

อิทธิพลของไฟเบอร์และแผ่นตาข่ายเสริมกำลังต่อกำลังอัดและความแข็งแแกร่งของทรายในการ ทดสอบแรงอัดสามแกน

INFLUENCE OF FIBER INCLUSION AND GEOGRID REINFORCEMENT ON THE COMPRESSIVE STRENGTH AND STIFFNESS OF SAND IN TRIAXIAL COMPRESSION

ปัญญพัฒน์ นนท์ ชัยวานิชญา^{1,*} และ วรัช ก้องกิจกุล¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, จังหวัดกรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*Corresponding author address: panjapanon.ch@mail.kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

การเพิ่มกำลังรับน้ำหนักแกดินในปัจจุบันไม่ได้มีแค่การเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังเพียงเท่านั้น ยังมีการเพิ่มกำลังด้วยการผสมวัสดุดินถมด้วยเส้นใยไฟเบอร์อีกด้วย อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยในอดีตพบว่า การศึกษาเกี่ยวกับการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังร่วมกับการผสมวัสดุดินถมด้วยเส้นใยไฟเบอร์ยังคงมีจำนวนน้อยมาก งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาอิทธิพลของการใช้เส้นใยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA) ผสมกับทรายสะอาดร่วมกับการเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังสองทิศทาง (Biaxial geogrid) ประเภทโพลีเอสเตอร์ (Polyester) โดยทำการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำ ตัวอย่างทรายที่ใช้มีรูปทรงปริซึมขนาด 12 ซม. X 12 ซม. X 24 ซม. เตรียมจากทรายสะอาดที่ผสมด้วยเส้นใย PVA ที่ร้อยละ 1.0 โดยมวลของทรายแห้ง และไม่เสริมกำลังหรือเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจำนวน 3 ชั้น นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังได้เสนอวิธีการทดสอบแบบใหม่โดยแรงสุญญากาศบางส่วน (Partial vacuuming) เพื่อทำให้ตัวอย่างทดสอบเข้าสู่ภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ผลการศึกษาพบว่า การเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังร่วมกับการผสมทรายด้วยเส้นใยไฟเบอร์ช่วยเพิ่มค่ากำลังรับแรงอัด มุมเสียดทานและลดการเสียรูปทางด้านข้างของตัวอย่างทราย

คำสำคัญ: ทดสอบแรงอัดสามแกน, ตาข่ายเสริมกำลัง, เส้นใยไฟเบอร์, กำลังรับแรงอัด, ความแข็งแแกร่ง

Abstract

Nowadays, the techniques to increase the soil bearing capacity are not limited to the soil reinforcing but the inclusion of fibre into the backfill material. However, it is found from the past studies that the researches focusing on the improved bearing capacity and stiffness are very limited. To this end, the present study interests in the influence on the inclusion of polyvinyl alcohol (PVA) fibre mixed with the sand backfill, which is reinforced with a biaxial polyester (PET) geogrid type, by performing a series of drained triaxial compression tests. The sand specimens were 12 cm x 12 cm x 24 cm prismatic in the shape. They were prepared from a clean sand mixed with PVA fibre at 1.0% by dry sand mass, and either unreinforced or reinforced with three layers of the PET geogrid. In addition, a new test technique called "double vacuuming" is also proposed for saturating the test specimen. The results showed that the reinforcing with geogrid together with the mixing with fibre increased the compressive strength and friction angle, while reduced the lateral deformation of the sand specimen.

Keywords: Triaxial compression, Geogrid, Fiber, Compressive strength, stiffness

1. บทนำ

ทรายเป็นวัสดุทางเทคนิคชนิดที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างอย่างแพร่หลาย อาทิ คันทางถนน กำแพงกันดิน และงานถมดิน เป็นต้น ทั้งนี้เป็นเพราะว่าทรายมีคุณสมบัติในการรับแรงเฉือนได้ดี มีการทรุดตัวต่ำ และสามารถบดอัดได้ง่ายอย่างไรก็ตามกำลังรับแรงเฉือนของทรายจะแปรผันตามแรงดันโอบรัดที่กระทำต่อมวลทราย ดังนั้นงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาจึงได้ทำการศึกษาวิธีการปรับปรุงคุณภาพของทรายเพื่อเพิ่มค่าความต้านทานแรงเฉือน การเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลัง [1] การผสมด้วยเส้นใยไฟเบอร์ [2,3]

ตาข่ายเสริมกำลังเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการก่อสร้างถนน เพื่อเพิ่มความสามารถการรับน้ำหนักของชั้นผิวทางและเพิ่มเสถียรภาพของโครงสร้างถนน โดยที่การเพิ่มจำนวนชั้นของตาข่ายเสริมกำลังสามารถเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักในช่วงใช้งาน (Serviceability load) ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น [4] จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดสามแกนของตัวอย่างทรายเสริมกำลังแผ่นตาข่ายเสริมกำลังพบว่า การวิบัติของทรายเสริมกำลังมักถูกควบคุมจากการวิบัติในส่วนของทรายโดยไม่เกิดการฉีกขาดที่ตาข่ายเสริมกำลัง [5] นอกจากนี้ ยังมีการทดสอบตัวอย่างทรายเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังโดยศึกษาถึงอิทธิพลของความหนาแน่น

สัมพัทธ์ของทราย แรงดันโอบรัด ชนิดของตาข่ายเสริมกำลัง และเงื่อนไขการเสริมแรงแบบยึดรั้ง (Anchorage) จากการศึกษาพบว่าตาข่ายเสริมกำลังสามารถเพิ่มความต้านแรงเฉือนสูงสุด กำลังการรับแรงอัดและช่วยลดการเสียรูปด้านข้าง อีกทั้งยังช่วยลดการขยายตัวในเชิงปริมาตรของทรายเสริมกำลัง ณ สถานะความหนาแน่นสูง [6]

ในปัจจุบัน ยังมีวัสดุเสริมแรงอีกหนึ่งชนิดที่ถูกนำเสนอใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับใช้ในการปรับปรุงคุณภาพทรายคือ การใช้เส้นใยไฟเบอร์ร่วมกับปูนซีเมนต์ เพื่อเพิ่มกำลังการรับแรงของทราย [7] จากการศึกษาวิจัยในอดีตที่ผ่านมาพบว่า มีการศึกษาอิทธิพลต่าง ๆ สำหรับการใช้เส้นใยไฟเบอร์ร่วมกับปูนซีเมนต์ปรับปรุงดิน ที่ส่งผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของทรายเป็นการศึกษาถึงประเภทเส้นใย (อาทิ เส้นใยโพลีเอสเตอร์ โพลีโพรพิลีน และแก้ว) ความยาว ปริมาณการใช้เส้นใย และโมดูลัสยืดหยุ่นของเส้นใย เป็นต้น [8] จากการศึกษาที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่า การใช้เส้นใยโพลีโพรพิลีนร่วมกับกับปูนซีเมนต์เสริมกำลังให้กับตัวอย่างทรายเป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพเนื่องจากเส้นใยโพลีโพรพิลีนสามารถช่วยเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนคงเหลือ (Residual strength) [9] นอกจากนี้ยังมีการใช้ฟิล์มโพลีเอสเตอร์ในการเสริมกำลังการรับแรงอัดของทรายซึ่งพบว่า การวางตัวในแนวนอนของฟิล์มโพลีเอสเตอร์ในชั้นทรายสามารถเพิ่มกำลังการรับแรงเฉือนของทรายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถึงแม้ว่าฟิล์มโพลีเอสเตอร์จะมีความสามารถในการความต้านแรงดึงที่ต่ำ เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าอนุภาคทรายเข้าไปแทรกในช่องว่างตาข่ายฟิล์มโพลีเอสเตอร์ส่งผลให้เกิดการเพิ่มแรงเสียดทานพื้นผิวระหว่างอนุภาคทรายและฟิล์มโพลีเอสเตอร์ อีกทั้งยังทำให้เกิดการเพิ่มแรงเสียดทานที่การประสานกันระหว่างอนุภาค (Interlocking friction) ในลักษณะเดียวกัน การใช้เส้นใยไฟเบอร์ซึ่งจะกระจายตัวแบบสุ่มในทรายก็สามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงของทรายได้เช่นกัน [10] มากไปกว่านั้น การเสริมกำลังด้วยเส้นใยไฟเบอร์ในทรายสามารถช่วยเพิ่มความต้านทานแรงเฉือนสูงสุด (Peak shear strength) และกำลังต้านทานแรงเฉือนคงเหลือ (Residual strength) ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดทราย ความหนาแน่นของทราย และปริมาณความหนาแน่นของเส้นใยไฟเบอร์ [11] นอกจากนี้ ผลการทดสอบแรงอัดสามแกนของทรายผสมเส้นใยไฟเบอร์ชนิดโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ยังแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของความต้านทานแรงเฉือนสูงสุดและความเครียดตามแนวแกนที่จุดวิบัติ [12]

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยในอดีตที่ผ่านมายังไม่มีการนำเสนอการใช้แผ่นตาข่ายเสริมกำลังร่วมกับเส้นใยโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ในการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของทราย ซึ่งจากงานวิจัยในอดีตได้แสดงถึงประสิทธิภาพของทั้งตาข่ายเสริมกำลังและเส้นใยไฟเบอร์ในการเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของทราย ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะทำการศึกษาดูพฤติกรรมเชิงกลของทรายที่ทำการการปรับปรุง

คุณภาพด้วยแผ่นตาข่ายเสริมกำลังร่วมกับเส้นใยไฟเบอร์ ดังนั้นงานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของทรายเสริมกำลังด้วยแผ่นตาข่ายเสริมกำลังร่วมกับเส้นใยไฟเบอร์ชนิดโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยการทดสอบแรงอัดสามแกน นอกจากนี้ยังมีได้เสนอใช้การทดสอบแบบใหม่โดยแรงสุญญากาศบางส่วน (Partial vacuuming) สำหรับทำให้ตัวอย่างทดสอบเข้าสู่ภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ และทำหน้าที่เป็นแรงดันโอบรัดจากภายในตัวอย่างทดสอบเองแทนการให้แรงดันกระทำต่อตัวอย่างจากภายนอก[13,14,15,16] โดยจะทำการเปรียบเทียบ กำลังรับแรงอัด โมดูลัส และอัตราส่วนปัวซอง

2. วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

2.1. ทราย

งานวิจัยนี้ใช้ทรายละเอียดสำหรับการทดสอบแรงอัดสามแกนในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นทรายจากแม่น้ำนครชัยศรี และก่อนการนำไปใช้งานได้ทำความสะอาดทรายก่อนการทดสอบ โดยการร่อนผ่านตะแกรงโดยจะนำส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 (0.424 มิลลิเมตร) และค้างบนตะแกรงเบอร์ 100 (0.150 มิลลิเมตร) มาใช้งานโดยในระหว่างการร่อนจะใช้น้ำประปาทำความสะอาดทรายพร้อมไปกับน้ำ หลังจากได้ทรายสะอาดตามขนาดที่ต้องการ จะทำการอบให้แห้งเป็นเวลา 2 วัน ทรายสำหรับการทดสอบจะมีลักษณะการกระจายอนุภาคแบบสม่ำเสมอ (Uniform graded) ตารางที่ 1 แสดงสมบัติกายภาพและสมบัติดัชนีของทราย ผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified proctor compaction test) ของทรายที่ใช้ทดสอบแสดงดังรูปที่ 1

2.2. ตาข่ายเสริมกำลัง

ตาข่ายเสริมกำลังที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำจากเส้นใยโพลีเอสเตอร์ ซึ่งมีคุณสมบัติรับแรงดึงได้สูง และมีการยึดตัวที่ต่ำ โดยที่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (T_{ult}) เท่ากับ 40 กิโลนิวตันต่อเมตร และอัตราส่วนปกคลุม (Covering ratio, CR) เท่ากับ 26.25% คุณสมบัติทางกายภาพของตาข่ายเสริมกำลังแสดงดังตารางที่ 2 และรูปที่ 2 แสดงทิศทางการวางแผ่นตาข่ายเสริมกำลังและระยะห่างระหว่างชั้นแผ่นตาข่ายเสริมกำลังซึ่งมีจำนวน 3 ชั้น ที่จัดเรียงในการทดสอบแรงอัดสามแกนในงานวิจัยนี้

2.3. เส้นใยไฟเบอร์เสริมกำลัง

เส้นใยไฟเบอร์ชนิดโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA) ซึ่งเป็นเส้นใยที่มีคุณสมบัติการยึดตัวต่ำ สามารถรับแรงดึงได้สูง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เส้นใยไฟเบอร์ที่ใช้ในการทดสอบมีความยาวเฉลี่ย 12 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย 1,079 เมกะปาสกาล คุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยไฟเบอร์แสดงดังตารางที่ 3 รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างเส้นใยไฟเบอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 1 สมบัติกายภาพและสมบัติดัชนีของทรายสะอาด

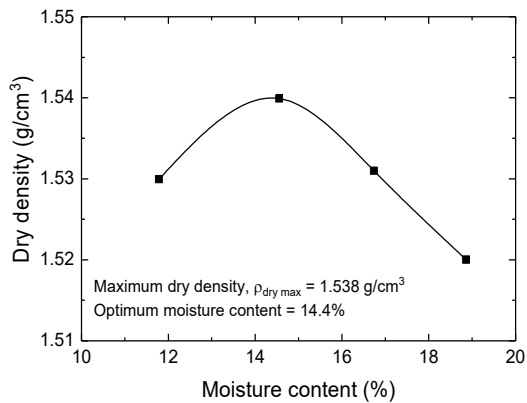
G_s	D50 (mm)	Cu	Cc	e_{max}	e_{min}	Particle shape
2.67	0.252	1.719	0.899	1.045	0.710	Sub-angular

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของตาข่ายเสริมกำลัง

Transverse member		Longitudinal member		Ultimate tensile strengths, (kN/m)
width, (mm)	length, (mm)	width, (mm)	length, (mm)	
3.15	120	3.15	120	40

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของเส้นใยไฟเบอร์เสริมกำลัง

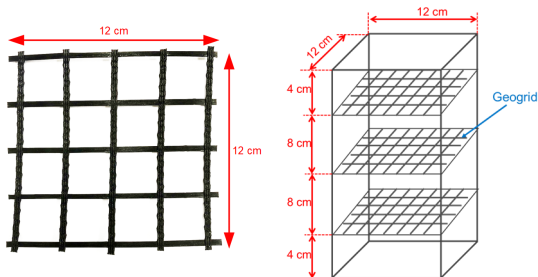
Type	Fiber Diameter dtex (μm)	Length (mm)	Specific gravity	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Elongation %
Dry Bundled	100	18.3	1.3	1079	28	8.7



รูปที่ 3 ลักษณะเส้นใยไฟเบอร์ที่ใช้ผสมกับทราย

รูปที่ 1 เส้นโค้งการบดอัดของทรายที่ใช้ในงานวิจัยนี้จากการบด

อัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน



รูปที่ 2 ลักษณะของตาข่ายเสริมกำลังและการจัดเรียงตาข่ายเสริมกำลังจำนวน 3 ชั้น ในตัวอย่างทรายสำหรับการทดสอบแรงอัดสามแกน

3. วิธีการทดสอบ

3.1. วิธีการเตรียมตัวอย่างทรายอัดด้วยน้ำ

งานวิจัยนี้ใช้การบดอัดด้วยการควบคุมความหนาแน่นและปริมาณน้ำ ทรายจะถูกนำมาผสมคลุกเคล้ากับน้ำที่ปริมาณน้ำเท่ากับ 14.4% ซึ่งเป็นค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ได้จากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน จากนั้นจึงแบ่งบรรจุใส่โมลเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นมีมวลทรายแห้งเท่ากับ 0.426 กิโลกรัม แล้วจึงทำการบดอัดโดยใช้ค้อนส่งแรงแก่กระทุ้งที่มีแผ่นไม้อัดรองรับบริเวณผิวบนของชั้นทรายจนกระทั่งชั้นทรายมีความหนาเท่ากับ 20 มิลลิเมตร แล้วจึงทำซ้ำการบรรจุทรายและบดอัดซ้ำอีกจนกระทั่งเต็มความจุของโมล เมื่อรวมชั้นการบดอัดทั้งหมด 12 ชั้นจะได้ตัวอย่างทรายมีมวลแห้งเท่ากับ 5.12 กิโลกรัม วิธีการเตรียมตัวอย่างทุกรูปแบบการทดสอบควบคุมค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของทราย (Relative density) ประมาณร้อยละ 80 และใช้ความดันโอบรัดรอบตัวอย่าง (Confining pressure) เท่ากับ 30 กิโลปาสกาล คงที่ ตลอดการเดือนตัวอย่าง เครื่องมือวัดและเครื่องมือทดสอบแสดงดังรูปที่ 4 การเดือนตัวอย่างทำโดยการกดลงในแนวแกนด้วยอัตราความเร็วเคลื่อนที่ (Rate displacement control) เท่ากับ 0.125 เปอเซ็นต์ต่ออนาที จนตัวอย่างเกิดการวิบัติ กรณีการทดสอบสำหรับการศึกษาค้างนี้มีทั้งหมด 4 กรณี ได้แก่ (1) ทรายที่ไม่เสริมกำลัง (2) ทรายที่

เสริมกำลังด้วยแผ่นตาข่ายเสริมกำลัง (3) ทราयीที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยไฟเบอร์ที่มีปริมาณร้อยละ 1 ของมวลทราयीแห้ง และ (4) ทราयीที่เสริมกำลังร่วมกันระหว่างตาข่ายเสริมกำลังกับเส้นใยไฟเบอร์ปริมาณร้อยละ 1 ของมวลทราयीแห้ง

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทราयीแบบอิมมิตัวด้วยด้วยน้ำด้วยระบบสุญญากาศสองชั้น (Double vacuum) น้ำที่ใช้สำหรับทำตัวอย่างอิมมิตัวเป็นน้ำที่ปราศจากอากาศ (De-aired water) แสดงดังรูปที่ 5 และแผนผังระบบเครื่องมือสำหรับเตรียมตัวอย่างให้อิมมิตัวด้วยน้ำแสดงดังรูปที่ 6 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างให้เข้าสู่ภาวะอิมมิตัวด้วยน้ำโดยใช้แรงดันและความต่างระดับน้ำเพื่อนำน้ำเข้าตัวอย่างจากฐานสู่วาล์วของฝา โดยกระบอกน้ำ (Cylinder) ที่ใช้มีทั้งหมด 3 กระบอก ได้แก่ กระบอก A ตั้งอยู่สูงกว่าตัวอย่าง 1 เมตร และให้ความดันสุญญากาศเท่ากับ -10 กิโลปาสกาล กระบอก B และกระบอก C วางต่ำกว่าตัวอย่าง 1 เมตรและให้ความดันสุญญากาศเท่ากับ -20 กิโลปาสกาล ดังรูปที่ 5 เฮด (Head) ของน้ำก่อนเข้าตัวอย่างและหลังจากออกจากตัวอย่างจะเท่ากับ 0 เมตร และ -3 เมตร ตามลำดับ ดังนั้นความแตกต่างของเฮดจึงเท่ากับ 3 เมตร ซึ่งจะให้น้ำไหลเข้าตัวอย่าง เพราะว่าตัวอย่างถูกแรงสุญญากาศกระทำตลอดเวลาจึงทำให้อากาศที่อยู่ในตัวอย่างค่อยๆไหลออกมาจากตัวอย่างทั้งสองทางงานวิจัยนี้กำหนดให้ปริมาตรน้ำไหลผ่านตัวอย่างไปยังกระบอก B และ C ต้องมากกว่า 3 เท่าของปริมาตรโพรงของตัวอย่างทราयी เพื่อให้แน่ใจว่าตัวอย่างทราयीเข้าสู่ภาวะอิมมิตัวด้วยน้ำซึ่งใช้เวลาประมาณ 2-3 ชั่วโมง อย่างไรก็ตาม ขั้นตอนการทดสอบด้วยวิธีนี้ไม่สามารถใช้แรงดันย้อนกลับ (Back pressure) เพื่อตรวจสอบระดับการอิมมิตัวด้วยน้ำของตัวอย่างทราयीได้ เนื่องจากการใช้ระบบสุญญากาศ [17] หลังจากตัวอย่างอิมมิตัวด้วยน้ำแล้วจึงนำกระบอก A ลงมาวางให้เสมอกับกระบอก B และ C จากนั้นค่อยๆปรับความดันสุญญากาศให้เท่ากันที่ -20 กิโลปาสกาล หลังจากนั้น รอให้น้ำที่ฐานและฝาบานของตัวอย่างทราयीหยุดไหล หลังจากนั้นเพิ่มแรงดันสุญญากาศบางส่วนให้เท่ากับ -30 กิโลปาสกาล ทำการถอดโมลออกจากตัวอย่าง และติดตั้งเครื่องมือวัดและจึงเริ่มเฉือนตัวอย่าง

3.2. พารามิเตอร์ความเค้นและพารามิเตอร์ความเครียด

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของทราयीเสริมกำลังในรูปแบบของพารามิเตอร์อัตราส่วนความเค้นเฉลี่ย (Stress ratio, R) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$R = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{\sigma_c + q}{\sigma_c} = \frac{\sigma_c + (F/A_0)}{\sigma_c} \quad (1)$$

โดยที่ q คือความเค้นเบี่ยงเบน (Deviator stress), F คือแรงกดที่วัดได้จากเซลล์วัดแรง (kN), A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของตัวอย่าง (0.12×0.12 ตารางเมตร) และ σ_c คือแรงดันโอบรัดรอบตัวอย่างซึ่งมีค่าเท่ากับ 30 kPa (เท่ากับความดันสุญญากาศ)

การเสียรูปในแนวตั้งของตัวอย่างนำเสนอในรูปแบบของค่าพารามิเตอร์ความเครียดในแนวแกน (Axial strain, ϵ_a) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$\epsilon_a = -\frac{\Delta H}{H_0} \times 100\% \quad (2)$$

เมื่อ ΔH คือการเปลี่ยนแปลงความสูงของตัวอย่างซึ่งวัดได้จากเซนเซอร์วัดระยะกระจัด และ H_0 คือความสูงเริ่มต้นของตัวอย่าง (เท่ากับ 240 มิลลิเมตร)

การเสียรูปในแนวราบของตัวอย่างนำเสนอในรูปแบบของค่าพารามิเตอร์ความเครียดในแนวราบเฉลี่ย (Horizontal strain, ϵ_h) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$\epsilon_h = -\frac{(\Delta B_1 + \Delta B_2)}{B_0} \times 100\% \quad (3)$$

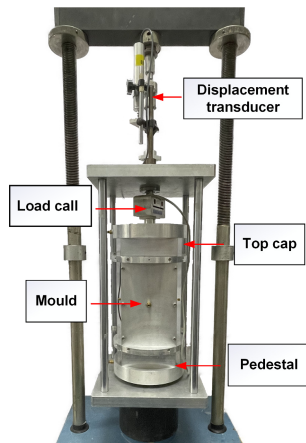
เมื่อ ΔB_1 และ ΔB_2 คือการเปลี่ยนแปลงความกว้างของตัวอย่างทราयीทดสอบทางด้านซ้ายและขวา ซึ่งสามารถวัดได้จากเซนเซอร์เลเซอร์วัดระยะกระจัดทางด้านซ้ายและขวา ตามลำดับ และ B_0 คือความกว้างเริ่มต้นของตัวอย่าง (เท่ากับ 120 มิลลิเมตร)

4. ผลการทดสอบ

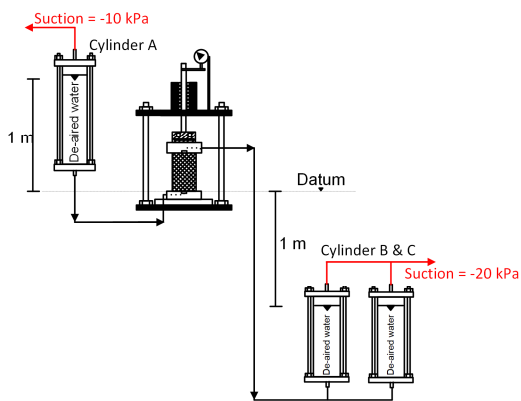
4.1. ค่าโมดูลัสและอัตราส่วนปัวซอง

รูปที่ 6ก และ 6ข เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง R กับ ϵ_a และความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ_h และ ϵ_a ตามลำดับ สำหรับตัวอย่างทดสอบทราयीที่แตกต่างกันทั้งหมด 4 กรณี จากผลการทดสอบแรงอัดสามแกนพบว่า R_{max} ค่ากำลังรับแรงอัดในกรณีของทราयीเสริมกำลังร่วมกันระหว่างแผ่นตาข่ายเสริมกำลังกับเส้นใยไฟเบอร์ (กรณีที่ 4) พบว่าค่า R_{max} มีค่าสูงกว่าของทราयीไม่เสริมกำลังเท่ากับ 2.58 เท่า ดังตารางที่ 4 รองลงมาเป็นกรณีทดสอบตัวอย่างทราयीเสริมกำลังด้วยแผ่นตาข่ายเสริมกำลัง (กรณีที่ 2) และกรณีทดสอบตัวอย่างทราयीเสริมกำลังด้วยเส้นใยไฟเบอร์ (กรณีที่ 3) สำหรับกรณีที่ 1 ตัวอย่างทดสอบทราयीไม่เสริมกำลังให้ค่ากำลังรับแรงอัดน้อยที่สุดดังแสดงในตารางที่ 4 จากผลการทดสอบนี้สามารถสรุปได้ว่าการเสริมกำลังร่วมกันระหว่างแผ่นตาข่ายเสริมกำลังและเส้นใยไฟเบอร์จะให้ค่า R_{max} ที่สูงที่สุด เนื่องจากเมื่อตัวอย่างรับแรงกระทำในแนวตั้ง ตัวอย่างจะขยายตัวออกทางด้านข้างในแนวราบ (Poisson's effect) ส่งผลให้ตาข่ายเสริมกำลังที่เรียงอยู่ในแนวราบยืดออก และทำให้เกิดแรงดึงภายในตาข่ายเสริมกำลังเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลให้เกิดแรงดันโอบรัดตัวอย่างทราयीในขณะที่การมีอยู่ของเส้นใยไฟเบอร์ทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคเม็ดทราयी และช่วยเสริมการทำงานของวัสดุกำลังทั้ง 2 ชนิด ส่งผลให้ตัวอย่างทราयीทดสอบมีค่า R_{max} ที่เพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจน

จากผลการศึกษาค่ากำลังบีบอัดสามแกน เมื่อพิจารณาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_{50}) ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่า E_{50} เพิ่มขึ้นตามวัสดุเสริมกำลังที่เพิ่มเข้าไปภายในตัวอย่างทราयी โดยเฉพาะอย่างยิ่ง



รูปที่ 4 อุปกรณ์ตรวจวัดค่าและเครื่องมือทดสอบ



รูปที่ 5 ระบบสำหรับให้น้ำสุญญากาศ

กับตัวอย่างทรายเสริมกำลังด้วยแผ่นตาข่ายเสริมกำลังร่วมกับเส้นใยไฟเบอร์ซึ่งมีค่า E_{50} มากที่สุด (13.19 เมกะปาสกาล) ผลการศึกษาชี้แสดงถึงความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของการใช้วัสดุเสริมกำลังในทราย

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนปัวซอง (Secant poisson's ratio, v_{sec}) พบว่าการเสริมวัสดุเสริมกำลังเข้าไปในตัวอย่างทรายสามารถช่วยลดการขยายตัวที่สภาวะสูงสุดของตัวอย่าง (ตารางที่ 4) สำหรับกรณีของทรายเสริมกำลังด้วยเส้นใยไฟเบอร์มีค่าการขยายตัวน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ 1 และ 3 จะพบว่าการผสมเส้นใยไฟเบอร์ทำให้ทรายเป็นการขยายตัวด้านข้างได้ ลดเหลือเท่ากับ $(0.72/1.06) \times 100\% = 68\%$ (เมื่อเปรียบเทียบ กรณีที่ 2 กับ 4 การผสมเส้นใยไฟเบอร์ลดการขยายตัวด้านข้างได้ ลดเหลือเท่ากับ $(0.89/0.97) \times 100\% = 92\%$ ดังนั้นการผสมเส้นใยไฟเบอร์สามารถลดการขยายตัวด้านข้างได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่ประสิทธิภาพจะลดลงในกรณีที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังเพราะว่าแรงดึงในตาข่ายสามารถเพิ่มขึ้นได้เรื่อย ๆ เมื่อเกิดการขยายตัวด้านข้างตรงเท่าที่ยังไม่เกิดการวิบัติ

4.2. กลไกการเพิ่มกำลังอัดและการเสริมกำลัง

จากค่า R_{max} ในแต่ละกรณีในตารางที่ 4 หากเราสมมติว่าทรายที่ทดสอบมีค่าแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion, c') เท่ากับศูนย์ และค่ามุมเสียดทานมีค่าคงที่กับแรงเราจะสามารถวิเคราะห์ ผลการทดสอบได้ ดังนี้ ตารางที่ 5 สมการที่ 4 และรูปที่ 8

$$\sigma_3 = \left(\frac{1 - \sin\phi}{1 + \sin\phi} \right) \times \sigma_1 - 2c' \sqrt{\left(\frac{1 - \sin\phi}{1 + \sin\phi} \right)} \quad (4)$$

กรณีที่ 1 R_{max} กรณีทรายที่ไม่เสริมกำลังเท่ากับ 225.9 กิโลปาสกาล เมื่อ $c' = 0$ จะได้ว่าค่ามุมเสียดทานของทรายทดสอบเท่ากับ $\sin^{-1} \left(\frac{7.53-1}{7.53+1} \right) = 50^\circ$

กรณีที่ 2 เมื่อเสริมกำลังในทรายด้วยตาข่ายเสริมกำลังมุมเสียดทานของทรายจะเท่าเดิม แต่ค่า σ_3 ที่กระทำต่อทรายจะเพิ่มขึ้นจากค่า $R_{max} = 10.16$ ดังนั้นค่า $\sigma_{1,f} = 10.16 \times 30 = 304.85$ กิโลปาสกาล ดังนั้นค่า $\sigma_{3,f}$ จะเพิ่มขึ้นเป็น $304.85 \times \left(\frac{1 - \sin 50^\circ}{1 + \sin 50^\circ} \right) = 40.46$ กิโลปาสกาล

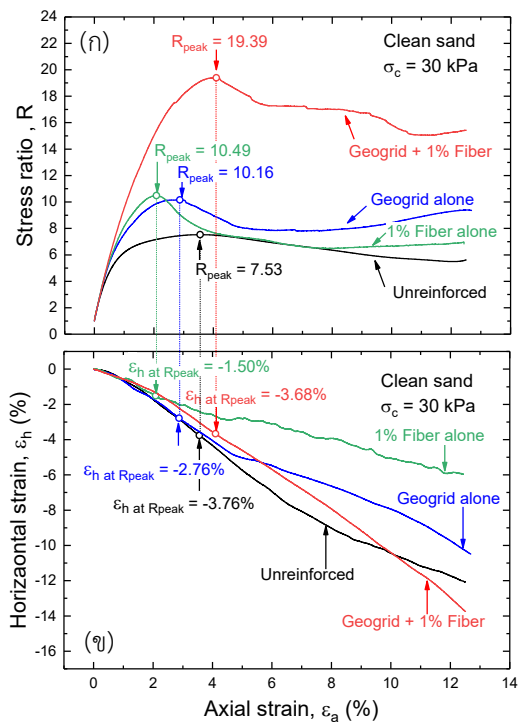
กรณีที่ 3 เมื่อผสมเส้นใยไฟเบอร์ในทรายมุมเสียดทานของทรายผสมไฟเบอร์จะเพิ่มขึ้นแต่ σ_3 ที่กระทำต่อทรายผสมเท่าเดิม ดังนั้นเมื่อตัวอย่างวิบัติด้วย $R_{max} = 10.49$ จะสามารถคำนวณมุมเสียดทานใหม่เท่ากับ $\sin^{-1} \left(\frac{10.49-1}{10.49+1} \right) = 55.7^\circ$

กรณีที่ 4 เมื่อเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังในทรายที่ผสมเส้นใยไฟเบอร์ตัวอย่างวิบัติที่ $R_{max} = 19.39$ ดังนั้นค่า $\sigma_{1,f} = 19.39 \times 30 = 581.81$ กิโลปาสกาล $\sigma_{3,f}$ จะเพิ่มขึ้นเป็น $581.81 \times \left(\frac{1 - \sin 55.7^\circ}{1 + \sin 55.7^\circ} \right) = 55.49$ กิโลปาสกาล จากที่กล่าวมาข้างต้น เราจะเห็นได้ว่า

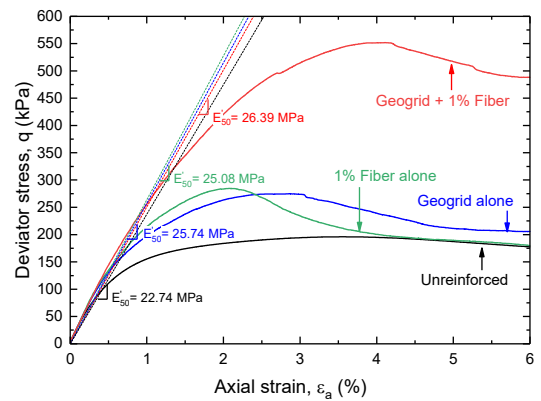
1. การเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังจะทำให้ σ_3 ที่จุดวิบัติเพิ่มขึ้น (30 → 40.46 กิโลปาสกาล) ดังนั้นกำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้น
2. การผสมเส้นใยไฟเบอร์ทำให้มุมเสียดทานเพิ่มขึ้น ($50^\circ \rightarrow 55.7^\circ$) ซึ่งจะทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเช่นกัน
3. การเสริมด้วยตาข่ายเสริมกำลังในทรายผสมเส้นใยไฟเบอร์จะเป็นรวมผลของ 1 และ 2 เข้าด้วยกันคือ มุมเสียดทานเพิ่มขึ้น ($50^\circ \rightarrow 55.7^\circ$) และ σ_3 นี้จุดวิบัติได้เพิ่มขึ้นไปมากกว่ากรณีเสริมด้วยตาข่ายเสริมกำลังเพียงอย่างเดียว (30 → 40.46 → 55.49 กิโลปาสกาล) ซึ่งจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างยิ่งยวด การเสริมเส้นใยไฟเบอร์เข้าไปภายในตัวอย่างสามารถเพิ่มมุมเสียดทานของทรายจากเส้นใยไฟเบอร์ได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า Babu et al. [18] และนอกจากนี้ทรายเสริมกำลังร่วมกันระหว่างแผ่นตาข่ายเสริมกำลังและเส้นใยไฟเบอร์ การเพิ่มขึ้นของแรงดันโอบรัดรอบตัวอย่างเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นอิทธิพลมาจากแรงดึงของตาข่ายเสริมกำลัง

ตารางที่ 4 ค่า R_{max} , Strength Ratio (SR), v_{sec} และความเครียดที่จุดวิบัติของตัวอย่างทรายกรณีต่าง ๆ

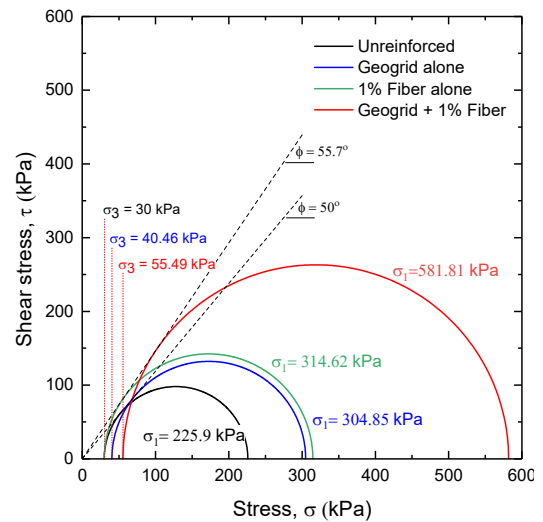
No	Test name	R_{max}	SR	Vertical strain at	Horizontal strain	Secant poisson's ratio, v_{sec}	Stress at failure	
				R_{max} , ϵ_a at R_{max} (%)	at R_{max} , ϵ_h at R_{max} (%)		$\sigma_{3,f}$ (kPa)	$\sigma_{1,f}$ (kPa)
1	Unreinforced	7.53	1.00	3.55	-3.76	1.06	30	225.9
2	Geogrid alone	10.16	1.35	2.86	-2.76	0.97	40.46	304.85
3	1% Fiber	10.49	1.39	2.08	-1.50	0.72	30	314.62
4	Geogrid + 1% Fiber	19.39	2.58	4.12	-3.68	0.89	55.49	581.81



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างทรายไม่เสริมกำลังและที่เสริมกำลังแบบต่าง ๆ (ก) ความสัมพันธ์ระหว่าง R กับ ϵ_a และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง ϵ_h และ ϵ_a



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q และ ϵ_a



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง τ กับ σ

5. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมของวัสดุเสริมกำลังด้วยการทดสอบแรงอัดสามแกนภายใต้เงื่อนไขการระบายน้ำด้วยวัฏกรรมใหม่โดยใช้ระบบสุญญากาศในการทำให้ตัวอย่างทดสอบอิ่มตัวด้วยน้ำ ตัวอย่างทดสอบประกอบด้วยทรายที่ไม่เสริมกำลัง ทรายที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยไฟเบอร์ ทรายที่เสริมกำลังด้วยแผ่นตาข่ายเสริมกำลัง และ ทรายที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยไฟเบอร์ร่วมกับแผ่นตาข่ายเสริมกำลัง สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. กำลังรับแรงอัดของทรายเพิ่มขึ้นเมื่อเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลัง เพราะว่าแรงดันโอบรัดที่กระทำต่อทรายมากขึ้น
2. กำลังรับแรงอัดของทรายเมื่อผสมกับเส้นใยไฟเบอร์จะมากขึ้น เพราะเมื่อสมมติให้ความเชื่อมแน่นของทรายผสมเส้นใยไฟเบอร์มีค่าเท่ากับศูนย์และเส้นใยไฟเบอร์ไม่ได้ส่งผลให้แรงดันโอบรัดภายในเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดของทรายเมื่อผสมกับเส้นใยไฟเบอร์จะมากขึ้น เนื่องจากมุมเสียดทานของทรายเพิ่มขึ้นจากการผสมเส้นใยไฟเบอร์
3. กำลังรับแรงอัดของทรายเสริมกำลังระหว่างตาข่ายเสริมกำลังร่วมกับเส้นใยไฟเบอร์จะเพิ่มขึ้นอย่างยี่งวดเพราะได้รับอิทธิพลจากแรงดันโอบรัดที่มากขึ้นจากแรงดึงในตาข่ายเสริมกำลังและมุมเสียดทานของทรายผสมเส้นใยไฟเบอร์ที่มากขึ้นด้วย
4. ค่าสตีเฟนสและการเสียรูปด้านข้างของทรายที่เสริมกำลังหรือผสมด้วยเส้นใยไฟเบอร์จะมีคุณสมบัติดีขึ้น ตามกำลังรับแรงอัดที่มากขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการทำงานระหว่างตาข่ายเสริมกำลังและเส้นใยไฟเบอร์ซึ่งกันและกัน

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ บริษัท เทนคาต้า จีโอซินเทติกส์ (ประเทศไทย) จำกัด ผู้ให้การสนับสนุนตาข่ายเสริมกำลัง บริษัท คุราเร่ (ประเทศไทย) จำกัด และบริษัท คุราเร่ (ประเทศญี่ปุ่น) จำกัด ผู้ให้การสนับสนุนเส้นใยไฟเบอร์สำหรับใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้

7. อ้างอิง

- [1] Haeri S.M., Noorzad R., Oskoorouchi A.M. (2000). Effect of geotextile reinforcement on the mechanical behavior of sand. *Geotextile and Geomembranes* 18(6), 385-402. DOI: 10.1016/S0266-1144(00)00005-4
- [2] Consoli N.C., Montardo J.P., Donato M., and Prietto P. (2004). Effect of material properties on the behaviour of sand cement fibre composites. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement* 8(2), 77-90. DOI: 10.1680/grim.8.2.77.36370

- [3] Ibraim E., Fourmont S. (2007). Behaviour of sand reinforced with fibres. soil stress-strain behaviour. *Solid Mechanics and its Applications* 146, 807-818. DOI: 10.1007/978-1-4020-6146-2_60
- [4] Sommers A.N., Viswanadham B.V.S. (2009). Centrifuge model tests on the behavior of strip footing on geotextile-reinforced slopes. *Geotextile and Geomembranes* 27(6), 497-505.
- [5] สุดใจ ส., ก้องกิงกุล ว. (2018). ผลกระทบของอัตราส่วนปกคลุมและระยะระหว่างชั้นของตาข่ายเสริมกำลังแบบสองทิศทางที่มีต่อกำลังอัดของทรายเสริมกำลัง. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่* 27, 1 (ม.ค.-เม.ย. 2562), 198-211
- [6] Liu C.N., Yang K.H., Nguyen M.D. (2014). Behavior of geogrid reinforced sand and effect of reinforcement anchorage in large-scale plane strain compression. *Geotextile and Geomembranes* 42(5), 479-493
- [7] Consoli N., Prietto P. D. M., Ulbrich L. A. (1998). Influence of fiber and cement addition on behavior of a sandy soil. *J. Geotech. Geoenviron. Eng* 124(12), 1211-1214.
- [8] Consoli N.C., Montardo J.P., Donato M., Prietto D.M. (2004). Effect of material properties on the behaviour of sand-cement-fiber composites. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement* 8(2), 77-90
- [9] Erken A., Ardabili H.F., Tarhan Ö.A., Cantekinler P.G. (2017). Tensile Strength of cement-fiber treated sands. *6th European Geosynthetics Congress*. September 25-28, Lubiana, Slovenia.
- [10] Latha G.M., Murthy V.S. (2007). Effects of reinforcement form on the behaviour of geosynthetic reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes* 25, 23-32. DOI: 10.1016/j.geotextmem.2006.09.002
- [11] Anagnostopoulos C. A., Papalianga T.T., Konstantinidis D., Patronis C. (2013). Shear strength of sands reinforced with polypropylene fibers. *Geotechnical and Geological Engineering* 31, 401-423. DOI: 10.1007/s10706-012-9593-3
- [12] Choobbasti A.J., Kutanaei S.S., Moein G. (2019). Shear behavior of fiber-reinforced sand composite.

- Arabian Journal of Geosciences* 12. 157,
DOI: org/10.1007/s12517-019-4326-z
- [13] Kongkitkul W., Tatsuoka F., Hirakawa D. (2007). Effects of reinforcement type and loading history on the deformation of reinforced sand in plane strain compression. *Soils and Foundations*, Vol.47, No.2, 395-414.
- [14] Kongkitkul W., Tatsuoka F., Hirakawa D. (2007). Rate-dependent load-strain behaviour of geogrid arranged in sand under plane strain compression. *Soils and Foundations*, Vol.47, No.3, 473-491.
- [15] Kongkitkul W., Hirakawa D., Tatsuoka F., Kanemaru T. (2007). Effects of geosynthetic reinforcement type on the strength and stiffness of reinforced sand in plane strain compression. *Soils and Foundations*, Vol.47, No.6, December 2007, 1109-1122.
- [16] Kongkitkul W., Hirakawa D., Tatsuoka F. (2008). Residual deformation of geosynthetic-reinforced sand in plane strain compression affected by viscous properties of geosynthetic reinforcement. *Soils and Foundations*, Vol.48, No.3, June 2008, 333-352.
- [17] AQIL U. (2004). *Strength and Deformation characteristics of recycled concrete aggregate as backfill material*. Department of Civil Engineering of the University of Tokyo in partial fulfillment of the requirements for the Master of Engineering degree, Japan
- [18] Babu G.L.S., Vasudevan A.M.K.N., Haldar S. (2008). Numerical simulation of fiber-reinforced sand behavior. *Geotextile and Geomembranes* 26(2), 181-188. DOI: 10.1016/j.geotextmem.2007.06.004