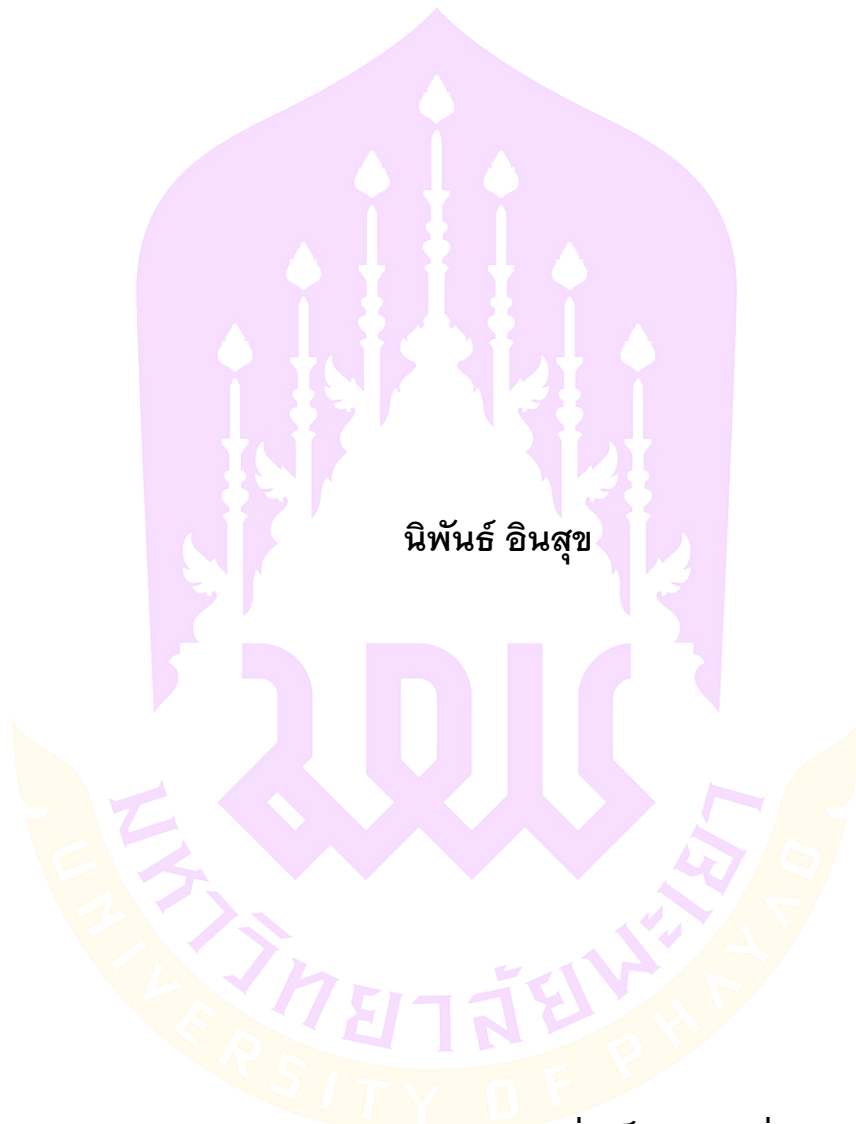


แบบจำลองย่อส่วนสามมิติสำหรับค้นทางบนชั้นดินอ่อนที่เสริมกำลังด้วย  
เสาเข็ม



วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
มีนาคม 2564  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

แบบจำลองย่อส่วนสามมิติสำหรับค้นทางบนชั้นดินอ่อนที่เสริมกำลังด้วยเสาเข็ม



วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มีนาคม 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

3D PHYSICAL MODELING FOR EMBANKMENT ON SOFT SOIL REINFORCED BY PILES



A Thesis Submitted to University of Phayao  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Master of Engineering Degree in Civil Engineering  
March 2021  
Copyright 2020 by University of Phayao

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

แบบจำลองย่อยส่วนสามมิติสำหรับคันทางบนชั้นดินอ่อนที่เสริมกำลังด้วยเสาเข็ม

ของ นิพนธ์ อินสุข

ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ของมหาวิทยาลัยพะเยา

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรกฎ นุสิทธิ์)

ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุริยาวัช ประอ้าย)

อาจารย์บัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยพะเยา

(ดร. ปาลีณี สุमितสุวรรณค์)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ)

**เรื่อง:** แบบจำลองยอลส่วนสามมิติสำหรับคันทางบนชั้นดินอ่อนที่เสริมกำลังด้วยเสาเข็ม  
**ผู้วิจัย:** นิพนธ์ อินสุข, วิทยานิพนธ์: วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, 2563  
**อาจารย์ที่ปรึกษา:** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุริยาวัชร ประอ้าย  
**คำสำคัญ** ชั้นถ่ายแรง, แรงวัฏจักร, แรงคงที่

#### บทคัดย่อ

การเสริมกำลังดินอ่อนที่ด้วยเสาเข็มเป็นวิธีการหนึ่งในการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันและลดการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากโครงสร้าง กรณีภายใต้การให้แรงแบบวัฏจักรในโครงสร้างมักพบในทางปฏิบัติซึ่งต้องใช้ความรู้และเข้าใจในเทคนิคนี้ภายใต้การให้แรงแบบวัฏจักรและการให้แรงแบบคงที่ในบทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการศึกษาทดลองที่ดำเนินการในห้องปฏิบัติการขนาด 1g เพื่อจำลองดินอ่อนที่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มขึ้นภายใต้การให้แรงแบบวัฏจักรซึ่งทำการทดสอบกับคันทางหรือชั้นถ่ายแรง (LTP) 2 ประเภท ได้แก่ ทราบและกรวด ในการศึกษาพารามิเตอร์ที่ทำการทดลองกับแบบจำลองทางกายภาพนี้ทำให้เราสามารถศึกษาอิทธิพลการให้แรงแบบวัฏจักรที่พื้นผิวของชั้นถ่ายแรง โดยผลการทดลองเน้นประสิทธิภาพของการถ่ายแรงลงสู่เสาเข็มและการทรุดตัวที่เกิดขึ้นของดินอ่อนในระหว่างการให้แรงแบบวัฏจักร



**Title:** 3D PHYSICAL MODELING FOR EMBANKMENT ON SOFT SOIL REINFORCED BY PILES  
**Author:** Nipun Insoog, Thesis: M.Eng. (Civil Engineering), University of Phayao, 2020  
**Advisor:** Assistant Professor Dr. Suriyayut Pra-ai  
**Keyword** Rigid inclusions, soft soil reinforcement, efficiency, cyclic loading

#### ABSTRACT

Soft soil reinforced by rigid inclusion is one of the methods to homogenize and reduce the settlements of earth structures. Various cases of structures under cyclic loading are commonly encountered in the practice, which requires the understanding of this technique under cyclic and/or dynamic loading. This paper is aimed to present a series of experimental studies performed at 1g laboratory scale to simulate soft soil reinforced by rigid inclusions subjected to cyclic loading. Tests were performed with two kinds of embankment or load transfer platform (LTP), i.e., sand and gravel. The parametric study performed with this physical model allowed us to study the influence of the sequence of cyclic loading at the surface of the load transfer platform. The experimental results highlighted the efficiency of load transfer and the accumulation of the settlements during the cyclic loading.



## กิตติกรรมประกาศ

ในงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุริยาวัช ปรธายาย ที่ได้สละเวลาอันมีค่าแก่ผู้วิจัยเพื่อให้คำปรึกษาและแนะนำตลอดจนตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างยิ่งจนงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้จากใจจริงและขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กรกฎ นุสิทธิ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำช่วยเหลือตรวจแก้ไขและปรับปรุงงานวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ และขอขอบพระคุณ ดร. ปาณินี สุमितสุวรรณค์ ที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างยิ่งในการให้คำแนะนำการทำเล่มวิทยานิพนธ์ สุดท้ายนี้ขออุทิศความดีที่มีในการศึกษาวิทยานิพนธ์นี้แด่บิดามารดาครอบครัวผู้ซึ่งสนับสนุนในทุกด้านและกำลังใจจากมิตรแท้ทุกท่าน

นิพนธ์ อิ้นสุข



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์งานวิจัย .....	3
ขอบเขตการศึกษา.....	3
ประโยชน์ที่ได้รับ .....	3
ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง .....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
การศึกษากลไกการถ่ายแรง (Soil Arching).....	5
งานวิจัยการทดลองทางกายภาพที่ผ่านมา .....	13
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย .....	25
ขั้นตอนการเตรียมวัสดุและอุปกรณ์.....	25
แบบจำลองกายภาพแบบ 3มิติ (3D Physical Model) .....	25
การเตรียมส่วนผสมดินตัวอย่าง (Soft soil) .....	27
การเตรียมวัสดุของดินคันทาง (Embankment) .....	28
วิธีผสมดินอ่อน (Soft soil) .....	28

การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test).....	29
การเตรียมตัวอย่าง.....	30
วิธีเตรียมตัวอย่าง .....	30
วิธีไปรยทรายคั่นทาง .....	31
วิธีตั้งค่าการให้แรงของตัวอย่างที่ใช้ทรายเป็นดินทับหน้า .....	32
วิธีติดตั้งแผ่นใยสังเคราะห์ Geotextile และ Geogrid .....	32
ทำการทดลองโดยการเริ่มใส่แรงในตัวอย่าง (ทราย) .....	33
บทที่ 4 ผลการทดลอง .....	36
เปรียบเทียบการเสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์และแบบไม่เสริมกำลัง .....	39
เปรียบเทียบการเสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ .....	40
บทที่ 5 บทสรุปผลการวิจัย .....	42
บรรณานุกรม .....	43
ประวัติผู้วิจัย .....	46



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 สรุปผลการทดลองที่ผ่านมา.....	23
ตาราง 2 กรลดขนาดของแบบจำลองทางกายภาพ.....	27
ตาราง 3 แผนการทดสอบ.....	34
ตาราง 4 คุณสมบัติของแผ่นใยสังเคราะห์.....	35



## สารบัญภาพ

หน้า

ภาพ 1 แสดงดินที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยเทคนิค (rigid inclusions) โดย Heitz et al (2008)...	2
ภาพ 2 แสดงแนวโค้งรับแรง (Arching Effect) โดย Karl Terzaghi (1965).....	6
ภาพ 3 แสดงแนวโค้ง (Arching Shell) โดย Hewlett and Randolph (1988) .....	7
ภาพ 4 แสดงแบบจำลอง 2 มิติ Chen Yun-min et al (2008).....	8
ภาพ 5 แสดงแนวโค้งรับแรงในคันดินที่เสริมกำลังด้วยเสาเข็ม Chen Yun-min et al.....	9
ภาพ 6 แสดงการทดลองประตูกโดยใช้ดินเสมือนหรือแท่งเหล็ก Jenck et al (2007).....	10
ภาพ 7 แสดงประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับอัตราส่วนพื้นที่ Jenck et al (2007) .....	10
ภาพ 8 แสดงแบบจำลองแนวเส้นโค้ง (Arching Model) ของ Hewlett and Randolph (1988) ..	11
ภาพ 9 แสดงแบบจำลองเส้นแนวโค้งศูนย์กลาง (Concentric Arched Model) ที่ได้รับเสริมกำลังด้วยวัสดุใยสังเคราะห์ ของ Hewlett & Randolph (1988).....	12
ภาพ 10 แสดงทิศทางการกระจายตัวของความเค้น (ก):ชั้นทรายผสมปูนซีเมนต์ (ข):ชั้นทรายบดอัด ของ กฤตบุญ ตัณฑโกศล และคณะ (2018) .....	13
ภาพ 11 แสดงเครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) โดย Baudoin et al 2010.....	14
ภาพ 12 แสดงกลไกการถ่ายโอนแรงของดินคันทางภาพระยะห่าง , (b) เส้นผ่านศูนย์กลางและเสาเข็ม ของ Filz et al (2006).....	16
ภาพ 13 แสดงการเสริมกำลังดิน : แบบไม่มีวัสดุแผ่นใยสังเคราะห์(ซ้าย) และมีวัสดุแผ่นใยสังเคราะห์(ขวา) ของ Blanc et al (2013).....	17
ภาพ 14 แสดงรูปแผนผังและลักษณะโดยทั่วไปของอุปกรณ์ถาดเคลื่อนที่ (mobile tray) ของ Blanc et al (2013).....	17
ภาพ 15 แสดงแรงที่ถูกแบ่งออกเป็นสามส่วนในการวิเคราะห์ของ Van Eekelen et al (2012)	19
ภาพ 16 แสดงแบบจำลองการทดลอง 3 มิติ ของ Heitz et al (2008).....	19
ภาพ 17 แสดงการแรงแบ้วจักรที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองของ Heitz et al (2008).....	20

ภาพ 18 แสดงแบบจำลองกายภาพ 3 มิติของ Dinh et al (2010).....	21
ภาพ 19 แบบจำลองกายภาพ 3 มิติ.....	26
ภาพ 20 ขั้นตอนการเตรียมเครื่องมือ: (A) การติดตั้งแรงเซนเซอร์บนหัวเสาเชื่อมกับติดตั้ง เซนเซอร์วัดระยะการทรุดตัวของดินอ่อน, (B) การคาร์ิเบรทเซนเซอร์วัดระยะการทรุดตัว, (C) ตัวเหล็กเชื่อมต่อกับเซนเซอร์วัดระยะการทรุดตัว, (D) การติดตั้งพลาสติกใสทั้ง 3 ด้าน.....	26
ภาพ 21 วัสดุของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ.....	28
ภาพ 22 อัตราการผ่านและตกค้างของทรายทับหน้า ทรายผสมตัวอย่างและโฟม.....	29
ภาพ 23 อัตราการผ่านและตกค้างของทรายทับหน้า ทรายผสมตัวอย่างและโฟม.....	30
ภาพ 24 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง (ดินอ่อน).....	31
ภาพ 25 การปล่อยให้ทรายตกอย่างอิสระจนหมด.....	32
ภาพ 26 วิธีตั้งค่าการให้แรงของตัวอย่าง (A) เมื่อใส่ทรายที่ความหนา 30 เซนติเมตร, (B) ใช้ แผ่นเหล็กในการปิดทับเพื่อช่วยในการถ่ายแรงสม่ำเสมอ (C) นำถุงลมใส่จะให้แรงกับตัวอย่าง, (D) ปิดฝาให้สนิทพร้อมทำการทดสอบ.....	33
ภาพ 27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลา.....	36
ภาพ 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่เกิดบนหัวเสาเชื่อมกับเวลา.....	37
ภาพ 29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าประสิทธิภาพกับเวลา.....	38
ภาพ 30 กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงกระทำที่ใส่ลงไปในช่วงผิวดันทางกับการทรุดตัว.....	38
ภาพ 31 (A) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบนหัวเสาเชื่อมกับเวลาของตัวอย่างที่มีการ เสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์และไม่มีเสริมกำลัง (B) กราฟแสดงการทรุดตัวที่เกิดขึ้น เมื่อเทียบกับแรงกระทำที่ใส่ลงไป.....	39
ภาพ 32 (A) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบนหัวเสาเชื่อมกับเวลาของตัวอย่างที่.....	40
ภาพ 33 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับจำนวนรอบที่ทำการใส่แรงแบบวงรอบ.....	41

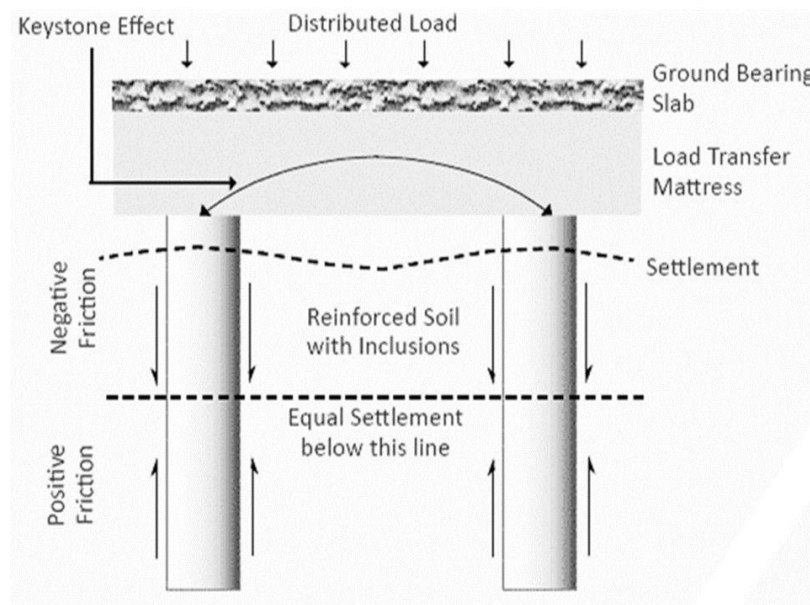
# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยของเราได้มีโครงการก่อสร้างระบบสาธารณูปโภคขนาดใหญ่ โดยมีโครงการก่อสร้างต่าง ๆ โดยเฉพาะโครงสร้างทางถนนและงานด้านระบบขนส่งสาธารณะ เช่น รถไฟฟ้า รถไฟใต้ดิน ทางหลวง บางโครงการอาจจะจำเป็นต้องก่อสร้างอยู่บนชั้นดินอ่อน ซึ่งลักษณะดินเหนียวอ่อนเป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่ไม่เหมาะสมกับการรับน้ำหนักบรรทุก เนื่องจากมีความสามารถในการรับแรงเฉือนที่ต่ำและมีการทรุดตัวที่มากเกินไป โดยปัญหาที่พบเจอ เมื่อมีการก่อสร้างบนชั้นดินเหนียวอ่อน คือการทรุดตัวของโครงสร้างและการพังทลายของชั้นดินเนื่องจากการรับแรงรวมไปถึงมีการทรุดตัวที่เกิดขึ้นมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวอ่อนเพื่อให้สามารถรองรับโครงสร้างได้อย่างมั่นคงและไม่มีการทรุดตัวเกิดขึ้น ในปัจจุบันนี้มีการใช้วิธีปรับปรุงดินมากมายหลายวิธี เช่น การเร่งการบีบอัดตัวคายน้ำ (Pre-loading), การเสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ (Geosynthetic reinforcement), เสาคementซีเมนต์ (Deep Cement Mixing, DCM) และเทคนิคการระบายน้ำในแนวตั้งเพื่อลดระยะเวลาการทรุดตัวของดิน (Prefabricated Vertical Drain, PVD) โดยวิธี PVD นี้มีข้อจำกัดในเรื่องของเวลาที่ใช้เวลาที่ยาวนานเกินไป ในขณะที่การเสริมกำลังของดินอ่อนโดยใช้เสาคementซีเมนต์ (Rigid inclusions) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะเพิ่มเสถียรภาพให้กับดินอ่อนได้เป็นอย่างดีและในปัจจุบันได้เริ่มมีการใช้วิธีการเสริมกำลังของดินอ่อนด้วยเสาคementซีเมนต์อย่างแพร่หลาย

ในปัจจุบันการใช้เสาคementซีเมนต์ในการปรับปรุงดินสามารถทำให้การทำงานมีความสะดวก รวดเร็วประหยัดเวลา และยังสามารถลดการทรุดตัวได้ดี ซึ่งการเสริมกำลังด้วยเสาคementซีเมนต์ เป็นเทคนิคการปรับปรุงดินอีกรูปแบบหนึ่ง ที่ได้รับความนิยมใช้ในปัจจุบัน วิธีการนี้ประกอบไปด้วย คันทางที่จะทำหน้าที่เป็นชั้นถ่ายแรง (Load Transfer Platform, LTP) วางอยู่บนชั้นดินอ่อน ที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยเสาคementซีเมนต์ น้ำหนักจากภายนอกที่มากระทำจะถูกถ่ายโอนผ่านคันทาง โดยน้ำหนักส่วนใหญ่จะถ่ายเป็นเส้นโค้งลงสู่หัวเสาคementซีเมนต์ และบางส่วนจะถ่ายลงสู่ชั้นดินอ่อน (ตามภาพ 1-1) การใช้แผ่นใยสังเคราะห์ร่วมกับเสาคementซีเมนต์จะช่วยให้เกิดการถ่ายแรงมายัง แผ่นใยสังเคราะห์ทำให้ช่วยลดแรงกระทำที่จะถ่ายลงสู่ชั้นดินอ่อน



ภาพ 1 แสดงดินที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยเทคนิค (rigid inclusions) โดย Heitz et al (2008)

ปัจจุบันการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงดินอ่อนโดยใช้เสาเข็มมีอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงการ ASIRI (Amélioration des Sols Par Inclusions Rigides) ในประเทศฝรั่งเศสได้นำเสนอการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของดินอ่อนที่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มและการเสริมด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ รวมถึงมีการเผยแพร่คู่มือแนะนำสำหรับการออกแบบและการก่อสร้าง อย่างไรก็ตามการศึกษาเหล่านั้นมุ่งเน้นเฉพาะกรณีที่มีหน่วยแรงมากกระทำแบบคงที่ (Monotonic loading) ในกรณีที่โครงสร้างต้องรองรับหน่วยแรงแบบวัฏจักรที่มีจำนวนวงรอบมาก ๆ เรามักจะเห็นแต่การอ้างอิงการศึกษาของ Heitz et al (2008) ที่ศึกษาหน่วยแรงวัฏจักรเชิงพลศาสตร์ที่มีความถี่สูง (1-5 Hz) นอกจากนี้การศึกษาเพื่ออธิบายกลไกการถ่ายแรงแบบวัฏจักรสู่ชั้นดินอ่อนที่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มโดยแบบจำลองเครื่องหมุนเหวี่ยงก็สามารถสืบค้นหาได้ (Blanc et al 2013, Okyay et al 2014) แต่กระนั้นการศึกษานี้จะทำการให้แรงวัฏจักรด้วยจำนวนไม่มาก Houda et al 2017 ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการเสริมกำลังดินอ่อนด้วยเสาเข็มในห้องปฏิบัติการภายใต้หน่วยแรงแบบวัฏจักรด้วยจำนวนวงรอบน้อยกว่า 50 วงรอบโดยศึกษาเพียงชนิดของชั้นถ่ายแรงเท่านั้น จะเห็นได้ว่าตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของดินอ่อนที่เสริมกำลังด้วยเสาเข็ม ยกตัวอย่าง เช่น ชนิดและจำนวนชั้นถ่ายแรง

ชนิดของแผ่นใยสังเคราะห์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งชนิดของหน่วยแรงที่มากกระทำ ซึ่งมีความซับซ้อน ยังคงจะต้องได้รับการศึกษาเพื่อให้เกิดความเข้าใจอย่างถูกต้อง

งานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาพฤติกรรมของกลไกการถ่ายแรงโดยจะศึกษาในแบบจำลองย่อส่วนแบบ 3 มิติ ในห้องปฏิบัติการภายใต้หน่วยแรงวัฏจักร โดยจะมุ่งเน้นศึกษาชนิดของชั้นถ่ายแรงและชนิดของแผ่นใยสังเคราะห์ที่จะเป็นตัวช่วยเสริมการถ่ายแรง

### วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมกลไกการถ่ายแรงที่เกิดบนหัวเสาเข็มภายใต้การให้แรงแบบวัฏจักรเมื่อเสริมการรับกำลังด้วยเสาเข็มและมีการเสริมกำลังของดินด้วยแผ่นใยสังเคราะห์แบบถัก (Woven geotextile) ซึ่งนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพ และการทรุดตัวที่เกิดขึ้น

2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมกลไกการถ่ายแรงที่เกิดบนหัวเสาเข็มภายใต้การให้แรงแบบวัฏจักรเมื่อเสริมการรับกำลังด้วยเสาเข็มและมีการเสริมกำลังของดินด้วยแผ่นใยสังเคราะห์แบบตาราง (Geogrid) ซึ่งนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพ และการทรุดตัวที่เกิดขึ้น

### ขอบเขตการศึกษา

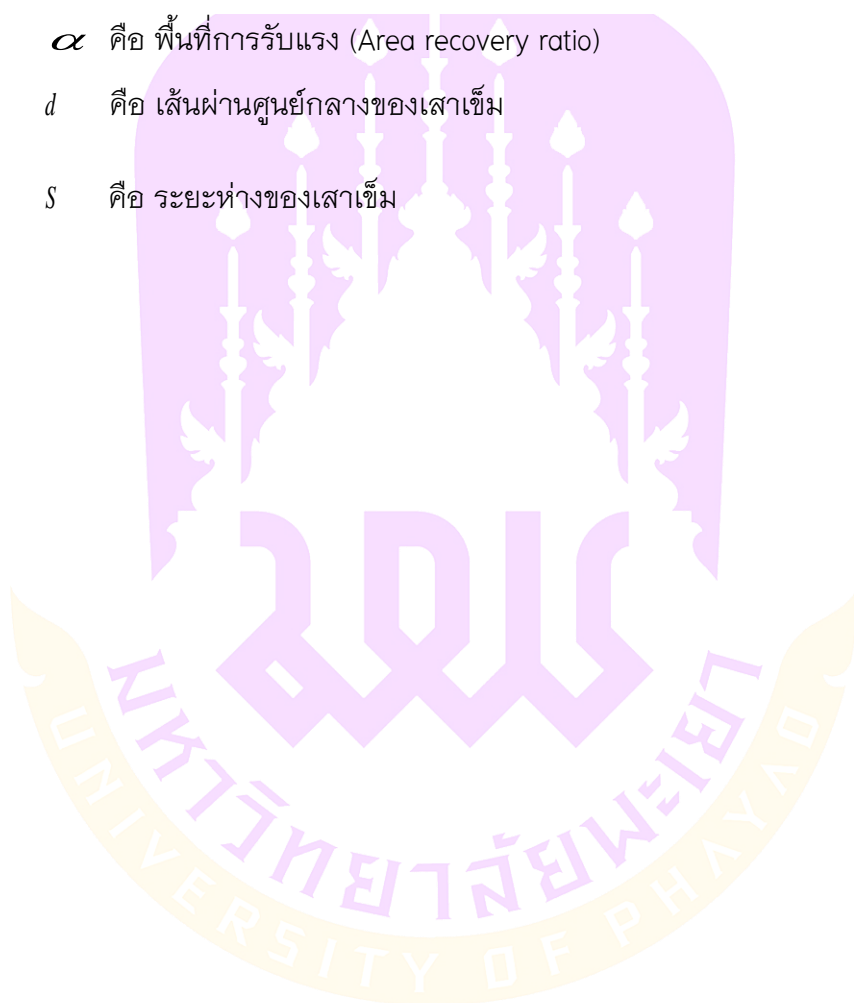
ศึกษาพฤติกรรมของการเสริมแรงด้วยเสาเข็มและแผ่นใยสังเคราะห์ในแบบจำลองย่อส่วนในห้องปฏิบัติการและนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพและการทรุดตัวที่เกิดขึ้น

### ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมกลไกการถ่ายแรงเมื่อเสริมการรับกำลังด้วยเสาเข็ม
2. ทำให้ทราบถึงแรงที่เกิดจากการถ่ายเทของแรงลงสู่หัวเสาเข็มโดยใช้วัสดุในชั้น Load Transfer Platform (LTP) ที่แตกต่างกันรวมถึงการเสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์แบบถัก (Woven geotextile) และแบบตาราง (Geogrid) เพื่อนำมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นได้

### ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

- $E$  คือ Efficiency (ประสิทธิภาพ)
- $F$  คือ แรงบนหัวเสาเข็มที่เซ็นเซอร์อ่านค่าได้
- $\gamma$  คือ ความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้เป็นดินคันทางหรือดินทับหน้า
- $H$  คือ ความสูงของดินคันทางหรือดินทับหน้าคูณกับพื้นที่รับแรง
- $W_s$  คือ แรงเนื่องจากความดันที่ถ่ายลงสู่คันทาง
- $\alpha$  คือ พื้นที่การรับแรง (Area recovery ratio)
- $d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม
- $S$  คือ ระยะห่างของเสาเข็ม



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

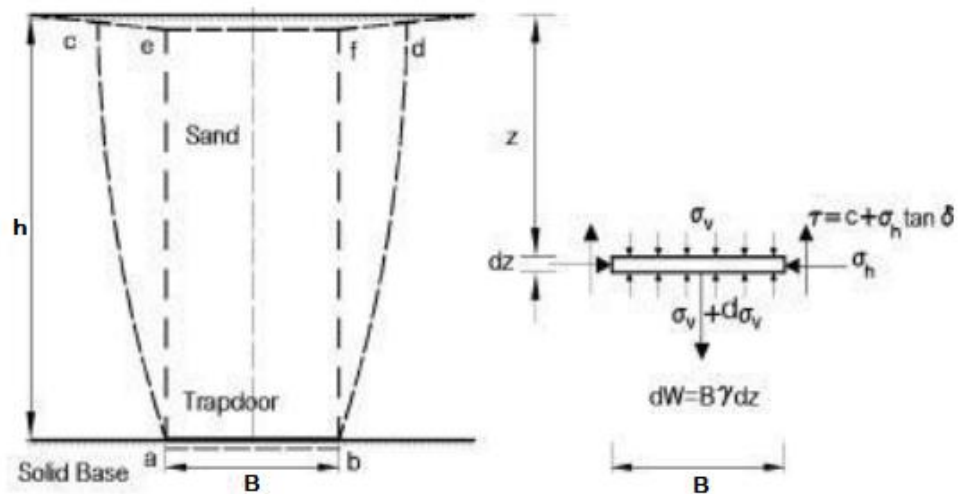
การทบทวนวรรณกรรมได้รับการศึกษาเพื่อได้มาซึ่งความรู้ที่เป็นพื้นฐานของการปรับปรุงดินอ่อนโดยการใช้เทคนิคการเสริมกำลังด้วยเสาเข็ม โดยการหาผลกระทบของพารามิเตอร์วัสดุที่ใช้ที่แตกต่างกันและการหาประสิทธิภาพภายใต้การให้แรงแบบคงที่และแบบวัฏจักร ซึ่งงานวิจัยเชิงทดลองและเชิงวิเคราะห์ที่ผ่านมามุ่งเน้นไปยังการพัฒนาแบบจำลอง เพื่อให้เกิดความเข้าใจขึ้นในกลไกการถ่ายโอนแรงในระบบ อีกทั้งยังปรับแต่งหรือแก้ไขในส่วนของพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อทำให้เกิดประสิทธิภาพของระบบให้ดียิ่งขึ้น

#### การศึกษากลไกการถ่ายโอนแรง (Soil Arching)

Terzaghi (1936) ได้ทำการศึกษารูปแบบการกระจายแรงที่เกิดขึ้นโดยใช้ทรายอิมตัวด้วยน้ำในการทดสอบ โดยในการทดสอบประกอบไปด้วยประตูกลจำลองขนาดความกว้าง 7.3 เซนติเมตร ยาว 46.3 เซนติเมตร ในการทดสอบ และวิธีการนี้ไม่ได้มีการให้แรงมากระทำต่อทรายอิมตัวด้วยน้ำที่ใช้ในการทดสอบแต่อย่างใด ซึ่งผลจากการทดสอบพบว่าลักษณะของการเคลื่อนตัวของทรายเมื่อมีการยกประตูกลลงนั้นทำให้เกิดทรายรั่วไหลลงมาตามระยะของการลดระดับของประตูกล แต่อย่างไรก็ตามภายใต้รูปแบบของลักษณะการเคลื่อนตัวของทรายนั้นเมื่อถึงจุดที่เกิดความเครียดที่สมบูรณ์แล้ว ทรายที่ไม่ไหลลงมาจะเกิดการเข้าโค้ง โดยลักษณะการโค้งที่เกิดขึ้นนี้จะถูกเรียกว่า Arching

ต่อมา Terzaghi (1965) ได้มีการวิเคราะห์แนวโค้งการรับแรง (Arching Effect) โดยกล่าวว่าเมื่อส่วนที่รองรับด้านข้างส่วนหนึ่งของมวลดินมีแนวโน้มที่จะโค้งงอหรือวิบัติเกิดขึ้น จะเกิดความต้านทานแรงเฉือน (Shear Resistance) ขึ้นกับมวลที่อยู่ข้างเคียง (Adjacent Stationary Mass) เพื่อรักษาสภาพตัวเองให้อยู่ในตำแหน่งเริ่มต้น ในกรณีของเราสามารถกล่าวได้ว่า การรองรับของการก่อสร้างเป็นพื้นผิวของดินอ่อนที่ถูกเสริมกำลังด้วยเสาเข็ม ดังนั้นชั้นวัสดุส่วนหนึ่งที่อยู่ด้านบนของดินอ่อนจึงมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนลงด้านล่างไปสู่ชั้นดินอ่อนที่ไม่ได้ถูกรองรับด้วยเสาเข็มตามแรงที่กระทำ (Applied Load) ที่เกิดขึ้น ซึ่งการเคลื่อนที่นี้จะถูกจำกัดด้วยความต้านทานแรงเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างมวลวัสดุที่โค้งงอกับมวลที่อยู่ข้างเคียงที่อยู่เหนือ

เสาเข็ม ด้วยเหตุนี้จึงเป็นผลทำให้แรงเฉือนกอดดินเพิ่มขึ้นที่เสาเข็มแต่แรงกอดดินบนดินรอบ ๆ เสาเข็มจะลดลง ซึ่งสรุปได้ว่า การเกิดการทรุดตัวที่ต่างกันระหว่างเสาเข็มกับดินโดยรอบ เสาเข็มซึ่งมีสาเหตุมาจากกลไกการถ่ายน้ำหนักลงสู่เสาเข็มโดยการเคลื่อนตัวของคันดินจะถูกยับยั้งโดยความต้านทานแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในดินถม ซึ่งความต้านทานแรงเฉือนนี้จะช่วยลดแรงกอดดินอ่อนรอบ ๆ หัวเสาเข็ม แต่จะเพิ่มแรงกอดบนหัวเข็ม โดยกลไกการถ่ายน้ำหนักนี้ เรียกว่า “Soil Arching Effect” ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่า Soil Arching Effect นี้มีความสัมพันธ์กับการทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างหัวเสาเข็มกับดินโดยรอบ ซึ่งประสิทธิภาพของการรับน้ำหนักของเสาเข็ม จะเพิ่มขึ้นโดยการขยายขนาดพื้นที่หน้าตัดของหัวเสาเข็มหรือลดระยะห่างระหว่างเสาเข็ม ตามดังภาพ 2



ภาพ 2 แสดงแนวโค้งรับแรง (Arching Effect) โดย Karl Terzaghi (1965)

Hewlett and Randolph (1988) ได้ทำการทดสอบแบบจำลอง 3 มิติเกี่ยวกับแบบจำลองโดมครึ่งทรงกลม โดยความหนาของเปลือกแนวโค้ง (Arching Shell) ดังภาพ 3 ถูกวิเคราะห์แบบ 2 มิติระหว่างเสาเข็มสองเสาที่อยู่ตรงข้ามกันเท่ากับ  $b/2$  และ Hewlett & Randolph ได้สันนิษฐานว่าความเค้นของดินนั้นมีการกระจายซ้ำในแนวโค้งเท่านั้น โดยได้ให้สูตรการวิเคราะห์ประสิทธิภาพที่เกิดขึ้น (E) ซึ่งสามารถนิยามได้ว่าเป็นสัดส่วนของความสูงคันดิน ที่ถูกรองรับด้วยเสาเข็ม ตามสมการดังนี้

$$E = \frac{P}{s^2 \gamma h} \quad (1)$$

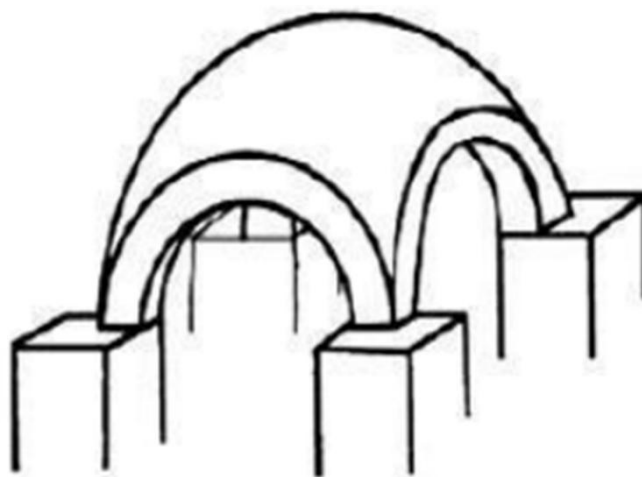
โดยที่

$P$  : แรงที่ทั้งหมดบนหัวเสาเข็ม (Pile Caps)

$\gamma$  : คือหน่วยน้ำหนักของดิน

$h$  : ความสูงของดิน

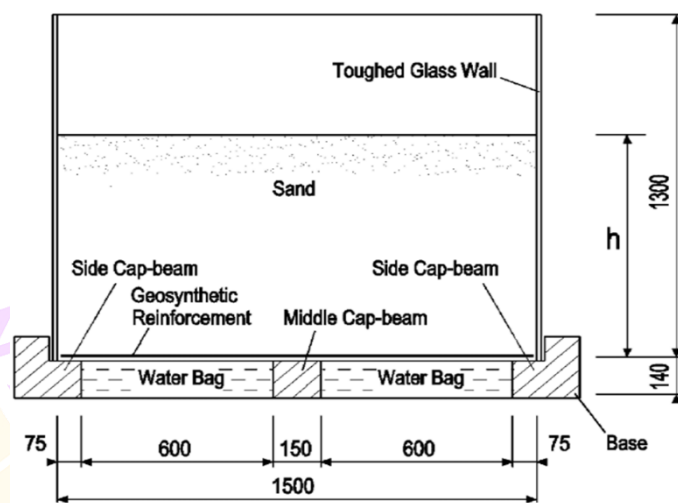
$s$  : ระยะห่างศูนย์กลางเสาเข็ม



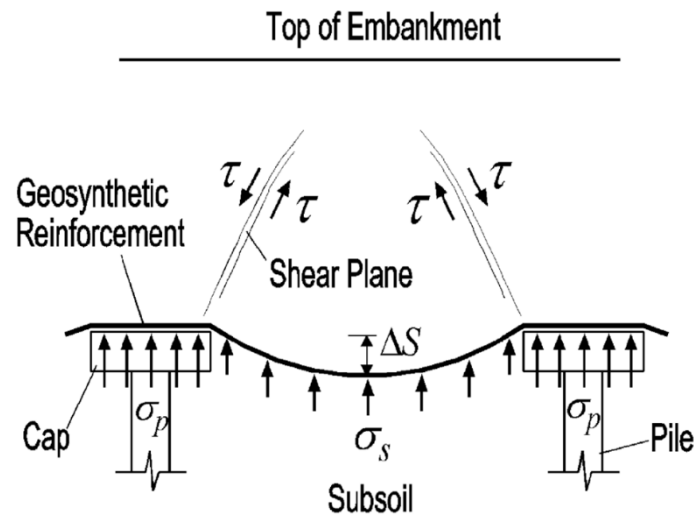
ภาพ 3 แสดงแนวโค้ง (Arching Shell) โดย Hewlett and Randolph (1988)

ส่วนใหญ่มักจะใช้พารามิเตอร์ที่มีหน่วยแบบไร้มิติเพื่ออำนวยความสะดวกและวิเคราะห์โดยกำหนดอัตราส่วนของระยะห่างของเสาเข็มต่อความสูงของดิน ( $h/s$ ) ส่วนพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพ ( $E$ ) ในทางอ้อม คืออัตราส่วนต่อพื้นที่ที่ครอบคลุมหัวเสาเข็ม  $\alpha = A_{pile} / A_{total}$  ซึ่งหมายถึงพื้นที่ที่เสาเข็มปกคลุมเมื่อเทียบกับพื้นผิวทั้งหมด

Yun–Min, Wei–Ping, and Ren–Peng (2008) ได้ทำการทดสอบแบบจำลอง 2 มิติเพื่อตรวจสอบแนวโค้งของดินในคันดินที่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มที่มีการเสริมกำลังด้วยวัสดุสังเคราะห์และไม่มีการเสริมกำลังด้วยวัสดุสังเคราะห์ โดยแบบจำลองจะประกอบด้วย ถังสี่เหลี่ยม และคานหัวเสาเข็ม (Cap Beam) ทั้งสองข้างพร้อมถุงยาง (Rubber Bag) ที่เติมน้ำที่อยู่ในช่องว่างแต่ละช่องระหว่างกัน ดังภาพ 4 โดยผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนความเค้นและการทรุดตัวได้รับอิทธิพลจากความสูงของคันดิน, ความกว้างของคานหัวเสาเข็ม (Cap Beam) และระยะห่างระหว่างเสาเข็มโดย Yun–min et al. ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนความสูงของคันดินต่อระยะห่างระหว่างเสาเข็ม  $h/s \geq 1.4$  การทรุดตัวจะเกิดขึ้นที่ด้านบนของคันดิน แต่ในทางตรงกันข้าม เมื่อ  $h/s \geq 1.6$  จะเกิดการสร้างแนวโค้งดิน (Soil Arching) ที่สมบูรณ์ นอกจากนี้ในการศึกษาเดียวกันนี้พบว่าความกว้างของคานหัวเสาเข็ม (Cap Beam) ส่งผลทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นนั้นเพิ่มขึ้นดังภาพ 5



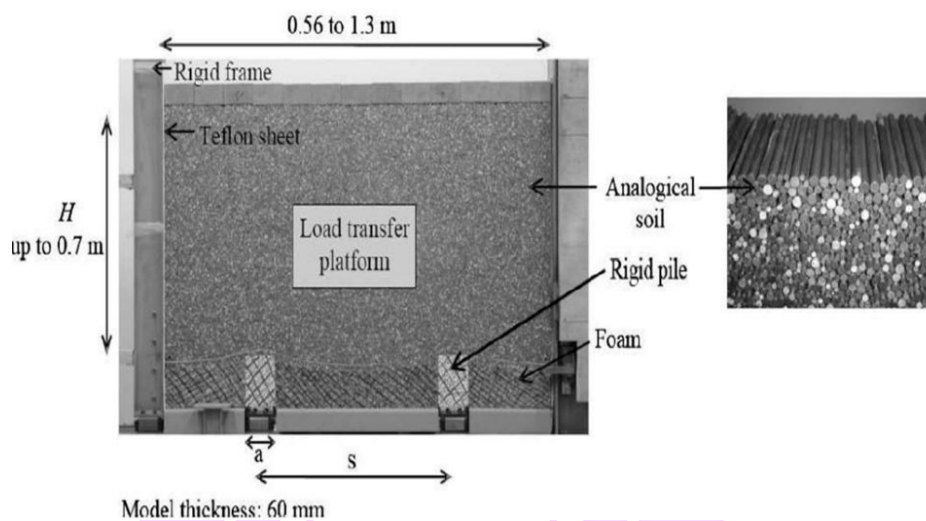
ภาพ 4 แสดงแบบจำลอง 2 มิติ Chen Yun–min et al (2008)



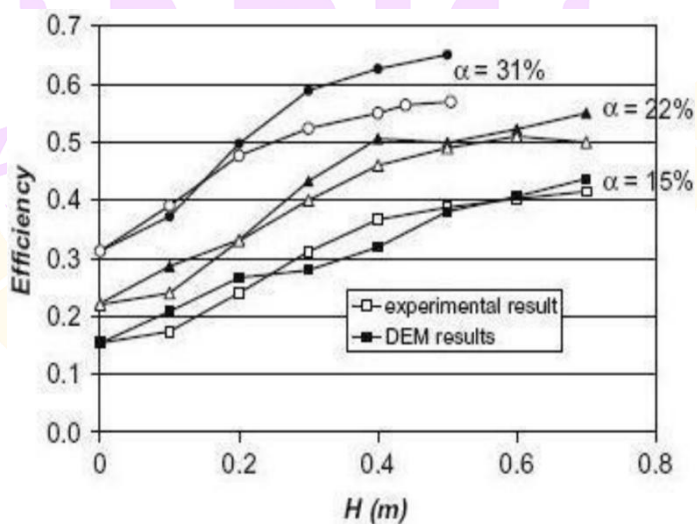
ภาพ 5 แสดงแนวโค้งรับแรงในคันดินที่เสริมกำลังด้วยเสาเข็ม Chen Yun-min et al (2008)

Jenck, Dias and Kastner (2007) ได้ทำการทดลองประตูกลซึ่งเป็นแบบจำลองขนาดเล็ก 2 มิติ โดยใช้ดินจำลองเสมือน (Taylor–Schneebeli soil analogue) ซึ่งการศึกษาดังนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาพารามิเตอร์และสภาพการทรุดตัวของดินอ่อนเพื่อศึกษากลไกพฤติกรรมการเฉือนที่เกิดขึ้น โดยมีการจำลองด้วยการใช้แท่งเหล็กขนาดต่าง ๆ เป็นชั้นถ่ายแรงเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเฉือนที่เกิดขึ้น โดยดินอ่อนที่อยู่รอบ ๆ เสาเข็มจะประกอบไปด้วยเม็ดโฟมซึ่งช่วยในการสังเกตการทรุดตัวที่เกิดขึ้น และเสาเข็มแบบแข็งที่ทำมาจากโลหะ ที่ติดตั้งกรอบหน้าต่างดังภาพ 6 โดยแบบจำลองนี้ถูกทดสอบภายใต้การรับน้ำหนักของตัวเอง โดยมีชั้นการถ่ายแรง (Load transfer platform) ที่มีความหนา 0.1 – 0.7 เมตร โดยการศึกษาพารามิเตอร์ในเชิงทดลองส่วนใหญ่มักมุ่งเน้นที่ความสูงของชั้นการถ่ายแรง (Load transfer platform) และอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของเสาเข็มต่อพื้นที่ทั้งหมด  $\alpha = A_{pile} / A_{total}$  โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ายิ่งความสูงของชั้นถ่ายแรงสูงเป็นสองเท่าของระยะห่างของเสาเข็ม ยิ่งทำให้มีค่าประสิทธิภาพ ( $E$ ) มากขึ้นเท่านั้น เนื่องจากแรงจะถูกส่งไปยังเสาเข็มเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพ ( $E$ ) ดังกล่าวยังสอดคล้องกับอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของเสาเข็มต่อพื้นที่ทั้งหมด ( $\alpha$ ) ที่มีค่าสูงขึ้นเช่นกันตามดังภาพ 7 โดยแบบจำลองนี้มีการศึกษาด้วยวิธี DEM และ FEM

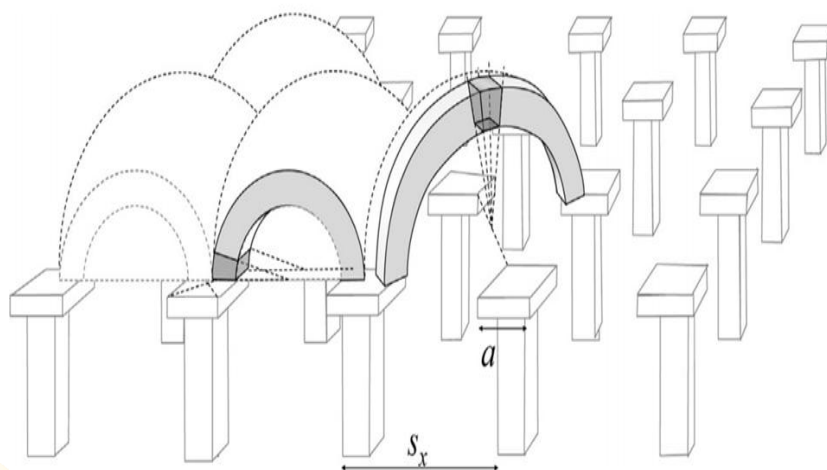


ภาพ 6 แสดงการทดลองประตุกลโดยใช้ดินเสมือนหรือแท่งเหล็ก Jenck et al (2007)



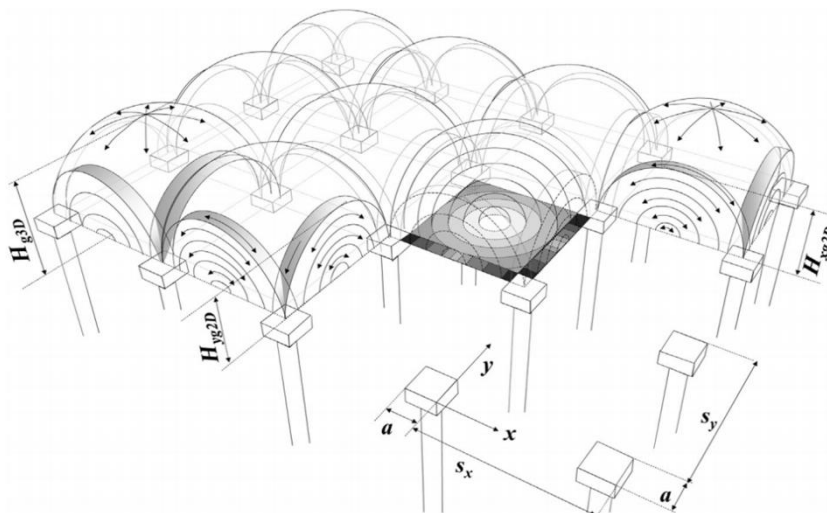
ภาพ 7 แสดงประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับอัตราส่วนพื้นที่ Jenck et al (2007)

Van Eekelen, Bezuijen and Van Tol (2013) ได้นำเสนอแบบจำลองดุลยภาพ (Equilibrium) ซึ่งเป็นแบบจำลองเส้นโค้งศูนย์กลาง (concentric arches) แบบจำลองดังกล่าวเป็นที่มีความคล้ายคลึงกับแบบจำลองของ Hewlett and Randolph (1988) และแบบจำลองดุลยภาพ EBGEO ของ Zaeske (2001) โดยแบบจำลองนี้ประกอบไปด้วยกลุ่มของเส้นโค้งและครึ่งวงกลมศูนย์กลาง (Concentric Hemisphere And Arc) โดยครึ่งวงกลมและเส้นโค้งที่เกิดขึ้นนั้นหากมีขนาดใหญ่ก็จะเกิดการถ่ายแรงที่มากขึ้น การถ่ายแรงของครึ่งวงกลมนั้นจะถ่ายแรงในรูปแบบของการถ่ายแรงแบบสามมิติไปยังเสาเข็มรอบ ๆ ที่อยู่ติดกัน การถ่ายแรงของเส้นโค้งนั้นจะเป็นการถ่ายแรงแบบสองมิติไปยังเสาเข็มที่อยู่ข้าง ๆ ตามดังภาพ 8



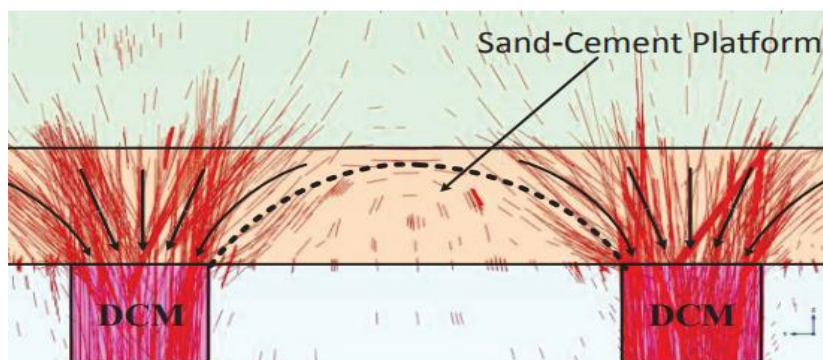
ภาพ 8 แสดงแบบจำลองแนวเส้นโค้ง (Arching Model) ของ Hewlett and Randolph (1988)

หากแบบจำลองเส้นโค้งศูนย์กลาง (Concentric Arches) ได้รับการเสริมประสิทธิภาพด้วยเส้นใยสังเคราะห์ ซึ่งจากผลการศึกษาที่ได้รับจากการสังเกตและทดสอบในภาคสนาม อีกทั้งวิเคราะห์เชิงตัวเลข พบว่าเส้นใยสังเคราะห์จะมีหน้าที่ในการช่วยกระจายแรงสู่เสาเข็มและลดการทรุดตัวของชั้นดินอ่อนตามดังภาพ 9

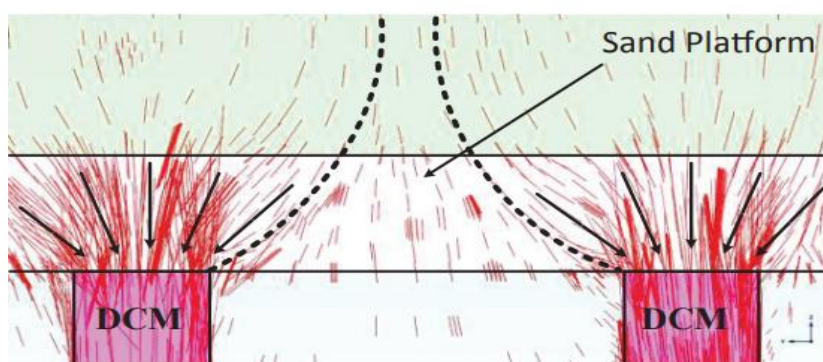


ภาพ 9 แสดงแบบจำลองเส้นแนวโค้งศูนย์กลาง (Concentric Arched Model) ที่ได้รับเสริมกำลังด้วยวัสดุใยสังเคราะห์ ของ Hewlett & Randolph (1988)

Tanthakosol et al (2018) ได้ทำการศึกษาโดยมุ่งเน้นตรวจสอบพฤติกรรมการทรุดตัวของดินที่ปรับปรุงด้วยเสาเข็มซีเมนต์ภายใต้น้ำหนักบรรทุกคั่นทางโดยมีชั้นถ่ายแรงที่ต่างกัน เพื่อยืนยันถึงประสิทธิภาพของชั้นถ่ายแรงของคั่นทางรองรับด้วยเสาเข็มซีเมนต์ โดยหนึ่งในการศึกษาวิจัยได้กล่าวถึงเรื่องพฤติกรรมการถ่ายแรง ตามภาพ 10 จะเห็นได้ว่า ทิศทางการกระจายตัวของความเค้นหลักของแต่ละชั้นถ่ายแรงมีทิศทางที่ต่างกัน โดยทิศทางการกระจายตัวของความเค้นหลักภายในชั้นถ่ายแรงที่เนทรายผสมปูนซีเมนต์บดอัดมีการก่อตัวเป็นเส้นโค้งครึ่งวงกลมจากหัวเสาเข็มซีเมนต์สองต้นเข้าหากัน (Soil Arching) ดังแสดงในภาพ 10(ก) ซึ่งในขณะที่ภาพ 10(ข) แสดงเส้นการก่อตัวของความเค้นหลักในชั้นถ่ายแรงที่เป็นทรายบดอัดมีรูปแบบเป็นเส้นโค้งจากหัวเสาเข็มขึ้นสู่ดินคั่นทาง โดยจากผลการศึกษาของเขาพบว่า ผลของความแกร่งที่เพิ่มขึ้นของชั้นถ่ายแรงเป็นทรายผสมปูนซีเมนต์บดอัดสามารถถ่ายลงสู่เสาเข็มซีเมนต์ได้ดีกว่า โดยปูนซีเมนต์บดอัดมีทิศทางของความเค้นหลักที่สามารถก่อตัวในรูปแบบของแนวโค้งรับแรง (Soil Arching) ได้ดีกว่าชั้นถ่ายแรงที่เป็นทรายบดอัด ซึ่งส่งผลให้น้ำหนักจากคั่นทางที่มีชั้นถ่ายแรงที่เป็นทรายผสมปูนซีเมนต์บดอัดถ่ายลงสู่เสาเข็มซีเมนต์ได้ดีกว่า



(ก)



(ข)

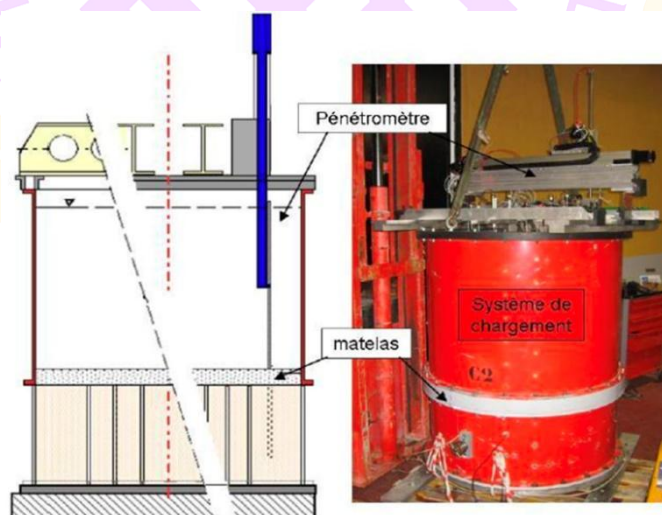
ภาพ 10 แสดงทิศทางการกระจายตัวของความเค้น (ก):ชั้นทรายผสมปูนซีเมนต์ (ข):ชั้นทรายบดอัด ของ กฤตบุญญ์ ตัณฑโกศล และคณะ (2018)

#### งานวิจัยการทดลองทางกายภาพที่ผ่านมา

ในการศึกษาเชิงทดลองการปรับปรุงดินอ่อนโดยใช้เทคนิคการเสริมกำลังด้วยเสาเข็มที่ผ่านมา ซึ่งในการศึกษาที่ผ่านมามีส่วนใหญ่มักจะมุ่งเน้นศึกษาในเรื่องของการให้แรงแบบคงที่ (Monotonic loading) โดยมีนักวิจัยหลายท่านได้ให้ความสำคัญในเรื่องของกลไกการถ่ายโอนแรง (Load-transfer mechanism) ในชั้นที่ใช้วัสดุแผ่นใยสังเคราะห์ในการเสริมกำลังหรือชั้นการถ่ายโอนแรง (Mattress) ซึ่งบางงานวิจัยใช้แบบจำลองทางกายภาพแบบ 2 มิติ ของ Antoine (2010), De Pasquale (2011), Horgan and Sarsby (2002), Jenck (2005), Yun-Min, Wei-Ping and Ren-Peng (2008) และบางวิจัยก็ใช้แบบจำลองทางกายภาพแบบ 3 มิติ เช่น

งานวิจัยของ Demerdash (1996), Dinh (2009), Eskişar, Otani and Hironaka (2012), Girout et al., (2016), Kempfert, Stadel and Zaeske (1997) and Van Eekelen et al (2012, 2012) ซึ่งพบว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราของพื้นที่ของเสาเข็มต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (Cover ratio) และความหนาของชั้น Granular รวมไปถึงมุมเสียดทาน (Friction angle) ที่มากขึ้นนั้นส่งผลทำให้การถ่ายเทแรงไปยังหัวเสาเข็ม (Rigid piles) มากขึ้น และยังช่วยลดการทรุดตัวแบบไม่สม่ำเสมอบนพื้นพื้นผิวคันดิน (Embankment) ด้วย

ในขณะการทดลองในห้องทดลองของทางยุโรปได้มีการใช้แบบจำลองโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ไม่ว่าจะเป็น Baudouin (2010) ได้ทำการทดลองด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร่ง 27g แบบ 3 มิติ ดังภาพ 11 เพื่อศึกษาพฤติกรรมกลไกการถ่ายโอนแรงและการทรุดตัวที่เกิดขึ้น ซึ่งในแบบจำลองนี้ได้ศึกษากรณีของการปรับปรุงดินโดยใช้เทคนิคการเสริมกำลังด้วยเสาเข็ม (Rigid inclusion) ซึ่งยังช่วยให้เรามีความเข้าใจมากขึ้นถึงกลไกการถ่ายโอน (Charge transfer mechanism) ในชั้นรองรับ (Mattress) และยังทำเข้าใจผลของความสูงของชั้นถ่ายแรง LTP รวมไปถึงผลของอัตราพื้นที่ของหัวเสาเข็มที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพ (E) ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่าเมื่อความสูงของชั้นถ่ายแรง LTP ที่มีความหนาที่น้อยนั้นจะส่งผลต่อความประสิทธิภาพ (E) ที่ลดน้อยลง



ภาพ 11 แสดงเครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) โดย Baudouin et al 2010

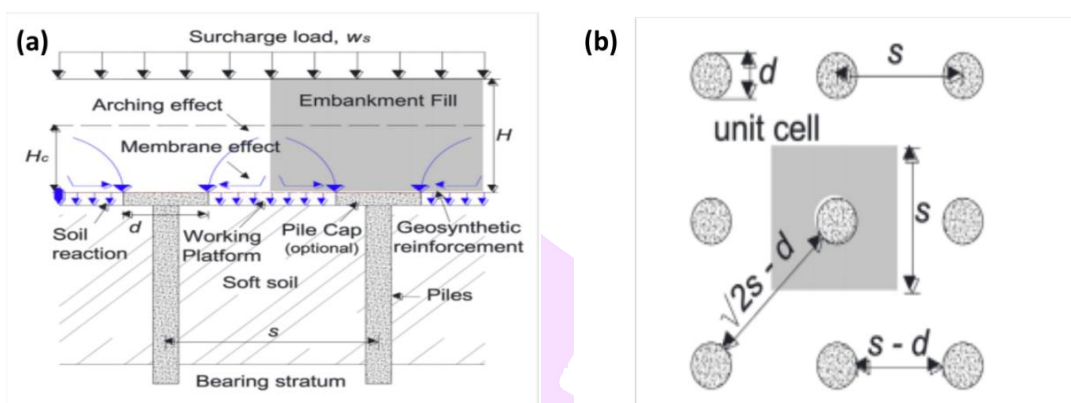
Filz and Navin (2006) ได้ศึกษาโดยทำการทดลองเพื่อเพิ่มกำลังของดินอ่อนโดยใช้การเสริมกำลังด้วยเสาเข็ม ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันทั่วไปในการออกแบบโครงสร้างบนดินที่อ่อน เนื่องจากการก่อสร้างที่เร็วกว่าโดยไม่ต้องรอการบดอัดของดิน นอกจากนี้ยังลดปริมาณของวัสดุที่ใช้ (เมื่อเทียบกับวิธีการแก้ปัญหาอื่น ๆ) ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่น้อยกว่า โดยกลไกการถ่ายโอนแรงของดินคันทางที่มีเสาเข็มเสริมเพื่อรับแรงตามแสดงในภาพ 12(a) และภาพ 12(b) ผลของการโค้ง (The arching) ถูกกำหนดให้เป็นส่วนหนึ่งของการรับแรงของดินคันทางที่ถูกถ่ายโอนโดยตรงไปยังเสาเข็ม และแรงทั้งหมดที่เหลือที่ไม่ได้ส่งไปยังเสาเข็มก็จะเกิดผลจากแรงที่กระจายลงสู่เสาเข็มเป็นเส้นโค้ง (Arching effect) คือความเครียดในแนวตั้งที่อยู่บนดินอ่อน (Soft soil) กลไกทั้งหมดเหล่านี้ขึ้นอยู่กับค่า Area ratio ( $\alpha$ ) ดังในภาพ 12(b) ซึ่งเป็นพื้นที่ในการรับแรงที่จะถูกถ่ายโอนลงในเสาเข็มแต่ละต้น การหาพื้นที่การรับแรงบนหัวเสาเข็มในแต่ละต้นจากสมการที่ 2

$$\alpha = \pi d^2 / 4s^2 \quad (2)$$

และประสิทธิภาพการถ่ายแรง ( $E$ ) เป็นผลมาจากแรงที่กระจายลงสู่เสาเข็มที่เป็นเส้นโค้ง (Arching) และผลกระทบจากแรงที่เกิดขึ้นบนหัวเสาเข็มต่อผลกระทบจากผลของการส่งถ่ายแรง (Membrane effect) ที่รวมกัน โดยสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพได้จากสมการที่

3

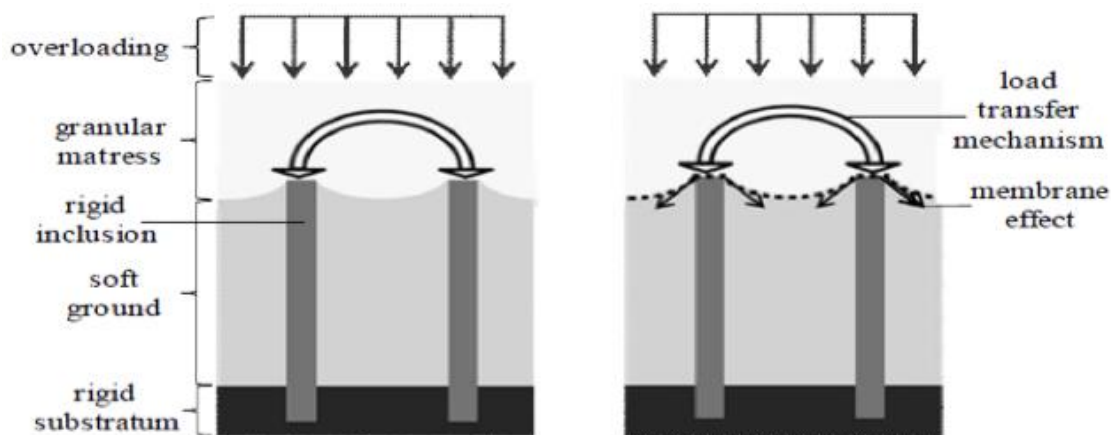
$$E = \frac{F}{\gamma H + Ws} \quad (3)$$



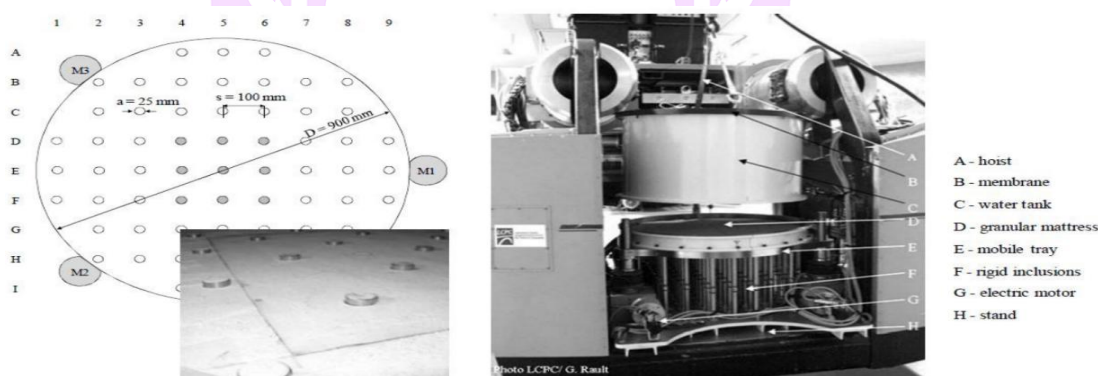
ภาพ 12 แสดงกลไกการถ่ายโอนแรงของดินคั่นทางภาพระยะห่าง , (b) เส้นผ่านศูนย์กลางและเสาะเข็ม ของ Filz et al (2006)

Blanc et al., (2013) ได้ทำการทดลองการเสริมกำลังของดินอ่อนโดยเทคนิคการใช้เสาะเข็ม (Rigid inclusions) และพฤติกรรมภายในชั้นวัสดุที่รองรับแรง (Granular mattress), ถาดเคลื่อนที่ (Mobile tray) ได้ถูกออกแบบขึ้นมาโดยเฉพาะ ซึ่งในอุปกรณ์การทดลองที่พัฒนาในห้องปฏิบัติการ IFSTTAR โดย Mobile tray นี้จะจำลองเป็นการทรุดตัวของพื้นอ่อนที่อยู่ระหว่างเสาะเข็ม การศึกษาของกลไกการถ่ายโอนแรงในชั้น (Mattress) ที่ควบคุมในเครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) 20g โดยถาดดังกล่าวซึ่งมีขนาดรัศมี 900 มิลลิเมตร และสามารถบรรจุเสาะได้มากถึง 61 ต้น ตรงส่วนบนหน้าพื้นผิวทั้งหมดประกอบด้วยความหนาแน่น (Mesh density)  $\alpha = 4.91\%$  ซึ่งแรงที่จะให้จะถูกติดตั้งในชั้น LTP โดยการเติมน้ำเข้าไป โดยแรงที่อยู่ด้านบนของเสาะและการทรุดตัวในพื้นที่ที่แตกต่างกันเหนือชั้นวัสดุที่รองรับแรง (Granular mattress) ได้รับการวัดขณะที่ถาดดังกล่าวเคลื่อนที่ลงโดยเซนเซอร์แรงที่ติดตั้งภายในแท่นหัวเสาะเข็มและการทรุดตัวจะได้รับการวัด ณ บริเวณที่แตกต่างกันเหนือชั้นวัสดุที่รองรับแรง (Granular mattress) เพื่อที่จะปรับปรุงเทคนิคการเสริมกำลังดังกล่าว วัสดุแผ่นใยสังเคราะห์จะถูกแทรกระหว่าง หัวเสาะเข็มและชั้นวัสดุที่รองรับแรง (Granular mattress) โดยการดึง (stretching) ซึ่งวัสดุแผ่นใยสังเคราะห์จะถ่ายโอนแรงไปยังเสาะเข็ม (Inclusions) ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า เมมเบรนเอฟเฟกต์ (Membrane effect) ในการทดสอบทั้งมีการเสริมกำลังด้วย

แผ่นใยสังเคราะห์และไม่มีวัสดุแผ่นใยสังเคราะห์ตามดั่งภาพ 13 ได้รับการทดลองโดยการเปลี่ยนความหนาของชั้นวัสดุที่รองรับแรง (Granular mattress) ที่ขนาดความหนาที่แตกต่างกัน



ภาพ 13 แสดงการเสริมกำลังดิน : แบบไม่มีวัสดุแผ่นใยสังเคราะห์(ซ้าย) และมีวัสดุแผ่นใยสังเคราะห์(ขวา) ของ Blanc et al (2013)



ภาพ 14 แสดงรูปแผนผังและลักษณะโดยทั่วไปของอุปกรณ์ถาดเคลื่อนที่ (mobile tray) ของ Blanc et al (2013)

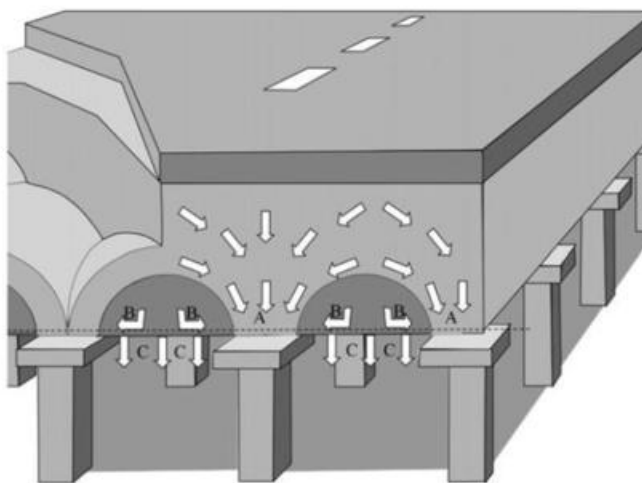
โดยการทดสอบทางกายภาพนี้ได้ศึกษากรณีของการปรับปรุงดินโดยใช้เทคนิคการเสริมกำลังด้วยเสาเข็ม (Rigid inclusion) โดยไม่มีพื้นแข็ง (Rigid slab) ทั้งแบบที่มีการเสริมและไม่มีเสริมวัสดุแผ่นใยสังเคราะห์ (Geosynthetic) และช่วยให้เรามีความเข้าใจมากขึ้นถึงกลไกการถ่ายโอน (Charge transfer mechanism) ในชั้นรองรับ (Mattress), ได้ศึกษาพารามิเตอร์ผลของความสูงที่มีผลต่อค่าการทดลอง และผลของการเสริมกำลังโดยใช้การ

เสริมแรงโดยวัสดุใยสังเคราะห์ (Geosynthetic effect) ภายใต้การแรงแบบคงที่ โดยผลที่ได้รับมีดังต่อไปนี้

-แบบไม่มีการเสริมแรงด้วยวัสดุใยสังเคราะห์ กลไกการถ่ายโอนแรงมีจะประสิทธิภาพมากขึ้นตามความหนาของชั้นวัสดุที่รองรับแรง (Granular mattress) ที่มีความหนาที่มากขึ้น นอกจากนี้การทรุดตัวยังลดน้อยลงอีกด้วย แต่กลับมีการเพิ่มขึ้นของความหนาในชั้นวัสดุที่รองรับแรง (Granular mattress) แทน

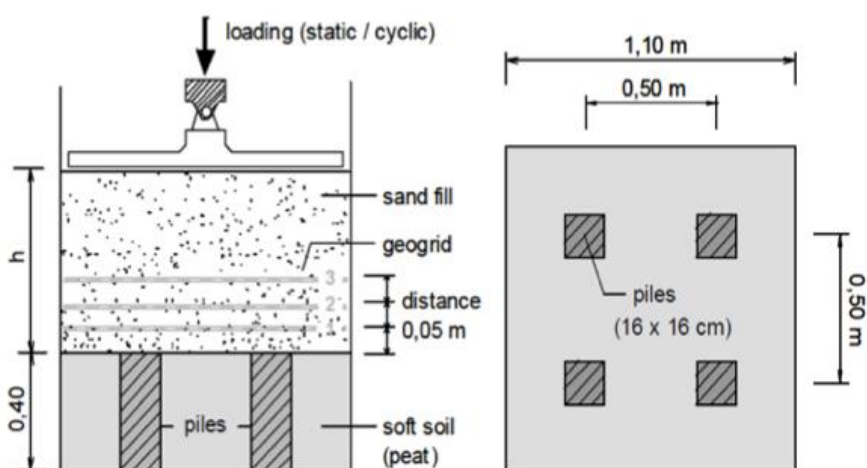
-แบบมีการเสริมแรงด้วยวัสดุใยสังเคราะห์ ประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นและการทรุดตัวแบบไม่สม่ำเสมอกลับลดลงอย่างเห็นชัด

ต่อมา Van Eekelen et al (2012) ได้นำเสนอการทดลองกายภาพแบบขนาด 3 มิติ เพื่อศึกษาอิทธิพลของคุณลักษณะแผ่นใยสังเคราะห์ (ความแข็งแรง, จำนวนชั้น) และผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของแรงที่เกิดขึ้น ในกลไกการถ่ายโอนแรง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของแรงที่จะใส่เข้าไป (Applied load) จะถูกออกแบบให้เป็นเบาะยาง (Rubber cushion) ที่ถูกเติมด้วยน้ำ (มีหัวก๊อกสำหรับการระบายน้ำออกเพื่อควบคุมการอัดให้แรง) โดยดินได้รับการเสริมกำลังด้วยเสาเข็ม (Rigid inclusion) โดยแบบจำลองการทดสอบจะประกอบไปด้วยเสาเข็มทรงกระบอก (Cylindrical) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร และระยะห่างคงที่ 0.45 เมตร คันดินถูกจำลองโดยใช้ทรายละเอียดที่มีขนาด 0.125 – 0.250 มิลลิเมตร และกรวดละเอียด (Granule fill) ที่มีขนาด 1–16 มิลลิเมตร และมีความหนาของชั้นเท่ากับ 0.42 เมตร จากการวิเคราะห์ของ Van Eekelen et al (2012) โดยระบุว่าแรงแนวตั้งที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกเป็นสามส่วนคือ A B และ C ตามดังภาพ 15 โดยที่ A คือส่วนของแรงแนวโค้ง ซึ่งหมายถึงแรงที่ส่งไปยังเสาเข็มโดยตรง ในส่วนของ B คือส่วนของแรงที่เกิดจากการเสริมแรงของแผ่นใยสังเคราะห์ และ C คือส่วนของแรงที่ลงสู่ดินอ่อน โดยข้อดีของการศึกษานี้คือมีความเป็นไปได้ในการวัดแยกเปอร์เซ็นต์ของแรงที่สอดคล้องกับแต่ละช่วงที่อ้างถึงได้ง่ายและเกิดความเข้าใจที่มากขึ้น

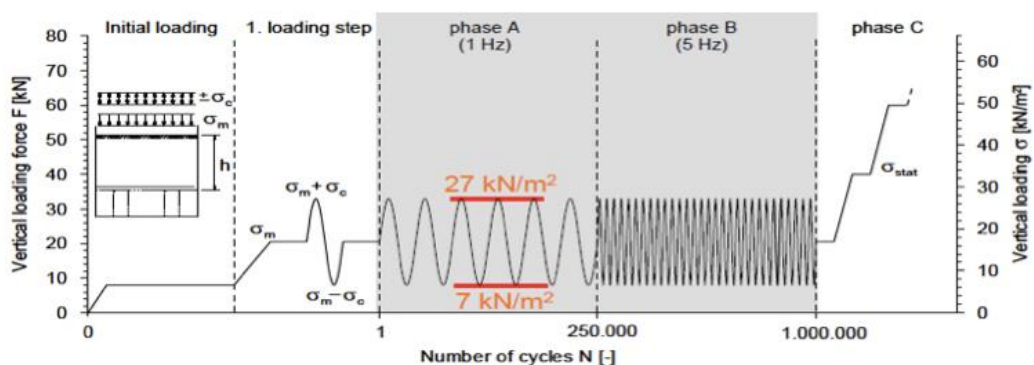


ภาพ 15 แสดงแรงที่ถูกแบ่งออกเป็นสามส่วนในการวิเคราะห์ของ Van Eekelen et al (2012)

จากนั้น Heitz, Lüking and Kempfert (2008) ได้ทำการทดลองแบบจำลองทางกายภาพ และได้ศึกษากลไกการถ่ายโอนแรงภายใต้การแรงแบบวัฏจักรในแบบจำลองทางกายภาพ โดยแบบจำลองประกอบไปด้วยดินอ่อนที่เสริมแรงด้วยเสา 4 ต้น กับการเสริมแรงด้วยวัสดุแผ่น Geogrid และพื้นแข็ง (Rigid slab) ดังภาพ 16 วัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาผลของการแรงแบบวัฏจักรในระยะยาวโดยใช้วงจรความถี่ที่ต่ำกว่า 5 Hz แสดงดังภาพ 17



ภาพ 16 แสดงแบบจำลองการทดลอง 3 มิติ ของ Heitz et al (2008)

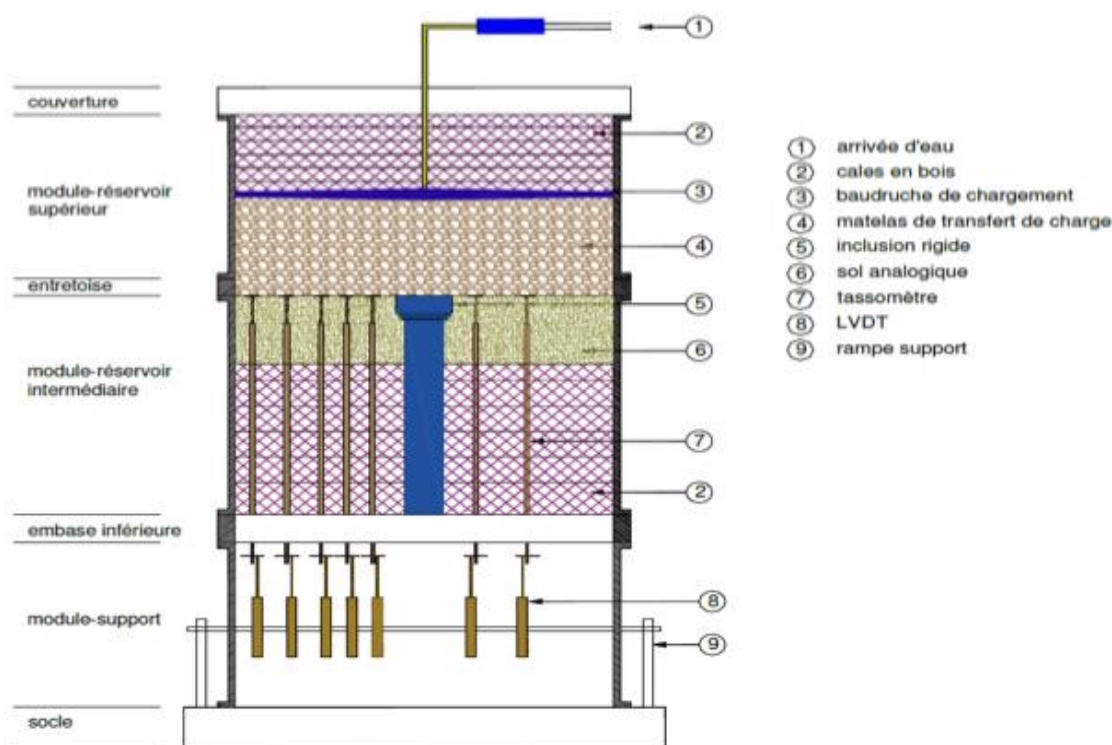


ภาพ 17 แสดงการแรงแบ้วัฏจักรที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองของ Heitz et al (2008)

Dinh et al (2010) ได้ศึกษาเพื่อหากลไกของการถ่ายโอนแรงที่เกิดขึ้นในชั้นวัสดุที่รองรับแรง (Granular mattress) ซึ่งมีหน้าที่ในการถ่ายโอนแรงจากโครงสร้างชั้นบนสู่เสา (Rigid inclusion) การให้แรงแบบคงที่และวัฏจักร ผลที่ได้ถูกนำมาใช้ในการเน้นความสำคัญของอิทธิพลของสมบัติ (Rheology) ของชั้นวัสดุถ่ายแรง (Granular LTP) ได้แก่ ความหนาแน่นสัมพัทธ์, ประสิทธิภาพของระบบ และการทรุดตัวเฉลี่ยของดินอ่อน แบบจำลองดังกล่าวตามดังภาพ 18 เป็นแบบจำลองที่ใช้แบบขนาด 1/5 ซึ่งดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

-ติดตั้งอุปกรณ์เซนเซอร์ ที่บริเวณหัวของของเสา (Rigid inclusion) เพื่อวัดแรงที่กระทำต่อหัวเสาเข็ม

-ประกอบเซนเซอร์เพื่อวัดการทรุดตัวของดินอ่อน



ภาพ 18 แสดงแบบจำลองกายภาพ 3 มิติของ Dinh et al (2010)

การให้แรงดันได้รับการควบคุมโดยตุลุมที่จำลองการให้แรงแบบสม่ำเสมอตามน้ำหนักของดิน และดินอ่อนถูกออกแบบโดยการผสมทรายกับเม็ดโพลีเมอร์เพื่อจำลองเป็นดินอ่อนที่ใช้ในการทดสอบ

จากการศึกษาพบว่า

- การเพิ่มขึ้นของความหนาของชั้นวัสดุ (Mattress) และความหนาแน่นของชั้นวัสดุ ช่วยให้แรงไปสู่เสา (Rigid inclusion) ได้ดี และลดการทรุดของดินอ่อน

- การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของวัสดุในชั้น (Mattress) ทำให้ประสิทธิภาพเฉลี่ยของระบบเพิ่มขึ้น

- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กของวัสดุประกอบของชั้นที่รองรับแรง (Granular mattress) ยิ่งทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น

- วัสดุผสมรวม (Granular) ที่มีขนาดสม่ำเสมอทำให้เกิดแรงบนหัวของเสา (Rigid inclusion) ดีกว่าวัสดุผสมรวม (Granular) แบบที่ไม่มีสม่ำเสมอ

- การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของชั้นผสมรวมจะทำให้เกิดแรงที่มากขึ้น ที่ส่วนหัวของเสา (Rigid inclusion)

-การเปรียบเทียบแบบเสริมและไม่เสริมกำลังโดยใช้เสา (Rigid inclusion) พบว่าการใช้เสา (Rigid inclusion) ลดการทรุดตัวของดิน – ในพื้นที่ระหว่างชั้นวัสดุ (Mattress) ได้ดีกว่า

## 2.4 ผลสรุปของการทดลองกายภาพที่ผ่านมาของแต่ละบุคคลกับเทคนิค

### Rigid inclusions

การศึกษาในเชิงทดลองแบบจำลองต่าง ๆ ได้รับการทำขึ้นเพื่อเข้าใจกลไกการถ่ายโอนแรง ในชั้นวัสดุการถ่ายแรง และคุณพฤติกรรมของระบบภายใต้การให้แรงแบบวัฏจักรและแบบคงที่ และผลกระทบของการเสริมกำลังด้วยวัสดุใยสังเคราะห์ตามตารางด้านล่างนี้แสดงสรุปผลการทดลองทางกายภาพที่ใช้เทคนิคการเสริมกำลังด้วยเสาเข็ม ดังตาราง 1



ตาราง 1 สรุปผลการทดลองที่ผ่านมา

วิธีการ	วัสดุที่ใช้				ผลหลักที่ได้รับ
	ดิน	ชั้นถ่าย แรง	เสาเข็ม	การเสริม กำลัง	
Hewlett & Randolph (1998) (แบบจำลอง 2 มิติ)	ยางโฟม (Foam Rubber)	ทราย	ไม้	-	-เน้นรูปครึ่งวงจรมุมของ แนวเส้นโค้ง - ความหนาแน่น $\alpha = 33\%$ ถ้าหาก อัตราส่วน (ความสูง แมทเทรส/ระยะห่าง ของเสาเข็ม) เพิ่มขึ้น การทรุดตัวลดลง ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้น
Low et al., (1994) (แบบจำลอง 2 มิติ)	โฟม	ทราย	ไม้	Geotextile J=400 KN/m	-ความหนาแน่นมากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพ มากขึ้น - การเสริมกำลังด้วย Geotextile จะทำให้ ประสิทธิภาพมากขึ้น 1.15 ถึง 1.3 เท่า
Kempfert et al., (1997) (แบบจำลอง 3 มิติ)	ถ่านหิน (peat)	ทราย	เสาเข็ม 4 ตัว 16X16 ซม.	Geogrid J=100 KN/m	-geotextile ช่วยลดการ ทรุดตัว -geotextile ที่มี ความ แข็งแรงแรงเพิ่มขึ้น => ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น การทรุดตัวน้อยลง

Denerdash, (1996) (แบบจำลอง 3 มิติ)	-	ทราย	เสาเข็ม 4 ตัว 10X10cซม	Geotextile	-ความหนาแน่นเพิ่ม => ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น -อัตราส่วน(ความสูง แมทเทรล/ระยะห่าง ของเสาเข็ม) มีอิทธิพล มากที่สุดต่อการทรุด ตัวแบบไม่สม่ำเสมอ
Heiz, (2008) (แบบจำลอง 3 มิติ)	ถ่านหิน (peat)	ทราย	วัสดุ rigid inclusions 4 ตัว เส้นผ่าน ศูนย์กลาง 18.1ซม	Geogrid	-การให้ แรงแบบวง จักร นำไปสู่อาร เปลี่ยนแปลงของกลไก การถ่ายโอนแรงและ arching effect ในดิน -ระหว่างการใช้แรงวง จักร ความผิดปกติของ แผ่น geogrid และการ ทรุดตัวของดินที่บีบอัด ได้เพิ่มมากขึ้น
Van Eekelen, (2011) (แบบจำลอง 3 มิติ)	เบาะเติม น้ำ	ทราย ละเอียด หรือ กรวด ละเอียด	Rigid inclusions ทรงกระบอก 4 ตัว เส้นผ่าน ศูนย์กลาง 10 ซม	Geotextile	-มุมเสียดทานมากขึ้น => Arching effect มาก ขึ้น -การเสียรูป geogrid เกิดขึ้นด้านบนเสาเข็ม และระหว่าง เสาเข็ม ที่ อยู่ติดกัน -ความแกร่งของแผ่น geogrid ไม่มีผลต่อ arching effect

## บทที่ 3

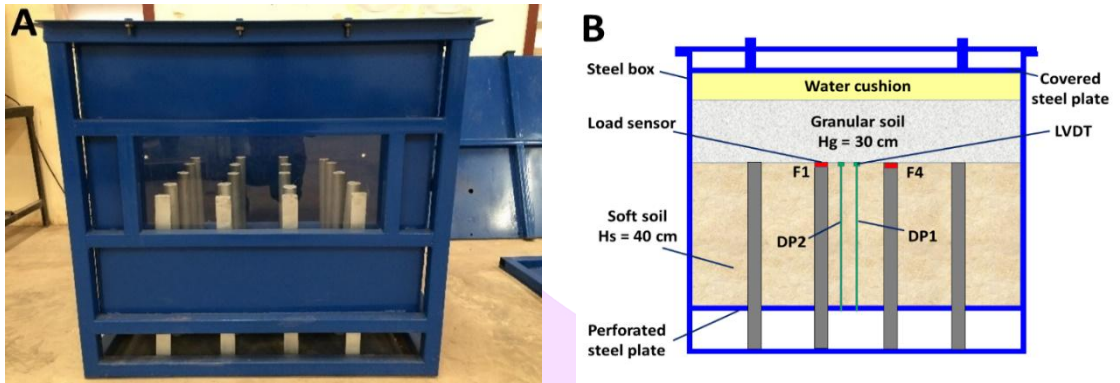
### วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการทดลองการศึกษาพฤติกรรมการยุบตัวของดินอ่อนและการรับน้ำหนักของเสาเข็ม โดยการเตรียมอุปกรณ์และใช้เครื่องมือต่าง ๆ และวิธีทำการทดลองนั้น จะทำการเตรียมทดลองจากขั้นตอนการทดลองต่อไปนี้

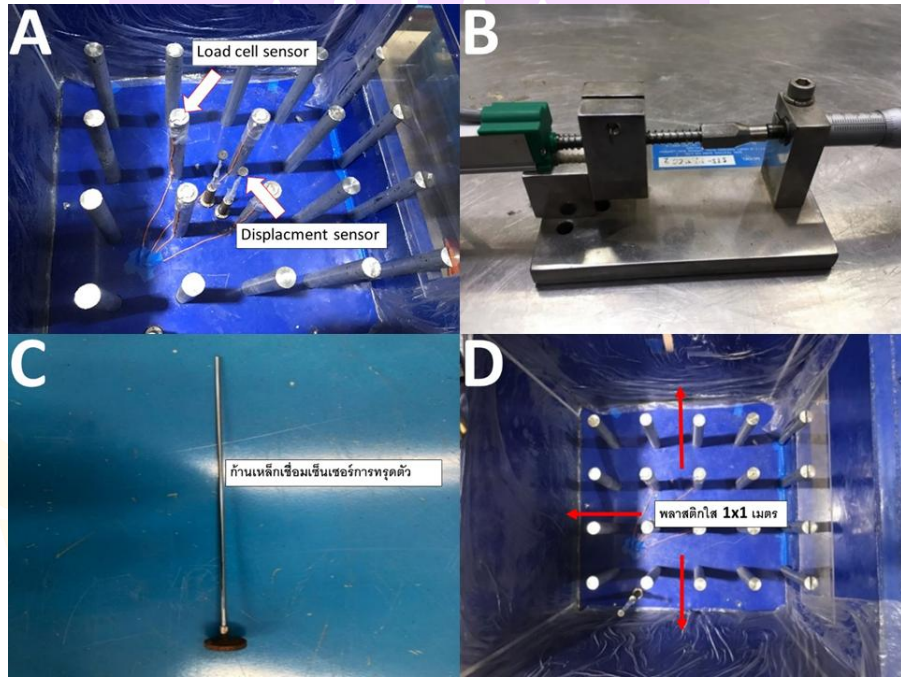
#### ขั้นตอนการเตรียมวัสดุและอุปกรณ์

##### แบบจำลองกายภาพแบบ 3 มิติ (3D Physical Model)

แบบจำลองกายภาพ 3 มิติ จะมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยม ประกอบด้วยเหล็กหนาที่มีขนาด กว้าง 1 เมตร x ความยาว 1 เมตร x สูง 1 เมตร โดยแบบจำลองที่ใช้เป็นแบบจำลอง 3 มิติ โดยใช้แบบขนาด 1g ต่อความยาวทั้งหมด ประกอบด้วยชั้นดินอ่อน (Soft soil) ที่มีความหนาของชั้นที่ 0.4 เมตรและชั้นคันทาง (Granular soil) ที่มีความหนาของชั้นที่ 0.3 เมตร ดังภาพ 19 โดยในตัวแบบจำลองจะมีแรงเซ็นเซอร์ติดตั้งเพื่อวัดค่าดูแรงกระทำที่เกิดบนหัวเสาเข็ม และมีเซนเซอร์วัดการทรุดตัวเซ็นเซอร์ติดตั้งเพื่อวัดการทรุดตัวของดินอ่อนที่เกิดขึ้น ดังภาพ 20(A) ดังนั้นเซนเซอร์ทุกตัวที่ถูกติดตั้งจะทำการตรวจสอบวัดค่าเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องและแม่นยำ ดังภาพ 20(B) นอกจากนี้ยังภายในกล่องแบบจำลองยังประกอบไปด้วยเสาเข็มทั้งหมด 20 ต้น (โดยแบ่งเป็น 16 ต้น และ 4 ต้นผ่าครึ่ง) โดยเสาเข็มมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 4 เซนติเมตร และมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของเสาเข็มอีกเสาเข็มเท่ากับ 20 เซนติเมตร และได้ทำการติดตั้งพลาสติกใสเพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในตัวอย่างการทดสอบ ดังภาพ 20(D)



ภาพ 19 แบบจำลองกายภาพ 3 มิติ



ภาพ 20 ขั้นตอนการเตรียมเครื่องมือ: (A) การติดตั้งแรงเซนเซอร์บนหัวเสาเชื่อมกับติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะการทรุดตัวของดินอ่อน, (B) การปรับเทียบเซนเซอร์วัดระยะการทรุดตัว, (C) ตัวเหล็กเชื่อมต่อกับเซนเซอร์วัดระยะการทรุดตัว, (D) การติดตั้งพลาสติกใสทั้ง 3 ด้าน

ตาราง 2 กรลดขนาดของแบบจำลองทางกายภาพ

Quantities	Unity	Proto-type	Model Ng
Gravity	$m/s^2$	1	N
Length	M	1	1/N
Strain	%	1	1
load	kN	1	$1/N^2$
Stress	kPa	1	1
Mattress density	$kN/m^3$	1	1
Weight	kg	1	$1/N^3$
Coverage area ratio	%	1	1
Secant stiffness	kN/m	1	1/N

ในตารางที่ 2 ในการจำลองแบบทดลองทางกายภาพจะมีการปรับลดขนาดเพื่อให้ง่ายต่อการทดสอบในห้องปฏิบัติการมากขึ้น โดยในตารางจะมีการปรับลดขนาดจาก 10 ส่วน ลงมาเป็น 1 ส่วน (1:10)

#### การเตรียมส่วนผสมดินตัวอย่าง (Soft soil)

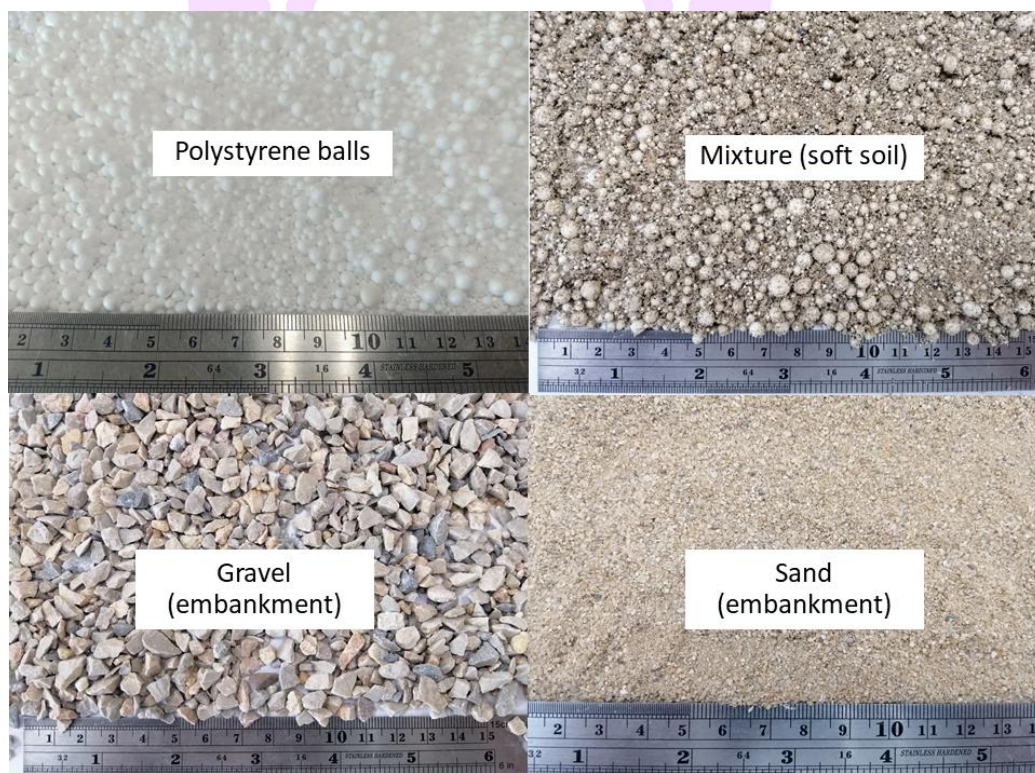
การร่อนทราย เป็นการร่อนทรายตามมาตรฐาน ASTM จากการทดลอง ทรายที่ใช้คือ ทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ #30 ค้างที่เบอร์ #50 ซึ่งจะใช้เป็นส่วนผสมในการจำลองดินอ่อน และเมื่อร่อนทรายได้ตามจำนวนที่กำหนดก็จะนำทรายมาผสมกับเม็ดโฟม ตามน้ำหนักที่กำหนดไว้ โดยใช้น้ำเป็นตัวผสมเพื่อให้ทรายและโฟมผสมให้เข้ากัน

### การเตรียมวัสดุของดินคันทาง (Embankment)

ในชั้นดินถมจะประกอบไปด้วยวัสดุ 2 ชนิด คือ ทรายและกรวด โดยทรายที่ใช้จะผ่านตะแกรงเบอร์ #8 ค้างเบอร์ #30 และกรวดที่ใช้จะผ่านตะแกรงเบอร์ #4 ค้างเบอร์ #16 ซึ่งจะใช้จำลองเป็นดินคันทางถม

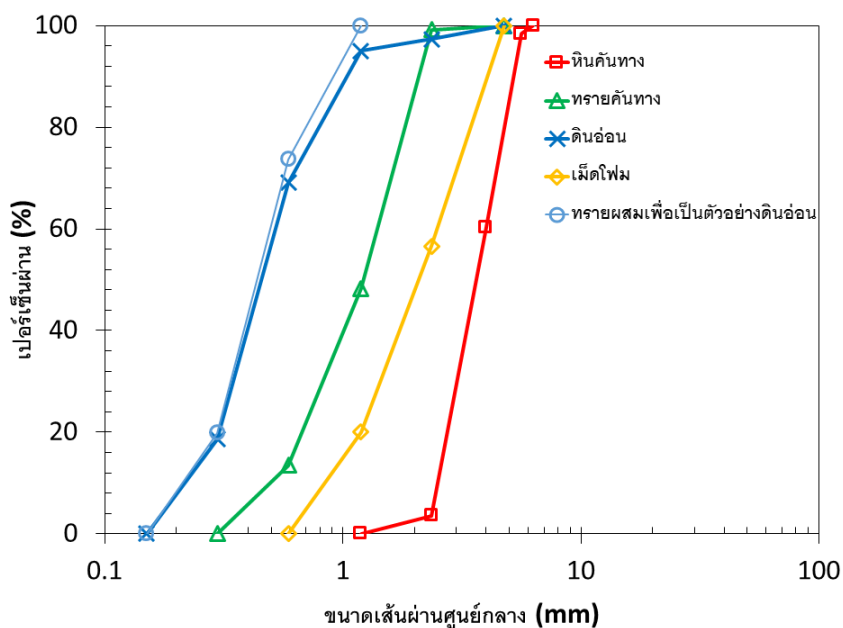
### วิธีผสมดินอ่อน (Soft soil)

1. เตรียมวัสดุที่ต้องใช้ อัตราส่วนผสม 40:4:1 โดยทราย 40 กิโลกรัมต่อน้ำ 4 กิโลกรัมต่อโฟม 1 กิโลกรัม และในโฟม 1 กิโลกรัมแบ่งเป็นโฟมขนาดใหญ่ 350 มิลลิกรัม โฟมขนาดกลาง 450 มิลลิกรัม โฟมขนาดเล็ก 200 มิลลิกรัม
2. ทำการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันก่อนที่จะนำไปทำการทดสอบ ในการทดสอบต้องบดอัดให้ได้ความหนาแน่นมีความหนาแน่น 0.55 ตันต่อลูกบาศก์เมตร



ภาพ 21 วัสดุของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

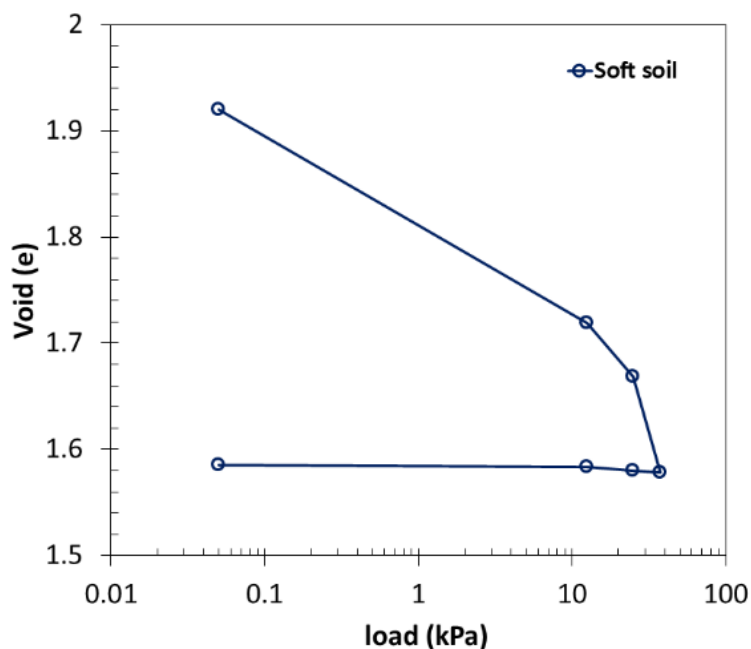
### 3. อัตราการผ่านและตกค้างของทรายทับหน้า ทรายผสมตัวอย่าง และโฟม



ภาพ 22 อัตราการผ่านและตกค้างของทรายทับหน้า ทรายผสมตัวอย่างและโฟม

#### การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test)

การทดสอบการอัดตัวคายน้ำเป็นการหาค่าการยุบตัวของดินอ่อน (Bangkok clay) เพื่อที่จะนำมาเป็นตัวเปรียบเทียบของดินทดสอบที่ทำการผสมขึ้นมาเอง เนื่องจากดินกรุงเทพฯ มีความยากลำบากในการทดสอบ ผู้ทดลองจึงได้ทำการคิดส่วนผสมขึ้นมาโดยให้การค้ำยุบตัวเท่ากับหรือใกล้เคียงกับดินกรุงเทพฯ เพื่อสะดวกในการทำการทดสอบและการเตรียมวัสดุในการทดลอง ผู้ทดลองจึงได้ทำการทดสอบการยุบตัวคายน้ำของดินกรุงเทพฯ ก่อนและหลังจากนั้นทำการคิดอัตราส่วนผสมของดินตัวอย่าง ได้อัตราส่วนผสม 40:4:1 โดยทราย 40 กิโลกรัมต่อน้ำ 4 กิโลกรัมต่อโฟม 1 กิโลกรัม และในโฟม 1 กิโลกรัมแบ่งเป็นโฟมขนาดใหญ่ 350 มิลลิกรัม โฟมขนาดกลาง 450 มิลลิกรัม โฟมขนาดเล็ก 200 มิลลิกรัม โดยตัวอย่างมีความหนาแน่นของตัวอย่าง 0.55 ตันต่อลูกบาศก์เมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การยุบตัว (Compression Index) เท่ากับ 0.5159

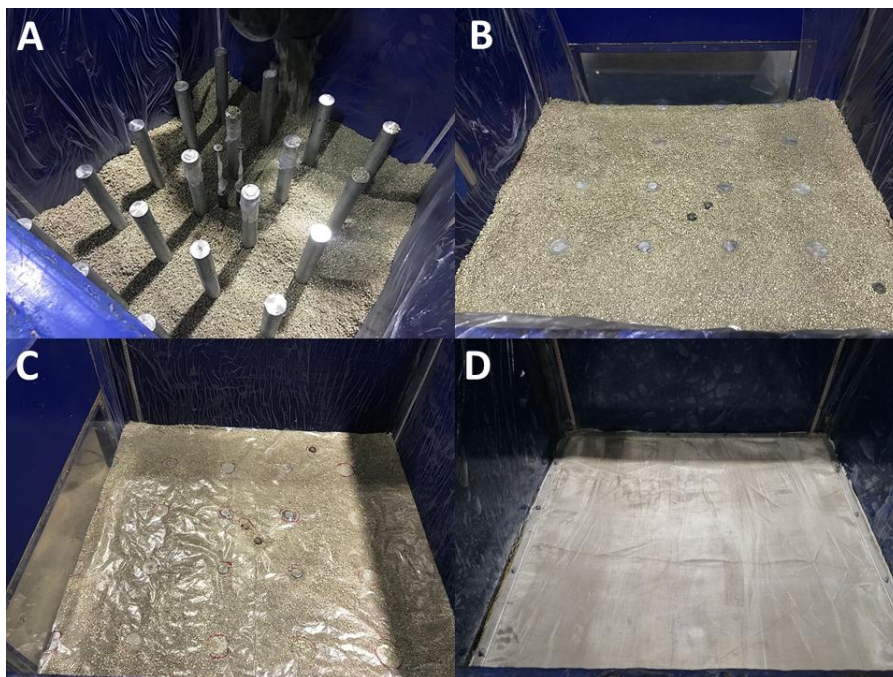


ภาพ 23 อัตราการผ่านและตกค้างของทรายทับหน้า ทรายผสมตัวอย่างและโพน

#### การเตรียมตัวอย่าง

##### วิธีเตรียมตัวอย่าง

นำดินตัวอย่างที่ผสมเก็บไว้ถังละ 55 กิโลกรัม 1 ถัง ใส่ลงไปในกลุ่มทดลองที่มีปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตรที่เตรียมไว้แล้วบดอัดให้ได้ความหนาที่ 10 เซนติเมตร จะได้ความหนาแน่นเท่ากับ 0.55 ตันต่อลูกบาศก์เมตร เสร็จแล้วนำดินตัวอย่างถังที่ 2, 3 และ 4 ใส่ลงไปในกลุ่มทดลองครั้งละ 1 ถังต่อ 1 ชั้น และบดอัดให้ได้ความหนาที่ 10 เซนติเมตรเหมือนเดิม ทำแบบนี้จนถึงชั้นที่ 4 ชั้นสุดท้ายตามดังภาพ 24 ถ้าหากกรณีมีการเสริมแผ่นใยสังเคราะห์ก็จะนำแผ่นใยสังเคราะห์ที่ติดโครงเหล็กสี่เหลี่ยมมีวางทับไว้



ภาพ 24 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง (ดินอ่อน)

#### วิธีไปรยทรายคั้นทาง

นำครนยกเครื่องไปรยทรายขึ้นวางบนกล่องที่บรรจุตัวอย่าง จากนั้นนำทรายหยาบที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ #8 ค้างเบอร์ #30 ใส่ลงไปเครื่องไปรยทรายจำนวน 170 กิโลกรัม (ใช้ความหนาแน่น 1.7 ตันต่อลูกบาศก์เมตร) จากนั้นปล่อยให้ทรายตกอย่างอิสระจนหมด จึงจะยกเครื่องไปรยทรายออกแล้วปรับหน้าให้เรียบจะได้ทรายที่มีความสูง 10 เซนติเมตร ทำ 3 ครั้ง ทรายทับหน้าจะมีความสูงที่ความสูง 30 เซนติเมตร รวมน้ำหนักทั้งหมด 510 กิโลกรัม (ความหนาแน่น 1.70 ตันต่อลูกบาศก์เมตร) ตามดังภาพ 25



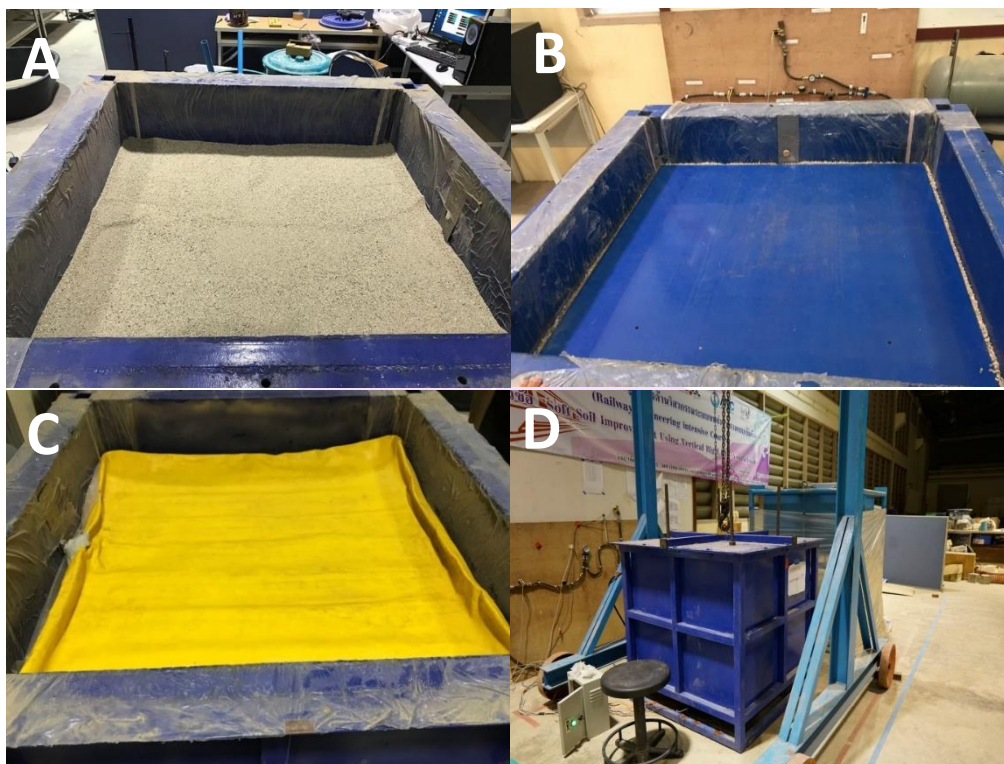
ภาพ 25 การปล่อยให้ทรายตกอย่างอิสระจนหมด

#### วิธีตั้งค่าการให้แรงของตัวอย่างที่ใช้ทรายเป็นดินทับหน้า

หลังจากโปรยทรายหรือหินทับหน้าเสร็จ นำแผ่นเหล็กขนาด 1x1 เมตร หนา 2 มิลลิเมตร วางทับลงไปเพื่อให้แรงกระจายลงได้ทั่วถึงทุกพื้นที่ เสร็จแล้วนำตุ้มลงวางลงไปบนพื้นแผ่นเหล็ก หลังจากนั้นนำฝาครอบมาปิดและยึดด้วยน๊อต บริเวณรอบ ๆ ของฝาปิด จากนั้นปล่อยให้ไว้ 12 ชั่วโมง จึงจะเริ่มให้แรง ตามดังภาพ 26

#### วิธีติดตั้งแผ่นใยสังเคราะห์ Geotextile และ Geogrid

นำแผ่นใยสังเคราะห์ที่ต้องการนำมาเสริมกำลังของดินอ่อนโดยตัดมาขนาดที่ 1 ตารางเมตร โดยจะมีเหล็กฉากประกบเพื่อให้แผ่นใยสังเคราะห์ที่นำมาติดตั้งมีความตึงโดยการติดตั้งจะทำการยึดกับเหล็กประกบแล้วยึดด้วยน๊อตเหล็ก พอเสร็จแล้วก็นำมาติดตั้งที่ชั้นบนของดินอ่อนก่อนทำการใส่วัสดุในชั้นถัดมา (ทราย)



ภาพ 26 วิธีตั้งค่าการให้แรงของตัวอย่าง (A) เมื่อใส่ทรายที่ความหนา 30 เซนติเมตร, (B) ใช้แผ่นเหล็กในการปิดทับเพื่อช่วยในการถ่ายแรงสม่ำเสมอ (C) นำถุงลมใส่จะให้แรงกับตัวอย่าง, (D) ปิดฝาให้สนิทพร้อมทำการทดสอบ

#### ทำการทดลองโดยการเริ่มใส่แรงในตัวอย่าง (ทราย)

1. เริ่มบันทึกค่าในโปรแกรมตั้งแต่นำฝาครอบมาปิดเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง โดยให้โปรแกรมบันทึกค่าทั้งหมด
2. หลังจากผ่านไป 12 ชั่วโมง ต่อสายลมจากเครื่องควบคุมแรงดันแล้วเริ่มให้แรงกดโดยใส่แรงดันเข้าไปในถุงลมจำนวน 5 kPa เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ฝ้าสังเกตและติดตามเซ็นเซอร์ควบคุมแรงดันอยู่ตลอดเวลาเพื่อไม่ให้เกิดปัญหา
3. หลังจากผ่านไป 3 ชั่วโมง เริ่มให้แรงกดโดยใส่แรงดันเข้าไปในถุงลมจำนวน 15 kPa เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ฝ้าสังเกตและติดตามเซ็นเซอร์ควบคุมแรงดันอยู่ตลอดเวลาเพื่อไม่ให้เกิดปัญหา

4. หลังจากผ่านไปอีก 3 ชั่วโมง เริ่มให้แรงกดโดยใส่แรงดันเข้าไปในถุงลมจำนวน 25 kPa เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เฝ้าสังเกตและติดตามเซ็นเซอร์ควบคุมแรงดันอยู่ตลอดเวลาเพื่อไม่ให้เกิดปัญหา

5. หลังจากผ่านไปอีก 3 ชั่วโมง ลดแรงดันให้เหลือ 0 kPa และฝาครอบและนำทรายทับหน้าออกแล้วทั้งหมด จึงหยุดการบันทึกค่า

6. นำทรายทับหน้าและดินตัวอย่างออก แล้วนำดินตัวอย่างไปล้างเพื่อแยกทรายกับโพลีเมอร์หลังจากนั้นนำโพลีเมอร์ทิ้งไปแล้วนำทรายไปตากให้แห้งเพื่อนำกลับมาทำตัวอย่างต่อไปดังตาราง 3

ตาราง 3 แผนการทดสอบ

การทดลอง	ชนิดของดิน ทาง	ชนิดหน่วยแรง พื้นผิว	หน่วยแรง พื้นผิว Pm (kPa)	การเสริมกำลัง
M_s1 M_s2_GT M_s3_GG	ทราย	คงที่	5-15-25	ไม่เสริม Geotextile Geogrid
Cy_s1 Cy_s2_GT Cy_s3_GG	ทราย	วัฏจักร	5-15	ไม่เสริม Geotextile Geogrid
Cy_s2 Cy_s22_GT Cy_s33_GG	ทราย		15-25	ไม่เสริม Geotextile Geogrid

ตาราง 4 คุณสมบัติของแผ่นใยสังเคราะห์

Properties of TenCate Miragrid Geogrids			Model
Property		Unit	GX 40/40
Initial Mechanical Properties			
Characteristic initial strength, $T_u$ (ISO 10319)	MD	kN/m	40
Characteristic initial strength (ISO 10319)	XD	kN/m	40
Characteristic initial strength at 5% strain (ISO103319)	MD	kN/m	20
Strain at initial strength	MD	(%)	10

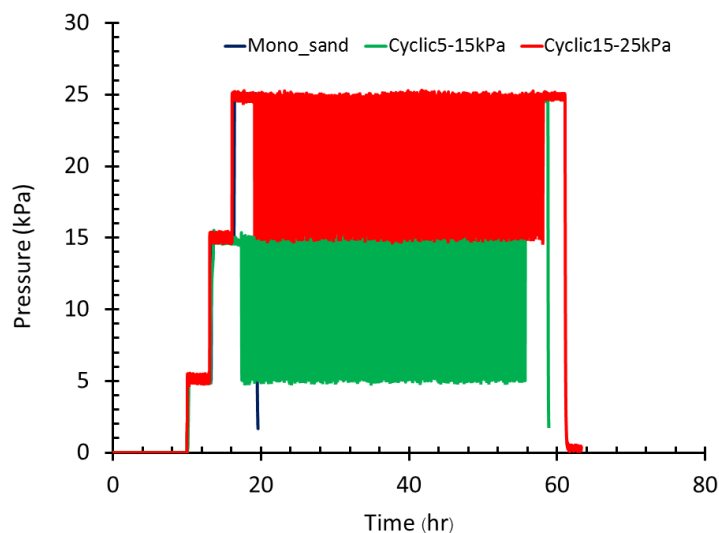
  

Properties of Polyfelt TS Woven Geotextiles			Model
Property		Unit	TS 20
Tensile strength (avg.) ISO 10319		kN/m	20
Tensile elongation (MD/CD) ISO 10319		(%)	75/35
Performance energy* Calculated		kN/m	25
CBR puncture strength ISO 12236		N	1500

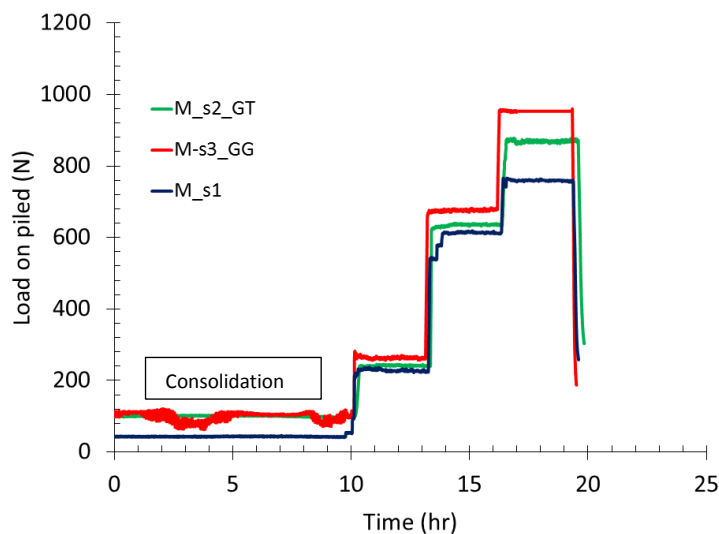
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

จากการทดลองตัวอย่างที่ใช้ดินคันทางคือ ทราย ภายใต้การให้แรงแบบคงที่และแบบวัฏจักรโดยมีการเสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์แบบถัก, แผ่นใยสังเคราะห์แบบตาราง และไม่มีการเสริมกำลัง ในการทดลองจะทำการทดลองโดยแบ่งการให้แรงออกเป็น 3 แบบ โดยแบบที่ 1 กราฟเส้นสีน้ำเงินโดยจะทำการให้แรงแบบคงที่ (5-15-25 kPa) ตามลำดับ โดยในแต่ละระดับการใส่แรงจะคงที่แรงไว้เป็นเวลา 3 ชั่วโมงเพื่อทำการเก็บข้อมูลและนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลการทดลองที่เกิดขึ้น แบบที่ 2 ในเส้นกราฟสีเขียวเราจะทำการให้แรงแบบคงที่ก่อน (5-15 kPa) จากนั้นจะใส่แรงเป็นวัฏจักรเป็นจำนวน 500 รอบ ที่หน่วยแรงสูงสุดคือ 15 kPa และต่ำสุดที่ 5 kPa หลังจากนั้นจะทำการให้แรงแบบคงที่ (25 kPa) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เป็นที่สิ้นสุดการทดลอง แบบที่ 3 ในเส้นกราฟสีแดงเราจะทำการให้แรงแบบคงที่ก่อน (5-15-25 kPa) จากนั้นจะใส่แรงเป็นวัฏจักรเป็นจำนวน 500 รอบ ที่หน่วยแรงสูงสุดคือ 25 kPa และต่ำสุดที่ 15 kPa หลังจากนั้นจะทำการให้แรงแบบคงที่ (25 kPa) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เป็นที่สิ้นสุดการทดลอง ดังแสดงภาพ 27

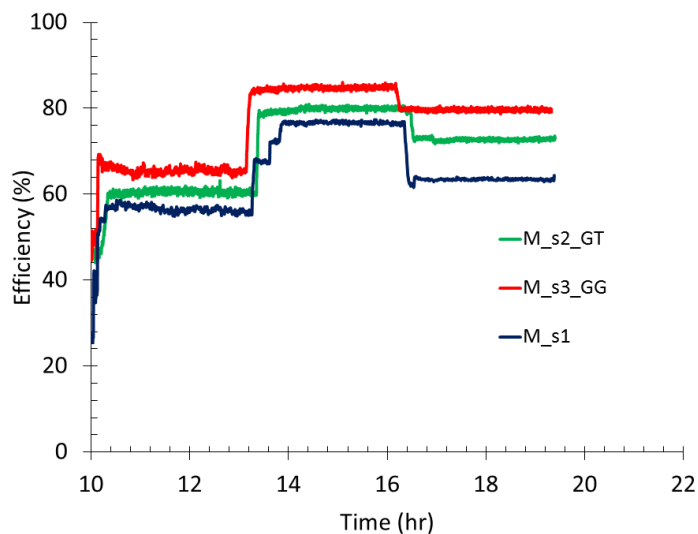


ภาพ 27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลา

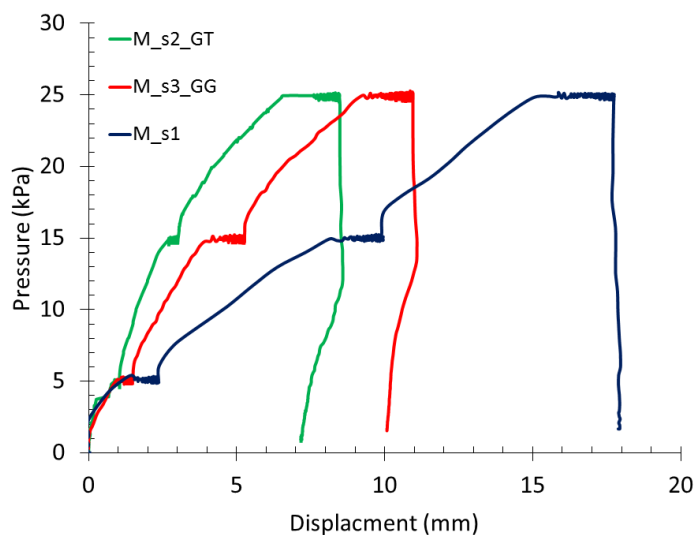


ภาพ 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่เกิดบนหัวเสาเข็มกับเวลา

จากภาพ 28 เมื่อเราทำการทดลองโดยใช้แรงกระทำที่คงที่ จากตัวอย่างของคันทางที่ใช้ทรายในการทดลองและมีการเสริมกำลังบนดินอ่อนโดยใช้แผ่นใยสังเคราะห์แบบถักและแบบตาราง และแบบไม่เสริมกำลัง ซึ่งจากผลการทดลองจะพบว่าเมื่อเราใส่แรงกระทำไปที่ 5 kPa แรงบนหัวเสาเข็มยังมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อเราใส่แรงกระทำไปที่ 15 kPa จนถึง 25 kPa จะพบว่าแรงที่เกิดบนหัวเสาเข็มของตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์จะมีค่ามากกว่าตัวอย่างของดินอ่อนที่ไม่เสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ ดังนั้นเมื่อเราเสริมกำลังของดินอ่อนด้วยวัสดุแผ่นใยสังเคราะห์จะส่งผลทำให้แรงที่ถ่ายลงสู่ดินอ่อนกระจายลงไปสู่เสาเข็มได้มากยิ่งขึ้น ดังภาพ 28 แต่ทั้งนี้เนื่องจากการเสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์แบบตารางมีความแข็งแรงที่สูงกว่าแบบการเสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์แบบถักซึ่งสังเกตได้จากกราฟเส้นสีแดงจะมีค่าแรงบนหัวเสาเข็มที่มากที่สุด ดังนั้นเมื่อแรงถ่ายลงสู่หัวเสาเข็มได้มากขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าประสิทธิภาพ (E) มีค่าที่มากขึ้นเช่นกัน ดังภาพ 29 ในทางเดียวกันเมื่อมีแรงกระทำต่อดินคันทางที่มากขึ้นส่งผลให้ดินอ่อนเกิดการทรุดตัวที่มากขึ้นตามแรงกระทำที่เราใส่เข้าไป แต่ในตัวอย่างการทดลองที่เสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์แบบตารางจะส่งผลให้ดินอ่อนเกิดการทรุดตัวที่มากกว่าแบบถักทั้งนี้เนื่องจากคุณลักษณะของแผ่นใยสังเคราะห์แบบตารางจะมีรูที่เป็นตารางที่กว้างมากทำให้ดินคันทางดันดินอ่อนที่อยู่ด้านใต้ทำให้เกิดค่าการทรุดตัวที่มาก ดังภาพ 30 โดยค่า Efficiency หรือ ค่าประสิทธิภาพคำนวณได้จากสมการที่ 3



ภาพ 29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าประสิทธิภาพกับเวลา

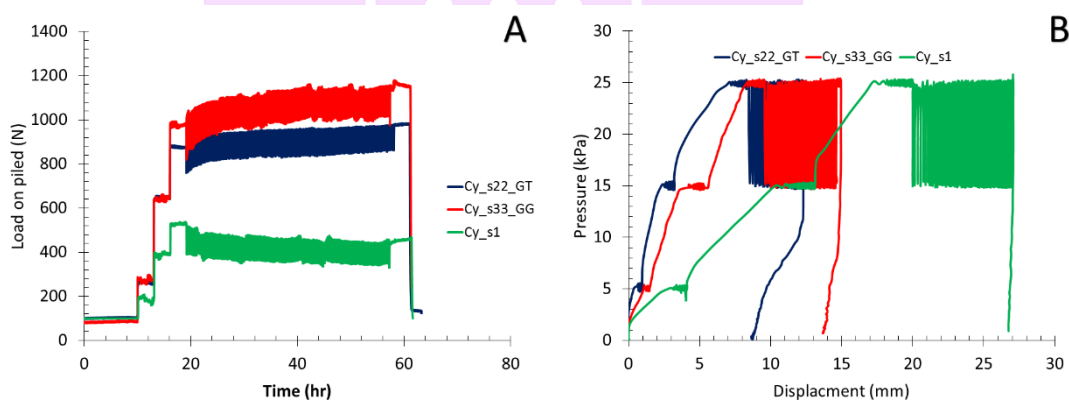


ภาพ 30 กราฟแสดงความสัมพันธ์แรงกระทำที่ใส่ลงไปในช่วงผิวดันทางกับการทรุดตัว

เมื่อเราใส่แรงดันให้กับตัวอย่างจะทำให้เกิดแรงกระทำที่ถ่ายลงสู่ดินคั่นทางไปสู่ดินอ่อน ดังภาพ 30 เป็นภาพที่แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวของดินอ่อนกับแรงดันที่มากกระทำกับตัวอย่าง ดังนั้นจะเห็นได้ว่า เมื่อมีแรงดันที่มากขึ้นจะทำให้เกิดการทรุดตัวที่มากขึ้นเช่นกัน

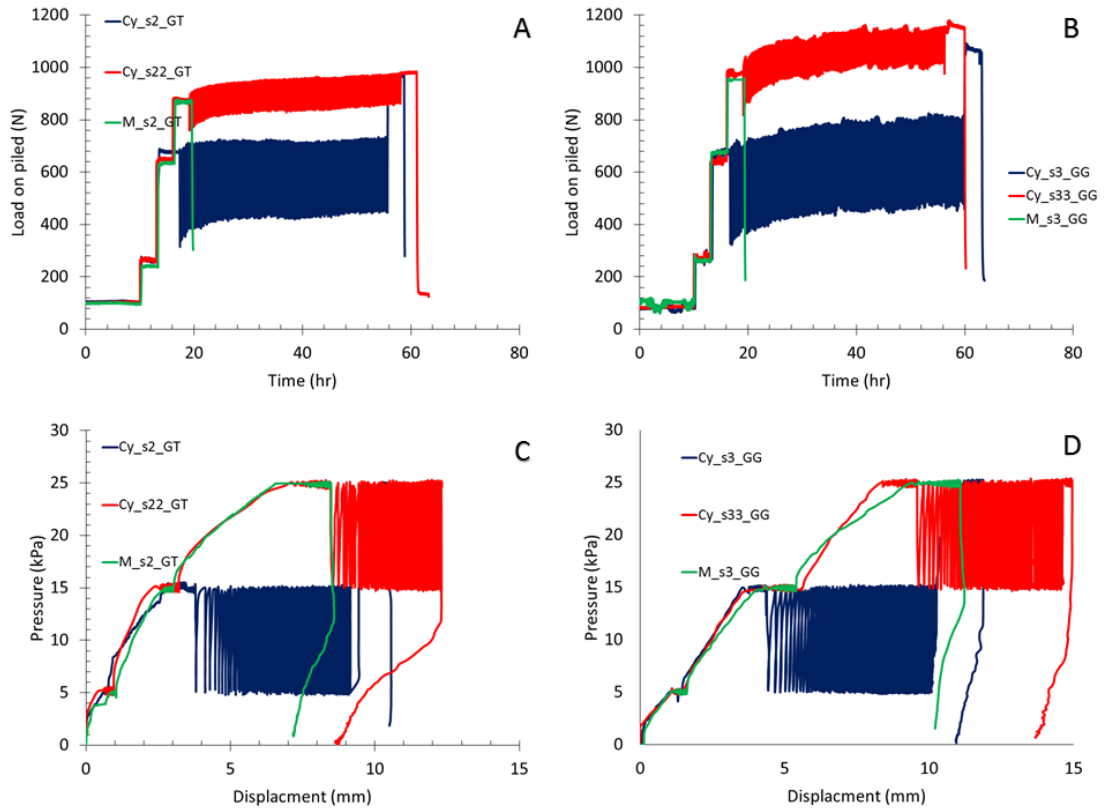
### เปรียบเทียบการเสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์และแบบไม่เสริมกำลัง

เมื่อเรานำข้อมูลที่ได้จากการทดลองตัวอย่างที่ใช้ทรายเป็นดินคั่นภายใต้เงื่อนไขโดยใส่แรงกระทำที่เป็นวงรอบและทำเปรียบเทียบตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังและไม่เสริมกำลังของดิน โดยจากรูป ภาพ 31(A) ทำให้เราเห็นว่าเมื่อเราใส่แรงกระทำบนดินคั่นทางแรงที่เกิดการถ่ายเทลงมาชั้นดินอ่อนในตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมกำลังซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่าแรงกระทำที่ถ่ายลงมาสู่เสาเข็มนั้นมีค่าน้อยกว่าในตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังของดินอ่อนโดยใช้แผ่นใยสังเคราะห์ ทำให้การทรุดตัวที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าที่มากกว่าอย่างเห็นได้ชัด ดังภาพ 31(B) ในกราฟเส้นสีเขียวจะมีการทรุดตัวที่เกิดขึ้นมากที่สุดเนื่องจากไม่มีการเสริมกำลังของดินอ่อนด้วยแผ่นใยสังเคราะห์



ภาพ 31 (A) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบนหัวเสาเข็มกับเวลาของตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์และไม่มีการเสริมกำลัง (B) กราฟแสดงการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับแรงกระทำที่ใส่ลงไป

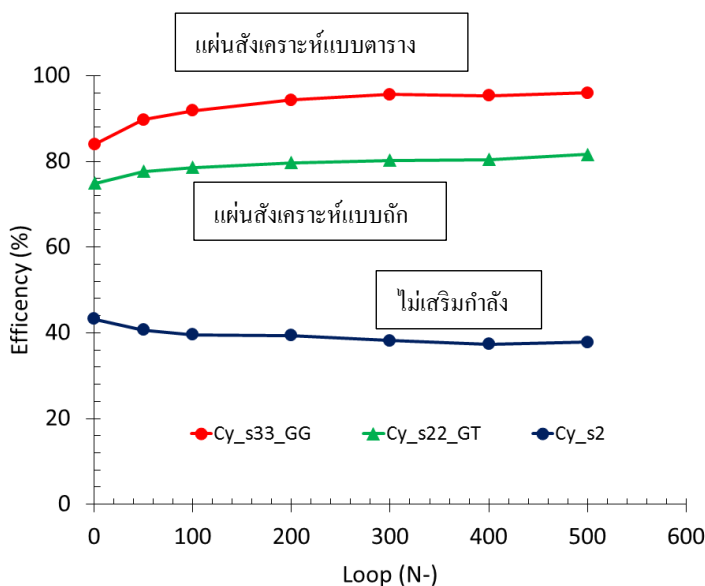
### เปรียบเทียบการเสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์



ภาพ 32 (A) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบนหัวเสาเข็มกับเวลาของตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์แบบถัก (B) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบนหัวเสาเข็มกับเวลาของตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์แบบตาราง (C) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับการทรุดตัวของตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์แบบถัก (D) ที่เสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์แบบตาราง

ในตัวอย่างการทดสอบมีการเสริมกำลังของดินอ่อนโดยใช้แผ่นใยสังเคราะห์เพื่อให้แรงถ่ายลงสู่หัวเสาเข็มมากที่สุด ดังนั้นการเสริมกำลังของดินอ่อนด้วยแผ่นใยสังเคราะห์จะทำให้ส่งผลให้ดินอ่อนเกิดการทรุดตัวที่น้อยลง เนื่องจากแรงที่ถ่ายลงมาจากดินคั่นทางจะลงสู่ดินอ่อนน้อยลง ในการทดลองเราทำการนำแผ่นใยสังเคราะห์ทั้ง 2 ประเภทนำมาเปรียบเทียบกัน ดังภาพ 32 (A) และ 32 (B) จะเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์แรงที่ถ่ายลงสู่หัวเสาเข็มโดยใช้แผ่นใยสังเคราะห์ที่ต่างกัน โดยเราจะเห็นถึงความแตกต่างของแรงที่ถ่ายลงสู่หัวเสาเข็มและ

ตัวอย่างการทดลองใน การเสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์แบบถัก ดังภาพ 32 (C) เกิดการทรุดตัวที่น้อยกว่าการเสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์แบบถัก



ภาพ 33 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับจำนวนรอบที่ทำการใส่แรงแบบวงรอบ

จากภาพ 33 จะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างภายใต้การให้แรงที่แบบวงรอบพบว่าการเสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ทำให้ระบบค่าประสิทธิภาพมีแนวโน้มที่มากขึ้นโดยกราฟที่แสดงจะเห็นได้ว่าในตัวอย่างการเสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์แบบตารางจะมีค่าประสิทธิภาพที่มากกว่าการเสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์แบบถัก จากกราฟเส้นสีแดง โดยเริ่มต้นที่ทำการใส่วงรอบจะมีค่าประสิทธิภาพ (E) = 85 จากนั้นเมื่อทำการใส่แรงเป็นวงรอบเป็นจำนวน 500 รอบ จะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพ (E) มีค่าที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากแผ่นใยสังเคราะห์ได้ทำการถ่ายแรงที่กระทำกับคันทางถ่ายลงสู่หัวเสาเข็มได้มากขึ้น แต่ในทางกลับกันในตัวอย่างที่ทำการทดลองที่ไม่มีการเสริมแผ่นใยสังเคราะห์เข้าไปนั้นบ่งชี้ให้เห็นว่าจากแนวกราฟ เส้นสีน้ำเงินเข็ม จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการใส่แรงเป็นวงรอบนั้นพบว่าประสิทธิภาพในระบบ (E) ที่เกิดขึ้น มีค่าแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากการทดลองเมื่อทำการใส่แรงเข้าไปซ้ำ ๆ ในตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ส่งผลทำให้แรงที่ถ่ายลงบนหัวเสาเข็มจะมีค่าที่ลดน้อยลง ดังนั้นเมื่อแรงที่ถ่ายลงบนหัวเสาเข็มที่ลดน้อยลงสามารถบ่งชี้ได้ว่าแรงที่ถ่ายลงมาจากคันทางจะถ่ายลงสู่ดินอ่อนด้วย จึงทำให้เกิดการทรุดตัวเกิดขึ้น

## บทที่ 5

### บทสรุปผลการวิจัย

แรงที่ถ่ายเทลงบนหัวเสาเข็มในตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์มีค่าที่มากกว่าในตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมกำลังการเสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ทำให้ลดการทรุดตัวของดินอ่อนอย่างเห็นได้ชัด

ค่าประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นในตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ทั้งแบบถักและแบบตาราง บ่งชี้ให้เห็นว่าค่าประสิทธิภาพ (E) ที่เกิดขึ้นในระบบมีค่าที่มากขึ้น

เมื่อเราใส่แรงกระทำที่ชั้นคันทาง 5 kPa ในตัวอย่างที่ใช้แรงภายใต้แรงกระทำแบบคงที่ทั้งในตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์และไม่เสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์พบว่าประสิทธิภาพ (E) มีค่าที่เพิ่มขึ้นจนไปถึงเมื่อใส่แรงเพิ่มบนชั้นคันทางที่ 15 kPa จนเมื่อถึงที่ใส่แรงสุดท้ายในการทดลองที่ 25 kPa จะพบว่าค่าประสิทธิภาพ (E) มีค่าอัตราที่ลดลง

ภายใต้การให้แรงแบบวงรอบในตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์แบบถักและแบบตาราง พบว่าการให้แรงแบบวงรอบในช่วง 500 รอบ ทำให้ค่าประสิทธิภาพ (E) มีอัตราที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ทั้งแบบถักและแบบตารางทำให้ทราบว่า แผ่นใยสังเคราะห์แบบตารางทำให้เกิดค่าประสิทธิภาพ (E) ที่มากกว่าแบบตาราง

ในตัวอย่างทดลองที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์จากผลการทดลองบ่งชี้ว่าค่าประสิทธิภาพ (E) เมื่อทำการใส่แรงเป็นวงรอบในช่วง 500 รอบ พบว่าค่าประสิทธิภาพ (E) จะมีค่าที่มีแนวโน้มลดลง ซึ่งพกผันกับตัวอย่างที่ไม่เสริมกำลังดินอ่อนด้วยแผ่นใยสังเคราะห์จะมีค่าประสิทธิภาพ (E) ที่เพิ่มขึ้น

การทรุดตัวที่เกิดขึ้นในตัวอย่างที่ไม่เสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังของดินอ่อนด้วยแผ่นใยสังเคราะห์พบว่าในตัวอย่างที่ไม่เสริมกำลังจะมีการทรุดตัวที่มากกว่าของตัวอย่างที่ไม่เสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ อีกทั้งยังบ่งชี้ให้เห็นว่าแรงที่ถ่ายจากชั้นคันทางลงสู่หัวเสาเข็มในตัวอย่างที่ไม่เสริมกำลังของดิน ถ่ายลงสู่หัวเสาเข็มได้มากกว่าตัวอย่างที่ไม่เสริมกำลังของดิน

## บรรณานุกรม

- Antoine, P. (2010). **Etude des dalles sur sols renforcés au moyen d'inclusions rigides ou non (Study of Slabs above Reinforced Soils by Rigid Inclusions)**. PhD thesis). Faculty of Applied Science, Brussels. In French,
- Baudouin, G. (2010). **Sols renforcés par inclusions rigides: modélisation physique en centrifugeuse de remblais et de dallage**. Nantes,
- Blanc, M., Rault, G., Thorel, L. และ Almeida, M. (2013). Centrifuge investigation of load transfer mechanisms in a granular mattress above a rigid inclusions network. **Geotextiles and Geomembranes**, 36, 92–105.
- De Pasquale, A. (2011). **Cyclic behaviour of geotechnical structures involving granular mats**. Master thesis). University Grenoble Alps, France,
- Demerdash, M. A. (1996). **An experimental study of piled embankments incorporating geosynthetic basal reinforcement**. Newcastle University,
- Dinh, A. Q. (2009). **Étude sur modèle physique des mécanismes de transfert de charge dans les sols renforcés par inclusions rigides. Application au dimensionnement**.
- Eskişar, T., Otani, J. และ Hironaka, J. (2012). Visualization of soil arching on reinforced embankment with rigid pile foundation using X-ray CT. **Geotextiles and Geomembranes**, 32, 44–54.
- Filz, G. M. และ Navin, M. P. (2006). *Stability of column-supported embankments*. Retrieved from
- Girout, R., Blanc, M., Thorel, L., Fagundes, D. F. และ Almeida, M. S. (2016). Arching and deformation in a piled embankment: centrifuge tests compared to analytical calculations. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 142(12), 04016069.
- Heitz, C., Lüking, J. และ Kempfert, H.–G. (2008). Geosynthetic reinforced and pile supported embankments under static and cyclic loading. **Strain**, 1, 1–5.
- Hewlett, W. และ Randolph, M. (1988). Analysis of piled embankments. ใน **Paper presented**

at the **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts** (หน้า 297–298).

Horgan, G. และ Sarsby, R. (2002). The arching effect of soils over voids and piles incorporating geosynthetic reinforcement. ใน **Paper presented at the Proceedings, 7th International Conference on Geosynthetics** (หน้า 373–378).

Jenck, O. (2005). **Le renforcement des sols compressibles par inclusions rigides verticales. Modélisation physique et numérique.**

Jenck, O., Dias, D. และ Kastner, R. (2007). Two-dimensional physical and numerical modeling of a pile-supported earth platform over soft soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 133(3), 295–305.

Kempfert, H. G., Stadel, M. และ Zaeske, D. (1997). Berechnung von geokunststoffbewehrten Teagschichten über Pfahlelementen. **Bautechnik (Berlin)**, 1984(12), 818–825.

Tanthakosol, K., Kriengtaweekit, T., Jongpradist, P., Phutthananon, C. และ Sukkarak, R. (2018). Effect of Load Transfer Platform Stiffness on Differential Settlement of Deep Cement Mixing Pile Supported Embankment. **Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok**, 28(4).

Terzaghi, K. (1965). Theoretical soil mechanics. **John Wiley and Sons.**

Terzaghi, K. (1936). Stress distribution in dry and in saturated sand above a yielding trap-door.

Van Eekelen, S., Bezuijen, A. และ Van Tol, A. (2013). An analytical model for arching in piled embankments. **Geotextiles and Geomembranes**, 39, 78–102.

Van Eekelen, S. J., Bezuijen, A., Lodder, H. และ van Tol, e. A. (2012). Model experiments on piled embankments. Part I. **Geotextiles and Geomembranes**, 32, 69–81.

Van Eekelen, S. J., Bezuijen, A., Lodder, H. และ van Tol, e. A. (2012). Model experiments on piled embankments. Part II. **Geotextiles and Geomembranes**, 32, 82–94.

Yun-Min, C., Wei-Ping, C. และ Ren-Peng, C. (2008). An experimental investigation of soil arching within basal reinforced and unreinforced piled embankments. **Geotextiles and Geomembranes**, 26(2), 164–174.

Zaeske, D. (2001). EBGeo: Zur Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen

Tragschichten über pfahlartigen Gründungselementen. **Schriftenreihe Geotechnik,**  
**Universtat Kassel, 10.**



## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	Nipun Insoog
วัน เดือน ปี เกิด	24 May 1995
สถานที่เกิด	Phayao. Thailand.
วุฒิการศึกษา	Piyamit Wittaya School. Triamudomsoksapattanakarn Chiangrai. University of Phayao.
ที่อยู่ปัจจุบัน	446 M.8 Thung Ruang Thong, Chun, Phayao, Thailand.
ผลงานตีพิมพ์	International Journal of GEOMATE

