



พฤติกรรมของถนนไร้ผิวทางเสริมกำลังด้วยตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทางภายใต้ความดันแบกทาน
BEHAVIOR OF UNPAVED ROAD REINFORCED WITH TRIAXIAL GEOGRID SUBJECTED TO
BEARING PRESSURE

ณัฐพล ชื่นพันธุ์^{1*}, พิทยา แจ่มสว่าง², ณัฐวุฒิ ธนศรีสถิตย์³, อุทัยฤทธิ์ โรจนวิภาต³ และหทัยรัตน์ ภูระหงษ์⁴

¹นักศึกษาปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

²ศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

⁴นักศึกษาปริญญาเอก, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

*Corresponding author, E-mail: s6301081814019@email.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้กล่าวถึงการปรับปรุงคุณภาพของถนนไร้ผิวทางโดยใช้ตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทางมาติดตั้งระหว่างดินชั้นพื้นทางและดินชั้นดินเดิม เพื่อศึกษาผลกระทบของการติดตั้งตาข่ายเสริมกำลังที่ระยะต่างๆและความสามารถในการรับน้ำหนักของถนนไร้ผิวทางที่ไม่ได้เสริมตาข่ายเสริมกำลังกับถนนไร้ผิวทางที่เสริมตาข่ายเสริมกำลัง โดยตัวอย่างของถนนไร้ผิวทางประกอบไปด้วยดินเหนียวพลาสติกสูงหนา 0.8 ม. และ หินคลุกหนา 0.2 ม. ซึ่งทำการเตรียมตัวอย่างลงในโมลเหล็กสี่เหลี่ยมกว้าง 1.5 ม. สูง 1.2 เมตร และติดตั้งตาข่ายเสริมกำลังที่รอยต่อระหว่างดินเหนียวอ่อนพลาสติกสูงกับหินคลุกและที่กึ่งกลางชั้นของหินคลุก ซึ่งการทดสอบจะอยู่ภายใต้ความดันแบกทานตามมาตรฐาน มยพ.1253-62 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อปรับปรุงคุณภาพของถนนไร้ผิวทางด้วยตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทางแล้ว มีประสิทธิภาพในการรับความดันแบกทานเป็น 1.63 เท่าและสามารถช่วยลดการทรุดตัวที่เกิดขึ้น

คำสำคัญ: ดินเหนียวอ่อนพลาสติกสูง; ตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทาง; ความดันแบกทาน; การทรุดตัว; ความเครียด

ABSTRACT

This research presents an improvement of unpaved roads using triaxial geogrid installed between the base and subgrade layers. The impact of installing geogrid at different intervals and the bearing capacity of unpaved roads with and without geogrid reinforcements were studied. The unpaved road samples included a 0.8-m-thick high plasticity clay and 0.2-m-thick crushed rock. The samples were prepared in a square steel mold 1.5m in width and 1.2 m in high, and the geogrid was installed at the interface between the high plasticity clay and the crushed rock, as well as at the mid-depth of the crushed rock layer. Testing was conducted under static load test conditions according to standard TIS 1253-62. Results show that when improving the unpaved roads with triaxial geogrid reinforcement, the bearing capacity increases by a factor of 1.63, and settlement reduces under the working pressure.

Nutthaphol Chunpun^{1*}, Pitthaya Jamsawang², Nuttawut Thanasisathit³, Uthairith Rochanavibhata³ and Hatthairat Poorahong⁴

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

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

KEYWORDS: High plasticity clay; Triaxial geogrid; Bearing pressure; Settlement; Strain

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ประเทศไทยนิยมใช้การขนส่งทางถนนเป็นหลัก เพราะเป็นการขนส่งที่สะดวก รวดเร็ว สามารถเข้าถึงพื้นที่ส่วนใหญ่ได้ง่าย ทำให้มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย และเมื่อถนนถูกใช้งานเป็นระยะเวลานาน ส่งผลให้อายุการใช้งานของถนนลดลง ทำให้ต้องมีการปรับปรุง ซ่อมแซมอยู่บ่อยครั้ง ในการก่อสร้างถนน โดยเฉพาะถนนที่มีโครงสร้างชั้นดินเป็นดินเหนียวอ่อน มักเกิดปัญหาการเคลื่อนตัวด้านข้างตัวของดินเหนียวอ่อน รับแรงเฉือนได้น้อย มีการทรุดตัวของดินเหนียวอ่อนเมื่อน้ำหนักมากระทำจะนำไปสู่การวิบัติ เนื่องจากสาเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการบดอัดดินและปรับปรุงคุณภาพเพื่อให้ได้มาตรฐานการก่อสร้าง ซึ่งมีขั้นตอนและวิธีการที่ยุ่งยาก ใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างมากขึ้น และมีต้นทุนในการก่อสร้างสูง การก่อสร้างถนนบนชั้นดินที่มีความอ่อนแอสามารถใช้วัสดุสังเคราะห์ เป็นวัสดุเสริมกำลังทำให้อายุการใช้งานของถนนเพิ่มขึ้น ซึ่งนอกจากเพิ่มเรื่องประสิทธิภาพการใช้งานแล้ว ยังสามารถลดระยะเวลาการก่อสร้างและต้นทุนในการก่อสร้างได้ [1]

ตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทาง (Triaxial geogrid) เป็นชนิดหนึ่งของตาข่ายเสริมกำลังซึ่งเป็นวัสดุที่ผลิตจากพอลิเมอร์ทำหน้าทีเสริมกำลังดิน มีลักษณะช่องเปิดสามเหลี่ยม สามารถรับแรงได้ใน 3 ทิศทาง คุณลักษณะนี้ทำให้เกิดประโยชน์ 2 ประการคือ ประการแรกมีการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดกับอนุภาคของดินดีขึ้น ประการที่สอง ตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทาง สามารถต้านทานแรงดึงได้สม่ำเสมอในทุกทิศทาง เพราะโครงสร้างของ จีโอกริด ช่องเปิดแบบสามเหลี่ยมเป็นโครงสร้างตารางที่มีเสถียรภาพมากกว่าช่องเปิดแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก [2] โดยทั่วไปนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการก่อสร้างถนน กำแพงกันดิน เขื่อนทางรถไฟ ฐานราก และทางลาด เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของโครงสร้าง การถ่ายเทน้ำหนัก ความสามารถในการรับน้ำหนัก ความแข็ง [3-13] และสามารถยืดอายุการใช้งานของถนนได้ ในการติดตั้งตาข่ายเสริมกำลัง มีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยากและยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม งานวิจัยยอมรับและบันทึกประโยชน์ของ geogrids อย่างกว้างขวางในการเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุด [14-17] Perkins [18] เสนอกลไกการเสริมกำลัง 4 แบบที่แตกต่างกัน กลไกการเสริมกำลังมีดังต่อไปนี้: (ก) การเก็บกักมวลรวมในช่องของ geogrid ทำให้เกิดการกระจายออกทางด้านข้างลดลง (ข) การกักขังช่วยเพิ่มความเครียดด้านข้างภายในมวลรวม ส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยลดการเสถียรภาพในระหว่างการรับน้ำหนักในแต่ละรอบ (ค) ค่าโมดูลัสของมวลรวมที่เพิ่มขึ้นช่วยให้การกระจายความเครียดในแนวดิ่งเพิ่มขึ้นบนชั้นดินด้านล่าง ส่งผลให้การเสถียรภาพของพื้นผิวลดลงและพื้นผิวมีความสม่ำเสมอมากขึ้น (ง) ความเค้นเฉือนที่ลดลงภายในชั้นดินเดิมจะนำไปสู่การลดความเครียดในแนวดิ่ง การวิจัยระบุว่ากลไกหลักของการเสริมกำลังด้วยตาข่ายรับแรงดึงคือการกักขังหรือการยึดรั้งด้านข้าง [9, 19] ผลกระทบของการกักขังสามารถเปรียบเทียบได้กับการเพิ่มขึ้นของความเครียดจากการกักขังที่มีประสิทธิภาพซึ่งกระทำกับดินหยาบและเนื้อละเอียด เนื่องจากดินจำนวนมากแสดงคุณลักษณะที่ขึ้นกับความเค้น ผลการยับยั้งด้านข้างของการเสริมแรงด้วยตาข่ายรับแรงดึง ช่วยเพิ่มโมดูลัสหรือความต้านทานแรงเฉือนของดินได้ [9,19-20] Perkins [18] and Al-Qadi et al. [21] ตั้งข้อสังเกตว่าความแข็งแรงของชั้นดินเดิม ความหนาของชั้นพื้นทาง ชนิดของวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ ตำแหน่งในการเสริมกำลัง และความแข็งแรงของดินเดิม เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของพื้นผิวที่มีความยืดหยุ่นเสริมด้วยวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ ประสิทธิภาพของโครงสร้างถนนที่เสริมด้วยตาข่ายรับแรงดึงอาจได้รับอิทธิพลจากปัจจัยหลายประการ รวมถึงปฏิสัมพันธ์ที่ส่วนต่อประสานระหว่างดินกับตาข่ายรับแรงดึง จำนวนชั้นเสริมแรง ระยะห่างระหว่างตาข่ายรับแรงดึง และความลึกของชั้นเสริมกำลังเริ่มต้น ในบรรดาปัจจัยเหล่านี้ปฏิสัมพันธ์ที่ส่วนต่อประสานระหว่างดินกับตาข่ายรับแรงดึงและหินคลุกมีบทบาทสำคัญในการกำหนดลักษณะประสิทธิภาพการเสริมแรงของตาข่ายรับแรงดึง [22]

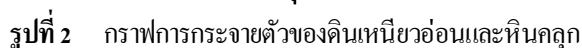
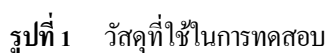
Abu-Farsakh et al. [23] and Gill et al. [24] ดำเนินการทดสอบบนฐานรากที่เสริมด้วยตาข่ายรับแรงดึงและแนะนำพารามิเตอร์การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเพิ่มอัตราส่วนความสามารถในการรับน้ำหนัก (BCR) จากการศึกษาชี้ให้เห็นว่าจำนวนชั้นเสริมแรงที่เหมาะสมที่สุดคือ 3 หรือ 4 และความลึกที่มีประสิทธิภาพสำหรับการเสริมแรงอยู่ในช่วง 1.25–2.5B โดยที่ B แสดงถึงความกว้างของแผ่นเหล็กที่ใช้ทดสอบ Demir et al. [25] ศึกษาดินเม็ดละเอียดที่เสริมด้วยตาข่ายรับแรงดึงบนดินเหนียวอ่อน พบว่าความสามารถในการรับความดันแบกทานเพิ่มขึ้นอย่างมาก 40% ชั้นตาข่ายรับแรงดึงสองชั้นช่วยเพิ่มความสามารถในการรับความดันแบกทานได้ถึง 130% ที่การทรุดตัวสูง และ 70% ที่การทรุดตัวต่ำ ความหนาที่จำกัดของดินเม็ดละเอียดลดการทรุดตัวลง 35% และชั้นตาข่ายรับแรงดึงสองชั้นลดการทรุดตัวลงอีก 50% การเติมดินเม็ดละเอียดจะช่วยให้การกระจายน้ำหนัก ช่วยลดความเข้มข้นของความเค้นและปรับปรุงการกระจายความเค้น Wang et al. [26] ตั้งข้อสังเกตว่าองค์ประกอบของการเสริมกำลังอาจส่งผลต่อกลไกความล้มเหลวของชั้นดิน Sun et al. [27-28] สำรวจประสิทธิภาพของการเสริมกำลังด้วยตาข่ายรับแรงดึงในการลดการเปลี่ยนรูปของพื้นผิวและดินเดิม พบว่าการเสริมกำลังด้วยตาข่ายรับแรงดึงลดการเสียรูปอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการเคลื่อนตัวจากการเสียรูปด้านข้าง เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนที่ไม่มีการเสริมแรง นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงการกระจายความเค้นในแนวรัศมีภายในชั้นพื้นทางและชั้นดินเดิมอีกด้วย

อย่างไรก็ตาม มีการศึกษาวิจัยอย่างจำกัดเกี่ยวกับความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างชั้นทางที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายรับแรงดึงสามทิศทางรุ่น TX150 บนชั้นหินคลุกเหนียวอ่อน การศึกษานี้ใช้การทดสอบแบบจำลองในห้องปฏิบัติการขนาดใหญ่เพื่อศึกษาผลกระทบของจำนวนชั้นเสริมแรง ความลึกของการเสริมแรง และตำแหน่งในการวาง โดยมีการทดสอบแบบจำลอง 5 รูปแบบ: การทดสอบแบบจำลองที่ 1 เป็นการทดสอบชั้นดินเหนียวเพียงอย่างเดียว การทดสอบแบบจำลองที่ 2 ประเมินชั้นหินคลุกที่ไม่ได้เสริมกำลังซึ่งอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อน การทดสอบแบบจำลองที่ 3 ถึง 5 ดำเนินการบนชั้นหินคลุกที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายรับแรงดึงสามทิศทางรุ่น TX150 โดยใช้จำนวนชั้นเสริมกำลังและตำแหน่งการวางที่แตกต่างกัน ในการวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างชั้นทางที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายรับแรงดึงสามทิศทางรุ่น TX150 ที่ระยะต่างกัน โดยมุ่งเน้นไปที่การทดสอบภายใต้การรับน้ำหนักแบบสถิต (Static load test)

2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ประกอบไปด้วย ดินเหนียวอ่อนที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ขนาด 4.75 มิลลิเมตร ซึ่งจะใช้เป็นดินชั้นดินเดิม แสดงดังรูปที่ 1 (ก), หินคลุกที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4 นิ้ว ขนาด 19.0 มิลลิเมตร ซึ่งจะใช้เป็นดินชั้นพื้นทางแสดงดังรูปที่ 1 (ข) และตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทาง ซึ่งจะใช้เป็นวัสดุเสริมกำลังในการวิจัยครั้งนี้ แสดงดังรูปที่ 1 (ค) การทดสอบหาสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนและหินคลุกจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM จากการทดสอบ ดินเหนียวอ่อนมีค่าพิกัดเหลวร้อยละ 55 พิกัดพลาสติกมีค่าร้อยละ 26 ตามมาตรฐาน ASTM D4318 [29] และจำแนกดินเหนียวอ่อนได้เป็นดินเหนียวอ่อนพลาสติกสูง (Clay of high plastic, CH) การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน ตามมาตรฐาน ASTM D854 [30] พบว่าดินเหนียวอ่อนที่ใช้ในการศึกษามีค่าเท่ากับ 2.72 การทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน ตามมาตรฐาน ASTM D1557 [31] พบว่าดินเหนียวอ่อนและหินคลุกมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 1.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ 2.216 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีค่าปริมาณความชื้นเหมาะสมอยู่ที่ร้อยละ 16.1 และ 4.2 ตามลำดับ การทดสอบหาค่าซีบีอาร์ (California Bearing Ratio, CBR) ของดินเหนียวอ่อนมีค่าร้อยละ 1.9 ตามมาตรฐาน ASTM D1883 [32] การกระจายตัวของดินเหนียวอ่อนประกอบไปด้วย กรวด 6%, ทราย 13%, ทรายแป้ง 12% และดินเหนียว 39% ส่วนหินคลุกประกอบไปด้วยกรวด 71% และ ทราย 27% และทรายแป้ง 2% แสดงดังรูปที่ 2 ตามมาตรฐาน ASTM D6913 [33] และ ASTM D7928 [34]



ณัฏฐพล ชื่นพันธ์^{1*}, พิทยา แจ่มสว่าง², ณัฏฐณิ ธนศรีสถิตย์³, อุทัยฤทธิ์ โรจนวิภาต³ และหทัยรัตน์ ภาระหงษ์⁴

ตารางที่ 1 สมบัติของตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทาง

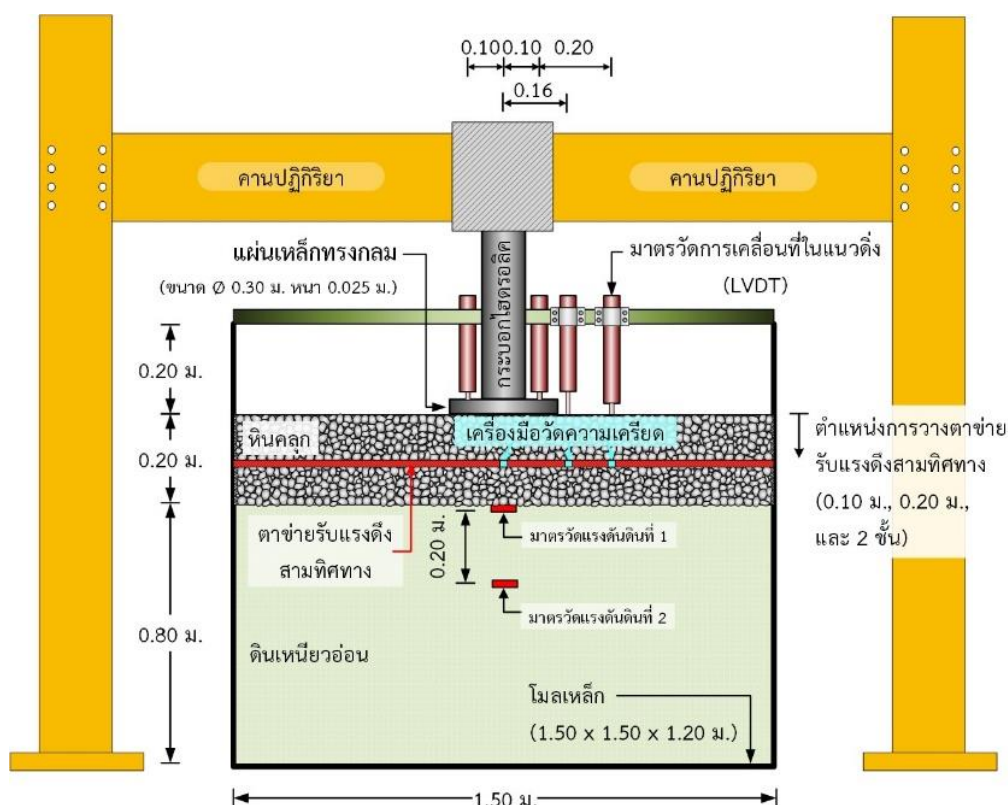
Geosynthetic property	TX 150
Aperture shape	Triangular
Rib Shape	Rectangular
Hexagon Pitch(mm)	80
Junction Efficiency (%)	100
Isotropic Stiffness Ratio	0.6
Radial stiffness at low strain at 0.5% strain (kN/m)	360

2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

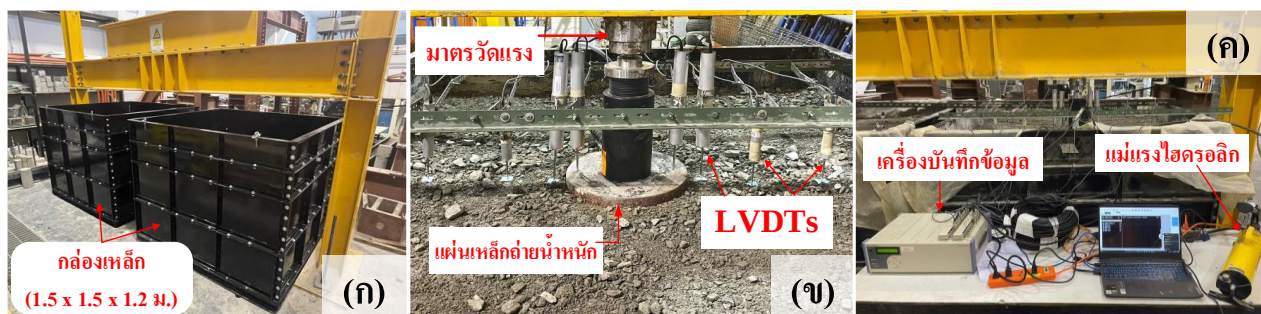
งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลกระทบของตำแหน่งการติดตั้งตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทาง ซึ่งมีการเตรียมตัวอย่างทดสอบเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพโครงสร้างชั้นดิน และมีการปรับปรุงคุณภาพโครงสร้างชั้นดินด้วยตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทาง ซึ่งตัวอย่างที่มีการปรับปรุงคุณภาพโครงสร้างชั้นทางจะแบ่งได้อีก 3 กรณี คือ การติดตั้งตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทาง 1 ชั้น โดยติดตั้งที่ระยะ 0.1 เมตร กับระยะ 0.2 เมตร ในดินชั้นพื้นทาง โดยวัดจากผิวของดินชั้นพื้นทาง ส่วนอีก 1 กรณี คือ การติดตั้งตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทาง 2 ชั้น โดยติดตั้งที่ระยะ 0.1 เมตรและระยะ 0.2 เมตรในดินชั้นพื้นทาง โดยวัดจากผิวของดินชั้นพื้นทาง ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้ความหนาดินชั้นผิวทางเท่ากับ 0.2 เมตรและ ใช้ความหนาดินชั้นดินเดิมเท่ากับ 0.8 เมตร แสดงดังรูปที่ 3

การเตรียมตัวอย่างทดสอบจะประกอบไปด้วยดินเหนียวอ่อนพลาสติกสูง, หินคลุก และตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทางรุ่น TX150 โดยผสมดินเหนียวอ่อนกับน้ำที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมที่ร้อยละ 16.1 คลุกให้เข้ากันแล้วจึงนำไปบดอัดลงในแบบเหล็กที่มีขนาด 1.5 x 1.5 เมตร สูง 1.2 เมตร แสดงดังรูปที่ 4 (ก) ให้ได้ความหนาที่ 0.8 เมตร เมื่อทำการบดอัดดินเสร็จแล้ว ให้ทำการแช่ตัวอย่างทดสอบเป็นระยะเวลา 7 วันหรือมากกว่าเพื่อให้ดินเหนียวอ่อนเกิดการอมน้ำ จากนั้นนำหินคลุกผสมกับน้ำที่ปริมาณความชื้นเหมาะสมที่ร้อยละ 4.2 แล้วจึงนำไปบดอัดให้ได้ความหนาที่ 0.2 เมตร

การติดตั้งอุปกรณ์ก่อนการทดสอบจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 3 ซึ่งประกอบไปด้วยมาตรวัดแรงดัน (Pressure cell) 2 เครื่อง โดยเครื่องที่ 1 จะติดตั้งบนชั้นดินเดิมและเครื่องที่ 2 จะติดตั้งที่ความลึกระดับ 0.2 เมตร ของชั้นดินเดิม, เครื่องมือวัดความเครียด (Strain gauge) จะติดตั้งบนตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทางเป็นจำนวน 6 ชิ้น และมาตรวัดน้ำหนัก (Load actuator) ที่สามารถวัดได้ถึง 50 กิโลนิวตัน 1 เครื่อง, มาตรวัดระยะการเคลื่อนตัว (Linear Variable Displacement Transducer, LVDT) ขนาด 100 มิลลิเมตร 4 เครื่อง ติดตั้งบนแผ่นเพลทเป็นจำนวน 2 เครื่อง ส่วนอีก 2 เครื่อง ติดตั้งบนดินชั้นพื้นทาง ข้างๆแผ่นเพลทและ LVDT ขนาด 50 มิลลิเมตร 4 เครื่อง ติดตั้งบนดินชั้นพื้นทาง ให้ตรงกับตำแหน่งของเครื่องมือวัดความเครียด



รูปที่ 3 การเตรียมตัวอย่างและการติดตั้งอุปกรณ์



รูปที่ 4 การติดตั้งอุปกรณ์

2.3 วิธีการทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก

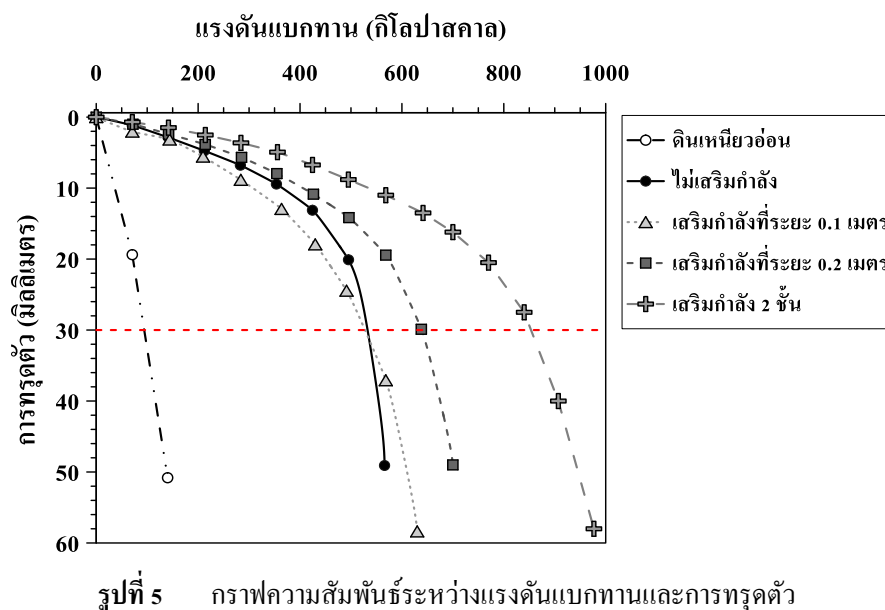
เมื่อทำการเตรียมตัวอย่างและติดตั้งอุปกรณ์ตามหัวข้อที่ 2.2 เรียบร้อยแล้ว ให้ทำการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุก ที่เป็นน้ำหนักแบบสถิต โดยอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของพื้นดิน (มยผ. 1253-62) [35] โดยการทดสอบจะเริ่มจากการใส่น้ำหนักบรรทุก 1 ใน 10 ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่กำหนดไว้ จากนั้นคงที่น้ำหนักบรรทุกไว้เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 15 นาที ในขณะที่ทำการทดสอบ ให้ทำการบันทึกค่าที่เกิดขึ้นโดยเฉลี่ยในเวลา 3 นาทีที่ต่อเนื่องกัน เมื่อครบ 15 นาทีแล้ว การทดสอบที่เกิดขึ้น ต้องไม่เกิน 0.02 มิลลิเมตรต่อนาที จึงจะสามารถเพิ่มน้ำหนักบรรทุกช่วงต่อไปได้

ในกรณีที่ทำการทดสอบครบ 15 นาทีแล้วการทรุดตัวที่เกิดขึ้น มากกว่า 0.02 มิลลิเมตรต่ออนาที่ ให้ทำการทดสอบต่อไปโดยใช้น้ำหนักนั้นๆ จนกว่าระยะการทรุดตัวที่เกิดขึ้น มีค่าน้อยกว่า 0.02 มิลลิเมตรต่ออนาที่ เมื่อทำการทดสอบจนครบ 1 ชั่วโมง แล้วมีอัตราการทรุดตัวมากกว่า 0.02 มิลลิเมตรต่ออนาที่ โดยเฉลี่ยจาก 3 นาทีที่ต่อเนื่องกัน ให้ทำการคงน้ำหนักบรรทุกไว้อีก 1 ชั่วโมง หากพบว่ายังมีการทรุดตัวมากกว่า 0.02 มิลลิเมตรต่ออนาที่ หรือดินเกิดการวิบัติ ให้ทำการสิ้นสุดการทดสอบ และถือว่าน้ำหนักบรรทุกทุกนั้นเป็นน้ำหนักบรรทุกสูงสุด เมื่อทำการทดสอบน้ำหนักเสร็จแล้ว ให้ทำการลดน้ำหนักบรรทุกเป็นร้อยละ 25 ของน้ำหนักบรรทุกทดสอบ โดยคงน้ำหนักทุกช่วง เป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 15 นาที และให้ทำการบันทึกค่าการคืนตัวจากการคืนน้ำหนักบรรทุกทดสอบอย่างน้อย 3 ค่า

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

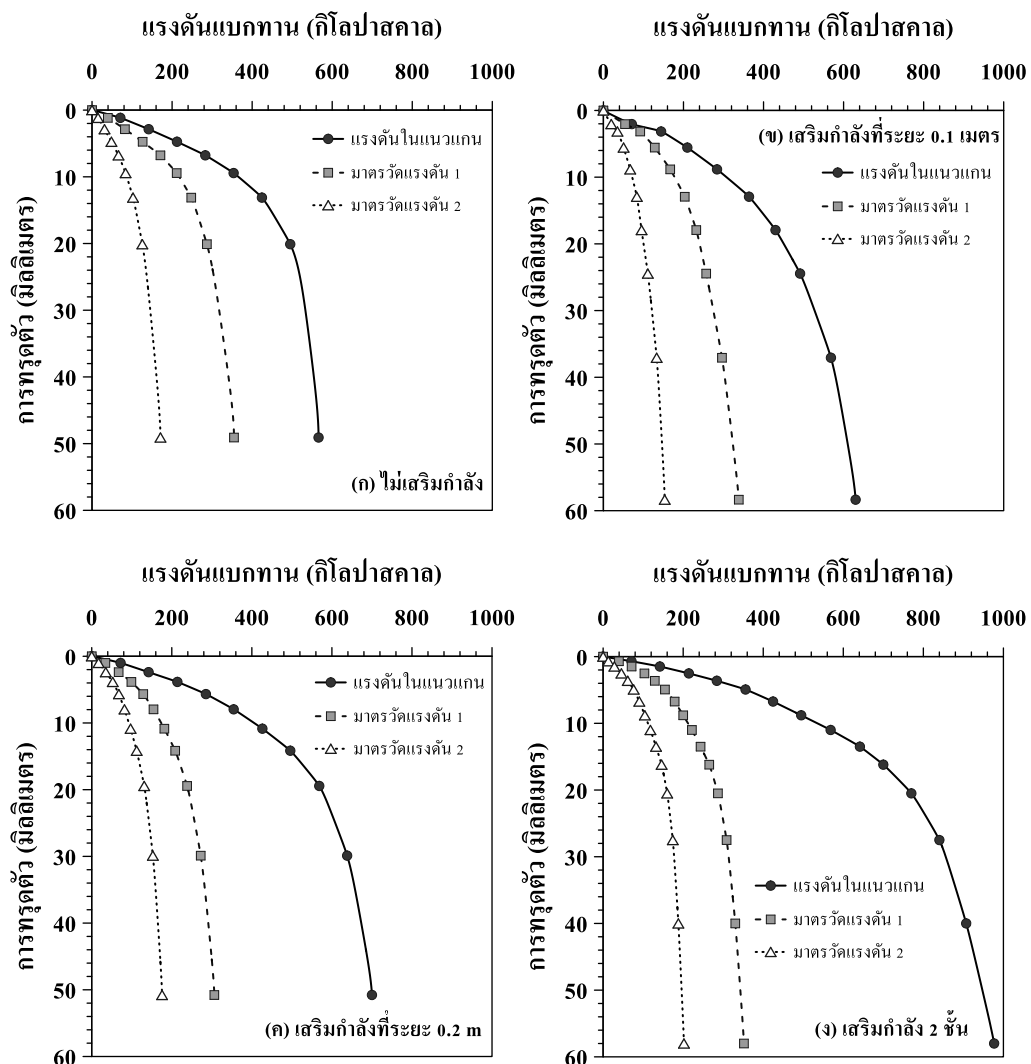
3.1 ประสิทธิภาพภายใต้แรงแบกทาน

ผลทดสอบความดันแบบทานของตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมกำลังและตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังซึ่งทำการทดสอบภายใต้มาตรฐานการทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของพื้นดิน (มยผ. 1253-62) [35] โดยการหาค่าแรงแบกทานสูงสุด (Ultimate bearing capacity, q_{ult}) ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธี 0.1B ซึ่งเป็นการหาแรงแบกทานสูงสุดที่ระยะการทรุดตัว 0.1B โดยที่ B คือเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นเหล็กกดทดสอบ [36] ผลการทดสอบจะแสดงดังรูปที่ 5 ที่จะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันแบกทานและการทรุดตัวที่เกิดขึ้น



โดยผลการทดสอบจะประกอบไปด้วย 5 การทดสอบ พบว่าที่ระยะการทรุดตัว 0.1B หรือ 30 มิลลิเมตร ตัวอย่างที่ไม่เสริมกำลังที่มีเฉพาะดินเหนียวอ่อนพลาสติกสูง มีค่า q_{ult} เท่ากับ 70 กิโลปาสคาล และตัวอย่างที่ไม่เสริมกำลังที่มีหินคลุก มีค่า q_{ult} เท่ากับ 525 กิโลปาสคาล ส่วนตัวอย่างที่มีการติดตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทางที่ระยะ 0.1, 0.2 เมตร และเสริมกำลัง 2 ชั้น มีค่า q_{ult} เท่ากับ 525, 640 และ 855 กิโลปาสคาล ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 2 จากผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าตัวอย่างที่เสริมกำลัง 2 ชั้น สามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงดันแบกทานได้ถึงร้อยละ 63 เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมกำลัง

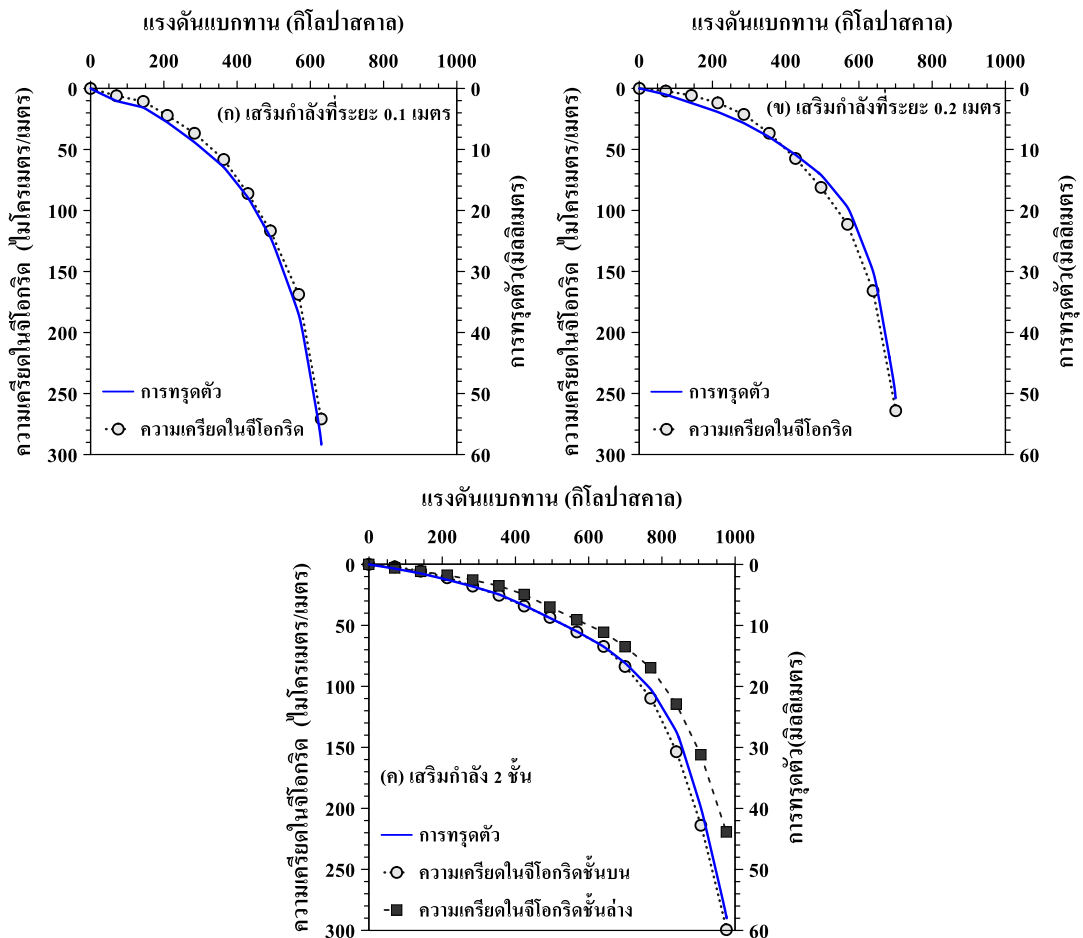
การเปรียบเทียบแรงดันแบกที่ความลึกแตกต่างกัน โดยติดตั้งมาตรวัดแรงดันตัวที่ 1 ที่ความลึก 0.2 เมตร และมาตรวัดแรงดันตัวที่ 2 ที่ความลึก 0.4 เมตร ทางผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ผลจากแรงดันแบกทานที่ระยะการทรุดตัว 0.1B จะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมกำลังมีค่าแรงดันแบกทานที่เกิดขึ้นบนมาตรวัดแรงดันตัวที่ 1 และ 2 ลดลงร้อยละ 39 และ 71 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับแรงดันแบกทานในแนวแกน แสดงดังรูปที่ 6 (ก) มาตรวัดแรงดันตัวที่ 1 ของตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังที่ระยะ 0.1, 0.2 เมตรและเสริม 2 ชั้น มีค่าแรงดันแบกทานลดลงร้อยละ 48, 57 และ 64 ตามลำดับ และมาตรวัดแรงดันตัวที่ 2 ของตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังที่ระยะ 0.1, 0.2 เมตรและเสริม 2 ชั้น มีค่าแรงดันแบกทานลดลงร้อยละ 77, 77 และ 79 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6 (ข) ถึงรูปที่ 6 (ง) เมื่อเปรียบเทียบกันแล้ว สามารถสรุปได้ว่าการเสริมกำลัง 2 ชั้น มีการถ่ายโอนแรงดันแบกทานน้อยที่สุดในขณะที่ตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมกำลังมีการถ่ายโอนแรงดันแบกทานมากที่สุด อย่างไรก็ตามการเสริมกำลังด้วยตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทาง ทำให้แรงดันแบกทานที่เกิดขึ้นบนผิวดินลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้การออกแบบถนนมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น [10]



รูปที่ 6 กราฟการเปรียบเทียบแรงดันแบกทานตามความลึก

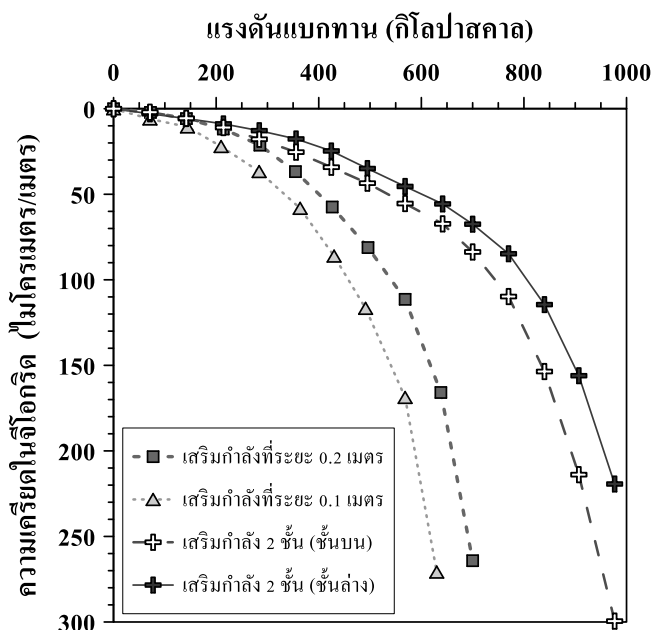
3.2 ความเครียดในตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทาง

การศึกษาความเครียดที่เกิดขึ้นในตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทางจะทำการเปรียบเทียบตัวอย่างการทดสอบที่มีการติดตั้งตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทางที่ระยะ 0.1, 0.2 และ เสริม 2 ชั้น ซึ่งจะแสดงถึงความสัมพันธ์ของความเครียดในตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทางกับแรงดันแบกทาน และความสัมพันธ์ของการทรุดตัวกับแรงดันแบกทาน โดยความเครียดที่เกิดขึ้นในตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทางจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามแรงดันแบกทานที่ได้รับ ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าการทรุดตัวที่เพิ่มมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 7 ถึงรูปที่ 8



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเครียด, แรงดันแบกทานและการทรุดตัว

ในการวิเคราะห์ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนตาข่ายรับแรงดึงแบบสามทิศทาง ทางผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบค่าความเครียดที่เกิดขึ้นกับค่าแรงดันแบกทานที่ระยะ 0.1B ของตัวอย่างที่ไม่ได้เสริม (525 กิโลปาสคาล) พบว่า ตัวอย่างที่เสริมที่ระยะ 0.1 เมตร และ 0.2 เมตร เกิดค่าความเครียด 140 ไมโครเมตรต่อเมตร และ 90 ไมโครเมตรต่อเมตร ตามลำดับ ส่วนตัวอย่างที่เสริม 2 ชั้น ที่ตาข่ายเสริมกำลังชั้นบน เกิดความเครียด 49 ไมโครเมตรต่อเมตร และตาข่ายเสริมกำลังชั้นล่าง เกิดความเครียด 40 ไมโครเมตรต่อเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเสริมตาข่าย 2 ชั้น จะช่วยลดความเครียดที่เกิดขึ้นได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับการติดตั้งที่ระยะอื่นๆ



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ของความเค้นในดินกับแรงดันแบกทาน

3.3 ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น

3.3.1 อัตราส่วนของแรงดันแบกทาน

การปรับปรุงคุณภาพของถนนไร้ผิวทางโดยการติดตั้งด้ายรับแรงดึงแบบสามทิศทาง เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักแบกทานในแต่ละตัวอย่าง สามารถหาค่าอัตราส่วนของแรงดันแบกทาน (Bearing capacity ratio, BCR) ของแต่ละการทดสอบจากสมการที่ 1 เมื่อค่า $q_{ult (unreinforced)}$ คือ แรงดันแบกทานสูงสุดที่ได้จากการทดสอบแบบไม่มีการเสริมด้ายเสริมกำลังและค่า $q_{ult (reinforced)}$ คือ แรงดันแบกทานสูงสุดที่ได้จากการเสริมด้ายเสริมกำลัง [37-39] โดยวัดจากการทรุดตัวที่ระยะ 0.1B ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5

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

จากผลการทดสอบทำให้สามารถคำนวณหาค่าอัตราส่วนของแรงแบกทาน (BCR) จากสมการที่ 1 ซึ่งแสดงผลตามตารางที่ 2 ทำให้ทราบว่า การติดตั้งด้ายรับแรงดึงแบบสามทิศทางที่ระยะ 0.1, 0.2 เมตรและติดตั้งแบบ 2 ชั้น ได้ค่า BCR เป็น 1.00, 1.22 และ 1.63 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเสริมด้วยด้าย ถ้าเสริมด้วยจำนวนชั้นที่มากขึ้นจะเพิ่มความสามารถในการรับแรงดันแบกทานของดิน [40-41]

3.3.2 โมดูลัสการต้านทานแรงกดของชั้นดิน

ค่าโมดูลัสการต้านทานแรงกดของชั้นดิน (Subgrade modulus, k) คืออัตราส่วนของความสัมพัทธ์ระหว่างแรงแบกทานและการยุบตัว [42] ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของฐานราก โดยที่ค่า q_{ult} คือ น้ำหนักแบกทานและค่า s คือค่าการทรุดตัวแสดงดังสมการที่ 2

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

จากการศึกษาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทางผู้วิจัยได้วิเคราะห์ค่าโมดูลัสการต้านทานแรงกดของชั้นดิน โดยพิจารณาจากค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นกับค่ากำลังแบกทานของชั้นดินที่ระยะการทรุดตัว 0.1B จากรูปที่ 5 ซึ่งค่าโมดูลัสการต้านทานแรงกดหรือค่า k ที่ได้ จะแสดงดังตารางที่ 2 เห็นได้ว่า ตัวอย่างที่มีการเสริมที่ระยะ 0.2 เมตร มีความสามารถในการรับแรงดันแบกทานเพิ่มขึ้นร้อยละ 22 มีค่า k เท่ากับ 21.30 เมกะปาสกาลต่อเมตร และตัวอย่างที่เสริม 2 ชั้นความสามารถในการรับแรงดันแบกทานเพิ่มขึ้นร้อยละ 63 มีค่า k สูงที่สุดเท่ากับ 28.50 เมกะปาสกาลต่อเมตร ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกันแล้วแสดงให้เห็นว่าค่าโมดูลัสการต้านทานแรงกดของชั้นดินจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นของตาข่ายเสริมกำลังเนื่องจากเป็นอัตราส่วนของแรงดันแบกทานและการทรุดตัว [43]

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบแรงดันแบกทานแบบสถิต

Test No.	Test Series	q_{ult} (kPa)	Percent (%) Improvement in BC	BCR @30 mm	Subgrade modulus, k (MPa/m)
1	ไม่เสริมกำลัง	525	-	-	-
2	เสริมกำลังที่ระยะ 0.1 m	525	0	1.00	17.50
3	เสริมกำลังที่ระยะ 0.2 m	640	22	1.22	21.30
4	เสริมกำลัง 2 ชั้น	855	63	1.63	28.50

4. สรุปผลการทดสอบ

4.1 ค่าแรงดันแบกทานสูงสุดของตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมด้วยตาข่ายเสริมกำลัง จะมีค่า 525 กิโลปาสกาล และของตัวอย่างที่มีการเสริมกำลังที่ระยะ 0.1, 0.2 เมตร และ เสริม 2 ชั้นจะอยู่ที่ 525, 640 และ 855 กิโลปาสกาล พบว่าตัวอย่างที่เสริมที่ระยะ 0.1 เมตร และเสริม 2 ชั้น มีการปรับปรุงความสามารถในการรับแรงดันแบกทานเพิ่มขึ้นร้อยละ 22 และ 63 ตามลำดับ

4.2 การเสริมตาข่ายที่ระยะ 0.2 เมตร หรือที่รอยต่อระหว่างชั้นหินคลุกและดินเหนียวอ่อนพลาสติกสูง และการเสริม 2 ชั้น แสดงให้เห็นถึง ค่ากำลังแบกทานและการทรุดตัวที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมตาข่าย

4.3 การเสริมตาข่ายที่ระยะ 0.1 เมตร หรือที่กึ่งกลางของชั้นหินคลุก ไม่แสดงผลถึงค่ากำลังแบกทานและการทรุดตัวที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมตาข่าย เนื่องจากมีระยะในการติดตั้งลึกลงไม่เพียงพอ

4.4 ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเสริมตาดำชั้นเดียวจะอยู่ที่ระยะ 0.2 เมตร หรือรอยต่อระหว่างชั้นดินเหนียวอ่อน พลาสติกสูงกับชั้นหินคลุก

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ระดับปริญญาเอก เลขที่สัญญา PHD62I0017 และบริษัท สยาม เกเบียน จำกัด ศาสตราจารย์ พิทยา แจ่มสว่าง ที่ให้คำปรึกษาตลอดจนแก้ไขในข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี ผู้วิจัยตระหนักถึงความทุ่มเทของอาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] S.K. Shukla Geosynthetics and their applications. London: Thomas Telford Publishing; 2002.
- [2] Dong, Y., Han, J., & Bai, X. A numerical study on the stress-strain responses of biaxial geogrids under tension at different directions. ASCE G-I GeoFlorida Conference; 2010.
- [3] 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.
- [4] Q. Chen, S. Hanandeh, M. Abu-Farsakh, L., Mohammad. Performance evaluation of full-scale geosynthetic reinforced flexible pavement. Geosynth. Int, 2018, 25 (1), pp. 26–36.
- [5] 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.
- [6] X. Sun, J. Han, R. Corey. Equivalent modulus of triaxial geogrid-stabilized granular base back-calculated using permanent deformation. J. Geotech. Geoenviron. Eng, 2017, 143 (9), 06017012.
- [7] 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.
- [8] Q. Chen, M. Abu-Farsakh, R. Sharma. Experimental and analytical studies of reinforced crushed limestone. Geotext. Geomembr, 2009, 27(5), pp. 357–367.
- [9] Q. Chen, M. Abu-Farsakh. Ultimate bearing capacity analysis of strip footings on reinforced soil foundation. Soils Found, 2015, 55(1) pp. 74–85.
- [10] L. Suku, S.S. Prabhu, G.L.S. Babu. Effect of triaxial geogrid-reinforcement in granular bases under repeated Loading. Geotext. Geomembr, 2017, 45, pp. 377-389.
- [11] 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.
- [12] 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.

- [13] 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.
- [14] Q. Chen, An Experimental Study on Characteristics and Behavior of Reinforced Soil Foundation. Doctoral Dissertation 3361, Louisiana State University, Baton Rouge, LA, USA, 2007.
- [15] 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.
- [16] C.C. Huang, M.Y. Al-Aghbari, Y.E.A. Mohamedzein. Ultimate bearing capacity of saturated reinforced horizontal ground. *Geosynth. Int*, 2016, 23, pp. 1–8.
- [17] 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.
- [18] Perkins SW Geosynthetic reinforcement of flexible pavements: laboratory based pavement test sections. Federal Highway , 1999. Administration Report No. FHWA/MT-99-001/81838
- [19] C.-C. Huang, F. Tatsuoka. Bearing capacity of reinforced horizontal sandy ground. *Geotext. Geomembr*, 1990, 9, pp. 51–82.
- [20] Q. Chen, Triaxial geogrid-Enhanced Modulus and Stress Distribution in Clay Soil Geotechnics, 2024, 4, pp. 41–53.
- [21] I.L. Al-Qadi, S.H. Dessouky, J. Kwon, E. Tutumluer, Geogrid in flexible pavements: validated mechanism. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2045. National Research Council, 2008, 02-109.
- [22] C.G. Bao, M.Y. Wang, J.H. Ding, Mechanism of soil reinforced with triaxial geogrid. *J. Yangtze River Sci. Res. Inst*, 2013, 30, pp. 34–41.
- [23] M. Abu-Farsakh, Q. Chen, R. Sharma, An experimental evaluation of the behavior of footings on geosynthetic-reinforced sand. *Soils Found*, 2013, 53 (2), pp. 335–348.
- [24] K.S. Gill, A.K. Choudhary, J.N. Jha, S.K. Shukla, Experimental and numerical studies of loaded strip footing resting on reinforced fly ash slope. *Geosynth. Int*, 2013, 20 (1), pp. 13–25.
- [25] A. Demir, M. Laman, A. Yildiz, M. Ornek, Large scale field tests on triaxial geogrid-reinforced granular fill underlain by clay soil. *Geotext. Geomembr*, 2013, 38, pp. 1-15.
- [26] 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. *Geotext. Geomembr*, 2018, 46 (5), pp. 586-596.
- [27] X.H. Sun, J. Han, J. Kwon, R.L. Parsons, M.H. Wayne, Radial stresses and resilient deformations of geogrid-stabilized unpaved roads under cyclic plate loading tests. *Geotext. Geomembr*, 2015, 43 (5), 440e449.
- [28] X.H. Sun, J. Han, M.H. Wayne, R.L. Parsons, J. Kwon, Determination of load equivalency for unpaved roads. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Low-Volume Roads (Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, 2015, 2473, pp. 233e241.
- [29] ASTM D4318-17e1 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, 2018.
- [30] ASTM D854-23 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, 2023.
- [31] ASTM D1557-12 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort, 2021.
- [32] ASTM D1883-21 Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory Compacted Soil, 2021.
- [33] ASTM D6913/D6913M-17 Standard Test Method for Particle-size Distribution of Soil Using Sieve Analysis, 2021.
- [34] ASTM D7928-21e1 Standard Test Method for Particle-size Distribution Soil Using The Sedimentation (Hydrometer) Analysis, 2021.
- [35] มยผ.1253 -62, มาตรฐานการทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของดิน, กรมโยธาและผังเมือง, กระทรวงมหาดไทย พ.ศ.2562.
- [36] Lutenegeger, 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.
- [37] J. Binquet, K.L. Lee, Bearing capacity tests on reinforced earth slabs. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 1975, 101 (12), pp. 1241–1255.

- [38] E. Badakhshan, A. Noorzad, 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.
- [39] Y. Xu, G. Yan, D.J. Williams, M. Serati, A. Scheuermann, T. Vangsness, 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
- [40] Laman M, Yildiz A, Demir A, Ornek M Shallow foundations on geogrid reinforced soft clay. In: 4th European geosynthetics conference (EuroGeo4), Edinburgh, Scotland, 7–10 September. 2008
- [41] Q. Chen, An experimental study on characteristics and behavior of reinforced soil footing. PhD Thesis, Louisiana State University, Baton Rouge, USA, 2007.
- [42] Bowles, J. E. *Foundation Analysis and Design*. 4th ed., McGraw-Hill Inc., New York, USA, 1988.
- [43] Subinay Saha Roy and Kousik Deb, Modulus of Subgrade Reaction of Unreinforced and Triaxial geogrid-Reinforced Granular Fill Over Soft Clay. *Int. J. Geomech*, 2021, 21(9), 04021156.