

แบบจำลองแรงจุดสูงสุดของเหล็กเสริมแบกทานเสริมกำลังในดินทราย

A Model of Maximum Pullout Force of Bearing Reinforcement Stabilized on Compacted Sandy Soil

วรรณชัย เกษกัน¹, อภิชาติ คำภาหล้า¹

Received: Oct 2008; Accepted: Dec 2009

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาพฤติกรรมและแรงต้านทานต่อแรงจุดในห้้องปฏิบัติการของเหล็กเสริมแบกทานเสริมกำลังในดินทรายบดอัดที่จุดเหมาะสมของพลังงานแบบมาตรฐาน จากการศึกษา พบว่าแรงแบกทานของเหล็กเสริมกำลังจะเกิดเต็มที่เมื่อเหล็กเสริมกำลังเคลื่อนตัวประมาณร้อยละ 65 ของความสูงของเหล็กแบกทาน และระยะห่างระหว่างเหล็กแบกทานเหมาะสมมีค่าเท่ากับ 45 เซนติเมตร ในขณะที่ความยาวของเหล็กแบกทานเหมาะสมมีค่าเท่ากับ 15 เซนติเมตร นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ความเค้นกดทับในแนวตั้งค่าหนึ่ง แรงจุดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตรงกับจำนวนและความยาวของเหล็กแบกทาน และที่ระยะห่างระหว่างเหล็กแบกทานค่าหนึ่ง แรงจุดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตรงกับความเค้นกดทับในแนวตั้งเช่นกัน จากนั้นแบบจำลองแรงจุดสูงสุดของเหล็กเสริมกำลังแบกทานในดินทรายที่บดอัดด้วยปริมาณน้ำเหมาะสมของพลังงานแบบมาตรฐานที่ระยะการเคลื่อนตัว 25 มิลลิเมตรได้ถูกสร้างขึ้น สุดท้าย แบบจำลองนี้ได้รับการตรวจสอบความถูกต้องจากข้อมูลของการทดสอบหินคลุก และผลการทำนายมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้

¹ อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา

Abstract

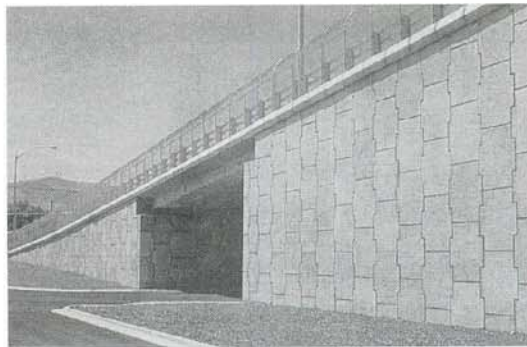
This paper deals with the laboratory investigation on behavior and pullout force resistance of the bearing reinforcement stabilized on compacted sandy soil at the optimum point of Standard Proctor energy. It was found that the bearing force is fully developed at the bearing reinforcement movement of 65% of the height of the bearing bar and the appropriate spacing and length of the bearing bar is 45 and 15 centimeters, respectively. At any vertical normal pressure, the maximum pullout force is increased proportionally with the number and length of the bearing bar, and at any spacing of the bearing bar, the maximum pullout force is increased proportionally with the vertical normal pressure. In addition, the model for the maximum pullout force of the bearing reinforcement stabilized on compacted sandy soil at the bearing reinforcement movement of 25 millimeters, on the optimum of Standard Proctor energy was proposed. It was verified by using the test results compiled from crushed rock. The predicted and the observed values are in good agreement within acceptable engineering error.

Keywords : Bearing reinforcement, Pullout force, Vertical normal pressure

บทนำ

ในงานก่อสร้างดินถมและกำแพงกันดิน หรือในงานทางด่วน (Highway project) พื้นที่ด้านข้างมักถูกจำกัดเนื่องจากราคาที่ดินที่สูงขึ้นในแต่ละปี จึงมีความจำเป็นที่จะต้องสร้างคันดินถมที่สูงและชันโดยปราศจากความลาดด้านข้าง (Side slope) ดังแสดงในรูปที่ 1 การจะสร้างกำแพงกันดินที่มีความสูงและชันได้จำเป็นต้องเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงดึงให้กับดินด้วยการเสริมวัสดุเสริมแรงดึง วิธีการเพิ่มกำลังต้านทานแรงดึงให้กับดินนี้ได้เกิดขึ้นในช่วงสองศตวรรษที่ผ่านมา

วัสดุเสริมแรงดึงในดินเรียกว่า Mechanically Stabilized Earth (MSE) วัสดุเสริมแรงดึงนอกจากจะเพิ่มแรงดึงให้กับดินแล้ว ยังช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแรง และต้านทานการอัดตัวของดินได้ วัสดุเสริมแรงดึงถูกแบ่งออกเป็นสองประเภทตามพฤติกรรมความเค้น-ความเครียด (Stress-strain behaviour) ได้แก่ วัสดุเสริมแรงดึงแบบยืดตัวได้ (Extensible reinforcement) และวัสดุเสริมแรงดึงแบบไม่ยืดตัว (Inextensible reinforcement) วัสดุเสริมแรงดึงจำพวกโลหะ (Metallic reinforcement) เช่น

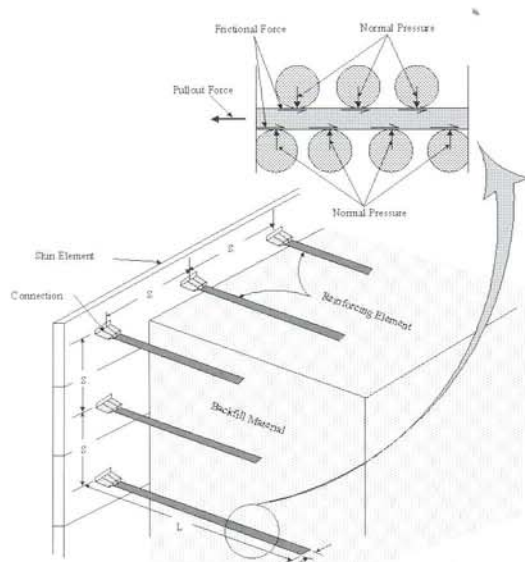


รูปที่ 1 การก่อสร้างกำแพงกันดินที่ปราศจาก Berm และ Side slope

ตะแกรงเหล็ก (Steel wire mesh) จัดเป็นวัสดุเสริมแรงดึงแบบไม่ยึดตัว เนื่องจากเหล็กมีค่าโมดูลัสที่สูงและมีการยึดตัวและการคืบที่ต่ำมาก วัสดุเสริมแรงดึงได้มีการประยุกต์ใช้งานตั้งแต่อดีต ตัวอย่างเช่น การสร้างผนังดินด้วยก้อนอิฐที่เสริมกำลังด้วยฟางข้าว การใช้ไม้ไผ่ในการเพิ่มเสถียรภาพของคันดินเตี้ยๆ ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

การเสริมวัสดุเสริมแรงดึงในยุคปัจจุบันเริ่มแรกโดยวิศวกรชาวฝรั่งเศส ทำโดยการเสริมเหล็กเสริมแรงดึงแบบแผ่น (Metal strip reinforcement) ในแนวนอนและต่อเชื่อมกับ Facing panel คอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 2 วัสดุผสมระหว่างดินและเหล็กเสริม (Composite material) นี้เรียกว่า Reinforced Earth (Vidal, 1969) โดยปฏิกริยาร่วมระหว่างดินและเหล็กเสริมแรงดึงจะเป็นแรงเสียดทานเป็นส่วนใหญ่

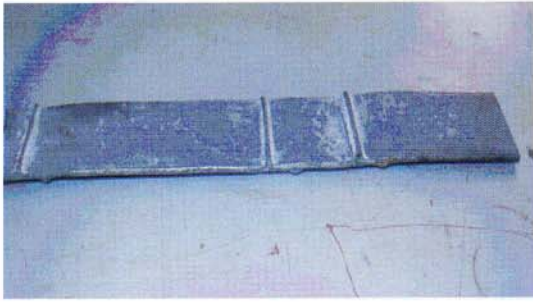
ในประเทศญี่ปุ่น การก่อสร้างคันดินสูงบนชั้นดินอ่อนมักใช้แผ่นเรซิน (Resinous sheet) และตาข่ายโพลีเมอร์ (Polymer net) เป็นวัสดุเสริมแรงดึงเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงแบกทานของดินฐานราก



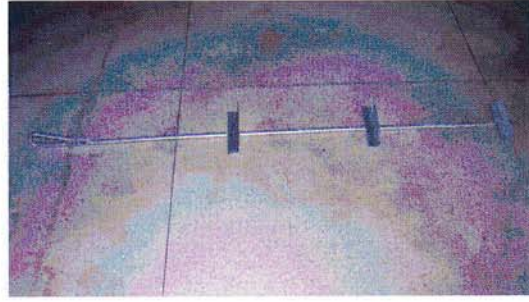
รูปที่ 2 กำแพงกันดินแบบ Reinforced Earth (Reinforced earth wall)

นอกจากนี้ ในประเทศอังกฤษยังมีการประยุกต์ใช้ตะแกรงไม้ไผ่ร่วมกับแผ่นโพลีเมอร์วางทับบนดินเหนียวอ่อนในหลายโครงการก่อสร้าง (Yamanouchi, 1986) ซึ่งพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นดินอ่อนและดินเม็ดหยาบที่มีราคาแพง นอกจากนี้ การใช้ตาข่ายโพลีเมอร์ในการเสริมแรงดึงของดินเชื่อมแน่นเพื่อใช้เป็นดินถม (Backfill) ก็ได้รับการยอมรับและใช้กันอย่างกว้างขวาง

ในปัจจุบัน การเสริมกำลังของดินมักใช้กับดินเม็ดหยาบที่มีคุณภาพดีและความสามารถในการซึมผ่านน้ำสูง ดินเม็ดหยาบดังกล่าวอาจแทบจะหาไม่ได้เลยในบางบริเวณพื้นที่ก่อสร้าง ดังนั้นการใช้ดินที่หาได้จากในพื้นที่ก่อสร้าง (แม้ว่าดินนั้นจะเป็นดินที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ไม่ดีนัก) อาจเป็นการประหยัดกว่าการนำดินที่เหมาะสมมาจากแหล่งอื่น การรวมตัวกันของดินและเหล็กเสริมกำลังทำให้ได้วัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติด้านกำลังอัดและกำลังดึงที่ดี การประยุกต์ใช้เหล็กเสริมแรงดึงกับชั้นดินบดอัดที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่างๆ จึงเป็นหัวข้องานวิจัยที่น่าสนใจและเป็นประโยชน์ต่องานก่อสร้างกำแพงกันดิน นอกจากดินถมแล้ว วัสดุเสริมแรงดึงก็เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ควบคุมราคาก่อสร้าง วัสดุเสริมแรงดึงที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศหรือต้องเสียค่าลิขสิทธิ์ให้กับเจ้าของสิทธิบัตรต่างชาติ จะมีราคาสูงมาก ตัวอย่างของเหล็กเสริมแรงดึงที่นำเข้าจากต่างประเทศ ได้แก่ เหล็กเสริมแรงดึงแบบแผ่น (Strip reinforcement) ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งนำเข้าจากประเทศแอฟริกาใต้ เพื่อเป็นการลดต้นทุนค่าก่อสร้างให้แก่บริษัทก่อสร้าง อันนำมาซึ่งการลดงบประมาณค่าก่อสร้างของเจ้าของงาน เช่น กรมทางหลวง กรมชลประทาน และหน่วยงานภาครัฐและเอกชน เป็นต้น จึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาวัสดุเสริมแรงดึงที่มีประสิทธิภาพทั้งในด้านวิศวกรรมและเศรษฐศาสตร์ขึ้นมาใช้ภายในประเทศ



รูปที่ 3 เหล็กเสริมแรงดึงแบบแผ่น
(Strip reinforcement)

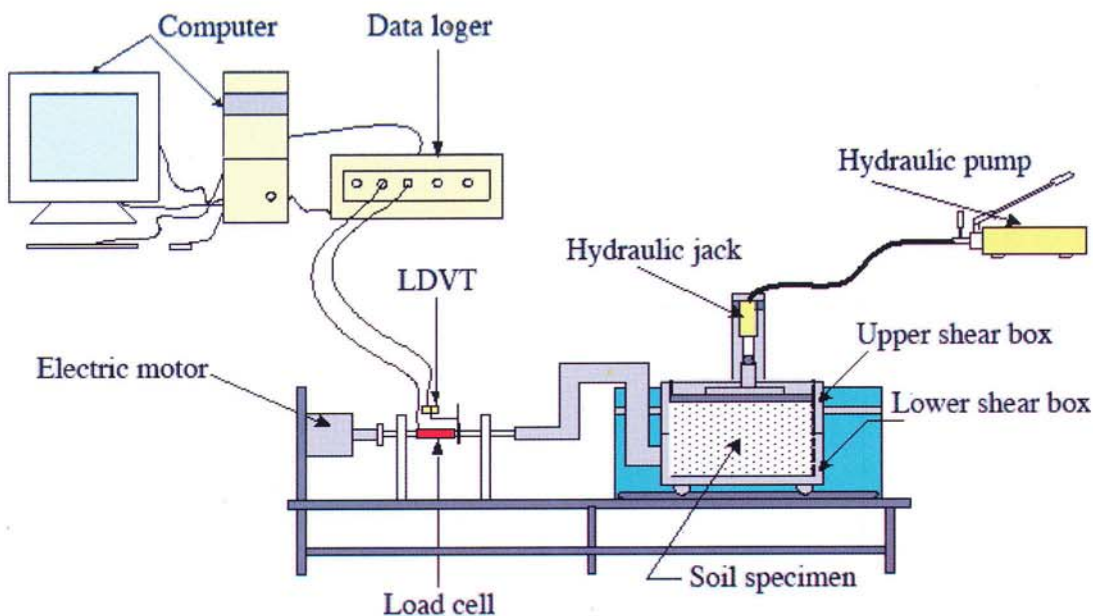


รูปที่ 4 เหล็กเสริมแรงดึงแบบแบกทาน
(Bearing reinforcement)

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เหล็กเสริมแบกทาน (Bearing reinforcement) แทนการใช้เหล็กเสริมแบบแผ่น รูปแบบทั่วไปของเหล็กเสริมแบกทาน ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งประกอบด้วยเหล็กข้ออ้อยเป็นเหล็กแกน (Longitudinal bar) และเหล็กฉากเป็นเหล็กแบกทาน ซึ่งเหล็กเสริมแบกทานนี้มีการเสียรูปต่ำขณะใช้งาน และมีความสามารถในการรับแรงแบกทานที่สูงมากในขณะที่มีดินหนุนที่ต่ำเนื่องจากสามารถผลิตได้เองในประเทศ

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดสอบ

ดินที่ใช้ในการทดสอบเป็นทรายแม่น้ำเก็บมาจากอำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา ดินตัวอย่างจะถูกนำมาบดอัดด้วยพลังงานมาตรฐานแบบหล่อ (Mold) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 101.23 มิลลิเมตร และสูง 115.90 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบหาพารามิเตอร์กำลัง (Strength parameters) เพื่อประเมินกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมในดิน จะใช้เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large scale direct shear test) ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 อุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือนโดยตรงขนาดใหญ่ (Large scale direct shear test)

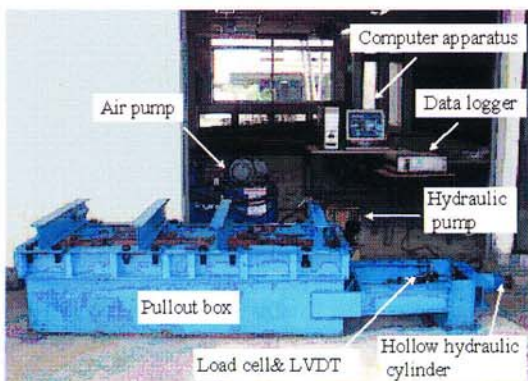
กล่องเฉือน (Shear box) ทั้งด้านบนและด้านล่างมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร และสูง 20 เซนติเมตร การให้น้ำหนักในแนวตั้งกระทำต่อดินตัวอย่างใช้เครื่องกดแบบไฮดรอลิก ขนาด 10 ตัน ในขณะที่เฉือนดินตัวอย่างกล่องเฉือนส่วนล่างจะถูกดันให้เคลื่อนที่ในแนวราบด้วยอัตราความเครียดคงที่ (Constant rate of strain) แรงที่ใช้ในการเฉือน (Shear force) วัดได้โดยใช้ Load cell ขนาด 10 ตัน ส่วนการเคลื่อนที่ในแนวราบของกล่องเฉือนทำการวัดโดย Linear variable differential transformer (LVDT) ที่สามารถวัดระยะได้สูงสุด 5 เซนติเมตร ทั้งการวัดแรงและการเคลื่อนตัวของดินตัวอย่างในแนวราบจะถูกบันทึกโดย Data logger

รูปที่ 6 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ทดสอบแรงดึงของเหล็กเสริมกำลังแบกทาน กล่องทดสอบมีความยาว ความกว้าง และความสูงเท่ากับ 1.80, 0.60 และ 0.50 เมตร ตามลำดับ ในขณะที่ทำการทดสอบเหล็กเสริมกำลังแบกทานจะถูกอัดความดันผ่านถุงลมให้มีความดันคงที่กระทำต่อดินบดอัดในแนวตั้งผ่านแผ่นเหล็กดัดตัวได้ (Flexible plate) ความดันนี้เปรียบเสมือนความเค้นในแนวตั้งที่เกิดจากน้ำหนักของดินบดอัดที่อยู่ด้านบนของเหล็กเสริม ด้านหน้าของกล่องจะติดตั้งอุปกรณ์สำหรับดึง

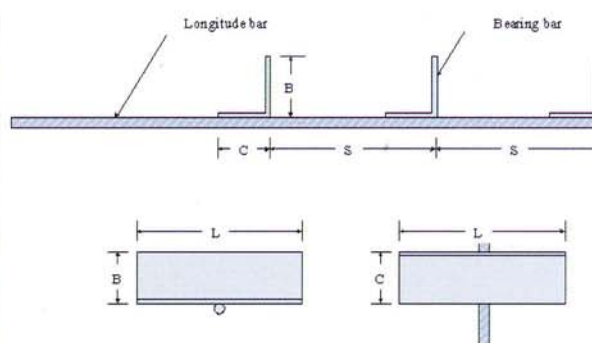
เหล็กเสริมผ่านระบบไฮดรอลิก การวัดแรงดึงจะใช้ Load cell ที่สามารถวัดแรงดึงได้สูงสุด 10 ตัน ส่วนระยะการเคลื่อนตัวของเหล็กเสริมจะวัดโดยใช้ LVDT ที่สามารถวัดระยะได้สูงสุด 5 เซนติเมตร ทั้งการวัดแรงและการเคลื่อนตัวของเหล็กเสริมจะถูกบันทึกโดย Data logger

เหล็กเสริมกำลังแบกทาน ที่ใช้ทดสอบประกอบด้วยเหล็กแกน (Longitudinal bar) และเหล็กแบกทาน (Bearing bar) ดังแสดงในรูปที่ 7 เหล็กแกนจะใช้เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร มีกำลังคราก (Yield strength) 4,500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนเหล็กแบกทานจะใช้เหล็กฉากขนาดมาตรฐาน 40x40 มิลลิเมตรหนา 5 มิลลิเมตร ทั้งเหล็กแกนและเหล็กแบกทานจะถูกประกอบต่อกันด้วยการเชื่อม เหล็กฉากหรือเหล็กแบกทานมีอัตราส่วนความยาวต่อความสูง (L/B) เท่ากับ 2.5, 3.75 และ 5.0 อัตราส่วนระยะห่างของเหล็กแบกทานต่อความสูง (S/B) เท่ากับ 3.75, 7.5, 11.25 และ 15.0 ทุกๆ เงื่อนไขของการทดสอบจะใช้จำนวน 3 ตัวอย่าง

ดินตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.77 ส่วนผสมหลักเป็นทรายในปริมาณ 97.7 เปอร์เซ็นต์ นอกนั้นเป็น



รูปที่ 6 ภาพถ่ายชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงดึง (Pullout test apparatus)



รูปที่ 7 ส่วนประกอบของเหล็กเสริมกำลังแบบแบกทาน (Bearing reinforcement)

กรวดและดินตะกอนในปริมาณร้อยละ 1.62 และ 0.68 ตามลำดับ ปริมาณน้ำเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดเมื่อบดอัดด้วยพลังงานมาตรฐาน มีค่าเท่ากับร้อยละ 6.3 และ 16.8 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ และจากผลทดสอบแรงเฉือนตรงพบว่าดินตัวอย่างมีมุมเสียดทาน 41 องศา และไม่ปรากฏหน่วยแรงยึดเกาะ

ผลทดสอบ

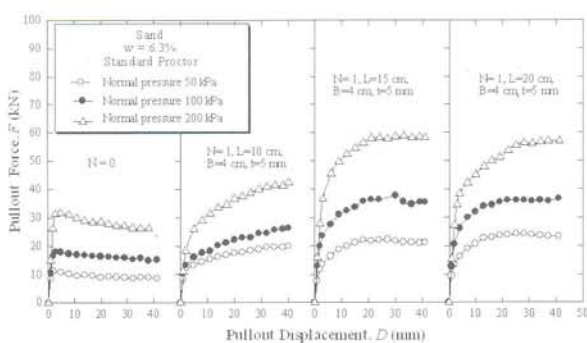
พฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กเสริมกำลังแบบแบกทาน

รูปที่ 8 แสดงผลเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดกับการเคลื่อนตัวของเหล็กเสริมกำลังในดินตัวอย่างบดอัด เมื่อเหล็กเสริมกำลังมีเพียงเหล็กแกนอย่างเดียว ($N=0$) และมีทั้งเหล็กแกนร่วมกับเหล็กแบกทาน ($N=1$) พบว่า แรงต้านทานต่อแรงจุดสูงสุดทั้งเหล็กเสริมกำลังที่มีเพียงเหล็กแกนอย่างเดียวและเหล็กเสริมกำลังที่มีทั้งเหล็กแกนร่วมกับเหล็กแบกทานมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเค้นในแนวดิ่งและความยาวของเหล็กแบกทาน นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเหล็กเสริมกำลังที่มีเพียงเหล็กแกนอย่างเดียวมีการเคลื่อนที่เลยจุดที่ให้แรงต้านทานต่อแรงจุดสูงสุดแล้ว แรงต้านทานจะมีค่าลดลงตามการเคลื่อนที่ของ

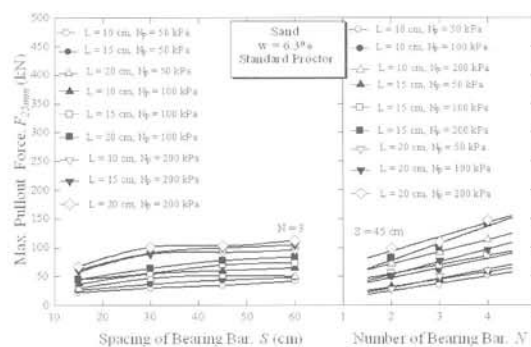
เหล็กเสริมกำลัง ในขณะที่เหล็กเสริมกำลังที่มีทั้งเหล็กแกนร่วมกับเหล็กแบกทานจะมีพฤติกรรมแตกต่างออกไป กล่าวคือ เมื่อเหล็กเสริมกำลังมีการเคลื่อนที่เลยจุดที่ให้แรงต้านทานต่อแรงจุดสูงสุดแล้วแรงต้านทานจะมีค่าคงที่ ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากว่า ในช่วงแรกของการเคลื่อนตัวของเหล็กเสริมกำลังแบบแบกทาน (ประมาณ 5 มิลลิเมตร) เหล็กแบกทานมีส่วนในการช่วยต้านทานต่อแรงจุดน้อยมาก แต่จะเกิดขึ้นที่เมื่อเกิดการเคลื่อนได้ประมาณ 25 มิลลิเมตร (ประมาณร้อยละ 65 ของความสูง (B) ของเหล็กแบกทาน) (Whitaker and Cooke, 1966)

อิทธิพลของระยะห่างและจำนวนของเหล็กแบกทานต่อแรงดึงออกสูงสุด

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดสูงสุดกับระยะห่างและจำนวนของเหล็กแบกทาน เมื่อแปรผันความเค้นในแนวดิ่งเท่ากับ 50, 100 และ 200 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร จากผลทดสอบพบว่า ที่จำนวนของเหล็กแบกทานค่าหนึ่ง แรงจุดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเค้นในแนวดิ่งและระยะห่างของเหล็กแบกทาน จนกระทั่งระยะห่างของเหล็กแบกทานมีค่าประมาณ 45 เซนติเมตร แรงจุดสูงสุดมีแนวโน้มคงที่ สาเหตุสำคัญที่ทำให้แรงจุดสูงสุดมีค่าต่ำเมื่อระยะห่างระหว่างเหล็กแบกทาน



รูปที่ 8 พฤติกรรมของแรงดึงออกและการเคลื่อนตัวของเหล็กเสริมกำลังในดินตัวอย่าง

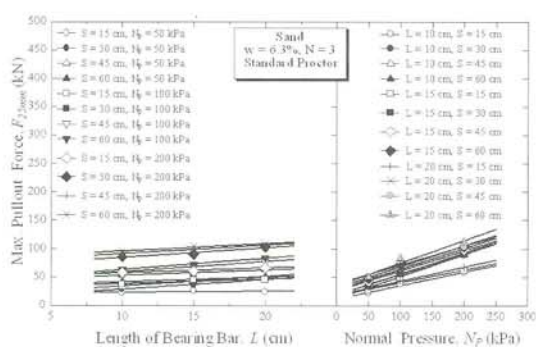


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดสูงสุดกับระยะห่างและจำนวนของเหล็กแบกทาน

มีค่าน้อยกว่า 45 เซนติเมตร เกิดจากอิทธิพลด้านขอบเขต (Boundary effect) กล่าวคือ เมื่อเหล็กแบกทานอยู่ใกล้กันเกินไปจะทำให้ระนาบการบิดตัวของเหล็กแบกทานแต่ละตัวเกิดการซ้อนทับกัน ส่งผลให้แรงจุดสูงสุดมีค่าต่ำ ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่าระยะห่างระหว่างเหล็กแบกทานต่ำสุดที่เหมาะสมสำหรับเหล็กเสริมกำลังแบกทานในดินตัวอย่างบดอัดมีค่าเท่ากับ 45 เซนติเมตร โดยประมาณ นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อระยะห่างระหว่างเหล็กแบกทานเท่ากับ 45 เซนติเมตร และที่ความเค้นในแนวตั้งค่าหนึ่งแรงจุดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตรงกับจำนวนของเหล็กแบกทาน ทั้งนี้เนื่องจากว่า เมื่อจำนวนของเหล็กแบกทานมากขึ้นจะทำให้เหล็กเสริมกำลังแบกทานมีพื้นที่รับแรงแบกทานมากขึ้นจึงส่งผลให้แรงดึงออกสูงสุดมีค่าสูง

อิทธิพลของความยาวเหล็กเสริมแบกทานและความเค้นในแนวตั้งต่อแรงจุดสูงสุด

รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดสูงสุดกับความยาวของเหล็กแบกทานและความเค้นในแนวตั้งของเหล็กเสริมกำลังแบกทานพบว่า ที่ระยะห่างของเหล็กแบกทานค่าหนึ่งแรงจุดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเค้นในแนวตั้งและความยาวของเหล็กแบกทานเชิงเส้นตรง ที่เป็น

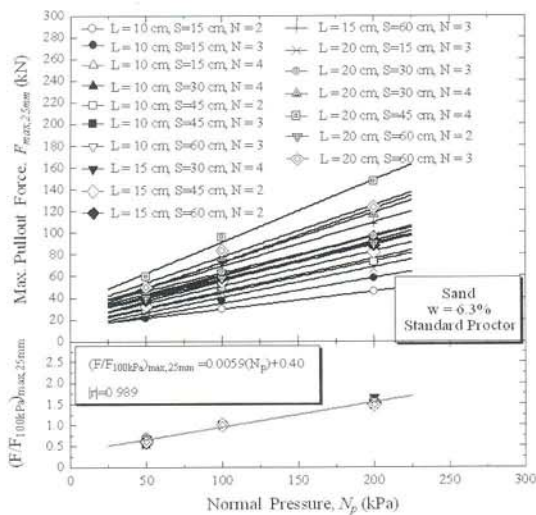


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดสูงสุดกับความยาวของเหล็กแบกทานและความเค้นในแนวตั้ง

เช่นนี้เนื่องจากว่าเมื่อความยาวของเหล็กแบกทานมากขึ้นจะทำให้เหล็กเสริมกำลังแบกทานมีพื้นที่รับแรงแบกทานมากยิ่งขึ้น และในขณะที่เมื่อเหล็กเสริมกำลังแบกทานเกิดการเคลื่อนตัวจะทำให้แรงต้านทานแรงจุดของดินด้านหน้าของเหล็กแบกทานอยู่ในสภาวะ Passive และแรงต้านทานนี้จะมีค่าสูงขึ้นตามความเค้นในแนวตั้ง (Bergado et al., 1993) ส่งผลให้แรงต้านทานแรงจุดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น

วิเคราะห์ผลทดสอบแรงดึงเหล็กเสริมกำลังแบกทาน

ดังได้ทราบมาแล้วว่า ขนาดของแรงแรงจุดสูงสุดที่ระยะการเคลื่อนตัว 25 มิลลิเมตร ของเหล็กเสริมกำลังแบกทาน ขึ้นอยู่กับความยาวของเหล็กแบกทาน (L) จำนวนของเหล็กแบกทาน (N) ระยะห่างของเหล็กแบกทาน (S) และความเค้นกดทับในแนวตั้ง (N_p) อย่างไรก็ตาม จากผลทดสอบจะพบว่าที่ความเค้นในแนวตั้งค่าหนึ่งแรงจุดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตรงกับจำนวนและความยาวของเหล็กแบกทาน และทำนองเดียวกันที่ระยะห่างของเหล็กแบกทานค่าหนึ่งแรงจุดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตรงกับความเค้นในแนวตั้งเช่นกัน ดังนั้น จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งถ้าเราสามารถหาวิธีในการประมาณแรงจุดสูงสุดที่ความเค้นกดทับต่างๆ ได้ จากผลทดสอบเพียงค่าเดียวจากแนวคิดข้างต้นผู้วิจัยได้ทำการ Normalization ความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดสูงสุด (F) กับความเค้นกดทับในแนวตั้งที่สภาวะการบดอัดเดียวกัน โดยการหารด้วยแรงจุดสูงสุดที่ความเค้นกดทับในแนวตั้งเท่ากับ 100 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร (F_{100kPa}) ภายใต้สภาวะตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความยาว จำนวน และระยะห่างของเหล็กแบกทาน ผลการ Normalization ดังแสดงในรูปที่ 11 และได้ความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรงตามสมการที่ 1



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงจุดสูงสุดกับความเค้นกดทับในแนวตั้ง และการ Normalization

$$\left(\frac{F}{F_{100kPa}} \right)_{max, 25mm} = 0.0059N_p + 0.4 \quad (1)$$

เมื่อ F และ F_{100kPa} คือ แรงจุดสูงสุดที่ความเค้นกดทับในแนวตั้ง N_p ใดๆ และแรงจุดสูงสุดที่ความเค้นกดทับในแนวตั้งเท่ากับ 100 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ตามลำดับ สมการที่ 1 สามารถใช้ทำนายแรงจุดสูงสุดของเหล็กเสริมกำลังแบกทาน

ที่ความเค้นกดทับในแนวตั้งใดๆ ได้เพียงแค่ว่าทราบในแนวตั้งสูงสุดที่สภาวะเดียวกัน โดยใช้ความเค้นกดทับในแนวตั้งเพียงค่าเดียว

การตรวจสอบแบบจำลอง

ในหัวข้อนี้ จะตรวจสอบความแม่นยำของสมการแรงจุดสูงสุดที่ระยะการเคลื่อนตัวของเหล็กเสริมกำลัง 25 มิลลิเมตร โดยใช้กับหินคลุกจากโรงโม่หินศิลาสากล จังหวัดนครราชสีมา ที่มีปริมาณน้ำเหมาะสมและหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดเมื่อบดอัดด้วยพลังงานมาตรฐานมีค่าเท่ากับร้อยละ 6.1 และ 21.6 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ (สาเหตุที่ใช้หินคลุกตรวจสอบแบบจำลองทั้งนี้เนื่องจากทรายที่ใช้สร้างแบบจำลองและหินคลุกเป็นดินเสียชานที่ไม่มีค่าหน่วยแรงยึดเกาะเหมือนกัน ดังนั้น วัสดุทั้งสองจึงน่าจะมีพฤติกรรมการวิบัติที่เหมือนกัน ถึงแม้ว่าจะมีมุมเสียดทานภายในแตกต่างกันก็ตาม) เหล็กเสริมแบกทานที่ใช้ทดสอบประกอบด้วยเหล็กแกนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร มีกำลังคราก 4,500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนเหล็กแบกทานใช้เหล็กจากขนาดมาตรฐาน 30x30 มิลลิเมตร หน้า 4 มิลลิเมตร ทั้งเหล็กแกนและเหล็กแบกทานจะถูกประกอบต่อกันด้วยการเชื่อม

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบแรงจุดสูงสุดจากแบบจำลองและจากการวัด

Bearing reinforcement	Normal Pressure (kPa)				
	50		100	200	
	Observe	Predicted	Observe (reference)	Observe	Predicted
N = 3, S - 15 cm, L - 6 cm, B - 3 cm	26.21	25.18	36.23	54.02	57.24
N = 3, S - 45 cm, L - 6 cm, B - 3 cm	36.99	35.51	51.1	68.76	80.74
N = 3, S - 30 cm, L - 6 cm, B - 3 cm	32.23	28.12	40.46	58.67	63.93
N = 3, S - 60 cm, L - 6 cm, B - 3 cm	35.23	29.75	42.81	65.93	67.64
N = 5, S - 15 cm, L - 12 cm, B - 3 cm	43.82	41.65	59.93	86.75	94.69
N = 5, S - 30 cm, L - 12 cm, B - 3 cm	60.39	56.77	81.69	126.8	129.07

ผลการทำนายแรงจุดสูงสุดดังแสดงในตารางที่ 1
พบว่า มีผลใกล้เคียงมากกับแรงจุดสูงสุดที่วัดได้

บทสรุป

จากผลทดสอบพบว่า แรงแบกทานของเหล็กเสริมกำลังในดินตัวอย่างบดอัดที่ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของพลังงานบดอัดแบบมาตรฐานจะเกิดเต็มที่เมื่อเหล็กเสริมกำลังแบกทานมีการเคลื่อนตัวประมาณร้อยละ 65 ของความสูงของเหล็กแบกทานและระยะห่างระหว่างเหล็กแบกทานต่ำสุดที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 45 เซนติเมตร ในขณะที่ความยาวของเหล็กแบกทานที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 15 เซนติเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความเค้นกดทับในแนวตั้งค่าหนึ่งแรงต้านทานแรงจุดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตรงกับจำนวนของเหล็กแบกทาน และทำนองเดียวกันที่ระยะห่างระหว่างเหล็กแบกทานค่าหนึ่งแรงต้านทานแรงจุดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตรงกับความเค้นกดทับในแนวตั้ง จากความสัมพันธ์ต่างๆ ดังกล่าวแบบจำลองแรงจุดสูงสุดของเหล็กเสริมกำลังแบกทานในดินทรายที่บดอัดด้วยปริมาณน้ำเหมาะสมของพลังงานแบบมาตรฐานที่ระยะการเคลื่อนตัว 25 มิลลิเมตร ได้ถูกสร้างขึ้น ซึ่งแบบจำลองนี้ได้รับการตรวจสอบความถูกต้องจากข้อมูลของการทดสอบหินคลุก และผลการทำนายมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จเรียบร้อยได้ด้วยดีผู้ทำวิจัยขอขอบคุณนักศึกษาที่ทำโครงการนี้ตลอดปีการศึกษา 2551

เอกสารอ้างอิง

- Bergado, D.T., Shivashankar, R., Alfaro, M.C., Chai, J.C., and Balasubramanim, A. (1993), "Interaction Behaviour of Steel Grid Reinforcements in a Alayey Sand", *Geotechnique*, Vol.43, No.4, pp.589-603.
- Vidal, M. H. (1969), "The Principle of Reinforced Earth", *Highway Research Record* 282, pp.1-16.
- Whitaker, T. and Cooke, R.W. (1966). "An Investigation of the Shaft and Base Resistance of Large Bored Piles in London Clay", *Proceedings of Conference on Large Bored Piles*, ICE, London, pp.7-49.
- Yamanouchi, T. (1986), "Historical Review of Geotextiles in Japan", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.4, pp.165-178.