



การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯด้วยความร้อนโดยการทดสอบแบบจำลองขนาดใหญ่

THERMAL STABILIZATION OF SOFT BANGKOK CLAY

USING LARGE SCALE MODEL TEST

กนกวรรณ ศรีสูงเนิน (Kanokwan Sornsoongnoen)¹

สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ (Suttisak Suralump)²

¹นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Sornsoongnoen@hotmail.com)

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (fengsus@ku.ac.th)

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติของดินที่ปรับปรุงคุณภาพโดยการใช้ความร้อน ดำเนินการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยเตรียมตัวอย่าง Reconstituted ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯขนาดใหญ่โดยใช้ Consolidometer Cell ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 เมตร สูง 1.50 เมตร พร้อมติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิและแรงดันน้ำในดิน ผลการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำส่วนเกินในดิน มีปัจจัยหลักเกิดจากการขยายปริมาตรของน้ำในมวลดิน เมื่อมวลดินได้รับความร้อน และเริ่มแผ่กระจายความร้อนในแนวราบ น้ำในมวลดินบริเวณแหล่งให้ความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการสะสมของแรงดันน้ำส่วนเกินในระยรัศมีที่ไกลออกไป เนื่องจากไม่มีการระบายน้ำในระหว่างการให้ความร้อน ผลของแรงดันน้ำส่วนเกินในช่วงของการให้ความร้อนเป็นรอบระยะสั้น พบว่าแรงดันน้ำส่วนเกินในตำแหน่งที่ใกล้จุดให้ความร้อนเพิ่มขึ้นและลดลงเนื่องจากอิทธิพลของการเพิ่มลดอุณหภูมิ แต่ในระยรัศมีที่ 40 เซนติเมตรแรงดันน้ำส่วนเกินกลับยังคงมีการทรงตัวอยู่ ไม่มีการเพิ่ม-ลดอย่างชัดเจน อาจเป็นผลเนื่องมาจากอิทธิพลการให้อุณหภูมิที่ยังคงค้างอยู่ในดิน คุณสมบัติพื้นฐานของดิน ทั้งก่อนและหลังการให้ความร้อน พบว่าค่าอัตราส่วนช่องว่างมีแนวโน้มลดลงในช่วงระยะรัศมี 10 เซนติเมตรจากแหล่งให้ความร้อน ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเพิ่มขึ้น ในขณะที่การทรุดตัวมีแนวโน้มเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากไม่สามารถระบายน้ำออกจากตัวอย่างดินได้

ABSTRACT : This research studied the properties of soil improvement by using the technique of draining the water from the soil under pressure and heat. This method Test to will make the soil sample consolidated rapidly. This study was done the laboratory by using large scale Consolidometer, with dimension of 1.00 m diameter and 1.50 m height. The thermal and pore pressure sensors were installed in the soil sample at various position in order to measure the changing of excess pore water pressure under thermal change. The soil samples were tested to compare the engineering properties before and after thermal stabilization, special is the changing in strength properties. The tested results showed that at constant heat the excess pore water pressure was decreased with increasing horizontal distance. When the soil sample was heated at constant temperature for a longer time, the excess poer water pressure was slightly decrease with time. However, the change in pore pressure and soil temperature was limited in farther radius the heat could not transfer through the thickness of the soil layer to drain the water from the soil. So, the excess pore water pressure in the soil was increased because of the undrained condition. The engineering properties of the soil sample such as undrained shear strength were found to be higher after thermal stabilization and void ratio is decrease. Effect of heat seems to be limited in 10 centimeter radial distance from heating surface.

KEYWORDS : THERMAL,STABILIZATION,SOIL IMPROVEMENT,SOFT CLAY,LARGE SCALE MODEL



1. บทนำ

ปัญหาดินอ่อนเป็นปัญหาสำคัญปัญหาหนึ่งสำหรับงานทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค ลักษณะชั้นดินของกรุงเทพฯ ประกอบด้วย ชั้นดินเปลือกแข็งหนาประมาณ 2 เมตร ซึ่งอยู่บนชั้นผิวบนสุดตามชั้นดินเหนียวอ่อนหนาประมาณ 8 เมตร ตามด้วยดินเหนียวแข็งปานกลางมีความหนาประมาณ 4 เมตร ส่วนชั้นดินเหนียวแข็งนั้นจะอยู่ลึกลงไปทีละระดับประมาณ 15 เมตร จากผิวดิน ในปัจจุบันมีเทคนิคหลากหลายรูปแบบ ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนนี้ โดยเน้นในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านการรับแรงและลดการทรุดตัว เช่นการใช้เสาเข็มดิน-ซีเมนต์หรือแรงการทรุดตัวโดยใช้ PVD อย่างไรก็ตามเทคนิคดังกล่าวมีข้อจำกัดทางด้านราคาหรือระยะเวลาที่ใช้ในการปรับปรุง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาเทคนิคที่อาศัยหลักการใหม่เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงมุ่งสู่การหาวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนที่มีราคาไม่สูงและใช้เวลาในการปรับปรุงน้อย โดยวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นวิธีที่ผสมผสานระหว่างการปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้วิธีการทรุดตัวโดยใช้ Preloading และการเร่งการระบายออกของน้ำในดินโดยความร้อน โดยจำกัดให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงสุดที่ 90 องศาเซลเซียส เพื่อให้สามารถใช้น้ำเป็นตัวกลางในการส่งถ่ายความร้อนได้

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาพบว่า การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยความร้อนได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการทดสอบในภาคสนาม โดยเน้นเงื่อนไขการแบ่งประเภทของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนออกเป็น 2 ประเภทคือ ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนถูกอัดตัวปกติ และตัวอย่างดินเหนียวอ่อนถูกอัดตัวมากกว่าตัวปกติ รวมถึงการจำลองสภาพการส่งถ่ายความร้อนในรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป เป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของตัวอย่างดินที่ไม่เหมือนกัน

งานวิจัยที่ผ่านมามุ่งเน้นการปรับปรุงคุณสมบัติด้านการรับแรงและการทรุดตัวของดินเหนียวอ่อน แต่ยังไม่สามารถสรุปแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมต่างๆของดินเหนียวอ่อนได้อย่างชัดเจน ดังสรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมามีในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปผลงานวิจัยที่ผ่านมา

Authors	OCR	Type of		Strength After Heating
		Heating	Searing	
Murayama (1969)	3/4	Undrained	Undrained	Decreased
Sherif and Burrous (1969)	1	Undrained	Undrained	Decreased
Houston <i>et al.</i> (1985)	1	Drained	Undrained	Increased
Hueckel and Baldi (1990)	5,12,5	Drained	Drained	Decreased
Kuntiwattankul <i>et al.</i> (1991)	1	Drained	Undrained	Increased
	1	Undrained	Undrained	Decreased
Tanaka <i>et al.</i> (1997)	1	Drained	Undrained	Increased
Graham <i>et al.</i> (2001)	1	Drained	Undrained	Increased
พิสิทธิ์และเพิ่มพร (2548)		Drained	Drained	Increased
สมศักดิ์และสุทธิศักดิ์ (2550)		Drained	Undrained	Increased

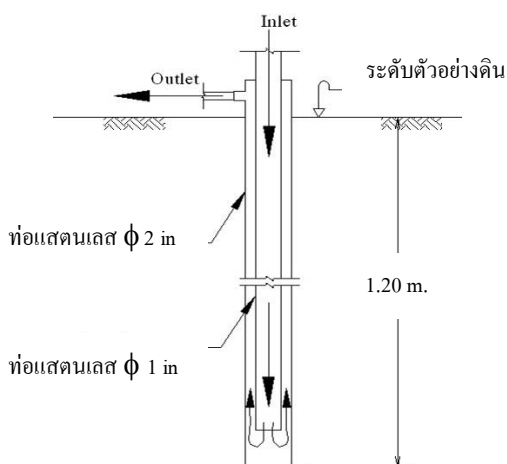
3. วิธีวิจัย

งานวิจัยนี้เริ่มโดยการจำลองและศึกษาคุณสมบัติและความสม่ำเสมอของตัวอย่างเสมือนคงสภาพ (Reconstituted Sample) ที่จำลองในแบบจำลองขนาดใหญ่ เพื่อใช้เป็นตัวแทนดินเหนียวอ่อนในการทดสอบการให้ความร้อนเท่าขนาดจริง (Full Scale Test) ในห้องปฏิบัติการ โดยศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางวิศวกรรมอันได้แก่การเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมของค่ากำลังรับน้ำหนัก แรงดันน้ำส่วนเกินและการทรุดตัวจากการเพิ่ม-ลดอุณหภูมิ โดยการส่งผ่านความร้อนลงไปในตัวอย่่างดินเหนียวอ่อน โดยใช้น้ำเป็นตัวกลางในการส่งผ่านความร้อนผ่านท่อโลหะ โดยอุณหภูมิสูงสุดในการศึกษากำหนดไว้ที่ประมาณ 90 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ผ่านการวิจัยในสนามแล้วพบว่าพลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียวสามารถทำให้น้ำร้อนขึ้นได้ถึงอุณหภูมิดังกล่าว (สมศักดิ์และสุทธิศักดิ์, 2550) งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมเพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำ อุณหภูมิ และการทรุดตัว รวมทั้งได้

ดำเนินการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของตัวอย่างดินเหนียวอ่อน ทั้งก่อนและหลังการส่งถ่ายความร้อน ขั้นตอนงานวิจัย ประกอบด้วย

การจำลองสภาพตัวอย่างดินเพื่อใช้ในการทดสอบจำลองเป็น ดินเหนียวอ่อนที่มีสภาพรับน้ำหนักปกติ (NC) โดยจำลองสภาพ แรงดันเทียบเท่าความลึกของชั้นดินประมาณ 2 เมตร โดย งานวิจัยนี้ไม่สามารถเตรียมตัวอย่างดินได้เสร็จภายในชั้นเดียว อันเนื่องมาจากแบบจำลองมีขนาดใหญ่ จึงดำเนินการเตรียม ตัวอย่างดินทั้งหมดสามชั้น โดยแต่ละชั้นจะทำการเตรียม ตัวอย่างดินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร ความสูงประมาณ 35-40 เซนติเมตร โดยเสมือนเป็นตัวอย่างดินเดียวกัน โดยมีการ ตรวจสอบคุณสมบัติความเป็นเนื้อเดียวกันของตัวอย่างดินด้วย วิธีการต่างๆที่ได้อธิบายในรายละเอียดในบทความข้างเคียง

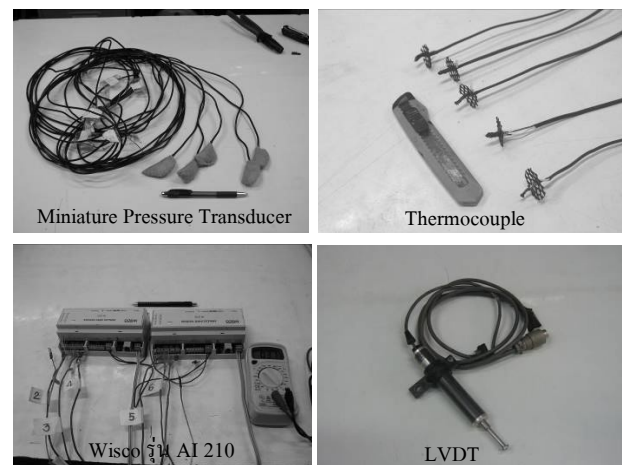
3.1.1 อุปกรณ์สำหรับการส่งถ่ายความร้อนลงไป ใน ตัวอย่างดิน เป็นท่อน้ำร้อนออกแบบให้มี 2 ท่อซ้อนกันอยู่ใน ขนาดของท่อภายในเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว น้ำเข้า ท่อนอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ใช้เป็นท่อน้ำออก ความยาว 1.20 เมตร น้ำร้อนจะไหลผ่านท่อน้ำชั้นในออกสู่ท่อน้ำชั้นนอก โดย ติดตั้งอยู่ในตำแหน่งจุดศูนย์กลางของ Large Consolidometer Cell จากนั้นจึงไหลย้อนและกลับเข้าสู่ชุดทำความร้อนโดยมีเป็น ควบคุมการไหลเข้า- ออกของน้ำร้อน ดังแสดงรายละเอียดใน ภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ระบบการทำงานของท่อน้ำร้อน

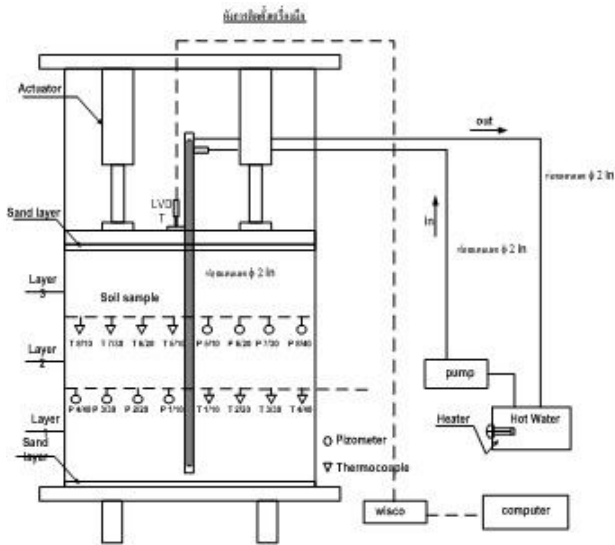
3.1.2 เครื่องทำความร้อน (Heater) ขนาด 2000 วัตต์ ช่วยในการทำความร้อนและรักษาอุณหภูมิภายในถังผลิตน้ำร้อน ที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส มีปั๊มน้ำร้อนควบคุม ปริมาณการไหลเข้าสู่ท่อทำความร้อนที่ติดตั้งในตัวอย่างดิน

3.1.3 เครื่องมือวัดพฤติกรรมในมวลดินแบ่งออกเป็น 2 ชุด โดยแต่ละชุดจะมีอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำ (Miniature Pressure Transducer) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple) ในดินอย่างละ 4 ตัว โดยเครื่องมือวัดชุดที่ 1 ติดตั้งที่ระดับ 28.67 เซนติเมตรใน แนวรัศมีห่างจากศูนย์กลาง ที่ระยะรัศมี 10 ซม. 20 ซม. 30 ซม. และ 40 ซม.ตามลำดับ และเครื่องมือวัดชุดที่ 2 ติดตั้งที่ระดับ 57.98 เซนติเมตร ในแนวรัศมีสลับด้านกับการติดตั้งเครื่องมือวัด ชุดที่ 1 ที่ระยะรัศมี 10 ซม. 20 ซม. 30 ซม. และ 40 ซม.ตามลำดับ โดยระดับอ้างอิงอยู่ที่ระดับความสูงจากพื้นด้านล่างของ Large Consolidometer Cell ดังแสดงในภาพที่ 3 และภาพที่ 4 แสดง ระบบงานทดสอบของการติดตั้งอุปกรณ์วัดพฤติกรรมและระบบ การให้ความร้อน



ภาพที่ 3 เครื่องมือวัดพฤติกรรมในมวลดิน

ผลการบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในตัวอย่างดิน ที่เวลาต่างๆสามารถบันทึกผลได้จากเครื่องมือวัดพฤติกรรม ขนาดเล็กน้ำ (Miniature Pressure Transducer) โดยประกอบด้วย อุปกรณ์วัดแรงดันน้ำ (Pressure Sensors) อุณหภูมิในดิน (Thermocouple) และอุปกรณ์วัดระยะการทรุดตัว ที่ได้ทำการ ติดตั้งในตำแหน่งต่างๆ โดย Sensors ต่างๆได้ตรวจวัดและเก็บ ข้อมูลผ่าน Data Interface (Wisco AI 210) เข้าสู่คอมพิวเตอร์



ภาพที่ 4 ระบบการทดสอบ

3.2 การให้ความร้อนแก่ดินจำลอง

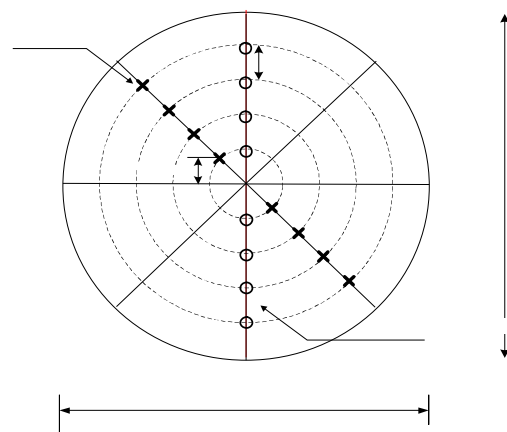
3.2.1 ให้ความร้อนคงที่ ณ อุณหภูมิสูงสุดที่ 90 องศาเซลเซียส ตรวจสอบพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำและความร้อนแล้วลดระดับความร้อนลงอย่างต่อเนื่องจนถึงความร้อนที่อุณหภูมิปกติ (ตารางที่ 2) การให้ความร้อนในลักษณะดังกล่าวกระทำเป็นรอบ 2 รอบ เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมที่ไม่กลับคืน (Irreversible) เมื่อดินได้รับความร้อนโดยเฉพาะอย่างยิ่งพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำ

3.2.2 ให้ความร้อนแบบระยะสั้น ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสในช่วงเวลากลางวันและลดอุณหภูมิลงในครั้งเดียวที่อุณหภูมิปกติในช่วงเวลากลางคืนเพื่อเป็นการจำลองสภาพการให้ความร้อนตามพลังงานแสงอาทิตย์

หลังจากสิ้นสุดการให้ความร้อน ได้ดำเนินการทดสอบ Laboratory Vane Shear Test ในตำแหน่งต่างๆจากที่หน้าความร้อนไปในแนวรัศมีและตามระดับความลึก และเก็บตัวอย่างดินเพื่อทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของตัวอย่างหลังจากให้ความร้อน ดังแสดงรายละเอียดในภาพที่ 5

ตารางที่ 2 รูปแบบการให้ความร้อนระหว่างการทดสอบ

รูปแบบการให้ความร้อนที่	ระดับของอุณหภูมิ องศาเซลเซียส	ระยะเวลาการให้ความร้อน (วัน)	หมายเหตุ
1	90	39	การให้ความร้อนแบบคงที่ แล้วทำการปรับลดอุณหภูมิ รอบที่ 1
	80	7	
	70	9	
	60	6	
	50	8	
	40-อุณหภูมิปกติ	3	
	รวม	72	
2	90	20	การให้ความร้อนแบบคงที่ แล้วทำการปรับลดอุณหภูมิ รอบที่ 2
	95	13	
	80	7	
	70	4	
	60	6	
	50	7	
	40-อุณหภูมิปกติ	21	
	รวม	78	
2	90-อุณหภูมิปกติ	6	การให้ความร้อนแบบระยะสั้น



ภาพที่ 5 ตำแหน่งการเก็บตัวอย่างและทดสอบ Vane Shear Test

4. ผลการวิจัย

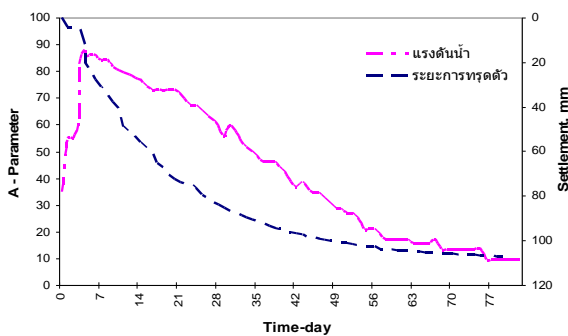
ผลการวิจัยการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยความร้อนแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย การจำลองสภาพตัวอย่างดิน พฤติกรรมของดินระหว่างการให้ความร้อนและ การ



คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดินทั้งก่อนและหลังการให้ความร้อน

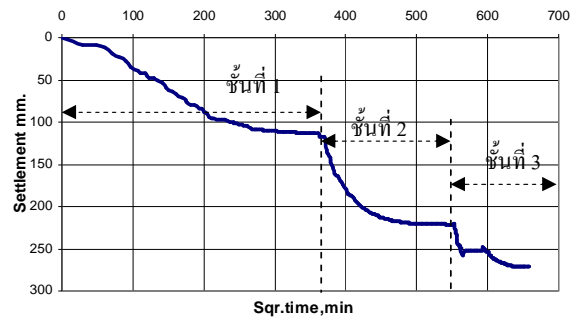
4.1 การจำลองสภาพตัวอย่างดิน

จำลองตัวอย่างดินแบบคงสภาพ (Reconstituted Soil) มาใช้ในงานทดสอบใน Large Consolidometer Cell จำนวน 2 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างแรกทำการทดสอบเพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของตัวอย่างดินซึ่งพบว่ามีความสม่ำเสมอดี โดยใช้เวลาการทดสอบ 295 วัน จากนั้นจึงเตรียมตัวอย่างที่ 2 ด้วยวิธีเดียวกันเพื่อทดสอบการให้ความร้อน โดย Consolidate ดิน จำนวน 3 ชั้น เพื่อให้ได้ความหนาของชั้นดินรวมเท่ากับ 1 เมตร แต่ละชั้นจะทำการควบคุมปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมให้มีปริมาณใกล้เคียงกัน (ให้มากกว่าค่าพิกัดเหลว) เพื่อควบคุมแล้วตัวอย่างดินเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่จับกันเป็นก้อน จากนั้นจึงนำไปทดลองใน Large Consolidometer Cell ให้ได้ความสูงตามต้องการและให้แรงกดทับที่ 2 ดันต่อตารางเมตร ในระหว่างการให้แรงกดทับทำการบันทึกข้อมูลการทรุดตัวและแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นในตัวอย่างดินพบว่าทันทีที่ตัวอย่างดินถูกแรงกดทับ แรงดันน้ำจะเพิ่มขึ้นทันทีตามแรงกด และเกิดการทรุดตัวแบบทันทีเมื่อมีหน่วยแรงมากระทำ เมื่อคงค่าแรงกดทับไว้แรงดันน้ำจะมีค่าลดลง เนื่องจากการระบายน้ำออกจากตัวอย่างดินตามพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำของดิน (Consolidation) ดังแสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำและระยะการทรุดตัวของตัวอย่างดินจำลอง

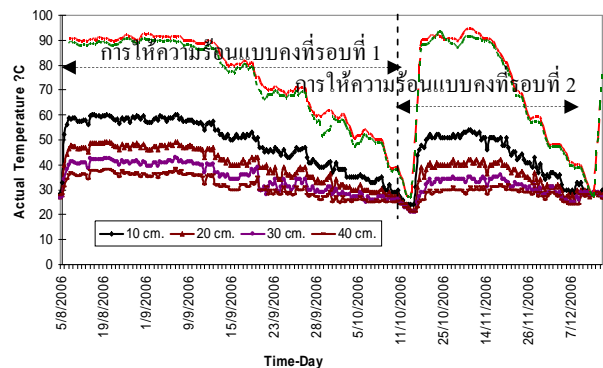
ผลการจำลองสภาพตัวอย่างดินรวมความหนาของตัวอย่างดินทั้ง 3 ชั้นก่อนให้แรงกดมีความหนารวม 115 เซนติเมตร หลังจากการให้แรงกดคงที่ที่เกิดระยะการทรุดตัวรวม 27.12 เซนติเมตร เหลือความหนาสุดท้าย 87.88 เซนติเมตร ใช้เวลาทั้งหมด 295 วัน ดังแสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ของระยะการทรุดตัวของตัวอย่างดินกับเวลา

4.2 การปรับปรุงคุณภาพดินจำลองโดยความร้อน

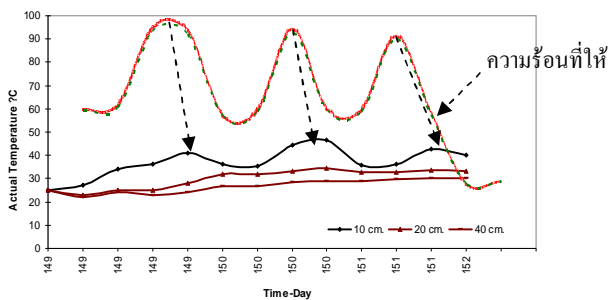
4.2.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเปรียบเทียบกับเวลาตามระยะตามแนวรัศมีในแนวราบ เมื่อมีการให้ความร้อนแบบคงที่ทั้ง 2 ครั้งเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิ 90 และ 80 องศาเซลเซียสพบว่าอุณหภูมิในตัวอย่างดินเพิ่มขึ้นในทิศทางและแนวโน้มแนวเดียวกัน คือ อุณหภูมิขึ้นสูงสุดประมาณ 58-60 องศาเซลเซียส ณ ตำแหน่งรัศมีที่ 10 เซนติเมตรและค่อยๆลดลงต่ำสุดประมาณ 34-36 องศาเซลเซียส ตามระยะรัศมีที่ไกลออกไป ดังแสดงในภาพที่ 8 เมื่อปรับลดอุณหภูมิในตัวอย่างดินกลับสู่สภาพปกติแล้วดำเนินการให้ความร้อนคงที่ครั้งที่ 2 พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในตัวอย่างดินมีค่าต่ำกว่าการให้ความร้อนครั้งที่ 1 โดยอุณหภูมิในตัวอย่างดินเพิ่มขึ้น 50-52 องศาเซลเซียส ในแนวรัศมีเดิมที่ 10 เซนติเมตร และลดลงต่ำสุดประมาณ 30-32 องศาเซลเซียส ตามระยะรัศมีที่ไกลออกไป พฤติกรรมดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาการให้ความร้อนกับชั้นดินเหนียวอ่อนในสนาม (สมศักดิ์และสุทธิศักดิ์, 2550) ที่พบว่าการให้ความร้อนในรอบที่มากขึ้น อุณหภูมิสูงสุดในจุดเดียวกันจะมีค่าลดลง



ภาพที่ 8 การเพิ่ม-ลดอุณหภูมิในตัวอย่างดินแบบคงที่รอบที่ 1 และรอบที่ 2



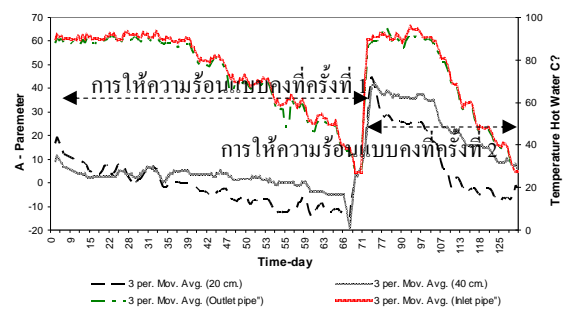
การให้ความร้อนเป็นรอบในระยะเวลาสั้น เป็นการให้ความร้อนในช่วงกลางวัน และหยุดให้ความร้อนในช่วงเวลากลางคืน จากผลการทดสอบพบว่า ค่าอุณหภูมิสูงสุดในแต่ละช่วงของการให้ความร้อนมีแนวโน้มขึ้น-ลงไม่แน่นอน เนื่องมาจากระยะเวลาที่ปล่อยให้อุณหภูมิลดลงเป็นช่วงเวลานั้นๆ เป็นผลทำให้อุณหภูมิในตัวอย่างดินยังคงค้างอยู่และเกิดการสะสมอุณหภูมิในตัวอย่างดินไม่สามารถระบายความร้อนออกจากชั้นดินได้หมด จึงทำให้มีแนวโน้มของอุณหภูมิแต่ละช่วงมีค่าขึ้น-ลงไม่แน่นอน นอกจากนี้ยังพบว่ามีค่าช้าของการตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อให้ความร้อน (Lag Time) ดังแสดงในภาพที่ 9 การให้ความร้อนแบบอุณหภูมิคงที่และแบบระยะสั้น พบความแตกต่างของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในตัวอย่างดินที่ต่างกัน โดยมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากผลของการให้ความร้อนกับตัวอย่างดิน เป็นผลทำให้ปริมาตรของดินเหนียวอัดตัวปกติมีปริมาตรลดลง ดังนั้นการเพิ่ม - ลดอุณหภูมิในแต่ละครั้ง อนุภาคของดินเหนียวเคลื่อนตัวเข้าใกล้กันมากขึ้น และน้ำในมวลดินมีปริมาณลดลง ทำให้ความร้อนแผ่กระจายออกไปได้เร็วขึ้น ดังนั้นการให้ความร้อนในแต่ละครั้งหลังจากหยุดการให้ความร้อน อุณหภูมิสูงสุดที่เพิ่มขึ้นในแต่ละรอบ ณ ตำแหน่งในแนวรัศมีเดียวกันจึงมีค่าลดลง



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่ม-ลดอุณหภูมิให้ความร้อนเป็นรอบระยะสั้นและ Time Lag

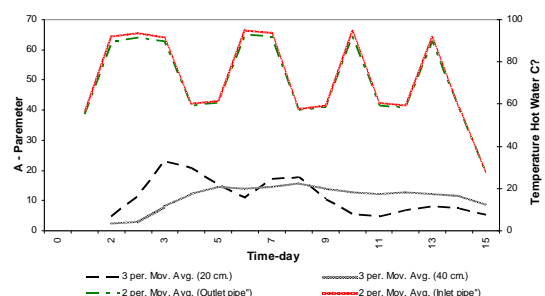
2.4.2 การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำส่วนเกินช่วงที่ให้ความร้อนคงที่ มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในตัวอย่างดิน โดยที่แรงดันน้ำจุดที่ใกล้กับท่อน้ำร้อนจะมีแรงดันน้ำส่วนเกินเกิดขึ้นสูงกว่า จุดที่อยู่ห่างออกไปตามแนวรัศมี แต่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิกิ่งที่พบว่า รัศมีที่ไกลออกไปเกิดมีการสะสมของแรงดันน้ำ ในขณะที่จุดที่ใกล้กับท่อน้ำร้อนแรงดันน้ำกลับมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลานานขึ้นถึงความร้อนยังคงที่ เป็นผลทำให้ในรัศมีที่ไกลออกไปกลับมีแรงดันน้ำส่วนเกินที่สูงกว่าจุดที่ใกล้กับท่อน้ำร้อน ในงานวิจัย

ครั้งนี้มีชั้นระบายน้ำอยู่ด้านบน-ล่างของ Large Consolidometer Cell โดยระหว่างชั้นระบายน้ำเป็นตัวอย่างดินเหนียวอ่อนมีความหนา ประมาณ 87.88 เซนติเมตร ดังนั้นการให้ความร้อนอาจไม่มากพอที่จะทำให้แรงดันน้ำส่วนเกินไหลไปสู่ชั้นระบายน้ำด้านบน-ล่างได้ จึงเกิดการสะสมของแรงดันน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ครั้งที่ 2 และการเกิดแรงดันน้ำส่วนเกินจากการให้ความร้อน

การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำส่วนเกินช่วงการให้ความร้อนเป็นรอบในระยะเวลาสั้น พบว่าการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดจากการให้อุณหภูมิ รัศมีที่อยู่ใกล้แหล่งให้ความร้อนจะมีแรงดันน้ำส่วนเกินเกิดขึ้นสูง และค่อยๆ ลดลงในระยะรัศมีที่ไกลออกไป โดยพฤติกรรมการลดลงของแรงดันน้ำส่วนเกินบริเวณจุดที่ใกล้แหล่งให้ความร้อน ในระยะรัศมีที่ไกลออกไปยังคงมีแรงดันน้ำส่วนเกินค้างหรือสะสมอยู่ อาจเป็นเพราะอิทธิพลของการให้ความร้อนแบบไม่ระบายน้ำ ทำให้เกิดการสะสมของแรงดันน้ำในระยษรัศมีที่ไกลออกไปดังแสดงในภาพที่ 11 ซึ่งเป็นภาพรวมของการให้ความร้อนแบบเป็นรอบระยะสั้น จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำส่วนเกินเกิดการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มและลดลง เป็นไปในแนวโน้มนเดียวกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แต่ไม่เท่ากันในช่วงแรกของการให้ความร้อนตลอดเวลา



ภาพที่ 11 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของการให้ความร้อนแบบระยะสั้นและการเกิดแรงดันน้ำส่วนเกินจากการให้ความร้อน



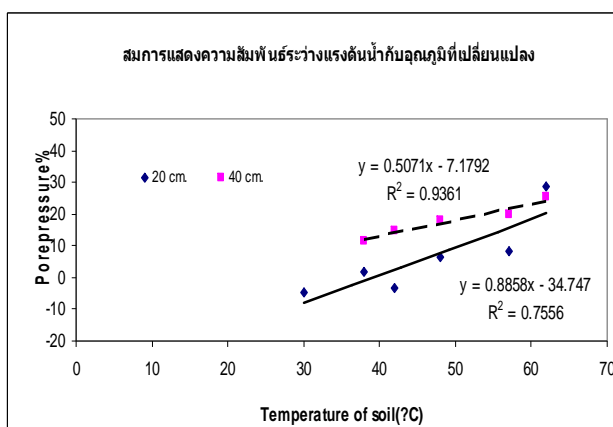
ผลของการศึกษาพฤติกรรมการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ด้วยความร้อนทำให้ทราบได้อย่างชัดเจนว่า การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำส่วนเกินในดิน มีปัจจัยหลักเกิดจากการขยายปริมาตรของน้ำในมวลดิน เมื่อมวลดินได้รับความร้อน และเริ่มแผ่กระจายความร้อนในแนวราบ น้ำในมวลดินบริเวณแหล่งให้ความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น เป็นผลให้เกิดแรงดันแบบไม่ระบายน้ำ และส่งผลให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกินในรัศมีที่ไกลออกไปในทันที แม้อุณหภูมิจะยังไม่ถึงก็ตาม นอกจากนี้เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการสะสมของแรงดันน้ำส่วนเกินในระยะรัศมีที่ไกลออกไป เนื่องจากไม่มีการระบายน้ำในระหว่างการให้ความร้อนและสภาพขอบเขต(Boundary Condition) เป็นสภาพปิดซึ่งแตกต่างจากพฤติกรรมจริงในสนาม

จากการทดสอบสามารถได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในช่วง 35 ถึง 65 องศาเซลเซียสแสดงได้ดังภาพที่ 12 และมีความสัมพันธ์ของสมการที่ (1)

$$\Delta U_i = 0.507 (T_i) - 7.179 \quad (1)$$

$$\Delta U_i = \text{แรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้น, (ตัน/ตร.ม.)}$$

$$T_i = \text{อุณหภูมิใดๆ มีค่าอยู่ในช่วง 35 ถึง 65, (C)}$$



ภาพที่ 12 สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

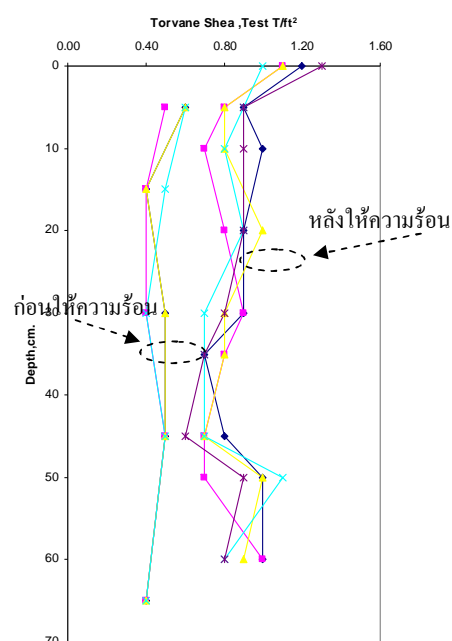
นอกจากนี้ผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างดิน มีระยะการทรุดตัวรวม 27.50 เซนติเมตร ในช่วงของการ Consolidate เพื่อเตรียมตัวอย่างก่อนการให้ความร้อน เมื่อเริ่มดำเนินการให้ความร้อนพบว่ามีการทรุดตัวเกิดขึ้นเพียง 1.46 เซนติเมตร หลังจากการให้ความร้อนเป็นเวลา 5 เดือน โดยยังคงค้างแรงกดทับไว้ การทรุดตัวควรเกิดขึ้นจากการให้ความร้อนทำให้เกิดแรงดันน้ำ

ส่วนเกิน และหากมีการระบายน้ำออกจากตัวอย่างดิน การทรุดตัวจะเกิดขึ้น แต่เนื่องจากแรงดันน้ำส่วนเกินไม่สามารถระบายสู่ชั้นระบายน้ำได้ทั้งหมด ถึงแม้ว่าจะให้ความร้อนตลอดเวลาที่ตาม ทำให้เกิดการทรุดมีค่าน้อยมาก

4.3 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดินก่อนและหลังการให้ความร้อน

จากผลการทดสอบค่าคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดินอันได้แก่ การทดสอบ Atterberg's Limit พบว่า ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยความร้อน ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างดินได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Towhata *et al.*, (1994) และ Gabriellsson *et al.*, (1997)

ผลการทดสอบ Torvane Shear Test และ Laboratory Vane Shear Test พบว่าการจำลองสภาพดินมีความเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Soil) โดยผลการทดสอบ Torvane Shear Test ก่อนการให้ความร้อนมีค่ากำลังรับน้ำหนักโดยเฉลี่ยประมาณ 0.48 ตันต่อตารางฟุต หลังจากให้ความร้อนมีค่ากำลังรับน้ำหนักโดยเฉลี่ยประมาณ 0.88 ตันต่อตารางฟุต ดังแสดงใน ภาพที่ 13 และมีค่าหน่วยน้ำหนักรวมก่อนและหลังการให้ความร้อนโดยเฉลี่ยประมาณ 1.44 ตันต่อลูกบาศก์เมตร และ 1.59 ตันต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ปริมาณน้ำในมวลดินก่อนให้ความร้อนอยู่ในช่วงร้อยละ 88.03-91.01 และหลังการให้ความร้อนลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 76.60-78.66



ภาพที่ 13 การทดสอบ Torvane Shear Test ของตัวอย่างดินก่อนและหลังการปรับปรุง ด้วยความร้อนที่ความลึกต่างๆ



ผลการทดสอบ Laboratory Vane Shear Test พบว่าก่อนการให้ความร้อนมีค่ากำลังรับน้ำหนักโดยเฉลี่ยประมาณ 0.29 ตันต่อตารางเมตร หลังจากให้ความร้อนมีค่ากำลังรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยประมาณ 0.85 ตันต่อตารางเมตร การทดสอบหาค่าอัตราส่วนช่องว่างภายในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ก่อนและหลังการได้รับการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยความร้อนแล้วปรากฏว่า ค่าอัตราส่วนช่องว่างลดลงหลังการปรับปรุงด้วยความร้อนร้อยละ 8-12 ณ ช่วงระยะระยะรีซีม 10 เซนติเมตรจากแหล่งให้ความร้อน

โดยสรุปพบว่าการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินหลังการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน โดยวิธี Torvane Shear Test โดยเฉลี่ยพบว่ามีค่ากำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นร้อยละ 45.45 วิธี Laboratory Vane Shear Test มีค่ากำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นร้อยละ 65.34 วิธีแรงกดแบบไม่มีแรงดันด้านข้าง (Unconfined Compressive Test) ค่ากำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.25-17 ในช่วงระยะรีซีม 10 ซม.จากผิวของแหล่งความร้อน

5. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาพฤติกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เมื่อทำการปรับปรุงด้วยความร้อน ซึ่งมีขอบเขตในการศึกษาวิจัยคือ ดำเนินการจำลองสภาพดินในแบบจำลองขนาดใหญ่เพื่อนำมาทดสอบการให้ความร้อนโดยแบบจำลองขนาดใหญ่ในห้องปฏิบัติการ ผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 ผลของการจำลองสภาพดินพบว่ามี Homogenous ตลอดทั่วทั้งมวลตัวอย่าง มีค่าหน่วยน้ำหนักโดยเฉลี่ย (\bar{X}) ประมาณ 1.55 ตันต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่า SD 0.02 และ COV เท่ากับร้อยละ 1.04 ปริมาณน้ำในมวลดินโดยเฉลี่ย (\bar{X}) อยู่ในช่วงร้อยละ 75 – 80 โดยมีค่า SD เท่ากับ 3.85 และ COV เท่ากับ ร้อยละ 4.98

5.2 ความร้อนที่ส่งถ่ายให้ตัวอย่างดินเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยอุณหภูมิภายในตัวอย่างดินเพิ่มสูงสุด 63 องศาเซลเซียสในบริเวณใกล้ตำแหน่งที่ให้ความร้อน และมีค่าอุณหภูมิลดลงต่ำสุดที่ 32.5 องศาเซลเซียสเมื่อมีระยะรีซีมไกลออกไป

5.3 ผลการตรวจวัดแรงดันน้ำส่วนเกินพบว่าในช่วงแรกของการให้ความร้อน แรงดันน้ำส่วนเกินจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ และเมื่อให้ความร้อนคงที่ แรงดันน้ำช่วงแรกมีแนวโน้มลดลง ซึ่ง

คล้ายกับพฤติกรรมในการทดสอบในภาคสนามจากงานวิจัยที่ผ่านมา (สมศักดิ์และสุทธิศักดิ์, 2550)

5.4 เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับผลการทดสอบในสนามของการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ามีแปลงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของความร้อนและแรงดันน้ำใกล้เคียงกัน ยกเว้นพฤติกรรมการสะสมแรงดันน้ำของรีซีมที่ไกลจากแหล่งให้ความร้อนซึ่งลักษณะดังกล่าว ไม่ปรากฏในสนาม ดังนั้นจึงทำการสรุปได้ว่าแม้จะใช้แบบจำลองที่มีขนาดใหญ่เพื่อลดอิทธิพลของสภาพขอบเขตจำกัด อย่างไรก็ตามอิทธิพลดังกล่าวยังปรากฏได้อย่างชัดเจนในตัวแปรของแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นในรีซีมไกลๆแต่ไม่ปรากฏว่ามีอิทธิพลต่อการแผ่กระจายความร้อน

5.5 ผลของแรงดันน้ำส่วนเกินในช่วงของการให้ความร้อนเป็นรอบระยะสั้น แรงดันน้ำส่วนเกินในตำแหน่งที่ใกล้จุดให้ความร้อนเพิ่มขึ้นและลดลงเนื่องจากอิทธิพลของการเพิ่ม-ลดอุณหภูมิ แต่ในระยะรีซีมที่ 40 เซนติเมตรแรงดันน้ำส่วนเกินกลับยังคงมีการทรงตัวอยู่ ไม่มีการเพิ่ม-ลด อย่างชัดเจน อาจเป็นผลเนื่องมาจากอิทธิพลการให้อุณหภูมิที่ยังคงค้างอยู่ในดิน

5.6 คุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ทั้งก่อนหลังการให้ความร้อนไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด

5.7 การวัดระยะการทรุดตัวทำการวัด ณ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของ Large Consolidometer Cell แนวโน้มที่ได้การทรุดตัวเนื่องจากการให้ความร้อนเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากไม่สามารถระบายน้ำออกจากตัวอย่างดินได้

5.8 จากผลการวิจัยพบว่าวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ด้วยความร้อนมีประสิทธิภาพด้านการเพิ่มกำลังรับแรงเฉือน ในระยะประมาณ 10 เซนติเมตร จากผิวของแหล่งความร้อน ทำให้มีแนวโน้มความเป็นไปได้ทางเทคนิคที่จะนำมาใช้ในงานก่อสร้างเพื่อแก้ปัญหาดินอ่อนหากมีการวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้เหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบคุณรัฐบาลไทยในการสนับสนุนทุนวิจัย สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชียในฐานะผู้ร่วมทุนและศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในการสนับสนุนทุนวิจัย



เอกสารอ้างอิง

- [1] Grino, L. 2004. Effect of Heat on the Deformation and strength Behavior of Soft Bangkok Clay. M.S Thesis. Asian Institute of Technology. Thailand.
- [2] Kuntiwattanukul, P.1991. Effect of High Temperature on Mechanical Behavior of Clays. Doctoral Dissertation thesis, University of Tokyo.
- [3] Towhata, I and Kuntiwattanukul, P. 1994. Behavior of Clays Undergoing Elevated Temperature comportement De l'argile a Haute Temperature. Department of Civil Engineering University of Tokyo .
- [4] Uddin, K. 1995. Strength and Deformation Characteristics of Cement-Treated Bangkok Clay. D. Eng. Dissertation No.GT-941,Asian Institute of Technology, Thailand