

## พฤติกรรมทรุดตัวของถนนบนดินอ่อน และแนวทางการแก้ปัญหาที่เหมาะสม โดยการปรับปรุงฐานรากด้วยความร้อน

### Long term settlement of highway embankment on soft clay foundation and suitable method for ground improvement by thermal consolidation

สุทธิศักดิ์ สรลัมภ์ (Suttisak Soralump)

อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ *fengsus@ku.ac.th*

หัวหน้าศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิชาญ ภูพัฒน์ (Wicharn Poophat)

รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ *fengwip@ku.ac.th*

**บทคัดย่อ :** พฤติกรรมทรุดตัวของถนนบนดินอ่อนเนื่องจากน้ำหนักรถ ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมในระยะยาว สมมุติฐานของพฤติกรรมและทฤษฎีได้ถูกนำเสนอ จากผลของสมมุติฐานเบื้องต้น ทำให้พบว่าวิธีการที่เหมาะสมในการปรับปรุงฐานรากดินอ่อนเพื่อการก่อสร้างถนน ควรจะเป็นวิธีการส่งถ่ายน้ำหนักดินถมลงไปสู่ชั้นที่แข็งแรงกว่าแทนที่จะเป็นวิธีการเร่งการทรุดตัวทั้งนี้เนื่องจากแรงดันน้ำส่วนเกินยังมีโอกาสเกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักรถ ทำให้เกิดการทรุดตัวในระยะยาวได้ ดังนั้นเทคนิคที่เหมาะสมน่าจะเป็นการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์หรือเสาเข็มคอนกรีตในการถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นที่แข็งแรงเพื่อลดปัญหาการเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำในชั้นดินเหนียวอ่อน อย่างไรก็ตามเทคนิคเหล่านี้ยังเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง บทความนี้จึงได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้ความร้อนที่เป็นพลังงานสะอาดจากพลังงานแสงอาทิตย์การศึกษาเบื้องต้นในห้องปฏิบัติการได้สรุปผลเป็นที่น่าพอใจคือดินมีกำลังรับน้ำหนักสูงขึ้นเมื่อได้รับความร้อนในระดับหนึ่ง แผนการศึกษาในสนามได้นำเสนอในบทความฉบับนี้

**KEYWORDS :** GROUND IMPROVEMENT, SOFT SOIL ENGINEERING, THERMAL CONSOLIDATION

#### 1. บทนำ

ปัญหาการทรุดตัวของถนนภายหลังการก่อสร้างถนนบนดินอ่อนเป็นปัญหาใหญ่เนื่องจากถนนไม่สามารถใช้งานได้ตามที่ออกแบบไว้หลังจากการก่อสร้างเสร็จสิ้นเพียงไม่กี่ปี ตัวอย่างหนึ่งที่เป็นตัวอย่างที่ชัดเจนได้แก่ปัญหาการทรุดตัวของถนนสายบางนา-บางปะกงในอดีต ซึ่งมีการศึกษาโดยการติดเครื่องมือวัดพฤติกรรมทรุดตัวไว้ การทรุดตัวของถนนบนดินอ่อนภายหลังการก่อสร้างก่อให้เกิดปัญหาหลายประการอันได้แก่

1. ระดับของถนนลดลงจนต่ำกว่าระดับน้ำท่วมถึง
2. การทรุดตัวแตกต่างกันบริเวณคอสะพาน

จากการวัดพฤติกรรมทรุดตัวในระยะยาวของถนนและจากการจำลองสภาพการทรุดตัวโดยแบบจำลองทำให้พบว่าการ

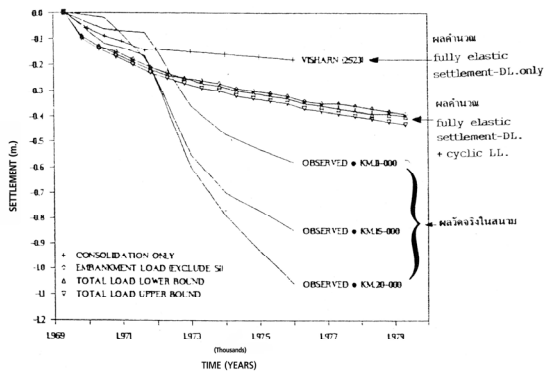
ทรุดตัวของถนนที่มีการจราจรสูงไม่สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีการทรุดตัวแบบ Consolidation ได้อย่างสมบูรณ์ พฤติกรรมทรุดตัวมีความเกี่ยวข้องกับน้ำหนักการจราจรที่ได้กระทำสถานะที่เป็นสภาวะจรด (Dynamic Load)

#### 2. พฤติกรรมทรุดตัวของถนนภายใต้น้ำหนักจร

ผลการวัดการทรุดตัวของถนนสายบางนา-บางปะกง ระหว่างปี 1969-1979 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1 และตารางที่ 1 ผลการวัดการทรุดตัวได้แสดงเปรียบเทียบกับผลการคำนวณทั้งจากการคำนวณในสภาวะ Fully Elastic Settlement จากน้ำหนักสถิตย์และผลการคำนวณที่รวมน้ำหนักจรไปด้วย ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวได้แสดงถึงความเบี่ยงเบนระหว่างผลการคำนวณและค่าที่วัดได้

จริงอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าการทรุดตัวหลังจากการเปิดการจราจรแล้วประมาณ 1.5 ปี อัตราการทรุดตัวแทนที่จะลดลงตามทฤษฎีแต่มีค่าสูงขึ้นมากอย่างเห็นได้ชัดสาเหตุดังกล่าวน่าจะมาจากการเกิดการเคลื่อนไถล (Slippage) ตามแนวระนาบการพิบัติเนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวได้สั่งสมจำนวน Cycle Load ได้มากพอทำให้เกิด Fatigue Failure มากพอที่จะเกิดสภาวะการเคลื่อนไถลได้

COMPARE PREDICTED - OBSERVED SETTLEMENT



รูปที่ 1 แสดงผลวัดการทรุดตัวในสนามและผลจากการคำนวณ

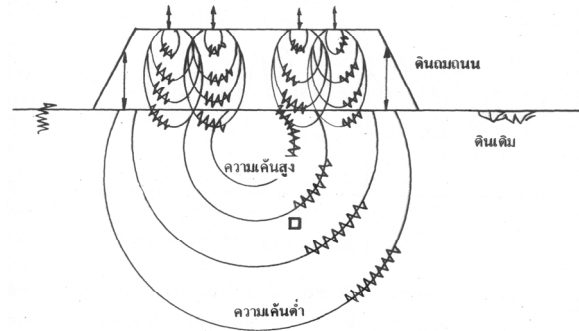
ตารางที่ 1 แสดงการทรุดตัวของถนนบางนง - บางปะกง ระหว่าง (1969-1979)

กม.	การทรุดตัว(ซม.)
0-10	80
10-20	120
20-30	180
30-35	200
35-40	120
40-45	60
45-50	120

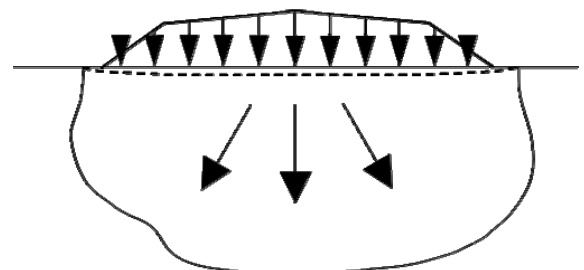
### 3. ทฤษฎีการทรุดตัวของถนนบนดินอ่อน

ในระดับมหภาคลักษณะความเค้นที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักสถิตย์และน้ำหนักจลน์ ได้แสดงในรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าความเค้นที่เกิดขึ้นในดินเดิมซึ่งเป็นดินอ่อนส่วนใหญ่เกิดจากอิทธิพลของน้ำหนักตัวถนนมากกว่าน้ำหนักจรบนถนนแต่เนื่องจากน้ำหนักจรบนถนนเป็นแรงกระทำประเภทแรงจลน์ (Dynamic Load) ถึงแม้ว่าความเค้นจากแรงนี้จะไม่ส่งผลลงไปดินมากนัก แต่ก็สามารถเหนี่ยวนำให้แรงกระทำจากน้ำหนักตัวถนนเปลี่ยน

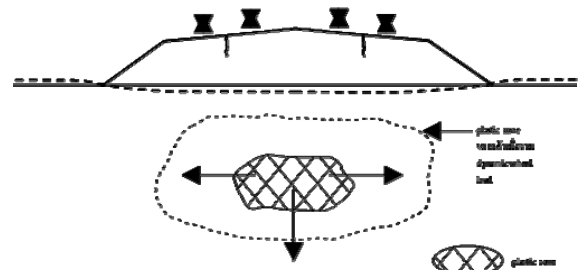
สภาพจากแรงสถิตเป็นแรงจลน์ได้ซึ่งเมื่อเกิดสภาพเช่นนี้จะทำให้เกิดแรงจลน์ขนาดใหญ่กระทำอยู่บนผิวดินเดิม



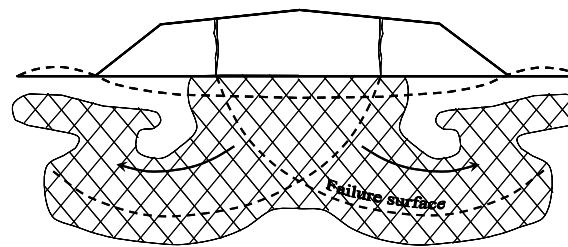
รูปที่ 2 แสดงพฤติกรรมของความเค้น (ระดับมหภาค) ที่ทำให้เกิดการทรุดตัว



ก. Fully elastic state



ข. Confined elasto-plastic state



ค. Formation of Failure Surface

รูปที่ 3 แสดงพฤติกรรมของดินเมื่อถูกความเค้น ระดับมหภาค

พฤติกรรมของดินเมื่อถูกความเค้นจากน้ำหนักสถิตย์หรือ น้ำหนักจลน์ได้แสดงในรูปที่ 3

มวลดินเมื่อถูกแรงกระทำทำให้เกิดความเค้นต่ำกว่ากำลังของดินทุกๆ จุดภายในมวลดิน (รูปที่ 3-ก) การขุดตัวส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ตามแนวแรงกระทำ มากกว่าจะไหลตัวออกทางด้านข้าง เมื่อแรงกระทำเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งบางส่วนของมวลดินเกิด plastic zone หรือ zone ที่ความเค้นสูงกว่ากำลังของดิน การเคลื่อนตัวด้านข้างของมวลดินก็จะมีมากขึ้นเมื่อเทียบกับการเคลื่อนตัวตามแนวแรงกระทำ (หรือแนวตั้ง) และการเคลื่อนตัวด้านข้างนี้จะมีเพิ่มมากขึ้นเมื่อ plastic zone หลายตัวเพิ่มมากขึ้น (ตามรูปที่ 3-ข) และการขยายตัวของ plastic zone นี้สามารถเกิดขึ้นได้มากกว่าเมื่อแรงกระทำเป็น cyclic load เมื่อเทียบกับแรงกระทำแบบ static load

เมื่อแรงกระทำเพิ่มมากขึ้นหรือ cyclic stress มีระดับสูงกว่า critical stress ในพื้นที่กว้างถึงระดับหนึ่ง (ตามรูปที่ 3-ค) จะเกิดรอยแตกกว้างบนตัวถนน และจะเริ่มมี failure surface เกิดขึ้น การเคลื่อนตัวของมวลดินในสภาวะนี้จะแตกต่างไปจากเดิมมาก กล่าวคือจะมีการเคลื่อนตัวของมวลดินตามแนว failure surface โดยมีการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงและเริ่มเห็นรอยปูของดินข้างตัวถนนชัดเจนยิ่งขึ้น ขนาดของการทรุดตัวของถนนในสภาวะนี้จะสูงมาก และคาดคะเนค่อนข้างจะยาก

หากมีการเพิ่มแรงกระทำ หรือจำนวนของ cyclic load กระทำซึ่งเพิ่มขึ้นการเคลื่อนตัวก็จะมากขึ้นจนกระทั่งเกิดการพังทลาย (collapse mechanism) ได้

ตามทฤษฎีที่กล่าวมาทั้งหมดอาจสรุปได้ว่าการทรุดตัวของถนนบนดินอ่อนโดยมีน้ำหนักกระทำในลักษณะ dynamic หรือ cyclic load สามารถทำให้เกิดการทรุดตัวได้หลายลักษณะดังนี้

(1) การทรุดตัวในสภาพที่ดินเดิมเป็น fully elastic states (กรณีที่มีน้ำหนักกระทำและน้ำหนักถนนไม่สูงมาก) จะเกิดการทรุดตัวที่เคลื่อนตามการคำนวณ โดยทฤษฎี consolidation ที่มีอยู่ทั่วไป โดยที่ค่า excess pore pressure ต้องรวมค่าจากผลของ static และ dynamic loads เข้าด้วยกัน

(2) การทรุดตัวในสภาพที่ดินเดิมอยู่ในสภาวะ confined elasto-plastic state (กรณีที่มีน้ำหนักกระทำและน้ำหนักถนนเริ่มสูงขึ้น) การทรุดตัวในระยะนี้ยังไม่มียุทธวิธีพื้นฐานมาช่วยการคาดคะเนการทรุดตัวได้มากนัก แต่สามารถใช้การวิเคราะห์โดยจำลองสภาพด้วยวิธี finite element simulation กำหนดค่าการทรุดตัวในสภาวะ confined elasto-plastic นี้ได้ ขนาดของการทรุดตัวในสภาวะนี้มักจะมีความสูงกว่าปกติแต่จะมากหรือน้อยเท่าใดขึ้นอยู่กับพื้นที่ของ plastic หรือ overstressed zone ที่เกิดขึ้น

(3) การทรุดตัวในสภาพที่ดินเดิมอยู่ในสภาวะที่ผิวการวิบัติเริ่มก่อตัว (กรณีที่มีน้ำหนักถนนและน้ำหนักกระทำสูงมาก) จะเกิดการ slip ตัวของมวลดินตาม failure surface การทรุดตัวในสภาวะนี้ยังไม่มีการพัฒนาทฤษฎีวิเคราะห์การทรุดตัวไว้แต่อย่างใดในปัจจุบัน ขนาดของการทรุดตัวของถนนในสภาวะนี้จะเกิดขึ้นในอัตราที่สูงมากกว่า 2 สภาวะที่กล่าวมาแล้ว

#### 4. การปรับปรุงฐานรากดินอ่อนที่เหมาะสมกับถนนที่มีจราจรสูง

การปรับปรุงฐานรากดินอ่อนโดยวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินสำหรับงานถนน โดยทั่วไปประกอบด้วย 2 ลักษณะ

1. การเร่งการทรุดตัวโดยการระบายน้ำออกจากดิน เช่น เทคนิค Vertical Drain (Bergodo et.al, 1988)
2. การถ่ายน้ำหนักของดินถมลงไปสู่ชั้นที่แข็งแรงกว่าโดยใช้หลักของเสาเข็มถ่ายแรงเช่นการใช้เสาเข็มดิน-ซีเมนต์ (Soralump, 1998)

เทคนิคการเร่งการทรุดตัวโดยการระบายน้ำออกจากดินทำให้เกิดการทรุดตัวในระยะเวลาอันสั้นเปรียบเทียบกับระยะเวลาการทรุดตัวปกติ อย่างไรก็ตามแรงดันน้ำส่วนเกินยังคงสามารถสะสมเพิ่มขึ้นได้หลังการก่อสร้าง เนื่องจากแรงกระทำลงที่กระทำสามารถส่งถ่ายพลังงานไปยังน้ำที่อยู่ในช่องว่างดินและในกรณีที่มีน้ำหนักถนนและน้ำหนักกระทำสูงมาก Formation of Failure Surface ยังสามารถเกิดขึ้นได้และในที่สุดจะสามารถเกิดการเคลื่อนไถลตามรอยการพิบัตินั้นได้ การทรุดตัวด้วยอัตราสูงจึงยังคงเกิดขึ้นได้ในที่สุด สำหรับการถ่ายน้ำหนักของดินถมลงสู่ชั้นที่แข็งแรงกว่าเนื่องจากน้ำหนักสถิตย์ส่วนใหญ่ได้ถูกถ่ายลงไปสู่ชั้นที่แข็งแรงกว่าด้านล่างทำให้กระเปาะของหน่วยแรงส่วนใหญ่อยู่ภายในชั้นดินแข็งด้านล่าง ดังนั้นถึงแม้จะมีการเหนี่ยวนำจากแรงกระทำลงทำให้เกิดแรงสถิตย์ลงแต่แรงดังกล่าวได้กระทำในชั้นดินที่แข็งแรงและขุดตัวได้น้อย ทำให้การทรุดตัวไม่เกิดการเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการก่อตัวของระนาบการพิบัติหรือการเกิด Yield Zone ภายในชั้นดินแข็งเป็นสภาวะที่เกิดขึ้นได้ยาก นอกจากนั้นถึงแม้ระนาบการพิบัติจะเกิดขึ้นในดินอ่อนด้านบนเนื่องจากความผิดพลาดของการก่อสร้างชั้นถ่ายน้ำหนัก (Capping) ระนาบการพิบัติอาจจะเกิดขึ้นได้แต่การเคลื่อนไถลคงเกิดได้ยากเนื่องจากมีเสาเข็มป้องกันอยู่

จากจุดนี้ทำให้สามารถสรุปในเบื้องต้นได้ว่าเทคนิคการถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นที่แข็งแรงกว่าจะเป็นเทคนิคการปรับปรุง

ฐานรากดินอ่อนที่เหมาะสมในการลดการทรุดตัวภายหลังการก่อสร้างของถนนที่มีการจราจรสูง

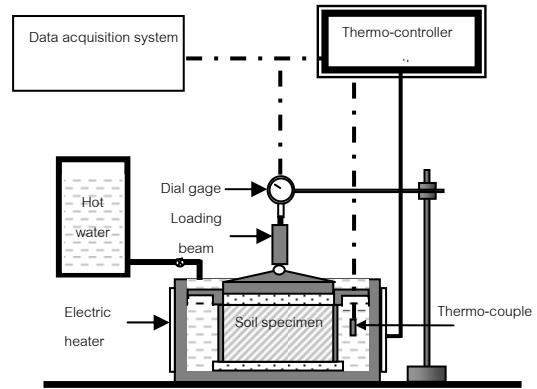
### 5. การปรับปรุงฐานรากดินอ่อนด้วยความร้อน

การปรับปรุงฐานรากดินอ่อนโดยใช้หลักการถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นดินที่แข็งแรงกว่านั้นเทคนิคที่ใช้ในประเทศไทยได้แก่การตอกเข็มคอนกรีตปูพรมและการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ วิธีทั้งสองเป็นวิธีที่ได้ผล อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวยังเป็นวิธีที่มีราคาต่ำก่อสร้างสูง การหาวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินที่ได้ผลและมีราคาการทำงานที่ต่ำจึงเป็นเป้าหมายที่วิศวกรปฐพีไทยควรจะค้นหา เนื่องจากโครงการก่อสร้างโดยเฉพาะการก่อสร้างถนนเป็นโครงการที่มีปริมาณงานมากทำให้การเลือกวิธีการปรับปรุงคุณภาพฐานรากที่มีราคาต่อหนึ่งหน่วยลดลงเพียงเล็กน้อย จะทำให้ราคาโดยรวมลดลงอย่างมาก

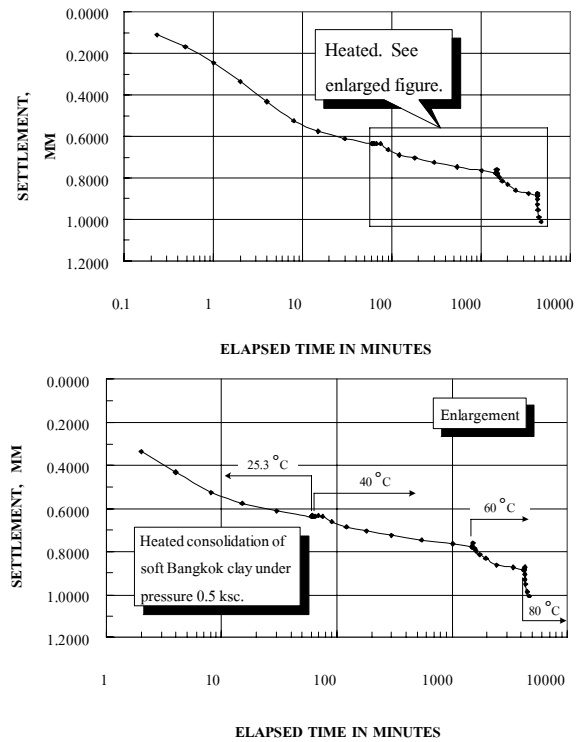
จากความเป็นจริงดังกล่าวผู้เขียนจึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงฐานรากดินอ่อนโดยใช้พลังงานความร้อนมาขับน้ำออกจากดินเพื่อให้หดตัวและทำให้ความแข็งแรงของดินโดยรอบมีค่าสูงขึ้น แหล่งพลังงานที่นำมาใช้ในการเพิ่มความร้อนสามารถใช้ได้หลายรูปแบบ รวมทั้งพลังงานสะอาดได้แก่พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นพลังงานเป้าหมายสำหรับการศึกษานี้ ดังนั้นในการศึกษาจึงได้จำกัดอุณหภูมิในการศึกษาไว้ไม่สูงเกินกว่า 90°C เหตุผลประการหนึ่งในการจำกัดอุณหภูมิดังกล่าวเนื่องจากการวิจัยจะใช้น้ำในการส่งถ่ายความร้อนลงไปได้ดิน แทนที่จะเป็นตัวนำอื่น ทั้งนี้เพื่อลดปัญหาการปนเปื้อนในดินและจำกัดราคาก่อสร้าง วิธีการปรับปรุงฐานรากดินอ่อนด้วยความร้อนจึงเป็นวิธีที่เป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าจะมีราคาต่ำกว่า วิธีดังกล่าวอยู่ภายใต้การวิจัยร่วมระหว่างมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชียภายใต้ทุนรัฐบาลไทย

การปรับปรุงฐานรากดินอ่อนด้วยความร้อนใช้หลักเบื้องต้นจากความจริงที่ความร้อนที่ไปโน้มน้าวให้เกิดแรงดันน้ำส่วนเกินทำให้เกิดการไหลของน้ำออกจากมวลดิน นอกจากนั้นความหนืดของน้ำยังลดลงเมื่ออุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นทำให้การไหลของน้ำในช่องว่างเม็ดดินเป็นไปได้ง่ายขึ้น เมื่อเริ่มต้น เทคนิคนี้มุ่งหวังไปยังการเร่งการทรุดตัวเพียงอย่างเดียว ซึ่งก็ได้ผลในห้องปฏิบัติการเป็นที่น่าพอใจ การทดสอบในห้องปฏิบัติการดำเนินการศึกษาโดยตัดแปลงเครื่องมือทดสอบ Consolidation ดังแสดงในรูปที่ 4 ผลการทรุดตัวได้แสดงในรูปที่ 5 จากผลการทดสอบเบื้องต้นพบว่าอัตราการทรุดตัวมีค่าสูงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นจากอีกการ

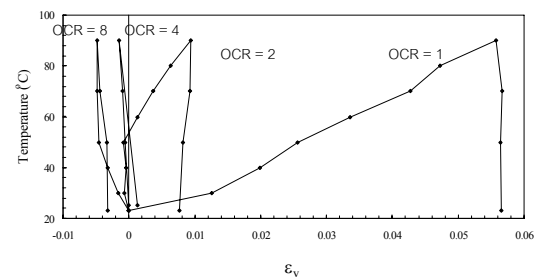
ทดลองรูปแบบหนึ่งยังพบว่า Volume Metric Strain ในลักษณะที่ไม่ย้อนกลับ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อดินมีค่า OCR=1 (รูปที่ 6)



รูปที่ 4 รูปแสดงเครื่องมือ Thermal Consolidation

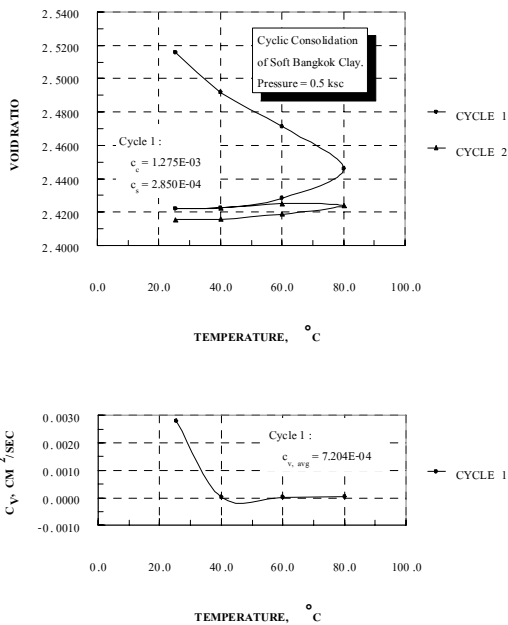


รูปที่ 5 ผลการวัดการทรุดตัวโดยการให้ความร้อน



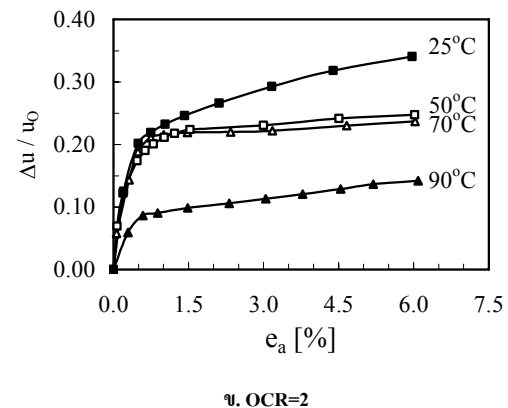
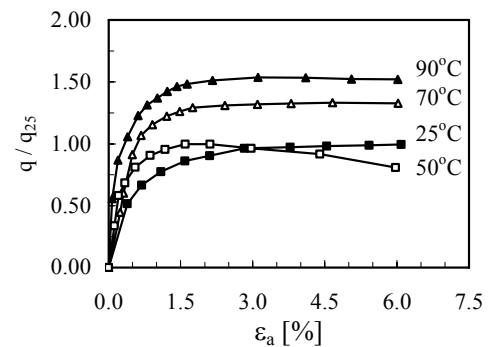
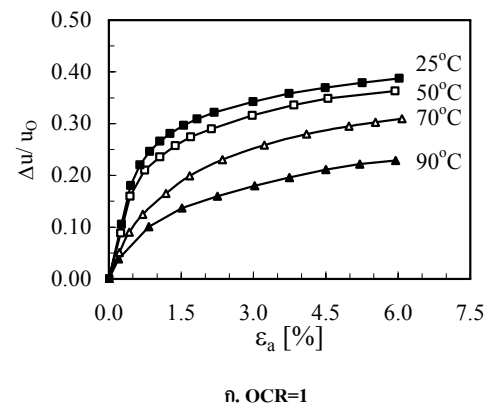
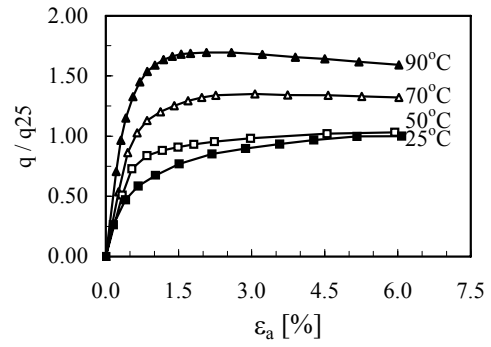
รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรภายใต้การให้ความร้อน (Abuel-Nage et.al, 2004)

การทดสอบการ Consolidation ภายใต้อุณหภูมิที่ร้อนยังได้กระทำภายใต้สภาพการทำงานจริงหากต้องใช้พลังงาน แสงอาทิตย์ในการให้ความร้อนแก่น้ำซึ่งไม่สามารถคงอุณหภูมิไว้ได้ในเวลากลางคืน การจำลองสภาพการเพิ่มและลดอุณหภูมิที่ให้แก่ตัวอย่าง แสดงผลที่น่าสนใจโดยลักษณะของการทรุดตัวมีลักษณะคล้ายผลการทดสอบ Consolidation โดยทั่วไป โดยสภาพการเพิ่มและลดความร้อนเปรียบเสมือนการเพิ่มและลดน้ำหนักของการทดสอบปกติ ผลการทดสอบได้แสดงในรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนช่องว่างกับอุณหภูมิมีลักษณะเดียวกับการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่างกับการให้น้ำหนักปกติ

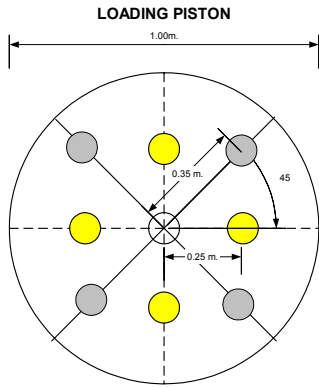


รูปที่ 7 Void Ratio เปรียบเทียบกับการให้อุณหภูมิในลักษณะของรอบ

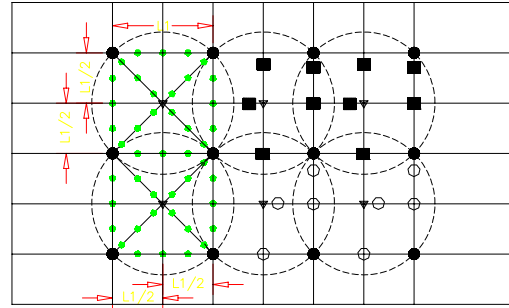
อย่างไรก็ตามเป้าหมายของการปรับปรุงคุณภาพดินอ่อนได้มุ่งไปสู่การปรับปรุงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของดินอ่อน แทนที่จะเป็นการเร่งการทรุดตัวเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผลที่กล่าวในเบื้องต้น เกี่ยวกับการทรุดตัวระยะยาวของถนนอ่อน เนื่องจากน้ำหนักจร การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงเพิ่มขึ้นโดยการสร้างเสาเข็มของดินแข็งอันเนื่องมาจากความร้อนเพื่อถ่ายน้ำหนักของดินถมลง ไปสู่ชั้นที่แข็งแรงกว่า จึงเป็นเป้าหมายสำคัญ การทดลองเพื่อตรวจสอบความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นของดินเหนียวอ่อนเนื่องมาจากการให้ความร้อน ได้แสดงผลในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ความแข็งแรงของดินที่เพิ่มขึ้นตามการให้อุณหภูมิ (Grino, 2004)

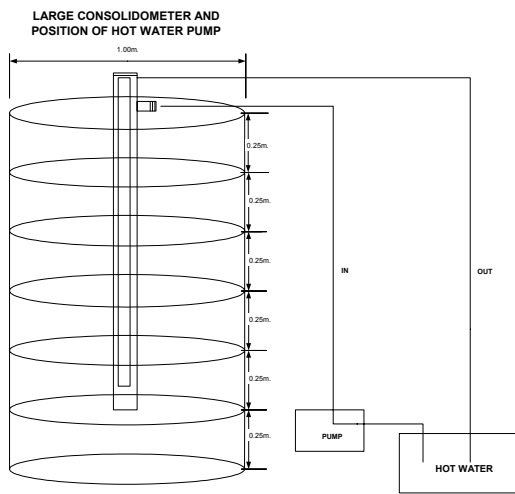


● POSITION OF HYDRAULIC LOAD  
● POSITION OF POLE



Monitoring Rectangular Pattern (L1)

รูปที่ 10 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือทดสอบในสนาม



รูปที่ 9 Large Consolidometer

## 6. การปรับปรุงฐานรากดินอ่อนด้วยความร้อน

งานวิจัยนี้อยู่ในระหว่างการดำเนินการทดสอบจริงในสนาม โดยอาศัยผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ Large Consolidometer (รูปที่ 9) ได้สร้างขึ้นเพื่อศึกษาแรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้นและการส่งถ่ายความร้อนจากแหล่งกำเนิดภายในดินเหนียวที่จำลองสภาพให้ใกล้เคียงกับดินเหนียวอ่อนที่มีความลึก 4 เมตร

สำหรับการทดสอบในสนามจะได้ทำการทดสอบโดยการติดตั้งจุดให้ความร้อนที่ใช้น้ำที่อุณหภูมิ 40°C - 90°C ไหลเวียนผ่านท่อที่ออกแบบเป็นพิเศษเพื่อส่งถ่ายความร้อนลงไปได้ดิน นอกจากนี้ยังได้ติดตั้งจู่ระบายน้ำเพื่อระบายน้ำออกจากดิน ตำแหน่งการติดตั้งจุดให้ความร้อนและจู่ระบายน้ำได้แสดงในรูปที่ 10

## 7. บทสรุป

การปรับปรุงคุณภาพของฐานรากดินอ่อนด้วยวิธีการให้ความร้อนถึงแม้ว่าจะอยู่ภายใต้การศึกษาวิจัยแต่ก็เป็นความพยายามหนึ่งในการที่จะหาวิธีลดค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงคุณภาพดิน ทั้งนี้จากผลการศึกษาเบื้องต้นในห้องปฏิบัติการพบว่าทำให้ความร้อนกับดินเหนียวอ่อนจะทำให้เกิดการเร่งการทรุดตัวและทำให้ดินมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการที่จะสร้างเสาเข็มของดินแข็งเพื่อถ่ายน้ำหนักของดินถมลงไปสู่ชั้นที่แข็งแรงกว่าจึงมีโอกาเป็นไปได้สูง ทั้งนี้วิธีการถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นที่แข็งแรงกว่าได้พิสูจน์ในเบื้องต้นแล้ว จากผลการวัดการทรุดตัวในระยะยาวว่าเป็นวิธีที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงฐานรากดินอ่อน เพื่อรองรับน้ำหนักถนนที่มีการจราจรสูง การศึกษาทดลองในสนามจริง ได้วางแผนในการดำเนินงานและจะได้ทำการเสนอผลต่อไป

## 5. เอกสารอ้างอิง

- Abuel-Naga, H.M., Bergado, D.T., Sorulump, S., and Rujivipat, P. (2004), Thermal Consolidation of Soft Bangkok Clay, International Journal of Lowland Technology.
- Bergodo, D.T., Miura, N., Singh, N. And Panichayatum, B. (1988), Improvement of Soft Bangkok Clay Using Vertical Band Drains Based on Full-Scall Test, In Proc. Int. Conf. Eng'g Problems of Regional Soils, Beijing, China, pp. 379-384.
- Grino, L. (2004), The Effect of Heat on Deformation and Strength Behavior of Soft Bangkok Clay, Master Thesis, Asian Institute of Technology.
- Sorulump, S., Bergado, D.T., and Balasubramaniam, A.S. (1998), Soil Cement Deep Mixing Method for Rehabilitation of Bangna-Bangpakon Highway, 34<sup>th</sup> Symposium on Engineering Geology and Geotechnical Engineering Logan, Utha. USA.