

การศึกษาการถ่ายแรงจากดินคั่นทางสู่เสาเข็มรองรับในดินอ่อน ด้วยวิธี  
ความสัมพันธ์ทางภาพถ่าย



วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
กันยายน 2563  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

การศึกษาการถ่ายรังจากดินคั่นทางสู่เสาเข็มรองรับในดินอ่อน ด้วยวิธีความสัมพันธ์ทาง  
ภาพถ่าย



วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
กันยายน 2563  
ชัยสิทธิ์เฟื่องจันทร์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

INVESTIGATION LOAD TRANSFER ON PILED EMBANKMENTS OVER SOFT SOIL BY DIGITAL  
IMAGE CORRELATION



CHASIT PENGJAN

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

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาการถ่ายแรงจากดินคันทางสู่เสาเข็มรองรับในดินอ่อน ด้วยวิธีความล้มพันธ์ทาง  
ภาพถ่าย

ของ ชัยสิทธิ์ เพ็งจันทร์

ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ของมหาวิทยาลัยพะเยา

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ดร.กรกฎ นุสิทธิ์)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุริยาวุธ ประอ้าย)

..... อาจารย์บัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยพะเยา

(ดร. ปาลีณี สุमितสุวรรณค์)

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธีรพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ)

<b>เรื่อง:</b>	การศึกษาการถ่ายแรงจากดินคั่นทางสู่เสาเข็มรองรับในดินอ่อน ด้วยวิธีความสัมพันธ์ทางภาพถ่าย
<b>ผู้วิจัย:</b>	ชัยสิทธิ์ เพ็งจันทร์, วิทยานิพนธ์: วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, 2563
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา:</b>	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุริยาวัชร ปรธะอำย
<b>คำสำคัญ</b>	แบบจำลองทางกายภาพ, การถ่ายแรงของดินคั่นทาง, ความสัมพันธ์ของภาพถ่าย, แรงวงจจักร

#### บทคัดย่อ

ความต้องการที่เพิ่มขึ้นสำหรับการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานทำให้วิศวกรจำเป็นต้องออกแบบโครงสร้างบนชั้นดินอ่อน แรงกระทำภายนอกที่พื้นผิวดินจะทำให้เกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันอย่างมา การทรุดตัวเหล่านี้จะเป็นจะต้องถูกจำกัดเพื่อให้เกิดเสถียรภาพและความมั่นคงของโครงสร้าง ในบรรดาวิธีการต่าง ๆ ของวิธีการปรับปรุงดิน วิธีการปรับปรุงดินโดยใช้เสาเข็มซึ่งเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับเทคนิคแบบดั้งเดิมมากขึ้นถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง บทความนี้นำเสนอการศึกษาการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นในชั้นดินถมที่วางอยู่บนชั้นดินอ่อนที่เสริมกำลังด้วยเสาเข็มภายใต้หน่วยแรงคงที่และแบบวงจจักร โดยใช้แบบจำลองแบบสามมิติในห้องปฏิบัติการแบบจำลองที่ใช้ศึกษาจะประกอบไปด้วยเสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ซม. จำนวน 20 ต้น ผังในชั้นดินอ่อนเสมือน การประยุกต์ใช้วิธีการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของภาพถ่าย (Digital Image Correlation, DIC) จะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์กลไกในการถ่ายแรง จากการทดสอบพบว่าการทรุดตัวสะสมและการเพิ่มขึ้นของแรงที่ถูกถ่ายไปยังหัวเสาเข็มในระหว่างการให้แรงแบบวงจจักรสามารถตรวจวัดได้ การวิเคราะห์ภาพถ่ายช่วยให้สามารถเข้าใจถึงการเคลื่อนที่ในชั้นถ่ายแรง

**Title:** INVESTIGATION LOAD TRANSFER ON PILED EMBANKMENTS OVER SOFT SOIL BY DIGITAL IMAGE CORRELATION

**Author:** Chaisit Pengjan, Thesis: M.Eng. (Civil Engineering), University of Phayao, 2020

**Advisor:** Assistant Professor Dr. Suriyayut Pra-ai

**Keyword** Physical modeling, Load Transfer Platform, Digital Image Correlation, Cyclic Loading

#### ABSTRACT

The rapid growth in infrastructure development has forced the engineers to design their structures on compressible soils. The structural load applied to the surface of a compressible ground introduces large total and differential settlement. These settlements have to be limited in order to maintain the stability and the durability of the concerned structures. Among various methods of soil improvement, the technique of employing the vertical rigid piles is widely implemented. It is an interesting alternative to more traditional techniques. This research focuses on the mechanistic behaviors of granular top soil supported by piles embedded in soft soil layer under the monotonic and cyclic loadings. An original three-dimensional laboratory model was developed. The model contains 20 rigid piles, and the compressible soil is explicitly simulated by a soft material. A Digital Image Correlation (DIC) technique was used to analyze the force and displacement taking place in the load transfer platform. It was found that the settlement accumulation and an increase in the load transmitted to the piles were observed during the loading cycles. The image analysis provides the access to the displacement field within the granular platform.



## กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจาก มหาวิทยาลัยพะเยา สัญญาหมายเลข RD61091 และทางผู้วิจัยยังขอขอบคุณ โครงการ Junior Fellowship Program 2019 โดย Campus France Thailand อีกทัง 3SR Laboratory, Grenoble สำหรับการช่วยเหลือทางด้านเทคนิคและคำแนะนำในการทดสอบ

ชัยสิทธิ์ เฟ็งจันทร์



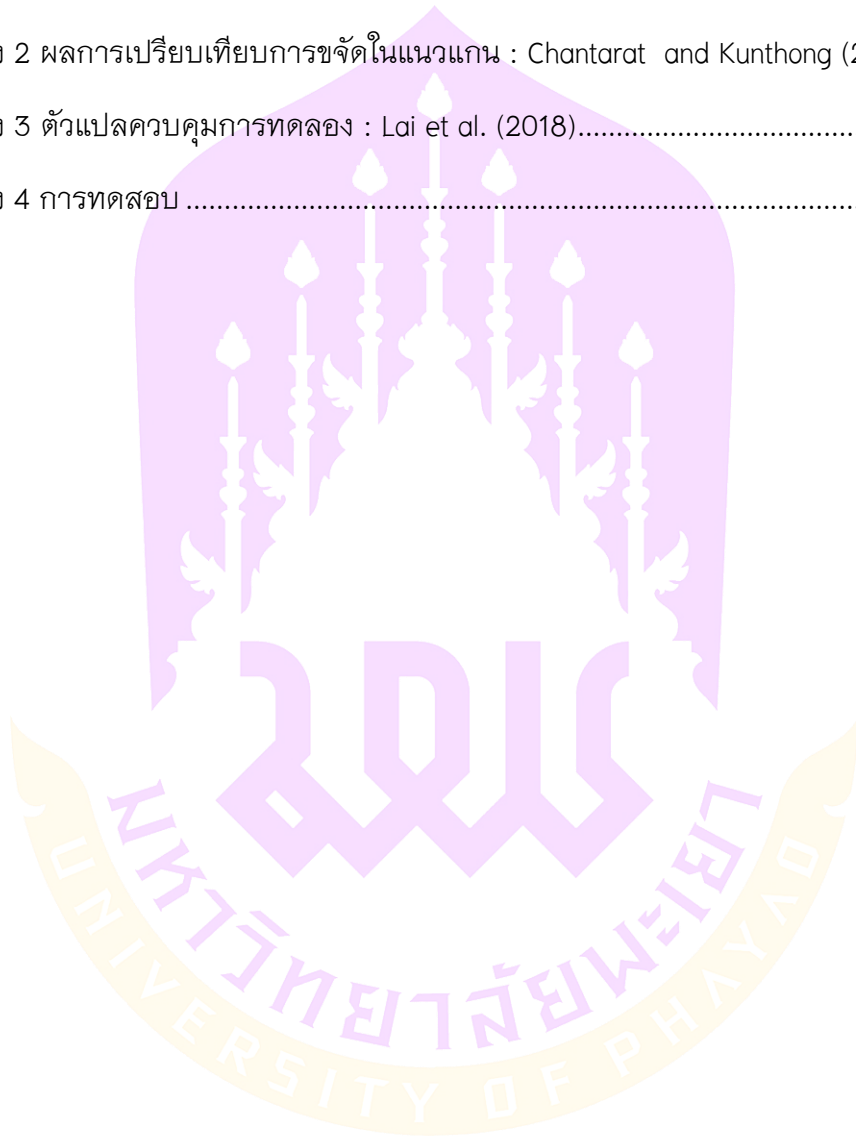
## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญ .....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	3
ขอบเขตการศึกษา.....	4
แผนการดำเนินงานวิจัย.....	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	7
การเสริมกำลังของดินอ่อนด้วยเสาเข็ม .....	7
การเสริมกำลังของดินอ่อนด้วยเสาเข็ม.....	7
กลไกการถ่ายแรงแบบเส้นโค้ง (Arcing Effect).....	7
การวิเคราะห์เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของภาพถ่าย (Digital Image Correlation, DIC).....	11
การวิเคราะห์ผลการทดสอบจากภาพถ่าย.....	11
ภาพถ่ายดิจิทัล (Digital Image) .....	12
การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของภาพถ่าย (Digital Image Correlation, DIC)...	13
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14

บทที่ 3 วิธีดำเนินการ .....	33
วัสดุ และ อุปกรณ์ .....	33
แบบจำลอง 3 มิติ (Physical Model) .....	33
ดินเหนียวอ่อนเสมือน (Soft Soil) .....	33
วัสดุตัดเลือกคันทาง ( Embankment ) .....	36
การถ่ายภาพ .....	37
การเตรียมการทดสอบ .....	38
วิธีเตรียมเครื่องมือ .....	38
การเตรียมตัวอย่างทดสอบ .....	41
วิธีการเตรียมดินคันทาง .....	42
วิธีตั้งค่าการให้แรงของตัวอย่าง .....	43
การเตรียมการถ่ายภาพ .....	44
วิธีวิเคราะห์ผลจากภาพถ่ายการวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม NCorr .....	47
บทที่ 4 ผลการศึกษาและการอภิปรายผล .....	49
ผลการทดสอบการให้แรงแบบคงที่ วัสดุตัดเลือกคันทางจำลอง ทราบาย (M <sub>s</sub> ) .....	50
ผลการทดสอบการให้แรงแบบคงที่ วัสดุตัดเลือกคันทางจำลอง หิน (M <sub>g</sub> ) .....	54
ผลการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักร วัสดุตัดเลือกคันทางจำลอง ทราบาย (Cyc <sub>s</sub> _5-15) ..	58
ผลการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักร วัสดุตัดเลือกคันทางจำลอง หิน (Cyc <sub>s</sub> _5-15) .....	63
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ .....	68
บรรณานุกรม .....	70
ประวัติผู้วิจัย .....	75

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 แผนการดำเนินงาน .....	5
ตาราง 2 ผลการเปรียบเทียบการจัดในแนวแกน : Chantararat and Kunthong (2013).....	25
ตาราง 3 ตัวแปรควบคุมการทดลอง : Lai et al. (2018).....	26
ตาราง 4 การทดสอบ .....	47



## สารบัญภาพ

หน้า

ภาพ 1 แรงกระทำต่อฐานราก (a) ฐานรากแผ่ , (b) ฐานรากลึก , (c) ฐานรากผสม , (d) เสาค้ำเสริม เสริมกำลัง : (IREX, 2012) .....	2
ภาพ 2 เครื่องมือทดสอบประตูกล : Lai et al. (2018) .....	8
ภาพ 3 เส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างของเสาค้ำเสริม .....	9
ภาพ 4 กลไกการถ่ายโอนแรงของดินคันทาง : Filz et al. (2012).....	10
ภาพ 5 รูปแบบการจำแนกการเกิดส่วนโค้ง (a) “Shear plane arching”; (b) “Partial arching”; (c) “Full arching” : Lai et al. (2018) .....	11
ภาพ 6 ตัวอย่างภาพถ่ายดิจิทัล (Digital Image).....	12
ภาพ 7 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในรูปภาพ .....	14
ภาพ 8 การทดลองประตูกลโดยใช้ดินเหนียว : Jenck, Dias and Kastner (2009) .....	16
ภาพ 9 ประสิทธิภาพการถ่ายแรงเมื่อเทียบกับอัตราส่วนพื้นที่ .....	16
ภาพ 10 การพัฒนาประสิทธิภาพด้วยแรงดัน (a) วัฏจักรแรก , (b) วัฏจักรแรก และ 2.....	18
ภาพ 11 แบบจำลองการศึกษาอิทธิพลของคุณลักษณะของแผ่นใยสังเคราะห์ และผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของแรง ในกลไกการถ่ายโอนแรง : Van Eekelen et al. (2012).....	19
ภาพ 12 แบบจำลองแนวเส้นโค้ง (Arching Model) : Hewlett and Randolph (1988) .....	20
ภาพ 13 แบบจำลองเส้นแนวโค้งศูนย์กลาง (Concentric Arched Model) ที่ได้รับเสริมกำลังด้วยวัสดุใยสังเคราะห์ : Van Eekelen, Bezuijen and Van Tol (2013) .....	21
ภาพ 14 การเสริมกำลังดิน : แบบไม่มีวัสดุแผ่นใยสังเคราะห์(ซ้าย) และมีวัสดุแผ่นใยสังเคราะห์(ขวา) : Blanc et al. (2013).....	22
ภาพ 15 แพนผังและลักษณะโดยทั่วไปของอุปกรณ์ทดสอบเคลื่อนที่ (Mobile tray) .....	22
ภาพ 16 การเปรียบเทียบผลการทดสอบ : Blanc et al. (2013).....	23
ภาพ 17 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับทดสอบ : Chantararat and Kunthong (2013).....	24

ภาพ 18 ลักษณะการเกิดแรงส่วนโค้งอย่างเต็มรูปแบบ (Full Arching).....	27
ภาพ 19 การศึกษาการจำลองคานยึดหยุ่นในวัสดุเมต .....28	28
ภาพ 20 ผลทดสอบการตรวจสอบประสิทธิภาพของเสาเข็มสกรู และเพลลา (a) เสาเข็มสกรู เพลลา , (b)เสาเข็มเพลลา : Chen et al. (2018) .....	30
ภาพ 21 การศึกษาพฤติกรรมระหว่างเสาเข็มและดินที่อยู่บริเวณรอบ ๆ เสาเข็มลักษณะการให้ แรง (a) ให้แรงโดยตรง , (b) ให้แรงทางอ้อม : Helm and Suleiman (2012) .....	31
ภาพ 22 ผลการวิเคราะห์การศึกษาพฤติกรรมระหว่างเสาเข็มและดินที่อยู่บริเวณรอบ ๆ (a) ให้ แรงโดยตรง , (b) ให้แรงทางอ้อม : Helm and Suleiman (2012).....	32
ภาพ 23 แบบจำลอง 3 มิติ (a) แบบจำลอง 3 มิติ, (b) แบบจำลอง 3 มิติ มุมมองด้านบน , (c) ส่วนประกอบภายในแบบจำลอง มุมมอง A-A.....	34
ภาพ 24 การผสมตัวอย่าง (a) เม็ดโฟม , (b) ทราายที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ #30 ค้างเบอร์ #50 , (c) ตัวอย่างดินอ่อนเสมือนที่ผสมเสร็จ .....	34
ภาพ 25 กราฟการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างดินอ่อนเสมือน.....	35
ภาพ 26 วัสดุคัดเลือกคั้นทาง (a) ทราายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ #8 ค้างเบอร์ #30, (b) หิน ที่ผ่าน ตะแกรงเบอร์ #4 ค้างเบอร์ #16 .....	36
ภาพ 27 กราฟอัตราการผ่านและตกค้างของวัสดุคัดเลือก และ ดินอ่อนเสมือน.....	36
ภาพ 28 อุปกรณ์ในการถ่ายภาพ (a) กล้องและเลนส์ , (b) ฉากกันแสง , (c) ไฟสปอตไลท์ LED .....	37
ภาพ 29 การเตรียมเครื่องมือ (a) การติดตั้งเซ็นเซอร์ , (b) การคลุมพลาสติกขนาด 1x1 เมตร 3 ด้าน ,(c) อุปกรณ์ควบคุมแรงดัน , (d) กล้องรับข้อมูลจากเซ็นเซอร์.....	39
ภาพ 30 ระบบการทำงานของเครื่องมือ.....	40
ภาพ 31 การเตรียมตัวอย่างภายในแบบจำลอง (a) ชั้นที่ 1 สูง 10 เซนติเมตร , (b) ชั้นที่ 2 ความสูง 20 เซนติเมตร , (c) ชั้นที่ 3 ความสูง 30 เซนติเมตร , (d) ชั้นที่ 4 ความสูง 40 เซนติเมตร.....	41
ภาพ 32 การโปรทราย (a) นำครนยกเครื่องโปรทรายขึ้น , (b) ปล่อยให้ทรายตกอย่างอิสระ จนหมด แล้วทำซ้ำให้ครบ 3 ครั้ง .....	42

ภาพ 33 อุปกรณ์การให้แรง (a) วางแผ่นเหล็กขนาด 1x1 เมตร , (b) นำปลั๊กกลมวางลงบนแผ่นเหล็ก , (c) ปิดฝาครอบและยึดด้วยน็อต ..... 43

ภาพ 34 การเตรียมการถ่ายภาพ (a) การติดตั้งกล่องแสงภายในฉากกันแสง , (b) การตั้งกล่อง ..... 44

ภาพ 35 รูปแบบการให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างทดสอบและลำดับการถ่ายภาพทดสอบ ในการทดสอบการให้แรงแบบคงที่ ..... 45

ภาพ 36 รูปแบบการให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างทดสอบและลำดับการถ่ายภาพทดสอบ ในการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักร ..... 46

ภาพ 37 แผนผังการทำงานของโปรแกรม NCorr ..... 48

ภาพ 38 ผลการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงจากดินคั่นทางสู่เสาเข็มรองรับด้วยวิธี ความสัมพันธ์ทางภาพถ่าย แสดงการเคลื่อนที่สะสม การทดสอบ  $M_s$  ..... 52

ภาพ 39 ผลการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงจากดินคั่นทางสู่เสาเข็มรองรับด้วยวิธี ความสัมพันธ์ทางภาพถ่าย แสดงการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ การทดสอบ  $M_s$  ..... 53

ภาพ 40 ผลการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงจากดินคั่นทางสู่เสาเข็มรองรับด้วยวิธี ความสัมพันธ์ทางภาพถ่าย แสดงการเคลื่อนที่สะสม การทดสอบ  $M_g$  ..... 56

ภาพ 41 ผลการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงจากดินคั่นทางสู่เสาเข็มรองรับด้วยวิธี ความสัมพันธ์ทางภาพถ่าย แสดงการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ การทดสอบ  $M_g$  ..... 57

ภาพ 42 ผลการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงจากดินคั่นทางสู่เสาเข็มรองรับด้วยวิธี ความสัมพันธ์ทางภาพถ่าย แสดงการเคลื่อนที่สะสม การทดสอบ Cyc\_s\_5-15 ..... 61

ภาพ 43 ผลการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงจากดินคั่นทางสู่เสาเข็มรองรับด้วยวิธี ความสัมพันธ์ทางภาพถ่ายแสดงการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่การทดสอบ Cyc\_s\_5-15 ..... 62

ภาพ 44 ผลการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงจากดินคั่นทางสู่เสาเข็มรองรับด้วยวิธี ความสัมพันธ์ทางภาพถ่ายแสดงการเคลื่อนที่สะสมการทดสอบ Cyc\_g\_5-15 ..... 66

ภาพ 45 ผลการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงจากดินคั่นทางสู่เสาเข็มรองรับด้วยวิธี ความสัมพันธ์ทางภาพถ่ายแสดงการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่การทดสอบ Cyc\_g\_5-15 ..... 67

## บทที่ 1

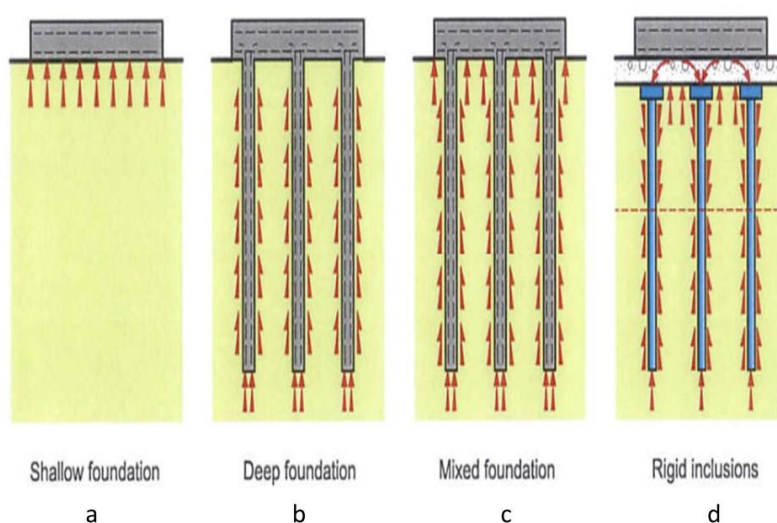
### บทนำ

#### ที่มาและความสำคัญ

จากการขยายตัวทางด้านเศรษฐกิจในเขตพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศไทย ทำให้การก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญ เช่น ถนน สะพาน ทางรถไฟ จำเป็นต้องวางอยู่บนชั้นดินที่ไม่เหมาะสมซึ่งไม่สามารถแบกรับน้ำหนักบรรทุกได้ เช่น ดินเหนียวอ่อน ซึ่งผลที่ตามมาคือการเผชิญกับปัญหาของการวิบัติเนื่องจากการกำลังแบกทานและการทรุดตัวที่มากเกินไป ดังนั้นจึงได้มีวิธีการปรับปรุงกำลังแบกทานของดินหรือหาวิธีที่จะทำให้สามารถสร้างสิ่งปลูกสร้างบนดินที่มีลักษณะดังกล่าว ซึ่งวิธีการปรับปรุงเสถียรภาพของดินนั้นมีมากมายหลากหลายวิธี เช่น เทคนิคการใช้สารผสมเพิ่ม (Admixtures) ที่จะช่วยเพิ่มค่าการรับแรงของดินให้มีค่ามากขึ้น (Abdel-Salam, 2018; Rios et al., 2016) แต่วิธีนี้ก็ยังมีปัญหาความยุ่งยากในการผสมสารเคมีหรือวัสดุต่าง ๆ เข้ากับดินเป็นอย่างมาก หรือเทคนิคการเร่งระบายน้ำด้วยท่อในแนวตั้ง (Prefabricated Vertical Drain, PVD) ที่เป็นเทคนิคในการนำน้ำที่มีอยู่ในมวลดินออกมาโดยการฝังท่อลงไปใต้ดินแล้วทำการถมดินไว้ข้างบนเพื่อกดทับดินเดิมให้ระบายน้ำออกมา (Gao and Zhang, 2020; Lam, Bergado and Hino, 2015) วิธีนี้จะสามารถลดปัญหาการทรุดตัวของดินได้เป็นอย่างดี แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของระยะเวลาที่ยาวนาน

การใช้เสาเข็มช่วยเสริมกำลังของดินอ่อนเป็นอีกหนึ่งเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นวิธีที่รวดเร็วและประหยัดงบประมาณ (Houda, Jenck and Emeriault, 2016; Jenck, Dias and Kastner, 2007; Van Eekelen et al., 2012) เมื่อเทียบกับวิธีการปรับปรุงดินอ่อนด้วยวิธีการอื่นๆ รูปแบบของการเสริมกำลังของดินอ่อนด้วยเสาเข็มนั้น เป็นการใช้เสาเข็มเข้าไปช่วยรับแรงที่จะมากระทำต่อดินอ่อนโดยตรง โดยแรงที่ถูกถ่ายลงสู่เสาเข็มจะบอกถึงประสิทธิภาพของการเสริมกำลัง วิธีการนี้จะทำให้ดินอ่อนนั้นรับแรงที่มากกระทำน้อยลงเนื่องจากกลุ่มของเสาเข็มและดินถมจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่ากลไกการถ่ายแรงแบบเส้นโค้ง (Arcing Effect) (Terzaghi, 1936; Jenck, Dias and Kastner, 2007; Lai et al., 2018) ซึ่งเป็นรูปแบบกลไกการถ่ายโอนแรงของดินคั่นทาง (Load Transfer Platform) สู่เสาเข็มในลักษณะของเส้นโค้ง (ภาพ 1) โดยลักษณะของเส้นโค้งที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดแบบเต็มรูปแบบ (Full

Arching) หรือเกิดแค่บางส่วน (Partial arching) ก็ขึ้นอยู่กับระยะห่างของเสาเข็ม ขนาดหน้าตัดของเสาเข็ม และความสูงของดินคั่นทาง ลักษณะกลไกการถ่ายแรงแบบเส้นโค้งแบบเต็มรูปแบบนั้นจะให้ประสิทธิภาพของการเสริมกำลังที่ดีกว่ากลไกการถ่ายแรงแบบเส้นโค้งแบบไม่เต็มรูปแบบ



ภาพ 1 แรงกระทำต่อฐานราก (a) ฐานรากแผ่ , (b) ฐานรากลึก , (c) ฐานรากผสม , (d) เสาเข็มเสริมกำลัง : (IREX, 2012)

โดยเทคนิคการปรับปรุงดินด้วยเสาเข็มนั้นสามารถนำไปใช้ได้กับสิ่งปลูกสร้างทุกรูปแบบ ทั้งยังปรับใช้ได้เป็นอย่างดีกับโครงสร้างที่มีแรงกระทำอย่างสม่ำเสมอ เช่น ถนน ทางรถไฟ โรงงานอุตสาหกรรม และอาคารพาณิชย์ เป็นต้น ทั้งนี้พื้นฐานของการเสริมกำลังของดินอ่อนด้วยเสาเข็มนั้นมีความคล้ายคลึงกับการสร้างฐานราก ซึ่งดินอ่อนบางส่วนนั้นยังจะได้รับแรงอยู่ การศึกษาการเสริมกำลังของดินอ่อนด้วยเสาเข็มได้รับความนิยมจากนักวิจัยอย่างมากมาทั้งในห้วงปฏิบัติการแบบย่อย (Blanc et al., 2013; Ellis and Aslam, 2009; Jenck, Dias and Kastner, 2007; Okyay et al., 2014; Van Eekelen et al., 2012) ในภาคสนาม (Lajvardi, Dias and Briançon, 2015; Van Eekelen, Bezuijen and Alexiew, 2008) และการใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข (Chevalier, Villard and Combe, 2011; Dang et al., 2016; Jenck, Dias and Kastner, 2009; Zhuang and Wang, 2016) อย่างไรก็ตามการศึกษาที่ผ่านมามุ่งที่จะอธิบายพฤติกรรม

ของการเสริมกำลังของดินอ่อนด้วยเสาเข็มเพื่อรองรับน้ำหนักแบบคงที่ (Monotonic loading) ในขณะที่การรองรับน้ำหนักแบบวัฏจักรที่มีจำนวนรอบมาก ๆ (A large number of cyclic loadings) การศึกษาด้วยวิธีการนี้ยังมีการเผยแพร่ไม่มาก (Heitz, Lüking and Kempfert, 2008; Houda, Jenck and Emeriault, 2019)

การใช้เทคนิคการถ่ายภาพเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยให้สามารถศึกษาลักษณะของการเกิดกลไกการถ่ายแรงแบบเส้นโค้งได้ในมิติของการวัดการกระจัดและอัตราการเพิ่มของหน่วยแรง โดยการถ่ายภาพหลายๆ ภาพแล้วนำมาวิเคราะห์ในลักษณะของการไล่ระดับสีตามขอบเขตการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างทดสอบเมื่อเทียบกับภาพเริ่มต้น จะทำให้เห็นถึงพฤติกรรมของการเกิดเส้นโค้งหน่วยแรงที่จะเกิดขึ้นได้ ดังนั้นวิธีการที่ถูกรเรียกว่า การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของภาพถ่าย (Digital Image Correlation, DIC: (Gao et al., 2020; Manzari et al., 2020; Sutton, Ortu and Schreier, 2009)) ซึ่งเป็นการถ่ายภาพของตัวอย่างขึ้นเดียวกัน หลายๆ ภาพในแต่ละช่วงเวลาเพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น จากนั้นใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพถ่ายเหล่านั้นออกมาในรูปแบบของการไล่ระดับความเข้มข้นของหน่วยแรงหรือการกระจัด

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษารูปแบบของการถ่ายแรงของดินคั่นทางเสาเข็มรองรับที่ถูกฝังอยู่ในชั้นของดินอ่อนภายใต้หน่วยแรงแบบคงที่ (Monotonic loading) และแบบวัฏจักร (Cyclic loading) โดยวิธีการถ่ายภาพและประมวลผลเพื่อให้ง่ายต่อการอธิบายรูปแบบของการถ่ายแรงที่เกิดขึ้น ในแบบจำลองย่อส่วนในห้องปฏิบัติการ

### วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงของดินคั่นทางลงเสาเข็มรองรับคั่นทางที่ถูกฝังอยู่ในดินอ่อน
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดวัสดุที่นำมาใช้เป็นคั่นทาง เช่น หิน และ ทราย ในการให้หน่วยแรงกระทำแบบคงที่ (Monotonic) และ วัฏจักร (Cyclic) ด้วยวิธี Digital Image Correlation (DIC)

### ขอบเขตการศึกษา

1. การทดสอบโดยใช้ดินเหนียวอ่อนเสมือนที่ได้จากส่วนผสมของ ทรายผสมกับ เม็ดโฟม ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การยุบตัว (Compressibility Index, Cc) เท่ากับ 0.5159
2. ทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ ภายใต้การจำลองแบบจำลองต่อตัวอย่าง จริง 1:10
3. ระยะห่างของเสาเข็มระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร เสาเข็มสูง 40 เซนติเมตร
4. ระยะความสูงของดินอ่อน 40 เซนติเมตร ระยะความสูงของคันทาง 30 เซนติเมตร
5. ใช้หินร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ค้าง 16 และทรายแม่น้ำ ผ่านตะแกรงเบอร์ 8 ค้าง 30 เพื่อจำลองเป็นดินคันทาง
6. การทดสอบการให้แรงคงที่ จะทำการให้แรงแก่ตัวอย่างที่ 5 15 และ 25 kPa ทุกๆ 3 ชั่วโมง และทำการถ่ายภาพของตัวอย่างที่แรง 0 kPa , 5 kPa (เริ่มต้น) , 5 kPa (เมื่อครบ 3 ชั่วโมง) 15 kPa (เริ่มต้น) , 15 kPa (เมื่อครบ 3 ชั่วโมง) , 25 kPa (เริ่มต้น) , 25 kPa (เมื่อครบ 3 ชั่วโมง)
7. การทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักร จะทำการให้แรงแบบคงที่ก่อนแล้วจึง ให้แรง แบบวัฏจักรที่ 5-15 kPa จำนวน 500 รอบ พร้อมทั้งทำการถ่ายภาพตัวอย่างระหว่างการทดสอบ



### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นแนวทางในการประยุกต์การถ่ายภาพเพื่อนำมาวิเคราะห์ข้อมูลได้ ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์แบบไม่ทำลาย รูปแบบใหม่ที่ทำให้สามารถเห็นภาพได้ชัดเจนและเข้าใจง่ายยิ่งขึ้น
2. ทราบถึงลักษณะการถ่ายแรงของ ตัวอย่าง embankment แต่ละชนิดมีผลกระทบต่อกรถ่ายแรงอย่างไร
3. เป็นแนวทางในการศึกษาความรู้ใหม่ ๆ ในการเสริมกำลังของดินเหนียวอ่อน ด้วยการใส่เสาเข็มเพื่อปรับปรุงวิธีการก่อสร้าง



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### การเสริมกำลังของดินอ่อนด้วยเสาเข็ม

##### การเสริมกำลังของดินอ่อนด้วยเสาเข็ม

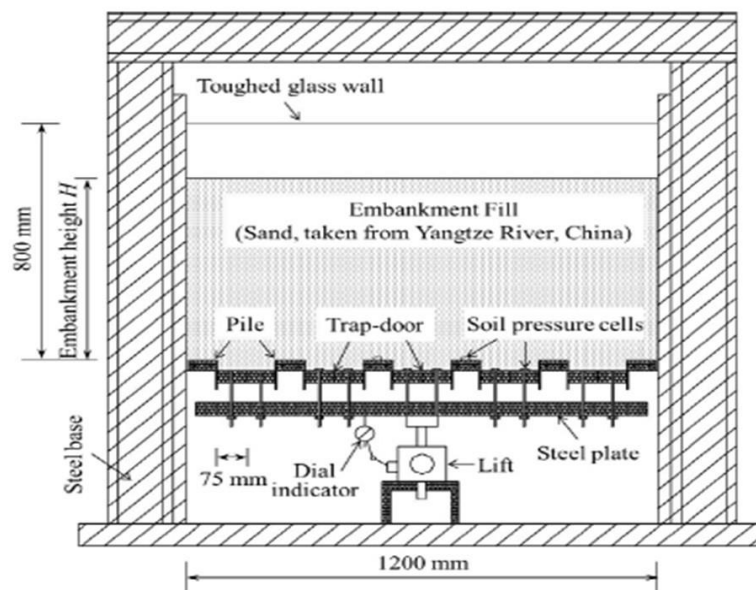
การศึกษาเชิงทดลองของการเสริมกำลังของดินอ่อนด้วยเสาเข็มนั้นมีการศึกษากันมาตั้งแต่อดีต ซึ่งลักษณะของการศึกษาจะมีความสอดคล้องกันในเรื่องของการเสริมกำลังของดินอ่อน โดยรูปแบบของการศึกษานั้นก็มีหลากหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นการกำหนดระยะห่างของเสาเข็มทดสอบ การเพิ่มลดความสูงของชั้นดินถมที่ใช้ในการทดสอบ ลักษณะและส่วนผสมของตัวอย่างที่นำมาจำลองเป็นดินอ่อน ซึ่งการศึกษาในแต่ละรูปแบบก็ทำให้เห็นถึงลักษณะกลไกการถ่ายแรงแบบเส้นโค้งที่เกิดขึ้นบนหัวเสาเข็ม

##### กลไกการถ่ายแรงแบบเส้นโค้ง (Arcing Effect)

การเกิดปรากฏการณ์การถ่ายแรงแบบเส้นโค้งนั้น เกิดจากการส่งถ่ายแรงของชั้นดินถมสู่เสาเข็มรองรับที่ถูกฝังอยู่ในชั้นของดินอ่อน ซึ่งเสาเข็มจะมีหน้าที่รับแรงส่วนมากที่ถูกถ่ายลงมาจากระบบชั้นดินถม แต่ก็ยังมีแรงบางส่วนที่ถูกถ่ายลงสู่ชั้นของดินอ่อน โดยแรงที่จะถูกถ่ายลงสู่ชั้นดินอ่อนนั้นจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ขนาดของเสาเข็ม ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม และความสูงของชั้นดินถม เป็นต้น

ทฤษฎีการเกิดกลไกการถ่ายแรงแบบเส้นโค้ง (Arcing Effect) บนหัวเสาเข็มนี้มีรูปแบบตั้งต้นมาจากการศึกษาในเรื่องของการถ่ายแรงด้วยประตูกล (Trap door) (ภาพ 2) ที่ได้กล่าวถึงการเกิดเส้นโค้ง (Arcing) เมื่อมีการเกิดความเครียดสมบูรณ์ของทรายที่อยู่เหนือประตูกล โดยการศึกษาในเรื่องของกลไกการถ่ายแรงแบบเส้นโค้ง (Arching Effect) จะเน้นไปในทางการใช้กลุ่มของเสาเข็มเข้ามาช่วยให้เกิดการกระจายแรงเส้นโค้งหลาย ๆ เส้นโค้งรวมเข้าด้วยกัน โดยเมื่อกลุ่มของเส้นโค้งหลาย ๆ เส้นโค้งรวมเข้าด้วยกันจะทำให้เกิดการส่งถ่ายแรงที่มีประสิทธิภาพ Terzaghi (1936) ได้กล่าวว่า การทรุดตัวที่ต่างกันระหว่างเสาเข็มกับดิน

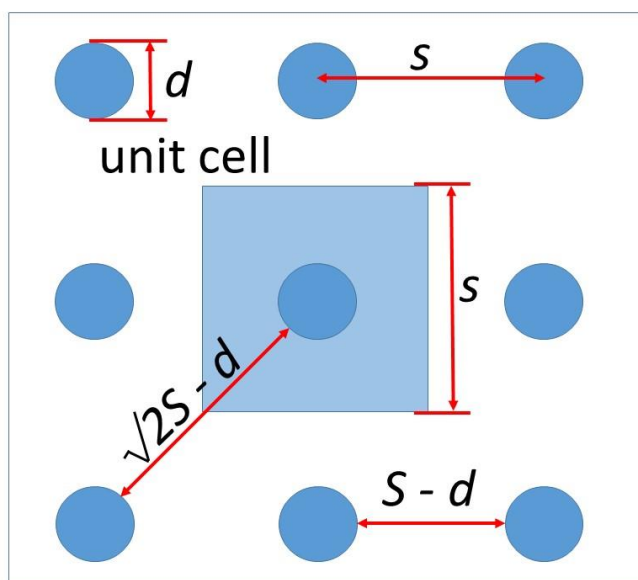
โดยรอบซึ่งมีสาเหตุมาจากกลไกการถ่ายน้ำหนักลงเสาเข็มโดยการเคลื่อนตัวของคันดินจะถูกยับยั้งโดยความต้านทานแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในดินถม ความต้านทานแรงเฉือนนี้ช่วยลดแรงกดบนดินฐานราก แต่จะเพิ่มแรงกดบนหัวเข็ม กลไกการถ่ายน้ำหนักนี้เรียกว่า Soil Arching Effect ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่า Soil Arching มีความสัมพันธ์กับการทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างหัวเข็มกับดินโดยรอบ ซึ่งประสิทธิภาพของการรับน้ำหนักของเสาเข็มจะเพิ่มขึ้นโดยการขยายขนาดพื้นที่หน้าตัดของหัวเสาเข็มหรือลดระยะห่างระหว่างเสาเข็ม



ภาพ 2 เครื่องมือทดสอบประตุกล : Lai et al. (2018)

โดยกลไกการถ่ายโอนแรงของดินคันทางไปสู่เสาเข็มที่ช่วยเสริมกำลังของดินอ่อนนั้น เป็นผลจากการเกิด Arching ที่เป็นรูปแบบของการถ่ายแรงของดินคันทางไปสู่เสาเข็มโดยตรง และแรงที่ไม่ได้ส่งถ่ายไปยังเสาเข็มโดยตรงจะเกิดการกระจายแรงเข้าสู่เสาเข็มเป็นรูปเส้นโค้ง (Arching Effect) กลไกการถ่ายแรงทั้งหมดเหล่านี้ ขึ้นอยู่กับค่า Area ratio ( $\alpha$ ) ซึ่งเป็นพื้นที่ในการรับแรงที่จะถูกถ่ายโอนลงในเสาเข็มแต่ละต้น (ภาพ 3) การหาพื้นที่การรับแรงบนหัวเสาเข็มในแต่ละต้นได้จากสมการที่ 1

$$\alpha = \frac{\pi d^2}{4S^2} \quad (1)$$

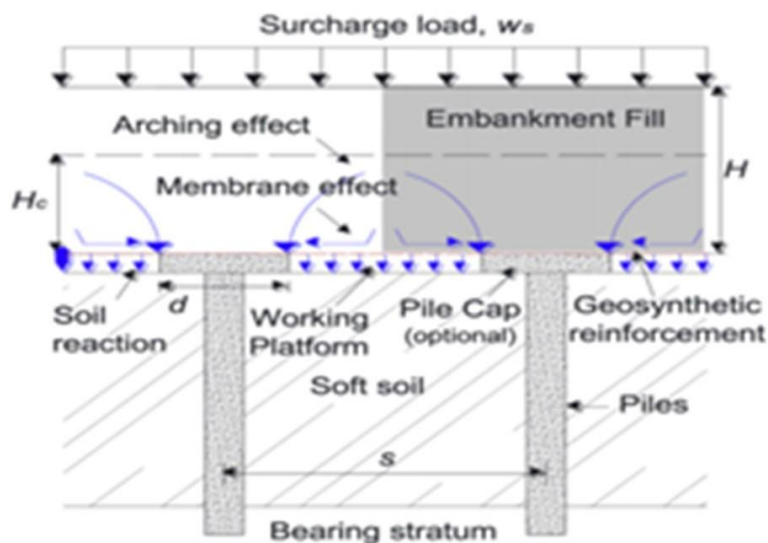


ภาพ 3 เส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างของเสาเข็ม

: ดัดแปลงจาก Filz et al. (2012)

และประสิทธิภาพของการถ่ายแรง ( $E$ ) นั้น เป็นผลมาจากกลไกการกระจายแรงเข้าสู่หัวเสาเข็ม (ภาพ 4) โดยผลกระทบของการถ่ายแรงที่หัวเสาเข็มได้รับนั้น หากมีมากจะเป็นแสดงให้เห็นว่าแรงที่จะถูกถ่ายลงสู่ชั้นดินอ่อนจะน้อยลงไปตาม โดยสามารถคำนวณประสิทธิภาพของการถ่ายโอนแรงได้จากสมการที่ 2

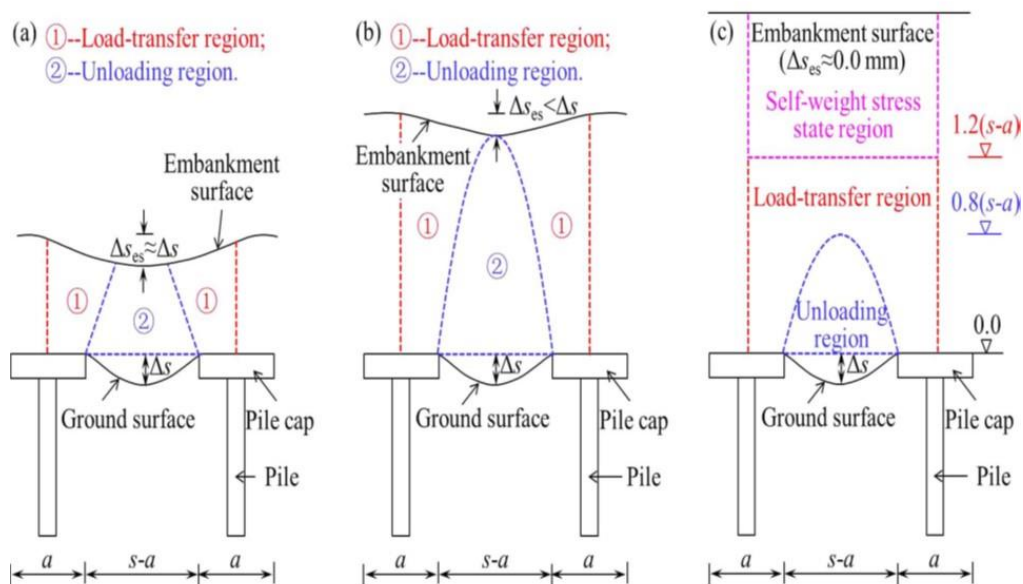
$$E = \frac{F}{(\gamma H + W_s)} \quad (2)$$



ภาพ 4 กลไกการถ่ายโอนแรงของดินคั่นทาง : Filz et al. (2012)

กลไกการถ่ายโอนแรงของดินคั่นทางที่มีเสาเข็มรองรับนั้น หากต้องการให้เกิดประสิทธิภาพของการรับแรงที่ดี จำเป็นต้องมีการถ่ายแรงที่ดีเกิดขึ้น ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการเสริมกำลังของดินอ่อนด้วยวิธีการใช้เสาเข็มรองรับดินคั่นทางนั้น มีผลมาจากค่า Area ratio ( $\alpha$ ) ซึ่งเป็นพื้นที่ในการรับแรงที่จะถูกถ่ายโอนลงในเสาเข็มแต่ละต้น กลไกการถ่ายโอนแรงของดินคั่นทางที่มีเสาเข็มรองรับนั้นสามารถจำแนกลักษณะของการเกิดการโค้งของตัวอย่างได้ 3 กรณี (ภาพ 5) ตามเงื่อนไขต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน คือ

1. การเกิดส่วนโค้งเฉพาะส่วน (Shear Plane Arching)
2. การเกิดส่วนโค้งบางส่วน (Partial Arching)
3. การเกิดส่วนโค้งอย่างเต็มรูปแบบ (Full Arching)



ภาพ 5 รูปแบบการจำแนกการเกิดส่วนโค้ง (a) “Shear plane arching”; (b) “Partial arching”; (c) “Full arching” : Lai et al. (2018)

การเกิดเส้นโค้งแบบเต็มรูปแบบนั้นจะทำให้ผิวบนของคันทางไม่มีการยุบตัวเกิดขึ้นหรืออาจเกิดขึ้นน้อยมาก เนื่องจากความสูงของดินถมมีความสำคัญต่อการเกิดการกระจายของแรงที่จะเกิดขึ้น เพื่อจะให้เกิดการกระจายแรงแบบเต็มรูปแบบ จำเป็นต้องให้ความสูงของดินถมมากกว่าระยะห่างของเสาเข็ม

การวิเคราะห์เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของภาพถ่าย (Digital Image Correlation, DIC)

#### การวิเคราะห์ผลการทดสอบจากภาพถ่าย

การถ่ายภาพเป็นการบันทึกข้อมูลที่อยู่ในอดีตเพื่อให้สามารถกลับมาดูว่าสิ่งที่เคยเกิดขึ้นมาก่อนหน้านั้นเกิดอะไรขึ้นบ้าง

การใช้ภาพถ่ายเข้ามาช่วยในการศึกษารูปแบบพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของตัวอย่างนั้นเป็นวิธีการที่จะทำให้เราเห็นความแตกต่างระหว่างการพฤติกรรมต่าง ๆ ของตัวอย่างใน

ขั้นตอนต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี เราสามารถที่จะทราบถึงสิ่งที่จะเกิดขึ้นได้ด้วยตาของเราเองและเป็นวิธีง่ายต่อการเข้าใจของบุคคลทั่วไป

### ภาพถ่ายดิจิทัล (Digital Image)

ภาพที่เก็บอยู่ในรูปแบบดิจิทัล เราสามารถเห็นได้ด้วยตาในลักษณะ 3 มิติ มีมิติ ความกว้าง ความยาว และความลึกหรือความสูง สีของภาพจะเหมือนกับวัตถุที่ถูกถ่าย โดยภาพที่ได้นั้นจะเกิดจาก ฟังก์ชัน 2 มิติ  $f(x, y)$  โดยที่  $x$  และ  $y$  คือพิกัดหรือตำแหน่งในระบบ และค่าของ  $f$  ที่พิกัด  $(x, y)$  ใด ๆ คือความเข้มของแสงสีในระบบ และเมื่อ  $x, y$  และ  $f$  มีค่าที่แน่นอนแล้ว ก็จะได้เป็นภาพดิจิทัลขึ้นมา และถ้ากำหนดให้ ฟังก์ชัน 2 มิติ  $f(x, y)$  มีขนาด  $M$  แถวและ  $N$  คอลัมน์ พิกัดจุดกำเนิดของภาพอยู่ที่ตำแหน่ง  $(x, y) = (0, 0)$  แล้ว จะเกิดเป็นสมการในรูปเมทริกซ์ ค่าที่อยู่ในเมทริกซ์นี้จะเรียกว่า พิกเซล (Pixel) โดยที่ตำแหน่ง  $(0, 0)$  จะอยู่ซ้ายบนสุดของภาพ โดยในแต่ละพิกเซลนั้นจะประกอบไปด้วยตัวเลข 0 กับ 1 ที่ถูกเก็บไว้ในรูปแบบของเลขฐานสิบ ซึ่งเป็นพื้นฐานของข้อมูลแบบดิจิทัล และสีของภาพถ่ายดิจิทัลนั้นจะถูกจัดเก็บในระบบสีที่เรียกว่า RGB ซึ่งเป็นการบันทึกค่าความเข้มของแสงสีแดง เขียว และน้ำเงินไว้ในรูปแบบของเมทริกซ์ที่ซ้อนทับกันสามชั้น ในแต่ละชั้นจะแบ่งความเข้มของสีได้ 256 ระดับ และในแต่ละพิกเซลของภาพจะสามารถแสดงความเข้มของสีที่แตกต่างกันได้ถึง 16,777,216 ระดับสี



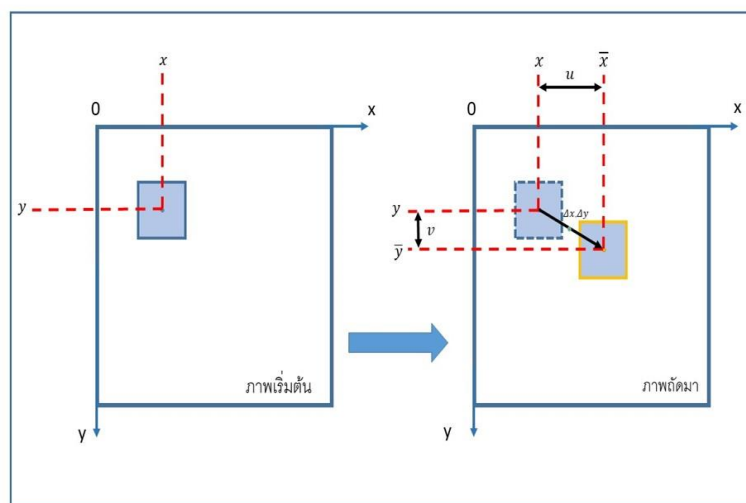
ภาพ 6 ตัวอย่างภาพถ่ายดิจิทัล (Digital Image)

### การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของภาพถ่าย (Digital Image Correlation, DIC)

หลักการพื้นฐานของการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของภาพถ่ายนั้น (DIC) เริ่มต้นจากการต้องการทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของการกระจัดและความเครียดของวัสดุเมื่อเริ่มให้แรงกระทำแก่วัสดุ ซึ่งในบางครั้งการวัดพื้นผิวของวัสดุที่เสียรูปไปแล้ว ด้วยการให้เครื่องมือการวัดพื้นฐานเป็นเรื่องที่อาจจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากวัสดุอาจจะเกิดการเสียรูปเพียงเล็กน้อยแต่เป็นเรื่องที่ยุ่งยากเป็นอย่างมากในการวัดการเสียรูปที่เกิดขึ้นนี้

วิธีการวัดการเปลี่ยนแปลงแบบ DIC นี้เป็นวิธีที่ไม่จำเป็นต้องสัมผัสกับวัตถุในระหว่างการวัด โดยการเริ่มต้นการวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นจะเริ่มจากการถ่ายภาพเริ่มต้นของวัตถุก่อนที่วัตถุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไว้ด้วยกล้องดิจิตอลก่อนเป็นอันดับแรก จากนั้นทำการถ่ายภาพของวัตถุทุกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นตามที่ต้องการ เมื่อเสร็จสิ้นแล้วนำภาพที่ได้มาเปรียบเทียบกันเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยความแม่นยำของการวัดแบบ DIC นี้จะขึ้นอยู่กับความแม่นยำของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลของภาพถ่ายดิจิตอลที่มี

โดยทั่วไปโปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผล DIC นั้นจะเป็นโปรแกรมที่ใช้การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของพิกเซลของภาพที่เกิดขึ้น โดยตัวโปรแกรมจะทำการจดจำค่าความเข้มของสี (RGB) ในแต่ละพิกเซลของภาพแรก ( $f(x,y)$ ) ที่มี แล้วนำไปเปรียบเทียบหาพิกเซลที่มีค่าความเข้มสี (RGB) ที่เหมือนกันของภาพถัดมา การเปลี่ยนตำแหน่งของค่าความเข้มสี (RGB) ในภาพแรกกับภาพถัดไปนั้นจะถูกวัดเป็นการเคลื่อนหรือการกระจัดที่เกิดขึ้นตามสมมุติฐาน (ภาพ 7) สามารถหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้จากสมการ (3)



ภาพ 7 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในรูปภาพ

$$\bar{x} = x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y$$

$$\bar{y} = y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \quad (3)$$

โดย  $(x, y)$  คือตำแหน่งพิกเซลของภาพแรกเริ่ม,  $(\bar{x}, \bar{y})$  คือตำแหน่งของพิกเซลในภาพถัดมา,  $(u, v)$  คือระยะขจัด,  $(\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y})$  คือความเครียดตั้งฉาก,  $(\frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y})$  คือความเครียดเฉือน,  $(\Delta x, \Delta y)$  คือระยะกึ่งกลางของ  $(x, y)$  ถึง  $(\bar{x}, \bar{y})$

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

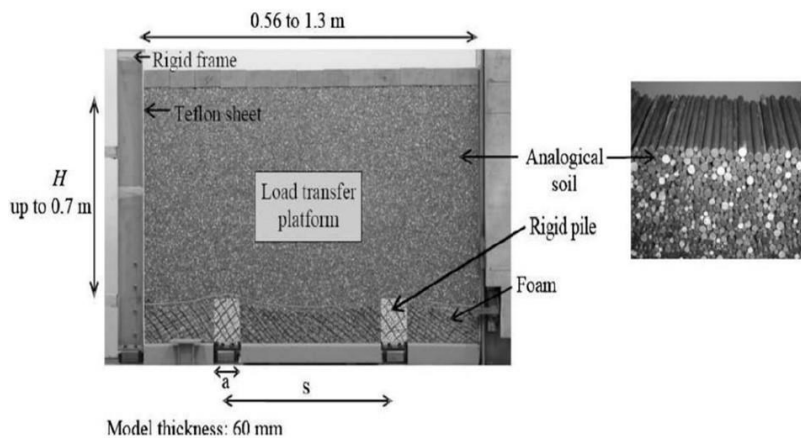
การทบทวนวรรณกรรมที่เคยได้รับการศึกษามาแล้วในอดีตเพื่อให้ได้มาซึ่งความรู้ที่เป็นพื้นฐานของการปรับปรุงดินอ่อนโดยใช้เทคนิคการเสริมกำลังด้วยเสาเข็ม และการใช้ภาพถ่ายในการประมวลผลของการทดสอบ ทำให้สามารถที่จะศึกษา เปรียบเทียบ และแก้ไขผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบให้เป็นไปตามทฤษฎีและไม่คล้ายคลึงกับการทดสอบของงานวิจัยอื่น ๆ มากเกินไป โดยงานวิจัยเชิงทดลองการปรับปรุงดินอ่อนโดยใช้เทคนิคการเสริมกำลังด้วยเสาเข็มที่ผ่านมามีมุ่งเน้นไปยังการพัฒนาแบบจำลอง เพื่อให้เกิด

ความเข้าใจในกลไกการถ่ายโอนแรงการเสริมกำลังของดินอ่อนด้วยเสาเข็มเพื่อปรับปรุงให้เกิดประสิทธิภาพของการถ่ายแรงให้ดียิ่งขึ้น และงานวิจัยเชิงวิเคราะห์ของการใช้ภาพถ่ายในการประมวลผลของการทดสอบนั้น จะมุ่งเน้นไปในทางการหาเวกเตอร์การกระจายของพิคเซลรูปภาพที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

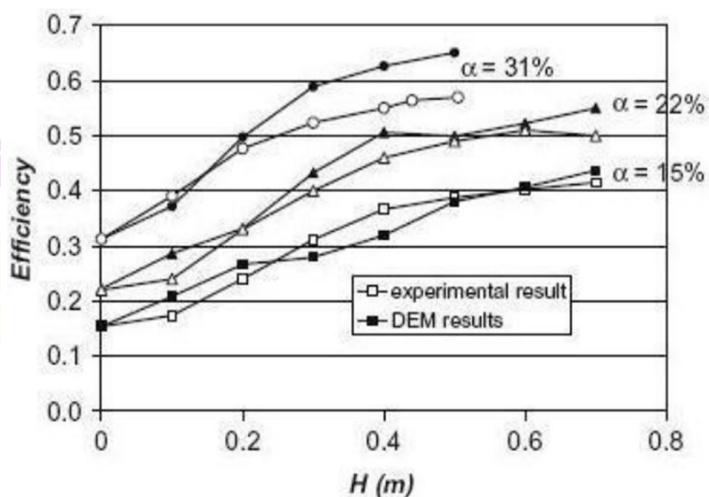
Terzaghi (1936) ได้ทำการศึกษารูปแบบการกระจายแรงของทรายอิ่มตัวด้วยน้ำ โดยการใช้ประตูกลจำลองขนาดความกว้าง 7.3 เซนติเมตร ยาว 46.3 เซนติเมตร ในการทดสอบ และวิธีการนี้ไม่ได้มีการให้แรงมากกระทำต่อทรายที่ใช้ในการทดสอบแต่อย่างใด ผลจากการทดสอบพบว่าลักษณะของการเคลื่อนตัวของทรายเมื่อมีการยกประตูกลลงนั้นทำให้เกิดทรายรั่วไหลลงมาตามระยะของการลดระดับของประตูกล หากแต่การที่ทรายเกิดการเคลื่อนตัวนั้นอาจเกิดจากการที่มีแรงสั่นสะเทือนขณะที่ทำการเปิดประตูกลแต่อย่างไรก็ตามภายใต้รูปแบบของลักษณะการเคลื่อนตัวของทรายนั้นเมื่อถึงจุดที่เกิดความเครียดสมบูรณ์แล้ว ทรายที่ไม่ไหลลงมาจะเกิดการเว้าโค้ง โดยลักษณะการโค้งที่เกิดขึ้นนี้จะถูกเรียกว่า Arching

Jenck, Dias and Kastner (2009) ได้ทำการทดลองประตูกลซึ่งเป็นแบบจำลองขนาดเล็ก 2 มิติ โดยใช้ดินเสมือน (Taylor– Schneebeli soil analogue) ซึ่งการศึกษารังนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์เพื่อหาพารามิเตอร์และสภาพการทรุดตัวของดินอ่อนเพื่อศึกษากลไกพฤติกรรมการเคลื่อนที่เกิดขึ้น โดยมีการจำลองด้วยการใช้แท่งเหล็กขนาดต่าง ๆ เป็นชั้นถ่ายแรงเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่เกิดขึ้น โดยดินอ่อนที่อยู่รอบ ๆ เสาเข็มจะประกอบไปด้วยเม็ดโพลีเมอร์ซึ่งช่วยในการสังเกตการทรุดตัวที่เกิดขึ้น และใช้เสาเข็มแบบแข็งที่ทำมาจากโลหะติดตั้งติดกับหน้าต่างใส (ภาพ 8) โดยแบบจำลองนี้ถูกทดสอบภายใต้การรับน้ำหนักของตัวเอง มีชั้นถ่ายแรง (Load transfer platform) ที่มีความหนา 0.1 – 0.7 เมตร โดยการศึกษาพารามิเตอร์ในเชิงทดลองส่วนใหญ่่มักมุ่งเน้นที่ ความสูงของชั้นการถ่ายแรง (Load transfer platform) และอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ ของเสาเข็มต่อพื้นที่ ทั้งหมด  $\alpha = A_{pile}/A_{total}$  โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ายิ่งความสูงของชั้นถ่ายแรงสูงเป็นสองเท่าของระยะห่างของเสาเข็ม ยิ่งทำให้มีค่าประสิทธิภาพการถ่ายแรง ( $E$ ) มากขึ้นเท่านั้น เนื่องจากไหลตจะถูกส่งไปยังเสาเข็มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพ

การถ่ายแรง ( $E$ ) ดังกล่าวยังสอดคล้องกับอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของเสาเข็มต่อพื้นที่ทั้งหมดที่มีค่าสูงขึ้นเช่นกัน (ภาพ 9) โดยแบบจำลองนี้มีการศึกษาด้วยวิธี DEM และ FEM



ภาพ 8 การทดลองประตุกลโดยใช้ดินเสมือน : Jenck, Dias and Kastner (2009)



ภาพ 9 ประสิทธิภาพการถ่ายแรงเมื่อเทียบกับอัตราส่วนพื้นที่ : Jenck, Dias and Kastner (2009)

Filz et al. (2012) ได้นำเสนองานวิจัยเทคนิคการเพิ่มกำลังของดินอ่อนที่มีเสาเข็มรองรับดินคันทาง ได้กล่าวว่า “ การเพิ่มกำลังของดินอ่อนด้วยฐานรากเสาเข็มนั้นเป็นวิธีทั่วไปในการก่อสร้างโครงสร้างบนดินอ่อน เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถก่อสร้างได้รวดเร็ว โดยที่ไม่ต้องรอการบดอัด ทั้งยังช่วยลดปริมาณของวัสดุที่ใช้ และยังเป็นวิธีที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า เมื่อเทียบกับวิธีการแก้ปัญหาอื่น ๆ โดยกลไกการถ่ายโอนแรงของดินคันทางไปสู่เสาเข็มที่ช่วยเสริมกำลังของดินอ่อนนั้น เป็นผลจากการเกิด The Arching ที่เป็นรูปแบบของการถ่ายโอนแรงของดินคันทางไปสู่เสาเข็มโดยตรง และแรงที่ไม่ได้ส่งถ่ายไปยังเสาเข็มโดยตรง จะเกิดการกระจายแรงเข้าสู่เสาเข็มเป็นรูปเส้นโค้ง (Arching Effect) กลไกการถ่ายโอนแรงทั้งหมดเหล่านี้ ขึ้นอยู่กับค่า Area ratio ( $\alpha$ ) ซึ่งเป็นพื้นที่ในการรับแรงที่จะถูกถ่ายโอนลงในเสาเข็มแต่ละต้น และประสิทธิภาพของการถ่ายโอนนั้น เป็นผลมาจากกลไกการกระจายแรงเข้าสู่หัวเสาเข็ม โดยผลกระทบของการถ่ายโอนที่หัวเสาเข็มได้รับนั้น หากมีมากจะเป็นการแสดงให้เห็นว่าแรงที่จะถูกถ่ายลงสู่ชั้นดินอ่อนจะน้อยลงไปตาม ”

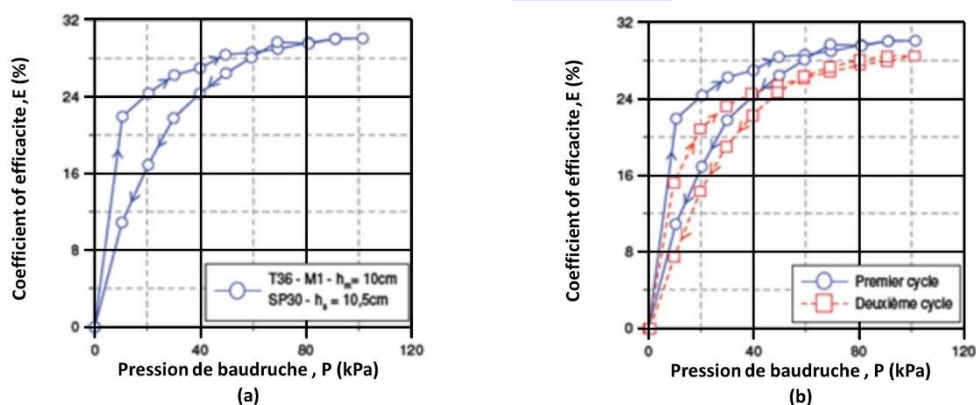
Thorel et al. (2010) ได้ทำการศึกษาที่มีจุดประสงค์ของการศึกษาเพื่อหาผลของของการถ่ายโอนแรงที่เกิดขึ้นในชั้นวัสดุที่รองรับแรง (Granular mattress) ซึ่งมีหน้าที่ในการถ่ายโอนแรงจากโครงสร้างชั้นบนสู่เสา (Rigid inclusion) การให้แรงแบบต่อเนื่องและวัฏจักร ผลที่ได้ถูกนำมาใช้ในการเน้นความสำคัญของอิทธิพลของสมบัติของชั้นวัสดุถ่ายโอนแรง (Granular LTP) ได้แก่ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ , ประสิทธิภาพของระบบ และการทรุดตัวเฉลี่ยของดินอ่อนแบบจำลองดังกล่าวประกอบไปด้วย แบบจำลองกายภาพที่สมมาตร (Axisymmetric) ที่สเกล 1/5 ซึ่งดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

1. ติดตั้งอุปกรณ์เซนเซอร์รับแรง ที่บริเวณหัวของของเสา (Rigid inclusion) เพื่อวัดแรงที่กระทำต่อหัวเสาเข็ม

2. ติดตั้งอุปกรณ์เซนเซอร์วัดการเคลื่อนที่เพื่อวัดการทรุดตัวของดินอ่อน

การให้แรงต้นได้รับการควบคุมโดยแรงเมมเบรนที่จำลองการแรงแบบสม่ำเสมอตามน้ำหนักของคันดิน โดยดินอ่อนถูกออกแบบโดยการผสมทรายกับเม็ดโฟม ในส่วนของการให้แรงแบบวัฏจักร สองวัฏจักร (ให้แรง/ไม่ให้แรง) ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมของชั้นวัสดุภายใต้การให้แรงวัฏจักร ในวัฏจักรแรก มีการบันทึกความแตกต่างที่สังเกตได้ระหว่างการ

ให้แรงและไม่ให้แรงในค่าประสิทธิภาพซึ่งการไม่ให้แรงต่ำกว่าอย่างมีนัยยะสำคัญ การลดลงของประสิทธิภาพของระบบเมื่อไม่ให้แรงแสดงถึงพฤติกรรมที่ไม่คืนตัวแบบพลาสติกของตัวอย่างดินอ่อนจำลอง หลังจากวัฏจักรแรก โครงสร้างแบบจำลองมีการเปลี่ยนแปลงคือ ดินที่บีบอัดได้ขยายตัวไม่กลับไปเป็นเหมือนเดิม ประสิทธิภาพที่ได้รับในวัฏจักรที่ 2 น้อยกว่าวัฏจักรแรกเล็กน้อย (ภาพ 10)



ภาพ 10 การพัฒนาประสิทธิภาพด้วยแรงดัน (a) วัฏจักรแรก , (b) วัฏจักรแรก และ 2 : Thorel et al. (2010)

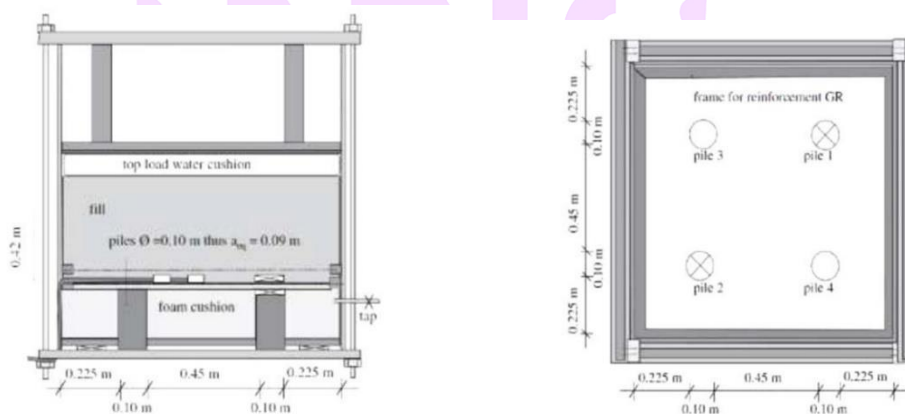
ในส่วนของคุณสมบัติของพารามิเตอร์ทางเรขาคณิต (Geometrical) การศึกษาหลักมีดังนี้

1. การเพิ่มขึ้นของความหนาของชั้นวัสดุดินถมและความหนาแน่นช่วยให้แรงไปสู่เสา (Rigid inclusion) ได้ดี และลดการทรุดตัวเฉลี่ยของดินถม
2. การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นทำให้ประสิทธิภาพเฉลี่ยของการถ่ายแรงเพิ่มขึ้น
3. เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่เล็กกลางของวัสดุประกอบของชั้นดินถมยิ่งทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น
4. วัสดุมวลรวม (Granular) ที่สม่ำเสมอทำให้เกิดแรงบนหัวของเสา (Rigid inclusion) ดีกว่าวัสดุมวลรวม (Granular) แบบไม่สม่ำเสมอ

5. การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของชั้นมวลรวมจะทำให้เกิดแรงที่มากขึ้น ที่ส่วนหัวของเสา (Rigid inclusion)

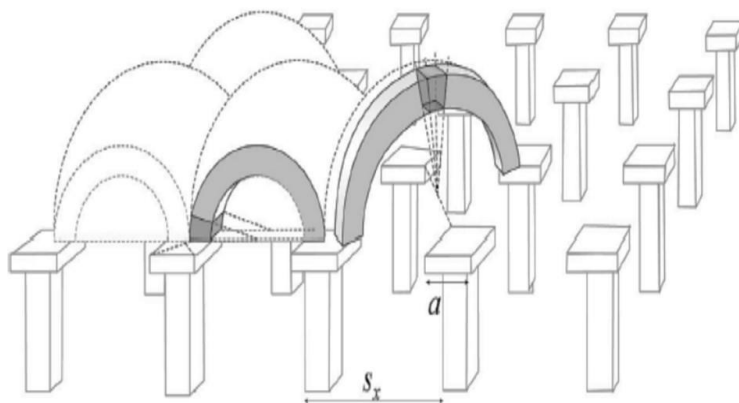
6. การเปรียบเทียบแบบเสริมและไม่เสริมกำลังโดยใช้เสา (Rigid inclusion) พบว่าการใช้เสา (Rigid inclusion) ลดการทรุดตัวของดินถมได้

Van Eekelen et al. (2012) ได้นำเสนอแบบจำลองกายภาพแบบสามมิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของคุณลักษณะของแผ่นใยสังเคราะห์ (ความแข็งแรง จำนวนชั้น และอื่น ๆ) และผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของแรง ในกลไกการถ่ายโอนแรง การเพิ่มขึ้นของแรงถูกออกแบบโดยใช้เบาะยาง (Rubber cushion) ที่เติมด้วยน้ำ (มีหัวก๊อกลสำหรับการระบายน้ำออกเพื่อควบคุมการอัดให้แรง) ดินได้รับการเสริมกำลังด้วยเสาเข็ม (Rigid inclusion) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร และระยะห่างคงที่ 0.45 เมตร คันดินจำลองใช้ทรายละเอียด (0.125 ถึง 0.250 มิลลิเมตร) และกรวดละเอียด (Granule fill) 1-16 มิลลิเมตร ที่ความสูง 0.42 เมตร ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ในชุดการทดสอบ (ภาพ 11)



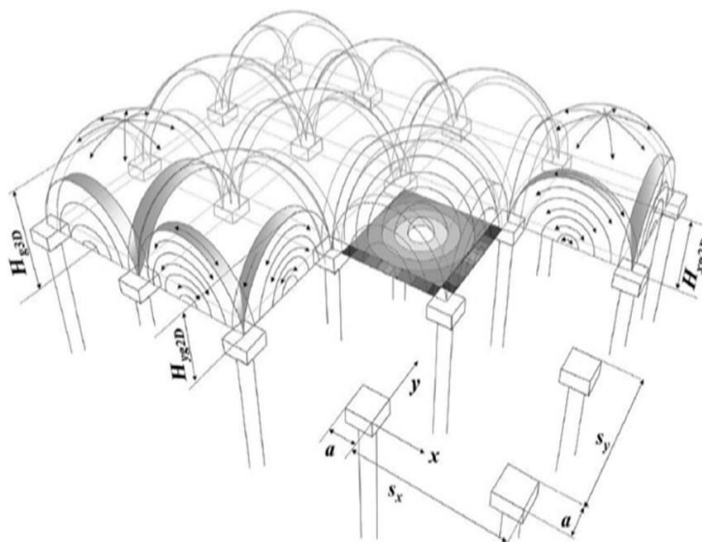
ภาพ 11 แบบจำลองการศึกษาอิทธิพลของคุณลักษณะของแผ่นใยสังเคราะห์ และผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของแรง ในกลไกการถ่ายโอนแรง : Van Eekelen et al. (2012)

Van Eekelen, Bezuijen and Van Tol (2013) ได้นำเสนอแบบจำลองดุลยภาพ (Equilibrium) แบบจำลองเส้นโค้งศูนย์กลาง (Concentric arches) แบบจำลองดังกล่าวเป็นที่มีความคล้ายกับแบบจำลองของ Hewlett and Randolph. (1988) และ แบบจำลองดุลยภาพ EBGeo ของ Zaeske. (2011) โดยแบบจำลองนี้ประกอบไปด้วยกลุ่มของเส้นโค้งและครึ่งวงกลมศูนย์กลาง (Concentric Hemisphere And Arc) (ภาพ 12) ครึ่งวงกลมและเส้นโค้งที่เกิดขึ้นนั้นหากมีขนาดใหญ่ก็จะเกิดการถ่ายแรงที่สูง การถ่ายแรงของครึ่งวงกลมนั้นจะถ่ายแรงในรูปแบบของการถ่ายแรงแบบสามมิติไปยังเสาเข็มรอบ ๆ ที่อยู่ติดกัน การถ่ายแรงของเส้นโค้งนั้นจะเป็นการถ่ายแรงแบบสองมิติไปยังเสาเข็มที่อยู่ข้าง ๆ



ภาพ 12 แบบจำลองแนวเส้นโค้ง (Arching Model) : Hewlett and Randolph (1988)

หากแบบจำลองเส้นโค้งศูนย์กลาง (Concentric Arches) (ภาพ 13) ได้รับการเสริมประสิทธิภาพด้วยเส้นใยสังเคราะห์ ซึ่งจากผลการศึกษาที่ได้รับจากการสังเกตและทดสอบภาคสนาม ทั้งวิเคราะห์เชิงตัวเลข พบว่าเส้นใยสังเคราะห์จะมีหน้าที่ในการช่วยกระจายแรงสู่เสาเข็ม และลดการทรุดตัวของชั้นดินอ่อน กล่าวคือ การเสริมเส้นใยสังเคราะห์เป็นการช่วยเพิ่มแนวเส้นโค้งขึ้นมา และแนวเส้นโค้งใหม่นี้เมื่อรวมกับเส้นโค้งเดิมที่มีอยู่จะทำให้เกิดการถ่ายแรงที่สมบูรณ์เกิดขึ้น

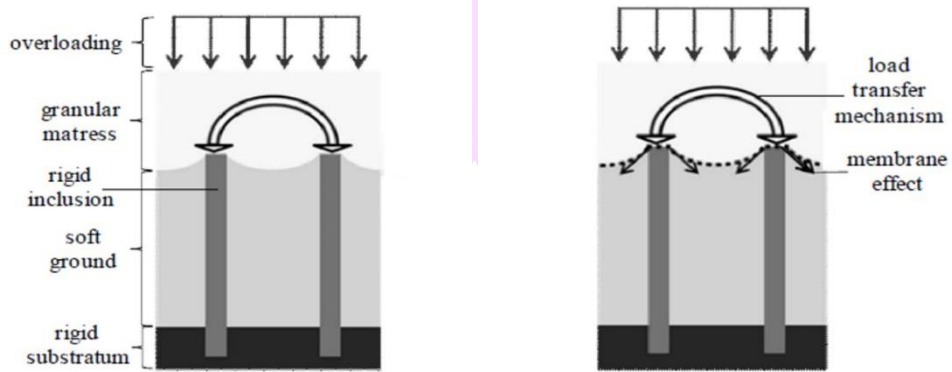


ภาพ 13 แบบจำลองเส้นแนวโค้งศูนย์กลาง (Concentric Arched Model) ที่ได้รับเสริมกำลังด้วยวัสดุใยสังเคราะห์ : Van Eekelen, Bezuijen and Van Tol (2013)

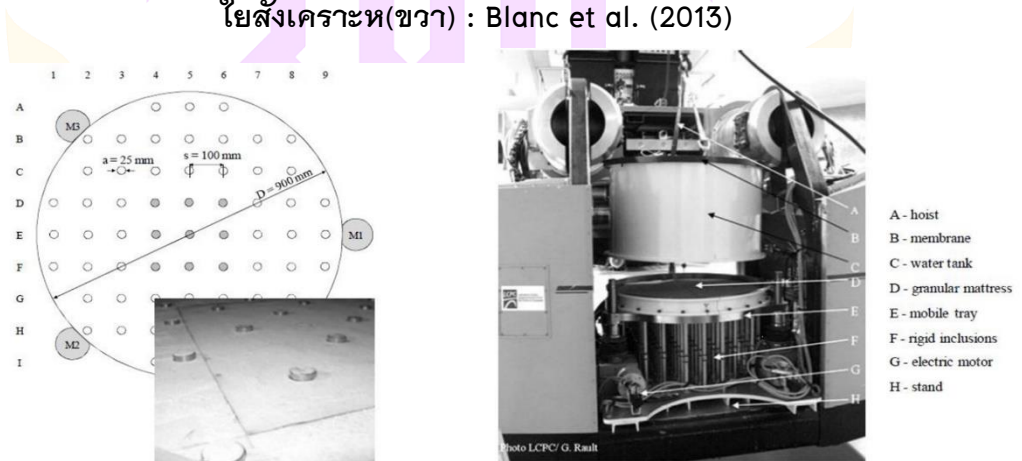
กลไกการถ่ายโอนแรงของดินคันทางที่มีเสาเข็มรองรับนั้น หากต้องการให้เกิดประสิทธิภาพของการรับแรงที่ดี จำเป็นต้องมีการถ่ายแรงที่ดีเกิดขึ้น ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการเสริมกำลังของดินอ่อนด้วยวิธีการใช้เสาเข็มรองรับดินคันทางนั้น มีผลมาจากค่า Area ratio ( $\alpha$ ) ซึ่งเป็นพื้นที่ในการรับแรงที่จะถูกถ่ายโอนลงในเสาเข็มแต่ละต้น

Blanc et al. (2013) ได้ศึกษาการเสริมกำลังของดินอ่อนโดยเทคนิค Rigid inclusions และพฤติกรรมภายในชั้นวัสดุที่รองรับแรง (Granular mattress) (ภาพ 14) แบบจำลอง (Mobile tray) ได้ถูกออกแบบขึ้นมาโดยเฉพาะในอุปกรณ์การทดลองที่พัฒนา ที่ห้องปฏิบัติการ IFSTAR โดยถาดที่เคลื่อนไหวได้นี้จำลองเป็นการทรุดตัวของพื้นอ่อนที่อยู่ระหว่างเสาเข็มและการศึกษาทางพาราเมตริกของกลไกการถ่ายโอนแรงใน (Mattress) ที่ควบคุมในเครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) (ภาพ 15) 20 g โดยแบบจำลองดังกล่าวมีขนาดรัศมีภายใน 900 มิลลิเมตร และสามารถบรรจุเสาได้มากถึง 61 ต้น บนหน้าพื้นผิวทั้งหมดประกอบด้วยความหนาแน่น (Mesh density)  $\alpha = 4.91\%$  ซึ่งแรงเกินถูกติดตั้งใน LTP ที่จำลองโดยการเติมน้ำเข้าไป แรงที่อยู่ด้านบนของเสาและการทรุดตัวในพื้นที่ที่แตกต่างกันเหนือชั้นวัสดุที่รองรับแรง (Granular

mattress) ได้รับการวัดขณะที่แบบจำลองดังกล่าวเคลื่อนที่ลงไป โดยมีเซนเซอร์รับแรงที่ติดตั้งภายในแท่นหัวเสาเข็มและมีการวัดการทรุดตัว ณ บริเวณที่แตกต่างกันเหนือชั้นวัสดุที่รองรับแรง (Granular mattress) เพื่อที่จะปรับปรุงเทคนิคการเสริมกำลังดังกล่าว จึงมีการใช้วัสดุแผ่นใยสังเคราะห์แทรกระหว่างหัวเสาเข็มและชั้นวัสดุที่รองรับแรง (Granular mattress) ซึ่งวัสดุแผ่นใยสังเคราะห์จะถ่ายโอนแรงไปยังเสาเข็ม (Inclusions) ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า เมมเบรนเอฟเฟกต์ (Membrane effect) การทดสอบทั้งมีและไม่มีวัสดุแผ่นใยสังเคราะห์ได้รับการทดลองในความหนาของชั้นวัสดุที่รองรับแรง (Granular mattress) หลากหลายแบบที่แตกต่างกัน



ภาพ 14 การเสริมกำลังดิน : แบบไม่มีวัสดุแผ่นใยสังเคราะห์(ซ้าย) และมีวัสดุแผ่นใยสังเคราะห์(ขวา) : Blanc et al. (2013)



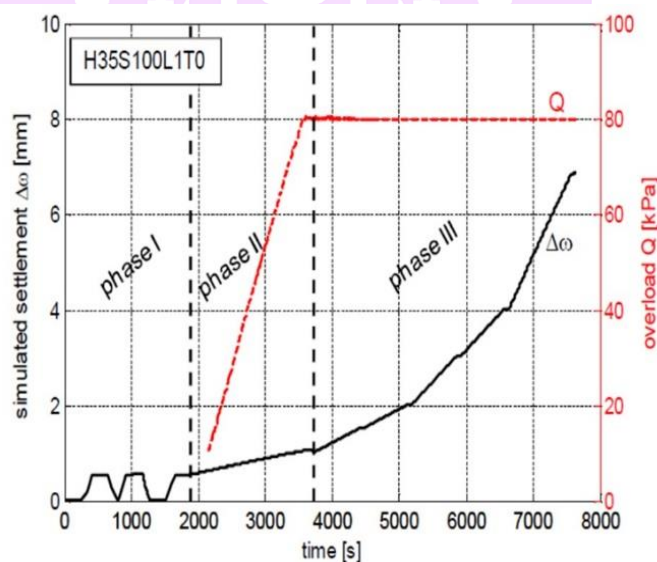
ภาพ 15 แผนผังและลักษณะโดยทั่วไปของอุปกรณ์ถาดเคลื่อนที่ (Mobile tray) : Blanc et al. (2013)

ลำดับการให้แรงประกอบไปด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ตัวอย่างได้รับการอัดแรง (Pre-Stressed) โดยการเร่งการหมุนเหวี่ยงที่ละนิตจนถึง 20 g จากนั้นลดกลับลงจนเหลือ 0 เพื่อที่จะคงไว้ซึ่งการอัดแรง (Pre-Stressing) ของ Granular LTP ขั้นตอนนี้ได้รับการทำซ้ำถึง 3 ครั้งด้วยกัน

2. เพิ่มแรง (Overloading) ของ LTP โดยการเติมที่เก็บน้ำด้วยน้ำ  $Q = 80$  kPa เพื่อจำลองคั่นกันน้ำสูง 5 เมตร ตามสเกลตัวต้นแบบ

3. การจำลองการทรุดตัวของดินอ่อนโดยเคลื่อนแบบจำลอง (Mobile tray) ในแนวตั้งลงไป



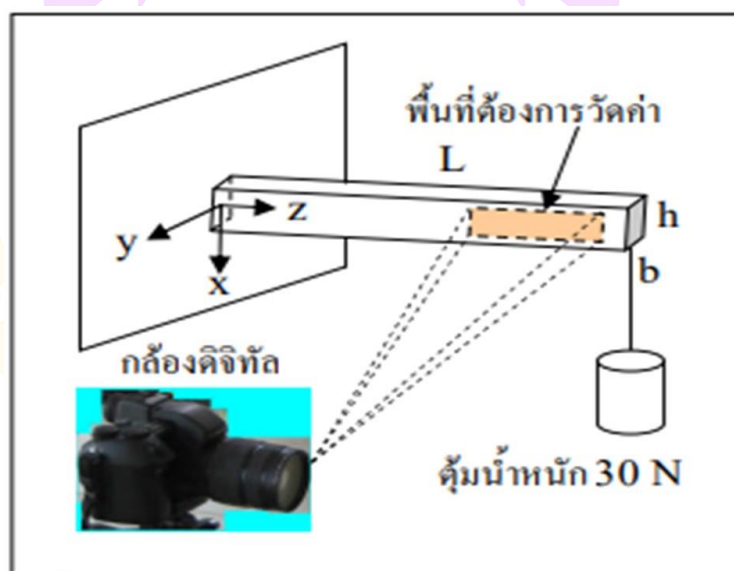
ภาพ 16 การเปรียบเทียบผลการทดสอบ : Blanc et al. (2013)

แบบจำลองนี้ได้ศึกษากรณีของการปรับปรุงดินโดยใช้เทคนิคการเสริมกำลังด้วยเสาเข็ม Rigid inclusion โดยไม่มีพื้นแข็ง (Rigid slab) ทั้งแบบที่มีและไม่มีวัสดุเสริมแรงใยสังเคราะห์ (Geosynthetic) และช่วยให้เรามีความเข้าใจมากขึ้นถึงกลไกการถ่ายโอน (Charge transfer mechanism) ในชั้นรองรับ (Mattress), ผลของความสูง LTP และผลของการเสริมกำลังโดยการใส่การเสริมแรงโดยวัสดุใยสังเคราะห์ (Geosynthetic effect) ภายใต้การแรงแบบต่อเนื่อง ผลที่ได้รับมีดังต่อไปนี้

1. แบบไม่มีการเสริมแรงด้วยวัสดุใยสังเคราะห์ กลไกการถ่ายโอนแรงมีประสิทธิภาพมากขึ้นตามความหนาของชั้นวัสดุที่รองรับแรง (Granular mattress) มีความหนาที่มากขึ้น ในกรณีนี้มาจากการพัฒนาแนวเส้นโค้ง (Arching effect) นอกจากนี้การทรุดตัวแบบไม่สม่ำเสมอ ยังคงลดลงอีกด้วย แต่กลับมีการเพิ่มขึ้นของความหนาในชั้นวัสดุที่รองรับแรง (Granular mattress) แทน

2. แบบมีการเสริมแรงด้วยวัสดุใยสังเคราะห์ ประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นและการทรุดตัวแบบไม่สม่ำเสมอดีขึ้นอย่างเห็นชัด

Chantararat and Kunthong (2013) ได้ทำการศึกษาการการวัดแบบเต็มพื้นผิวของการเปลี่ยนรูปด้วยวิธีความสัมพันธ์ทางภาพดิจิทัล (Digital Image Correlation, DIC) โดยในการทดลองได้ใช้คานยื่นที่ทำจากเหล็กกล้า ยาว 160 มิลลิเมตร กว้าง 12 มิลลิเมตร และ สูง 4 มิลลิเมตร โดยที่ปลายเหล็กได้วางด้วยตุ้มน้ำหนักขนาด 30 N และทำการกำหนดตำแหน่งที่จะต้องการทำการศึกษาไว้บนแท่งเหล็กจำนวน 6 จุด (ภาพที่ 17)



ภาพ 17 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับทดสอบ : Chantararat and Kunthong (2013)

ผลการเปรียบเทียบจากทฤษฎีอิลาสติกซิตีวิเคราะห์เปรียบเทียบกับการวัดจาก DIC จากการทดสอบพบว่าการใช้ภาพถ่ายในการช่วยวัดการขจัดของคานที่เกิดขึ้นนั้นมีความแม่นยำสูง (ตาราง 2)

ตาราง 2 ผลการเปรียบเทียบการขจัดในแนวแกน : Chantararat and Kunthong (2013)

การขจัดในแนวแกน X				การขจัดในแนวแกน Z			
ตำแหน่ง ที่	ระยะบน คาน , Z (cm)	ทฤษฎี , u (mm)	DIC , u (mm)	ตำแหน่ง ที่	ระยะบน คาน , Z (cm)	ทฤษฎี , u (mm)	DIC , u (mm)
1	16	4.8002	4.5770	1	16	0.1200	0.1141
2	14.3	3.8344	3.7778	2	14.3	0.1073	0.1521
3	12.6	2.9770	3.2444	3	12.6	0.0945	0.1141
4	10.9	2.2279	2.2667	4	10.9	0.0818	0.0380
5	9.2	1.5872	1.6000	5	9.2	0.0690	0.0760
6	7.5	1.0549	1.1111	6	7.5	0.0563	0.0760

ในการใช้การประเมินผลด้วย DIC ในการใช้หาค่าการขจัดที่เกิดขึ้นนั้นสรุปได้ว่า DIC มีความแม่นยำสูงในการวัดการขจัดในแนวแกน X แต่ความแม่นยำในแนวแกน Y นั้นกลับมีค่าน้อยมากเนื่องจากการเกิดการขจัดที่ต่ำนั้นจะทำให้โปรแกรม DIC ที่ใช้ในการวิเคราะห์เกิดความแม่นยำต่ำไปด้วย โดยการเพิ่มความแม่นยำในการวัดอาจจะต้องเพิ่มกำลังขยายของเลนส์กล้องดิจิทัล ในการใช้งาน

Lai et al. (2018) ได้ทำการทดสอบและทำการจำแนกประเภทและลักษณะของแรงกระจายจากโครงสร้างดินสู่เสาเข็มที่รองรับ ในการทดสอบนี้ได้นำหลักการของประกกลเขามาใช้ด้วย โดยการทดสอบถูกทำในห้องปฏิบัติการ เสาเข็มจะถูกจำลองด้วยแท่งเหล็กที่มีลักษณะการทำงานเหมือนกับลิฟท์ ใช้ทรายแม่น้ำแยงซีเป็นวัสดุในการทดสอบ จะทำการบันทึกข้อมูลช่วงเวลาของดินถมและระยะการขจัดของแท่งลิฟท์ และได้กำหนดตัวแปรควบคุมต่าง ๆ ไว้ตาม

ตาราง 3

ตาราง 3 ตัวแปลควบคุมการทดลอง : Lai et al. (2018)

Case	H (mm)	a (mm)	(s-a) (mm)	H/(s-a)	a/(s-a)	Grain size (mm)
No. 1	150	300	300	0.5	1	1.4 – 2.0
No. 2	150	75	75	2	1	0.25 – 0.425
No. 3	600	75	300	2	0.25	1.0 – 1.4

H คือ ความสูงของดินถม, a คือ ขนาดของเสาเข็ม, s-a คือ ระยะห่างของเสาเข็ม.

ผลการทดสอบพบว่า แรงส่วนโค้งของโครงสร้างดินจะเกิดขึ้นตามเงื่อนไขต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปทรงของระยะการกระจัดที่เกิดขึ้น ซึ่งจะแบ่งได้เป็น 3 กรณี

1. Shear Plane Arching การเกิดแรงส่วนโค้งเฉพาะส่วน
2. Partial Arching การเกิดแรงส่วนโค้งบางส่วน
3. Full Arching การเกิดแรงส่วนโค้งอย่างเต็มรูปแบบ

การเกิดแรงส่วนโค้งเฉพาะส่วน (Shear Plane Arching) ก็จะมีลักษณะที่เกิดขึ้นอยู่ 3 รูปแบบ

1. Inactive Region ขอบเขตที่ไม่มีผล
2. Active Region ขอบเขตที่มีผล

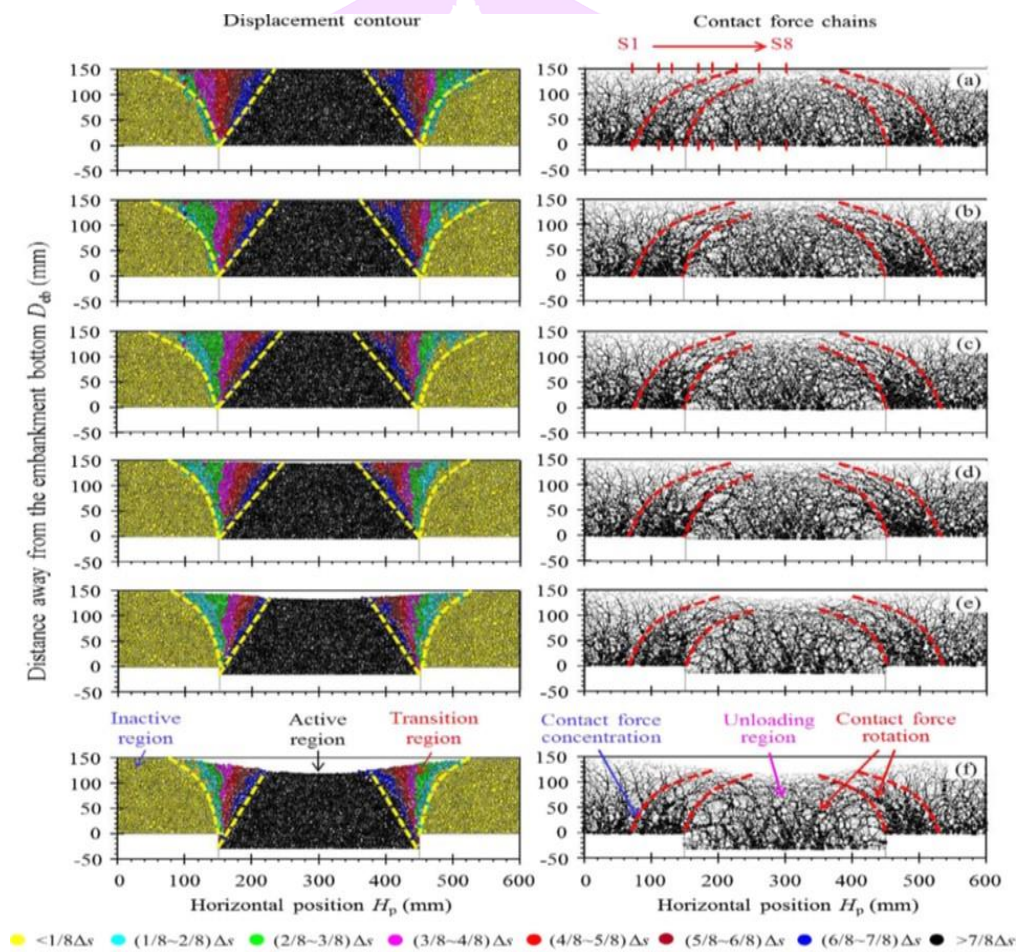
ซึ่งทั้ง 2 รูปแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อระยะห่างของเสาเข็มกับความเสาเข็มเป็น ความสูงน้อยกว่า  $1/16$  ของระยะห่าง และ ความสูงมากกว่า  $15/16$  ของระยะห่าง และรูปแบบที่

3. Transition Region เป็นการเกิดขึ้นของแรงที่อยู่ ในช่วง  $1/16$  ถึง  $15/16$  ความสูงของดินถมต่อระยะห่างของเสาเข็ม

การเกิดแรงบางส่วน (Partial Arching) ซึ่งจะมีลักษณะการเกิดเหมือนกับการเกิดแรงดึงเฉพาะส่วน มี 3 ลักษณะ เป็น การเกิดแรงแบบสะพานโค้ง (Arched Force Bridges) เป็นการเกิดแรงภายในของ โค้งบางส่วน ที่อยู่ในช่วงของการเกิดแรงแบบ Transition

และเป็นการเกิดส่วนโค้งที่มีแรงมากระทำต่อแท่งเหล็กที่รองรับน้อยกว่า การเกิดแรงส่วนโค้ง เฉพาะส่วน (Shear Plane Arching)

การเกิดแรงส่วนโค้งอย่างเต็มรูปแบบ (Full Arching) เป็นการเกิดแรงที่มีการเกิดแรง 3 ลักษณะพร้อม ๆ กัน ทั้ง การเกิดแรงเฉพาะส่วน การเกิดแรงบางส่วน และ การเกิดช่วงของการเกิดแรง เป็นการเกิดการกระจายแรงที่มีประสิทธิภาพที่สุด (ภาพ 18)

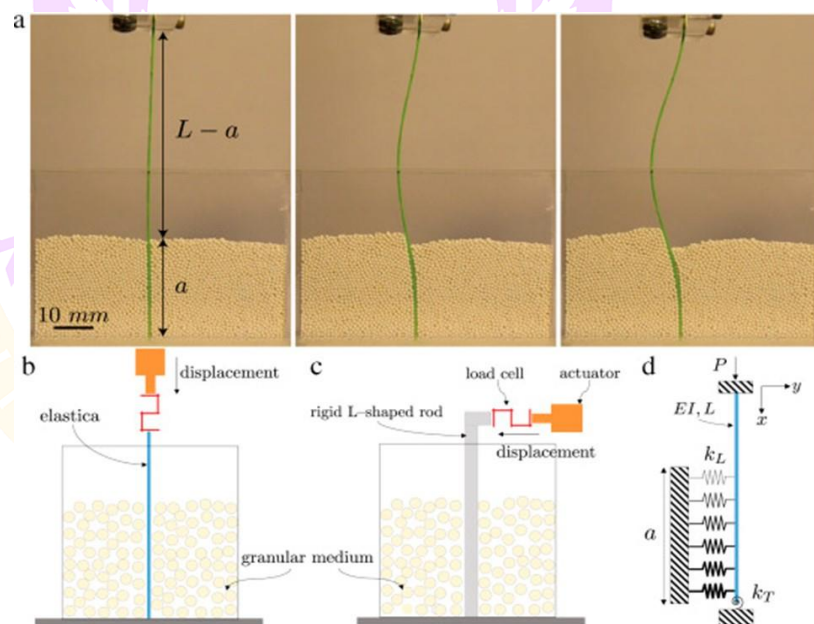


ภาพ 18 ลักษณะการเกิดแรงส่วนโค้งอย่างเต็มรูปแบบ (Full Arching)

: Lai et al. (2018)

จากการทดสอบนั้นสามารถสรุปได้ว่า ความสูงของดินถมมีความสำคัญต่อการเกิด การกระจายของแรงที่จะเกิดขึ้น เพื่อจะให้เกิดการกระจายแรงแบบ การเกิดแรงส่วนโค้ง อย่างเต็มรูปแบบ (Full Arching) จำเป็นต้องถมดินให้มีความสูงมากกว่าระยะห่างของเสาเข็ม

Mojdehi et al. (2016) ได้ทำการศึกษาการจำลองคานยืดหยุ่นในวัสดุเม็ด เป็นการจำลองแรงที่กระทำต่อฐานรากและมีแรงที่เหมือนสปริงตามความยาวของคาน แบบจำลองนี้ ถูกใช้อย่างแพร่หลายให้การศึกษาพฤติกรรมระหว่างโครงสร้างและดิน เมื่อโครงสร้างที่มีเสารองรับ เช่น สะพาน สะพานจะถ่ายแรงไปยังฐานราก พฤติกรรมการโก่งของเสาฐานรากจะเกิดขึ้นตามความยาวเสา และการโก่งตัวจะลดลงตามแรงกระทำของดินที่อยู่รอบ ๆ เสาฐานราก โดยวิธีสังเกตจากภาพถ่าย ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลองและวิเคราะห์พฤติกรรม การโก่งของคานยาวยืดหยุ่นในวัสดุเม็ดละเอียด การโก่งของคานจะมีการเกิดขึ้นแตกต่างกันตามค่า  $EI$  และความลึกของระยะฝัง การตอบสนองต่อแรงด้านข้างและ การกระจัดของตัวอย่างถูกวัดด้วย เครื่องมือวัดระยะ การทดลองจะใช้แท่ง โพลีคาร์บอเนต จำลองเป็นคาน ความยาว 90 มิลลิเมตร มีค่า  $EI$   $6.7 \times 10^{-5} \text{ Nm}^2$  ใช้เม็ดลูกปัด จำลองเป็นดิน ความหนาแน่น 3.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซน ความสูงของลูกปัดมี 2 ขนาดที่ใช้ทดลอง มีการให้แรงเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร ทุก ๆ 1 วินาที ในการทดลองกำหนดความสูงของเม็ดลูกปัดเป็น 0.3L ละ 0.8L (ภาพ 19)



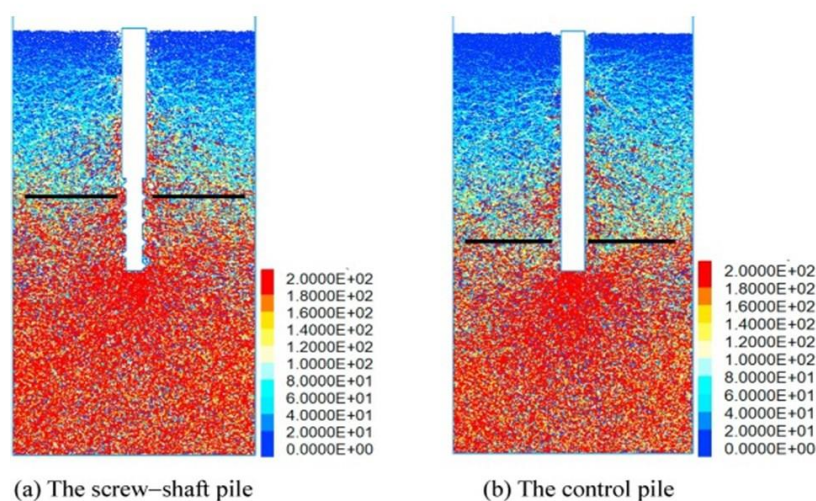
ภาพ 19 การศึกษาการจำลองคานยืดหยุ่นในวัสดุเม็ด

: Mojdehi et al. (2016)

ผลการทดสอบพบว่า การตอบสนองต่อการโก่งงอของคานยึดหยุ่นเรียวยาวที่ถูกฝังในวัสดุเม็ต นั้นจะมีความแตกต่างกันไปตามค่าความต้านทานแรงดัดของคานและลักษณะของเม็ตของแข็งที่ใช้แทนดินก็มีผลต่อการเกิดการโก่งงออีกด้วย ทั้งนี้ระยะการฝังของคานก็มีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงของคาน และการปรับระยะการฝังที่เหมาะสมและความหนาแน่นที่ดีของเม็ตลูกบดที่อยู่รอบ ๆ คานจะช่วยให้คานสามารถรับกำลังแบกทานได้ดียิ่งขึ้น

Chen et al. (2018) ได้ศึกษาการตรวจสอบประสิทธิภาพของเสาเข็มสกรู และเพลลา ในการให้โหลดในแนวแกนเสาเข็ม โดยมีการติดตั้งเสาเข็มสกรูเพลลาในชั้นทราย เสาเข็มสกรู และเพลลา จะถูกทดสอบการรับน้ำหนักเพื่อหาความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มสกรู และเพลลา ยังได้ทำการทำสอบเสาเข็มเพลลาภายใต้เงื่อนไขเดียวกันเพื่อเป็นตัวแปลควบคุมของผลการศึกษา และได้ใช้ความสัมพันธ์ทางรูปภาพ (DIC) ตลอดการทดลองเพื่อใช้ตรวจสอบประสิทธิภาพของเสาเข็มทั้ง 2 ชนิด วิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบ จะทำการบรรจุทรายลงในกล่องขนาด กว้าง 1 เมตร ยาว 1.2 เมตร สูง 1.5 เมตร ด้านหน้าถูกติดตั้งแผ่นกระจกใสเพื่อใช้ในการถ่ายภาพ ด้านบนของเสาเข็มจะถูกติดตั้ง โหลดเซลล์ และทรานสดิวเซอร์ดิสเพลสเมนต์ด้านบนของโหลดเซลล์มีลูกสูบไฮดรอลิกเพื่อใช้ในการให้แรงแก่เสาเข็ม ทรายจะถูกใส่ลงไปในห้องจำนวน 1.4 ลูกบาศก์เมตร โดยจะมีความสูงประมาณ 1.2 เมตร เสาเข็มที่ใช้ทำจาก อลูมิเนียมแข็งวงกลมผ่าครึ่งสำหรับการทำแบบจำลอง เหตุผลที่ทำการผ่าครึ่งเสาเข็มเพื่อให้เสาเข็มอยู่ชิดติดกับกระจกด้านหน้าของกล่องบรรจุทรายซึ่งจะทำให้กล่องสามารถถ่ายภาพกระบวนการในการทดสอบเสาเข็มได้

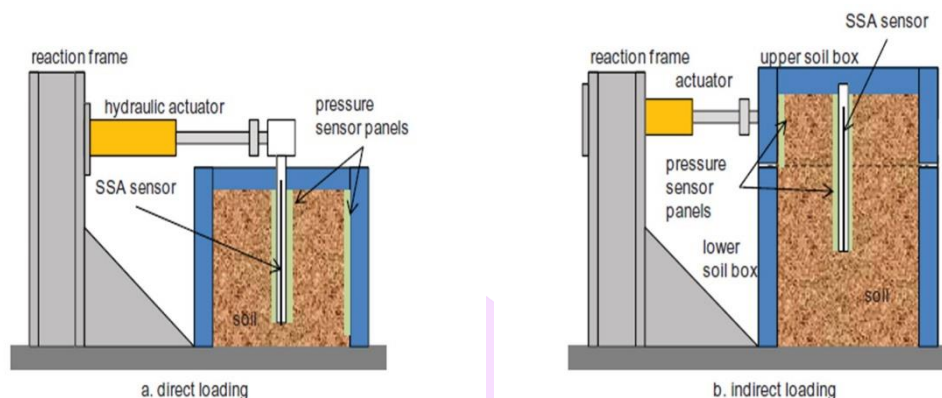
ผลการทดสอบที่เกิดขึ้นจะเห็นได้ว่า แรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นสะท้อนให้เห็นถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคและแรงการบีบอัดจากเสาเข็ม ทำให้สามารถเข้าใจถึงความสามารถในการรับกำลังแบกทานของเสาเข็มได้ แรงที่ถูกถ่ายลงสู่อนุภาคนั้นจะถูกแสดงออกมาเป็นสีต่าง ๆ ตั้งแต่แรงสัมผัสต่ำที่สุด 0 จนถึง 200 N และค่าที่เกิด 200 N จะถูกนับว่าเป็น 200 N จะเห็นว่าระดับการกระจายแรงของเสาเข็มสกรูเพลลา และเสาเข็มเพลลาจะแตกต่างกันอย่างชัดเจน เสาเข็มสกรูเพลลามีการกระจายแรงตั้งแต่ส่วนที่เป็นเพลลาจนถึงปลายสกรู ในส่วนของสกรูจะเป็นตัวช่วยเพิ่มการเสียดสี แต่เสาเข็มเพลลาจะกระจายแรงที่ปลายสุดของเพลลา (ภาพ 20)



ภาพ 20 ผลทดสอบการตรวจสอบประสิทธิภาพของเสาเข็มสกรู และเพลา (a) เสาเข็มสกรูเพลา , (b)เสาเข็มเพลา : Chen et al. (2018)

รายงานนี้เป็นการนำเสนอการประเมินประสิทธิภาพของเสาเข็มสกรูเพลา โดยทำการทดสอบการจำลอง ประสิทธิภาพของเสาเข็มสกรูเพลา จะถูกเปรียบเทียบกับเสาเข็มเพลา ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน การศึกษาจะตรวจสอบลักษณะ การรับกำลังแบกทานของเสาเข็มเมื่อเทียบกับการหลุดตัว พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของเม็ดทรายรอบ ๆ เสาเข็ม สรุปผลการทดสอบที่ได้ นั้นเสาสกรูเพลา มีประสิทธิภาพดีกว่าในแง่ของการรับกำลังแบกทานความสามารถในการรับน้ำหนักมีมากกว่าเสาเข็มเพลาธรรมดาถึง 43%

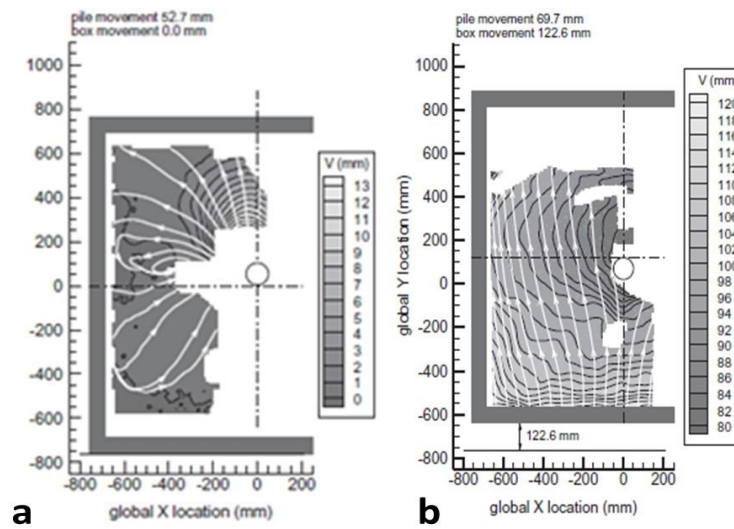
Helm and Suleiman (2012) ได้ศึกษาพฤติกรรมระหว่างเสาเข็มและดินที่อยู่บริเวณรอบ ๆ เสาเข็มยังไม่ค่อยมีความชัดเจนว่าจะเป็นอย่างไรแน่ชัด ดังนั้นจึงอาจเกิด ความไม่น่าเชื่อถือต่อการออกแบบได้ จึงได้มีการศึกษาปฏิกิริยาของดินรอบ ๆ ต่อโครงสร้างเสาเข็มขึ้นมา และวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของแรงที่มีผลต่อโครงสร้างและดิน และเพื่อศึกษาการเคลื่อนตัวของดินและการเคลื่อนไหวของเสาเข็มด้วยวิธีการถ่ายภาพ ในการศึกษา นี้ จะทำการศึกษาโดยมีเงื่อนไขการให้แรงอยู่ 2 วิธี คือ การให้แรงโดยตรง เป็นการให้แรงแก่เสาเข็มโดยตรงเพื่อจะกดลงสู่ดิน และการให้แรงทางอ้อม โดยการให้แรงผ่านดินกดเสาเข็มลงสู่ดิน แล้วทำการวัดค่า พารามิเตอร์ต่าง ๆ (ภาพ 21)



ภาพ 21 การศึกษาพฤติกรรมระหว่างเสาเข็มและดินที่อยู่บริเวณรอบ ๆ เสาเข็มลักษณะการให้แรง (a) ให้แรงโดยตรง , (b) ให้แรงทางอ้อม : Helm and Suleiman (2012)

จากการผลการวิเคราะห์เมื่อให้แรงแก่ตัวอย่างทั้งโดยตรงและทางอ้อมที่แรงกระทำ 17.8 kN เท่ากัน พบว่าการให้แรงโดยตรงนั้น การเคลื่อนตัวของเสาเข็มเท่ากับ 52.7 มิลลิเมตร และเวกเตอร์การเคลื่อนที่ของดินในแนวระนาบที่เกิดขึ้นมีทั้งพุ่งออกและพุ่งเข้าเสาเข็ม ส่วนการให้แรงทางอ้อมนั้น พบว่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มเท่ากับ 69.7 มิลลิเมตร และการเคลื่อนตัวของกล่องทดสอบอยู่ที่ 122.6 มิลลิเมตร และเวกเตอร์การเคลื่อนที่ของดินในแนวระนาบที่เกิดขึ้นจะพุ่งออกจากขอบของกล่องในด้านที่มีการให้แรงกระทำไปสู่ขอบของกล่องด้านตรงข้าม (ภาพ 22)

การให้แรงแบบโดยตรงและการให้แรงทางอ้อม ระบบสามารถวัดการเคลื่อนตัวของผิวดินรอบ ๆ เสาเข็มจากภาพได้ และยังบอกลักษณะการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรได้อีกด้วย



ภาพ 22 ผลการวิเคราะห์การศึกษาพฤติกรรมระหว่างเสาเข็มและดินที่อยู่บริเวณรอบ ๆ  
 (a) ให้แรงโดยตรง , (b) ให้แรงทางอ้อม : Helm and Suleiman (2012)



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการ

#### วัสดุ และ อุปกรณ์

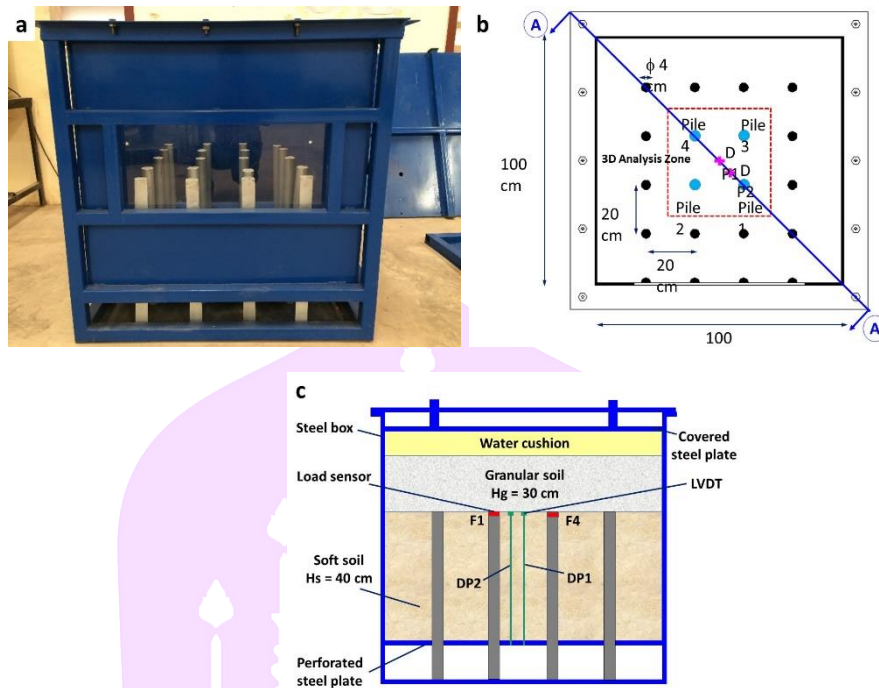
การทดสอบในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบโดยใช้แบบจำลอง 3 มิติ เป็นแบบจำลองแบบลดขนาดสเกล 1 g ลักษณะของแบบจำลองประกอบด้วยแผ่นเหล็กหนาที่ถูทำให้เป็นกล่องลูกบาศก์ขนาด กว้าง 1 เมตร x ความยาว 1 เมตร x สูง 1 เมตร ภายในติดตั้งแท่งเหล็กกลมเพื่อใช้จำลองเป็นเสาเข็ม พร้อมทั้งติดตั้งโหลดเซ็นเซอร์ และ ทรานสดิวเซอร์เซ็นเซอร์ (ภาพ 23 a) เพื่อวัดขนาดของน้ำหนักที่กระทำและวัฏระยะการกระจัดที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ภายในการทดสอบได้ใช้ตัวอย่างดินอ่อนเสมือน ที่เกิดจากการผสมระหว่างทรายและเม็ดโพลีเมอร์เข้าด้วยกันเพื่อจำลองเป็นดินเหนียวอ่อน และวัสดุคัดเลือกที่ถูกจำลองเป็นคันทงานั้นจะให้ ทราย และ หิน ในการทดสอบ (ภาพ 23 c)

#### แบบจำลอง 3 มิติ (Physical Model)

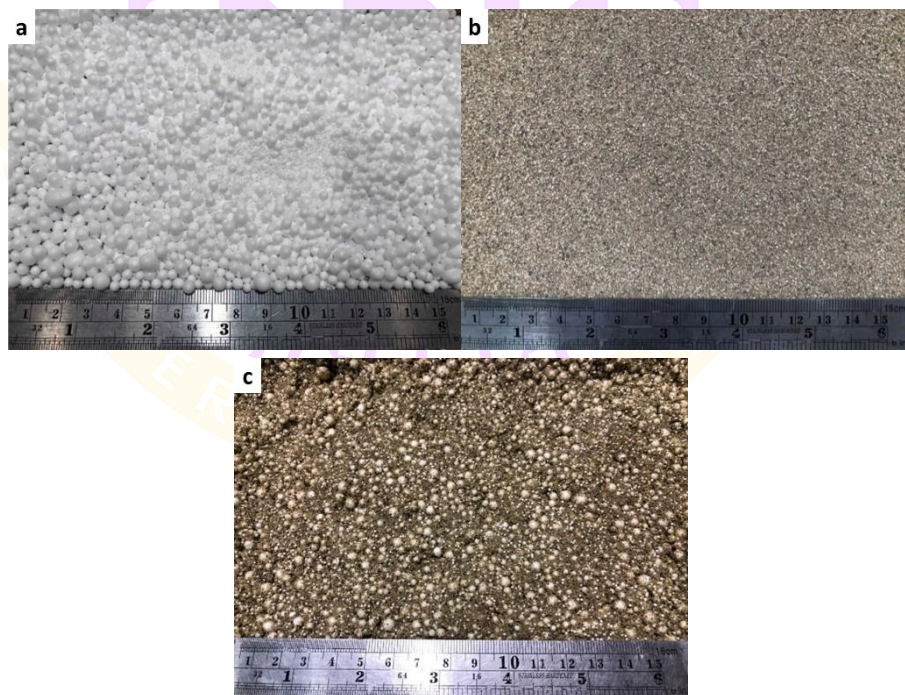
โดยในตัวแบบจำลองจะมีโหลดเซ็นเซอร์ติดตั้งเพื่อตรวจสอบแรงกระทำบนหัวเสาเข็มที่เกิดขึ้น และมีทรานสดิวเซอร์เซ็นเซอร์ติดตั้งเพื่อการเคลื่อนที่ของดินอ่อนที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยเสาเข็มกลม 16 ต้น และเสาเข็มครึ่งวงกลม 4 ต้น โดยเสาเข็มมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 4 เซนติเมตร และมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของเสาเข็มอีกเสาเข็มเท่ากับ 20 เซนติเมตร (ภาพ 23 b)

#### ดินเหนียวอ่อนเสมือน (Soft Soil)

การร่อนทราย เป็นการร่อนทรายตามมาตรฐาน ASTM จากการทดลอง ทรายที่ใช้คือ ทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ #30 ค้างที่เบอร์ #50 (ภาพ 24 b) ซึ่งจะใช้เป็นส่วนผสมในการจำลองดินอ่อน และเมื่อร่อนทรายได้ตามจำนวนที่กำหนดก็จะนำทรายมาผสมกับเม็ดโพลีเมอร์ (ภาพ 24 d) ตามน้ำหนักที่กำหนดไว้ โดยใช้ น้ำ เป็นตัวผสมเพื่อให้ทรายและเม็ดโพลีเมอร์ผสมให้เข้ากัน

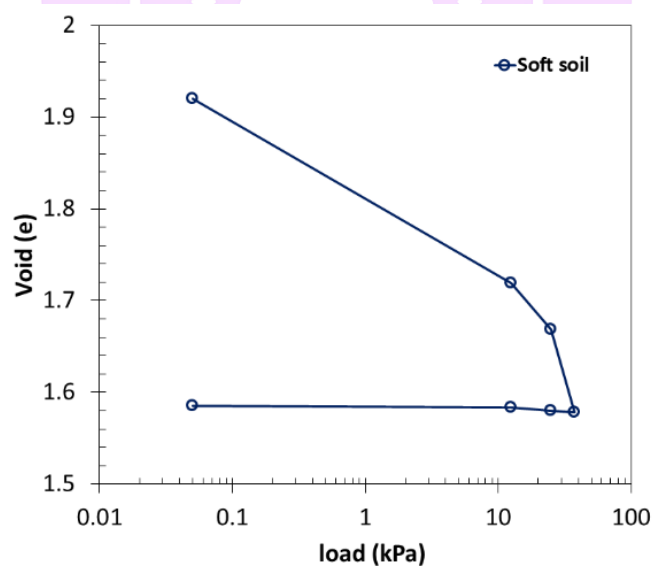


ภาพ 23 แบบจำลอง 3 มิติ (a) แบบจำลอง 3 มิติ, (b) แบบจำลอง 3 มิติ มุมมองด้านบน, (c) ส่วนประกอบภายในแบบจำลอง มุมมอง A-A



ภาพ 24 การผสมตัวอย่าง (a) เม็ดโฟม, (b) ทรายที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ #30 ค้างเบอร์ #50, (c) ตัวอย่างดินอ่อนเสมือนที่ผสมเสร็จ

การทดสอบการอัดตัวคายน้ำเป็นการหาค่าการยุบตัวของดินอ่อน (ดินกรุงเทพฯ) เพื่อที่จะนำมาเป็นตัวเปรียบเทียบของดินทดสอบที่ทำการผสมขึ้นมาเอง เนื่องจากดินกรุงเทพฯ มีความยากลำบากในการทดสอบ ผู้ทดลองจึงได้ทำการคิดส่วนผสมขึ้นมาโดยให้การคายตัวเท่ากับหรือใกล้เคียงกับดินกรุงเทพฯ เพื่อสะดวกในการทำการทดสอบและการเตรียมวัสดุในการทดลอง ผู้ทดลองจึงได้ทำการทดสอบการยุบตัวคายน้ำของดินกรุงเทพฯ ก่อนและหลังจากนั้นทำการคิดอัตราส่วนผสมของดินตัวอย่าง ได้อัตราส่วนผสม 40:4:1 โดยทราย 40 กิโลกรัม ต่อ น้ำ 4 กิโลกรัม ต่อ เม็ดโฟม 1 กิโลกรัม และในเม็ดโฟม 1 กิโลกรัม แบ่งเป็น เม็ดโฟม ขนาด 3 มิลลิเมตร หนัก 350 กรัม เม็ดโฟมขนาด 2 มิลลิเมตร หนัก 450 กรัม และเม็ดโฟมขนาด 1 มิลลิเมตร หนัก 200 กรัม (ภาพ 24 c) โดยตัวอย่างมีความหนาแน่นของตัวอย่าง 0.55 ตันต่อลูกบาศก์เมตร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การยุบตัว ( Compression Index ) เท่ากับ 0.5159 (ภาพ 25)



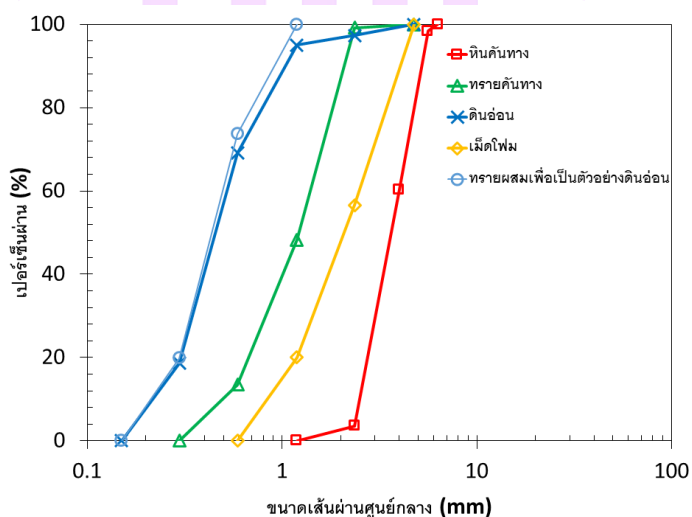
ภาพ 25 กราฟการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างดินอ่อนเสมือน

### วัสดุคัดเลือกคันทาง ( Embankment )

ในชั้นดินถมจะประกอบไปด้วยวัสดุ 2 ชนิด คือ ทรายและกรวด โดยทรายที่ใช้จะผ่านตะแกรงเบอร์ #8 ค้างเบอร์ #30 (ภาพ 26 a) และหินที่ใช้จะผ่านตะแกรงเบอร์ #4 ค้างเบอร์ #16 (ภาพ 26 b) ซึ่งจะใช้จำลองเป็นดินคันทางถมกลบหน้าดินอ่อน



ภาพ 26 วัสดุคัดเลือกคันทาง (a) ทรายที่ผ่านตะแกรงเบอร์ #8 ค้างเบอร์ #30, (b) หินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ #4 ค้างเบอร์ #16



ภาพ 27 กราฟอัตราการผ่านและตกค้างของวัสดุคัดเลือก และ ดินอ่อนเสมือน

### การถ่ายภาพ

ในการถ่ายภาพตัวอย่างการทดสอบนั้นจะใช้กล้อง Sony d7 เลนส์ซูมกำลังขยายที่ x70 เท่า (ภาพ 28 a) มีฉากันแสงเพื่อช่วยในการลดแสงจากภายนอกที่จะเข้ามารบกวนการถ่ายภาพ (ภาพ 28 b) และยังใช้ไฟ LED สปอตไลท์สีขาวเข้ามาช่วยเพื่อให้แสงแก่ตัวอย่างสม่ำเสมอจนตลอดทั้งการทดลอง (ภาพ 28 c)



ภาพ 28 อุปกรณ์ในการถ่ายภาพ (a) กล้องและเลนส์ , (b) ฉากกันแสง , (c) ไฟสปอตไลท์ LED

## การเตรียมการทดสอบ

### วิธีเตรียมเครื่องมือ

1. ติดตั้งเซ็นเซอร์รับค่าการยุบตัว (displacement) โดยจะมีแท่งเหล็กเป็นตัวครอบไว้เพื่อให้ เซ็นเซอร์ทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพโดยแท่งเหล็กที่ครอบจะยึดติดกับแผ่นเหล็กในการทดลองนี้ใช้ เซ็นเซอร์รับค่าการยุบตัว 2 ตัว เพื่อวัดการยุบตัวของแบบจำลองดินอ่อนกรุงเทพ

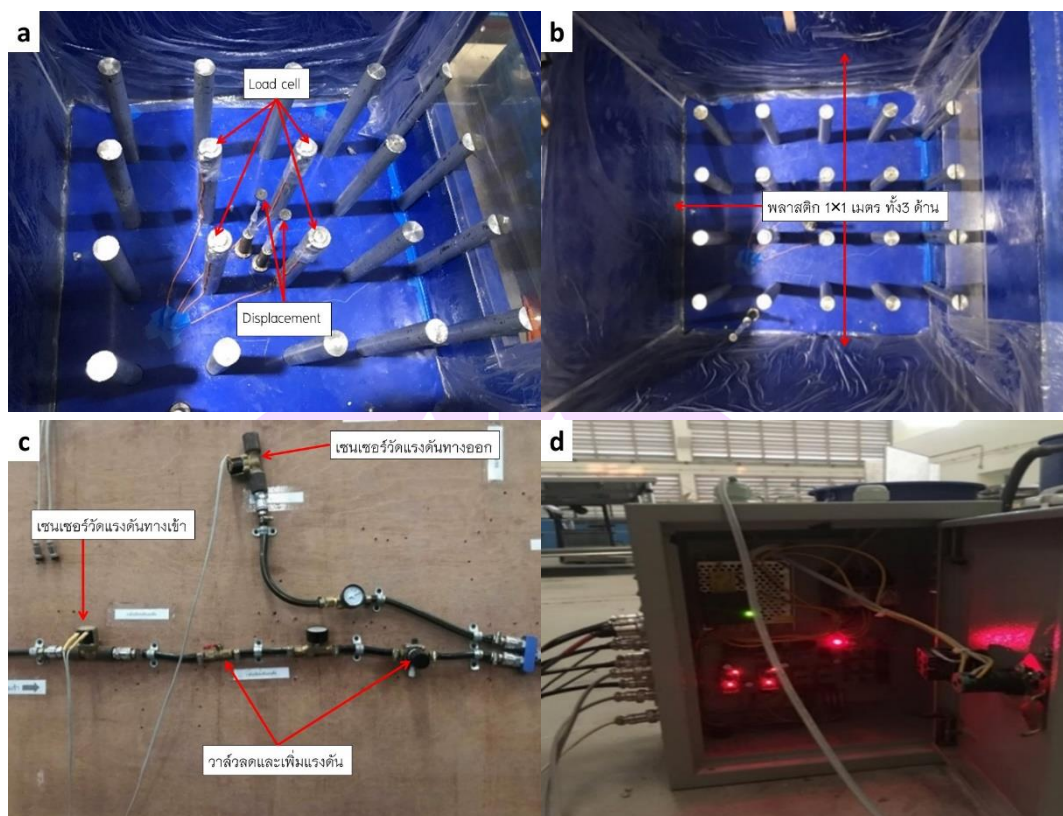
2. ทำการปรับเทียบเซ็นเซอร์รับค่าการยุบตัว (displacement) เพื่อดูค่าที่สมบูรณ์ที่สุดที่จะรับน้ำหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. นำก้านเหล็กเชื่อมด้วยเหล็กกลมขนาด 2 มิลลิเมตร ก้านยาว 40 เซนติเมตร เพื่อเป็นตัวรับน้ำหนักที่ลงมากกระทำต่อดินอ่อน โดยก้านเหล็กนี้จะถูกวางบนหัวเซ็นเซอร์รับค่าการยุบตัว (displacement) ก้านเหล็กที่นำมาใช้ต้องตรงไม่งอเพื่อไม่ให้เกิดการบิดขั้ในตัวของแท่งเหล็ก แล้วทำการกดดูว่าบิดขั้ตรงไหนบ้าง

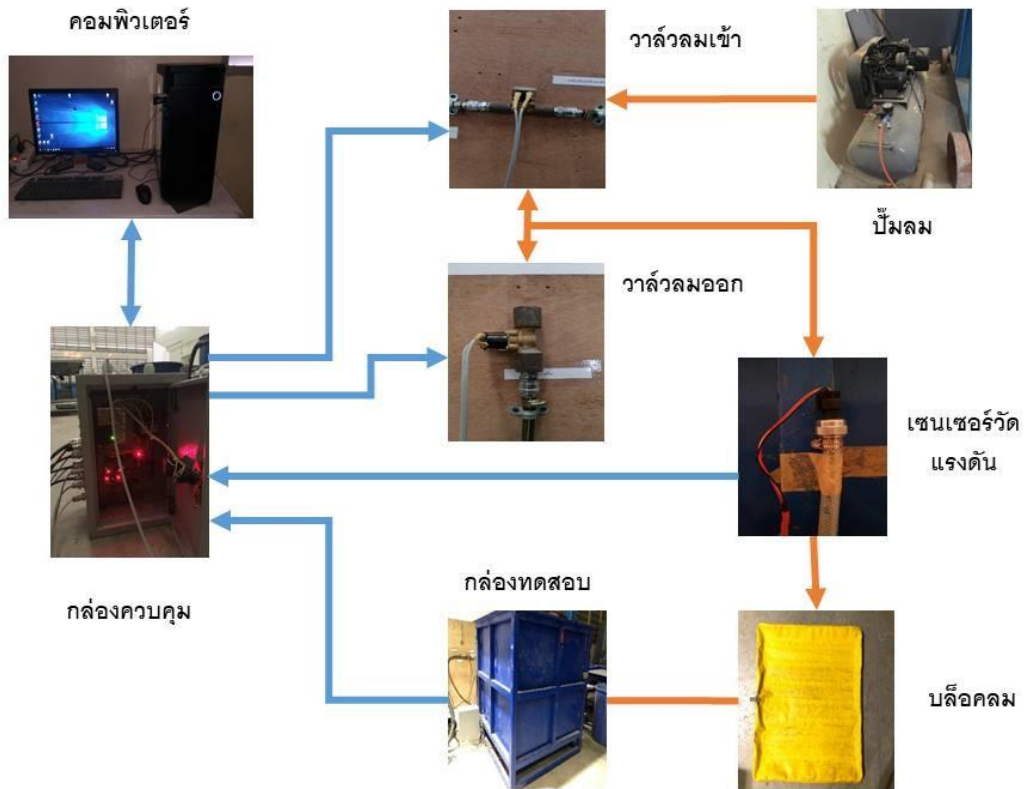
4. ด้านข้างของกล่องใส่ตัวอย่างจะทาสีทึบทั้ง 3 ด้าน จะมีด้านหนึ่งที่เป็นกระจกใสเพื่อทำการดูการเคลื่อนตัวของดินอ่อน แล้วนำพลาสติกขนาด 1x1 เมตร ไปติดทั้ง 3 ด้าน เพื่อไม่ให้เกิดแรงเสียดทานด้านข้าง (ภาพ 29 b)

5. นำเสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร จำนวน 16 แท่ง และเสาเข็มครึ่งวงกลมอีก 4 แท่ง ยาวจากแผ่นเหล็กชั้นที่ 2 ด้านล่างขึ้นมา 40 เซนติเมตร วางห่างกันระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางถึงเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร และแผ่นเหล็กชั้นล่างที่ติดกับพื้นเราจะสมมุติว่าชั้นดินแข็ง จะมีเสาเข็ม 4 แท่ง เป็นเสาเข็มที่ติดตั้ง load cell บนหัวเสาเข็มทั้ง 4 แท่ง โดยเราจะทำการ calibrate load cell ก่อน (ภาพ 29 a)

6. ตรวจสอบอุปกรณ์ควบคุมแรงดันให้อยู่ในสภาวะใช้งานได้อยู่ตลอดเวลาไม่ว่าจะเป็นเซ็นเซอร์หรือโปรแกรม



ภาพ 29 การเตรียมเครื่องมือ (a) การติดตั้งเซ็นเซอร์ , (b) การคลุมพลาสติกขนาด 1x1 เมตร 3 ด้าน ,(c) อุปกรณ์ควบคุมแรงดัน , (d) กล่องรับข้อมูลจากเซ็นเซอร์

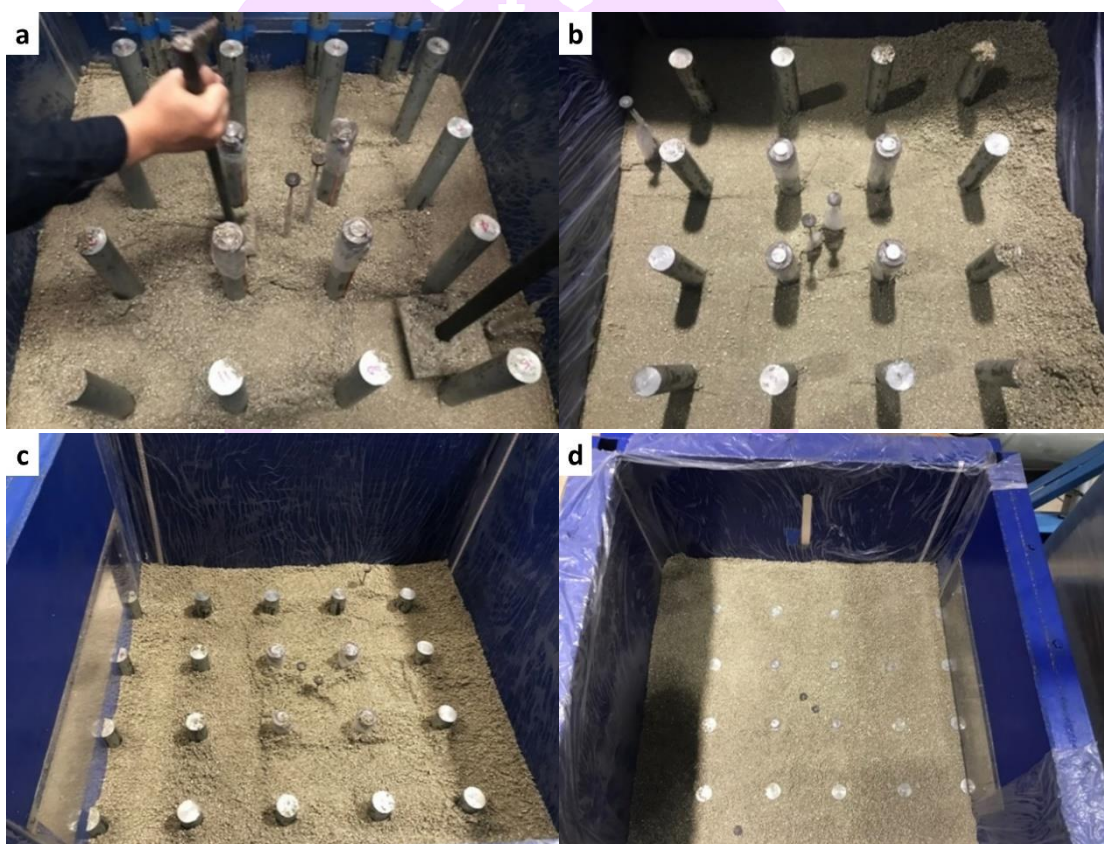


ภาพ 30 ระบบการทำงานของเครื่องมือ



### การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

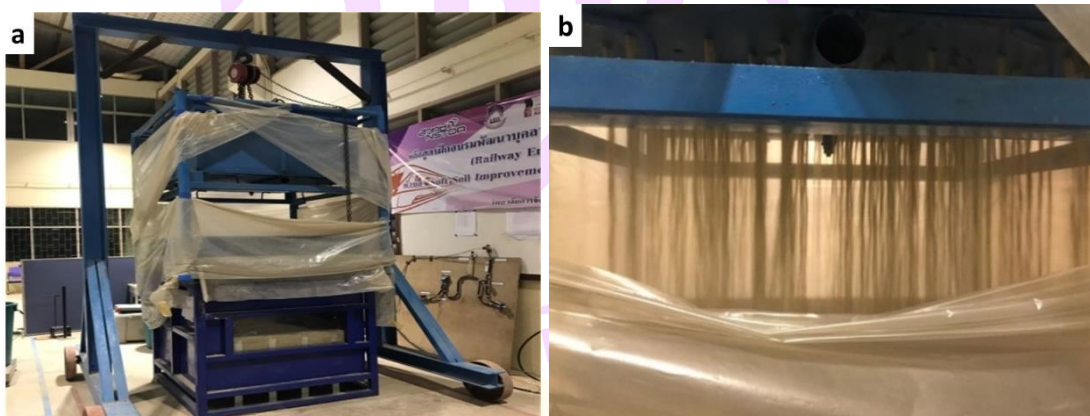
นำดินตัวอย่างดินอ่อนเสมือนที่ผสมเก็บไว้ถังละ 55 กิโลกรัม 1 ถัง ใส่ลงไปในกลุ่มทดลองที่มีปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตรที่เตรียมไว้แล้วบดอัดให้ได้ความหนาที่ 10 เซนติเมตร จะได้ความหนาแน่นเท่ากับ 0.55 ตันต่อลูกบาศก์เมตร เสร็จแล้วนำดินตัวอย่างถึงที่ 2,3 และ 4 ใส่ลงไปในกลุ่มทดลองครั้งละ 1 ถังต่อ 1 ชั้น และบดอัดให้ได้ความหนาที่ 10 เซนติเมตร เหมือนเดิม ทำแบบนี้จนถึงชั้นที่ 4 ชั้นสุดท้าย (ภาพ 31 a, ภาพ 31 b, ภาพ 31 c, ภาพ 31 d)



ภาพ 31 การเตรียมตัวอย่างภายในแบบจำลอง (a) ชั้นที่ 1 สูง 10 เซนติเมตร , (b) ชั้นที่ 2 ความสูง 20 เซนติเมตร , (c) ชั้นที่ 3 ความสูง 30 เซนติเมตร , (d) ชั้นที่ 4 ความสูง 40 เซนติเมตร

### วิธีการเตรียมดินคันทาง

ในการทดสอบโดยใช้ทรายจำลองเป็นคันทางนั้น นำครนยกเครื่องโปรยขึ้นวางบนกล่องที่บรรจุตัวอย่างดินอ่อนเสมือน (ภาพ 32 a) จากนั้นนำทรายหยาบที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ #8 ค้างเบอร์ #30 ใส่ลงไปเครื่องโปรยทรายจำนวน 170 กิโลกรัม จากนั้นปล่อยให้ทรายตกอย่างอิสระจนหมด (ภาพ 32 b) จึงจะยกเครื่องโปรยทรายออกแล้วปรับหน้าให้เรียบจะได้ทรายที่มีความสูง 10 เซนติเมตร ทำ 3 ครั้ง ทรายทับหน้าจะมีความสูงที่ความสูง 30 เซนติเมตร หนัก 510 กิโลกรัม ความหนาแน่น 1.70 ต้นต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนการทดสอบโดยใช้หินเป็นคันทาง จะทำการตักหินที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ #4 ค้างเบอร์ #16 ใส่ในกล่องที่บรรจุตัวอย่างดินอ่อนเสมือนเสร็จแล้วแทนการโปรยแบบทรายโดยจะทำการตักใส่ทั้งหมด 3 ชั้น ชั้นละ 10 เซนติเมตร จนมีความสูงของคันทาง 30 เซนติเมตร โดยแต่ละชั้นจะใช้หินทั้งหมด 156 กิโลกรัม รวมทั้งหมด 468 กิโลกรัม ความหนาแน่น 1.56 ต้นต่อลูกบาศก์เมตร และมีการทดสอบโดยใช้ความสูงของหินที่ 5 เซนติเมตร รวมกับทรายที่มีความสูง 25 เซนติเมตร รวมเป็น 30 เซนติเมตรในการทดสอบด้วย โดยการทดสอบนี้ จะใช้วิธีการเตรียมตัวอย่าง และ ความหนาแน่นของหินและทราย เท่ากับการทดสอบ หิน และ ทราย ที่ความสูง 30 เซนติเมตรปกติ



ภาพ 32 การโปรยทราย (a) นำครนยกเครื่องโปรยทรายขึ้น , (b) ปล่อยให้ทรายตกอย่างอิสระจนหมด เสร็จแล้วทำต่อให้ครบ 3 ครั้ง

### วิธีตั้งค่าการให้แรงของตัวอย่าง

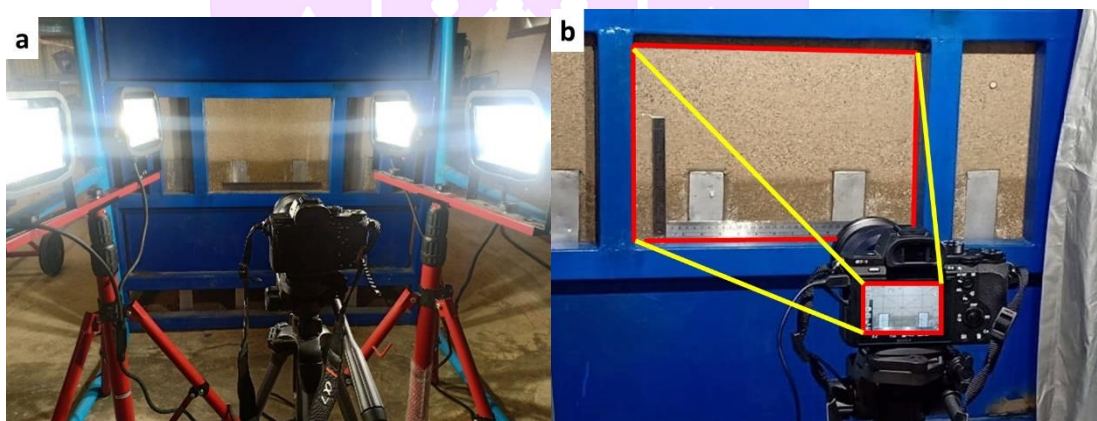
หลังจากโปรยทรายหรือหินเสร็จ นำแผ่นเหล็กขนาด 1×1 เมตร หนา 2 มิลลิเมตร วางทับลงไปเพื่อให้แรงกระจายลงได้ทั่วถึงทุกพื้นที่ (ภาพ 33 a) เสร็จแล้วนำถุงลมวางลงบนพื้นแผ่นเหล็ก (ภาพ 33 b) หลังจากนั้นนำฝาครอบมาปิดและยึดด้วยน็อต บริเวณรอบๆของฝาปิด (ภาพ 33 c) จากนั้นปล่อยทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างที่อยู่ในแบบจำลองเซตตัว จึงจะเริ่มให้แรงในการทดสอบ



ภาพ 33 อุปกรณ์การให้แรง (a) วางแผ่นเหล็กขนาด 1×1 เมตร , (b) นำปลีอกลมวางลงบนแผ่นเหล็ก , (c) ปิดฝาครอบและยึดด้วยน็อต

### การเตรียมการถ่ายภาพ

ในการถ่ายภาพตัวอย่างการทดสอบนั้นจะถ่ายภาพผ่านช่องอคติลิสี่เหลี่ยมใสที่สามารถมองเห็นลักษณะของตัวอย่างที่อยู่ภายในได้ (ภาพ 34 b) โดยกล้องที่ใช้ในครั้งนี้เป็นกล้อง Sony a7 ใช้เลนส์ซูมกำลังขยายที่ x70 เท่า ระยะจากช่องสี่เหลี่ยมถึงกล้อง 1 เมตร ระยะการโฟกัสที่ 90 เซนติเมตร ความสูงจากกลางเลนส์ถึงพื้นเป็น 65 เซนติเมตร ทั้งสองข้างของกล้องมีหลอดไฟ LED เพื่อช่วยในการให้แสงแก่ตัวอย่างแบบคงที่และเพื่อลดเงาสะท้อนของกล้องที่จะเกิดการสะท้อนกับแผ่นอคติลิส (ภาพ 34 a) โดยทั้งหลอดไฟและกล้องจะถูกครอบด้วยฉากกันแสง เพื่อช่วยลดแสงจากภายนอกที่อาจจะทำให้ภาพถ่ายมีสีของภาพที่แตกต่างกันได้

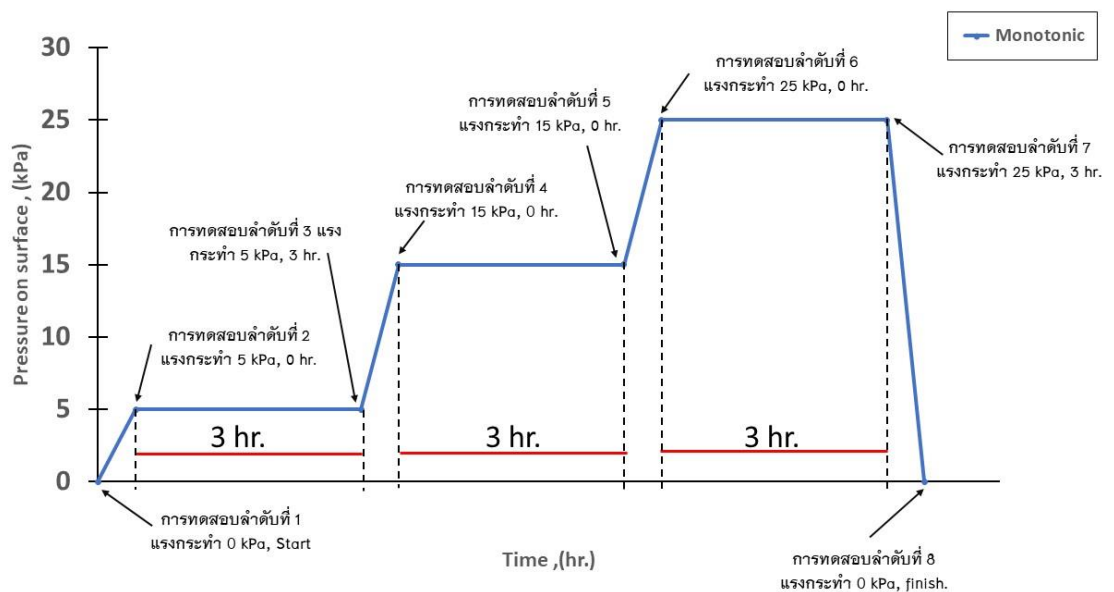


ภาพ 34 การเตรียมการถ่ายภาพ (a) การติดตั้งกล้องแสงภายในฉากกันแสง , (b) การตั้งกล้อง

การตั้งค่าการถ่ายภาพของกล้อง ใช้กล้องในโหมดการกำหนดค่าเอง (M) รูรับแสงที่ 100 F(100) ความเร็วของการถ่ายภาพ 0.3 วินาที โดยการถ่ายภาพจะทำการถ่ายผ่านการเชื่อมต่อกล้องกับโทรศัพท์มือถือ

## รูปแบบการทดสอบ

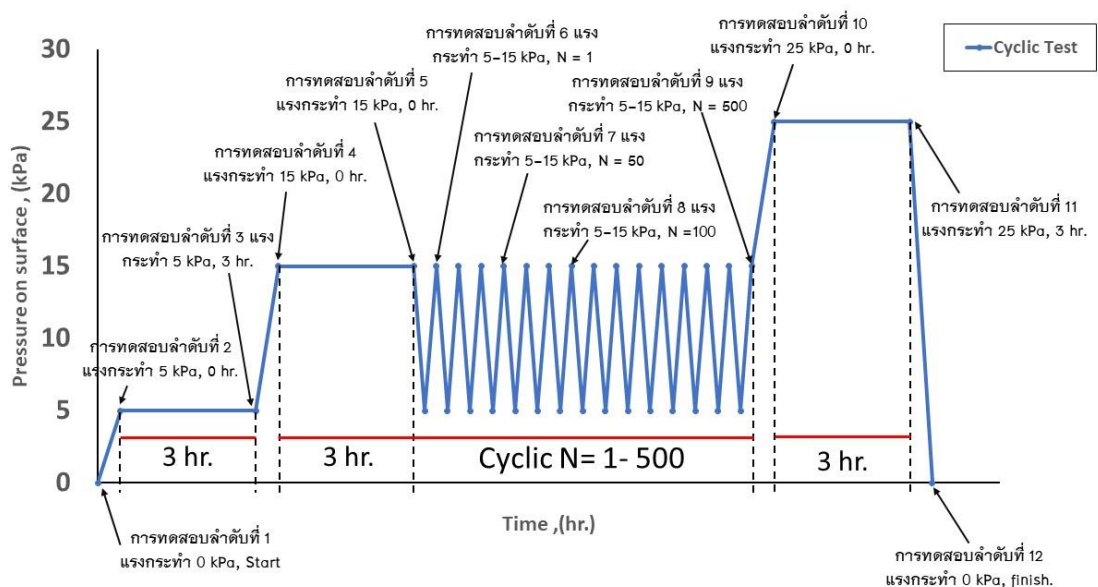
ในการทดสอบจะทำการให้แรงแก่ตัวอย่างในระดับต่าง ๆ และจะทำการถ่ายภาพเพื่อที่จะนำมาวิเคราะห์ผลต่อไป โดยจะมีการถ่ายภาพการทดสอบที่แรงกระทำดังนี้ การทดสอบลำดับที่ 1 แรงกระทำ 0 kPa หรือเริ่มต้นจากการไม่ใส่แรง การทดสอบลำดับที่ 2 ให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างถึง 5 kPa การทดสอบลำดับที่ 3 ให้แรงกระทำ 5 kPa คงที่ไว้ 3 ชั่วโมง การทดสอบลำดับที่ 4 ให้แรงกระทำถึง 15 kPa การทดสอบลำดับที่ 5 ให้แรงกระทำ 15 kPa คงที่ไว้ครบ 3 ชั่วโมง การทดสอบลำดับที่ 6 ให้แรงกระทำถึง 25 kPa การทดสอบลำดับที่ 7 ให้แรงกระทำ 25 kPa คงที่ไว้ครบ 3 ชั่วโมง และการทดสอบลำดับที่ 8 จะทำการลดแรงกระทำให้เหลือ 0 kPa สิ้นสุดการทดสอบในการทดสอบการให้แรงแบบคงที่ (ภาพ 35)



ภาพ 35 รูปแบบการให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างทดสอบและลำดับการถ่ายภาพทดสอบในการทดสอบการให้แรงแบบคงที่

และในส่วนของการให้แรงแบบวัฏจักรนั้น จะทำการให้แรงแก่ตัวอย่างทดสอบเหมือนการทดสอบการให้แรงแบบคงที่ก่อนหลังจากนั้นจะทำทำการให้แรงแบบวัฏจักรต่อเมื่อทำการให้แรงแบบวัฏจักรเสร็จสิ้น จะทำการให้แรงแบบคงที่อีกครั้ง โดยจะมีการถ่ายภาพการทดสอบ

ที่แรงกระทำดังนี้ การทดสอบลำดับที่ 1 แรงกระทำ 0 kPa หรือเริ่มต้นจากการไม่ใส่แรง การทดสอบลำดับที่ 2 ให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างถึง 5 kPa การทดสอบลำดับที่ 3 ให้แรงกระทำ 5 kPa คงที่ไว้ครบ 3 ชั่วโมง การทดสอบลำดับที่ 4 ให้แรงกระทำ 15 kPa การทดสอบลำดับที่ 5 ให้แรงกระทำ 15 kPa คงที่ไว้ครบ 3 ชั่วโมง หลังจากกให้แรงถึง 15 kPa ทิ้งไว้ครบ 3 ชั่วโมง แล้วจะทำการเริ่มให้แรงแบบวัฏจักรแก่ตัวอย่าง ในการทดสอบลำดับที่ 6 ให้แรงกระทำแบบวัฏจักรที่ 5-15 kPa, วงรอบแบบวัฏจักรที่ 1 การทดสอบลำดับที่ 7 ให้แรงกระทำแบบวัฏจักรที่ 5-15 kPa ครบ 50 รอบ การทดสอบลำดับที่ 8 ให้แรงกระทำแบบวัฏจักรที่ 5-15 kPa, ครบ 100 รอบ การทดสอบลำดับที่ 9 ให้แรงกระทำแบบวัฏจักรที่ 5-15 kPa ครบ 500 รอบ และหลังจากให้แรงแก่ตัวอย่างครบ 500 รอบแล้วจะทำการให้แรงแบบคงที่ต่อ โดยการทดสอบลำดับที่ 10 จะให้แรงกระทำจนถึง 25 kPa การทดสอบลำดับที่ 11 จะให้แรงกระทำถึง 25 kPa คงที่ไว้ 3 ชั่วโมง และการทดสอบลำดับที่ 12 จะลดแรงกระทำให้เหลือ 0 kPa สิ้นสุดการทดสอบ (ภาพ 36)



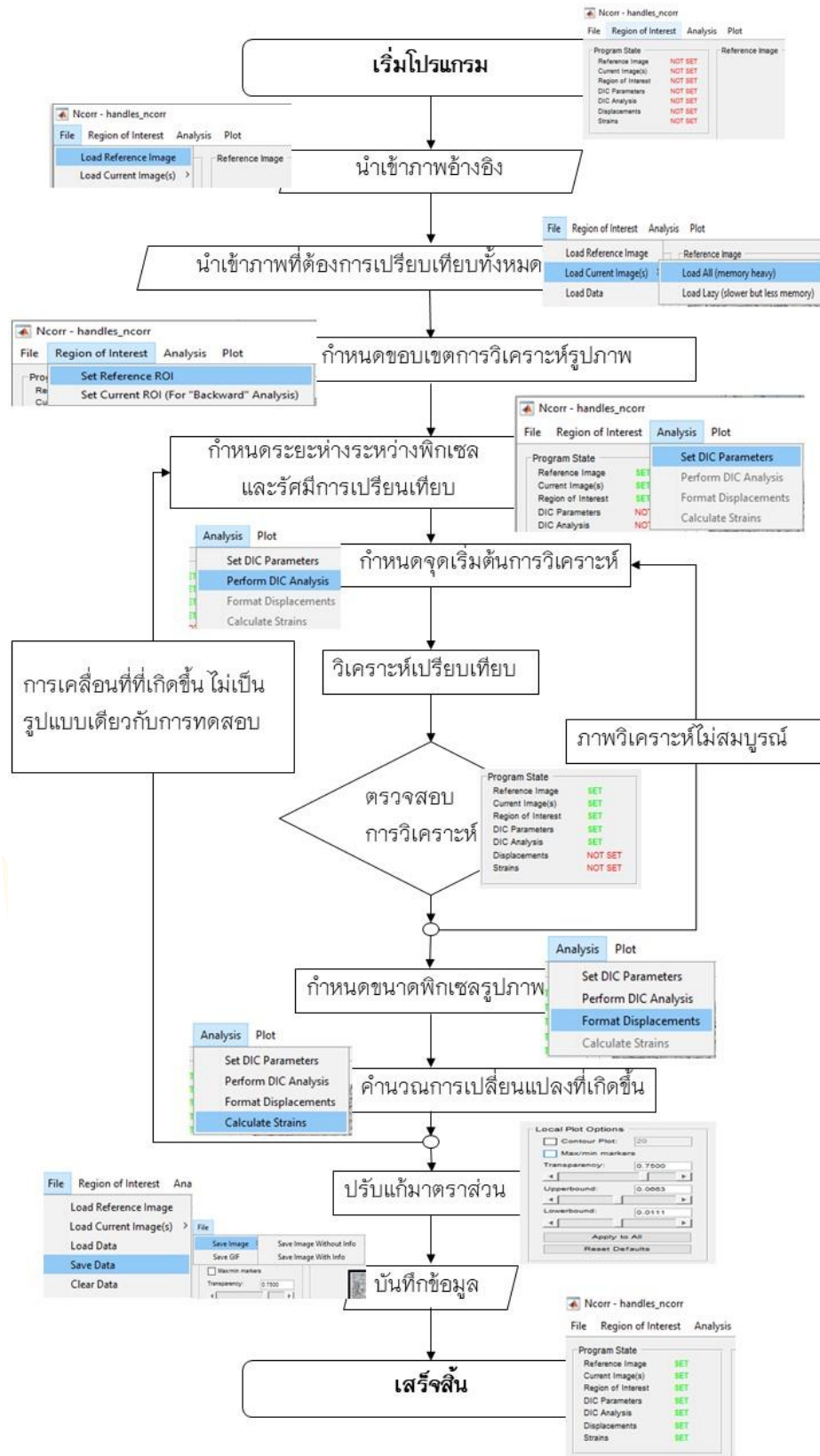
ภาพ 36 รูปแบบการให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างทดสอบและลำดับการถ่ายภาพทดสอบ ในการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักร

### วิธีวิเคราะห์ผลจากภาพถ่ายการวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม NCorr

NCorr เป็นโปรแกรมเสริมของ Matlab ในรูปแบบของการใช้งานได้ฟรี ที่สามารถวิเคราะห์ภาพถ่าย 2 มิติ ที่มีอยู่หลาย ๆ ภาพเรียงต่อกัน ให้ออกมาในรูปแบบของระดับสีได้ โดยระดับสีที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการประมวลผลของการเปลี่ยนแปลงในแต่ละพิกเซลของภาพแรกเริ่มเมื่อเปรียบเทียบกับภาพต่อ ๆ ไป และผลการวิเคราะห์ของโปรแกรมที่ออกมานั้นจะถูกประมวลผลให้อยู่ในรูปแบบของความเครียด ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละตัวอย่างการทดสอบที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ โดยการใช้งานโปรแกรม NCorr นั้นจำเป็นจะต้องมีโปรแกรม Matlab และโปรแกรม ที่สามารถอ่านอ่านค่าภาษา C++ ได้ ในที่นี้จะใช้โปรแกรม Microsoft Visual Studio ในการใช้งานร่วมกับ Matlab

#### ตาราง 4 การทดสอบ

ชื่อการทดสอบ	ชนิด	ความสูง Embankment (cm)	วิธีทดสอบ	การให้แรง (kPa)	โปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์ภาพถ่าย
M_g	หิน	30	mono	0 - 25	Ncorr
Cyc_g_5-15		30	cyclic	5 - 15	Ncorr
M_s	ทราย	30	mono	0 - 25	Ncorr
Cyc_s_5-15		30	cyclic	5 - 15	Ncorr



ภาพ 37 แผนผังการทำงานของโปรแกรม NCorr

## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

การทดสอบในครั้งนี้เป็นศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงของคันทงจำลอง ที่ใช้วัสดุคัตเลือกที่แตกต่างกัน ภายใต้แรงกระทำแบบคงที่ และ แรงกระทำแบบวัฏจักร จากการสังเกตพบว่า พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของวัสดุคัตเลือกทั้ง 2 ชนิดนั้น ในช่วงแรกที่มีการให้แรง 0 ถึง 5 kPa นั้นมีความคล้ายคลึงกันเป็นอย่างมาก ทั้งการให้แรงแบบคงที่และแบบวัฏจักร ไม่ว่าจะเป็นการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ ( displacement -X ) หรือ การเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ( displacement - Y ) แต่หลังจากให้แรง 5 ถึง 15 kPa ไปแล้วนั้น พบว่าพฤติกรรมการถ่ายแรงมีความแตกต่างกันไปในแต่ละวัสดุ และในวัสดุชนิดเดียวกันการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นยังคงคล้ายกันอยู่ หลังจากให้แรงกระทำถึง 15 kPa ผ่านแล้วนั้น รูปแบบการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละการทดสอบนั้นมีความแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง โดยการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นแตกต่างกันนั้น อาจเป็นผลมาจากรูปแบบของแรงกระทำที่แตกต่างกันรวมถึงชนิดของวัสดุคัตเลือกที่แตกต่างกัน โดยจากการทดสอบนั้นพบว่า การเคลื่อนที่สูงสุดในแนวระนาบ และ แนวตั้ง

ในการทดสอบการให้แบบคงที่ของทั้งทราย ( $M_s$ ) และ หิน ( $M_g$ ) นั้นพบว่าการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ จะมีค่าไม่เกิน 2 มิลลิเมตร ทั้งทางซ้ายและทางขวา ( ค่าบวกเคลื่อนที่ไปทางซ้าย, ค่าลบ เคลื่อนที่ไปทางขวา) ส่วนการเคลื่อนที่ในแนวตั้งนั้นเมื่อทดสอบเสร็จสิ้นแล้วจะมีค่าไม่สูงไปกว่า 10 มิลลิเมตร ในทิศทางลง (ค่าบวก เคลื่อนที่ลง, ค่าลบ เคลื่อนที่ขึ้น)

การทดสอบแบบวัฏจักรนั้นพบว่า การเคลื่อนที่ในแนวระนาบของวัสดุทั้ง 2 ชนิดนั้นจะมีค่าเกินกว่า 2 มิลลิเมตร ทั้งทางซ้ายและทางขวา เมื่อมีวงรอบของแรงกระทำมากมากขึ้น และการเคลื่อนที่ในแนวระนาบจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ และการการเคลื่อนที่ในแนวตั้งนั้นจะแตกต่างกัน โดยผลการทดสอบของทราย (Cyc\_s\_5-15) นั้นพบว่า เมื่อมีวงรอบของแรงกระทำมากขึ้นจนถึงสิ้นสุดการทดสอบ การเคลื่อนที่ในแนวตั้งนั้นจะอยู่ในช่วง 10 ถึง 15 มิลลิเมตรเท่านั้น หากแต่การทดสอบของหิน (Cyc\_g\_5-15) นั้น เมื่อมีวงรอบของแรงกระทำมากขึ้นจนถึงสิ้นสุดการทดสอบ การเคลื่อนที่ในแนวตั้งนั้นจะมีค่ามากกว่า 15 มิลลิเมตร ในทิศทางลง และในการทดสอบแบบวัฏจักรนั้นยังสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อทำ

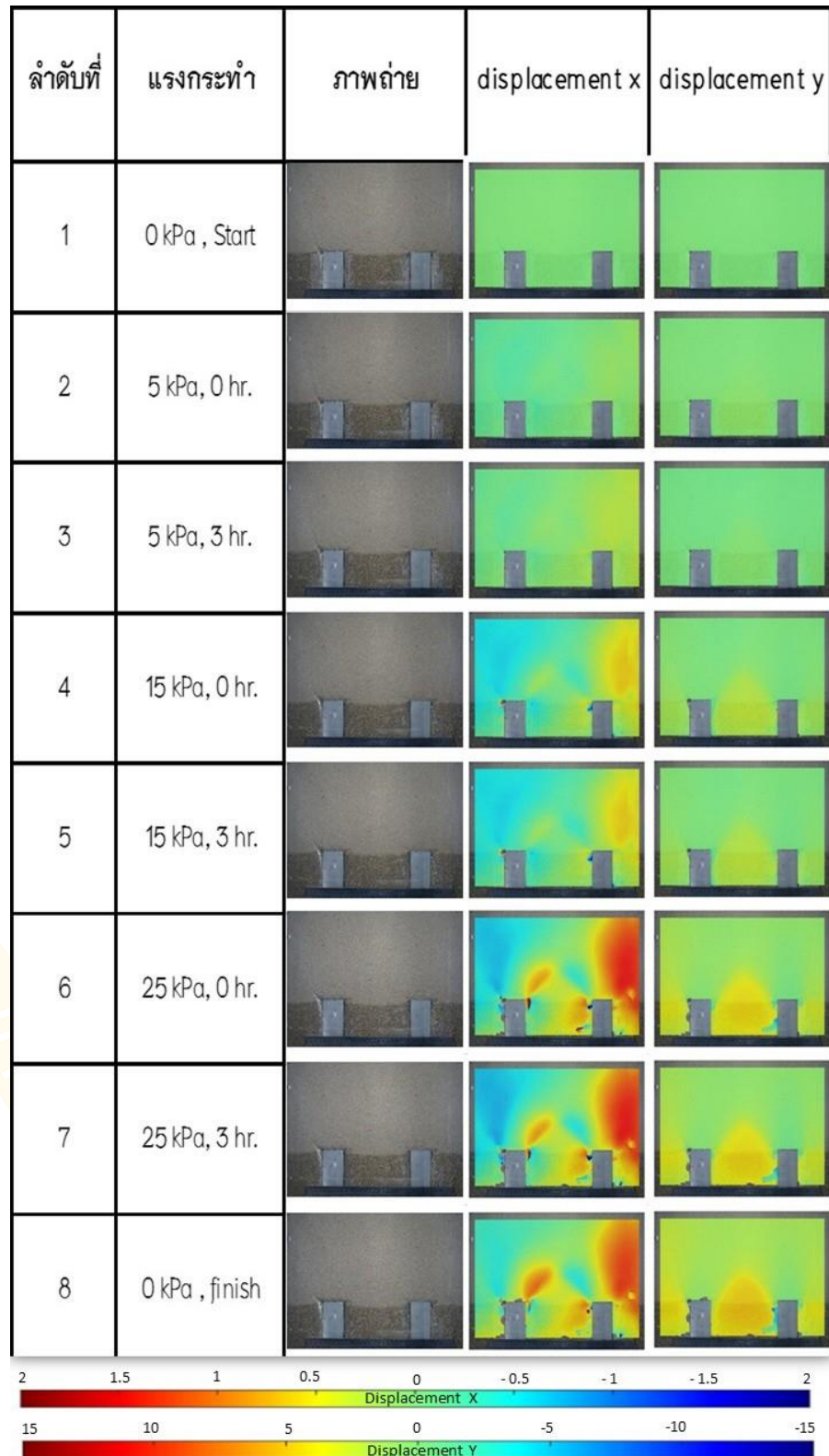
การทดสอบตัวอย่างครบ 500 วงรอบไปแล้ว จากนั้นให้แรงแก่ตัวอย่างเพิ่มขึ้นจาก 15 kPa ไป 25 kPa และทิ้งไว้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่า การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นของตัวอย่างนั้นไม่ได้มีความแตกต่างเพิ่มขึ้นมากนัก

### ผลการทดสอบการให้แรงแบบคงที่ วัสดุคัดเลือกตัดทางจำลอง ทราบาย ( $M_s$ )

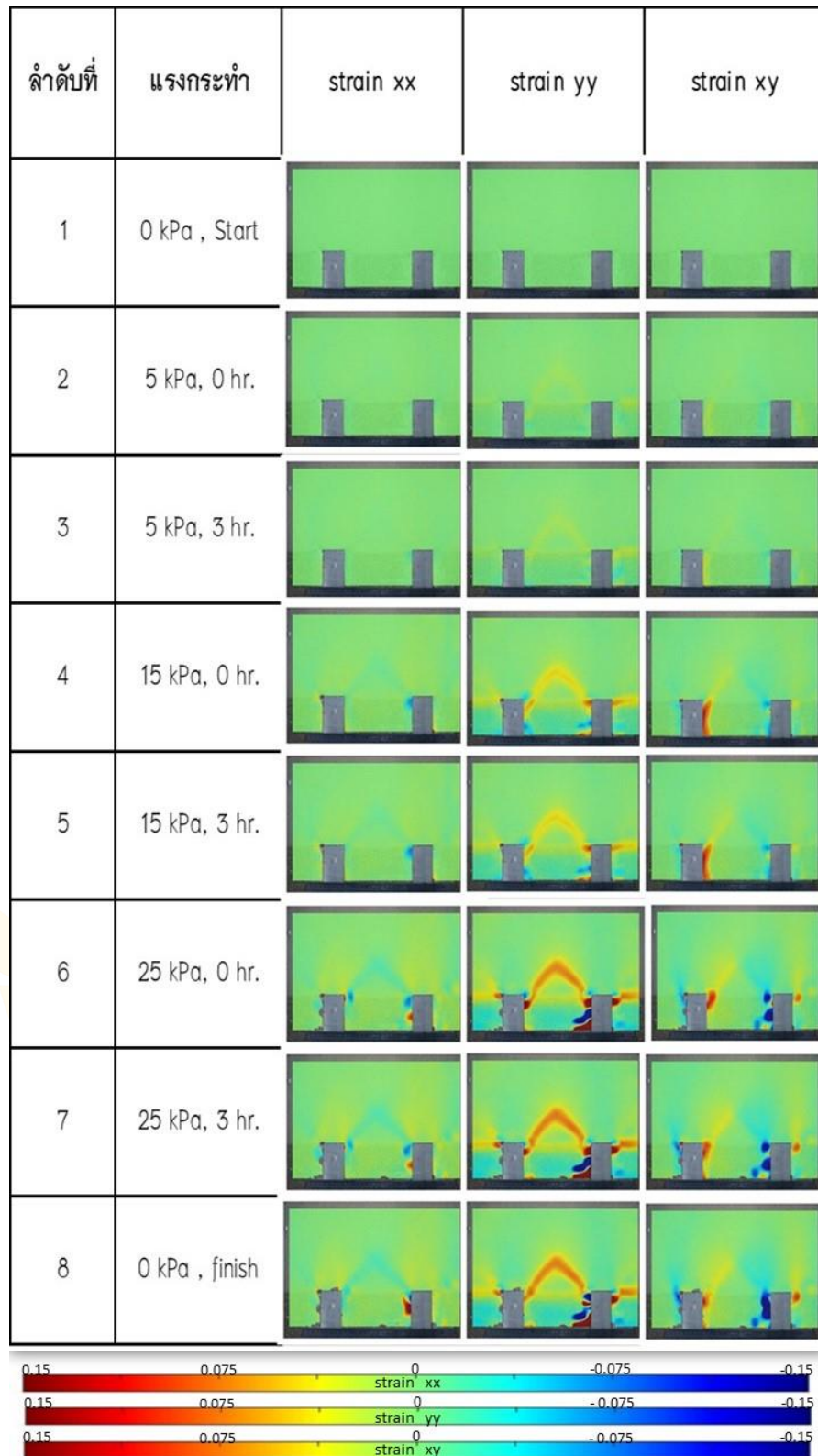
ในการทดสอบการให้แรงคงที่แก่วัสดุคั่นเลือกคั่นทางจำลองที่เป็นทราบายนั้น จากการสังเกตจะเห็นได้ว่า เมื่อเริ่มการทดสอบจะยังไม่มี การเพิ่มแรงให้แก่ตัวอย่างทดสอบ พบว่า การเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งและแนวราบนั้นจะมีค่าเท่ากับ 0 หรือจะเทียบเท่าวัตถุหยุดนิ่ง และเมื่อเริ่มให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างทดสอบไปถึง 5 kPa แล้วนั้น พบว่าพฤติกรรมการถ่ายแรงของตัวอย่างทดสอบเมื่อให้แรงเพิ่มจาก 0 kPa ไปจนถึง 5 kPa การเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้น จะมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในทิศทางลงเท่านั้น โดยมีค่าการเคลื่อนที่ตัวสูงสุดที่ 0.58 มิลลิเมตร และการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวา ซึ่งการเคลื่อนที่ ส่วนใหญ่นั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ตัวไปทางขวามากกว่า โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.43 มิลลิเมตร และเมื่อให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง พบว่าการเคลื่อนที่ในแนวตั้งจะเกิดขึ้นในทิศทางลงเท่านั้น โดยมีค่าการเคลื่อนที่ตัวสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 0.94 มิลลิเมตร ในส่วนของการเคลื่อนที่ในแนวราบจะมีการเคลื่อนที่ตัวเกิดขึ้นไปทั้งทางซ้ายและทางขวา ซึ่งการเคลื่อนที่ตัวของเม็ดทราบายส่วนใหญ่นั้นจะไปทางขวามากกว่า โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.67 มิลลิเมตร และเมื่อให้แรงกระทำจาก 5 kPa ไปจนถึง 15 kPa พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้นจะมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในทิศทางลง โดยมีค่าการเคลื่อนที่ตัวสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 0.94 มิลลิเมตรเป็น 2.99 มิลลิเมตร ละจะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อให้แรงกระทำจนถึง 15 kPa รูปแบบการถ่ายแรงจะเกิดที่เพิ่มขึ้นจะเห็นได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้นในส่วนของการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง โดยจะเห็นได้ว่าเกิดรูปแบบของเส้นโค้งเกิดขึ้นระหว่างเสาเข็มทั้ง 2 ต้น และในส่วนของการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้น จะมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวาเหมือนเดิม ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่นั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ตัวไปทางขวามากกว่า มีค่าการเคลื่อนที่ตัวสูงสุดเท่ากับ 0.88 มิลลิเมตร และหลังจากให้แรงกระทำที่ 15 kPa ทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้นจะมีทิศทางลงเท่านั้นเหมือนเดิม มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 3.49 มิลลิเมตร และการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้น จะมีการเคลื่อนที่ตัวทั้งทางซ้ายและทางขวา ซึ่งส่วนใหญ่นั้นจะเคลื่อนที่ตัวไปทางขวามากกว่า

มีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดเท่ากับ 0.93 มิลลิเมตร และหลังจากให้แรง 15 kPa ทิ้งไว้ครบ 3 ชั่วโมงจะเริ่มให้แรงจาก 15kPa ไปจนถึง 25 kPa ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้นจะมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในทิศทางลงเท่านั้น และมีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 6.43 มิลลิเมตร ในส่วนของการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นทั้งทางซ้ายและทางขวาเหมือนกับการทดสอบอื่น ๆ ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่จะเกิดการเคลื่อนตัวไปทางขวามากกว่า โดยมีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดเท่ากับ 1.64 มิลลิเมตร และหลังจากให้แรงกระทำ 25kPa ค้างไว้ 3 ชั่วโมง พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้นจะมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในทิศทางลงเท่านั้นเหมือนเดิม โดยมีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 8.98 มิลลิเมตร และการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวาเหมือนกัน ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่จะเกิดการเคลื่อนตัวไปทางขวามากกว่า มีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดเท่ากับ 1.79 มิลลิเมตร และหลังจากให้แรงที่ 25 kPa ทิ้งไว้ครบ 3 ชมแล้ว จะทำการลดแรงกระทำแก่ตัวอย่างจาก 25 kPa จนเหลือ 0 kPa. หรือจนกว่าจะไม่มีแรงมากระทำแก่ตัวอย่างแล้ว พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้นจะมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในทิศทางขึ้นบนเล็กน้อย มีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดลดลงจาก 8.98 มิลลิเมตรเหลือเป็น 8.91 มิลลิเมตร และการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวาอยู่เหมือนเดิมแต่การเคลื่อนที่นั้นก็ลดลงไปด้วยเหมือนกัน ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่จะเกิดการเคลื่อนตัวไปทางขวามากกว่า มีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดเท่ากับ 1.41 มิลลิเมตร โดยเมื่อสิ้นสุดการทดสอบแล้วในส่วนของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งจะสังยังเห็นรูปแบบของเส้นโค้งเกิดขึ้นระหว่างเสาเข็มทั้ง 2 ต้น ซึ่งเส้นโค้งที่เกิดขึ้นนี้จะอธิบายได้ว่าการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นนี้เกิดในลักษณะการเกิดแรงส่วนโค้งอย่างเต็มรูปแบบ (Full Arching) (ภาพ 38)

ในส่วนของการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่แบบไม่สะสมนั้นจะสามารถดูได้จากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของการทำสอบในแต่ละลำดับซึ่งจะทำให้เห็นลักษณะการเกิดเส้นโค้งได้ดียิ่งขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแนวระนาบจะอยู่ในรูปแบบของ strain xx การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแนวตั้งจะอยู่ในรูปของ strain yy และ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นรวมจะอยู่ในรูปแบบของ strain xy จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นพบว่า พฤติกรรมการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดการถ่ายแรงเป็นเส้นโค้ง ซึ่งสามารถเห็นได้ตั้งแต่เริ่มให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างทดสอบที่ 5 kPa , 0 hr. ไปจนถึงสิ้นสุดการทดสอบ โดยเส้นโค้งที่เกิดขึ้นนั้นจะเห็นได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้นเมื่อให้แรงเพิ่มขึ้น (ภาพ 39)



ภาพ 38 ผลการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงจากดินคั่นทางสู่เสาเข็มรองรับด้วยวิธี  
ความสัมพันธ์ทางภาพถ่าย แสดงการเคลื่อนที่สะสม การทดสอบ  $M_s$



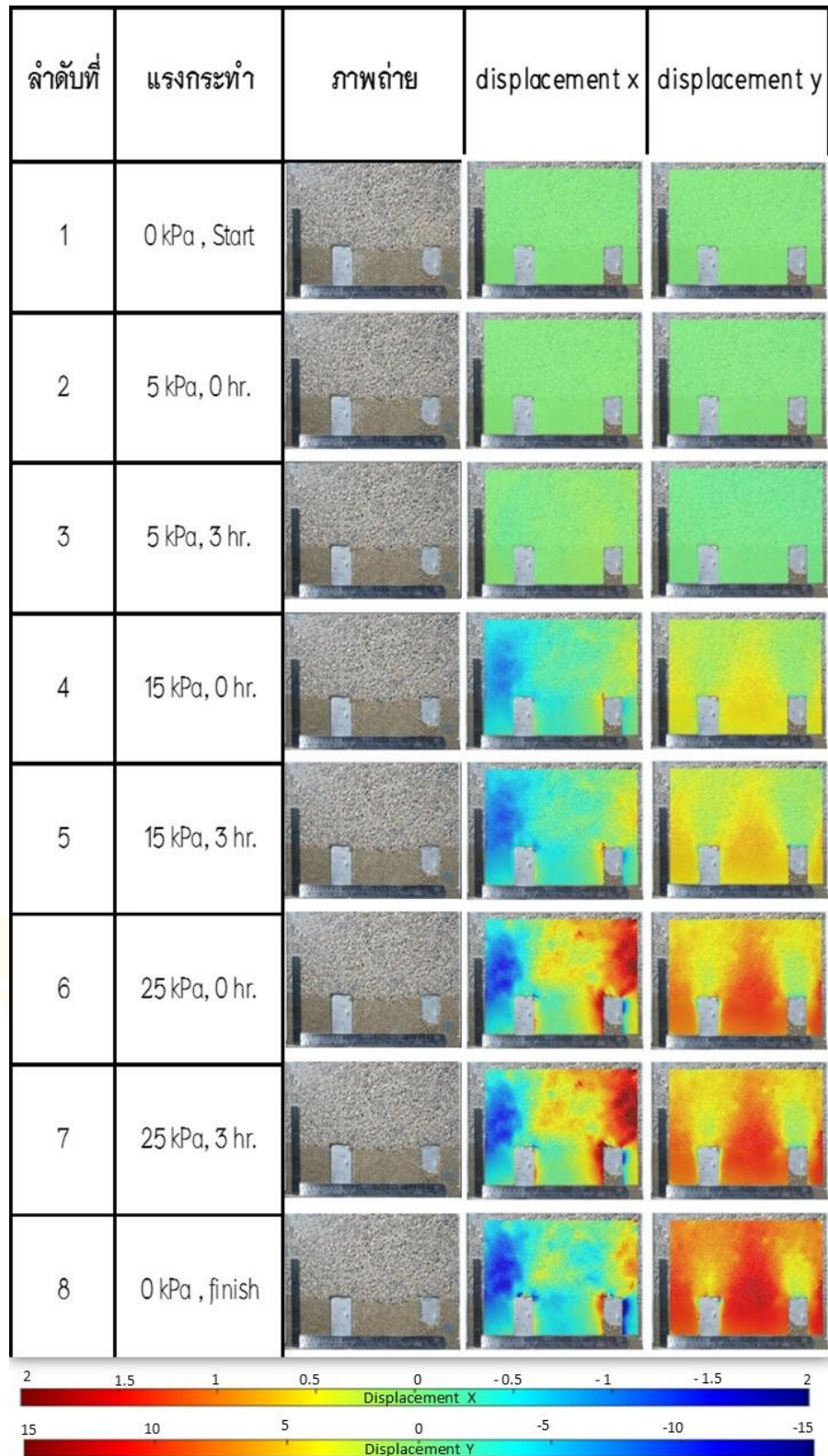
ภาพ 39 ผลการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงจากดินค้ำทางสู่เสาเข็มรองรับด้วยวิธีความสัมพันธ์ทางภาพถ่าย แสดงการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ การทดสอบ  $M_s$

### ผลการทดสอบการให้แรงแบบคงที่ วัสดุคัดเลือกตัดทางจำลอง หิน ( $M_g$ )

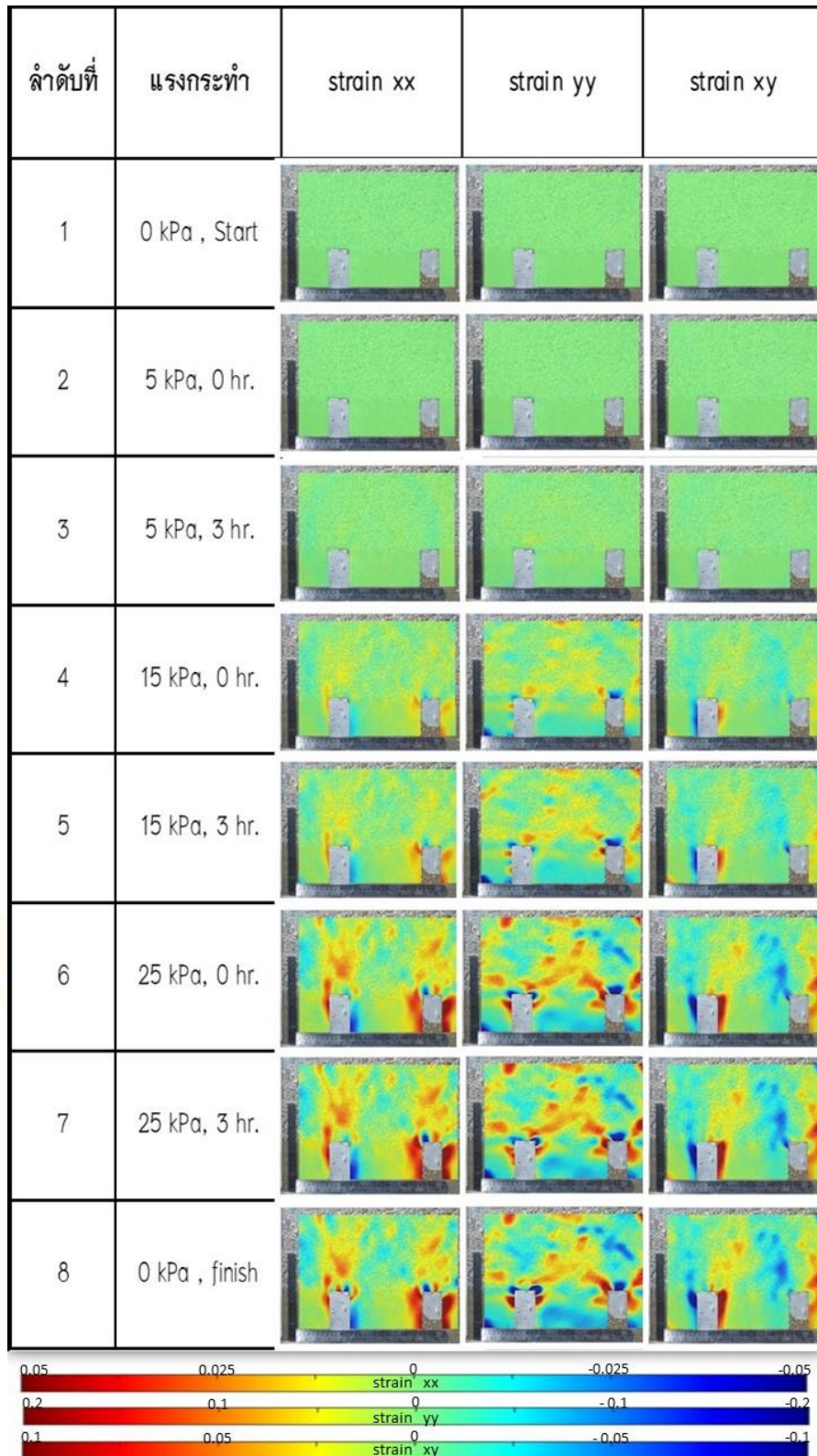
ในการทดสอบการให้แรงคงที่แก่วัสดุคัดเลือกตัดทางจำลองที่เป็นหินนั้น จากการสังเกตจะเห็นได้ว่า พฤติกรรมการถ่ายแรงของตัวอย่างทดสอบก่อนที่จะทำการให้แรงแก่ตัวอย่างนั้น พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งและแนวราบนั้นจะมีค่าเท่ากับ 0 หรือจะเทียบเท่าวัตถุหยุดนิ่ง เหมือนกับการทดสอบทราย และเมื่อเริ่มให้แรงจาก  $0\text{ kPa}$  ไปจนถึง  $5\text{ kPa}$  พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้นไม่มีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น หรือมีค่าเท่ากับ 0 มิลลิเมตรและการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นก็ไม่มีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นทั้งทางซ้ายและทางขวามีค่าเท่ากับ 0 มิลลิเมตร และเมื่อให้แรงกระทำ  $5\text{ kPa}$  ค้างไว้ 3 ชั่วโมง พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้นจะมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในทิศทางลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยมีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 0.14 มิลลิเมตร และการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวา ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่นั้นจะเกิดการเคลื่อนตัวไปทางซ้ายเป็นส่วนใหญ่ มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 0.11 มิลลิเมตร หลังจากทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง จะเริ่มให้แรงให้แรงแก่ตัวอย่างจาก  $5\text{ kPa}$  ไปจนถึง  $15\text{ kPa}$  พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้นจะมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในทิศทางลงเหมือนเดิม โดยการเคลื่อนที่สูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 0.14 เป็น 3.82 มิลลิเมตร และจะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อให้แรงกระทำจนถึง  $15\text{ kPa}$  รูปแบบการถ่ายแรงจะเกิดที่ที่เกิดขึ้นจะเห็นได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้นในส่วนของการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง โดยจะเห็นได้ว่าเกิดรูปแบบของเส้นโค้งยกสูงเกิดขึ้นระหว่างเสาเข็มทั้ง 2 ต้น บางส่วนหรือที่เรียกว่า Partial arching และในส่วนของการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวาเหมือนเดิม ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่นั้นจะเกิดการเคลื่อนตัวไปทางซ้ายมากกว่า มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 0.72 มิลลิเมตร และเมื่อให้แรงกระทำ  $15\text{ kPa}$  ค้างไว้ 3 ชั่วโมง พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้นจะมีทิศทางลง ซึ่งมีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 4.74 มิลลิเมตร และการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะมีการขยับตัวทั้งทางซ้ายและทางขวา ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่นั้นจะเกิดการเคลื่อนตัวไปทางขวา โดยมีการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 0.88 มิลลิเมตร และหลังจากนั้นจะเริ่มให้แรงจาก  $15\text{ kPa}$  ไปจนถึง  $25\text{ kPa}$  พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้นจะมีทิศทางลงเท่านั้น มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 7.82 มิลลิเมตร และการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวา ซึ่งส่วนใหญ่นั้นจะเกิดการเคลื่อนตัวไปทางขวามากกว่า มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 1.76 มิลลิเมตร และเมื่อให้แรงกระทำ  $25\text{ kPa}$  ค้างไว้ 3 ชั่วโมง พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้นจะมีการเคลื่อนที่

เป็นในทิศทางลง มีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 9.33 มิลลิเมตร จาก 7.82 มิลลิเมตร และการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวา ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่จะเกิดการเคลื่อนตัวไปทางขวามากกว่า มีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดเท่ากับ 1.93 มิลลิเมตร และสุดท้ายเมื่อให้แรงแก่ตัวอย่างทอด 25 kPa ที่ังไว้ครบ 3 ชั่วโมงแล้วจะทำการลดแรงกระทำจาก 25 kPa ลงไปเป็น 0 kPa หรือเทียบเท่าไม่มีแรงมากระทำ พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้นจะมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในทิศทางลงเพิ่มไปอีก โดยมีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดยังเพิ่มขึ้นเป็น 10.18 มิลลิเมตร และการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวาอยู่เหมือนเดิมแต่การเคลื่อนที่นั้นก็มิต่ำลงลงเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับการทดสอบใช้หินแทนคันทางจำลอง ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่จะเกิดการเคลื่อนตัวไปทางซ้าย มีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดเท่ากับ 1.12 มิลลิเมตร โดยเมื่อสิ้นสุดการทดสอบแล้วในการเคลื่อนที่ในแนวตั้งจะสังยังเห็นรูปแบบของเส้นโค้งเกิดขึ้นระหว่างเสาเข็มทั้ง 2 ต้น ซึ่งเส้นโค้งที่เกิดขึ้นนี้จะอธิบายได้ว่าการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นนี้เกิดในลักษณะการเกิดแรงส่วนโค้งบางส่วน (Partial arching) (ภาพ 40)

ในส่วนของการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่แบบไม่สะสมนั้นจะสามารถดูได้จากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของการทำสอบในแต่ละลำดับซึ่งจะทำให้เห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างการทดสอบได้เป็นอย่างดียิ่งขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแนวระนาบจะอยู่ในรูปแบบของ strain xx การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแนวตั้งจะอยู่ในรูปของ strain yy และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นรวมจะอยู่ในรูปแบบของ strain xy จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นพบว่า พฤติกรรมถ่ายแรงที่เกิดขึ้นนั้นจะเห็นได้ชัดเจนเมื่อให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างทดสอบไปจนถึง 15 kPa ซึ่งรูปแบบการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นนี้จากการสังเกต เป็นรูปแบบการถ่ายแรงที่กระจายแบบลุ่ม ไม่สามารถระบุรูปแบบที่แน่นอนได้ (ภาพ 41)



ภาพ 40 ผลการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงจากดินคั่นทางสู่เสาเข็มรองรับด้วยวิธี  
ความสัมพันธ์ทางภาพถ่าย แสดงการเคลื่อนที่สะสม การทดสอบ  $M_g$



ภาพ 41 ผลการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงจากดินคั่นทางสู่เสาเข็มรองรับด้วยวิธีความสัมพันธ์ทางภาพถ่าย แสดงการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ การทดสอบ  $M_g$

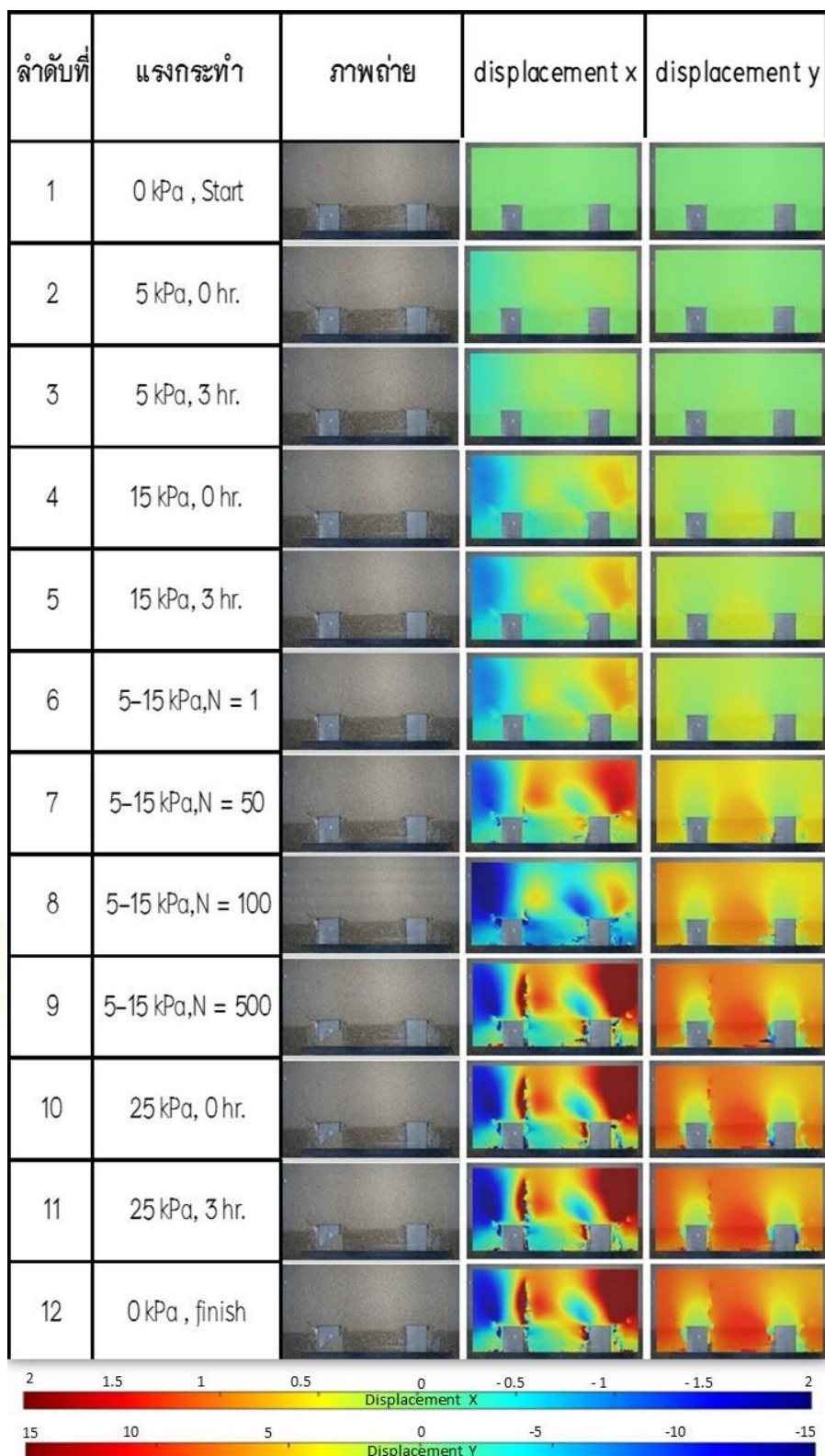
### ผลการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักร วัสดุคัดเลือกคัตทางจำลอง ทราบาย (Cyc\_s\_5-15)

ในการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักรแก่วัสดุคัดเลือกคัตทางจำลองที่เป็นทราบายนั้น จะให้แรงแก่ตัวอย่างทดสอบแบบคงที่ก่อนจาก 0 kPa ไปจนถึง 15 kPa จากนั้นจะทำให้ให้แรงแบบวัฏจักร 5-15 kPa โดยในการทดสอบนี้จะให้แรงวัฏจักรแก่ตัวอย่างจำนวน 500 รอบ หลังจากนั้นจะทำการให้แรงแบบคงที่เพิ่มจาก 15 kPa ไปเป็น 25 kPa โดยก่อนที่จะทำการให้แรงแก่ตัวอย่าง พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งและแนวราบนั้นจะมีค่าเท่ากับ 0 หรือจะเทียบเท่าวัตถุหยุดนิ่ง และเมื่อเริ่มให้แรงจาก 0kPa ไปจนถึง 5 kPa พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้นจะมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในทิศทางลง มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 0.69 มิลลิเมตร และการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวา ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่นั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ตัวไปทางขวามากกว่า มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 0.47 มิลลิเมตร หลังจากนั้นจะทำการแรงกระทำ 5kPa ค้างไว้ 3 ชั่วโมง พบว่าเมื่อครบ 3 ชั่วโมงแล้วการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในทิศทางลง มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 0.85 มิลลิเมตร และการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวา ซึ่งการเคลื่อนที่ตัวส่วนใหญ่นั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ตัวไปทางขวามากกว่า มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 0.61 มิลลิเมตร และเมื่อครบ 3 ชั่วโมง จะเริ่มให้แรงจาก 5 kPa ไปจนถึง 15 kPa พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้นจะมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในทิศทางลง ซึ่งมีค่าการเคลื่อนที่ตัวสะสมเป็น 3.43 มิลลิเมตร และจะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อให้แรงกระทำจนถึง 15 kPa รูปแบบการถ่ายแรงจะเกิดที่ที่เกิดขึ้นจะเห็นได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้นในส่วนของการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง โดยจะเห็นได้ว่าเกิดรูปแบบของเส้นโค้งเกิดขึ้นระหว่างเสาเข็มทั้ง 2 ต้นเป็นการเกิดแรงส่วนโค้งอย่างเต็มรูปแบบ (Full Arching) และในส่วนของการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวาเหมือนเดิม ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่นั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ตัวไปทางขวามากกว่า มีค่าการเคลื่อนที่ตัวสูงสุดเท่ากับ 0.95 มิลลิเมตร และเมื่อให้แรงกระทำ 15kPa ค้างไว้ 3 ชั่วโมง การเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งจะเกิดขึ้นในทิศทางลงเหมือนเดิม และมีค่าการเคลื่อนที่ สูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 3.49 มิลลิเมตร และในส่วนของการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวาเหมือนตัวอย่างอื่น ๆ ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่นั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ตัวไปทางขวามากกว่า มีค่าการเคลื่อนที่ตัวสูงสุดเท่ากับ 1.03 มิลลิเมตร และเมื่อให้แรงแก่ตัวอย่างทิ้งไว้ครบ 3 ชั่วโมงแล้ว จะเริ่มให้แรงแบบ

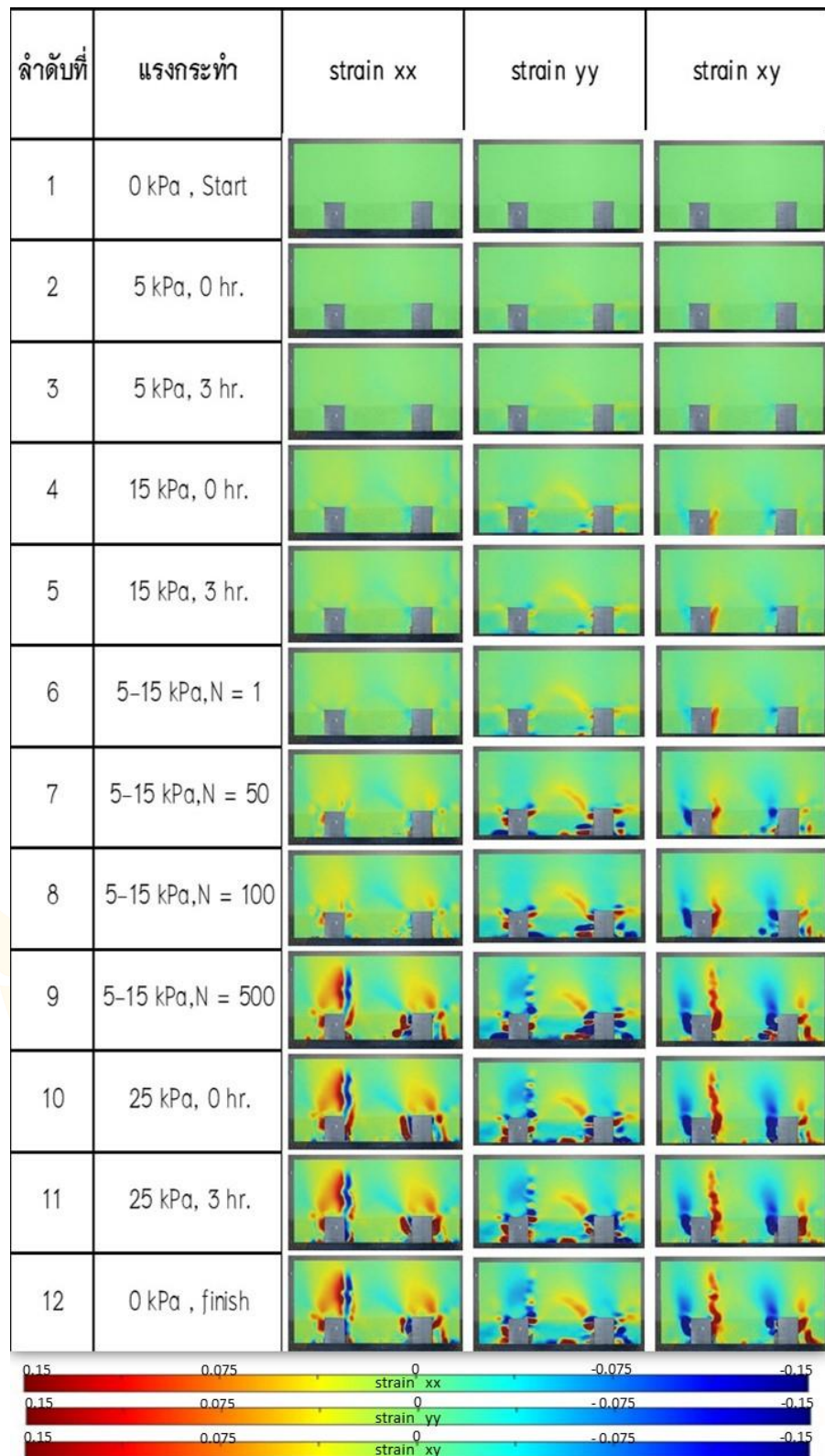
วัฏจักร โดยเมื่อจำนวนรอบวัฏจักรเท่ากับ 1 รอบนั้นการเคลื่อนที่สะสมในแนวราบและแนวตั้ง นั้นมีค่าเท่ากับ การให้แรงกระทำ 15 kPa, 3 hr. คือ 1.03 มิลลิเมตร และ 3.49 มิลลิเมตร ตามลำดับ หรือจะเรียกได้ว่าในวัฏจักรแรกนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเมื่อเทียบกับการให้แรงก่อนหน้า และหลังจากจำนวนรอบวัฏจักรเท่ากับ 50 รอบ พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้นจะมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในทิศทางลงเท่านั้น โดยค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 5.16 มิลลิเมตร และการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวา ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่นั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ไปทางขวามากกว่า มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 1.49 มิลลิเมตร หลังจากจำนวนรอบวัฏจักรเท่ากับ 100 รอบ พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้นจะมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในทิศทางลงเหมือนเดิม และมีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 6.67 มิลลิเมตร ในส่วนของการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวา ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่นั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ไปทางซ้ายมากกว่า มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 2.16 มิลลิเมตร และเมื่อจำนวนรอบวัฏจักรเท่ากับ 500 รอบ การเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้นก็ยังเกิดขึ้นในทิศทางลง มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 8.82 มิลลิเมตร และการเคลื่อนที่ในแนวราบมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวาทั้ง 2 ทิศทาง ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่นั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ไปทางขวามากกว่า มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 2.64 มิลลิเมตร หลังจากให้แรงแบบวัฏจักร ครบ 500 รอบแล้วนั้น จะเริ่มให้แรงแบบคงที่อีกครั้งจาก 15 kPa ไปเป็น 25 kPa โดยพบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้ง มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 10.15 มิลลิเมตร และการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวา ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่นั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ไปทางขวามากกว่า มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 2.94 มิลลิเมตร และหลังจากให้แรงกระทำ แก่ตัวอย่าง 25kPa ทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้ง มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 10.94 มิลลิเมตร และการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวา ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่นั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ไปทางขวามากกว่า มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 3.09 มิลลิเมตร และหลังจากครบ 3 ชั่วโมง จะทำการลดแรงกระทำลงจาก 25 kPa เหลือ 0 kPa. พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้นจะมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในทิศทางขึ้น โดยมีการเคลื่อนที่สะสมลดลงเหลือ 10.71 มิลลิเมตร และการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นเกิดขึ้นทั้งทางซ้ายและทางขวาอยู่เหมือนเดิมแต่การเคลื่อนที่นั้นก็มียาลดลงไปด้วยเหมือนกัน ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่นั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ไปทางขวา

มากกว่า มีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดเท่ากับ 3.01 มิลลิเมตร โดยเมื่อสิ้นสุดการทดสอบแล้ว จะยังเห็นรูปแบบของเส้นโค้งเกิดขึ้นระหว่างเสาเข็มทั้ง 2 ต้น สังเกตได้จากการเคลื่อนตัวแนวตั้ง ซึ่งเส้นโค้งที่เกิดขึ้นนี้จะอธิบายได้ว่าการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นนี้เกิดในลักษณะการเกิดแรงส่วนโค้งอย่างเต็มรูปแบบ (Full Arching) (ภาพ 42)

ในส่วนของการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่แบบไม่สะสมนั้นจะสามารถดูได้จากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของการทำสอบในแต่ละลำดับซึ่งจะทำให้เห็นลักษณะการเกิดเส้นโค้งได้ดียิ่งขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแนวระนาบจะอยู่ในรูปแบบของ strain xx การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแนวตั้งจะอยู่ในรูปของ strain yy และ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นรวมจะอยู่ในรูปแบบของ strain xy จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นพบว่า พฤติกรรมการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดการถ่ายแรงเป็นเส้นโค้ง ซึ่งสามารถเห็นได้ตั้งแต่เริ่มให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างทดสอบที่ 5 kPa , 0 hr. ว่ามีรูปแบบของการพยายามจะเกิดการถ่ายแรงเป็นเส้นโค้งทั้ง strain xx , strain yy และ strain xy จนถึงแรงกระทำที่ 5-15 kPa , N = 50 ลำดับที่ 7 พบว่ารูปแบบการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นใน strain xx และ strain yy ยังมีการเกิดรูปแบบการถ่ายแรงแบบเส้นโค้งอยู่ แต่ใน strain xy นั้นรูปแบบการถ่ายแรงจะเกิดเป็นการถ่ายแรงเฉพาะส่วน หรือ Shear Plane Arching โดยรูปแบบที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดขึ้นจนจบการทดสอบ (ภาพ 43)



ภาพ 42 ผลการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงจากดินคั่นทางสู่เสาเข็มรองรับด้วยวิธี  
ความสัมพันธ์ทางภาพถ่าย แสดงการเคลื่อนที่สะสม การทดสอบ Cyc\_s\_5-15



ภาพ 43 ผลการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงจากดินคั่นทางสู่เสาเข็มรองรับด้วยวิธีความสัมพันธ์ทางภาพถ่ายแสดงการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่การทดสอบ Cyc\_s\_5-15

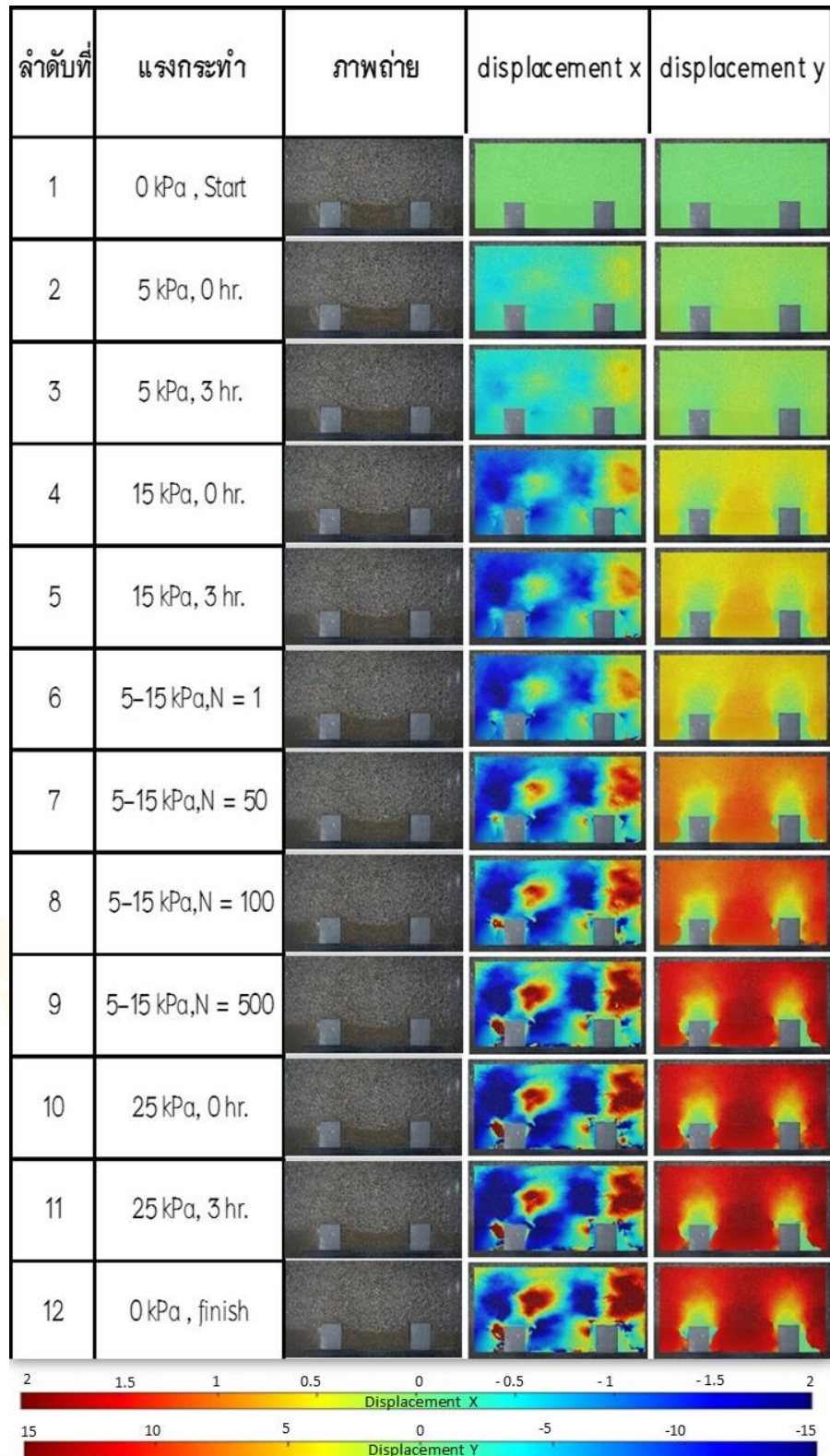
### ผลการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักร วัสดุคัดเลือกค้ำทางจำลอง หิน (Cyc\_s\_5-15)

ในการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักรแก่วัสดุคัดเลือกค้ำทางจำลองที่เป็นหินนั้น จะให้แรงแก่ตัวอย่างทดสอบแบบคงที่ก่อนจาก 0 kPa ไปจนถึง 15 kPa จากนั้นจะทำให้ให้แรงแบบวัฏจักร 5-15 kPa โดยในการทดสอบนี้จะให้แรงวัฏจักรแก่ตัวอย่างจำนวน 500 รอบ หลังจากนั้นจะทำการให้แรงแบบคงที่เพิ่มจาก 15 kPa ไปเป็น 25 kPa เหมือนกับการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักรของทราย โดยพฤติกรรมการถ่ายแรงของตัวอย่างทดสอบก่อนที่จะทำการให้แรงแก่ตัวอย่างนั้น พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งและแนวราบนั้นจะมีค่าเท่ากับ 0 หรือจะเทียบเท่าวัตถุหยุดนิ่ง และหลังจากให้แรงจาก 0kPa ไปจนถึง 5 kPa พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้นจะมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในทิศทางลงเท่านั้น มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 1.39 มิลลิเมตร และการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวา ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่จะเกิดการเคลื่อนตัวไปทางซ้ายมากกว่า มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 0.46 มิลลิเมตร และเมื่อให้แรงกระทำ 5kPa ค้างไว้ครบ 3 ชั่วโมง พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้นจะมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในทิศทางลงโดยมีการเคลื่อนที่สูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 1.76 มิลลิเมตร และการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวา ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่จะเกิดการเคลื่อนตัวไปทางซ้ายมากกว่า มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 0.68 มิลลิเมตร และเมื่อครบ 3 ชั่วโมง จะเพิ่มแรงจาก 5 kPa ไป 15 kPa พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้นจะมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในทิศทางลงเท่านั้น มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 4.78 มิลลิเมตร และจะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อให้แรงกระทำจนถึง 15 kPa รูปแบบการถ่ายแรงจะเกิดที่ที่เกิดขึ้นจะเห็นได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้นในส่วนของการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง โดยจะเห็นได้ว่าเกิดรูปแบบของเส้นโค้งเกิดขึ้นระหว่างเสาเข็มทั้ง 2 ต้นเป็นการเกิดแรงส่วนโค้งบางส่วน (Partial arching) และในส่วนของการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวาเหมือนเดิม ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่จะเกิดการเคลื่อนตัวไปทางซ้ายมากกว่า มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 1.68 มิลลิเมตร และหลังจากให้แรงกระทำ 15kPa ค้างไว้ 3 ชั่วโมง พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้นจะมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในทิศทางลงเหมือนเดิม ซึ่งมีการเคลื่อนที่สูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 5.95 มิลลิเมตร และการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวา ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่จะเกิดการเคลื่อนตัวไปทางซ้ายมากกว่า มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 3.02 มิลลิเมตร และหลังจากให้แรงแบบคงที่ที่ 15 kPa ทิ้งไว้ครบ 3 ชั่วโมงแล้วจะเริ่มให้แรงแบบวัฏจักร โดยเมื่อจำนวนรอบวัฏจักรเท่ากับ 1 รอบ พบว่า

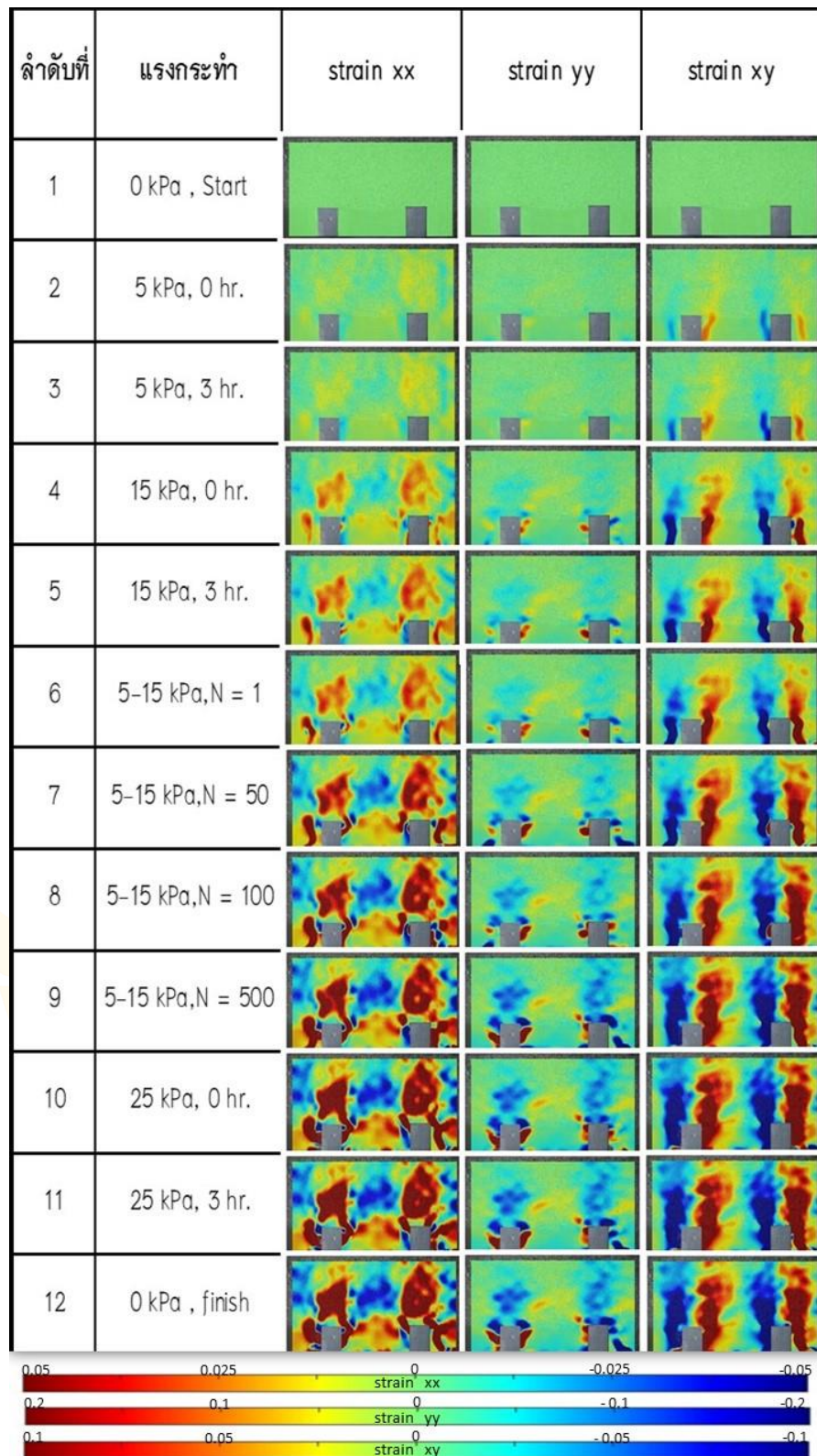
การเคลื่อนที่สะสมในแนวราบและแนวตั้งนั้น มีค่าเท่ากับการทดสอบการให้แรง 15 ค้างไว้ 3 ชั่วโมง โดยค่าที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าในรอบวัฏจักรที่แรกนั้นการไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเมื่อเทียบกับการให้แรงก่อนหน้า และเมื่อจำนวนรอบวัฏจักรเท่ากับ 50 รอบ พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้นจะมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในทิศทางลง มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 9.43 มิลลิเมตร และการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวา ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่นั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ตัวไปทางซ้ายมากกว่า มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 3.70 มิลลิเมตร และเมื่อจำนวนรอบวัฏจักรเท่ากับ 100 รอบ พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้นมีการเคลื่อนที่สูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 13.39 มิลลิเมตร ในทิศทางลง และการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวา ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่นั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ตัวไปทางซ้ายมากกว่า มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 4.40 มิลลิเมตร และเมื่อจำนวนรอบวัฏจักรเท่ากับ 500 รอบ การเคลื่อนที่ในแนวตั้งนั้นมีการเคลื่อนที่สูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 16.08 มิลลิเมตร และการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ตัวไปทางซ้ายมากกว่าทางขวา โดยมีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 9.72 มิลลิเมตร หลังจากทำการทดสอบแบบวัฏจักรครบ 500 รอบแล้ว จะทำการให้แรงแบบคงที่อีกครั้งจาก 15 kPa ไปจนถึง 25 kPa พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งมีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 16.54 มิลลิเมตร และการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวา ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่นั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ตัวไปทางซ้ายมากกว่า มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 10.47 มิลลิเมตร และเมื่อให้แรงกระทำ 25 kPa ค้างไว้ 3 ชั่วโมง พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้นจะมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในทิศทางลงเท่านั้น ซึ่งมีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 17.40 มิลลิเมตร และการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวา ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่นั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ตัวไปทางขวามากกว่า มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 11.21 มิลลิเมตร และสุดท้าย เมื่อให้แรง 25 kPa ค้างไว้ 3 ชั่วโมงเสร็จแล้ว จะทำการลดแรงกระทำจาก 25 kPa เหลือ 0 kPa. พบว่าการเคลื่อนที่สะสมในแนวตั้งนั้นมีการเคลื่อนที่สูงสุดลดลงเป็น 17.22 มิลลิเมตร และการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นจะมีการเคลื่อนที่ทั้งทางซ้ายและทางขวาอยู่เหมือนเดิมแต่การเคลื่อนที่นั้นก็มีการลดลงไปด้วยเหมือนกัน ซึ่งการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่นั้นจะเกิดการเคลื่อนที่ตัวไปทางขวามากกว่า โดยมีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 10.11 มิลลิเมตร โดยเมื่อสิ้นสุดการทดสอบแล้วจะสังเกตรูปแบบของเส้นโค้งที่เกิดขึ้น ในการเคลื่อนที่แนวตั้ง ระหว่างเสาเข็มทั้ง 2 ต้น ซึ่งเส้นโค้งที่เกิดขึ้นนี้

จะอธิบายได้ว่าการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นนี้เกิดในลักษณะการเกิดแรงส่วนโค้งบางส่วน (Partial arching) (ภาพ 44)

ในส่วนของการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่แบบไม่ระคนนั้นจะสามารถดูได้จาก การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของการทำสอบในแต่ละลำดับซึ่งจะทำให้เห็นลักษณะ การเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างการทดสอบได้เป็นอย่างดียิ่งขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ในแนวระนาบจะอยู่ในรูปแบบของ strain xx การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแนวตั้งจะอยู่ในรูปของ strain yy และ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นรวมจะอยู่ในรูปแบบของ strain xy จากการสังเกต การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นพบว่า พฤติกรรมการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นนั้นจะเห็นได้ชัดเจนเมื่อให้ แรงกระทำแก่ตัวอย่างทดสอบที่ 5 kPa เป็นต้นไป ซึ่งรูปแบบการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นนี้จากการสังเกต พบว่าใน strain yy มีการเกิดรูปแบบการถ่ายแรงแบบเส้นโค้ง แต่ใน strain xy นั้น รูปแบบการถ่ายแรงจะเกิดเป็นการถ่ายแรงเฉพาะส่วน หรือ Shear Plane Arching โดยรูปแบบ ที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มให้แรงจนจบการทดสอบ และใน strain xx ไม่สามารถระบุ รูปแบบได้ (ภาพ 45)



ภาพ 44 ผลการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงจากดินค้ำทางสู่เสาเข็มรองรับด้วยวิธี  
ความสัมพันธ์ทางภาพถ่ายแสดงการเคลื่อนที่สะสมการทดสอบ Cyc\_g\_5-15



ภาพ 45 ผลการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงจากดินคั่นทางสู่เสาเข็มรองรับด้วยวิธี  
ความสัมพันธ์ทางภาพถ่ายแสดงการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่การทดสอบ Cyc\_g\_5-15

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาและขอเสนอแนะ

การศึกษาการถ่ายแรงจากดินคันทงสู่เสาเข็มรองรับในดินอ่อน ด้วยวิธีความสัมพันธ์ทางภาพถ่ายในครั้งนี้ใช้แบบจำลองทางกายภาพแบบย่อส่วนในการทดสอบ และใช้โปรแกรมเสริมของ MATLAB ที่ชื่อว่า NCorr ในการวิเคราะห์ผลของภาพถ่าย

การใช้ความสัมพันธ์ทางภาพถ่ายมาช่วยศึกษาพฤติกรรมของตัวอย่างในการทดสอบนั้น ทำให้เราสามารถเห็นถึงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงการถ่ายโอนแรงในแต่ละระดับการให้แรงได้อย่างชัดเจน โดยสังเกตได้จากแถบสีที่เกิดขึ้น

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม NCorr ทำให้เห็นถึงลักษณะพฤติกรรม การเคลื่อนที่และถ่ายแรงของวัสดุที่นำมาทำเป็นคันทงจำลอง โดยจากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า การเคลื่อนที่ในแนวระนาบนั้นเกิดการเคลื่อนที่ไปทั้งทางซ้ายและทางขวาทุกการทดลอง แต่การเคลื่อนที่ในแนวตั้งนั้นจะเกิดขึ้นเฉพาะทิศทางลงเท่านั้น เป็นผลมาจากการให้แรงดันพื้นผิวแก่ตัวอย่างทดสอบที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบการให้แรงแบบคงที่ของทรายกับหิน และการทดสอบการให้แรงแบบวัฏจักรของทรายกับหิน จะเห็นได้คันทงจำลองที่เป็นทรายนั้นจะมีการเคลื่อนที่ในทิศทางลงในแนวตั้งน้อยกว่าคันทงจำลองที่เป็นหิน

จากการทดสอบในครั้งนี้ จะเห็นได้ว่ารูปแบบการให้แรงแบบวัฏจักรนั้นจะส่งผลให้ตัวอย่างทดสอบได้รับแรงที่มากกว่าการให้แรงแบบคงที่อย่างเห็นได้ชัดเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ ทั้งนี้วัสดุที่ต่างชนิดกันยังส่งผลให้การถ่ายแรงที่เกิดขึ้นแตกต่างกันไปอีกด้วย จากผลการศึกษา จะเห็นได้ว่ารูปแบบการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นนั้นในช่วยของก่อนการให้แรง ตัวอย่างการทดสอบทุกการทดสอบจะมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0 และจะเริ่มเห็นพฤติกรรม การถ่ายแรงที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจนเมื่อให้แรงแก่ตัวอย่างถึง 15 kPa เป็นต้นไป

ในการทดสอบการใช้ทรายแทนคันทงจำลองจะเห็นรูปแบบการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นเป็นรูปแบบที่ชัดเจนกว่าการใช้หินแทนคันทงจำลอง โดยรูปการณ์ถ่ายแรงที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทรายนั้นพบว่าเป็นการถ่ายแรงแบบแรงส่วนโค้งอย่างเต็มรูปแบบ (Full Arching)

ทั้งการทดสอบ การให้แรงแบบคงที่ และการให้แรงแบบวัฏจักร ในส่วนของรูปแบบการถ่ายแรงของหินนั้นจะเกิดเป็นการถ่ายแรงแบบส่วนโค้งบางส่วน (Partial arching)

การศึกษาครั้งนี้เป็นการประยุกต์ใช้วิธีการของงานวิจัยต่างประเทศที่เคยมีการทดลองมาแล้วมาปรับใช้ให้มีรูปแบบตามที่ต้องการ โดยจะใช้ทรายผสมกับโฟมเพื่อจำลองเป็นดินเหนียวอ่อน และ ปรับเปลี่ยนรูปแบบการให้แรงแก่ตัวอย่างทดสอบเพื่อให้มีความใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากที่สุด ในส่วนของการวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยภาพถ่ายนั้น เป็นวิธีการที่เริ่มจะเป็นที่นิยมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายต่อการสังเกตผลและเปรียบเทียบของการทดสอบ และยังเป็นวิธีที่มีความแม่นยำค่อนข้างสูง

และการทดสอบในห้องปฏิบัติการนั้น ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกับ การทดสอบจริงได้ แต่สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการจัดทำเป็นแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อทำการศึกษาต่อไป



## บรรณานุกรม

- Abdel-Salam, A. E. (2018). Stabilization of peat soil using locally admixture. **HBRC journal**, 14(3), 294–299.
- Blanc, M., Rault, G., Thorel, L. and Almeida, M. (2013). Centrifuge investigation of load transfer mechanisms in a granular mattress above a rigid inclusions network. **Geotextiles and Geomembranes**, 36, 92–105.
- Chantararat, R. and Kunthong, P. (2013). Mixed Numerical–Experimental Technique for Identification of Elastic Material Parameters Using Digital Image Correlation: Simulation Approach. **Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering**, 7(1), 65–78.
- Chen, Y., Deng, A., Wang, A. and Sun, H. (2018). Performance of screw–shaft pile in sand: Model test and DEM simulation. **Computers and Geotechnics**, 104, 118–130.
- Chevalier, B., Villard, P. and Combe, G. (2011). Investigation of load–transfer mechanisms in geotechnical earth structures with thin fill platforms reinforced by rigid inclusions. **International Journal of Geomechanics**, 11(3), 239–250.
- Dang, L. C., Dang, C. C., Khabbaz, H. and Fatahi, B. (2016). **Numerical assessment of fibre inclusion in a load transfer platform for pile–supported embankments over soft soil Geo–China 2016** (pp. 148–155).
- Ellis, E. และ Aslam, R. (2009). Arching in piled embankments: comparison of centrifuge tests and predictive methods–part 2 of 2. **Ground Engineering**.
- Filz, G., Sloan, J., McGuire, M. P., Collin, J. and Smith, M. (2012). **Column–supported embankments: settlement and load transfer Geotechnical engineering state of the art and practice: keynote lectures from GeoCongress 2012** (pp. 54–77).
- Gao, Y.–B. and Zhang, Z. (2020). Vertical compression of soft clay within PVD–improved zone under vacuum loading: Theoretical and practical study. **Geotextiles and Geomembranes**, 48(3), 306–314.

- Gao, Z., Li, F., Liu, Y., Cheng, T., Su, Y., Fang, Z. et al. (2020). Tunnel contour detection during construction based on digital image correlation. **Optics and Lasers in Engineering**, 126, 105879.
- Heitz, C., Lükling, J. and Kempfert, H.-G. (2008). Geosynthetic reinforced and pile supported embankments under static and cyclic loading. **Strain**, 1, 1–5.
- Helm, J. and Suleiman, M. (2012). Measuring soil–structure interaction on laterally loaded piles with digital image correlation. **Procedia IUTAM**, 4, 66–72.
- Hewlett, W. and Randolph, M. (1988). Analysis of piled embankments. **Paper presented at the International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**
- Houda, M., Jenck, O. and Emeriault, F. (2016). Physical evidence of the effect of vertical cyclic loading on soil improvement by rigid piles: a small–scale laboratory experiment using Digital Image Correlation. **Acta Geotechnica**, 11(2), 325–346.
- Houda, M., Jenck, O. and Emeriault, F. (2019). Rigid pile improvement under vertical cyclic loading: 1 g laboratory small–scale modelling. **International Journal of Physical Modelling in Geotechnics**, 19(2), 89–103.
- Jenck, O., Dias, D. and 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.
- Jenck, O., Dias, D. and Kastner, R. (2009). Discrete element modelling of a granular platform supported by piles in soft soil–Validation on a small scale model test and comparison to a numerical analysis in a continuum. **Computers and Geotechnics**, 36(6), 917–927.
- Jenck, O., Dias, D. and Kastner, R. (2009). Three–dimensional numerical modeling of a piled embankment. **International Journal of Geomechanics**, 9(3), 102–112.
- Lai, H.-J., Zheng, J.-J., Zhang, R.-J. and Cui, M.-J. (2018). Classification and characteristics of soil arching structures in pile–supported embankments. **Computers and Geotechnics**, 98, 153–171.

- Lajevardi, S., Dias, D. and Briançon, L. (2015). Experimental studies of the behaviour of geosynthetic wrap around anchorage. **Geosynthetics International**, 22(3), 249–256.
- Lam, L. G., Bergado, D. T. and Hino, T. (2015). PVD improvement of soft Bangkok clay with and without vacuum preloading using analytical and numerical analyses. **Geotextiles and Geomembranes**, 43(6), 547–557.
- Manzari, L., Mao, H., Göransson, P., Cuenca, J. and Arteaga, I. L. (2020). A method for the observation of the anelastic behaviour of anisotropic porous materials using digital image correlation. **Journal of Sound and Vibration**, 474, 115244.
- Mojdehi, A. R., Tavakol, B., Royston, W., Dillard, D. A. and Holmes, D. P. (2016). Buckling of elastic beams embedded in granular media. **Extreme Mechanics Letters**, 9, 237–244.
- Okyay, U., Dias, D., Thorel, L. and Rault, G. (2014). Centrifuge modeling of a pile-supported granular earth-platform. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 140(2), 04013015.
- Rios, S., Cristelo, N., Viana da Fonseca, A. and Ferreira, C. (2016). Structural performance of alkali-activated soil ash versus soil cement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 28(2), 04015125.
- Sutton, M. A., Orteu, J. J. and Schreier, H. (2009). **Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications** : Springer Science & Business Media.
- Terzaghi, K. (1936). Stress distribution in dry and in saturated sand above a yielding trap-door.
- Thorel, L., Dupla, J. C., Rault, G., Canou, J., Baudouin, G., Dinh, A. Q. et al., (2010). Pile-supported earth platforms: two approaches with physical models. **Paper presented at the 7th Int. Conf. on Physical Modelling in Geotechnics Zurich, June 28th July 1st 2010**
- Van Eekelen, S., Bezuijen, A. and Alexiew, D. (2008). Piled embankments in the Netherlands, a full-scale test, comparing 2 years of measurements with design

calculations. **Paper presented at the Proceedings of the 4th European Geosynthetics Conference (EuroGeo4)**

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

Zhuang, Y. and Wang, K. (2016). Finite–element analysis on the effect of subsoil in reinforced piled embankments and comparison with theoretical method predictions. **International Journal of Geomechanics**, 16(5), 04016011.





## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	ชัยสิทธิ์ เพ็งจันทร์
วัน เดือน ปี เกิด	9 กุมภาพันธ์ 2538
สถานที่เกิด	จ.นครศรีธรรมราช
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา
ที่อยู่ปัจจุบัน	4 หมู่ 5 ตำบล แม่ต๋ำ อ.พญาเม็งราย จ.เชียงราย 57290
ผลงานตีพิมพ์	ชัยสิทธิ์ เพ็งจันทร์, นิพันธ์ อินสุข, อภิวิชญ์ ทองรักษา, กรกฏ นุสิทธิ์, & สุริยา วุฒประอ้าย. (2020). การศึกษาการถ่ายแรงจากดินคันทันทางสู่เสาเข็มรองรับในดินอ่อนด้วยวิธีความสัมพันธ์ทางภาพถ่าย. การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธา แห่งชาติ ครั้งที่ 25, 25, GTE45-GTE45.

