



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง สมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตพรุนในการป้องกันการกัดเซาะสำหรับงานวิศวกรรมปฐพี

Engineering Properties of Porous Concrete for Soil Erosion Protection
in Geotechnical Engineering

นามผู้วิจัย นายยุทธนา บุญสินชัย

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ศุภกิจ นนทนานันท์, D.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภินิติ โชติสังกัส, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ยอดสุคใจ, D.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

สมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตพรุนในการป้องกันการกัดเซาะ

สำหรับงานวิศวกรรมปฐพี

Engineering Properties of Porous Concrete

for Soil Erosion Protection in Geotechnical Engineering

โดย

นายยุทธนา บุญสินชัย

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2556

ยุทธนา บุญสินชัย 2556: สมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตพูนในการป้องกันการกัด
เซาะสำหรับงานวิศวกรรมปฐพี ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
รองศาสตราจารย์ศุภกิจ นนทนันทน์, D.Eng. 118 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางด้านกำลังรับแรงคัดและพฤติกรรมการ
วิบัติของคอนกรีตพูนในห้องปฏิบัติการ โดยการประยุกต์ใช้วัสดุใยสังเคราะห์ประเภท Fiber
glass และ Geogrid เพื่อเสริมแรงให้กับคอนกรีตพูน รวมถึงการประยุกต์ใช้งานร่วมกับ
Geotextile เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการกรอง

ผลการวิจัยพบว่าคอนกรีตพูนมีค่ากำลังรับแรงคัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามอายุการบ่ม ขนาด
ของมวลรวมมีผลช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงคัดของคอนกรีตพูนให้ดีขึ้น โดยที่การ
เสริมวัสดุใยสังเคราะห์ประเภท Fiberglass และ Geogrid พบว่ามีคุณสมบัติช่วยปรับปรุง
พฤติกรรมด้าน Ductility ของคอนกรีตพูนให้ดียิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตพูนปกติที่ไม่
มีการเสริมวัสดุใยสังเคราะห์ ผลการวิจัยยังพบอีกว่าคอนกรีตพูนสามารถเป็นวัสดุที่ทำหน้าที่
กรองและระบายน้ำในมวลดินที่ปกคลุมได้ การประยุกต์ใช้ Geotextile และ ไม่ใช้ Geotextile
พบว่ามีค่าอัตราการไหลที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามคอนกรีตพูนที่มี Geotextile เป็นวัสดุกรองมี
ค่าความชุ่มและการสูญเสียอนุภาคเม็ดดินมากกว่าคอนกรีตพูนที่ไม่มี Geotextile และมวลรวมที่
มีขนาดใหญ่มีแนวโน้มเปอร์เซ็นต์การสูญเสียมากกว่ามวลรวมขนาดเล็ก จากผลการวิจัยข้างต้นสรุป
ได้ว่าคอนกรีตพูนมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้ในการป้องกันการกัดเซาะสำหรับงานวิศวกรรม
ปฐพี

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Yuttana Boonsinchai 2013: Engineering Properties of Porous Concrete for Soil Erosion Protection in Geotechnical Engineering. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Supakij Nontananandh, D.Eng. 118 pages.

This research aims to study the flexural strength and failure behavior of porous concrete in the laboratory with geosynthetics reinforcement using fiberglass and geogrid. Also the study includes using geotextile with porous concrete to increase its efficiency of filtration

The results indicate that the flexural strength of porous concrete tends to increase with curing time. Aggregate size improves the flexural strength of porous concrete. In addition, it is also found that the geosynthetics markedly improve the ductility behavior of porous concretes when compared with the porous concretes with no reinforcement. In addition, it was found that the porous concrete can be used as a filter and drainage in the soil cover. Yet, the difference of using with geotextile and without geotextile are relatively small. However, the porous concrete reinforced with geotextile allowed less turbid discharge and percent particle loss than without geotextile. The larger aggregate size tends to increase percent particle loss when compared with the smaller aggregate size. Based on these findings, the porous concrete provides a good opportunity for soil erosion protection in geotechnical engineering

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิจ นนทนานันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้ความอนุเคราะห์อย่างมากในการให้คำปรึกษาสำหรับงานวิจัยและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ โดยให้ความเมตตาในการอบรมสั่งสอน การเรียน การทำงานวิจัย รวมไปถึงชี้แนะแนวทางการดำเนินชีวิตในสังคม อันเป็นประโยชน์อย่างสูงต่อผู้วิจัย พร้อมกันนี้ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภินิติ โชติสังกาศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความเมตตาให้คำปรึกษาแนะนำในด้านการเรียนและงานวิจัย และ ดร.ถนัดกิจ ชารีรัตน์ ที่เมตตาให้ความรู้เรื่องคอนกรีตพูนและคำแนะนำที่ดีเสมอมา จนประสบผลสำเร็จด้วยดี

ขอบคุณเพื่อน ๆ และรุ่นพี่-รุ่นน้อง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องการทดลองและให้กำลังใจด้วยดีมาโดยตลอด รวมถึงเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมปฐพี ห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือในเรื่องอุปกรณ์การทดลองและให้คำปรึกษาจนทำให้งานวิจัยผ่านลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อเกษม-คุณแม่วาสนา บุญสินชัย พร้อมทั้งญาติพี่น้องทุกคนที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

ประโยชน์อันเนื่องมาจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่ คุณพ่อ คุณแม่ และคณาจารย์ทุกท่านที่ได้เมตตาอบรมสั่งสอนวิชาให้มีความรู้ มีคุณธรรม และจริยธรรม มาจนถึงปัจจุบัน

ยุทธนา บุญสินชัย

มีนาคม 2556

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	26
อุปกรณ์	26
วิธีการ	28
ผลและวิจารณ์	52
สรุปและข้อเสนอแนะ	84
สรุป	84
ข้อเสนอแนะ	85
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	86
ภาคผนวก	90
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูน	91
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบการซึมผ่านน้ำและการกรองของคอนกรีตพูน	96
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	118

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ข้อมูลอัตราส่วน (Paste/Aggregate volume ratio) และ (W/C) ของคอนกรีตพูน	28
2 ผลการทดสอบคุณสมบัติการซึมผ่านน้ำเบื้องต้นของวัสดุทดสอบ	39
3 เกณฑ์ข้อกำหนดสำหรับออกแบบการกรอง (Existing Geotextile Retention Criteria)	41
4 ผลการทดสอบการวัดค่าความขุ่น (Turbidity Test)	79
ตารางผนวกที่	
ก1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงค้ำของมวลรวมขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 4	92
ก2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงค้ำของมวลรวมขนาด 3/8 นิ้ว	92
ก3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงค้ำของมวลรวมสองชั้น	93
ข1 ผลการวัดค่าอัตราการไหลของมวลรวม #4 Without Geotextile	97
ข2 ผลการวัดค่าอัตราการไหลของมวลรวม #4 With Geotextile	100
ข3 ผลการวัดค่าอัตราการไหลของมวลรวม 3/8 นิ้ว Without Geotextile	103
ข4 ผลการวัดค่าอัตราการไหลของมวลรวม 3/8 นิ้ว With Geotextile	106
ข5 ผลการวัดค่าอัตราการไหลของมวลรวมสองชั้น Without Geotextile	109
ข6 ผลการวัดค่าอัตราการไหลของมวลรวมสองชั้น With Geotextile	112
ข7 ผลการทดสอบ % Particle Loss ที่ Elapsed Time 7 วัน	115
ข8 ผลการทดสอบ % Particle Loss ที่ Elapsed Time 28 วัน	116
ข9 ผลการทดสอบ % Particle Loss ที่ Elapsed Time 56 วัน	116

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ขั้นตอนการวัดค่าอัตราส่วนโพรง	6
2	ตัวแปรต่างๆสำหรับการวัดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ	7
3	วิธีในการทำคอนกรีตพรุนให้แน่น	8
4	คอนกรีตพรุนสำหรับปูทางเดินหน้าบ้าน	9
5	คอนกรีตพรุนสำหรับพื้นที่ลาดชัน	9
6	คอนกรีตพรุนสำหรับกรองน้ำเสียและสิ่งปฏิกูล	10
7	คอนกรีตพรุนสำหรับดูดซับเสียงบนทางหลวง	11
8	คอนกรีตพรุนสำหรับดูดซับความชื้น	11
9	การเจริญเติบโตของพืชบนคอนกรีตพรุน	12
10	ลักษณะ Woven Geotextile	14
11	ลักษณะ Nonwoven Geotextile	15
12	ลักษณะการประยุกต์ใช้งานวัสดุใยสังเคราะห์ด้านการแยกชั้นวัสดุ (Separation)	15
13	ลักษณะการประยุกต์ใช้งานวัสดุใยสังเคราะห์ด้านการกรองและการระบายน้ำ (Filtration and Drainage)	16
14	ลักษณะ Uniaxial Geogrid	17
15	ลักษณะ Biaxial Geogrid	18
16	ลักษณะการประยุกต์ใช้วัสดุใยสังเคราะห์ด้านการเสริมแรง (Reinforcement)	18
17	ลักษณะ Geonet	19
18	ลักษณะ Geomembrane	20
19	ลักษณะ Geosynthetic clay liner	20
20	ลักษณะ Geopipe	21
21	ลักษณะ Fiberglass	22
22	รูปแบบการทดสอบวิธีใช้แรงกดหนึ่งจุดที่จุดกึ่งกลาง	23
23	รูปแบบการทดสอบวิธีใช้แรงกดสองจุด	23
24	สภาพรับน้ำหนักบรรทุกทุกจากยานพาหนะของแผ่นพื้น	24
25	หน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิตอนกลางวัน	24

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	หน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิตอนกลางคืน	25
27	ลำดับขั้นตอนการทำวิจัย	29
28	มวลรวมหยาบขนาด 3/8 นิ้วที่ผ่านการคัดขนาดแล้ว	30
29	มวลรวมหยาบขนาดค้ำตะแกรง # 4 (4.75 มิลลิเมตร) ที่คัดขนาดแล้ว	30
30	การแช่มวลรวมหยาบในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้มวลรวมอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ	31
31	มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry, SSD) และการใช้ผ้าชุบน้ำคลุมเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำออกจากมวลรวม	31
32	การเตรียมปูนซีเมนต์ สารผสมเพิ่มและน้ำเพื่อทำการผสมซีเมนต์เพสต์	32
33	การผสมซีเมนต์เพสต์และลักษณะซีเมนต์เพสต์หลังจากการผสม	33
34	การเติมซีเมนต์เพสต์ผสมกับมวลรวมหยาบเพื่อผลิตคอนกรีตพูน	33
35	การผลิตคอนกรีตพูนในเครื่องผสม	34
36	คอนกรีตพูนที่ได้จากมวลรวมหยาบขนาดค้ำตะแกรง # 4 (4.75 มิลลิเมตร)	34
37	คอนกรีตพูนที่ได้จากมวลรวมหยาบขนาด 3/8 นิ้ว	35
38	กราฟการกระจายตัวของเม็ดดินของทรายที่เป็นวัสดุทดสอบ	36
39	กราฟการบดอัด (Compaction curve) ของทรายที่เป็นวัสดุทดสอบ	37
40	ลักษณะของทรายที่เป็นวัสดุทดสอบ	37
41	Diagram อุปกรณ์ทดสอบความซึมผ่านของน้ำ (Permeability Testing)	39
42	วัสดุใยสังเคราะห์ชนิด Geotextile ที่ใช้ในการทดสอบการกรอง	40
43	แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาดกว้าง 15 ซม. x ยาว 50 ซม. x หนา 7.5 ซม.	43
44	วัสดุใยสังเคราะห์ชนิด Geogrid ที่ใช้ในการทดสอบโดยการตัดให้ได้ขนาดกว้าง 12 ซม.และยาว 92.5 ซม.	43
45	วัสดุใยสังเคราะห์ชนิด Fiberglass ที่ใช้ในการทดสอบโดยการตัดให้ได้ขนาดกว้าง 12 ซม.และยาว 92.5 ซม.	43
46	ลักษณะคอนกรีตพูนมวลรวมขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 4	44
47	ลักษณะคอนกรีตพูนมวลรวมขนาด 3/8 นิ้ว	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
48	ลักษณะคอนกรีตพูนมวลรวมสองชั้น	44
49	การบ่มคอนกรีตพูนตามอายุก่อนการทดสอบกำลังรับแรงดัด	45
50	อุปกรณ์ทดสอบกำลังรับแรงดัดแบบกดสองจุด (Third-Point Loading Testing)	45
51	การทดสอบการซึมผ่านของน้ำแบบ Constant Head	46
52	การหล่อตัวอย่างคอนกรีตพูนสำหรับการทดสอบ	47
53	การประกอบ Geotextile เข้ากับแบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตพูน	48
54	การบดอัดทรายลงในแบบหล่อคอนกรีตพูนที่ความหนาแน่น 1.54 ตัน/เมตร ³	48
55	การปิดด้านบนด้วยเม็ดยกและครอบอีกทีด้วยตาข่ายเพื่อป้องกันการกัดเซาะจากน้ำ	49
56	ตัวอย่างทดสอบหลังจากปิดฝาด้านบนและทากาวปิดให้สนิท	49
57	การทดสอบการกรองและการซึมผ่านของน้ำที่ระยะเวลาต่างๆ	50
58	อุปกรณ์การทดสอบค่าความขุ่น (Turbidity meter)	51
59	กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนที่ไม่เสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงตามอายุการบ่ม	53
60	พฤติกรรมการวิบัติของคอนกรีตพูนที่ไม่เสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรง	53
61	กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนที่เสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงชนิด Fiberglass ตามอายุการบ่ม	54
62	พฤติกรรมการวิบัติของคอนกรีตพูนที่เสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงชนิด Fiberglass	55
63	กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนที่เสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงชนิด Geogrid ตามอายุการบ่ม	56
64	พฤติกรรมการวิบัติของคอนกรีตพูนที่เสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงชนิด Geogrid	56
65	กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนแต่ละขนาดมวลรวมที่อายุการบ่ม 7 วัน	57
66	กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนแต่ละขนาดมวลรวมที่อายุการบ่ม 14 วัน	58
67	กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนแต่ละขนาดมวลรวมที่อายุการบ่ม 28 วัน	59
68	กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนแต่ละขนาดมวลรวมที่อายุการบ่ม 90 วัน	60
69	อัตราการไหลของมวลรวมขนาด #4 ในช่วงเวลา 0.5 ถึง 24 ชั่วโมง	62
70	อัตราการไหลของมวลรวมขนาด #4 ในช่วงเวลา 1 ถึง 56 วัน	63
71	อัตราการไหลของมวลรวมขนาด 3/8 นิ้ว ในช่วงเวลา 0.5 ถึง 24 ชั่วโมง	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
72	อัตราการไหลของมวลรวมขนาด 3/8 นิ้ว ในช่วงเวลา 1 ถึง 56 วัน	64
73	อัตราการไหลของมวลรวมสองชั้นในช่วงเวลา 0.5 ถึง 24 ชั่วโมง	65
74	อัตราการไหลของมวลรวมสองชั้นในช่วงเวลา 1 ถึง 56 วัน	66
75	อัตราการไหลของแต่ละมวลรวมที่ไม่ประยุกต์ใช้ Geotextile ในช่วง 0.5 ถึง 24 ชั่วโมง	67
76	อัตราการไหลของแต่ละมวลรวมที่ไม่ประยุกต์ใช้ Geotextile ในช่วง 1 ถึง 56 วัน	67
77	อัตราการไหลของแต่ละมวลรวมที่ประยุกต์ใช้ Geotextile ในช่วง 0.5 ถึง 24 ชั่วโมง	68
78	อัตราการไหลของแต่ละมวลรวมที่ประยุกต์ใช้ Geotextile ในช่วง 1 ถึง 56 วัน	69
79	เปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินของแต่ละมวลรวมในช่วงเวลา 7 วัน	71
80	เปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินของแต่ละมวลรวมในช่วงเวลา 28 วัน	72
81	เปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินของแต่ละมวลรวมในช่วงเวลา 56 วัน	73
82	เปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินที่ไม่ประยุกต์ใช้ Geotextile ที่เวลา 7 28 และ 56 วัน	75
83	เปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินที่ประยุกต์ใช้ Geotextile ที่เวลา 7 28 และ 56 วัน	76
84	ความชุ่มและอนุภาคของเม็ดดินที่ไหลผ่านคอนกรีตพอร์นในช่วง 1 นาทีแรก ของมวลรวมขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 4 โดยที่ภาพด้านซ้าย (a) ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง และภาพด้านขวา (b) มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง	76
85	ความชุ่มและอนุภาคของเม็ดดินที่ไหลผ่านคอนกรีตพอร์นในช่วง 1 นาทีแรก ของมวลรวมขนาด 3/8 นิ้ว โดยที่ภาพด้านซ้าย (a) ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง และภาพด้านขวา (b) มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง	77
86	ความชุ่มและอนุภาคของเม็ดดินที่ไหลผ่านคอนกรีตพอร์นในช่วง 1 นาทีแรก ของมวลรวมสองชั้น โดยที่ภาพด้านซ้าย (a) ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง และภาพด้านขวา (b) มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง	77
87	ความชุ่มและตะกอนที่ไหลผ่านคอนกรีตพอร์น โดยที่ภาพด้านซ้าย (a) แสดงลักษณะของน้ำที่ไหลผ่านคอนกรีตพอร์นในช่วงหลังจาก 1 นาทีแรก และภาพด้านขวา (b) ลักษณะน้ำที่ไหลผ่านคอนกรีตพอร์นในช่วง 1 นาทีแรกที่ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง(c) ลักษณะน้ำที่ไหลผ่านคอนกรีตพอร์นหลังจาก 1 นาที (d) ลักษณะน้ำที่ไหลผ่านคอนกรีตพอร์นในช่วง 1 นาทีแรกที่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง	78

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
88	เปอร์เซ็นต์ที่อนุภาคเม็ดดินค้างภายในรูคอนกรีตพูน โดยที่ไม่มีการประยุกต์ใช้ Geotextile	81
89	เปอร์เซ็นต์ที่อนุภาคเม็ดดินค้างภายในรูคอนกรีตพูน โดยที่มีการประยุกต์ใช้ Geotextile	81
90	อนุภาคของเม็ดดินที่อุดตันอยู่ภายในรูโพรงคอนกรีตพูนของมวลรวมขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 4 โดยที่ภาพด้านซ้าย (a) แสดงมวลรวมที่ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง และภาพด้านขวา b แสดงมวลรวมที่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง	82
91	อนุภาคของเม็ดดินที่อุดตันอยู่ภายในรูโพรงคอนกรีตพูนของมวลรวมขนาด 3/8 นิ้ว โดยที่ภาพด้านซ้าย (a) แสดงมวลรวมที่ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง และภาพด้านขวา (b) แสดงมวลรวมที่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง	82
92	อนุภาคของเม็ดดินที่อุดตันอยู่ภายในรูโพรงคอนกรีตพูนของมวลรวมสองชั้น โดยที่ภาพด้านซ้าย (a) แสดงมวลรวมที่ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง และภาพด้านขวา (b) แสดงมวลรวมที่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง	83
ภาพผนวกที่		
ก1	Diagram แผ่นคอนกรีตพูนที่ไม่เสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรง	94
ก2	Diagram แผ่นคอนกรีตพูนที่เสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรง	94
ก3	Diagram แผ่นคอนกรีตพูนสองชั้นที่ไม่เสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรง	95
ก4	Diagram แผ่นคอนกรีตพูนสองชั้นที่เสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรง	95

สมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตพรุนในการป้องกันการกัดเซาะ สำหรับงานวิศวกรรมปฐพี

Engineering Properties of Porous Concrete for Soil Erosion Protection in Geotechnical Engineering

คำนำ

คอนกรีตพรุนได้ถูกคิดค้นและพัฒนาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในประเทศต่างๆ อาทิ เช่น สหรัฐอเมริกา อังกฤษ ญี่ปุ่น เพื่อใช้ในงานคอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม คอนกรีตพรุนเป็นคอนกรีตที่ไม่มีมวลรวมละเอียดในส่วนผสม เพื่อต้องการให้มีรูพรุนที่ต่อเนื่องอยู่ภายใน ที่สามารถระบายน้ำได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งมีความแตกต่างอย่างชัดเจนจากคอนกรีตที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไปที่มีความทึบน้ำสูง ด้วยคุณสมบัติที่มีความพรุนในตัวคอนกรีตจึงสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น การนำคอนกรีตพรุนมาใช้สำหรับงานปูผิวถนน ใช้ในการลาดคลองเพื่อให้สิ่งมีชีวิตดำรงอยู่ได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในงานวิศวกรรมอื่นๆ เช่น ใช้เป็นฉนวนความร้อน ด้านการเก็บเสียงและด้านการระบายน้ำ รวมทั้งสามารถทำพื้นผิวทางสำหรับเดินเท้าและสำหรับขุดยานพาหนะ (ถนัดกิจและยวดี, 2551) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้ปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมในการผลิตคอนกรีตพรุนอีกด้วย (ศุภกิจและคณะ, 2554)

คอนกรีตพรุนมีการนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่หลากหลาย แต่เนื่องจากคุณสมบัติที่มีรูพรุนต่อเนื่องภายในตัวของคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตพรุนมีค่ากำลังรับแรงดัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตปกติทั่วไป อาจทำให้เกิดปัญหาการแตกหักและเสียหายของคอนกรีตพรุนในระหว่างการใช้งาน ดังนั้น เพื่อให้สอดคล้องกับการประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายในปัจจุบัน โดยเฉพาะในประเทศไทยยังม้งานวิจัยที่ศึกษาคุณสมบัติด้านนี้ค่อนข้างน้อย งานวิจัยนี้จึงเน้นการศึกษาคุณสมบัติทางด้านกำลังรับแรงดัดและพฤติกรรมการวิบัติของคอนกรีตพรุนในห้องปฏิบัติการ โดยการประยุกต์ใช้วัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงประเภท Geogrid และ Fiber glass รวมถึงการประยุกต์ใช้ร่วมกับ Geotextile เพื่อศึกษาให้มีการระบายน้ำที่ดีและสามารถเป็นวัสดุรองได้ สำหรับรองรับการใช้งานหลากหลายรูปแบบที่จะเพิ่มมากขึ้นในอนาคต และยังเป็นการประยุกต์ใช้วัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในงานด้านวิศวกรรม ตามกรอบแนวคิดวิศวกรรมปฐพีสิ่งแวดล้อม

วัตถุประสงค์

เพื่อเป็นการศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีตพูนในด้านกำลังรับแรงคดและพฤติกรรมการวิบัติ โดยการประยุกต์ใช้งานกับวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงประเภท Geogrid และ Fiberglass ตลอดจนคุณสมบัติสำคัญต่างๆ เช่น การระบายน้ำและการกรอง เพื่อเป็นการเพิ่มทางเลือกในการประยุกต์ใช้วัสดุสำหรับป้องกันการกัดเซาะในงานวิศวกรรมปฐพี นอกเหนือจากวิธีการและวัสดุเดิมที่มีอยู่แล้ว

ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของคอนกรีตพูนในห้องปฏิบัติการ
2. ศึกษาพฤติกรรมทางด้านกำลังรับแรงคดและการวิบัติของคอนกรีตพูนที่มีการประยุกต์ใช้วัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงกับคอนกรีตพูนธรรมดาที่ไม่มีวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงที่อายุการบ่ม 7 วัน 14 วัน 28 วัน และ 90 วัน
3. ศึกษาคุณสมบัติทางการกรองของคอนกรีตพูนในแต่ละขนาดมวลรวม รวมถึงมีการประยุกต์ใช้งานร่วมกับ Geotextile โดยที่ใช้ทรายขนาดเม็ดสม่ำเสมอ (SP) เป็นวัสดุทดสอบ การวิจัยใช้อุปกรณ์ทดสอบความซึมผ่านของน้ำแบบใช้ความดันน้ำคงที่ (Constant Head Permeameter)

การตรวจเอกสาร

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคอนกรีตพูน

1. คุณสมบัติของวัสดุ

วัสดุที่นำมาใช้ในการผลิตคอนกรีตพูนจะมีลักษณะใกล้เคียงกับวัสดุที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตทั่วไป แต่มีส่วนที่แตกต่างคือ คอนกรีตพูนจะไม่มีมวลรวมละเอียดผสมอยู่ โดยจะมีเฉพาะซีเมนต์เพสต์และมวลรวมหยาบ โดยที่มวลรวมหยาบจะมีขนาดเดียวกันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1.1 คุณสมบัติของมวลรวม มวลรวมจะทำหน้าที่เป็นวัสดุย่อยกระจายอยู่ทั่วเนื้อคอนกรีต ช่วยให้คอนกรีตมีความทนทานและยังลดการยึดหดตัวของคอนกรีต ซึ่งคุณลักษณะมวลรวมที่ดีควรมีคุณสมบัติดังนี้

1.1.1 ความแข็งแรง (Strength) มวลรวมควรมีความสามารถรับแรงกดได้ไม่น้อยกว่า 70 ถึง 300 กิโลกรัม/เซนติเมตร²

1.1.2 ความต้านทานต่อแรงกระแทกและการขัดสี (Impact and Abrasion Resistance) มวลรวมควรมีความต้านทานต่อแรงกระแทกและการขัดสีที่ดี เพราะจะเป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของมวลรวม

1.1.3 รูปร่างและลักษณะผิว (Particle Shape and surface Texture) มวลรวมควรมีลักษณะกลมหรือเหลี่ยมในระดับความสามารถเทได้และต้องสะอาดไม่มีตะกอนติดมากับมวลรวม

1.1.4 ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี (Chemical Stability) มวลรวมควรที่จะไม่ทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์และสิ่งแวดล้อมภายนอกจนทำให้เกิดการสึกกร่อน

1.1.5 สัดส่วนคละ (Gradation) มวลรวมควรมีขนาดคละที่เท่าๆกันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด เมื่อนำมาผสมกันแล้วจึงจะเกิดรูปพูนในตัวคอนกรีต

1.1.6 หน่วยน้ำหนักและช่องว่าง (Unit Weight and Void) หน่วยน้ำหนักของมวลรวมคือ น้ำหนักของมวลรวมในขนาดกะที่ต้องการต่อหน่วยปริมาตร หน่วยน้ำหนักจะบอกถึงปริมาตรและช่องว่างของมวลรวม โดยทั่วไปจะอยู่ประมาณ 1600 ถึง 1800 กิโลกรัม/เมตร³

1.2 คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์จะทำหน้าที่ให้กำลังของคอนกรีตโดยทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำ เกิดเป็นของเหลวหนืด ซึ่งจะทำหน้าที่เชื่อมประสานมวลรวมเข้าด้วยกันและหล่อลื่นคอนกรีตให้สามารถเทได้ เมื่อแข็งตัวจะให้กำลังกับคอนกรีต คุณสมบัติของปูนซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารเคมีและความละเอียดของเม็ดปูน ในการผลิตคอนกรีตพูนใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาประเภทที่ 1 ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์สำหรับงานโครงสร้างทั่วไป โดยลักษณะต้องเป็นผงบดละเอียดไม่จับตัวกันเป็นก้อนและที่สำคัญปูนซีเมนต์ที่นำมาใช้ต้องไม่ผ่านการเก็บรักษาในบริเวณที่มีความชื้นหรือบริเวณที่น้ำอาจซึมเข้าไปในถุงปูนซีเมนต์ได้

1.3 คุณสมบัติของน้ำ น้ำจะทำหน้าที่ผสมกับปูนซีเมนต์ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและยังช่วยหล่อลื่นให้คอนกรีตอยู่ในสภาพเหลวมีความสามารถเทลงในแบบหล่อได้ (Workability) ซึ่งลักษณะของน้ำในการผสมคอนกรีตควรที่จะสะอาด ปราศจากสีและกลิ่นหรือสิ่งปนเปื้อน

1.4 สารเคมีผสมเพิ่ม Type F (Super plasticizer) สำหรับสารผสมเพิ่มหรือน้ำยาผสมคอนกรีต หมายถึงสารที่เติมลงไปในส่วนผสมของคอนกรีตไม่ว่าจะก่อนหรือหลังผสม เพื่อปรับปรุงหรือเพิ่มประสิทธิภาพของคอนกรีต ขณะที่คอนกรีตยังเหลวอยู่ เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ต้องการและสอดคล้องกับสภาพของวัสดุ สิ่งแวดล้อมและสภาพการทำงานโดยวัตถุประสงค์หลักๆ คือปรับปรุงความสามารถของคอนกรีต เร่งหรือหน่วงเวลาการก่อตัว ควบคุมหรือตัดแปลงการพัฒนากำลัง เพื่อให้คอนกรีตได้คุณสมบัติตามที่เรากำหนดไว้

2. อัตราส่วนโพรง (Void ratio)

หมายถึงปริมาณของช่องว่างที่แทรกอยู่ในเนื้อคอนกรีตทั้งหมด ความพรุนของคอนกรีตจะลดลงตามกำลังในการบดอัดจนถึงจุดที่มีความหนาแน่นของคอนกรีตสูงสุด ซึ่งพลังงานในการบดอัดจะส่งผลต่ออัตราส่วนโพรงของคอนกรีตพูน ภาพที่ 1 แสดงขั้นตอนการวัดค่าอัตราส่วนโพรง

2.1 ขั้นตอนในการหาอัตราส่วนโพรงของคอนกรีตพูน

2.1.1 ตัวอย่างคอนกรีตพูนที่อยู่ในแบบหล่อจะถูกถอดแบบหลังจากการหล่อครบ 24 ชั่วโมง ทำการวัดขนาดของแท่งตัวอย่าง เพื่อคำนวณหาค่าปริมาตรรวม (V_1 : Total Volume) แล้วนำตัวอย่างไปแช่ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างอิมตัวไปด้วยน้ำตลอดทั้งโพรงที่ต่อเนื่อง (Continuous Void) และโพรงที่ไม่ต่อเนื่อง (Un – continuous Void)

2.1.2 เมื่อครบ 24 ชั่วโมงแล้วนำตัวอย่างขึ้นมาจากน้ำแล้วทำการชั่งน้ำหนักในน้ำทันที วัดค่าเป็น W_1

2.1.3 หลังจากนั้นนำตัวอย่างขึ้นมาจากน้ำนำมาตากให้แห้งในห้องที่มีอุณหภูมิประมาณ 20 องศา ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 60 % ต่อเนื่องอีก 24 ชั่วโมง

2.1.4 ทำการชั่งน้ำหนักในอากาศวัดค่าเป็น W_2 ซึ่งจะสามารถหาอัตราส่วนโพรงรวมคือ อัตราส่วนโพรงรวมโดยปริมาตร (A_t : Total void ratio) โดยใช้สมการที่ (1)

2.1.5 หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่ทำการชั่งน้ำหนักแห้งในอากาศแล้ว มาทำการชั่งน้ำหนักในน้ำทันทีเพื่อที่จะวัดค่า W_3 ซึ่งในการชั่งน้ำหนักครั้งนี้ น้ำจะอิมตัวเฉพาะในส่วนของโพรงที่ต่อเนื่องและจะเห็นได้ว่าค่า W_3 จะมีค่าน้อยกว่า W_1

2.1.6 ทำการคำนวณหาอัตราส่วนโพรงต่อเนื่องโดยวิธีปริมาตร (A_c : Continuous void ratio) โดยใช้สมการที่ (2)

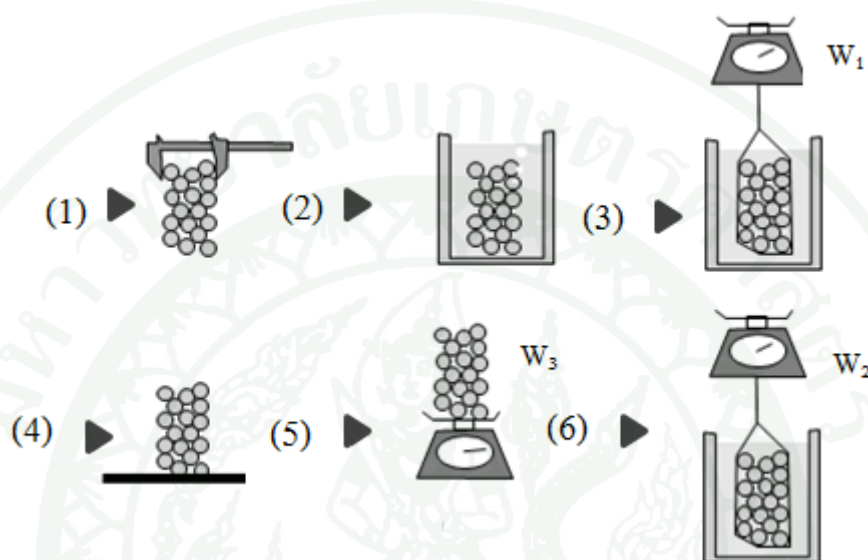
2.2 สมการในการคำนวณหาอัตราส่วนโพรงของคอนกรีตพูน

2.2.1 อัตราส่วนโพรงรวม โดยวิธีปริมาตร (A_t : Total void ratio)

$$A_t = \left\{ 1 - \left[\frac{W_1 - W_2}{V_1} \right] \right\} \times 100 \% \quad (1)$$

2.2.2 อัตราส่วนโพรงต่อเนื่อง โดยวิธีปริมาตร (A_c : Continuous void ratio)

$$A_c = \left\{ A_t - \left[\frac{W_1 - W_3}{V_1} \right] \right\} \times 100 \% \quad (2)$$



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการวัดค่าอัตราส่วนโพรง

ที่มา: ถนัดกิจ และปริญญา (2552)

3. สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (Coefficient of water permeability)

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความพรุนเป็นตัวควบคุม ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำจะเพิ่มตามความพรุนของคอนกรีตที่มากขึ้น

3.1 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

3.1.1 วัดขนาดพื้นที่หน้าตัด (A) และความสูง (H) ของแท่งตัวอย่างคอนกรีตพรุน

3.1.2 บรรจุแท่งตัวอย่างลงในท่อพีวีซีที่มีขนาดใหญ่กว่าแท่งตัวอย่างเพียงเล็กน้อย เติมน้ำที่ด้านบนของท่อจนน้ำมีอัตราการไหลคงที่ ชั่งน้ำหนักของน้ำ (Q) ที่ช่วงระยะเวลาใดๆ (t_1 , t_2) สำหรับค่าตัวแปรอื่นที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ แสดงในภาพที่ 2

3.2 สมการในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของคอนกรีตพูน

$$\text{Permeability, (k)} = \frac{Q H}{h A t} \quad (3)$$

โดยที่ k คือ อัตราการไหลของน้ำผ่านมวลดิน, เซนติเมตร/วินาที

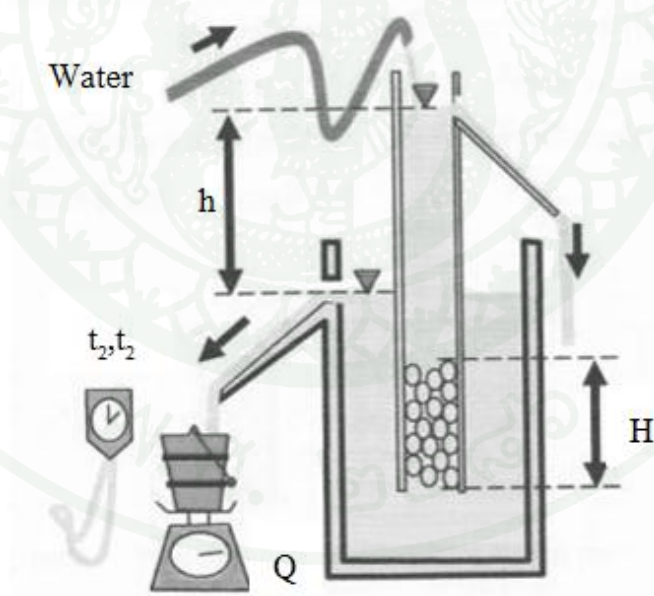
Q คือ ปริมาณน้ำที่วัดระหว่างการทดสอบ, เซนติเมตร³

H คือ ความยาวของตัวอย่าง, เซนติเมตร

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดิน, เซนติเมตร²

h คือ ความต่างของระดับน้ำ, เซนติเมตร

t คือ เวลาในการทดสอบ, วินาที

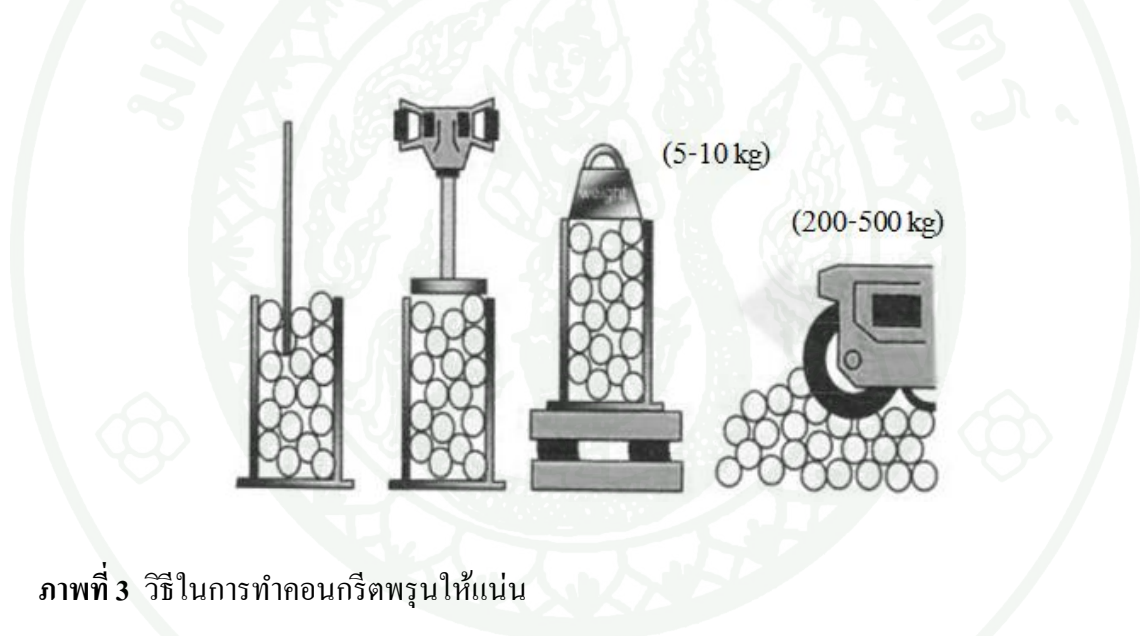


ภาพที่ 2 ตัวแปรต่างๆสำหรับการวัดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ

ที่มา: อดิศักดิ์ (2551)

4. การบดอัดคอนกรีตพอร์น (Compaction)

กระบวนการที่ทำให้คอนกรีตพอร์นนั้นมีความแน่นสามารถกระทำได้หลายวิธี วิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยมคือ การเขย่าสั่นที่ผิว (Surface vibrating compaction) เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและสามารถที่จะประยุกต์ใช้ได้โดยตรงกับการทำงานภาคสนาม วิธีการนี้สามารถอธิบายและควบคุมได้โดยการวัดค่าพลังงานการสั่น (Vibrating energy) แต่ถ้ามีปัญหาเรื่องการขาดแคลนอุปกรณ์ในวิธีที่กล่าวมาข้างต้น ก็สามารถใช้วิธีการกระทุ้งโดยการกำหนดพลังงานที่จะกระทุ้งให้เท่ากันหรือใกล้เคียงกันให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยการกระทุ้งให้แบ่งเป็นสองชั้น ชั้นละประมาณ 10 ครั้ง ดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งสภาวะสุดท้ายของการบดอัดคอนกรีตพอร์นที่ดีต้องไม่มีการจมตัวของซีเมนต์เพสต์ลงข้างล่าง



ภาพที่ 3 วิธีในการทำคอนกรีตพอร์นให้แน่น

ที่มา: ถนัดกิจ (2551)

5. การประยุกต์ใช้คอนกรีตพอร์นสำหรับงานก่อสร้าง (Applications of Porous Concrete)

5.1 คอนกรีตพอร์นสำหรับการซึมผ่านน้ำและการระบายน้ำ จากคุณสมบัติในการซึมผ่านน้ำ ระบายน้ำ ของคอนกรีตพอร์นสามารถที่จะนำมาใช้สำหรับงานปูพื้นถนน ทางเดินเท้าภายในดึกหรืออาคาร ที่จอดรถ สำหรับในประเทศไทยญี่ปุ่นได้มีการนำคอนกรีตพอร์นไปใช้ปูผิวถนนทางหลวง ซึ่งจะสามารถช่วยในเรื่องการทนการขัดสีหรือสึกกร่อนและต้านทานการลื่นที่ดี อีกทั้งยังสามารถระบายน้ำออกจากผิวถนนได้อย่างรวดเร็ว มีการใช้คอนกรีตพอร์นไปใช้ปูผิวทางบนหุบเขาและผิวทาง

จราจรบนพื้นที่ลาดชันเพื่อไม่ให้มีน้ำขังหรือไหลนองบริเวณผิวทางซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการขับขี่ สิ้นเปลืองได้ง่าย ดังแสดงในภาพที่ 4 และภาพที่ 5



ภาพที่ 4 คอนกรีตพูนสำหรับปูทางเดินหน้าบ้าน

ที่มา: อดิศักดิ์ (2551)



ภาพที่ 5 คอนกรีตพูนสำหรับพื้นที่ลาดชัน

ที่มา: อดิศักดิ์ (2551)

5.2 คอนกรีตพูนสำหรับกรองน้ำเสียและสิ่งปฏิกูล มลภาวะของแม่น้ำและบ่อฝังกลบขยะ ก่อให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสียซึ่งเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อม คอนกรีตพูนสามารถบำบัดน้ำเสียเหล่านี้ให้ดีขึ้นได้ เนื่องจากคอนกรีตพูนจะมีรูพรุนตัวคอนกรีตจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่บริเวณผิวสัมผัสภายในตัวคอนกรีตพูน รวมถึงจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่บริเวณผิวหน้าของช่องว่างที่ต่อเนื่อง ซึ่งจะช่วยทำหน้าที่ในการบำบัดน้ำให้สะอาดยิ่งขึ้น โดยอาศัยสิ่งมีชีวิตจำพวกจุลินทรีย์ รวมทั้งการใช้เปลือกคอนกรีตพูนวางในทางน้ำต่างๆและใช้เครื่องอัดอากาศฝังลงไปเพื่อให้ดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัส การสร้างสิ่งมีชีวิตโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันที่บริเวณผิวสัมผัสภายในตัวคอนกรีตพูน นอกจากจะทำหน้าที่ในการบำบัดน้ำเสียแล้วยังเป็นที่ยึดเกาะของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กอีกด้วย ซึ่งจะส่งผลให้ระบบนิเวศดีขึ้นด้วยดังแสดงในภาพที่ 6



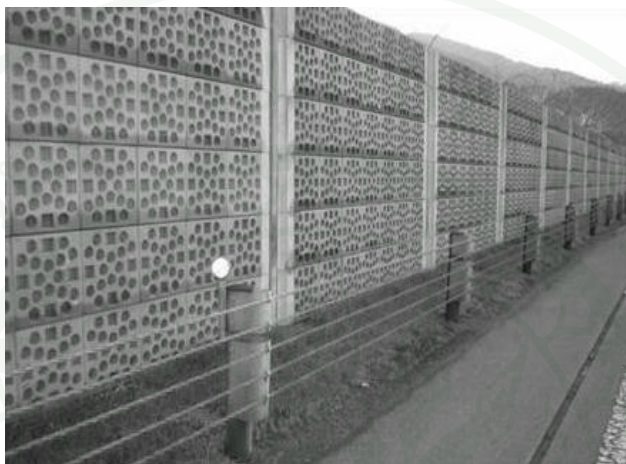
ภาพที่ 6 คอนกรีตพูนสำหรับกรองน้ำเสียและสิ่งปฏิกูล

ที่มา: ถนัดกิจ (2551)

5.3 คอนกรีตพูนสำหรับดูดซับเสียง ในประเทศญี่ปุ่นได้มีการหล่อกำแพงและผนังคอนกรีตพูนเพื่อใช้ประโยชน์การดูดซับเสียงของขบวนพาหนะบนถนนทางหลวงทางรถไฟ รวมไปถึงผนังภายในอุโมงค์รถไฟใต้ดิน ซึ่งยังไม่มีผลงานการวิจัยที่ได้กล่าวถึงผลกระทบที่ตามมาจากการใช้คอนกรีตพูนเพื่อดูดซับเสียงดังกล่าว ดังแสดงในภาพที่ 7

5.4 คอนกรีตพูนสำหรับดูดซับความชื้น ความสามารถในการดูดซับความชื้นของคอนกรีตพูนขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติในการดูดซับความชื้นของมวลรวม ปริมาณโพรงอากาศ สภาพ

โพรงอากาศภายในและคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน เนื่องจากคอนกรีตพูนมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก ดังนั้นคอนกรีตพูนจึงสามารถดูดซับก๊าซ อาทิ ก๊าซ SO_3 และ NO_2 ไว้ภายในตัวคอนกรีตและยังสามารถดูดซับก๊าซที่เป็นอันตรายในบรรยากาศ เช่น ก๊าซไทเทเนียมออกไซด์ (Titanium Oxide) ไว้ที่บริเวณผิวคอนกรีตเพื่อ ไม่ให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 7 คอนกรีตพูนสำหรับดูดซับเสียงบนทางหลวง

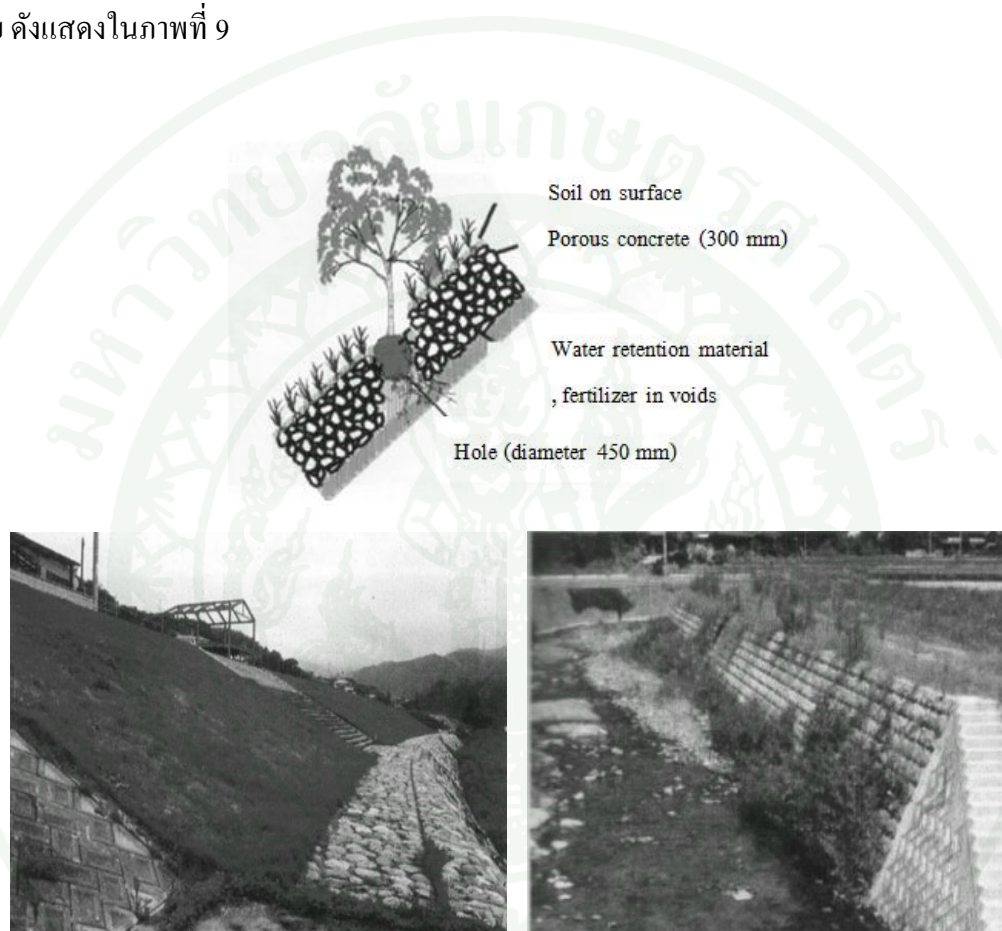
ที่มา: ฤกษ์กิจ (2551)



ภาพที่ 8 คอนกรีตพูนสำหรับดูดซับความชื้น

ที่มา: ฤกษ์กิจ (2551)

5.5 คอนกรีตพรุนสำหรับใช้เป็นที่อยู่อาศัยของพืช ด้วยคุณสมบัติของคอนกรีตพรุนที่มีรูพรุนในตัวเอง ดังนั้นเมื่อนำคอนกรีตพรุนไปปูในสวนหย่อมหรือพื้นที่ที่ต้องการปลูกพืช ก็จะสามารถเจริญเติบโตได้ในคอนกรีตพรุนและที่สำคัญยังสามารถให้น้ำ ให้น้ำปุ๋ย แก่พืชโดยสารอาหาร จะซึมผ่านตามรูพรุนของคอนกรีต ซึ่งรากของพืชยังสามารถหยั่งลึกลงไปถึงดินด้านล่างได้อีก ด้วย ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 การเจริญเติบโตของพืชบนคอนกรีตพรุน

ที่มา: อดิศักดิ์ (2551)

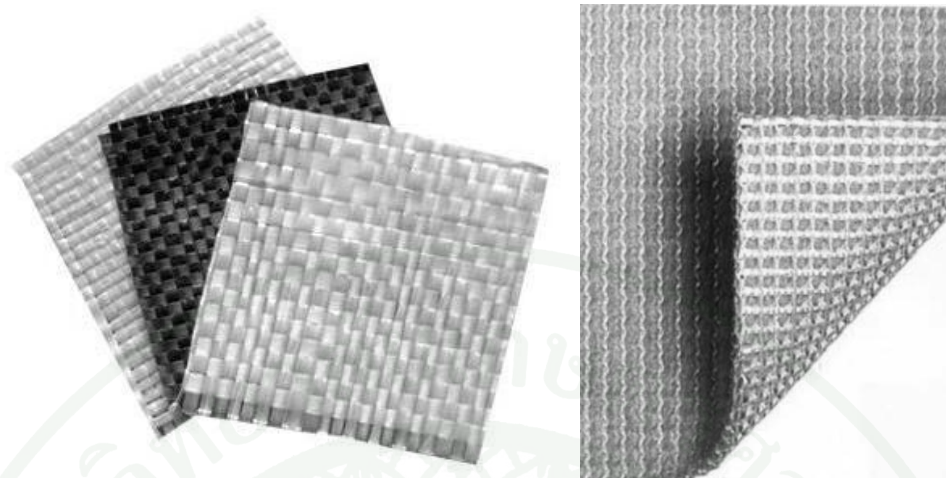
วัสดุสังเคราะห์

วัสดุสังเคราะห์ (Geosynthetics) คือวัสดุที่ผลิตจากวัสดุประเภท Polymeric material เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานด้านวิศวกรรมปฐพี (Geotechnical Engineering) เช่น งานเขื่อนดิน งานกำแพงกันดิน งานระบบระบายน้ำ งานการกรองวัสดุ งานแยกชั้นวัสดุ และงานป้องกันการกัดเซาะชายฝั่งหรือแม่น้ำ เป็นต้น แสดงในภาพที่ 12 และภาพที่ 13 ซึ่งสามารถจำแนก ตามลักษณะรูปร่าง วัสดุที่ใช้ในการผลิตวิธีการผลิตและประโยชน์ในการนำมาใช้งาน ดังนี้

1. Geotextile

Geotextile เป็นวัสดุประเภทหนึ่งใน Geosynthetics ซึ่งถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางและมีแนวโน้มการประยุกต์ใช้ที่สูงขึ้นมากในปัจจุบัน มีลักษณะเป็นแผ่นที่ผลิตจากเส้นใย Synthetic Fiber ซึ่งเส้นใยมีความคงทนกว่าเส้นใยธรรมชาติ มีความยืดหยุ่นสูง มีความสม่ำเสมอ สามารถผลิตเป็นแผ่นได้โดยการถักทอเหมือนผ้า (Woven Geotextiles) หรือใช้วิธีการอื่นที่ไม่ใช่เทคนิคการถักทอปกติในการประสานเส้นใย (Nonwoven Geotextile) เช่นการใช้ความร้อน การใช้พันธะเคมี เป็นต้น ประโยชน์ของ Geotextile ในการนำไปประยุกต์ใช้งานคือ การแยกวัสดุ (Separation) การเสริมแรง (Reinforcement) การกรองวัสดุ (Filtration) การระบายน้ำ (Drainage) และการป้องกันการกัดเซาะ (Erosion) ซึ่ง Geotextile แบ่งออกได้ 2 ประเภทได้แก่

1.1 Woven Geotextile เป็นประเภทแรกที่มีมนุษย์สามารถผลิตขึ้นได้ โดยพัฒนาเทคนิคมาจากการทอผ้า แต่เปลี่ยนมาใช้เส้นใยประเภท Synthetic Polymers แทน ซึ่งมีส่วนประกอบอยู่สองส่วนคือเส้นใยในแนวตามยาวแผ่นเรียกว่า Wrap และเส้นใยในแนวขวางเรียกว่า Weft เส้นใยที่ใช้ในการทอประสานหนาประมาณ 1 ถึง 2 มิลลิเมตร ซึ่งจะมีช่องว่างมากทำให้การซึมผ่านของน้ำสูง และสามารถให้วัสดุอนุภาคเล็กๆจำพวกดินเหนียว (clay) หรือทรายแป้ง (silt) ผ่านไปได้บ้าง โดยที่ว่าการรับแรงดึงของ Geotextile ในแนว Wrap Direction จะมีค่าสูงกว่า Weft Direction ซึ่งแสดงลักษณะของ Woven Geotextile แสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ลักษณะ Woven Geotextile

ที่มา: บริษัท Noida Co.,Ltd. (2556)

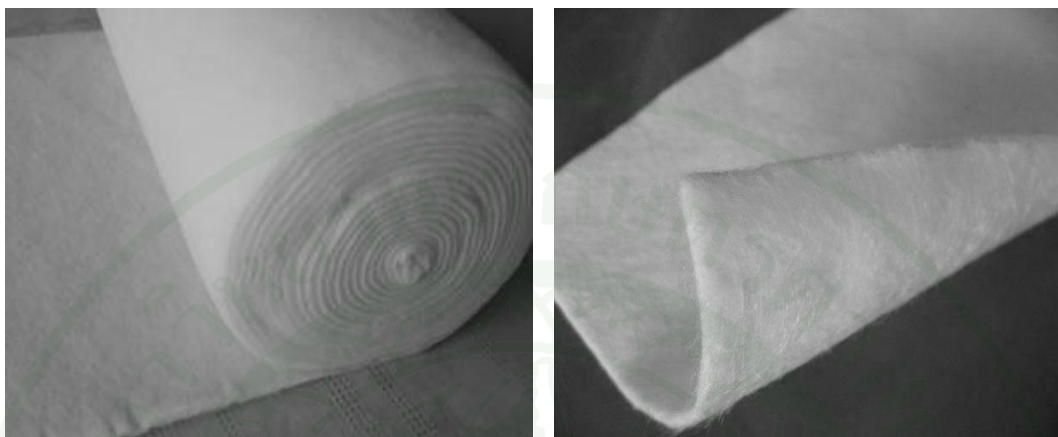
1.2 Nonwoven Geotextile แสดงในภาพที่ 11 เป็นการประสานเส้นใย Synthetic Polymers ด้วยพันธะต่างๆ ตามกรรมวิธีต่อไปนี้

1.2.1 Heat or Thermal Bonding คือการใช้อุณหภูมิในการละลายเส้นใยประสานกันเป็นแผ่น ทำได้โดยการลำเลียงเส้นใยวัตถุดิบอย่างสม่ำเสมอให้ผ่านลูกกลิ้งที่มีความร้อนสูง โดยลูกกลิ้งจะทำหน้าที่บดอัดเส้นใยให้หลอมละลายเข้าด้วยกัน ซึ่งในการผลิตให้มีความบางได้ถึง 0.5 ถึง 1 มิลลิเมตร การรับแรงดึงของแผ่นจะใกล้เคียงกันทุกทิศทางและสามารถเลือกค่าการซึมผ่านน้ำได้ในช่วงกว้างกว่า Woven Geotextile

1.2.2 Mechanical Bonding or Needle Punched โดยการใช้เข็มหมุดที่ได้ออกแบบไว้สำหรับทำการตอกหรือถักร้อยเส้นใยให้ประสานกันเป็นแผ่น สามารถผลิตแผ่นให้มีความหนา ระหว่าง 0.5 ถึง 5 มิลลิเมตร ซึ่งคุณสมบัติของ Geotextile ที่ผลิตได้สามารถกำหนดได้แน่นอนกว่าวิธีอื่นๆ สามารถรับแรงดึงได้สูงใกล้เคียงกันทุกทิศทางและกำหนดช่วงของค่า Permeability ได้ดีกว่าวิธีอื่น

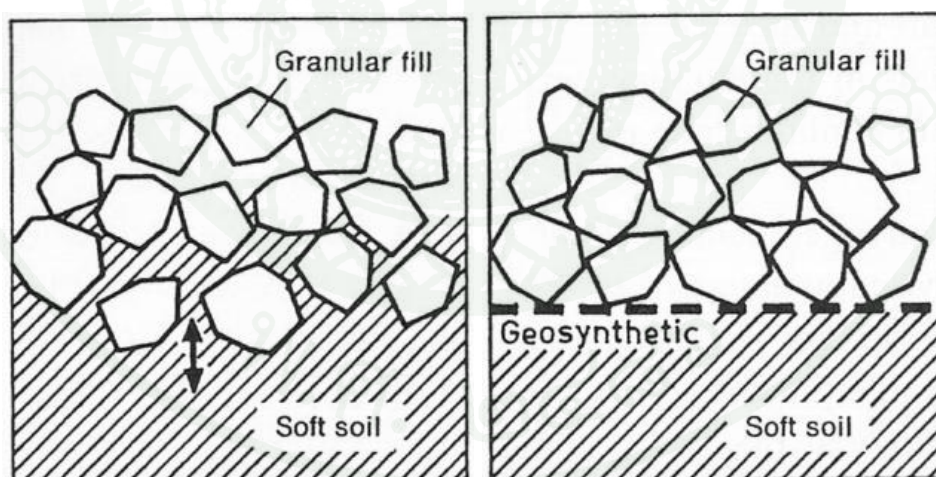
1.2.3 Chemical Bonding เป็นการใส่สารเคมีในการประสานเส้นใย โดยใช้ Acrylic Resin เพื่อทำปฏิกิริยากับวัตถุดิบเพื่อให้เกิดการรวมตัวเป็นแผ่น แล้วนำไปตากในอากาศที่แห้งก่อน

นำไปม้วนเพื่อนำไปใช้งานต่อไป แต่วิธีการ Chemical Bonding เป็นวิธีที่ไม่นิยมใช้ในการผลิต เนื่องจากควบคุมผลิตภัณฑ์ให้มีคุณสมบัติตรงตามความต้องการได้ยากกว่าวิธีการอื่นๆ



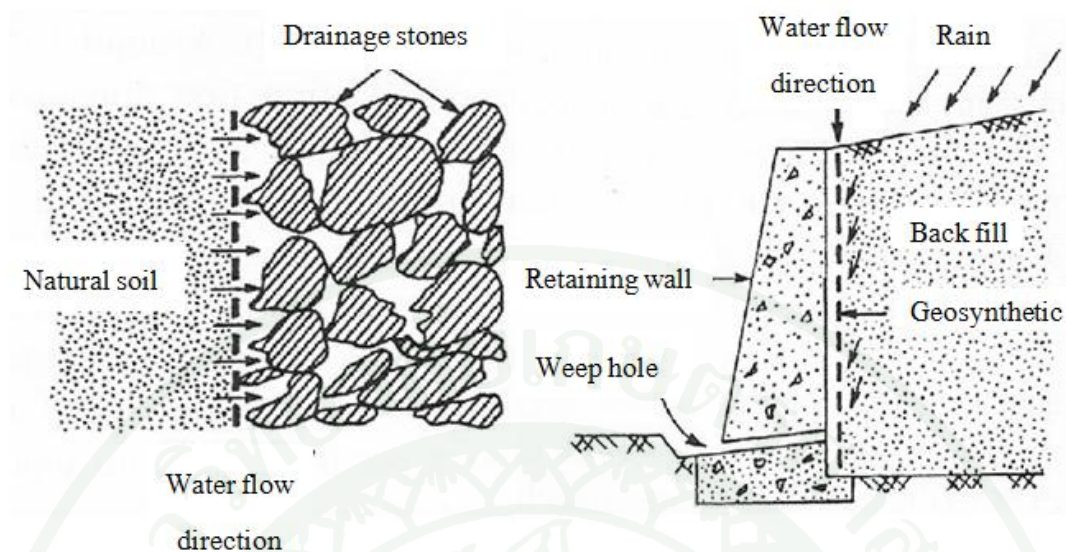
ภาพที่ 11 ลักษณะ Nonwoven Geotextile

ที่มา: บริษัท Nan Yang LI Da Geosynthetics Co.,Ltd. (2556)



ภาพที่ 12 ลักษณะการประยุกต์ใช้งานวัสดุใยสังเคราะห์ด้านการแยกชั้นวัสดุ (Separation)

ที่มา: Sunjay Kumar Shukla (2012)



ภาพที่ 13 ลักษณะการประยุกต์ใช้งานวัสดุสังเคราะห์ด้านการกรองและการระบายน้ำ (Filtration and Drainage)

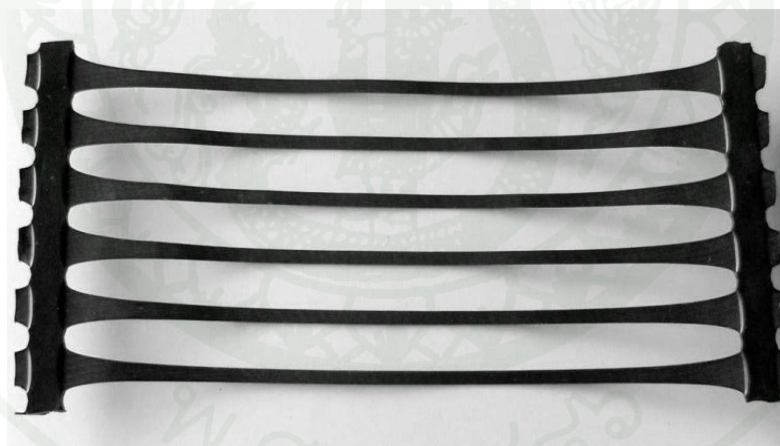
ที่มา: Sunjay Kumar Shukla (2012)

2. Geogrid

Geogrid เป็น Geosynthetic ชนิดหนึ่ง มีลักษณะเป็นแผ่นตารางที่ผลิตจาก Synthetic Polymer โดยในแผ่น Geogrid จะมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 2 ส่วน คือ เส้นตามแนวยาวของแผ่น (Longitudinal Ribs) และเส้นตามแนวขวางของแผ่น (Transverse Ribs) นำมาสานกันและมีช่องเปิดอยู่ทั่วแผ่น เรียกช่องเปิดนั้นว่า Apertures สามารถรับแรงดึงได้สูงและการยึดตัวในระยะยาวมีค่าน้อยกว่า Geotextile จึงเหมาะสมในการใช้รับแรงดึงสูงๆ ประโยชน์ของ Geogrid สามารถประยุกต์ใช้ในงานด้านการเสริมแรง (Reinforcement) ในงานโครงสร้างดินเป็นหลัก เช่น งานถนนคันทาง กำแพงกันดิน เป็นต้น แสดงในภาพที่ 16 นอกจากนี้จะมีใช้ในงานโครงสร้างดิน Geogrid ยังสามารถใช้เสริมแรงในงาน Asphalt Concrete งานเสริม Bearing Capacity ในดินอ่อน งานเกี่ยวกับโครงสร้างของหินหรือวัสดุขนาดใหญ่ งานโครงสร้างกำแพงกันดิน โดยใช้เป็นตัวดึงเพื่อเพิ่มเสถียรภาพ รวมทั้งการประยุกต์ใช้งานร่วมกับ Geotextile หรือ Geomembrance เพิ่มเสริมประโยชน์ในการแยกชั้นวัสดุหรือการกรอง หรือควบคุมอัตราการซึมผ่านของน้ำในโครงสร้างงานดิน โดย Geogrid แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทได้แก่

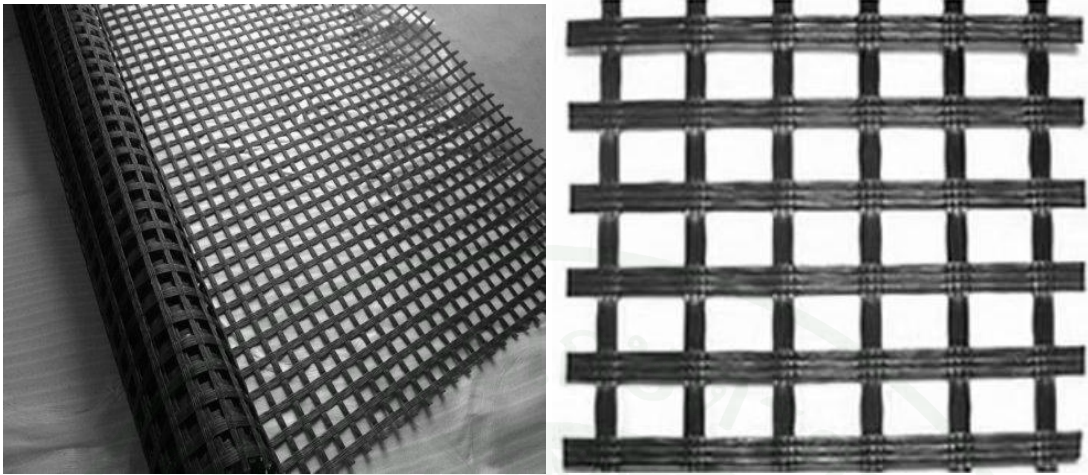
2.1 Uniaxial Geogrid คือ ผลิตขึ้นมาเพื่อรับแรงในแนวเดียว โดยที่ในแนวตามยาวจะสามารถรับแรงดึงได้สูงกว่าในแนวตามขวางมาก ใช้ประโยชน์ในงานเสริมแรงถนนคันทาง กำแพงกันดิน เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 14

2.2 Biaxial Geogrid คือ ผลิตขึ้นมาเพื่อให้สามารถรับแรงดึงได้ 2 แกน ใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้างพื้นที่ขนาดใหญ่ งานเสริมแรงใต้ฐานราก เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 15



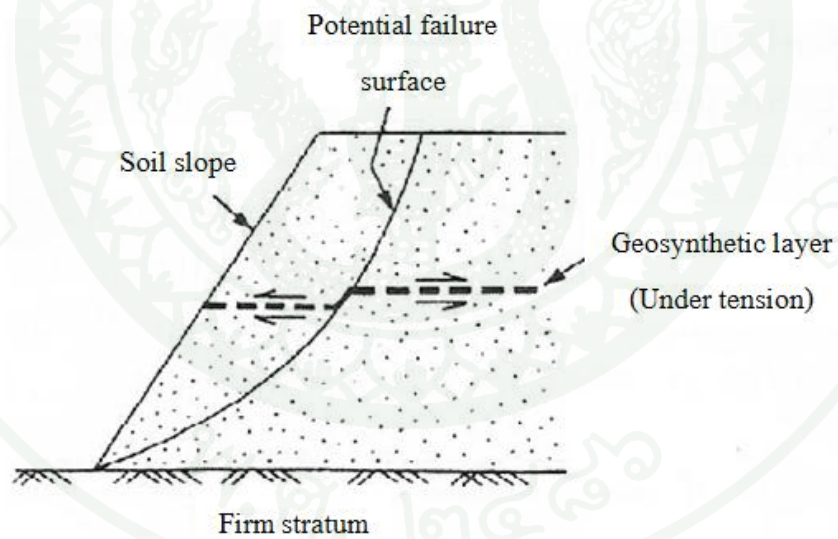
ภาพที่ 14 ลักษณะ Uniaxial Geogrid

ที่มา: บริษัท Feicheng Haicheng Plastic Package Co.,Ltd. (2556)



ภาพที่ 15 ลักษณะ Biaxial Geogrid

ที่มา: บริษัท Taian Road Engineering Materials Co.,Ltd. (2556)

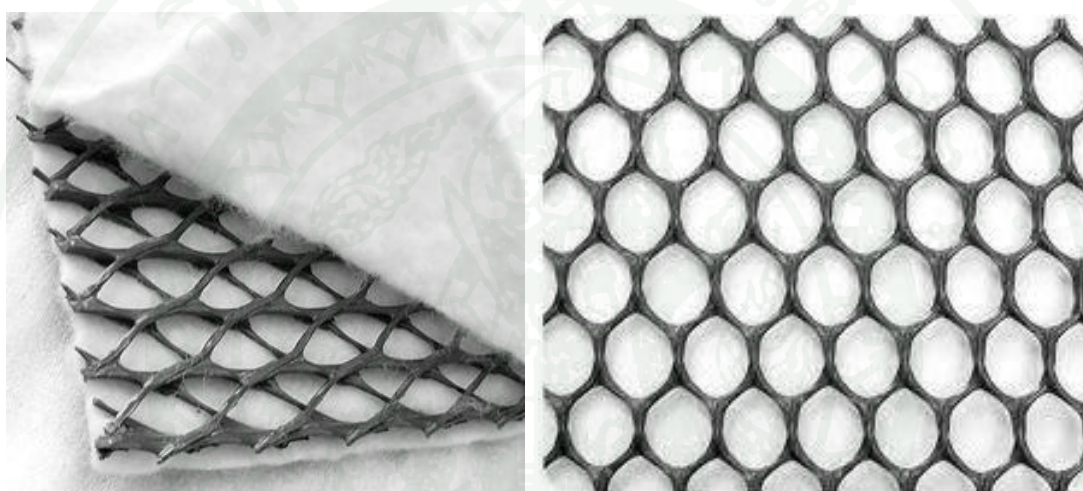


ภาพที่ 16 ลักษณะการประยุกต์ใช้วัสดุใยสังเคราะห์ด้านการเสริมแรง (Reinforcement)

ที่มา: Sunjay Kumar Shukla (2012)

3. Geonet or Geospace

มีลักษณะทั่วไปเป็นแผ่นตาข่ายที่ผลิตจากวัสดุ Polyethylene เกือบทั้งหมด โดยแผ่นจะมีช่องเปิดกว้างทั่วแผ่นสามารถกำหนดการผลิตได้ตามความต้องการ มีประโยชน์ในการใช้งานด้านการระบายน้ำโดยเฉพาะ ซึ่งการนำไปใช้งานจำเป็นต้องมีแผ่น Geotextile ประกบหน้าหลังเพื่อกรองวัสดุเข้าไปอุดตันในทางระบายน้ำของ Geonet ตัวอย่างงานที่ใช้ Geonet เช่น การระบายน้ำหลังกำแพงดินหรือฐานรากเป็นต้น ซึ่งตัวอย่าง Geonet แสดงในภาพที่ 17

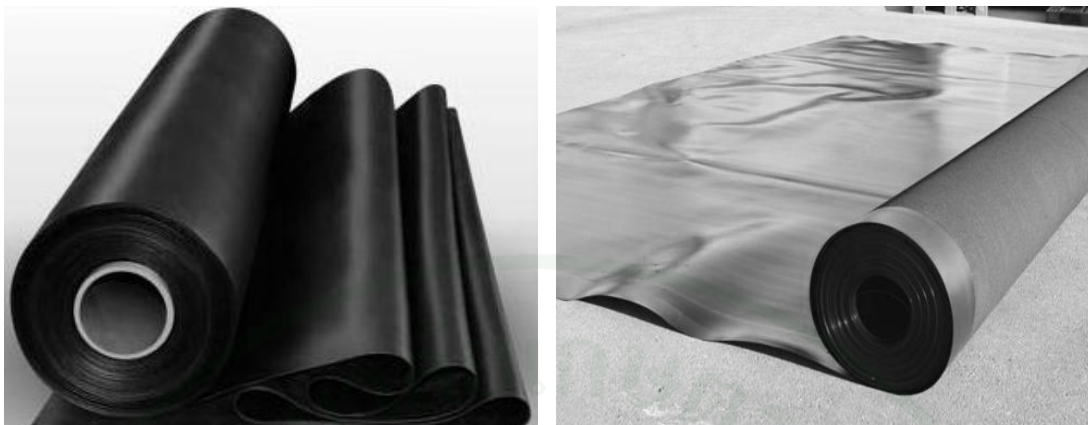


ภาพที่ 17 ลักษณะ Geonet

ที่มา: บริษัท Chainamaking Co., Ltd. (2556)

4. Geomembrane

เป็นแผ่นวัสดุที่ทำการผลิตขึ้นจาก Polyethylene หรือพลาสติกหรือยางมีการซึมผ่านของน้ำต่ำถึงต่ำมาก ใช้ประโยชน์ในด้านการควบคุมน้ำเสียไม่ให้ไหลผ่านมาปะปนกับน้ำดีหรือป้องกันการไหลเข้าออกของน้ำ และใช้เป็นวัสดุวางระหว่างมวลดินและโครงสร้างต่างๆเพื่อลดการกัดกร่อนเป็นต้น โดยปกติค่าการซึมผ่านของน้ำจะอยู่ประมาณ 10^{-7} เซนติเมตร/วินาที ซึ่งตัวอย่าง Geomembrane แสดงในภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ลักษณะ Geomembrane

ที่มา: บริษัท Golden-Pow Co., Ltd. (2556)

5. Geosynthetic clay liner or (GCL)

ลักษณะเป็นแผ่นของการประกบชั้นบางๆของ Bentonite clay ด้วย Geotextile หรือ Geomembrance ทั้งหน้าและหลัง โดยอัดเป็นแผ่นเดียวกัน ใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่ในด้านการป้องกันการซึมผ่านของน้ำ มีลักษณะใกล้เคียงกับ Geomembrance โดยสามารถผลิตให้มีค่าความชื้น น้ำ ความหนา และลักษณะพื้นผิวได้ตามต้องการ ซึ่งตัวอย่าง GCLS แสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ลักษณะ Geosynthetic clay liner

ที่มา: บริษัท Shandong MaoXun Information Technology Co.,Ltd. (2556)

6. Geopipe

เป็นท่อที่ผลิตจากวัสดุประเภท Polymeric Materials ซึ่งมีความยืดหยุ่น และมีการตัดโครง ได้มากน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ผลิต ประโยชน์ของ Geopipe ในการเป็นท่อระบายน้ำเช่น การระบายน้ำใต้ดินหลังกำแพงดิน เป็นต้น และงานท่อส่งน้ำ หรือสารละลายต่างๆ ข้อดีของ Geopipes คือมีการยืดหยุ่นตัวและทนต่อการกัดกร่อนได้สูง ซึ่งตัวอย่าง Geopipe แสดงในภาพที่ 20

7. Geocomposites

เป็นการนำ Geosynthetics มากกว่า 1 ชนิด มาใช้ร่วมกันเพื่อเพิ่มประโยชน์ใช้สอยในงาน ด้านต่างๆ ให้มากขึ้น เช่น การใช้ Geogrids ร่วมกับ Geomembranes หรือ Geotextiles การใช้ Geonet ร่วมกับ Geotextile เป็นต้น เป็นการนำคุณสมบัติที่ดีของ Geosynthetics แต่ละชนิด เพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพในการใช้งานประโยชน์สูงสุด



ภาพที่ 20 ลักษณะ Geopipe

ที่มา: ทักษิณี สุวรรณมงคล และ จิราภรณ์ ศรีเรไร (2549)

8. Fiberglass

Fiberglass คือผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ใส่วัสดุอื่นเพื่อเสริมความแข็งแรง (มีวัสดุมากกว่า 2 ชนิดมาประสานกัน) วัสดุที่นำมาเสริมแรงให้พลาสติกคือ “ใยแก้ว” ซึ่งมีลักษณะอ่อนนุ่มแต่เหนียว ทนความร้อนได้สูง ส่วนพลาสติกที่นำมาใช้เป็นเนื้อ ต้องเป็นชนิดที่มีความแข็งแรงมาก ซึ่งถ้าไม่มีการเสริมแรงแล้วจะเปราะ ดังนั้นการสร้างผลิตภัณฑ์ขึ้นมา จึงเรียกได้ว่าเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกเสริมแรงด้วยใยแก้วหรือ FRP โดยที่ Fiberglass จะมีคุณสมบัติพิเศษ เช่น ไม่เป็นสนิม ทนต่อการกัดกร่อน น้ำหนักเบา โครงสร้างแข็งแรงให้ตัวได้ ป้องกันการรั่วซึมหรือร้าว ไม่เน่าเปื่อยหรือผุกร่อนทนทุกสภาวะสิ่งแวดล้อมคงรูปเดิมได้ดี และทนต่อแสงแดดและแสงยูวี เป็นต้น



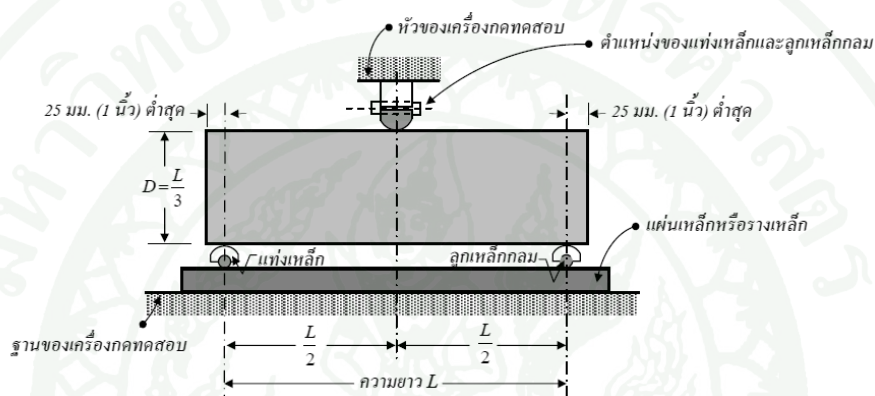
ภาพที่ 21 ลักษณะ Fiberglass

กำลังรับแรงดัดของคอนกรีต (Flexural Strength of Concrete)

การทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงดัดของคอนกรีตเพื่อหาค่าโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture) คือค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากแรงดัดสูงสุดที่กระทำต่อตัวอย่างคอนกรีต ณ จุดวิบัติ ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีใช้แรงกดหนึ่งจุดที่จุดกึ่งกลางคาน (Center-Point Loading) และวิธีใช้แรงกดคาน 2 จุด โดยกำหนดตำแหน่งของจุดทั้งสองเป็นตำแหน่งที่แบ่งคานออกเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กัน (Third-Point Loading) ซึ่งการทดสอบทั้งสองแบบจะให้ค่ากำลังรับแรงดัดต่างกันเพียงเล็กน้อย

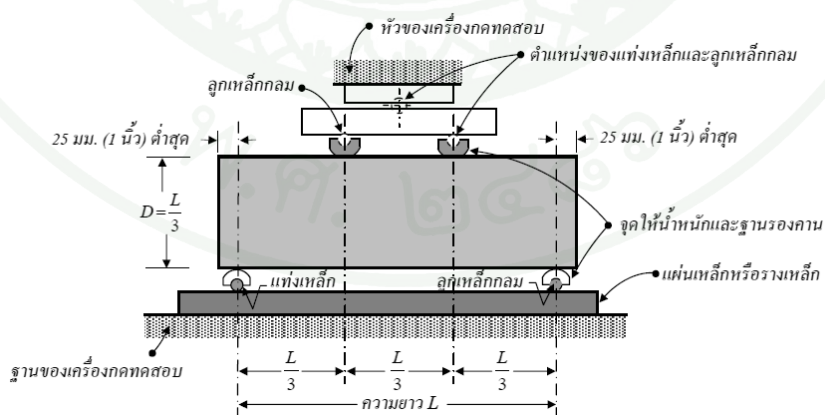
เครื่องทดสอบ

ใช้เครื่องทดสอบที่สามารถเพิ่มแรงกดได้อย่างต่อเนื่อง ไม่มีจังหวะหยุด หรือกระตุกในระหว่างการเพิ่มแรง สำหรับการทดสอบการรับแรงดัดของคอนกรีต โดยวิธีให้แรงกดหนึ่งจุดที่จุดกึ่งกลาง คานแสดงการติดตั้งเครื่องมือในภาพที่ 22 ส่วนวิธีให้แรงกดคานสองจุดโดยให้ตำแหน่งของจุดทั้งสองเป็นตำแหน่งที่แบ่งคานออกเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กัน ดังแสดงการติดตั้งเครื่องมือไว้ในภาพที่ 23



ภาพที่ 22 รูปแบบการทดสอบวิธีใช้แรงกดหนึ่งจุดที่จุดกึ่งกลาง

ที่มา: มาตรฐานการทดสอบวัสดุในงานคอนกรีต, มยพ.1211-50. (2550)

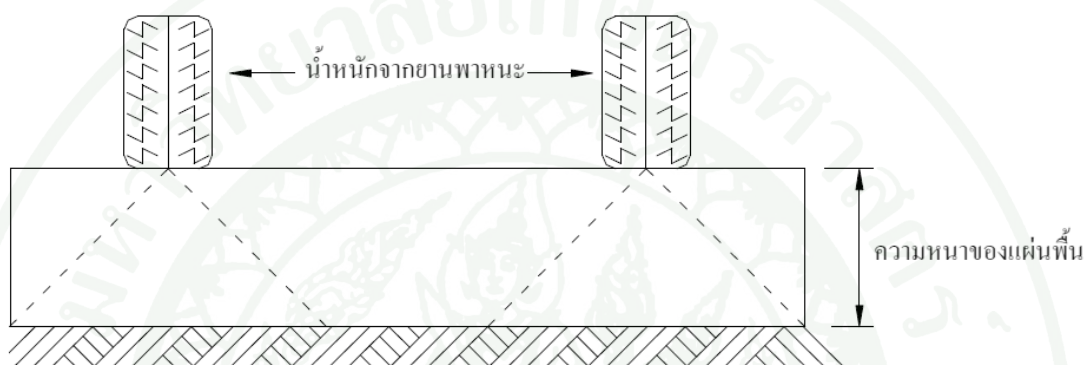


ภาพที่ 23 รูปแบบการทดสอบวิธีใช้แรงกดสองจุด

ที่มา: มาตรฐานการทดสอบวัสดุในงานคอนกรีต, มยพ.1211-50. (2550)

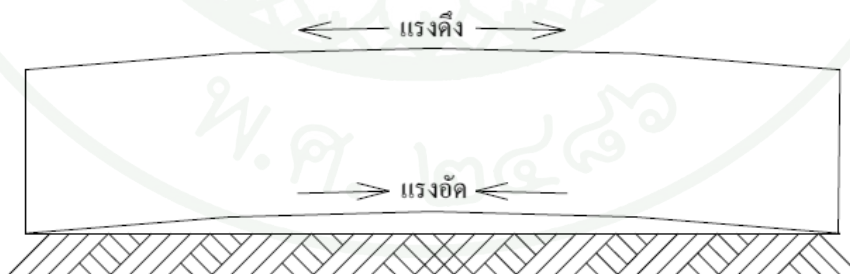
พฤติกรรมของหน่วยแรงตัดที่กระทำต่อคอนกรีต

หน่วยแรงตัดเนื่องจากน้ำหนักบรรทุก โดยที่มีตำแหน่งวิกฤต 3 จุดคือ น้ำหนักที่กระทำที่มุมแผ่นพื้นคอนกรีตห่างจากขอบ น้ำหนักกระทำที่ขอบแผ่นพื้นคอนกรีตห่างจากมุม น้ำหนักกระทำที่ตำแหน่งห่างจากขอบ ซึ่งน้ำหนักที่กระทำทั้งสามจุดจะก่อให้เกิดหน่วยแรงตัดในคอนกรีต

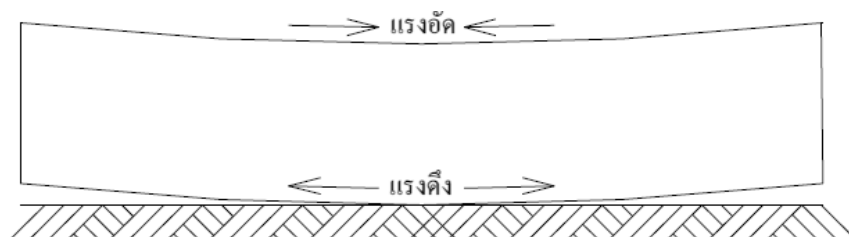


ภาพที่ 24 สภาพรับน้ำหนักบรรทุกจากยานพาหนะของแผ่นพื้น

หน่วยแรงตัดเนื่องจากอุณหภูมิแผ่นพื้น เนื่องจากอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างกลางวันและกลางคืน ก่อให้เกิดการขยายตัวด้านบนและด้านล่างของแผ่นพื้นในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้แผ่นพื้นโก่งงอก่อให้เกิดหน่วยแรงตัดในคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 25 และ ภาพที่ 26



ภาพที่ 25 หน่วยแรงตัดที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิตอนกลางวัน



ภาพที่ 26 หน่วยแรงคัตที่เกิดขึ้นจากอูณหภูมิตอนกลางคืน

แบบหล่อคานคอนกรีตมาตรฐานสำหรับทดสอบกำลังรับแรงคัต

1. แบบหล่อคานคอนกรีตมาตรฐานอเมริกา

- 1.1 ขนาด 15x15x50 เซนติเมตร (ใช้กรณีที่มีมวลรวมหยาบมีขนาดเล็กกว่า 2 นิ้ว)
- 1.2 ขนาด 20x20x70 เซนติเมตร (ใช้กรณีที่มีมวลรวมหยาบมีขนาดใหญ่กว่า 2 นิ้ว)

2. แบบหล่อคานคอนกรีตมาตรฐานอังกฤษ

- 2.1 ขนาด 10 ซม. x 10 ซม. x 50 ซม. (ใช้กรณีที่มีมวลรวมหยาบมีขนาดเล็กกว่า 3/4 นิ้ว)
- 2.2 ขนาด 15 ซม. x 15 ซม. x 70 ซม. (ใช้กรณีที่มีมวลรวมหยาบมีขนาดใหญ่กว่า 3/4 นิ้ว)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ผลิตคอนกรีตพูน
 - 1.1 เครื่องผสมคอนกรีตพูน
 - 1.2 เครื่องผสมซีเมนต์เพส
 - 1.3 เครื่องคัดแยกขนาดมวลรวมหยาบ
 - 1.4 เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 0.01 กรัม
 - 1.5 เกรียงและท่อนเหล็กกระทุ้ง
 - 1.6 กระบอบกดวงวัดปริมาตร

2. อุปกรณ์ทดสอบกำลังรับแรงค้ำของคอนกรีตพูน
 - 2.1 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงค้ำของคอนกรีตพูน (Third-Point Loading machines)
ตามมาตรฐาน ASTM standard C78-02
 - 2.2 แบบหล่อแผ่นคอนกรีตพูนขนาด 5 ซม. x 15 ซม. x 50 ซม.
 - 2.3 ตลับเมตรและเวอร์เนียคาลิเปอร์
 - 2.4 เครื่องมือวัดการแอ่นตัว (Dial gage)
 - 2.5 บ่อสำหรับบ่มคอนกรีต
 - 2.6 กล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหวและภาพนิ่ง

3. อุปกรณ์ทดสอบการไหลซึมผ่านของน้ำและทดสอบการกรอง
 - 3.1 เครื่องมือทดสอบ Permeability Test แบบ Constant Head แสดงในภาพที่ 41
 - 3.2 ปุ่มสูบน้ำ
 - 3.3 แบบหล่อทรงกระบอกกลวง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.16 ซม. สูง 19.2 ซม.
สำหรับทดสอบการซึมผ่านของน้ำและทดสอบคุณสมบัติด้านการกรองของคอนกรีตพูน
 - 3.4 เครื่องมือวัดความขุ่น (Turbidity meter)

- 3.5 ตู้อบอุณหภูมิสูง 71-110 องศาเซลเซียส
- 3.6 นาฬิกาจับเวลา
- 3.7 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.01 กรัม
- 3.8 ถังรองน้ำ
- 3.9 ท่อนเหล็กกระทุ้ง

วัสดุทดสอบ

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาประเภทที่ 1
2. น้ำสะอาดและสารลดน้ำปริมาณมาก Type F (Super plasticizer)
3. มวลรวมหยาบขนาดค้ำตะแกรง #4 (4.75 มิลลิเมตร) มวลรวมหยาบขนาด 3/8 นิ้ว
4. มวลรวมละเอียด (Sand Fill) ที่มีคุณสมบัติ ดังแสดงในภาพที่ 40
5. วัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงชนิด Geogrid ที่เคลือบด้วย PVC / bitumen มีลักษณะช่องรูเปิดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 20 x 20 มิลลิเมตร ซึ่งมีกำลังรับแรงดึงที่การยืดตัว 5% เท่ากับ 40 กิโลนิวตัน/เมตร
6. วัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงชนิด Fiberglass ที่เคลือบด้วย Bitumen มีลักษณะช่องรูเปิดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 25.4 x 25.4 มิลลิเมตร ซึ่งมีกำลังรับแรงดึงที่การยืดตัว 5% เท่ากับ 32 กิโลนิวตัน/เมตร
7. วัสดุใยสังเคราะห์ชนิด Geotextile ที่มี Apparent Opening Size O_{95} ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D4751 เท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร และมีค่า Vertical Water Flow (Head 50 mm) ตามมาตรฐานการทดสอบ IOS 11058 เท่ากับ 100 ลิตร/ตารางเมตร/วินาที หรือมีค่า k เท่ากับ 3×10^{-1} เซนติเมตร/วินาที

วิธีการ

วิธีการในการทำวิจัยมีลำดับขั้นตอนดังแสดงในภาพที่ 27 โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การศึกษาอัตราส่วนผสมของคอนกรีตพูนที่เหมาะสม

พิจารณาคัดเลือกขนาดมวลและอัตราส่วนน้ำต่อปริมาณปูนซีเมนต์ (w/c) ที่เหมาะสม รวมไปถึงความสามารถในการนำไปใช้งาน (Workability) ของอัตราส่วนผสมนั้นๆ จากการศึกษาเบื้องต้นสามารถสรุปอัตราส่วนผสมของคอนกรีตพูนที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตพูน ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยขนาดมวลรวมที่ใช้ในการทำวิจัยประกอบด้วย มวลรวมหยาบคัดขนาดค้ำ ตะแกรง #4 (4.75 มิลลิเมตร) และมวลรวมหยาบคัดขนาด 3/8 นิ้ว

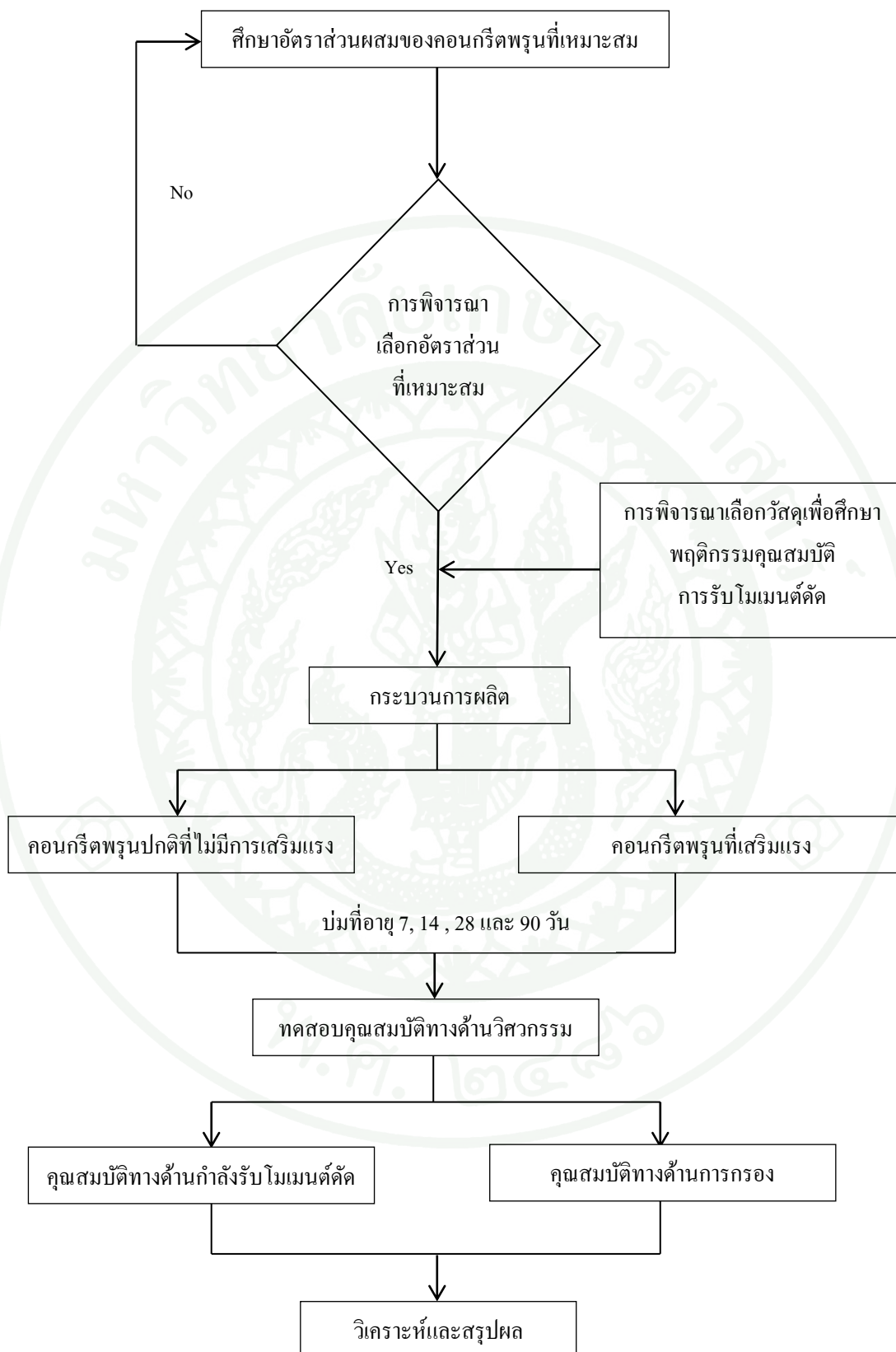
ตารางที่ 1 ข้อมูลอัตราส่วน (Paste/Aggregate volume ratio) และ (W/C) ของคอนกรีตพูน

อัตราส่วน	Paste/Aggregate Volume Ratio	W/C	Void Ratio
	0.327	29.5%	25%

ที่มา: อดิศักดิ์ (2551)

จากข้อมูลอัตราส่วนผสมของคอนกรีตพูนในตารางที่ 1 สามารถคำนวณหาอัตราส่วนผสมคอนกรีตพูนได้โดยประมาณดังนี้ โดยที่ใช้สารผสมเพิ่มเท่ากับ 1% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

หน่วยน้ำหนักคอนกรีตพูน (Unit Weight)	2,193.70	kg/m ³
มวลรวมหยาบ (Aggregate)	1,650.00	kg/m ³
น้ำ (Water)	122.90	kg/m ³
ปูนซีเมนต์ (Cement)	416.60	kg/m ³
สารผสมเพิ่ม (Type F)	4.16	kg/m ³



ภาพที่ 27 ลำดับขั้นตอนการทำวิจัย

2. ขั้นตอนการผลิตคอนกรีตพูน

2.1 การเตรียมมวลรวมหยาบ

หลังจากที่คัดมวลรวมหยาบได้ตามขนาดที่ต้องการ นำมวลรวมหยาบล้างให้สะอาดด้วยน้ำและนำไปแช่ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้มวลรวมอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ จากนั้นทำให้มวลรวมอยู่ในสภาพอิมตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry, SSD) ซึ่งทำได้โดย การเช็ดให้ผิวแห้งโดยการกลิ้งมวลรวมหยาบไปมาบนผ้าแห้งจนน้ำที่ผิวมวลรวมถูกขจัดไป เสร็จแล้วใช้ผ้าชุบน้ำคลุมเพื่อป้องกันน้ำระเหยออกจากมวลรวม ดังแสดงในภาพที่ 28 ถึงภาพที่ 31



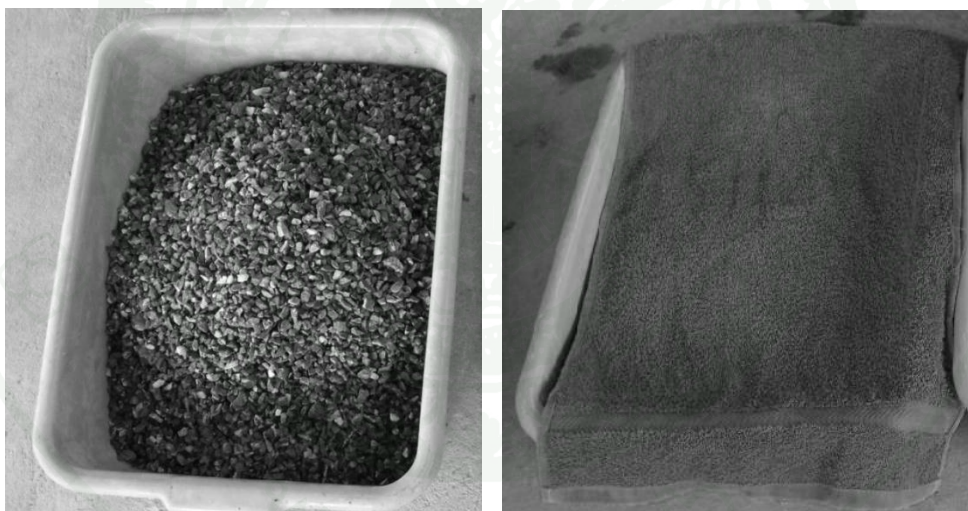
ภาพที่ 28 มวลรวมหยาบขนาด 3/8 นิ้วที่ผ่านการคัดขนาดแล้ว



ภาพที่ 29 มวลรวมหยาบขนาดค้ำตะแกรง # 4 (4.75 มิลลิเมตร) ที่คัดขนาดแล้ว



ภาพที่ 30 การแช่มวลรวมหยาบในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้มวลรวมอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ



ภาพที่ 31 มวลรวมหยาบที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry, SSD) และการใช้ผ้าชุบน้ำคลุมเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำออกจากมวลรวม

2.2 การเตรียมปูนซีเมนต์ สารผสมเพิ่มและน้ำ

ในการทดสอบใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และใช้น้ำจากน้ำประปา โดยจะนำน้ำสะอาดและน้ำยาผสมเพิ่มมาผสมกันก่อนที่จะทำการผสมซีเมนต์เพสต์ตามอัตราส่วนที่ได้ออกแบบไว้ ดังแสดงในภาพที่ 32



ภาพที่ 32 การเตรียมปูนซีเมนต์ สารผสมเพิ่มและน้ำเพื่อทำการผสมซีเมนต์เพสต์

2.3 การผสมซีเมนต์เพสต์

ในการผสมซีเมนต์เพสต์ใช้เวลาในการผสมทั้งหมด 270 วินาที โดยแบ่งเป็น ความเร็ว 100 รอบ/นาที ใช้เวลา 30 วินาที และที่ความเร็ว 200 รอบ/นาทีใช้เวลา 240 วินาที โดยที่ลักษณะของซีเมนต์เพสต์ที่ดีนั้นต้องมีลักษณะมันวาวไม่กระด้าง โดยมีข้อควรระวังคือหลังจากที่ผสมซีเมนต์เพสต์เสร็จควรที่จะนำไปเข้าเครื่องผสมคอนกรีตพูนทันที ซึ่งระยะเวลาหลังจากผสมซีเมนต์เพสต์เสร็จจนกระทั่งนำซีเมนต์เพสต์เทใส่ในเครื่องผสมคอนกรีตพูนควรใช้เวลาไม่เกิน 5 นาที เพื่อป้องกันไม่ให้ซีเมนต์เพสต์แข็งตัวก่อนที่จะผสมกับมวลรวมหยาบ ดังแสดงในภาพที่ 33

2.4 การผสมคอนกรีตพูน

การผสมคอนกรีตพูนจะใช้เวลาทั้งหมด 120 วินาที โดยแบ่งเป็นความเร็ว 50 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 วินาทีและความเร็ว 200 รอบ/นาทีเป็นเวลา 90 วินาที สำหรับการผสมคอนกรีตพูน จะใส่มวลรวมหยาบลงไปเครื่องผสมคอนกรีตพูนก่อน หลังจากนั้นจึงเติมซีเมนต์เพสต์ตามลงไป โดยมีข้อควรระวังคือหลังจากผสมคอนกรีตพูนเสร็จควรที่จะหล่อในแบบหรือ โมลที่เตรียมไว้ให้เร็วที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้คอนกรีตพูนแห้งเกินไป ซึ่งระยะเวลาตั้งแต่ผสมคอนกรีตพูนเสร็จจนกระทั่งหล่อเข้าแบบเสร็จเรียบร้อยควรใช้เวลาไม่เกิน 10 นาที ดังแสดงในภาพที่ 34



ภาพที่ 33 การผสมซีเมนต์เพสต์และลักษณะซีเมนต์เพสต์หลังจากการผสม



ภาพที่ 34 การเติมซีเมนต์เพสต์ผสมกับมวลรวมหยาบเพื่อผลิตคอนกรีตพูน



ภาพที่ 35 การผลิตคอนกรีตพูนในเครื่องผสม



ภาพที่ 36 คอนกรีตพูนที่ได้จากมวลรวมหยาบขนาดข้างตะแกรง # 4 (4.75 มิลลิเมตร)



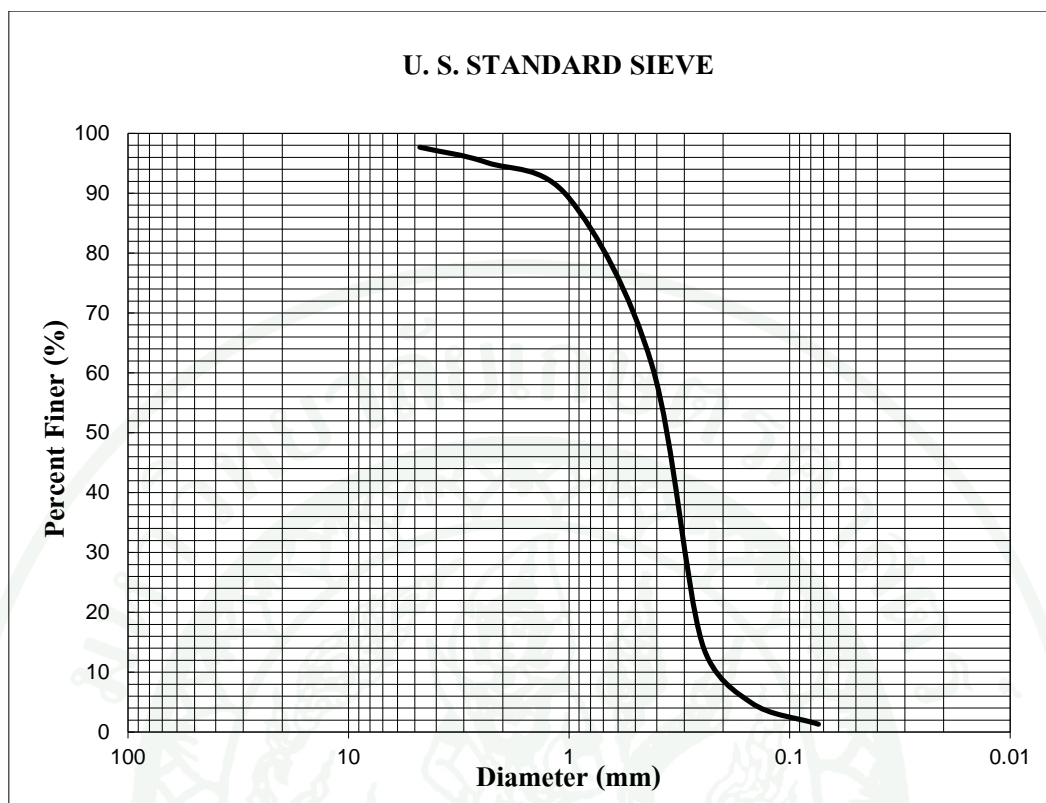
ภาพที่ 37 คอนกรีตพรุนที่ได้จากมวลรวมหยาบขนาด 3/8 นิ้ว

3. การทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม

3.1 การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุทดสอบ

3.1.1 การทดสอบหาการกระจายตัวของเม็ดดิน (Soil Distribution Curve) ของทรายที่ใช้เป็นวัสดุทดสอบ

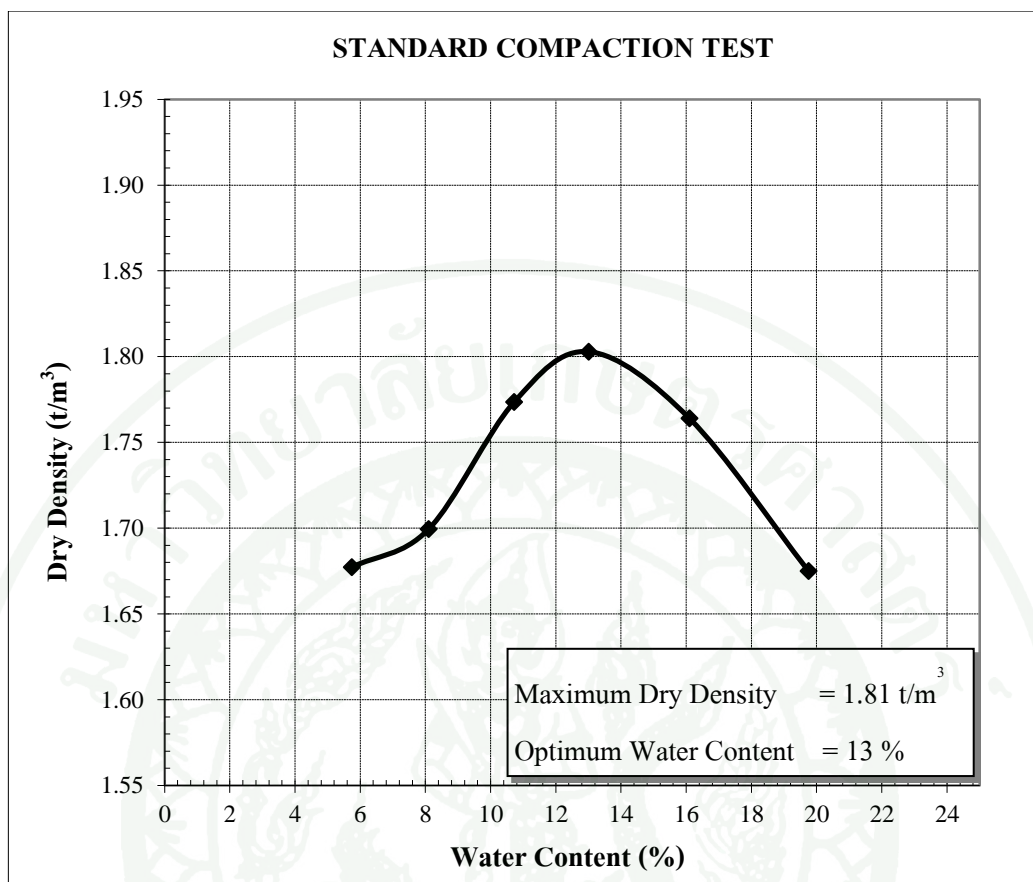
จากข้อมูลการกระจายตัวของเม็ดดิน พบว่าทรายที่ใช้ในการวิจัยสามารถจำแนกได้เป็น (SP) โดยระบบ (Unified Classification) เป็นทรายที่มีลักษณะขนาดคละกันไม่ดี (Poorly graded soil) เม็ดดินมีขนาดสม่ำเสมอเม็ดดินจะมีขนาดเดียวกันเป็นส่วนใหญ่ (Uniform graded) มีค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Coefficient of Uniformity, C_u) เท่ากับ 1.56 และสัมประสิทธิ์ความโค้งของกราฟ (Coefficient of Curvature, C_c) เท่ากับ 0.79 ดังแสดงในภาพที่ 38



ภาพที่ 38 กราฟการกระจายตัวของเม็ดดินของทรายที่เป็นวัสดุทดสอบ

3.1.2 การทดสอบหาความหนาแน่น (Compaction Test) ของทรายที่ใช้เป็นวัสดุทดสอบ

จากการทดสอบความหนาแน่นแบบมาตรฐาน (Standard Proctor Compaction Test) พบว่าทรายมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, γ_{dmax}) เท่ากับ 1.81 ตันต่อลูกบาศก์เมตรและค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่เหมาะสม (Optimum water content) ประมาณ 13 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงในภาพที่ 39 และภาพที่ 40 แสดงลักษณะของทรายที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ 39 กราฟการบดอัด (Compaction curve) ของทรายที่เป็นวัสดุทดสอบ



ภาพที่ 40 ลักษณะของทรายที่เป็นวัสดุทดสอบ

3.1.3 การทดสอบหาความซึมผ่านน้ำ (Coefficient of Permeability) ของมวลรวมที่ใช้เป็นวัสดุทดสอบ

ผลการทดสอบคุณสมบัติการซึมผ่านน้ำเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ แสดงในตารางที่ 2 ในการวิจัยครั้งนี้ทำการบดอัดทรายที่ความหนาแน่น 1.54 ตัน/เมตร³ การคำนวณความเร็วของการไหลซึมของของเหลวผ่านตัวกลางพรุน (เช่นมวลดิน) สามารถพิจารณาได้จากกฎของดาร์ซี (Darcy law) โดยจะเป็นปฏิภาคกลับกับความชันทางชลศาสตร์ (Hydraulic Gradient) ตามสมการที่ 4 และภาพที่ 41 แสดงอุปกรณ์ทดสอบการซึมผ่านน้ำ

$$v \propto i$$

$$v = ki \quad (4)$$

$$Q = vA \quad (5)$$

ดังนั้น

$$Q = kiA \quad (6)$$

โดยที่ Q คือ อัตราการไหลของน้ำ, เซนติเมตร³/วินาที

v คือ ความเร็วของการไหลซึม, เซนติเมตร/วินาที

k คือ ค่าความซึมผ่านของดิน, เซนติเมตร/วินาที

i คือ ความชันทางชลศาสตร์ มีค่าเท่ากับ $\frac{h}{L}$

A คือ พื้นที่หน้าตัดดินที่น้ำไหลผ่าน, เซนติเมตร²

เมื่อแทนค่า i แล้วหาค่า Permeability, k ในเทอมตัวแปรต่างๆจะได้

$$k = \frac{qL}{Ah} \quad (7)$$

โดยที่ k คือ อัตราการไหลของน้ำผ่านมวลดิน, เซนติเมตร/วินาที

q คือ ปริมาณน้ำที่วัดระหว่างทดสอบ, เซนติเมตร³/วินาที

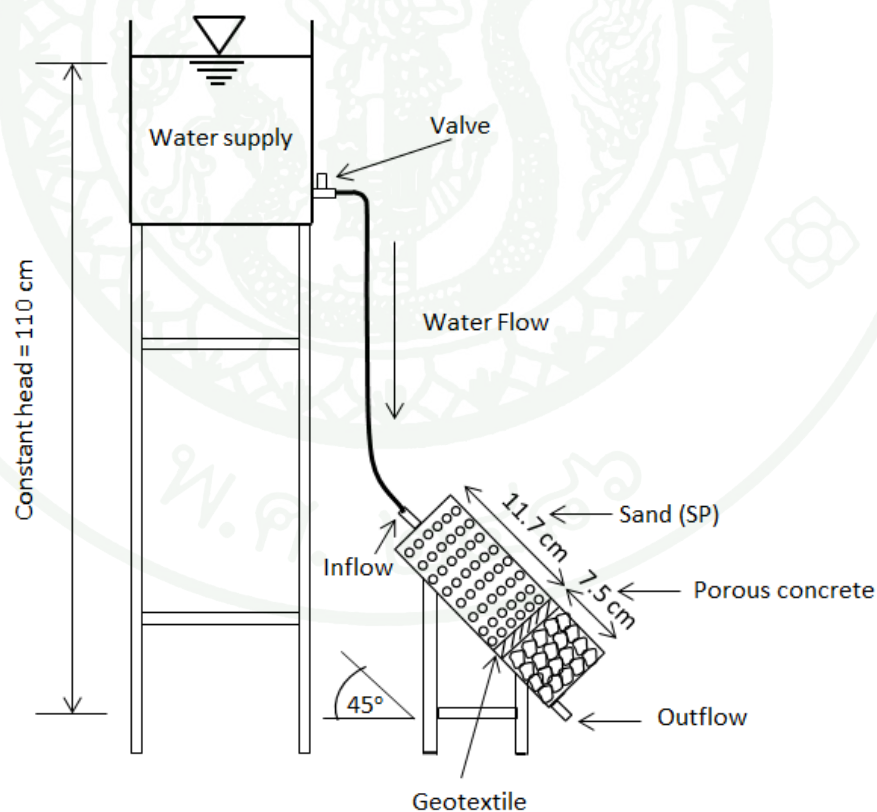
L คือ ความยาวของตัวอย่าง, เซนติเมตร

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดิน, เช่นติเมตร²

h คือ ความต่างของระดับน้ำ, เช่นติเมตร

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบคุณสมบัติการซึมผ่านน้ำเบื้องต้นของวัสดุทดสอบ

วัสดุทดสอบ	ค่าความซึมผ่านน้ำ, k (ชม./วินาที)	อัตราการไหลเริ่มต้น (ชม. ³ /วินาที/ชม. ²)
ทรายบดอัดที่ γ_d max เท่ากับ 1.8 ตัน/เมตร ³	1.66×10^{-3}	1.54×10^{-2}
ทรายบดอัดที่ γ_d เท่ากับ 1.54 ตัน/เมตร ³	9.99×10^{-3}	9.32×10^{-2}
มวลรวมขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 4	2.01×10^{-2}	29×10^{-2}
มวลรวมขนาด 3/8 นิ้ว	2.28×10^{-2}	33×10^{-2}
มวลรวมสองชั้น	2.10×10^{-2}	31×10^{-2}



ภาพที่ 41 Diagram อุปกรณ์ทดสอบความซึมผ่านของน้ำ (Permeability Testing)

3.1.4 การเลือกและออกแบบวัสดุกรอง

งานวิจัยนี้เลือกและออกแบบวัสดุใยสังเคราะห์ Geotextile แบบ Non-woven สำหรับเป็นวัสดุการระบายน้ำ เพื่อให้สามารถไหลได้ทันพอที่จะไม่ทำให้เกิด Piping แต่จะต้องกรองอนุภาคของเม็ดดินไม่ให้หลุดร่อนออกไป Geotextile ที่ใช้ในงานวิจัย แสดงในภาพที่ 42 อัตราการไหลสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 7 และข้อกำหนดการออกแบบสำหรับการกรองแสดงในตารางที่ 3



ภาพที่ 42 วัสดุใยสังเคราะห์ชนิด Geotextile ที่ใช้ในการทดสอบการกรอง

$$\psi = \frac{k_n}{t} \quad (8)$$

โดยที่ ψ คือ ค่า Permittivity

k_n คือ ค่า สปส.ความซึมน้ำในทิศทางตั้งฉากกับการไหล

t คือ ความหนาของตัวอย่าง

$$\psi_{\text{allow}} = \psi_{\text{ult}} \left(\frac{1}{FS_{\text{SCB}} \times FS_{\text{CR}} \times FS_{\text{IN}} \times FS_{\text{CC}} \times FS_{\text{BC}}} \right) \quad (9)$$

โดยที่ ψ_{allow} คือ ค่า สปส.ความซึมน้ำในทิศทางตั้งฉากที่ยอมให้

Ψ_{ult}	คือ	ค่า สปส.ความชื้นน้ำในทิศตั้งฉากสูงสุด
FS _{SCB}	คือ	ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการอุดคั่น
FS _{CR}	คือ	ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการล้า
FS _{IN}	คือ	ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการอุดคั่นของวัสดุ
FS _{CC}	คือ	ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการอุดคั่นของสารเคมี
FS _{BC}	คือ	ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อการอุดคั่นของสารเคมี

ตารางที่ 3 เกณฑ์กำหนดสำหรับออกแบบการกรอง (Existing Geotextile Retention Criteria)

Source	Criterion	Remarks
Task Force #25 (1986)	$50\% \leq 0.074 \text{ mm}, O_{95} < 0.59 \text{ mm}$ $50\% > 0.074 \text{ mm}, O_{95} < 0.30 \text{ mm}$	No limitation on geotextile type or soil type
Giroud (1982, 1988)	$O_{95}/D_{50} \leq (9-18)/C_U$	Dependent on soil type and C_U
Carroll (1983)	$O_{95}/D_{85} \leq 2-3$	Wovens and nonwovens
Ogink (1975)	$O_{95}/D_{90} \leq 1$	Woven
	$O_{95}/D_{90} \leq 1.8$	Non-woven
Holtz et al. (1998)	$O_{95}/D_{85} \leq 1.0$	$1 < C_U < 2; D_{50} > 74 \text{ mm}$
	$O_{95}/D_{85} \leq 1.8$	$1 < C_U < 2; D_{50} < 74 \text{ mm}$
	$O_{95}/D_{85} \leq 1-2$	$2 < C_U < 2; D_{50} > 74 \text{ mm}$
	$O_{95}/D_{85} \leq 1.8$	$2 < C_U < 2; D_{50} < 74 \text{ mm}$

ที่มา: Fischer et al. (1990); Christopher et al. (1993); Holtz et al. (1998)

3.2 การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงตัดของคอนกรีตพูน (Modulus of Rupture)

การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงตัดเป็นการหาค่าโมดูลัสการแตกร้าวและพฤติกรรมการวิบัติของคอนกรีตพูน ในแบบขนาดกว้าง 15 ซม. x ยาว 50 ซม. x หนา 7.5 ซม. ดังแสดงในภาพที่ 43 ตัวอย่างประกอบด้วยแผ่นคอนกรีตพูนปกติที่ไม่มีการเสริมวัสดุใยสังเคราะห์ และแผ่นคอนกรีตพูนที่มีการเสริมแรงด้วยวัสดุใยสังเคราะห์ชนิด Geogrid และวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงชนิด Fiberglass ขนาดกว้าง 12 ซม. และยาว 92.5 ซม. ดังแสดงในภาพที่ 44 ภาพที่ 45

โดยมีการหล่อแผ่นตัวอย่างทดสอบ 3 ชนิด ได้แก่ มวลรวมขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 4 มวลรวมขนาด 3/8 นิ้ว และแผ่นคอนกรีตพรุนสองชั้นที่มีมวลรวมขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 4 และมวลรวมขนาด 3/8 นิ้วอย่างละครึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 46 ถึง ภาพที่ 48 วิธีการหล่อมวลรวมสองชั้น ทำได้โดยการหล่อมวลรวมขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 4 ที่มีขนาดเล็กกว่าอยู่ด้านล่างและมวลรวมขนาด 3/8 นิ้วที่มีขนาดใหญ่กว่าอยู่ด้านบน โดยที่มีตัวอย่างทดสอบจำนวนทั้งสิ้น 108 ตัวอย่าง บ่มที่อายุ 7 วัน 14 วัน 28 วันและ 90 วัน ดังแสดงในภาพที่ 49 และ Diagram แสดงในภาพผนวกที่ ก1-ก4 เมื่อครบอายุการบ่มจึงนำคอนกรีตพรุนมาฝังให้แห้งในอากาศ ก่อนทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดโดยใช้วิธีกดคาน 2 จุด ซึ่งกำหนดตำแหน่งของจุดทั้งสองเป็นตำแหน่งที่แบ่งคานออกเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กัน (Third-Point Loading) ที่ระยะห่างจุดรองรับ 40 ซม.ตามมาตรฐาน ASTM Standard C78-02 ดังแสดงในภาพที่ 50 และทำการบันทึกภาพถ่ายเคลื่อนไหวและภาพนิ่งในระหว่างการทดสอบเพื่อสังเกตพฤติกรรมการแอ่นตัว (ductility) จนกระทั่งตัวอย่างคอนกรีตพรุนเกิดการวิบัติ

3.2.1 การคำนวณค่าโมดูลัสของการแตกหัก (Modulus of Rupture, R) เมื่อรอยแตกอยู่ในช่วงกลางคาน

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (10)$$

3.2.1 การคำนวณค่าโมดูลัสของการแตกหัก (Modulus of Rupture, R) เมื่อรอยแตกอยู่นอกช่วงกลางคาน และห่างจากช่วงกลางไม่เกินร้อยละ 5 ของช่วงคาน

$$R = \frac{3Pa}{bd^2} \quad (11)$$

โดยที่ R คือ ค่าการรับแรงดัด เป็น เมกาปาสกาล

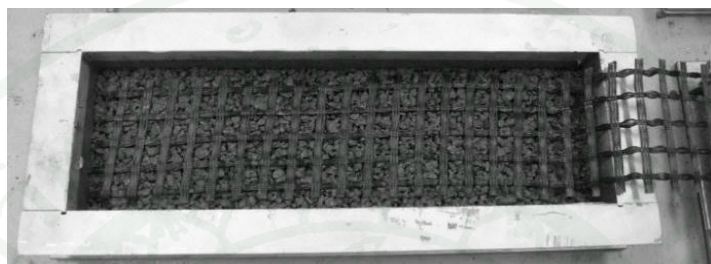
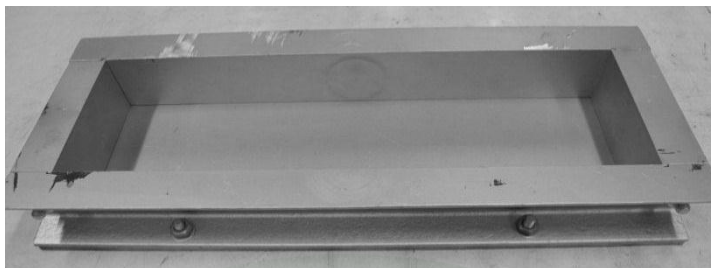
P คือ แรงสูงสุดที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบเป็นนิวตัน

L คือ ช่วงคาน เป็น มิลลิเมตร

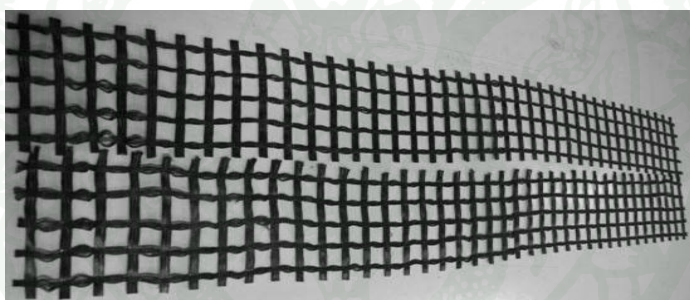
b คือ ความกว้างเฉลี่ยที่หน้าตัดบริเวณรอยแตก เป็น มิลลิเมตร

d คือ ความลึกเฉลี่ยที่หน้าตัดบริเวณรอยแตกเป็นมิลลิเมตร

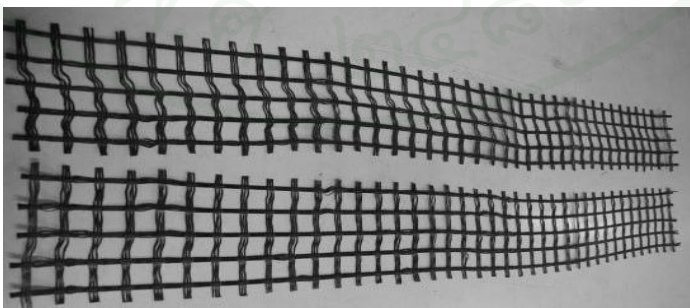
a คือ ระยะเฉลี่ยจากรอยแตกถึงฐานรองคานด้านใกล้ที่สุดเป็นมิลลิเมตร



ภาพที่ 43 แบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตขนาดกว้าง 15 ซม. x ยาว 50 ซม. x หนา 7.5 ซม.



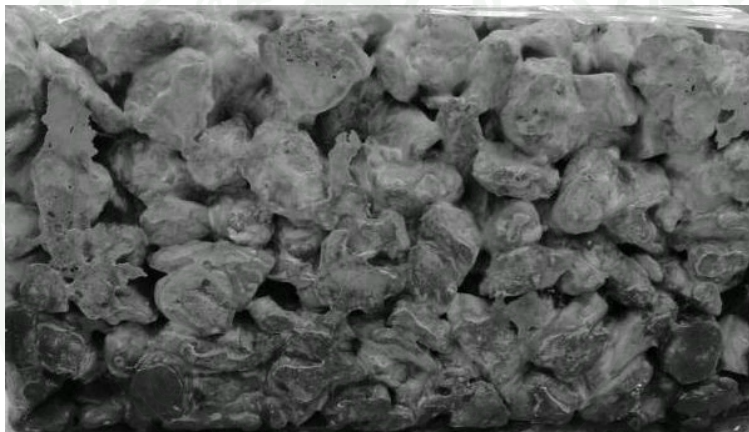
ภาพที่ 44 วัสดุใยสังเคราะห์ชนิด Geogrid ที่ใช้ในการทดสอบโดยการตัดให้ได้ขนาดกว้าง 12 ซม. และยาว 92.5 ซม.



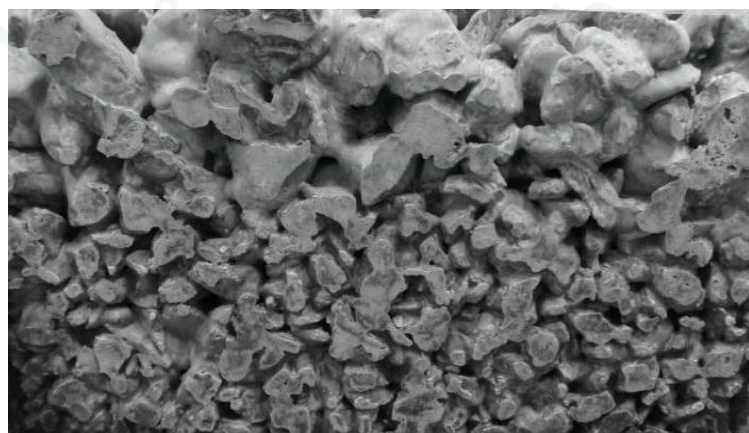
ภาพที่ 45 วัสดุใยสังเคราะห์ชนิด Fiberglass ที่ใช้ในการทดสอบโดยการตัดให้ได้ขนาดกว้าง 12 ซม. และยาว 92.5 ซม.



ภาพที่ 46 ลักษณะคอนกรีตพูนมวลรวมขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 4



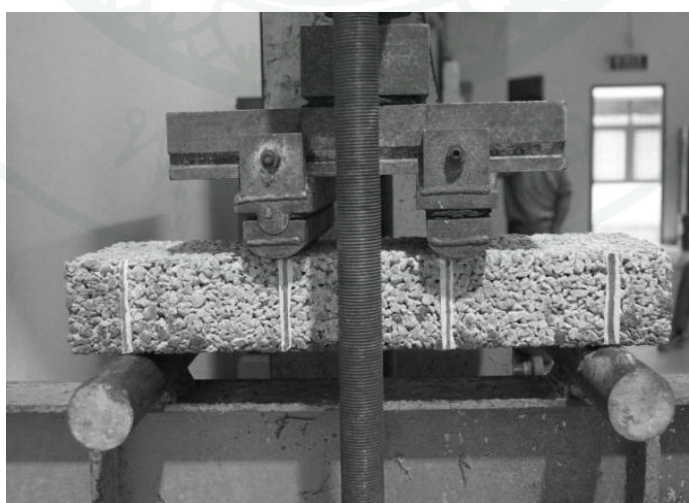
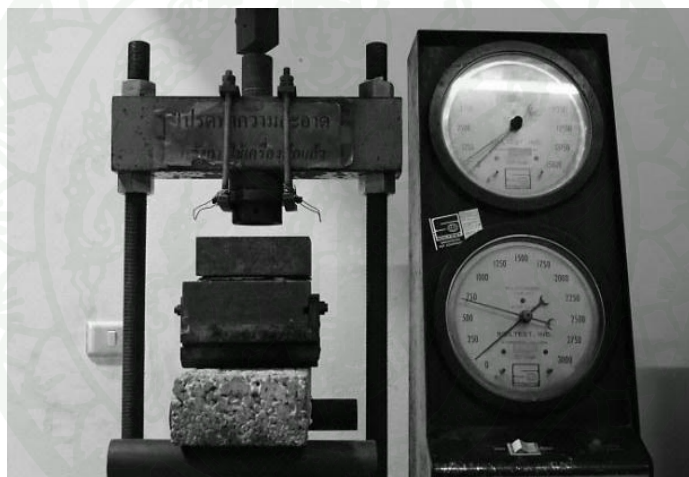
ภาพที่ 47 ลักษณะคอนกรีตพูนมวลรวมขนาด 3/8 นิ้ว



ภาพที่ 48 ลักษณะคอนกรีตพูนมวลรวมสองชั้น



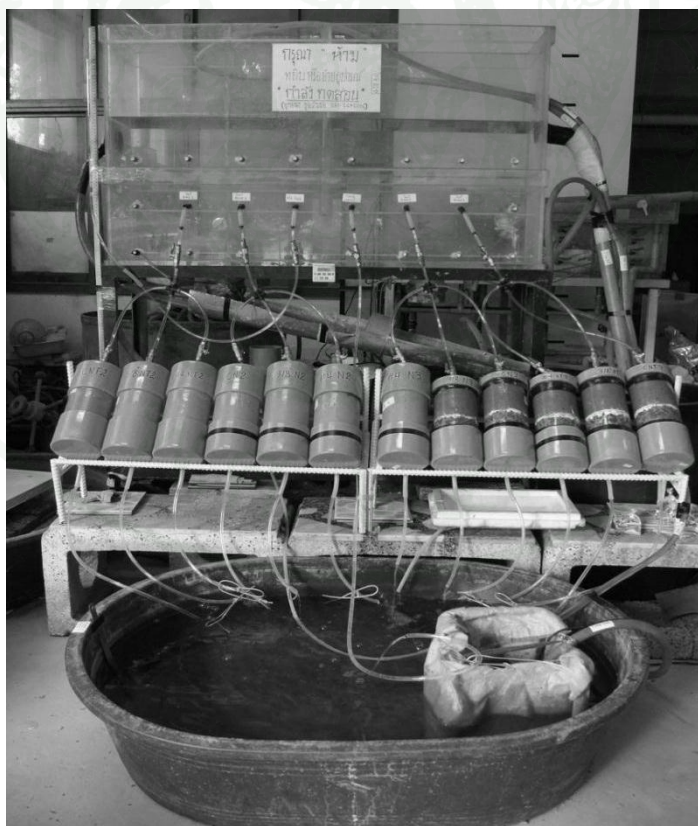
ภาพที่ 49 การบ่มคอนกรีตพูนตามอายุก่อนการทดสอบกำลังรับแรงดัด



ภาพที่ 50 อุปกรณ์ทดสอบกำลังรับแรงดัดแบบกดสองจุด (Third-Point Loading Testing)

3.3 การทดสอบคุณสมบัติด้านการกรองและค่าความซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพรุน (Filtration and Permeability Test)

เป็นการทดสอบหาอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านวัสดุทดสอบประเภทดินทรายซึ่งมีคอนกรีตพรุนเป็นวัสดุกรองและนำวัสดุใยสังเคราะห์ประเภท Geotextile มาประยุกต์ใช้งานร่วมกับคอนกรีตพรุนที่ระยะเวลาการทดสอบ 56 วัน และทำการหาเปอร์เซ็นต์ปริมาณอนุภาคของทรายที่สูญเสียระหว่างการทดสอบที่ 7 วัน 28 วันและ 56 วัน สังกัดสีของน้ำที่ไหลออกมา และวัดค่าความชุ่มของน้ำ ณ ช่วงเวลาต่างๆ โดยที่มีตัวอย่างทดสอบทั้งสิ้น 18 ตัวอย่าง การทดสอบ Permeability Test ใช้วิธี Constant Head ที่มีความสูง 110 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 51 ในการทดสอบจะปล่อยให้ให้น้ำไหลผ่านตัวอย่างตลอดเวลา โดยที่ตัวอย่างทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.16 เซนติเมตร สูง 19.2 เซนติเมตร แบ่งเป็นทรายหนา 11.7 เซนติเมตร และคอนกรีตพรุนหนา 7.5 เซนติเมตร โดยการทดสอบทำให้ตัวอย่างเอียง 45 องศา ซึ่งมีขั้นตอนวิธีการในการทดสอบดังต่อไปนี้



ภาพที่ 51 การทดสอบการซึมผ่านของน้ำแบบ Constant Head

3.3.1 การผลิตตัวอย่างคอนกรีตพูน

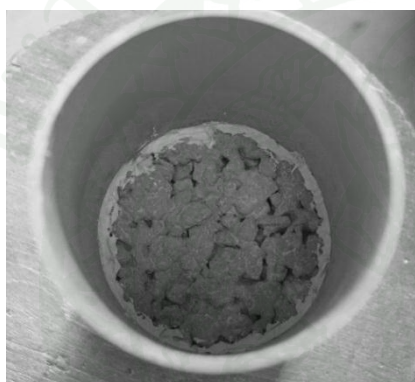
วัสดุในการผลิตตัวอย่างคอนกรีตพูนประกอบด้วยมวลรวมขนาดข้างตะแกรงเบอร์ 4 มวลรวม 3/8 นิ้ว และมวลรวมสองชั้น ทำได้โดยการหล่อคอนกรีตพูนในแบบหล่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.16 เซนติเมตร สูง 19.2 เซนติเมตร โดยที่หล่อคอนกรีตพูนให้หนา 7.5 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 52 และบ่มในน้ำเป็นระยะเวลา 14 วัน ก่อนการทดสอบ



ภาพที่ 52 การหล่อตัวอย่างคอนกรีตพูนสำหรับการทดสอบ

3.3.2 การประกอบ Geotextile และการบดอัดทรายลงในแบบหล่อตัวอย่าง

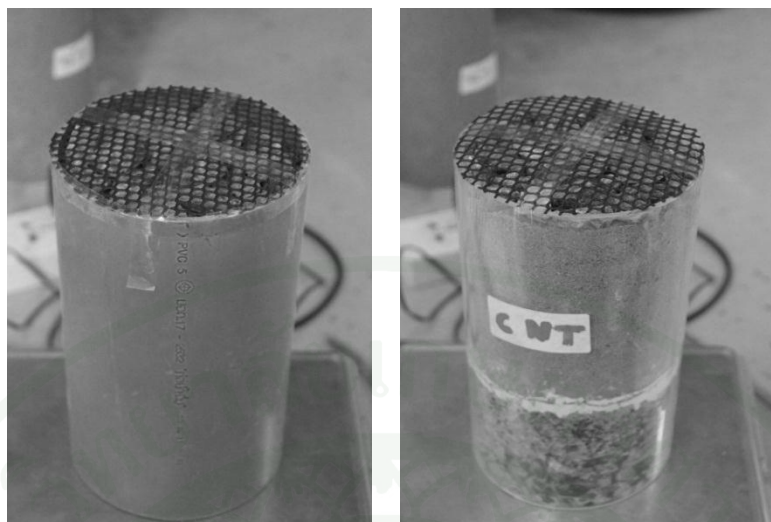
ตัดแผ่น Geotextile เป็นวงกลมแล้วประกอบเข้ากับแบบหล่อคอนกรีตพูน จากนั้นใช้กาวซิลิโคนติดรอบๆ เพื่อป้องกันการรั่วออกด้านข้าง ดังแสดงในภาพที่ 53 บดอัดทรายลงในแบบหล่อคอนกรีตพูนที่มีความหนาแน่นแห้ง 1.54 ตัน/ลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในภาพที่ 53 ปิดด้านบนด้วยเม็ดกรวดและวางตาข่ายครอบไว้ เพื่อป้องกันการกัดเซาะจากน้ำในระหว่างการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 55 เมื่อเสร็จสิ้นแล้วจึงนำพาที่เตรียมไว้ปิดด้านบนโดยการทากาวให้สนิท เพื่อป้องกันน้ำที่จะซึมออกบริเวณรอยต่อระหว่างแบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตพูนและฝาปิดด้านบน รอนกาวแห้งประมาณ 24 ชั่วโมงจึงจะสามารถนำตัวอย่างไปทดสอบการกรองและการซึมผ่านของน้ำได้ ดังแสดงในภาพที่ 56



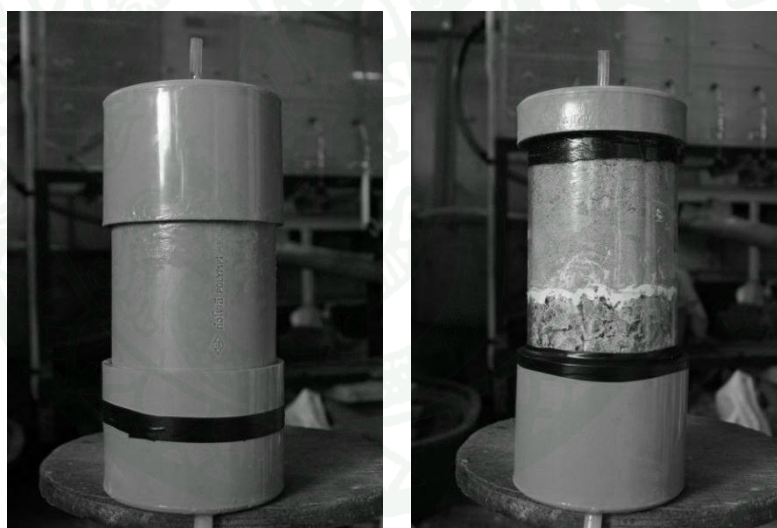
ภาพที่ 53 การประกอบ Geotextile เข้ากับแบบหล่อตัวอย่างคอนกรีตพูน



ภาพที่ 54 การบดอัดทรายลงในแบบหล่อคอนกรีตพูนที่ความหนาแน่น 1.54 ตัน/เมตร³



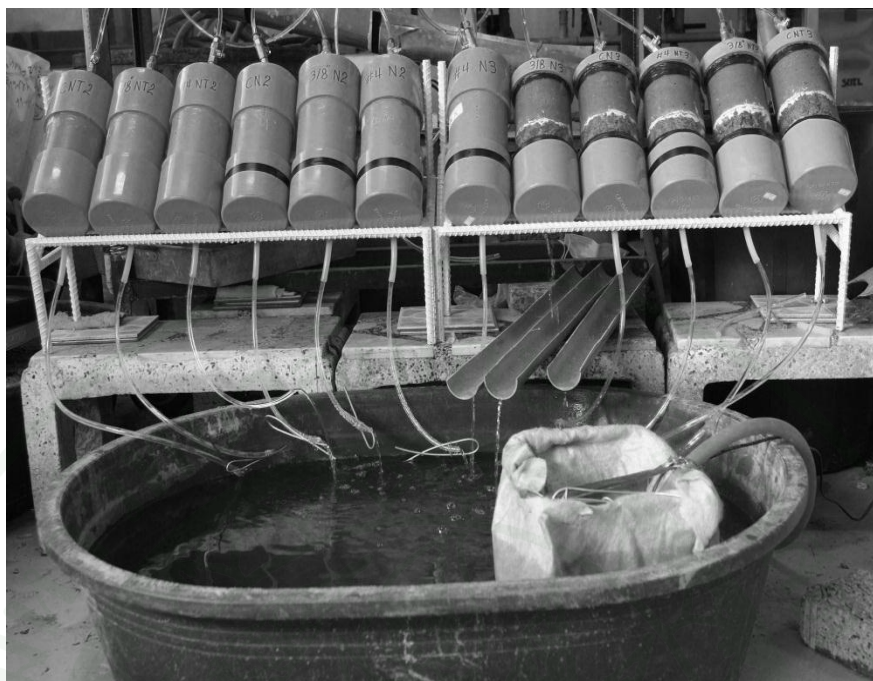
ภาพที่ 55 การปิดด้านบนด้วยเม็ดกรวดและครอบอีกทีด้วยตาข่ายเพื่อป้องกันการกักเซาะจากน้ำ



ภาพที่ 56 ตัวอย่างทดสอบหลังจากปิดฝาด้านบนและทากาวปิดให้สนิท

3.3.3 การวัดค่าทดสอบการกรองและการซึมผ่านน้ำ

การวัดค่าประกอบด้วยการวัดอัตราการไหล (Flow rate) เทียบกับเวลา ซึ่งในช่วง 7 วันแรก ทำการวัดค่าวันละ 2 ครั้งหลังจากนั้นจึงลดลงเหลือวันละ 1 ครั้งจนครบ 56 วัน ดังแสดงในภาพที่ 57



ภาพที่ 57 การทดสอบการกรองและการซึมผ่านของน้ำที่ระยะเวลาต่างๆ

3.3.4 การทดสอบวัดค่าความขุ่น (Turbidity Test)

ค่าความขุ่นของน้ำ คือความสามารถของน้ำที่สกัดกั้นหรือดูดซับปริมาณแสงที่ส่องผ่านไว้ได้ สิ่งที่ทำให้น้ำขุ่น ได้แก่ อินทรีย์และอนินทรีย์สารในน้ำ ตลอดจนสิ่งมีชีวิตเล็ก ๆ โดยปรากฏอยู่ในลักษณะสารแขวนลอย เช่น อนุภาคของดิน ทราย แพลงก์ตอน แบคทีเรีย เป็นต้น ระหว่างการทดสอบทำการวัดค่าความขุ่นของน้ำ Turbidity Test ในหน่วย NTU (Nephelometric Turbidity Units) และสังเกตสีของตะกอนทรายที่ไหลผ่านคอนกรีตพูน โดยในวันแรกทำการวัดค่าที่ 1 นาที 5 นาที 1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง 6 ชั่วโมง 12 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ จากนั้นวัดค่าความขุ่นมีค่าคงที่ จากนั้นวัดค่าทุกๆ 7 วัน อุปกรณ์วัดค่าความขุ่น (Turbidity meter) แสดงในภาพที่ 58



ภาพที่ 58 อุปกรณ์การทดสอบค่าความขุ่น (Turbidity meter)

สถานที่ทำการวิจัย

1. ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ
2. ห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ
3. ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ

ระยะเวลาในการทำวิจัย

งานวิจัยนี้เริ่มตั้งแต่ พฤษภาคม 2555 ถึง กุมภาพันธ์ 2556

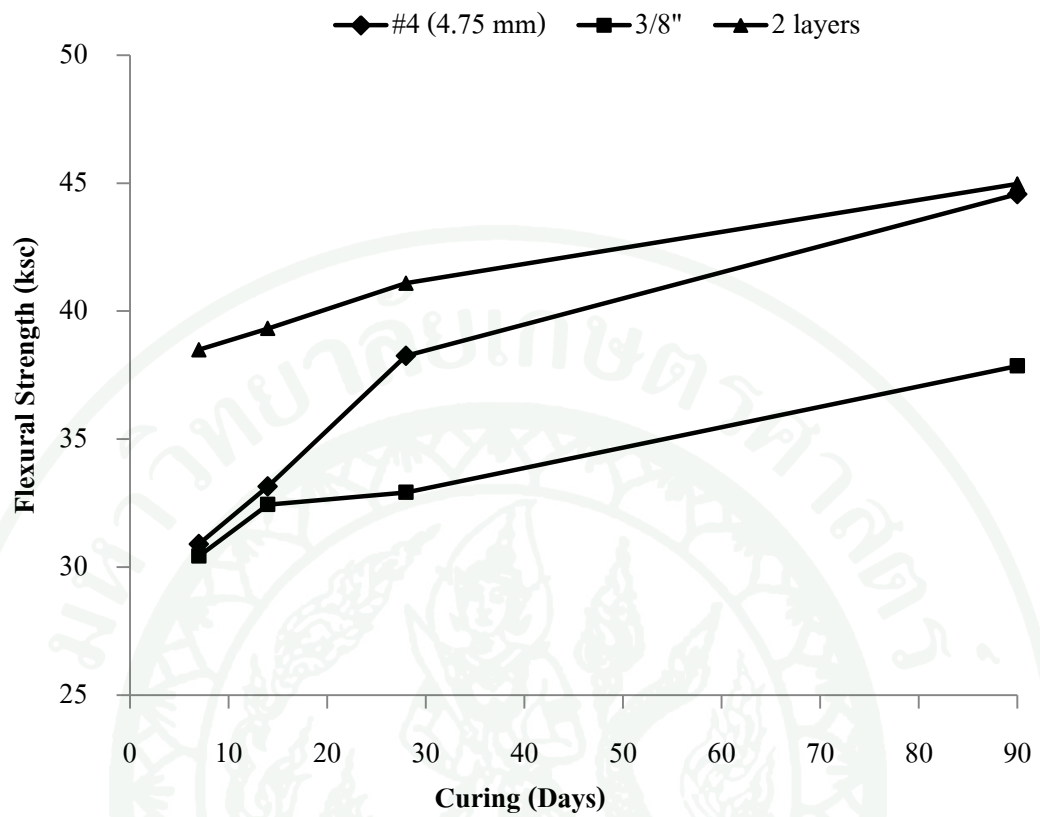
ผลและวิจารณ์

คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม

1. ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดและพฤติกรรมการวิบัติของคอนกรีตพูน

1.1 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนที่ไม่เสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรง

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดและจากการวิเคราะห์ภาพถ่ายเคลื่อนไหวระหว่างการทดสอบเพื่อสังเกตลักษณะการวิบัติของคอนกรีตพูนปกติที่ไม่มีการเสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงที่อายุการบ่ม 7 วัน 14 วัน 28 วัน และ 90 วัน พบว่าคอนกรีตพูนมีค่ากำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามอายุการบ่ม มวลรวมขนาด #4 และ 3/8 นิ้ว ให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่ใกล้เคียงกัน ส่วนมวลรวมสองชั้นจะให้ค่ากำลังต้านทานแรงดัดที่สูงกว่าที่อายุการบ่มเดียวกัน ที่อายุการบ่ม 28 วัน มวลรวมสองชั้นมีค่ากำลังต้านทานแรงดัดประมาณ 41.09 กิโลกรัม/เซนติเมตร² ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ ถนัดกิจและคณะ (2551) ที่พบว่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าประมาณ 38 กิโลกรัม/เซนติเมตร² และที่อายุการบ่ม 90 วันพบว่ามวลรวมขนาด #4 มีแนวโน้มให้กำลังใกล้เคียงกับมวลรวมสองชั้นซึ่งมีค่าประมาณ 45 กิโลกรัม/เซนติเมตร² ส่วนมวลรวมขนาด 3/8 นิ้ว มีแนวโน้มให้ค่ากำลังรับแรงดัดต่ำสุด ดังแสดงในภาพที่ 59 เมื่อสังเกตพฤติกรรมการวิบัติของคอนกรีตพูนปกติที่ไม่มีการเสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรง พบว่ามีลักษณะคล้ายกันทุกๆมวลรวมกล่าวคือ หลังจากแผ่นคอนกรีตพูนรับน้ำหนักถึงจุดวิบัติคอนกรีตพูนจะแตกหักและแยกออกจากกันทันที สามารถสังเกตเห็นจากรอยแตกจากด้านล่างตรงกึ่งกลางคานภายนอกได้อย่างชัดเจน ซึ่งถือว่ามีความเสี่ยงในเรื่องความปลอดภัยหากนำไปประยุกต์ใช้งาน ดังแสดงในภาพที่ 60



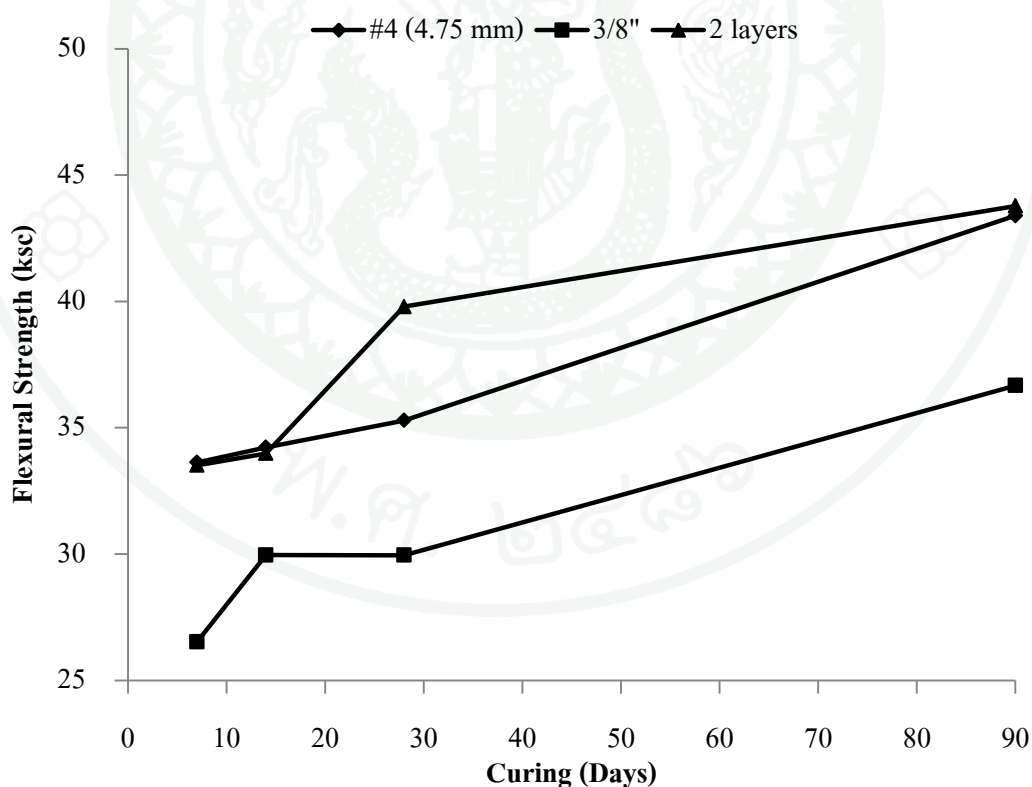
ภาพที่ 59 กำลังรับแรงค้ำของคอนกรีตพูนที่ไม่เสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงตามอายุการบ่ม



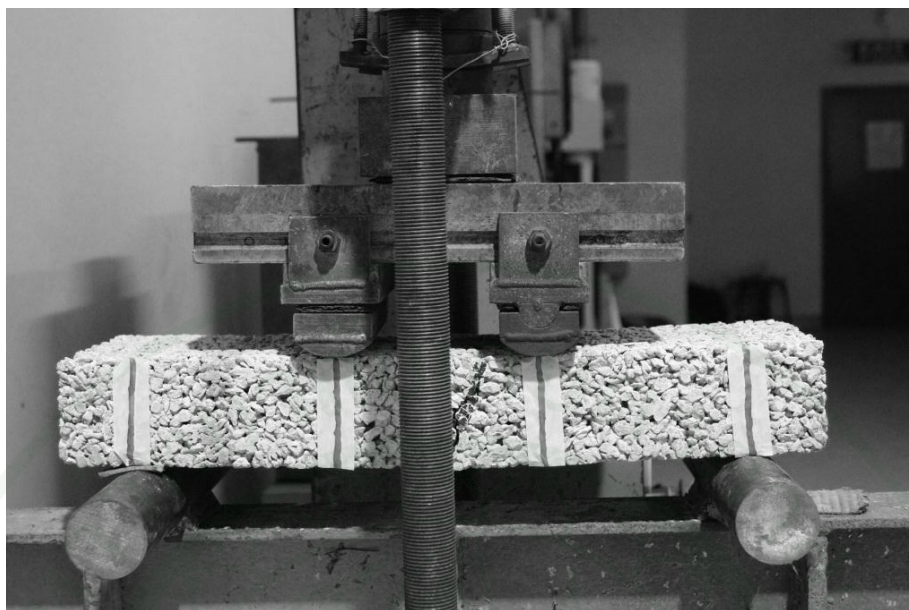
ภาพที่ 60 พฤติกรรมการวิบัติของคอนกรีตพูนที่ไม่เสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรง

1.2 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนที่เสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงชนิด Fiberglass

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดและลักษณะของคอนกรีตพูนที่มีการเสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงชนิด Fiberglass ที่อายุการบ่ม 7 วัน 14 วัน 28 วัน และ 90 วัน พบว่าค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยที่มวลรวมขนาด #4 และมวลรวมสองชั้น มีค่าการพัฒนากำลังต้านทานแรงดัดที่ใกล้เคียงกันตามอายุการบ่ม ส่วนมวลรวมที่ 3/8 นิ้ว จะให้ค่ากำลังรับแรงดัดต่ำกว่าอย่างชัดเจนที่อายุการบ่มเดียวกัน ที่อายุบ่มการ 90 วันมวลรวมสองชั้นมีค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดประมาณ 44 กิโลกรัม/เซนติเมตร² ดังแสดงในภาพที่ 61 เมื่อสังเกตพฤติกรรมการวิบัติของคอนกรีตพูนที่มีการเสริมวัสดุใยสังเคราะห์ชนิด Fiberglass พบว่ามีลักษณะคล้ายกันในทุกๆตัวอย่าง กล่าวคือหลังจากรับน้ำหนักถึงจุดวิบัติแล้ว แผ่นคอนกรีตพูนยังคงมีสภาพเชื่อมติดกัน มีการเสยรูปที่น้อยมาก ไม่มีการแตกหักและแยกออกแบบทันทีทันใด เหมือนอย่างกรณีคอนกรีตพูนปกติ ดังแสดงในภาพที่ 62



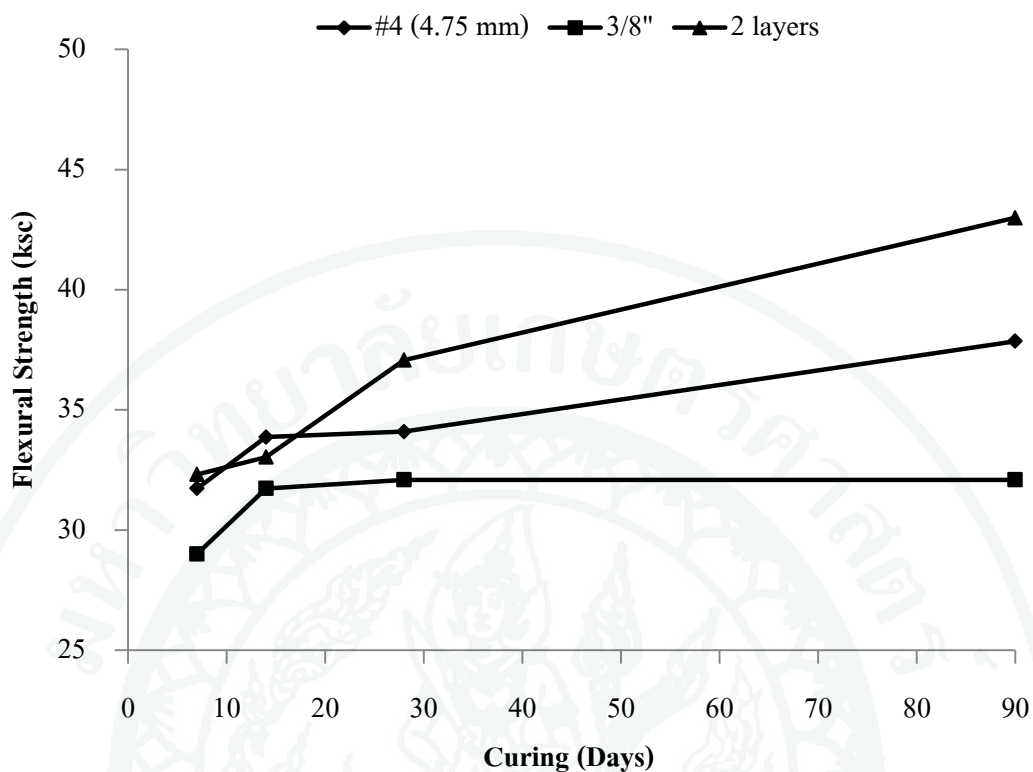
ภาพที่ 61 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนที่เสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงชนิด Fiberglass ตามอายุการบ่ม



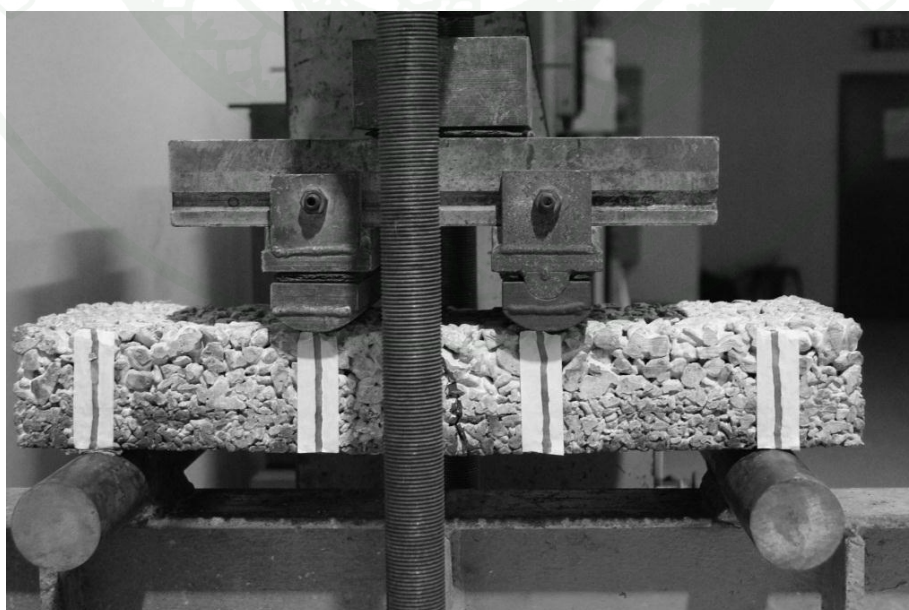
ภาพที่ 62 พฤติกรรมการวิบัติของคอนกรีตพูนที่เสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงชนิด Fiberglass

1.3 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนที่เสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงชนิด Geogrid

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดและลักษณะการวิบัติของคอนกรีตพูนที่มีการเสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงประเภท Geogrid ที่อายุการบ่ม 7, 14, 28 และ 90 วัน พบว่ามีความสอดคล้องกับการใช้วัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงประเภท Fiberglass โดยมีลักษณะการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานแรงดัดตามอายุการบ่ม แต่พบว่าที่อายุการบ่ม 90 วัน การเสริมวัสดุใยสังเคราะห์ชนิด Geogrid มีแนวโน้มให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่ต่ำกว่าการเสริมวัสดุใยสังเคราะห์ชนิด Fiberglass โดยที่อายุการบ่ม 90 วัน ในการเสริมเสริมวัสดุใยสังเคราะห์ชนิด Geogrid มวลรวมสองชั้นให้ค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดประมาณ 43 กิโลกรัม/เซนติเมตร² ดังแสดงในภาพที่ 63 และเมื่อสังเกตพฤติกรรมการวิบัติพบว่า มีลักษณะคล้ายกับการเสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงชนิด Fiberglass กล่าวคือการเสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงชนิด Geogrid หลังจากรับน้ำหนักถึงจุดวิบัติแล้ว แผ่นคอนกรีตพูนยังคงมีสภาพเชื่อมติดกันซึ่งยังมีความยืดหยุ่น ไม่มีการแตกหักและแยกออกแบบทันทีทันใด แสดงให้เห็นว่าการเสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงชนิด Geogrid และ Fiberglass สามารถช่วยปรับปรุง Ductility หรือความยืดหยุ่นของคอนกรีตพูนให้ดียิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตพูนปกติที่ไม่มีการเสริมวัสดุใยสังเคราะห์ ซึ่งจะทำให้มีความปลอดภัยมากขึ้นระหว่างการใช้งาน ดังแสดงในภาพที่ 64



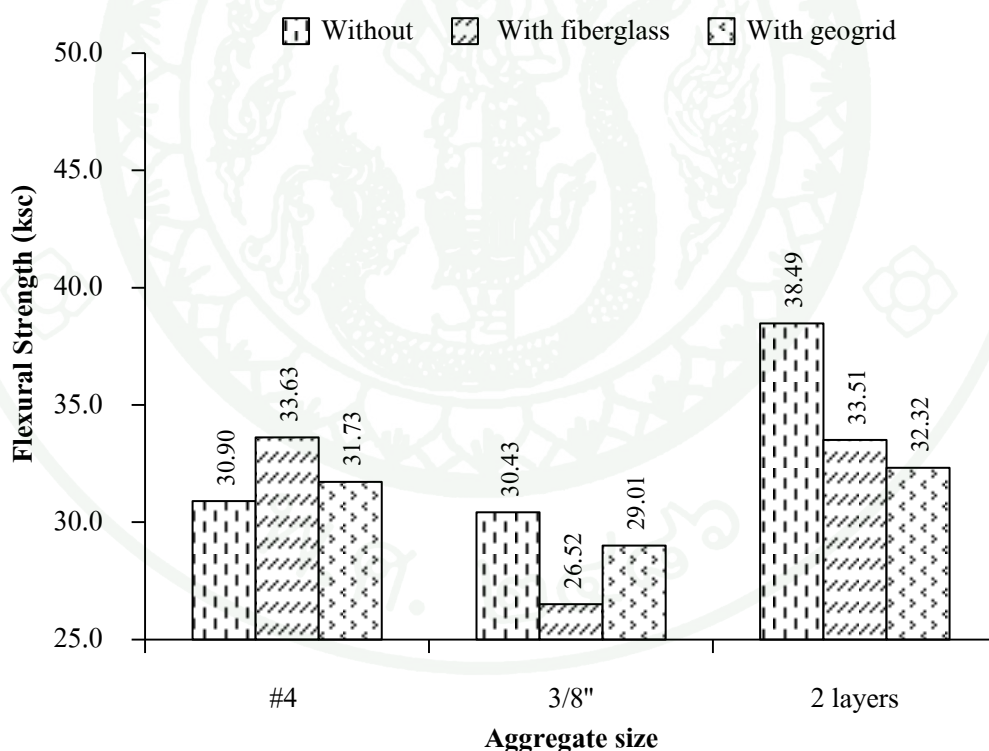
ภาพที่ 63 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนที่เสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงชนิด Geogrid ตามอายุการบ่ม



ภาพที่ 64 พฤติกรรมการวิบัติของคอนกรีตพูนที่เสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงชนิด Geogrid

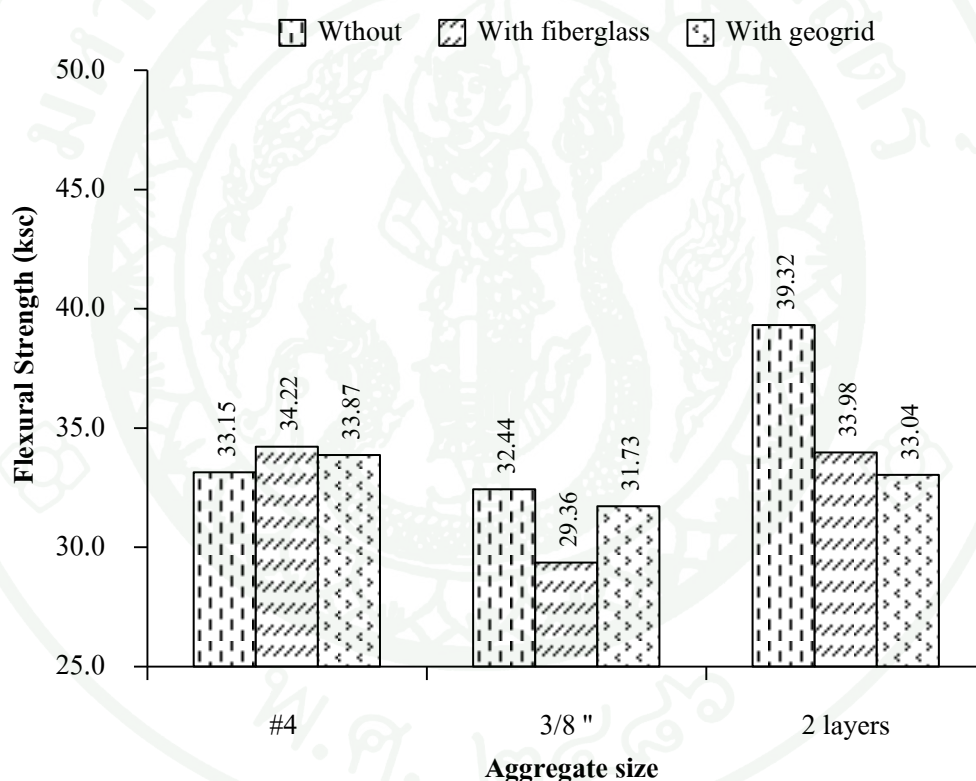
1.4 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนตามอายุการบ่ม

เมื่อพิจารณากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนที่อายุการบ่ม 7 วัน ดังแสดงในภาพที่ 65 พบว่ามวลรวมสองชั้นที่ไม่เสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงมีแนวโน้มให้กำลังดัดสูงสุดประมาณ 38.49 กิโลกรัม/เซนติเมตร² และเมื่อพิจารณาการเสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงในช่วง 7 วันพบว่ามวลรวมขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 4 และมวลรวมสองชั้นให้กำลังรับแรงดัดที่ใกล้เคียงกัน ส่วนมวลรวมขนาด 3/8 นิ้วให้กำลังรับแรงดัดที่ต่ำสุด เมื่อพิจารณาการเสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงพบว่าในช่วง 7 วันแรกพบว่าค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยประมาณ 2 ถึง 3 กิโลกรัม/เซนติเมตร² เมื่อเทียบกับคอนกรีตพูนปกติที่ไม่มีการเสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรง ยกเว้นมวลรวมขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 4 ที่ในช่วงอายุบ่ม 7 วัน การเสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงช่วยให้ค่ากำลังรับแรงดัดสูงขึ้นเล็กน้อย



ภาพที่ 65 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนแต่ละขนาดมวลรวมที่อายุการบ่ม 7 วัน

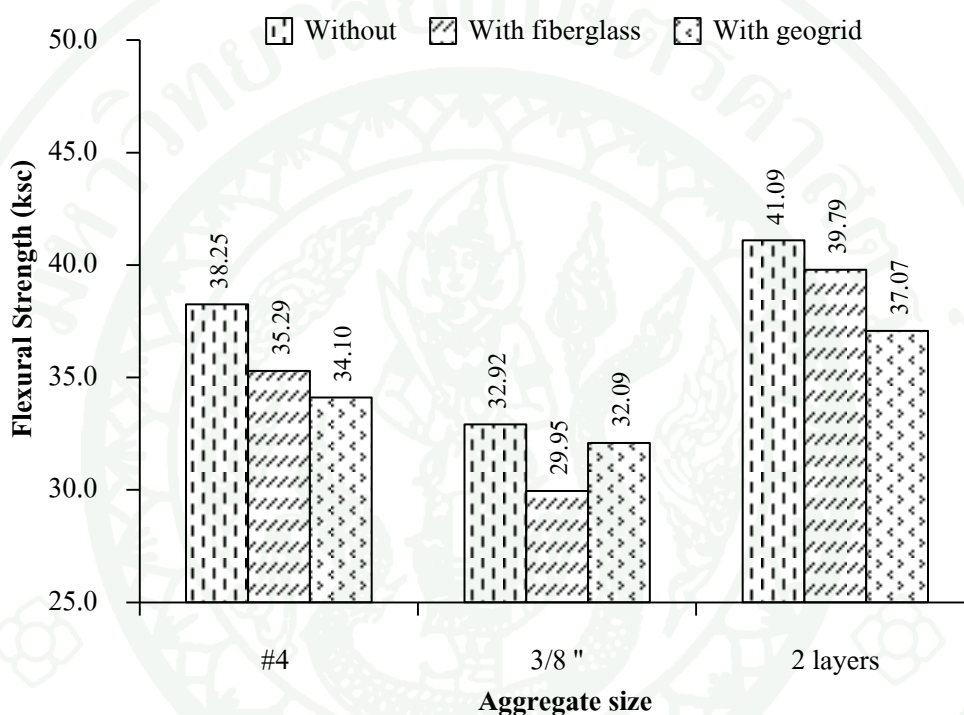
เมื่อพิจารณากำลังรับแรงค้ำของคอนกรีตพูนที่อายุการบ่ม 14 วัน ดังแสดงในภาพที่ 66 พบว่ามีพฤติกรรมคล้ายกับกำลังรับแรงค้ำของคอนกรีตพูนที่อายุบ่ม 7 วัน คือมวลรวมขนาดสองชั้นที่ไม่เสริมวัสดุสังเคราะห์มีแนวโน้มให้กำลังรับแรงค้ำที่สูงสุดประมาณ 39.32 กิโลกรัม/เซนติเมตร² และกำลังรับแรงค้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามอายุการบ่มจาก 7 วันเป็น 14 วัน ขณะที่กำลังรับแรงค้ำของคอนกรีตพูนมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเสริมวัสดุสังเคราะห์ที่เสริมแรง ยกเว้นมวลรวมขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 4 ที่การเสริมวัสดุสังเคราะห์เสริมแรงช่วยให้ค่ากำลังรับแรงค้ำสูงขึ้นเล็กน้อย โดยภาพรวมพฤติกรรมยังมีความแตกต่างไม่มากนักเมื่อเทียบกับคอนกรีตพูนที่มีอายุการบ่ม 7 วัน



ภาพที่ 66 กำลังรับแรงค้ำของคอนกรีตพูนแต่ละขนาดมวลรวมที่อายุการบ่ม 14 วัน

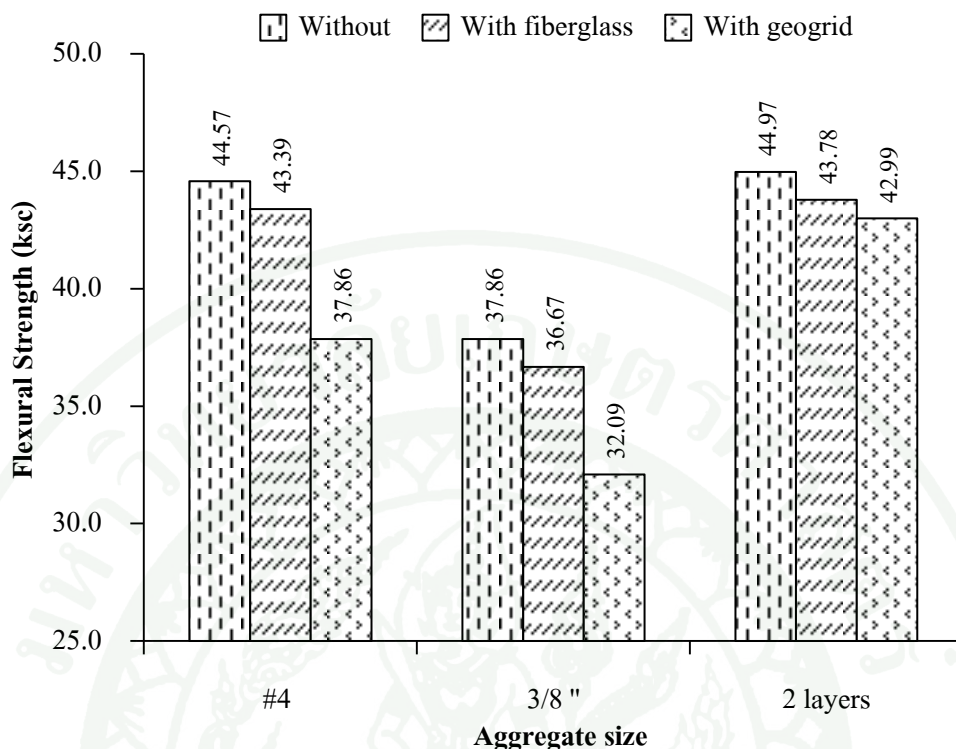
เมื่อพิจารณากำลังรับแรงค้ำของคอนกรีตพูนที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังแสดงในภาพที่ 67 พบว่ามีพฤติกรรมคล้ายกับกำลังรับแรงค้ำของคอนกรีตพูนที่อายุบ่ม 7 วันและ 14 วัน แต่มีความแตกต่างเล็กน้อยตรงที่มวลรวมขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 4 ที่ไม่เสริมวัสดุสังเคราะห์เสริมแรงมีแนวโน้มให้ค่ากำลังรับแรงค้ำที่สูงกว่าการเสริมวัสดุสังเคราะห์เสริมแรง ซึ่งแตกต่างจากอายุ

การบ่ม 7 วัน และ 14 วัน ที่การเสริมวัสดุสังเคราะห์เสริมแรงจะให้กำลังรับแรงดัดที่สูงกว่าการเสริมวัสดุสังเคราะห์เสริมแรง ขณะที่กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอายุการบ่ม โดยที่อายุการบ่ม 28 วัน มวลรวมสองชั้นมีแนวโน้มให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่สูงกว่ามวลรวมขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 4 และมวลรวมขนาด 3/8 นิ้ว ทั้งชนิดวัสดุสังเคราะห์เสริมแรงและไม่เสริมวัสดุสังเคราะห์เสริมแรง ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดประมาณ 41.09 กิโลกรัม/เซนติเมตร²



ภาพที่ 67 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนแต่ละขนาดมวลรวมที่อายุการบ่ม 28 วัน

เมื่อพิจารณากำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนที่อายุการบ่ม 90 วัน ดังแสดงในภาพที่ 68 พบว่ามีพฤติกรรมคล้ายกับกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนที่อายุบ่ม 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน คือทุกขนาดมวลรวมมีกำลังเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม มวลรวมขนาดสองชั้นมีแนวโน้มให้กำลังรับแรงดัดดีที่สุดประมาณ 45 กิโลกรัม/เซนติเมตร² จากการวิจัยพบอีกว่าที่อายุการบ่ม 90 วัน มวลรวมขนาด # 4 ให้ค่ากำลังรับแรงดัดที่ใกล้เคียงกับมวลรวมสองชั้นและการเสริม Fiberglass มีแนวโน้มให้กำลังรับแรงดัดที่ดีกว่าการเสริม Geogrid โดยที่มวลรวมขนาด 3/8 นิ้วมีแนวโน้มให้ค่ากำลังรับแรงดัดต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับมวลรวมขนาดอื่นๆ



ภาพที่ 68 กำลังรับแรงคัตของคอนกรีตพูนแต่ละขนาดมวลรวมที่อายุการบ่ม 90 วัน

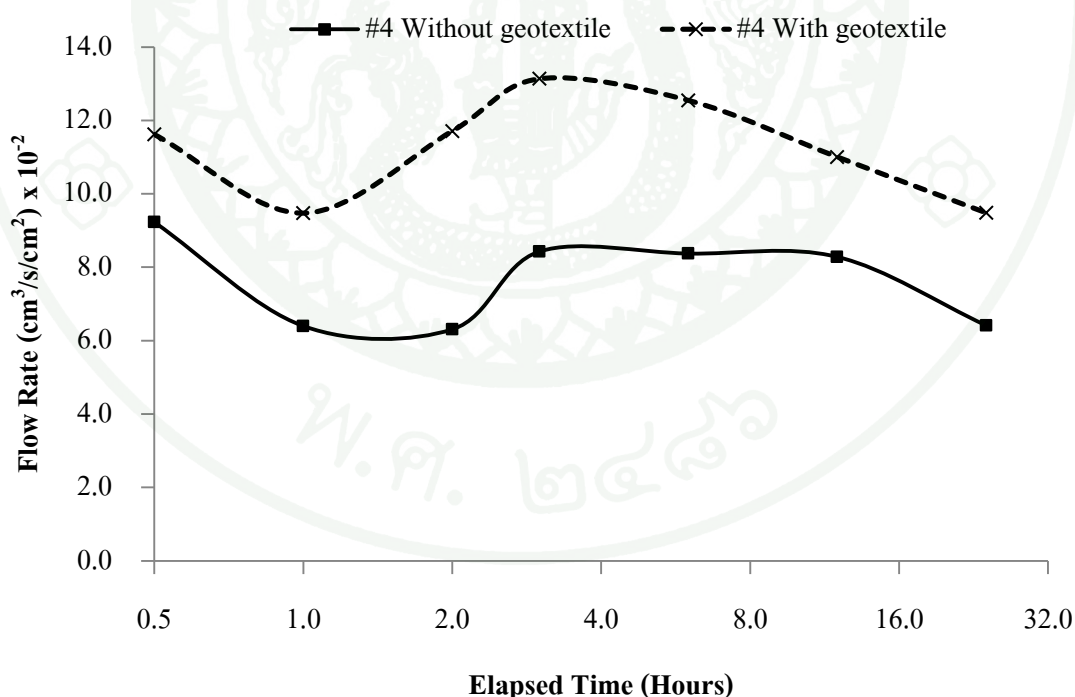
จากการวิเคราะห์ภาพรวมทั้งที่อายุการบ่ม 7 วัน 14 วัน 28 วัน และ 90 วันพบว่า มวลรวมที่มีขนาดเล็กมีแนวโน้มที่จะให้กำลังรับแรงคัตที่สูงกว่ามวลรวมที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากจาก พฤติกรรมการรับแรงคัตของคอนกรีตบริเวณผิวด้านล่างจะรับแรงดึงและบริเวณผิวด้านบนจะรับ แรงอัด ซึ่งมวลรวมที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าและมีช่องว่างน้อยกว่ามวลรวมที่มี ขนาดใหญ่ ดังนั้นคอนกรีตพูนที่มีมวลรวมขนาดเล็กจึงมีพฤติกรรมที่สามารถรับแรงดึงได้ดีกว่า มวลรวมที่มีขนาดใหญ่ที่บริเวณผิวด้านล่าง และในทางตรงกันข้ามมวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่าจะ สามารถรับแรงอัดได้ดีกว่ามวลรวมที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากมวลรวมขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวน้อยกว่า มวลรวมที่มีขนาดเล็ก จึงทำให้มีปริมาณซีเมนต์เคลือบมวลรวมหนากว่ามวลรวมขนาดเล็ก ประกอบกับมวลรวมขนาดใหญ่จะมีความแข็งแรงมากกว่า จึงทำให้มวลรวมขนาดใหญ่รับแรงอัด ได้ดีกว่ามวลรวมที่มีขนาดเล็กที่บริเวณผิวด้านบน จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้คอนกรีตพูนสองชั้นมีค่า กำลังรับแรงคัตที่ดีกว่ามวลรวมชั้นเดียว เนื่องจากว่าคอนกรีตพูนสองชั้นมีมวลรวมขนาดใหญ่อยู่ ด้านบนและมีมวลรวมขนาดเล็กอยู่ด้านล่าง เป็นผลทำให้สามารถรับกำลังรับแรงคัตได้สูงสุด

จากที่กล่าวมาในข้างต้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าขนาดมวลรวมมีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนและมวลรวมสองชั้นยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูนให้ดียิ่งขึ้น แต่เนื่องจากคอนกรีตพูนมีช่องว่างภายในตัว ซึ่งส่งผลทำให้การยึดเกาะระหว่างคอนกรีตพูนและวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงไม่ดีเท่าที่ควร จึงทำให้การเสริมวัสดุใยสังเคราะห์ไม่ได้ช่วยในด้านการเพิ่มกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูน อย่างไรก็ตามเมื่อสังเกตพฤติกรรมการวิบัติจะพบว่าการเสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรงทั้งชนิด Fiberglass และ Geogrid จะสามารถช่วยปรับปรุงความยืดหยุ่น (Ductility) ของคอนกรีตพูนให้ดียิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตพูนปกติที่ไม่มีการเสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรง กล่าวคือ หลังจากรับน้ำหนักถึงจุดวิบัติแล้ว แผ่นคอนกรีตพูนยังคงมีสภาพเชื่อมติดกันซึ่งยังมีความยืดหยุ่น ไม่มีการแตกหักและแยกออกแบบทันทีทันใด เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตพูนปกติที่ไม่มีการเสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรง ซึ่งสังเกตได้จากการถ่ายภาพและบันทึกภาพเคลื่อนไหวในระหว่างการทดสอบ

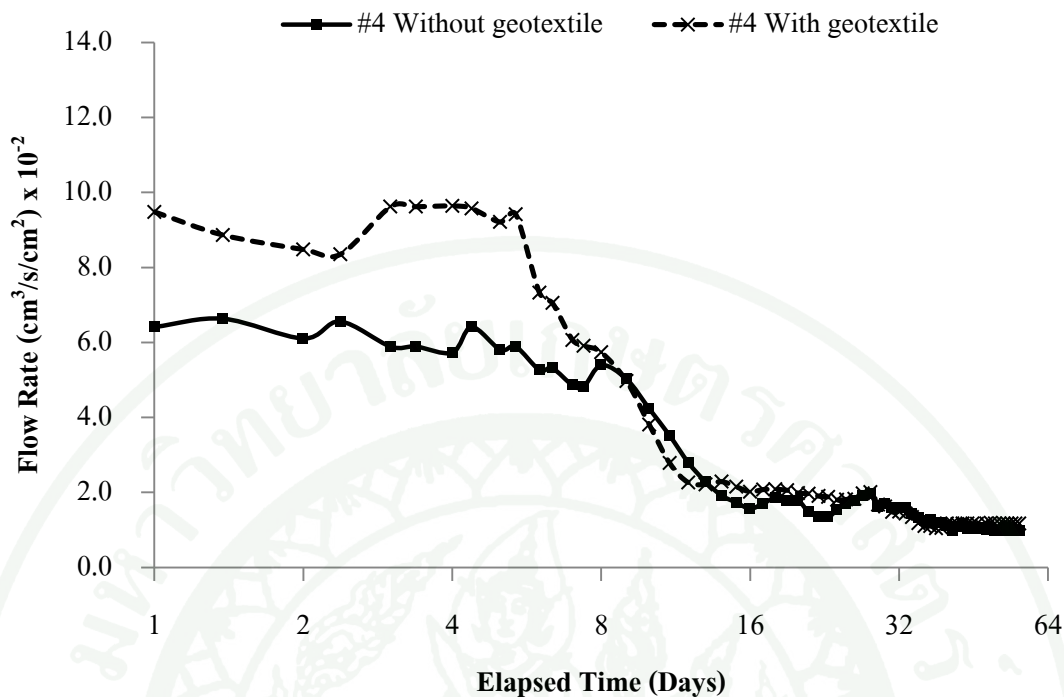
2. ผลการทดสอบด้านการระบายน้ำของคอนกรีตพรุน

2.1 อัตราการไหลของน้ำของมวลรวมขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 4 ที่ประยุกต์ใช้ Geotextile และไม่ประยุกต์ใช้ Geotextile

ในช่วงแรกอัตราการไหลของน้ำผ่านมวลรวมขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 4 ที่มีการประยุกต์ใช้งานร่วมกับ Geotextile มีค่าแนวโน้มสูงกว่าอัตราการไหลของน้ำที่ไม่มีการประยุกต์ใช้ Geotextile ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 8×10^{-2} ถึง 12×10^{-2} เซนติเมตร³/วินาที/เซนติเมตร² และ 6×10^{-2} ถึง 8×10^{-2} เซนติเมตร³/วินาที/เซนติเมตร² ตามลำดับ จากนั้นค่าอัตราการไหลค่อยๆ ลดต่ำลงอย่างต่อเนื่องโดยที่คอนกรีตพรุนที่ไม่ Geotextile เป็นวัสดุกรอง จะมีค่าแนวโน้มอัตราการไหลที่มีสูงกว่าคอนกรีตพรุนที่มี Geotextile เป็นวัสดุกรองเล็กน้อย จนกระทั่งเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 30 ถึง 48 วัน จะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ มีค่าอัตราการไหลประมาณ 1×10^{-2} ถึง 2×10^{-2} เซนติเมตร³/วินาที/เซนติเมตร² ดังแสดงในภาพที่ 69 และภาพที่ 70



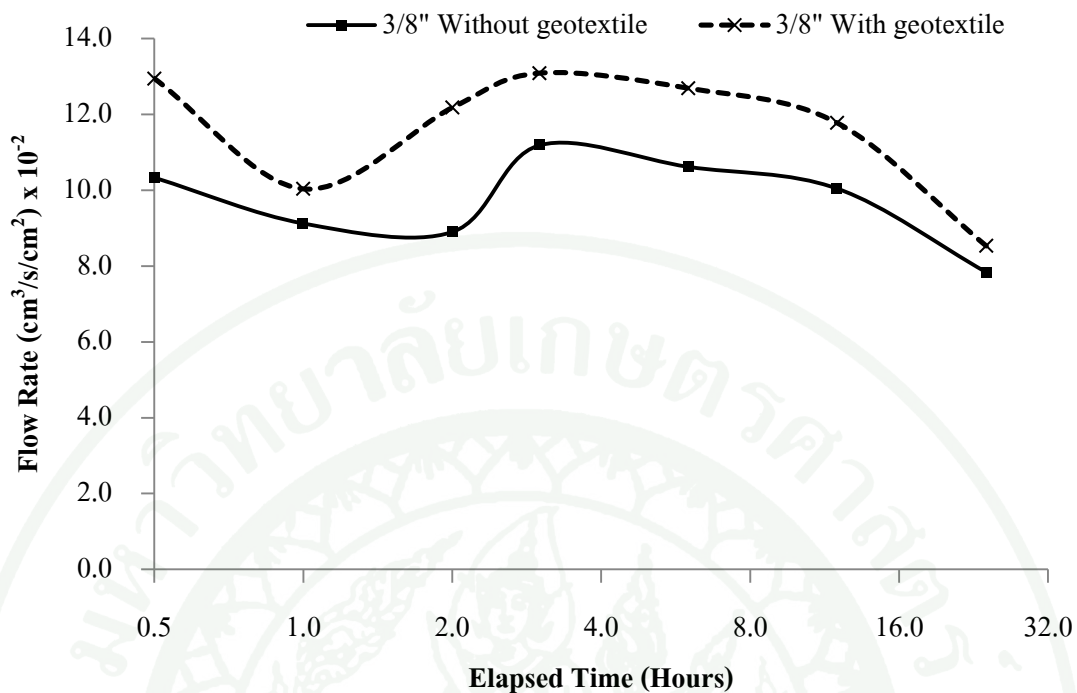
ภาพที่ 69 อัตราการไหลของมวลรวมขนาด #4 ในช่วงเวลา 0.5 ถึง 24 ชั่วโมง



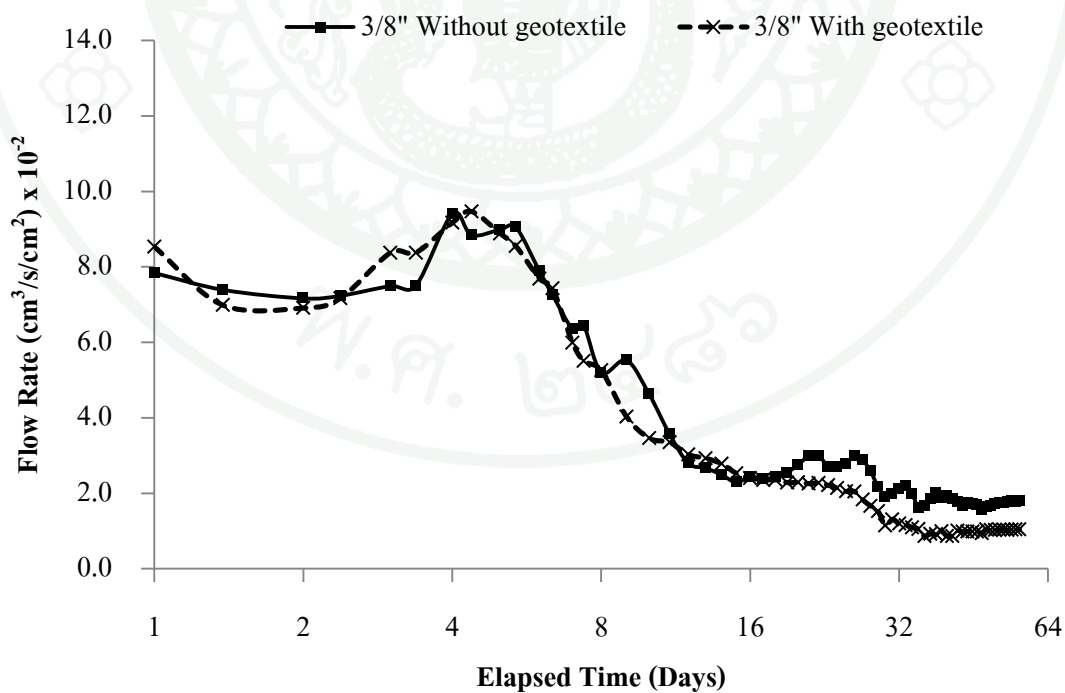
ภาพที่ 70 อัตราการไหลของมวลรวมขนาด #4 ในช่วงเวลา 1 ถึง 56 วัน

2.2 อัตราการไหลของน้ำของมวลรวมขนาด 3/8 นิ้ว ที่ประยุกต์ใช้ Geotextile และไม่ประยุกต์ใช้ Geotextile

อัตราการไหลของน้ำผ่านมวลรวมขนาด 3/8 นิ้วมีลักษณะคล้ายกับอัตราการไหลของน้ำผ่านมวลรวมขนาดล้างตะแกรงเบอร์ 4 กล่าวคือ ในช่วงแรกอัตราการไหลที่มี Geotextile เป็นวัสดุกรองมีแนวโน้มที่สูงกว่า ซึ่งมีค่าอัตราการไหลประมาณ 8×10^{-2} ถึง 13×10^{-2} เซนติเมตร³/วินาที/เซนติเมตร² และหลังจากนั้นอัตราการไหลของน้ำจึงค่อยๆ ลดลงต่อเนื่องและจะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยมีอัตราการไหลระหว่าง 1×10^{-2} ถึง 2×10^{-2} เซนติเมตร³/วินาที/เซนติเมตร² ที่สภาวะอัตราการไหลของน้ำคงที่มวลรวมขนาด 3/8 นิ้ว ที่ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง มีค่าแนวโน้มอัตราการไหลที่สูงกว่าการที่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง ซึ่งจะตรงกันข้ามกับอัตราการไหลของน้ำในช่วงเวลา 1 ถึง 6 วันแรก ที่ค่าอัตราการไหลของน้ำที่มี Geotextile เป็นวัสดุกรองจะมีค่าแนวโน้มที่สูงกว่าการที่ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง ดังแสดงในภาพที่ 71 และภาพที่ 72



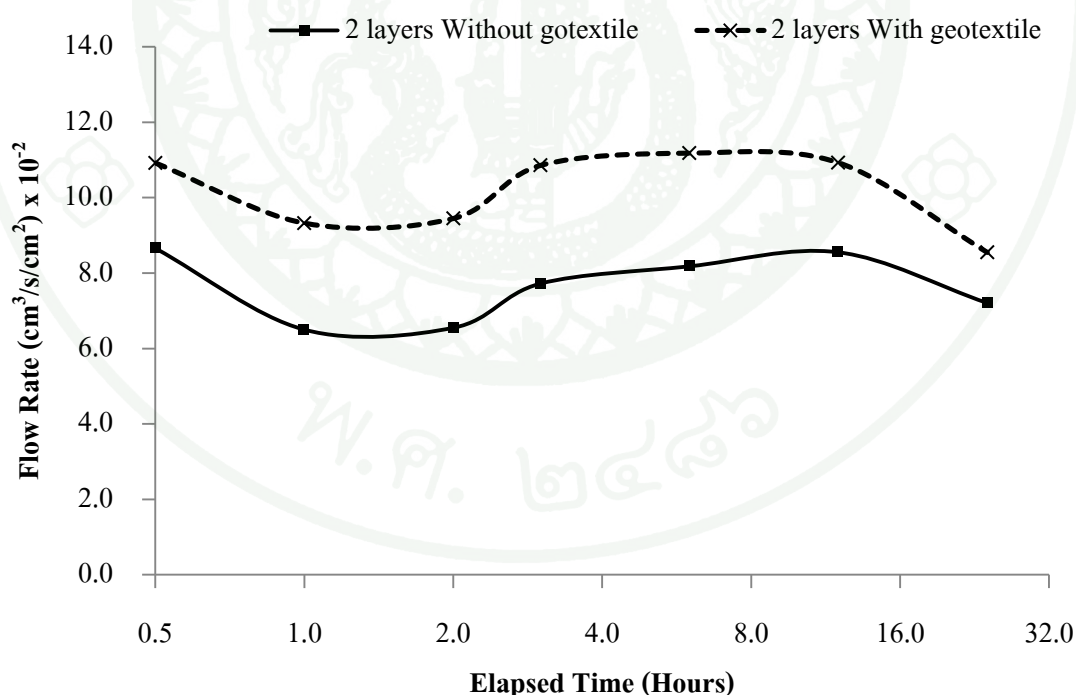
ภาพที่ 71 อัตราการไหลของมวลรวมขนาด 3/8 นิ้ว ในช่วงเวลา 0.5 ถึง 24 ชั่วโมง



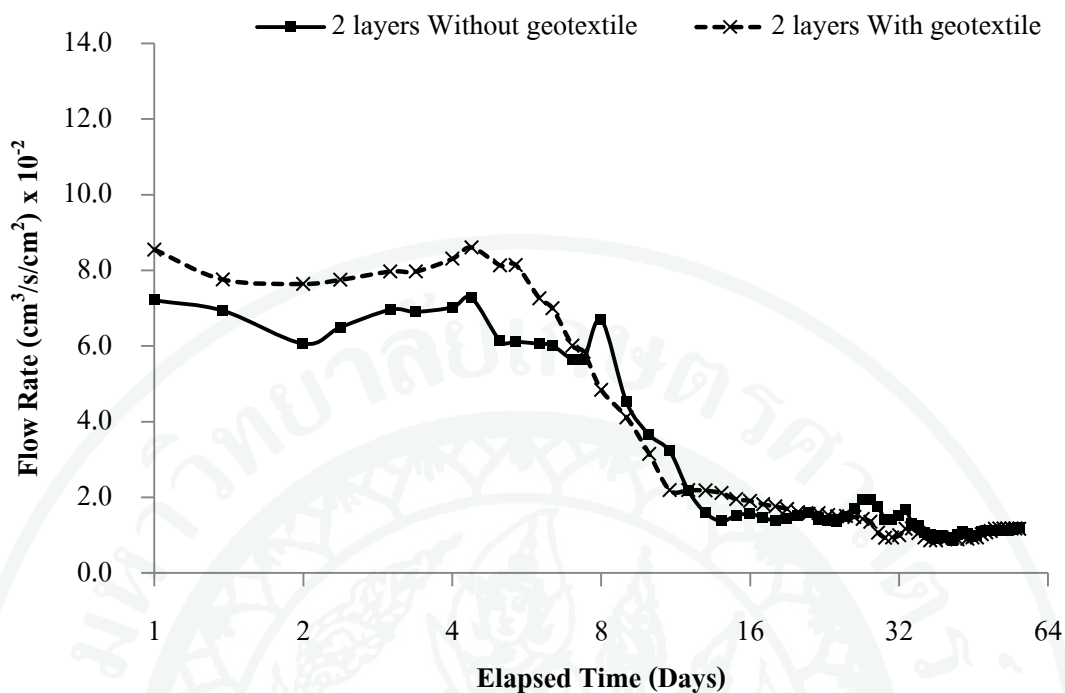
ภาพที่ 72 อัตราการไหลของมวลรวมขนาด 3/8 นิ้ว ในช่วงเวลา 1 ถึง 56 วัน

2.3 อัตราการไหลของน้ำของมวลสองชั้น ที่ประยุกต์ใช้ Geotextile และไม่ประยุกต์ใช้ Geotextile

อัตราการไหลของน้ำผ่านมวลรวมสองชั้นมีลักษณะคล้ายกับอัตราการไหลของน้ำผ่านมวลรวมขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 4 และมวลรวมขนาด 3/8 นิ้ว กล่าวคือ ในช่วงแรกอัตราการไหลของน้ำเมื่อใช้ Geotextile เป็นวัสดุกรอง มีแนวโน้มที่สูงกว่ากรณีที่ไม่ใช้ Geotextile เป็นวัสดุกรอง ซึ่งมีค่าอัตราการไหลอยู่ระหว่าง 7.5×10^{-2} ถึง 11×10^{-2} เซนติเมตร³/วินาที/เซนติเมตร² และเมื่อเวลาผ่านไป อัตราการไหลของน้ำจึงค่อยๆ ลดลงจนเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ ที่อัตราการไหลระหว่าง 1×10^{-2} ถึง 2×10^{-2} เซนติเมตร³/วินาที/เซนติเมตร² ซึ่งในสภาวะที่อัตราการไหลของน้ำคงที่ มวลสองชั้นที่ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรองจะมีค่าแนวโน้มอัตราการไหลที่สูงกว่าการที่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง ซึ่งจะตรงกันข้ามกับอัตราการไหลของน้ำในช่วงเวลา 1 ถึง 6 วันแรก ที่ค่าอัตราการไหลของน้ำที่มี Geotextile เป็นวัสดุกรองจะมีค่าแนวโน้มที่สูงกว่าการที่ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง ดังแสดงในภาพที่ 73 และภาพที่ 74



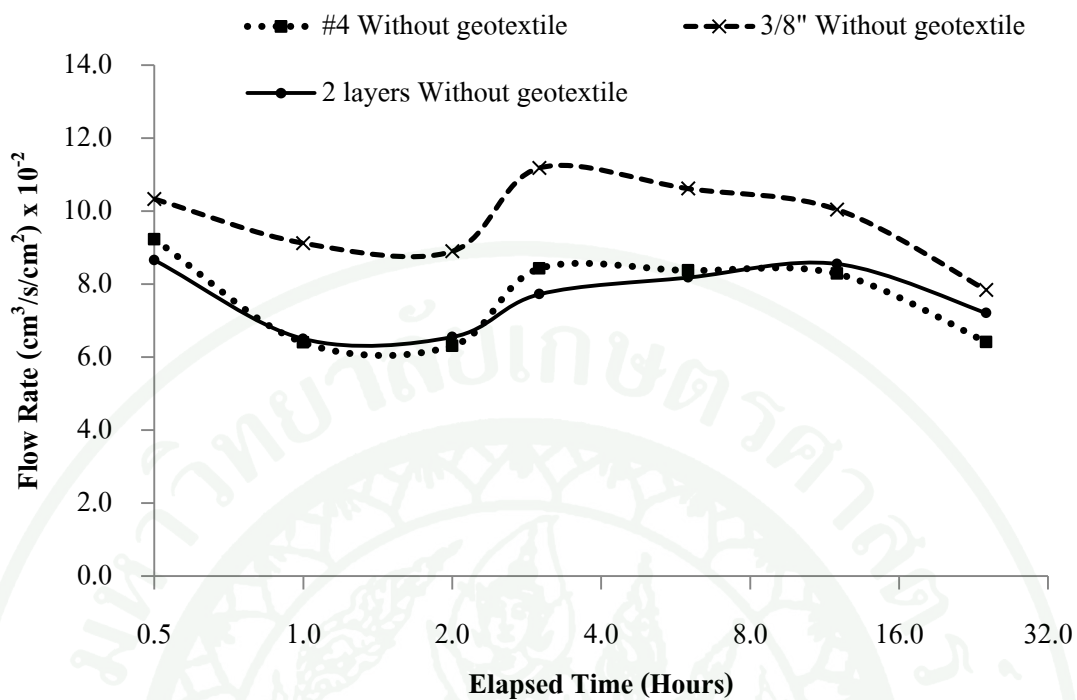
ภาพที่ 73 อัตราการไหลของมวลรวมสองชั้นในช่วงเวลา 0.5 ถึง 24 ชั่วโมง



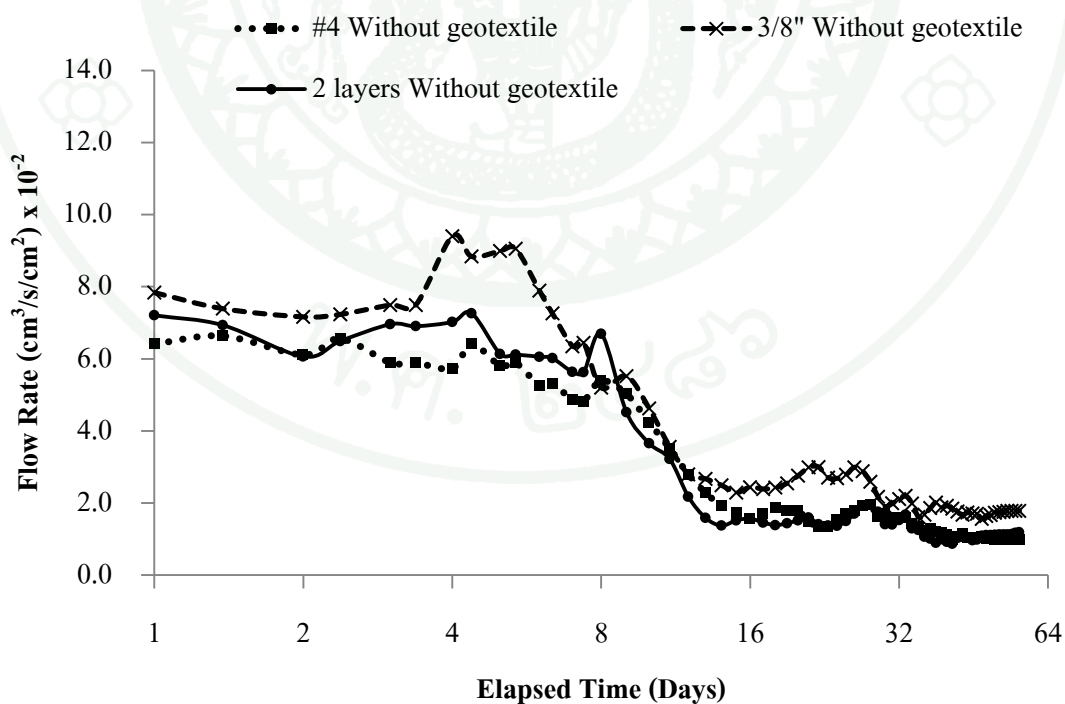
ภาพที่ 74 อัตราการไหลของมวลรวมสองชั้นในช่วงเวลา 1 ถึง 56 วัน

2.4 อัตราการไหลของน้ำ ที่ไม่มีการประยุกต์ใช้งานร่วมกับ Geotextile ในแต่ละขนาดมวลรวม

ค่าอัตราการไหลของน้ำในแต่ละขนาดมวลรวมที่ไม่มีการประยุกต์ใช้ Geotextile มีลักษณะคล้ายๆกันกล่าวคือ ค่าอัตราการไหลมีแนวโน้มสูงในช่วงแรกซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 6×10^{-2} ถึง 12×10^{-2} เซนติเมตร³/วินาที/เซนติเมตร² และเมื่อเวลาผ่านไป อัตราการไหลของน้ำจึงค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องและลดลงในอัตราที่ใกล้เคียงกันทั้งสามชนิดมวลรวม จนกระทั่งเมื่อเวลาผ่านไป อัตราการไหลของน้ำผ่านมวลรวมที่ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง จึงเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ที่อัตราการไหลระหว่าง 1×10^{-2} ถึง 3×10^{-2} เซนติเมตร³/วินาที/เซนติเมตร² โดยที่มวลรวมขนาด 3/8 นิ้ว มีค่าแนวโน้มอัตราการไหลสูงสุดในช่วงแรกและช่วงเข้าสู่สภาวะอัตราการไหลคงที่ เมื่อเปรียบเทียบกับมวลรวมขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 4 และมวลรวมสองชั้น ส่วนมวลรวมขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 4 และมวลรวมสองชั้น มีค่าแนวโน้มอัตราการไหลที่ใกล้เคียงกันทั้งในช่วงแรกและช่วงเข้าสู่สภาวะอัตราการไหลคงที่ ดังแสดงในภาพที่ 75 และภาพที่ 76



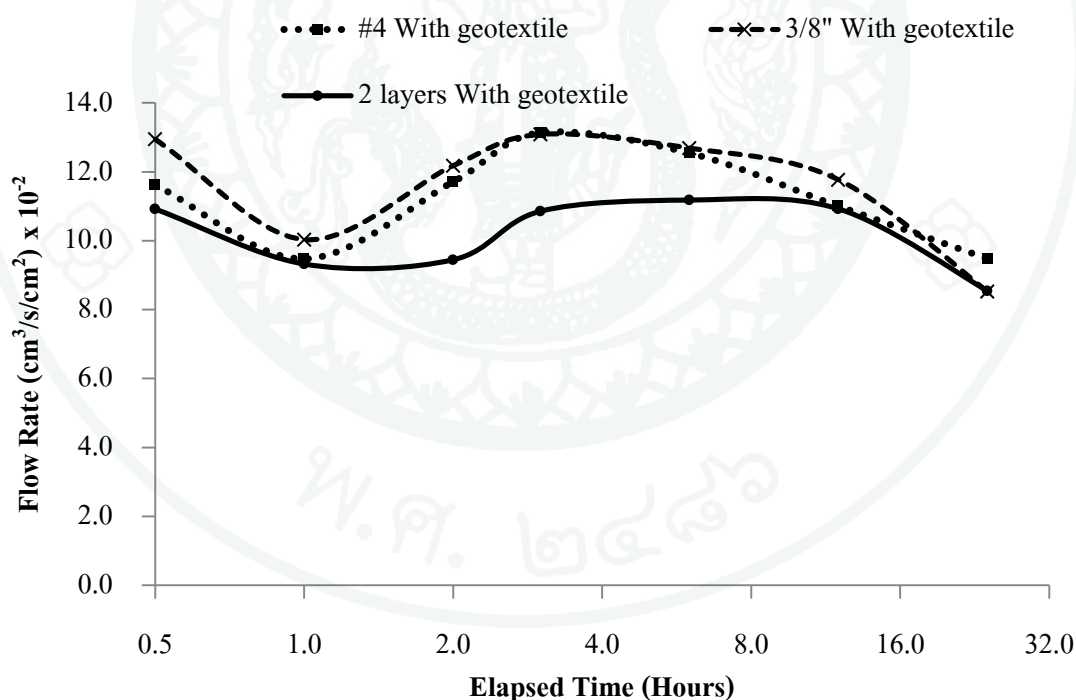
ภาพที่ 75 อัตราการไหลของแต่ละมวลรวมที่ไม่ประยุกต์ใช้ Geotextile ในช่วง 0.5 ถึง 24 ชั่วโมง



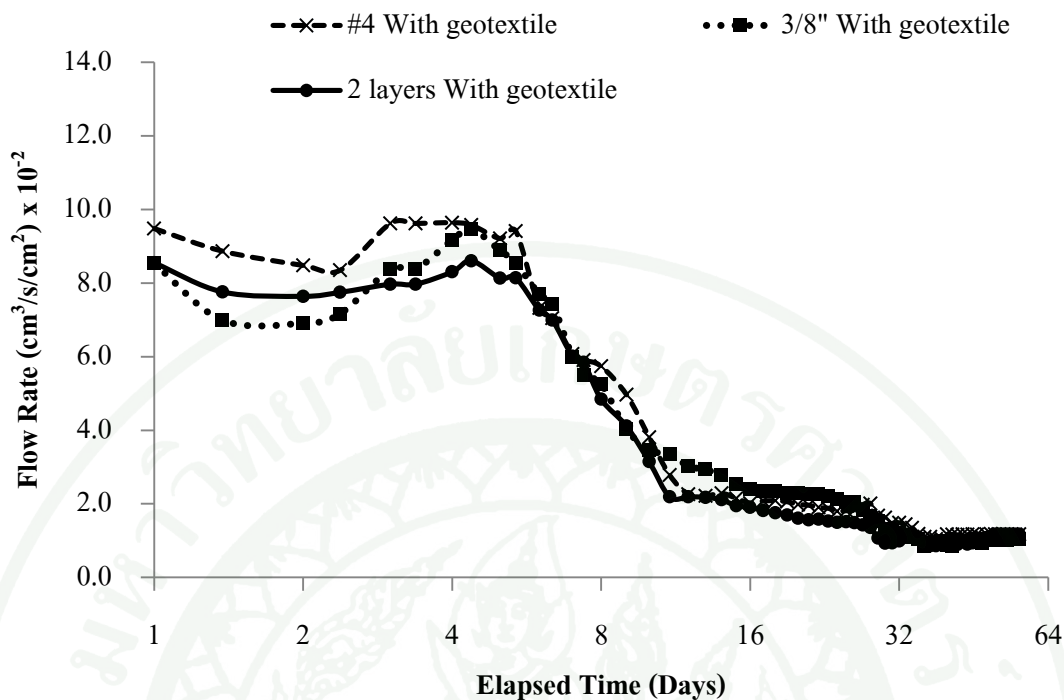
ภาพที่ 76 อัตราการไหลของแต่ละมวลรวมที่ไม่ประยุกต์ใช้ Geotextile ในช่วง 1 ถึง 56 วัน

2.5 อัตราการไหลของน้ำ ที่มีการประยุกต์ใช้งานร่วมกับ Geotextile ในแต่ละขนาดมวลรวม

อัตราการไหลของน้ำในแต่ละขนาดมวลรวมที่มีการประยุกต์ใช้ Geotextile มีลักษณะคล้ายๆกันกล่าวคือ ค่าอัตราการไหลมีแนวโน้มสูงในช่วงแรกซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 7×10^{-2} ถึง 13×10^{-2} เซนติเมตร³/วินาที/เซนติเมตร² และเมื่อเวลาผ่านไป อัตราการไหลของน้ำจึงค่อยๆลดลงอย่างต่อเนื่องและลดลงในอัตราที่ใกล้เคียงกันทั้งสามชนิดมวลรวม จากนั้นอัตราการไหลของน้ำผ่านมวลรวมที่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง ก็จะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ ที่อัตราการไหลระหว่าง 1×10^{-2} ถึง 2×10^{-2} เซนติเมตร³/วินาที/เซนติเมตร² โดยที่มวลรวมทั้งสามประเภทที่มีการใช้ Geotextile เป็นวัสดุกรอง มีค่าแนวโน้มอัตราการไหลที่ใกล้เคียงกันซึ่งจะแตกต่างจากมวลรวมที่ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง ที่มีมวลรวมขนาดใหญ่กว่าจะมีแนวโน้มให้ค่าอัตราการไหลที่สูงกว่ามวลรวมที่มีขนาดเล็ก ดังแสดงในภาพที่ 77 และภาพที่ 78



ภาพที่ 77 อัตราการไหลของแต่ละมวลรวมที่ประยุกต์ใช้ Geotextile ในช่วง 0.5 ถึง 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 78 อัตราการไหลของแต่ละมวลรวมที่ประยุกต์ใช้ Geotextile ในช่วง 1 ถึง 56 วัน

จากการวิเคราะห์ค่าอัตราการไหลในแต่ละขนาดมวลรวมที่มีการประยุกต์ใช้งานร่วมกับ Geotextile พบว่ามีค่าแนวโน้มสูงในช่วง 1 ถึง 6 วันแรก ประมาณ 7×10^{-2} ถึง 13×10^{-2} เซนติเมตร³/วินาที/เซนติเมตร² หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 30 ถึง 32 วัน ค่าอัตราการไหลจะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ ประมาณ 1×10^{-2} ถึง 1.5×10^{-2} เซนติเมตร³/วินาที/เซนติเมตร² ซึ่งในแต่ละมวลรวมมีค่าอัตราการไหลที่ใกล้เคียงกันโดยที่ขนาดมวลรวมไม่ค่อยมีผลต่ออัตราการไหลมากนัก

จากการวิเคราะห์ค่าอัตราการไหลในแต่ละขนาดมวลรวมที่ไม่มีการประยุกต์ใช้งานร่วมกับ Geotextile พบว่ามีค่าแนวโน้มสูงในช่วง 1 ถึง 6 วันแรก ประมาณ 6×10^{-2} ถึง 11×10^{-2} เซนติเมตร³/วินาที/เซนติเมตร² หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 40 ถึง 48 วัน ค่าอัตราการไหลจะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ ประมาณ 1×10^{-2} ถึง 2×10^{-2} เซนติเมตร³/วินาที/เซนติเมตร² โดยที่มวลรวมขนาดใหญ่มีค่าแนวโน้มอัตราการไหลสูงกว่าคอนกรีตพูนที่มีมวลรวมขนาดเล็ก

อัตราการไหลมีแนวโน้มลดลงระหว่างอัตราการไหลช่วงแรกและช่วงเข้าสู่สภาวะอัตราการไหลคงที่ เนื่องจากว่า ในสภาวะเริ่มต้นทรายที่ใช้เป็นวัสดุทดสอบ ทำการการบดอัดด้วยความหนาแน่นที่ต่ำกว่าคือ ทรายอยู่ในสภาวะหลวมและมีช่องว่างสูงจึงทำให้ค่าอัตราการไหลของน้ำใน

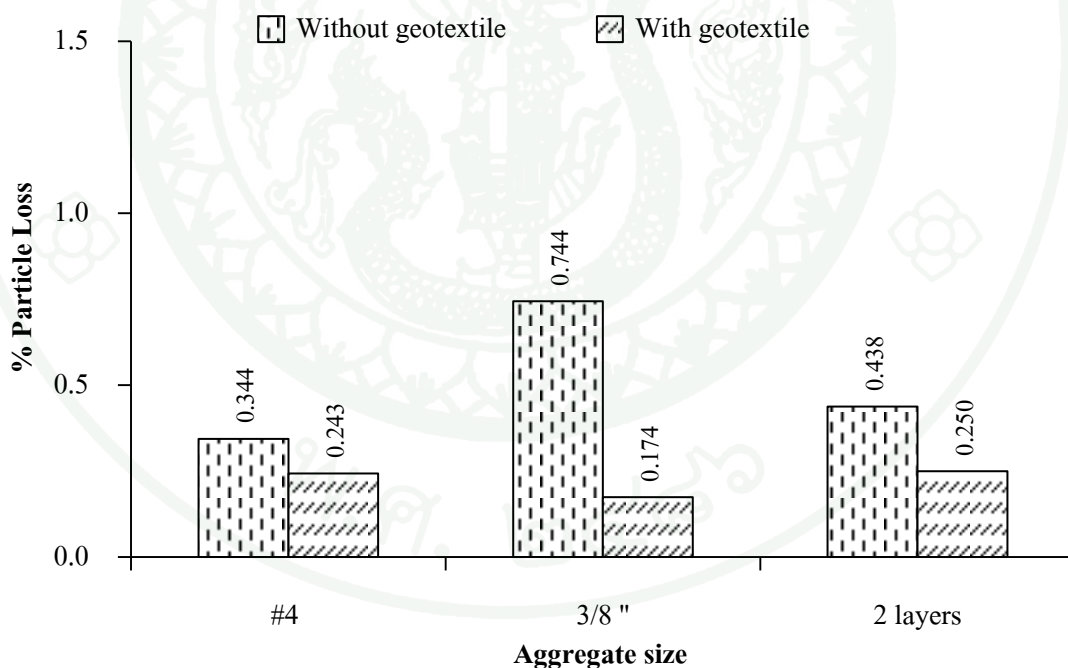
ช่วงแรกมีค่าค่อนข้างสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปทรายที่ใช้เป็นวัสดุทดสอบเริ่มที่จะมีการยุบตัวทำให้ช่องว่างมีค่าลดต่ำลงและมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น ประกอบกับอนุภาคของเม็ดดินเริ่มที่จะเข้าไปอุดตันในรูช่องว่างของ Geotextile และรูช่องว่างภายในตัวคอนกรีตพูน จึงส่งผลทำให้ค่าอัตราการไหลค่อยๆลดต่ำลงและเข้าสู่สภาวะอัตราการไหลคงที่ จากการทดสอบค่าอัตราการไหลในสภาวะเริ่มต้นของทรายที่บดอัดความหนาแน่นแห้ง γ_d เท่ากับ 1.54 ตัน/เมตร³ ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นแห้งที่ใช้ในการบดอัดทรายในตัวอย่างทดสอบ มีค่าอัตราการไหลเริ่มต้นที่ประมาณ 9.32×10^{-2} เซนติเมตร³/วินาที/เซนติเมตร² และจากการทดสอบอัตราการไหลในสภาวะเริ่มต้นของทรายที่ค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) ซึ่งจะให้มีความหนาแน่นแห้งสูงสุด $\gamma_{d,max}$ เท่ากับ 1.80 ตัน/เมตร³ พบว่ามีค่าอัตราการไหลเริ่มต้นที่ประมาณ 1.54×10^{-2} เซนติเมตร³/วินาที/เซนติเมตร²

ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการที่อัตราการไหลของน้ำลดลงอย่างต่อเนื่องไม่ได้เกิดจากการที่อนุภาคของเม็ดดินเข้าไปอุดตันช่องว่างภายในคอนกรีตพูนและช่องว่างภายใน Geotextile เพียงอย่างเดียว แต่เกิดจากช่องว่างในมวลดินของทรายมีค่าลดต่ำลงและมีความหนาแน่นมากขึ้นเมื่อน้ำไหลผ่านตัวอย่างทรายทดสอบไปเรื่อยๆ จึงส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านของดิน (Permeability) ลดต่ำลง ดังนั้นค่าอัตราการไหลของน้ำผ่านคอนกรีตพูนจึงลดต่ำลงตามไปด้วย และสาเหตุที่มวลรวมที่มีการประยุกต์ใช้ Geotextile มีค่าอัตราการไหลที่ต่ำกว่ามวลรวมที่ไม่มีการประยุกต์ใช้ Geotextile ในสภาวะที่ค่าอัตราการไหลเริ่มลดต่ำลงจนถึงสภาวะที่ค่าอัตราการไหลคงที่ เนื่องจากว่าช่องว่างภายใน Geotextile มีขนาดเล็กกว่าช่องว่างในตัวคอนกรีตพูนจึงส่งผลทำให้ Geotextile อุดตันได้เร็วกว่าคอนกรีตพูน ดังนั้นค่าอัตราการไหลจึงต่ำกว่าคอนกรีตพูนที่ไม่มีการประยุกต์ใช้ Geotextile

3. ผลการทดสอบด้านการกรองของคอนกรีตพรุน

3.1 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินของแต่ละมวลรวมในช่วงเวลา 7 วัน

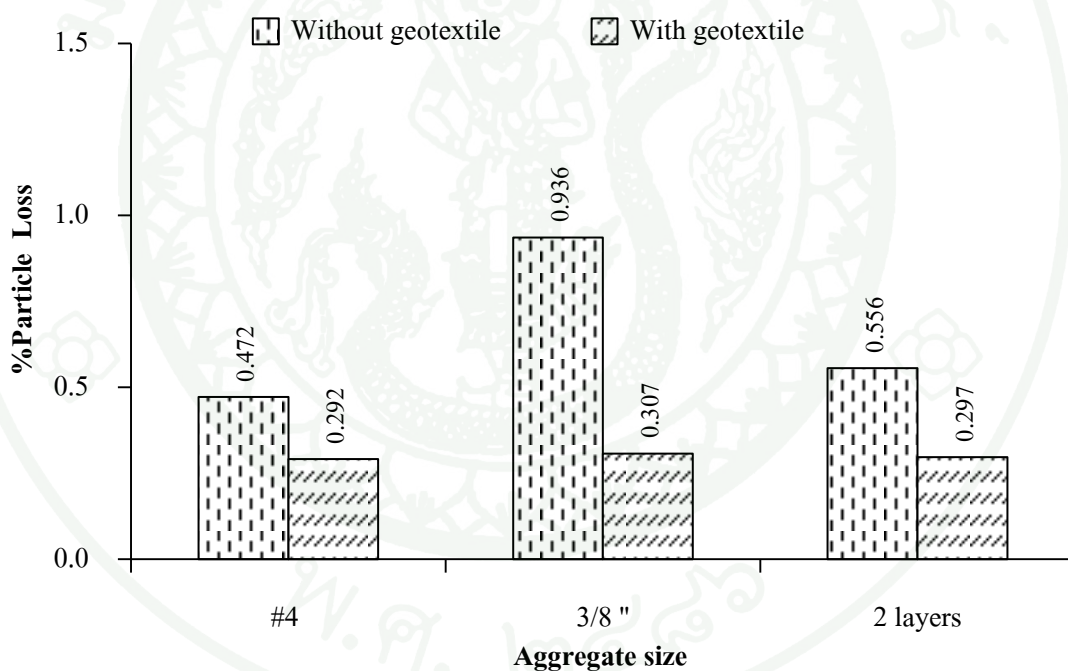
ในช่วงเวลา 7 วันแรก มวลรวมรวมขนาด 3/8 นิ้ว มีแนวโน้มเปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินมากที่สุดเท่ากับ 0.744 % รองลงมาคือมวลรวมสองชั้นและมวลรวมขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 4 ที่มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินเท่ากับ 0.438% และ 0.344% ตามลำดับ โดยที่มวลรวมที่มีการประยุกต์ใช้ Geotextile เป็นวัสดุกรองทั้งสามประเภท มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินที่ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.174 % ถึง 0.250 % และยังมีค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียที่น้อยกว่ามวลรวมที่ไม่มีการประยุกต์ใช้ Geotextile เป็นวัสดุกรอง แสดงให้เห็นว่าในช่วง 7 วันแรก Geotextile มีความสามารถในการกรองและช่วยลดเปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินได้ ดังแสดงในภาพที่ 79



ภาพที่ 79 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินของแต่ละมวลรวมในช่วงเวลา 7 วัน

3.2 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินของแต่ละมวลรวมในช่วงเวลา 28 วัน

ในช่วงเวลา 7 ถึง 28 วัน มีลักษณะสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การสูญเสียในช่วงเวลา 7 วัน กล่าวคือมวลรวมขนาด 3/8 นิ้ว มีแนวโน้มเปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินมากที่สุดเท่ากับ 0.936 % รองลงมาคือมวลรวมสองชั้นและมวลรวมขนาดข้างตะแกรงเบอร์ 4 ที่มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินเท่ากับ 0.556% และ 0.344% ตามลำดับ โดยที่มวลรวมที่มีการประยุกต์ใช้ Geotextile เป็นวัสดุรองทั้งสามประเภท มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินที่ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.292 % ถึง 0.297 % และยังมีค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียที่น้อยกว่ามวลรวมที่ไม่มีการประยุกต์ใช้ Geotextile เป็นวัสดุรอง แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไป 28 วัน Geotextile ยังมีความสามารถในการกรองและช่วยลดเปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินได้ ดังแสดงในภาพที่ 80

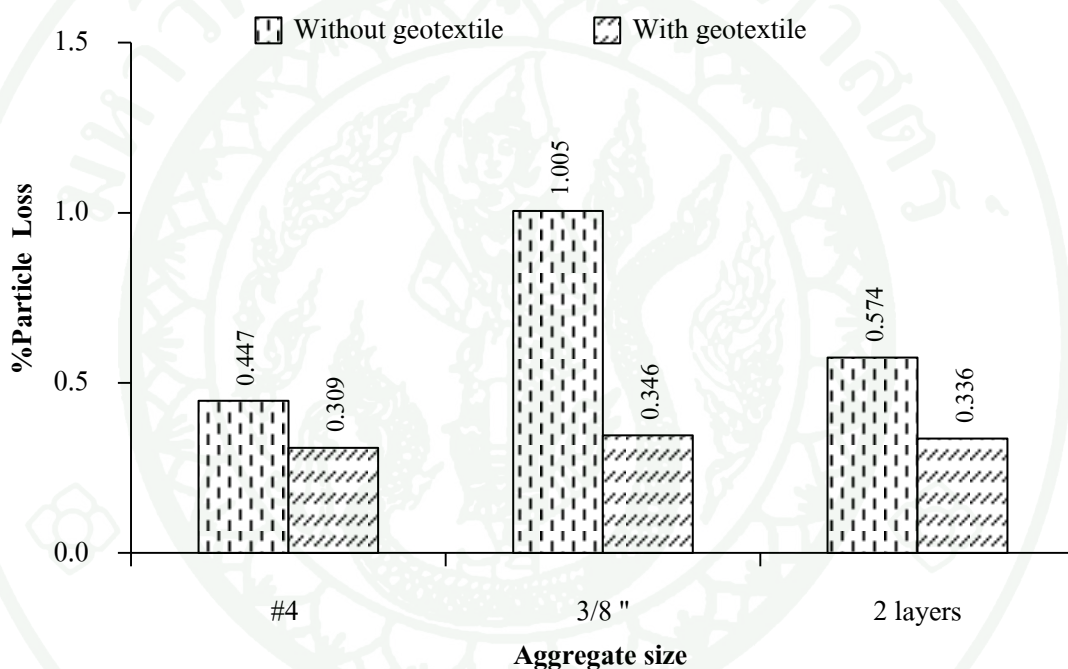


ภาพที่ 80 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินของแต่ละมวลรวมในช่วงเวลา 28 วัน

3.3 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินของแต่ละมวลรวมในช่วงเวลา 56 วัน

ในช่วงเวลา 56 วันการสูญเสียอนุภาคเม็ดดิน มีลักษณะสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การสูญเสียในช่วงเวลา 7 วันและช่วงเวลา 28 วัน กล่าวคือมวลรวมขนาด 3/8 นิ้ว มีแนวโน้ม

เปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินมากที่สุดเท่ากับ 1.005 % รองลงมาคือมวลรวมสองชั้นและมวลรวมขนาดต่างตะแกรงเบอร์ 4 ที่มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินเท่ากับ 0.574 % และ 0.447 % ตามลำดับ โดยที่มวลรวมที่มีการประยุกต์ใช้ Geotextile เป็นวัสดุรองทั้งสามประเภท มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินที่ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.309 % ถึง 0.346 % และยังมีค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียที่น้อยกว่ามวลรวมที่ไม่มีการประยุกต์ใช้ Geotextile เป็นวัสดุรอง แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไป 56 วัน Geotextile ยังมีความสามารถในการกรองและช่วยลดเปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินได้ ดังแสดงในภาพที่ 81



ภาพที่ 81 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินของแต่ละมวลรวมในช่วงเวลา 56 วัน

3.4 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินที่มีการประยุกต์ใช้ Geotextile และที่ไม่มีการประยุกต์ใช้ Geotextile เป็นวัสดุรอง

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การสูญเสียในภาพรวมจาก 7 วันจนถึง 56 วันที่มีการประยุกต์ใช้ Geotextile และที่ไม่มีการประยุกต์ใช้ Geotextile เป็นวัสดุรองแสดงในภาพที่ 81 และภาพที่ 83 พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจาก 7 วันจนถึง 56 วัน แสดงให้เห็นว่าการสูญเสียอนุภาคเม็ดดินจะเกิดขึ้นมากในช่วงแรกเท่านั้น ซึ่งก็สอดคล้องกับการ

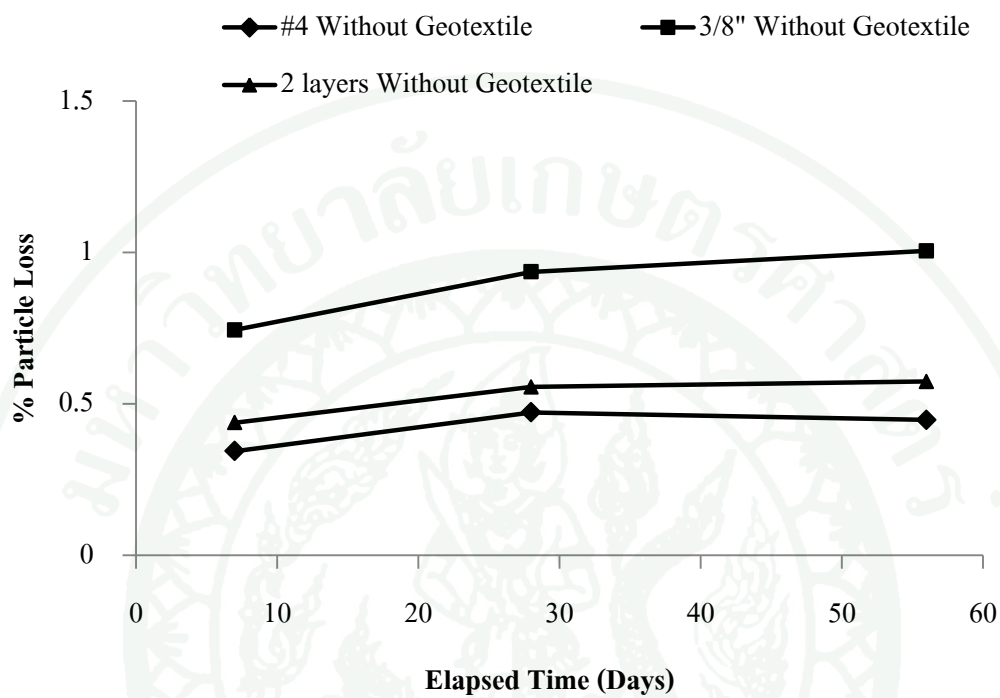
สังเกตสีของน้ำและตะกอนที่ไหลผ่านคอนกรีตพูนในระหว่างการทดสอบ ที่พบว่าน้ำจะมีสีขุ่น และมีตะกอนไหลออกมามากในช่วง 1 นาทีแรกเท่านั้น หลังจากนั้นน้ำก็จะเริ่มใสขึ้นโดยไม่สังเกตเห็นสีหรือตะกอนที่ไหลออกมา

นอกจากนี้ยังพบอีกว่ามวลรวมที่มีขนาดใหญ่ที่ไม่มีการประยุกต์ใช้งานร่วมกับ Geotextile จะมีสีของน้ำที่ขุ่นกว่าและตะกอนที่ไหลออกมามีมากกว่ามวลรวมที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากว่ามวลรวมที่มีขนาดใหญ่จะมีช่องว่างภายในตัวคอนกรีตพูนมากกว่า ดังนั้นอนุภาคของตะกอนจึงมีโอกาสที่จะไหลออกมาได้มากกว่ามวลรวมที่มีขนาดเล็ก ส่วนมวลรวมที่มีการประยุกต์ใช้งานร่วมกับ Geotextile พบว่ามีลักษณะคล้ายๆกัน โดยสามารถสังเกตเห็นสีของน้ำและตะกอนไหลออกมาในช่วงเวลา 1 นาทีแรกเท่านั้น แต่จะสามารถสังเกตได้ว่ามีปริมาณตะกอนไหลออกมาน้อยกว่าคอนกรีตพูนที่ไม่มีการประยุกต์ใช้งานร่วมกับ Geotextile เป็นวัสดุกรอง ดังแสดงในภาพที่ 84 ถึงภาพที่ 87

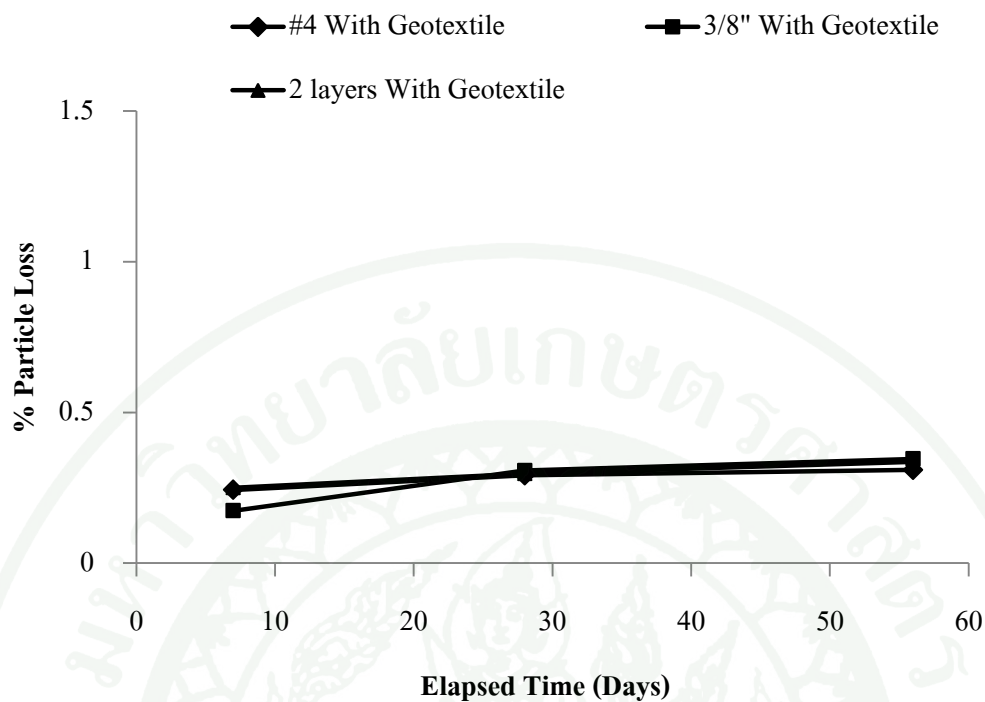
ผลการทดลองสอดคล้องกับผลการทดสอบวัดค่าความขุ่น (Turbidity Test) ของน้ำแสดงในตารางที่ 5 ที่พบว่าค่าความขุ่นของน้ำจะมีค่าที่สูงในช่วง 1 นาทีแรกเท่านั้น โดยที่มวลรวมที่ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง จะมีค่าความขุ่นที่สูงกว่ามวลรวมที่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง มวลรวมขนาด 3/8 นิ้ว ซึ่งเป็นมวลรวมที่มีขนาดใหญ่สุดของตัวอย่างการทดสอบจะมีค่าความขุ่นสูงสุดประมาณ 310.25 NTU โดยที่มวลรวมสองชั้นและมวลรวมขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 4 มีค่าความขุ่นที่ใกล้เคียงกันประมาณ 276.60 NTU และ 280.28 NTU ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าน้ำที่ไหลผ่านคอนกรีตพูนมีค่าความขุ่นมาก แต่เมื่อเวลาผ่านไปหลังจาก 1 นาที ค่าความขุ่นของน้ำก็ลดลงเหลือประมาณ 1 NTU ถึง 3 NTU เท่านั้น ซึ่งก็เป็นค่าที่น้อย แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตพูนสามารถกรองอนุภาคเม็ดดินได้

ในคอนกรีตพูนที่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง พบว่าจะมีค่าความขุ่นที่ใกล้เคียงกันทั้งสามประเภทประมาณ 130.56 NTU ถึง 142.89 NTU โดยที่มีค่าความขุ่นน้อยกว่ามวลรวมที่ไม่มีการประยุกต์ใช้ Geotextile ประมาณ 2 เท่า สังเกตได้ว่าคอนกรีตพูนที่มีการประยุกต์ใช้ Geotextile จะมีค่าความขุ่นไม่เกิน 200 NTU บ่งบอกว่าน้ำมีความขุ่นไม่มากแสดงว่า Geotextile สามารถกรองอนุภาคของเม็ดดินได้ และค่าที่ได้จากการทดสอบค่าความขุ่นเมื่อผ่านช่วง 1 นาที พบว่ามีค่าประมาณ 1 NTU ถึง 3 NTU เท่านั้น ดังนั้นจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตพูนสามารถเป็นวัสดุสำหรับการระบายน้ำและสำหรับการกรองได้ โดยที่การประยุกต์ใช้ Geotextile

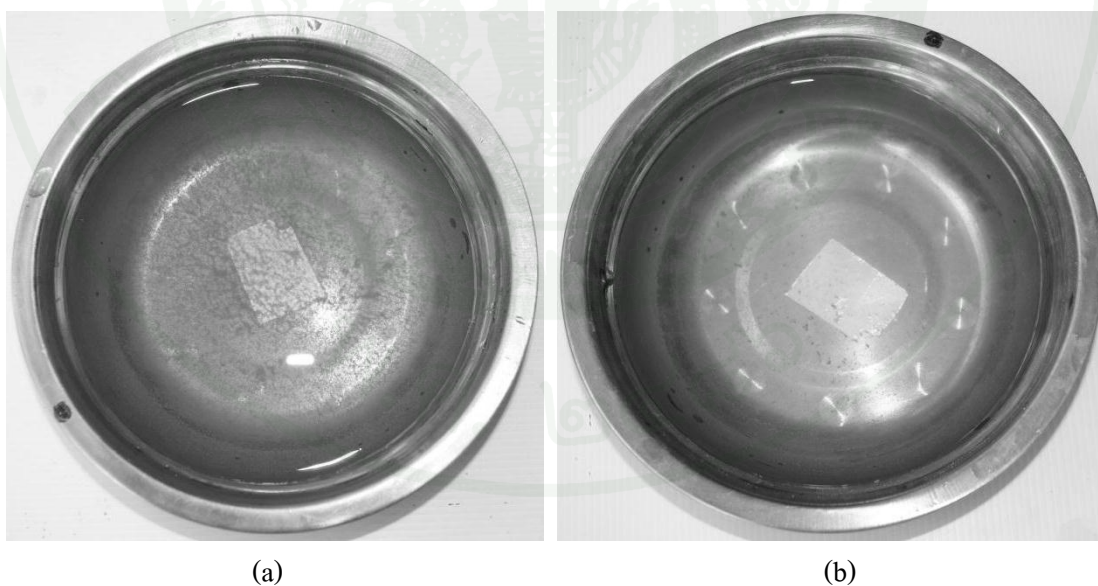
เป็นวัสดุกรองสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในด้านการกรองและลดเปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินให้ดียิ่งขึ้น



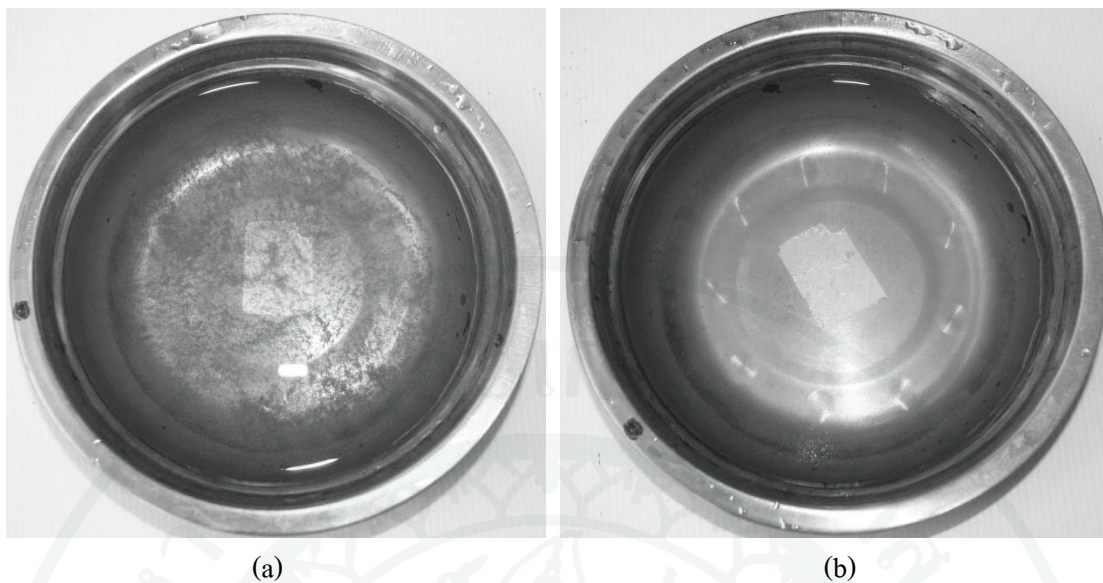
ภาพที่ 82 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินที่ไม่ประยุกต์ใช้ Geotextile ที่เวลา 7 28 และ 56 วัน



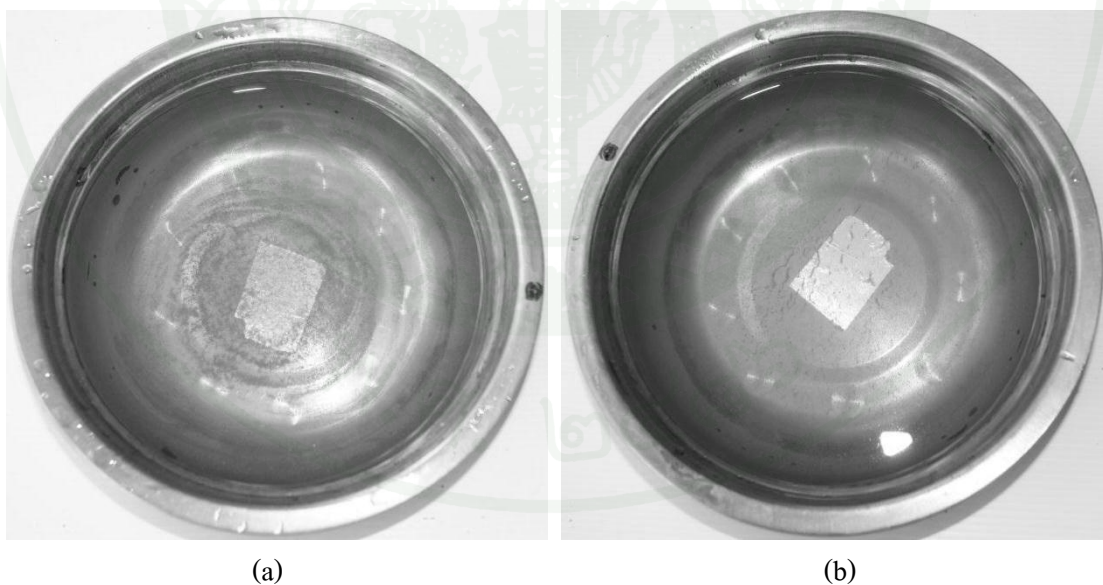
ภาพที่ 83 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินที่ประยุกต์ใช้ Geotextile ที่เวลา 7 28 และ 56 วัน



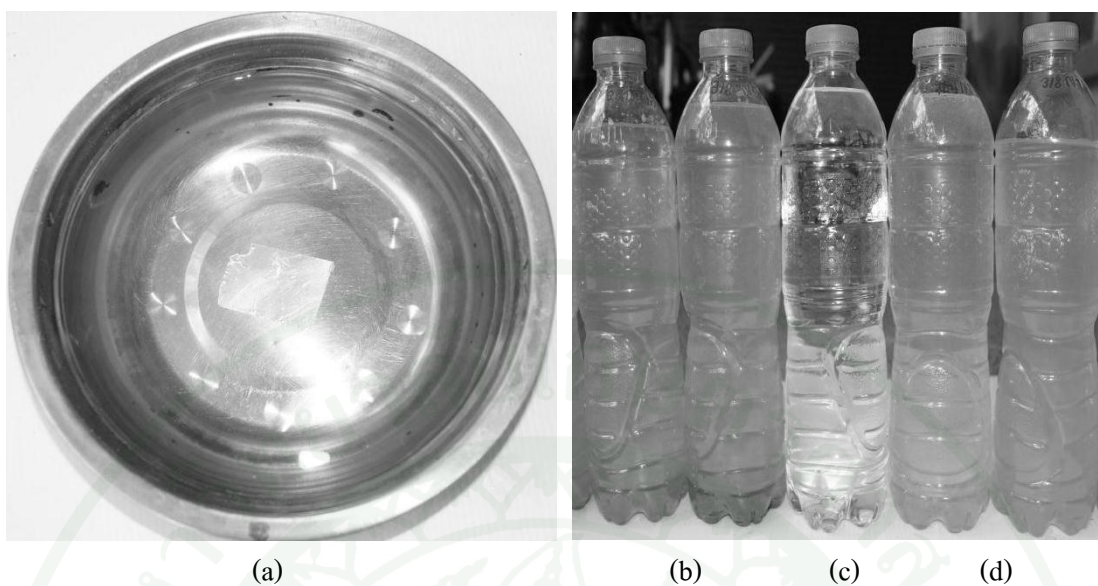
ภาพที่ 84 ความชุ่มและอนุภาคของเม็ดดินที่ไหลผ่านคอนกรีตพูนในช่วง 1 นาทีแรก ของมวลรวมขนาดข้างตะแกรงเบอร์ 4 โดยที่ภาพด้านซ้าย (a) ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง และภาพด้านขวา (b) มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง



ภาพที่ 85 ความชุ่มและอุณหภูมิของเม็ดดินที่ไหลผ่านคอนกรีตพูนในช่วง 1 นาทีแรก ของมวลรวมขนาด 3/8 นิ้ว โดยที่ภาพด้านซ้าย (a) ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง และภาพด้านขวา (b) มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง



ภาพที่ 86 ความชุ่มและอุณหภูมิเม็ดดินที่ไหลผ่านคอนกรีตพูนในช่วง 1 นาทีแรก ของมวลรวมสองชั้น โดยที่ภาพด้านซ้าย (a) ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง และภาพด้านขวา (b) มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง



ภาพที่ 87 ความชุ่มและตะกอนที่ไหลผ่านคอนกรีตพูน โดยที่ภาพด้านซ้าย (a) แสดงลักษณะของน้ำที่ไหลผ่านคอนกรีตพูนในช่วงหลังจาก 1 นาทีแรก และภาพด้านขวา (b) ลักษณะน้ำที่ไหลผ่านคอนกรีตพูนในช่วง 1 นาทีแรกที่ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง (c) ลักษณะน้ำที่ไหลผ่านคอนกรีตพูนหลังจาก 1 นาที (d) ลักษณะน้ำที่ไหลผ่านคอนกรีตพูนในช่วง 1 นาทีแรกที่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการวัดค่าความขุ่น (Turbidity Test)

Elapsed Time	Without Geotextile			With Geotextile		
	# 4 (NTU)	3/8" (NTU)	2 layers (NTU)	#4 (NTU)	3/8" (NTU)	2 layers (NTU)
1 Minute	280.28	310.25	276.60	130.56	142.89	136.32
5 Minute	1.42	2.50	1.56	1.39	1.30	1.62
1 Hours	1.37	2.36	1.93	1.46	1.57	1.50
2 Hours	1.70	1.54	1.20	0.80	0.72	0.76
3 Hours	0.88	1.70	1.40	0.59	1.03	1.47
6 Hours	0.92	1.15	0.88	1.01	0.72	0.73
12 Hours	0.73	0.72	0.51	1.20	0.83	0.52
24 Hours	0.90	0.80	0.88	0.58	1.15	0.67
7 Days	0.70	0.83	0.84	0.60	1.15	0.64
14 Days	0.53	1.84	1.62	1.16	1.39	1.18
21 Days	1.06	1.21	1.64	1.11	1.78	1.41
28 Days	3.71	2.09	2.63	1.32	2.71	2.36
35 Days	0.487	0.658	0.312	0.348	0.705	0.427
42 Days	0.787	1.210	0.802	0.586	0.555	0.672
49 Days	0.660	0.663	0.600	0.865	0.858	0.645
56 Days	0.738	0.625	0.598	0.725	0.968	0.549

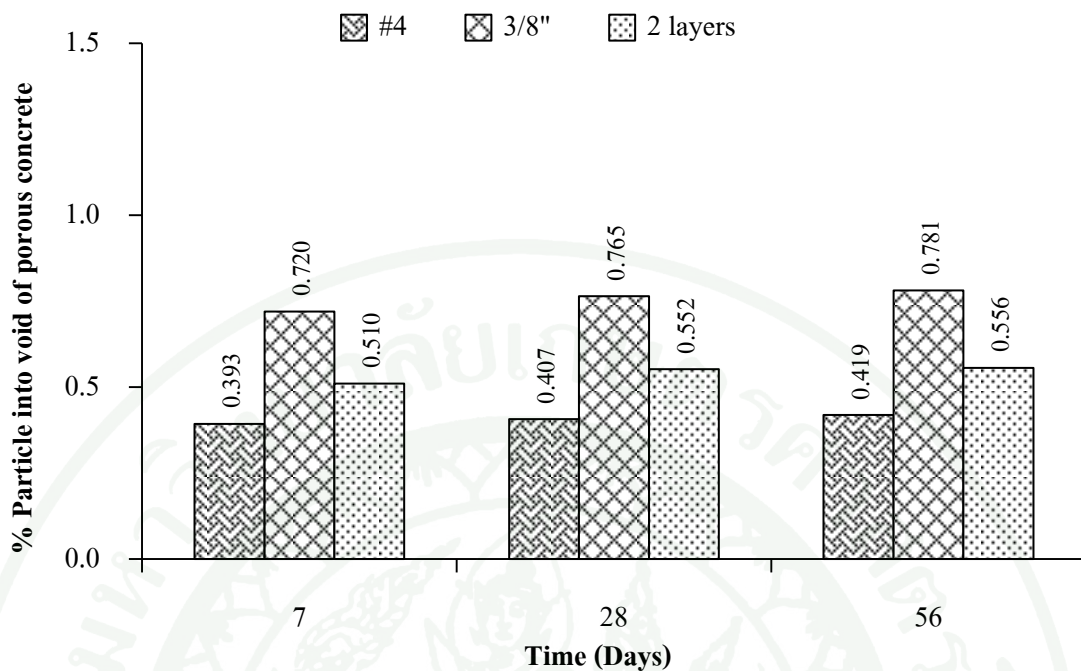
3.5 เปอร์เซ็นต์ที่อนุภาคเม็ดดินเข้าไปอยู่ในรูโพรงของคอนกรีตพูนที่มีการประยุกต์ใช้ Geotextile และที่ไม่มีการประยุกต์ใช้ Geotextile เป็นวัสดุกรอง

จากภาพที่ 88 และภาพที่ 89 พบว่าคอนกรีตพูนที่ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง จะมีอนุภาคของเม็ดดินเข้าไปอยู่ภายในรูโพรงมากของคอนกรีตพูนมากกว่าคอนกรีตพูนที่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง ประมาณ 3 ถึง 6 เท่า โดยที่มวลรวมขนาด 3/8 นิ้ว ที่ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง มีแนวโน้มที่อนุภาคของเม็ดดินจะเข้าไปอยู่ในรูโพรงมากที่สุด รองลงมาคือมวลรวมสองชั้นและมวลรวมขนาดข้างตะแกรงเบอร์ 4 ตามลำดับ

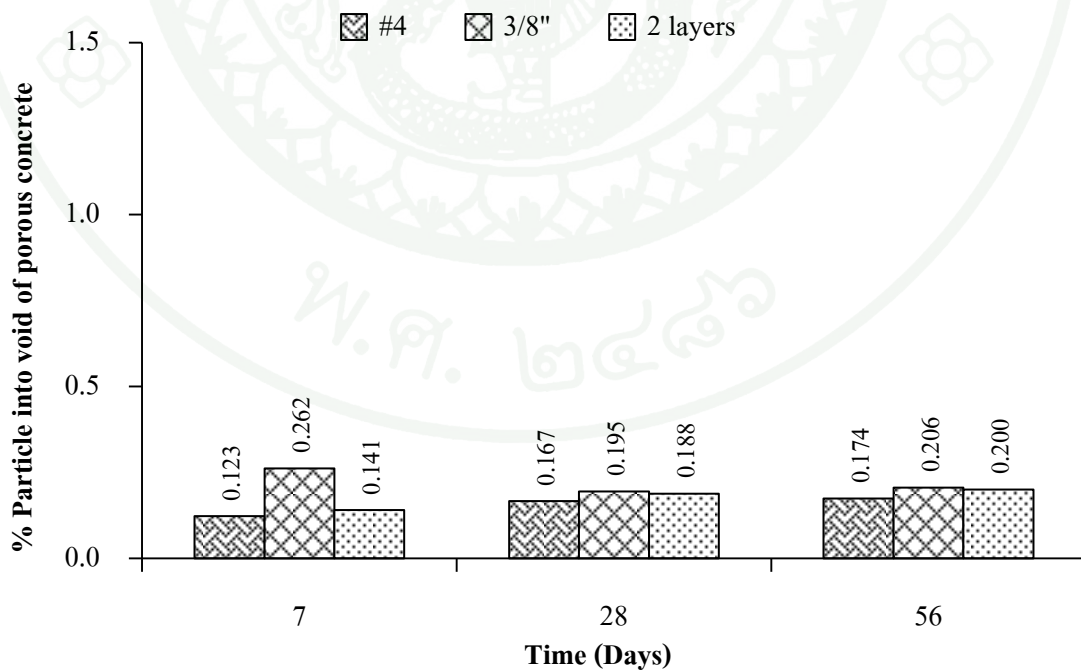
จากการสังเกตคอนกรีตพูนที่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง พบว่ามีอนุภาคของเม็ดดินเข้าไปอยู่ภายในรูโพรงของคอนกรีตพูนไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากว่ามี Geotextile เป็นวัสดุกรองไว้ก่อนแล้วและเมื่อเวลาผ่านไปอนุภาคเม็ดดินที่อยู่ภายในคอนกรีตพูนไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปมากนัก ซึ่งก็สอดคล้องกับค่าความขุ่นที่กล่าวมาในข้างต้นว่าอนุภาคของเม็ดดินหลุดร่อนหรือไหลผ่านคอนกรีตพูนและ Geotextile เฉพาะช่วงแรกเท่านั้น จากนั้นอนุภาคของเม็ดดินก็จะค้างอยู่ภายในรูโพรงของคอนกรีตพูนและรูช่องว่างของ Geotextile ซึ่งทั้งคอนกรีตพูนและ Geotextile ก็ทำหน้าที่เป็นวัสดุกรองเพื่อป้องกันมิให้อนุภาคของเม็ดดินหลุดร่อนออกไปได้

นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอนุภาคของเม็ดดินไหลเข้าไปภายในรูโพรงของคอนกรีตพูนที่ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรองอย่างรวดเร็วในช่วงแรก ส่วนคอนกรีตพูนที่มี Geotextile เป็นวัสดุกรองไม่สามารถเห็นอนุภาคของเม็ดดินที่ไหลเข้าไปในรูโพรงของคอนกรีตพูนได้ชัดเจนมากนัก สังเกตจากสีของน้ำที่ขุ่นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งหลังจากการทดสอบก็ได้นำคอนกรีตพูนมาดูการอุดตันภายในรูโพรงของคอนกรีตพูน พบว่ามีลักษณะคล้ายกับที่กล่าวมาในข้างต้นกล่าวคือ คอนกรีตพูนที่ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง สังเกตเห็นอนุภาคของเม็ดดินอยู่ภายในรูโพรงของคอนกรีตพูนได้อย่างชัดเจน ส่วนคอนกรีตพูนที่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง สามารถสังเกตเห็นเป็นคราบน้ำขุ่นๆ โดยไม่ปรากฏเห็นในลักษณะที่เป็นอนุภาคเม็ดดิน ดังแสดงในภาพที่ 90 ถึงภาพที่ 92

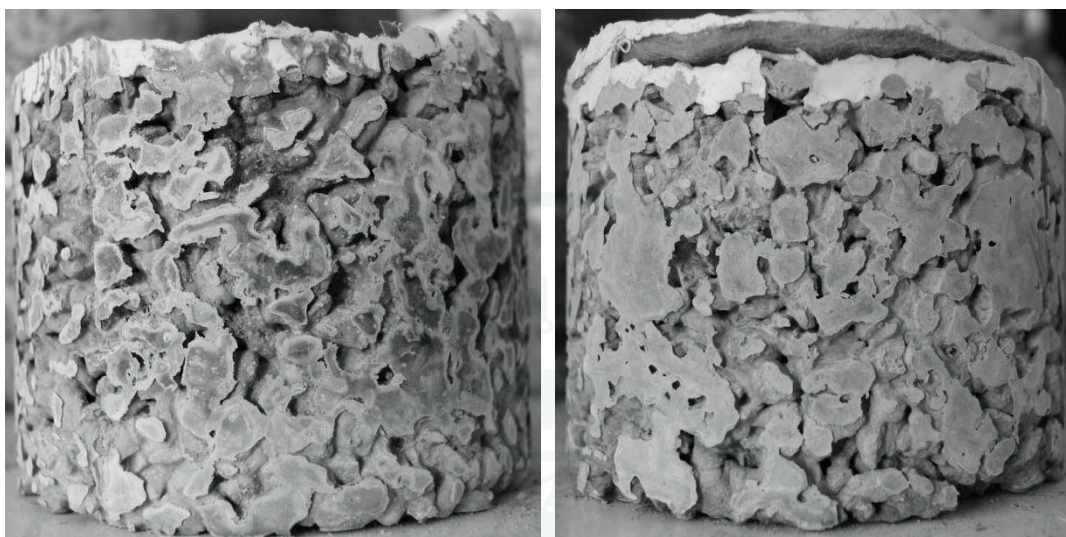
เมื่อพิจารณาภาพรวมในด้านการระบายน้ำและการกรองของคอนกรีตพูนที่มีการประยุกต์ใช้ Geotextile และไม่ใช่ Geotextile ของทุกๆขนาดมวลรวม พบว่าค่าอัตราการไหลมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก คอนกรีตพูนสามารถเป็นวัสดุสำหรับการกรองอนุภาคของเม็ดดินและสำหรับการระบายน้ำได้ โดยที่การประยุกต์ใช้งานร่วมกับ Geotextile สามารถช่วยลดเปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคของเม็ดดิน



ภาพที่ 88 เปอร์เซ็นต์ที่อนุภาคเม็ดดินค้ำภายในรูคอนกรีตพรุนโดยที่ไม่มีการประยุกต์ใช้ Geotextile



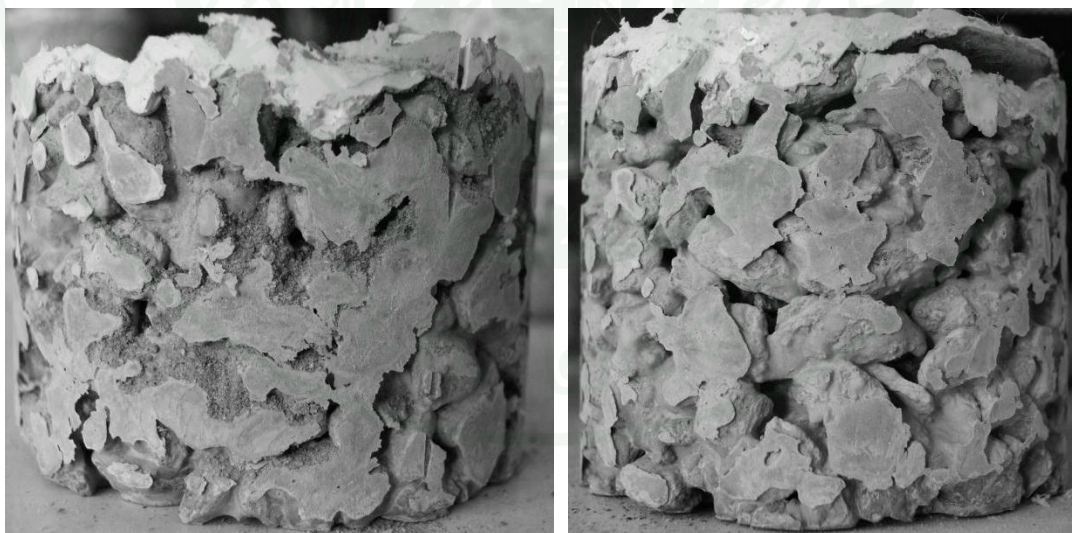
ภาพที่ 89 เปอร์เซ็นต์ที่อนุภาคเม็ดดินค้ำภายในรูคอนกรีตพรุนโดยที่มีการประยุกต์ใช้ Geotextile



(a)

(b)

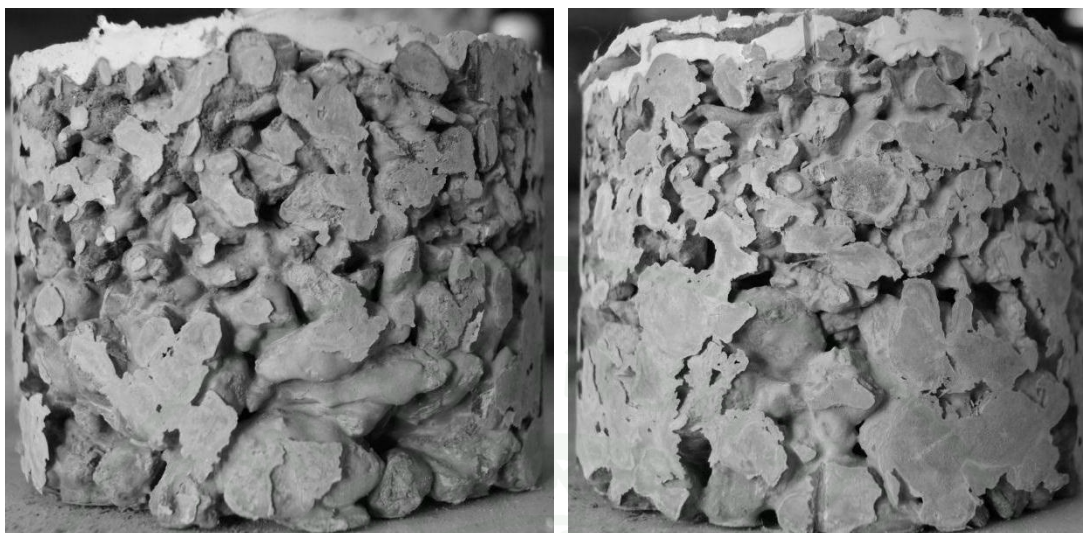
ภาพที่ 90 อนุภาคของเม็ดดินที่อุดตันอยู่ภายในรูโพรงคอนกรีตพูนของมวลรวมขนาดข้างตะแกรงเบอร์ 4 โดยที่ภาพด้านซ้าย (a) แสดงมวลรวมที่ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง และภาพด้านขวา (b) แสดงมวลรวมที่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง



(a)

(b)

ภาพที่ 91 อนุภาคของเม็ดดินที่อุดตันอยู่ภายในรูโพรงคอนกรีตพูนของมวลรวมขนาด 3/8 นิ้ว โดยที่ภาพด้านซ้าย (a) แสดงมวลรวมที่ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง และภาพด้านขวา (b) แสดงมวลรวมที่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง



(a)

(b)

ภาพที่ 92 อนุภาคของเม็ดดินที่อุดตันอยู่ภายในรูโพรงคอนกรีตพูนของมวลสองชั้น โดยที่ภาพด้านซ้าย (a) แสดงมวลรวมที่ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง และภาพด้านขวา (b) แสดงมวลรวมที่มี Geotextile เป็นวัสดุกรอง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางด้านกำลังรับแรงค้ำและพฤติกรรมการวิบัติของคอนกรีตพูนในห้องปฏิบัติการ โดยการประยุกต์ใช้วัสดุสังเคราะห์เสริมแรงประเภท Geogrid และ Fiberglass รวมถึงการประยุกต์ใช้ร่วมกับ Geotextile เพื่อประสิทธิภาพในด้านการกรอง จากงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. คอนกรีตพูนมีการพัฒนากำลังรับแรงค้ำเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยขนาดของมวลรวมมีผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านกำลังรับแรงค้ำของคอนกรีตพูนให้สูงขึ้น ค่ากำลังรับแรงค้ำของคอนกรีตพูนอยู่ในช่วง 29.95 ถึง 41.09 กิโลกรัม/เซนติเมตร² ที่อายุการบ่ม 28 วัน
2. คอนกรีตพูนปกติที่ไม่มีการเสริมวัสดุสังเคราะห์มีการวิบัติแบบทันทีทันใด การเสริมวัสดุสังเคราะห์ประเภท Fiberglass และ Geogrid พบว่ามีคุณสมบัติช่วยปรับปรุงพฤติกรรมด้านความยืดหยุ่น (Ductility) ของคอนกรีตพูนให้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามกำลังรับแรงค้ำจะลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตพูนปกติที่ไม่มีการเสริมวัสดุสังเคราะห์ ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตพูนมีช่องว่างภายในตัว จึงส่งผลทำให้การยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตพูนกับวัสดุสังเคราะห์เสริมแรงไม่ดีเท่าที่ควร
3. คอนกรีตพูนสามารถเป็นวัสดุสำหรับการกรองและการระบายน้ำได้สำหรับดินทราย โดยที่สภาวะอัตราการไหลคงที่ การประยุกต์ใช้ Geotextile และไม่ใช่ Geotextile มีค่าอัตราการไหลที่ใกล้เคียงกันในช่วง 1×10^{-2} ถึง 2×10^{-2} เซนติเมตร³/วินาที/เซนติเมตร² และการประยุกต์ใช้ Geotextile มีประสิทธิภาพช่วยลดเปอร์เซ็นต์การสูญเสียอนุภาคเม็ดดินได้
4. คอนกรีตพูนที่ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรองมีการสูญเสียอนุภาคเม็ดดินมากในช่วงแรก โดยที่มวลรวมขนาดใหญ่มีแนวโน้มเปอร์เซ็นต์การสูญเสียมากกว่ามวลรวมที่มีขนาดเล็กมีค่าอยู่ในช่วง 0.344 % ถึง 1.005 % ส่วนคอนกรีตพูนที่มี Geotextile เป็นวัสดุกรองมีการสูญเสียอนุภาคเม็ดดินที่ใกล้เคียงกันในทุกขนาดมวลรวมและมีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียที่น้อยกว่ามวลรวมที่ไม่มี Geotextile เป็นวัสดุกรองมีค่าอยู่ในช่วง 0.174 % ถึง 0.346 %

ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยในอนาคตควรปรับปรุงการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุคอนกรีตพูนกับวัสดุใยสังเคราะห์เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงดัดและติดตั้งเครื่องมือวัดการแอ่นตัวของคานเพื่ออธิบายการปรับปรุงพฤติกรรมด้านการวิบัติให้ชัดเจนยิ่งขึ้น
2. ควรมีการนำวัสดุเชื่อมประสานชนิดอื่นทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติในด้านต่างๆเพิ่มเติมและเป็นการเพิ่มทางเลือกในการผลิตคอนกรีตพูน
3. เพื่อยืนยันประสิทธิภาพการกรองของวัสดุใยสังเคราะห์ควรมีการทดลองกับดินประเภทต่างๆ เช่น ดินเหนียว ดินตะกอน เป็นต้น
4. งานวิจัยในอนาคตควรที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานในพื้นที่จริง เพื่อยืนยันคุณสมบัติจากการทดลองในห้องปฏิบัติการและติดตั้งเครื่องมือวัดค่าจริงในสนามเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการป้องกันเสถียรภาพของลาดดิน

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ชัยรัตน์ ศุภชวโรจน์. 2552. การประยุกต์ใช้ตาข่ายเสริมแรง (Geogrid) ในโครงสร้างชั้นทาง. ใน การสัมมนาเจ้าหน้าที่วิเคราะห์และตรวจสอบปี2552, ส่วนออกแบบและแนะนำโครงสร้างชั้นทางสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ, กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

ถนัดกิจ ชาริรัตน์, วัจนวงศ์ กรีพละ, กษิธิศ การิษุม, ทวีวุฒิ พิทักษ์กุล, ชัยวัฒน์ โกศล และ รัฐติวุธ ทวีโคตร. 2555. การประยุกต์ใช้ฝาปิดรางระบายน้ำคอนกรีตพูนในชุมชนเมือง. ใน การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 17, จ.อุตรธานี.

ถนัดกิจ ชาริรัตน์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2551. คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์สำหรับผลิตคอนกรีตพูน. ใน การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 4, จ.อุบลราชธานี.

ถนัดกิจ ชาริรัตน์. 2551. เอกสารประกอบการสอนคอนกรีตเทคโนโลยี สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ถนัดกิจ ชาริรัตน์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2552. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรงและกำลังอัดของคอนกรีตพูน. ใน การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, จ.นครราชสีมา.

ถนัดกิจ ชาริรัตน์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2551. คอนกรีตพูน: คอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม. ใน การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 13 พัทยา, จ.ชลบุรี

ทัศนีย์ สุวรรณมงคล และ จิราภรณ์ ศรีเรไร. 2549. การควบคุมคุณภาพวัสดุ Geosynthetic. ใน การสัมมนาเจ้าหน้าที่วิเคราะห์และตรวจสอบปี2549, กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

บริษัท ทีพีไอ คอนกรีต จำกัด. 2551. เอกสารคอนกรีตเทคโนโลยี

บริษัท Chainamaking Co., Ltd. 2556. ลักษณะผลิตภัณฑ์ Geonet. แหล่งที่มา:

<http://www.chinametalking.com/List.asp?page=4&TId=&TPIId>, 8 มีนาคม 2556

บริษัท Feicheng Haicheng Plastic Package Co.,Ltd. 2556., **ลักษณะผลิตภัณฑ์ Uniaxial Geogrid.**

แหล่งที่มา:<http://www.tradekorea.com/sell-leads>

[detail/S00012467/Uniaxial_HDPE_Geogrid.html](http://www.tradekorea.com/sell-leads/detail/S00012467/Uniaxial_HDPE_Geogrid.html), 8 มีนาคม 2556

บริษัท Golden-Pow Co., Ltd. 2556. **ลักษณะผลิตภัณฑ์ Geomembrane.** แหล่งที่มา:

<http://goldenpow.en.busytrade.com/products/info/802622/HDPE-Geomembrane.html>, 8

มีนาคม 2556

บริษัท Nan Yang LI Da Geosynthetics Co.,Ltd. 2556. **ลักษณะผลิตภัณฑ์ Nonwoven Geotextile.**

แหล่งที่มา:<http://lidany.com.cn/uploadfile/20100705/20100705154042643.jpg>, 8 มีนาคม

2556

บริษัท Noida Co.,Ltd. 2556. **ลักษณะ Woven Geotextile.** แหล่งที่มา:

<http://noida-uttarpradesh.olx.in/woven-geotextile-fabric-iid-56677167>, 8 มีนาคม 2556

บริษัท Shandong MaoXun Information Technology Co.,Ltd. 2556. **ลักษณะผลิตภัณฑ์**

Geosynthetic clay liner. แหล่งที่มา: <http://www.trade.gov.cn/product/58663.html>, 8

มีนาคม 2556

บริษัท Taian Road Engineering Materials Co.,Ltd. 2556. **ลักษณะผลิตภัณฑ์ Biaxial Geogrid.**

แหล่งที่มา:http://www.taroad.com/products_detail/&productId, 8 มีนาคม 2556

มาตรฐานการทดสอบวัสดุในงานคอนกรีต. 2550. **มาตรฐานการทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดของคอนกรีต (มยพ.1211-50).**

ขงยุทธ เต๋าสิริ และ กฤษณา ขวชานนท์. 2548. แนวทางในการป้องกันและแก้ไขการเคลื่อนตัวเชิงลาด. ใน การสัมมนาเจ้าหน้าที่วิเคราะห์และตรวจสอบประจำปีงบประมาณ 2548, ส่วนออกแบบและแนะนำโครงสร้างชั้นทางสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ,กรมทางหลวง. กรุงเทพฯ.

ยุทธนา บุญสินชัย และ ทศพล เพชรโรจน์. 2553, ปริญญานิพนธ์, อิทธิพลของมวลรวมและอัตราส่วนโพรงต่อความทนทานการขัดสีและสึกกร่อนของคอนกรีตพอร์น, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ, จ.สกลนคร.

ยุวดี หิรัญ, พีรพงษ์ ศิวินา, สุรชาติ ราโชติ. 2551. บล็อกปูถนนคอนกรีตพอร์น. ใน การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่4, จ.อุบลราชธานี.

ศุภกิจ นนทนานันท์, เกียรติคุณ ทองแดง, ฌพล อยู่บรรพต, ดวงฤดี ฉายสุวรรณ และ มณฑล ฐานุตตมวงศ์. 2554. การใช้ประโยชน์ปูนซีเมนต์จากขยะอุตสาหกรรมโดยผลิตเป็นคอนกรีตพอร์น. ใน การประชุมเกษตรวิชาการครั้งที่ 49, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อุตสาหกรรม, กระทรวง. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2543. มอก. 1841-2542 คอนกรีต-การทดสอบความต้านทานแรงดัด, กทมฯ.

ASTM C78-02. **Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)**

Berg, R.R., Christopher, B.R., and Perkins, S. 2000. **Geosynthetic Reinforcement of the Aggregate Base/Subbase Courses of Pavement Structures**, Geosynthetic Materials Association White Paper II, Geosynthetic Materials Association, Roseville, Minnesota.

Chareerat, T., Nontananandh, S., Prasertrunguang, M., Chindaprasirt, P., Nakagawa T. and Hatanaka, S., 2009. **Porous Concrete: Environmentally Friendly Applications in Thailand**, Proc. of the 16th Tri-University International Joint Seminar and Symposium, Mie University, Japan, October 19-22, 2009.

Chareerat, T., Nontananandh, S., Tanchaisawat, T. and Hatanaka, S., 2009. **Porous concrete: Recent Applications for Geo-Environment**. International Conference on science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB), 23-24 July 2009 , Mahasarakham University, Thailand

Chindaprasirt, P and Chareerat, T. 2006. **Cement Paste Characteristics and Porous Concrete Properties**. Constr Build Mater(2007),doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.12.17

Robert M. Koerner., **Designing With Geosynthetics**, Third edition

Sanjay Kumar Shukla., Handbook of Geosynthetic Engineering, Second edition





ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูน

ตารางผนวกที่ ก1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของมวลรวมขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 4

มวลรวมขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 4									
Curing	Without			With Fiberglass			With Geogrid		
Time	Ex1	Ex2	Ex3	Ex1	Ex2	Ex3	Ex1	Ex2	Ex3
(Days)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
7	631.84 (29.95)	671.84 (31.85)	681.84 (32.32)	721.84 (34.22)	696.84 (33.03)	731.84 (34.69)	656.84 (33.13)	681.84 (32.32)	681.84 (32.32)
14	691.84 (32.79)	706.84 (36.06)	721.84 (34.22)	731.84 (34.69)	711.84 (33.74)	731.84 (34.69)	706.84 (33.50)	721.84 (34.22)	721.84 (34.22)
28	806.84 (38.25)	806.84 (40.81)	811.84 (38.48)	706.84 (33.50)	781.84 (37.06)	791.84 (37.53)	681.84 (32.32)	756.84 (35.87)	781.84 (37.26)
90	931.84 (44.17)	981.84 (46.54)	906.84 (45.55)	1006.84 (47.72)	931.84 (44.17)	806.84 (38.25)	831.84 (39.43)	831.84 (39.43)	731.84 (34.69)

หมายเหตุ ค่าตัวเลขในวงเล็บ () มีหน่วยเป็น กิโลกรัม/เซนติเมตร² (ksc)

ตารางผนวกที่ ก2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของมวลรวมขนาด 3/8 นิ้ว

มวลรวมขนาด 3/8 นิ้ว									
Curing	Without			With Fiberglass			With Geogrid		
Time	Ex1	Ex2	Ex3	Ex1	Ex2	Ex3	Ex1	Ex2	Ex3
(Days)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
7	626.84 (29.72)	656.84 (31.14)	651.84 (30.90)	531.84 (25.21)	586.84 (27.82)	581.84 (27.58)	631.84 (29.95)	591.84 (28.05)	611.84 (29.00)
14	681.84 32.72	686.84 32.56	681.84 32.32	631.84 29.95	606.84 28.76	671.84 31.85	681.84 32.32	656.84 31.09	661.84 31.37

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

มวลรวมขนาด 3/8 นิ้ว									
Curing	Without			With Fiberglass			With Geogrid		
Time	Ex1	Ex2	Ex3	Ex1	Ex2	Ex3	Ex1	Ex2	Ex3
(Days)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
28	706.84 (33.51)	681.84 (32.32)	731.84 (34.69)	631.84 (29.95)	631.84 (29.95)	631.84 (29.95)	671.84 (31.81)	681.84 (32.32)	706.84 (33.51)
90	831.84 (39.43)	781.84 (37.06)	781.84 (37.06)	781.84 (37.06)	756.84 (35.87)	781.84 (37.06)	731.84 (34.69)	856.84 (40.62)	756.84 (35.87)

หมายเหตุ ค่าตัวเลขในวงเล็บ () มีหน่วยเป็น กิโลกรัม/เซนติเมตร² (ksc)

ตารางผนวกที่ ก3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของมวลรวมสองชั้น

มวลรวมสองชั้น									
Curing	Without			With Fiberglass			With Geogrid		
Time	Ex1	Ex2	Ex3	Ex1	Ex2	Ex3	Ex1	Ex2	Ex3
(Days)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
7	781.84 (37.06)	841.84 (39.91)	781.84 (37.06)	706.84 (33.51)	706.84 (33.51)	756.84 (35.87)	631.84 (29.95)	731.84 (34.69)	681.84 (32.32)
14	816.84 (38.72)	841.84 (39.91)	831.84 (39.43)	711.84 (33.74)	721.84 (34.22)	731.84 (34.69)	681.84 (32.32)	711.84 (33.75)	706.84 (33.51)
28	831.84 (39.43)	901.84 (42.75)	831.84 (39.43)	806.84 (38.25)	871.84 (41.33)	881.84 (41.80)	781.84 (37.06)	781.84 (37.06)	781.84 (37.06)
90	981.84 (46.55)	931.84 (44.17)	931.84 (44.17)	931.84 (44.17)	856.84 (40.62)	981.84 (46.55)	956.84 (45.36)	931.84 (44.17)	831.84 (39.43)

หมายเหตุ ค่าตัวเลขในวงเล็บ () มีหน่วยเป็น กิโลกรัม/เซนติเมตร² (ksc)

ตัวอย่างการคำนวณกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพูน (Flexural strength)

มวบรวมขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 4 Ex 1 ที่อายุการบ่ม 7 วัน

$$\begin{aligned} \text{Flexural Strength, } R &= \frac{PL}{bd^2} = \frac{631.84 \times 40}{15 \times 7.5^2} \\ &= 29.95 \text{ กิโลกรัม/เซนติเมตร}^2 \end{aligned}$$

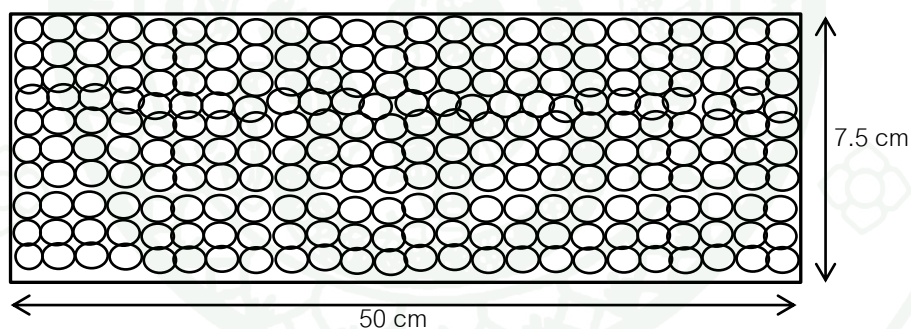
โดยที่ $P = 631.84$ กิโลกรัม

$L = 40$ เซนติเมตร

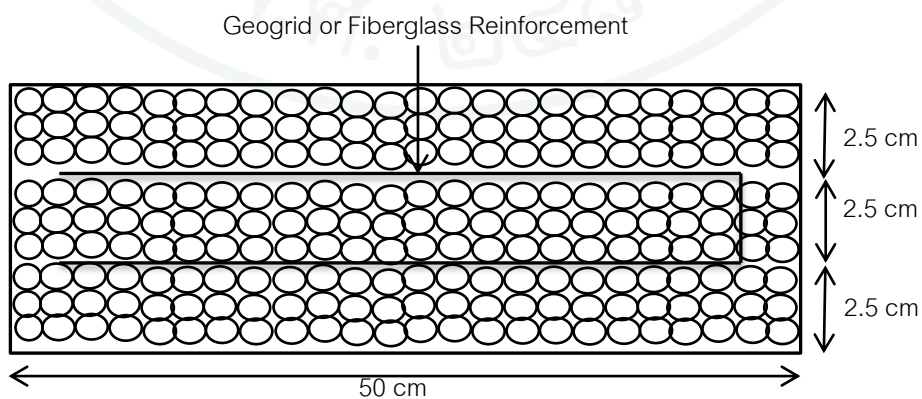
$b = 15$ เซนติเมตร

$d = 7.5$ เซนติเมตร

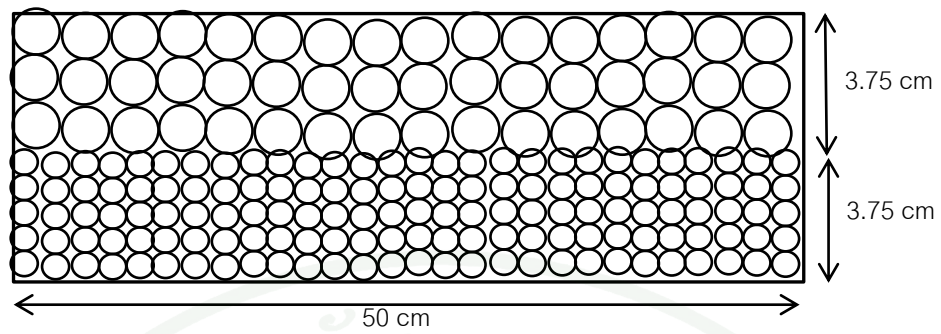
Diagram แผ่นคอนกรีตพูนสำหรับทดสอบกำลังรับแรงดัด



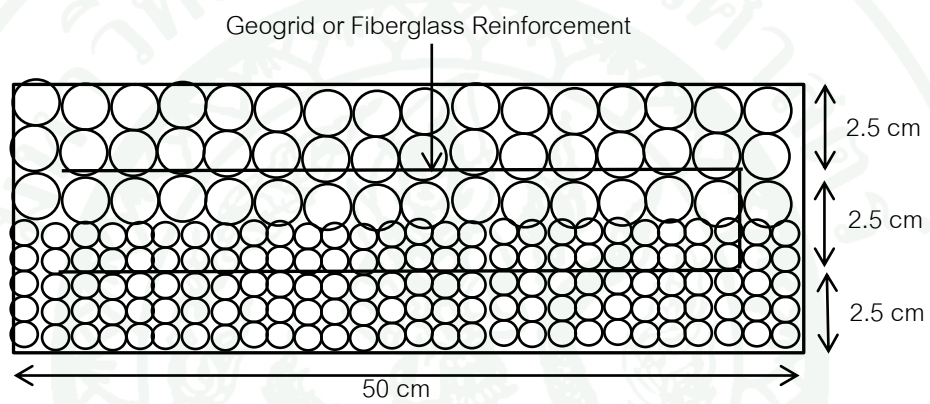
ภาพผนวกที่ ก1 Diagram แผ่นคอนกรีตพูนที่ไม่เสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรง



ภาพผนวกที่ ก2 Diagram แผ่นคอนกรีตพูนที่เสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรง



ภาพผนวกที่ ก3 Diagram แผ่นคอนกรีตพูนสองชั้นที่ไม่เสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรง



ภาพผนวกที่ ก4 Diagram แผ่นคอนกรีตพูนสองชั้นที่เสริมวัสดุใยสังเคราะห์เสริมแรง



ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบการซึมผ่านน้ำและการกรองของคอนกรีตพรุน

ตารางผนวกที่ ข1 ผลการวัดค่าอัตราการไหลของมวลรวม #4 Without Geotextile

Elapse Time (Days)	#4 Without Geotextile Ex 1			#4 Without Geotextile Ex 2			#4 Without Geotextile Ex 3		
	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)
0.02	140.34	20	7.02	132.91	20	6.65	166.31	20	8.32
0.04	120.45	20	6.02	125.15	20	6.26	82.33	20	4.12
0.08	99.09	20	4.95	98.80	20	4.94	105.74	20	5.29
0.13	135.35	20	6.78	129.35	20	6.47	143.95	20	7.20
0.25	134.67	20	6.73	135.84	20	6.79	135.67	20	6.78
0.5	130.34	20	6.52	134.13	20	6.71	134.42	20	6.72
1	105.44	20	5.27	107.92	20	5.40	100.02	20	5.00
1.38	110.45	20	5.52	116.48	20	5.82	98.64	20	4.93
2	95.42	20	4.77	109.69	20	5.48	88.34	20	4.42
2.38	104.58	20	5.23	106.66	20	5.33	106.02	20	5.30
3	95.12	20	4.76	97.39	20	4.87	93.67	20	4.68
3.38	95.09	20	4.75	97.39	20	4.87	93.67	20	4.68
4	93.45	20	4.67	94.67	20	4.73	91.18	20	4.56
4.38	100.11	20	5.01	96.67	20	4.83	111.23	20	5.56
5	93.44	20	4.67	91.76	20	4.59	96.49	20	4.82
5.38	95.53	20	4.78	90.91	20	4.55	99.98	20	5.00
6	85.72	20	4.29	83.18	20	4.16	87.54	20	4.38
6.38	86.90	20	4.34	82.36	20	4.12	89.89	20	4.49
7	80.33	20	4.02	78.10	20	3.91	79.43	20	3.97
7.38	-	-	-	76.81	20	3.84	79.55	20	3.98
8	-	-	-	86.90	20	4.35	88.03	20	4.40
9	-	-	-	80.66	20	4.03	82.16	20	4.11
10	-	-	-	66.20	20	3.31	71.08	20	3.55
11	-	-	-	56.03	20	2.80	57.97	20	2.90

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Elapse Time (Days)	#4 Without Geotextile Ex 1			#4 Without Geotextile Ex 2			#4 Without Geotextile Ex 3		
	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)
12	-	-	-	42.25	20	2.11	48.33	20	2.42
13	-	-	-	35.22	20	1.76	38.78	20	1.94
14	-	-	-	28.25	20	1.41	34.02	20	1.70
15	-	-	-	26.49	20	1.32	29.62	20	1.48
16	-	-	-	24.09	20	1.20	26.77	20	1.34
17	-	-	-	26.29	20	1.31	29.05	20	1.45
18	-	-	-	28.87	20	1.44	31.49	20	1.57
19	-	-	-	29.07	20	1.45	28.96	20	1.45
20	-	-	-	29.4	20	1.47	28.57	20	1.43
21	-	-	-	23.34	20	1.17	24.55	20	1.23
22	-	-	-	22.07	20	1.10	21.87	20	1.09
23	-	-	-	21.93	20	1.10	21.56	20	1.08
24	-	-	-	24.88	20	1.24	25.13	20	1.26
25	-	-	-	27.73	20	1.39	27.54	20	1.38
26	-	-	-	29.08	20	1.45	28.31	20	1.42
27	-	-	-	31.17	20	1.56	31.17	20	1.56
28	-	-	-	32.16	20	1.61	31.25	20	1.56
29	-	-	-	-	-	-	26.20	20	1.31
30	-	-	-	-	-	-	27.63	20	1.38
31	-	-	-	-	-	-	25.77	20	1.29
32	-	-	-	-	-	-	25.75	20	1.29
33	-	-	-	-	-	-	25.90	20	1.30
34	-	-	-	-	-	-	23.00	20	1.15
35	-	-	-	-	-	-	21.61	20	1.08

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Elapse Time (Days)	#4 Without Geotextile Ex 1			#4 Without Geotextile Ex 2			#4 Without Geotextile Ex 3		
	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)
36	-	-	-	-	-	-	19.95	20	1.00
37	-	-	-	-	-	-	20.72	20	1.04
38	-	-	-	-	-	-	19.45	20	0.97
39	-	-	-	-	-	-	19.25	20	0.96
40	-	-	-	-	-	-	18.11	20	0.91
41	-	-	-	-	-	-	15.97	20	0.80
42	-	-	-	-	-	-	17.42	20	0.87
43	-	-	-	-	-	-	18.72	20	0.94
44	-	-	-	-	-	-	16.81	20	0.84
45	-	-	-	-	-	-	16.84	20	0.84
46	-	-	-	-	-	-	16.96	20	0.85
47	-	-	-	-	-	-	17.06	20	0.85
48	-	-	-	-	-	-	16.41	20	0.82
49	-	-	-	-	-	-	16.28	20	0.81
50	-	-	-	-	-	-	15.87	20	0.79
51	-	-	-	-	-	-	15.96	20	0.80
52	-	-	-	-	-	-	15.94	20	0.80
53	-	-	-	-	-	-	15.93	20	0.80
54	-	-	-	-	-	-	15.95	20	0.80
55	-	-	-	-	-	-	15.97	20	0.80
56	-	-	-	-	-	-	15.95	20	0.80

ตารางผนวกที่ ข2 ผลการวัดค่าอัตราการไหลของมวลรวม #4 With Geotextile

Elapse Time (Days)	#4 With Geotextile Ex 1			#4 With Geotextile Ex 2			#4 With Geotextile Ex 3		
	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)
0.02	180.34	20	9.02	151.03	20	7.55	225.67	20	11.28
0.04	150.45	20	7.52	158.73	20	7.94	148.51	20	7.43
0.08	193.40	20	9.67	206.48	20	10.32	173.25	20	8.566
0.13	210.76	20	10.54	211.87	20	10.59	214.03	20	10.70
0.25	200.87	20	10.04	194.20	20	9.71	212.63	20	10.63
0.5	175.43	20	8.77	178.41	20	8.92	178.41	20	8.92
1	150.88	20	7.54	134.75	20	6.74	172.73	20	8.64
1.38	155.32	20	7.77	124.00	20	6.20	163.55	20	8.18
2	130.44	20	6.22	117.76	20	5.89	157.20	20	7.86
2.38	140.00	20	7.00	115.20	20	5.76	155.51	20	7.78
3	150.87	20	7.54	142.80	20	7.14	169.17	20	8.46
3.38	155.22	20	7.76	142.80	20	7.14	169.17	20	8.46
4	160.98	20	8.05	140.84	20	7.04	171.78	20	8.59
4.38	155.47	20	7.77	138.36	20	6.92	172.19	20	8.61
5	145.44	20	7.27	135.26	20	6.76	163.44	20	8.17
5.38	148.98	20	7.45	137.63	20	6.88	167.70	20	8.39
6	115.37	20	5.77	114.68	20	5.73	122.82	20	6.14
6.38	113.89	20	5.69	109.08	20	5.45	119.54	20	5.98
7	99.23	20	4.96	92.63	20	4.63	104.11	20	5.21
7.38	-	-	-	90.84	20	4.54	100.82	20	5.04
8	-	-	-	70.50	20	3.53	115.52	20	5.78
9	-	-	-	59.42	20	2.97	101.68	20	5.08
10	-	-	-	44.35	20	2.22	79.28	20	3.96
11	-	-	-	31.32	20	1.57	58.89	20	2.94

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

Elapse Time (Days)	#4 With Geotextile Ex 1			#4 With Geotextile Ex 2			#4 With Geotextile Ex 3		
	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)
12	-	-	-	32.29	20	1.61	41.03	20	2.05
13	-	-	-	35.36	20	1.77	36.40	20	1.82
14	-	-	-	36.6	20	1.83	37.60	20	1.88
15	-	-	-	35.37	20	1.77	34.37	20	1.72
16	-	-	-	32.62	20	1.64	32.60	20	1.63
17	-	-	-	33.62	20	1.68	33.93	20	1.69
18	-	-	-	33.67	20	1.68	33.93	20	1.70
19	-	-	-	33.64	20	1.68	33.07	20	1.65
20	-	-	-	32.16	20	1.61	32.18	20	1.61
21	-	-	-	31.75	20	1.59	31.93	20	1.60
22	-	-	-	30.73	20	1.54	30.94	20	1.55
23	-	-	-	30.52	20	1.53	30.45	20	1.52
24	-	-	-	29.05	20	1.45	29.29	20	1.46
25	-	-	-	29.35	20	1.47	29.45	20	1.47
26	-	-	-	29.66	20	1.48	29.77	20	1.49
27	-	-	-	31.85	20	1.59	32.23	20	1.61
28	-	-	-	32.57	20	1.63	32.49	20	1.62
29	-	-	-	-	-	-	27.16	20	1.36
30	-	-	-	-	-	-	26.29	20	1.31
31	-	-	-	-	-	-	24.00	20	1.20
32	-	-	-	-	-	-	24.07	20	1.20
33	-	-	-	-	-	-	23.34	20	1.17
34	-	-	-	-	-	-	21.82	20	1.09
35	-	-	-	-	-	-	19.16	20	0.96

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

Elapse Time (Days)	#4 With Geotextile Ex 1			#4 With Geotextile Ex 2			#4 With Geotextile Ex 3		
	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)
36	-	-	-	-	-	-	17.90	20	0.90
37	-	-	-	-	-	-	17.92	20	0.90
38	-	-	-	-	-	-	16.95	20	0.85
39	-	-	-	-	-	-	17.04	20	0.85
40	-	-	-	-	-	-	18.95	20	0.95
41	-	-	-	-	-	-	18.93	20	0.95
42	-	-	-	-	-	-	18.75	20	0.94
43	-	-	-	-	-	-	18.95	20	0.95
44	-	-	-	-	-	-	18.93	20	0.95
45	-	-	-	-	-	-	18.95	20	0.95
46	-	-	-	-	-	-	18.92	20	0.95
47	-	-	-	-	-	-	17.95	20	0.90
48	-	-	-	-	-	-	18.95	20	0.95
49	-	-	-	-	-	-	19.2	20	0.96
50	-	-	-	-	-	-	18.95	20	0.95
51	-	-	-	-	-	-	18.93	20	0.95
52	-	-	-	-	-	-	18.97	20	0.95
53	-	-	-	-	-	-	18.94	20	0.95
54	-	-	-	-	-	-	18.95	20	0.95
55	-	-	-	-	-	-	18.94	20	0.95
56	-	-	-	-	-	-	18.97	20	0.95

ตารางผนวกที่ ๓ ผลการวัดค่าอัตราการไหลของมวลรวม 3/8 นิ้ว Without Geotextile

Elapse Time (Days)	3/8" Without Geotextile Ex 1			3/8" Without Geotextile Ex 2			3/8" Without Geotextile Ex 3		
	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)
0.02	135.46	20	6.77	141.38	20	7.07	136.65	20	6.83
0.04	103.34	20	5.17	109.29	20	5.46	101.51	20	5.08
0.08	108.12	20	5.41	114.52	20	5.73	97.87	20	4.89
0.13	123.65	20	6.18	124.60	20	6.23	125.79	20	6.29
0.25	133.23	20	6.66	129.38	20	6.47	135.87	20	6.79
0.5	135.46	20	6.77	134.60	20	6.73	142.73	20	7.14
1	115.43	20	5.77	119.53	20	5.98	114.16	20	5.71
1.38	112.45	20	5.62	114.87	20	5.74	109.95	20	5.50
2	98.65	20	4.93	99.27	20	4.96	97.25	20	4.86
2.38	105.78	20	5.29	107.36	20	5.37	103.18	20	5.16
3	113.45	20	5.67	114.16	20	5.71	111.53	20	5.58
3.38	110.56	20	5.29	112.37	20	5.62	111.53	20	5.58
4	112.67	20	5.63	115.40	20	5.77	112.32	20	5.62
4.38	115.42	20	5.77	118.11	20	5.91	117.51	20	5.88
5	99.81	20	4.99	101.79	20	5.09	97.04	20	4.85
5.38	98.76	20	4.94	99.26	20	4.96	99.06	20	4.95
6	97.54	20	4.88	97.87	20	4.89	98.56	20	4.93
6.38	96.52	20	4.83	95.94	20	4.80	99.12	20	4.86
7	91.15	20	4.56	92.38	20	4.62	90.29	20	4.51
7.38	-	-	-	91.3	20	4.57	91.28	20	4.56
8	-	-	-	109.48	20	5.47	107.62	20	5.38
9	-	-	-	89.56	20	4.48	89.56	20	4.48
10	-	-	-	77.71	20	3.89	72.17	20	3.61
11	-	-	-	58.75	20	2.94	56.75	20	2.84

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

Elapse Time (Days)	3/8" Without Geotextile Ex 1			3/8" Without Geotextile Ex 2			3/8" Without Geotextile Ex 3		
	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)
12	-	-	-	48.31	20	2.42	42.31	20	2.12
13	-	-	-	47.29	20	2.36	39.29	20	1.96
14	-	-	-	44.40	20	2.22	36.4	20	1.82
15	-	-	-	39.62	20	1.98	34.62	20	1.73
16	-	-	-	39.6	20	1.98	39.60	20	1.98
17	-	-	-	38.62	20	1.93	38.82	20	1.94
18	-	-	-	39.41	20	1.97	39.29	20	1.96
19	-	-	-	41.74	20	2.09	40.93	20	2.05
20	-	-	-	44.71	20	2.24	44.71	20	2.24
21	-	-	-	47.40	20	2.37	49.40	20	2.47
22	-	-	-	48.60	20	2.43	48.60	20	2.43
23	-	-	-	44.32	20	2.22	43.32	20	2.17
24	-	-	-	43.73	20	2.19	43.32	20	2.17
25	-	-	-	45.15	20	2.26	45.15	20	2.26
26	-	-	-	48.16	20	2.41	48.85	20	2.44
27	-	-	-	47.20	20	2.36	46.2	20	2.31
28	-	-	-	41.14	20	2.06	42.8	20	2.14
29	-	-	-	-	-	-	35.24	20	1.76
30	-	-	-	-	-	-	30.82	20	1.54
31	-	-	-	-	-	-	32.28	20	1.61
32	-	-	-	-	-	-	34.24	20	1.71
33	-	-	-	-	-	-	35.6	20	1.78
34	-	-	-	-	-	-	32.15	20	1.61
35	-	-	-	-	-	-	26.16	20	1.31

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

Elapse Time (Days)	3/8" Without Geotextile Ex 1			3/8" Without Geotextile Ex 2			3/8" Without Geotextile Ex 3		
	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)
36	-	-	-	-	-	-	27.16	20	1.36
37	-	-	-	-	-	-	30.12	20	1.51
38	-	-	-	-	-	-	32.69	20	1.63
39	-	-	-	-	-	-	30.49	20	1.52
40	-	-	-	-	-	-	31.23	20	1.56
41	-	-	-	-	-	-	29.88	20	1.49
42	-	-	-	-	-	-	28.57	20	1.43
43	-	-	-	-	-	-	27.12	20	1.36
44	-	-	-	-	-	-	18.12	20	1.41
45	-	-	-	-	-	-	27.72	20	1.39
46	-	-	-	-	-	-	27.55	20	1.38
47	-	-	-	-	-	-	25.31	20	1.27
48	-	-	-	-	-	-	26.60	20	1.33
49	-	-	-	-	-	-	26.95	20	1.35
50	-	-	-	-	-	-	27.95	20	1.40
51	-	-	-	-	-	-	28.24	20	1.41
52	-	-	-	-	-	-	28.45	20	1.42
53	-	-	-	-	-	-	28.85	20	1.44
54	-	-	-	-	-	-	28.95	20	1.45
55	-	-	-	-	-	-	28.92	20	1.45
56	-	-	-	-	-	-	28.93	20	1.45

ตารางผนวกที่ ๔ ผลการวัดค่าอัตราการไหลของมวลรวม 3/8 นิ้ว With Geotextile

Elapse Time (Days)	3/8" With Geotextile Ex 1			3/8" With Geotextile Ex 2			3/8" With Geotextile Ex 3		
	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)
0.02	160.56	20	8.03	158.42	20	7.92	261.34	20	13.07
0.04	163.45	20	8.17	168.27	20	8.41	157.11	20	7.86
0.08	195.34	20	9.78	193.78	20	9.69	201.12	20	10.06
0.13	220.46	20	11.02	184.10	20	9.21	240.29	20	12.01
0.25	200.67	20	10.03	188.88	20	9.44	222.61	20	11.13
0.5	195.67	20	9.78	190.88	20	9.54	190.88	20	9.54
1	136.56	20	6.83	152.29	20	7.61	124.31	20	6.22
1.38	110.98	20	5.55	125.1	20	6.26	101.48	20	5.07
2	109.54	20	5.48	92.88	20	4.64	131.15	20	6.56
2.38	120.98	20	6.05	95.88	20	4.79	136.55	20	6.83
3	140.59	20	7.03	110.23	20	5.51	161.37	20	8.07
3.38	145.90	20	7.30	110.23	20	5.51	161.37	20	8.07
4	150.34	20	7.52	124.08	20	6.20	173.26	20	8.66
4.38	155.87	20	7.80	129.93	20	6.50	177.05	20	8.85
5	140.89	20	7.04	122.45	20	6.12	165.61	20	8.28
5.38	144.59	20	7.23	119.84	20	5.99	157.46	20	7.87
6	125.78	20	6.30	105.45	20	5.27	143.87	20	7.19
6.38	120.68	20	6.03	102.89	20	5.14	138.19	20	6.91
7	100.56	20	5.03	83.07	20	4.15	111.06	20	5.55
7.38	-	-	-	76.56	20	3.83	101.97	20	5.10
8	-	-	-	59.65	20	2.98	110.85	20	5.54
9	-	-	-	56.54	20	2.83	74.16	20	3.71
10	-	-	-	55.50	20	2.78	56.67	20	2.83
11	-	-	-	54.29	20	2.71	54.29	20	2.71

ตารางผนวกที่ ๗4 (ต่อ)

Elapse Time (Days)	3/8" With Geotextile Ex 1			3/8" With Geotextile Ex 2			3/8" With Geotextile Ex 3		
	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)
12	-	-	-	49.07	20	2.45	49.07	20	2.45
13	-	-	-	47.52	20	2.38	47.45	20	2.37
14	-	-	-	45.62	20	2.28	44.62	20	2.23
15	-	-	-	42.48	20	2.12	39.48	20	1.97
16	-	-	-	39.36	20	1.97	38.42	20	1.92
17	-	-	-	38.64	20	1.93	37.63	20	1.88
18	-	-	-	38.65	20	1.93	37.67	20	1.88
19	-	-	-	37.47	20	1.87	36.53	20	1.83
20	-	-	-	37.07	20	1.85	37.07	20	1.85
21	-	-	-	36.85	20	1.84	36.29	20	1.81
22	-	-	-	36.84	20	1.84	36.84	20	1.84
23	-	-	-	35.84	20	1.79	35.84	20	1.79
24	-	-	-	34.50	20	1.73	34.84	20	1.74
25	-	-	-	33.18	20	1.66	33.27	20	1.66
26	-	-	-	32.16	20	1.61	34.1	20	1.71
27	-	-	-	29.93	20	1.50	29.40	20	1.47
28	-	-	-	27.40	20	1.37	26.57	20	1.33
29	-	-	-	-	-	-	24.73	20	1.24
30	-	-	-	-	-	-	18.60	20	0.93
31	-	-	-	-	-	-	21.14	20	1.06
32	-	-	-	-	-	-	19.38	20	0.97
33	-	-	-	-	-	-	18.67	20	0.93
34	-	-	-	-	-	-	17.78	20	0.89
35	-	-	-	-	-	-	17.04	20	0.85

ตารางผนวกที่ ๗4 (ต่อ)

Elapse Time (Days)	3/8" With Geotextile Ex 1			3/8" With Geotextile Ex 2			3/8" With Geotextile Ex 3		
	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)
36	-	-	-	-	-	-	13.95	20	0.70
37	-	-	-	-	-	-	14.95	20	0.75
38	-	-	-	-	-	-	14.89	20	0.74
39	-	-	-	-	-	-	16.01	20	0.80
40	-	-	-	-	-	-	14.04	20	0.70
41	-	-	-	-	-	-	13.95	20	0.70
42	-	-	-	-	-	-	16.33	20	0.82
43	-	-	-	-	-	-	15.90	20	0.80
44	-	-	-	-	-	-	15.95	20	0.80
45	-	-	-	-	-	-	15.95	20	0.80
46	-	-	-	-	-	-	15.93	20	0.80
47	-	-	-	-	-	-	15.20	20	0.76
48	-	-	-	-	-	-	16.95	20	0.85
49	-	-	-	-	-	-	16.60	20	0.83
50	-	-	-	-	-	-	16.65	20	0.83
51	-	-	-	-	-	-	16.75	20	0.84
52	-	-	-	-	-	-	16.70	20	0.84
53	-	-	-	-	-	-	16.65	20	0.83
54	-	-	-	-	-	-	16.77	20	0.84
55	-	-	-	-	-	-	16.84	20	0.84
56	-	-	-	-	-	-	16.85	20	0.84

ตารางผนวกที่ ๕ ผลการวัดค่าอัตราการไหลของมวลรวมสองชั้น Without Geotextile

Elapse Time (Days)	2L Without Geotextile Ex 1			2L Without Geotextile Ex 2			2L Without Geotextile Ex 3		
	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)
0.02	170.45	20	8.52	161.64	20	8.08	176.03	20	8.80
0.04	170.34	20	8.52	180.34	20	9.02	115.48	20	5.77
0.08	140.87	20	7.04	154.13	20	7.71	134.41	20	6.72
0.13	180.32	20	9.12	184.66	20	9.23	178.00	20	8.90
0.25	170.89	20	8.54	174.42	20	8.72	169.81	20	8.49
0.5	163.89	20	8.19	165.04	20	8.25	160.56	20	8.03
1	125.67	20	6.28	129.22	20	6.46	124.9	20	6.25
1.38	150.98	20	7.55	188.49	20	5.92	121.20	20	6.06
2	120.86	20	6.04	108.81	20	5.44	123.51	20	6.18
2.38	120.39	20	6.02	111.12	20	5.56	123.38	20	6.17
3	120.78	20	6.04	121.36	20	6.07	121.54	20	6.08
3.38	120.89	20	6.04	121.54	20	6.08	121.54	20	6.08
4	155.98	20	7.80	154.58	20	7.73	150.38	20	7.52
4.38	140.43	20	7.02	142.27	20	7.11	144.40	20	7.22
5	145.45	20	7.27	146.08	20	7.30	145.44	20	7.27
5.38	145.22	20	7.26	147.25	20	7.36	146.36	20	7.32
6	125.03	20	6.25	128.10	20	6.41	127.76	20	6.39
6.38	119.39	20	5.97	117.20	20	5.86	118.19	20	5.91
7	100.54	20	5.03	103.49	20	5.17	102.46	20	5.12
7.38	-	-	-	104.49	20	5.22	104.42	20	5.22
8	-	-	-	85.62	20	4.28	82.92	20	4.15
9	-	-	-	74.62	20	3.73	71.75	20	3.59
10	-	-	-	60.2	20	3.01	58.35	20	2.92
11	-	-	-	51.14	20	2.56	53.27	20	2.66

ตารางผนวกที่ ๕ (ต่อ)

Elapse Time (Days)	2L Without Geotextile Ex 1			2L Without Geotextile Ex 2			2L Without Geotextile Ex 3		
	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)
12	-	-	-	37.49	20	1.87	33.02	20	1.65
13	-	-	-	26.31	20	1.32	25.14	20	1.26
14	-	-	-	22.25	20	1.11	22.25	20	1.11
15	-	-	-	24.62	20	1.23	24.62	20	1.23
16	-	-	-	25.38	20	1.27	25.38	20	1.27
17	-	-	-	23.62	20	1.18	23.62	20	1.18
18	-	-	-	22.44	20	1.12	22.44	20	1.12
19	-	-	-	22.73	20	1.14	23.93	20	1.20
20	-	-	-	24.66	20	1.23	24.60	20	1.23
21	-	-	-	25.22	20	1.26	26.52	20	1.33
22	-	-	-	20.96	20	1.05	24.78	20	1.24
23	-	-	-	22.26	20	1.11	22.16	20	1.11
24	-	-	-	20.45	20	1.02	23.78	20	1.19
25	-	-	-	21.99	20	1.10	26.45	20	1.32
26	-	-	-	26.86	20	1.34	28.29	20	1.41
27	-	-	-	31.38	20	1.57	31.38	20	1.57
28	-	-	-	31.14	20	1.56	32.03	20	1.60
29	-	-	-	-	-	-	28.43	20	1.42
30	-	-	-	-	-	-	22.89	20	1.14
31	-	-	-	-	-	-	22.67	20	1.13
32	-	-	-	-	-	-	24.72	20	1.24
33	-	-	-	-	-	-	27.10	20	1.36
34	-	-	-	-	-	-	20.96	20	1.05
35	-	-	-	-	-	-	20.19	20	1.01

ตารางผนวกที่ ๕ (ต่อ)

Elapse Time (Days)	2L Without Geotextile Ex 1			2L Without Geotextile Ex 2			2L Without Geotextile Ex 3		
	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)
36	-	-	-	-	-	-	17.19	20	0.86
37	-	-	-	-	-	-	16.39	20	0.82
38	-	-	-	-	-	-	14.53	20	0.73
39	-	-	-	-	-	-	16.09	20	0.80
40	-	-	-	-	-	-	14.90	20	0.75
41	-	-	-	-	-	-	13.99	20	0.70
42	-	-	-	-	-	-	16.63	20	0.83
43	-	-	-	-	-	-	17.74	20	0.89
44	-	-	-	-	-	-	16.99	20	0.85
45	-	-	-	-	-	-	15.67	20	0.78
46	-	-	-	-	-	-	15.95	20	0.80
47	-	-	-	-	-	-	17.62	20	0.88
48	-	-	-	-	-	-	17.91	20	0.90
49	-	-	-	-	-	-	17.95	20	0.90
50	-	-	-	-	-	-	18.15	20	0.91
51	-	-	-	-	-	-	18.18	20	0.91
52	-	-	-	-	-	-	18.2	20	0.91
53	-	-	-	-	-	-	18.24	20	0.91
54	-	-	-	-	-	-	18.35	20	0.92
55	-	-	-	-	-	-	18.95	20	0.95
56	-	-	-	-	-	-	19.16	20	0.96

ตารางผนวกที่ ๖ ผลการวัดค่าอัตราการไหลของมวลรวมสองชั้น With Geotextile

Elapse Time (Days)	2 layer With Geotextile Ex 1			2 layer With Geotextile Ex 2			2 layer With Geotextile Ex 3		
	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)
0.02	170.98	20	8.55	163.36	20	8.17	190.78	20	9.54
0.04	150.16	20	7.51	176.42	20	8.82	125.96	20	6.30
0.08	160.45	20	8.02	171.61	20	8.58	134.78	20	6.74
0.13	170.76	20	8.54	187.87	20	9.39	164.14	20	8.21
0.25	180.76	20	9.04	195.59	20	9.78	166.97	20	8.35
0.5	185.89	20	9.29	188.99	20	9.45	165.35	20	8.27
1	150.70	20	7.54	133.88	20	6.69	143.33	20	7.17
1.38	140.85	20	7.04	123.23	20	6.06	130.35	20	6.52
2	130.09	20	6.50	117.97	20	5.90	129.79	20	6.19
2.38	125.46	20	6.27	122.02	20	6.10	129.24	20	6.46
3	127.98	20	6.40	122.98	20	6.15	134.42	20	6.77
3.38	128.05	20	6.40	122.98	20	6.15	135.42	20	6.77
4	133.09	20	6.65	130.95	20	6.55	138.34	20	6.92
4.38	140.12	20	7.01	139.11	20	6.96	139.97	20	7.00
5	137.43	20	6.87	126.33	20	6.32	137.31	20	6.87
5.38	134.51	20	6.72	129.70	20	6.49	134.29	20	6.71
6	120.76	20	6.04	109.92	20	5.50	125.55	20	6.28
6.38	110.50	20	5.52	105.31	20	5.27	121.57	20	6.08
7	100.34	20	5.02	88.79	20	4.44	106.03	20	5.30
7.38	-	-	-	85.69	20	4.28	103.76	20	5.19
8	-	-	-	72.33	20	3.62	84.68	20	4.23
9	-	-	-	60.33	20	3.02	73.03	20	3.65
10	-	-	-	47.05	20	2.35	54.95	20	2.75
11	-	-	-	33.61	20	1.68	37.39	20	1.87

ตารางผนวกที่ ๖ (ต่อ)

Elapse Time (Days)	2 layer With Geotextile Ex 1			2 layer With Geotextile Ex 2			2 layer With Geotextile Ex 3		
	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)
12	-	-	-	34.52	20	1.73	36.50	20	1.83
13	-	-	-	35.32	20	1.77	35.29	20	1.76
14	-	-	-	34.37	20	1.72	34.07	20	1.70
15	-	-	-	31.71	20	1.59	31.51	20	1.58
16	-	-	-	30.4	20	1.52	31.40	20	1.57
17	-	-	-	29.73	20	1.49	29.16	20	1.46
18	-	-	-	28.40	20	1.42	28.5	20	1.43
19	-	-	-	27.72	20	1.39	27.11	20	1.36
20	-	-	-	25.50	20	1.28	26.50	20	1.33
21	-	-	-	25.07	20	1.25	25.61	20	1.28
22	-	-	-	25.87	20	1.29	2537	20	1.27
23	-	-	-	24.79	20	1.24	24.72	20	1.24
24	-	-	-	24.4	20	1.22	24.18	20	1.21
25	-	-	-	24.46	20	1.22	24.45	20	1.22
26	-	-	-	23.45	20	1.17	24.61	20	1.23
27	-	-	-	23.07	20	1.15	23.26	20	1.16
28	-	-	-	22.23	20	1.11	21.60	20	1.08
29	-	-	-	-	-	-	17.31	20	0.87
30	-	-	-	-	-	-	15.01	20	0.75
31	-	-	-	-	-	-	15.20	20	0.76
32	-	-	-	-	-	-	16.10	20	0.81
33	-	-	-	-	-	-	18.95	20	0.95
34	-	-	-	-	-	-	19.07	20	0.95
35	-	-	-	-	-	-	17.16	20	0.86

ตารางผนวกที่ ๖ (ต่อ)

Elapse Time (Days)	2 layer With Geotextile Ex 1			2 layer With Geotextile Ex 2			2 layer With Geotextile Ex 3		
	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)	Q (cc)	Time (s)	Flow Rate (cc/s)
36	-	-	-	-	-	-	15.26	20	0.76
37	-	-	-	-	-	-	13.91	20	0.70
38	-	-	-	-	-	-	13.95	20	0.70
39	-	-	-	-	-	-	15.25	20	0.76
40	-	-	-	-	-	-	14.79	20	0.74
41	-	-	-	-	-	-	15.01	20	0.75
42	-	-	-	-	-	-	14.44	20	0.72
43	-	-	-	-	-	-	15.74	20	0.79
44	-	-	-	-	-	-	14.65	20	0.73
45	-	-	-	-	-	-	15.15	20	0.76
46	-	-	-	-	-	-	15.25	20	0.76
47	-	-	-	-	-	-	16.55	20	0.83
48	-	-	-	-	-	-	17.45	20	0.87
49	-	-	-	-	-	-	17.95	20	0.90
50	-	-	-	-	-	-	18.95	20	0.95
51	-	-	-	-	-	-	19.03	20	0.95
52	-	-	-	-	-	-	18.98	20	0.95
53	-	-	-	-	-	-	19.06	20	0.95
54	-	-	-	-	-	-	19.05	20	0.95
55	-	-	-	-	-	-	19.00	20	0.95
56	-	-	-	-	-	-	18.97	20	0.95

ตัวอย่างการคำนวณอัตราการไหล (Flow Rate)

มวลรวมค้ำตะแกรงเบอร์ 4 Without Geotextile Ex3 ที่ Elapse Time 30 วัน

$$\text{Flow Rate} = \frac{Q}{tA}$$

$$\text{Flow Rate} = \frac{27.63}{20 \times 81.073} \times 10^2$$

$$\text{Flow Rate} = 1.704 \times 10^{-2} \text{ เซนติเมตร}^3/\text{วินาที}/\text{เซนติเมตร}^2$$

โดยที่ Q = 27.63 เซนติเมตร³

t = 20 วินาที

A = 81.073 เซนติเมตร²

ตารางผนวกที่ ข7 ผลการทดสอบ % Particle Loss ที่ Elapsed Time 7 วัน

Specimens	Initial Weight of Sand (g)	Final Weight of Sand (g)	Weight of Particle Into Void (g)	Particle Into Void (%)	Particle Loss (%)
#4 Without Geotextile	1453.90	1448.90	5.71	0.393	0.344
3/8" Without Geotextile	1458.89	1448.04	10.53	0.720	0.744
2 layers Without Geotextile	1448.64	1442.29	7.36	0.510	0.438
#4 With Geotextile	1456.35	1452.81	1.82	0.123	0.243
3/8" With Geotextile	1444.62	1440.84	2.51	0.262	0.174
2 layers With Geotextile	1461.35	1457.69	2.00	0.141	0.250

ตารางผนวกที่ ข8 ผลการทดสอบ % Particle Loss ที่ Elapsed Time 28 วัน

Specimens	Initial Weight of Sand (g)	Final Weight of Sand (g)	Weight of Particle Into Void (g)	Particle Into Void (%)	Particle Loss (%)
#4 Without Geotextile	1452.47	1445.62	5.91	0.407	0.472
3/8" Without Geotextile	1457.81	1444.17	11.15	0.765	0.936
2 layers Without Geotextile	1440.98	1432.97	7.95	0.552	0.556
#4 With Geotextile	1463.46	1463.46	2.44	0.167	0.291
3/8" With Geotextile	1447.67	1443.22	2.83	0.195	0.307
2 layers With Geotextile	1455.87	1451.54	2.74	0.188	0.297

ตารางผนวกที่ ข9 ผลการทดสอบ % Particle Loss ที่ Elapsed Time 56 วัน

Specimens	Initial Weight of Sand (g)	Final Weight of Sand (g)	Weight of Particle Into Void (g)	Particle Into Void (%)	Particle Loss (%)
#4 Without Geotextile	1461.8	1454.82	6.12	0.419	0.477
3/8" Without Geotextile	1459.69	1445.02	11.40	0.781	1.005
2 layers Without Geotextile	1447.56	1439.25	8.05	0.556	0.574
#4 With Geotextile	1467.81	1463.28	2.55	0.174	0.309
3/8" With Geotextile	1455.30	1450.27	3.00	0.206	0.346
2 layers With Geotextile	1468.90	1463.97	2.94	0.200	0.336

ตัวอย่างการคำนวณ % Particle Loss

มวลรวมค้ำตะแกรงเบอร์ 4 Without Geotextile ที่ Elapse Time 7 วัน

$$\% \text{ Particle Loss} = \frac{\text{Initial Weigth-Final Weigth}}{\text{Initial Weigth}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ Particle Loss} = \frac{1453.90-1443.19}{1453.90} \times 100 \%$$

$$\% \text{ Particle Loss} = 0.737 \%$$

โดยที่ Initial Weight = 1453.90 กรัม

Final Weight = 1443.19 กรัม

ตัวอย่างการคำนวณ % Particle Into Void of Porous Concrete

มวลรวมค้ำตะแกรงเบอร์ 4 Without Geotextile ที่ Elapse Time 7 วัน

$$\% \text{ Particle Particle Into Void} = \frac{\text{Weigth of Particle Into Void}}{\text{Initial Weigth}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ Particle Particle Into Void} = \frac{5.71}{1453.90} \times 100 \%$$

$$\% \text{ Particle Particle Into Void} = 0.393 \%$$

โดยที่ Initial Weight = 1453.90 กรัม

Final Weight = 5.71 กรัม

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ - นามสกุล นายยุทธนา บุญสินชัย
เกิดวันที่ 31 กรกฎาคม 2531
สถานที่เกิด อำเภอโพธิ์ชัย จังหวัดร้อยเอ็ด
ประวัติการศึกษา วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

