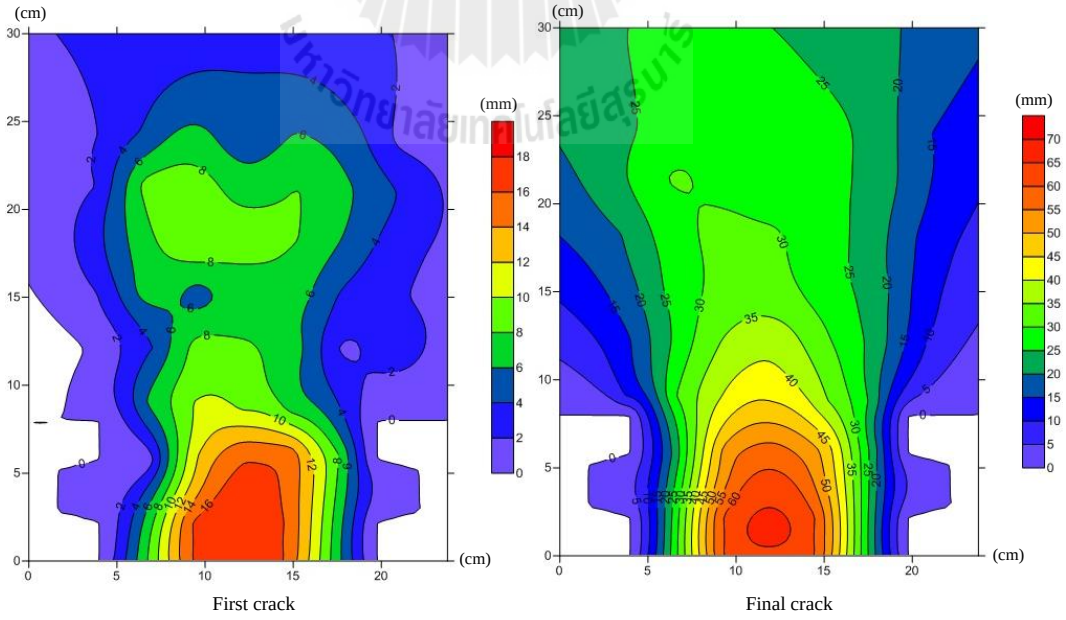


รูปที่ 4.8 เส้น contour line การเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบกับแบบจำลองขนาด $S_g / B = 1.2$

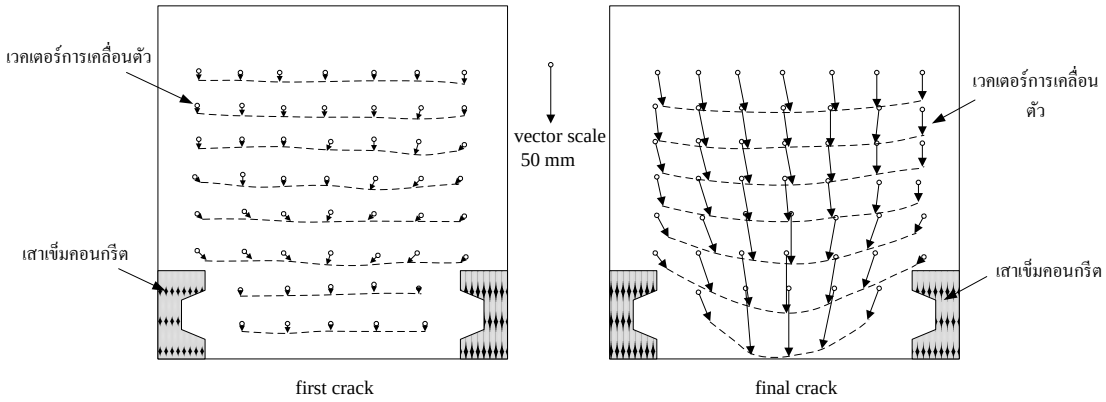


รูปที่ 4.9 เวคเตอร์การเคลื่อนตัวในแบบจำลองขนาด $S_g / B = 1.2$

จากรูปที่ 4.10 พบว่าที่อัตราส่วน S_g / B เท่ากับ 2.0 เมื่อตัวอย่างทดสอบเกิด first crack เส้นการเคลื่อนตัวที่ 8 mm เริ่มมีลักษณะเป็นสะพานโค้ง และที่จุดวิบัติค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดในมวลดินจะเป็น 70 mm โดยยังคงมีพฤติกรรมเป็นสะพานโค้งอยู่ อีกทั้งยังพบว่าดินตัวอย่างมีการเคลื่อนตัวสูงที่สุดที่บริเวณกึ่งกลางช่องว่างระหว่างแบบจำลองเสาเข็ม ขณะที่ดินตัวอย่างบริเวณด้านบนติดกับผิวของเสาเข็มจะมีการเคลื่อนตัวน้อยมากหรือไม่มีการเคลื่อนตัวเลย

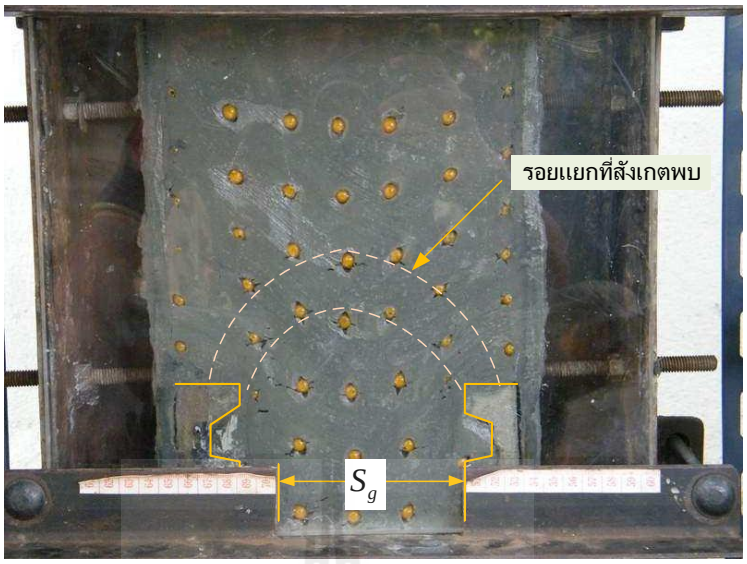


รูปที่ 4.10 เส้น contour line การเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบกับแบบจำลองขนาด $S_g / B = 2.0$

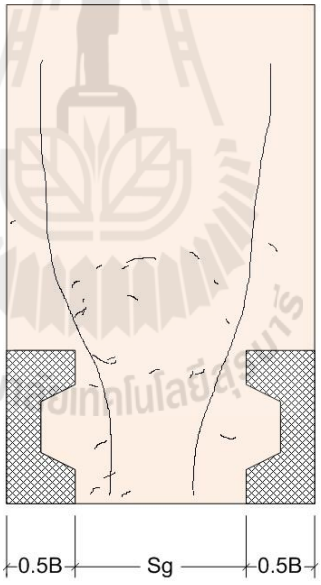


รูปที่ 4.11 เวคเตอร์การเคลื่อนตัวในแบบจำลองขนาด $S_g / B = 2.0$

จากผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินตัวอย่างด้วยภาพถ่ายเชิงซ้อน เช่น ตัวอย่างที่มี S_g / B เท่ากับ 1.2 เมื่อเพิ่มแรงกดแบบจำลองทางกายภาพประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ของแรงกดประลัย พบว่า ดินตัวอย่างเกิดแนวเฉือนเห็นเป็นรอยแยกเริ่มต้น (first crack) บริเวณเหนือเสาเข็มทั้งสอง รอยแยกเริ่มต้น (first crack) ทำมุมประมาณ 45 องศากับแนวราบ ลักษณะที่เกิดขึ้นอธิบายได้ว่า เกิดจากพฤติกรรมการปิดกั้นบางส่วนของดินระหว่างเสาเข็ม ซึ่งเป็นผลมาจากแนวโค้งรับแรง (arching effect) สอดคล้องกับรายงานผลทดสอบกับแบบจำลองทางกายภาพของอุโมงค์โดย Atkinson et al. (1975) ที่เสนอว่าช่วงกลไกการวิบัติเริ่มต้น (initial failure) มีลักษณะเป็นลิ่มเหนือช่องเปิด โดยมีการถ่ายแรงกระทำเข้าสู่เสาเข็มโดยตรง ทำให้เกิดการยุบอัดตัวบริเวณด้านหน้าเสาเข็มจนทำให้เกิดรอยแยกเริ่มต้น (first crack) และเกิดการยุบตัวบริเวณช่องเปิด ดินบางส่วนที่อยู่ใต้แนวรอยแยกสามารถหลุดออกมาได้ ดินที่อยู่เหนือรอยแยกจะรวมตัวกันเป็นสะพานรูปอาร์คต้านแรงดันดินไว้จนถึงจุดวิบัติ หลังจากพบรอยแยกเริ่มต้น (first crack) เมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อไป รอยแยกจะขยายตัวเพิ่มขึ้นตามแรงกดที่กระทำต่อแบบจำลอง เกิดรอยแยกเล็กๆ อีกหลายรอย จนกระทั่งถึงแรงกดประลัยพบว่า การถ่ายแรงกระทำจากอาร์คเข้าสู่เสาเข็มถึงจุดประลัยทำให้เกิดการพังของดินระหว่างเสาเข็มในลักษณะเฉือนขาด



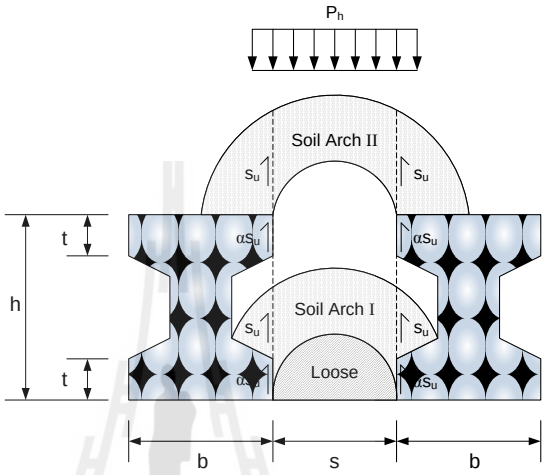
รูป 4.12 ภาพถ่ายรอยแยกสุดท้าย (final crack) ที่เกิดขึ้น (ระยะ $S_g / B = 1.2$)



รูปที่ 4.13 ภาพร่างรอยแยกสุดท้าย (final crack) ที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบขนาด $S_g / B = 1.2$

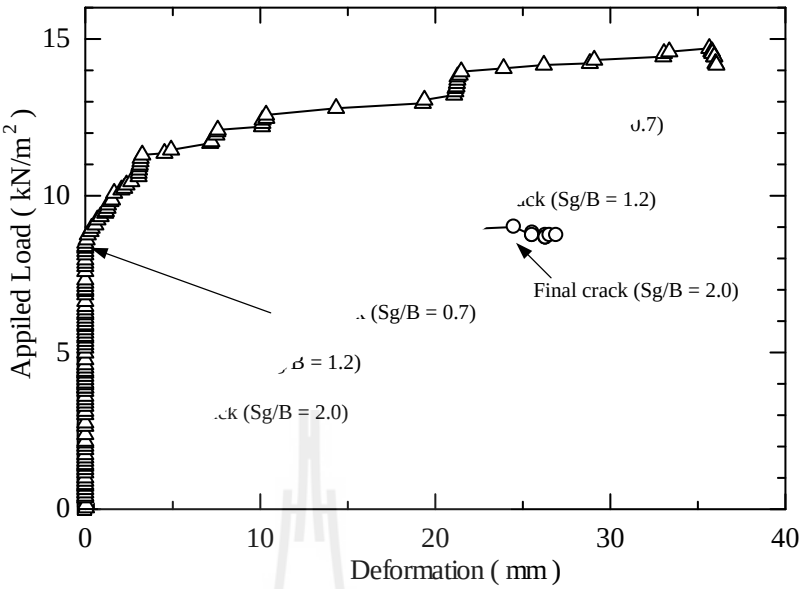
จากรูปที่ 4.12 และ รูปที่ 4.13 ตัวอย่างทดสอบที่มีขนาด $S_g / B = 1.2$ พบว่า รอยแยกสุดท้าย มีลักษณะเป็นรอยเฉือนรูปครึ่งวงกลม มีจุดยอดอยู่บริเวณกึ่งกลางแบบจำลอง ปลายทั้งสองข้างมีทิศทางไปยังตำแหน่งประมาณ 1/4 เท่าของความกว้างเสาเสาเข็ม ขณะเดียวกันพบรอยเฉือนตรงเกิดขึ้นทั้งสองข้าง มีทิศทางจากช่องเปิดไปยังผิวดินด้านบนคล้ายกับกลไกการวิบัติสุดท้ายของ Atkinson et al. (1975) ที่เสนอว่าการวิบัติสุดท้าย (final failure) มีลักษณะเป็นรอย

เฉือนตรง จากผิวดินด้านบนถึงอุโมงค์ และคล้ายกับกลไกการวิบัติของประจิต (2539) ที่เสนอไว้ดังรูปที่ 4.14 แต่พบว่าเกิดเพียงอาร์คเดียวเท่านั้นบริเวณเหนือเสาเข็มแต่ไม่พบอาร์คบริเวณช่องว่างระหว่างเสาเข็มแต่อย่างใด อีกทั้งพบแนวการวิบัติที่เฉือนผ่านอาร์คลงมาซึ่งเป็นไปตามกลไกที่เสนอโดยประจิต

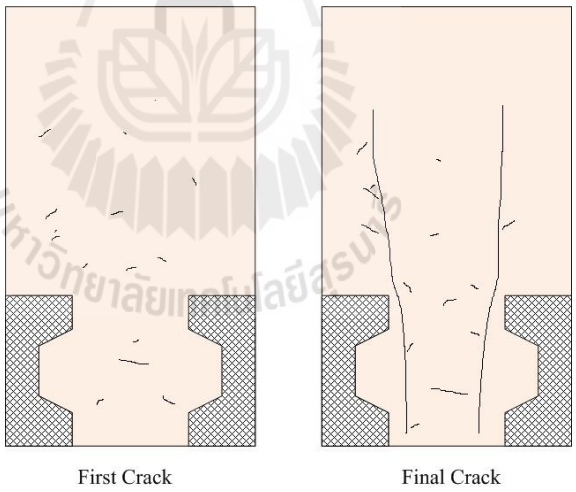


รูปที่ 4.14 สะพานดินระหว่างซอกเสาเข็มและระนาบวิบัติของดินสำหรับเสาเข็มตัวไอ (ประจิต, 2539)

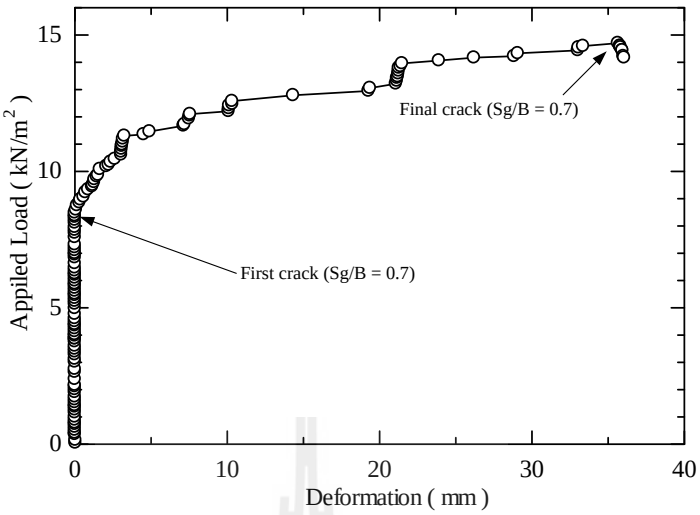
จากรูปที่ 4.15 พบว่ารอยแยกเริ่มต้นอยู่ในช่วงประมาณ 20-60 เปอร์เซ็นต์ ของแรงกดประลัย และรอยแยกสุดท้าย (final crack) เกิดขึ้นที่ช่วงสุดท้ายก่อนการวิบัติของดินตัวอย่าง ดังบทสรุปการทดลองของ Atkinson et al. (1975) กล่าวว่า แรงดันที่การวิบัติเริ่มต้น (initial failure) ไม่เกี่ยวข้องกับอัตราส่วนความลึกต่อขนาดรัศมีอุโมงค์ แต่การวิบัติสุดท้าย (final failure)จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความลึกต่อขนาดรัศมีอุโมงค์ สอดคล้องกับการทดลองแบบจำลองทางกายภาพที่ว่า ช่วงรอยแยกเริ่มต้น (first crack) พบที่ แรงกระทำต่อดินตัวอย่างต่ำ ส่วนรอยแยกสุดท้าย (final crack) พบที่แรงกระทำต่อดินตัวอย่างสูง และที่อัตราส่วนช่องเปิดต่อขนาดความกว้างของเสาเข็ม S_g / B มากขึ้น กำลังต้านทานต่อแรงดันดินด้านข้างก็จะลดต่ำลง อิทธิพลของการเกิดรอยแยกเริ่มต้น (first crack) ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระยะห่างช่องเปิดต่อขนาดความกว้างเสาเข็ม (S_g / B) กล่าวคือ อัตราส่วนระยะห่างช่องเปิดต่อขนาดความกว้างเสาเข็ม(S_g / B) น้อย รอยแยกเริ่มต้น(first crack) จะพบที่แรงกระทำสูง ส่วนอัตราส่วนระยะห่างช่องเปิดต่อขนาดความกว้างเสาเข็ม (S_g / B) มาก รอยแยกเริ่มต้น (first crack) จะพบที่แรงกระทำต่ำ



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันดินกับการเคลื่อนตัวของดินตัวอย่าง

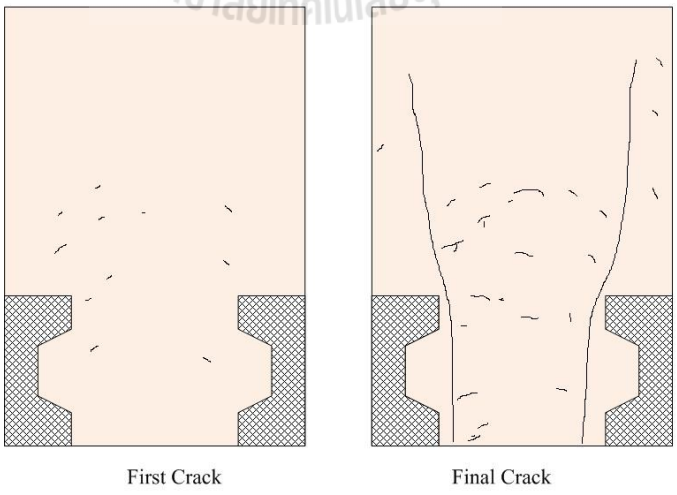


รูปที่ 4.16 รอยแยกเริ่มต้น (first crack) ที่พบและรอยแยกสุดท้าย (final crack) ของขนาด $S_g / B = 0.7$

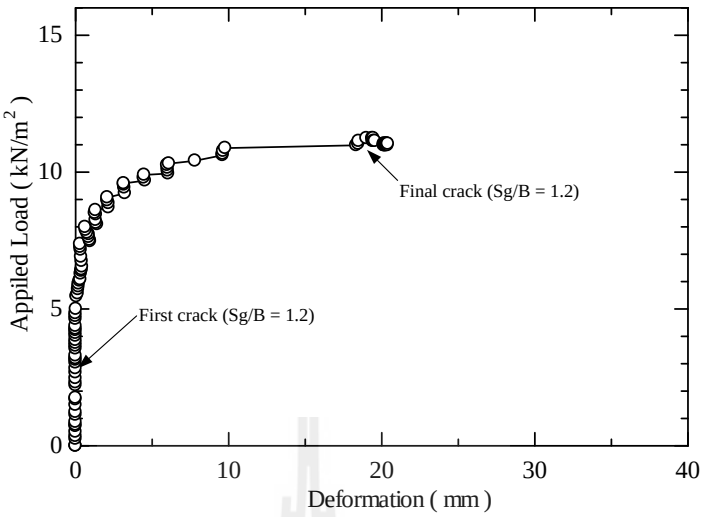


รูป 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันดินกับการเคลื่อนตัวของดินตัวอย่าง ของขนาด $S_g / B = 0.7$

จากรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 พบว่ารอยแยกเริ่มต้นอยู่ในช่วงประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ของแรงกดประลัยและพบว่ามีลักษณะเป็นรอยเฉือนรูปครึ่งวงกลม มีจุดยอดอยู่บริเวณกึ่งกลางแบบจำลอง ปลายทั้งสองข้างมีทิศทางไปยังตำแหน่งประมาณ 1/4 เท่าของความกว้างเสาเสาเข็ม รอยแยกสุดท้าย (final crack) เกิดขึ้นที่ช่วงสุดท้ายก่อนการวิบัติของดินตัวอย่าง ขณะเดียวกันพบรอยเฉือนตรงเกิดขึ้นทั้งสองข้าง มีทิศทางจากช่องเปิดไปยังผิวดินด้านบน

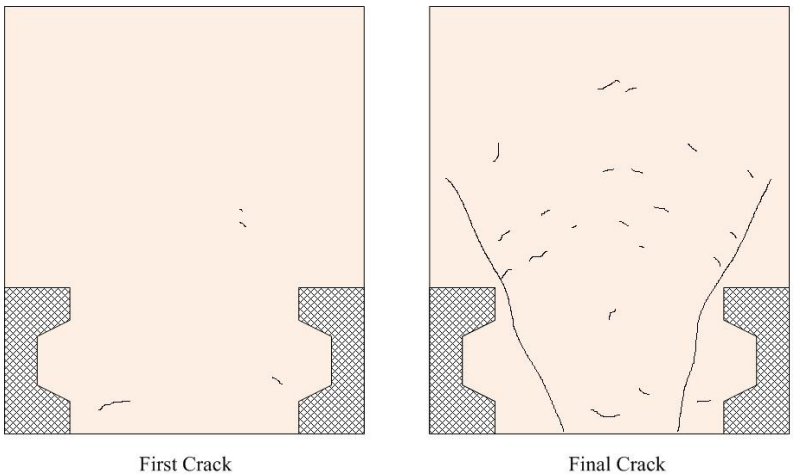


รูปที่ 4.18 รอยแยกเริ่มต้น (first crack) ที่พบและรอยแยกสุดท้าย (final crack) ของขนาด $S_g / B = 1.2$

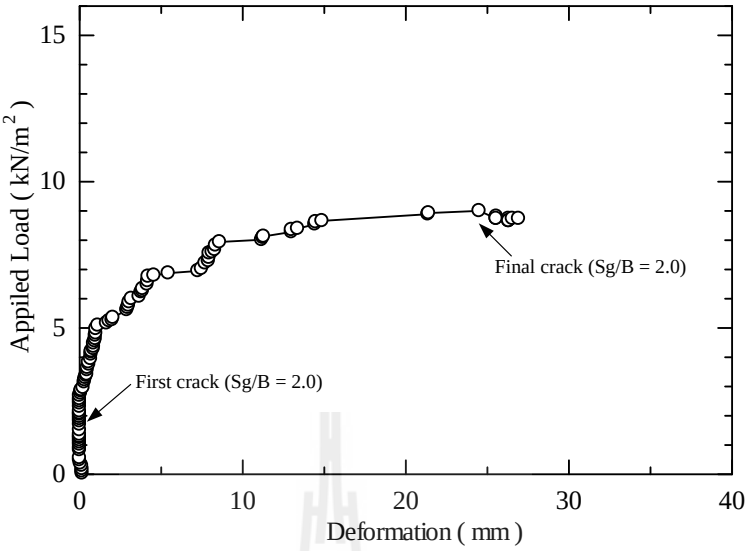


รูป 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันดินกับการเคลื่อนตัวของดินตัวอย่าง
ของขนาด $S_g / B = 1.2$

จากรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19 พบว่ารอยแยกเริ่มต้นอยู่ในช่วงประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ของแรงกดประลัย รอยแยกสุดท้าย (final crack) เกิดขึ้นที่ช่วงสุดท้ายก่อนการวิบัติของดินตัวอย่าง และพบว่า รอยแยกสุดท้าย มีลักษณะเป็นรอยเฉือนรูปครึ่งวงกลม มีจุดยอดอยู่บริเวณกึ่งกลางแบบจำลอง ปลายทั้งสองข้างมีทิศทางไปยังตำแหน่งประมาณ 1/4 เท่าของความกว้างเสาเสาเข็ม ขณะเดียวกันพบรอยเฉือนตรงเกิดขึ้นทั้งสองข้าง มีทิศทางจากช่องเปิดไปยังผิวดินด้านบน



รูปที่ 4.20 รอยแยกเริ่มต้น (first crack) ที่พบและรอยแยกสุดท้าย (final crack)
ของขนาด $S_g / B = 2.0$



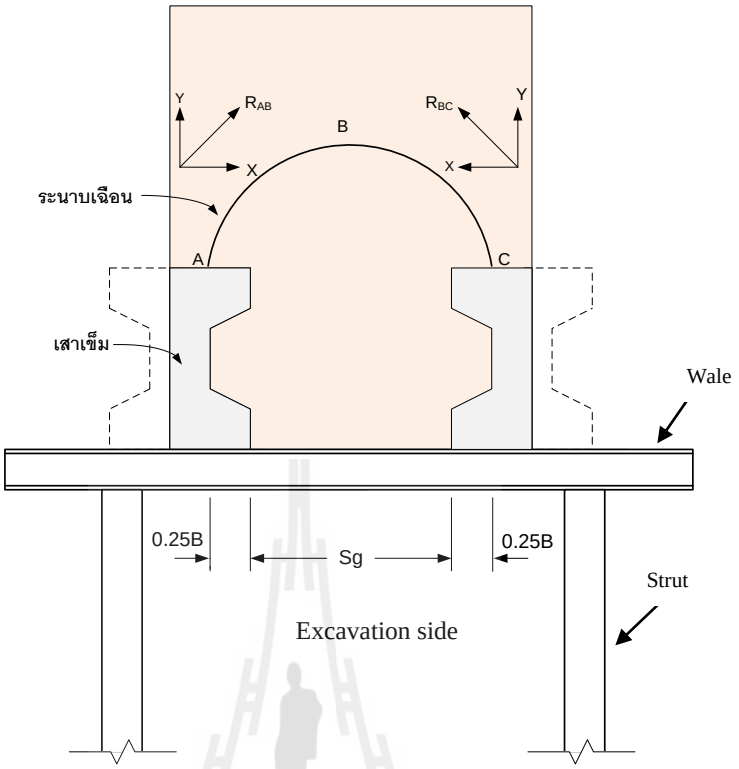
รูป 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันดินกับการเคลื่อนตัวของดินตัวอย่าง ของขนาด $S_g / B = 2.0$

จากรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21 พบว่ารอยแยกเริ่มต้นอยู่ในช่วงประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ของแรงกดประลัย รอยแยกสุดท้าย (final crack) เกิดขึ้นที่ช่วงสุดท้ายก่อนการวิบัติของดินตัวอย่าง และพบว่า รอยแยกสุดท้าย มีลักษณะเป็นรอยเฉือนรูปครึ่งวงกลม มีจุดยอดอยู่บริเวณกึ่งกลางแบบจำลอง ปลายทั้งสองข้างมีทิศทางไปยังตำแหน่งประมาณ 1/4 เท่าของความกว้างเสาเสาเข็ม ขณะเดียวกันพบรอยเฉือนตรงเกิดขึ้นทั้งสองข้าง มีทิศทางจากช่องเปิดไปยังผิวดินด้านบน

4.5 แนวคิดกลไกการวิบัติที่ได้จากการทดสอบทางกายภาพ

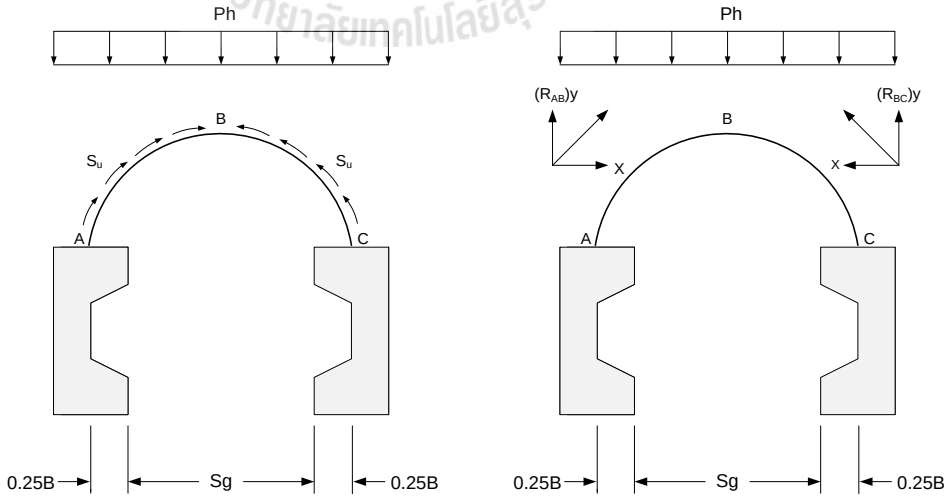
4.5.1 กลไกการวิบัติ FM1

จากภาพถ่ายแนวการเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบสังเกตุได้ว่า ดินตัวอย่างเกิดการวิบัติเป็นรูปครึ่งวงกลมเหนือแบบจำลองเสาเข็มโดยแนวส่วนโค้งจะเป็นระนาบแรงเฉือน รอยเฉือนจะเริ่มเคลื่อนตัวจากด้านหน้าแบบจำลองเสาเข็มทั้งสองข้างจนเคลื่อนตัวมาบรรจบกัน ซึ่งจะเกิดแรงเฉือนลัพธ์ทำมุม 45 องศากับแนวราบ อีกทั้งจะเกิดรอยเฉือนขึ้นอีกจำนวนมากตามมาที่บริเวณเหนือช่องเปิดขึ้นไป โดยสามารถลากเส้นแนวระนาบการวิบัติได้ดังรูปที่ 4.22 จากรูปจะแสดงบริเวณกล่องทดสอบพบว่าระนาบแรงเฉือนจะเกิดบริเวณด้านบนของแบบจำลองเสาเข็มและมาบรรจบกันที่กึ่งกลาง โดยมีแรงต้านทานเท่ากับกำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน



รูปที่ 4.22 แนวคิดกลไกการวิบัติแบบ FM1ที่เกิดจากการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ

จากแนวระนาบแรงเฉือนที่เสนอสามารถเขียน free-body diagram ของระนาบแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 free body diagram ของระนาบการวิบัติ

ความยาวส่วนโค้ง AB และ BC

$$arch \quad AB\,and\,BC = \frac{\pi}{2}\left(\frac{B}{4}+\frac{S_g}{2}\right)$$
$$= \pi\left(\frac{B+2S_g}{8}\right) \tag{4.2}$$

วิเคราะห์แรงลัพธ์ต่อหนึ่งด้าน โดยใช้สมการความสมดุลของแรงในแนวแกน y ในการหาแรงลัพธ์ที่เกิดขึ้น

$$R_{AB} = R_{BC} = S_u \pi\left(\frac{B+2S_g}{8}\right) \tag{4.3}$$

$$(R_{AB})_y = \left(R_{BC}\right)_y = \frac{\pi}{\sqrt{2}} S_u\left(\frac{B+2S_g}{8}\right) \tag{4.4}$$

วิเคราะห์แรงดันประลัยต่อความกว้างของแนวโค้งรับแรง (arching) โดยใช้สมการความสมดุลในแนวแกน y แรงดันดินด้านข้างที่นำมาวิเคราะห์จะวิเคราะห์เฉพาะบริเวณช่องเปิด เนื่องจากบริเวณแบบจำลองเสาเข็มเป็นฐานรองรับจึงเกิดการรับแรงที่มากระทำไว้ทั้งหมดและเสาเข็มมีลักษณะ rigid ในขณะที่แรงดันดินด้านข้างกระจายแรงทำให้ดินเสียรูปนั้น ความต้านทานแรงเฉือนพยายามที่จะรักษาสภาพให้อยู่ในตำแหน่งเดิมโดยใช้ส่วนที่ติดกับโครงสร้างเป็นจุดรองรับ เกิดโครงสร้างรับแรงขึ้น เพราะฉะนั้นการวิเคราะห์ถึงระนาบแรงเฉือนจึงต้องนำส่วนของระนาบแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมาวิเคราะห์ด้วย ดังนี้

$$P_h \cdot S_g = \left[\left(R_{AB}\right)_y + \left(R_{BC}\right)_y\right]$$
$$= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} S_u\left(\frac{B+2S_g}{8}\right) \tag{4.5}$$

$$\frac{P_h}{S_u} = \frac{\pi}{\sqrt{2}}\left(\frac{B}{4S_g}+0.5\right) \tag{4.6}$$

โดยที่ S_g = ระยะห่างระหว่างผิวถึงผิวเสาเข็ม

B = ขนาดความกว้างเสาเข็มรูปตัวไอ

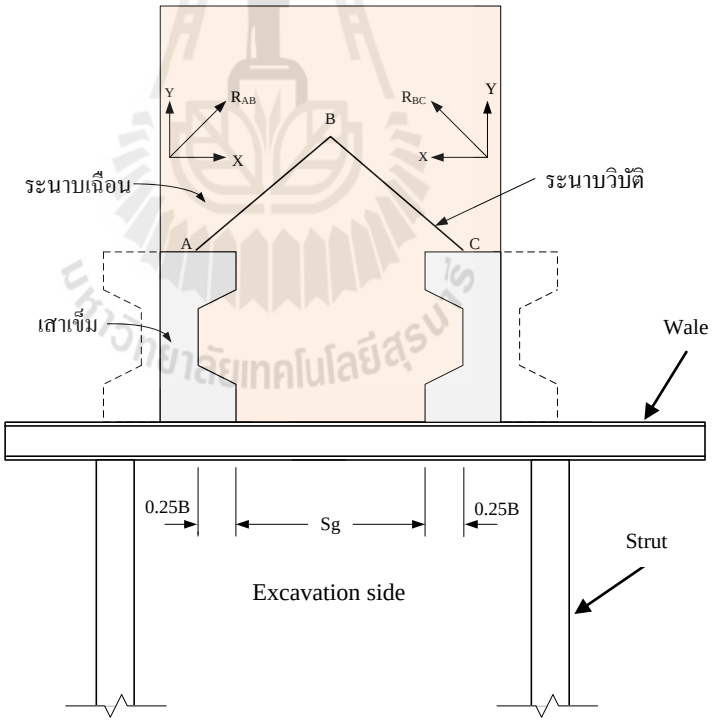
S_u = กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

α = เฟคเตอร์ยึดเกาะระหว่างผิวของเสาเข็มกับดิน

P_h = แรงดันดินด้านข้าง

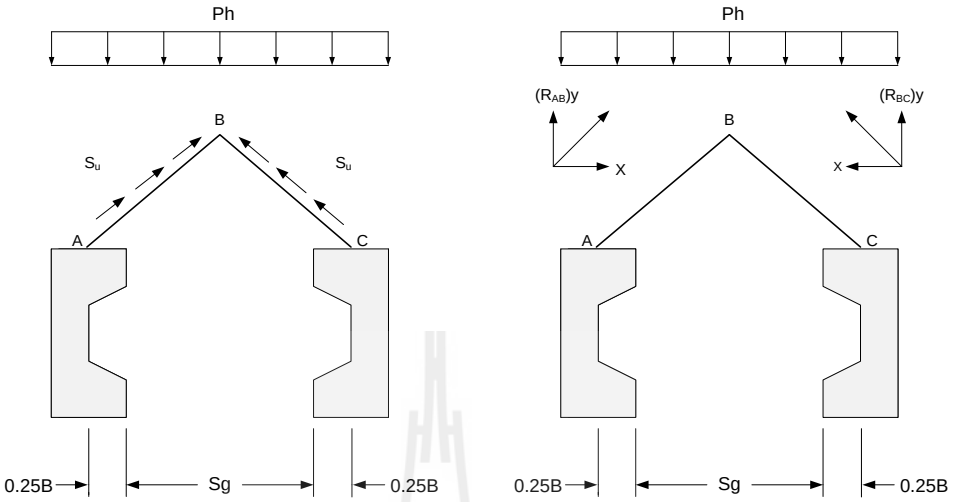
4.5.2 กลไกการวิบัติ FM2

ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองใช้ระนาบการวิบัติที่เสนอไว้โดย วินิตย์และคณะ,2553 เสนอว่าดินตัวอย่างเกิดการวิบัติเป็นรูปสามเหลี่ยมเหนือแบบจำลองเสาเข็ม โดยแนวที่เป็นส่วนของเส้นตรงจะเป็นระนาบแรงเฉือน โดยรอยเฉือนจะเริ่มเคลื่อนตัวจากด้านหน้าแบบจำลองเสาเข็มทั้งสองข้างโดยทำมุม 45 องศากับแนวราบ จนเคลื่อนตัวมาบรรจบกัน จากแนวความคิดนี้จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นกลไกการวิบัติของแบบจำลองเสาเข็มหน้าตัดรูปตัวไอดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 แนวคิดกลไกการวิบัติแบบ FM2 ของแบบจำลองทางกายภาพ ประยุกต์จาก (วินิตและคณะ, 2553)

จากแนวระนาบแรงเฉือนที่เสนอสามารถเขียน free-body diagram ของระนาบแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 free body diagram ของระนาบการวิบัติ

ความยาวด้าน AB และ BC

$$arch \quad AB\,and\,BC = \sqrt{\left(\frac{B+2S_g}{4}\right)^2+\left(\frac{B+2S_g}{4}\right)^2} = \sqrt{2}\left(\frac{B+2Sg}{4}\right) \tag{4.7}$$

วิเคราะห์แรงลัพธ์ต่อหนึ่งด้าน โดยใช้สมการความสมดุลของแรงในแนวแกน y ในการหาแรงลัพธ์ที่เกิดขึ้น

$$R_{AB} = R_{BC} = S_u\left[\sqrt{2}\left(\frac{B+2S_g}{4}\right)\right] \tag{4.8}$$

$$(R_{AB})_y = \left(R_{BC}\right)_y = S_u\left(\frac{B+2Sg}{4}\right) \tag{4.9}$$

วิเคราะห์แรงดันประลัยต่อความกว้างของแนวโค้งรับแรง (arching effect) โดยใช้สมการความสมดุลในแนวแกน y แรงดันดินด้านข้างที่นำมาวิเคราะห์จะวิเคราะห์เฉพาะบริเวณช่องเปิด

เนื่องจากบริเวณแบบจำลองเสาเข็มเป็นฐานรองรับจึงเกิดการรับแรงที่มากระทำไว้ทั้งหมดและเสาเข็มมีลักษณะ rigid ในขณะที่แรงดันดินด้านข้างกระจายแรงทำให้ดินเสียรูปนั้น ความต้านทานแรงเฉือนพยายามที่จะรักษาสภาพให้อยู่ในตำแหน่งเดิมโดยใช้ส่วนที่ติดกับโครงสร้างเป็นจุดรองรับ เกิดโครงสร้างรับแรงขึ้น เพราะฉะนั้นการวิเคราะห์ถึงระนาบแรงเฉือนจึงต้องนำส่วนของระนาบแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมาวิเคราะห์ด้วย ดังนี้

$$P_h \cdot S_g = \left[\left(R_{AB}\right)_y + \left(R_{BC}\right)_y \right]$$

$$= 2\left[S_u \left(\frac{B + 2S_g}{4} \right) \right] \tag{4.10}$$

$$\frac{P_h}{S_u} = \frac{B}{2S_g} + 1 \tag{4.11}$$

โดยที่ S_g = ระยะห่างระหว่างผิวถึงผิวเสาเข็ม

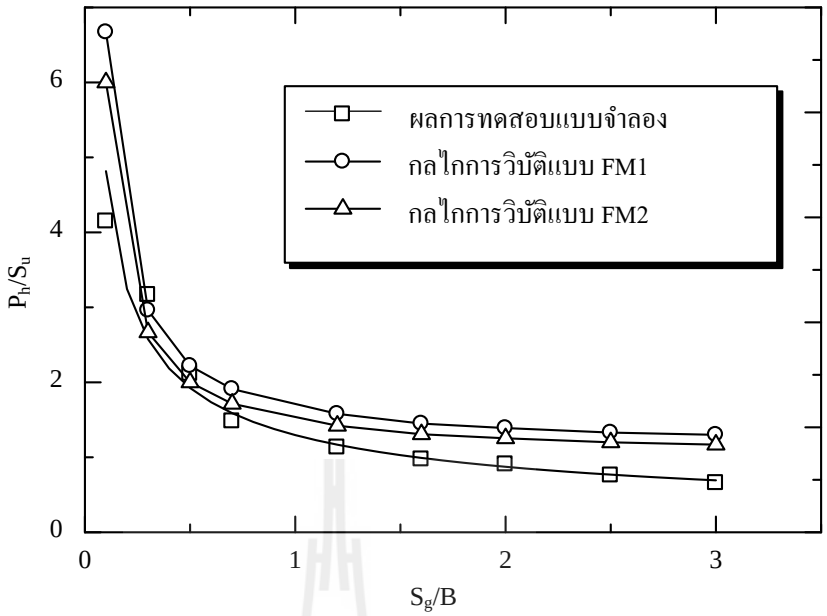
B = ขนาดความกว้างเสาเข็มรูปตัวไอ

S_u = กำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

α = เฟคเตอร์ยึดเกาะระหว่างผิวของเสาเข็มกับดิน

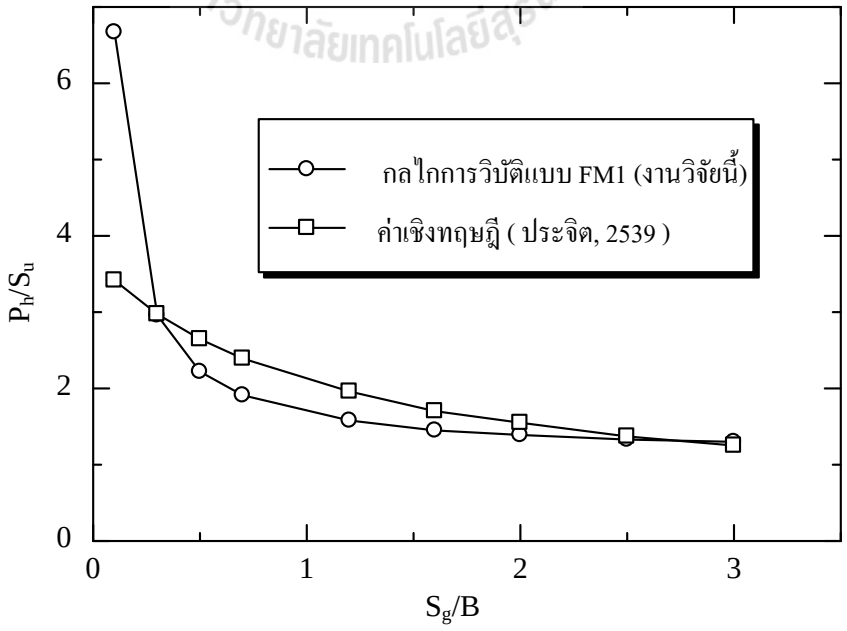
P_h = แรงดันดินด้านข้าง

รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง P_h / S_u ต่อ S_g / B ของสมการที่ 4.6 กับสมการที่ 4.11 กับผลการทดสอบแบบจำลอง พบว่ากลไกวิบัติแบบ FM2 รูปสามเหลี่ยมเหนือแบบจำลองเสาเข็ม ซึ่งก็คือสมการที่ 4.11 ให้ค่า P_h / S_u ใกล้เคียงกับผลการทดสอบทางกายภาพมากกว่า และเมื่อนำสมการที่ 4.11 มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบทางกายภาพพบว่าให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมากที่ S_g / B ตั้งแต่ 0.3 ถึง 1.0 ขณะที่อัตราส่วน S_g / B อื่นๆ นั้นให้ค่าที่สูงกว่าผลการทดสอบทางกายภาพไม่มากนัก โดยมีแนวโน้มของกราฟไปในทางเดียวกัน



รูปที่ 4.26 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับแนวคิดกลไกการวิบัติ

จากรูปที่ 4.26 ยังพบอีกว่าว่า กลไกวิบัติรูปสามเหลี่ยมและกลไกวิบัติรูปครึ่งวงกลมนั้นให้ค่าอัตราส่วน P_h / S_u ที่ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกสมการที่ 4.6 ซึ่งก็คือกลไกวิบัติรูปครึ่งวงกลมเพราะว่ามีรูปแบบตรงกับกลไกการวิบัติที่เกิดขึ้นจริงในการทดสอบทางกายภาพ นำมาเปรียบเทียบกับทฤษฎีที่เสนอโดยประจิต ,2539 พบว่าค่า P_h / S_u มีค่าต่ำกว่าไม่มากนักและให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมากที่ S_g / B ตั้งแต่ 1.6 ถึง 3.0 โดยมีแนวโน้มของกราฟไปในทางดียวกัน ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบทฤษฎีของประจิต (2539) กับแนวคิดการวิบัติ

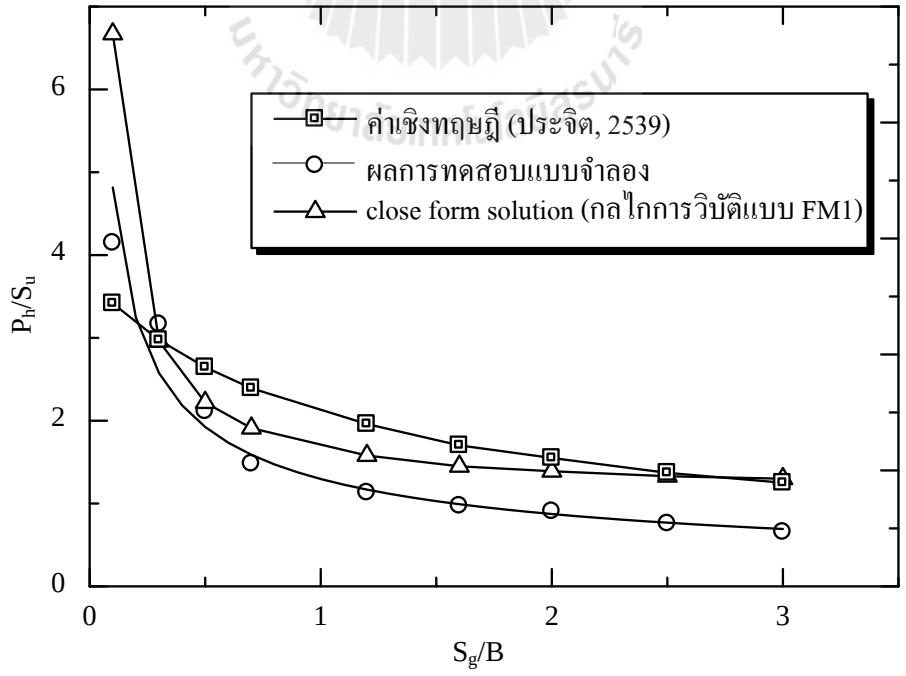
4.6 การเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบจำลองกับกลไกการวิบัติแบบ FM1 และ FM2

การเปรียบเทียบผลการทดสอบทางกายภาพกับการวิเคราห์ด้วยวิธีต่างๆ แสดงดังรูป 4.28 เริ่มจากทฤษฎี ประจิต (2539) จะให้ค่า P_h / S_u ที่สูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบในงานวิจัยนี้ไม่มากนัก มีเพียงช่วงที่อัตาส่วน S_g / B มีค่าต่ำกว่า 0.2 เท่านั้นที่ผลการทดสอบมีค่า P_h / S_u สูงกว่าค่าที่ได้จากทฤษฎี ซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากการตั้งสมมติฐานกลไกการวิบัติขึ้นก่อน ผลที่ได้จึงมีค่าสูงกว่าผลการทดสอบทางกายภาพ

จากสมการที่ 4.6 กลไกการวิบัติที่เสนอ ผลการวิเคราะห์ให้ค่า P_h / S_u ที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบทางกายภาพมากที่ S_g / B ตังแต่ 0.3 ถึง 1.0 ขณะที่อัตราส่วนอื่นๆ นั้นให้ค่าที่สูงกว่าผลการทดสอบทางกายภาพ โดยมีแนวโน้มของกราฟไปในทิศทางเดียวกัน

จากสมการที่ 4.6 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับทฤษฎีที่เสนอโดยประจิต (2539) พบว่ามีค่าต่ำกว่าไม่มากนักและให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมากที่ S_g / B ตั้งแต่ 1.6 ถึง 3.0 โดยมีแนวโน้มของกราฟไปในทางดียวกัน

ประจิต (2539) ได้รวบรวมข้อมูลการก่อสร้างกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องหน้าตัดรูปตัวไอในกรุงเทพมหานคร พบว่ามีช่วงการใช้งานอัตราส่วนระยะห่างของเสาเข็ม S_g / B ตั้งแต่ 0.5 ถึง 1.0 ซึ่งค่า P_h / S_u ที่ได้จากทฤษฎีของประจิต (2539) ผลทดสอบทางกายภาพ และกลไกการวิบัติรูปครึ่งวงกลมในงานวิจัยนี้มีค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันดี



รูปที่ 4.28 การเปรียบเทียบผลการทดสอบทางกายภาพกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีต่างๆ

บทที่ 5
บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากผลการศึกษา วิจัย อิทธิพลของระยะห่างของเสาเข็มต่อกำลังรับแรงดันดินของกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องรูปตัวไอ โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

1) กรณีของเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่องรูปตัวไอ กำลังต้านทานต่อแรงกดในเทอม P_h / S_u ที่ได้จากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพ โดยใช้ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนแบบคงสภาพคุณภาพสูง แปรผกผันกับอัตราส่วนระหว่างช่องว่างระหว่างเสาเข็มต่อความกว้างของเสาเข็ม S_g / B โดยมีความสัมพันธ์อยู่ในรูปไฮเพอร์โบล่าดังสมการ

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

โดยมี $R^2 = 0.975$

และสมการ close form solution ที่ได้สร้างขึ้นโดยใช้กลไกการวิบัติแบบครึ่งวงกลม (FM1) ที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพเป็น

$$\frac{P_h}{S_u} = \frac{\pi}{\sqrt{2}}\left(\frac{B}{4S_g} + 0.5\right)$$

สมการที่สร้างขึ้นโดยใช้กลไกการการวิบัติแบบลิ่มรูปสามเหลี่ยม (FM2) ตามรูปแบบเสาเข็มกลมเป็น

$$\frac{P_h}{S_u} = \frac{B}{2S_g} + 1$$

2) เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับสมการเชิงทฤษฎีจะเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์แบบไฮเพอร์โบลาเหมือนกับสมการที่เสนอโดยประจิต (2539) แต่เมื่อได้เปรียบเทียบค่าที่ได้จากทฤษฎี

แล้วจะพบว่า ค่า P_h / S_u ที่ได้จากการทดสอบในงานวิจัยนี้จะมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีเกือบทั้งหมด มีเพียงช่วงที่ S_g / B มีค่าต่ำกว่า 0.2 เท่านั้นที่ผลการทดสอบมีค่า P_h / S_u สูงกว่าค่าที่ได้จากทฤษฎี เนื่องจากดินบริเวณซอกเสาเข็มนั้นสามารถไหลออกมาได้น้อยมากขณะทดสอบ จึงทำให้ค่า P_h / S_u ที่ได้สูงกว่าปกติและมากกว่าค่าจากทฤษฎีที่เสนอโดยประจิต (2539)

3) รูปแบบการวิบัติที่สังเกตุได้เมื่อตัวอย่างทดสอบถูกกดจนวิบัติจะเป็นรอยแตกในดินที่มีแนวโน้มเป็นอาร์คซึ่งสอดคล้องกับกลไกการวิบัติที่เสนอโดยประจิต แต่พบว่าเกิดเพียงอาร์คเดียวเท่านั้นบริเวณเหนือเสาเข็มแต่ไม่พบอาร์คบริเวณช่องว่างระหว่างเสาเข็มแต่อย่างใด อีกทั้งยังพบแนวการวิบัติที่เฉือนผ่านอาร์คลงมาซึ่งเป็นไปตามที่เสนอไว้ในทฤษฎี

4) การเคลื่อนตัวของดิน พบว่า การเคลื่อนตัวจะเคลื่อนที่ออกจากช่องว่างระหว่างเสาเข็ม โดยการเคลื่อนตัวจะมากที่สุดที่บริเวณช่องว่างระหว่างแบบจำลองเสาเข็ม และที่บริเวณด้านบนของแบบจำลองเสาเข็มจะมีการเคลื่อนตัวน้อยมากหรือไม่เคลื่อตัวเลย โดยบริเวณที่มีการเคลื่อนตัวน้อยจะเกิดการบีบอัดตัวของดินด้านหน้าเสาเข็มทำให้เกิดรอยแยกของดิน ส่วนที่อยู่ใต้แนวรอยแยกจะหลุดออกมาได้ ส่วนที่อยู่ด้านบนรอยแยกจะรวมตัวกันเป็นสะพานรูปอาร์ค รับแรงดันดินได้

5) จากกลไกวิบัติเป็นรูปครึ่งวงกลมเหนือแบบจำลองเสาเข็มที่เสนอ ซึ่งก็คือสมการที่ 4.6 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบทางกายภาพพบว่าให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมากที่ S_g / B ตั้งแต่ 0.3 ถึง 1.0 ขณะที่อัตราส่วน S_g / B อื่นๆ นั้นให้ค่าที่สูงกว่าผลการทดสอบทางกายภาพไม่มากนัก และเมื่อนำค่า P_h / S_u มาเปรียบเทียบกับทฤษฎีที่เสนอโดยประจิต(2539) ก็พบว่ามีค่าต่ำกว่าไม่มากนักและให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมากที่ S_g / B ตั้งแต่ 1.6 ถึง 3.0 โดยมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

6) การก่อสร้างกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องหน้าตัดรูปตัวไอนั้น ส่วนใหญ่จะใช้อัตราส่วนระยะห่างของเสาเข็ม S_g / B อยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.5 ถึง 1.0 ซึ่งค่า P_h / S_u ที่คำนวณได้จากทฤษฎีของประจิต (2539) ให้ผลที่สูงผลการทดสอบทางกายภาพและกลไกการวิบัติในงานวิจัยนี้ไม่มากนัก ดังนั้น ผลการทดสอบทางกายภาพและกลไกการวิบัติที่เสนอในงานวิจัยนี้จึงอยู่ในช่วงที่ปลอดภัยในการออกแบบ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาต่อในอนาคตแนะนำให้ศึกษาในลักษณะของเสาเข็มรูปแบบอื่นๆของกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องและอาจศึกษาการเคลื่อนตัวเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับวิธีการวิเคราะห์แบบไฟไนท์อิลิเมนต์ เพื่อขยายผลการทดสอบให้สามารถนำไปใช้ในการทำนายพฤติกรรมของกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องรูปแบบอื่นๆ ต่อไป

รายการอ้างอิง

วินิตย์ แหมา, พรพจน์ ตันเส็ง 2553. อิทธิพลของระยะห่างของเสาเข็มต่อแรงดันดินของกำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง. **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15** (The 15th National Convention on Civil Engineering), GTE 026, โรงแรมสุนีย์ แกรนด์ แอนด์ คอนเวนชั่นเซนเตอร์ จ. อุบลราชธานี. 12-14 พฤษภาคม 2553.

ทัศนนิพันธ์ ณรงค์ (2543). ประสบการณ์และพัฒนาการก่อสร้างเสาเข็มเจาะลึกมากในชั้นดินกรุงเทพ. **การสัมมนาทางวิชาการเรื่อง ฐานราก** . วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.

ธนาดล คงสมบูรณ์ และ ประสพศิริ แสงภู่ (2547). การใช้เทคนิคภาพถ่ายในการศึกษาทางวิศวกรรมฐานราก. **การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 9**. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย

บริษัท ฟูจิ โฟโต้ ฟิล์ม (ประเทศไทย) จำกัด. 2552. รู้จักกล้อง ตอนที่ 10 : ปัญหาที่พบได้ทั่วไปในภาพถ่าย [Online]. available : http://www.fujifilm.co.th/forum/archive/index.php?t-8958.html

ประจิต จิรัปปภา (2536). การใช้เข็มเจาะหล่อในที่เรียงต่อเนื่องเป็นกำแพงกันดินในงานขุดห้องใต้ดินลึกมากในกรุงเทพฯ. **การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2536** . วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ. 66 – 78

ประจิต จิรัปปภา (2539). กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องกับงานก่อสร้างใต้ดินในกรุงเทพฯ. **การประชุมสัมนาทางวิชาการเรื่อง "งานก่อสร้างใต้ดิน 39"**. 36-54

ประสพศิริ แสงภู่ (2546). การศึกษาพฤติกรรมการโค้งของแนวแรงในดินทรายระหว่างเสาเข็มเมื่อรับแรงส่งผ่านในแนวราบ. **วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**

วิชัย สังวรปทานกุล (2540). วิสัยรับแรงธารด้านข้างของผนังเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง. **การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 4**. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยและสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง (2550). วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิค (FINITE ELEMENT METHOD IN GEOTECHNICAL ENGINEERING), ปีที่ 1/2550, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพ

อรรถสิทธิ์ สวัสดิ์พานิช, จุฑา สุนิตย์สกุล, มนตรี เดชาสกุลสม, (2551). การศึกษาพฤติกรรมถ่ายภาพทางธรณีเทคนิคในระหว่างการก่อสร้างของทางลอดในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพทางลอดที่แยกมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, **รายงานฉบับที่ วพ. 257**, สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง, กรมทางหลวง

อรรวินท์ อุบลเลิศ (2550). การก่อสร้างห้องใต้ดินลึกมากโดยใช้ระบบกำแพงกันดินแบบ Contiguous Pile Wall ในชั้นดินกรุงเทพ. **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 Chevalier, Gael Combe and Pascal Villard. (2007). Load tranfers and arching effects in granular soil layer, **18eme Congres Francais de Mecanique**, Grenoble 27 – 31 about 2007

Bowles, J.E., (1996). **Foundation Analysis and Design**, McGrew – Hill, New York, 551

Einstein, H.H., C.W. Schwartz, W. Steiner, M.M. Baligh, and R.E. Levitt. (1980). Improved Design for Tunnel Supports. **Analysis Method and Ground Structure Behavior,** Vol.II, MIT, DOT-05-60136.

Evans, C.H. (1983). **An Examination of Arching in Granular Soils** , M.S. Thesis, MIT.

Gaba, R. A., B. Simpson, et al. (2003). **Embedded retaining walls z guidance for economic design**. London, CIRIA.

Hidetoshi Kohashi, Kazushi Furumoto and Saiichi Sakajo, (2008). Arching effect

base Low Improvment ratio Cement Column method. **The International seminar on bast practice in soft ground omprovment**. 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, Akhtar and Danish, (1975). In Situ and Laboratory Permeability of Bangkok Clay at Nong Ngoo Hao and Rangsit. M.Eng Thesis .No. 765, AIT. Thailand.

J.P.North Lewis and G.H.A Lyons, (1975). Contiguous bored piles. London: Institution of Civil Engineers, 189 – 194.

Sergge Leroueil, Jean – Pilerre Magnan, Francois Tavenas, (1990) **Embankment on soft clays**, Ellis horwood limited, England, 67-69

Terzaghi, K (1943). **Theoretical Soil Mechanics**, John Wiley and Sons, New York, pp. 66-76

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

พรพจน์ ตันเส็ง, ธีรศักดิ์ สีนาก, วินิตย์ แหมา 2555. **อิทธิพลของระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่อกำลังต้านทานการไหลของดินระหว่างเสาเข้มรูปตัวไอ ในชั้นดินเหนียวอ่อนมาก**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17 (The 17th National Convention on Civil Engineering), GTE 042, โรงแรมเซ็นทารา แอนด์ คอนเวนชั่น เซ็นเตอร์ จ. อุดรธานี. 9 - 11 พฤษภาคม 2555., หน้า GTE042-1 – GTE042-9

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17
9-11 พฤษภาคม 2555 ณ โรงแรม เซ็นทารา แอนคอนเวนชั่นเซ็นเตอร์ อุดรธานี

อิทธิพลของระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่อกำลังต้านทานการไหลของดินระหว่างเสาเข็มรูปตัวไอในชั้นดินเหนียวอ่อนมาก

INFLUENCE OF PILE SPACING ON RESISTANCE OF FLOW BETWEEN I-SECTION PILE WALL IN VERY SOFT CLAY

พรพจน์ ตันเส็ง[1], ธีรศักดิ์ สีนาก[2] วินิตย์ แหมา[3]

[1] สาขาวิศวกรรมโยธา ม. เทคโนโลยีสุรนารี (pornpot@sut.ac.th)
[2] สาขาวิศวกรรมโยธา ม. เทคโนโลยีสุรนารี (jane_ksr@hotmail.com)
[3] สำนักงานทางหลวงชนบทจังหวัดสุโขทัย สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 9 กรมทางหลวงชนบท
(winit_haema@yahoo.co.th)

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบแบบจำลองกายภาพแบบย่อส่วนของเสาเข็มตัวไอที่เรียงต่อเนื่องกันเป็นกำแพงกันดิน เพื่อยืนยันกลไกการวิบัติเชิงทฤษฎีที่ยังไม่มีการยืนยันด้วยการทดสอบ โดยทำการทดสอบกับดินเหนียวอ่อนมากคงสภาพคุณภาพสูงที่ได้จากการขุดเปิดหน้าดินแล้วเก็บตัวอย่างมาทดสอบในบริเวณใกล้เคียงกับหลุมเปิดหน้าดินนั้น เพื่อรักษาคุณสมบัติของดินให้ใกล้เคียงกับธรรมชาติมากที่สุด การทดสอบเป็นแบบไม่ระบายน้ำ และอยู่ในสภาวะความเครียดบนระนาบ โดยสัดส่วนระหว่างระยะห่างของช่องว่างต่อความกว้าง (S_g / B)เท่ากับ 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 , 1.2 , 1.6 ,2.0 ,2.5 และ 3.0 ระหว่างการทดสอบได้ถ่ายรูปแบบจำลองที่ได้ทำเครื่องหมายไว้บนตัวอย่างดิน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า กลไกการวิบัติที่เกิดขึ้นจริงนั้นแตกต่างจากกลไกการวิบัติที่สมมุติไว้เดิม และอัตราส่วนระหว่างแรงต้านทานต่อแรงดันดินประลัยต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (P_h / S_u) มีแปรผกผันกับ S_g / B โดยมีสมการอยู่ในรูปของไฮเพอร์โบลา และเมื่อเปรียบเทียบกับเสาเข็มกลมแล้ว เสาเข็มตัวไอจะมีค่า P_h / S_u ที่ต่ำกว่า เนื่องจากขนาดของอาร์คที่เกิดขึ้นและสภาพของจุดรองรับอาร์คที่ต่างกัน งานวิจัยนี้ทำให้สามารถออกแบบระยะห่างระหว่างเสาเข็มตัวไอได้สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงมากขึ้นกว่าทฤษฎีที่มีอยู่เดิม

คำสำคัญ : กำแพงกันดิน, เสาเข็มตัวไอ, แบบจำลองทางกายภาพ, ดินเหนียวอ่อน, งานขุดดิน

Abstract : This research verified the theoretical failure mechanism of soil between piles with reduced-scale physical model test. The very soft clay block samples were taken from large pit. The samples were prepared and tested near the pit to maintain natural state of the soil. The models were tested with undrained condition. The ratios of pile gap to pile width (S_g / B) are 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 , 1.2 , 1.6 ,2.0 ,2.5, and 3.0. The soil models were marked with beads. During the test, photos of model were recorded. The P_h / S_u from the test results are

[1] ผู้ติดต่อหลัก (Corresponding author)

lower than the theoretical value because the failure mechanisms are different. The equation can be established from the test results. The P_h / S_u of I-section pile are lower than the P_h / S_u of bored pile as the geometry of failure mechanisms are different. These results can be used for determination of appropriate spacing of I-section pile to resist flow of soil between gap.

Keywords : retaining wall, I-section pile, physical model, soft clay, excavation

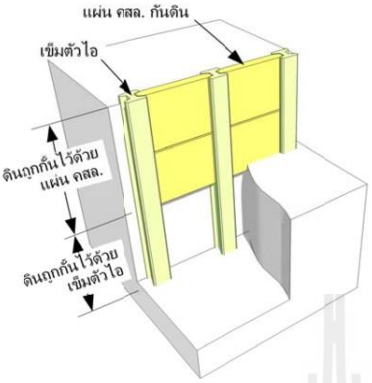
1. บทนำ

ในการก่อสร้างใต้ดินในชั้นดินเหนียวอ่อน ซึ่งพื้นที่ถูกจำกัดด้วยสิ่งปลูกสร้างข้างเคียง จำเป็นจะต้องใช้ระบบกำแพงกันดิน โดยกำแพงกันดินนั้นๆ จะต้องสามารถต้านทานแรงดันดินด้านข้างได้โดยไม่เกิดการวิบัติของกำแพงและดินที่ถูกกั้นไว้ สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งก็คือระบบกำแพงกันดินและระบบค้ำยันที่เลือกใช้จะต้องก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินในปริมาณที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับสิ่งปลูกสร้างข้างเคียง ในขณะทำการขุดดิน กำแพงกันดินที่วิศวกรส่วนใหญ่มีความเคยชินได้แก่ กำแพงกันดินเข็มพืดเหล็ก (sheet pile wall) ซึ่งมีการวิเคราะห์ออกแบบไม่ยุ่งยาก เนื่องจากเหล็กมีกำลังรับโมเมนต์ดัดคงที่ตลอดทั้งแผ่น กำแพงกันดินลักษณะอื่นได้แก่ กำแพงกันดินไดอะแฟรมวอลล์ (diaphragm wall) และกำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง (contiguous pile wall) ซึ่งเป็นกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กที่หล่อกับที่โดยใช้ดินเป็นแบบ เมื่อเปรียบเทียบด้านสติฟเนสแล้วกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีสติฟเนสที่สูงกว่ากำแพงเข็มพืดเหล็กมาก แต่ในทางกลับกันกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กแบบหล่อในที่จะมีราคาที่สูงกว่ากำแพงเข็มพืดเหล็ก

ระบบกำแพงกันดินอีกชนิดหนึ่งที่วิศวกรมีความคุ้นเคยและนิยมใช้สำหรับเป็นกำแพงป้องกันตลิ่งและกำแพงกันดินถม ได้แก่กำแพงชนิดที่เป็นเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อสำเร็จรูปมาตอกเรียงกันเพื่อเป็นกำแพงกันดิน ซึ่งจะมีราคาถูกกว่ากำแพงไดอะแฟรมวอลล์ และกำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง หน้าตัดเสาเข็มหล่อสำเร็จที่นิยมใช้ได้แก่เสาเข็มตัวไอ ดังตัวอย่างในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นการนำเอาเสาเข็มตัวไอมาตอกเรียงกันเพื่อเป็นกำแพงกันดินสำหรับงานก่อสร้างฐานรากอาคารในชั้นดินเหนียวอ่อนมาก ซึ่งสามารถป้องกันการเคลื่อนตัวของเสาเข็มได้อย่างมีประสิทธิภาพ

รูปที่ 1 การใช้เสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่องรูปตัวไอในการขุดเพื่อก่อสร้างฐานราก

ตัวอย่างการใช้งานเสาเข็มตัวไออีกรูปแบบหนึ่งคือการใช้เสาเข็มตัวไอมาตอกเรียงกันให้มีระยะห่างกว่าในรูปที่ 1 เพื่อใช้เป็นกำแพงกันดินสำหรับดินถมชิดเขตที่ดังรูปที่ 2 โดยจะใช้แผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กสอดไว้ในระหว่างเสาเข็มเพื่อป้องกันการไหลของดินลอดผ่านช่องว่างระหว่างเสาเข็ม ส่วนที่อยู่ใต้ดินลงไปจะไม่มีแผ่นคอนกรีตกั้นดิน ดังนั้นดินที่อยู่ระหว่างเสาเข็มจะถูกกั้นไว้ด้วยเสาเข็มเท่านั้น กำแพงชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้สำหรับเป็นกำแพงกันดินริมตลิ่งหรือกำแพงเพื่อกันดินในกรณีถมดินชิดเขตที่ดิน เป็นต้น

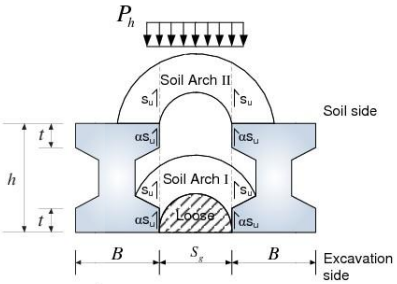


รูปที่ 2 การใช้เสาเข็มรูปตัวไอร่วมกับแผ่น คสล. เพื่อเป็นระบบกำแพงกันดิน

การใช้กำแพงกันดินเสาเข็มตัวไอเป็นกำแพงกันดินสำหรับงานขุด จะเหมาะสมมากกับชั้นดินที่เป็นดินเหนียว เนื่องจากกำแพงเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่องไม่เป็นกำแพงที่ทึบน้ำ น้ำและดินสามารถไหลผ่านซอกเสาเข็มที่ไม่ชนกันจนสนิทได้ แต่ดินเหนียวนั้นมีกำลังต้านทานต่อแรงเฉือนและมี cohesion ที่ทำให้ดินไม่ไหลออกมาตามซอกเสาเข็ม ในกรณีของดินเหนียวที่มีความชื้นน้ำได้ต่ำ ดินที่กักอยู่ระหว่างซอกของเสาเข็มจะไม่ไหลออกมาเหมือนกับกรณีของทรายที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน แต่อย่างไรก็ตามดินเหนียวที่ถูกกักอยู่ระหว่างซอกของเสาเข็มนั้นจะต้องมีกำลังต้านทานต่อแรงดันดินได้ ในปัจจุบันยังไม่มีวิธีคำนวณหรือข้อกำหนดการออกแบบใดๆ ระบุถึงวิธีการคำนวณระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่เหมาะสมที่จะทำให้ดินไม่ไหลออกมาระหว่างเสาเข็ม จะมีเพียงการคำนวณโดยการสมมุติรูปแบบการวิบัติขึ้นมาโดยไม่ได้มีการทดสอบเพื่อยืนยันรูปแบบการวิบัติ ดังนั้นในบทความนี้จึงจะได้กล่าวถึงการวิเคราะห์กำลังต้านทานของดินที่อยู่ระหว่างซอกเสาเข็ม และการทดสอบเพื่อพิสูจน์รูปแบบการวิบัติที่มีผู้นำเสนอไว้ เพื่อใช้เป็นมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบกำแพงเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่องรูปตัวไอต่อไป

2. ทฤษฎี และงานวิจัยเกี่ยวกับการทดสอบโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ

ในการวิเคราะห์กำลังต้านทานต่อการไหลของดินนั้น [1] ได้เสนอแนวคิดเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับกำลังต้านทานต่อแรงดันดินระหว่างซอกเสาเข็มโดยสมมุติกลไกการวิบัติของดินที่ถูกกักไว้ระหว่างซอกของเสาเข็ม (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 แสดงสะพานดินระหว่างซอกเสาเข็มและระนาบวิบัติของดินสำหรับเสาเข็มตัวไอ [1]

แนวการวิบัติจะพิจารณาให้เป็นระนาบเฉือนผ่านส่วนอาร์คหมายเลข 1 และอาร์คหมายเลข 2 และกำลังต้านทานต่อแรงดันดินประลัย P_h จะคิดว่าหน่วยแรงต้านทานที่เกิดขึ้นบนระนาบวิบัติมีค่าเท่ากับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน S_u ส่วนของดินที่เป็นผิวสัมผัสระหว่างเสาเข็มคอนกรีตกับดินจะพิจารณาลดค่าโดยใช้เฟคเตอร์การยึดเกาะ α ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ที่อยู่ในพจน์ของ P_h / S_u ได้ดังสมการที่ 1

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

S_u = กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ
P_h = แรงดันดินด้านข้าง (Lateral earth pressure)
S_g = ระยะห่างระหว่างเสาเข็มจากขอบถึงขอบ
B = ความกว้างของเสาเข็มรูปตัวไอ
h = ความลึกของเสาเข็มรูปตัวไอ
t = ความหนาของปีกเสาเข็มรูปตัวไอ

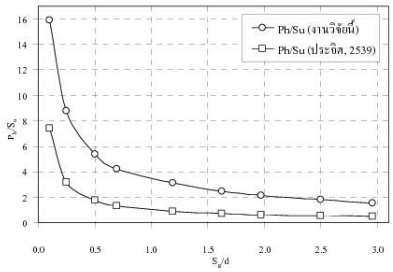
α = เฟคเตอร์การยึดเกาะตัวระหว่างดินกับผิวเสาเข็มคอนกรีต

จากสมการที่ 1 จะเห็นได้ว่ากำลังต้านทานต่อแรงดันดินที่กระทำระหว่างเสาเข็มนั้นจะขึ้นกับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ, ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม, ความกว้าง, ความลึก, และความหนาของปีกเสาเข็ม สมการจะอยู่ในรูปของไฮเปอร์โบลา โดยถ้าใช้เสาเข็มขนาดเท่ากัน ค่า P_h / S_u จะแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างชอกเสาเข็ม

จากแนวคิดเชิงทฤษฎีนี้เป็นที่น่าสนใจว่า จะเกิดสภาวะเช่นนี้ขึ้นจริงในสภาวะใช้งานหรือไม่ และค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 1 เหมาะสมกับการใช้งานแล้วหรือยัง ด้วยเหตุนี้จึงได้มีแนวคิดที่จะทดสอบโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ กับดินเหนียวอ่อน ซึ่งจะเป็นข้อมูลสำหรับปรับปรุงและพัฒนาแนวคิดเชิงทฤษฎีนี้ต่อไป

ซึ่งวิธีการทดสอบโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพนี้ได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษากำลังต้านทานต่อการไหลระหว่างชอกเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่องโดย [2], [3] ในการทดสอบได้ใช้วิธีเก็บตัวอย่างดินเหนียวอ่อนธรรมชาติโดยการขุดเปิดหน้าดิน และทำการทดสอบในบริเวณที่เก็บตัวอย่าง โดยใช้ระยะเวลาระหว่างการเก็บตัวอย่างจนถึงการทดสอบสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทำให้ได้ตัวอย่างที่ถูกรบกวนต่ำมาก และดินยังคงสภาพน้ำในดินไว้เหมือนกับสภาพธรรมชาติมากที่สุด ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังต้านทานแรงดันดินที่เกิดขึ้นจริงนั้นสูงกว่ากำลังต้านทานที่ได้จากแนวคิดเชิงทฤษฎีดังรูปที่ 4 และกลไกการวิบัติที่พบในแบบจำลองทางกายภาพนั้นแตกต่างจากกลไกการวิบัติที่สมมุติไว้ในการพัฒนาสมการเชิงทฤษฎี

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงได้นำมาใช้เป็นต้นแบบสำหรับงานวิจัยนี้



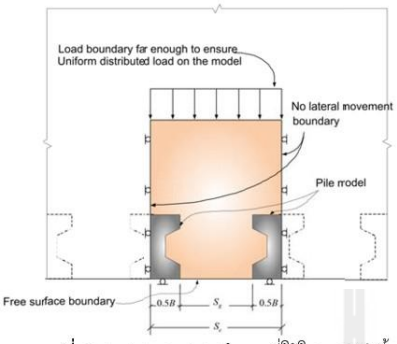
รูปที่ 4 เปรียบเทียบแรงดันดินวิบัติที่ทำนายโดยใช้สมการของ [1] กับแรงดันดินวิบัติจากการทดสอบ [2]

3. วิธีทดลองวิจัย

ในการทดสอบโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพ โดยใช้พื้นที่เก็บตัวอย่างดินในบริเวณ ตำบลบางตีนเป็ด อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา ซึ่งดินในบริเวณนี้เป็นชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีอายุไม่นานนัก ดังนั้นจึงพบชั้นดินเหนียวอ่อนในระดับลึกลงไปจากชั้นเปลือกดินเหนียว (weathered clay crust) ประมาณ 0.5 ถึง 1.0 เมตร

ในงานวิจัยได้พิจารณาเก็บตัวอย่างดินเหนียวอ่อนแบบคงสภาพที่คุณภาพสูง ทำให้ได้คุณสมบัติของดินใกล้เคียงกับสภาพธรรมชาติมากที่สุด ซึ่งจะดีกว่าการทดสอบกับตัวอย่างที่สร้างขึ้นมาใหม่ (Remold soil sample) การขุดเปิดหน้าดินจะขุดจนถึงความลึกประมาณ 1.8 เมตร และเก็บตัวอย่างโดยใช้กล่องเหล็กบางขนาด 30×25×10 เซนติเมตร กดลงในดินและตัดด้านใต้ของตัวอย่างให้ขาดจากชั้นดิน จากนั้นยกตัวอย่างขึ้นมากตัดแต่งลงในแบบทดสอบ

ในการทดสอบจะจำลองเสาเข็มเฉพาะส่วนที่เป็นช่องว่างระหว่างเสาเข็ม และเนื่องจากความสมมาตรจึงจำลองโดยใช้ระยะระหว่างกึ่งกลางของเสาเข็ม ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ขอบเขตของแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้

โดยด้านข้างของแบบจำลองจะอยู่ตรงกับกึ่งกลางของเสาเข็มและรัดไว้ด้วยแผ่นเหล็กที่เสริมให้มีความแกร่ง (rigid) เพื่อจำลองขอบเขตทางกายภาพที่ไม่มีการเคลื่อนของดินไปทางด้านข้างของเสาเข็มต้นที่อยู่ชิดกัน ในการทดสอบจะตั้งตัวอย่างให้อยู่ในแนวดิ่งเพื่อให้สะดวกต่อการทดสอบ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในดินเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกนี้น้อยมากเมื่อเทียบกับแรงต้านทานของดิน ก่อนตั้งตัวอย่างขึ้นจะเรียงเม็ดลูกปัดขนาดเล็กบนผิวหน้าของดิน และปิดผิวหน้าของตัวอย่างด้วยแผ่นอะคริลิกใสที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร

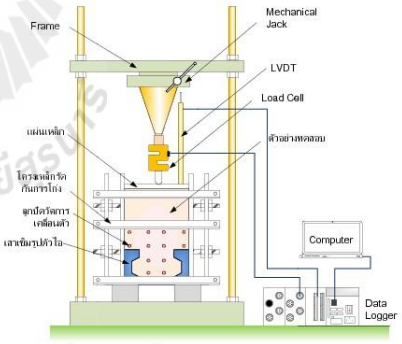
ก้อนตัวอย่างและแบบจะทาไว้ด้วยไขที่ทำจากวัสดุปิโตรเลียม (petroleum grease) เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างดินและแบบ โดยแรงเสียดทานดังกล่าวนี้น้อยมากเมื่อเทียบกับแรงต้นที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำระหว่างการกด โดยจะเห็นได้จากเมื่อวางดินบนแผ่นอะคริลิกที่ทาไขไว้แล้ว ดินจะสิ่นไหลได้โดยมีแรงเสียดทานที่น้อยมาก และไม่เกาะติดกับแผ่นอะคริลิกหรือแผ่นเหล็กที่ใช้เป็นแบบเลย

เพื่อให้ความเครียดที่เกิดขึ้นในแบบจำลองเป็นความเครียดในระนาบ (plane strain) จะรัดแผ่นอะคริลิกไว้ด้วยโครงสร้างเหล็กฉากเพื่อให้ไม่เกิดความเครียดในแนวตั้งฉากกับระนาบ (normal strain) ของแบบจำลอง ความเครียดในขณะทำการทดสอบจะเกิดขึ้นในระนาบเท่านั้น แบบจำลองเสาเข็มนั้นจะรองรับไว้ด้วยแท่นรองที่แข็งและไม่ยุบตัว ด้านบนของตัวอย่างจะเป็นแผ่นเหล็กหนาที่จะใช้กระจายแรงกดอย่างสม่ำเสมอต่อตัวอย่าง ความสูงของก้อนตัวอย่างจะสูงพอที่จะทำให้เกิดแรงกระทำสม่ำเสมอต่อตัวอย่างและสูงพอที่จะทำให้แนวการวิบัติเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

ในการทดสอบจะไม่มีการปล่อยให้ตัวอย่างคายน้ำเพื่อให้ดินอยู่ในสภาวะไม่ระบายน้ำ ซึ่งทำให้สามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบกับทฤษฎีได้

ในการทดสอบจะใช้ระยะห่างระหว่างเสาเข็มต่อความกว้างของเสาเข็ม (S_g / B) เท่ากับ 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 , 1.2 , 1.6 ,2.0 ,2.5 และ 3.0 เพื่อให้ครอบคลุมระยะที่นิยมใช้กันในทางปฏิบัติ โดยสัดส่วนของเสาเข็มจะใช้ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 396-2549

รูปที่ 6 เป็นการจัดเตรียมเครื่องมือเพื่อทำการทดสอบ โดยการกดทดสอบจะใช้แม่แรงแบบมือหมุนเพื่อความสะดวกในการทดสอบในสนาม แรงกดจะอ่านโดยใช้ load cell และการเคลื่อนตัวจะอ่านโดยใช้ LVDT ข้อมูลจะบันทึกโดย data lagger ซึ่งต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงบนบนหน้าจอ



รูปที่ 6 การติดตั้งอุปกรณ์กดทดสอบและตัวอย่างเข้าด้วยกัน

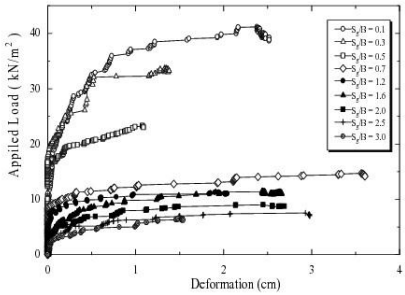
ในระหว่างการทดสอบจะถ่ายภาพไว้เป็นระยะโดยตั้งระยะห่างจากแบบจำลองที่เหมาะสมที่จะไม่เกิดการบิดของรูป และถ่ายโดยใช้ขาตั้งกล้องเพื่อให้รูปถ่ายทั้งหมดมีจุดอ้างอิงเดียวกันสำหรับการประมวลผลภาพถ่ายเชิงซ้อนในขั้นตอนการวิเคราะห์ผล

ในการเก็บตัวอย่างเพื่อมาทดสอบในแบบจำลองจะทำการเก็บตัวอย่างดินจุดเดียวกันมาทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพได้แก่ Liquid limit, plastic limit, และ natural water content; ทดสอบคุณสมบัติทางกลได้แก่ unconfined compressive strength; ทดสอบเพื่อหาค่าเฟคเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินเหนียวกับคอนกรีต α โดยใช้การทดสอบแบบเฉือนตรง (direct shear test)

4. สรุปวิเคราะห์ผล

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดินตัวอย่าง พบว่าดินมีค่า liquid limit เท่ากับ 59 เปอร์เซ็นต์, plastic limit เท่ากับ 36 เปอร์เซ็นต์ และมี natural water content เท่ากับ 98 เปอร์เซ็นต์ และเฟคเตอร์การยึดเกาะแบบไม่ระบายน้ำ α เท่ากับ 0.9

รูปที่ 7 เป็นผลการทดสอบในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อแบบจำลองกับการเคลื่อนตัวของตัวอย่างในแบบจำลอง จะเห็นได้ว่าตัวอย่างจะต้านทานแรงกดเพิ่มขึ้นในช่วงแรกซึ่งเห็นได้จากเส้นโค้งที่มีความชันและเมื่อออกแรงกระทำต่อแบบจำลองเพิ่มขึ้นเส้นโค้งมีความชันลดลง และเมื่อตัวอย่างในแบบจำลองวิบัติ เส้นโค้งเกือบอยู่ในแนวราบ และเมื่อพิจารณาในแง่ของระยะห่างระหว่างเสาเข็มจะเห็นได้ว่าแรงต้านทานต่อการกดจะแปรผกผันกับอัตราส่วน S_g / B โดยกำลังต้านทานต่อแรงกดที่ S_g / B เท่ากับ 0.1 ต่อกำลังต้านทานต่อแรงกดที่ S_g / B เท่ากับ 3.0 จะต่างกัน 6.3 เท่า

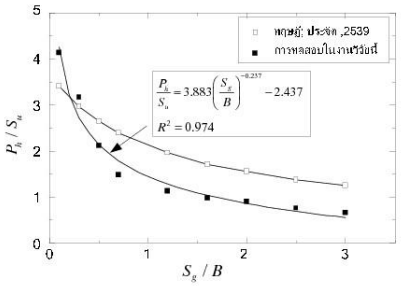


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันดินที่กระทำต่อแบบจำลองกับการเคลื่อนตัวของดิน

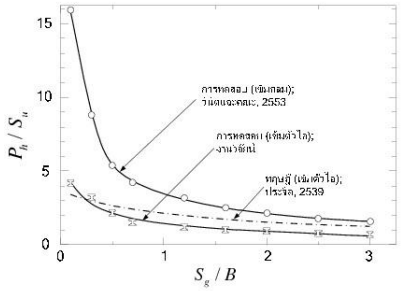
และเมื่อนำแรงต้านทานประลัยมาทำการ normalized ด้วยกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ จะได้เป็นอัตราส่วน P_h / S_u ซึ่งเมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง P_h / S_u กับอัตราส่วนระยะห่างของเสาเข็ม S_g / B จะได้ดังรูปที่ 8 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากำลังต้านทานต่อแรงดัน, P_h / S_u แปรผกผันกับอัตราส่วนระยะห่าง S_g / B โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2

$$\frac{P_h}{S_u} = 3.883\left(\frac{S_g}{B}\right)^{-0.237} - 2.437 \qquad (2)$$

สมการที่ 2 มีความสัมพันธ์แบบไฮเพอร์โบลาเหมือนกับสมการที่เสนอโดย [1] แต่เมื่อได้เปรียบเทียบค่าที่ได้จากทฤษฎีแล้วพบว่า ค่า P_h / S_u ที่ได้จากการทดสอบในงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีเกือบทั้งหมด มีเพียงช่วงที่ มีค่าต่ำกว่า 0.2 เท่านั้นที่ผลการทดสอบมีค่า P_h / S_u สูงกว่าค่าที่ได้จากทฤษฎี ที่ค่า S_g / B ที่ได้จากการทดสอบแตกต่างจากค่าทางทฤษฎีเนื่องจาก ค่าทางทฤษฎีนั้นไม่ได้ถูกพัฒนามาจากกลไกการวิบัติที่เกิดขึ้นจริง และจากภาพถ่ายกลไกการวิบัติจากการทดสอบ จะแตกต่างจากกลไกการวิบัติทางทฤษฎีที่สมมุติขึ้นมาโดยสิ้นเชิงดังรูปที่ 11



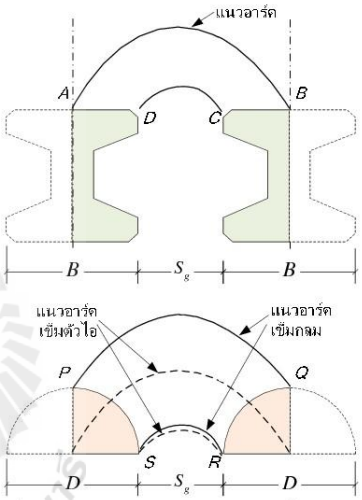
รูปที่ 8 กราฟการเปรียบเทียบ P_h / S_u กับ S_g / B ของผลการทดสอบโดยใช้แบบจำลองทางกายภาพกับค่าที่ได้จากแนวคิดเชิงทฤษฎีของ [1]



รูปที่ 9 กราฟการเปรียบเทียบ P_h / S_u กับ S_g / B ของเสาเข็มกลมและเสาเข็มรูปตัวไอ

เมื่อเปรียบเทียบกำลังต้านทานของดินที่อยู่ระหว่างช่องว่างของเสาเข็มตัวไอในงานวิจัยนี้ กับเสาเข็มกลมที่ได้จากการทดสอบโดย [2] จะได้ดังรูปที่ 9 ซึ่งพบว่ากำลังต้านทานของเสาเข็มกลมจะสูงกว่ากำลังต้านทานของเข็มรูปตัวไออย่างมีนัยยะสำคัญ เหตุผลที่เป็นเช่นนี้อาจเกิดเนื่องจากในกรณีของเสาเข็มกลม แนวอาร์คที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่กว่าแนวอาร์คที่เกิดขึ้นในกรณีของเสาเข็มตัวไอ เหตุผลอีกประการคือเสาเข็มรูปวงกลมมีฐานรองรับอาร์คที่สามารถก่อให้เกิดแรงต้านต่ออาร์คได้ดีกว่าเนื่องจากลักษณะความโค้งของเสาเข็มดังจะเห็นได้ในรูปที่ 10

แต่ในการใช้งานถ้าพิจารณาที่ความกว้างของเสาเข็มที่เท่ากัน เสาเข็มรูปตัวไอจะมีสติฟเนสและกำลังต้านทานต่อโมเมนต์ดัดที่สูงเสาเข็มกลม ดังนั้นในการพิจารณาวิเคราะห์ออกแบบระยะห่าง นอกจากการป้องกันการไหลออกของดินแล้ว ควรพิจารณาป้องกันการวิบัติของโครงสร้างกำแพงเนื่องจากแรงดันดินที่กระทำต่อกำแพงด้วย

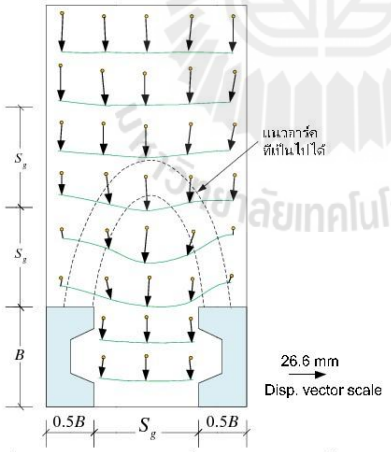


รูปที่ 10 เปรียบเทียบลักษณะรูปทรงเรขาในกรณีของเสาเข็มตัวไอ กับเสาเข็มวงกลม

จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายลักษณะการวิบัติของมวลดินที่ถูกกักอยู่ระหว่างเสาเข็มจะพบเห็นรอยแยกในมวลดินโดยแนวการเฉือนมีลักษณะเป็นรูปสะพานโค้งรูปที่ 11 แนวโค้งที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นอาร์คเหมือนกับรูปที่ 10 แต่ไม่พบการวิบัติของตัวอย่างแบบเฉือนผ่านอาร์คดังที่เสนอโดยประจิต (2539) แต่อย่างใด โดยลักษณะการวิบัติที่พบเป็นเหมือนการไหลของวัสดุที่มีความหนืดผ่านช่องเปิด

รูปที่ 11 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่างที่สังเกตุพบ (ระยะ S_g / B = 1.2)

และเมื่อนำการเคลื่อนตัวของลูกบัดมาวิเคราะห์เป็นภาพเชิงซ้อนจะได้ดังรูปที่ 12 ซึ่งจะเห็นว่าดินที่ติดกับแผ่นเหล็กกระจายแรงกดมีการเคลื่อนตัวเท่ากัน และการเคลื่อนตัวของดินที่ตรงกับตำแหน่งของเสาเข็มจะน้อยกว่าการเคลื่อนตัวบริเวณช่องเปิด และไม่พบว่ามีการเฉือนในแนวดิ่งเนื่องจากหากมีการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง ระยะการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งในแนวตั้งเดียวกันจะต้องเคลื่อนตัวด้วยปริมาณที่เท่ากัน ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการวิบัติในภาพที่ 10



รูปที่ 12 เวคเตอร์ของการเคลื่อนตัวของมวลดินตั้งแต่เริ่มทดสอบจนวิบัติที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพเชิงซ้อน (ระยะ S_g / B = 0.5)

5. สรุป

จากผลการวิจัยสามารถสรุปและเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไปได้ดังนี้

- ในกรณีของเสาเข็มตอกเรียงต่อเนื่องรูปตัวไอ กำลังต้านทานต่อแรงกดในเทอม P_h / S_u ที่ได้จากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพ โดยใช้ตัวอย่างดินเหนียวแบบคงสภาพคุณภาพสูง แปรผกผันกับอัตราส่วนระหว่างช่องว่างระหว่างเสาเข็มต่อความกว้างของเสาเข็ม S_g / B โดยมีความสัมพันธ์อยู่ในรูปไฮเพอร์โบลาดังสมการ

$$\frac{P_h}{S_u} = 3.883\left(\frac{S_g}{B}\right)^{-0.237} - 2.437$$

ซึ่งสมการนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่จะไม่ทำให้ดินไหลออกตามช่องว่างระหว่างเสาเข็มเนื่องจากแรงดันดินได้

- เมื่อเปรียบเทียบกับสมการเชิงทฤษฎี แล้วค่า P_h / S_u ที่ได้จากการทดสอบให้ค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากทฤษฎี ยกเว้นช่วงที่ S_g / B มีค่าต่ำกว่า 0.2 ที่ค่า P_h / S_u ที่ได้จากการทดสอบจะสูงกว่าค่าที่ได้จากทฤษฎี

- รูปแบบการวิบัติที่สังเกตุได้เมื่อตัวอย่างทดสอบถูกกดจนวิบัติจะเป็นรอยแตกในดินที่มีแนวโน้มเป็นอาร์คซึ่งสอดคล้องกับกลไกการวิบัติที่เสนอโดยประจิต แต่อย่างไรก็ตาม แนวการวิบัติที่เฉือนผ่านอาร์คนั้นไม่ได้เป็นไปตามที่เสนอไว้ในทฤษฎี

- เวคเตอร์การเคลื่อนตัวของมวลดินแสดงให้เห็นว่า ดินมีการเคลื่อนตัวสูงในบริเวณช่องว่างระหว่างเข็มและการเคลื่อนตัวจะลดลงบริเวณเสาเข็ม และดินจะเคลื่อนตัวด้วยปริมาณที่เท่ากันที่ระยะ 1.5 เท่าของระยะช่องว่างระหว่างเสาเข็ม

- กำลังต้านทานต่อแรงดันดินระหว่างเสาเข็มตัวไอจะต่ำกว่ากรณีของเสาเข็มกลมเนื่องจากรูปร่างของเสาเข็มกลมจะทำให้เกิดอาร์คที่สมบูรณ์และมีขนาดที่ใหญ่กว่า

- จากผลการวิจัยซึ่งเป็นรูปแบบการวิบัติที่เกิดขึ้นจริงนี้สามารถนำไปใช้สร้างสมการรูปแบบปิด (close form) ต่อไปได้

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบคุณ คุณพงศธร บุญที ในการเป็นผู้ช่วยวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณ คุณปัญญา และคุณสุพจน์ ต้นเส็งที่ให้ความอนุเคราะห์จัดหาแปลงที่ดินสำหรับงานวิจัยนี้

7. อ้างอิง

[1] ประจิต จิรัปปภา. กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องกับงานก่อสร้างใต้ดินในกรุงเทพฯ. งาก่อสร้างใต้ดิน 39. 2539. กรุงเทพมหานคร.

[2] วินิตย์ แหมา และ พรพจน์ ต้นเส็ง (2553). อิทธิพลของระยะห่างของเสาเข็มต่อแรงดันดินของกำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15, จ. อุบลราชธานี 12-14 พฤษภาคม 2553

[3] พรพจน์ ต้นเส็ง และวินิตย์ แหมา (2554). กลไกการวิบัติของดินที่ถูกกักอยู่ระหว่างช่องว่างของกำแพงเสาเข็มเจาะเรียงต่อเนื่อง. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16, จ. ชลบุรี. 18-20 พฤษภาคม 2554

[4] มอก.396-2549(2550),มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เสาเข็มคอนกรีตอัดแรงหล่อสำเร็จ, ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 3568 (พ.ศ. 2549)

ประวัติผู้เขียน

นายธีรศักดิ์ สีนาก เกิดวันศุกร์ที่ 19 มิถุนายน พ.ศ. 2530 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี ในปีการศึกษา 2552 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา ในปีการศึกษา 2552 ขณะที่ทำการศึกษาในระดับปริญญาตรีในภาคการเรียนสุดท้ายได้ร่วมสหกิจศึกษากับ บริษัท กรุงเทพเอ็นยิเนียริ่งคอนซัลแตนท์ จำกัด เป็นระยะเวลา 4 เดือนและเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2553 และมีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จำนวน 1 เรื่องในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17 (the 17th national convention on civil engineering), GTE 042

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี