



สมรรถนะของถนนไร้ผิวทางเสริมกำลังด้วยตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทางภายใต้แรงดันแบกทาน

PERFORMANCE OF UNPAVED ROAD REINFORCED WITH TRIAXIAL GEOGRIDS SUBJECTED TO BEARING PRESSURE

บุรัสกร บุญญกามา^{1*}, พิทยา แจ่มสว่าง², ณัฐวุฒิ ธนศรีสถิต³, อุทัยฤทธิ์ โรจนวิภาต³ และหทัยรัตน์ ภูระหงษ์⁴

¹ นักศึกษาปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ศาตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

⁴ นักศึกษาปริญญาเอก, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

*Corresponding author, E-mail: s640108181401@email.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ค้นคว้าวิจัยหาประสิทธิภาพของการปรับปรุงคุณภาพดินของถนนไร้ผิวทางด้วยวัสดุเส้นใยที่ทอเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินชนิดตาข่ายเสริมกำลังดินแบบสามทิศทาง ซึ่งถนนไร้ผิวทางประกอบไปด้วยชั้นดินเดิมและดินชั้นพื้นทาง โดยในการทดสอบจะทำการทดสอบด้วยดินเหนียวอ่อนพลาสติกต่ำ ที่มีชั้นพื้นทางเป็น หินคลุก การจำลองตัวอย่างทดสอบนี้จะใช้เป็นโมเดลเล็กขนาดกว้าง 1.5 เมตร สูง 1.2 เมตร และชั้นดินเดิมสูง 0.80 เมตร ในการจำลองชั้นพื้นทางจะมีความหนาตั้งแต่ 0.05-0.20 เมตร จากนั้นทำการใส่วัสดุปรับปรุงคุณภาพที่ระหว่างชั้นของดินทั้งสองและทำการทดสอบกำลังรับแบกทานแบบสถิต มาตรฐาน มยผ. 1253-62 ผลการวิจัยพบว่าการใช้ตาข่ายเสริมกำลังดินแบบสามทิศทาง ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักได้ 1.46 เท่า และลดความหนาของชั้นหินคลุก ดังนั้นการเสริมแรงด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินแบบสามทิศทางจึงสามารถนำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพในการก่อสร้างถนนไร้ผิวทาง

คำสำคัญ: ตาข่ายเสริมกำลัง; ดินเหนียวอ่อนพลาสติกต่ำ; แรงดันแบกทาน; การทรุดตัว; ความเครียด

ABSTRACT

This article studies the effectiveness of unpaved roads reinforced with triaxial geogrids. The unpaved road comprises subgrade and base layers. The subgrade and base considered in this study were low-plasticity clay and crust rock, respectively. The model test was performed in a square steel mold 1.5 m in width and 1.2 m in height. The subgrade thickness was fixed at 0.8 m, whereas the crust rock thicknesses varied from 0.05 to 0.2 m. The triaxial geogrid was inserted between the subgrade and the crust rock layers. The static bearing capacity tests were conducted on the unpaved road models according to the standard TIS 1253-62. The results show that using the triaxial geogrid enhances bearing capacity by 1.46 times and reduces the crust rock thicknesses. Thus, the triaxial geogrid reinforcement can be effectively utilized in unpaved road construction.

Burassakorn Boonyakama^{1*}, Pitthaya Jamsawang², Nuttawut Thanasisathit³, Uthairith Rochanavibhata³ and Hatthairat Poorahong⁴

^{1*}Graduate Student, ² Professor, ³ Assistant Professor and ⁴ Doctoral degrees

^{1, 2, 3, 4} Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok,

Thailand.

KEYWORDS: Geogrid; Clay low plasticity; Static bearing pressure; Settlement; Strain

1. บทนำ

ปัจจัยหลักที่กำหนดอายุการใช้งานของถนนคือความหนาของชั้นพื้นทาง และขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแต่ละชั้นในโครงสร้างของชั้นทาง ในการปูผิวทางแบบฮาร์ดคอร์ทั่วไป ความเสียหายมักเกิดขึ้นเนื่องจากการรับน้ำหนักบรรทุกที่มากเกินไป การรับน้ำหนักกระทำซ้ำไปซ้ำมา [1] ซึ่งนำไปสู่การวิบัติของโครงสร้างหรือทางเท้าอาจมีสาเหตุหลักมาจากร่องล้อและความเมื่อยล้าปรากฏการณ์เหล่านี้และแนวคิดความเสียหายสะสมได้ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาความหนาของชั้นพื้นทางและการผสมผสานวัสดุที่เป็นเข้าไปในโครงสร้างของชั้นทาง เพื่อป้องกันปัญหาที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้าง ซึ่งจำเป็นต้องมีความหนาของชั้นฐานที่สูงเพื่อให้อายุการใช้งานของถนนที่ไม่ได้ลาดยางสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวัสดุขาดความพร้อมและปริมาณการจราจรที่เพิ่มมากขึ้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องลดความหนาของฐานโดยไม่กระทบต่อประสิทธิภาพของชั้นทาง

หินคลุกเป็นทรัพยากรอันมีค่าที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการก่อสร้างถนนสำหรับชั้นพื้นทาง เนื่องจากมีความทนทาน แข็งแรง และมีความสามารถในการรับน้ำหนักได้มาก อย่างไรก็ตาม การสกัดหินบดด้วยวิธีการระเบิดอาจมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมีนัยสำคัญ เช่น การปล่อยฝุ่นและอนุภาคออกสู่อากาศ ซึ่งอาจทำให้คุณภาพอากาศลดลงอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพทางเดินหายใจของชุมชนใกล้เคียง และทำให้ทรัพยากรธรรมชาติหมดสิ้นหากไม่ได้รับการจัดการอย่างยั่งยืน ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพของหินคลุกที่ความหนาลดลงจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการก่อสร้างถนน ในแนวทางปฏิบัติในการก่อสร้างปัจจุบัน วัสดุเส้นใยสังเคราะห์ (Geosynthetic) มักใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพดินที่อ่อนแอหรือไม่เหมาะสมสำหรับถนนลาดยางและถนนที่ไม่ได้ลาดยาง [2-4] การใช้วัสดุเส้นใยสังเคราะห์เพื่อการเสริมกำลังได้พิสูจน์แล้วว่าเป็นกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการเสริมกำลังถนนที่ไม่ได้ลาดยางซึ่งสร้างบนพื้นชั้นดินเหนียวอ่อน ส่งผลให้อายุการใช้งานของถนนยาวนานขึ้น การใช้งานนี้มีข้อดีหลายประการ นอกเหนือไปจากการปรับปรุงประสิทธิภาพและความทนทานเพื่อรวมผลประโยชน์ในแง่ของประสิทธิภาพการก่อสร้างและความคุ้มค่าโดยรวม [5]

ตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทาง (Geogrid) เสริมกำลังดิน ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการก่อสร้างถนน กำแพงกันดิน คันทางรถไฟ ฐานราก และทางลาดชัน เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของโครงสร้าง การถ่ายเทน้ำหนัก ความสามารถในการรับน้ำหนัก และความแข็งแรง [6-16] งานวิจัยที่ผ่านมายอมรับและบันทึกประโยชน์ของ geogrids อย่างกว้างขวางในการเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุด [17-20] Perkins [21] เสนอกลไกการเสริมแรง 4 แบบที่แตกต่างกัน คือ (ก) การเก็บกักมวลรวมในช่องของ geogrid ทำให้การกระจายด้านข้างลดลง (ข) การกักขังช่วยเพิ่มความเครียดด้านข้างภายในมวลรวม ซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งจะช่วยลดการเสียรูปในระหว่างรอบการโหลดแต่ละรอบ (ค) โมดูลัสมวลรวมที่เพิ่มขึ้นมีส่วนช่วยในการกระจายความเครียดในแนวดิ่งที่เพิ่มขึ้นบนชั้นดินด้านล่าง ส่งผลให้การเสียรูปของพื้นผิวลดลงและพื้นผิวมีความสม่ำเสมอมากขึ้น (ง) ความเค้นเฉือนที่ลดลงภายในเกรดย่อจะนำไปสู่การลดความเครียดในแนวดิ่ง การวิจัยระบุว่ากลไกหลักของการเสริมกำลังด้วย geogrid คือการกักขังหรือการยึดรั้งด้านข้าง [12, 22] ผลกระทบของการกักขังสามารถเปรียบเทียบได้กับการเพิ่มขึ้นของความเครียดจากการกักขังที่มีประสิทธิผลซึ่งกระทำกับดินหยาบและเนื้อละเอียด เนื่องจากดินจำนวนมากแสดงคุณลักษณะที่ขึ้นกับความเค้น ผลการยึดรั้งด้านข้างของการเสริมกำลังด้วย geogrid ช่วยเพิ่มโมดูลัสหรือความต้านทานแรงเฉือนของดินได้ [12, 22-23] Zhou et al. [24] and Kazi et al. [25] ยังพบว่าสำหรับฐานรากที่รับน้ำหนักคงที่บนดินเสริมกำลังด้วยวัสดุธรณีสังเคราะห์ที่มีหลายแบบพันรอบมีความสามารถในการรับน้ำหนักที่มากขึ้น เนื่องจากผลกระทบที่จำกัดมากขึ้นของการเคลื่อนที่ของดิน

อย่างไรก็ตาม การศึกษายังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับความสามารถในการรับน้ำหนักของชั้นพื้นทางที่มีความหนาลดลงเหนือดินเหนียวอ่อน บทความนี้ศึกษาพฤติกรรมระหว่างแรงดันแบกทานกับการทรุดตัว และผลกระทบของความหนาของชั้นพื้นทางที่มีการเสริมกำลังด้วยตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทาง โดยทดสอบด้วยแบบจำลองขนาดใหญ่ในห้องปฏิบัติการ มีการทดสอบแบบจำลอง 5 แบบ แบบจำลองที่ 1 เป็นการทดสอบชั้นดินเหนียวเพียงอย่างเดียว ซึ่งประกอบด้วยดินเหนียวอ่อน แบบจำลองที่ 2 มุ่งเน้นไปที่การประเมินชั้นทางที่ไม่มีการเสริมกำลังซึ่งประกอบด้วยหินคลุกที่วางอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อน แบบจำลองที่ 3 ถึง 5 ดำเนินการบนชั้นหินคลุกที่เสริมด้วยตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทางภายใต้ชั้นพื้นทางที่มีความหนาแตกต่างกัน ในการวิจัยนี้เซลล์ความดันและสเตรนเกจถูกวางไว้ที่ตำแหน่งชั้นล่างเพื่อวัดแรงดันที่ส่งผ่านไปยังดินเหนียวอ่อนจะได้รับการกระจายแรงดันตามความลึกสำหรับความหนาของชั้นพื้นทางที่แตกต่างกัน การสังเกตเหล่านี้สร้างความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างความหนาของชั้นพื้นทางและแรงดันที่ถ่ายโอนไปยังชั้นล่าง การศึกษานี้ประเมินการกระจายแรงดันตามความลึกและค่าโมดูลัสด้านทานแรงกดของชั้นดินเดิมสำหรับส่วนที่ไม่มีการเสริมกำลังกับส่วนที่มีการเสริมกำลังที่ชั้นฐานที่มีความหนาแตกต่างกันและ



(ก) Uniaxial Geogrid

(ข) Biaxial Geogrid

(ค) Triaxial Geogrid

รูปที่ 1 ชนิดของ ตาข่ายรับแรงดึง ที่แบ่งตามลักษณะทิศทางการรับแรง

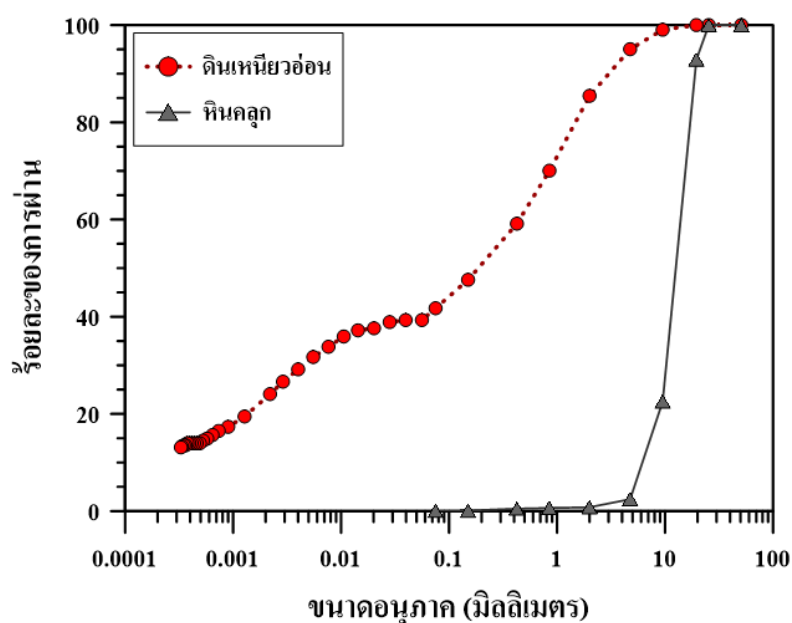
2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

2.1 วัสดุ

ในงานวิจัยนี้วัสดุพื้นฐานที่ใช้ในการทดสอบจะมีทั้งหมด 3 อย่างได้แก่ ชั้นดินเดิมเป็นดินเหนียวพลาสติกต่ำ (CL) ชั้นพื้นทางเป็นหินคลุกและวัสดุปรับปรุงคุณภาพตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทางรุ่น TX150 แสดงในรูปที่ 2 ชั้นดินเดิม ดินที่ใช้ในที่นี้คือดินชนิด ดินเหนียวพลาสติกต่ำ ที่มีคุณสมบัติดังนี้ ค่าความถ่วงจำเพาะของอนุภาคเม็ดดินอยู่ที่ 2.75 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D854 [26] ค่าพิกัดความชื้นเหลวอยู่ที่ร้อยละ 36 ค่าพิกัดความเป็นพลาสติก ร้อยละ 24 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4318 [27] ความหนาแน่นแห้งสูงสุด 1.78 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและความชื้นที่เหมาะสม อยู่ที่ร้อยละ 15.97 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1557 [28] และ หินคลุก ที่ความหนาแน่นแห้งสูงสุด 2.22 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความชื้นที่เหมาะสมอยู่ที่ร้อยละ 4.2 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1557 [28] และ ขนาดกะอนุภาคดินแสดงในรูปที่ 3 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D6913 [29] และ ASTM D7928 [30] การทดสอบหาค่าซีบีอาร์ (California Bearing Ratio; CBR) ได้ค่าคิดเป็นร้อยละ 4 ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM1883 [31]



รูปที่ 2 วัสดุในการทดสอบ



รูปที่ 3 กราฟการกระจายตัวของเม็ดดินในการทดสอบ

ในส่วนของวัสดุเสริมกำลังด้วยตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทาง ซึ่งวัสดุที่ผลิตขึ้น โดยนำ Polypropylene มาขึ้นรูปด้วยความร้อนในลักษณะเป็นตาข่ายประสาน ซึ่งในการใช้งานนิยมนำมาเพิ่มความเสถียรภาพ หรือ ช่วยในการเสริมกำลังรับแรงเฉือนให้กับถนน คุณสมบัติและความสามารถในการรับแรงพื้นฐานความเหนียวของตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทางนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้อ้างอิงคุณสมบัติจากบริษัท Tensar ซึ่งเป็นผู้ผลิต TriAx®(TX) Geogrid ซึ่งมีการระบุคุณสมบัติพื้นฐานของ Triaxial Geogrid TX150 ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของ geogrids

Geosynthetic property	TX 150
Aperture shape	Triangular
Rib Shape	Rectangular
Hexagon Pitch(mm)	80
Junction Efficiency (%)	100
Isotropic Stiffness Ratio	0.6
Radial stiffness at low strain at 0.5% strain (kN/m)	360

2.2 วิธีการทดสอบ

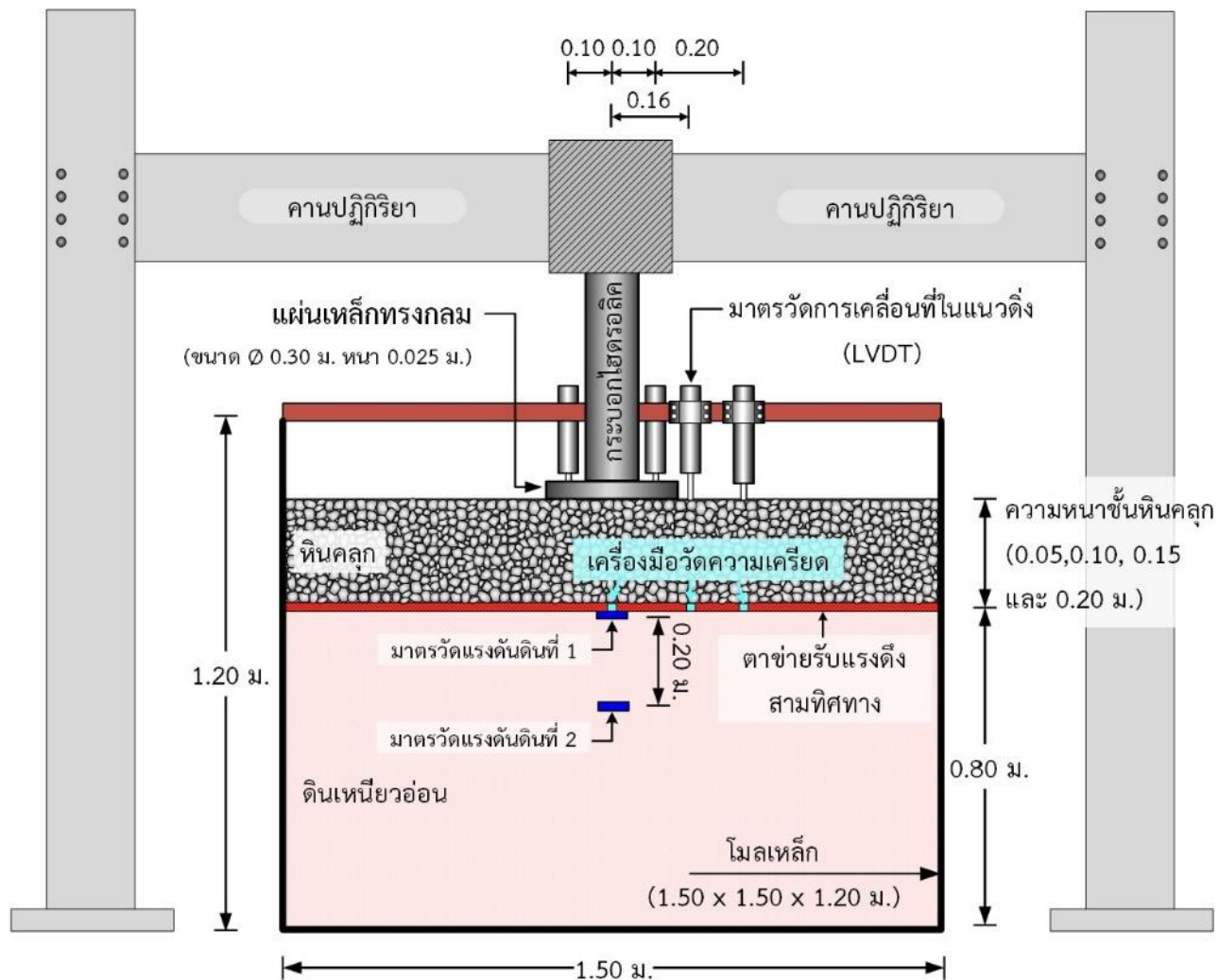
2.2.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ในการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบจะจำลองชั้นทางในตัวอย่างโมลขนาด 1.5 x 1.5 เมตร สูง 1.2 เมตร ทั้งนี้กำหนดให้ความสูงของตัวอย่างชั้นดินเดิมสูง 0.80 เมตร ให้ดินอยู่ในสภาพถมจากนั้นในตัวอย่าง Stabilized จะติดตั้งแผ่นตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทางรุ่น TX150 ขนาด 1.5 x 1.5 เมตร บริเวณระหว่างชั้นดินเดิมและชั้นผิวทาง จากนั้นทำการบดอัดชั้นผิวทางลงไปตามความสูงที่กำหนดไว้ในแต่ละรูปแบบตัวอย่างโดยลักษณะการทดสอบจะเป็นการให้แรงกระทำแบบสถิตบนแผ่นเหล็กวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.30 เมตร ตัวอย่างทดสอบจะมีทั้งหมด 6 ตัวอย่างโดยการทดสอบแบ่งเป็น ตัวอย่างเสริมกำลัง 4 ตัว และตัวอย่างไม่เสริมกำลัง 2 ตัว ตัวอย่างเสริมกำลังจะประกอบไปด้วย ดินชั้นพื้นทางที่เสริมด้วยตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทาง แต่ในชั้นหินคลุก จะกำหนดความหนาแต่ละตัวอย่างอยู่ที่ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 เมตร ในส่วนของตัวอย่างไม่ใส่วัสดุเสริมกำลังจะทำการทดสอบกับดินที่มีแต่ชั้นพื้นทางไม่มีหินคลุกสูง 0.80 เมตร และแบบชั้นพื้นทางเสริมด้วยชั้นหินคลุก 0.20 เมตร

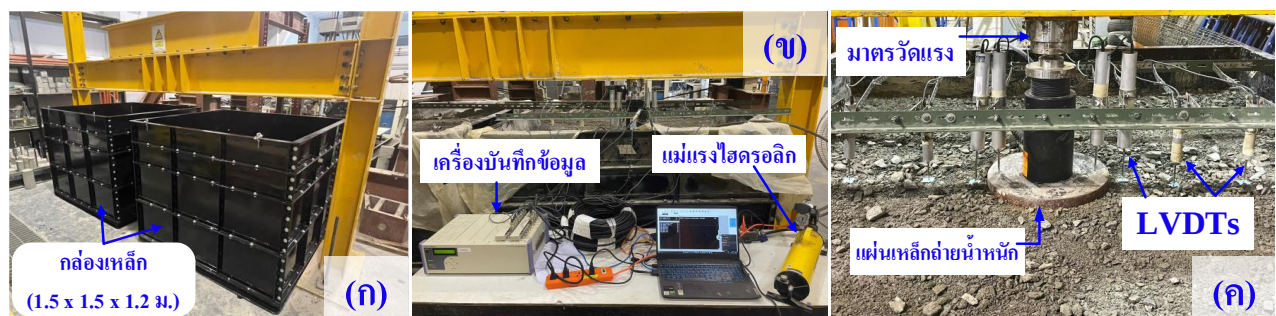
2.2.2 การติดตั้งเครื่องมือวัด

การติดตั้งเครื่องมือวัดนั้นทางคณะผู้วิจัยต้องการที่จะวัดผลพฤติกรรมต่างๆที่เกิดขึ้นในสภาวะแรงกระทำที่กำหนดจึงติดตั้งเครื่องมือวัดเพื่อหาค่าหลักๆ 4 ค่าได้แก่ แรงที่กระทำกับตัวอย่าง กำลังแบกทานที่เกิดขึ้นในชั้นดินเหนียวอ่อน การเคลื่อนตัวของชั้นผิวทาง และ ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในตาข่ายเสริมกำลัง โดยเครื่องมือวัดที่ใช้จะมี 4 อย่างได้แก่ มาตรวัดแรงกระทำ (Load Cell), มาตรวัดกำลังแบกทาน (Pressure cell), เซนเซอร์วัดระยะกระจัด (Displacement transducer/LVDT) และเซนเซอร์วัดความเครียด (Strain gage)

ในการติดตั้งจะเริ่มทำการติดตั้ง มาตรวัดกำลังแบกทานในชั้นดินเดิม ที่ระยะความสูง 0.60 เมตร และ 0.80 เมตร จากฐานของตัวอย่างทดสอบเพื่อหาค่ากำลังแบกทานที่เกิดขึ้นที่ทั้งสองตำแหน่งในขณะทดสอบ และ ติดตั้งเซนเซอร์วัดความเครียด ที่บริเวณผิวด้านบนของตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทาง แล้วทำการบดอัดชั้นหินคลุกจากนั้นบริเวณผิวบนของตัวอย่างจะทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะที่ตำแหน่งต่างๆรวมทั้ง 4 ตัวโดยใช้เครื่องมือวัดที่มีความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ช่วงการวัดสูงสุดที่ 100 มิลลิเมตร เพื่อวัดระยะการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นในระหว่างทดสอบ ในการทดสอบนั้นจะทำการเพิ่มกำลังกดโดยใช้แม่อัดแรงไฮดรอลิกซึ่งจะมีมาตรวัดแรงกระทำที่จะอ่านค่าแรงกระทำในขณะทดลองพร้อมติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะการทรุดตัวที่เกิดขึ้นบริเวณแผ่นกดอีก 2 ตัวโดยใช้เครื่องมือวัดที่มี ช่วงการวัดสูงสุดที่ 50 มิลลิเมตร โดยในขณะทดลองข้อมูลของเครื่องมือวัดต่างๆจะถูกประมวลผลและรวบรวมข้อมูลส่งผ่านไปยังเครื่องบันทึกข้อมูลเพื่อบันทึกและประมวลผล



รูปที่ 4 รูปแบบการติดตั้งตัวอย่างการทดสอบ



รูปที่ 5 อุปกรณ์ในการทดสอบ

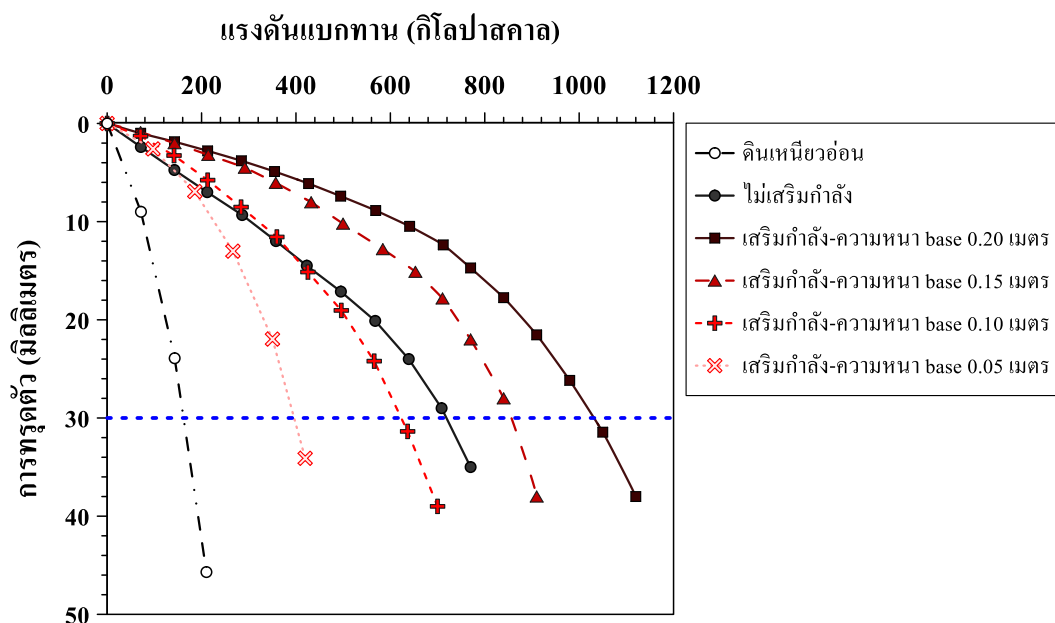
2.2.3 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองจะทดลองโดยใช้แรงกระทำแบบสถิต อ้างอิงมาตรฐานการทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของพื้นดิน มยพ.1253-6 [32] โดยในการทดสอบจะทดสอบกับตัวอย่างที่สัดส่วนต่างๆที่กำหนดไว้โดยการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทีละ 5 กิโลนิวตัน และคงค้างโหลดไว้เป็นเวลา 15 นาทีเมื่อหลังจากผ่านเวลา 5 นาทีมาแล้ว ให้หาค่าเฉลี่ยของการเคลื่อนตัว 3 นาทีที่ต่อเนื่องกันค่าทรุดตัวต้องน้อยกว่า 0.02 มิลลิเมตรต่อนาที จากนั้นจึงเพิ่มโหลดต่อไปและทำซ้ำ จนกว่าจะเกิดการวิบัติหรือก็คือการทรุดตัวถึงที่ระยะร้อยละ 10 ของความกว้างแผ่กวดจนถือว่าเกิดการวิบัติ

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

3.1 ความสามารถในการรับแรงดันแบกทาน

จากการศึกษาทดสอบเพื่อหาความสามารถในแรงดันแบกทานด้วยแรงแบกทานแบบสถิต ตามมาตรฐานการทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของพื้นดิน มยพ. 1253-62 [32] ของกรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย พ.ศ. 2562 ในการหาค่ากำลังอัดสูงสุดทาง (q_{ult}) ผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธี 0.1B โดยการเทียบที่ค่าสิ่งที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างทดสอบที่ระยะ 0.1 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นกดทดสอบ [33] โดยผลการทดสอบทั้งหมด 6 ตัวอย่าง ในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันแบกทานที่เกิดขึ้นกับระยะการทรุดตัวเมื่อทำการวิเคราะห์หาค่ากำลังอัดสูงสุดจะพบว่า ตัวอย่างแบบไม่เสริมกำลังที่ไม่มีชั้นหินคลุกกับตัวอย่างไม่เสริมกำลังแบบมีหินคลุก 0.20 เมตร จากผลการทดสอบนั้นกำลังอัดสูงสุดอยู่ที่ 160 และ 710 กิโลปาสคาลตามลำดับ ในส่วนของตัวอย่างเสริมกำลังความหนาหินคลุก 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 เมตร จะอยู่ที่ 400, 860 และ 1040 กิโลปาสคาลตามลำดับ จะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่เสริมกำลังความหนาหินคลุก 0.20 เมตร จะมีพฤติกรรมการรับแรงดีที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างไม่เสริมกำลังแบบมีหินคลุก 0.20 เมตร จะสามารถรับกำลังได้เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 46 ในส่วนตัวอย่างเสริมกำลังที่รับแรงได้ต่ำที่สุดคือตัวอย่างที่เสริมกำลังความหนาหินคลุก 0.05 เมตร

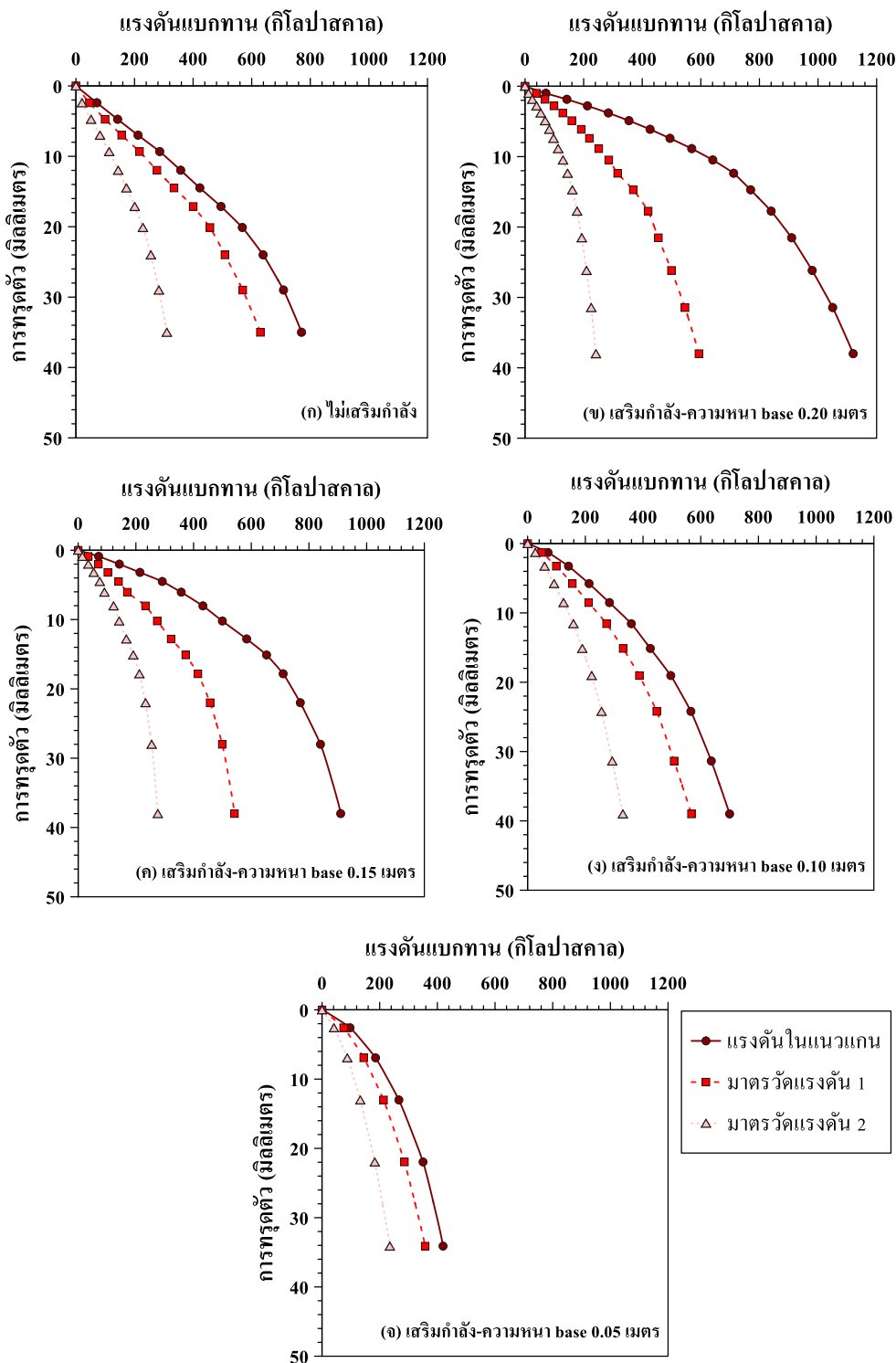


รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันแบกทานและค่าการทรุดตัว

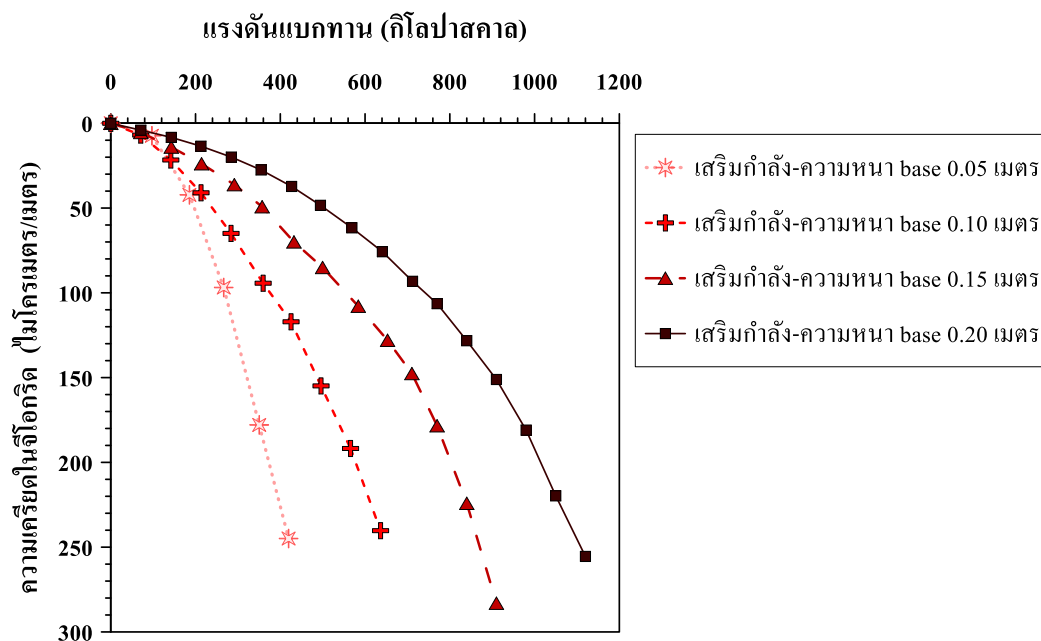
ในส่วนของรูปที่ 7 จะแสดงถึงกำลังแบกทานที่ถูกวัดจากมาตรวัดแรงที่ 1 และ 2 ที่เกิดการกระจายตัวเนื่องจากความหนาของชั้นดินซึ่งความลึกที่เพิ่มขึ้นนั้นช่วยให้แรงดันที่กระทำน้อยลง ซึ่งใน 5 ตัวอย่างที่ทำการวัดผลเมื่อวิเคราะห์จากแรงดันที่ เกิดขึ้นที่ระยะ 0.03 เมตร (0.1B) ตัวอย่างไม่เสริมกำลังแบบมีชั้นหินคลุก หนา 0.20 เมตรกำลังที่เกิดขึ้นที่มาตรวัดที่ 1 และ 2 จะลดลงร้อยละ 19.8 และ 60.6 เมื่อเทียบกับแรงดันแบกทานที่กระทำที่ผิว ในส่วนของตัวอย่างเสริมกำลังความหนาหินคลุก 0.20 เมตร ค่าแรงดันแบกทานที่ลดลงของ มาตรวัดที่ 1 และ 2 จะคิดเป็นร้อยละ 49.0 และ 78.4 ตัวอย่างเสริมกำลังความหนาหินคลุก 0.15 เมตร มาตรวัดที่ 1 และ 2 จะลดลงร้อยละ 41.9 และ 73.3 ตัวอย่างเสริมกำลังความหนาหินคลุก 0.10 เมตร มาตรวัดที่ 1 และ 2 จะลดลงร้อยละ 22.2 และ 55.6 เสริมกำลังความหนา หินคลุก 0.05 เมตร มาตรวัดที่ 1 และ 2 จะลดลงร้อยละ 17.5 และ 45 จากผลการทดสอบที่ได้ จะเห็นว่าตัวอย่างที่ลดแรงดันแบกทานที่ได้ค่ามากที่สุดคือ ตัวอย่างที่เสริมกำลังความหนาหินคลุก 0.20 เมตร

3.2 ความเครียดที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกระทำ

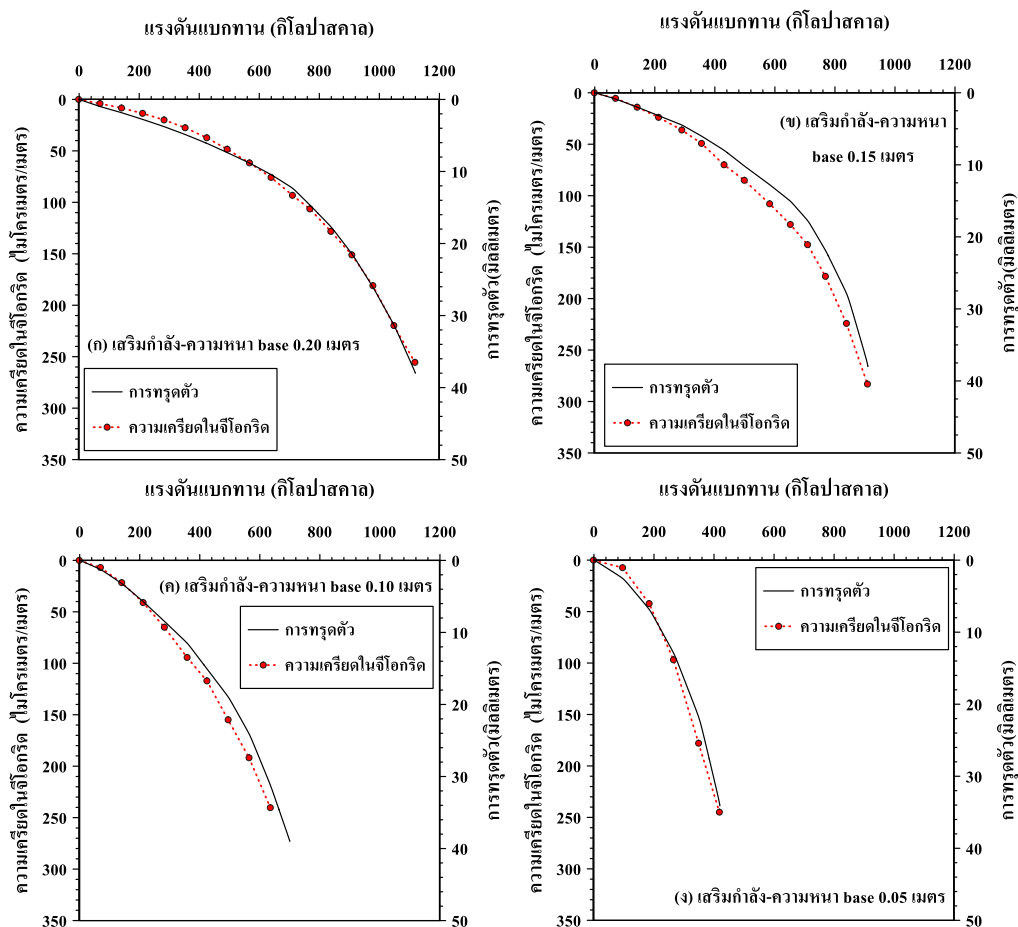
ในการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นที่ชั้นผิวดาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทาง ด้วยการติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียดที่ผิวของดาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทาง ทั้งหมด 4 ตัวอย่างในรูปที่ 9 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบระหว่างความเครียดที่เกิดขึ้นภายใต้แผ่นกดทดสอบและระยะทรุดตัวที่เกิดขึ้นที่ตัวอย่างเสริมกำลังที่ความหนา 0.20, 0.15, 0.10 และ 0.05 เมตร ที่แรงดันแบกทานต่างๆซึ่งจากรูปแนวโน้มของการทรุดตัวและความเครียดที่เกิดขึ้นนั้นจะมีแนวโน้มสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน ในรูปที่ 8 จะแสดงให้เห็นถึงความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละตัวอย่างโดย ตัวอย่างเสริมกำลัง 0.20 เมตร เมื่อเปรียบเทียบกับความเครียดที่ครึ่งหนึ่งของกำลังอัดสูงสุดที่ทำได้ของตัวอย่างไม่เสริมกำลังความหนา 0.20 เมตรที่ (305 กิโลปาสกาล) ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจะอยู่ที่ 29 ไมโครเมตรต่อเมตร ส่วนตัวอย่าง 0.15, 0.10 0.05 จะอยู่ที่ 46, 89 และ 175 ไมโครเมตรต่อเมตรตามลำดับ จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ตัวอย่างที่มีค่าความเครียดที่น้อยที่สุดที่เกิดขึ้นคือ ตัวอย่างเสริมกำลัง 0.20 เมตร ซึ่งหมายความว่าตัวอย่าง 0.20 เมตรนั้นมีความสามารถรับแรงดีที่สุด ทั้งนี้เป็นไปตามการศึกษาว่า ดาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทางมีประสิทธิภาพในการลดความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากความหนาของชั้นดิน [34]



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันที่มาตรวัดที่ 1 และ 2 กับค่าการทรุดตัว



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันแบกทานและค่าความเครียดในตาข่ายเสริมกำลัง



รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง แรงดันแบกทาน ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในตาข่ายเสริมกำลัง และ ค่าการทดสอบ

3.3. การเปรียบเทียบผลการศึกษา

3.3.1 อัตราส่วนประสิทธิผลของแรงดันแบกทาน

ผลจากการเปรียบเทียบผลการทดสอบสมรรถนะกำลังรับแรงดันแบกทานของดาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทาง โดยจากการหาค่ากำลังอัดวิบัติด้วยวิธี 0.1B จากรูปที่ 5 [33] และนำมาเปรียบเทียบหาอัตราส่วนประสิทธิผล ของแรงดันแบกทาน (Bearing Capacity Ratio ; BCR) ในแต่ละตัวอย่างทดสอบด้วยสมการที่ 1 โดย $q_{ult(r)}$ และ q_{ult} คือแรงดันแบกทานวิบัติแบบเสริมกำลังและไม่เสริมกำลังตามลำดับ [35, 36, 37]

$$BCR = \frac{q_{ult(r)}}{q_{ult}} \quad (1)$$

โดยผลการเปรียบเทียบจากการคำนวณจะแสดงในตารางที่ 2 จะเห็นว่า ค่า BCR ของตัวอย่างเสริมกำลัง 0.20, 0.15, 0.10 และ 0.05 เมตร จะอยู่ที่ 1.46 1.21 0.89 และ 0.56 ตามลำดับ ซึ่งจากผลจะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่ให้ค่า BCR ได้ดีกว่าคือ ตัวอย่างเสริมกำลัง 0.20 และ 0.15 เมตรจะให้ค่า BCR ที่สูงกว่านั้นหมายความว่า การเสริมดาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทางนั้นช่วยในการเสริมให้ดินรวมตัวกันเป็นวัสดุคอมโพสิตที่ช่วยลดการเสียรูปของการทรุดตัวเนื่องจากแรงกระทำ [38] และยังแสดงให้เห็นอีกว่า ในตัวอย่างที่มีความหนาชั้นที่ต่ำกว่ายังสามารถให้ค่า BCR ที่มากกว่า 1 อีกด้วย

3.3.2 โมดูลัสต้านทานแรงกดของชั้นดิน

ค่าโมดูลัสต้านทานแรงกดของชั้นดิน (Modulus of subgrade ; K) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า สัมประสิทธิ์การต้านทานแรงกดของชั้นดิน (Coefficient of Subgrade Reaction: K_s) ก็คือการหาอัตราส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันแบกทานสูงสุด (q_{ult}) กับระยะการทรุดตัว ($\Delta\delta$) ที่เกิดขึ้นได้แผ่นกดของดิน [39] ซึ่งค่า ตามสมการที่ 2

$$k = \frac{q_{ult}}{\Delta\delta} \quad (2)$$

ในการศึกษาเปรียบเทียบได้นำค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นและค่ากำลังอัดวิบัติที่เกิดขึ้นจากรูปที่ 5 มาทำการศึกษาค่า โมดูลัสต้านทานแรงกดของชั้นดินที่เกิดขึ้นของตัวอย่างทดลองต่างๆ ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 2 ทั้งนี้ จะเห็นได้ว่าค่าโมดูลัสที่เกิดขึ้นตัวอย่างทดลองที่ให้ค่าสูงสุดคือตัวอย่างเสริมกำลัง 0.20 เมตรที่ 34.67 เมกะปาสคาลต่อเมตร มากขึ้นเป็นร้อยละ 46 เมื่อเทียบกับตัวอย่างทดสอบแบบไม่เสริมกำลัง และเมื่อเมื่อนำผลการคำนวณของตัวอย่างเสริมกำลัง 0.15 เมตร มาเปรียบเทียบกับตัวอย่างไม่เสริมกำลัง จะเห็นว่าค่าโมดูลัสที่ได้ของตัวอย่าง 0.15 เมตรมีค่าเท่ากับ 28.67 เมกะปาสคาลเมตร คิดเป็นการเสริมกำลังมากขึ้นร้อยละ 21 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ดาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทางนั้นสามารถช่วยในการลดความหนาของชั้นทางได้ถึง 0.05 เมตร ซึ่งในการช่วยเสริมแรงนี้อาจจะเป็นผลมาจากลักษณะ โครงสร้างของดาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทางที่ช่วยในการรับน้ำหนักเนื่องจากการเสริมแรงแบบสามแกนของดาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทาง [40, 41, 42]

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบและแสดงผลการศึกษา

Test No.	Test series	q_{ult} (kPa)	Percent (%) Improvement in BC	BCR @30 mm	Subgrade modulus, k (MPa/m)
1	ไม่เสริมกำลัง	710	0	1.00	23.67
2	เสริมกำลัง ความหนา base 0.05 m	400	-44	0.56	13.33
3	เสริมกำลัง ความหนา base 0.10 m	630	-11	0.89	21.00
4	เสริมกำลัง ความหนา base 0.15 m	860	21	1.21	28.67
5	เสริมกำลัง ความหนา base 0.20 m	1040	46	1.46	34.67

4. สรุปผลการทดสอบ

จากการวิจัยในเรื่องการปรับปรุงคุณภาพดินของตัวอย่างเสริมกำลัง 0.20 เมตร พบว่าประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจากการเสริม ดา ข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทางคิดเป็นร้อยละ 46 จึงสรุปได้ว่า ดาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทางมีความสามารถในการปรับปรุง คุณภาพช่วยเสริมกำลังและนอกจากนี้ยังช่วยในการเสริมลดความเครียดที่เกิดขึ้นบนชั้นผิวทาง และ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบ ของตัวอย่างเสริมกำลัง 0.15 เมตร กับ ตัวอย่างไม่เสริมกำลัง 0.20 เมตร พบว่าตัวอย่างเสริมกำลัง 0.15 เมตร มีประสิทธิภาพและ พฤติกรรมการรับแรงดีกว่า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ดาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทางสามารถช่วยในเรื่องของการลดความหนาของชั้น ผิวทางและยังคงความแข็งแรงได้อีกด้วย

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่อ อุตสาหกรรม (พวอ.) ระดับปริญญาเอก เลขที่สัญญา PHD62I0017 และบริษัท สยาม เกเบียน จำกัด ขอขอบคุณศาสตราจารย์ พิทยา แจ่มสว่าง ที่ให้คำปรึกษาตลอดจนแก้ไขในข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี ผู้วิจัยตระหนักถึงความทุ่มเทของ อาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Leng, Characteristics and behavior of geogrid reinforced aggregate under cyclic loading, doctoral diss., North Carolina State University, NC, 2002.
- [2] B.A. MIR. Geosynthetics Applications In Highway Construction In J&K: Sustainable Infrastructure Development. Journal on Structural Engineering: State-of-the-art and State-of-Practice in Structural Engineering, 2014, 3 (3), pp. 1-9. <https://doi.org/10.26634/jste.3.3.3060>.
- [3] B.A. Mir, S. Ashraf, Evaluation of Load-Settlement Behaviour of Square Model Footings Resting on Geogrid Reinforced Granular Soils. In: Shehata, H., Das, B. (eds) Advanced Research on Shallow Foundations. GeoMEast 2018. Sustainable Civil Infrastructures. Springer, Cham. Chp, 2019, 9, pp. 103–126. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01923-5_9

- [4] Q.S. Banyhussan, H.A. hassan, A.J. Kadhum. Performance of reinforced subbase materials by geogrid as a base layer under weak subgrade. E3S Web of Conferences (ICGEE 2023), 2023. 427: 03008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342703008>.
- [5] S.K. Shukla Geosynthetics and their applications. London: Thomas Telford Publishing; 2002.
- [6] G.T. Mehrjardi, A. Ghanbari, H. Mehdizadeh. Experimental study on the behaviour of triaxial geogrid-reinforced slopes with respect to aggregate size. Geotext. Geomembranes, 2016, 44 (6), pp.862–871.
- [7] Q. Chen, S. Hanandeh, M. Abu-Farsakh, L., Mohammad. Performance evaluation of full-scale geosynthetic reinforced flexible pavement. Geosynth., 2018.Int. 25 (1), pp. 26–36.
- [8] M. Esmaili, J.A. Zakeri, M. Babaei. Laboratory and field investigation of the effect of triaxial geogrid-reinforced ballast on railway track lateral resistance. Geotext. Geomembranes, 2017, 45 (2), pp. 23–33.
- [9] X. Sun, J. Han, R. Corey, 2017. Equivalent modulus of triaxial geogrid-stabilized granular base back-calculated using permanent deformation. J. Geotech. Geoenviron. Eng. 143 (9) 06017012.
- [10] J.Q. Wang, L.L. Zhang, J.F. Xue, Y. Tang, Load-settlement response of shallow square footings on triaxial geogrid-reinforced sand under cyclic loading. Geotextiles and Geomembranes, 2018, 46, pp.586–596.
- [11] Q. Chen, M. Abu-Farsakh, R. Sharma. Experimental and analytical studies of reinforced crushed limestone. Geotext. Geomembr., 2009, 27 (5), pp. 357–367.
- [12] Q. Chen, M. Abu-Farsakh. Ultimate bearing capacity analysis of strip footings on reinforced soil foundation. Soils Found, 2015, 55 (1), pp.74–85.
- [13] L. Suku, S.S. Prabhu, G.L.S. Babu, 2017. Effect of triaxial geogrid-reinforcement in granular bases under repeated Loading. Geotext. Geomembr., 2017, 45, pp.377–389.
- [14] M.Y. Fattah, M.R. Mahmood, M.F. Aswad, Stress Distribution from Railway Track over Geogrid Reinforced Ballast underlain by Clay. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2019, 18 (1), pp.77–93.
- [15] M.Y. Fattah, N.M. Salim, M.S. Ismaiel, Influence of Geogrid Reinforcement of Sand in Transfer of Dynamic Loading to Underground Structure. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 856 012013, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 856. Doi:10.1088/1755-1315/856/1/012013.
- [16] B.A. Mir, B.A. Wani, N. Ahmad, R. Ayoub, J. Aziz, Comparative Study on Load-Settlement Behavior of Shallow Footings on Dredged Material underlain by a Rigid Base. World Res J Civ Eng, 2014, 3 (1), pp.34–38.
- [17] Q. Chen, An Experimental Study on Characteristics and Behavior of Reinforced Soil Foundation. Doctoral Dissertation 3361, Louisiana State University, Baton Rouge, LA, USA, 2007.
- [18] Q. Chen, M. Abu-Farsakh. Mitigating the bridge end bump problem: A case study of a new approach slab system with geosynthetic reinforced soil foundation. Geotext. Geomembr., 2016, 44, pp.39–50.
- [19] C.C. Huang, M.Y. Al-Aghbari, Y.E.A. Mohamedzein, Ultimate bearing capacity of saturated reinforced horizontal ground. Geosynth. Int, 2006, 23, pp. 1–8.
- [20] M. Mosallanezhad, N. Hataf, S.S. Taghavi. Experimental and large-scale field tests of grid-anchor system performance in increasing the ultimate bearing capacity of granular soils. Can. Geotech. J. 2016, 53, pp.1047–1058.
- [21] Perkins SW Geosynthetic reinforcement of flexible pavements: laboratory-based pavement test sections. Federal Highway, 1999.Administration Report No. FHWA/MT-99-001/81838
- [22] C.-C. Huang, F. Tatsuoka. Bearing capacity of reinforced horizontal sandy ground. Geotext. Geomembr., 1990, 9, pp. 51–82.
- [23] Q. Chen, Triaxial Geogrid-Enhanced Modulus and Stress Distribution in Clay Soil Geotechnics, 2024, 4, pp. 41–53.
- [24] Zhou, J., Kong, X.L., Wang, X.C. Bearing capacity behaviours and failure models of reinforced ground. Chin. J. Geotech. Eng. 2008, 30 (9), pp.1265–1269 (In Chinese)

- [25] Kazi, M., Shukla, S.K., Habibi, D. An improved method to increase the load-bearing capacity of strip footing resting on geotextile-reinforced sand bed. *Indian Geotech. J.*, 2015, 45 (1), pp. 98–109.
- [26] ASTM D854-23 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, 2023.
- [27] ASTM D4318-17e1 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, 2018.
- [28] ASTM D1557-12 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort, 2021.
- [29] ASTM D6913/D6913M-17 Standard Test Method for Particle-size Distribution of Soil Using Sieve Analysis, 2021.
- [30] ASTM D7928-21e1 Standard Test Method for Particle-size Distribution Soil Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis, 2021.
- [31] ASTM D1883-21 Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory Compacted Soil, 2021.
- [32] มยพ.1253-62 มาตรฐานการทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของดิน, กรมโยธาและผังเมือง, กระทรวงมหาดไทย พ.ศ.2562
- [33] Lutenecker, A.J. and Adams, M.T. Bearing Capacity of Footings on Compacted Sand. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 123(1): 30–36. Proceedings: Fourth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Missouri, March 9–12, 1998.
- [34] Lekshmi Suku, Sudheer S. Prabhu, G.L. Sivakumar Babu Effect of triaxial geogrid-reinforcement in granular bases under repeated Loading. *Geotextiles and Geomembranes*, 2017, 45, pp. 377–389
- [35] Binquet, J., Lee, K.L. Bearing capacity tests on reinforced earth slabs. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 1975, 101 (12), pp. 1241–1255.
- [36] Badakhshan, E., & Noorzad, A. Load eccentricity effects on behavior of circular footings reinforced with triaxial geogrid sheets. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015, 7 (6), pp. 691–699. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.08.006>
- [37] Xu, Y., Yan, G., Williams, D.J., Serati, M., Scheuermann, A., & Vangsness, T. Experimental and numerical studies of a strip footing on geosynthetic-reinforced sand. *International Journal of Physical Modelling in Geotech*, 2019, 20 (5), pp. 1–14
- [38] Ahmet Demir, Mustafa Laman, Abdulazim Yildiz, Murat Ornek Large scale field tests on triaxial geogrid-reinforced granular fill underlain by clay soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 2013, 38, pp. 1–15
- [39] Bowles, J. E. *Foundation Analysis and Design*. 4th ed., McGraw-Hill Inc., New York, USA, 1998.
- [40] Sharma, R., Q. Chen, M. Abu-Farsakh, and S. Yoon. Analytical modeling of triaxial geogrid reinforced soil foundation. *Geotext. Geomembr.*, 2009, 27 (1) pp. 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2008.07.002>.
- [41] Chen, Q., M. Abu-Farsakh, and R. Sharma. “Experimental and analytical studies of reinforced crushed limestone.” *Geotext. Geomembr.*, 2009, 27 (5), pp. 357–367. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2009.03.002>.
- [42] Chen, Q., and M. Abu-Farsakh. Ultimate bearing capacity analysis of strip footings on reinforced soil foundation. *Soils Found*, 2015, 55 (1), pp. 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.12.006>.