

การปรับปรุงฐานรากดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

Improvement of Soft Bangkok Clay Foundation Using Solar Heat Energy

คำนำ

ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Bangkok Soft Clay) เป็นดินที่เกิดจากการพัดพาของน้ำ หรือดินแขวนลอย ไหลตามน้ำมา เมื่อความเร็วของน้ำชะลอลงเพราะกระแสน้ำมาปะทะกับน้ำทะเลในอ่าวไทย ทำให้ดินที่แขวนลอยมากับน้ำตกตะกอน บางส่วนวิ่งไปตกตะกอนในอ่าวไทย และบางส่วนที่ละเอียดมาก ๆ จะกลับมาตกตะกอนบริเวณกรุงเทพฯ ใหม่ โดยแขวนลอยมากับน้ำทะเลหนุน (น้ำขึ้น) ดังนั้นชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ จึงเป็นชั้นดินที่มีเม็ดละเอียดมากมีความหนาประมาณ 10-15 เมตร มีปริมาณน้ำบรรจุ (Water Content) อยู่ระหว่างร้อยละ 60-120 มีค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit) อยู่ระหว่างร้อยละ 60-120 มีค่าความซึมได้ตามแนวดิ่งอยู่ระหว่าง 0.2-1.0 เมตรต่อปี มีอัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio) 1.80-3.50 และมีค่า Undrained Shear Strength อยู่ระหว่าง 300-1,500 กิโลเมตรต่อตารางเมตร (เกษม, 2538) จากคุณสมบัติดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ รับน้ำหนักได้น้อย และยุบตัวได้สูง พร้อมจะเลื่อนไหลเมื่อมีน้ำหนักกดทับ และมีส่วนผสมของแร่ คาโอไลน์ (Kaolinite) 43%, มอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite) 33%, อิลไลต์ (Illite) 19% และควอตซ์ (Quartz) 5% (Uddin, 1995) ภาพที่ 1 แสดงลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ

การทรุดตัวของดินเหนียวอ่อนตามธรรมชาติใช้เวลานานกว่าการทรุดตัวจะสิ้นสุดลง เนื่องจากดินเหนียวอ่อนมีขนาดอนุภาคเล็กมาก ตั้งแต่ 0.002 มิลลิเมตรลงมา ทำให้มีค่าความซึมน้ำต่ำ ทำให้เกิดปัญหาการทรุดตัวระยะยาวภายหลังการก่อสร้าง และปัญหาเสถียรภาพและกำลังรับน้ำหนักของดิน ดังแสดงตัวอย่างดังภาพที่ 2 -3

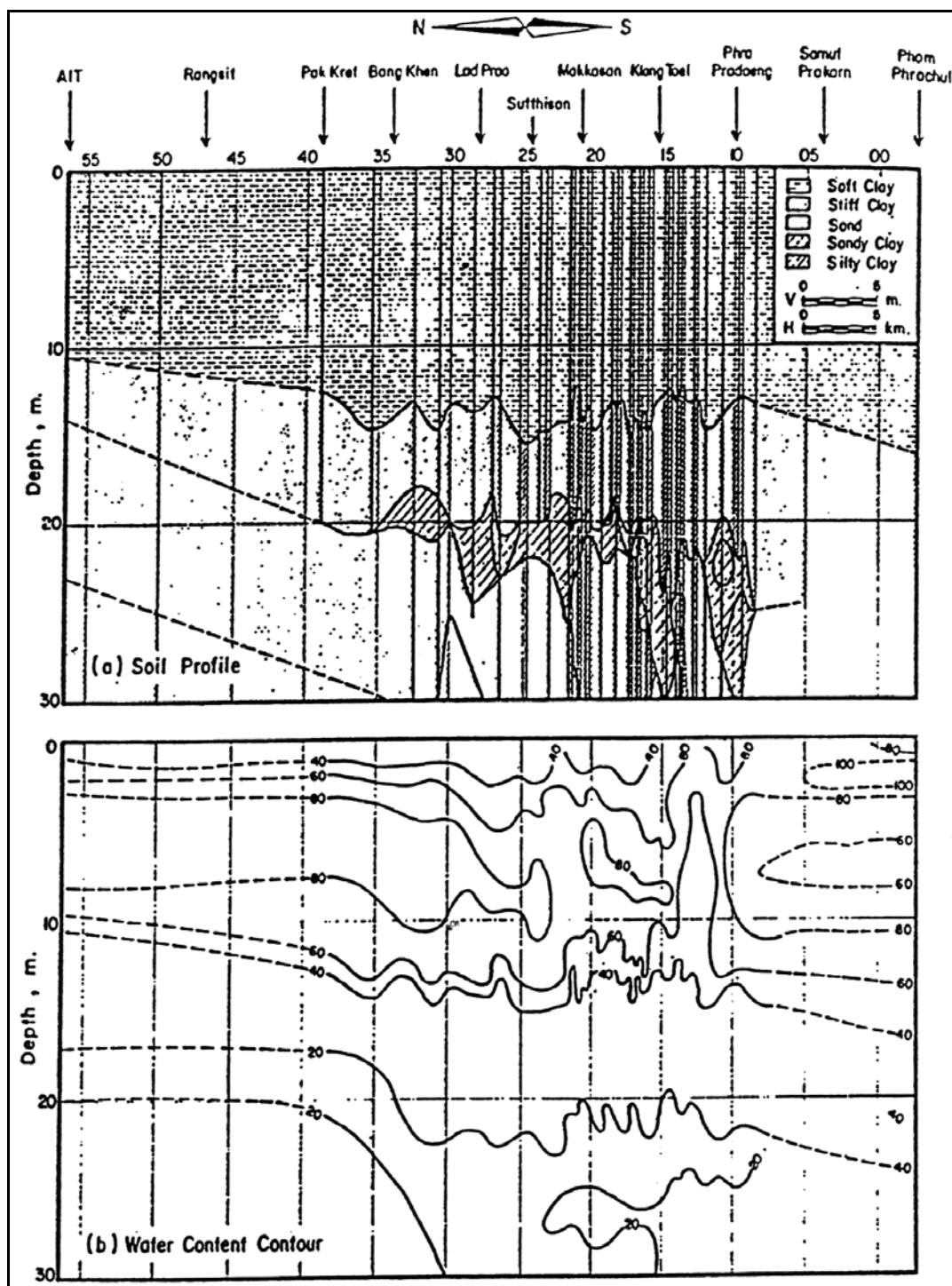
ในอดีตจนถึงปัจจุบัน มีการคิดค้นเทคนิคในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนหลายรูปแบบ เทคนิคดังกล่าวอาศัยหลักการ 2 ประการได้แก่

1. การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนโดยการเพิ่มกำลังรับน้ำหนักให้กับดิน เช่นการใช้ Soil Cement Column ดังแสดงดังภาพที่ 4

2. การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนโดยการเร่งการทรุดตัวของดินเหนียวอ่อนโดยการระบายน้ำออกจากดิน เช่น การเร่งการทรุดตัวโดยใช้ Prefabricate Vertical Drain (PVD) ดังแสดงดังภาพที่ 5

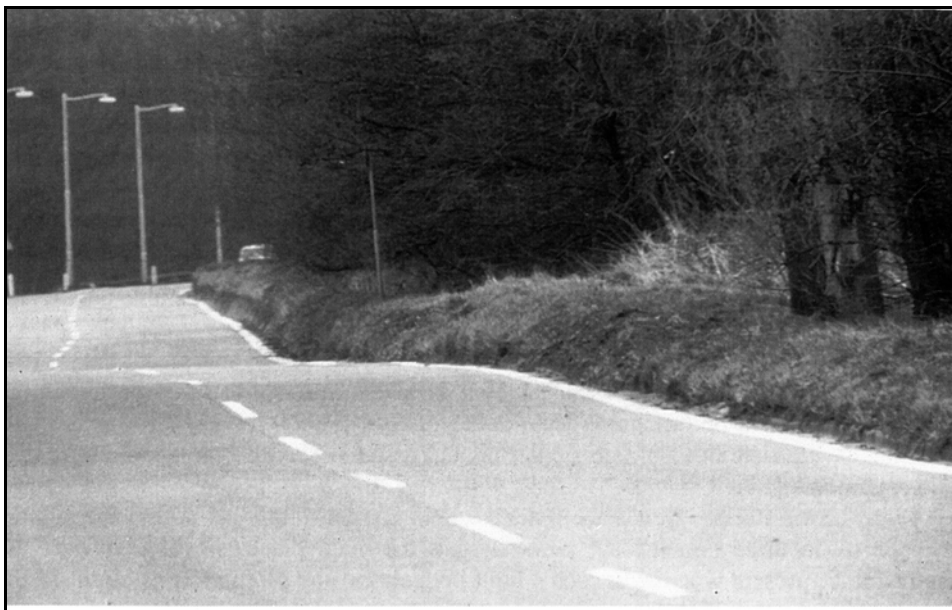
ในอดีตมีความพยายามในการปรับปรุงฐานรากดินอ่อนระดับลึก โดยใช้ความร้อน วิธีดังกล่าวต้องอาศัยพลังงานความร้อนมากซึ่งไม่เหมาะสมในประเทศเขตร้อน เมื่อพิจารณาถึงประเทศไทยซึ่งอยู่ในประเทศเขตร้อนจึงมีแนวโน้มของความเป็นไปได้ที่จะใช้พลังงานแสงอาทิตย์มาช่วยในการปรับปรุงฐานรากดินอ่อน ทั้งนี้เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ในพื้นที่ ที่มีแสงแดด ที่ตกกระทบพื้นโลก บนพื้นที่ 1 ตารางเมตร ได้พลังงานประมาณ 1,000 วัตต์ หรือเฉลี่ย 4-5 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อวัน (www.thainotebook.co.th)

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ รวมไปถึงศึกษาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของ ค่ากำลังรับน้ำหนัก-แรงดันน้ำ-การทรุดตัว กับการเพิ่ม – ลดอุณหภูมิ โดยการส่งถ่ายความร้อนลงไปชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ซึ่งความร้อนดังกล่าวผลิตจากเครื่องผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ อุณหภูมิสูงสุดในการศึกษากำหนดไว้ที่ประมาณ 90 องศาเซลเซียส โดยทำการติดตั้งเครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำ, อุณหภูมิ และการทรุดตัว รวมทั้งได้ทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของดินเหนียวอ่อน ก่อนและหลังการส่งถ่ายความร้อน ผู้วิจัยคาดว่าการศึกษาครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการลดค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อใช้เป็นฐานรากของโครงสร้างทางวิศวกรรมในอนาคต และเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการพัฒนาการวิจัยอื่นๆ ได้อีกต่อไป



ภาพที่ 1 ชั้นดิน และเส้นการกระจายตัว ของค่าปริมาณความชื้น (Water content) ของชั้นดินในเขต
กทม. ตามแนวเหนือ-ใต้

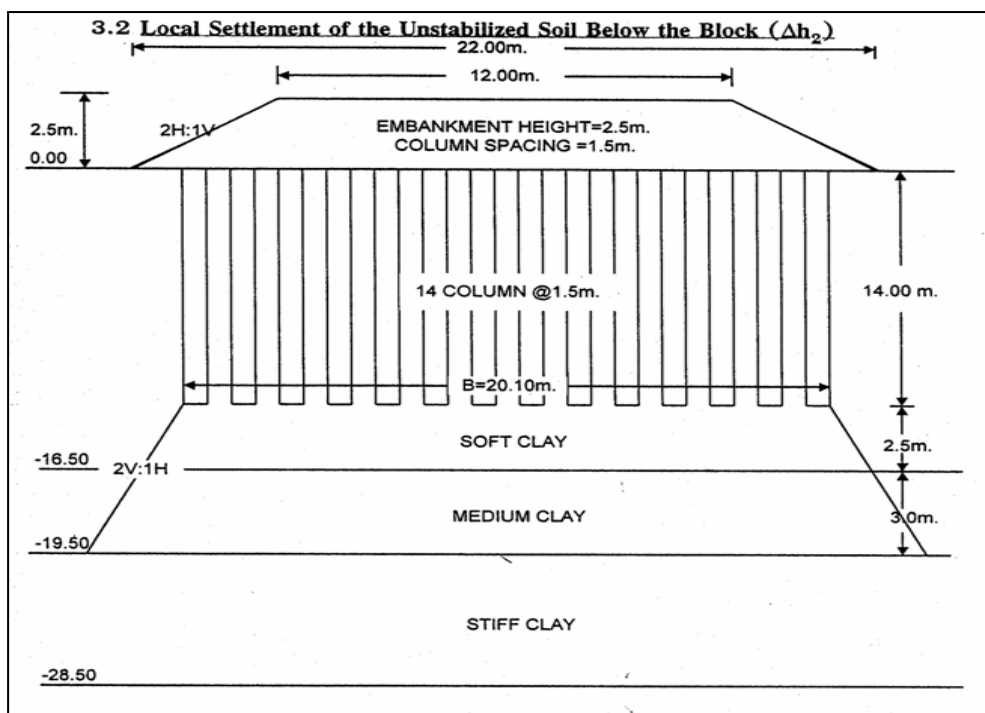
ที่มา: Tonyagate (1987)



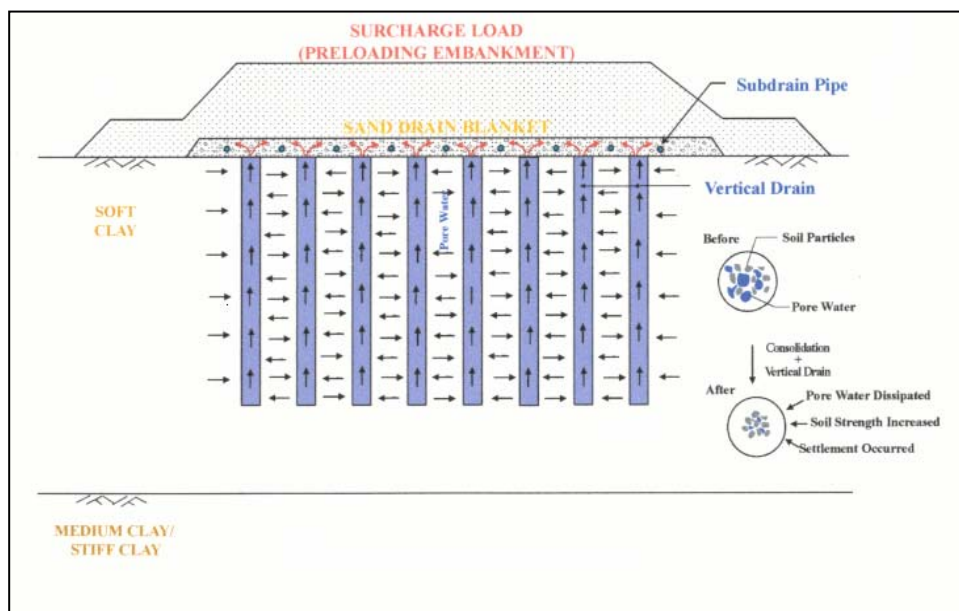
ภาพที่ 2 ปัญหาที่เกิดจากการทรุดตัวของฐานรากดินเหนียวอ่อน
ที่มา: Berkema *et al.* (1996)



ภาพที่ 3 ปัญหาที่เกิดจากเสถียรภาพต่ำของฐานรากดินเหนียวอ่อน
ที่มา: Bergado *et al.* (1992)



ภาพที่ 4 การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้ Soil Cement Column
ที่มา: Soralump (1996)



ภาพที่ 5 การปรับปรุงคุณภาพดินโดยการเร่งการระบายน้ำ ในชั้นดินเหนียวอ่อนร่วมกับน้ำหนักกดทับ

วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการวิจัยเรื่องการปรับปรุงฐานรากดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ได้แก่

1. ทดสอบประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ในสนาม
2. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำและอุณหภูมิในชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ระหว่างการทดสอบปรับปรุงคุณภาพดินด้วยความร้อนในสนาม
3. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงกำลังรับน้ำหนักของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ หลังจากการทดสอบปรับปรุงคุณภาพดินด้วยความร้อนในสนาม
4. ศึกษาการทรุดตัว ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ หลังจากการทดสอบปรับปรุงคุณภาพดินด้วยความร้อน
5. ศึกษาพฤติกรรมการแผ่กระจายความร้อนในแนวราบของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ
6. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันน้ำส่วนเกิน กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในแนวราบที่ระยะต่างๆ
7. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันน้ำส่วนเกินกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตร
8. ศึกษาความคุ้มค่าของการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

ขอบเขตการวิจัย

1. การทดสอบในสนาม ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์วัดพฤติกรรมดินเหนียวอ่อน และทดสอบดินเหนียวอ่อนถึงระดับความลึก 5 เมตรจากระดับดินเดิม
2. การวิจัยดำเนินการเฉพาะชั้นดินเหนียวอ่อนธรรมชาติในสภาพ ดินเหนียวอ่อนถูกอัดตัวปกติ (Normally Consolidated Clay)
3. ทำการทดสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวอ่อนตั้งแต่ชั้นความลึก 0-5 เมตรจากระดับดินเดิม ก่อนและหลังการให้ความร้อน ในห้องปฏิบัติการ

การตรวจเอกสาร

หลักการการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยความร้อน

ความร้อนมีผลต่อความหนืดของน้ำในมวลดิน การเพิ่มความร้อนให้กับดินเหนียวอ่อนทำให้น้ำในมวลดินมีค่าความหนืดลดลง จึงทำให้เกิดการขยายปริมาตรของน้ำและของแข็ง จึงทำให้เกิดช่องว่างภายในมวลดินเพิ่มขึ้น และน้ำจึงสามารถระบายออกจากอนุภาคดินเหนียวได้ง่ายขึ้น ผลภายหลังอนุภาคดินมีแนวโน้มเกิดการอัดเรียงตัวขึ้นใหม่ ทำให้ดินเหนียวเกิดแนวโน้มมีค่ากำลังรับน้ำหนักมากขึ้นด้วย (Paaswell, 1967; Plum and Esrig, 1969)

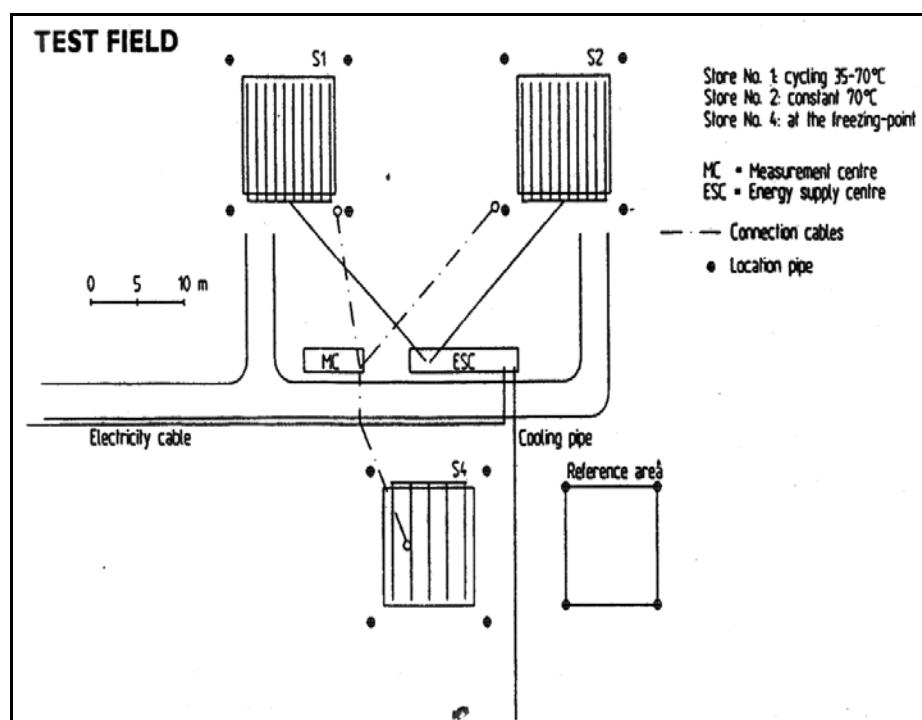
1. การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยความร้อนในสนาม

Gabrielsson *et al.* (1997) ได้ทำการทดสอบในสนามเพื่อศึกษาการทรุดตัวของดินเหนียวในประเทศสวีเดน โดยการส่งถ่ายความร้อนลงไปยังชั้นดินที่ความลึกถึงระดับ 10 เมตรจากผิวดินเดิม และทำการทดสอบเป็นระยะเวลา 3 ปี ภาพที่ 6 และ 7 แสดงรูปแบบการทดสอบและเครื่องมือติดตั้ง การทดสอบดำเนินการโดยติดตั้งท่อทนความร้อนลงไปในชั้นดินถึงความลึก 10 เมตร และมีระยะห่างระหว่างจุดที่ติดตั้งท่อเท่ากับ 1 เมตร การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ

1. รูปแบบที่ 1 ทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นรอบ อุณหภูมิอยู่ในช่วง 35-70 องศาเซลเซียส ทั้งหมด 6 รอบในระยะเวลา 3 ปี ดังภาพที่ 8
2. รูปแบบที่ 2 ทำการรักษาอุณหภูมิให้คงที่ ที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ปี ดังภาพที่ 8

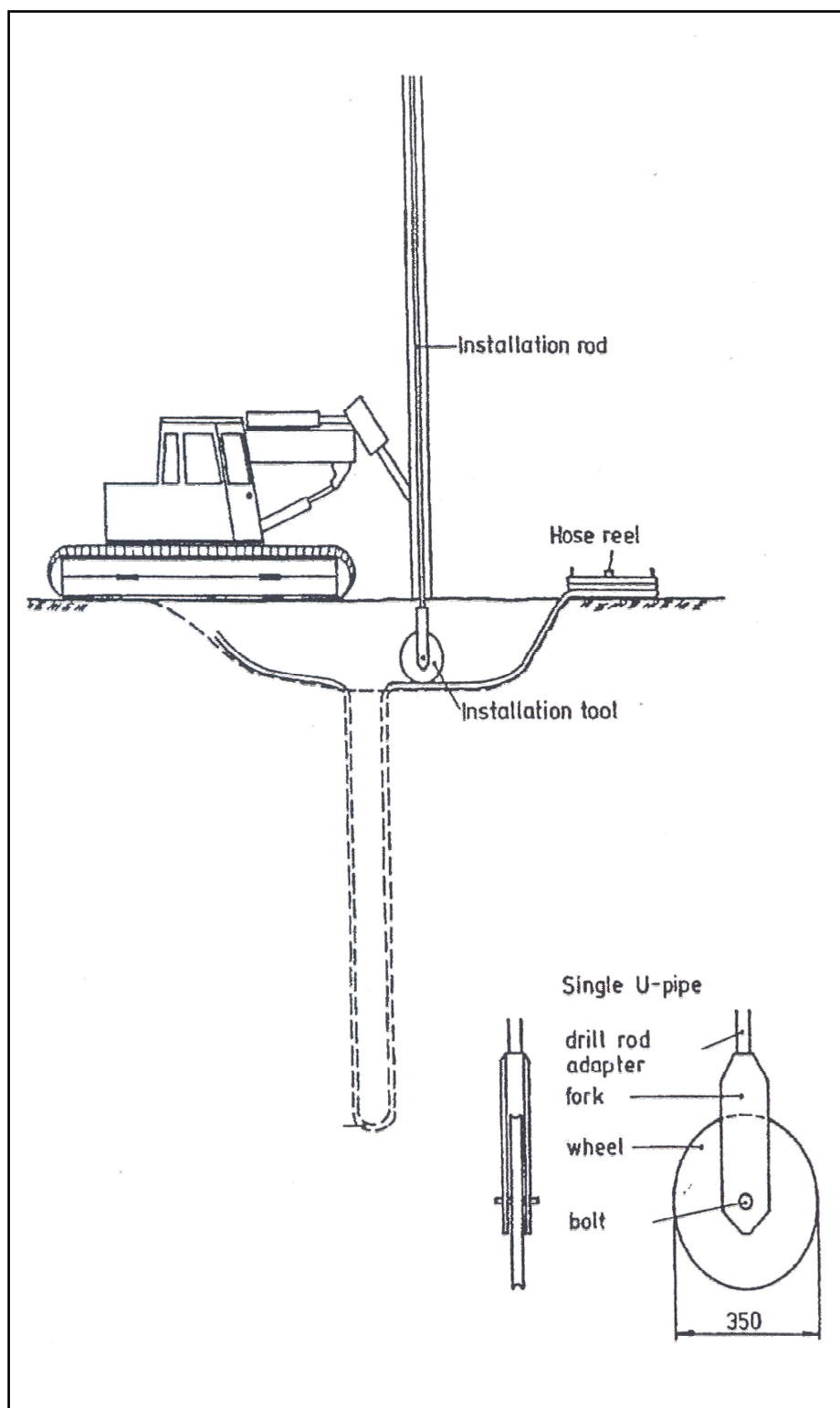
ผลการทดสอบ แสดงดังภาพที่ 9 การทรุดตัวแบบที่ 1 จะได้ผลการทรุดตัวรวมตลอด 3 ปี เท่ากับ 72 มม. และการทรุดตัวแบบที่ 2 เท่ากับ 88 มม. การทรุดตัววัดที่จุดกึ่งกลางการให้ความร้อน ผลการของแรงดันน้ำส่วนเกินของรูปแบบที่ 1 จะเพิ่มขึ้น และลดลงตามอุณหภูมิที่ให้กับชั้นดิน แต่ค่าที่เพิ่มขึ้นสูงสุดของแรงดันน้ำส่วนเกินในแต่ละรอบของการเพิ่มอุณหภูมิมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ แสดงดังภาพที่ 10 ส่วนในรูปแบบที่ 2 แรงดันน้ำส่วนเกินเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในช่วง 3 เดือนแรก และลดลงสู่สภาวะปกติดังภาพที่ 11 การติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำของทั้ง 2 รูปแบบติดตั้งที่ความ

ลึก 3.5 เมตร 6 เมตร และ 9 เมตรตามลำดับในส่วนของค่ากำลังรับแรงเฉือนซึ่งทำการทดสอบในสนามโดยวิธี Vane Shear ที่ความลึก 6 เมตร ณ เวลาต่างกัน ค่ากำลังรับแรงเฉือนจะลดลงช่วงแรก และระยะเวลาหลังจาก 1 ปีไปแล้วค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้ง 2 รูปแบบ โดยที่การทดสอบในสนามครั้งนี้ไม่มีการติดตั้งทางระบายน้ำออกจากดิน ภาพที่ 12 แสดงผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินเหนียว ซึ่งทำการทดสอบโดยเก็บตัวอย่างดินระหว่างการให้ความร้อนที่ระดับความลึก 3.5 เมตร 6 เมตร 9 เมตร และ 12 เมตรตามลำดับ ตัวอย่างที่เก็บขึ้นมาของรูปแบบที่ 1 ทำการปล่อยทิ้งไว้ให้ตัวอย่างดินเย็นลงถึง 20 องศาเซลเซียสแล้วจึงทำการทดสอบส่วนตัวอย่างดินในรูปแบบที่ 2 อุณหภูมิของตัวอย่างขณะทำการทดสอบคุณสมบัติของดินมีค่าระหว่าง 20 – 45 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พบว่าค่าคุณสมบัติของดินที่ระดับความลึกเดียวกันไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติพื้นฐานของดินดังแสดงผลในภาพที่ 13 และ 14



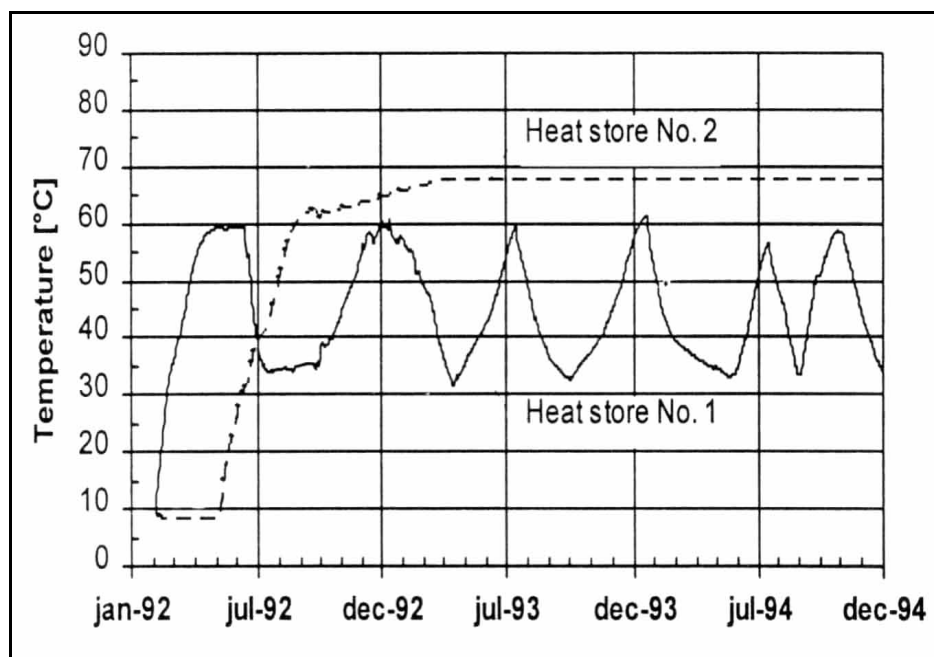
ภาพที่ 6 รูปแบบการทดสอบในสนาม

ที่มา: Gabrielsson *et al.* (1997)

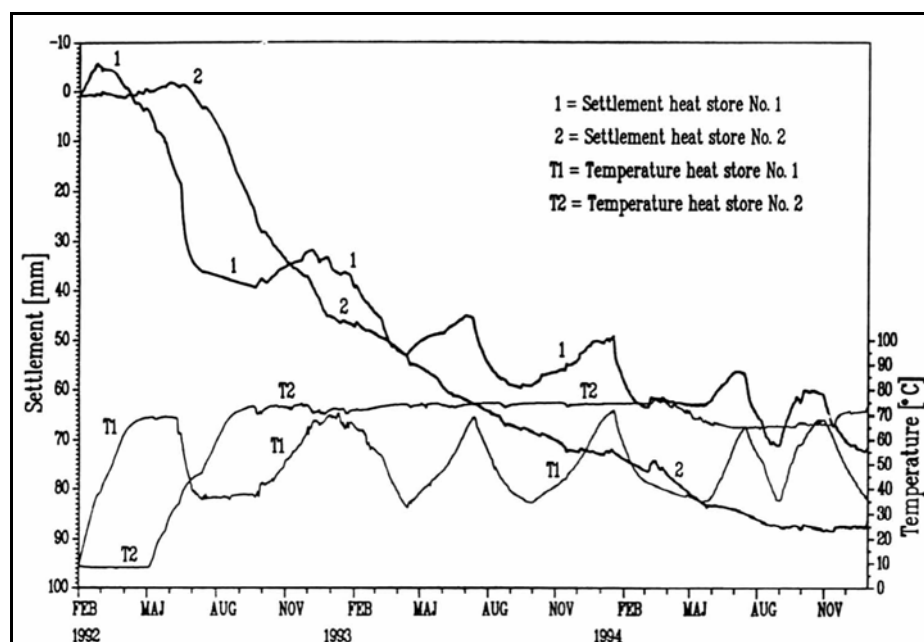


ภาพที่ 7 เครื่องจักรในการติดตั้งอุปกรณ์ในสนาม

ที่มา: Gabrielsson *et al.* (1997)

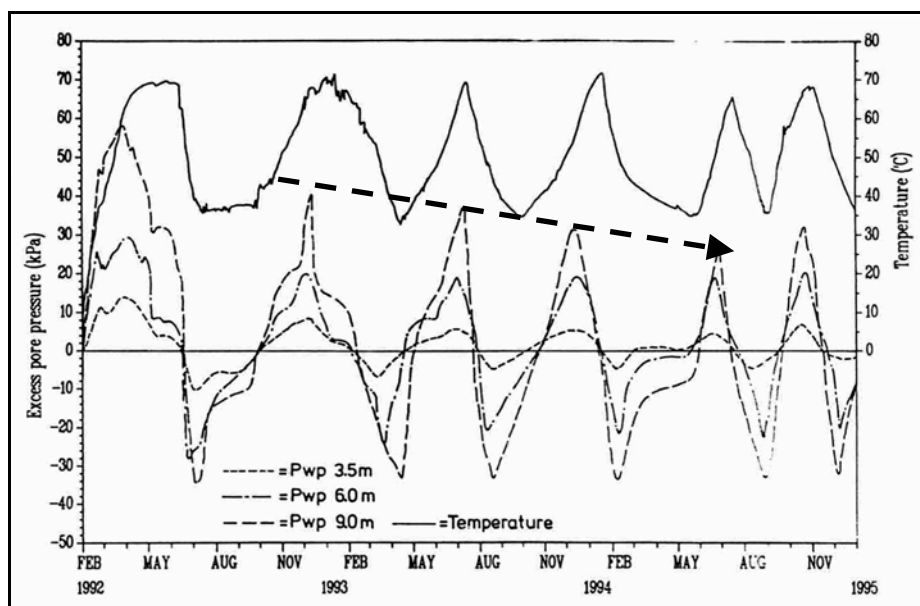


ภาพที่ 8 รูปแบบการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนในสนามทั้ง 2 รูปแบบ
ที่มา: Gabrielsson *et al.* (1997)



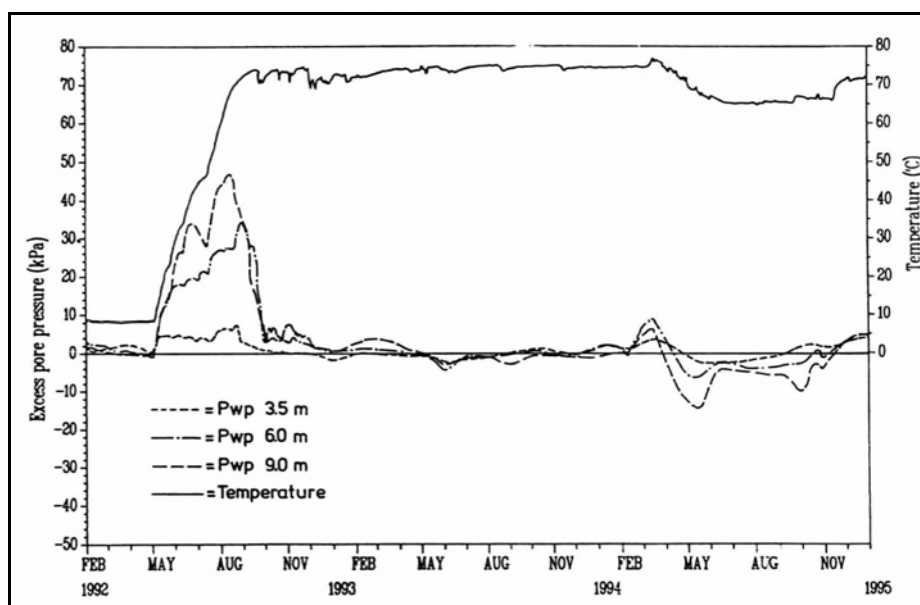
ภาพที่ 9 การทรุดตัวที่เกิดขึ้นทั้งหมดของการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยความ
ร้อนทั้ง 2 รูปแบบ

ที่มา: Gabrielsson *et al.* (1997)



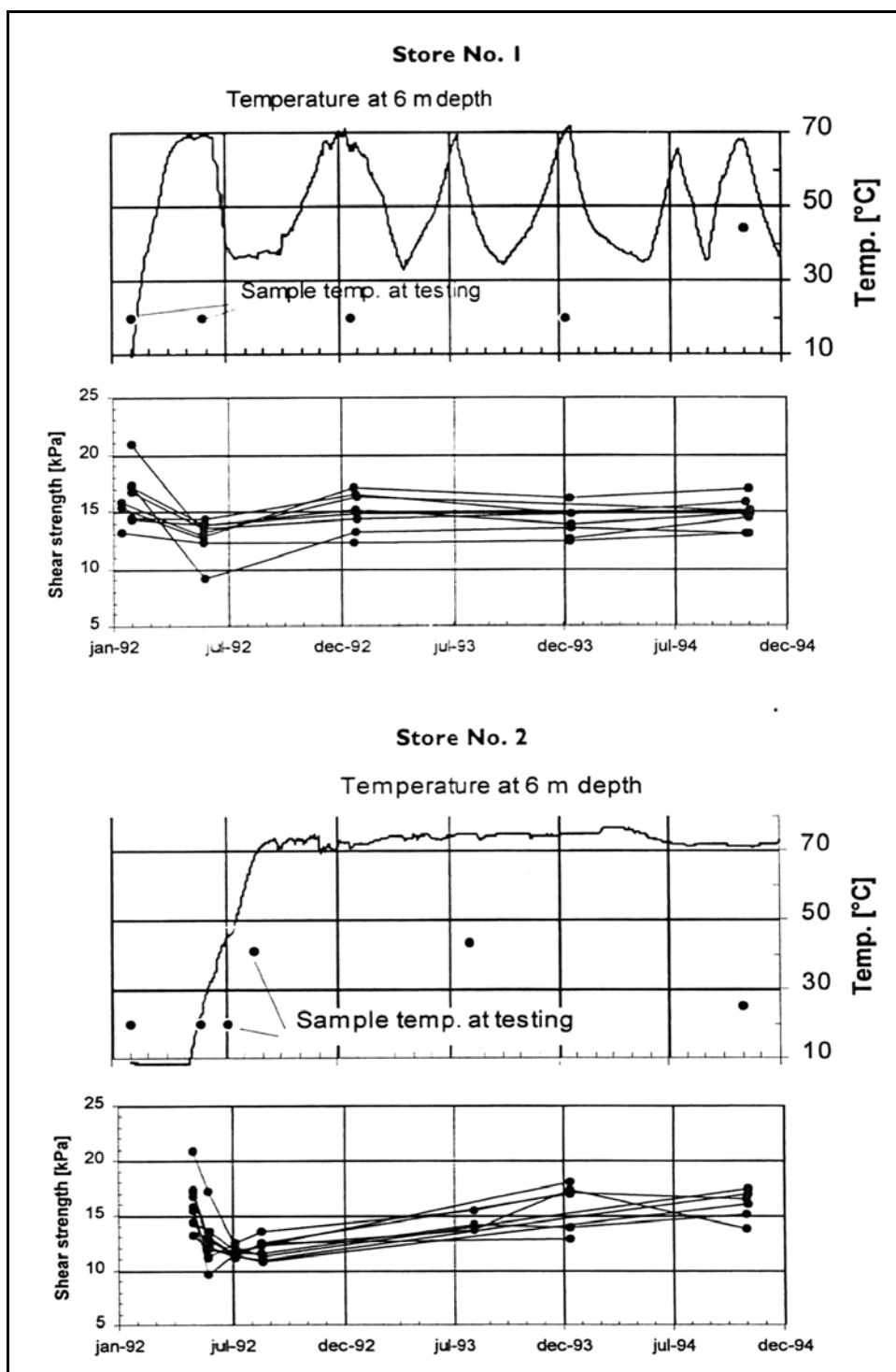
ภาพที่ 10 ลักษณะการลดลงของแรงดันน้ำส่วนเกิน กับเวลาตามรอบของการให้อุณหภูมิแก่ดินเหนียวอ่อนในสนามรูปแบบที่ 1

ที่มา: คัดแปลงจาก Gabrielsson *et al.* (1997)

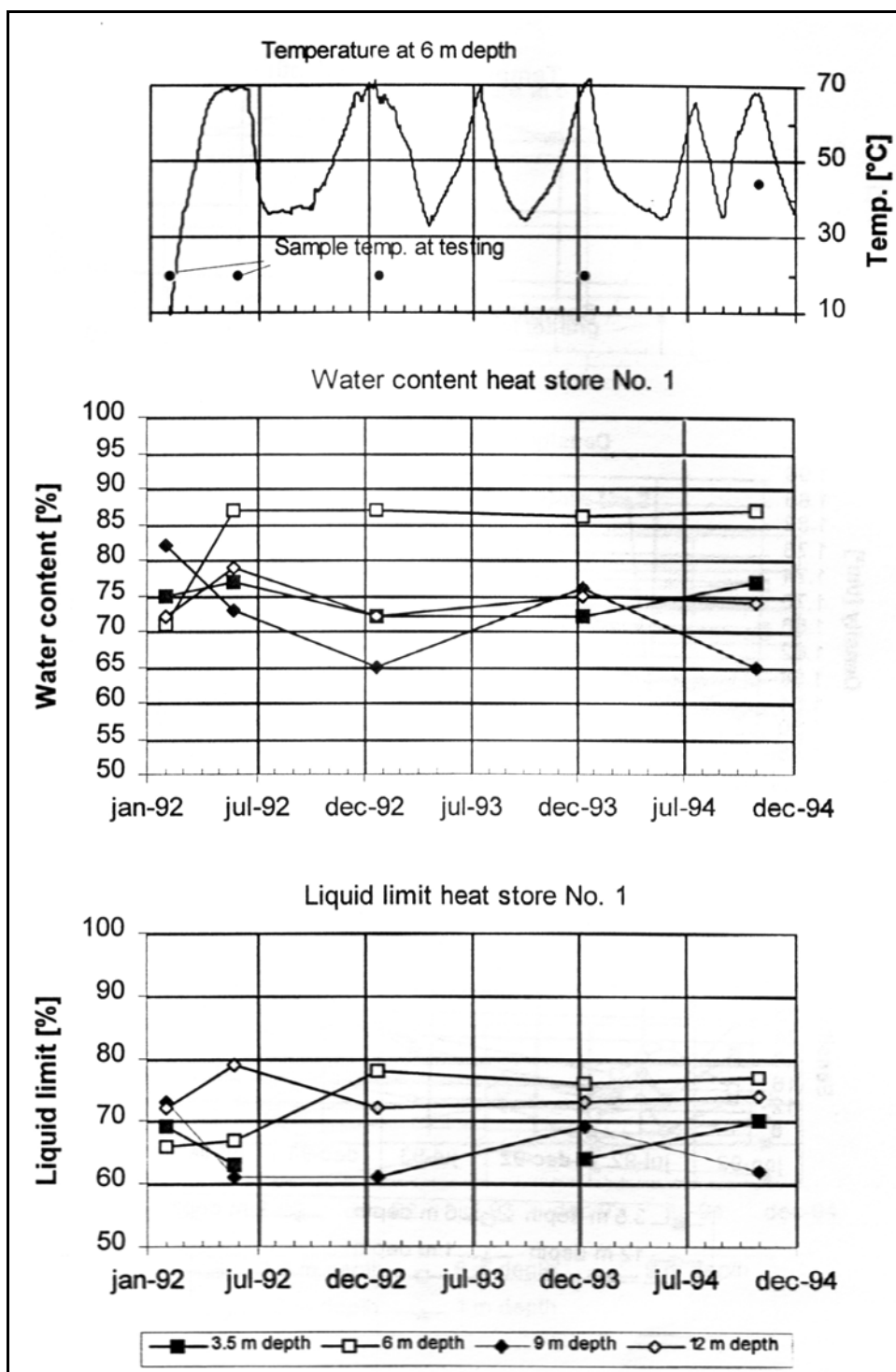


ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำส่วนเกิน กับอุณหภูมิของการทดสอบการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนในสนามรูปแบบที่ 2

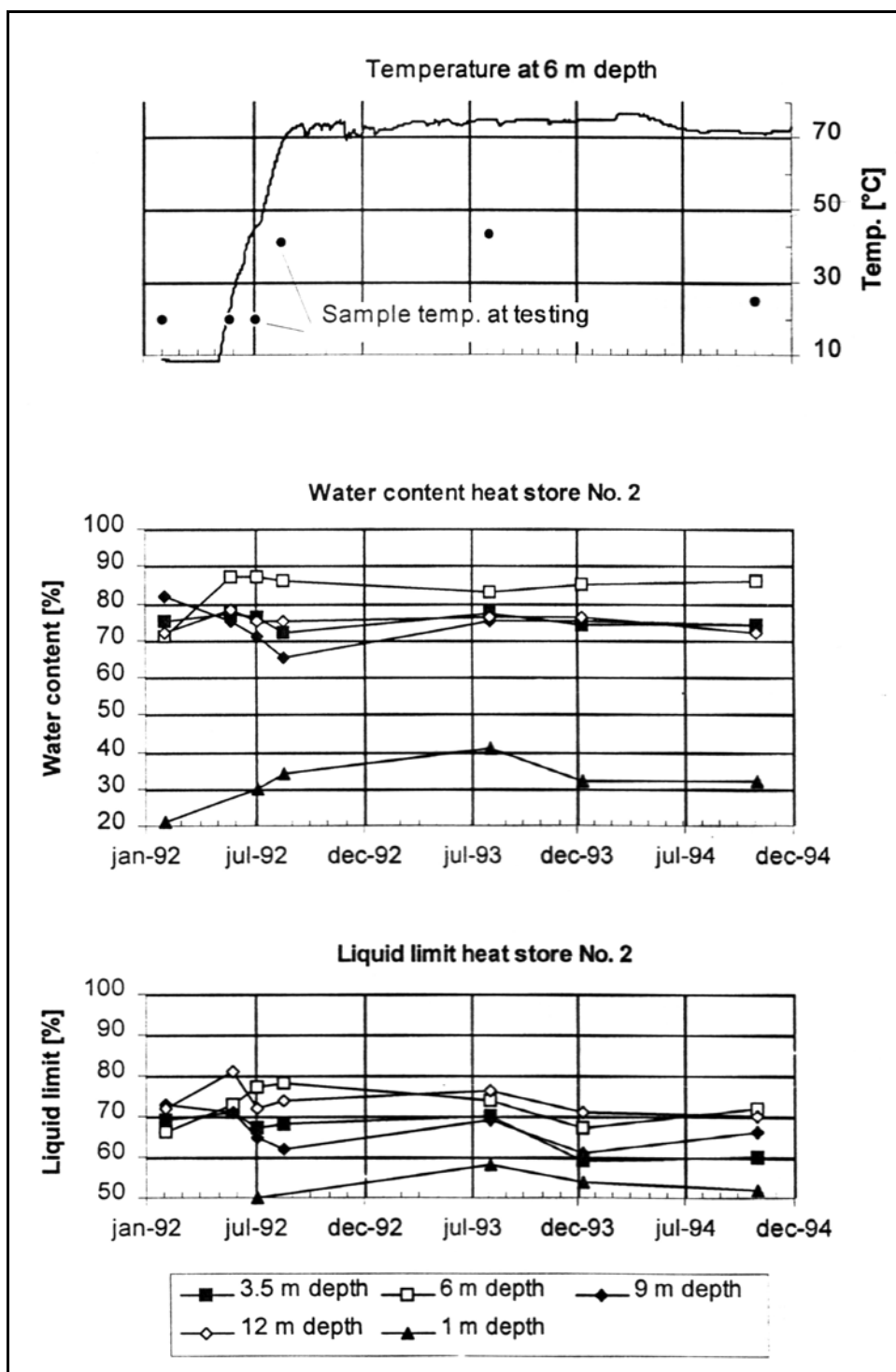
ที่มา: Gabrielsson *et al.* (1997)



ภาพที่ 12 การเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนในดินที่ความลึก 6 เมตรทดสอบโดยใช้ Vane Shear ระหว่าง
การทดสอบปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนในสนามทั้ง 2 รูปแบบ
ที่มา: Gabrielsson *et al.* (1997)



ภาพที่ 13 คุณสมบัติของดินหลังการปรับปรุงคุณภาพดินแบบเพิ่ม – ลดอุณหภูมิ (แบบที่ 1)
 ที่มา: Gabriellsson *et al.* (1997)



ภาพที่ 14 คุณสมบัติของดินหลังการปรับปรุงคุณภาพดินแบบคงที่อุณหภูมิ (แบบที่ 2)
 ที่มา: Gabrielsson *et al.* (1997)

2. การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยความร้อน กับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินเหนียวอ่อน

อิทธิพลของความร้อนมีผลทำให้ปริมาตรของดินเหนียวเกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากพลังงานความร้อนที่ส่งผ่านไปยังชั้นดินเหนียว จะมีผลโดยตรงกับการเพิ่มขึ้นของปริมาตรน้ำในมวลดิน นอกจากนั้นเมื่อมีความร้อนเพิ่มมากขึ้นทำให้ความชื้นลดลง และสามารถเกิดการไหลได้ง่ายจากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าพฤติกรรมของดินเหนียวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ สามารถอธิบายได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

2.1. อิทธิพลของความร้อนกับพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในดินเหนียวถูกอัดตัวปกติ (Normally Consolidated Clay)

การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินเหนียวถูกอัดตัวปกติ เมื่ออุณหภูมิในดินสูงขึ้นจะทำให้ น้ำที่อยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน และน้ำรอบอนุภาคดิน (Double layer) พยายามไหลออกจากตำแหน่งเดิม ผลต่อเนื่องเมื่อน้ำระหว่างอนุภาคลดลง ทำให้อนุภาคสามารถเคลื่อนตัวเข้าหากันได้ ใกล้กันมากขึ้น จึงทำให้ปริมาตรของดินเกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะลดลง (Paaswell, 1967; Plum and Esrig, 1969; Towhata *et al.*, 1993)

2.2. อิทธิพลของความร้อนกับพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในดินเหนียวถูกอัดตัวมากกว่าปกติ (Overconsolidated Clay)

ในกรณีดินชนิดเดียวกัน สำหรับดินเหนียวถูกอัดตัวมากกว่าปกติ จะมีอัตราส่วนช่องว่างน้อยกว่าดินเหนียวที่ถูกอัดตัวปกติ เพราะดินชนิดนี้เคยรับน้ำหนักในอดีตมากกว่าในปัจจุบัน ดังนั้นเมื่อมีการส่งถ่ายพลังงานความร้อนให้กับชั้นดิน น้ำเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการขยายปริมาตรขึ้น ทำให้ปริมาตรเดิมของดินเหนียวถูกอัดตัวมากกว่าปกติ มีอนุภาคของดินอยู่ใกล้กันมาก จึงมีแนวโน้มเกิดการขยายปริมาตรตามการขยายปริมาตรของน้ำและของแข็ง หลังจากน้ำในมวลดินไหลออกจากชั้นดินแล้ว อนุภาคดินจะมีการเรียงตัวใหม่ทำให้ปริมาตรของดินลดลงอีกครั้ง ดังนั้นพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินเหนียวถูกอัดตัวมากกว่าปกติ จะมีลักษณะขยายปริมาตรในช่วงแรก และปริมาตรจะลดลงในช่วงหลัง (Paaswell, 1967; Plum and Esrig, 1969; Towhata *et al.*, 1993)

Towhata *et al.* (1993) ได้ทดลองศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงปริมาตร เนื่องจากความร้อนของดินเหนียว ทั้งในดินเหนียวที่ถูกอัดตัวปกติ และดินเหนียวที่ถูกอัดตัวมากกว่าปกติ ซึ่งทดสอบโดยวิธีอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) ภาพที่ 15 แสดงเครื่องมือการทดสอบ ซึ่งทำการทดสอบกับดินเหนียวแบบเปลี่ยนสภาพ ที่มีแร่ธาตุส่วนใหญ่เป็นคาโอลีน และเบนโทไนท์ โดยเพิ่มความร้อนให้กับดินถึง 90 องศาเซลเซียส ดังแสดงผลในภาพที่ 16 - 17 นอกจากนั้นผลงานวิจัยของ Grino (2004) ซึ่งทำการทดสอบกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ แบบคงสภาพที่ความลึก 3-4 เมตร โดยทำการทดสอบโดยใช้เครื่องมือทดสอบแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial Cell) ดังภาพที่ 18 ทำการทดสอบกับดินเหนียวในลักษณะที่ถูกอัดตัวปกติ และถูกอัดตัวมากกว่าปกติ ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 19 Rujivipat (2004) ทำการทดสอบกับตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ แบบคงสภาพ โดยทำการทดสอบแบบการอัดตัวคายน้ำ ภาพที่ 20 แสดงเครื่องมือการทดสอบ และภาพที่ 21 แสดงผลการทดสอบ

จากผลงานวิจัยข้างต้น พบว่าความร้อนจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในดินเหนียวถูกอัดตัวปกติ มากกว่าในดินเหนียวถูกอัดตัวมากกว่าปกติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งดินเหนียวมีค่า OCR สูง อุณหภูมิจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อยมาก (Grino, 2004; Rujivipat, 2004)

การเปลี่ยนแปลงปริมาตรในดินเนื่องจากความร้อนมีผลมาจากการขยายปริมาตรของทั้งน้ำและดิน Campanella และ Mitchell (1968) ได้เสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของน้ำและดิน กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

$$\Delta V_w = \alpha_w \cdot V_{w0} \cdot \Delta T \quad (1)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \Delta V_w &= \text{ปริมาตรน้ำที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ} \\ \alpha_w &= \text{สัมประสิทธิ์การขยายตัวของปริมาตรของน้ำ} \\ V_{w0} &= \text{ปริมาตรเริ่มต้นของน้ำ} \\ \Delta T &= \text{อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง} \end{aligned}$$

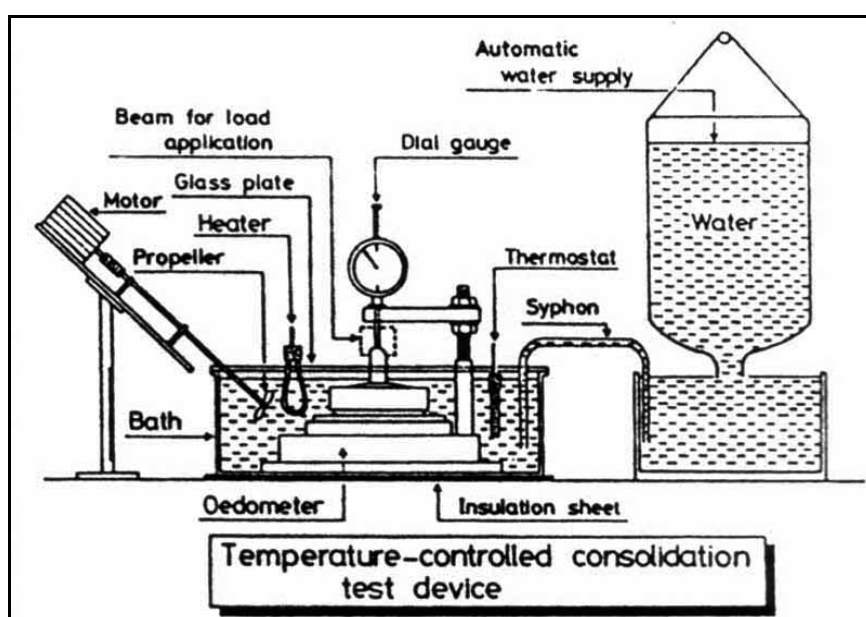
$$\Delta V_s = \alpha_s \cdot V_{s0} \cdot \Delta T \quad (2)$$

เมื่อ

ΔV_s = ปริมาตรดินที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

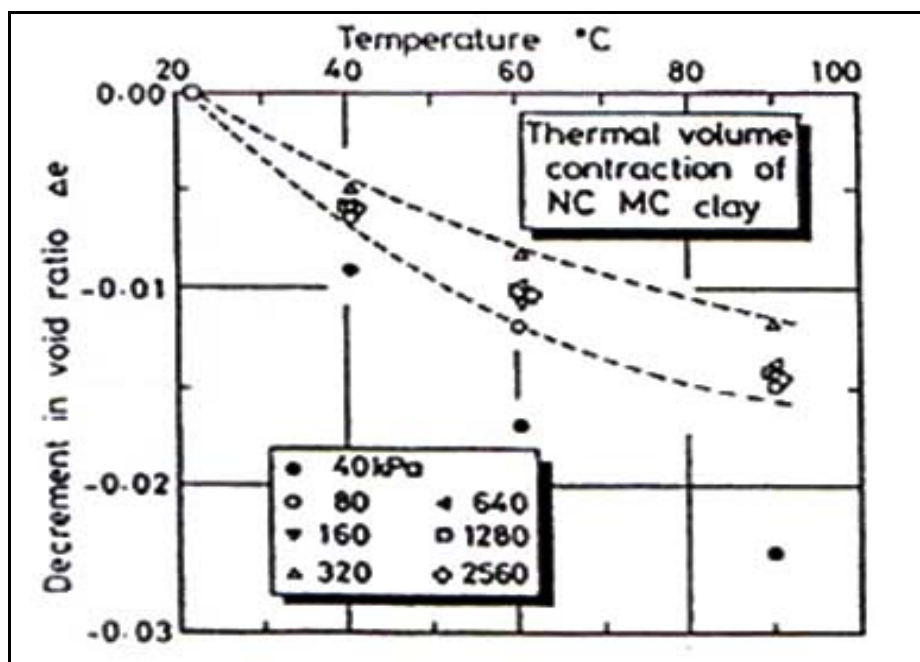
α_s = สัมประสิทธิ์การขยายตัวของปริมาตรของดิน

V_{s0} = ปริมาตรเริ่มต้นของดิน

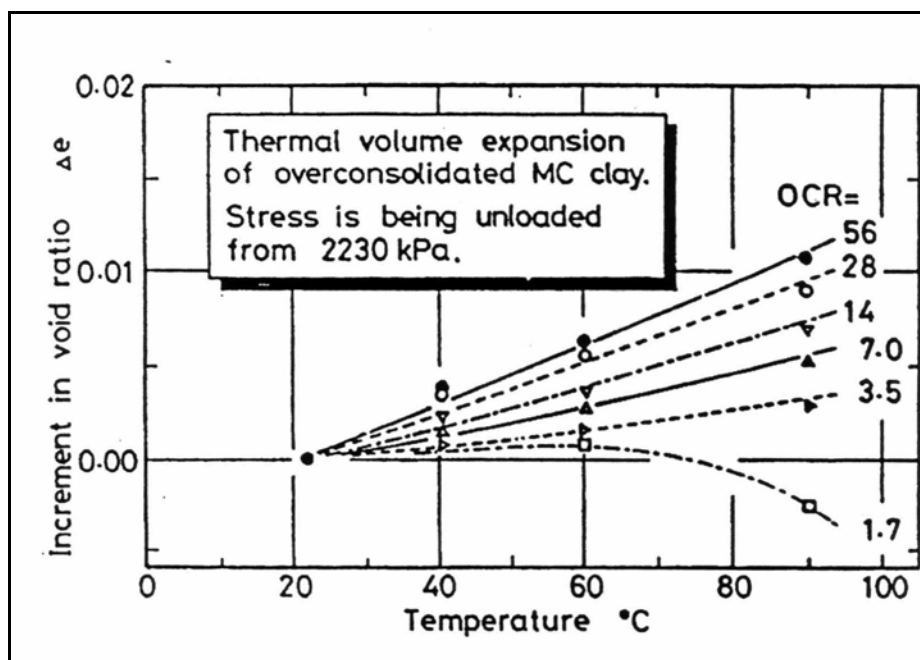


ภาพที่ 15 เครื่องมือทดสอบแบบการอัดตัวคายน้ำ (Oedometer) สำหรับการทดสอบการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินเหนียวอ่อน

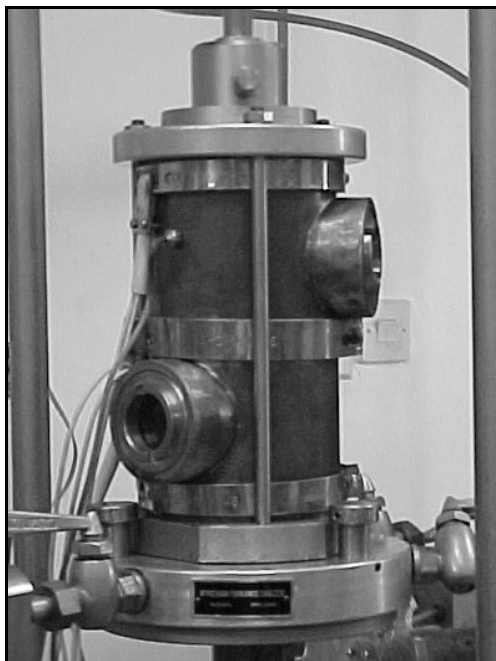
ที่มา: Towhata *et al.* (1993)



ภาพที่ 16 การเปลี่ยนแปลงปริมาตร กับ อุณหภูมิของดินเหนียวถูกอัดตัวปกติ
ที่มา: Towhata *et al.* (1993)

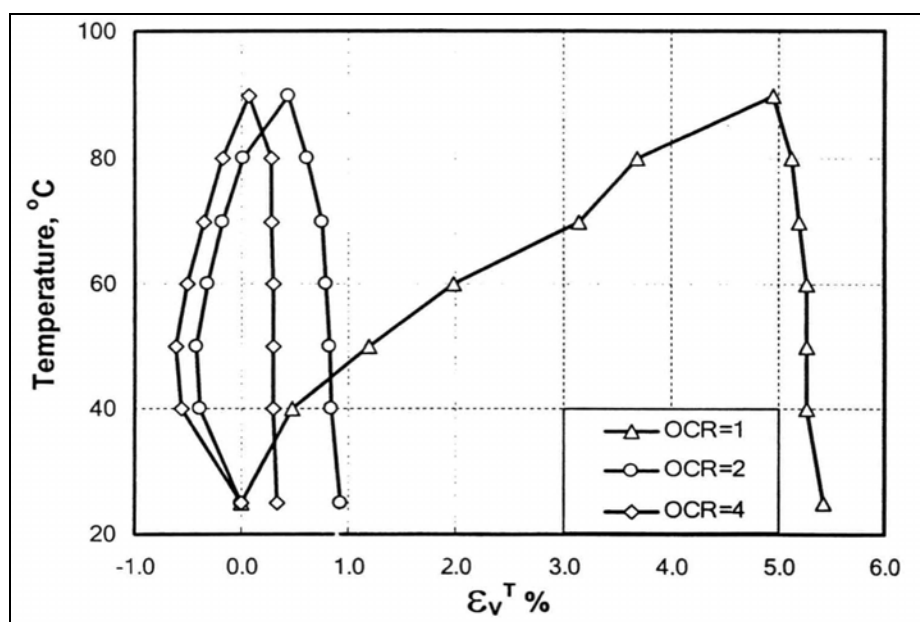


ภาพที่ 17 การเปลี่ยนแปลงปริมาตร กับ อุณหภูมิของดินเหนียวถูกอัดตัวมากกว่าปกติในลักษณะที่
เพิ่มน้ำหนักจนถึง 2,230 kPa และลดน้ำหนักลงทำให้ดินเกิดการขยายปริมาตรขึ้น
ที่มา: Towhata *et al.* (1993)



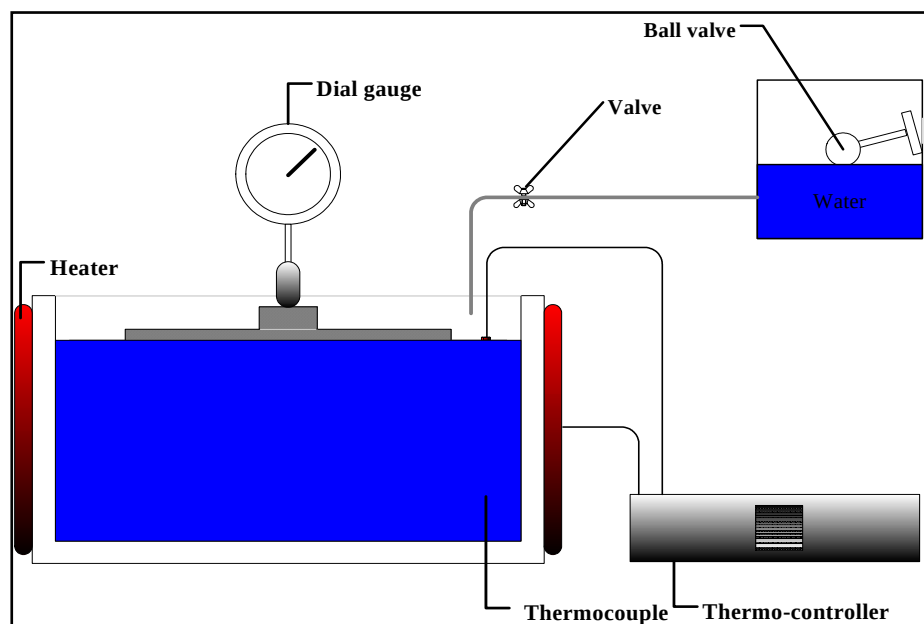
ภาพที่ 18 เครื่องมือทดสอบแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial Cell) สำหรับการทดสอบเปลี่ยนแปลง
อุณหภูมิของตัวอย่างดิน

ที่มา: Grino (2004)



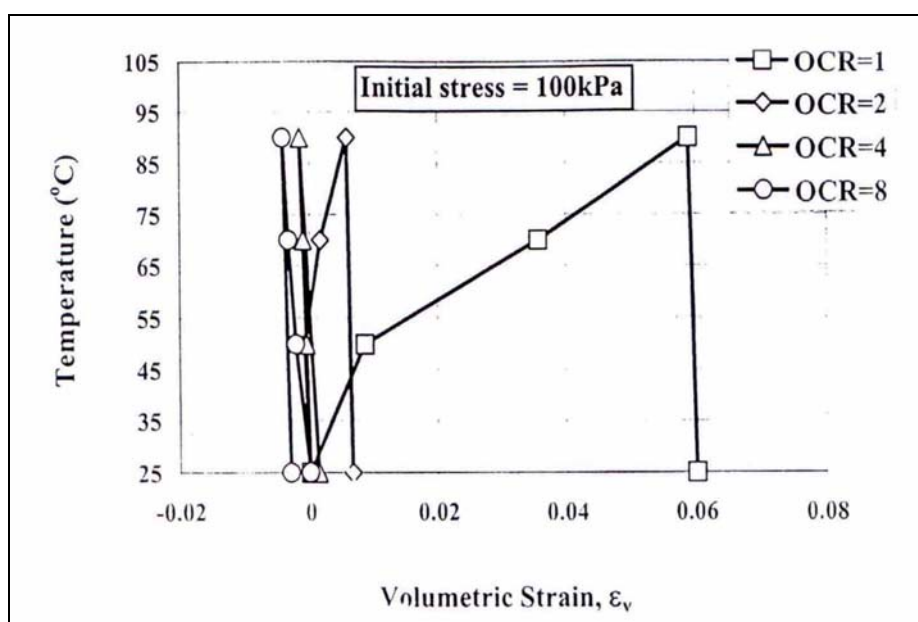
ภาพที่ 19 การเปลี่ยนแปลงปริมาตร กับอุณหภูมิ ของตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ แบบคงสภาพที่
ค่า OCR = 1, 2 และ 4

ที่มา: Grino (2004)



ภาพที่ 20 เครื่องมือทดสอบการอัดตัวคายน้ำตัดแปลงเพื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในมวลดิน

ที่มา: Rujivipat (2004)



ภาพที่ 21 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรกับอุณหภูมิ ของตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ แบบคงสภาพที่มีค่า OCR = 1, 2, 4 และ 8

ที่มา: Rujivipat (2004)

3. การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยความร้อน กับการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำส่วนเกินของดินเหนียวอ่อน

การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของน้ำและดินเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำในดินเหนียวทั้ง 2 ลักษณะดังนี้

3.1. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำส่วนเกินในดินเหนียวถูกอัดตัวปกติ

การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยความร้อน ส่งผลทำให้แรงดันน้ำในมวลดินเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น ซึ่งน้ำในมวลดินได้รับผลกระทบโดยตรงจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ทั้งน้ำและของแข็ง จึงเกิดการขยายปริมาตร แต่น้ำสามารถขยายปริมาตรได้มากกว่าของแข็งมาก จึงทำให้แรงดันน้ำในดินเพิ่มสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น โดยที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำในดิน เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการขยายปริมาตรของน้ำจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทำให้อัตราการเพิ่มขึ้น และลดลงของแรงดันน้ำในมวลดิน เกิดการเปลี่ยนแปลงตามค่าอุณหภูมิของดินที่เพิ่มขึ้น และลดลง (Campanella and Mitchell, 1968)

3.2. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำส่วนเกินในดินเหนียวถูกอัดตัวมากกว่าปกติ

ดินเหนียวถูกอัดตัวมากกว่าปกติ จะมีอัตราส่วนช่องว่างภายในดินน้อยกว่าในดินเหนียวถูกอัดตัวปกติ ดังนั้นเมื่อมีการส่งถ่ายความร้อนให้กับดินเหนียวลักษณะนี้ แรงดันน้ำจะเกิดขึ้นน้อยกว่าเนื่องจากช่องว่างในดินมีน้อย การยึดเกาะระหว่างอนุภาคดินจะแข็งแรงมากกว่า จึงทำให้การขยายปริมาตรของน้ำเกิดขึ้นได้ยากกว่าในดินเหนียวถูกอัดตัวปกติ แต่การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำมีแนวโน้มตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และลดลง ในลักษณะเดียวกันกับดินเหนียวถูกอัดตัวปกติ แต่มีสัดส่วนที่เล็กกว่า (Tanaka *et al.*, 1997; Grino, 2004)

Tanaka *et al.* (1997) ได้ทำการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำ ที่ค่าแรงดันในการกดตัวอย่างดินต่างๆกัน กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของดินเหนียวอิลลิติกแบบเปลี่ยนสภาพ ในช่วงแรกของการทดสอบ ทำการทดสอบแบบการอัดตัวคายน้ำ ซึ่งนำดินตัวอย่างมา

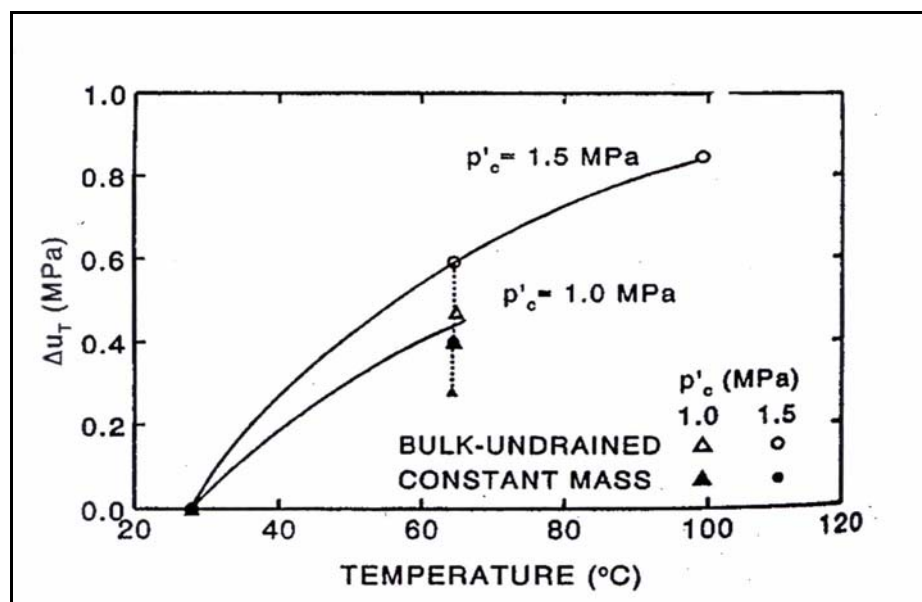
ทำการอัดตัวคายน้ำช่วงแรงดัน 0.5 – 1.5 MPa ทั้งดินเหนียวถูกอัดตัวปกติ และดินเหนียวถูกอัดตัวมากกว่าปกติ แสดงดังภาพที่ 22 และทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้ในภาพที่ 12 กับค่าแรงกดในการอัดตัวคายน้ำเริ่มต้นคือ 0.5 MPa (p'_c) และค่าแรงกดในการอัดตัวคายน้ำที่ค่าสุดท้ายคือ 1.5 MPa (p'_{cons}) แสดงผลดังภาพที่ 23 นอกจากนี้ผลงานวิจัยของ Grino (2004) ได้ทำการทดสอบโดยเครื่องมือแบบแรงอัดสามแกน โดยการเพิ่มและลดอุณหภูมิให้กับตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ แบบคงสภาพที่มีค่า OCR ต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 24 และ 25

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมา เห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้

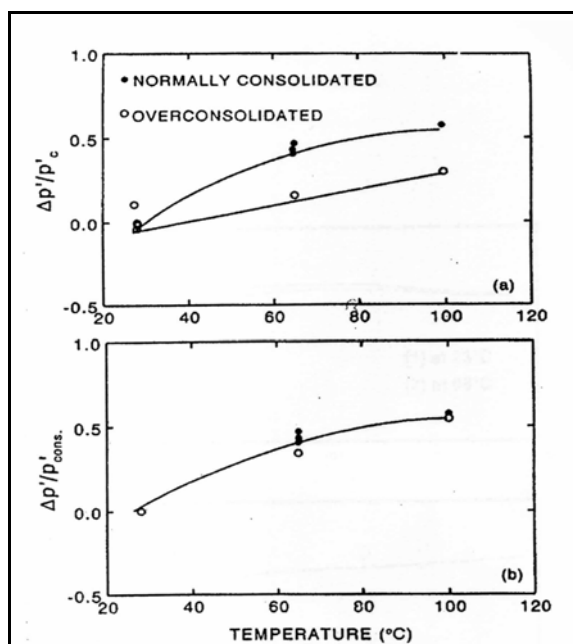
ก. ค่า OCR (Tanaka *et al.*, 1997; Grino, 2004)

ข. น้ำหนักที่กดทับระหว่างการทดสอบ (Hueckel and Pellegrini, 1992; Tanaka *et al.*, 1997; Grino, 2004)

ค. อัตราการเพิ่ม-ลดอุณหภูมิ (Campanella and Mitchell, 1968; Agar *et al.*, 1987, Hueckel and Pellegrini, 1992; Tanaka *et al.*, 1997, Gabrielsson *et al.*, 1997; Grino, 2004)

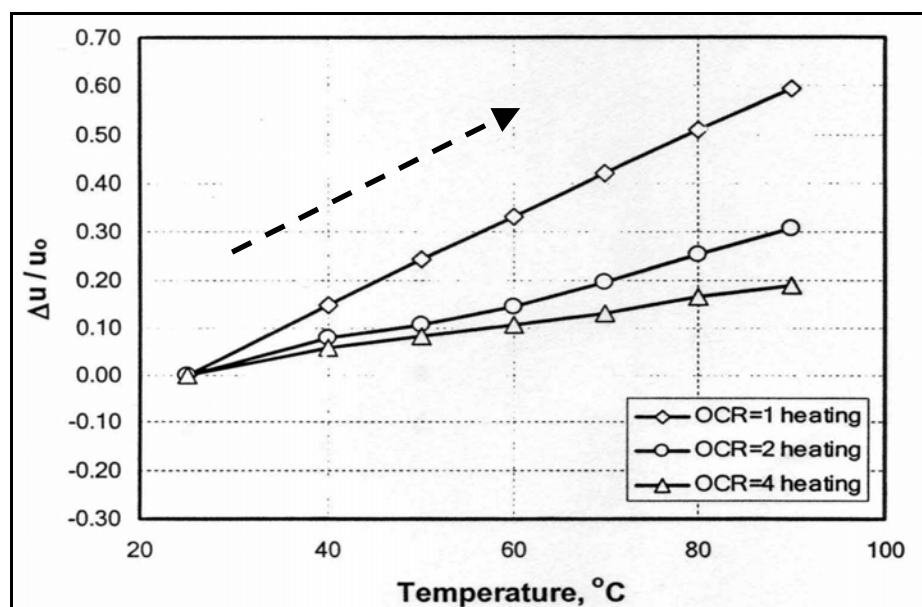


ภาพที่ 22 การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำ กับ อุณหภูมิ ที่แรงดันในการทดสอบต่างกัน
ที่มา: Tanaka *et al.* (1997)



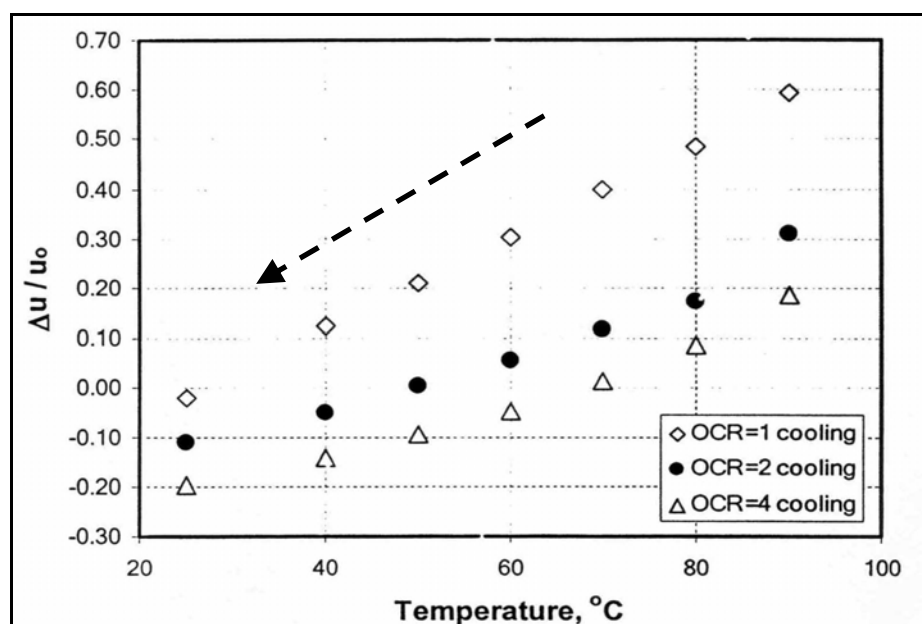
ภาพที่ 23 การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำ กับ อุณหภูมิ ของตัวอย่างดินเหนียวถูกอัดตัวปกติ และดินเหนียวถูกอัดตัวมากกว่าปกติ

ที่มา: Tanaka *et al.* (1997)



ภาพที่ 24 การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำส่วนเกิน กับการเพิ่มอุณหภูมิ ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ แบบคงสภาพที่มีค่า OCR = 1, 2 และ 4

ที่มา: ดัดแปลงจาก Grino (2004)



ภาพที่ 25 การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำส่วนเกิน กับการลดอุณหภูมิ ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อน
กรุงเทพฯ แบบคงสภาพที่มีค่า OCR =1, 2 และ 4
ที่มา: ดัดแปลงจาก Grino (2004)

4. การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยความร้อน กับการเปลี่ยนแปลงกำลังรับน้ำหนักของดินเหนียวอ่อน

พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับน้ำหนักของดินเหนียวอ่อน เนื่องจากการปรับปรุง
ด้วยความร้อนแบบมีการระบายน้ำ และการปรับปรุงความร้อนแบบไม่มีการระบายน้ำ สามารถแบ่ง
ออกเป็น 2 ลักษณะคือ

4.1. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับน้ำหนักในดินเหนียวถูกอัด ตัวปกติ

การเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับน้ำหนักของดินเหนียวถูกอัดตัวปกติโดยความร้อนแบ่ง
ออกเป็น 2 ลักษณะคือ การปรับปรุงดินความร้อนแบบมีการระบายน้ำ และการปรับปรุงดินด้วย
ความร้อนแบบไม่มีการระบายน้ำ ซึ่งการให้ความร้อนแบบมีการระบายน้ำ น้ำในมวลดินสามารถ
ไหลออกจากชั้นดินได้ระหว่างการให้ความร้อน จึงทำให้ค่ากำลังรับน้ำหนักของดินมีแนวโน้ม
สูงขึ้น ส่วนการให้ความร้อนแบบไม่มีการระบายน้ำ แรงดันน้ำส่วนเกินที่เพิ่มขึ้นไม่สามารถระบาย
ออกได้ทัน จึงทำให้ค่ากำลังรับน้ำหนักของดินมีแนวโน้มลดลง (Kuntiwattanakul *et al.*, 1995)

4.2. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับน้ำหนักในดินเหนียวถูกอัดตัวมากกว่าปกติ

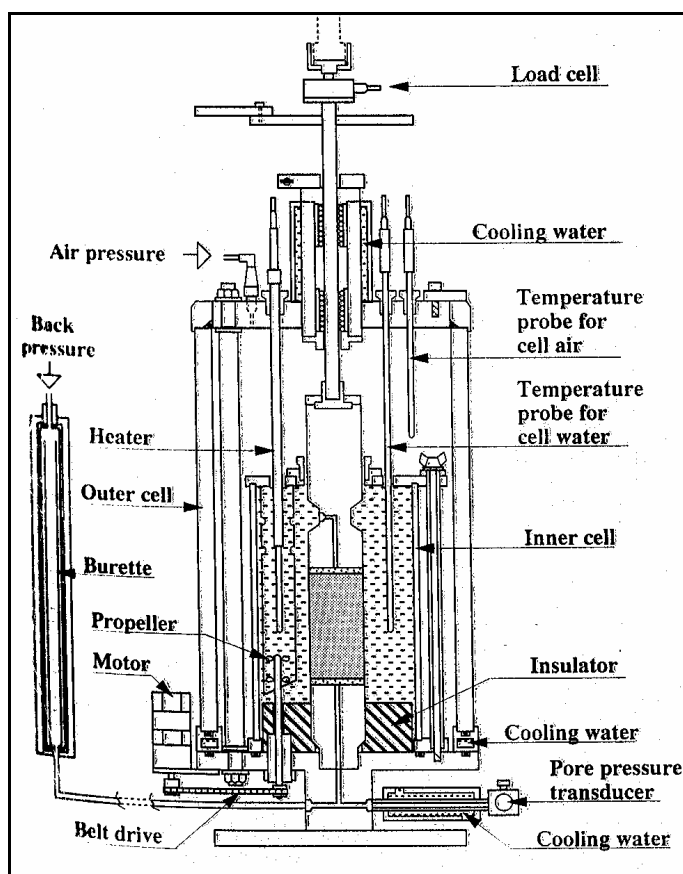
พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับน้ำหนักของดินเหนียวถูกอัดตัวมากกว่าปกติ มีแนวโน้มเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมากทั้งกรณีการปรับปรุงความร่วนแบบมีการระบายน้ำ และไม่มี การระบายน้ำ เนื่องจากดินเหนียวที่ถูกอัดตัวปกติมีการจัดเรียง โครงสร้างดินแข็งแรงกว่าดินเหนียว ที่ถูกอัดตัวปกติของดินชนิดเดียวกัน ดังนั้นการให้ความร้อนกับดินเหนียวที่ถูกอัดตัวมากกว่าปกติ จึงเกิดแรงดันน้ำส่วนเกินไม่มาก ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับน้ำหนักมีค่าน้อย โดยเฉพาะ ในดินเหนียวที่มีค่า OCR สูงๆ การให้ความร้อนไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับน้ำหนัก (Kuntiwattanakul *et al.*, 1995)

Kuntiwattanakul *et al.* (1995) ได้ทำการทดสอบกับตัวอย่างดินเหนียวแบบเปลี่ยนสภาพที่มีแร่ คาโอสิน เป็นส่วนประกอบหลัก ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องมือแบบแรงอัดสามแกน แสดงดัง ภาพที่ 26 และได้ผลการทดสอบทั้งของตัวอย่างดินเหนียวที่ถูกอัดตัวปกติ และดินเหนียวที่ถูกอัดตัว มากกว่าปกติ แสดงผลดังภาพที่ 27

ค่ากำลังรับน้ำหนักของดินเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำ และการระบายน้ำใน มวลดิน หากดินสามารถระบายน้ำออกได้ในขณะเพิ่มอุณหภูมิ ค่ากำลังรับน้ำหนักในดินจะมี แนวโน้มสูงขึ้น(Kuntiwattanakul *et al.*, 1995) แต่ถ้าในระหว่างที่แรงดันน้ำเพิ่มขึ้นและไม่มีทาง ระบายน้ำออก แรงดันน้ำยังคงค้างอยู่ในชั้นดิน จะส่งผลให้ค่ากำลังรับน้ำหนักของดินลดลง (Kuntiwattanakul *et al.*, 1995) ตารางที่ 1 สรุปผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับน้ำหนัก ด้วยวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยความร้อน จากตารางดังกล่าวสรุปได้ว่า ตัวอย่างดินที่ทดสอบทั้ง ในกรณีที่มีการระบายน้ำ และไม่มีมีการระบายน้ำระหว่างการให้ความร้อน ค่ากำลังรับน้ำหนักของ ตัวอย่างดินในขณะทำการกดตัวอย่างแบบมีการระบาย และ ไม่ระบายน้ำ ผลที่ได้คือ ค่ากำลังรับ น้ำหนักของดินมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจน ซึ่งมีทั้งที่ค่ากำลังรับน้ำหนักของดินเพิ่มขึ้น และลดลง จึงไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่าผลเนื่องจากการปรับปรุงดินด้วยความร้อนแล้วจะทำ ให้ค่ากำลังรับน้ำหนักเพิ่มขึ้น หรือลดลง Grino (2004) ได้ทดสอบตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ แบบ คงสภาพ โดยใช้ค่าอุณหภูมิในการปรับปรุงคุณภาพดินอยู่ในช่วงประมาณ 25-90 องศาเซลเซียส ผล ที่ได้ คือ ค่ากำลังรับน้ำหนักของทั้งดินเหนียวถูกอัดตัวปกติ และในดินเหนียวถูกอัดตัวมากกว่าปกติ เกิดการเพิ่มขึ้นได้ดีที่สุดในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว แสดงดังตารางที่ 2 นอกจากนั้นยังพบว่าความร้อน

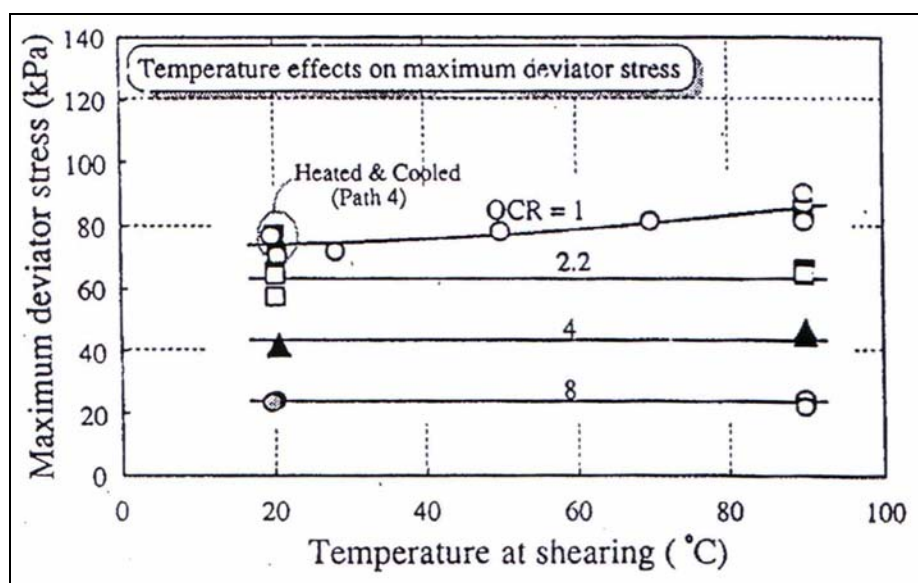
ส่งผลต่อดินเหนียวถูกอัดตัวปกติมากกว่าในดินเหนียวที่ถูกอัดตัวมากกว่าปกติ เนื่องจากในดินเหนียวถูกอัดตัวปกติมีอัตราส่วนช่องว่างมากกว่าในดินเหนียวถูกอัดตัวมากกว่าปกติจึงทำให้ค่าความชื้นน้ำมีค่าสูงกว่าด้วย ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นน้ำในมวลดินจะมีความหนืดลดลง และสามารถไหลออกจากอนุภาคดินได้ง่าย เป็นผลทำให้อนุภาคดินเคลื่อนที่เข้าหากันได้ใกล้มากขึ้น และเกิดการเรียงตัวขึ้นใหม่ ทำให้อนุภาคดินมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคแข็งแรงมากขึ้น จึงทำให้ค่ากำลังรับน้ำหนักมีค่าสูงขึ้นด้วย ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 28 - 30

จากผลงานวิจัยข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับน้ำหนักของดินอันได้แก่ ค่า OCR การระบายน้ำระหว่างการทดสอบ และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในดิน



ภาพที่ 26 เครื่องมือทดสอบแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial Cell) สำหรับการทดสอบเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่างดิน

ที่มา: Kuntiwattanakul *et al.* (1995)



ภาพที่ 27 การเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับน้ำหนักกับอุณหภูมิแบบมีการระบายน้ำ ของตัวอย่างดินมีค่า OCR ต่างๆกัน

ที่มา: Kuntiwattanakul *et al.* (1995)

ตารางที่ 1 สรุปผลการทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนักเนื่องจากการให้ความร้อนแก่ดินในสภาพต่างๆ

Authors	Types of heating	Type of shearing	Strength after heating
Mitchell (1964)	D	U	ลดลง
Murayama (1969)	U	U	ลดลง
Sherif and Burrous (1969)	U	U	ลดลง
Hueckel and Baldi (1990)	D	D	ลดลง
Laguros (1969)	D	U	เพิ่มขึ้น
Houston <i>et al.</i> (1985)	D	U	เพิ่มขึ้น
Nobel and Demirel (1969)	D	Direct shear	เพิ่มขึ้น

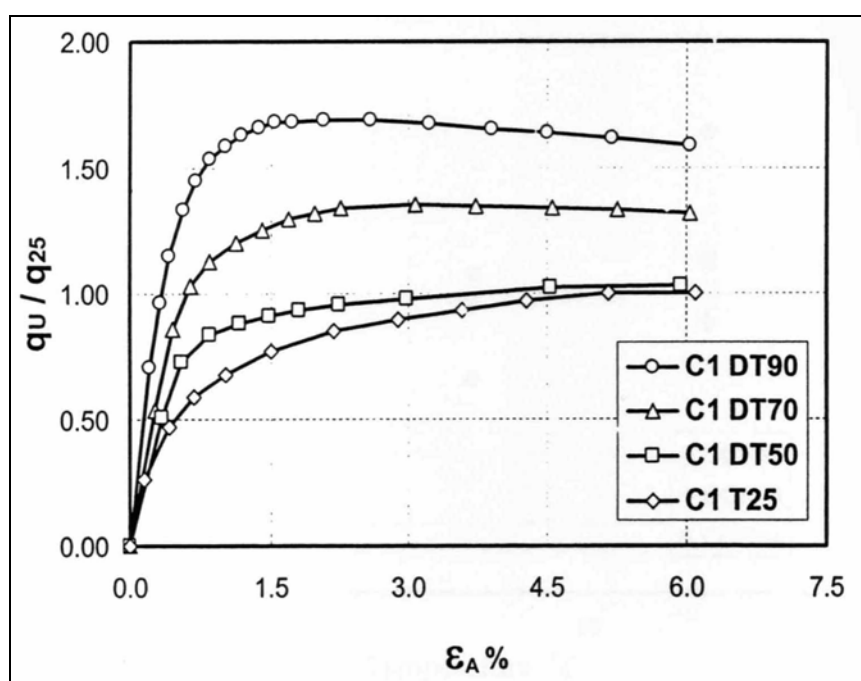
หมายเหตุ D = Drained, U = Undrained

ที่มา: แปลจาก Kuntiwattanakul *et al.* (1995)

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับน้ำหนักเนื่องจากการให้ความร้อนของ
ตัวอย่างดินที่มีค่า OCR = 1, 2 และ 4

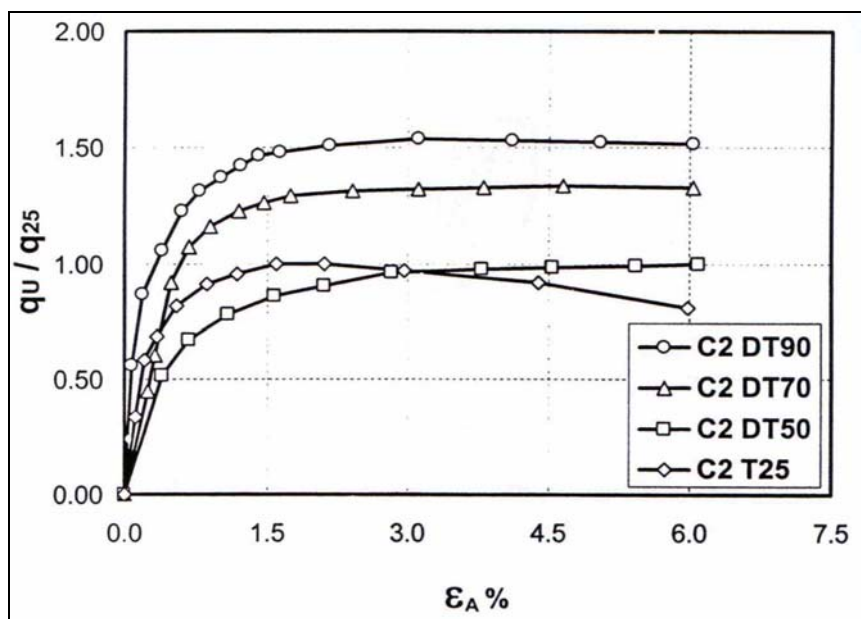
ชนิดของตัวอย่างดิน	การเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับน้ำหนักของดิน		
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		
	25-50	25-70	25-90
ดินเหนียวถูกอัดตัวปกติ	-	เพิ่ม 35%	เพิ่ม 70%
ดินเหนียวถูกอัดตัวมากกว่าปกติ, OCR=2	-	เพิ่ม 35%	เพิ่ม 60%
ดินเหนียวถูกอัดตัวมากกว่าปกติ, OCR=4	เพิ่ม 25%	เพิ่ม 30%	เพิ่ม 40%

ที่มา: ดัดแปลงจาก Grino (2004)



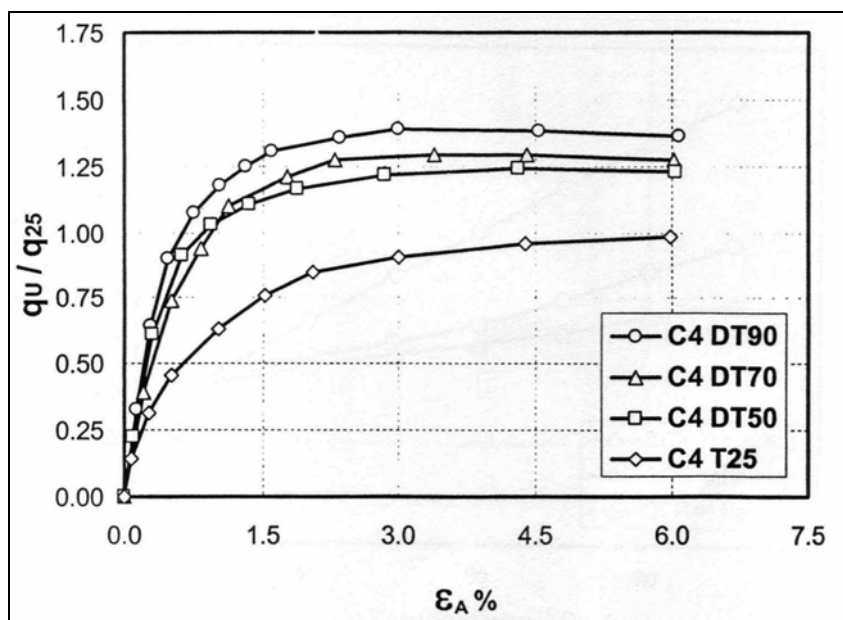
ภาพที่ 28 การเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับน้ำหนักของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ แบบคงสภาพ
ที่ถูกอัดตัวปกติ ที่อุณหภูมิต่างๆ

ที่มา: Grino (2004)



ภาพที่ 29 การเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับน้ำหนักของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ แบบคงสภาพ
มีค่า OCR=2 ที่อุณหภูมิต่างๆ

ที่มา: Grino (2004)

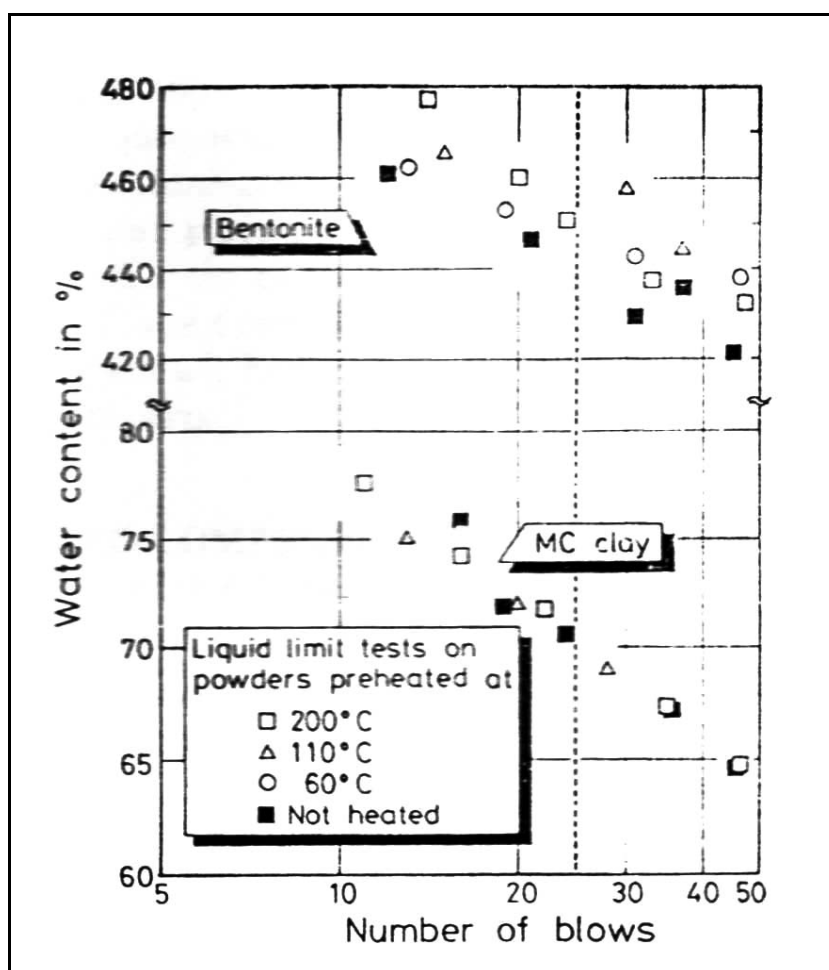


ภาพที่ 30 การเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับน้ำหนักของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ แบบคงสภาพ
มีค่า OCR=4 ที่อุณหภูมิต่างๆ

ที่มา: Grino (2004)

5. การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยความร้อนกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวอ่อน

Towhata *et al.* (1994) ได้ทำการทดสอบโดยการนำดินเหนียว และเบนโทไนท์ มาให้ความร้อนที่อยู่ในช่องอุณหภูมิ 60 – 200 องศาเซลเซียส แล้วปล่อยตัวอย่างให้เย็น จึงทำการทดสอบคุณสมบัติของดินพบว่าค่าคุณสมบัติพื้นฐานของดินเปรียบเทียบกับตัวอย่างดินชนิดเดียวกัน ที่ไม่ได้รับการปรับปรุงด้วยความร้อน ผลปรากฏว่าความร้อนไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติพื้นฐานของดิน แสดงผลดังภาพที่ 31

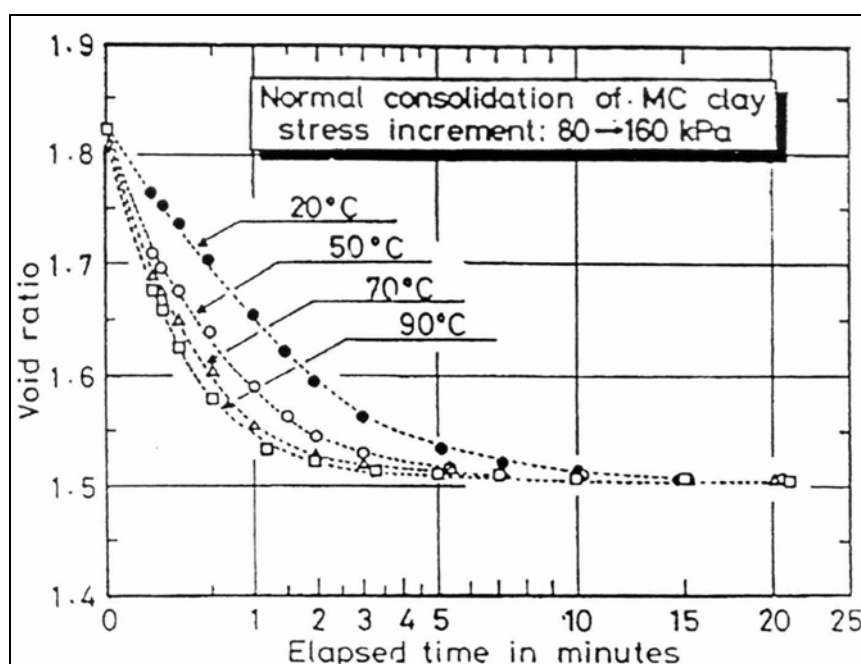


ภาพที่ 31 คุณสมบัติพื้นฐานของดินที่ได้รับการปรับปรุงด้วยความร้อน กับดินที่ไม่ได้รับการปรับปรุงด้วยความร้อน

ที่มา: Towhata *et al.* (1994)

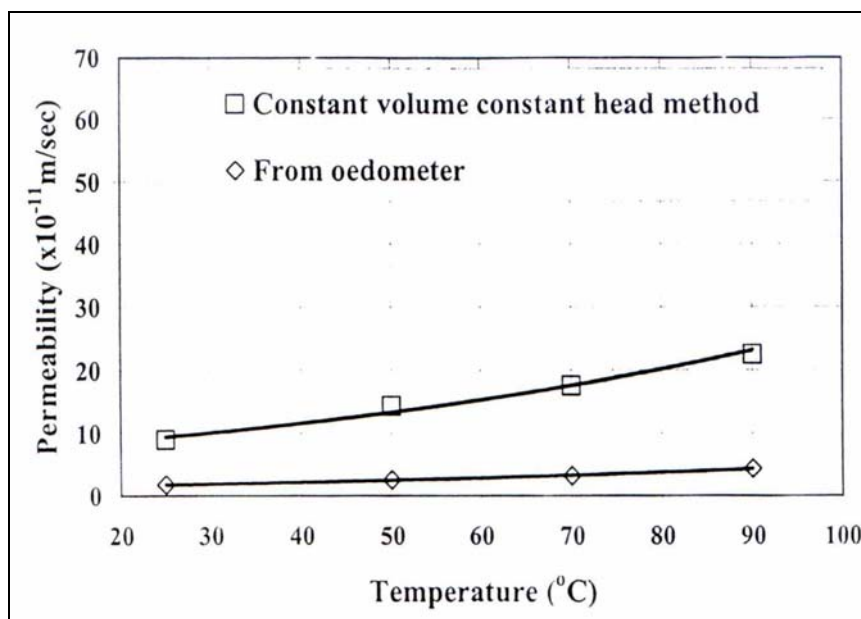
6. การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยความร้อนกับการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นน้ำของดินเหนียวอ่อน

Towhata *et al.* (1993) ทำการทดสอบตัวอย่างดินเหนียวแบบเปลี่ยนสภาพ ที่มีแร่ธาตุส่วนใหญ่เป็นคาโอลีน และเบนโทไนท์ ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 32 อัตราส่วนช่องว่างในดินมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากน้ำในมวลดินเมื่อได้รับความร้อนจึงทำให้มีความหนืดลดลง น้ำในมวลดินจึงสามารถไหลออกจากชั้นดินได้เร็วขึ้น เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงช่องว่าง ณ ค่าเดียวกันของตัวอย่างดินที่อุณหภูมิปกติ (20 °C) ใช้เวลาในการเปลี่ยนแปลงช่องว่างมากกว่าตัวอย่างดินที่มีอุณหภูมิสูง ดังนั้น ค่าความชื้นน้ำของดินเหนียวที่อุณหภูมิสูงควรมีค่ามากกว่าค่าความชื้นน้ำของดินเหนียวที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อที่จะทำให้การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่างเกิดได้เร็วขึ้น ผลการวิจัยของ (Rujivipat, 2004) ทำการทดสอบกับตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ แบบคงสภาพ โดยวิธีอัดตัวคายน้ำ และ แบบความดันคงที่ ดังภาพที่ 33 แสดงผลที่ได้คือ ค่าความชื้นน้ำในดินมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ



ภาพที่ 32 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่างของดินเหนียว ที่อุณหภูมิต่างๆ

ที่มา: Towhata *et al.* (1993)



ภาพที่ 33 ค่าความซึมผ่านของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ แบบคงสภาพ จากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ (Oedometer) และจากการทดสอบแบบความดันน้ำคงที่ ที่อุณหภูมิต่างๆ

ที่มา: Rujivipat (2004)

7. คุณสมบัติการนำความร้อนของดินเหนียวอ่อน

ค่าการนำพาความร้อนในดินเหนียว ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินชนิดนั้น โดยจะขึ้นอยู่กับแร่ธาตุในดิน ปริมาณน้ำในดิน ค่าความอิ่มตัว และอัตราส่วนช่องว่าง ตารางที่ 3 แสดงค่าการนำพาความร้อนของดินที่มีสถานะต่าง ๆ กัน งานวิจัยของ Thet (2004) ทำการทดสอบแบบการอัดตัวคายน้ำ แสดงเครื่องมือทดสอบดังภาพที่ 34 โดยทำการทดสอบกับตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ แบบคงสภาพที่ระดับความลึก 3-4 เมตร ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 35 คือ ค่าการนำพาความร้อนไม่คงที่ แต่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ และ San San (2005) ทำการทดสอบในลักษณะแบบการอัดตัวคายน้ำโดยทำการพัฒนาอุปกรณ์ทดสอบขึ้นมา แสดงดังภาพที่ 36 กับตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ทั้งแบบคงสภาพ และเปลี่ยนสภาพ แสดงผลดังภาพที่ 37 ผลที่ได้คล้ายกับผลการวิจัยของ (Thet, 2004) คือค่าการนำพาความร้อนจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

ตารางที่ 3 ค่าการนำความร้อนของดินชนิดต่างๆ

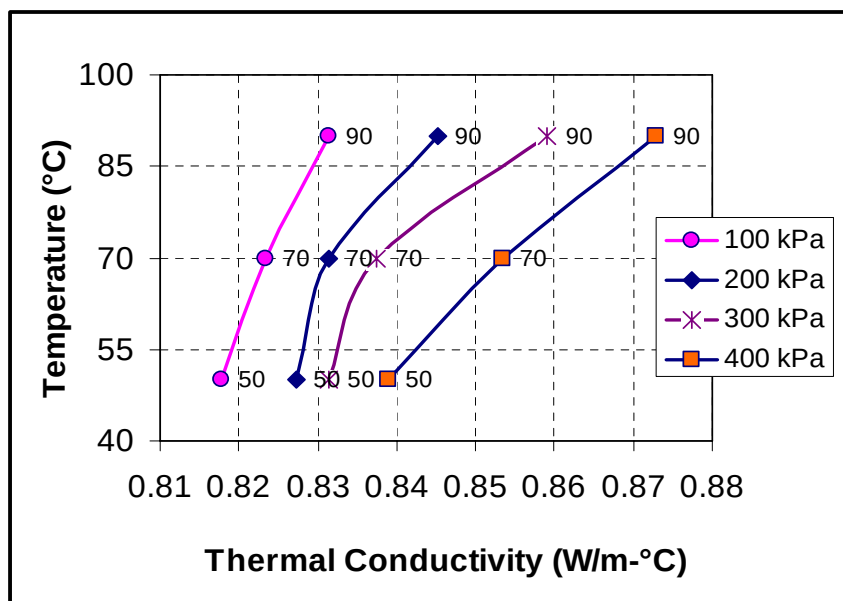
ชนิดของดิน	ค่าการนำความร้อน (W/mK)
ดินทุกประเภท	0.15 to 4
ดินอิ่มตัว (Saturated soil)	0.6 to 4
ทรายแห้ง (Sand perfectly dry)	0.15 to 0.25
ทรายชื้น (Sand moist)	0.25 to 2
ทรายอิ่มตัว (Sand saturated)	2 to 4
ดินเหนียวแห้งถึงชื้น (Clay dry to moist)	0.15 to 1.8
ดินเหนียวอิ่มตัว (Clay saturated)	0.6 to 2.5
ดินปะปนอินทรีย์สาร (Soil with organic matter)	0.15 to 2

ที่มา: (<http://www.hukseflux.com/thermal%20conductivity/thermal.htm>)



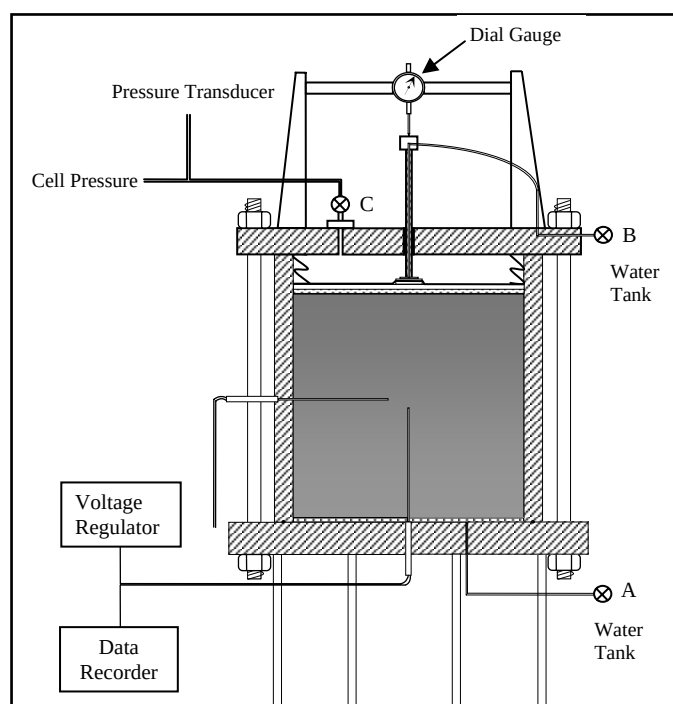
ภาพที่ 34 อุปกรณ์การทดสอบหาค่าการนำพาความร้อนแบบการอัดตัวคายน้ำ

ที่มา: Thet (2004)



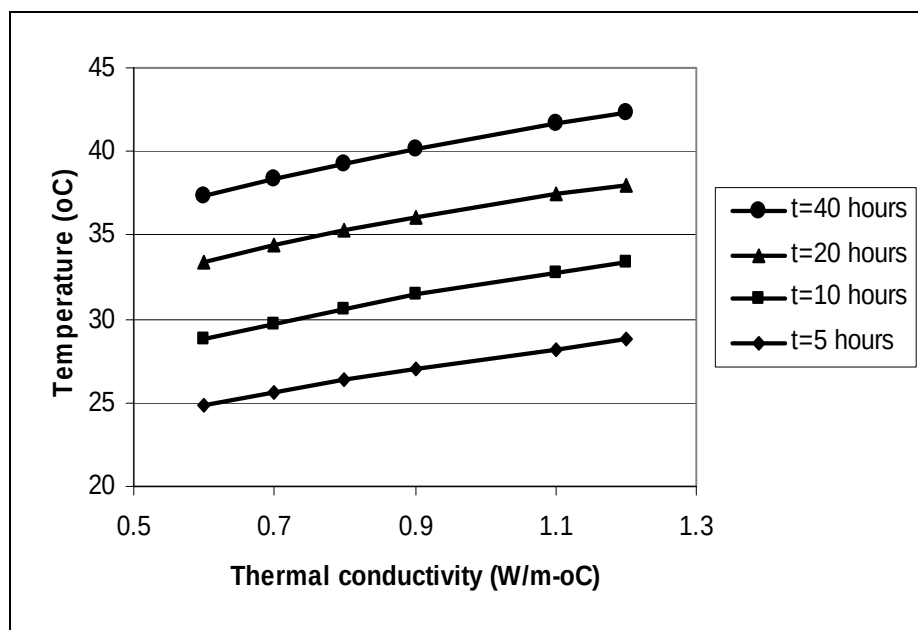
ภาพที่ 35 ค่าการนำพาความร้อน กับอุณหภูมิ ที่แรงดันต่างๆของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ
แบบคงสภาพ

ที่มา: Thet (2004)



ภาพที่ 36 อุปกรณ์การทดสอบหาค่าการนำพาความร้อนแบบการอัดตัวคายน้ำ

ที่มา: San San (2005)



ภาพที่ 37 ค่าการนำพาความร้อนกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของตัวอย่างดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ
แบบคงสภาพ

ที่มา: San San (2005)

การแผ่กระจายความร้อนในดินแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่

1. การถ่ายเทความร้อน (Heat Conduction) การแผ่กระจายความร้อนในลักษณะนี้เป็น การส่งถ่ายความร้อนในรูปแบบของการเคลื่อนตัวของโมเลกุลที่อยู่ติดกันของสารนั้น หรือเป็น การส่งถ่ายความร้อนผ่านวัตถุที่อยู่ติดต่อเนื่องกันไป เช่นการพาความร้อนในท่อเหล็ก
2. การนำพาความร้อน (Heat Convection) การแผ่กระจายความร้อนในลักษณะ เกิดจาก การส่งถ่ายพลังงานความร้อนผ่านตัวกลาง ทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยการแผ่กระจายความร้อนในลักษณะนี้ จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของตัวกลางในการนำพา หรือเป็นการนำพาความร้อนในลักษณะที่มีตัวกลางเป็นตัวเคลื่อนย้ายความร้อน เช่น การพาความร้อนโดยลม
3. การนำพาความร้อนแบบคลื่น (Heat Radiation) การแผ่กระจายความร้อนในลักษณะนี้เป็นแผ่กระจายความร้อนออกมาในรูปของรังสี รังสีที่ประกอบด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า รังสีสามารถ กระจายความร้อนได้ดีในอากาศ เพราะถ้าตัวกลางเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ จะมีรังสี

บางส่วนถูกดูดซับไป เนื่องจากเมื่อรังสีเดินทางผ่านตัวกลางที่ไม่ใช่อากาศ คลื่นรังสีจะมีทั้งที่เกิดการสะท้อนหักเห ทะลุผ่าน และถูกดูดซับ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกลางชนิดนั้น

สามารถคำนวณพลังงานความร้อนที่ทำให้วัตถุเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดังสมการ

$$\text{Heat Energy} = c.m.\Delta T \quad (3)$$

Heat Energy	=	พลังงานความร้อนที่ทำให้วัตถุเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ, (J)
c	=	ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity), J/(g °C)
m	=	มวลของวัตถุที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ, (g)
ΔT	=	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง, (°C)

สมการของ Fourier ได้เสนอวิธีคิดอัตราการไหลของความร้อน ดังสมการ

$$Q = kA(\Delta T)/\Delta L \quad (4)$$

Q	=	อัตราการไหลของความร้อน, (J/sec), (W)
k	=	ค่าการนำพาความร้อน, (J/(sec-m-°C)), (W/m-°C)
A	=	พื้นที่หน้าตัดตั้งฉากกับทิศทางการไหล, (m ²)
ΔT	=	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงระหว่างสองจุดที่พิจารณา, (°C)
ΔL	=	ระยะทางระหว่างสองจุดที่พิจารณา, (m)

8. สรุปผลการวิจัยการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนด้วยความร้อนที่ผ่านมา

ผลจากงานวิจัยที่ผ่านมาสรุปดังตารางที่ 4 สามารถแยกลักษณะการเปลี่ยนแปลงจากการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยความร้อนออกเป็น 2 ลักษณะคือ

1. การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยความร้อนกับดินเหนียวถูกอัดตัวปกติ ปริมาตรของดินเหนียวถูกอัดตัวปกติจะลดลงเมื่อได้รับความร้อน และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น น้ำจะเกิดการขยาย

ปริมาณขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงส่งผลทำให้แรงดันน้ำส่วนเกินในดินเหนียวถูกอัดตัวปกติเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ แต่ค่ากำลังรับน้ำหนักในดินยังมีปัจจัยในการระบายน้ำในระหว่างการทดสอบเข้ามาเกี่ยวข้อง เนื่องจากแรงดันน้ำส่วนเกินเป็นปัจจัยที่ทำให้ค่ากำลังรับน้ำหนักลดลง ถ้ามีการระบายน้ำในระหว่างการทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนักของดินเหนียวควรที่จะเพิ่มขึ้น แต่จากผลการวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่สามารถสรุปได้ชัดเจนว่าเป็นในลักษณะใด โดยที่ผลจากการวิจัยส่วนใหญ่ ค่ากำลังรับน้ำหนักของดินเหนียวถูกอัดตัวปกติแบบมีการระบายน้ำระหว่างการทดสอบ มีแนวโน้มสูงขึ้น แต่การปรับปรุงด้วยความร้อนแบบไม่มีการระบายน้ำ ค่ากำลังรับน้ำหนักที่ได้ไม่ชัดเจนที่จะสรุปได้ สำหรับค่าคุณสมบัติพื้นฐานของดินเหนียวผลที่ได้ปรากฏว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ส่วนค่าความชื้นน้ำในดินจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เนื่องจากอิทธิพลเนื่องจากความร้อนมีผลกับน้ำ ทำให้น้ำมีความหนืดลดลงทำให้น้ำสามารถระบายออกจากชั้นดินได้เร็วขึ้น นอกจากนั้นค่าการนำพาความร้อนแสดงผลที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ อันเป็นผลต่อเนื่องจากที่ปริมาณของดินเหนียวถูกอัดตัวปกติมีปริมาณลดลงเมื่อได้รับการปรับปรุงด้วยความร้อน ซึ่งแสดงว่าโครงสร้างของดินเหนียวมีแนวโน้มในการจัดเรียงตัวใหม่ ทำให้อนุภาคดินเข้าใกล้กันมากขึ้น และค่าการนำพาความร้อนในดินเกิดจากการถ่ายเทความร้อน (Heat Conduction) เมื่อของอนุภาคดินเข้าใกล้กันมากขึ้น จึงทำให้ค่าการนำพาความร้อนเพิ่มขึ้น

2. การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยความร้อนกับดินเหนียวถูกอัดตัวมากกว่าปกติ แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงปริมาณของดินเหนียวถูกอัดตัวมากกว่าปกติมีลักษณะที่เป็นแบบทั้งที่มีการขยายปริมาณและ ลดปริมาณ เนื่องจากดินเหนียวที่ถูกอัดตัวมากกว่าปกติอนุภาคดินจะเรียงตัวอยู่ใกล้กันมากกว่าในดินเหนียวที่ถูกอัดตัวปกติในดินชนิดเดียวกัน ดังนั้นเมื่อดินได้รับความร้อนแล้วแรงดันน้ำส่วนเกินในดินยังคงเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิจึงทำให้อนุภาคของดินที่อยู่ใกล้กันเกิดการขยายปริมาณในช่วงแรก และเมื่อแรงดันน้ำส่วนเกินลดลงปริมาณจะลดลง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเริ่มต้นแล้ว ปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไปมีค่าไม่มาก ส่วนค่ากำลังรับน้ำหนักของดินทั้งแบบที่มีการระบายน้ำ และแบบที่ไม่มีการระบายน้ำในระหว่างการให้ความร้อน ไม่สามารถสรุปได้ชัดเจนว่าเป็นไปในแนวโน้มใด สำหรับค่าคุณสมบัติของดินเหนียวถูกอัดตัวมากกว่าปกติมีลักษณะเช่นเดียวกับในดินเหนียวถูกอัดตัวปกติ คือค่าคุณสมบัติพื้นฐานไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ส่วนค่าความชื้นน้ำในดินเหนียวถูกอัดตัวมากกว่าปกติยังคงเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เนื่องจากผลของความร้อนมีผลกับน้ำในมวลดินทำให้น้ำมีความหนืดลดลงและสามารถไหลออกจากอนุภาคดินได้เร็วมากขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และค่าการนำพาความร้อน มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับในดินเหนียวถูกอัดตัวปกติ คือมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ถึงแม้ว่าในดินเหนียวถูกอัดตัวมากกว่าปกติการ

เปลี่ยนแปลงปริมาตรจะมีการขยายตัวในช่วงแรก แต่หลังจากนั้นแล้วปริมาตรจะลดลงในเวลาต่อมา ทำให้อนุภาคดินอยู่ใกล้มากขึ้น แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าในดินเหนียวถูกอัดตัวปกติก็ตาม จึงส่งผลทำให้ค่าการนำพาความร้อนเพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิ

ตารางที่ 4 สรุปพฤติกรรมของดินเหนียวอ่อนโดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงจากการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยความร้อน	ดินเหนียวถูกอัดตัวปกติ (NC Clay)	ดินเหนียวถูกอัดตัวมากกว่าปกติ (OC Clay)
1. ปริมาตร	ปริมาตรลดลงแบบไม่คืนรูป	ปริมาตรเปลี่ยนแปลงแบบคืนรูปทั้งการขยายและลดลง
2. แรงดันน้ำส่วนเกิน	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
3. กำลังรับน้ำหนักแบบระบายน้ำ	ไม่ชัดเจน (แนวโน้มเพิ่มขึ้น)	ไม่ชัดเจน
4. กำลังรับน้ำหนักแบบไม่ระบายน้ำ	ไม่ชัดเจน	ไม่ชัดเจน
5. คุณสมบัติพื้นฐาน	ไม่เปลี่ยนแปลง	ไม่เปลี่ยนแปลง
6. ค่าความชื้นน้ำ	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
7. การนำพาความร้อน	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น