



คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลมหอบขอนแก่นบดอัด

Engineering Properties of Compacted KhonKaen Loess Soil

ครุณี ทาทะสุทธิ์* อนุกุล อ่างบุญตา และ อภิชาติ คำภาหาล้า

Darunee Tatasut* Anukul Arngboonta and Apichit Kampala

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ขอนแก่น ประเทศไทย

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan.

KhonKaen Campus, KhonKaen, Thailand.

**Corresponding author, E-mail: ioda23@hotmail.com*

บทคัดย่อ

ชั้นดินในแถบจังหวัดขอนแก่น ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย เป็นที่รู้จักกันว่า ส่วนใหญ่เป็นดินทรายปนดินตะกอน และ ดินเหนียวปนดินตะกอน ที่มีขนาดเล็ก ถูกพัดพาด้วยลมมาทับถม เรียกชั้นดินนี้ว่าดินลมหอบหรือดินลมหอบขอนแก่น ซึ่งชั้นดินนี้ มีการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมอยู่อย่างจำกัด ดังนั้น งานนี้ทำการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรม ของดินลมหอบขอนแก่น และดินลมหอบขอนแก่นแปรผันปริมาณดินเหนียว ผลจากการศึกษา พบว่า ดินลมหอบขอนแก่นจัดเป็นดินประเภท inactive and normal clay ค่าความเค้นครากของดินลมหอบขอนแก่น มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผลของดินลมหอบขอนแก่น มีค่าค่อนข้างต่ำ มีค่าประมาณ 20 กิโลปาสกาล ไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณของดินเหนียว ในขณะที่ ค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผล มีค่าสูงสุดประมาณ 25 องศา และมีค่าลดลงตามปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้น กำลังอัดแกนเดี่ยว และกำลังแบกทาน ของดินลมหอบขอนแก่นบดอัด ในสภาวะบดอัดที่หน่วยน้ำแห้งสูงสุด มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้นที่ ในขณะที่ กำลังอัดแกนเดี่ยวและกำลังแบกทานสภาวะแช่น้ำมีค่าลดลง ตามปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: คุณสมบัติทางวิศวกรรม ดินลมหอบขอนแก่น ดินบวมตัวต่ำ

Abstract

The soil layer in KhonKaen province in the northeast of Thailand mostly known as silty sand and silty clay with tiny soil grains has been blown and piled up by the wind, formed into layers of soil. This layer is regularly called “loess” or “KhonKaen loess,” and a limited number of studies have been previously conducted on its engineering properties. Accordingly, this research aimed to explore the basic and engineering properties of this



KhonKaen loess and KhonKaen loess with variable clay amount. The research result indicated that KhonKaen loess could be classified as inactive and normal clay while the yield stress of KhonKaen loess seemed to decrease following the increasing amount of clay. The effective cohesion of KhonKaen loess was relatively low (approximately 20 kPa), and did not change according to the clay amount. The maximum of the effective internal friction angle was 25 degree while the soaked bearing strength seemed to decrease following the increasing amount of clay.

Keywords: Engineering Properties, KhonKaen Loess, Low swelling soil

1. บทนำ

ชั้นดินในแถบจังหวัดขอนแก่น ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ที่พบเห็น โดยส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยดิน 2 ประเภท ได้แก่ 1) ดินทรายปนดินตะกอน (Silty sand, SM) ส่วนมากพบที่ระดับความลึก 0.0 – 1.5 ม. และ 5.0 – 8.0 ม.จากระดับผิวดิน และ 2) ดินเหนียวปนดินตะกอน (Silty clay, CL) พบที่ระดับความลึก ที่ระดับ 1.5 - 5.0 ม. จากระดับผิวดิน หรือแทรกอยู่ในชั้นดินที่ระดับความลึกต่างๆ ชั้นดินทรายปนดินตะกอน (SM) เป็นดินที่มีขนาดเล็ก ที่ถูกลมพัดพามาทับถม ในบริเวณใกล้เคียง โดยทั่วไป เรียกว่าชั้นดินนี้ว่า ดินลมหอบ (Loess) หรือ ดินลมหอบขอนแก่น (KhonKaen Loess)

ดินลมหอบขอนแก่น ที่พบเห็นได้มาก เป็นดินที่มีสีเหลือง เนื้อละเอียด ดินลมหอบโดยทั่วไป จะเป็นดินร่วนเม็ดละเอียด ในอนุภาคดินจะอุดมไปด้วยแคลเซียม ทำให้จับเกาะกันแน่นมาก แต่อย่างไรก็ตามจะหลุดออกจากกันโดยง่ายเมื่อโดนน้ำ ดินลมหอบในสถานะแห้งหรือบดอัดที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดี ในการรับน้ำหนักบรรทุก ได้มากกว่า 1000 กิโลปาสกาล มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ประมาณ 1×10^{-5} ถึง 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที และมีค่าการหดตัวเชิงเส้น ประมาณ 1% แต่อย่างไรก็ตาม ในสถานะเปียก หรือ มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินเพิ่มขึ้น เพียง 5%-8% ดินลมหอบนี้ จะรับน้ำหนักได้น้อยกว่า 50 กิโลปาสกาล และมีค่าการหดตัวเพิ่มขึ้นถึง 8% - 10% เมื่อเกิดการแห้งตัว (Al-Rawas, 2000; Li P et al., 2014; Lommler & Bandini, 2015; Nouaouria et al., 2008; Phien-wej et al., 1992; Rogers et al., 1994; Rogers, 1995; Ryashchenko et al., 2008) ในขณะที่ดินเหนียวปนดินตะกอนเป็นดินตะกอนทรายอนินทรีย์ มีความเหนียวต่ำถึงปานกลาง (Low to medium plasticity) คุณสมบัติของดินชนิดนี้ จะแปรผันตามปริมาณของดินเหนียว และหากมองคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวนั้น จะมีคุณสมบัติรับแรงเฉือนต่ำ ค่าความสามารถในการซึมผ่านของน้ำได้ต่ำ และมีค่าการยุบอัดตัวสูง (Horpibulsuk et al., 2007)

หลายงานวิจัยในอดีต ได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทางวิศวกรรม และคุณสมบัติพื้นฐานของดิน โดยส่วนมากจะเป็นดินเหนียวอ่อน (Akagi, 1981; Balasubramanian, 1975; Bergado, 1990; Brenner et al., 1979; Cox, 1971; Horpibulsuk et al., 2007; Horpibulsuk & Rachan, 2004; Kim et al., 1994; Ladd et al., 1971) อย่างไรก็ตาม ในชั้นดินลมหอบ หรือดินทรายปนดินตะกอน และดินเหนียวปนดินตะกอน นั้น ยังมีการศึกษาอยู่อย่างจำกัด (Sadia et al., 2012) ทั้งนี้ มีการก่อสร้างในชั้นดินดังกล่าว อยู่อย่างเป็นจำนวนมาก ดังนั้น งานวิจัยนี้ทำการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐาน ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ขนาดผละ ดัชนีความเหลว และ การบดอัด และคุณสมบัติทางวิศวกรรม ซึ่งได้แก่



กำลังต้านทางแรงเฉือน สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน และการอัดตัวคายน้ำของดินลมหอบขอนแก่น และดินลมหอบขอนแก่นแปรผันปริมาณดินเหนียว ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ จะทำให้เข้าใจคุณสมบัติของดินลมหอบขอนแก่น และดินลมหอบขอนแก่นแปรผันปริมาณดินเหนียว เป็นประโยชน์ต่อการออกแบบ และใช้งานดินลมหอบขอนแก่นเป็นวัสดุก่อสร้าง

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลมหอบขอนแก่น และดินลมหอบขอนแก่นแปรผันปริมาณดินเหนียว

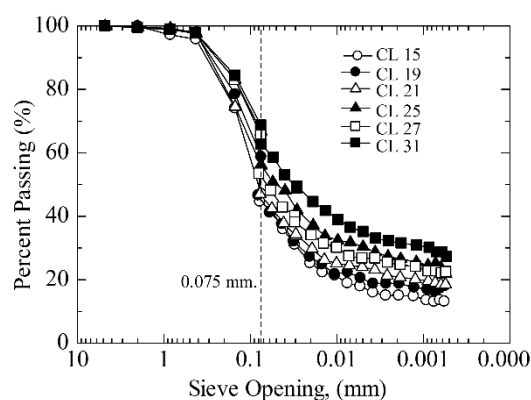
3. อุปกรณ์และวิธีการ / วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ดินตัวอย่าง

ดินลมหอบขอนแก่นเป็น ดินลมหอบและดินเหนียว นำมาจากบ่อขุดดิน เก็บจากระดับความลึก 1 ถึง 3 เมตร จากระดับผิวดิน ภายในเขตอำเภอบ้านไผ่ อำเภอมือทอง จังหวัดขอนแก่น ตัวอย่างดินเหนียวจะถูกผสมเข้ากับดินลมหอบเพื่อจำลองการแทรกหรือการปนกันของดินตัวอย่างเนื่องจากการเก็บตัวอย่างในบ่อขุด (Borrow pit) สำหรับการก่อสร้าง ดินตัวอย่างแบ่งออกเป็น 6 กลุ่ม ได้แก่ ดินลมหอบ 100% และ ดินลมหอบผสมดินเหนียวในปริมาณ 10, 20, 30, 40 และ 50% ของน้ำหนักดินแห้ง

การกระจายสัดส่วนของอนุภาคของดินตัวอย่าง แสดงในรูปที่ 1 เมื่อผสมดินเหนียวเข้าไปในดินลมหอบ สัดส่วนอนุภาคขนาดเล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้น ตามปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้น

คุณสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างทั้ง 6 ชนิด แสดงในตารางที่ 1 เมื่อจำแนกดินตัวอย่างด้วยระบบ USCS พบว่า ดินลมหอบขอนแก่นที่ไม่มีส่วนผสมของดินเหนียว จัดเป็นดิน (Silty sand, SM) ดินลมหอบขอนแก่นที่มีส่วนผสมของดินเหนียว จัดเป็นดิน (Low plasticity clay, CL) และ ดินเหนียว จัดเป็นดิน (High plasticity clay, CH) ตามลำดับ



รูปที่ 1 ขนาดคละของดินลมหอบขอนแก่นแปรผันปริมาณดินเหนียว



3.2 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน

รายการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่าง ประกอบไปด้วยดังนี้

- 1) ความถ่วงจำเพาะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 854.
- 2) ขนาดผลของดินตัวอย่าง ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 422. และ ASTM D 422-63.
- 3) ซีดจำกัดเหลวและพิกัดพลาสติก ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 4318.
- 4) การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1557

ตารางที่ 1 รายการตัวอย่าง ของดินลมหอบขนแก่นแปรผันปริมาณดินเหนียว แต่ละสัดส่วน และ คุณสมบัติพื้นฐานของแต่ละตัวอย่าง

Number of samples	Samples	Loess : Clay	% of clay fraction	Specific Gravity (Gs)	Liquid Limit, LL (%)	Plastic Limit, PL (%)	Plasticity Index, PI (%)	Soil classification
1	CL 15	100 : 0	15.24	2.60	24.70	14.02	10.68	SM
2	CL 19	100 : 10	18.78	2.62	26.88	14.14	12.74	CL
3	CL 21	100 : 20	20.76	2.63	27.19	13.81	13.38	CL
4	CL 25	100 : 30	24.69	2.65	33.29	16.06	17.23	CL
5	CL 27	100 : 40	26.56	2.66	34.90	17.20	17.70	CL
6	CL 31	100 : 50	31.49	2.67	40.63	17.25	23.38	CL
7	CL 67	0 : 100	67.19	2.69	62.72	35.06	27.66	CH

3.3 การทดสอบคุณสมบัติด้านวิศวกรรม

รายการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม ประกอบด้วย การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว การทดสอบกำลังแบกทาน การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ และ การทดสอบแรงเฉือนตรง รายละเอียด ดังนี้

3.3.1) การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2166 ทดสอบกับตัวอย่างที่บดอัดใน โมลมาตรฐานขนาด 10.16 เซนติเมตร (4 นิ้ว) ด้วยพลังการบดอัดแบบสูงกว่าแบบมาตรฐาน (Modified compaction) ที่ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (*OWC*) (หน่วยน้ำหนักดินแห้งสูงสุด) ก่อนทำการทดสอบ จะทำการแช่ดินตัวอย่างในน้ำ 2 ชั่วโมง แล้วผึ่งให้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง ก่อนนำมาทดสอบกำลังอัด โดยใช้อัตรา การทดสอบ 1.0 เปอร์เซ็นต์ ของความสูงของดินตัวอย่างต่ออนาที

3.3.2) การทดสอบกำลังแบกทาน (Bearing capacity) ของการทดสอบ C.B.R ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1883-99 ทดสอบภายใต้การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ในสภาวะแช่น้ำ (Soaked) และ ไม่แช่น้ำ (Unsoaked) โดยในสภาวะแช่น้ำจะแช่เป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 4 วัน และวัดการบวมตัวของตัวอย่าง

3.3.3) การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2435 ทดสอบกับตัวอย่างที่บดอัดด้วยพลังการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่ปริมาณน้ำที่เหมาะสม โดยขนาดตัวอย่าง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 63 มิลลิเมตร สูง 20 มิลลิเมตร จากนั้น นำมาทดสอบการอัดตัวคายน้ำ โดยให้น้ำหนักกดทับเท่ากับ 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640 และ 1280 กิโลปาสกาล และทำการถอนน้ำหนักคืนมาที่ 100 กิโลปาสกาล ตลอดการทดสอบ

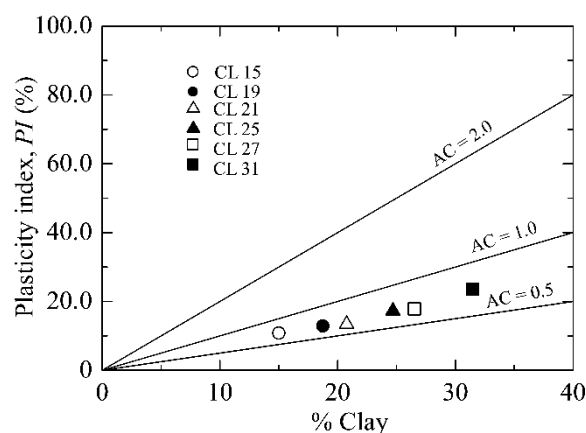


จะอ่านและบันทึกค่าการทรุดตัวของดินตัวอย่างในแต่ละน้ำหนักบรรทุก ที่เวลา 0.25, 0.30, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240, 480, 960 และ 1440 นาที

3.3.4) การทดสอบแรงเฉือนตรง (Direct shear test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 3080-98 ทดสอบกับตัวอย่างที่บดอัดด้วยพลังการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ที่ปริมาณน้ำที่เหมาะสม โดยขนาดตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 63 มิลลิเมตร สูง 20 มิลลิเมตร จากนั้น นำมาทดสอบการแรงเฉือนตรงในสภาวะแช่น้ำโดยให้น้ำหนักกดทับจนถึงสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ จากนั้นจะเริ่มเฉือนตัวอย่าง โดยให้อัตราการเคลื่อนที่ตามแนวราบประมาณ 1.27 มิลลิเมตร / นาที ถึง 2.54 มิลลิเมตร / นาที โดยสม่ำเสมอ

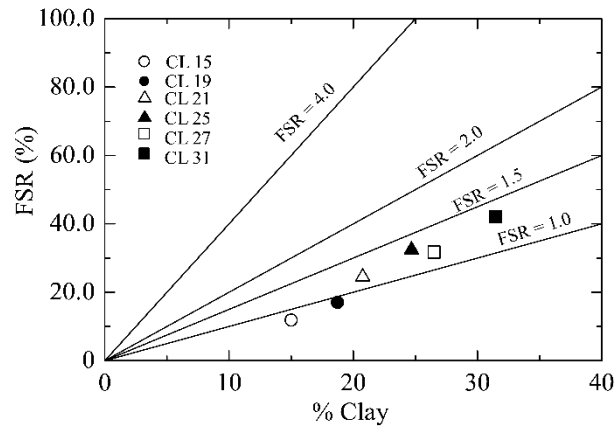
4. ผลการวิจัย

ดังรูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ซีดจำกัดพลาสติก กับ Activity index ของตัวอย่างดินลมหอบ ขอนแก่นแปรผันปริมาณดินเหนียว จากรูปพบว่า ทุกๆ ตัวอย่าง ค่า activity index มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้น ค่า activity index ของดินตัวอย่างมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.5 ถึง 1.0 จัดเป็นดินประเภท inactive and normal clay (Skempton & Northey, 1953)

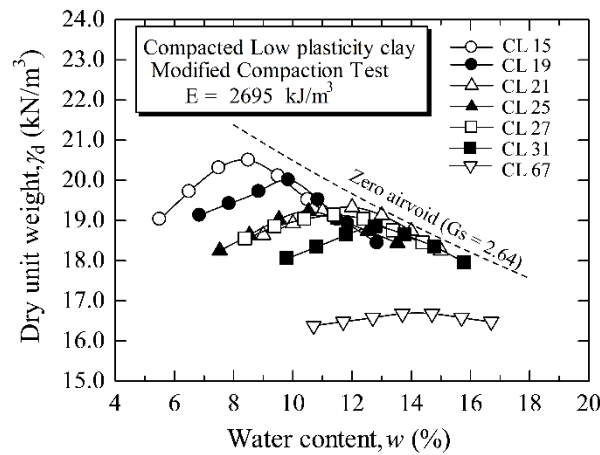


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Plasticity index กับ Activity index ของดินลมหอบแปรผันปริมาณดินเหนียวในปริมาณต่างๆ

ดังรูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนการบวมตัวอิสระ (Free swelling ratio) ตามวิธีของ Prakash and Sridharan (Prakash & Sridharan, 2004) กับเกณฑ์การจำแนกประเภทของแร่ดินเหนียวของตัวอย่างดินลมหอบ ขอนแก่นแปรผันปริมาณดินเหนียว จากรูปพบว่า ทุกๆตัวอย่าง ค่าการบวมตัวอิสระมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 1.5 จัดเป็นดินเหนียวบวมตัวต่ำ มีแร่ดินเหนียวประเภท Kaolinite และ Montmorillonite เป็นแร่ประกอบดินเหนียว (Prakash & Sridharan, 2004)

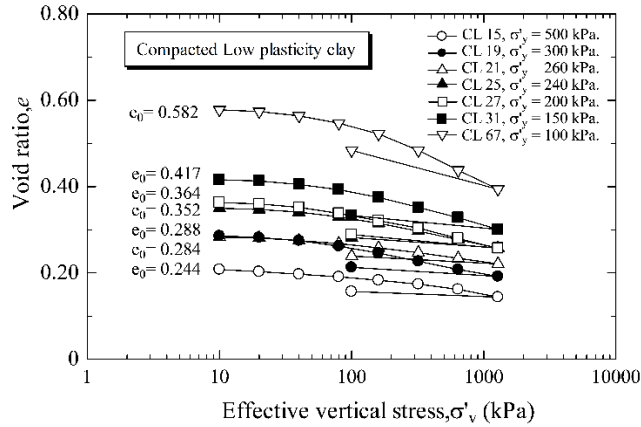


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนการบวมตัวอิสระ (Free swelling ratio) กับเกณฑ์การจำแนกประเภทของแร่ดินเหนียวของตัวอย่างดินลมหอบขนแกนแปรผันปริมาณดินเหนียว



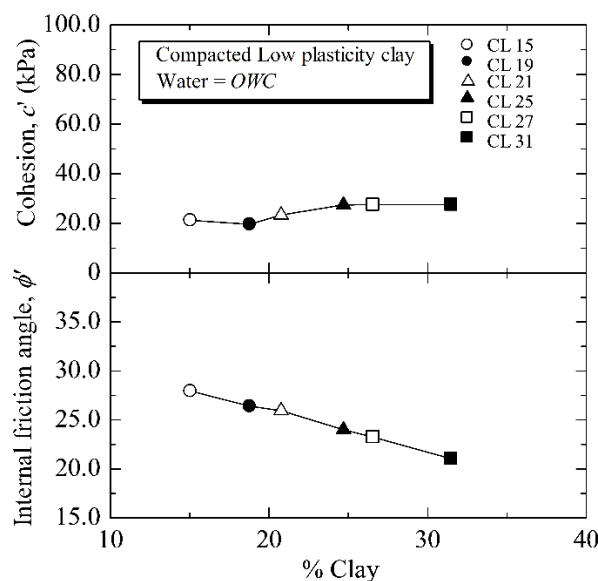
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง หน่วยน้ำหนักแห้ง (dry unit weight) และ ปริมาณน้ำ (water content) ของตัวอย่างดินลมหอบขนแกนแปรผันปริมาณดินเหนียว

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง หน่วยน้ำหนักแห้ง (Dry unit weight) และ ปริมาณน้ำ (Water content) ของตัวอย่างดินลมหอบขนแกนแปรผันปริมาณดินเหนียว ภายใต้พลังงาน การบดอัดแบบสูงกว่าแบบมาตรฐาน จากรูปพบว่า หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ของตัวอย่างดินลมหอบ (CL 15) มีค่ามากที่สุด จากนั้นหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดจะมีค่าลดลงตามปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณน้ำที่เหมาะสม มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 5 ลักษณะการอัดตัว (compressibility) ของตัวอย่างดินลมหอบขนแกนแปรผันปริมาณดินเหนียว

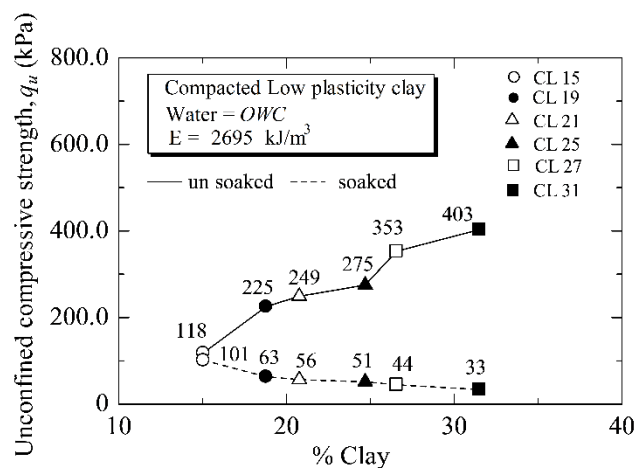
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนโพรง (Void ratio) และ ความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้ง (Effective vertical stress) ของการทดสอบการอัดตัว (Compressibility) ตัวอย่างดินลมหอบขนแกนแปรผันปริมาณดินเหนียว บดอัดแบบสูงกว่าแบบมาตรฐาน จากรูปพบว่า ตัวอย่างที่มีปริมาณดินเหนียวสูง มีแนวโน้มขยายตัวสูงเมื่อมีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น (จากการแช่น้ำก่อนการทดสอบ) ผลจากการขยายตัวทำให้ ค่าอัตราส่วนโพรงเริ่มต้น (Initial void ratio, e_0) และ เส้นการอัดตัว (Compression curve) ของตัวอย่างดินเหนียว CL67 (Without loess soil) มีค่าสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ตัวอย่าง CL31, CL27, CL25, CL21, CL19 และ CL15 ตามลำดับ ผลจากการทดสอบ แสดงให้เห็นว่า ค่าความเค้นครากสูงสุดของตัวอย่างดินลมหอบขนแกน มีค่าสูงสุด และมีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้น อย่างมีนัยยะสำคัญ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล มุมเสียดทานภายในประสิทธิผล และ ปริมาณดินเหนียว ของตัวอย่างดินลมหอบขนแกนแปรผันปริมาณดินเหนียว



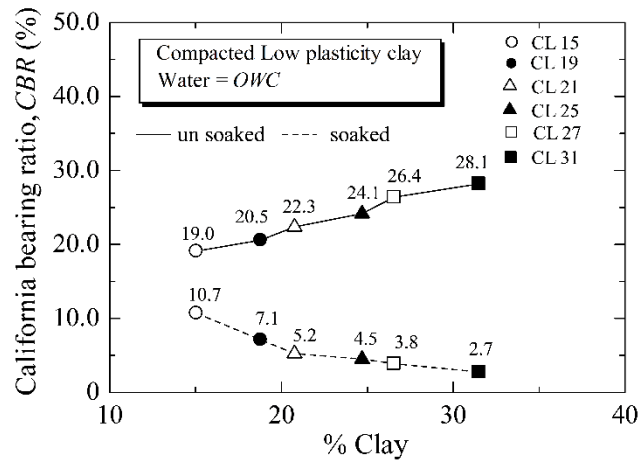
รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงยึดเกาะประสิทธิผล (Cohesion), มุมเสียดทานภายในประสิทธิผล (Internal friction angle) และ ปริมาณดินเหนียว ของตัวอย่างดินลมหอบซอนแก่นแปรผันปริมาณดินเหนียวบดอัดแบบสูงกว่าแบบมาตรฐาน ทดสอบการแรงเฉือนตรง แบบอัดตัวคายน้ำ จากรูปพบว่า ทุก ๆ ตัวอย่าง แรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผล มีค่าค่อนข้างต่ำ และมีค่าค่อนข้างคงที่ ประมาณ 20 กิโลปาสคาล ไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณของดินเหนียว ค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผล ของตัวอย่างดินลมหอบซอนแก่นแปรผันปริมาณดินเหนียวบดอัด มีสูงสุดประมาณ 25 องศา และมีค่าลดลงตามปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้น อย่างมีนัยยะสำคัญ



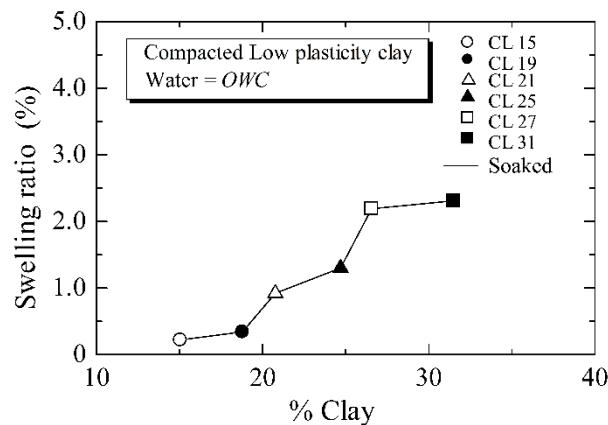
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Unsoaked strength และ Soaked strength กับ ปริมาณดินเหนียว ของตัวอย่างดินลมหอบซอนแก่นแปรผันปริมาณดินเหนียว

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังอัดแกนเดียว (Unconfined compressive strength) และ ปริมาณดินเหนียว ของตัวอย่างดินลมหอบซอนแก่นแปรผันปริมาณดินเหนียว บดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน ทดสอบในสภาวะแช่น้ำ และไม่แช่น้ำ จากรูปพบว่า ทุก ๆ ตัวอย่างในสภาวะไม่แช่น้ำ กำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้นที่ ในขณะที่สภาวะแช่น้ำ กำลังอัดแกนเดียวจะมีค่าลดลงตามปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้น

ดังรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังแบกทาน (Bearing capacity) และ ปริมาณดินเหนียว ของตัวอย่างดินลมหอบซอนแก่นแปรผันปริมาณดินเหนียว ทดสอบในสภาวะแช่น้ำ และไม่แช่น้ำ ภายใต้พลังงานการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน จากรูปพบว่า ทุกๆ ตัวอย่างในสภาวะไม่แช่น้ำ กำลังแบกทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้นที่ ในขณะที่สภาวะแช่น้ำ กำลังแบกทานจะมีค่าลดลงตามปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้น โดยผลการทดสอบในส่วนนี้จะสอดคล้องกับผลทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (ดูรูปที่ 7) รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการบวมตัว (Swelling ratio) และ ปริมาณดินเหนียว ของตัวอย่างดินลมหอบซอนแก่นแปรผันปริมาณดินเหนียว ภายใต้การทดสอบ CBR test ในสภาวะแช่น้ำ จากผลการทดสอบ ดินลมหอบซอนแก่นเป็นดินบวมตัวต่ำ ประมาณ 0.2% ค่าการบวมตัวของดินลมหอบซอนแก่นแปรผันปริมาณดินเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้น ตามปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Unsoaked bearing capacity และ Soaked bearing capacity กับปริมาณดินเหนียว ของตัวอย่างดินลมหอบ ขอนแก่นแปรผันปริมาณดินเหนียว



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการบวมตัว (swelling ratio) และ ปริมาณดินเหนียว (%clay) ของดินลมหอบขอนแก่นแปรผัน ปริมาณดินเหนียวบดอัด

5. การอภิปรายผล

กลไกที่ควบคุมคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลมหอบขอนแก่นแปรผันปริมาณดินเหนียว ได้แก่ แร่ดินเหนียว และ ปริมาณน้ำในการบดอัด จากผลทดสอบ Activity index (ดูรูปที่ 2) แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณดินเหนียวในดินลมหอบขอนแก่นส่งผลให้ Activity index มีค่าสูงขึ้น ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 1.0 จัดเป็นดินประเภท บวมตัวต่ำ-บวมตัวปกติ (Inactive-Normal clay) (Skempton & Northey, 1953) สอดคล้องกับผลการทดสอบ อัตราส่วนบวมตัวอิสระ (ดูรูปที่ 3) มีค่า FSR อยู่ระหว่าง 1 ถึง 1.5 จัดว่าเป็นดินบวมตัวต่ำ มีแร่ดินเหนียว Kaolinite และ Montmorillonite เป็นส่วนประกอบหลัก (Prakash & Sridharan, 2004) นอกจากนี้ ผลจากการทดสอบการบดอัดดินลมหอบขอนแก่นแปรผันปริมาณดินเหนียว พบว่า หน่วยหนักดินแห้ง และปริมาณน้ำที่เหมาะสมมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยยะสำคัญ กับปริมาณของดินเหนียว (ดูรูปที่ 4) เนื่องจาก ดินเหนียวที่แทรกตัวอยู่ในดินลมหอบ



หอบขนแก่นเป็นดินเหนียววมตัวต่ำ ชิดจำกัดเหลว (Liquid limit, LL) ของดินเหนียว เป็นตัวควบคุมปริมาณน้ำในการบดอัด (Horpibulsuk et al., 2008)

การยุบอัดตัวของดินเป็นอีกพฤติกรรม ที่เป็นตัวบ่งบอกคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน โดยหาได้จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test) จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินลมหอบแปรผันปริมาณดินเหนียว (ดูรูปที่ 5) พบว่า ผลของดินเหนียวที่แทรกอยู่ในดินลมหอบแปรผัน ทำให้เกิดการขยายตัวเนื่องจากการแช่น้ำ ส่งผลค่าอัตราส่วน โพรงเริ่มต้นของดินตัวอย่าง มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้น และทำให้ความเค้นคราก (Yield stress or pre-consolidation pressure) มีค่าลดลงตามปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้น ผลจากพฤติกรรมดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงตัวแปรควบคุมของดินเหนียว (ของเหลวที่อยู่ระหว่างช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Pore fluid) และ พื้นที่ผิวของดิน (Surface area) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับแรงของดินเหนียว) ในส่วนของ พฤติกรรมด้านการรับกำลังดินลมหอบแปรผัน ปริมาณดินเหนียว จะพบว่า ในสภาวะแช่น้ำกำลังอัดแกนเดียวและกำลังแบกทานจะมีค่าลดลงตามปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้น (ดูรูปที่ 7 และ 8) ในขณะที่ ผลทดสอบการบวมตัว (ดูรูปที่ 9) จะพบว่า ค่าการบวมตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินเหนียวเพิ่มขึ้น ผลจากพฤติกรรมดังกล่าวอธิบายได้ว่า โครงสร้างของดินประเภทนี้เป็นดินที่มีความไวตัวต่อน้ำ มีพันธะเชื่อมประสานของดินเหนียวที่อ่อนแอ, มีความพรุนสูง และ การเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคของดินไม่มีเสถียรภาพ ทำให้เกิดการสูญเสียกำลังและมีการขยายตัวที่สูง (Ma et al., 2017)

การวิเคราะห์กำลังต้านทานแรงของดินลมหอบขนแก่นจะวิเคราะห์ในพจน์ของพารามิเตอร์กำลังประสิทธิภาพ (Effective strength parameter) ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของดินชนิดหนึ่งๆ ในดินลมหอบขนแก่นแปรผันดินเหนียววมตัวต่ำ ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่า อิทธิพลของดินเหนียวไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความยึดเหนี่ยว (Cohesion) แต่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์มุมเสียดทานภายในของเม็ดดิน (Internal friction angle) อย่างเห็นได้ชัดเจน (ดูรูปที่ 6) เนื่องจาก แร่ประกอบดินเหนียวจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของดินเหนียว ในดินลมหอบขนแก่นแปรผันดินเหนียว ผลจากการทดสอบ FSR แสดงให้เห็นว่า แร่คาโอลิไนท์ (Kaolinite) และ มอนต์มอริโอไนท์ (Montmorillonite) เป็นส่วนประกอบหลัก (ดูรูปที่ 3) เมื่อทำการทดสอบในสภาวะดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ผลของน้ำจะทำให้แร่ดินเหนียวเกิดการบวมตัว ค่ามุมเสียดทานภายในจะมีค่าลดลงตามปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้น

6. บทสรุป

1) ผลการศึกษา คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางวิศวกรรม ของดินลมหอบขนแก่น และดินลมหอบขนแก่นแปรผันปริมาณดินเหนียว สรุปได้ดังนี้ดินลมหอบขนแก่นธรรมชาติ จัดเป็นดินทรายปนดินตะกอน (Silty sand, SM) ดินลมหอบขนแก่นที่มีส่วนผสมของดินเหนียว จัดเป็นดินเหนียวปนดินตะกอน (Low plasticity clay, CL) ค่า activity index ของดินตัวอย่างมีค่า อยู่ในช่วงระหว่าง 0.5 ถึง 1.0 และ ค่าอัตราส่วนการบวมตัวอิสระมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 1.5 จัดเป็นดินประเภท inactive and normal clay

2) ค่าความเค้นครากสูงสุดของดินลมหอบขนแก่นบดอัดมีค่าสูงสุด และมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้น

3) แรงยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพของดินลมหอบขนแก่นบดอัดมีค่าสูงสุดมีค่าค่อนข้างต่ำ และ มีค่าค่อนข้างคงที่ ประมาณ 20 กิโลปาสกาล ไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณของดินเหนียว ค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิภาพ ของ



ตัวอย่างดินลมหอบขนแก่นแปรผันปริมาณดินเหนียวบดอัด มีสูงสุดประมาณ 25 องศา และมีค่าลดลงตามปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้น

4) กำลังอัดแกนเดียวและกำลังแบกทานของดินลมหอบขนแก่นบดอัดในสภาวะบดอัดที่หน่วยน้ำแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้นที่ ในขณะที่กำลังอัดแกนเดียวและกำลังแบกทานสภาวะแช่น้ำมีค่าลดลงตามปริมาณดินเหนียวที่เพิ่มขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัย สำหรับระดับปริญญาบัณฑิตศึกษา งบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น

8. เอกสารอ้างอิง

- Al-Rawas AA. (2000). State-of-the-art review of collapsible soils. *Science and Technology Review*, 115-35.
- Akagi, T. (1981). Effect of mandrel-driven sand drains on soft clay. In *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, A.A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands,1, 581– 584.
- Balasubramanian, A.S. (1975). Stress–strain behavior of a saturated clay for states below the state boundary surface. *Soils and Foundations*, 15(3), 13–25.
- Bergado, D.T., Ahmed, S., Sampaco, C.L., and Balasubramaniam, A.S. (1990). Settlements of Bangna–Bangpakong Highway on soft Bangkok clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 116(1), 136–155.
- Brenner, R.P., Balasubramaniam, A.S., Chotivittayathanin, R., and Pananookool, P. (1979). Pore pressure from pile driving in Bangkok clay. In *Proceedings of the 6th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Singapore, 133–136.
- Cox, J.B. (1971). Geotechnical characteristic of soil along the Thon Buri-Pak Tho Highway Thailand. In *Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Bangkok, Thailand, 26 July – 1 August 1971., 249–255
- Horpibulsuk, S., and Rachan, R. (2004). Novel approach for analyzing compressibility and permeability characteristics of Bangkok clayey soils. In *Proceedings of the 15th Southeast Asian Geotechnical Conference*, Bangkok, Thailand, 22–26 November 2004, 3–8.
- Horpibulsuk, S., Shibuya, S., Fuenkajorn, K. and Katkan, W. (2007). Assessment of engineering properties of bangkok clay. *Geotechnique*, 44, 173 – 187
- Horpibulsuk, S., Katkan, W., and Apichatvullop, A. (2008). An approach for assessment of compaction curves of fine-grained soils at various energies using a one point test, *Soils and Foundations*, 48(2), 115-126



- Kim, S.R., Seah, T.H., and Balasubramaniam, A.S. (1994). Formulation stress strain behavior inside the stress boundary surface. In Proceedings of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi, India, 5– 10 January 1994. A.A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands, 1, 51–56
- Ladd, C.C., Moh, Z.C., and Gifford, D.G. (1971). Undrained strength of soft Bangkok clay. In Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok, Thailand, 26 July – 1 August 1971, 135–140.
- Li P, Qian H, Wu J. (2014). Environment: Accelerate research on land creation. *Nature*. 5,510(7503),29-31
- Lommler JC, Bandini P. (2015). Characterization of collapsible soils. In: Proceedings of IFCEE 2015, San Antonio, Texas
- Ma, F., Jing Yang, J., Bai, X. (2017). Water sensitivity and microstructure of compacted loess. *Transportation Geotechnics*, 11, 41–56
- Nouaouria MS, Guenfoud M, Lafifi B. (2008). Engineering properties of loess in Algeria. *Engineering Geology*, 99(1-2), 85-90.
- Phien-wej N, Pientong T, Balasubramaniam AS. (1992). Collapse and strength characteristics of loess in Thailand. *Engineering Geology*, 32(1-2),59-72.
- Prakash, K. and Sridharan, A. (2004). Free swell ratio and clay mineralogy of fine-grained soils. *Geotechnical Testing Journal*, 27, 2, 220-225.
- Rogers CDF, Dijkstra TA, Smalley IJ. (1994). Hydroconsolidation and subsidence of loess: studies from China, Russia, North America and Europe. *Engineering Geology*, 37(2), 83-113
- Rogers CDF. (1995). Types and distribution of collapsible soils. In: Genesis of properties of collapsible soils. NATO ASI seriesvol. 468. Dordrecht, the Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1-17.
- Ryashchenko TG, Akulova VV, Erbaeva MA. (2008). Loessial soils of Priangaria Transbaikalia, Mongolia, and northwestern China. *Quaternary International*, 179:1, pp.90-95
- Sadia Sohail, N. Aadil, and M. S. Khan (2012). Analysis of Geotechnical and Consolidation Characteristics: A Case Study of UET, Kala Shah Kaku Campus, Lahore, Pakistan. *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, 4:5 , pp.661-664
- Skempton, A.W. and Northey, R.D. (1953). The sensitivity of clays. *Geotechnique*, 3, 30-53.