

การทดสอบภาคสนามเพื่อศึกษาการทรุดตัวของฐานรากตื้น บนดินทรายปนดินเหนียว

A Field Study on Settlement of Shallow Foundation on Clayey Sand

อัทพล บุบปี (Attaphol Bubpi)^{1*} ดร.พงศกร พวงชมพู (Dr.Pongsagorn Pongchompu)**

(Received: August 3, 2020; Revised: September 15, 2020; Accepted: May 18, 2021)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการทรุดตัวของฐานรากตื้น โดยแบบจำลองภาคสนามทั้งแบบวงกลมและแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งทั้งสองรูปแบบนั้นมีพื้นที่เท่ากัน ทดสอบที่ระดับความลึก -1.00 ม. โดยดินบริเวณที่ศึกษาเป็นดินทรายละเอียดไม่ดีและทรายปนดินเหนียว มีค่าความชื้นเฉลี่ยของดินที่ 27.10 % และได้ใช้น้ำหนักบรรทุกออกแบบที่ 10 ตัน/ตร.ม. อัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 3 น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของดิน 30 ตัน/ตร.ม. ทำการศึกษารูปแบบละ 3 หลุมทดสอบ พบว่าการทรุดในสนามมีค่าการทรุดตัวเฉลี่ย แบบวงกลมและแบบสี่เหลี่ยมอยู่ที่ 2.81 มม.และ 3.19 มม.ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำหนักบรรทุกที่กระจายผ่านฐานราก รูปทรงแบบวงกลมนั้น ลดการทรุดตัวในดินฐานรากได้มากกว่าฐานรากแบบสี่เหลี่ยมประมาณ 12%

ABSTRACT

This research aimed to study settlement of shallow foundation by field models with the square and circle shape steel plate that both had equal section area. It used criteria at depth - 1.00 meter on poorly graded sand and clayey sand that had average water content 27.10 %. Moreover considered to design bearing load 10 tons /square meter and ultimate loading capacity of soil 30 tons / square meter with safety factor ratio 3 as well as use 3 sample for each test case. The results found the settlement values of circle and square steel plate showed 2.81 and 3.19 millimeters, respectively, effectively reduced the settlement induced by the model test loading passed through circular foundations was about 12% less than square foundations.

คำสำคัญ: ฐานรากตื้น การทรุดตัว กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดิน

Keywords: Shallow foundation, Settlement, Capacity of soil

¹Correspondent author: attaphol009tum@gmail.com

*อาจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
วิทยาเขตขอนแก่น

**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อาจารย์สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
วิทยาเขตขอนแก่น

บทนำ

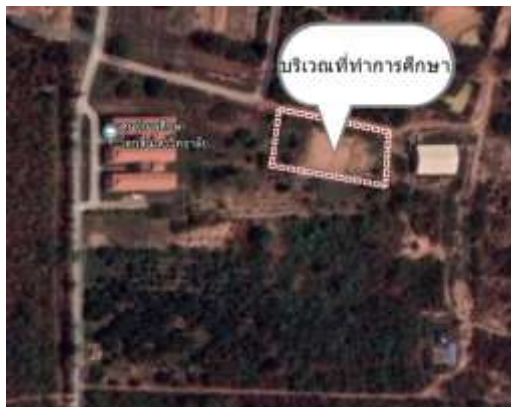
ในปัจจุบันจำนวนประชากรเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ และความต้องการด้านปัจจัยสี่ก็เพิ่มตามไปด้วย สิ่งที่เกิดขึ้นไม่ได้ด้านวิศวกรรมก็คือ การรองรับความต้องการที่อยู่อาศัย เช่น การก่อสร้างอาคาร บ้านเรือน คอนโด หรือแม้แต่โรงงานอุตสาหกรรมก็มีเพิ่มมากขึ้น องค์ประกอบที่สำคัญที่วิศวกรผู้ออกแบบอาคารต้องพิจารณาเป็นพิเศษคือ โครงสร้างฐานรากของอาคาร โดยรูปแบบของโครงสร้างอาคารหลักๆที่นิยมใช้มี 2 รูปแบบ คือ ฐานรากลึกหรือฐานรากที่มีเสาเข็มและฐานรากตื้นหรือที่เรียกว่าฐานรากแผ่ โดยทั่วไปแล้วอาคารขนาดเล็กที่มีน้ำหนักของโครงสร้างไม่มากนัก เช่น บ้านพักอาศัยชั้นเดียวหรือโรงงานขนาดเล็ก ที่ก่อสร้างในเขตพื้นที่ดินแข็ง ที่มีค่ากำลังต้านทานจากดินค่อนข้างสูง วิศวกรผู้ออกแบบมักจะนิยมออกแบบฐานรากอาคารเป็นแบบฐานรากตื้น แต่ต้องมีการตรวจสอบการรับน้ำหนักของชั้นดินก่อนจึงมีการออกแบบ เพื่อความปลอดภัยของโครงสร้างอาคารและผู้ใช้งาน โดยใช้วิธีการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของดิน (plate load test) อีกองค์ประกอบหนึ่งที่ผู้ออกแบบต้องคำนึงถึง ในแง่การออกแบบ การรับน้ำหนักและการทรุดตัวของโครงสร้างคือรูปร่างหรือรูปทรงของฐานรากตื้นก็มีหลากหลายรูปแบบให้เลือกใช้งาน เช่น แบบวงกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือแบบหกเหลี่ยม เป็นต้น ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบภาคสนามเพื่อศึกษาการทรุดตัวของฐานรากตื้น ซึ่งผู้วิจัยต้องการทราบถึง รูปแบบของฐานรากตื้นนั้นมีผลต่อการรับกำลังและการทรุดตัวที่แตกต่างกันน้อยเพียงใด ในเงื่อนไขที่มีพื้นที่ของแบบจำลองที่เท่า ๆ กัน และผู้วิจัยหวังว่าข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้จะเป็นประโยชน์แก่นักวิจัยอื่นและผู้ออกแบบ ในการเรื่องเลือกรูปแบบร่างของฐานรากตื้นต่อไป

วัตถุประสงค์

การทดสอบภาคสนามเพื่อศึกษาการทรุดตัวของฐานรากตื้น ในรูปแบบวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตร และในรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.265 x 0.265 เมตร ซึ่งทั้ง 2 รูปแบบนั้นมีพื้นที่เท่ากันที่ 0.07 ตารางเมตร

ขอบเขตการศึกษา

1. สถานที่ทำการศึกษา ศูนย์การศึกษาโคกสี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
2. วิธีการทดสอบในภาคสนาม ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1194-94 [1] ทำการทดสอบที่ระดับความลึก -1.00 เมตร โดยใช้น้ำหนักบรรทุกออกแบบที่ 10 ตัน/ตารางเมตร อัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 3 ซึ่งมีน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของดิน 30 ตัน/ตารางเมตร
3. วิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการ Sieve Analysis of Soil (ASTM D 2487) [4] Atterberg's Limit of Soil (ASTM D 4318) [5] และ Natural Water Content (ASTM D 4959-00) [6]



ภาพที่ 1 สถานที่ทำการศึกษ

ทฤษฎีและวิจัยที่เกี่ยวข้อง

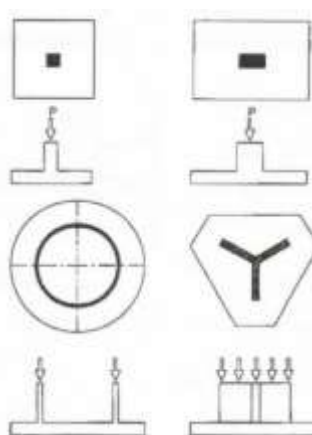
ฐานรากตื้น

ฐานรากระดับตื้น(Shallow foundation) คือ ฐานรากที่สามารถกระจายน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างผ่านฐานรากลงบนชั้นดินที่แข็งแรงพอสมควรในระดับประมาณ 1 – 3 เมตร จากผิวดินได้โดย มีข้อบ่งชี้ที่เหมาะสมดังนี้ [7]

1. ชั้นดินในระดับตื้นที่รองรับฐานรากมีความแข็งแรง
2. ไม่มีดินเหนียวอ่อนที่จะทำให้การทรุดตัวมากหรือทรุดตัวต่างกันระหว่างฐานราก
3. ลักษณะการจัดเรียงตัวของชั้นดินค่อนข้างสม่ำเสมอ
4. ไม่อยู่ในบริเวณที่มีร่องน้ำหรือลำน้ำที่อาจเกิดการกัดเซาะ

รูปแบบฐานรากตื้นแบบแผ่เดี่ยว (isolate spread footing) [7]

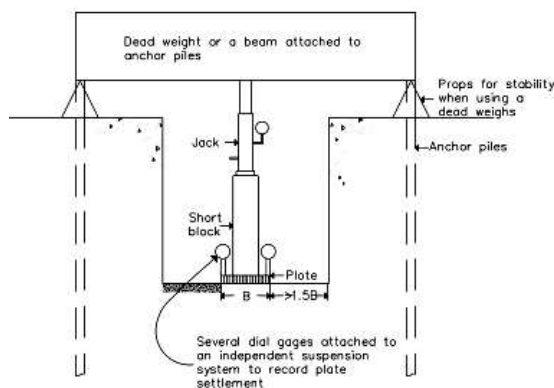
โครงสร้างมีลักษณะเสาแยกจากกันพอสมควร โดยที่น้ำหนักที่ถ่ายลงเสาไม่มากนักและชั้นดินมีความแข็งแรงเพียงพอ ดังนั้นจึงไม่ต้องการพื้นที่ถ่ายแรงมากนัก การออกแบบเป็นฐานรากแผ่เดี่ยวรับน้ำหนักจากเสาแต่ละต้นจะเป็นการประหยัดและง่ายต่อการก่อสร้างในทางปฏิบัติ



ภาพที่ 2 ฐานรากแผ่เดี่ยว

การทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดิน (Plate Bearing Test)

บุญเทพ (2539) [8] เป็นการทดสอบโดยอาศัยแผ่นเหล็กทรงกลมหนา 1 นิ้ว และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 12-30 นิ้ว ซึ่งขนาดเพิ่มช่วงละ 6 นิ้ว แต่บางครั้งอาจใช้แผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 12x12 นิ้ว หากใช้ขนาดใหญ่แล้วจำเป็นที่จะต้องนำแผ่นที่มีขนาดเล็กกว่ามาทับเป็นชั้น ๆ ไว้เพื่อลดการโก่งงอของแผ่นเหล็ก ในขณะที่เหล็กมีน้ำหนักสูงมากค้ำ การติดตั้งเครื่องมือพร้อมอุปกรณ์ของการทดสอบ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4 ควรทดสอบที่ระดับความลึกเดียวกันกับที่จะวางฐานรากและทำการสูบน้ำออกจากดินหลุมหากทดสอบในความลึกต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน

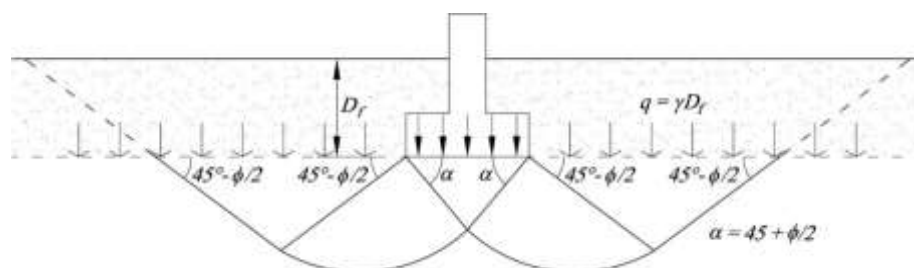


ภาพที่ 3 การทดสอบ Plate Bearing Test ในสนาม

การสำรวจและเก็บตัวอย่างดินในสนาม [7]

การสำรวจชั้นดิน สามารถทำได้ 2 กลุ่ม คือ

1. การสำรวจทางอ้อม ได้แก่ การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ ซึ่งเป็นการสำรวจที่ส่งพลังงาน เช่น คลื่นเสียงและไฟฟ้า ลงไปในชั้นดินและแปลค่าออกมาเป็นลักษณะของชั้นดินโดยไม่มีการขุดเจาะ
 2. การสำรวจทางตรง คือ การขุดเจาะชั้นดินลงไปเพื่อทราบสภาพจริงของชั้นดิน ประกอบการทดสอบในสนามและเก็บตัวอย่างดินมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นประกอบการออกแบบ
- การพิจารณาค่ามุมที่เกิดจากการเสีรูปของชั้นดินได้ฐานรากแผ่ การเสีรูปของชั้นดินได้ฐานรากแผ่ตามแนวคิดของ Terzaghi และ Meyerhof แสดงดังภาพที่ [9]



ภาพที่ 4 ลักษณะการวิบัติของชั้นดินได้ฐานรากตามแนวคิดของ Terzaghi, และ Meyerhof

สำหรับการการเสีรูปของชั้นดินได้ฐานรากตามแนวคิดของ Terzaghi, ได้จากสมการกำลังรับแรงแบกทานประลัย ดังนี้ [9]

$$q_u = 1.3cN_c + qN_q + 0.4\gamma BN_f$$

สำหรับฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส

$$q_u = 1.3cN_c + qN_q + 0.3\gamma BN_f$$

สำหรับฐานรากวงกลม

การประมาณการทรุดตัวของฐานรากบนชั้นดินทรายตามทฤษฎีของ Schmertmann and Haetman

การประมาณการทรุดตัวของฐานรากบนชั้นดินทรายของ Schmertmann and Haetman เป็นการหาแบบกึ่งประสพการณ์ (Semi empirical) ซึ่งประมาณสัมประสิทธิ์ความเครียดจากผลทดสอบในสนาม สมมติฐานในการวิเคราะห์น้ำหนักที่กระทำเป็นแบบสม่ำเสมอ (Uniform load) ทำให้เกิดการกระจายความเครียดในแนวตั้งเป็นไปตามทฤษฎีหุ้้น การคำนวณทำได้โดยการประมาณการเปลี่ยนแปลงโมดูลัสยืดหยุ่นตามความลึก ซึ่งการประมาณการทรุดตัวของฐานรากบนชั้นดินทรายได้จากสมการดังต่อไปนี้ [9]

$$S_r = C_1 C_2 (q_{ult}) \sum_{i=1}^n \frac{I_z}{E_r} \Delta z$$

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Aarash Hosseini, [10] ได้ทำวิจัยในการหาค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของฐานรากรูปทรงสี่เหลี่ยม ผลการทดสอบพบว่า ความสามารถในการรับน้ำหนักของฐานรากขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของดิน ความลึกของหลุมการทดสอบ และแรงที่ใช้ในการทดสอบเป็นต้น การศึกษาความเครียดของดินจะขึ้นอยู่กับปริมาณของแรงที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งมีความสำคัญในการระบุพฤติกรรมของดิน ดังนั้นในการศึกษาในครั้งนี้จะเป็นการศึกษาผลกระทบของแรงดันในการยึดเกาะของดินที่มีผลต่อการเกาะกันของมุมและแรงเสียดทานในดิน จากนั้นจึงทำการประเมินผลการทดสอบต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของดิน ด้วยวิธี Meyerhof, และ Terzaghi, ด้วยการใช้ซอฟต์แวร์ Plaxis.

D. A. M. Araújo, C. M. L. Costa and Y. D. J. Costa [11] ได้ทำการศึกษาผลของขนาดของฐานรากดินในทราย ในการทดสอบจะใช้แผ่นเหล็กสามแผ่น ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30, 0.50 และ 0.80 เมตร ผลจากการทดสอบพบว่า กราฟความเครียดที่ได้รับจากการทดสอบไม่ได้แสดงรูปแบบความล้มเหลวที่ชัดเจน ดังนั้นจึงใช้เกณฑ์ความล้มเหลวทั่วไปเพื่อกำหนดความสามารถของ

Manav Patel, Manas Bhoi [12] ได้ศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวของฐานรากที่มีรูปแบบวงกลมและแบบสี่เหลี่ยม ได้ทำการทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบของรูปร่างฐานรากที่มีผลต่อกำลังแบกทาน โดยได้ทำการศึกษาฐานรากแบบวงกลม แบบสี่เหลี่ยมและแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า อัตราส่วนของฐานรากใช้ที่ L/B ที่ 1.5 และ 2 เท่า ซึ่งใช้ขนาดของฐานรากสี่เหลี่ยมกว้างเท่ากับ 15 ซม. สูงศูนย์กลางที่ 15 ซม. และฐานรากวงกลมที่เส้นผ่านศูนย์กลางที่ 15 ซม. เช่นกันและทำการทดสอบบนทรายแม่น้ำที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ 60% และ 80% และผลการทดสอบการรับกำลังแบกทานและการทรุดตัวของฐานรากในรูปแบบดังกล่าวนี้ พบว่ามีค่าการรับน้ำหนักแบกทานและการทรุดตัวของฐานรากมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

Nakul Dev [3] ได้ทำการวิจัยหาค่ากำลังรับแรงแบกทานของดินโดยใช้วิธีการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของดิน (plate load test) เพื่อนำค่าที่ได้จากการทดสอบนำมาใช้ในการออกแบบอาคารชลประทานใช้

ในการระบายน้ำของโครงการบ้านสาเกี๊ยะ ผลจากการทดสอบพบว่าการรับกำลังรับแรงแบกทานของดินอยู่ในช่วง $2.40 \text{ kg/cm}^2 - 3.64 \text{ kg/cm}^2$

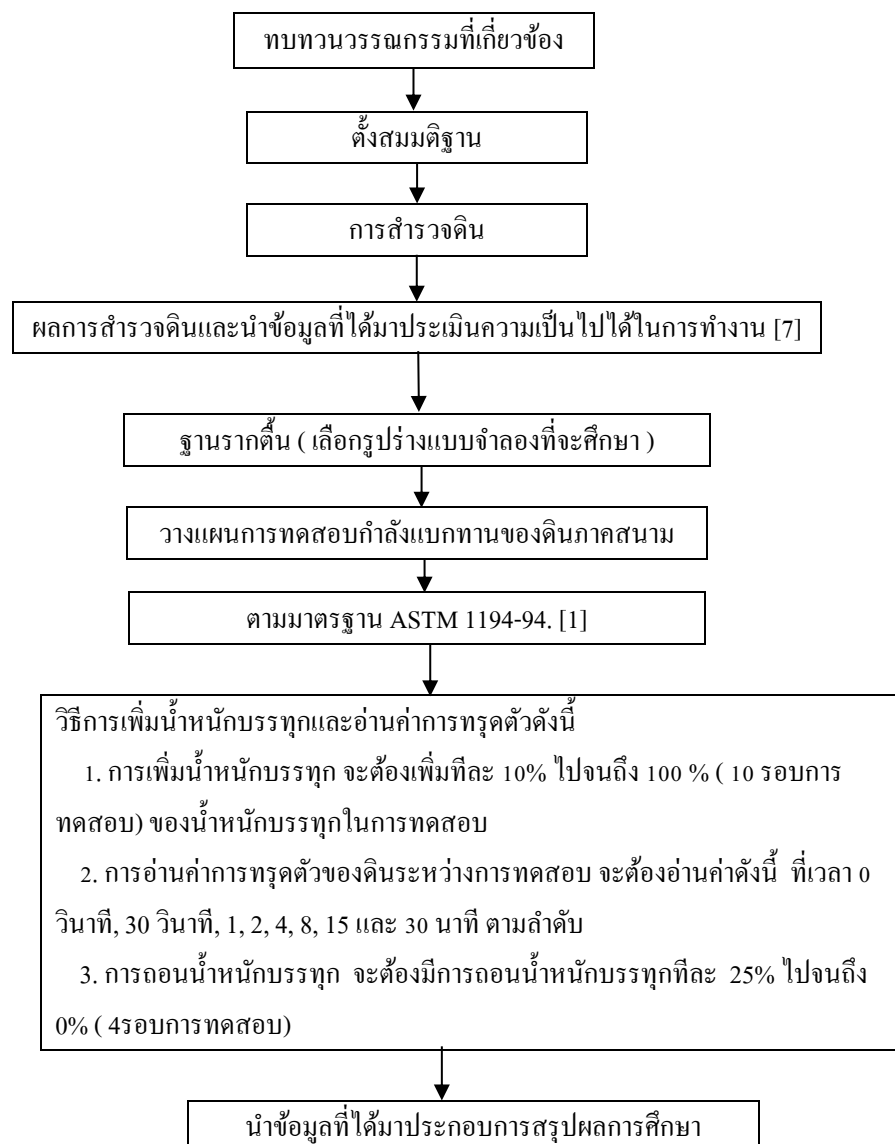
S. R. Pathak, S. N. Kamat and D. R. Phatak [13] ได้ศึกษาพฤติกรรมของฐานรากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ฐานรากรูปวงกลมและฐานรากรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า การทดสอบแบบจำลองฐานรากวางอยู่บนดิน c - ϕ ดินเหนียวในแบบจำลองห้องปฏิบัติการ ศึกษากำลังแบกทานและค่าการทรุดตัว มีการควบคุมพารามิเตอร์ ต่าง ๆ เช่น อัตราส่วน L/B รูปร่างและขนาดของฐานราก ทั้งนี้จะนำผลการศึกษาดังกล่าวนั้นไปใช้ในการประมาณค่าความน่าเชื่อถือของกำลังแบกทานของดิน ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากที่สุดในงานออกแบบฐานราก ทำการเปรียบเทียบกำลังแบกทานระหว่างฐานรากที่ประเมินโดยวิธีการ Vesic วิธีของ Tezaghi และที่ประเมินโดยแบบทดสอบผลลัพธ์ ผลที่ได้คือ ความสามารถในการรับน้ำหนักของฐานรากแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสรับน้ำหนักได้มากกว่าฐานรากแบบวงกลมและแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีพื้นที่เท่ากัน

Bestun J. Nareeman. [14] การศึกษาผลของขนาดต่อความสามารถในการรับกำลังแบกทานและการทรุดตัวของฐานรากดิน ได้ทำการศึกษาฐานรากดิน รูปแบบ คือ แบบวงกลม สี่เหลี่ยมผืนผ้าและสี่เหลี่ยมจัตุรัส 3 สำหรับฐานรากวงกลมจะใช้เส้นผ่านศูนย์กลาง 8, 10, 15 และ 20 ซม. ในขณะที่ฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดที่ใช้คือ 8×8 , 10×10 , 15×15 , 20×20 ซม. และ 8×12 , 10×15 , 15×22.5 และ 20×30 ซม. ตามลำดับ งานทดลองได้ศึกษาโดยใช้ซอฟต์แวร์ (SAGE-CRISP) ซึ่งเป็นโปรแกรมไฟไนต์ 2 มิติที่ออกแบบมาเพื่อแก้ปัญหาความเครียดระนาบ 2 มิติและปัญหาสมมาตรตามแนวแกน ใช้ในการวิเคราะห์ตารางพุทขนาด 8, 15 และ 20 ซม. นอกจากนี้ยังใช้สมการ Zhu et al (2001) เพื่อกำหนดปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนัก S_u และ N_u สำหรับรูปทรงฐานรากที่แตกต่างกัน ความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าสมการเหล่านี้สามารถใช้สำหรับฐานรากที่ใหญ่ขึ้นโดยใช้ปัจจัยสำหรับ N_u พบว่าความสามารถในการรับน้ำหนักแบกทาน ปัจจัยรูปร่าง S_u เพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามความกว้างของฐานรากที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ปัจจัยด้านความสามารถในการรองรับน้ำหนักแบก N_u ลดลง ผลการทดสอบมาตราส่วนแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนักแบกทาน N_u ขึ้นอยู่กับความกว้างสัมบูรณ์ของฐานราก แต่สำหรับฐานรากวงกลม สี่เหลี่ยมผืนผ้าและสี่เหลี่ยมจัตุรัส ค่า N_u ลดลงตามการเพิ่มขนาดฐานราก

M. Alhassan , I. L. Boiko.[15] การศึกษาผลของรูปทรงฐานรากต่อการทรุดตัวและความสามารถในการแบกของดิน ผู้วิจัยได้นำเสนอรูปแบบของเส้นโค้งการทรุดตัวของการรับน้ำหนักของฐานรากดิน 4 รูปแบบ คือ สี่เหลี่ยมผืนผ้า สี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมแบบรูปลิ้มและสี่เหลี่ยมรูปตัวท การศึกษาโดยทั่วไปแสดงให้เห็นว่าส่วนใหญ่ของความต้านทานต่อการรับน้ำหนักของฐานดินในตัวอย่างของฐานรากดินที่มีรูปร่างหน้าตัดแนวตั้งเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับดินที่อยู่ใต้ฐานฐานรากในขณะที่กรณีที่มีรูปลิ้มและรูปตัว T ในแนวตั้ง รูปร่างหน้าตัดทั้งดินได้ฐานของฐานรากและตามแนวตั้งมีส่วนร่วมในการต้านทานแรงของโครงสร้าง สิ่งนี้บ่งชี้ว่าการใช้ฐานรากที่มีหน้าตัดแนวตั้งรูปลิ้มและรูปตัว T สามารถช่วยในการเคลื่อนย้ายดินจำนวนมากเหนือฐานรากและเป็นส่วนเพิ่มของดินที่อยู่ใต้ฐานราก แต่ก็ยังช่วยต้านทานการรับน้ำหนักได้อีกด้วยช่วยในการกระจายน้ำหนักของโครงสร้างไปยังชั้นดินโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อชั้นดินที่แข็งแรงกว่าอยู่ภายใต้ชั้นดินที่อ่อนแอกว่า

วิธีการดำเนินงานวิจัย

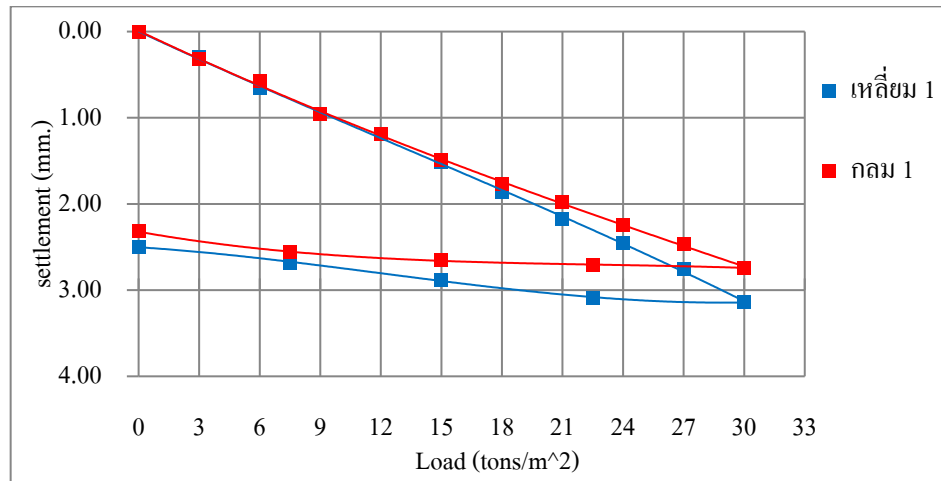
ในการศึกษาในครั้งนี้ ได้เริ่มต้นจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องและตั้งสมมติฐาน ทำการสำรวจดิน พบว่าคุณสมบัติของดิน คือ ค่าขีดจำกัด Atterberg's Limits [5] คือ Liquid Limit [5] 22.4 , Plastic Limit [5] 19.14 ,ค่า Coefficient of Uniformity 3.95 ,ค่า Coefficient of Curvature 1.25 และค่า Plasticity index คือ -3.26 ซึ่งมีค่ามากกว่าเส้น A-Line คือ 1.752 จึงจัดประเภทของดิน คือ SP-SC เป็นดินทรายละเอียดไม่ดีและเป็นดินเหนียวปนทราย [4] และมีค่าความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 27.10 % [6] และนำข้อมูลที่ได้มาพิจารณาแล้วมีความสอดคล้องตามข้อแนะนำ [7] กรณีที่ไม่สอดคล้องตามคำแนะนำไม่ขอกล่าวถึงในงานวิจัยครั้งนี้ ต่อมาได้ทำการทดสอบกำลังแบกทานของดินในสนาม ดังแสดงในการดำเนินงานนี้



ภาพที่ 5 แสดงแผนภาพขั้นตอนในการดำเนินงาน

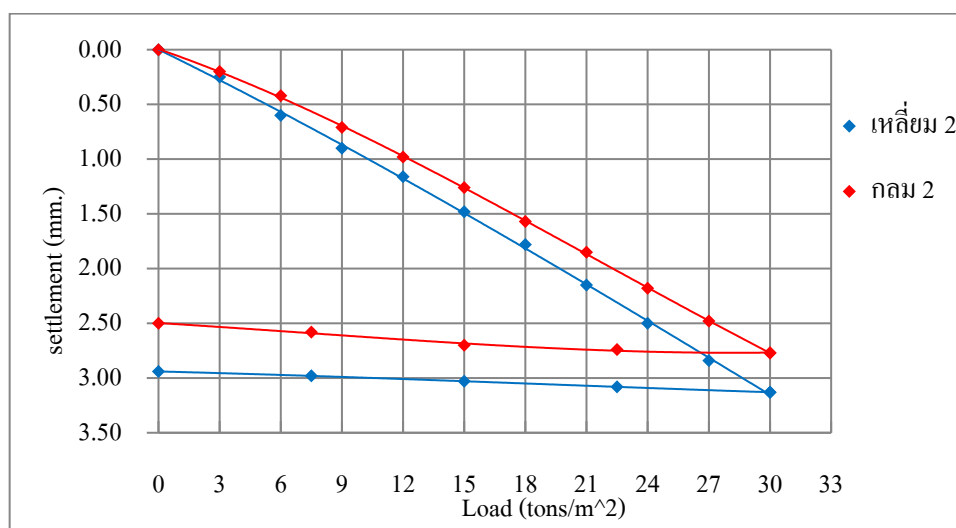
ผลการทดสอบในสนาม

การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของดิน ซึ่งทำการทดสอบตาม มาตรฐาน ASTM D 1194-94 [1] ผลการทดสอบในภาคสนามจะแสดงผลการรับน้ำหนักบรรทุกและค่าการทรุดตัวของดินในขณะที่รับน้ำหนักบรรทุก จะทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ 30 ตันต่อตารางเมตรและพิจารณาค่าการทรุดตัวสูงสุดของทั้งสอบรูปแบบการทดสอบ



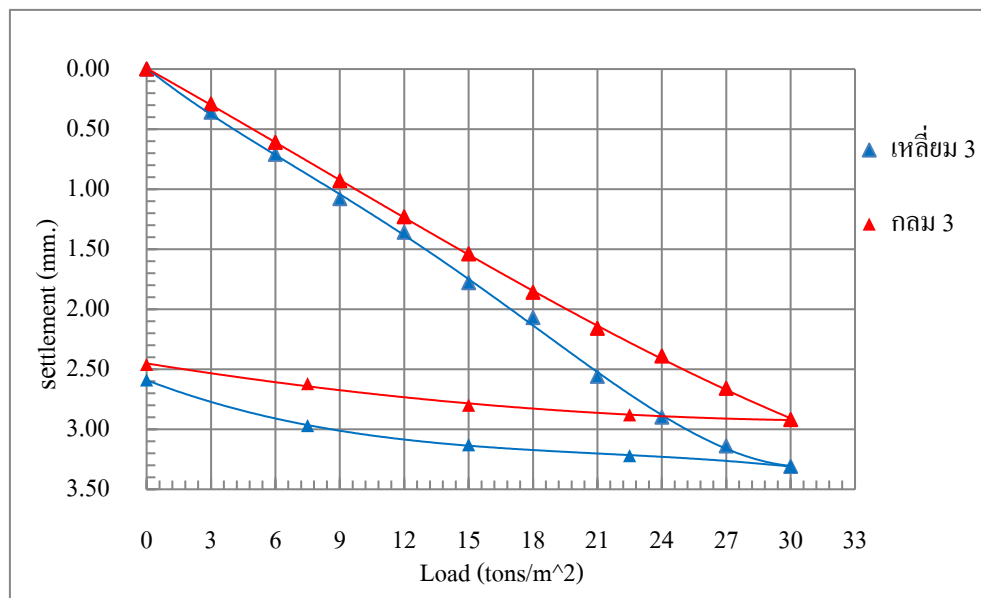
ภาพที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวของดินกับน้ำหนักบรรทุกของดินของหลุมที่ 1 และค่าการคืบตัวของดิน

จากภาพที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวของดินกับน้ำหนักบรรทุกของดิน โดยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดอยู่ที่ 30 ตัน/ตารางเมตร ผลการทรุดตัวสูงสุดของแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยม คือ 3.14 มิลลิเมตร มีค่าการคืบตัวของดินที่น้ำหนักบรรทุกเป็น 0 มีค่าเท่ากับ 2.50 มิลลิเมตร และผลการทรุดตัวสูงสุดของแผ่นเหล็กวงกลม อยู่ที่ 2.74 มิลลิเมตร มีค่าการคืบตัวของดินที่น้ำหนักบรรทุกเป็น 0 มีค่าเท่ากับ 2.32 มิลลิเมตร ซึ่งมีการทรุดตัวสูงสุดแตกต่างกันที่ 0.40 มิลลิเมตร



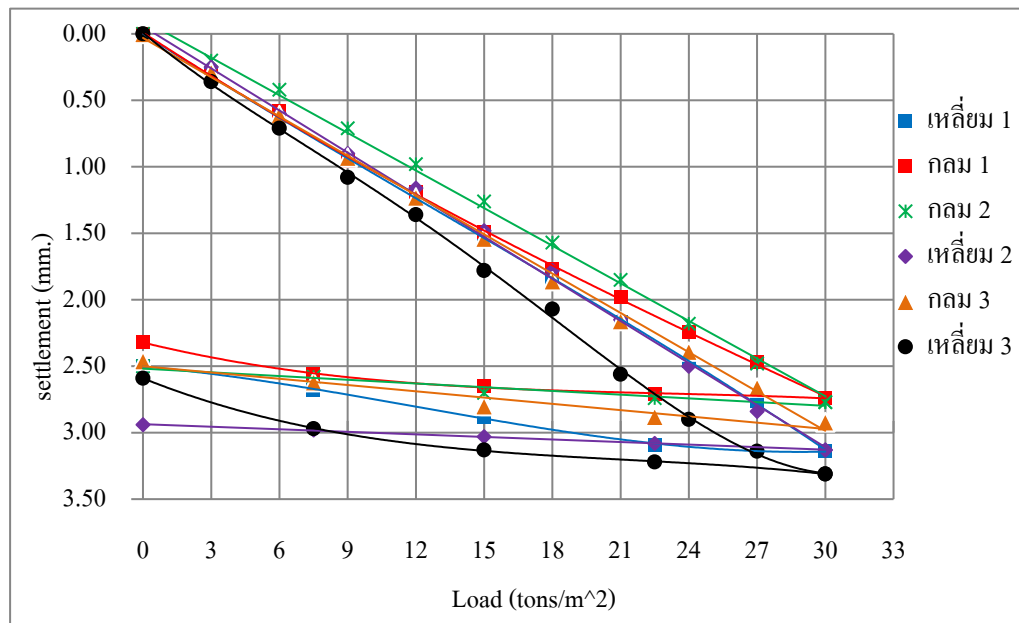
ภาพที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวของดินกับน้ำหนักบรรทุกของดินของหลุมที่ 2 และค่าการคืบตัวของดิน

จากภาพที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวของดินกับน้ำหนักบรรทุกของดิน โดยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดอยู่ที่ 30 ตัน/ตารางเมตร ผลการทรุดตัวสูงสุดของแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยม คือ 3.13 มิลลิเมตร มีค่าการคืบตัวของดินที่น้ำหนักบรรทุกเป็น 0 มีค่าเท่ากับ 2.94 มิลลิเมตร และผลการทรุดตัวสูงสุดของแผ่นเหล็กวงกลมอยู่ที่ 2.77 มิลลิเมตร มีค่าการคืบตัวของดินที่น้ำหนักบรรทุกเป็น 0 มีค่าเท่ากับ 2.50 มิลลิเมตร ซึ่งมีการทรุดตัวสูงสุดแตกต่างกันที่ 0.36 มิลลิเมตร



ภาพที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวของดินกับน้ำหนักบรรทุกของดินของหลุมที่ 3 และค่าการคืบตัวของดิน

จากภาพที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวของดินกับน้ำหนักบรรทุกของดิน โดยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดอยู่ที่ 30 ตัน/ตารางเมตร ผลการทรุดตัวสูงสุดของแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยม คือ 3.31 มิลลิเมตร มีค่าการคืบตัวของดินที่น้ำหนักบรรทุกเป็น 0 มีค่าเท่ากับ 2.59 มิลลิเมตร และผลการทรุดตัวสูงสุดของแผ่นเหล็กวงกลมอยู่ที่ 2.92 มิลลิเมตร มีค่าการคืบตัวของดินที่น้ำหนักบรรทุกเป็น 0 มีค่าเท่ากับ 2.46 มิลลิเมตร ซึ่งมีการทรุดตัวสูงสุดแตกต่างกันที่ 0.39 มิลลิเมตร



ภาพที่ 9 รวมกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวของดินกับน้ำหนักบรรทุกของดินและค่าการคืนตัวของดินของทุกหลุมทดสอบ

จากภาพที่ 9 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวของดินและน้ำหนักบรรทุก ซึ่งน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของทุกหลุมทดสอบ มีค่าเท่ากับ 30 ตัน/ตารางเมตร แล้วค่าการทรุดตัวของแผ่นเหล็กวงกลมเฉลี่ยเท่ากับ 2.81 มิลลิเมตรตามลำดับและค่าการทรุดตัวของแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมเฉลี่ยเท่ากับ 3.19 มิลลิเมตรตามลำดับ ซึ่งมีค่าการทรุดตัวสูงสุดเฉลี่ยแตกต่างกันที่ 0.39 มิลลิเมตร ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 12% ผลต่างของการทรุดตัวดังกล่าวสอดคล้องกับผลต่างของความกว้างแบบจำลอง (B) ฐานรากดินที่ต่างกันร้อยละ 12% เช่นกันและยังสอดคล้องกับ Manav Patel, Manas Bhoi [12] ที่เคยเสนอไว้ว่าค่าการทรุดตัวของแบบวงกลมและสี่เหลี่ยมมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 1 สรุปผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของแต่ละรูปแบบ

รูปแบบการทดสอบ	น้ำหนักบรรทุก สูงสุด (ตันต่อตารางเมตร)	ผลการทรุดตัวเฉลี่ย (มิลลิเมตร)	ผลการทรุดตัวที่แตกต่าง กัน (%)
สี่เหลี่ยม 1 (หลุมทดสอบที่ 1)	30	3.14	12.74
วงกลม 1 (หลุมทดสอบที่ 1)	30	2.74	
สี่เหลี่ยม 2 (หลุมทดสอบที่ 2)	30	3.13	11.50
วงกลม 2 (หลุมทดสอบที่ 2)	30	2.77	
สี่เหลี่ยม 3 (หลุมทดสอบที่ 3)	30	3.31	11.78
วงกลม 3 (หลุมทดสอบที่ 3)	30	2.92	
ค่าเฉลี่ยแบบสี่เหลี่ยม	30	3.19	12.01
ค่าเฉลี่ยแบบวงกลม	30	2.81	

ผลการเลือกรูปของชั้นดินใต้ฐานรากตามแนวคิดของ Terzaghi [9]

จากสมการกำลังรับแรงแบกทานประลัยของฐานราก (q_u) ทำให้ทราบค่าหน่วยแรงยึดเกาะ (C) เท่ากับ 42 KN/m^2 หน่วยน้ำหนักประสิทธิผลของดิน (γ) เท่ากับ 18.34 KN/m^3 สัมประสิทธิ์กำลังแบกทานเป็นฟังก์ชันในรูปของมุม ($\phi = 30$ องศา) คือ $N_c = 37.16$, $N_q = 22.46$, $N_{\gamma} = 19.13$ และความกว้างของฐานราก 0.30 เมตร และ 0.265 เมตร ที่ใช้ในการคำนวณจากสมการ ดังนั้นกำลังรับแรงแบกทานประลัยของฐานรากรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส $q_u = 2290.73 \text{ KN/m}^2$ และ กำลังรับแรงแบกทานประลัยของฐานรากรูปวงกลม $q_u = 2295.64 \text{ KN/m}^2$

ผลการประมาณการทรุดตัวของฐานรากบนชั้นดินทรายตามทฤษฎีของ Schmertmann and Haetman (1987) [9]

จากสมการประมาณการทรุดตัวของฐานรากบนชั้นดินทราย (S_r) ของฐานรากวงกลม และฐานรากสี่เหลี่ยม พบว่า สัมประสิทธิ์ความเครียดตามความลึกของฐานราก (I_z) เท่ากับ 0.32 ตัวคูณปรับแก้สำหรับความลึกของฐานราก (C_1) เท่ากับ 0.467 ตัวคูณปรับแก้สำหรับความลึกของดิน (C_2) เท่ากับ 1.20 โมดูลัสยืดหยุ่นของดินในแต่ละช่วงความลึก (E_s) เท่ากับ 6250 KN ความหนาของชั้นดิน (ΔZ) เท่ากับ 1000 มิลลิเมตร ความเค้นสุทธิที่ระดับท้องฐานราก (q_{net}) เท่ากับ 275.96 KN/m^2 เมื่อแทนค่าที่ได้ลงในสมการ จะทราบค่าประมาณการทรุดตัวของฐานรากบนชั้นดินทราย (S_r) เท่ากับ 7.92 มิลลิเมตร ต่อระยะเวลา 1 ปี

สรุปและอภิปรายผล

จากการทดสอบภาคสนามเพื่อศึกษาการทรุดตัวของฐานรากดิน ในดินบริเวณศูนย์การศึกษาโลกสิมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น ทำการทดสอบที่ระดับความลึก -1.00 เมตร โดยใช้ น้ำหนักออกแบบที่ 10 ตัน/ตารางเมตร อัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 3 มีน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของดิน 30 ตัน/ตารางเมตร ทดสอบโดยวิธี การกระจายน้ำหนักผ่านแผ่นเหล็ก ตามมาตรฐาน ASTM D 1194-94 [1] ซึ่งได้ใช้รูปแบบของแบบจำลองฐานรากดิน 2 แบบ คือ รูปแบบวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 ม. และรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.265×0.265 ม. ซึ่งทั้ง 2 รูปแบบนั้นมีพื้นที่ในการรับน้ำหนักบรรทุกที่เท่ากัน คือ 0.07 ตารางเมตร และได้ผลการศึกษาดังนี้

ผลการศึกษาคุณสมบัติของดินในห้องปฏิบัติการพบว่าดินคือ SP-SC เป็นดินทรายละเอียดไม่ดีและเป็นดินเหนียวปนทรายและมีค่าความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 27.10% ค่าการทรุดตัวของแบบจำลองแบบวงกลมและแบบสี่เหลี่ยม มีการทรุดตัวสูงสุดอยู่ที่ 2.81 มิลลิเมตรและ 3.19 มิลลิเมตร ซึ่งแตกต่างกันอยู่ที่ 0.38 มิลลิเมตร คิดเป็นการทรุดตัวที่แตกต่างกันอยู่ที่ร้อยละ 12% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำหนักบรรทุกกระจายผ่านฐานรากรูปร่างแบบวงกลมนั้น ผลการทรุดตัวในดินฐานรากได้ดีกว่าแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสและจากการทรุดตัวที่แตกต่างกันดังกล่าวยังสอดคล้องกับผลต่างของความกว้างของแบบจำลองที่มีค่าต่างกันที่ 12% ผลการศึกษาดังกล่าวยังสอดคล้องกับ Manav Patel, Manas Bhoi [12] ที่เคยศึกษาพฤติกรรมทรุดตัวของฐานรากที่มีรูปแบบวงกลมและแบบสี่เหลี่ยม พบว่ามีค่าการรับน้ำหนักแบกทานและการทรุดตัวของฐานรากมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนต้องขอขอบคุณ สาขาครุศาสตร์อุตสาหกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่นที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

1. ASTM D 1194-94 American Society for Testing and Materials.
2. TISI 105-2545 standards.
3. Dev N. Bearing Capacity Determination using Plate Load Test - A Case Study [Online]. Researchgat. Available form : <https://www.researchgate.net>. (2019, August 28)
4. ASTM D 2487 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)
5. ASTM D 4318 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils
6. ASTM D 4959-00 Natural Water Content
7. Gasaluck W. Shallow foundations handbook. Bangkok: Se-education; 2013. p. 90.
8. Boonthep Nanegrungsunk. Foundation Engineering and Tunneling. Bangkok: Se-education; 1996. p. 183-208.
9. Horpibulsuk S. Foundation engineering handbook. Bangkok: Se-education; 2009. p. 43-79.
10. Hosseini A. Effect of Confinement Pressure on Soil Behavioral Parameters,” Department of Civil Engineering. Arak Branch, Islamic Azad University, 8.2:2014.(January): 615-619.
11. Araújo D A M , Costa C M L, Costa Y D J. Dimension Effect on Plate Load Test Resulta. Proceedings of the 2nd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering.2,4: 2017 (April): 187-191.
12. Patel M, Bhoi M. Effect of Different Shape of Footing on its Load-Settlement Behaviour (Circular, Square and Rectangular) .Proceedings of the 4th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'19) Rome, Italy – April, 2019 Paper No. ICGRE 168 DOI: 10.11159/icgre19.168
13. Pathak SR, Kamat SN, Phatak DR. Study of Behaviour of Square and Rectangular Footings Resting on Cohesive Soils Based on Model Tests. International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. (2008) - Sixth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering.
14. Bestun J. Nareeman. A Study on the Scale Effect on Bearing Capacity and Settlement of Shallow Foundations. International Journal of Engineering and Technology Volume 2 No. 3, March, 2012.
15. Alhassan M, Boiko IL. Experimental Study of the Effect of Foundation Shape on Settlement and Bearing Capacity of Soils. International Journal of Engineering and Technology Volume 3 No. 2, February, 2013.
16. Warmate1 T, Nwankworala HO. Determination of Elastic Modulus Using Plate Load Test In Calabar, South-Eastern Nigeria [Online]. Ideas. Available form : <https://ideas.repec.org>. (2019, August 28)



17. Xiaohua Bao, Guanlin Ye, Bin Ye, Yanbin Fu, Dong Su. Co-seismic and post-seismic behavior of an existed shallow foundation and super structure system on a natural sand/silt layered ground [Online]. Researchgat. Available form : <https://www.researchgate.net>. (2019, August 28).