

การศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯเนื่องจากวงจรการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดินในงานเสาเข็มพลังงาน THE EFFECT OF THERMAL CYCLIC INDUCED CONSOLIDATION IN BANGKOK SOFT CLAY FROM THE USAGE OF ENERGY PILE

ธิตี ชาญญาณนท์^{1,*}, อภินิติ โชติสังกา¹ และ ก่อโชค จันทวรารังกูร¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*Corresponding author address: thiti.chan@ku.th

บทคัดย่อ

นวัตกรรมเสาเข็มพลังงานเพื่ออาคารประหยัดพลังงานเป็นการประยุกต์เสาเข็มเพื่อระบายความร้อนที่เกิดจากระบบปรับอากาศ ไปยังมวลดินรอบเสาเข็ม ในระหว่างการใช้งานเสาเข็มพลังงานสามารถส่งผลให้อุณหภูมิของดินรอบเสาเข็มเปลี่ยนแปลงไป โดยเกิดการเพิ่มและลดของอุณหภูมิแบบวัฏจักร เพื่อประเมินอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในชั้นดินเหนียวอ่อนรอบเสาเข็มพลังงาน ในการศึกษานี้ได้ทดสอบที่อาร์ที (Thermal response test) เพื่อประเมินสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของดิน และศึกษาผลกระทบจากวัฏจักรการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อการทรุดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯคงสภาพในระยะยาว ด้วยอุปกรณ์โออีโอดีมิเตอร์ (Oedometer) ณ ค่าอัตราส่วนอัดเกินตัว (OCR) = 1.3 ที่ความเค้นแนวดิ่งประสิทธิผล 65 kPa อุปกรณ์ดัดแปลงให้มีระบบควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำ ที่อุณหภูมิ 30 - 40 องศาเซลเซียส ทำการทดลองทั้งหมดจำนวน 100 รอบ วัฏจักรอุณหภูมิ จากการทดลอง Thermal Response Test ในแปลงทดลองเสาเข็มพลังงานขนาดเท่าจริง สามชนิด ได้แก่ เสาเข็มคอนกรีต Spun Pile (เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ความลึกเสาเข็ม 9 เมตร ใช้ระยะท่อHDPEยาว 18 เมตร), เสาเข็มเหล็ก Micro Pile (เส้นผ่านศูนย์กลาง 14 - 16.5 เซนติเมตร ความลึกเสาเข็ม 16 เมตร ใช้ระยะท่อHDPEยาว 32 เมตร) และ เสาเข็มเหล็ก Screw Pile (เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ความลึกเสาเข็ม 13.5 เมตร ใช้ระยะท่อHDPEยาว 27 เมตร) ผลการศึกษาใช้ในการประเมินผลกระทบจากการถ่ายเทความร้อนจากเสาเข็มพลังงานต่อการทรุดตัวของดินเหนียวรอบเสาเข็มได้

คำสำคัญ: เสาเข็มพลังงาน, การถ่ายเทความร้อนในดิน, อาคารประหยัดพลังงาน, การทรุดตัวของดินเหนียวกรุงเทพฯ, ความล้มเนื่องจากอุณหภูมิ

Abstract

The innovation of energy pile for using in green building was introduced to implement the piles as the heat exchanger to dissipate the heat from the air conditioning system to the soil mass and water around the pile. This technique has been used in the Bangkok area where the thick soft clay was present. Due to the cyclic heating and cooling of piles and surrounding soils, effect of thermal cycle on secondary consolidation in Soft Bangkok Clay was investigated in this study using the modified oedometer equipped with a controlled temperature water circulation system with 30-degree Celsius cooling loop and 40-degree Celsius heating loop for 100 loops. Tests were performed on an undisturbed Bangkok clay at a vertical stress of 65 kPa with OCR = 1.3. In addition, a series of thermal response tests on full-scale experimental piles were performed, namely, 30 cm diameter concrete spun pile at the depth of 9 meters using 18 m long HDPE loop, 14 and 16.5 cm diameter Micro Steel pile at the depth of 16 meters using 32 m long HDPE loop and the last, 15 cm diameter Screw pile at the depth of 13.5 meter. The effective thermal conductivity for each energy pile type was then present.

Keywords: Energy Pile, Heat transfer in soil, Heat Dissipation in Soil, Green Building, Consolidation in Bangkok Soft Clay, Thermal cyclic induced creep

1. บทนำ

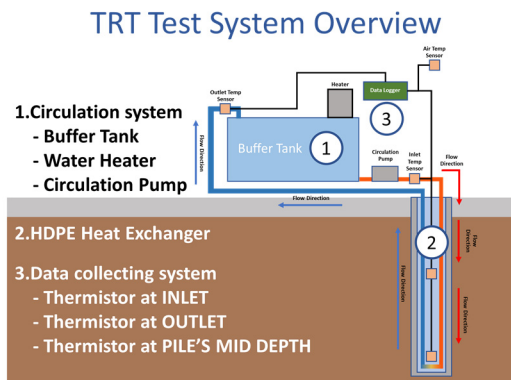
เสาเข็มพลังงานหรือการใช้เสาเข็มช่วยถ่ายเทความร้อนจากระบบปรับอากาศเป็นนวัตกรรมหนึ่งซึ่งสามารถช่วยแก้ปัญหาปรากฏการณ์เกาะความร้อน (Heat island phenomenon) ที่เกิดขึ้นในเมืองที่มีความหนาแน่นอย่างกรุงเทพฯและช่วยการประหยัดพลังงานในอาคาร ตามหลักการอาคารเขียว (Green

building) แต่การใช้งานเทคโนโลยีเสาเข็มพลังงานในประเทศไทยในปัจจุบันยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนักเนื่องจากสภาพภูมิอากาศที่มีอุณหภูมิค่อนข้างสูงทั้งปีเมื่อเทียบกับประเทศในเขตอบอุ่นหรือเขตหนาว ที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละช่วงเวลาของปีที่แตกต่างกันมาก อีกทั้งในพื้นที่กรุงเทพฯเอง ที่เป็นพื้นที่ลุ่มมีชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีปัญหาสำคัญคือการทรุดตัวที่มากและรุนแรง ด้วยปัญหาดังกล่าวในการศึกษานี้จึงครอบคลุมทั้งด้านประสิทธิภาพการ

ถ่ายเทความร้อนและด้านผลกระทบจากการใช้งานเสาเข็มพลังงาน โดยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ การทดลอง Thermal Response Test เพื่อหาค่าการนำความร้อนของตัวอย่างดิน เพื่อศึกษาการระบายความร้อนของดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองในสนาม ได้แก่ อุณหภูมิภายในและรอบเสาเข็ม นำมาตั้งค่าตัวแปรของการทดลองการทรุดตัวของดินรอบเสาเข็มแบบเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เพื่อประเมินผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้งานเสาเข็มพลังงาน

2. วิธีดำเนินงาน

2.1. การทดลอง THERMAL RESPONSE TEST



ภาพที่ 1 การทดลอง Thermal Response Test

ในการทดลองเป็นการระบายความร้อนจาก Heater (1) ผ่านการหมุนเวียนน้ำในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งติดตั้งในรูกลวงตรงกลางเสาเข็มสปีนคอนกรีตและเสาเข็มเกลียวเหล็ก (2) พร้อมติดตั้งอุปกรณ์เก็บข้อมูลอุณหภูมิ (3) ที่ขาเข้า-ขาออกของระบบหมุนเวียนน้ำ, อุณหภูมิกลางเสาเข็มและอุณหภูมิของอากาศ ระบบหมุนเวียนน้ำ (1) ประกอบด้วยเครื่องให้ความร้อนและปั๊มน้ำและใช้น้ำเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อนแทนคอนกรีต ข้อมูลอุณหภูมิ และอัตราการไหลของน้ำในท่อจะใช้ในการคำนวณหาค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity)

เนื่องด้วยการทดสอบ TRT ในการศึกษาใช้น้ำบรรจุในช่องว่างกลางเสาเข็มก่อนจะบรรจุท่อพลาสติก น้ำส่วนนี้จึงเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนจากท่อพลาสติกสู่เสาเข็มและดิน ค่าพลังงานความร้อนที่วัดได้จากการทดลองนี้ จะถูกแบ่งไปกักเก็บในตัวกลางหรือได้รับการถ่ายเทไปยังดินรอบเสาเข็มมากน้อยเพียงใดจะส่งผลถึงการวิเคราะห์ จึงได้ตั้งสมมุติฐานดังสมการที่ 1 ว่าพลังงานความร้อนที่ใช้ทั้งหมด (Q_1 , Watt) เกิดจากผลรวมของพลังงานที่น้ำในใจกลางเสาเข็มดูดซับไว้ (Q_2 , Watt) และพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทไปยังดินรอบเสาเข็ม (Q_3 , Watt) ตามสมการ

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 \quad (1)$$

พลังงานความร้อนทั้งหมด (Q_1) ได้จากสมการที่ 2

$$Q_1 = \dot{m}c\Delta T \quad (2)$$

เมื่อ \dot{m} มวลน้ำไหลผ่านท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (kg/s)

c ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg°C)

ΔT ส่วนต่างของอุณหภูมิขาเข้าและออก (C)

พลังงานที่น้ำในใจกลางเสาเข็มดูดซับไว้ (Q_2) ได้จากสมการที่ 3

$$Q_2 = m_c c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

เมื่อ m_c มวลน้ำตัวกลางในเสาเข็ม (kg)

c ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg°C)

$\frac{\partial T}{\partial t}$ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำกึ่งกลางเสาเข็มตามเวลา (Celsius/s)

ค่าการนำความร้อนของตัวอย่างดิน (Thermal-conductivity) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4 [1]

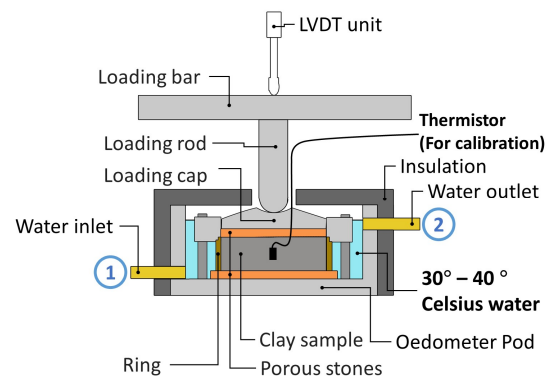
$$\lambda = \frac{Q_3}{4\pi\alpha L} \quad (4)$$

เมื่อ Q_3 พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่ดิน

α ความชันกราฟอุณหภูมิและล็อกของเวลาที่เป็นเส้นตรง

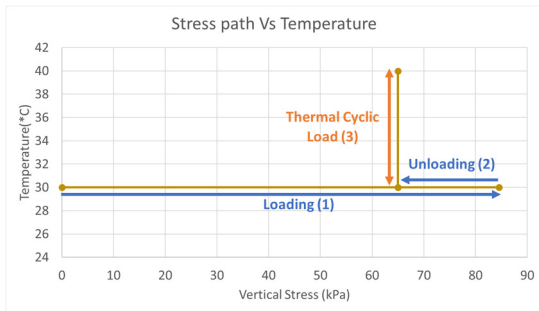
L ความยาวของเสาเข็มส่วนที่มีท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

2.2. การทดลองการทรุดตัวของดินแบบเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ



ภาพที่ 2 อุปกรณ์ทดลองการทรุดตัวแบบเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

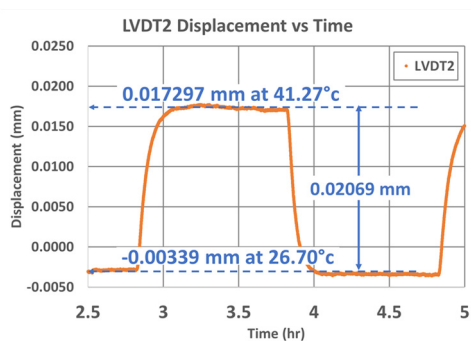
การศึกษาพฤติกรรมทรุดตัวของดินเหนียวกรุงเทพฯที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหลังสิ้นสุดการทรุดตัวหลักไปแล้ว ทดลองโดยอุปกรณ์ Oedometer ที่ปรับปรุงโดยให้ควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำร้อน โดยเพิ่มทางน้ำเข้า (1) และออก (2) ที่แสดงในภาพที่ 2 และสามารถทดสอบดินตามสภาวะทางเดินของหน่วยแรงในภาพที่ 3



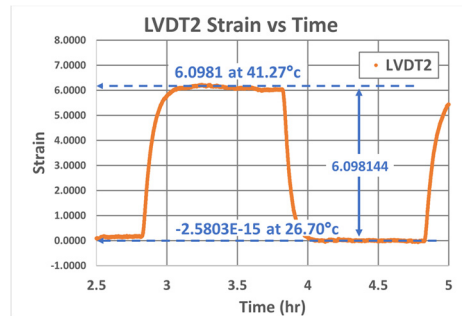
ภาพที่ 3 แผนภาพเส้นทางความเค้นและอุณหภูมิ

ในการศึกษานี้ได้จำลองความเค้น (Stress) ของตัวอย่างดินที่ 65 kPa และมีค่า OCR = 1.3 และให้ความร้อนแก่ตัวอย่างดินที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วกลับมาสู่อุณหภูมิห้องที่ 30 องศาเซลเซียส อีกเป็นเวลา 12 ชั่วโมง พร้อมบันทึกค่าระยะการทรุดตัวและอุณหภูมิตัวอย่างดิน โดยทดลองวงจรการเปลี่ยนอุณหภูมิจำนวน 100 วงจร

ในการทดลองจะมีตัวอย่างควบคุม (ไม่เปลี่ยนอุณหภูมิ) และตัวอย่างที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบวงจร เพื่อแยกอิทธิพลจากวงจรอุณหภูมิจากการคืบของดิน และมีการปรับแก้ผลการขยายและหดตัวของโลหะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ต่อค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินที่อ่านได้ ด้วยค่าคงที่ซึ่งได้จากการสอบเทียบ พบ การขยายตัวของอุปกรณ์ Oedometer เท่ากับ $\frac{0.017297 - 0.00339}{41.27 - 26.70} = 0.00142$ มิลลิเมตรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส ที่แสดงในภาพที่ 4 หรือ มีค่าเป็นความเครียดที่เกิดขึ้นเมื่อต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{6.0981 - 0.0000}{41.27 - 26.70} = 0.41854$ ที่แสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 4 แผนภาพแสดงระยะการหดและขยายตัวของอุปกรณ์ Oedometer(Displacement)



ภาพที่ 5 แผนภาพแสดงระยะการหดและขยายตัวของอุปกรณ์ Oedometer(Strain)

ความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นภายในตัวอย่างดินทั้งหมด (ϵ_t) สามารถอธิบายได้ตามสมการที่ 5 คือ

$$\epsilon_t = \epsilon_{tc} + \epsilon_c \quad (5)$$

เมื่อ ϵ_{tc} ความเครียดจากการเปลี่ยนอุณหภูมิ

ϵ_c ความเครียดจากการทรุดตัวทุติยภูมิ

การทำนายค่าความเครียดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยใช้ความสัมพันธ์ของกฎกำลัง (Power law) โดยใช้สมการที่ 6

$$\epsilon_{thermal\ induced} = \alpha N^\beta \quad (6)$$

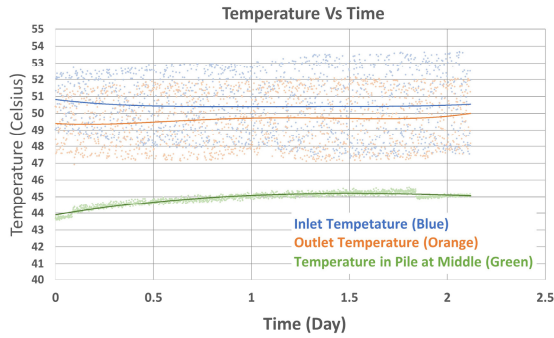
เมื่อ N คือจำนวนรอบของวงจรอุณหภูมิ

จากสมการเห็นได้ว่า ความเค้นและจำนวนรอบมีความสัมพันธ์ตามกฎกำลัง (Power law) การแสดงผลจำนวนรอบและค่าความเครียดในรูปแบบของแผนภาพที่อยู่ในมาตราส่วนของ log นั้น ค่าความชันของเส้นกราฟเองจะแสดงอยู่ในรูปสมการกำลัง ที่แสดงค่าคงที่ α ที่แสดงถึงความเครียดที่เกิดขึ้นเมื่อ $N=1$ และค่าคงที่ β ที่แสดงถึงความเร็วในการเปลี่ยนแปลงของค่าสมการ

3. ผลการศึกษา

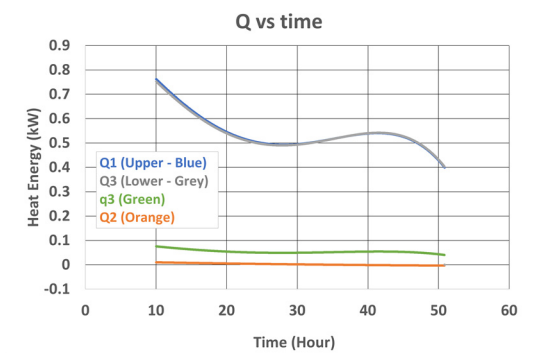
3.1. การทดลอง THERMAL RESPONSE TEST

ผลการตรวจวัดพบว่าอุณหภูมิทั่วไปใต้ดินในสถานะเริ่มต้นมีค่าอยู่ที่ 29-30 องศาเซลเซียส ผลทดลองในเสาเข็มคอนกรีต Spun Pile ที่แสดงใน ภาพที่ 6 อุณหภูมิของน้ำขาเข้า Inlet - สิ้นน้ำเงิน (ได้รับความร้อนจากเครื่องทำความร้อน) มีค่า 48-53 องศาเซลเซียส เฉลี่ยที่ 50.5 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิของ Outlet - สิ้นส้ม มีค่า 47-52 องศาเซลเซียส เฉลี่ยที่ 49.5 องศาเซลเซียส ค่าอุณหภูมิต่างกันประมาณ 1 องศาเซลเซียส เนื่องจากการถ่ายเทสู่เสาเข็มและดินโดยรอบ อุณหภูมิของใจกลางเสาเข็มสปันคอนกรีต - สิ้นเขียว มีค่า 44-45 องศาเซลเซียส



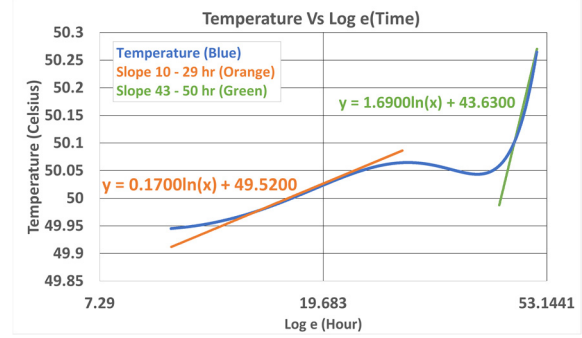
ภาพที่ 6 แผนภาพแสดงอุณหภูมิและเวลาในเสาเข็มสับคอนกรีต

ในภาพที่ 7 จะแสดงให้เห็นว่าในด้านพลังงานความร้อนทั้งหมด (Q1) ที่ใส่ไปยังเสาเข็มจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาผ่านไป โดยเริ่มจากราว 0.75 kW และลดลงไปยัง 0.40 kW พลังงานที่น้ำในใจกลางเสาเข็มดูดซับไว้ (Q2) มีแนวโน้มคงที่และมีค่าเข้าใกล้ 0 จึงส่งผลให้พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทไปยังดิน (Q3) มีค่าไปในทิศทางและปริมาณที่ใกล้เคียงกับ Q1



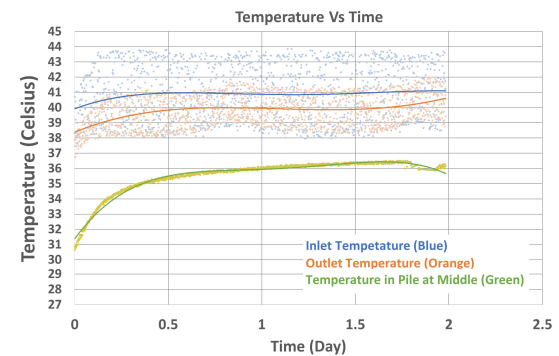
ภาพที่ 7 แผนภาพพลังงานความร้อนและเวลาในเสาเข็มคอนกรีต

เมื่อนำข้อมูลมาแสดงในรูปแบบของอุณหภูมิและเวลาในมาตราส่วน log ธรรมชาติ (ภาพที่ 8) พบว่าค่าความชันแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ความชัน 0.17 และ 1.69 เมื่อคำนวณพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน มีค่าเท่ากับ 26.75 และ 2.33 W/m °C ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าในช่วงนี้สอง เป็นค่าที่สมเหตุสมผลกว่า เนื่องจากเป็นค่าในสภาวะเสมือนคงที่ (Quasi-steady state) และน้ำในกึ่งกลางเสาเข็มไม่ดูดซับความร้อนไว้ (Q2=0)



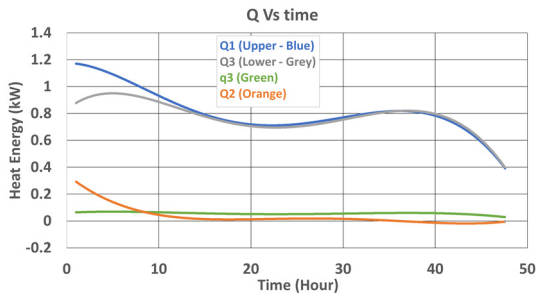
ภาพที่ 8 แผนภาพอุณหภูมิและเวลาในมาตราส่วน log ธรรมชาติของเสาเข็มสับคอนกรีต

ผลทดลองในเสาเข็มเหล็ก Screw Pile ที่แสดงใน ภาพที่ 9 พบว่า อุณหภูมิของ Inlet - สีส้มเงิน มีค่า 40-41 องศาเซลเซียส เฉลี่ยที่ 40.86 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิของ Outlet - สีส้ม มีค่า 38-40 องศาเซลเซียส เฉลี่ยที่ 39.8 องศาเซลเซียส ค่าอุณหภูมิต่างกันประมาณ 1.8 องศาเซลเซียส อุณหภูมิใจกลางเสาเข็มเกลียวเหล็ก - สีเขียว มีค่า 31-36 องศาเซลเซียส



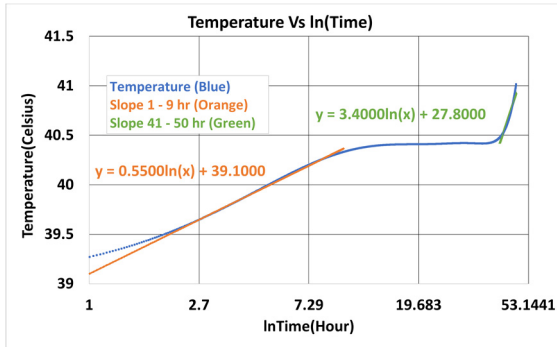
ภาพที่ 9 แผนภาพแสดงอุณหภูมิและเวลาในเสาเข็มเกลียวเหล็ก

ในภาพที่ 9 จะแสดงให้เห็นว่าในด้านพลังงานความร้อนทั้งหมด (Q1) ที่ใส่ไปยังเสาเข็มเกลียวเหล็กพบว่าแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาผ่านไป โดยเริ่มจาก 1.2 kW และลดลงไปยัง 0.40 kW เมื่อเวลาผ่านไป พลังงานความร้อนที่น้ำในใจกลางเสาเข็มดูดซับไว้ เริ่มต้นที่ 0.3 kW และมีแนวโน้มลดลงจนเข้าใกล้ 0 เมื่อหักลบกับ Q1 ทำให้พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทไปยังดิน (Q3) มีค่าเริ่มต้นที่ประมาณ 0.9 kW และปรับลดลงไปในทิศทางและปริมาณที่ใกล้เคียงกับ Q1 ในตอนปลาย



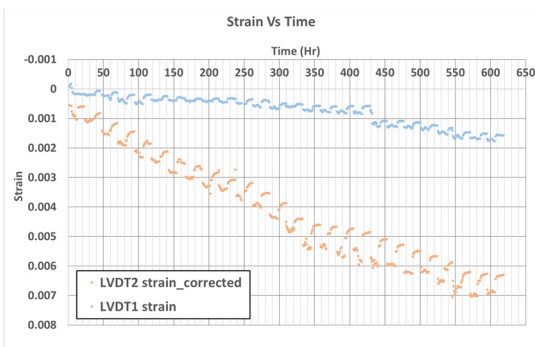
ภาพที่ 10 แผนภาพพลังงานและเวลาในเสาเข็มเกลียวเหล็ก

เมื่อนำข้อมูลมาแสดงในรูปแบบของอุณหภูมิและเวลาในมาตราส่วน logธรรมชาติ(ภาพที่ 11) พบว่า ค่าความชันแบ่งได้ เป็น 2 ส่วน คือความชัน 0.55 และ 3.4 เมื่อคำนวณพบว่าค่าการนำความร้อน มีค่าเท่ากับ 9.83 และ 1.08 W/m °C ตามลำดับ โดยค่าในช่วงทดสอบที่สองมีความน่าเชื่อถือมากกว่า

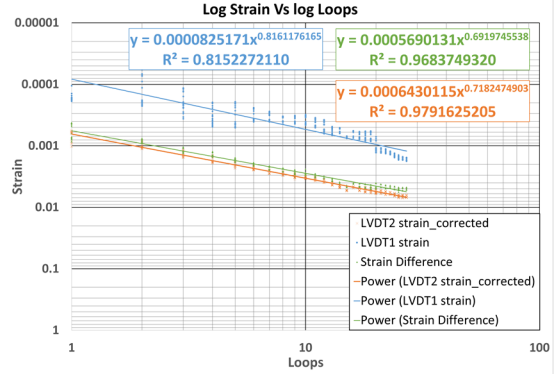


ภาพที่ 11 แผนภาพอุณหภูมิและเวลาในมาตราส่วน logธรรมชาติของเสาเข็มเกลียวเหล็ก

3.2. การทดลองการทรุดตัวของดินแบบควบคุมอุณหภูมิ



ภาพที่ 12 แผนภาพระหว่างค่าความเครียดและเวลา



ภาพที่ 13 แผนภาพค่าความเครียดและจำนวนวงจรถอดลงมาตราส่วน log

ในภาพที่ 12 ได้แสดงค่าความเครียดสูงสุดที่เวลาต่าง ๆ จากผลการทดลองรอบการเปลี่ยนอุณหภูมิจำนวน 27 วงจร พบว่า ค่าความเครียดของตัวอย่างควบคุม (ภาพที่ 12 สีฟ้า) มีค่าเท่ากับ 0.001572 และค่าความเครียดของตัวอย่างที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ภาพที่ 12 สีส้ม) มีค่าเท่ากับ 0.006300

ในภาพที่ 13 คือการแสดงค่าความเครียดสะสมของตัวอย่างดินที่จำนวนวงจรถอดลงต่าง ๆ ในมาตราล็อก-ล็อก ประกอบกับสมการที่ 5 ที่ใช้เพื่อคำนวณความเครียดสะสมที่เกิดจากความร้อน โดยผลลัพธ์จะมีค่าเป็น ค่าความเครียดของดินที่ได้รับผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ที่แสดงภาพที่ 13 (สีเขียว) สมการของเส้นแนวโน้มของค่า log strain และ log จำนวนวงจร จะอยู่ในรูปของ Power law จึงสามารถหาค่าคงที่ α และ β ดังที่แสดงในตารางที่ 1 นี้ เพื่อใช้สำหรับทำนายค่าความเครียดเมื่อมีจำนวนวงจรถอดลงเพิ่มมากขึ้น ค่าคงที่

ตารางที่ 1 ค่าตัวแปรผลตามกฎของกำลัง

	Description	α	β	R^2
1	Stress induced Strain (LVDT1)	0.000083	0.816118	0.8152
2	Stress and Thermal induced Strain (LVDT2)	0.000643	0.718247	0.9792
2 - 1	Thermal induced Strain	0.000569	0.691975	0.9684

4. สรุปผลการศึกษา

4.1. การทดลอง THERMAL RESPONSE TEST

การที่แผนภาพแสดงอุณหภูมิในมาตราส่วน log ธรรมชาติมันมีความชันของเส้นที่แบ่งเป็น 2 ส่วนอย่างชัดเจน อาจเป็นผลมาจากในช่วงแรกตัวกลางน้ำในเสาเข็มนั้นทำหน้าที่ในการดูดซับความร้อนไว้ไม่ได้ถ่ายเทไปยังดินบ่งชี้ได้จากการนำความร้อนที่มีค่าสูงถึง 26.75 และ 9.83 W/m °C ในช่วงเวลา 30 และ 9 ชั่วโมงแรก สำหรับเสาเข็มสปันคอนกรีตและเสาเข็มเกลียวเหล็กตามลำดับ อีกทั้งแนวโน้มพลังงานทั้งหมดที่ใช้มีแนวโน้มลดลงสอดคล้องกัน เมื่อ

เข้าสู่ภาวะสมดุลของระบบสามารถสังเกตได้จากค่าการนำความร้อนที่อ่านมาได้นั้นมีค่าลดลงจนมีค่า 2.33 และ 1.08 W/m °C สำหรับเสาเข็มสปันคอนกรีตและเสาเข็มเกลียวเหล็กตามลำดับ เมื่อเทียบค่าการนำความร้อนของดินเหนียวในช่วง 0.9–2.3 W/m °C [2]

ตารางที่ 2 ค่าการนำความร้อนของดินจากแต่ละการศึกษา

Pile type	Fill material	Heat exchanger	λ	Ref.
		length		
		m	W/m°C	
Concrete spun pile	น้ำ	28.34	3.42	[3]
Steel pile	คอนกรีต	103.40	2.01	[4]
Steel pile	คอนกรีต	123.50	1.49	[4]
Concrete spun pile	น้ำ	17.40	2.33	
Steel screw pile	น้ำ	27.64	1.08	

จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ค่าการนำความร้อนของดิน (λ) ในตารางที่ 2 พบว่าเมื่อการทดลองของเสาเข็มสปันคอนกรีตที่ใช้น้ำในใจกลางเข้าสู่ระยะสมดุลแล้วค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันผลการทดลองของเสาเข็มเหล็กที่มีคอนกรีตใส่ในแกนกลาง [4] โดยมีผลที่ต่ำกว่าราว 15.92% ในส่วนของค่าการนำความร้อนของดินจากการทดลองโดยใช้เสาเข็มเกลียวเหล็กที่มีน้ำเป็นแกนกลางเมื่อเข้าสู่ระยะสมดุลเมื่อเทียบกับเสาเข็มเหล็กที่มีคอนกรีตในแกนกลาง [4] โดยมีผลที่น้อยกว่าราว 37.96%

ผลที่ได้นี้ยังบ่งชี้ว่าอาจนำความรู้นี้ไปประยุกต์ใช้เพื่อตัดแปลงเทคโนโลยีเสาเข็มพลังงานเพื่อใช้งานสำหรับอาคารเก่าที่ต้องการปรับปรุงให้เป็น อาคารประหยัดพลังงานหรืออาคารเขียวโดยวิธีการใช้หลุมเจาะที่ใช้น้ำเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อทดแทนการใช้งานเสาเข็มที่อาจมีอุปสรรคในการใช้งานเนื่องจากข้อจำกัดด้านพื้นที่หรืองบประมาณ อีกหนึ่งประเด็นที่น่าสนใจคือจากผลทำให้ทราบว่าเงื่อนไขเวลาในการทดลองจำเป็นต้องมีระยะเวลาที่ยาวนานกว่าเดิมที่ทำการทดลองเพียงแค่ 48 ชั่วโมง เพื่อให้เห็นผลชัดเจน

4.2. การทดลองการทรุดตัวของดินแบบเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

แนวโน้มพฤติกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯที่มีค่า OCR มากกว่า 1 เล็กน้อย(OCR เท่ากับ 1.3 ตามที่ได้กำหนดไว้ในเงื่อนไขการทดลอง) จากผลเห็นได้ว่า เมื่อดินได้รับความร้อนจะมีแนวโน้มทรุดตัวและขยายตัวกลับเมื่ออุณหภูมิลดลงแต่จะไม่สามารถขยายกลับไปยังสภาพเดิมก่อนได้รับความร้อนซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของดินที่ได้รับการศึกษาก่อนหน้านี้ [6] ที่ได้บรรยายไว้ถึงพฤติกรรม การเสีรูปลาวของดินเหนียวอ่อนที่ได้รับความร้อนเนื่องจากมีการ คั่งค้างของความเครียดอันเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิและการ จัดเรียงเม็ดดินใหม่

การศึกษาในหัวข้อที่ใกล้เคียงกันเกี่ยวกับพฤติกรรมของดินที่พบในพื้นที่กรุงเทพฯเมื่อได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยพบว่า ในตารางที่ 3 ได้เปรียบเทียบค่าคงที่ α และ β จากศึกษาผลกระทบของการทำงานเสาเข็มพลังงานในชั้นทรายกรุงเทพฯ[7] และการศึกษาผลกระทบที่มีต่อดินเหนียวเนื่องจากการใช้เสาเข็ม [8]

ตารางที่ 3 ค่าคงที่จากการทดลองโอโดมิเตอร์แบบควบคุมอุณหภูมิ

#	Temp	Stress	OCR	α	β	R ²
	c	kPa				
A	28 - 50	2000	1	0.0011	0.2330	0.9417
B	28 - 50	3200	1	0.0010	0.2961	0.9624
C	28 - 50	4000	1	0.0009	0.2996	0.8961
D	28 - 50	49.74	1	0.0050	0.1488	N/A
E	30 - 40	65	1.3	0.0006	0.6920	0.9684

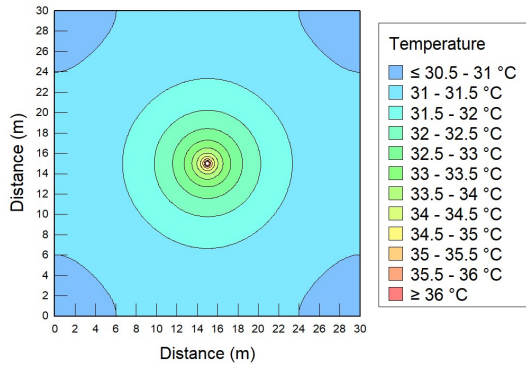
ตัวอย่าง A,B,C Undisturbed Bangkok sand (Dr = 44%) [7] /

ตัวอย่าง D Reconstituted Bangkok Clay [8] / ตัวอย่าง E

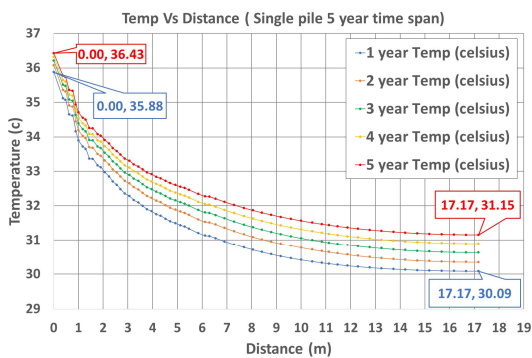
Natural Bangkok clay

หากเปรียบเทียบในส่วนของผลการทดลองในตัวอย่างดินเหนียว (ตัวอย่างDและE) พบว่า ค่า α ที่บ่งบอกถึงการทรุดตัวในช่วงแรกที่ได้จากตัวอย่าง D นั้นมีค่ามากกว่าค่าจากตัวอย่าง E ถึง 8.33 เท่า ซึ่งคาดว่าเกิดจากการเรียงตัวของอนุภาคดินในสภาวะคงสภาพ ซึ่งทับถมตามธรรมชาติ แตกต่างจากดินในสภาวะสร้างใหม่ แต่ในทางกลับกันค่า β จากตัวอย่าง E กลับมีค่ามากกว่าจากตัวอย่าง D ถึง 4.65 เท่า จึงแสดงให้เห็นได้ว่า ตัวอย่าง E ใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่าในเวลาทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการทรุดตัวเพิ่มเติมอันเนื่องมาจากผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

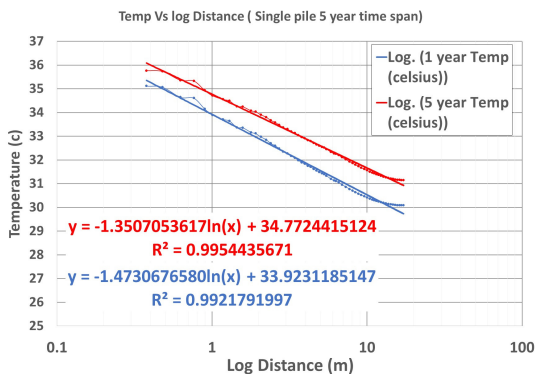
เมื่อนำเงื่อนไขเรื่องระยะเวลาและอุณหภูมิจากการศึกษาในหัวข้อ 2.2 มาประเมินในแบบจำลองการถ่ายเทพลังงานความร้อนที่แสดงผลเป็นค่าอุณหภูมิเทียบกับระยะห่างจากเสาเข็มพลังงานในรูปแบบของเส้นแสดงรูปร่าง(contour)ในภาพที่ 14 โดยสีที่แตกต่างกัน แสดงถึงค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันไป โดยข้อมูลผลลัพธ์จากแบบจำลองสามารถแสดงให้เห็นค่าการเพิ่มขึ้นของผลอุณหภูมิของดินบริเวณรอบเสาเข็มพลังงานที่ระยะต่างๆจากผิวเสาเข็มพลังงาน (ภาพที่ 15) เมื่อใช้งานระยะเวลาผ่านไปตั้งแต่ 1 – 5 ปี ของเสาเข็มเดี่ยว พบว่าอุณหภูมิสูงสุดที่ได้รับมีค่าเพียง 36.43 องศาเซลเซียสที่ดินรอบผิวเสาเข็มพลังงาน (ระยะจากผิวเสาเข็ม = รัศมีจากแบบจำลอง - รัศมีของเสาเข็ม) ค่าอุณหภูมิของดินรอบเสาเข็มพลังงานจะลดลงตามระยะห่างจากเสาเข็มพลังงานที่เพิ่มมากขึ้นในเมื่อแสดงรูปแบบความสัมพันธ์ที่อยู่ในรูปของล็อกการิทึม (ภาพที่ 16) เมื่อมีการใช้งานไปแล้วเป็นระยะเวลา 1 ปี (สีแดง) และ 5 ปี (สีน้ำเงิน)



ภาพที่ 14 Contour จากแบบจำลองแสดงอุณหภูมิของดินรอบเสาเข็มพลังงานหลังมีการใช้งานเป็นเวลา 5 ปี



ภาพที่ 15 แผนภาพข้อมูลจากแบบจำลอง แสดงอุณหภูมิรอบเสาเข็มพลังงาน ณ ระยะทางต่างๆ รอบเสาเข็มพลังงานหลังมีการใช้งานเป็นระยะเวลา 5 ปี



ภาพที่ 16 อุณหภูมิรอบเสาเข็มพลังงานที่ระยะทางต่างๆ ในมาตรฐานส่วนลึก ที่ระยะเวลา 5 ปี

เปรียบเทียบระหว่างค่าอุณหภูมิ 36.43 องศาเซลเซียสที่ดินบริเวณผิวเสาเข็มที่ได้จากแบบจำลองที่เวลาผ่านไป 5 ปีและอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสที่ใช้ในการทดลองการทดสอบพบว่า หากเป็นการใช้งานเข็มเต็มมีโอกาสน้อยมากที่ค่าอุณหภูมิดินรอบเสาเข็มพลังงานจะมีค่าถึง 40 องศาเซลเซียสซึ่งทำให้ค่าความเครียดในดินรอบเสาเข็มพลังงานที่ 0.0063 เมื่อ $N = 27$ ทำให้เห็นว่าเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองการทดสอบตัวของดินแบบเปลี่ยนแปลง

อุณหภูมินั้นเป็นการทดลองที่ส่งผลให้ผลกระทบจากการใช้งานเสาเข็มพลังงานมากกว่าการใช้งานจริงค่อนข้างมาก และบ่งชี้ว่าเมื่อดินรอบเสาเข็มยังมีอุณหภูมิต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส ทำให้ยังมีการไหลของความร้อนจากเสาเข็มพลังงานไปดินรอบเสาเข็มได้อย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังเป็นผลดีหากมองในแง่การใช้เป็นหลักเกณฑ์ในการออกแบบหรือการเพิ่มอัตราความปลอดภัยที่ใช้ในการออกแบบเสาเข็มพลังงานในแง่ของการทดสอบเพิ่มเติมจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอันเนื่องจากการใช้งานเสาเข็มพลังงาน

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้แต่งที่หนึ่งขอขอบคุณ รศ.ดร.อภินิติ โชติสังกาศ, รศ.ก่อโชค จันทรวงูร และ คณาจารย์ท่านอื่นๆ ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และคอยชี้แนะ รวมถึง นายเกียรติศักดิ์ - นางจุฑาทิพย์ ชาญชญาพันธ์ พ่อแม่ผู้ส่งเสริมและเห็นความสำคัญกับการศึกษานางสาวศุจิรา ชาญชญาพันธ์ พี่สาวผู้คอยเป็นกำลังใจและผลักดัน อีกทั้งเพื่อนและคนรู้จักที่ไม่ได้เอ่ยนามถึงที่เคย์ช่วยส่งเสริม

6. การอ้างอิง

- [1] Ioan Sarbu, Calin Sebarchievici. (2016). Ground-Source Heat Pump Systems. In: Ground-Source Heat Pumps Fundamentals, Experiments and Applications. Academic Press, Waltham, MA 02451, USA, Page 93.
- [2] Ground Source Heat Pump Association. (2018). Appendix B: Thermal Properties of Soils and Weak Rocks In: Thermal Pile Design, Installation and Materials Standards (Version 2). Page 69
- [3] ศ.ดร.ตั้งคุ่มวงศ์, พงษ์พัฒน์ อวพิทักษ์ และ พัทธดนย์ เลหาศรีสกุล. 2561. การศึกษาคุณสมบัติและประสิทธิภาพของ เสาเข็มพลังงานในชั้นดินกรุงเทพมหานคร. บทความวิจัยระดับปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [4] อภินิติ โชติสังกาศ, อิติ ชาญชญาพันธ์, อรรถพร วิเศษสินธุ์, สกาวรัตน์ สัตยานันท์ และ สินีนาฏ อ่อนคำ (2563). การประยุกต์เสาเข็มท่อเหล็กไมโครโพล์เป็นเสาเข็มพลังงานเพื่อถ่ายเทความร้อนจากระบบปรับอากาศในอาคารบ้านพักอาศัย. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25, 15-17 กรกฎาคม 2563, จังหวัดชลบุรี, ประเทศไทย.
- [5] สกาวรัตน์ สัตยานันท์ และ สินีนาฏ อ่อนคำ. 2562. การประยุกต์เสาเข็มเหล็กและเสาเข็มสับคนกริตเป็นเสาเข็มพลังงาน เพื่อถ่ายเทความร้อนจากระบบปรับ

อากาศ. บทควมวิจัยระดับปริญญาตรี,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- [6] Lyesse Laloui, Alice Di Donna. (2013). Soil Response under Thermomechanical Conditions. In: Energy Geotechnures Innovation in Underground Engineering. ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc., 27-37 St George's Road London SW19 4EU UK., 1 1 1 River Street Hoboken, NJ 07030 USA, Page 7
- [7] จิตวีร์ สิทธิดำรง (2561) อิทธิพลจากความร้อนของเสาเข็มพลังงาน ต่อมุมเสียดทาน และพฤติกรรมทางปริมาตร ของดินทรายกรุงเทพฯ วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [8] ชลธิดา ศรีสงคราม, พิมพ์ชนก ทองดินอก, ชญานิษฐ์ ดิษยบุตร (2561) การศึกษาผลกระทบที่มีต่อดินเหนียวเนื่องจากการใช้เสาเข็ม พลังงาน โครงการวิศวกรรมโยธา ระดับปริญญาตรี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์