

การประยุกต์ใช้แผ่นยางพารารวมควั่น RSS-Geogrid เพื่อเสริมกำลังถนน
วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม FEM 2D

THE APPLICATION OF RSS-GEOGRID REINFORCED ROAD EMBANKMENT
ANALYZED BY FEM 2D



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมโยธา สิ่งแวดล้อม และการจัดการงานก่อสร้าง
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2564

KMITL-2021-EN-M-097-028

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE APPLICATION OF RSS-GEOGRID REINFORCED ROAD EMBANKMENT
ANALYZED BY FEM 2D



NAKIB ARWAEDO

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING ENVIRONMENTAL ENGINEERING
AND CONSTRUCTION MANAGEMENT
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2021

KMITL-2021-EN-M-097-028
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2021

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้แผ่นยางพารารวมควัน RSS-Geogrid เพื่อเสริมกำลังถนน วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม FEM 2D
นักศึกษา	นายณกัฏฐ์ อาแวโศ
รหัสประจำตัว	62601162
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	สาขาวิศวกรรมโยธา สิ่งแวดล้อม และการจัดการงานก่อสร้าง
พ.ศ.	2564
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ศลิษา ไชยพุทธ

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีปริมาณยางพาราส่งออกจำหน่ายในท้องตลาดไม่สอดคล้องกับความต้องการใช้งานยางพารา ทำให้เกิดปัญหาการคายางตกตัวอย่างต่อเนื่องในตลอดหลายปีที่ผ่านมา งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายหลัก คือ การเพิ่มฟังก์ชันการใช้งานแผ่นยางพารารวมควันเพื่อทำหน้าที่เป็นตาข่ายเสริมกำลังดิน (หรือเรียกว่า RSS-geogrid) โดยเริ่มจากการทดลองในห้องปฏิบัติการของดินลูกรังชนิด E1 และ E2 ที่มีขนาดคละและ CBR ต่างกัน ซึ่งดินลูกรัง E2 ในกรณีไม่เสริมกำลัง (CBR=40.56%) มีค่า CBR ที่น้อยกว่าดินลูกรัง E1 ไม่เสริมกำลัง (CBR=64.53%) จากผลการทดสอบพบว่าค่ากำลัง CBR ของดินลูกรังในเงื่อนไข E1-RSS เมื่อเทียบกับดินลูกรังในเงื่อนไข E1 (ไม่เสริมกำลัง) นั้นมีค่าลดลง 0.34 % ส่วนในกรณีดินลูกรังในเงื่อนไข E2-RSS ค่า CBR มีค่าเพิ่มขึ้น 23.15 % เมื่อเทียบกับดินลูกรังในเงื่อนไข E2 (ไม่เสริมกำลัง) จึงสรุปได้ว่า RSS-geogrid สามารถเสริมกำลังดินลูกรังชนิด E ได้ โดย RSS-geogrid มีประสิทธิภาพที่ดีในการเสริมกำลังเมื่อดินลูกรังมีค่า CBR น้อย จากนั้นทำการศึกษาดูด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข เริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์จำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid ในคันดินถนนที่มีความสูง 2 เมตร วางอยู่บนดินเดิมในสายทาง อย. 5034 ที่ได้รับการปรับเทียบข้อมูลดินแล้ว โดยทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนชั้นและตำแหน่งทั้งหมด 4 เงื่อนไขใหญ่ (จำนวนชั้น N=0, N=1, N=2, และ N=3) 61 เงื่อนไขย่อย จากผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่าการเสริมกำลังในสภาวะ $N2-h_{u1}$ ($N=2$ ที่ $h(N-1)/H=0.4$ และ $u/H=0.1$) เป็นจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด สุดท้ายทำการศึกษาอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของคันดินถนนและคันดินทรายเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่เสริมกำลังและเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid ซึ่งนำจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังมาประยุกต์ใช้ จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า RSS-geogrid มีประสิทธิภาพในการเพิ่มอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ในคันดินถนนซึ่งเป็นดินที่มีเสถียรภาพต่ำในเงื่อนไขไม่เสริมกำลัง (เพิ่มขึ้น 17.53%) ได้ดีกว่าคันดินทรายซึ่งเป็นดินที่มีเสถียรภาพสูงอยู่แล้วในเงื่อนไขไม่เสริมกำลัง (เพิ่มขึ้น 2.44%) และยังคงสอดคล้องกับงานวิจัยในห้องปฏิบัติการที่ได้ข้อสรุปในทำนองเดียวกันว่าประสิทธิภาพในการเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid จะมีประสิทธิภาพเมื่อดินในกรณีไม่เสริมกำลังมีความแข็งแรงน้อย (CBR ต่ำ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	The Application of RSS-Geogrid Reinforced Road Embankment Analyzed by FEM 2D
Student	Mr.Nakib Arwaedo
Student ID.	62601162
Degree	Master of Engineering
Program	Civil Engineering Environmental Engineering and Construction Management
Year	2021
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Salisa Chaiyaput

ABSTRACT

Nowadays, the amount of natural rubber in Thailand is not consistent with the demand for use. The decreasing prices problem has occurred. Adding the new function of ribbed smoked sheet rubber (RSS) as a geogrid function, called RSS-geogrid, is the goal of the project. The first, laboratory test of 2 gradations of lateritic soils type E (E1 and E2) were tested by CBR method. The CBR of nonreinforced condition of E2 (CBR=40.56%) was lower than E1 (CBR=64.53%). The results showed that CBR of E1-RSS condition decreased 0.34% from E1 condition. While CBR of E2-RSS condition increased 23.15% from E2 condition. Thus, RSS-geogrid can improve the CBR of lateritic soil type E. The great efficiency of RSS-geogrid to reinforcement was occurred in case of low CBR of nonreinforced. In the part of numerical modelling by PLAXIS 2D, beginning with analyzed the optimal layers and position of RSS-geogrid in road embankment, which had 2 meter high and located on the subgrade of AY.5034 which was validated by horizontal displacement on site. Analyzed for 4 main conditions (reinforced layer N=0, N=1, N=2, and N=3), 61 minor conditions. The result of analyzation showed that the condition of N2-h₄u₁ (N=2, h(N-1)/H=0.4, and u/H=0.1) was optimal condition for the embankment. Finally, studied the factor of safety (FS) of the road and sand embankments when compared nonreinforced and reinforced conditions, which reinforced at the optimal layers and positions. The results showed that the RSS-geogrid reinforcement can increase the FS of road embankment, low FS in nonreinforced condition, equal 17.53%. It better than sand embankment, high FS in nonreinforced condition, that increase 2.44% only. In addition, the result is consistent with the laboratory test.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสำเร็จจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ศลิษา ไชยพุทธ ที่ได้ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในทุกเรื่องตั้งแต่เริ่มต้นการศึกษา ไม่ว่าจะเป็นคำแนะนำในการวิจัย ระเบียบวิธีการวิจัย การเขียนบทความทางวิชาการ การเขียนเล่มวิทยานิพนธ์ และอื่น ๆ อีกมากมาย ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.จิรัชญา อายะวรรณ ที่ได้ให้คำปรึกษาในเรื่องการนำเสนองานวิชาการ รูปแบบการนำเสนอ และการเขียนบทความทางวิชาการแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ นายณัฐ สุทธิ รุ่งพีที่เคารพที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ตลอดจนให้คำปรึกษาในเรื่องของงานวิจัยแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ นายโอจักรพรรดิ สุขชัยสิทธิ์ นายสหสวรรค์ เตียวทิพย์สุคนธ์ และนายกันตินันท์ เอื้อพัทธยากร ที่ช่วยกันลงแรงลงมือทำงานวิจัยในห้องปฏิบัติการจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ตลอดจนให้การสนับสนุนข้อมูลทางวิชาการแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ นายภักภณ จรุงรัตน์ นายภูบัติ ภูสันติสัมพันธ์ และ นายอนุพุทธ เลียงสุนทรสิทธิ์ ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลทางวิชาการแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ นายฐาปกรณ์ สากลปัญญา และนายพนัส โอภากุลวงษ์ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกและให้คำแนะนำแก่ข้าพเจ้าในการวิเคราะห์โปรแกรม FEM 2D

เหนือสิ่งอื่นใดต้องขอขอบพระคุณบิดามารดา ผู้เป็นที่รักและเคารพยิ่ง ผู้ให้กำเนิด เลี้ยงดู และให้การสนับสนุนข้าพเจ้าในทุกเรื่อง ขอขอบพระคุณครอบครัวและคนที่ข้าพเจ้ารัก ที่เป็นกำลังใจที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า ขอให้พระองค์โปรดทรงประทานความรัก ความเมตตาและความปลอดภัยแก่บุคคลดังกล่าวด้วยเทอญ

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ตลอดจนครูบาอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

นกีบ อาแวโต

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.3.1 ขอบเขตด้านบุคคล และสถานที่.....	2
1.3.2 ขอบเขตด้านเวลา.....	2
1.3.3 ขอบเขตด้านข้อมูล.....	2
1.3.4 ขอบเขตด้านแบบจำลองโปรแกรม PLAXIS 2D ในงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษา.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	4
2.1 ยางพารา.....	4
2.1.1 ยางพาราดิบและส่วนประกอบของน้ำยาง.....	4
2.1.2 การผลิตยางแผ่นดิบคุณภาพดี.....	5
2.1.3 การผลิตแผ่นยางรมควัน (Ribbed Smoked Sheet, RSS).....	6
2.1.4 ประเภทของยางแผ่นรมควัน (RSS) ตามมาตรฐาน Green Book.....	7
2.2 ประมวลงานวิจัยการประยุกต์ใช้ยางพาราในงานถนน.....	9
2.3 แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน (Geogrid).....	10
2.3.1 บทนำและประวัติความเป็นมา.....	10
2.3.2 ประเภทของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3	หน้าที่ของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินในงานถนน 13
2.3.4	ลักษณะช่องเปิดของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน 13
2.3.5	เปรียบเทียบราคาการก่อสร้างด้วยแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินและการก่อสร้าง ด้วยวิธีอื่น ๆ 14
2.4	โครงสร้างถนนและมาตรฐานวัสดุในงานถนน 16
2.4.1	โครงสร้างชั้นทางถนนไม่ปูผิว (Unpaved Road) 16
2.4.2	โครงสร้างชั้นทางถนนปูผิว (Paved Road) 17
2.4.3	มาตรฐานวัสดุชั้นพื้นทาง (Base) 17
2.4.4	มาตรฐานวัสดุชั้นรองพื้นทาง (Subbase) 19
2.4.5	มาตรฐานวัสดุคัดเลือก ก 20
2.4.6	มาตรฐานชั้นวัสดุคัดเลือก ข 21
2.5	การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดิน 21
2.5.1	พิกัดอัสเตอร์เบิร์ก (Atterberg's Limit) 21
2.5.2	การทดสอบหาขนาดและการกระจายตัวของเม็ดดิน 24
2.5.3	การทดสอบการบดอัดดิน 26
2.5.4	การทดสอบหาลำดับรับน้ำหนักแบบ CBR 34
2.6	คุณสมบัติเชิงกลและวิธีการทดสอบของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน 36
2.6.1	Wide-Width Tensile Strength 36
2.6.2	Axial Stiffness (EA) of Geogrid 37
2.7	ตำแหน่งการเสริมกำลังและตัวแปรที่เกี่ยวข้อง 39
2.7.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งการเสริมกำลัง 39
2.7.2	จำนวนชั้นและตำแหน่งการเสริมกำลังที่เหมาะสมของ Esmaeili et al. (2018) 42
2.8	งานวิจัยที่สนับสนุนการเสริมกำลังในดินอ่อนมีผลมากกว่าการเสริมกำลังในดินแข็ง 43
2.9	งานวิจัยกำลังรับแรงดึงของ Geogrid ในตลาด 44
2.10	การออกแบบและใช้งาน Geogrid ในงานก่อสร้างถนน 46
2.10.1	Unpaved Roads: การเสริมกำลัง Geogrid ในถนนไม่ปูผิว 46
2.10.2	Paved Roads-Base Courses 49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.10.3 Paved Roads-Pavements	52
2.11 แร่งดินน้ำ หน่วยแรงประสิทธิผล และค่าความปลอดภัยของดินถม.....	53
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	55
3.1 การศึกษา RSS-Geogrid และผลการเสริมกำลัง CBR ในดินลูกรังชนิด E ที่มีขนาดคละ ต่างกัน (E1 และ E2).....	57
3.1.1 ขอบเขตการศึกษา.....	57
3.1.2 เงื่อนไขการทดสอบ (Testing Conditions) ของ CBR test.....	59
3.1.3 วิธีการทดสอบ CBR.....	60
3.2 การศึกษาคุนสมบัติทางกายภาพของ RSS.....	65
3.2.1 การทดสอบ Wide-Width Strip Method	65
3.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและกำลังรับแรงดึงสูงสุดของ RSS	65
3.2.3 การวิเคราะห์คุนสมบัติ Axial Stiffness (EA) ของ RSS.....	67
3.3 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ของการเสริมกำลัง RSS-Geogrid ในคันดินต่างชนิด	68
3.3.1 ขอบเขตการศึกษา.....	68
3.3.2 พื้นที่ศึกษาและข้อมูลเบื้องต้นของโครงการ (Study Area).....	68
3.3.3 การสร้างแบบจำลองดินเดิม (Subsoil) และคันดิน (Embankment).....	71
3.3.4 การเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง (Numerical Model Validation)	73
3.3.5 คุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้อง (Material Properties).....	74
3.3.6 การกำหนดตัวแปร (Variable Assignment).....	76
3.3.7 เงื่อนไขการศึกษา (Study Condition).....	79
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	86
4.1 ประสิทธิภาพของ RSS-Geogrid สำหรับการเสริมกำลังในดินลูกรัง.....	86
4.2 จำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังคันดินถนนด้วย RSS-Geogrid	87
4.2.1 ผลการคำนวณอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของคันดินถนนในทุกเงื่อนไข .	87

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2 การวิเคราะห์หาจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังคันดิน ถนนด้วย RSS-Geogrid	89
4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของคันดินถนนและคันดินทรายเมื่อ เปรียบเทียบกรณีไม่เสริมกำลังและเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid ภายใต้เงื่อนไขจำนวนชั้น และตำแหน่งที่เหมาะสม	93
4.4 การประยุกต์ใช้จำนวนชั้นและตำแหน่งการเสริมกำลัง RSS-geogrid ในงานก่อสร้าง ถนน.....	98
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	100
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	100
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	101
บรรณานุกรม.....	102
ภาคผนวก.....	107
ภาคผนวก ก. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	108
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบ CBR และการบดอัดดินในห้องปฏิบัติการ.....	116
ภาคผนวก ค. วิธีการสร้างแบบจำลองด้วย PLAXIS 2D	129
ภาคผนวก ง. ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัยในทุกเงื่อนไข	143
ภาคผนวก จ. แนวการพังทลายของคันดินถนนและคันดินทราย.....	176
ประวัติผู้เขียน.....	181

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของอนุภาคเม็ดยางเมื่อนำอนุภาคเม็ดยางมาวิเคราะห์ พบส่วนประกอบโดยประมาณดังนี้ (การยางแห่งประเทศไทย. 2561).....	5
2.2 การแบ่งประเภทของแผ่นยางรมควัน (RSS) ตามมาตรฐาน Green Book (การยางแห่งประเทศไทย. 2561).....	8
2.3 ขนาดคละของวัสดุพื้นทางหินคลุก.....	18
2.4 ขนาดคละเกรดต่าง ๆ ของวัสดุชั้นรองพื้นทาง (กรมทางหลวง. 2532).....	19
2.5 ลักษณะของดินที่มีขนาดคละก้นดี (มานิต ชวยงาน. 2554).....	25
2.6 การเปรียบเทียบวิธีการและเครื่องมือระหว่างวิธีการทดสอบแบบมาตรฐาน (standard proctor test) กับ การทดสอบแบบโมดิฟายด์ (modified proctor test).....	29
2.7 ค่าหน่วยแรงมาตรฐาน (Standard Unit Stress) ที่ความลึกในการกด (Penetration) ต่าง ๆ.....	34
2.8 ค่า CBR ที่เหมาะต่อชั้นทางต่าง ๆ.....	35
2.9 คุณสมบัติของ Kenaf LLGs. (Artidteang et al. 2012).....	39
2.10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของ geogrid ในตลาด 7 ประเภท (Al-Omari, R.R. and Fekheraldin, M.K. 2012).....	45
3.1 จำแนกชนิดของดินลูกรังที่เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง (กรมทางหลวง, 2532) และดินลูกรัง E1, E2 ที่ใช้ในงานวิจัย.....	57
3.2 คุณสมบัติของดินลูกรัง E1 และ E2.....	58
3.3 ตารางแสดงผลการทดสอบแรง (Wide-Width Tensile Test) ของ RSS ในเงื่อนไข SS (RSS-SS) จำนวน 2 ตัวอย่าง และเงื่อนไข DS (RSS-DS) จำนวน 2 ตัวอย่าง.....	66
3.4 คุณสมบัติของดินเดิม (subsoil) ที่ผ่านการปรับเทียบแล้วในแบบจำลอง.....	75
3.5 คุณสมบัติของคันดินถนนและคันดินทรายที่อ้างอิงจาก Wulandari and Tjandra (2015) และ Chaiyaput et al. (2014) ตามลำดับ.....	75
3.6 คุณสมบัติของ RSS-geogrid ซึ่งมีกำลังเทียบเท่ากับ geogrid ในตลาดบางประเภท (ดูตารางที่ 2.10).....	76
3.7 เงื่อนไขการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของคันดินถนน (road embankment) ในเงื่อนไข N เท่ากับ 0 (N=0) เพื่อศึกษาจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมของคันถนน โดยมีความสูงของคันดิน H เท่ากับ 2 เมตร (H=2).....	82

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.8 เงื่อนไขการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของคันดินถนน (road embankment) ในเงื่อนไข N เท่ากับ 1 (N=1) เพื่อศึกษาจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมของคันดิน ถนน โดยมีความสูงของคันดิน H เท่ากับ 2 เมตร (H=2).....	82
3.9 เงื่อนไขการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของคันดินถนน (road embankment) ในเงื่อนไข N เท่ากับ 2 (N=2) เพื่อศึกษาจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมของคันดิน ถนน โดยมีความสูงของคันดิน H เท่ากับ 2 เมตร (H=2).....	82
3.10 เงื่อนไขการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของคันดินถนน (road embankment) ในเงื่อนไข N เท่ากับ 3 (N=3) เพื่อศึกษาจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมของคันดิน ถนน โดยมีความสูงของคันดิน H เท่ากับ 2 เมตร (H=2).....	83
3.11 เงื่อนไขการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของคันดินถนนและคันดินทรายเมื่อเปรียบเทียบกรณีไม่เสริมกำลังและเสริมกำลัง.....	85
4.1 ผลการทดสอบ CBR ของดิน E1 ในเงื่อนไขไม่เสริมกำลัง (E1 condition).....	86
4.2 ผลการทดสอบ CBR ของดิน E2 ในเงื่อนไขไม่เสริมกำลัง (E2 condition).....	86
4.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบดินลูกรัง E ที่เสริมกำลัง (E1-RSS และ E2-RSS conditions) และดินลูกรัง E ไม่เสริมกำลัง (E1 และ E2 conditions)	87
4.4 ผลการคำนวณอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของคันดินถนน (road embankment) ในทุกเงื่อนไขใหญ่ ทั้งหมด 61 เงื่อนไขย่อย.....	87
4.5 ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย (FS) รวมถึงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของ FS ของคันดินถนนและคันดินทรายในเงื่อนไขไม่เสริมกำลังและเสริมกำลังในสภาวะเหมาะสม และลักษณะการพังทลายของดินที่จำลองใน PLAXIS สองมิติ	93

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างยางธรรมชาติ cis-1,4-polyisoprene (การยางแห่งประเทศไทย. 2561).....	4
2.2 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินในตลาดของบริษัท Netlon Ltd. และ Tensar Corporation (Koerner. 1997).....	11
2.3 woven geogrids.....	12
2.4 extruded geogrids	12
2.5 ลักษณะของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินแบบ ก. biaxial geogrid ข. triaxial geogrid ค. uniaxial geogrid (happho.com).....	13
2.6 หน้าที่ของแผ่นตาข่ายเสริมกำลัง ก. จำกัดการเคลื่อนที่ด้านข้างของดิน (lateral restraint) ข. เพิ่มกำลังรับน้ำหนักแบกทานของระบบ (bearing capacity increase) และ ค. รองรับเมมเบรน (membrane tension support) (Christopher. 2010).....	15
2.7 ราคาการก่อสร้างกำแพงกันดินในรูปแบบต่าง ๆ (Koerner. 1997)	15
2.8 ลักษณะโครงสร้างของถนนแบบไม่ปูผิวที่มี vehicle load กระทำ (Giroud and Han. 2004).....	16
2.9 ลักษณะโครงสร้างถนนปูผิวแบบลาดยาง โดย พ.ท.สายรุ่ง โปยขุนทด.....	16
2.10 สถานะของดินมวลละเอียดเมื่อปริมาณความชื้นในมวลดินต่างกัน	22
2.11 รอยบากมาตรฐานของการทดสอบค่าพิกัดเหลว (สกว. 2549).....	23
2.12 การทดสอบหาค่าพิกัดพลาสติกโดยวิธีการคลึง (วรรณวรงค์ รัตนาภิรมย์. 2560).....	23
2.13 ลักษณะขนาดของดิน well graded soil (มานิต ช่วยงาน. 2554).....	25
2.14 ลักษณะขนาดของดิน uniform graded soil (มานิต ช่วยงาน. 2554).....	26
2.15 ลักษณะขนาดของดิน gap graded soil (มานิต ช่วยงาน. 2554).....	26
2.16 แสดงเส้นกราฟการกระจายตัวของเม็ดดิน หรือ grain size distribution curve	26
2.17 เส้นการบดอัดดินแสดงความสัมพันธ์ระหว่างของปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งของดิน	28
2.18 เม็ดดินและปริมาณน้ำมีผลต่อพฤติกรรมดิน.....	29
2.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น (Hogentogler. 1936).....	30
2.20 อิทธิพลของพลังงานบดอัดต่อกราฟการบดอัดของดินลูกรัง (Horpibulsuk et al. 2004)	31
2.21 อิทธิพลของชนิดดินต่อการบดอัดแบบมาตรฐาน (Johnson and Sallberg. 1960).....	32
2.22 ผลกระทบของการบดอัดดินที่มีต่อโครงสร้างดิน (โกคินทร์ ชำเกตุ. 2554)	32
2.23 การทดสอบความซึมผ่านได้และการบดอัดดิน Siburaa (Lambe. 1962).....	33
2.24 แสดงการปรับแก้โค้งการทดสอบ CBR (ชลธิ เร่บ้านเกาะ. 2554).....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
X
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.25 การใช้งาน geogrid ในรูปแบบต่าง ๆ.....	37
2.26 tensile strength of kenaf LLGs (Artidteang et al. 2012).....	39
2.27 geosynthetic reinforced soil foundation parameters (Chen. 2007).....	40
2.28 การเสริมกำลังด้วย geogrid แบบ one way slope (Esmaeili et al. 2018).....	41
2.29 ผลจากการทดลองเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมของชั้น geogrid เบื้องต้น (Esmaeili et al. 2018).....	41
2.30 แนวคิดการกระจายแรงแบบ pyramidal geometric shape (Koerner. 1997).....	47
2.31 แผนภูมิการออกแบบสำหรับ geogrid เสริมกำลัง (ด้านซ้าย) และกรณีไม่เสริมกำลัง (ด้านขวา) ของถนน unpaved road (Giroud et al. 1984).....	48
2.32 การเสริมกำลัง geogrid ในชั้นพื้นทาง (base course) สำหรับถนนลาดยางโดยใช้ HDPE geogrid (Carroll et al. 1987).....	51
2.33 ค่าความปลอดภัย แรงเฉือน แรงดันน้ำส่วนเกิน หน่วยแรงประสิทธิผล ของลาดดินถมที่ ระยะเวลาต่างๆ (ดัดแปลงจาก Bishop และ Bjerrum, 1960).....	54
3.1 grain size distribution ของดินลูกรังชนิด E ที่มีขนาดคละและ CBR ต่างกัน คือ E1 (CBR=64.53%) และ E2 (CBR=40.56%).....	57
3.2 วัสดุเสริมแรง RSS-geogrid สำหรับการทดสอบ CBR.....	59
3.3 แผนภาพเงื่อนไขการทดสอบ CBR ของเงื่อนไข E1, E2, E1-RSS, E2-RSS และตำแหน่งการเสริมกำลังในโมลด์ (mold).....	59
3.4 การติดตั้งวัสดุเสริมกำลัง RSS-geogrid ในเงื่อนไขเสริมกำลังขณะที่ทำการบดอัดดิน โดยตำแหน่งเสริมกำลังของ RSS-geogrid จะถูกเสริมระหว่างชั้นที่ 2 และ 3 ของการบดอัดในโมลด์.....	60
3.5 ตำแหน่งของชั้นเสริมกำลังเมื่อนำไปกดทดสอบกำลังรับน้ำหนักด้วย penetration piston.....	60
3.6 แสดงตัวอย่างดินและภาชนะบดอัดที่พร้อมทำการบดอัด.....	62
3.7 แสดงการบดอัดด้วยวิธี modified proctor test.....	62
3.8 แสดงแบบบดอัดดินที่ประกอบด้วยฐานรองพร้อมทำไปทดสอบการเจาะทะลุ.....	62
3.9 แสดงการทดสอบการเจาะทะลุ.....	63
3.10 แสดงตัวอย่างดินที่นำไปหา moisture content.....	63
3.11 การทดสอบหาค่า wide-width tensile strength ด้วย UTM.....	65
3.12 ลักษณะตัวอย่าง RSS ประเภท 3 ที่เตรียมเสร็จเรียบร้อยแล้ว.....	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 แผนภาพเงื่อนไขการทดสอบความความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและกำลังรับแรงดึงสูงสุดของ RSS ในเงื่อนไข RSS-SS และ RSS-DS.....	66
3.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและกำลังรับแรงดึงสูงสุดของ RSS.....	66
3.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง tensile strength กับ strain ของ RSS ในเงื่อนไข RSS-DS-02....	67
3.16 แผนที่บริเวณที่ตั้งของสายทาง อย.5034 (กรมทางหลวงชนบท, 2560).....	69
3.17 รายละเอียดของชั้นผิวทางและภาพตัดของถนนสายทาง อย.5034.....	69
3.18 ข้อมูลชั้นดินมี boring log หมายเลข BH-1 จากการสำรวจสายทาง อย.5034 กม.ที่ 6+200 (กรมทางหลวงชนบท, 2559)	70
3.19 ข้อมูลการเคลื่อนตัวของดินทางด้านข้างของคันทางถนนสาย อย.5034 กม.ที่ 5+400.....	71
3.20 รูปทรงเรขาคณิต (geometry) ของแบบจำลองในภาพรวมทั้งหมด	72
3.21 รูปทรงเรขาคณิตและขนาด (geometry and dimensions) ของคันทาง อย.5034 ในแบบจำลองพร้อมพิกัดของรูปทรง	72
3.22 การเปรียบเทียบข้อมูลดินเดิม (a) ให้นำหนักแก่ดินเดิม (b) ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวในแนวราบ (u_x) ในแบบจำลองมีค่าสูงสุดที่ 31.02 มิลลิเมตร	73
3.23 การเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวราบ (u_x) กับความลึกของชั้นดิน (depth) ระหว่างค่าที่วัดได้จริง ณ วันที่ 11/09/2019 เทียบกับค่าที่ประมาณจาก PLAXIS.....	74
3.24 การกำหนดสัญลักษณ์ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับรูปร่างคันดินและตำแหน่งเสริมกำลังในงานวิจัย.....	76
3.25 ตัวแปรตำแหน่งการเสริมกำลังในกรณี N=1	78
3.26 ตัวแปรตำแหน่งการเสริมกำลังในกรณี N=2	78
3.27 ตัวแปรตำแหน่งการเสริมกำลังในกรณี N=3	79
3.28 เงื่อนไขไม่เสริมกำลัง N0 ของคันดินถนน.....	80
3.29 ตัวอย่างตำแหน่งการเสริมกำลังของคันดินถนนในเงื่อนไข N1- u_1	80
3.30 ตัวอย่างตำแหน่งการเสริมกำลังของคันดินถนนในเงื่อนไข N2- h_1u_1	81
3.31 ตัวอย่างตำแหน่งการเสริมกำลังของคันดินถนนในเงื่อนไข N3- h_1u_1	81
4.1 ความสัมพันธ์ของ FS ของคันดินถนนกรณีไม่เสริมกำลัง (N=0) และเสริมกำลัง 1 ชั้น (N=1) เมื่อเปลี่ยน $u/H = 0.1$ ถึง 1.0 โดยหมายเลข 1 หมายถึงเงื่อนไข N=1, $u/H=0.1$ ให้ค่า FS สูงสุด และหมายเลข 2 หมายถึงเงื่อนไข N=1, $u/H>0.9$ ให้ค่า FS ต่ำกว่าเงื่อนไข N0	90

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ความสัมพันธ์ของ FS ของคันดินถนนกรณีเสริมกำลัง 2 ชั้น ($N=2$) เมื่อเปลี่ยน $h(N-1)/H$ ตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.5 และมีค่า u/H ที่ต่างกันตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.5 โดยที่ $u/H=0.1$ ให้ค่า FS สูงที่สุดในทุกเงื่อนไข	91
4.3 ความสัมพันธ์ของ FS ของคันดินถนนกรณีเสริมกำลัง 3 ชั้น ($N=3$) เมื่อเปลี่ยน $h(N-1)/H$ ตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.5 และมีค่า u/H ที่ต่างกันตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.5 โดยที่ $u/H=0.1$ ให้ค่า FS สูงที่สุดในทุกเงื่อนไข ยกเว้นที่ $h(N-1)/H=0.1$	91
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง FS และ $h(N-1)/H$ (เท่ากับ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, และ 0.5) โดยเจาะจงไปที่ $u/H=0.1$ ซึ่งที่ $h(N-1)/H=0.4$ ให้ FS มากที่สุด กล่าวคือเงื่อนไข $N2-h_4u_1$ เป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด	92
4.5 เงื่อนไข road embankment ไม่เสริมกำลัง (RE-N0) โดย a. การเคลื่อนตัวของ mesh (deform mesh) และ b. ลักษณะการพังทลายโดยมี global FS เท่ากับ 1.255	94
4.6 เงื่อนไข road embankment เสริมกำลัง ณ สภาวะเหมาะสม (RE-N2- h_4u_1) โดย a. การเคลื่อนตัวของ mesh (deform mesh) และ b. ลักษณะการพังทลายโดยมี global FS เท่ากับ 1.475	95
4.7 เงื่อนไข sand embankment ไม่เสริมกำลัง (SE-N0) โดย a. การเคลื่อนตัวของ mesh (deform mesh) และ b. ลักษณะการพังทลายโดยมี global FS เท่ากับ 1.599	96
4.8 เงื่อนไข sand embankment เสริมกำลัง ณ สภาวะเหมาะสม (SE-N2- h_4u_1) โดย a. การเคลื่อนตัวของ mesh (deform mesh) และ b. ลักษณะการพังทลายโดยมี global FS เท่ากับ 1.638	97

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ยางพารานับเป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญอันเป็นอันดับต้นๆของประเทศ และในอดีตยางพารามีราคาสูง เนื่องจากปริมาณยางพาราที่ผลิตได้ในแต่ละปีมีปริมาณที่น้อยไม่เพียงพอกับความต้องการในการนำยางพารามาใช้ประโยชน์ ทำให้เกษตรกรจำนวนมากสนใจและนิยมหันมาปลูกยางพาราและยึดอาชีพเกษตรกรชาวสวนยางเป็นอาชีพหลัก ส่งผลให้ในปัจจุบันมีปริมาณยางพาราจำนวนมากถูกส่งออกมาจำหน่ายยังท้องตลาด ในขณะที่ผลิตภัณฑ์และนวัตกรรมที่เกิดจากการใช้ประโยชน์จากยางพารายังคงมีปริมาณไม่มากนัก ไม่เพียงพอที่จะรองรับปริมาณยางพาราจำนวนมาก ทำให้เกิดปัญหาปริมาณยางพาราล้นตลาดและราคายางพาราตกต่ำในทุก ๆ ปี จากปัญหาดังกล่าวทำให้ในทุก ๆ ปีรัฐบาลต้องมีนโยบายในการแก้ปัญหาและพยุงราคายางพารา ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำยางพารามาใช้ประโยชน์ควบคู่ไปกับการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของประเทศ นับเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับยางพารา ซึ่งอาจก่อให้เกิดประโยชน์กับเกษตรกรชาวสวนยาง การพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศสอดคล้องกับแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2560-2564) และยังเป็นหนึ่งในยุทธศาสตร์สำคัญที่จะช่วยยกระดับรายได้และคุณภาพชีวิตเกษตรกรชาวสวนยางให้ดีขึ้นได้

ในการก่อสร้างมักประสบปัญหาดินที่ใช้เป็นฐานรากหรือเป็นวัสดุก่อสร้างขาดเสถียรภาพ มีความสามารถ และกำลังการรับแรงที่ต่ำ โดยเฉพาะดินที่นำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างในงานถนนจึงจำเป็นต้องพัฒนาปรับปรุงคุณภาพกำลังการรับแรงของดิน ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีและหนึ่งในนั้นคือ เสริมกำลังดินด้วยแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน (geogrid) ซึ่งเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่ผลิตจากโพลีเมอร์ที่มีกำลังรับแรงดึงที่สูง สามารถช่วยเสริมสร้างเสถียรภาพของดินได้และนิยมใช้ในงานก่อสร้างถนนเพื่อที่จะเพิ่มกำลังรับแรงอัดของดินหรือใช้ในการก่อสร้างกำแพงกันดิน ปัจจุบันมีการใช้ geogrid ในการก่อสร้างงานทางด้านวิศวกรรมมากขึ้น แต่วัสดุดังกล่าวจำเป็นต้องสั่งซื้อและนำเข้ามาจากต่างประเทศ ดังนั้นหากสามารถผลิต geogrid จากวัตถุดิบที่มีภายในประเทศได้ จะสามารถเพิ่มมูลค่าและส่งเสริมการใช้วัตถุดิบภายในประเทศได้อีกด้วย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์หลักคือ การนำแผ่นยางพารารมควัน หรือ ribbed smoked sheet (RSS) มาประยุกต์ใช้ในการเสริมกำลังดินถนน (road embankment) ให้ทำหน้าที่เดียวกันกับตาข่ายเสริมกำลังดิน หรือ geogrid โดยเริ่มด้วยการทดสอบประสิทธิภาพการเสริมกำลังรับน้ำหนักแบกทานของดินแบบ California bearing ratio (CBR) ของแผ่น RSS ที่ทำหน้าที่เป็น geogrid หรือ

เรียกว่า RSS-geogrid ในดินลูกรัง (lateritic soil) จากนั้นวิเคราะห์หาจำนวนชั้นและตำแหน่งที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะสมของการใช้ RSS-geogrid เพื่อเสริมกำลังคันดินถนน (road embankment) ด้วยโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) PLAXIS แบบสองมิติ (2D) โดยใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างของดินเดิมบนสายทาง อย.5034 และตรวจสอบประสิทธิภาพของการใช้ RSS-geogrid เพื่อเสริมกำลังคันดินถนน (road embankment) และคันดินทราย (sand embankment) เปรียบเทียบกรณีไม่เสริมกำลังและเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid เพื่อเพิ่มมูลค่าของยางพาราได้ในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงกำลังรับน้ำหนักแบกทานแบบ CBR ของดินลูกรังชนิด E ที่มีขนาดคละต่างกัน (E1 และ E2) กรณีไม่เสริมกำลังและเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid
2. เพื่อศึกษาจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังคันดินถนนด้วย RSS-geogrid วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D
3. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของคันดินถนนและคันดินทราย กรณีไม่เสริมกำลังและเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ขอบเขตด้านบุคคล และสถานที่

การทดลองไม่ว่าจะเป็นการทดสอบคุณสมบัติรับแรงดึงของแผ่นยางพารารวมควิน (RSS) หรือการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบกทานแบบ CBR ในงานวิจัยนี้ ทำการศึกษา ณ ห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

1.3.2 ขอบเขตด้านเวลา

ใช้เวลาศึกษาทั้งในส่วนการทดลองในห้องปฏิบัติการและการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ตั้งแต่สิงหาคม 2562 ถึง มกราคม 2564

1.3.3 ขอบเขตด้านข้อมูล

สำหรับข้อมูลดินลูกรัง (lateritic soil) ได้รับความรู้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ โดยศึกษาเฉพาะดินลูกรังชนิด E เท่านั้น ในส่วนข้อมูลดินเดิม (sub soil) ใช้การเปรียบเทียบข้อมูลดินด้วยข้อมูลการเคลื่อนตัวด้านข้างของดินเดิมบนสายทาง อย.5034 และสุดท้ายข้อมูลคันดินถนน (properties of road embankment) และข้อมูลคันดินทราย (properties of sand embankment) ได้รับความรู้จากงานวิจัยของ Wulandari and Tjandra (2015) และ Chaiyaput et al. (2014) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ไม่ศึกษาความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์และอายุการใช้งานของวัสดุ RSS

1.3.4 ขอบเขตด้านแบบจำลองโปรแกรม PLAXIS 2D ในงานวิจัย

จำลองโดยใช้โปรแกรม PLAXIS 2D เวอร์ชัน connect edition V20 โดยใช้ Mohr-Coulomb model (MCM) ในการจำลองคันดินและดินเดิมบางส่วน และใช้ soft soil model (SSM) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการจำลองดินเดิมบางส่วนที่เป็นดินอ่อน ในส่วนเสถียรภาพลาดดินนั้นใช้วิธี phi-c reduction เพื่อหาค่าอัตราส่วนปลอดภัย (factor of safety, FS)

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
2. กำหนดปัญหาการวิจัย
3. กำหนดวัตถุประสงค์ ขอบเขตการวิจัย และสมมุติฐานเบื้องต้น
4. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของ RSS เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ต่อในงานวิจัย
5. ศึกษาในส่วนปฏิบัติการในห้องทดลอง คือ ศึกษาผลของการเสริมกำลัง RSS-geogrid ต่อกำลัง CBR ของดินลูกรังชนิด E ที่มีขนาดคละต่างกัน คือ E1 และ E2
6. ทำการเปรียบเทียบแบบจำลอง (model validation) ของดินเดิมในสายทาง อย.5034
7. ศึกษาในส่วนการวิเคราะห์ในแบบจำลองโดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D คือ ศึกษาจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังคันดินถนนด้วย RSS-geogrid และศึกษาอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของคันดินถนนและคันดินทราย กรณีไม่เสริมและเสริมกำลัง
8. วิเคราะห์ข้อมูล
9. สรุปผล อภิปรายผล และรับฟังข้อเสนอแนะ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่ แผ่นยางพารารวมควัน (RSS) ได้
2. สามารถนำ RSS มาใช้ประโยชน์ให้มีหน้าที่เป็นตาข่ายเสริมกำลังดินได้ โดยเรียกว่า RSS-geogrid
3. เป็นแนวทางในการนำ RSS-geogrid ไปประยุกต์ใช้ในงานจริงได้
4. เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจและเกี่ยวข้องกับงานวิจัยชิ้นนี้ ในการวิจัยและศึกษาต่อไปในอนาคต

1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษา

1. RSS-geogrid หมายถึง แผ่นยางพารารวมควัน (RSS) ที่ถูกนำมาใช้เป็นตาข่ายเสริมกำลังดิน โดยได้รับการออกแบบให้มีช่องเปิด (apertures) ขนาด 20 x 20 มิลลิเมตร
2. FS หมายถึง factor of safety หรืออัตราส่วนความปลอดภัยที่วิเคราะห์ด้วย phi-c reduction
3. Road embankment หมายถึง คันดินถนนที่ใช้ข้อมูลดินของ Wulandari and Tjandra (2015)
4. Sand embankment หมายถึง คันดินทรายที่ใช้ข้อมูลดินของ Chaiyaput et al. (2014)
5. CBR หมายถึง ค่ากำลังรับน้ำหนักแบกทานที่ทดสอบด้วย California bearing ratio test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

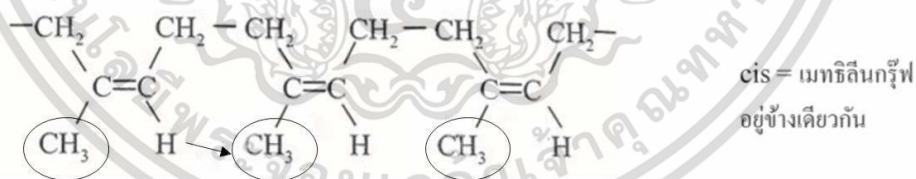
บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 ยางพารา

2.1.1 ยางพาราดิบและส่วนประกอบของน้ำยาง

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) ดังรูปที่ 2.1 เป็นโมเลกุลที่ ประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนล้วน ทำให้มีสมบัติไม่ทนต่อน้ำมันแต่เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี ใน 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน (C₅H₈)_n มาต่อกันเป็นสายโซ่ยาวประมาณ 50,000 หน่วย แบบเส้นตรงใน 1 หน่วยไอโซพรีนจะมีพันธะคู่และหมู่แอลฟาเมทธิลีนที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำให้สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถันและเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายด้วยออกซิเจนและโอโซน ยางจึงเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายเช่นเดียวกัน ยางธรรมชาติมีสายโซ่ที่เคลื่อนไหวหักงอไปมาได้ ทำให้ยางธรรมชาติคงสภาพยืดหยุ่นได้ดีมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ประมาณ -72 °C สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำมาก สำหรับความสม่ำเสมอในโครงสร้างโมเลกุล ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้เมื่อยืด เนื่องจากการยืดตัวยังทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น นั่นคือ ยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขีดถูสูงขึ้น ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูงอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้างมาก ทำให้ยางแข็งเกินไปที่จะนำไปแปรรูปโดยตรง จะต้องมีการบดยาง ก่อนที่จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิต



รูปที่ 2.1 โครงสร้างยางธรรมชาติ cis-1,4-polyisoprene (การยางแห่งประเทศไทย, 2561)

น้ำยางธรรมชาติ มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวเหมือนน้ำนม มีสภาพเป็นคอลลอยด์ หรือ สารแขวนลอย มีความหนาแน่น 0.975-0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร มีความถ่วงจำเพาะ 0.92 กรัมต่อ ลบ.ซม. มีค่า pH ประมาณ 6.5 - 7.0 มีความหนืดประมาณ 12-15 centipoises เป็นสารที่ไม่บริสุทธ์ มีปริมาณของเนื้อยางแห้งระหว่าง 25 - 45% ความแตกต่างระหว่างปริมาณสารที่เป็นของแข็งทั้งหมดและส่วนที่เป็นเนื้อยางแห้ง ประมาณ 3 % น้ำยางสดเมื่อนำมาปั่นด้วยความเร็วสูง 20,000 รอบต่อนาที น้ำยางจะแยกออกได้ 4 ส่วนดังนี้ 1. ส่วนของเนื้อยางแห้ง 2. อนุภาคเพอร์รี่-วิสลิ่ง 3. เซรุ่ม และ

4. ตะกอนสีเหลืองหรือขาวที่เรียกสารพวกลูทอยด์ (การยางแห่งประเทศไทย, 2561)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของอนุภาคเม็ดยางเมื่อนำอนุภาคเม็ดยางมาวิเคราะห์ พบส่วนประกอบ โดยประมาณดังนี้ (การยางแห่งประเทศไทย. 2561)

ส่วนประกอบ	โดยประมาณ
เนื้อยางไฮโดรคาร์บอน	86%
น้ำที่เจือเข้าไปในอนุภาค	10%
สารโปรตีน	1%
สารพวกไลปิด ไขมัน	3%
พวกโลหะ (Mg, P, Cu)	ไม่เกิน 0.05%

2.1.2 การผลิตยางแผ่นดิบคุณภาพดี

การยางแห่งประเทศไทย (2561) ได้ระบุในเอกสาร “ข้อมูลวิชาการยางพาราปี 2561” ว่า ยางแผ่นจะมีคุณภาพดีหรือไม่ดีขึ้นอยู่กับวิธีการผลิตถ้าหากเกษตรกรสามารถผลิตยางแผ่นคุณภาพดี ออกจำหน่ายก็จะได้ราคาที่สูงกว่ายางแผ่นคุณภาพต่ำ ยางแผ่นคุณภาพดีเป็นยางแผ่นที่มีความยืดหยุ่นดี แผ่นยางสะอาด สีของแผ่นสม่ำเสมอ และมีขนาดมาตรฐาน

2.1.2.1 การเตรียมน้ำยางสดก่อนการผลิตยางแผ่นดิบ

ขั้นตอนแรกทำการเก็บน้ำยางสด ถ้าหากเป็นส่วนยางขนาดเล็กแล้ว สามารถรวบรวมน้ำยางได้ในระยะเวลาที่จำกัดไม่จำเป็นต้องใช้สารรักษาสภาพ แต่หากเป็นส่วนยางขนาดใหญ่ หรือต้องรวบรวมมาจากหลายสวนและใช้ระยะเวลาเกินกว่า 6 ชั่วโมงหลังจากการกรีด ก็จำเป็นต้องใช้สารรักษาสภาพน้ำยางตามคำแนะนำข้างต้น น้ำยางสดเมื่อมาถึงโรงทำยางจำเป็นต้องกรองน้ำยาง ก่อนโดยใช้ตะแกรงกรองที่มีขนาดรูตะแกรงเบอร์ 40-60 เมช (mesh) ขั้นตอนการกรองจะใช้ตะแกรงที่มีความถี่หยาบกว่าวางข้างบนซ้อนกับตะแกรงเบอร์ละเอียดเพื่อที่จะได้กรองสิ่งสกปรกออกไปได้มากที่สุด

2.1.2.2 การทำยางแผ่นในตะกวด

น้ำยางสดที่ผ่านการกรองแล้ว นำมารวบรวมในภาชนะเดียวกัน เพื่อที่จะได้ความเข้มข้นของเนื้อ ยางเท่ากัน ตะกวดจะมีความจุโดยเฉลี่ย 6 ลิตร ดังนั้นส่วนผสมของน้ำยางสดและ น้ำควมมีระดับไม่เกิน 5 ลิตร โดยทั่วไปน้ำยางจะมี DHC 32 - 35% จะใช้อัตราส่วนส่วนน้ำยาง 3 ลิตร ผสมกับน้ำสะอาด 2 ลิตร

2.1.2.3 การเตรียมกรด

สุดท้ายเตรียมกรดกรดฟอร์มิกเข้มข้น 3 ซ้อนแกมผสมน้ำ 3 ครอบงนมข้น คนให้เข้ากันจะได้ความเข้มข้น 3% แบ่งมาใช้ 1 ครอบงนมต่อ 1 ตะกวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.4 ขั้นตอนการทำยางแผ่น

เทน้ำยางสดที่ผ่านการกรองเรียบร้อยแล้ว ลงไปในตะกวดกวดก่อน แล้วเทน้ำสะอาดลงไปตาม สัดส่วนข้างต้น (หากเทน้ำลงไปก่อนแล้วผสมน้ำยางลงไปจะทำให้ยางเหนียวเมื่อผสมกับน้ำกรดจะจับตัว ไม่ทั่ว ยางแผ่นที่แห้งแล้วเนื้อยางจะไม่สม่ำเสมอ) คนให้เข้ากันจากนั้นเติมน้ำกรด 1 กระป๋องนม คนเบาๆ ให้เข้ากันแล้วปาดฟองให้หมด ทิ้งไว้ประมาณ 45 นาที ยางจะเริ่มจับตัว ใช้มือแตะเบา ๆ หากน้ำยางไม่ติด มือ ให้หล่อน้ำเพื่อไม่ให้ผิวยางมีสีคล้ำ ปล่อยให้ยางจับตัวนานประมาณ 1 ชั่วโมง นำมาขนาดด้วยมือหรือ วัสดุท่อนกลมที่สะอาด จากนั้นนำไปรีดด้วยจักรรีดยางที่มีน้ำหล่อผ่านเหนือลูกกลิ้ง ผ่านจักรรีดเรียบ ประมาณ 3 ครั้ง แล้ว ผ่านจักรดอกอีก 1 - 2 ครั้ง นำไปล้างน้ำให้สะอาดเพื่อชะล้างน้ำกรดออกไป ผึ่งให้ สะเด็ดน้ำนำไปตากในที่ที่มีอากาศถ่ายเทได้สะดวก

2.1.3 การผลิตแผ่นยางรมควัน (Ribbed Smoked Sheet, RSS)

การรมควันเป็นการแปรรูปยางโดยใช้ความร้อนและควัน ด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสม จะทำให้ยางแผ่นแห้ง นอกจากนี้จะเป็นการลดความชื้นในแผ่นยางแล้ว ยางที่ผ่านการรมควันจะมีความยืดหยุ่น เหมาะสมกับการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์แล้ว สารจากควันไฟยังช่วยป้องกันการเกิดรา ซึ่งเป็นตำหนิชนิดหนึ่งในการจัดชั้นยาง การผลิตยางแผ่นรมควันทำได้ 2 วิธี คือเริ่มจากการนำน้ำยางสดจับตัวรีดเป็นแผ่น จากนั้นผึ่งให้สะเด็ดน้ำ แล้วนำเข้าห้องรมควัน อีกวิธีคือเริ่มจากนำยางแผ่นดิบมาล้างด้วยเครื่องล้าง แล้วนำไปรมควัน

ในส่วนขั้นตอนการผลิตเริ่มจากกรองน้ำยางสดโดยใช้ตะแกรงกรองเบอร์ 60 เพื่อกรองสิ่งปนเปื้อนที่อาจติดมากับน้ำยางได้ หากน้ำยางเริ่มเสียสภาพ ไม่ควรนำมาปะปนกับน้ำยางที่ยังสด เพราะจะทำให้ยางมีรอยตำหนิได้

วิธีการผลิตยางแผ่นดิบเพื่อนำไปผลิตยางแผ่นรมควัน

การยางแห่งประเทศไทย (2561) ได้ระบุว่าขั้นตอนการทำยางแผ่นดิบจะต้องทำอย่างระมัดระวัง มิเช่นนั้นจะทำให้ยางแผ่นรมควันที่ผลิตออกมามีรอยตำหนิและเกิดของเสีย ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นและต้องใส่ใจเรื่องอุปกรณ์การผลิตจะต้อง สะอาดและพร้อมใช้งาน โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เติมน้ำในตะกวดจับตัวยางที่ได้คำนวณ DRC ที่เจือจางแล้ว ตามสูตรที่กำหนด จนได้ระดับที่ต้องการ
2. กวนน้ำยางสดในบ่อรวมยางที่หา DRC รวมแล้ว ให้เข้ากัน จากนั้นปล่อยลงตะกวดที่ได้เติมน้ำสะอาดไว้แล้ว จนได้ระดับที่ต้องการด้วยการผ่านตะแกรงกรองขนาด 100 เมช
3. กวนน้ำกับน้ำยางให้เข้ากัน
4. กวาดฟองออกให้เกือบหมด
5. ค่อย ๆ เทสารละลายกรดฟอร์มิคที่เจือจางแล้วเข้มข้น 4% ในอัตรา 0.6% ต่อปริมาณเนื้อ

ยางแห้งจนทั่วตะกวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. กวนสารละลายกรดฟอร์มิกเจือจางกับน้ำยางในให้เข้ากันช้า ๆ ไปมา 15 ครั้ง
7. กวาดฟองออกให้หมด ด้วยการไล่ฟองอากาศไปข้างใดข้างหนึ่งของตะก
8. ทำการเสียบแผ่นเริ่มจากกึ่งส่วนบริเวณที่ยังคงมีฟองอากาศหลงเหลืออยู่ เสียบแผ่นตรงกลางของตะก และทยอยเสียบโดยกะให้มีระยะห่างของการเสียบเท่า ๆ กัน จนหมดแผ่นเสียบ โดยในระหว่าง การเสียบแผ่นจะต้องกวาดฟองอากาศให้หมด
9. ปล่อยทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 45 นาที
10. ใช้นิ้วแตะผิวหน้ายาง หากน้ำยางไม่ติดนิ้ว ให้ทำการล่อน้ำทันที่เพื่อป้องกันผิวหน้ายางมีสีคล้ำ
11. ปล่อยทิ้งไว้อีกประมาณ 1.30 ชั่วโมง เพื่อให้ยางจับตัวสมบูรณ์
12. เติมน้ำในตะกจนท่วม ดึงแผ่นเสียบออกและยกแผ่นยางออกจากตะกไว้ในบ่อที่มีน้ำหล่อเต็มเพื่อเตรียมการรีดแผ่น ให้เรียงแผ่นยางเพื่อสะดวกในการหยิบแผ่นยางเข้าเครื่องรีด
13. ทำการรีดยางทีละแผ่นผ่านเครื่องจักรรีดยางที่มีน้ำหล่อผ่าน ลงในบ่อล้างยางหลังรีดที่มีน้ำไหลผ่านตลอดระยะเวลาการรีด
14. พาดยางบนไม้ราวที่สะอาด เรียงบนรถตากยางให้มีระยะห่างเท่า ๆ กัน
15. ผึ่งจนยางสะเด็ดน้ำ
16. สางยางทุกแผ่นเพื่อป้องกันไม่ให้แผ่นยางติดกัน
17. นำเข้าห้องรมควัน

วิธีการรมควัน

การรมควันเป็นเทคนิคการใช้ความร้อนและควัน เพื่อทำให้แผ่นยางแห้งด้วยการควบคุมอุณหภูมิ และควันในระดับที่เหมาะสม นอกจากจะเป็นการลดความชื้นในแผ่นยางแล้ว ยางที่ผ่านการรมควันจะมีความยืดหยุ่นสูง สารจากควันไฟยังช่วยป้องกันการเกิดเชื้อรา การควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสม ความร้อนไม่เกิน 60°C เริ่มจากอุ่นเตาให้ร้อนก่อนประมาณ 45°C ใช้เวลาครึ่งชั่วโมงเมื่อนำยางเข้ารมแล้ว ระยะแรกแผ่นยางที่มีความชื้นเฉลี่ย 30% เมื่อกระทบความร้อนน้ำจะเริ่มระเหยพร้อมกับเนื้อยางที่มีการหดตัวอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิในช่วงระยะนี้จะลดลงประมาณ 10-15°C อาจใช้เวลา 10 - 12 ชั่วโมง อุณหภูมิจึงจะเริ่มสูงขึ้น วันต่อมาให้เติมพินรักษาอุณหภูมิในห้องไว้ประมาณ 50°C และเพิ่มเป็น 55 - 60 °C ในวันที่ 3 - 4 ลดอุณหภูมิก่อนยางแห้งสนิท โดยไม่ต้องเติมพินอีก ใช้ความร้อนที่ระอุอยู่ทำให้แผ่นยางแห้งสนิทประมาณ 1-3 ชม.

2.1.4 ประเภทของยางแผ่นรมควัน (RSS) ตามมาตรฐาน Green Book

มาตรฐาน Green Book มีการแบ่งประเภทของ RSS ทั้งหมด 6 ประเภท ได้แก่ RSS1X, RSS1, RSS2, RSS3, RSS4 และ RSS5 โดย RSS1X เป็นแผ่นยางที่มีคุณภาพดีที่สุด มีการควบคุมการผลิตอย่างเข้มงวด และมีคุณสมบัติดังนี้ แผ่นยางต้องแห้งดี รมควันเสมอทั่วทั้งแผ่น ปราศจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟองอากาศ สิ่งสกปรก ตลอดจนสิ่งแปลกปลอมอื่น ๆ ในขณะที่ RSS5 เป็นแผ่นยางที่มีคุณภาพแย่มากที่สุด โดยรายละเอียดทั้งหมดถูกแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การแบ่งประเภทของแผ่นยางรมควัน (RSS) ตามมาตรฐาน Green Book (การยางแห่งประเทศไทย. 2561)

ชื่อประเภท	คุณสมบัติ	ลักษณะของแผ่นยางรมควัน
RSS1X	คุณสมบัติพิเศษ	เป็นยางที่ควบคุมการผลิตทุกขั้นตอนโดยต้องตรวจกรรมวิธีการผลิตภายใน โรงงานผลิต ยางแผ่นดิบและโรงรมควัน ส่วนยางแผ่นรมควันชั้นอื่น ๆ ไม่จำเป็นต้องตรวจขั้นตอนการผลิต ยางแผ่นรมควันชั้นนี้ต้องปราศจากราทุกชนิด และไม่อนุญาตให้มีตำหนิใด ๆ ที่แผ่นยางได้เลย
	ลักษณะแผ่นยาง	แผ่นยางแห้ง เนื้อแน่นแข็ง สะอาด แผ่นสมบูรณ์ 100% สีสม่ำเสมอ
RSS 1	ลักษณะแผ่นยาง	แผ่นยางแห้ง เนื้อแน่นแข็ง สะอาด แผ่นสมบูรณ์ สีสม่ำเสมอ (อนุญาตให้มีเปลือกไม้เล็ก ๆ ได้เล็กน้อย)
	ไม่อนุญาต	ยางฟอง ยางฟองอากาศ ยางแกร่ม ยางแกไฟ ยางไหม้ ยางอ่อนรม ยางดิบ ยางเยิ้ม ผิวแผ่นเป็นตำหนิ
RSS 2	ลักษณะแผ่นยาง	อนุญาตมีราแห้งหรือราสนิมบริเวณระหว่างแผ่นต่อกับผิวก้อน ได้ไม่เกิน 5% ของยาง ลูกขุนส่งมอบ แผ่นยางแห้ง เนื้อแน่นแข็ง สีสม่ำเสมอ ผิวแผ่นตำหนิ ได้เล็กน้อย ฟองอากาศขนาดเล็ก
	ไม่อนุญาต	ยางแกร่ม ยางอ่อนรม ยางดิบ ยางเยิ้ม ยางอ่อน ยางแกไฟ ยางไหม้
RSS 3	ลักษณะแผ่นยาง	อนุญาตมีราแห้งหรือราสนิมบริเวณระหว่างแผ่นยางกับผิวก้อนได้ไม่เกิน 10% ของยางส่งมอบ แผ่นยางแห้ง สะอาด เนื้อแน่นแข็ง มีตำหนิผิวแผ่นได้เล็กน้อย ต่างตำหนิเล็กน้อย ฟองอากาศเล็กน้อย
	ไม่อนุญาต	ยางแกร่ม อ่อนรม ยางดิบ ยางเยิ้ม ยางอ่อน ยางแกไฟ ยางไหม้ ยางฟองขนาดใหญ่
RSS 4	ลักษณะแผ่นยาง	อนุญาตมีราแห้งหรือราสนิมบริเวณระหว่างแผ่นต่อกับผิวก้อนได้ไม่เกิน 20% ของยางลูกขุนส่งมอบ แผ่นยางแห้ง เนื้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		แน่นแข็ง สะอาด ผิวแผ่นมีตำหนิ สีต่าง ต่างดำปานกลาง สีคล้ำเล็กน้อย ยางแก่รมได้เล็กน้อย
	ไม่อนุญาต	ยางอ่อนรม ยางดิบ ยางเฝิ้ม ยางแก่ไฟ ยางไหม้ ยางฟองขนาดใหญ่
RSS 5	ลักษณะแผ่นยาง	อนุญาตมีราแห้งหรือราสนิมบริเวณระหว่างแผ่นต่อกับผิว ก้อนได้ไม่เกิน 30% ของยางส่งมอบ แผ่นยางเนื้อแน่นแข็ง สะอาด แห้ง มีสิ่งสกปรกขนาดใหญ่ขึ้นได้เล็กน้อย มียางแก่รมและยางอ่อนรมได้เล็กน้อย
	ไม่อนุญาต	ยางดิบ ยางเฝิ้ม ยางอ่อน ยางแก่ไฟ ยางไหม้

หมายเหตุ: ไม่อนุญาต หมายถึง ไม่อนุญาตให้มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

2.2 ประมวลงานวิจัยการประยุกต์ใช้ยางพาราในงานถนน

การประยุกต์ใช้ยางพาราซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติในงานถนนนั้นมีการศึกษามากมายในประเทศไทย โดยเหล่าผู้วิจัยล้วนมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มฟังก์ชันการใช้งานของยางพาราเพื่อเพิ่มมูลค่าของพยาง ทั้งสิ้น ในบทนี้รวบรวมงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้ยางพาราในงานถนน ไม่ว่าจะเป็น การใช้ยางพาราผสมยางแอสฟัลต์เพื่อทำถนนผิวจราจรแอสฟัลต์ผสมยางพารา และการใช้ยางพาราผสมดินซีเมนต์เพื่อทำถนนดินซีเมนต์ผสมยางพารา เป็นต้น โดยข้อมูลดังกล่าวอ้างอิงจาก กาญจนา ปันวิเศษ (2560) ในวิทยานิพนธ์ที่ชื่อว่า “การพัฒนางานดินซีเมนต์ผสมน้ำยางพารา”

กรมทางหลวงได้มีการศึกษาเรื่องการใช้ยางพาราผสมยางแอสฟัลต์เพื่อใช้ทำผิวทางแอสฟัลต์ ทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม รวมทั้งติดตามผลการใช้ยางพาราผสมแอสฟัลต์ที่ผ่านมา พบว่าการนำยางธรรมชาติผสมกับยางแอสฟัลต์ ทำได้ 2 แบบ คือการนำยางธรรมชาติผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60 – 70 กับกบการนำยางธรรมชาติผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชัน ขณะนี้ยางพาราที่ผสมสามารถใช้ยางธรรมชาติชนิดน้ำยางข้น (latex) ได้เพียงอย่างเดียวเท่านั้น วิธีการ คือ ใช้น้ำยางข้นประมาณร้อยละ 5 ผสมกับยางแอสฟัลต์ร้อยละ 95 จากการศึกษาพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ยางพาราประมาณนี้สามารถทำได้ง่าย เพียงพอต่อการปรับปรุงคุณภาพของยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60/70 และผ่านมาตรฐานของแอสฟัลต์ตามข้อกำหนด มอก. 851-2532 โดย asphalt cement ผสมยางธรรมชาติเรียกว่า para asphalt cement และผิวทาง asphalt concrete ที่ใช้ para asphalt cement เรียกว่า para asphalt concrete ส่วนวิธีที่สอง คือ การผสมน้ำยางข้นกับแอสฟัลต์อิมัลชัน ซึ่งไม่สามารถผสมกันได้โดยตรง จะต้องใช้เทคโนโลยีและความรู้ด้านเคมีเทคนิคในการผลิต ซึ่งขณะนี้บริษัทผู้ผลิตสามารถผลิตในเชิงพาณิชย์ได้แล้ว

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ยางพาราผสมดินซีเมนต์เพื่อทำถนนดินซีเมนต์ผสมยางพารานั้นได้รับการศึกษาอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากยางพารามีคุณสมบัติยืดหยุ่น ทึบน้ำ และคงทน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงมีแนวความคิดในการใช้ยางพาราผสมดินซีเมนต์ทำถนนดินซีเมนต์ผสมยางพารา เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของถนนดินซีเมนต์ให้ดีขึ้น เช่น แรงอัด แรงดัด แรงดึง และการดูดซึมน้ำลดลง โดยน้ำยางพาราจะทำหน้าที่เป็นเสมือนตัวประสานและสามารถป้องกันการร้าวซึมได้ดี เพราะถนนดินซีเมนต์เมื่อก่อสร้างเสร็จจะพบปัญหาการแตกร้าว (crack) และเกิดฝุ่นละอองทำให้ประสิทธิภาพของถนนลดลง โดยการมีการศึกษาจาก จตุรงค์ เสาวภาคย์ไพบุลย์ และคณะ (2553); ธติพิงศ์ หล่อพิศาลชัย และคณะ (2556); พีรวัฒน์ ปลาเงิน (2557); ระพีพันธ์ แดงตันกี (2559); และ กาญจนา ปิ่นวิเศษ (2560) เป็นต้น

อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมาดังกล่าวใช้ยางพาราในรูปแบบของน้ำยางพาราทั้งสิ้น ยังไม่มีงานวิจัยใดในอดีตที่นำแผ่นยางพารารมควัน (RSS) มาประยุกต์ใช้กับงานถนน จึงเป็นหัวข้อที่น่าสนใจเพื่อศึกษาต่อไปในงานวิจัยนี้

2.3 แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน (Geogrid)

2.3.1 บทนำและประวัติความเป็นมา

วัสดุใยสังเคราะห์ (geosynthetics) หมายถึง วัสดุที่มนุษย์ประดิษฐ์ หรือคิดค้นขึ้น เพื่อใช้งานในวิศวกรรมปฐพี โดยคำว่า geosynthetics นั้นมาจากสองคำ คือ “geo” ซึ่งหมายถึงวัสดุที่เกิดจากธรรมชาติ เช่น ดิน และหิน เป็นต้น และคำว่า “synthetics” หมายถึง สิ่งที่มนุษย์สร้างขึ้น เช่น พอลิเมอร์ และไฟเบอร์กลาส เป็นต้น วัสดุดังกล่าวมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ และความแข็งแรงให้แก่ดิน การปรับปรุงคุณภาพชั้นดินเพื่อใช้ในงานก่อสร้างนั้นมีตั้งแต่ยุคก่อนประวัติศาสตร์ มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงยุคปัจจุบันนี้ เช่น การปลูกพืชคลุมดินป้องกันการกัดเซาะ การใช้ไม้หรือก้อนหินมาเทปูทับหน้าดินเพื่อแยกชั้นดินและเสริมความแข็งแรง โดยในปี ค.ศ.1935 South Carolina Highway Department ได้ทดลองนำผ้าฝ้ายปูลงบนดินเดิมก่อนดำเนินการก่อสร้างชั้นต่อไป ถือเป็นต้นแบบในการนำวัสดุต่าง ๆ เพื่อใช้พัฒนาความสามารถในการรับน้ำหนักของดิน ทำให้ดินมีประสิทธิภาพมากขึ้น (ศลิษา ไชยพุทธ. 2561)

ในปัจจุบันแผ่นใยสังเคราะห์จึงถูกพัฒนาและใช้กันอย่างแพร่หลาย ในรูปแบบและผลิตภัณฑ์ที่ต่างกันไป ไม่ว่าจะเป็นแผ่นใยสังเคราะห์ (geotextile), แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน (geogrid), แผ่นตาข่ายระบายน้ำ (geonet), แผ่นพลาสติกความหนาแน่นสูง (geomembrane), แผ่นดินเหนียวสังเคราะห์ (geosynthetic clay liner or GCL), แผงตาข่ายรังผึ้ง (geocell), และวัสดุเชิงประกอบ (geocomposite) ล้วนเป็นรูปแบบหนึ่งของวัสดุใยสังเคราะห์ทั้งสิ้น โดยงานวิจัยนี้สนใจแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินเป็นหลัก

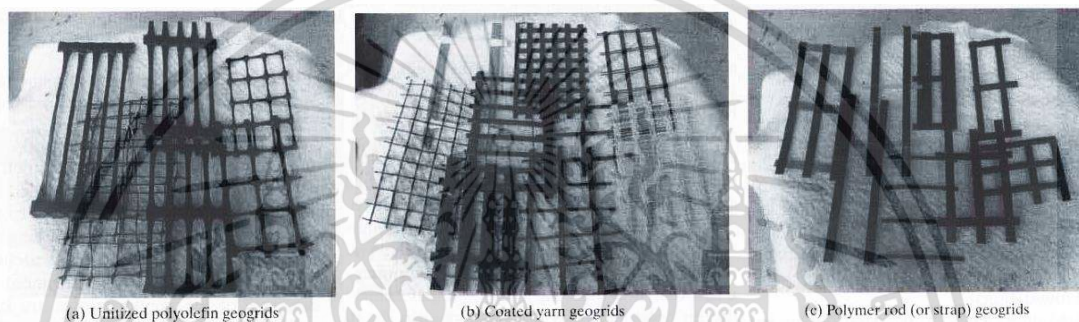
แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน (geogrid) มีการใช้งานที่หลากหลาย เมื่อเทียบกับแผ่นใยสังเคราะห์ (geotextile) แล้ว วัสดุใยสังเคราะห์ทั้งสองชนิดมีวิธีการออกแบบที่ใกล้เคียงกัน แต่ต่างกัน

ที่การผลิต รูปร่างลักษณะ และการใช้งาน เป็นต้น ซึ่งคำจำกัดความของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินตามเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ชนะของ Koerner (1997) คือ วัสดุใยสังเคราะห์ที่ประกอบด้วย แถบรับแรงดึง (tensile ribs) ที่เชื่อมต่อกันในลักษณะเป็นช่องเปิด (apertures) ซึ่งมีขนาดเพียงพอในการยอมให้วัสดุที่เกิดจากรธรรมชาติ เช่น เม็ดดิน และ หิน สามารถลอดผ่านได้ (Koerner. 1997)

แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินประกอบไปด้วยแถบรับแรงดึงที่เรียกว่า “tensile ribs” ไขว้กันเป็นช่องเปิดที่เรียกว่า “apertures” ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 10 – 100 มิลลิเมตร แตกต่างกันไป โดยมีฟังก์ชันการใช้งานหลัก คือ เสริมกำลังในงานก่อสร้างถนน งานกำแพงดิน และลาดคันดิน ในรูปที่ 2.2 แสดงถึงตัวอย่างผลิตภัณฑ์แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินในตลาดของบริษัท Netlon Ltd. และ Tensar Corporation



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินในตลาดของบริษัท Netlon Ltd. และ Tensar Corporation (Koerner. 1997)

คุณสมบัติทางกายภาพ (physical properties) ของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินมีบางส่วนสามารถวัดได้โดยตรง เช่น ชนิดของโครงสร้าง (type of structure), ชนิดของข้อต่อ (junction type), ขนาดช่องเปิด (aperture size), และความหนา (thickness) เป็นต้น สำหรับคุณสมบัติอื่น ๆ เช่น น้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ (mass per unit area) ให้มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 200 ถึง 1000 g/m² และ เปอร์เซ็นต์พื้นที่ช่องเปิด (open percent area) ให้มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 40% ถึง 90%

2.3.2 ประเภทของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน

(1) แบ่งประเภทตามความแข็ง (stiffness)

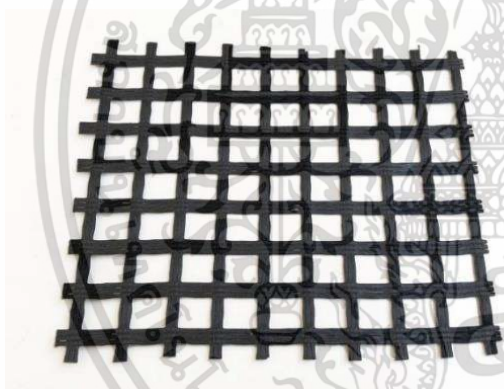
อีกหนึ่งคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญสำหรับแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน คือ ความแข็ง (stiffness) ซึ่งสามารถวัดได้โดยวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1388 เพื่อทดสอบหาความแข็งเชิงตัด (flexural rigidity) โดยสามารถแบ่งกลุ่มได้ 2 ชนิดด้วยกัน ดังนี้ (1) stiff geogrids โดยทั่วไปจะผลิตจากวัสดุ polyethylene หรือ polypropylene จะมีค่าความแข็งเชิงตัดมากกว่า 1000 g-cm ในบางครั้งจะเรียกชนิดนี้ว่า homogeneous geogrids และ (2) flexible geogrids

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปจะผลิตจากวัสดุใยที่ผ่านการทอ เป็น polyester และเส้นด้าย fiberglass ถูกแบ่งโดยใช้ค่าความแข็งแรงตัดซึ่งจะน้อยกว่า 1000 g-cm (Koerner. 1997)

(2) แบ่งประเภทตามวิธีการขึ้นรูป

แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินสามารถผลิตขึ้นรูปได้ 2 วิธี ดังนี้ วิธีที่ (1) woven geogrids (รูปที่ 2.3) เป็นผ้าทอที่มีความยืดหยุ่นด้วยน้ำหนักโมเลกุลสูง ผลิตโดยเส้นด้าย polyester ที่มีการคืบน้อยความต้านทานแรงดึงสูงสุด มีลักษณะเป็นเส้นด้ายมีความมั่นคงและเชื่อมต่อกันเป็นตารางโดยอยู่ภายใต้ความตึง ถูกเคลือบอย่างสม่ำเสมอด้วยสารปลอดสารพิษที่เป็นโพลิเมอร์เพื่อเพิ่มความต้านทานโดยรวมต่อการเสียดสี อัลตราไวโอเลต สภาพอากาศ กรด ต่าง การสลายตัวทางชีวภาพ และ สภาพภายนอกอื่น ๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ และวิธีที่ (2) extruded geogrids (รูปที่ 2.4) เป็นแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินที่อัดขึ้นรูปนั้นทำจาก polypropylene โดยการอัดขึ้นรูปพลาสติกแผ่นแบนแล้วเจาะรู เพื่อสร้างความต้านทานแรงดึง วัสดุจะถูกยืดออกไปทั้งแนวยาวและแนวขวาง ใช้ในงานปรับปรุงเสถียรภาพของโครงสร้างของถนนและทางรถไฟ, ถนนชั่วคราว, กำแพงกันดินเสริมกำลัง (MSE wall) และพื้นผิวดินที่มีความลาดชัน



รูปที่ 2.3 woven geogrids
(geosynthetics.net.au)



รูปที่ 2.4 extruded geogrids
(www.geo-textile.eu)

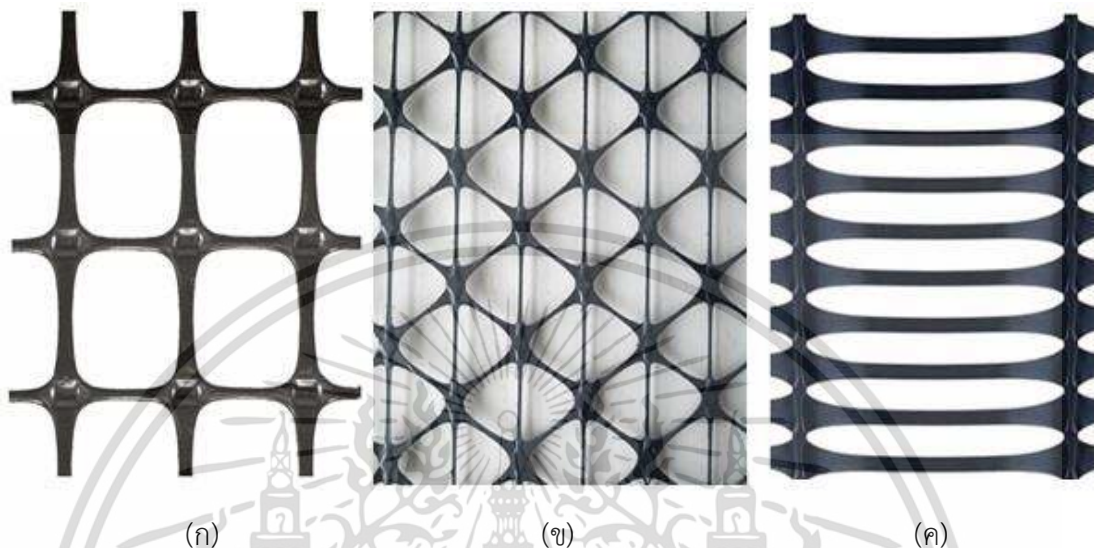
(3) แบ่งประเภทตามแนวการรับแรง

แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินสามารถแบ่งตามประเภทตามแนวการรับแรงของแถบรับแรงได้ 3 ประเภท ดังนี้ ประเภทที่ (1) uniaxial geogrid (รูปที่ 2.5 ค) เป็นแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินที่มีแนวการรับแรงเพียงเดียว นิยมใช้กับงานกำแพงกันดินเสริมกำลัง (MSE wall) ลักษณะเป็นช่องตารางสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีช่องเปิดตรงกลางตลอดความยาว รับแรงดึงสูงในทิศทางเดียว ความต้านทานการพังทลายสูง ความคืบต่ำ ประเภทที่ (2) biaxial geogrid (รูปที่ 2.5 ก) ลักษณะเป็นช่องเปิดสี่เหลี่ยม กระจายแรงได้ดีกว่าแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินแบบอื่น เนื่องจากสามารถกระจายแรงได้ทั้ง 2

ทิศทาง ความต้านทานการพังทลายสูง ความคืบต่ำ เหมาะสำหรับการก่อสร้างถนน ทางรถไฟ และ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นาไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลาดคันดิน เป็นต้น ประเภทที่ (3) triaxial geogrid (รูปที่ 2.5 ข) ลักษณะเป็นช่องเปิดรูปสามเหลี่ยมมุมภายใน 60 องศา ทำให้สามารถรับน้ำหนักได้สูง การเสียรูปและการสิ้นเปลืองค่า ความต้านทานแรงบิดสูง มีประสิทธิภาพในการแยกชั้นวัสดุสูง และมีความต้านทานแรงจากหลายทิศทาง



รูปที่ 2.5 ลักษณะของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินแบบ ก. biaxial geogrid ข. triaxial geogrid ค. uniaxial geogrid (happho.com)

2.3.3 หน้าที่ของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินในงานถนน

ในงานก่อสร้างถนนพบว่าหน้าที่ของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินนั้นมีดังนี้ คือ (1) จำกัดการเคลื่อนที่ด้านข้างของดิน (2) เพิ่มกำลังรับน้ำหนักแบกทานของระบบ และ (3) รองรับเมมเบรนได้ โดยแสดงลักษณะของการกระจายแรงในแต่ละหน้าที่ได้ดังรูปที่ 2.6 ก, 2.6 ข, และ 2.6 ค ตามลำดับ (Haliburton et al. 1981; Giroud et al. 1984; Koerner. 1997; Christopher. 2010)

2.3.4 ลักษณะช่องเปิดของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน

ดังที่ได้กล่าวแล้วข้างต้นในบทที่ 2.3.1 ในเรื่องของช่องเปิด (apertures) ว่าโดยทั่วไปแล้วมีการออกแบบให้มีขนาดตั้งแต่ 10 – 100 มิลลิเมตร แตกต่างกันไป และเปอร์เซ็นต์พื้นที่ช่องเปิด (open percent area) ให้มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 40% ถึง 90% แล้วแต่ผลิตภัณฑ์ (Koerner. 1997) แต่อย่างไรก็ตามขนาดช่องเปิด (aperture size) ของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน ควรที่จะต้องเหมาะสมกับขนาดของมวลรวม (aggregate size หรือ particle diameter) ด้วย ซึ่งมีงานวิจัยหลายงานวิจัยที่ทำการศึกษาลักษณะของช่องเปิดที่เหมาะสม การศึกษาของ Han et al. (2018) เป็นหนึ่งในนั้น โดยงานวิจัยของเขาชื่อว่า “Laboratory Investigation of Particle Size Effects on The Shear Behavior of Aggregate-Geogrid Interface”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

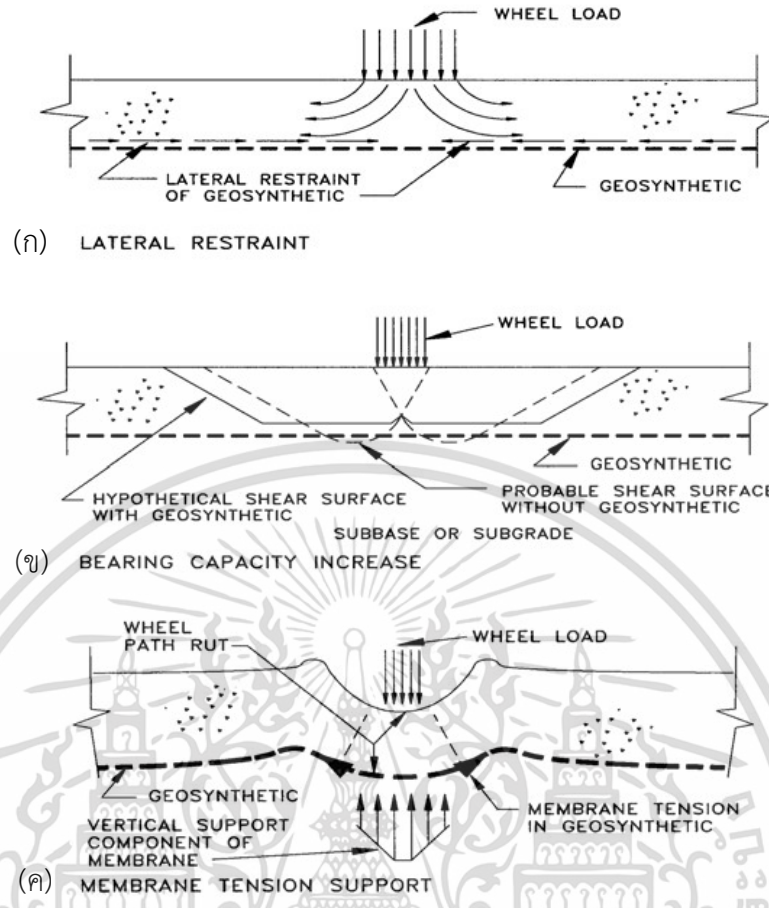
Han et al. (2018) ได้ทำการทดสอบ large-scale direct shear เพื่อศึกษา shear behavior ของผิวสัมผัสระหว่าง aggregate และ geogrid และยิ่งไปกว่านั้นทำการศึกษาผลจากขนาดมวลรวม (particle size) ต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบ interfacial shear strength ทำการศึกษาโดยใช้แผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน 2 แบบ (biaxial geogrids 32x31 มิลลิเมตร และ triaxial geogrids 46x46x46 มิลลิเมตร) และมวลรวมขนาดเดียว (single size) ที่มีขนาด 3 ช่วงขนาด คือ AGG1 (12.5–19 มิลลิเมตร), AGG2 (19–25 มิลลิเมตร), และ AGG3 (25–37.5 มิลลิเมตร) ผลการทดสอบพบว่ามวลรวม AGG2 ได้รับผลในการเสริมกำลังดีกว่ามวลรวมที่มีขนาด AGG1 และ AGG3 และเมื่อวิเคราะห์ขนาดช่องเปิดที่เหมาะสมของงานวิจัยพบว่า สำหรับ biaxial geogrids ค่าอัตราส่วนระหว่างขนาดช่องเปิดต่อขนาดมวลรวม (ratio of equivalent aperture size to aggregate particle size) หรือใช้ตัวแปรที่เรียกว่า “A/D” ซึ่ง A หมายถึง ขนาดช่องเปิด และ D หมายถึงขนาดมวลรวมเฉลี่ยควรมีค่าระหว่าง 1.30 ถึง 1.71 จึงจะทำให้การ interlock ได้ดี และทำให้ contact area ระหว่างมวลรวมและตาข่ายเสริมกำลังดิน (geogrid) น้อยที่สุด

และสำหรับ triaxial geogrids พบว่าค่าอัตราส่วนระหว่างขนาดช่องเปิดต่อขนาดมวลรวม A/D ควรมีค่าระหว่าง 1.08 ถึง 1.43

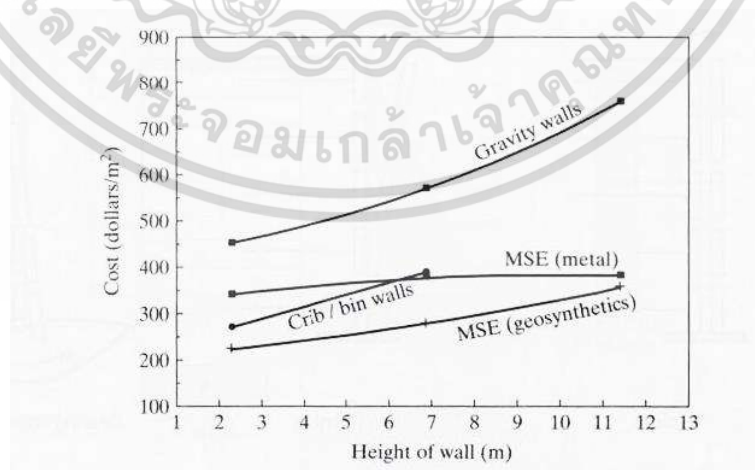
ดังที่กล่าวมาข้างต้น ค่าอัตราส่วนระหว่างขนาดช่องเปิดต่อขนาดมวลรวม หรือ A/D ของ biaxial geogrids (A/D เท่ากับ 1.30 ถึง 1.71) จะถูกนำไปใช้ต่อไปในการออกแบบ RSS-geogrid ในงานวิจัยนี้ (ดูบทที่ 3.1.1 ขอบเขตการศึกษา - การออกแบบช่องเปิดของ RSS-geogrid)

2.3.5 เปรียบเทียบราคาการก่อสร้างด้วยแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดินและการก่อสร้างด้วยวิธีอื่น ๆ

นอกเหนือจากการใช้งานที่หลากหลายแล้ว กำแพงกันดินเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินยังมีราคาที่ถูกที่สุดอีกด้วยเมื่อเทียบกับกำแพงกันดินทุกประเภท ไม่ว่าจะเป็น gravity, crib/bin และ MSE walls with metallic reinforcement ทั้งนี้รูปที่ 2.7 ได้แสดงผลการสำรวจต้นทุนกำแพงกันดินแต่ละประเภทเปรียบเทียบกัน พบว่ากำแพงกันดินที่ไม่ได้รับการเสริมกำลังใช้งบประมาณในการก่อสร้างมากที่สุด รองลงมา คือ กำแพงกันดินที่ใช้เหล็กเป็นวัสดุเสริมกำลัง และน้อยที่สุดคือ กำแพงกันดินเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังดินดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว



รูปที่ 2.6 หน้าที่ของแผ่นตาข่ายเสริมกำลัง ก. จำกัดการเคลื่อนที่ด้านข้างของดิน (lateral restraint) ข. เพิ่มกำลังรับน้ำหนักแบกทานของระบบ (bearing capacity increase) และ ค. รองรับเมมเบรน (membrane tension support) (Christopher. 2010)



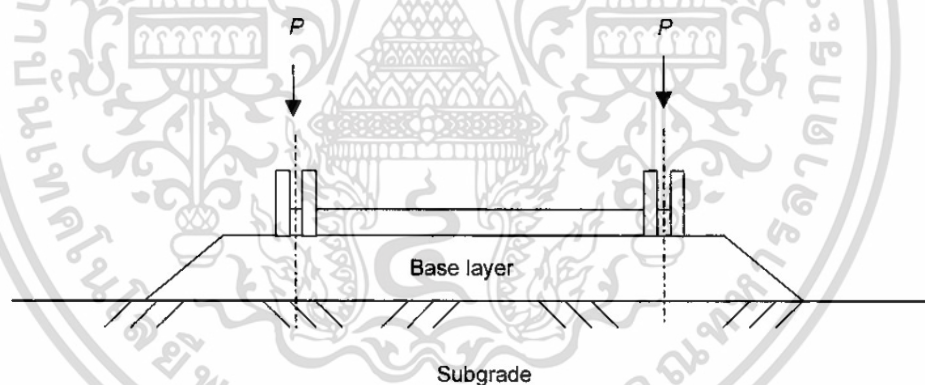
รูปที่ 2.7 ราคาการก่อสร้างกำแพงกันดินในรูปแบบต่าง ๆ (Koerner. 1997)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

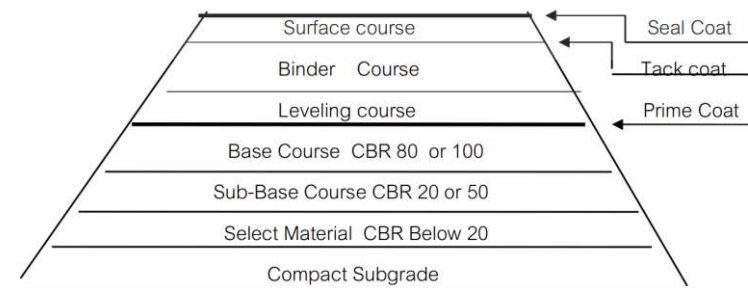
2.4 โครงสร้างถนนและมาตรฐานวัสดุในงานถนน

2.4.1 โครงสร้างชั้นทางถนนไม่ปูผิว (Unpaved Road)

ถนนไม่ปูผิว (unpaved road) โดยปกติใช้เพื่อเป็นถนนชั่วคราว (temporary roads) ซึ่งถูกใช้งานในงานระยะสั้นและสามารถรับปริมาณการจราจรได้น้อย (low volume of traffic) ลักษณะของ unpaved road เป็นชนิดถนนที่มีชั้นวัสดุรวมรวม (aggregate) หรือเรียกว่าชั้นพื้นทาง (base, มยผ.2102-57 ระบุไว้ว่าถนนไม่ปูผิวมีพื้นทางเป็นดินลูกรัง) ชั้นเดียววางอยู่บนดินเดิม (subgrade) (Calvarano et al. 2016) โดยที่ไม่มีชั้นผิวทางถาวร (permanent surfacing) เช่น คอนกรีต และแอสฟัลต์ (Koerner. 1997) ซึ่งวัสดุรวมรวมในชั้น base ทำหน้าที่กระจายแรงที่กระทำบนผิว และชั้น subgrade เป็นชั้นที่คอยรับน้ำหนักของยานพาหนะ ดังนั้นชั้น subgrade ควรรับน้ำหนักได้ หากในกรณีที่ subgrade มีลักษณะเป็นดินอ่อน (weak) การเสริมกำลังด้วยวัสดุใยสังเคราะห์เสริมกำลัง (geosynthetic reinforcement) จะถูกใช้ในการเสริมกำลังและวางอยู่ระหว่างชั้น base และ subgrade (Calvarano et al. 2016) โดยทั่วไปมีรูปทรงเรขาคณิต (geometry) ของโครงสร้างถนน unpaved road ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงถึงชั้น base ที่มีลักษณะเป็น uniform thickness ถูกวางอยู่บนชั้นดินเดิม



รูปที่ 2.8 ลักษณะโครงสร้างของถนนแบบไม่ปูผิวที่มี vehicle load กระทำ (Giroud and Han. 2004)



รูปที่ 2.9 ลักษณะโครงสร้างถนนปูผิวแบบลาดยาง โดย พ.ท.สายรุ่ง โปยขุนทด

(ที่มา: %C3%C7%C1%20%B4%D2%B4%BC%D4%C7.pdf)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 โครงสร้างชั้นทางถนนปูผิว (Paved Road)

ถนนแบบปูผิว (paved road) มีทั้งแบบถนนคอนกรีตและถนนลาดยาง ในบทนี้จะกล่าว โดยเฉพาะส่วนของถนนลาดยาง (flexible pavement structure) อ้างอิงจากเอกสารการสอน วิชาการลาดผิว พ.ท.สายรุ่ง โปยขุนทด มีโครงสร้างของถนนดังรูปที่ 2.9 ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละชั้นดังต่อไปนี้

ชั้นผิวทาง (Pavement)

เป็นชั้นที่รับการจราจรของยานพาหนะโดยตรง มีความต้านทานต่อการบิด (distortion) มีผิวหน้าเรียบ กันน้ำได้ (waterproof) มีความลาดเอียงแนวขวางเพื่อระบายน้ำป้องกันความชื้นไม่ให้ กัดเซาะโครงสร้างถนน ยิ่งไปกว่านั้นต้องต้านทานการลื่นไถลได้

ชั้นพื้นทาง (Base)

เป็นชั้นที่อยู่ใต้ผิวทาง วัสดุที่ใช้เป็นดินเม็ดหยาบ (granular material) ที่มีความแข็งแรงสูง จุดประสงค์การก่อสร้างก็เพื่อกระจายน้ำหนักจากล้อลงไปยังชั้นรองพื้นทาง (subbase) หรือชั้นดิน เดิม (subgrade) โดยในชั้นนี้มีมาตรฐาน คือ วัสดุที่ใช้ก่อสร้างต้องมีค่า CBR ไม่น้อยกว่า 80% การ บดทับต้องให้ได้ 100% ของการบดอัดแบบ modified โดยบดทับเป็นชั้น ๆ ชั้นละไม่น้อยกว่า 4 นิ้ว เมื่อการก่อสร้างเสร็จต้องมีความหนาแน่นและความมั่นคงสูงตามที่ยกแบบไว้

ชั้นรองพื้นทาง (Subbase)

เป็นชั้นที่อยู่รองจากชั้นพื้นทาง จะทำการก่อสร้างชั้นนี้เมื่อชั้นดินเดิม (subgrade) ในบริเวณ นั้นอ่อนมาก จำเป็นต้องเพิ่มความหนาของถนน ซึ่งทำได้โดยใช้วัสดุจากแหล่งใกล้เคียงที่หาง่ายและ ราคาถูก มี CBR ระหว่าง 20-50% วัสดุทั่วไปที่ใช้ ได้แก่ ดินลูกรัง ทราย เป็นต้น

ชั้นวัสดุคัดเลือก (Selected Material)

เป็นชั้นที่อยู่ใต้สุดของโครงสร้างถนนลาดยางหากไม่นับชั้นดินเดิม วัสดุที่ใช้มี CBR ต่ำกว่า 20% มีจุดประสงค์เพื่อช่วยเพื่อความหนาและปรับระดับ และสามารถรับน้ำหนักออกแบบได้ประหยัดขึ้น

ชั้นดินเดิม (subgrade)

เป็นชั้นดินเดิมที่รองรับโครงสร้างของถนนทั้งหมดไว้ เป็นปัจจัยสำคัญหนึ่งที่ใช้ในการ ออกแบบถนน คือ ต้องออกแบบให้ถนนมีโครงสร้างหนาพอที่จะกระจายน้ำหนักลงบนชั้นดินเดิมแล้ว รับน้ำหนักได้ และต้องมีการตากแห้งและถอนเอาวัสดุที่ไม่ต้องการออก เช่น รากไม้ แล้วรื้อไถชั้น ดินลงไปอีก 15-20 เซนติเมตร เพื่อบดทับให้แน่นแล้วจึงเริ่มการก่อสร้างโครงสร้างถนนต่อไป

2.4.3 มาตรฐานวัสดุชั้นพื้นทาง (Base)

มาตรฐานพื้นทางหินคลุกของกรมทางหลวง (DH-S 201/2544) ระบุไว้ว่างานนี้ประกอบด้วย หินไม่มวลรวม ซึ่งมีขนาดคลุสมำเสมอ จากใหญ่ไปหาเล็ก โดยจะก่อสร้างเป็นชั้นเดียว หรือหลายชั้น ไปบนชั้นรองพื้นทาง หรือชั้นอื่นใดที่ได้เตรียมไว้ และได้รับการตรวจสอบว่าถูกต้องแล้ว โดยการเกลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่งและบดทับให้ถูกต้องตามแนวระดับ ความลาด ขนาด ตลอดจนรูปตัดตามที่ได้แสดงไว้ในแบบ

วัสดุในชั้นพื้นทาง เป็นวัสดุหินไม่รวม ต้องเป็นวัสดุที่มีเนื้อแข็งเหนียว สะอาด ไม่ผุ และปราศจากวัสดุเจือปนอื่น โดยวัสดุจำพวก shale ห้ามนำมาใช้ ในกรณีที่ไม่ได้ระบุคุณสมบัติของวัสดุพื้นทางหินคลุกไว้เป็นอย่างอื่น วัสดุที่ใช้ทำพื้นทางหินคลุกต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- มีค่าสึกหรอเมื่อทดลองตามวิธีการทดลองหาค่าความสึกหรอของมวลรวมหยาบ (coarse aggregate) โดยวิธีการทดสอบการ Los Angeles abrasion test ไม่เกินร้อยละ 40
- มีค่าของส่วนที่ไม่คงทนเมื่อทดลองตามวิธีการทดลองหาความคงทน (soundness) ของมวลรวม โดยใช้โซเดียมซัลเฟต จำนวน 5 รอบแล้วไม่เกินร้อยละ 9 ให้มีการทดลองทุกครั้งที่นำมาใช้
- มวลรวมละเอียด (fine aggregate) ต้องเป็นวัสดุชนิดและคุณสมบัติเช่นเดียวกับกับมวลรวมหยาบ
- มีขนาดละเอียดเมื่อทดลองตามวิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้าง ต้องมีขนาดใดขนาดหนึ่ง ตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ขนาดละเอียดของวัสดุพื้นทางหินคลุก

ขนาดตะแกรง (มิลลิเมตร)	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล	
	A	B
50 (2 นิ้ว)	100	100
25 (1 นิ้ว)	-	75-95
9.5 (3/8 นิ้ว)	30-65	40-75
4.75 (เบอร์ 4)	25-55	30-60
2 (เบอร์ 10)	15-40	20-45
0.425 (เบอร์ 40)	8-20	15-30
0.075 (เบอร์ 200)	2-8	5-20

- มวลรวมละเอียดที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ต้องไม่มากกว่าสองในสามของมวลรวมละเอียดที่ผ่านตะแกรง 0.425 มิลลิเมตร (เบอร์ 40)
- ค่าพิกัดเหลว (liquid limit, LL) เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองหาค่า liquid limit ของดิน ไม่มากกว่าร้อยละ 25
- ค่าพิกัดพลาสติก (plasticity index, PI) เมื่อทดลองตามวิธีการทดสอบเพื่อหาค่า plastic limit และ plasticity index ไม่มากกว่าร้อยละ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่ากำลังรับน้ำหนักแบกทานแบบ CBR จากห้องทดลองไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 สำหรับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต และไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 สำหรับผิวทางเซอร์เฟซทรีตเมนต์ ที่ร้อยละ 95 ของค่าความแน่นแห้งสูงสุดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (modified proctor density) ตามมาตรฐานการทดสอบเพื่อหาค่า CBR หรือไม่น้อยกว่าที่กำหนดไว้ในแบบก่อสร้าง

2.4.4 มาตรฐานวัสดุชั้นรองพื้นทาง (Subbase)

ตามมาตรฐานวัสดุชั้นรองพื้นทางของกรมทางหลวง (DH-S 205-2532) งานก่อสร้างถนนประกอบไปด้วยมวลรวม ซึ่งมีขนาดคละสม่าเสมอจากขนาดใหญ่ไปขนาดเล็ก โดยจะก่อสร้างเป็นชั้นเดียวหรือหลายชั้นบนวัสดุคัดเลือกหรือชั้นอื่นใดที่ได้เตรียมไว้ และได้รับการตรวจสอบมาตรฐานเรียบร้อยแล้ว โดยการบดอัดที่ถูกต้องตามมาตรฐาน ได้ขนาด ความลาด รูปตัดตามทีออกแบบไว้อย่างถูกต้อง

วัสดุมวลรวมที่ใช้ในการก่อสร้างนั้นจะต้องมีคุณสมบัติ เม็ดดินแข็งแรงทนทานมีขนาดคละที่ดี มีการรับรองมาตรฐานแหล่งที่มา วัสดุมวลรวมที่เกะกันมีขนาดใหญ่กว่า 50 มิลลิเมตรจะต้องถูกกำจัดออกหรือบดให้เข้ากับเนื้อดินปราศจากก้อนดินเหนียวและวัชพืชต่าง ๆ

ในกรณีที่ไม่ได้ระบุคุณสมบัติของวัสดุรองพื้นทางเป็นอย่างอื่น วัสดุมวลรวมที่นำมารองพื้นทางจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- มีค่าความสึกหรอเมื่อทดลองตามวิธีการทดลองหาค่าความสึกหรอของมวลรวมหยาบ (coarse aggregate) โดยวิธีการทดสอบการ Los Angeles abrasion test ไม่เกินร้อยละ 60
- มีขนาดคละที่ดี และเมื่อทดลองตามวิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล่างต้องมีขนาดหนึ่งตามตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ขนาดคละเกรดต่าง ๆ ของวัสดุชั้นรองพื้นทาง (กรมทางหลวง. 2532)

ขนาดตะแกรง (มิลลิเมตร)	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล				
	A	B	C	D	E
50 (2 นิ้ว)	100	100	-	-	-
25 (1 นิ้ว)	-	-	100	100	100
9.5 (3/8 นิ้ว)	30-65	40-75	50-85	60-100	-
2 (เบอร์ 10)	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100
0.425 (เบอร์ 40)	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50
0.075 (เบอร์ 200)	2-8	5-20	5-15	5-20	6-20

- ปราศจากก้อนดินเหนียว (clay lump) หินดินดาน (shale) รากไม้หรือวัชพืชอื่น ๆ

- ขนาดวัสดุใหญ่สุดไม่โต กว่า 5 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่าพิกัดเหลว (liquid limit, LL) ไม่มากกว่าร้อยละ 35 ตามมาตรฐานการทดสอบเพื่อหาค่าพิกัดเหลว (liquid limit test)
- ค่าพิกัดพลาสติก (plasticity index, PI) ไม่มากกว่าร้อยละ 11 ตามมาตรฐานการทดสอบเพื่อหาค่าพิกัดพลาสติก (plastic limit test)
- ค่ากำลังรับน้ำหนักแบกทานแบบ CBR จากห้องทดลองไม่น้อยกว่าร้อยละ 25 ที่ร้อยละ 95 ของค่าความแน่นแห้งสูงสุดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (modified proctor density) ตามมาตรฐานการทดสอบเพื่อหาค่า CBR หรือไม่น้อยกว่าที่กำหนดไว้ในแบบก่อสร้าง

2.4.5 มาตรฐานวัสดุคัดเลือก ก.

ตามมาตรฐานวัสดุคัดเลือก ก. ของกรมทางหลวง (DH-S 208/2532) ระบุไว้ว่างานนี้ประกอบด้วยวัสดุมวลรวม ซึ่งมีขนาดคละกันจากใหญ่ไปหาเล็ก โดยจะก่อสร้างเป็นชั้นเดียว หรือหลายชั้นบนวัสดุคัดเลือก ข. หรือชั้นอื่นใดที่เตรียมไว้ และได้รับการตรวจสอบว่าถูกต้องแล้ว โดยการเกลี่ยแต่ง และบดทับให้ถูกต้องตามแบบที่กำหนดไว้

วัสดุมวลรวมต้องเป็นวัสดุที่มีความคงทน มีมวลรวมหยาบผสมกับมวลรวมละเอียดที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสานที่ดี ปราศจากก้อนดินเหนียว และวัชพืชอื่น ๆ หากส่วนใดจับเป็นก้อนแข็งหรือยึดเกาะกันมีขนาดใหญ่กว่า 50 มิลลิเมตร จะต้องกำจัดออกไปหรือทำให้แตก ในกรณีที่ไม่ได้ระบุคุณสมบัติของวัสดุคัดเลือก ก. จะต้องมียุทธศาสตร์ดังต่อไปนี้

- เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้างต้องมีความเม็ดใหญ่สุดไม่เกิน 50 มิลลิเมตร และส่วนที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ไม่เกินร้อยละ 30
- ห้ามใช้ทรายที่มีคุณสมบัติข้อหนึ่งข้อใดดังต่อไปนี้ ทำวัสดุคัดเลือก ก. คือ (1) ทรายแม่น้ำ (2) มีส่วนที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.425 (เบอร์ 40) มากกว่าร้อยละ 80 และ (3) มีส่วนที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 (เบอร์ 200) น้อยกว่าร้อยละ 8 หรือมากกว่าร้อยละ 30
- ค่าพิกัดเหลว (liquid limit, LL) ไม่มากกว่าร้อยละ 40
- ค่าพิกัดพลาสติก (plasticity index, PI) ไม่มากกว่าร้อยละ 20
- ค่ากำลังรับน้ำหนักแบกทานแบบ CBR จากห้องทดลองไม่น้อยกว่าร้อยละ 10 ที่ร้อยละ 95 ของค่าความแน่นแห้งสูงสุดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (modified proctor density) และมีค่าขยายตัวเมื่อทดสอบตามมาตรฐาน CBR แล้วไม่เกินร้อยละ 3
- กรณีใช้วัสดุจำพวก shale ต้องมีค่าเฉลี่ย durability index ของวัสดุทั้งชนิดเม็ดละเอียดและชนิดเม็ดหยาบ เมื่อทดลองตามวิธีการทดลองหาค่า durability ของวัสดุ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.6 มาตรฐานชั้นวัสดุคัดเลือก ข.

ตามมาตรฐานชั้นคัดเลือกวัสดุคัดเลือก ข. กรมทางหลวง (DH-S 209/2532) วัสดุมวลรวม หรือทราย หรือวัสดุอื่นใดที่นายช่างผู้ควบคุมงานยอมให้ใช้ได้ โดยจะก่อสร้างเป็นชั้นเดียว หรือหลายชั้น ไปบนชั้นดินคันทาง หรือชั้นอื่นใดที่ได้เตรียมไว้ และได้รับการตรวจสอบว่าถูกต้องแล้ว โดยการไถ่เกลี่ยแต่ง และบดทับให้ถูกต้องตามแนว ระดับ ความลาด ขนาด ตลอดจนรูปตัดตามที่ได้แสดงไว้ในแบบ

วัสดุมวลรวม หรือทราย หรือวัสดุอื่นใดที่นายช่างผู้ควบคุมงานยอมให้ใช้ได้ ต้องเป็นวัสดุที่มีความคงทน ปราศจากก้อนดินเหนียว และวัชพืชอื่น ๆ จากแหล่งที่ได้รับความเห็นชอบจากนายช่างผู้ควบคุมงานแล้ว หากส่วนใดจับเป็นก้อนแข็งหรือยึดเกาะกันมีขนาดใหญ่กว่า 50 มิลลิเมตร จะต้องกำจัดออกไปหรือทำให้แตก ในกรณีที่ไม่ได้ระบุคุณสมบัติของวัสดุคัดเลือก ข. ไว้เป็นอย่างอื่น วัสดุที่ใช้ทำชั้นวัสดุคัดเลือก ข. จะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- เมื่อทดสอบตามวิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยผ่านตะแกรงแบบล้างต้องมีความเม็ดใหญ่สุดไม่เกิน 50 มิลลิเมตร และส่วนที่ผ่านตะแกรงขนาด 0.075 มิลลิเมตร (เบอร์ 200) ไม่เกินร้อยละ 35
- ค่ากำลังรับน้ำหนักแบกทานแบบ CBR จากห้องทดลองไม่น้อยกว่าร้อยละ 6 ที่ร้อยละ 95 ของค่าความแน่นแห้งสูงสุดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (modified proctor density) และมีค่าขยายตัวเมื่อทดสอบตามมาตรฐาน CBR แล้วไม่เกินร้อยละ 3

2.5 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดิน

2.5.1 พิกัดอัตราเบอร์ก (Atterberg's Limit)

ความชื้นในมวลดินมีอิทธิพลสูงต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินทั้งในด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพ เช่น ดินมีสภาพเป็นของเหลวในกรณีที่มีน้ำมาก ดินมีสภาพเป็นของแข็งในกรณีที่มีน้ำน้อย และการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางวิศวกรรม เช่น ความแข็งแรงของดินฐานรากมีค่าลดลงเมื่อมีน้ำมาก โดยการเปลี่ยนแปลงความชื้นดังกล่าวมีผลมากต่อดินที่มีขนาดเม็ดละเอียด (fine grain soil) ได้แก่ดินที่เรียกว่าดินเหนียว (cohesive soil) ทั้งนี้แรงยึดเกาะระหว่างเม็ดดินหรือความเหนียวดังกล่าวเกิดจากการดึงดูดระหว่างประจุไฟฟ้าที่อยู่ในเม็ดดิน ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้น สำหรับดินเม็ดหยาบ (coarse grain soil) อิทธิพลของการดึงดูดเนื่องจากประจุไฟฟ้ามีน้อย จึงถือว่าไม่มีความเหนียว (cohesionless) ดินประเภทนี้จึงมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากเมื่อความชื้นในดินเปลี่ยนแปลงไป

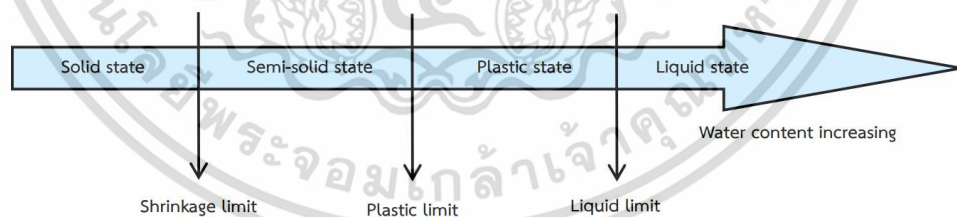
ความชื้นในมวลดิน ณ จุดขณะเปลี่ยนสภาพ เรียกว่า “ขอบเขตสถานะภาพ” (limit state) เช่น เป็นปริมาณความชื้นที่ดินจะเริ่มไหลเหมือนของเหลว ฯลฯ ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของมวลดิน

นั้น ๆ นอกจากจะใช้เป็นตัวบ่งคุณสมบัติพื้นฐานแล้ว ยังใช้ในการจัดจำแนกหมวดหมู่ (soil classification) และคาดคะเนคุณสมบัติทางวิศวกรรมบางอย่าง เช่น การทรุดตัวของชั้นดิน เป็นต้น

พิกัดอัตรเตอร์เบอร์ก (Atterberg's limits) ถูกเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดน ชื่อ A.M. Atterberg หมายถึงปริมาณน้ำในมวลดินที่ทำให้สภาพความเหนียวตัวของมวลดินเปลี่ยนแปลงไป สถานภาพของมวลดินแบ่งออกเป็น 5 สถานภาพ โดย จุดแบ่งแต่ละสถานภาพเรียกว่า พิกัด (limit) ดังนี้

1. cohesion limit คือ ปริมาณน้ำในมวลดินที่ทำให้เศษดินเริ่มมีการยึดเกาะเข้าด้วยกัน
2. sticky limit คือ ปริมาณน้ำในมวลดินที่ทำให้มวลดินเริ่มมีการยึดเกาะกับผิวของโลหะ
3. พิกัดเหลว (liquid limit, LL)
4. พิกัดพลาสติก (plastic limit, PL)
5. พิกัดการหดตัว (shrinkage limit, SL)

ต่อมาได้มีการนำค่าพิกัดดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ทางด้านวิศวกรรมโยธาโดย เพื่ออธิบายคุณสมบัติของดินมวลละเอียดเมื่อมีปริมาณความชื้น (water content) ในมวลดินแตกต่างกัน โดยทั่วไปสามารถแบ่งสภาพของมวลดินที่มีปริมาณความชื้นในมวลดินจากน้อยไปหามากได้ 4 สถานะ คือ สถานะของเหลว (liquid state) สถานะพลาสติก (plastic state) สถานะกึ่งของแข็ง (semi-solid state) และสถานะของแข็ง (solid state) โดยช่วงแบ่งสภาพของมวลดินแต่ละช่วงตามปริมาณความชื้นในมวลดินที่เปลี่ยนแปลงไป เรียกว่า ค่าพิกัดขั้นเหลวหรือค่าพิกัดอัตรเตอร์เบอร์ก (Atterberg's limit) ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าพิกัดเหลว (liquid limit, LL) ค่าพิกัดพลาสติก (plastic limit, PL) และค่าพิกัดหดตัว (shrinkage limit, SL) ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 สถานะของดินมวลละเอียดเมื่อปริมาณความชื้นในมวลดินต่างกัน

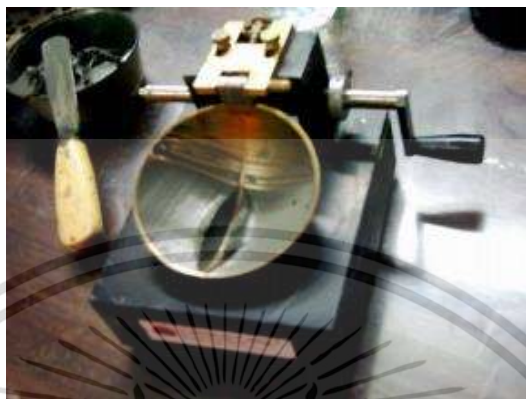
(วรรณวรงค์ รัตนานิคม. 2560)

ค่าพิกัดเหลว (LL)

ค่าพิกัดเหลว (LL) หมายถึง ปริมาณความชื้นที่น้อยที่สุดในดินที่ทำให้ดินสามารถไหลตัวได้ด้วยน้ำหนักของตัวเอง หรือถ้าพิจารณาจากรูปที่ 2.10 คือ ขีดจำกัดที่เปลี่ยนจากของเหลวเป็นพลาสติก สามารถหาค่าได้กับดินที่มีความเชื่อมั่นแน่น (ดินเหนียว หรือดินมวลละเอียด) ความชื้นของมวลดินที่เมื่อเตรียมดินลงในถ้วยเคาะโดยมีรอยบากมาตรฐานแล้วเคาะได้ 25 ครั้ง โดยมีรอยบาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

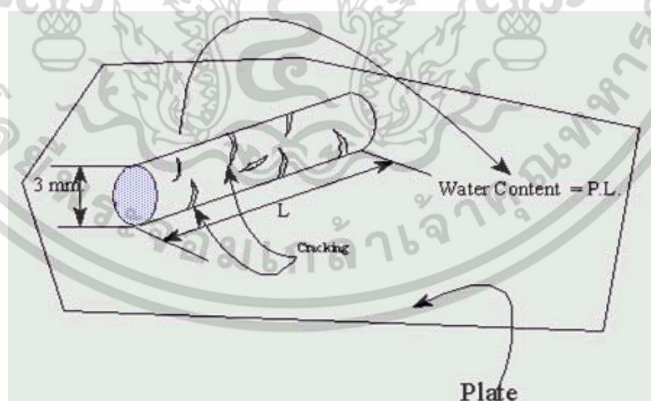
มาตรฐาน (รูปที่ 2.11) แล้วเคาะได้ 25 ครั้ง รอยบากนั้นจะเคลื่อนมาบรรจบกันยาวประมาณ 1.3 เซนติเมตร ซึ่งเท่ากับความชื้น ณ จุดที่กำลังของดินเท่ากับ 25 กรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยเปรียบเทียบไว้ว่าการเคาะแต่ละครั้ง เท่ากับหน่วยแรงเฉือนที่กระทำต่อมวลดินมีค่าประมาณ 1 กรัมต่อตารางเซนติเมตร (มานิต ช่วยงาน. 2554) มีมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคือ ASTM D4318



รูปที่ 2.11 รอยบากมาตรฐานของการทดสอบค่าพิกัดเหลว (สกว. 2549)

ค่าพิกัดพลาสติก (PL)

ค่าพิกัดพลาสติก (PL) หมายถึงปริมาณความชื้นในมวลดินขณะที่มวลดินเริ่มเปลี่ยนสภาพจากพลาสติกเป็นกึ่งของแข็ง หรือหมายถึงค่าความชื้นต่ำสุดที่ดินยังคงมีสภาพแบบพลาสติก หาได้โดยนำดินขึ้นมาคลึงให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1/8 นิ้ว (3.2 มิลลิเมตร) และเกิดรอยแตกบริเวณที่ดินถูกคลึง (รูปที่ 2.12) มีมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคือ ASTM D4318



รูปที่ 2.12 การทดสอบหาค่าพิกัดพลาสติกโดยวิธีการคลึง (วรรณวรงค์ รัตนาณคม. 2560)

ค่าดัชนีพลาสติก (Plasticity index, PI)

ค่าดัชนีพลาสติก คือ ค่าผลต่างระหว่างค่าพิกัดเหลว (LL) และค่าพิกัดพลาสติก (PL) ดังสมการที่ 2.1 หรือหมายถึงช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่าความชื้นของมวลดินโดยที่มวลดินนั้นจะยังคง

รักษา สภาพเป็นพลาสติกอยู่ได้ โดยทั่วไปจะแสดงค่าเป็นจำนวนเต็ม
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 การทดสอบหาขนาดและการกระจายตัวของเม็ดดิน

ในมวลดินอาจประกอบด้วยเม็ดดินหลายขนาด ซึ่งขนาดของเม็ดดินนี้จะมีผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของมวลดินอย่างมาก เช่น มีผลต่อค่าความซึมผ่าน (permeability) อัตราการทรุดตัว (rate of settlement) และความสามารถในด้านกำลังของมวลดิน (strength) เป็นต้น เพราะฉะนั้นจึงต้องทราบขนาดคละของเม็ดดินเพื่อให้เหมาะกับงานก่อสร้าง เช่น งานเขื่อน ถนน สนามบิน มวลดินที่มีขนาดเม็ดหยาบอยู่มากจะทำให้น้ำไหลซึมผ่านได้ง่าย มวลดินที่มีขนาดเม็ดละเอียดอยู่มากดินจะแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ง่ายเมื่อผสมน้ำแล้วจะตกตะกอนช้ากว่าดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่กว่า

การหาขนาดและการกระจายตัวของเม็ดดินทำได้หลายวิธีตามความเหมาะสมของขนาดเม็ดดินและตามชนิดของดินดังนี้

1. วิธีร่อนผ่านตะแกรง (sieve analysis) สำหรับเม็ดดินที่มีขนาดใหญ่กว่าตะแกรงเบอร์ 200 เป็นส่วนใหญ่ สามารถหาขนาดเม็ดดินได้โดยการร่อนดินผ่านตะแกรงเบอร์ต่าง ๆ ซึ่งวางเรียงลำดับโดยให้ตะแกรงอยู่ข้างบนและตะแกรงละเอียดที่สุดอยู่ข้างล่างแล้วหาเปอร์เซ็นต์ของดินที่ค้างบนตะแกรง แต่วิธีนี้เป็นเพียงค่าประมาณเท่านั้นเพราะรูปร่างขนาดเม็ดดินมีความแตกต่างกันไม่ใช่กลมหรือลูกบาศก์แต่เป็นเหลี่ยมแหลมไปตามธรรมชาติ
2. วิธีตกตะกอนโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer analysis) สำหรับดินที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200 เป็นส่วนใหญ่ (ขนาดเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร) เช่น ดินเหนียว (clay) ดินเหนียวปนตะกอน (silty clay)

สำหรับดินโดยทั่วไปจะใช้ทั้ง 2 วิธีร่วมกันในการวิเคราะห์ขนาดของเม็ดดิน ซึ่งทั้งสองวิธีนี้จะเกี่ยวเนื่องกันเมื่อได้ผลแล้วต้องนำผลทั้ง 2 วิธีมาเขียนกราฟการกระจายตัวของขนาดเม็ดดินต่อไป กล่าวคือ ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของเม็ดดินโดยทั่วไปขนาดของเม็ดดินกับเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเม็ดดิน (diameter) ที่มีขนาดเม็ดดินเล็กกว่าที่ระบุหรือเปอร์เซ็นต์ที่ผ่านตะแกรงค่าต่าง ๆ จะถูกนำมาเขียนกราฟมากกว่าการวิเคราะห์ข้อมูลจากตารางบันทึกผลก็จะเห็นลักษณะการกระจายตัวได้ทันที (ดูตัวอย่างรูปที่ 2.13) จากรูปที่ 2.13 จะเห็นว่าลักษณะกราฟการกระจายตัวของเม็ดดินสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ (1) ดินที่มีขนาดคละกันดี (well graded soil), (2) ดินที่มีขนาดเม็ดสม่ำเสมอ (uniform graded) และ (3) ดินที่มีขนาดเม็ดขาดช่วง (skip หรือ gap graded) ซึ่งประเภทที่ 2 และ 3 เป็นดินที่มีขนาดคละกันไม่ดี (poorly graded soil) คือ โดยในแต่ละประเภทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ดินที่มีขนาดคละกันดี

ดินที่มีขนาดคละกันดี (well graded soil) ได้แก่ดินที่มีขนาดต่าง ๆ ตั้งแต่ขนาดใหญ่ไปจนถึงขนาดเล็กคละกันอย่างเหมาะสม (รูปที่ 2.13) เส้นกราฟที่ได้จะเป็นเส้นโค้งสม่ำเสมอลากจากด้านเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง (ดังรูปที่ 2.16) หรือสามารถหาจากค่า coefficient of uniformity (C_u) ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกความสม่ำเสมอของเม็ดดิน โดยหาได้จากสมการที่ 2.2 นอกจากนี้สามารถหาจากสัมประสิทธิ์ความโค้งของเส้นกราฟที่เรียกว่า coefficient of curvature (C_c) หาได้จากสมการที่ 2.3 โดยดินที่มีลักษณะขนาดคละกันดีนั้น จะต้องมิลักษณะตามตารางที่ 2.5

$$C_u = \frac{D_{10}}{D_{60}} \quad (2.2)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (2.3)$$

โดยที่

D_{10} = คือขนาดของเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่า 10% โดยน้ำหนัก เรียกว่าขนาดประสิทธิผล (effective size)

D_{30} = คือขนาดของเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่า 30% โดยน้ำหนัก

D_{60} = คือขนาดของเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่า 60% โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2.5 ลักษณะของดินที่มีขนาดคละกันดี (มานิต ช่วยงาน. 2554)

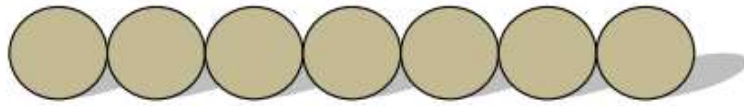
ชนิดของดิน	C_u	C_c
กรวด	มากกว่า 4	1-3
ทราย	มากกว่า 6	1-3



รูปที่ 2.13 ลักษณะขนาดของดิน well graded soil (มานิต ช่วยงาน. 2554)

ดินที่มีขนาดเม็ดสม่ำเสมอ

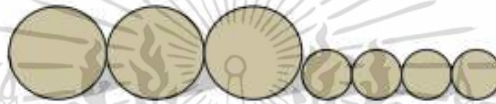
ดินที่มีขนาดเม็ดสม่ำเสมอ (uniform graded) คือดินที่มีขนาดเดียวกันเป็นส่วนใหญ่ (รูปที่ 2.14) เส้นกราฟจะให้ลักษณะที่เป็นเส้นขนานกับแกน y (รูปที่ 2.16) เรียกดินลักษณะนี้ว่า narrowly graded ซึ่งเป็นหนึ่งใน poorly graded soil



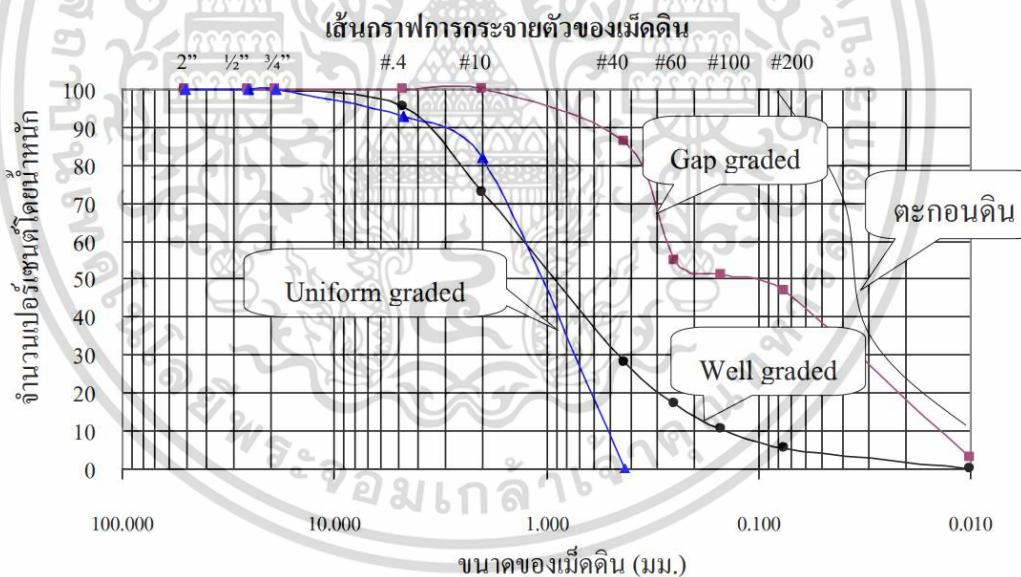
รูปที่ 2.14 ลักษณะขนาดของดิน uniform graded soil (มานิต ช่วยงาน. 2554)

ดินที่มีขนาดเม็ดขาดช่วง

ดินที่มีขนาดเม็ดขาดช่วง (skip หรือ gap graded) ลักษณะของเส้นการกระจายตัวของดินจะมีบางช่วงซึ่งทอดตัวในแนวขนาน ดังแสดงในรูปที่ 2.16 แสดงถึงดินที่มีเม็ดบางขนาดหายไป (รูปที่ 2.15) ซึ่งเป็นหนึ่งใน poorly graded soil



รูปที่ 2.15 ลักษณะขนาดของดิน gap graded soil (มานิต ช่วยงาน. 2554)



รูปที่ 2.16 แสดงเส้นกราฟการกระจายตัวของเม็ดดิน หรือ grain size distribution curve (มานิต ช่วยงาน. 2554)

2.5.3 การทดสอบการบดอัดดิน

การบดอัดดิน (compaction) เป็นวิธีการปรับปรุงเสถียรภาพการรับแรงของดินที่แพร่หลาย และเป็นที่ยอมรับที่สุด โดยเฉพาะงานก่อนสร้างที่ดินเป็นวัสดุถม (fill material) เช่นงานถนน งานเชื่อม งานสนามบิน เป็นต้น เนื่องจากการบดอัดดิน คือ การใช้แรงภายนอก เช่น แรงกระแทก แรงบด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดนามิกส์ มาโล่อากาศในมวลดินออกไป ทำให้ดินที่ได้รับการบดอัดแล้วมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โดยมีจุดประสงค์ 3 ข้อด้วยกัน คือ (1) ช่วยลดการทรุดตัวที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต (decrease future settlement), (2) เพิ่มเสถียรภาพการรับกำลังของดิน (increase shear strength) เพื่อให้ดินรับแรงได้มากขึ้น และ (3) ลดความชื้นน้ำของดิน (decrease permeability)

การอัดดินนั้นจะทำได้โดยการใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่โดยสามารถแบ่งประเภทออกเป็น 2 ประเภทของดินที่บดอัดได้เป็น รถบดอัดสำหรับวัสดุมวลรวมเม็ดละเอียด เช่น รถบดอัดตีนแกะ (sheepsfoot roller) และรถบดอัดสำหรับวัสดุมวลรวมเม็ดหยาบ เช่น รถบดอัดล้อยาง (pneumatic tire roller) รถบดอัดล้อเหล็ก 2 ล้อสั่นสะเทือน (vibratory roller) รถบดล้อเหล็กล้อเหล็กผิวเรียบ เป็นต้น การควบคุมคุณภาพการบดอัดดินเป็นสิ่งที่สำคัญ ดังนั้นจึงต้องมีการนำดินจากแหล่งเดียวกับที่นำมาก่อสร้างมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับดินที่บดอัดแล้วในสนาม

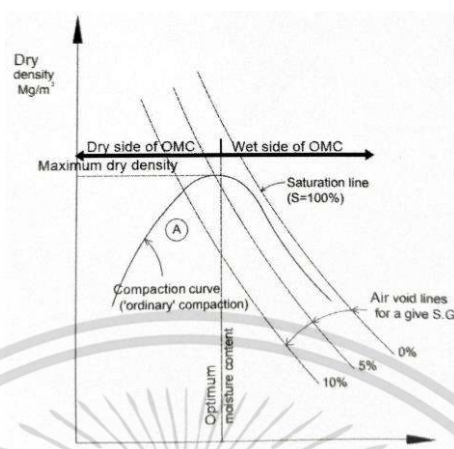
2.5.3.1 ทฤษฎีการบดอัดดินของ Proctor (1930)

ทฤษฎีพื้นฐานการบดอัดดินสำหรับดินที่มีความชื้นแน่นได้ถูกสร้างความสัมพันธ์ขึ้นโดย R.R. Proctor ในปี ค.ศ. 1930 โดยเริ่มต้นเมื่อมีการสร้างเขื่อนเพื่อกักเก็บน้ำใน Los Angeles และเขาได้พัฒนาหลักการบดอัดดินแล้วนำวิธีการทดสอบนี้ไปใช้ในห้องปฏิบัติการโดยเรียกวิธีการดังกล่าวว่า “Proctor test” โดยกลไกของการเกิดเส้นการบดอัดลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.17 จากรูปแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นต่อหน่วยน้ำหนักแห้งของดินที่เปลี่ยนแปลงไป โดยเรียกจุดที่หน่วยน้ำหนักของดินเพิ่มขึ้นถึงจุดที่เม็ดดินอยู่ใกล้กันมากที่สุด ซึ่งเป็นจุดที่มีความหนาแน่นแห้งสูงสุดว่า maximum dry density และเรียกปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจุดนี้ว่า optimum moisture content (OMC)

จากรูปที่ 2.17 สามารถสังเกตเห็นได้ว่าพฤติกรรมของดินที่ถูกบดอัดจะถูกแบ่งเป็น 2 ด้าน คือ ด้านซ้ายเรียกว่าด้านแห้ง (dry side of optimum) ทางด้านขวาเรียกว่าทางด้านเปียก (wet side of optimum) สำหรับการบดอัดดินที่แห้งมาก ๆ ดินจะมีแรงเสียดทานที่สูงมาก เนื่องจากแรงตึงผิวที่เกิดจากความชื้นคาพิลลารี (capillary moisture) เป็นผลให้การบดอัดดินทำได้ยาก แต่เมื่อเติมน้ำเข้าไปในดินที่แห้งมาก ๆ น้ำจะไปลดแรงคาพิลลารีและเป็นผลให้แรงเสียดทานลดลงไปด้วย ถ้าเติมน้ำเข้าไปอีกเรื่อย ๆ จนน้ำไปสลายแรงเสียดทานได้แล้ว น้ำก็จะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นทำให้เม็ดดินเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ จนถึงปริมาณน้ำที่เติมช่องว่างในช่วงหนึ่งก็จะทำให้ดินมีความหนาแน่นแห้งสูงสุด แม้ว่าดินจะมีความหนาแน่นสูงสุดแล้ว แต่ยังคงมีช่องว่างในดินเหลืออยู่ (ปริมาณน้อย) ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำให้ในมวลดินปราศจากช่องว่างได้ (กราฟการบดอัดจะไม่สัมผัส saturation line = 100%)

หลังจากจุดนี้เมื่อเติมน้ำเข้าไปอีกจะทำให้ความหนาแน่นแห้งลดลง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเข้าไปแทนที่เนื้อดิน ทำให้เนื้อดินที่มีในปริมาตรที่เท่ากันลดลง อีกทั้งเกิดจากความถ่วงจำเพาะของ

น้ำน้อยกว่าดิน ในขณะที่ความหนาแน่นเปียกมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อความชื้นในดินสูงมาก ๆ พบว่าดินจะอยู่ในสภาพอ่อนตัว ซึ่งไม่อยู่ในสภาพที่สามารถรับน้ำหนักได้อีกต่อไป

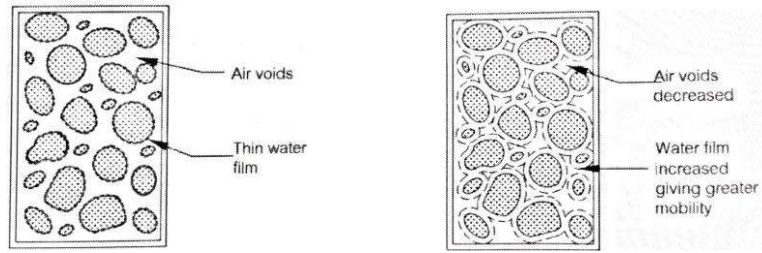


รูปที่ 2.17 เส้นการบดอัดดินแสดงความสัมพันธ์ระหว่างของปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักแห้งของดิน

ในการบดอัดดินเป็นการทำให้เม็ดดินเข้าใกล้กันมากที่สุด ทำให้ช่องว่างหรืออากาศในมวลดินมีปริมาตรลดลง และปริมาณน้ำในมวลดินไม่ลดลงหรือลดลงน้อยมาก ในการบดดินไม่สามารถทำให้ช่องว่างหายไปทั้งหมดได้แต่สามารถทำให้เหลือน้อยที่สุดได้ โดยการควบคุมการบดอัดอย่างดีในขณะที่มวลดินมีปริมาณน้ำอยู่น้อย น้ำจะเกิดเป็นฟิล์มบางเคลือบเม็ดดินอยู่ (รูปที่ 2.18) เมื่อปริมาณน้ำมากขึ้นเม็ดดินจะเกิดการไสลด์ขึ้นเรียกกระบวนการนี้ว่า lubrication มีผลอย่างมากในดินเม็ดละเอียด และมีผลน้อยกว่าในดินเม็ดหยาบเนื่องจากความหนาของฟิล์มน้ำนั้นมีขนาดน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของเม็ดดิน อย่างไรก็ตามหากมีการบดอัดเพิ่มเติมความหนาแน่นของดินยังสามารถเพิ่มได้อีกจึงมักจะควบคุมปริมาณพลังงานที่ใช้ในการบดอัดดิน เพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่สุดเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำ จากปริมาณน้ำที่เหมาะสมจะเกิดเป็นน้ำส่วนเกิน (excess water) ทำให้เกิดแรงผลักกันระหว่างเม็ดดิน น้ำเข้าไปแทนที่เม็ดดินทำให้เม็ดไม่สามารถเข้าใกล้กันได้มากเท่าที่ควร ปริมาณความชื้นในดินจะมากขึ้นโดยที่ปริมาณอากาศในมวลดินไม่ลดลงหรือลดลงน้อยมาก

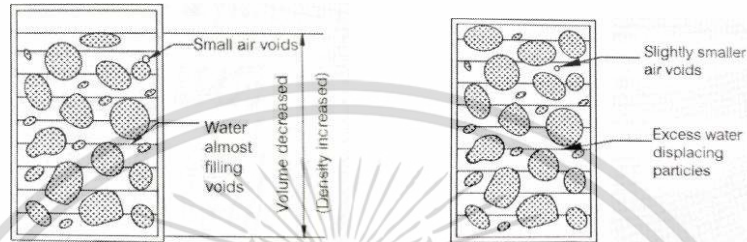
จากพฤติกรรมดังกล่าว R.R. Proctor (1933) ได้กำหนดกระบวนการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณน้ำในมวลดินกับความหนาแน่นของดินจากการบดอัดในห้องปฏิบัติการขึ้นมา ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันแพร่หลาย เรียกว่าวิธีการทดสอบแบบมาตรฐาน (standard proctor test) เหมาะกับงานก่อสร้าง เช่น ถนน สนามบิน เขื่อนดิน เป็นต้น เนื่องจากปัจจุบันยานพาหนะมีขนาดและน้ำหนักมากขึ้น จึงมีวิธีการทดสอบที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยการเพิ่มพลังในการบดอัดดิน เรียกว่า การทดสอบแบบโมดิฟายด์ (modified proctor test) โดยมีข้อแตกต่างดังตารางที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ดินแห้ง

(ข) เติมน้ำลงไปดิน



(ค) ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

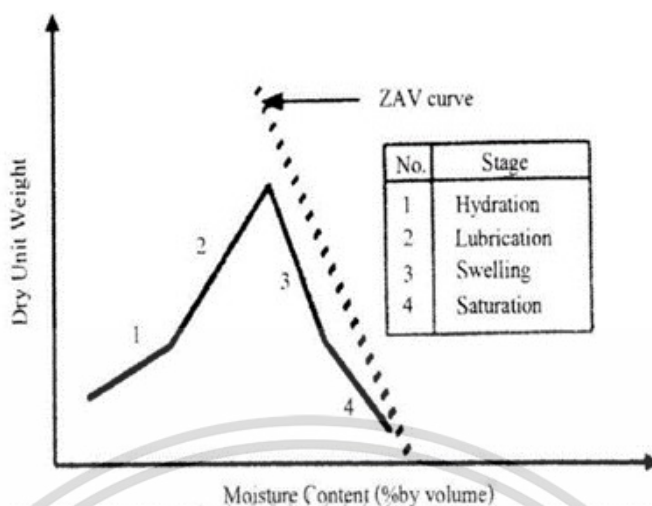
(ง) น้ำในมวลดินเป็นน้ำส่วนเกิน

รูปที่ 2.18 เม็ดดินและปริมาณน้ำมีผลต่อพฤติกรรมดิน

ตารางที่ 2.6 การเปรียบเทียบวิธีการและเครื่องมือระหว่างวิธีการทดสอบแบบมาตรฐาน (standard proctor test) กับ การทดสอบแบบโมดิฟายด์ (modified proctor test)

Using	Standard		Modified	
Mold	Ø 4"x4.6"	Ø 6"x5"	Ø 4"x4.6"	Ø 6"x5"
Rammer (lb)	5.5	5.5	10	10
No. of Layer	3	3	5	5
No. of Blow per Layer	25	56	25	56
Rammer Fall (in)	12	12	18	18
Compaction energy (ft-lb/ft ³)	12375	12375	56250	56250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้น (Hogentogler, 1936)

Hogentogler นำเสนอเส้นกราฟการบดอัดที่แตกต่างกับ R.R.Proctor กล่าวคือ เขาได้นำเสนอเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้ง (dry density) กับปริมาณความชื้นในรูปของปริมาณน้ำต่อปริมาตรรวม (molding moisture content: V_w/V) โดยลักษณะของเส้นกราฟแสดงด้วยเส้นตรง 4 เส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ซึ่งสาเหตุที่เขาได้นำเสนอการพล็อตเส้นกราฟแบบนี้เนื่องจากเขาพบว่าน้ำมีบทบาทอยู่ 4 ส่วน แบ่งได้เป็น 4 ช่วงที่มีผลทำให้ดินเกิดความหนาแน่นแห้งสูงสุด และทำให้โครงสร้างของดินบดอัดมีความแตกต่างกันโดยมีรายละเอียดแต่ละช่วง

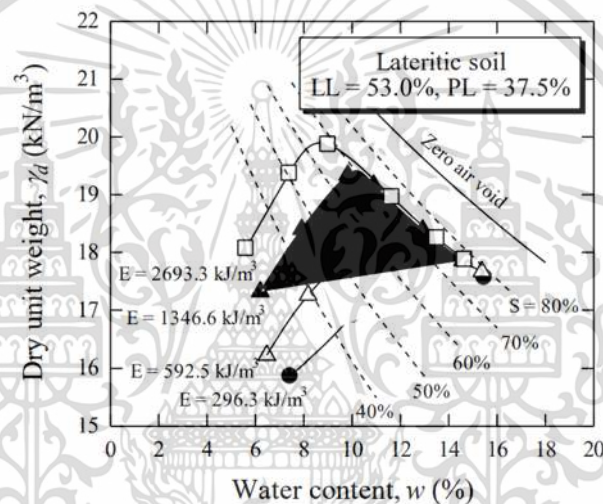
1. Hydration stage เขากล่าวว่าในช่วงนี้น้ำจะถูกดูดซึมโดยอนุภาคของดินในลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบาง ๆ ห่อหุ้มอนุภาคดินในลักษณะเดียวกับเมื่อพรมน้ำลงไปบนดินแห้ง ในช่วงแรกอนุภาคดินจะดูดซึมน้ำทันทีเพื่อไปห่อหุ้มอนุภาคดินก่อน โดยน้ำส่วนกลางที่จะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นนั้นยังไม่มี
2. Lubrication stage ในช่วงนี้น้ำจะมีบทบาทเป็นสารหล่อลื่นเป็นผลให้ดินเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ในลักษณะที่มวลดินมีความแน่นขึ้น โดยยังคงมีอากาศอยู่ในมวลดินบางส่วนนั้นหมายถึงความหนาแน่นแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเมื่อถึงจุดปริมาณน้ำที่เหมาะสม (optimum moisture content; OMC) จะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งมีค่าสูงสุด (maximum dry density)
3. Swelling stage ในช่วงนี้เกิดจากการเติมน้ำที่เกินปริมาณน้ำที่เหมาะสม อากาศในส่วนที่มีอยู่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากปริมาตรของมวลดินมีค่าน้อยอยู่แล้วและอยู่ในสภาพที่แน่นซึ่งจะไม่ให้อากาศที่มีอยู่ออกไป ดังนั้นเมื่อเติมน้ำเข้าไปอีกมวลดินจึงเกิดการบวมตัวในขณะที่ปริมาตรอากาศคงที่อากาศที่มีอยู่ออกไป ดังนั้นเมื่อเติมน้ำเข้าไปอีก มวลดินจึงเกิดการบวมตัวในขณะที่ปริมาตรอากาศคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Saturation Stage ในช่วงนี้ เมื่อเติมน้ำเข้าไปอีกน้ำจะเข้าไปแทนที่อากาศในช่องว่างที่เหลืออยู่ในมวลดิน เป็นผลให้ระดับความอิ่มตัว (Degree of Saturation) เพิ่มมากขึ้นและมีแนวโน้มเข้าใกล้เส้นอากาศเป็นศูนย์ (Zero Air Void; ZAV)

2.5.3.2 พลังงานการบดอัดดินที่ต่างกัน

การบดอัดด้วยวิธีการทดสอบแบบโมดิไฟด์ (modified proctor test) มีค่าพลังงานที่ให้กับดินสูงกว่าวิธีการบดอัดมาตรฐานและมีปริมาณความชื้นน้อยกว่า ในวิธีการบดอัดเดียวกันหากเพิ่มจำนวนครั้งหรือ พลังงานในการบดอัดความหนาแน่นสูงสุดของดินจะมีค่าเพิ่มขึ้นและมีปริมาณน้ำในมวลดินลดลง กราฟการบดอัดจะมีลักษณะคล้ายกันแต่จะมีการขยับขึ้นและขยับไปทางซ้ายตามพลังงานที่เพิ่มเข้าไป



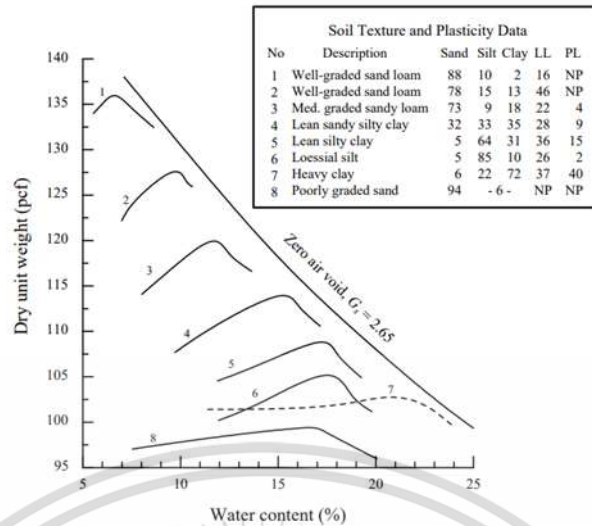
รูปที่ 2.20 อิทธิพลของพลังงานบดอัดต่อกราฟการบดอัดของดินลูกรัง (Horpibulsuk et al. 2004)

จากรูปที่ 2.20 เราสามารถสรุปได้ว่า

1. หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานการบดอัดที่เพิ่มขึ้น
2. ปริมาณความชื้นเหมาะสมมีค่าลดลงตามการเพิ่มของพลังงานการบดอัด

2.5.3.3 การบดอัดดินที่มีขนาดต่างกัน

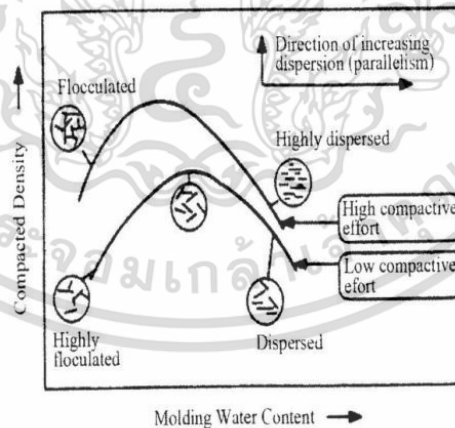
การบดอัดดินต่างชนิดกันที่มีขนาดของเม็ดดินต่างกันนั้น ดินที่มีเม็ดหยาบจะบดอัดได้ความหนาแน่นสูงกว่าดินที่มีเม็ดละเอียด สาเหตุหนึ่งมาจากดินที่มีเม็ดหยาบจะมีพื้นที่ในการซึมซับน้ำได้น้อยกว่าดินเม็ดละเอียด ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจึงน้อยกว่าทำให้ความหนาแน่นสูงที่สุดมากกว่าด้วย ลักษณะของกราฟการบดอัดจะขยับมาทางซ้ายดังแสดงในรูปที่ 2.21 สังเกตได้ว่ายิ่งปริมาณของทราย (ดินเม็ดหยาบ) มากเท่าใดก็ยิ่งมีค่าความหนาแน่นแห้งสูงขึ้นเช่นกัน ยกเว้นในส่วน of poorly graded sand ที่มีขนาดละเอียด ซึ่งมีความหนาแน่นแห้งต่ำที่สุด



รูปที่ 2.21 อิทธิพลของชนิดดินต่อการบดอัดแบบมาตรฐาน (Johnson and Sallberg, 1960)

2.5.3.4 การบดอัดต่อโครงสร้างของดินที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive Soil)

การบดอัดดินเม็ดละเอียดที่มีความเชื่อมแน่น เช่น ดินเหนียว จะส่งผลต่อโครงสร้างของเม็ดดินโดยเริ่มแรกอนุภาคของเม็ดดินจะเรียงตัวแบบสะเปะสะปะ (flocculent structure) เมื่อปริมาณความชื้นมากขึ้น อนุภาคของเม็ดดินจะเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้น (parallel structure) เม็ดดินเรียงตัวกันทำให้สามารถเคลื่อนที่เข้าใกล้กันได้มากขึ้นมีความหนาแน่นมากขึ้น เมื่อปริมาณน้ำมากขึ้นจะให้ให้เกิดแรงผลักระหว่างเม็ดดิน พลังที่เพิ่มขึ้นก็ทำให้เม็ดดินเรียงตัวมากขึ้นเช่นกัน (รูปที่ 2.22)



รูปที่ 2.22 ผลกระทบของการบดอัดดินที่มีต่อโครงสร้างดิน (โกคินท์ ซ้ำเกตุ, 2554)

2.5.3.5 ผลการบดอัดต่อกำลังของดิน

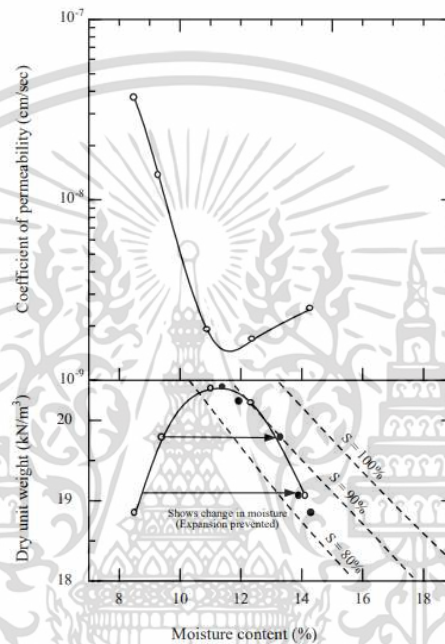
ค่ากำลังรับแรงสูงสุดของดิน ทางด้านแห้ง (dry side of optimum) จะมีค่ามากกว่าทางด้านเปียก (wet side of optimum) และจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยกว่า (lower

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

strain) จึงเกิดการวิบัติแบบเปราะ (brittle failure) ส่วนทางด้านเปียกจะเกิดการวิบัติแบบพลาสติก (plastic failure)

2.5.3.6 การบดอัดดินต่อการซึมผ่านของน้ำ

เมื่อปริมาณความชื้นในการบดอัดเพิ่มขึ้น การซึมผ่านของน้ำในด้านแห้งจะมีค่าลดลงจนมีค่าต่ำสุดที่ปริมาณความชื้นสูงกว่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมเล็กน้อย และมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในทางด้านเปียกเนื่องจากดินถูกบดอัดทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดดินลดลงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การทดสอบความซึมผ่านได้และการบดอัดดิน Siburua (Lambe, 1962)

2.5.3.7 การเลือกด้านการบดอัด

ในงานก่อสร้างทางวิศวกรรม ผู้ออกแบบมักจะต้องการให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อย (low strain) ดังนั้นจึงต้องทำการบดอัดในด้านแห้ง ส่วนในเขื่อนดินเหนียวหากต้องการคุณสมบัติของดินที่ทับน้ำก็ควรทำการบดอัดจากด้านเปียก แต่ต้องระวังปัญหาเรื่องการทรุดตัว การเปลี่ยนแปลงปริมาตรมากที่สุดที่ยอมให้โดยไม่เกิดรอยร้าว (allow larger displacement strains without cracking)

สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างการบดอัดดินในสนามเทียบกับการบดดินในห้องปฏิบัติการได้จากสมการที่ 2.4

$$\text{Relative compaction, RC} = \frac{\gamma_{df}}{\gamma_{dl}} \times 100 (\%) \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ γ_{df} = หน่วยน้ำหนักดินในสนาม (dry unit weight in field)
 γ_{dl} = หน่วยน้ำหนักดินในห้องปฏิบัติการ (dry unit weight in laboratory)

2.5.4 การทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักแบบ CBR

การทดสอบแคลิฟอร์เนีย แบริง เรโซ (California bearing ratio test, CBR) ถูกพัฒนาในช่วงปี ค.ศ. 1930 โดยเป็นวิธีการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของดินที่บดอัดแน่น ซึ่งการทดสอบหาค่าเปอร์เซ็นต์ CBR สามารถทำการทดสอบได้ทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการปกติจะทำการทดสอบที่จุดความชื้นที่เหมาะสมที่สุด (OMC) โดยใช้เหล็กกลมตัน (penetration piston) ขนาดพื้นที่ 3 ตารางนิ้ว กดลงบนตัวอย่างด้วยอัตรา 0.05 นิ้วต่อนาที หรือ 1.25 มิลลิเมตรต่อนาที แล้วนำค่าหน่วยแรงที่ได้ที่ความลึกในการกดต่าง ๆ ให้ถือว่าเป็น test unit stress และนำไปหาอัตราส่วนกับค่าหน่วยแรงมาตรฐาน standard unit stress ที่การยุบตัวเดียวกัน (สมการที่ 2.5) โดยหน่วยแรงมาตรฐานนั้นได้จากการทดสอบตัวอย่างหินคลุกที่กำหนดโดย California Division of Highways และกำหนดให้มีค่าเป็นมาตรฐานตามตารางที่ 2.7

การทดสอบ CBR แบ่งได้ 2 แบบ คือ

1. ทดสอบแบบแห้ง (unsoaked sample test) คือ การที่ทดสอบตัวอย่างดินที่บดอัดไว้แล้วทันที
2. ทดสอบแบบเปียก (soaked sample test) คือ การที่ทดสอบตัวอย่างดินที่บดอัดแล้วและผ่านการแช่น้ำไม่ต่ำกว่า 96 ชม. (4 วัน) หรือจนกว่าดินจะหยุดการบวมตัว (swelling) โดยดินที่มีค่าบวมตัวสูงไม่เหมาะกับการทำถนน

ตารางที่ 2.7 ค่าหน่วยแรงมาตรฐาน (Standard Unit Stress) ที่ความลึกในการกด (Penetration) ต่าง ๆ

Penetration		Standard Unit Stress	
mm.	in.	MPa	psi
2.5	0.10	6.9	1000
5	0.20	10.3	1500
7.5	0.30	13.0	1900
10.0	0.40	16.0	2300
12.7	0.50	18.0	2600

$$CBR = \frac{\text{test unit stress}}{\text{standard unit stress}} \times 100 \% \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปแล้วจะใช้ค่า CBR ที่ความลึกการกดที่ 0.1 นิ้ว แต่ถ้าค่า CBR ที่ความลึก 0.2 นิ้วมีค่ามากกว่าที่ 0.1 นิ้ว จะต้องทำการทดสอบใหม่ (ปกติค่า CBR ที่ 0.1 นิ้วมีค่ามากกว่า CBR ที่ 0.2 นิ้ว) และหากทดสอบอีกครั้งแล้วยังได้ผลเหมือนเดิมก็ให้ใช้ค่าที่ 0.2 นิ้วได้ เมื่อได้คุณสมบัติ CBR ของดินแล้วสามารถกำหนดคุณสมบัติของดินว่าเหมาะที่จะนำไปใช้ในงานถนนหรือไม่และเหมาะที่จะใช้เป็นวัสดุในชั้นใดของงานทางดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ค่า CBR ที่เหมาะต่อชั้นทางต่าง ๆ

CBR No.	General rating	User	Classification system	
			Unified	ASSHTO
0-3	Very Poor	Subgrade	OH, CH, MH, OL	A5, A6, A7
3-7	Poor to fair	Subgrade	OH, CH, MH, OL	A4, A5, A6, A7
7-20	Fair	Subbase	OL, CL, ML, SC, SM, SP	A2, A4, A6, A7
20-50	Good	Base of Subbase	GM, GC, SW, SM, SP, GP	A1b, A2-5, A3, A2-6
>50	Excellent	Subgrade	GW, GM	A1a, A2-4, A3

การทดสอบ CBR เมื่อนำมาเขียนกราฟระหว่างค่าหน่วยแรงกับค่ายุบตัว กราฟที่ได้มีลักษณะโค้งที่มีส่วนของเส้นตรงผ่านจุดกำเนิด หากในกรณีที่มีส่วนของเส้นตรงไม่ได้ผ่านจุดกำเนิด จะต้องทำการปรับแก้ (correct) โดยลาดเส้นให้สัมผัสกับส่วนของเส้นตรงมากที่สุดมาตัดกับแนวแกนนอน โดยเรียกจุดดังกล่าวว่า 'จุดเริ่มใหม่' (new origin) จากนั้นค่ายุบตัวที่ 0.1 และ 0.2 นิ้ว จะต้องเริ่มวัดจากจุดเริ่มต้นใหม่ดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2.24 (ดูเส้นกราฟ B) ในส่วนของสาเหตุที่ส่วนของเส้นตรงไม่ผ่านจุดกำเนิดนั้นอาจเกิดจากผิวหน้าของดินบดอัดถูกรบกวน หรือได้รับการบดอัดที่ไม่ดี และอาจมีสาเหตุจากแท่งเหล็กกดตะขั่วตัวอย่างได้ไม่มั่นคงก่อนทำการทดสอบ โดยเส้นกราฟ A แสดงถึงกรณีที่มีส่วนของเส้นตรงผ่านจุดกำเนิดพอดี

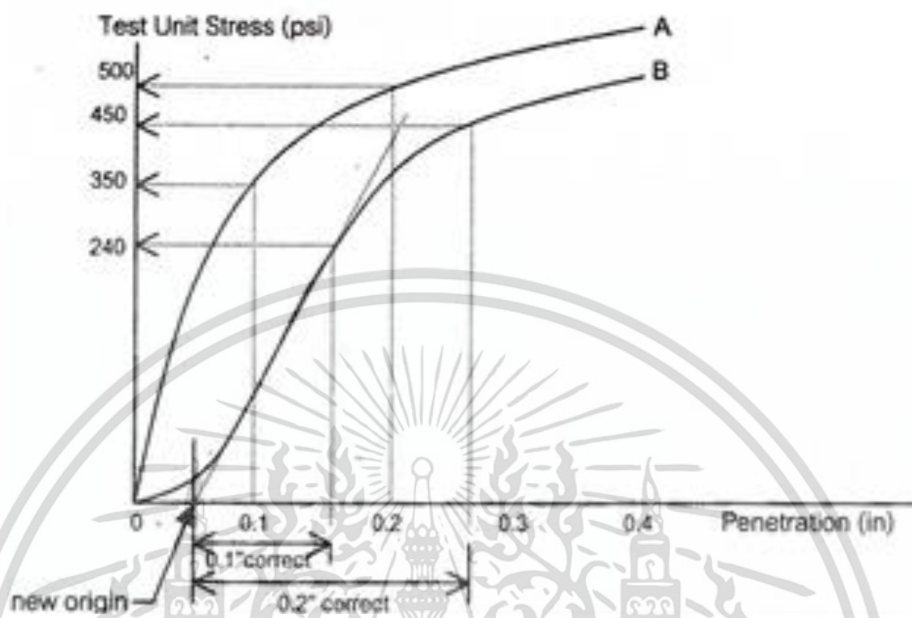
จากรูปที่ 2.24 มีตัวอย่างการคำนวณหาค่า CBR ของตัวอย่างดิน A ได้ดังนี้

$$\text{ค่า CBR (กราฟ A) ที่การยุบตัว 0.1 นิ้ว} = \frac{350}{1000} \times 100 = 35 \%$$

$$\text{ค่า CBR (กราฟ A) ที่การยุบตัว 0.2 นิ้ว} = \frac{500}{1500} \times 100 = 33 \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เห็นได้ว่าค่า CBR ที่ 0.1 นิ้ว มากกว่าค่า CBR ที่ 0.2 นิ้ว ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทำการทดสอบใหม่ซ้ำ และสรุปได้ว่าค่า CBR ของดินตัวอย่าง A = 35 %



รูปที่ 2.24 แสดงการปรับแก้โค้งการทดสอบ CBR (ชลธิ เร็บ้านเกาะ, 2554)

อีกพฤติกรรมหนึ่งที่น่าสนใจคือ ค่า CBR ที่ได้จากการทดสอบจะมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นแห้งและปริมาณความชื้นในดิน โดย CBR จะมีค่าสูงสุดทางด้านแห้งของ OMC (dry side of optimum) และจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น และลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเข้าสู่ด้านเปียกของ OMC (wet side of optimum)

2.6 คุณสมบัติเชิงกลและวิธีการทดสอบของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน

2.6.1 Wide-Width Tensile Strength

wide-width tensile strength เป็นวิธีการวัด tensile strength ในสเกลใหญ่ของตาข่ายเสริมกำลังดิน (geogrid) สามารถวัดในแนว machine direction สำหรับ uniaxial geogrid และวัดได้ทั้งในแนว machine และ cross machine direction สำหรับ biaxial geogrid สำหรับ geogrid มีสองวิธีในการทดสอบ wide-width tensile strength คือ (1) ASTM D4595 หรือเรียกว่า wide-width strip method เป็นหนึ่งในวิธีที่ทดสอบกับ geotextile และได้มาปรับใช้ใน geogrid สิ่งที่ได้กำหนดไว้สำหรับการทดสอบนี้คือค่าความกว้างของตัวอย่าง ความสูง ระบบการจับ อัตราการดึง และวิธีการวัดระยะเคลื่อนตัว ถ้าหากการทดสอบนี้ได้รับการยอมรับแล้ว อีกทางเลือกหนึ่งเราสามารถใช

(2) ISO 10319 ในการทดสอบได้ อย่างไรก็ตามก็ตีข้อมูลที่ได้รับจากการทดสอบ wide-width tensile

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

strength มีหลายค่า เช่น กำลังรับแรงดึงที่จุดวิบัติ (kN/m) ระยะการยืดตัวที่จุดวิบัติ (%) กำลังรับแรงดึงที่ระยะยืดต่าง ๆ (เช่น stress at 5% หรือ stress at 10% (kN/m)) และโมดูลัสแรงดึงที่ได้รับจากช่วงแรกของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง strength และ elongation ของ geogrid

การคำนวณค่า wide-width tensile strength (T) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.6 ตามมาตรฐาน ASTM D4595 โดยตัดตัวอย่างเป็น 200 x 200 mm และเมื่อทดสอบนั้น ค่าความกว้าง (width) จะถูกกำหนดเป็น 0.2 m และค่าความยาว (length) จะถูกกำหนดเป็น 0.1 m เนื่องจากถูกเครื่องหนีบจับไป 0.1 m

$$T = \frac{F}{\text{width of sample} = 200 \text{ mm (or 0.2 m)}} \quad \text{kN/m} \quad (2.6)$$

2.6.2 Axial Stiffness (EA) of Geogrid

ตาข่ายเสริมกำลังดิน (geogrid) เป็นวัสดุที่มีลักษณะแบน (slender) และมีคุณสมบัติความแข็งในแนวแกน (axial stiffness) แต่ไม่มีคุณสมบัติความแข็งในการดัด (bending stiffness) อีกทั้ง geogrid สามารถรับแรงดึงได้เพียงอย่างเดียว ไม่สามารถรับแรงอัดได้ โดยทั่วไปแล้วใช้ในงานเสริมกำลังดินในรูปแบบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 การใช้งาน geogrid ในรูปแบบต่าง ๆ

(PLAXIS 2D-reference manual last updated: September 01, 2020. p.112)

สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองในโปรแกรม PLAXIS 2D นั้น ในส่วนของเรขาคณิตของโมเดล geogrid ปรากฏในสัญลักษณ์ที่เป็น ‘เส้นสีเหลืองสว่าง (light yellow lines)’ โดยมีคุณสมบัติที่ต้องระบุให้กับมันเพียงแค่คุณสมบัติเดียวเท่านั้น คือ elastic normal stiffness หรือ axial stiffness (EA) ซึ่งสามารถหาได้จากข้อมูลกราฟพล็อตกราฟระหว่าง tensile strength และ strain

ใน PLAXIS 2D นั้น การจำลองของ geogrid ใช้โมเดลแบบ elastic เท่านั้น ดังนั้นเราจึงมองอย่างง่ายว่า RSS เป็นวัสดุ elastic material ในส่วนของความสม่ำเสมอของวัสดุเพื่อให้ง่ายก็การคำนวณ จึงจำลอง RSS เป็นแบบ Isotropic ที่มีค่า axial stiffness (EA) เท่ากันทั้งสองทิศทาง (in plane and out of plane) โดยปกติแล้วค่า axial stiffness (EA) ของวัสดุจะได้รับจากโรงงานผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่กำหนดมาให้ มีหน่วยเป็น kN/m แต่ในกรณีที่เป็นวัสดุประยุกต์ มีสูตรการคำนวณดังสมการที่ 2.7 (PLAXIS 2D-reference manual last updated: September 01, 2020, p.280)

$$EA = \frac{T}{\Delta l/l} \quad \text{kN/m} \quad (2.7)$$

โดยที่

T = wide-width tensile strength or axial forced (force per unit width) (kN/m)

$\Delta l/l$ = strain (แปลงเปอร์เซ็นต์เป็นรูปทศนิยม)

Δl = the elongation or stroke (mm)

l = original length (mm)

ตัวอย่างการคำนวณ EA จากงานวิจัย Stability Analyses of Embankment with Limited Life Woven Geosynthetics (LLGs) Reinforced On Soft Clay (Artidteang et al. 2012) โดยในงานวิจัยดังกล่าวได้ระบุถึงคุณสมบัติของ Kenaf LLGs ที่ผ่านการทดสอบในห้องปฏิบัติการมาแล้ว โดยมีกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง tensile strength กับ strain ดังรูปที่ 2.26 และคุณสมบัติอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.9 ซึ่งวัสดุดังกล่าวมีค่า axial stiffness (EA) เท่ากับ 400 kN/m และมีวิธีคำนวณเบื้องต้นดังนี้

ตัวอย่างวิธีการคำนวณ

EA หรือ axial stiffness ที่ 9% strain (20 kN/m)

จากตารางมีค่า T = 20.00 kN/m และมีค่า strain เมื่อปรับแก้แล้วเท่ากับ 5% หรือ $\Delta l/l = 0.05$

$$EA = \frac{T}{\frac{\Delta l/l}{20}}$$

$$EA = \frac{20}{0.05} = 400 \text{ kN/m}$$

EA หรือ axial stiffness ที่ ultimate tensile strength (27.5 kN/m) ที่ 11% strain

จากตารางมีค่า T = 27.50 kN/m และมีค่า strain เมื่อปรับแก้แล้วเท่ากับ 7% หรือ $\Delta l/l = 0.07$

$$EA = \frac{T}{\frac{\Delta l/l}{27.50}}$$

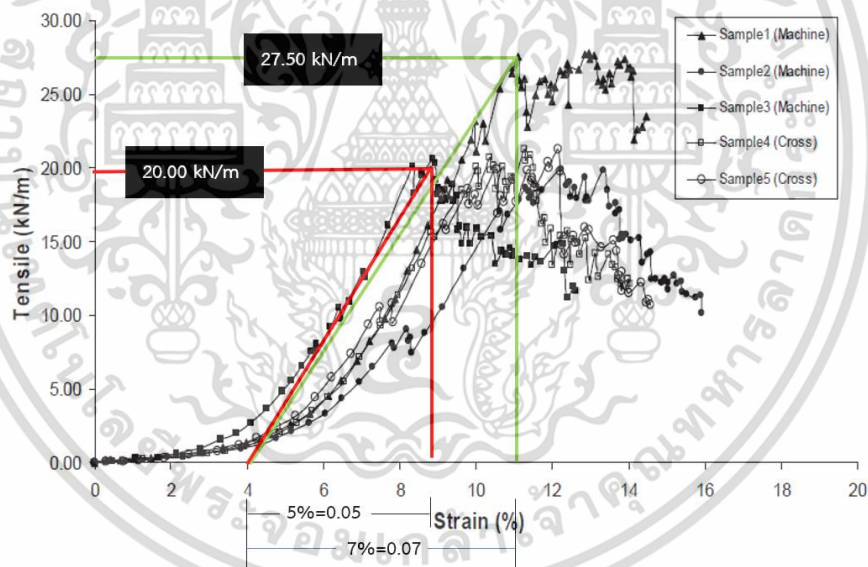
$$EA = \frac{27.50}{0.07} = 392.86 \text{ kN/m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้ไม่ได้ระบุว่าคิด axial stiffness (EA) ที่เปอร์เซ็นต์ strain เท่าไหร่ แต่ค่าโดยประมาณอยู่ประมาณ 400 kN/m

ตารางที่ 2.9 คุณสมบัติของ Kenaf LLGs. (Artidteang et al. 2012)

Properties of Kenaf LLGs	Values
Mass per unit area (g/m ²)	1157
Thickness (mm)	5.27
Tensile strength (kN/m)	20
Elongation (%)	15
Toughness (kN/m)	1.5
Axial stiffness (kN/m)	400



รูปที่ 2.26 tensile strength of kenaf LLGs (Artidteang et al. 2012)

2.7 ตำแหน่งการเสริมกำลังและตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

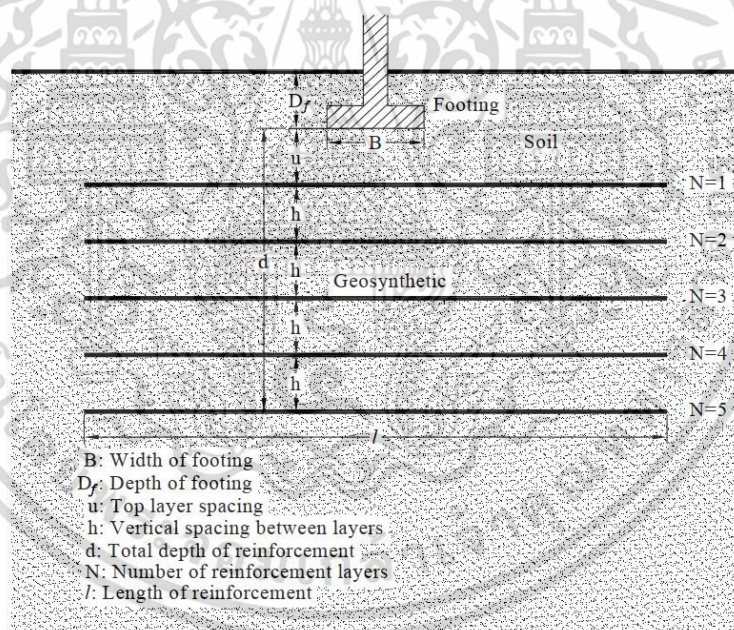
2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งการเสริมกำลัง

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งการเสริมกำลังนั้นมีหลายตัวแปรด้วยกัน และมีหลากหลายรูปแบบในการกำหนดสัญลักษณ์ซึ่งไม่มีรูปแบบตายตัว ขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนั้น ๆ สำหรับตัวอย่างที่เกี่ยวข้องนั้นมีหลากหลาย เช่น ในงานวิจัยที่ชื่อว่า An Experimental Study on Characteristics and Behavior of Reinforced Soil Foundation (Chen. 2007) และงานวิจัยที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อว่า Investigating the Effect of Geogrid on Stabilization of High Railway Embankments. (Esmaeili et al. 2018) เป็นต้น

An Experimental Study on Characteristics and Behavior of Reinforced Soil Foundation

งานวิจัยของ Chen (2007) ได้กล่าวถึงการเสริมกำลังใต้ฐานราก หรือ reinforced soil foundations (RSF) ซึ่งตลอดระยะเวลาสามสิบปีที่ผ่านมาได้มีการวิจัยอย่างแพร่หลาย ทุกงานวิจัยล้วนระบุว่าชั้นเสริมกำลัง geosynthetics สามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักแบกทาน (bearing capacity) ได้ และลดการทรุดตัวของดินฐานรากได้ โดยมีตัวแปรที่นักวิจัยได้กำหนดไว้ดังนี้ (1) top layer spacing (u), (2) number of layers (N), (3) total depth of reinforcement (d), (4) vertical spacing between reinforcement (h), (5) length of reinforcement (l), (6) type and stiffness of reinforcement, (7) soil type, (8) embedment depth of footing (D_f), and (9) shape of footing ดังแสดงในรูปที่ 2.27

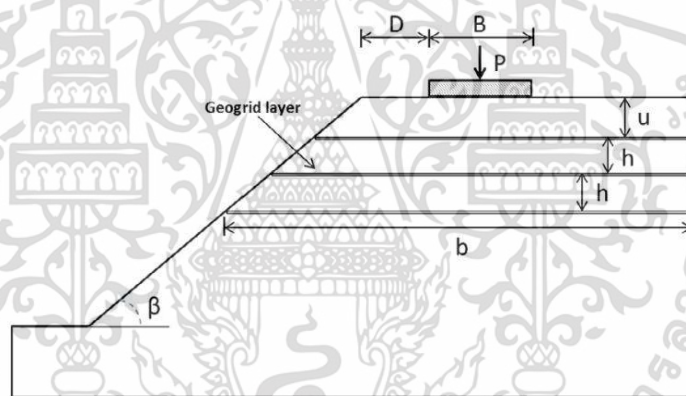


รูปที่ 2.27 geosynthetic reinforced soil foundation parameters (Chen. 2007)

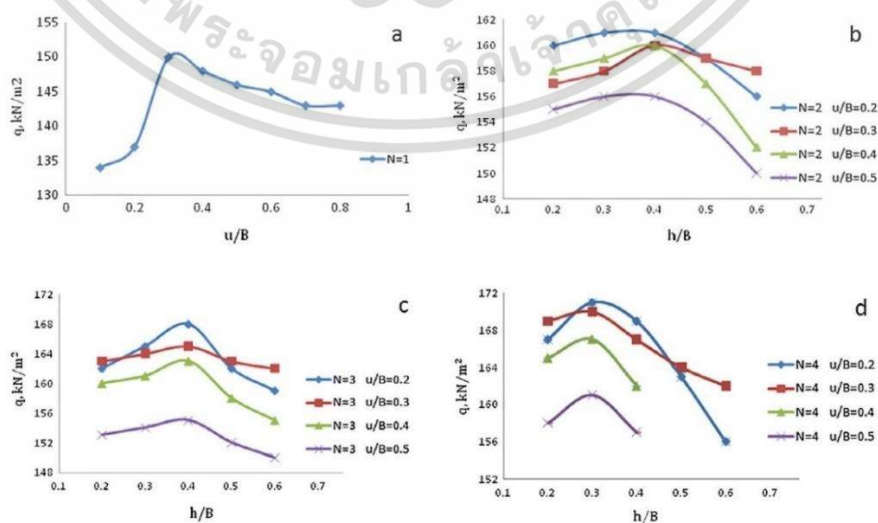
Investigating the Effect of Geogrid on Stabilization of High Railway Embankments

ในขณะที่งานวิจัยของ Esmaeili et al. (2018) ก็ได้มีกำหนดตัวแปรเช่นกัน แต่มีความแตกต่างทั้งลักษณะการเสริมกำลังและความแตกต่างในการกำหนดสัญลักษณ์ด้วยในบางส่วน งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของ geogrid ต่อการควบคุมเสถียรภาพและการทรุดตัวของคันดินถนนทางรถไฟ โดยอธิบายผ่านการทดลองในห้องปฏิบัติการและการจำลองในไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) ด้วย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PLAXIS 2D แบบจำลองแบบ full scale มีขนาดดังนี้ คือ embankment height (H)=10 m, embankment crest width (B)=4.80 m โดยทำการศึกษาแบบจำลองคันดินถมทั้งหมดห้าแบบจำลอง (fifth series) ศึกษาในมาตราส่วน 1:20 จะได้ความสูงของคันดินถมในการทดลอง 50 cm (ย่อส่วนจาก $H=10\text{m}$ ด้วยอัตราส่วน 1:20) หลังจากนั้นทำการให้นำหนักลงบนยอดคันดิน (uniformly load on the crest) โดยใช้ loading chamber ขนาด $240 \times 235 \times 220$ cm ในแบบจำลองที่หนึ่งจำลองคันดินถมที่ไม่ได้เสริมแรงด้วย geogrid ส่วนแบบจำลองที่สองถึงแบบจำลองที่ห้ามีการเสริมกำลังด้วย geogrid ตั้งแต่ 1 - 4 ชั้น (layers) ตามลำดับ โดยก่อนที่จะทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ จะทำการหาตำแหน่งของ geogrid ที่เหมาะสมต่อการเสริมกำลังด้วยโปรแกรม PLAXIS V.8.2 ก่อน เป็นการศึกษาเบื้องต้น ซึ่งมีการกำหนดตัวแปรตำแหน่งการเสริมกำลังไว้ดังรูปที่ 2.28 และตัวแปรที่กำหนดไว้มีดังนี้ (1) ระยะจากยอดคันดินที่ให้น้ำหนักถึงชั้นเสริมกำลังชั้นแรก (u), (2) ระยะห่างระหว่างชั้นเสริมกำลัง (h), (3) จำนวนชั้นการเสริมกำลัง (N), และ (4) ค่าความกว้างของพื้นที่ให้น้ำหนัก (B)



รูปที่ 2.28 การเสริมกำลังด้วย geogrid แบบ one way slope (Esmaeili et al. 2018)



รูปที่ 2.29 ผลจากการทดลองเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมของชั้น geogrid เบื้องต้น (Esmaeili et al. 2018)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.29 แสดงให้เห็นถึงผลจากการทดลองเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมของชั้น geogrid เบื้องต้น รูปที่ 2.29 (a) แสดงถึงค่าการรับน้ำหนักสูงสุดของคันดินถมที่เสริมกำลัง 1 ชั้นด้วย geogrid ศึกษาโดยการเปลี่ยนค่า u/B เช่นเดียวกันกับในกรณีเสริมกำลังตั้งแต่ 2 – 4 ชั้น ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนค่า u/B และ h/B เพื่อหาตำแหน่งเสริมกำลังชั้นแรกที่เหมาะสมและหาตำแหน่งเสริมกำลังชั้นถัดมา เมื่อเทียบกับชั้นแรกตามลำดับ จากการทดลอง รูปที่ 2.29 (a) ถึง (d) แสดงให้เห็นว่าชั้นการเสริมกำลังที่ให้ประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับทุกกรณีคือมีค่า u/B เท่ากับ 0.3 และ h/B เท่ากับ 0.4 และเสริมกำลังหยุดที่ N เท่ากับ 4 ชั้น เนื่องจากแนวโน้มการเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มจำนวนชั้นมากกว่านี้จะส่งผลน้อยมากต่อกำลังรับน้ำหนักแบกทานที่เพิ่มขึ้นและการทรุดตัวที่ลดลง

จากการศึกษาพบว่าคันดินถมที่มีการเสริมกำลังด้วย geogrid 1 ชั้น สามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักแบกทาน (bearing capacity) ได้ 7.14 % และลดการทรุดตัว (settlement) ได้ 11.24 % เมื่อเทียบกับคันดินถมที่ไม่ได้เสริมกำลัง สำหรับคันดินถมที่มีการเสริมกำลังด้วย geogrid ตั้งแต่ 2 – 4 ชั้น สามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักแบกทานและลดการทรุดตัวได้ (19, 36.14), (26.3, 52.8) และ (28.9, 53.42) % ตามลำดับ และจากการทดลองในห้องปฏิบัติการสรุปได้ว่าการเสริมกำลังด้วยจำนวนชั้น 3 ชั้น ให้ค่า bearing capacity สูงที่สุด และที่การเสริมกำลัง 4 ชั้นไม่ส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนักอย่างมีนัยสำคัญ

จากนั้นทำการตรวจสอบข้อมูลการทดลองด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D โดยทำการจำลองคันดินถมที่มีความสูง 5, 10, 15 และ 20 m ภายใต้รูปแบบการให้น้ำหนัก LM71 loading pattern (Eurocode, 2003) พร้อมทั้งศึกษาผลของพารามิเตอร์สำคัญ ได้แก่ จำนวนชั้นการเสริมกำลังด้วย geogrid คุณสมบัติของดิน ขนาดของคันดินถม interface coefficient ระหว่างดินกับ geogrid และกำลังรับแรงดึงของ geogrid (tensile strength of geogrid) ที่มีผลต่อกำลังรับน้ำหนักแบกทานและระยะการทรุดตัวของคันดินถม เป็นต้น

จากการศึกษาด้วยวิธี numerical พบว่าให้ผลสอดคล้องกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ คือ ยืนยันว่าการเพิ่มจำนวนชั้นของ geogrid เสริมกำลังจะเพิ่มกำลังรับน้ำหนักแบกทานและลดการทรุดตัวของคันดินถมอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตามการเพิ่มจำนวนชั้นของ geogrid มากขึ้นไป จะส่งผลน้อยลงเรื่อย ๆ เช่นกัน ยิ่งไปกว่านั้นผลจากแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) ได้แสดงอีกว่า geogrid ที่มีกำลังรับแรงดึงสูง สามารถลดระยะการทรุดตัวของคันดินถมได้ดีในกรณีที่ดินมีคุณสมบัติแบบ poor soil และยังแสดงให้เห็นถึงการส่งผลที่เล็กน้อยของ geogrid-soil interface coefficient ต่อการทรุดตัวและอัตราส่วนความปลอดภัยของการลื่นไถล (sliding safety factor)

2.7.2 จำนวนชั้นและตำแหน่งการเสริมกำลังที่เหมาะสมของ Esmaili et al. (2018)

ผลการทดลองของ Esmaili et al. (2018) ที่ได้กล่าวถึงตำแหน่งการเสริมกำลังที่เหมาะสมในคันดินถมทางรถไฟ (high railway embankments) ที่มีความสูง หรือ embankment height (H)=10 m และมีความกว้างของยอดคันดิน หรือ embankment crest width (B)=4.80 m หากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์แล้วจะสรุปได้ว่าการเสริมกำลังด้วยจำนวนชั้น 3 ชั้น ($N=3$) ให้ค่า bearing capacity สูงที่สุด ด้วยตำแหน่งการเสริมกำลังที่ให้ประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับทุกกรณีคือมีค่า u/B เท่ากับ 0.3 และ h/B เท่ากับ 0.4

เมื่อคำนวณระยะจากยอดคันดินที่ให้น้ำหนักถึงชั้นเสริมกำลังชั้นแรก (u) และระยะห่างระหว่างชั้นเสริมกำลัง (h) ที่ตำแหน่งการเสริมกำลังที่เหมาะสม ($u/B=0.3$ และ $h/B=0.4$) โดย $B=4.80$ จะได้

$$u=0.3 \times 4.80 \text{ หรือ } u=1.44 \text{ m และ}$$

$$h=0.4 \times 4.80 \text{ หรือ } h=1.92 \text{ m}$$

ยิ่งไปกว่านั้นหากนำคันดินดังกล่าวที่มีค่า $H=10$ m และ $B=4.8$ m ที่เสริมกำลัง ณ ตำแหน่งการเสริมกำลัง $u=1.44$ m และ $h=1.92$ m ด้วยจำนวนชั้น $N=3$ ซึ่งเป็นจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด (ในงานวิจัยดังกล่าว) นำมาคำนวณโดยใช้แนวคิดอัตราส่วนต่อความสูงของ u/H และ $h(N-1)/H$ (ดูเพิ่มเติมบทที่ 3.3.6.2) จะได้

$$u/H=1.44/10 \text{ หรือ } u/H=0.144$$

$$h(N-1)/H=1.92(3-1)/10 \text{ หรือ } h(N-1)/H=0.384$$

จึงสรุปได้ว่าการเสริมกำลังด้วย $N=3$ ที่ $u/H=0.144$ (ประมาณ 0.1) และ $h(N-1)/H=0.384$ (ประมาณ 0.4) เป็นจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้เมื่อวิเคราะห์ด้วยแนวคิดอัตราส่วนต่อความสูง

2.8 งานวิจัยที่สนับสนุนการเสริมกำลังในดินอ่อนมีผลมากกว่าการเสริมกำลังในดินแข็ง

การทดสอบในหนังสือ Designing with Geosynthetics

การทดสอบนี้เสนอโดย Koerner (1997) ซึ่งเป็นการนำ geotextile ไปเสริมกำลังดิน kaolinite clay ที่สภาวะความชื้น (water content) ต่างกัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าในดินเดียวกันที่มีค่าความชื้นที่มากกว่า (หมายถึงดินนั้นอ่อนกว่า) จะมีค่าอัตราส่วนของค่า CBR ในกรณีเสริมกำลังหารด้วยค่า CBR ของดินในกรณีไม่เสริมกำลังนั้นมากกว่า กล่าวคือ ดินอ่อนมีความอ่อนไหวต่อการเสริมกำลังด้วย geotextile มากกว่าดินแข็ง

งานวิจัย Behavior of Subgrade Soil Reinforced with Geogrid

งานวิจัยนี้ถูกเสนอโดย Ahmed Kamel et al. (2004) มีวัตถุประสงค์หลักคือ การศึกษาผลการเสริมกำลังใน subgrade soil ทั้งหมด 3 ชนิด (soil A, soil B, และ soil C) ด้วย geogrid ที่แตกต่างกัน 2 ชนิด (grid-1, grid-2) ซึ่งเป็นการเสริมกำลังเพียง 1 ชั้น และศึกษาผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งการเสริมกำลังด้วย โดยใช้การทดสอบ CBR และ static triaxial and เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

unconfined compression test จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังด้วย geogrid 1 ชั้น คือ 72% และ 76% จากผิวบนของตัวอย่าง และพบว่าดิน soil B และ soil C ซึ่งเป็นดินที่อ่อนกว่า มีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของ CBR เมื่อเทียบกับกรณี no grid หรือกรณีไม่เสริมกำลังมากกว่าดิน soil A ซึ่งเป็นดินที่แข็งที่สุดในการศึกษานี้ (ค่า MDD มากที่สุด และ OMC น้อยที่สุด)

งานวิจัย Laboratory Investigations of Reinforced Sub Grade Soils

งานวิจัยนี้ถูกเสนอโดย Nagrale et al. (2010) การศึกษานี้เป็นการศึกษาถนน flexible pavement ใน India ซึ่งส่วนใหญ่สร้างอยู่บนชั้นดินอ่อนที่มีค่า CBR ต่ำ ซึ่งจะทำให้ความหนาของชั้นความหนาของถนนมากขึ้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากการเสริมกำลัง geogrid ในดินที่มีค่าคุณสมบัติ maximum dry density (MDD), optimum moisture content (OMC), California bearing ratio (CBR) and E- Value ต่างกัน

โดยในงานวิจัยมีดินสองชนิด คือ Soil-A และ Soil-B โดยมีค่า CBR value เท่ากับ 4.15 % และ 1.1 % ตามลำดับ เมื่อเสริมกำลังด้วย geogrid ที่ 80% ของความลึก (จากด้านบน) แล้ว พบว่ากำลังรับน้ำหนัก CBR เพิ่มขึ้นเป็น 6.83 % และ 2.52 % ตามลำดับ ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นเท่ากับ 65 % และ 129 % ตามลำดับเมื่อเทียบกับกรณีไม่เสริมกำลัง งานวิจัยนี้สรุปได้ว่าประสิทธิภาพการเสริมกำลังของ geogrid นั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของดินและตำแหน่งการเสริมกำลังของ geogrid โดยผลการทดสอบค่า modulus of elasticity (E) ของ soil A และ B ที่ confining pressure เท่ากับ 40 kPa พบว่า ในกรณีเสริมกำลังของดิน A มีค่าเท่ากับ 256 kg/cm² (กรณีไม่เสริมกำลังมีค่า 162.1 kg/cm²) และในกรณีเสริมกำลังของดิน B เท่ากับ 244 kg/cm² (กรณีไม่เสริมกำลังมีค่า 75.6 kg/cm²) ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการเสริมกำลังจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อเสริมกำลังในดินอ่อน กล่าวคือการเสริมกำลังในดินแข็งอาจจะเสริมกำลังได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

2.9 งานวิจัยกำลังรับแรงดึงของ Geogrid ในตลาด

ในส่วนนี้เป็นการนำเสนองานวิจัยเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของ geogrid คือ คุณสมบัติทางด้านการรับแรงดึง โดย Al-Omari, R.R. and Fekheraldin, M.K. (2012) ได้ทำการศึกษาและนำเสนอในงานวิจัยที่ชื่อว่า Measurement of Tensile Properties of Geogrids ซึ่งได้ระบุว่า geogrid บางประเภทในตลาดไม่ได้รับการระบุคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงดึง (tensile properties) ให้แก่ผลิตภัณฑ์ของเขา งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการทดสอบ geogrid ในตลาดหลากหลายรูปแบบทั้งหมด 7 ประเภท ที่ผลิตในประเทศ อิรัก, อิหร่าน, จีน, และอังกฤษ โดยทำการศึกษาคูณสมบัติดังนี้ คือ peak tensile strength, modulus of elasticity, upper yield strength, lower yield strength, tensile strength, non-proportional extension strength, total extension strength, fracture elongation, elongation at maximum load, และ total elongation และรวมไปถึงคุณสมบัติเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางด้านกายภาพของ geogrid ด้วย เช่น aperture size, mass per unit area, rib thickness, rib width, junction thickness, roll width, mesh type, standard color, และ polymer type

สำหรับส่วนสนับสนุนงานวิจัยนี้นั้นสนใจเฉพาะ peak tensile strength เป็นหลัก ซึ่งมีหน่วย กิโลนิวตันต่อเมตร (kN/m) เป็นหน่วยเดียวกันที่ใช้ใน wide-width tensile strength (ของ wide-width strip test) ซึ่งมีหน่วย kN/m เช่นกัน ผลการทดลองจากงานวิจัยดังกล่าวระบุไว้อย่างชัดเจนว่าค่า peak tensile strength ของ geogrid ทั้ง 7 ชนิด มีค่าหลากหลายตั้งแต่ 0.25 – 14.4 kN/m (MD) โดย PMP SQ15 เป็นชนิดที่มีกำลังรับแรงดึงน้อยที่สุด (เท่ากับ 0.25 kN/m) และ Tensar SS2 (เท่ากับ 14.4 kN/m) มีค่ากำลังรับแรงดึงมากที่สุดในงานวิจัยนี้ (ดูตารางที่ 2.10)

จากงานวิจัยดังกล่าวสามารถสนับสนุนงานวิจัยนี้ได้ คือ RSS มีกำลังเทียบเท่ากับ geogrid บางประเภทในตลาดเช่นกัน โดยในกรณีของ RSS-SS (RSS เยื่อไนเซอแลนเดี่ยว) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.42 kN/m ถึง 0.65 kN/m และในกรณีของ RSS-DS (RSS เยื่อไนเซอแลนสองแผ่น) มีค่าอยู่ระหว่าง 1.06 kN/m ถึง 1.31 kN/m ซึ่งรายละเอียดของกำลังรับแรงดึงของ RSS ได้ถูกระบุในบทที่ 3.2.2 (ดูตารางที่ 3.3)

ตารางที่ 2.10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของ geogrid ในตลาด 7 ประเภท (Al-Omari, R.R. and Fekheraldin, M.K. 2012)

Geogrid type	Peak tensile Strength MD/XMD (kN/m)	Modulus of elasticity MD/XMD (GPa)	Rib Thickness MD/XMD (mm)	Mass per unit area (g/m ²)	Rib width Lw/tw (mm)
Netlon CE121	6.4	0.39	1.6/1.45	740	2/2.75
Tensar SS2	14.4/28.2	0.57/0.99	1.2/1.1	300	3/3
Iraqi geogrid	1.6	0.083	1.4/2.25	255	1.6/2
China geogrid	1.1	0.03	1.2/1.1	283	1.4/1.25
PMP SQ12	0.25	0.28	1.7	318	1.3/1.6
PMP SQ15	2.41	0.12/0.54	2	385	2.5/2.2
CE131	1.92	0.32	2.8	429	3.1/3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 การออกแบบและใช้งาน Geogrid ในงานก่อสร้างถนน

โดยปกติแล้ว geogrid มีการใช้งานหลากหลายในการเสริมกำลังถนน ไม่ว่าจะเป็นถนนแบบไม่ปูผิว (unpaved road) หรือถนนปูผิว (paved road) ก็ตาม โดยการเสริมกำลังขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ออกแบบ ไม่ได้มีการเจาะจงชั้นใดชั้นหนึ่ง ขึ้นอยู่กับความสามารถของวัสดุเสริมกำลังและกำลังรับน้ำหนักของดินเดิม ซึ่งมีวิธีการออกแบบการเสริมกำลังด้วย geogrid ที่ได้รับการศึกษาแล้วมากมาย ตัวอย่างเช่น การออกแบบการเสริมกำลังถนน unpaved road ด้วย geogrid ระหว่างชั้นดินเดิม (subgrade) และคันดินพื้นทาง (ดินลูกรัง) (Giroud et al. 1984), การออกแบบการเสริมกำลังถนนลาดยางด้วย geogrid ในชั้นพื้นทางหินคลุก (paved roads-base courses) (Haas. 1984; Abd El Halim et al. 1983; Carroll et al. 1987), การออกแบบการเสริมกำลังถนนลาดยางด้วย geogrid ในชั้นผิวทาง (paved roads-pavements) (Brown et al. 1984; Kennepohl and Kamel. 1984; Molenaar and Nods. 1996) เป็นต้น โดยมีรายละเอียดบางส่วนดังต่อไปนี้

2.10.1 Unpaved Roads: การเสริมกำลัง Geogrid ในถนนไม่ปูผิว

การใช้ geogrid เพื่อเสริมกำลังดินอ่อนและ/หรือดินอัดในงานถนนไม่ปูผิว (unpaved aggregate roads) นั้นเป็นฟังก์ชันการใช้งานหลัก มีการรายงานความสำเร็จมากมายพร้อมกับความพยายามหลายครั้งในวิธีการออกแบบ ซึ่งวิธีการออกแบบแบบ analytical method ที่ได้ถูกใช้งานและมีความซับซ้อน (advanced) สูงสุดก็คือวิธีของ Giroud et al. (1984) วิธีดังกล่าวนี้มีความคล้ายกับที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 6.1 ซึ่งสถานการณ์แบบ nonreinforced จะถูกพิจารณาก่อน หลังจากนั้นแนวคิดใหม่หรือแนวคิดแบบ reinforced case ก็ได้รับการพัฒนาขึ้น จากการศึกษาการเสริมกำลังของ geogrid พบว่าการเสริมกำลังนั้นส่งผลให้ (1) increase soil strength, (2) enhanced load spreading, และ (3) membrane support via controlled rutting และเมื่อเสริมกำลังแล้วจะสามารถลดความหนาของถนนหรือความหนาของชั้นดินได้ จึงเกิดความแตกต่างของความหนาของชั้นดินที่ต้องการ (difference in required thickness) เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างแล้ว ถ้ากรณีเสริมกำลังทำให้ค่าก่อสร้างถูกกว่าก็แนะนำให้ใช้ (ปกติใช้กับกรณีที่ดินเป็น soft soil subgrade)

สำหรับการคำนวณในกรณี nonreinforced จะดัดแปลงใช้สมการของ U.S. Army Corps of Engineers Unpaved Road ซึ่งพิจารณาถึงจำนวนครั้งที่ยานพาหนะผ่าน (number of vehicle passages) ส่วนกรณี geogrid reinforced คำนวณโดยใช้แนวคิดใหม่ ซึ่งได้พิจารณารวมถึงกลไกการเสริมกำลังที่ได้กล่าวถึงแล้วข้างต้น เมื่อพิจารณาแล้วทำให้เกิดผลดังนี้

1. An increase in soil subgrade strength

เพิ่มการรับกำลังของดินเดิม: จากกรณีไม่เสริมกำลังไปสู่กรณีเสริมกำลัง ส่งผลให้เปรียบเทียบสมการต่อไปนี้ได้ (สมการที่ 2.8 และ 2.9)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_e = \pi C_{uN} + \gamma h_0 \quad (2.8)$$

$$P_{lim} = (\pi+2) C_{uN} + \gamma h \quad (2.9)$$

เมื่อ

P_e = bearing capacity pressure based on the elastic limit (nonreinforced case)

P_{lim} = bearing capacity pressure based on the plastic limit (reinforced case)

C_{uN} = undrained soil strength at the N^{th} vehicle passage

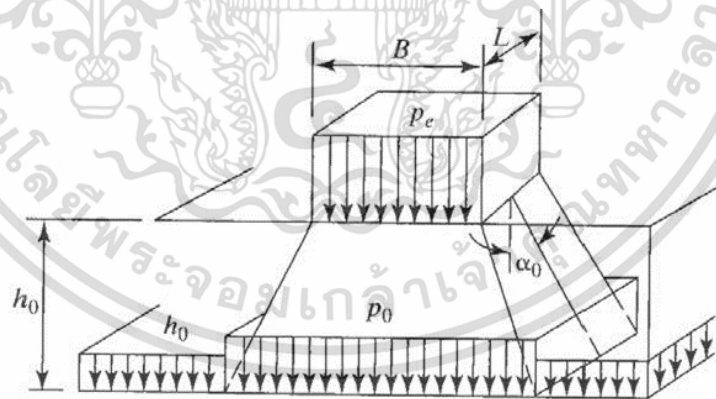
γ = unit weight of aggregate

h_0 = aggregate thickness without reinforcement

h = aggregate thickness with reinforcement

2. An improved load distribution

ปรับปรุงการกระจายของน้ำหนักให้ดีขึ้น: โดยทั่วไปแล้วการกระจายของน้ำหนักลงสู่ชั้น soil subgrade นั้น ถูกนิยามพื้นฐานให้มีการกระจายแบบ pyramidal geometric shape (รูปที่ 2.30) จากรูปที่ 2.30 แสดงถึงมุม α_0 สำหรับกรณีไม่เสริมกำลัง (nonreinforced case) เปรียบเทียบกับ โครงสร้างถนนเดิมแต่เสริมกำลัง (reinforced case) ซึ่งได้มุมใหม่เป็นมุมที่กว้างกว่า เรียกมุมนั้นว่า α อัตราส่วนระหว่างกรณีเสริมกำลังและไม่เสริมกำลังถูกแสดงเป็นอัตราส่วนของ $\tan \alpha / \tan \alpha_0$ ซึ่งมีค่าเกิน 1 อย่างแน่นอน



รูปที่ 2.30 แนวคิดการกระจายแรงแบบ pyramidal geometric shape (Koerner. 1997)

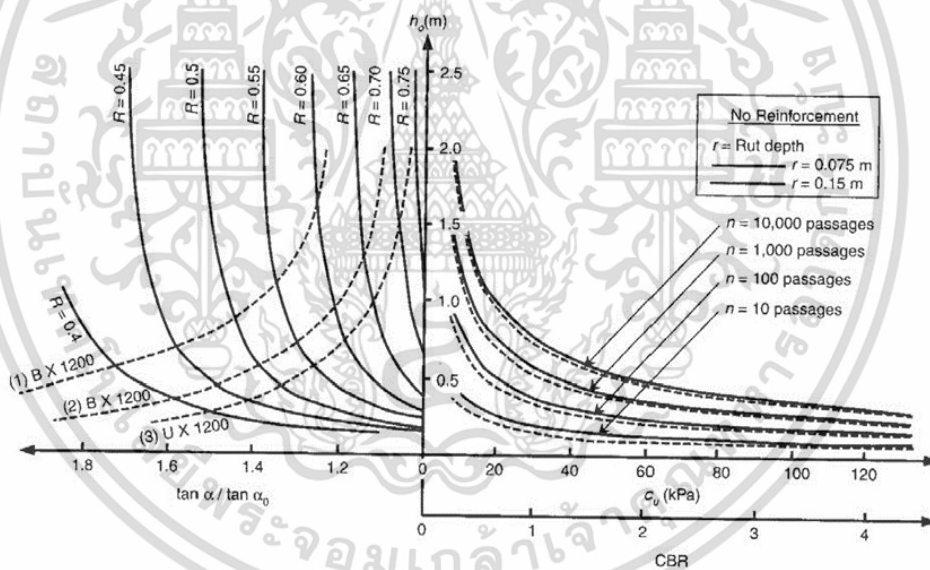
3. A tensioned membrane effect

ซึ่งเป็นฟังก์ชันการใช้งานที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกำลังรับ tensile modulus และ elongation ของ geogrid โดยส่งผลต่อการเสียรูปของชั้นดินเดิม เช่น rut depth เป็นต้น

ด้วยการรวมผลของกลไกการเสริมกำลังของ geogrid สองรายการแรกข้างต้น และ เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้รับการเสริมกำลัง Giroud et al. (1984) ได้พัฒนาแผนภูมิการออกแบบที่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงในรูปที่ 2.31 โดยที่ membrane effect ถูกละเอียดอย่างระมัดระวัง ทางด้านขวาของกราฟ แสดงถึงโหลดเพลามาตรฐานที่ 80 kN (standard axle load of 80 kN) และจำนวนยานพาหนะที่ผ่าน 10 ถึง 10,000 รอบ ซึ่งความหนาของชั้นดินที่ใช้ในการถมถนนในกรณีไม่เสริมแรง (h_0) ขึ้นอยู่กับค่าความแข็งแรงของชั้นดินเดิม (c_u , CBR) ด้วย สังเกตเห็นได้ว่า rut depth ไม่มีนัยสำคัญเท่าไร จากนั้นค่าทั้งหมดจะถูกขยายในแนวนอนไปทางด้านซ้ายของรูปภาพ โดยตัดกับค่าหนึ่งค่าต่อไปนี้:

- **Curve 1 สำหรับ BX 1200 geogrids** ด้วยกับการออกแบบให้สามารถรับจำนวนยานพาหนะที่ผ่านได้มาก ($N > 1000$) ในกรณีที่มีความเป็นไปได้ของการปนเปื้อนในเนื้อดินสูง โดยไม่มี geogrid
- **Curve 2 สำหรับ BX 1200 geogrids** ด้วยกับการออกแบบให้สามารถรับจำนวนยานพาหนะที่ผ่านได้น้อย ในกรณีที่มีความเป็นไปได้ของการปนเปื้อนในเนื้อดินต่ำ
- **Curve 3 สำหรับ UX 1200 geogrids** ด้วยกับการออกแบบให้สามารถรับจำนวนยานพาหนะที่ผ่านได้น้อย ในกรณีที่มีความเป็นไปได้ของการปนเปื้อนในเนื้อดินต่ำ



รูปที่ 2.31 แผนภูมิการออกแบบสำหรับ geogrid เสริมกำลัง (ด้านซ้าย) และกรณีไม่เสริมกำลัง (ด้านขวา) ของถนน unpaved road (Giroud et al. 1984)

เพื่อที่จะหาความหนาของดินถมกรณีเสริมกำลัง หรือ aggregate thickness using geogrid reinforced (h) ได้นั้น ให้ใช้ค่า R ที่ได้จากกราฟ คำนวณตามสมการต่อไปนี้ โดยที่ค่าความแตกต่างระหว่าง h_0 และ h เรียกว่าค่าที่ประหยัดได้ของวัสดุ หรือ Δh

$h = R h_0$ สำหรับค่า $r < 150$ mm และไม่มี channelized traffic pattern

$h = 0.9 R h_0$ สำหรับค่า $r \geq 150$ mm ด้วยกับ channelized traffic pattern

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง

ชั้นดินเดิมหนึ่งมีค่าความแข็งแรง CBR เท่ากับ 1.0 และต้องรองรับการผ่านของยานพาหนะแบบ standard-axle vehicle จำนวน 1000 รอบ ด้วยกับรอยร่องล้อสูงสุด 75 mm จงหาความหนาของถนนในกรณีที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วย geogrid และความหนาของถนนเดียวกันเมื่อเสริมกำลังด้วย geogrid ชนิด BX 1200 ในกรณีที่มีความเป็นไปได้ของการบวมเป่งในเนื้อดินต่ำ และจงหา Δh หรือความหนาที่แตกต่างของทั้งสองกรณี

วิธีคำนวณ

จากข้อมูล ใช้รูปที่ 2.31 ในกรณี nonreinforced case พบว่า

$$h_0 = 0.60 \text{ m}$$

สำหรับกรณี geogrid reinforced case ตรงกับข้อมูล curve 2 ซึ่งให้ค่า $R = 0.50$

$$\begin{aligned} h &= Rh_0 \\ &= (0.50)(0.60) \\ &= 0.30 \text{ m} \end{aligned}$$

สามารถประหยัดวัสดุรวมได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} \Delta h &= 0.60 - 0.30 \\ &= 0.30 \text{ m} \end{aligned}$$

2.10.2 Paved Roads-Base Courses

การใช้ geogrid ในชั้นพื้นทาง (base course) ของถนนปูผิว (paved road) เป็นการใช้งาน geogrid ที่มีลักษณะช่องเปิดกว้าง (large aperture size) โดยใช้ geogrid เสริมกำลังลงไปชั้น granular base course ซึ่งปกติเป็นหินคลุก (crushed stone) (Koerner, 1997) มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่ม modulus ช่วยการจำกัดเคลื่อนตัวด้านข้าง (lateral confinement) ของระบบ การลดเคลื่อนตัวด้านข้างดังกล่าวต้านทานแนวโน้มการขยายออกทางด้านข้างที่เกิดจาก repetitive traffic load บนผิวทางคอนกรีตหรือยางมะตอย สถานการณ์ดังกล่าวสามารถนำไปใช้กับบัสลาสตีได้รางรถไฟได้เช่นกัน และอาจมากยิ่งขึ้นไปอีกถ้าเกิดโหลดแบบไดนามิก

มีการทดสอบในห้องปฏิบัติการหลายการทดสอบที่พยายามประเมินผลและกลไกที่เกี่ยวข้อง งานของ Haas (1984) และ Abd El Halim et al. (1983) ถือเป็นงานที่สำคัญ ในการทดสอบที่มีเครื่องตรวจวัดขนาด ความยาว 4.0 m กว้าง 2.4 m ลึก 2 m และใช้แรงโหลด 10 kN โดยใช้ความถี่แบบ 10 Hz ในความถี่ 300 Hz บนแผ่นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 mm ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ชุด (**ชุดที่ 1**) loop 1 เปรียบเทียบการตอบสนองของส่วนที่ไม่ได้รับการเสริมกำลัง (non-reinforced) และการเสริมกำลัง (reinforced) โดยใช้ทั้งสภาพที่เป็นแบบแห้ง (dry, strong) และอิ่มตัว (saturated, weak) การวิบัติปรากฏในส่วนที่ไม่ได้รับการเสริมกำลังก่อนส่วนเสริมกำลัง ภายใต้เงื่อนไขทั้งสอง (**ชุดที่ 2**) loop 2 ให้ข้อมูลที่แสดงความแตกต่างเล็กน้อยใน elastic deflection ในการทดลองทั้งสองครั้ง ซึ่งเป็นการทดสอบแบบสภาวะแห้งทั้งหมด (dry condition) ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนผลของ angle of curvature และ the elastic strain ที่จุดใต้ผิวทางนั้น มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ปรากฏว่าคุณสมบัติทั้งสองลดลง 50% สำหรับส่วนที่เสริมกำลัง แสดงว่าการกระจายโหลดนั้นเป็นตัวช่วยที่สำคัญ ทำให้การเคลื่อนตัวของ permanent surface ในส่วนที่เสริมกำลังนั้นได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้น สังเกตได้ว่าการเคลื่อนตัว 20 mm (ถือเป็นจุดวิกฤติ) กรณีที่ไม่เสริมกำลังรับ load cycle เข้าได้ 110,000 ครั้ง ต่างจากกรณีเสริมกำลังสามารถรับ load cycle เข้าได้ 320,000 ครั้ง ในบริบทของการอภิปรายเกี่ยวกับ geotextiles ที่ใช้ในการควบคุมการแตกร้าวของถนนลาดยาง สิ่งนี้จะเรียกว่า geogrid effectiveness factor (GEF) เท่ากับ 2.9

การทดลองต่อมา (ชุดที่ 3) loop 3 ได้ทำการสำรวจคำนึงถึงความหนาต่าง ๆ ที่นำมาเสริมแรง ผลสรุปว่ากรณีเสริมกำลังที่ความหนา 150 mm รับแรงเข้าได้ถึง 80,000 ครั้ง เปรียบเทียบกับกรณีไม่เสริมกำลังที่ความหนา 200 mm และ 250 mm ซึ่งสามารถรับแรงเข้าได้ 34,000 และ 92,000 ครั้ง ตามลำดับ หรือกล่าวได้ว่าถนนกรณีเสริมกำลัง 150 mm สามารถรับแรงเข้าได้เทียบเท่ากับถนนไม่เสริมกำลังที่ความหนา 200 mm (ชุดที่ 4) loop 4 ยืนยันผลเหล่านี้ในส่วนเสริมกำลังนั้นส่งผลให้ประหยัดแอสฟัลต์ที่ 50 ถึง 100 mm เมื่อเทียบกับกรณีไม่ได้เสริมแรง และ (ชุดที่ 5) loop 5 เกี่ยวข้องกับความดันเซลล์ในชั้นดินเดิมและยืนยันความสามารถในการกระจายน้ำหนักของการเสริมแรง

การศึกษาลักษณะนี้มักจะระบุฟังก์ชันของการเสริมกำลังในระบบถนน pavement ให้ โดยใช้ geogrid แม้ว่าจากการศึกษาพบว่าการเสริมกำลังจะมีกลไกที่ค่อนข้างซับซ้อน ไม่ว่าจะเป็นเพิ่ม initial stiffness, ลดการเคลื่อนที่แบบ long-term vertical, ลดการเคลื่อนที่แบบ long-term horizontal, เพิ่ม tensile strength, ลดรอยร้าว และ พัฒนาพฤติกรรมการรับ cyclic fatigue หรือจะกล่าวโดยรวมคือ geogrid มีฟังก์ชันในการยึดระบบเข้าด้วยกัน (holding the system together) ด้วยเหตุดังกล่าวทำให้เกิดความยุ่งยากในการออกแบบที่ต้องคำนึงถึงกลไกที่ซับซ้อนทั้งหมดข้างต้น เราจึงใช้ geogrid effectiveness factor (GFE) และนำไปคิดรวมกับ design traffic number (DTN) เพื่อที่จะประมาณค่าปรับแก้ที่เกิดขึ้น และออกแบบตามนั้น โดยความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.10 คือ

$$DTN_R = DTN_N / GFE \quad (2.10)$$

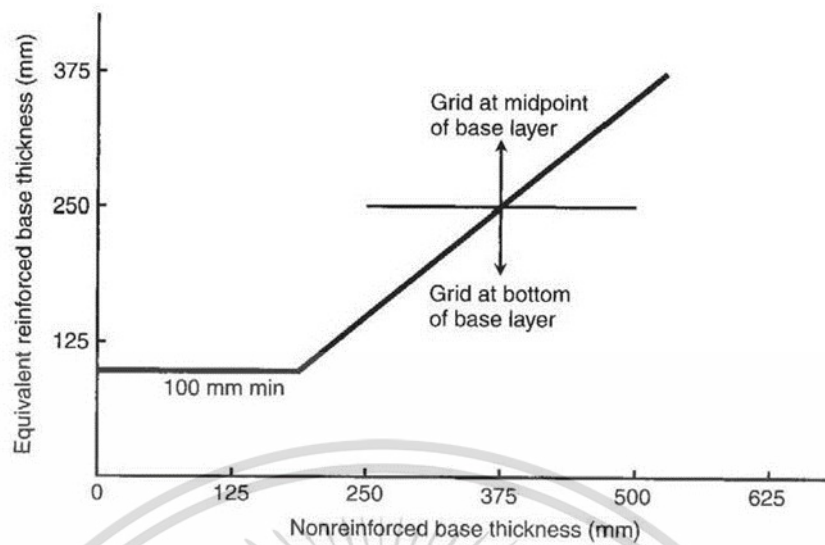
เมื่อ

DTN_R = design traffic number for the geogrid-reinforce case

DTN_N = design traffic number under standard (nonreinforced) conditions (e.g., using the Asphalt Institute's procedures)

GFE = geogrid effectiveness factor (มีค่าประมาณ 3.0 สำหรับ homogeneous geogrid)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.32 การเสริมกำลัง geogrid ในชั้นพื้นทาง (base course) สำหรับถนนลาดยางโดยใช้ HDPE geogrid (Carroll et al. 1987)

Carroll et al. (1987) ได้ปรับปรุงเทคนิคโดยใช้ข้อมูลการทดลองเดียวกันเพื่อคำนวณ structural number ตาม AASHTO (1986) ใช้แนวคิดของ structural number ซึ่งในส่วน nonreinforced (control) คือ

$$SN = 25a_1d_1 + 25a_2d_2 \quad (2.11)$$

เมื่อ

SN = structural number

a_i = layer coefficients (เท่ากับ 0.4 สำหรับ Asphalt และ 0.14 สำหรับ granular stone base)

d_i = ความหนา (mm) ของแต่ละชั้น

โดยใช้ค่า soil subgrade support value (S) ที่ได้จากการทดสอบ CBR สามารถคำนวณจำนวนเทียบเท่า 80 KN single-axle สำหรับส่วน cross section ใด ๆ จากนั้นจะทำการคำนวณตัวคูณแก้ไขโหลตสำหรับ geogrid เสริมกำลัง มีการประมาณค่า SN ของถนนเสริมกำลังและสร้างอัตราส่วนสำหรับส่วนเสริมกำลังและแบบไม่เสริมกำลัง เมื่อพล็อตเทียบกับความหนาจริงของเสริมกำลังแล้วอัตราส่วนนี้จะเส้นตรง ถึงค่าจะต่างกันแต่ก็มีแนวโน้มที่เหมือนกันในการเสริมกำลังที่มี geogrids อยู่ตรงกลางและที่ด้านล่างของชั้นพื้นทาง แผนภูมิการออกแบบ (design chart) ที่ช่วยให้ความหนาของชั้นพื้นทางแบบไม่เสริมแรงสามารถแปลงค่าเป็นความหนาของชั้นพื้นทางที่เสริมกำลังได้ ดังรูปที่ 2.32 โปรดทราบว่า การเปลี่ยนเกิดขึ้นที่พื้นทางเสริมกำลังหนา 250 mm หรือที่จุดพื้นทางไม่เสริม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังหนา 375 mm คือ เป็นจุดเปลี่ยนแยกระหว่างการเสริมกำลังที่จุดกลางของชั้นพื้นทางหรือเสริมกำลังที่ได้สุดของชั้นพื้นทาง เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องตระหนักว่าเส้นแนวโน้มนี้อยู่บนพื้นฐานของข้อมูลการทดลองของ geogrid เฉพาะตัวเท่านั้น (สำหรับ HDPE geogrid) เป็นการยากที่จะพยากรณ์ geogrid ในชนิดอื่นที่ แตกต่างกัน longitudinal and transverse rib strength, modulus in both directions, and junction strength ทั้งหมดรวมอยู่ในกลไกการเสริมแรงทั้งสิ้น

2.10.3 Paved Roads-Pavements

มีการวิจัยอย่างต่อเนื่องเกี่ยวข้องกับการเสริมกำลังด้วย geogrid โดยแทรกไปที่ชั้นผิวทาง (placement in pavement) โดยตรง ไม่ว่าจะเป็ผิวทางแบบลาดยางหรือคอนกรีต ซึ่งในที่นี่เกี่ยวข้องกับทั้งการก่อสร้างโครงสร้างถนนใหม่ และการซ่อมแซมฟื้นฟูสภาพผิวทางเก่าด้วย เช่น การชะลอรอยแตก เป็นต้น Brown et al. (1984) ได้รายงานการศึกษากว่า กรณี high deformation ของผิวทาง geogrid สามารถลดรอยล่อได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามในกรณี low deformation ของผิวทางนั้น การส่งผลของ geogrid นั้นมีน้อย การจัดวางตำแหน่งของ geogrid ให้แน่นและให้เหมือนกับกำลัง prestressing อยู่ นั่น ดูเหมือนจะเป็นไปตามหลักเหตุผล แต่ในการทำให้สำเร็จนั้นยากกว่าที่คิด ต่อมา Kennepohl and Kamel (1984) ได้อธิบายถึงอุปกรณและเทคนิคที่ใช้ในการติดตั้ง โดยวัสดุและชนิดของ geogrid เป็นสิ่งสำคัญมาก เนื่องจากยางมะตอย (asphalt) นั้นยากที่จะติดกับพื้นผิวของ polyethylene, polypropylene หรือ polyester แต่จะเพิ่มความเสียดทานได้หากใช้ flexible geogrid หรือแบบ yarn-type geogrid ที่เคลือบด้วยสาร bitumen coated อีกสิ่งหนึ่งที่เหมือนจะเป็นปัญหาสำคัญคือการหดตัวของ geogrid ที่เกิดขึ้นระหว่างการติดตั้งในชั้นผิวทางที่มีอุณหภูมิสูง อาจจะทำให้เกิดการคลายตัวของโมดูลัสความเครียด จนสูญเสีย strength หรือ modulus ไป ถึงแม้จะมีการพูดถึงปัญหาดังกล่าว แต่ความสำเร็จในการทดลองเพื่อป้องกันรอยแตก โดยใช้ geogrid เป็นตัวป้องกันการแตกร้าวก็ได้รับการรายงานแล้วเช่นกัน

การใช้ geogrid เพื่อชะลอและลดการแตกร้าวของผิวทางเดิม โดยใช้การลาดผิวทางยางมะตอยใหม่ทับไปเป็นเรื่องที่น่าสนใจ ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดย Molenaar and Nods (1996) แนะนำให้ใช้กฎพลังงาน (power law) เพื่อคำนวณอัตราการกระจายของรอยแตกผ่านชั้นใหม่ (the rate of crack propagation through the new overlay thickness) ดังสมการที่ 2.12

$$\frac{dc}{dN} = AK^n \quad (2.12)$$

เมื่อ

$\frac{dc}{dN}$ = crack propagation rate per number of load cycles

K = stress intensity factor

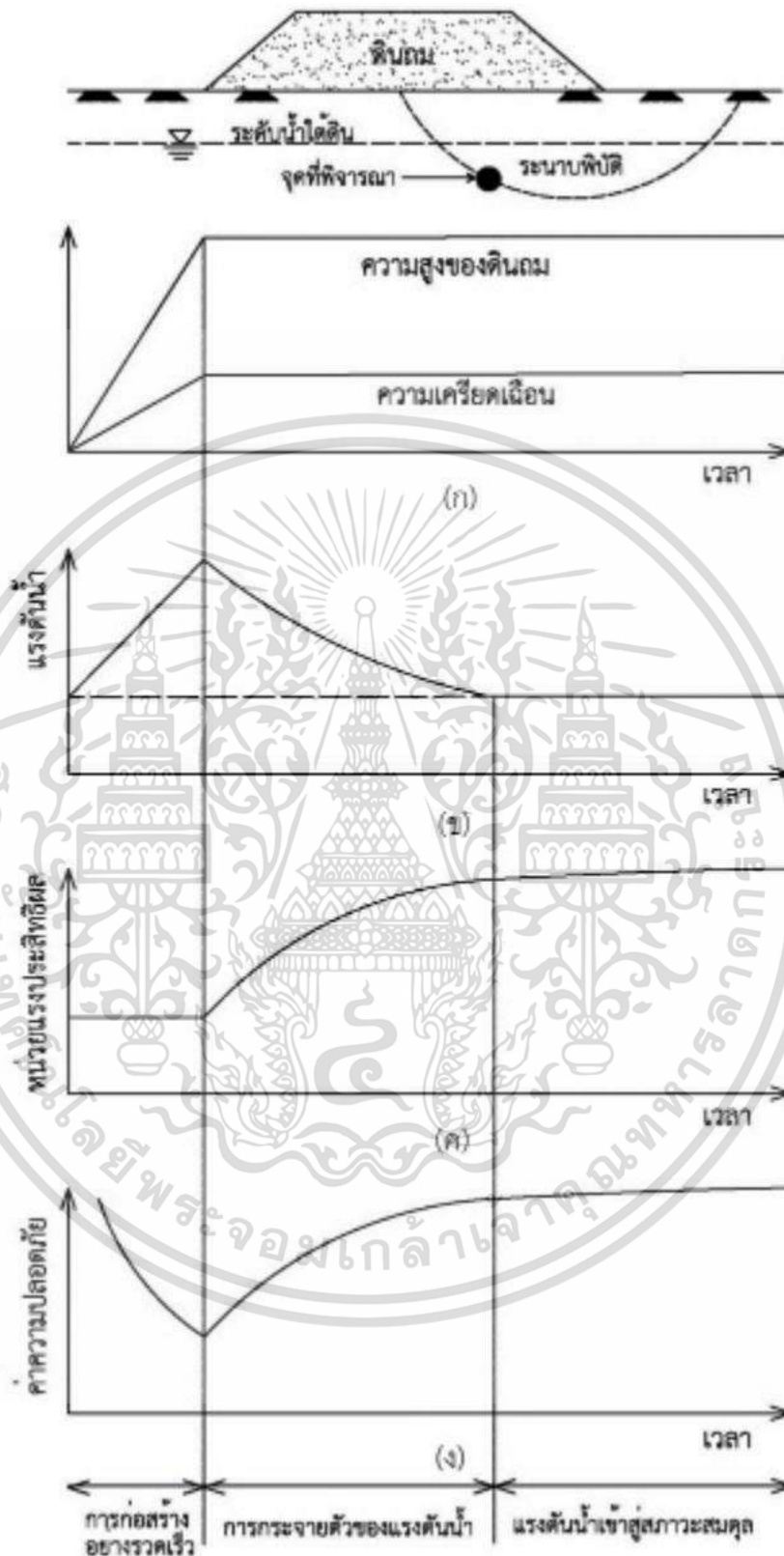
A, n = experimentally obtained constants

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

bidirectional geogrids จะถูกวางไว้บน pavements ที่มีอยู่ โดยทั่วไปแล้วจะติดตั้งโดยใช้สารยึดติดหรือวางแยกเลยก็ได้ หลังจากนั้นทำการคลุมด้วย bituminous ทับลงไป เห็นได้ชัดว่ากำลังรับแรงดึงของ geogrid จะถูกความร้อนที่เกิดจากการทับลงด้วย และเกิดการหดตัวจนทำให้เกิดรอย crack ได้ ดังนั้น geogrid ที่ใช้จึงจำเป็นต้องมีกำลังรับแรงดึงที่สูง โพลีเมอร์ geogrids ทุกประเภทจะถูกนำมาใช้ในการใช้งานนี้เช่นเดียวกับ geogrids ที่ทำจากไฟเบอร์กลาส ไฟเบอร์กลาสมีคุณสมบัติความต้านทานแรงดึงที่ยอดเยี่ยมในเรื่องนี้ (เช่นความแข็งแรงสูง การยืดตัวต่ำ โมดูลัสสูง และการเกิด creep ต่ำ) นอกจากนี้ยังมีความพยายามอย่างต่อเนื่องในการใช้ geogrids เพื่อเสริมแรงผิวทางแบบคอนกรีตพอร์ตแลนด์ - ซีเมนต์ในลักษณะที่คล้ายกับที่อธิบายไว้ในกรณีของ asphaltic pavements

2.11 แรงดันน้ำ หน่วยแรงประสิทธิผล และค่าความปลอดภัยของดินถม

การถมดินเพื่อสร้างถนน ไม่ว่าจะเป็นในกรณีของถนนไม่เสริมกำลังหรือถนนเสริมกำลังก็ตาม มีประเด็นที่ควรรู้ คือ การถมดินให้สูงขึ้นนั้นจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำ หน่วยแรงประสิทธิผล และค่าความปลอดภัยของดินถมเมื่อเวลาผ่านไป ดังแสดงในรูปที่ 2.33 โดยสามารถแบ่งได้ 3 ช่วงสภาวะ คือ (1) ก่อสร้างอย่างรวดเร็ว, (2) การกระจายตัวของแรงดันน้ำ, และ (3) แรงดันน้ำเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยในแต่ละช่วงมีรายละเอียดดังนี้ ในช่วงที่ 1 การก่อสร้างอย่างรวดเร็วของคันดินถมที่สูงขึ้นส่งผลให้จุดที่พิจารณามีความเครียดเฉือนเพิ่มขึ้น แรงดันน้ำเพิ่มขึ้น ในขณะที่หน่วยแรงประสิทธิผลคงที่ และค่าความปลอดภัยลดลง เมื่อเข้าสู่ช่วงที่ 2 เกิดสภาวะกระจายตัวของแรงดันน้ำ ทำให้ความเครียดเฉือนคงที่ แรงดันน้ำลดลงเนื่องจากการกระจายตัวของแรงดันน้ำจนคงที่เมื่อเข้าสู่ช่วงที่ 3 ในส่วนของหน่วยแรงประสิทธิผลนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นจนคงที่เมื่อเข้าสู่ช่วงที่ 3 เช่นเดียวกันกับค่าความปลอดภัยที่มีค่าเพิ่มขึ้นจนคงที่เมื่อเข้าสู่ช่วงที่ 3 จุดเน้นที่สำคัญ คือ เมื่อเวลาผ่านไปจนแรงดันน้ำเข้าสู่สภาวะสมดุล คันดินจะมีค่าความปลอดภัยที่คงที่



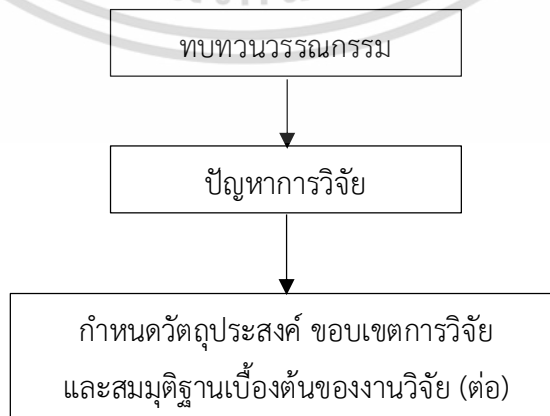
รูปที่ 2.33 ค่าความปลอดภัย แรงเฉือน แรงดันน้ำส่วนเกิน หน่วยแรงประสิทธิผล ของลาดดินถมที่
ระยะเวลาต่างๆ (ดัดแปลงจาก Bishop และ Bjerrum, 1960)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

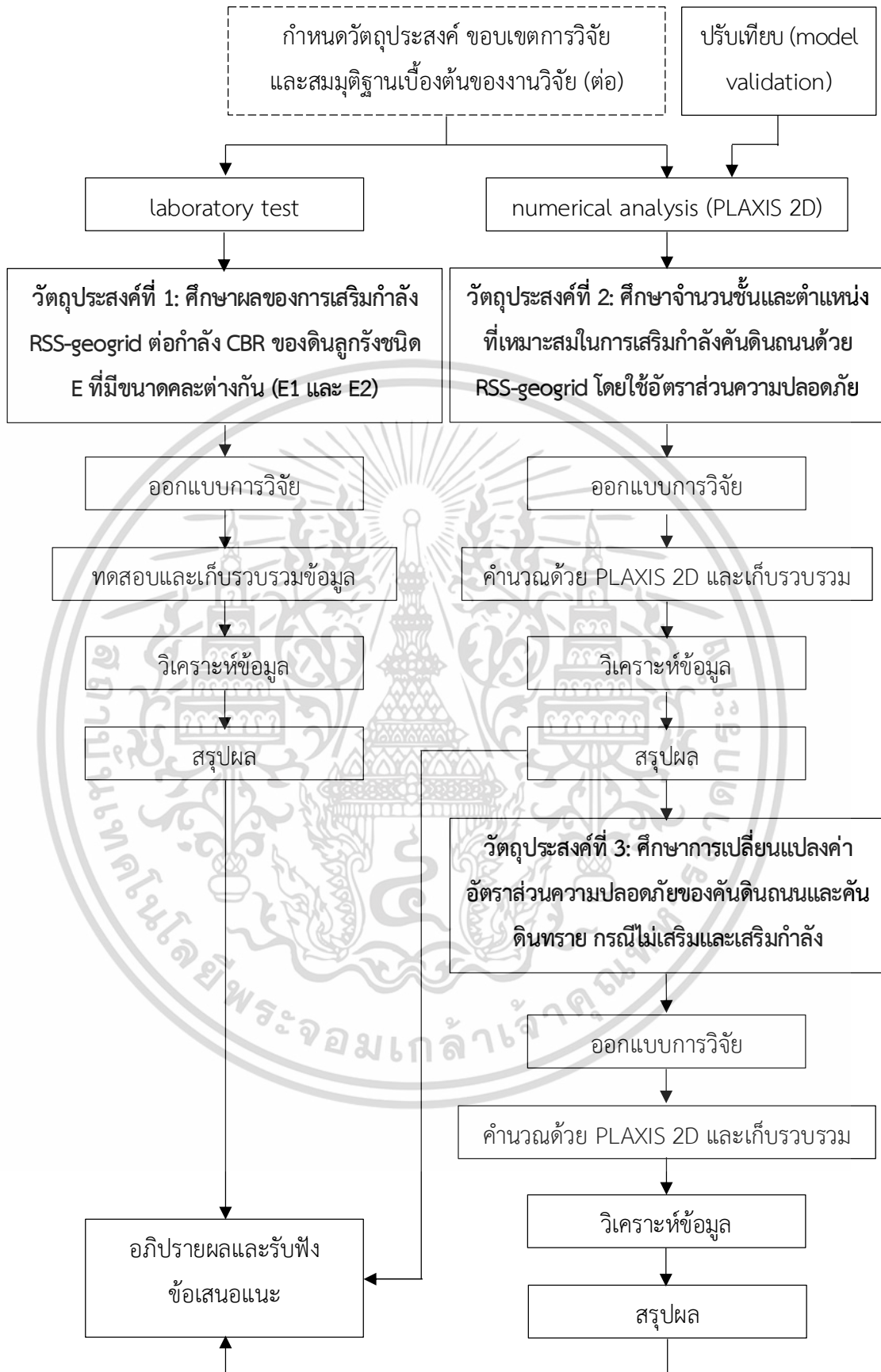
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีดำเนินการวิจัยของงานวิจัย เริ่มต้นตั้งแต่ออกแบบและทดสอบ RSS-geogrid ในห้องปฏิบัติการรวมไปถึงการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม PLAXIS 2D โดยมีรายละเอียดประกอบไปด้วย (1) การศึกษาผลของ RSS-geogrid ต่อกำลังรับน้ำหนักเบกทานแบบ CBR ของดินลูกรังชนิด E ที่มีขนาดคละต่างกัน (E1 และ E2) กรณีไม่เสริมกำลังและเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid โดยในส่วนนี้อธิบายรายละเอียดของขอบเขตการศึกษา, คุณสมบัติของดินลูกรัง, การออกแบบช่องเปิด, เงื่อนไขการทดสอบ, และวิธีการทดสอบ (2) การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของ RSS ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ต้องนำคุณสมบัติไปใช้ในแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D โดยการใช้การทดสอบ wide-width tensile strip method เพื่อหาค่า wide-width tensile strength และความสัมพันธ์ระหว่าง tensile strength กับ strain เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่า axial stiffness (EA) ของ RSS และ (3) การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ของคันดินที่เสริมกำลังด้วย RSS-geogrid โดยในส่วนนี้อธิบายรายละเอียดของขอบเขตการศึกษา, พื้นที่ศึกษาและข้อมูลเบื้องต้นของโครงการที่ใช้เปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง, การสร้างแบบจำลองและการเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง (validation), คุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้อง, การกำหนดตัวแปร (variable assignment), และเงื่อนไขการศึกษา (study condition) เพื่อศึกษาจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังคันดินถนนด้วย RSS-geogrid และศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของคันดินถนนและคันดินทราย เปรียบเทียบกรณีไม่เสริมกำลังและเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid ด้วยแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D โดยมีวิธีดำเนินการวิจัยดังแผนผังต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการทำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (ดูหน้าถัดไป...)

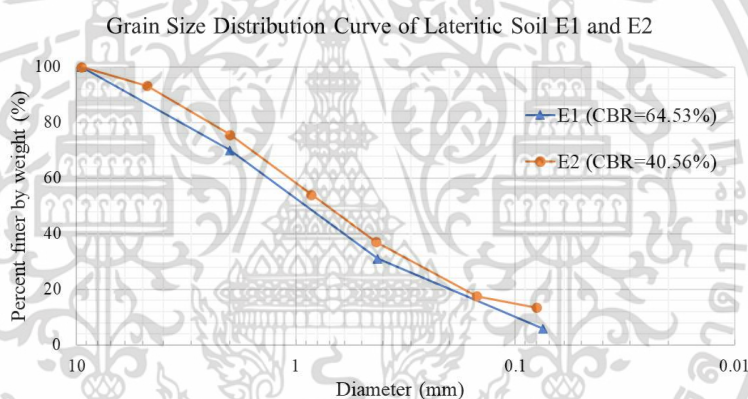


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การศึกษา RSS-Geogrid และผลการเสริมกำลัง CBR ในดินลูกรังชนิด E ที่มีขนาดคละต่างกัน (E1 และ E2)

3.1.1 ขอบเขตการศึกษา

1. ใช้ RSS ประเภท 3 เท่านั้น (ในงานวิจัยนี้เรียกว่า RSS) ในการประยุกต์ใช้เป็น RSS-geogrid เนื่องจากเป็นประเภทที่มีอยู่ทั่วไปในท้องตลาด
2. ใช้ดินลูกรัง (lateritic soil) ชนิด E ที่มีขนาดคละและ CBR ต่างกัน คือ E1 (CBR=64.53%) และ E2 (CBR=40.56%) ซึ่งดินลูกรังชนิด E เป็นวัสดุในชั้นรองพื้นทางที่มีขนาดคละแย่ที่สุด ทำให้มีค่า CBR ต่ำที่สุด จำแนกประเภทโดยกรมทางหลวง (2532) ดังแสดงในตารางที่ 3.1
3. ช่องเปิด (apertures) ของ RSS-geogrid ถูกออกแบบให้มีขนาด 20 x 20 มิลลิเมตร เท่านั้น
4. ทดสอบ CBR ด้วยวิธี modified และในเงื่อนไขที่ความชื้นในดินเท่ากับความชื้นที่เหมาะสม (OMC) ที่ 14 %
5. ไม่ศึกษาผลกระทบด้านเศรษฐศาสตร์



รูปที่ 3.1 grain size distribution ของดินลูกรังชนิด E ที่มีขนาดคละและ CBR ต่างกัน คือ E1 (CBR=64.53%) และ E2 (CBR=40.56%)

ตารางที่ 3.1 จำแนกชนิดของดินลูกรังที่เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทาง (กรมทางหลวง, 2532) และดินลูกรัง E1, E2 ที่ใช้ในงานวิจัย

ขนาดตระแกรง (มิลลิเมตร)	ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล					วัสดุในงานวิจัย	
	A	B	C	D	E	E1	E2
50	100	100	-	-	-	-	-
25	-	-	100	100	100	100	100
9.5	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	-
2	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	70	75.67
0.425	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	31	37.10
0.075	2-8	5-20	5-15	5-20	6-20	6	13.51

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของดินลูกรัง E1 และ E2

Soil type	OMC (%)	Dry density, γ_{dry} (g/cm ³)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	CBR	
						Name	Values (%)
E1	14.00	1.86	48.00	21.54	26.46	High CBR	64.53
E2	14.00	1.86	48.00	23.23	24.77	Low CBR	40.56

คุณสมบัติของดินลูกรัง (lateritic soil)

ดินลูกรังชนิด E ซึ่งเป็นดินลูกรังที่มีขนาดคละแยะที่สุดจะถูกใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากเสริมกำลังในดินอ่อนมีผลมากกว่าการเสริมกำลังในดินแข็ง (ดูบทที่ 2.8) โดยเลือกขนาดคละแยะที่แตกต่างกัน 2 ขนาดคละทำให้มีค่า CBR ที่ต่างกัน คือ E1 (CBR=64.53%) และ E2 (CBR=40.56%) ซึ่งดินทั้ง 2 ชนิดจะถูกแบ่งแยกโดยใช้คุณสมบัติ Atterberg's limit, OMC และ grain size distribution (รูปที่ 3.1 และตารางที่ 3.1) ที่ต่างกัน โดยคุณสมบัติของดินลูกรัง E1 และ E2 นั้นได้ถูกรวบรวมไว้ในตารางที่ 3.2

การออกแบบช่องเปิดของ RSS-geogrid

แผ่นยางพารารวมควัน (RSS) จะถูกออกแบบให้มีช่องเปิด (apertures) เพื่อให้มันทำหน้าที่คล้าย geogrid กล่าวคือ ช่องเปิดของ RSS จะทำหน้าที่ interlock กับเม็ดดิน พร้อมกับทำหน้าที่เป็นทางผ่านของน้ำ (Koerner, 1997) เมื่อถูกทำให้มีช่องเปิดแล้วแผ่นยาง RSS ดังกล่าวจะถูกเรียกว่า RSS-geogrid โดยช่องเปิดของ RSS-geogrid ในงานวิจัยนี้ออกแบบให้มีลักษณะดังรูปที่ 3.2 คือ เป็นช่องเปิดขนาด 20 x 20 มิลลิเมตร โดยแต่ละช่องเปิดห่างกันเป็นระยะ 20 มิลลิเมตร ทั้งแนวนอนและแนวตั้ง ยิ่งไปกว่านั้น RSS-geogrid จะถูกตัดให้เป็นวงกลมเพื่อให้สามารถติดตั้งลงในโมลด์ทดสอบ CBR ได้

การออกแบบดังกล่าว (ช่องเปิดขนาด 20 x 20 มิลลิเมตร) นั้นสอดคล้องกับ Koerner (1997) และ Han et al. (2018) ซึ่งระบุว่าช่องเปิดควรมีขนาดตั้งแต่ 10 – 100 มิลลิเมตร และเปอร์เซ็นต์พื้นที่ช่องเปิด (open percent area) ให้มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 40% ถึง 90% (Koerner, 1997) และการออกแบบช่องเปิดยังสอดคล้องกับค่าอัตราส่วนระหว่างขนาดช่องเปิด (A) ต่อขนาดมวลรวม (D) หรือ A/D ของ biaxial geogrids โดย Han et al. (2018) ระบุว่า A/D ควรมีค่าระหว่าง 1.30 ถึง 1.71 (ดูบทที่ 2.3.4 ลักษณะช่องเปิดของแผ่นตาข่ายเสริมกำลังดิน) โดยขนาดมวลรวมซึ่งเป็นดินลูกรัง (D) มีขนาดผ่านตะแกรงใหญ่ที่สุดในช่วง 25-9.5 มิลลิเมตร (ดูตารางที่ 3.1) จึงออกแบบให้ RSS-geogrid มีขนาดช่องเปิด (A) เท่ากับ 20 มิลลิเมตร เมื่อคำนวณ A/D แล้วก็จะมีค่าอยู่ในช่วงที่กำหนดตามงานวิจัยของ Han et al. (2018)



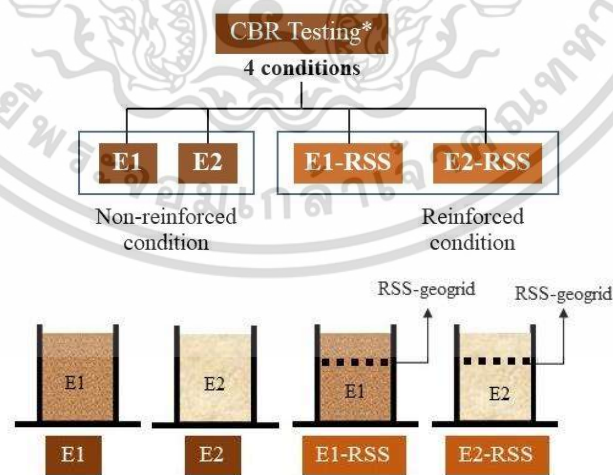
รูปที่ 3.2 วัสดุเสริมแรง RSS-geogrid สำหรับการทดสอบ CBR

3.1.2 เงื่อนไขการทดสอบ (Testing Conditions) ของ CBR test

การทดสอบ CBR มีเงื่อนไขทั้งหมด 4 เงื่อนไขดังนี้

1. ทดสอบดินลูกรัง E1 แบบไม่ติดตั้ง RSS-geogrid เสริมกำลัง (E1 condition)
2. ทดสอบดินลูกรัง E2 แบบไม่ติดตั้ง RSS-geogrid เสริมกำลัง (E2 condition)
3. ทดสอบดินลูกรัง E1 พร้อมติดตั้ง RSS-geogrid เสริมกำลัง (E1-RSS condition)
4. ทดสอบดินลูกรัง E2 พร้อมติดตั้ง RSS-geogrid เสริมกำลัง (E2-RSS condition)

ตามลำดับ โดยรูปที่ 3.3 แสดงถึงแผนภาพเงื่อนไขการทดสอบทั้งหมดและตำแหน่งการเสริมกำลังในโมลด์ (mold) CBR รูปที่ 3.4 แสดงถึงการติดตั้งวัสดุเสริมกำลัง RSS-geogrid ในเงื่อนไขเสริมกำลัง ขณะที่ทำการบดอัดดิน โดยตำแหน่งเสริมกำลังของ RSS-geogrid จะถูกเสริมระหว่างชั้นที่ 2 และ 3 ของการบดอัดในโมลด์ และรูปที่ 3.5 แสดงถึงตำแหน่งของชั้นเสริมกำลังเมื่อนำไปทดสอบกำลังรับน้ำหนักด้วย penetration piston



Note:

ASTM D1557 (modified compaction test) was used.

ASTM D1883 (CBR test) was used to determine the strength of soil.

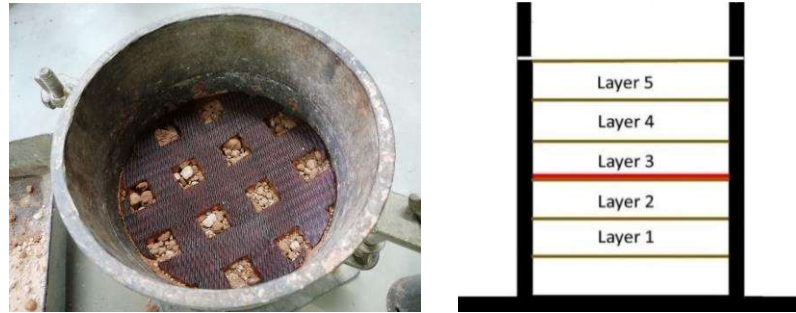
*Tested under OMC condition

รูปที่ 3.3 แผนภาพเงื่อนไขการทดสอบ CBR ของเงื่อนไข E1, E2, E1-RSS, E2-RSS และตำแหน่งการ

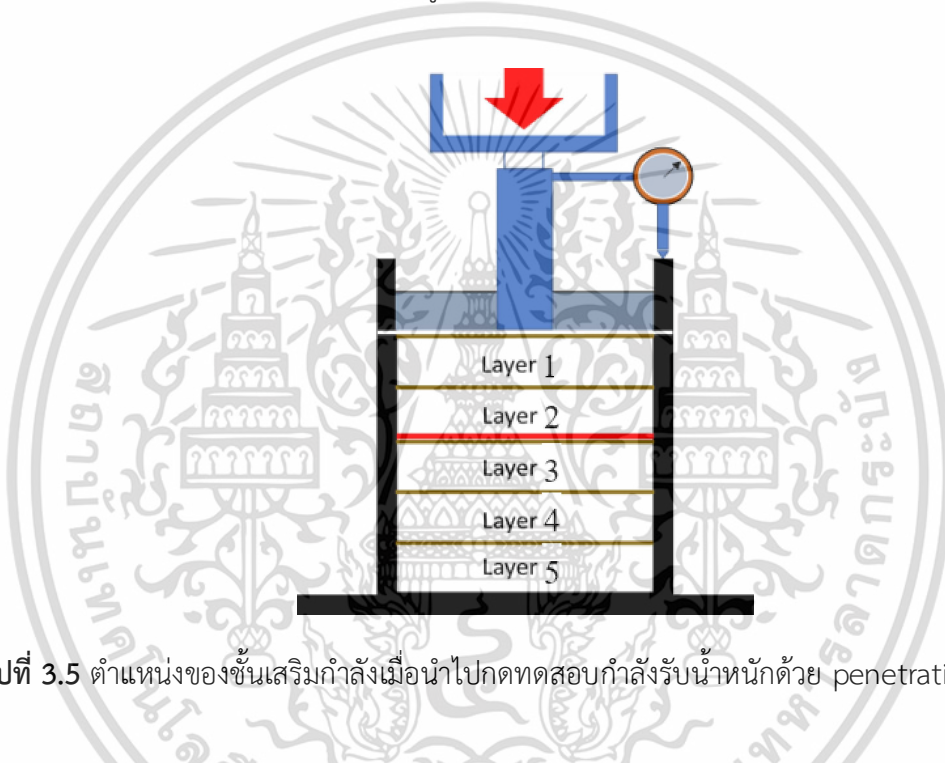
เสริมกำลังในโมลด์ (mold)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 การติดตั้งวัสดุเสริมกำลัง RSS-geogrid ในเงื่อนไขเสริมกำลังขณะที่ทำการบดอัดดิน โดยตำแหน่งเสริมกำลังของ RSS-geogrid จะถูกเสริมระหว่างชั้นที่ 2 และ 3 ของการบดอัดในโมลด์



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งของชั้นเสริมกำลังเมื่อนำไปทดสอบกำลังรับน้ำหนักด้วย penetration piston

3.1.3 วิธีการทดสอบ CBR

3.1.3.1 วิธีการทดสอบ CBR ในเงื่อนไข E1 และ E2 (ไม่เสริมกำลัง)

วัตถุประสงค์

เพื่อกำหนดค่าของดินบดอัดในค่าของ CBR ด้วยมาตรฐาน ASTM D1883

อุปกรณ์การบดอัด (Compaction)

1. แบบ CBR mold ขนาด \varnothing 6 นิ้ว x 7 นิ้ว พร้อมปลอก (collar) สูง 2 นิ้ว แผ่นฐาน (base plate) ปลอกตัดดิน (cutting collar) และแผ่นเหล็กกรอง (spacer disc) \varnothing 5.94 นิ้ว x 2.416 นิ้ว ด้านหนึ่งเจาะรูมีเกลียวสำหรับใช้มือสกรูดึงแผ่นออกจากแบบอัดดิน

2. ตุ่มบดอัด (drop rammer หรือ compaction hammer) ขนาด \varnothing 2 นิ้ว น้ำหนัก 10 ปอนด์ ระยะตก 18 นิ้ว สำหรับการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน (modified proctor test)

3. กระจกตวงน้ำ (graduate cylinder) ขนาด 250-500 ลูกบาศก์เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ขวดฉีดน้ำ (wash bottle)
5. ช้อนตักดิน (soil scoop)
6. ไม้บรรทัดเหล็กปาดดิน (straight edge)
7. ถาดผสมดิน (mixing pan)
8. ตาชั่งขนาด 20 กิโลกรัม อ่านได้ละเอียด 0.1 กรัม
10. เครื่องดันตัวอย่างดิน (sample extruder)
11. กระดาษกรอง (filter papers) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว (150 มิลลิเมตร)

อุปกรณ์การกดทดลอง (Penetration Test)

1. เครื่องกดแบบมือหมุน (mechanical) หรือแบบอิเล็กทรอนิกส์ (motorized) มีกำลังกดอย่างต่ำ 6000 ปอนด์
2. แท่งเหล็กกดกลมตัน (penetration piston) มีพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว ยาวอย่างน้อย 4 นิ้ว ต่อเข้ากับ proving ring
3. มาตรวัดการยุบตัว (penetration dial gauge) ขนาด 1 นิ้ว อ่านละเอียด 0.001 นิ้ว หรือขนาด 25 มิลลิเมตร อ่านละเอียด 0.01 มิลลิเมตร พร้อมอุปกรณ์ยึดเข้ากับแท่งเหล็กกดกลมตัน

การเตรียมตัวอย่างดิน

1. ทิ้งตัวอย่างดินให้แห้งในห้องปฏิบัติการ (air dry) แล้วเลือกตัวแทนดินโดยใช้กล้องแยกดินหรือ ใช้วิธีแยกตัวอย่างเอา 2 ใน 4 (quartering) จากนั้นนำดินร่อนผ่านตะแกรงขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว ส่วนที่ค้างบนตะแกรงให้ทิ้งไป และนำดินที่ผ่านตะแกรงขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว แต่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 ในจำนวนที่เท่ากันโดยน้ำหนักมาผสม
2. หาความชื้นที่เหมาะสม (optimum moisture content, OMC) ตามการทดสอบการบดอัดดินด้วยวิธี modified proctor test (ASTM D1557)

การบดอัด (Compaction)

1. นำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้มาประมาณ 12 kg แบ่งดินสำหรับการบดอัดตัวอย่าง 2 ตัวอย่าง ตัวอย่างละประมาณ 6 กิโลกรัม (รูปที่ 3.6) และแบ่งตัวอย่างดินประมาณ 100 กรัม หรือมากกว่า ไปหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของตัวอย่างดินก่อนทำการทดสอบ (initial water content)
2. ประกอบโมลด์เข้ากับ แผ่นฐาน และ แผ่นเหล็กกรอง โดยให้ด้านที่มีรูเกลียวอยู่ข้างล่าง วางแผ่นกระดาษกรองบน แผ่นเหล็กกรอง เพื่อป้องกันไม่ให้ดินเกาะติดกับแผ่นเหล็ก ตั้งชุดโมลด์บนพื้นที่ที่เรียบและแข็งแรง
3. นำน้ำปริมาณมากกว่าที่ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (optimum moisture content, OMC) 2 % (เพื่อเผื่อการระเหยและติดภาชนะ) ผสมคลุกเคล้ากับตัวอย่างดินโดยใช้ขวดฉีดน้ำ

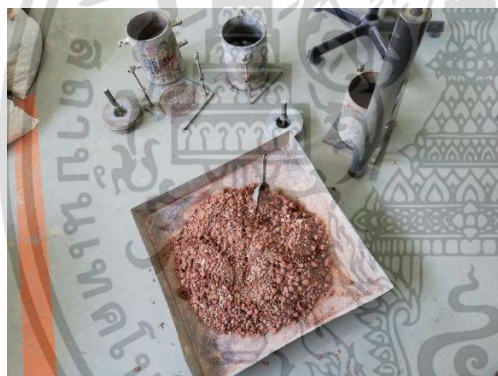
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำการบดอัดดินตามวิธีการบดอัดแบบ modified proctor test (ASTM D 1557) โดยมีตุ้มขนาด 10 ปอนด์ ระยะตก 18 นิ้ว ทำการบดอัดจำนวน 5 ชั้น ชั้นละ 56 ครั้ง (รูปที่ 3.7)

5. หลังจากบดอัดจนครบจำนวนชั้นและจำนวนครั้งแล้ว ถอดปลอก ออก ใช้ไม้บรรทัด เหล็กปาดดินให้สูงเสมอขอบโมลด์พร้อมซ่อมแต่งผิวหน้าตัวอย่างดินให้เรียบ

6. ถอดแผ่นฐาน และ แผ่นเหล็กรองออก ในการถอดแผ่นเหล็กรอง หากแผ่นเหล็กรองติดให้ใช้มือสกรูหมุนเข้าไปในรูใต้แผ่นเหล็กรอง แล้วดึงออกจากแบบอัดดิน หลังจากนั้นนำโมลด์และ ตัวอย่างดินไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าความหนาแน่น และนำตัวอย่างดินประมาณ 100 กรัม หรือมากกว่า ไปหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นหลังการบดอัด

7. นำโมลด์ที่บรรจุดินอัดแน่นประกอบเข้ากับ แผ่นฐานโดยให้ขอบโมลด์ด้านที่มีดินเสมอขอบวางบนแผ่นฐาน ให้ส่วนโมลด์ที่มีช่องว่างอยู่ด้านบน (รูปที่ 3.8)



รูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างดินและภาชนะบดอัดที่พร้อมทำการบดอัด



รูปที่ 3.7 แสดงการบดอัดด้วยวิธี modified proctor test



รูปที่ 3.8 แสดงแบบบดอัดดินที่ประกอบด้วยฐานรองพร้อมทำไปทดสอบการเจาะทะลุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกดทดลอง

1. วางแผ่นเหล็ก (surcharge weight) อย่างน้อย 10 ปอนด์ ลงบนตัวอย่างดินในโมลด์
2. จัดวางโมลด์พร้อมตัวอย่างดินเข้ากับเครื่องทดสอบซึ่งมีแท่งเหล็กกดกลมตัน ขนาดพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้ว ประกอบติดอยู่ โดยจัดให้ผิวหน้าของตัวอย่างดินในโมลด์แตะสัมผัสกับแท่งเหล็กกดกลมตันดังกล่าว
3. ติดตั้งมาตรวัดการยุบตัวเพื่อวัดการยุบตัวเข้ากับแท่งเหล็กกดกลมตัน จัดปลายมาตรวัดการยุบตัวให้ชนเสมอขอบโมลด์จากนั้นปรับมาตรหน้าปัดของมาตรวัดการยุบตัวให้เป็นศูนย์
4. เริ่มกดทดสอบโดยใส่แรงกดในอัตรา 0.05 นิ้ว/นาาที พร้อมกับอ่านค่าแรง ที่ตรงกับการยุบตัว (penetration) 0, 0.025, 0.050, 0.075, 0.100, 0.125, 0.150, 0.175, 0.200, 0.225, 0.250, 0.300, 0.350, 0.400 และ 0.500 นิ้ว จึงหยุด (รูปที่ 3.9)
5. นำโมลด์ออกจากเครื่องทดสอบ เก็บตัวอย่างดินตรงกลางตามแนวตั้งประมาณ 100 กรัม สำหรับดินเม็ดละเอียด หรือประมาณ 500 กรัม สำหรับดินเม็ดหยาบ เพื่อนำไปหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น (รูปที่ 3.10)



รูปที่ 3.9 แสดงการทดสอบการเจาะทะลุ



รูปที่ 3.10 แสดงตัวอย่างดินที่นำไปหา

moisture content

การคำนวณผล

1. คำนวณหน่วยแรงกดจากสมการที่ 3.1

$$\text{Test Unit Stress} = \frac{\text{Test Unit Load (lb)}}{3 \text{ (in}^2\text{)}} \quad \text{lb/in}^2, \text{ psi} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า หน่วยแรงแรงที่เกิดขึ้น กับค่า ระยะการกดพร้อมทำการปรับแก้กราฟตามวิธีการปรับแก้ในบทที่ 2.5.4

3. อ่านค่าหน่วยแรงจากกราฟที่ค่า 0.1 นิ้วและ 0.2 นิ้ว และคำนวณหาค่า CBR ด้วยสมการที่ 3.2 โดยเปรียบเทียบกับค่าหน่วยแรงกดมาตรฐาน (แสดงไว้ในบทที่ 2 ตารางที่ 2.7) ที่ระยะกด 0.1 นิ้ว และ 0.2 นิ้ว

$$\text{CBR} = \frac{\text{Test Unit Stress}}{\text{Standard Unit Stress}} \times 100 \quad \%$$
 (3.2)

4. คำนวณหาค่าความหนาแน่นดินแห้ง (dry density)

$$\gamma_d = \frac{W}{V(1+w)} \quad \text{lb/ft}^3, \text{ g/cm}^3$$
 (3.3)

โดยที่

W = น้ำหนักดินเปียก (Wet Weight) ในโมลต์ lb, g
 V = ปริมาตรของโมลต์ ft³, cm³
 w = ความชื้นของดิน (Water Content) เปอร์เซ็นต์/100

3.1.3.2 วิธีการทดสอบ CBR ในเงื่อนไข E1-RSS และ E2-RSS (เสริมกำลัง)

วิธีการทดสอบกำลังของดินลูกรังในกรณีเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid นั้นมีวิธีที่เหมือนกันกับบทที่ 3.1.3.1 คือ ใช้ตุ้มขนาด 10 ปอนด์ ระยะตก 18 นิ้ว ทำการบดอัดจำนวน 5 ชั้น ชั้นละ 56 ครั้ง เพียงแต่เพิ่มรายละเอียดในส่วนของการนำ RSS-geogrid ไปติดตั้งหลังจากที่บดอัดชั้นที่ 2 เสร็จ หรือก่อนบดอัดชั้นที่ 3 (รูปที่ 3.4) โดยแผ่นเสริมกำลังดังกล่าวมีช่องเปิดลักษณะเป็นช่องเปิดขนาด 20 x 20 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.2) ในส่วนที่นอกเหนือจากนี้ให้ควบคุมการทดสอบทุกขั้นตอนเหมือนกันกับกรณีที่ไม่มีการเสริมกำลัง ไม่ว่าจะเป็นปริมาณดิน การแยกตัวอย่าง และความชื้นที่เหมาะสม ทั้งหมดที่กล่าวมานั้นถูกควบคุมทั้งสิ้น จากนั้นทำการกดทดลองเช่นเดียวกันกับบทที่ 3.1.3.1 โดยรูปที่ 3.5 แสดงถึงแบบจำลองการกดทดสอบของดินที่เสริมกำลังด้วย RSS-geogrid แล้ว หรือแบบจำลองในเงื่อนไขของ E1-RSS และ E2-RSS

การทดสอบ CBR ถือเป็น การทดสอบเบื้องต้น (preliminary test) ของประสิทธิภาพการเสริมกำลังของ RSS-geogrid เมื่อเสริมกำลังในดินลูกรัง

3.2 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของ RSS

3.2.1 การทดสอบ Wide-Width Strip Method

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาคุณสมบัติการรับแรงดึงของ RSS โดยมาตรฐาน ASTM D4595-09 ถูกเลือกใช้ในการทดสอบนี้ และเครื่องทดสอบ universal testing machine (UTM) ก็ถูกใช้เช่นกัน ขั้นตอนการทดสอบเริ่มต้นด้วยการเตรียมตัวอย่าง RSS ประเภท 3 ซึ่งเป็นประเภทที่หาง่ายในท้องตลาด ให้มีขนาด 20 x 20 เซนติเมตร โดยแบ่ง RSS เป็นสองส่วน คือ ส่วนแรกคือส่วนที่ถูกหนีบด้วยหัวจับในด้านบนและล่างด้านละ 5 เซนติเมตร ซึ่งถูกเทปกาวหนัวย่นปิดไว้เพื่อป้องกันการวิบัติเนื่องจากแรงหนีบของหัวจับ และส่วนที่สองคือส่วนที่เว้นไว้เป็น gauge length ตรงกลางของแผ่นเป็นระยะ 10 เซนติเมตร โดยรูปที่ 3.11 แสดงตัวอย่างของ RSS ที่ถูกเตรียมเรียบร้อยแล้ว จากนั้นตัวอย่างจะถูกนำไปทดสอบ wide-width strip method เพื่อหา wide-width tensile strength ด้วยกับอัตรา strain increase rate เท่ากับ 15% ต่อนาที หรือกล่าวได้ว่าดึงด้วยอัตราเร็ว 1.5 cm ต่อนาที (รูปที่ 3.12)



รูปที่ 3.12 ลักษณะตัวอย่าง RSS ประเภท 3 ที่เตรียมเสร็จเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 3.11 การทดสอบหาค่า wide-width tensile strength ด้วย UTM

3.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและกำลังรับแรงดึงสูงสุดของ RSS

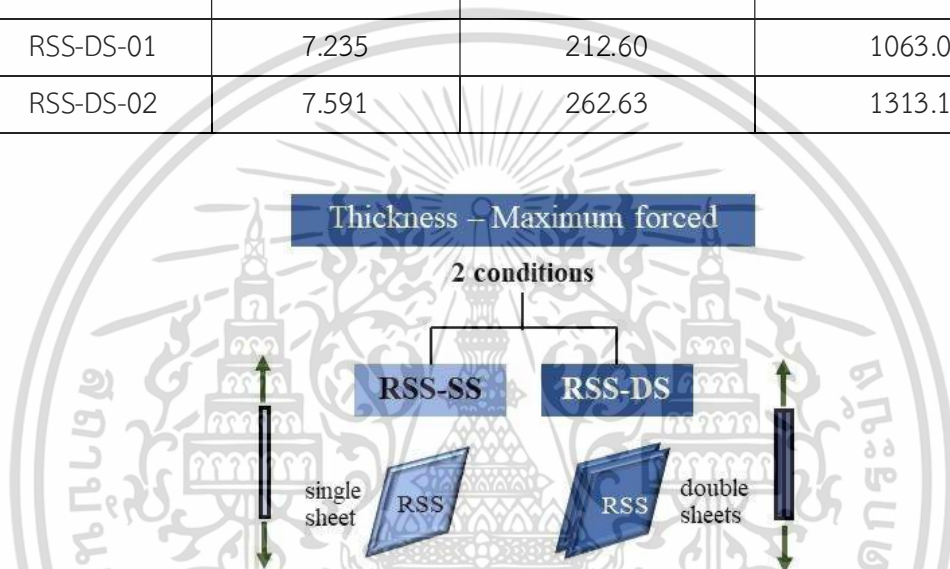
การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและกำลังรับแรงดึงสูงสุดของ RSS ศึกษาทั้งหมด 2 เงื่อนไข ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ประกอบด้วย RSS ในเงื่อนไขแผ่นเดียว (RSS-SS) จำนวน 2 ตัวอย่าง คือ RSS-SS-01 (ตัวอย่างที่ 1) และ RSS-SS-02 (ตัวอย่างที่ 2) และเงื่อนไขสองแผ่น (RSS-DS) จำนวน 2 ตัวอย่าง คือ RSS-DS-01 (ตัวอย่างที่ 1) และ RSS-DS-02 (ตัวอย่างที่ 2) ซึ่งเป็นการวางซ้อนกันแบบไม่ได้ยึดติดด้วยกาวติดประสาน โดย ตารางที่ 3.3 แสดงถึงผล wide-width tensile strength ของทุกเงื่อนไข จากการทดสอบสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและกำลังรับแรงดึงสูงสุดของ RSS ได้ดังรูปที่ 3.14 โดยมีสมการความสัมพันธ์ คือ $y = 7.628x^3 -$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

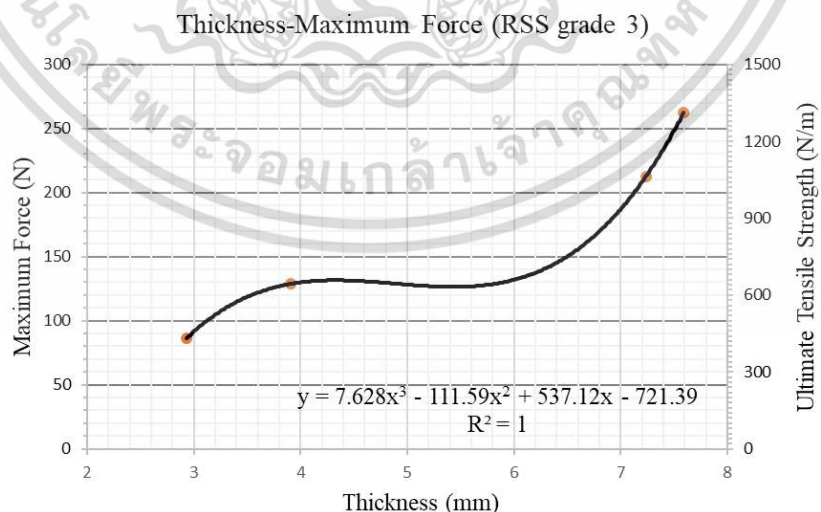
$111.59x^2 + 537.12x - 721.39$ โดยแกน x คือความหนา และแกน y คือกำลังรับแรงดึง สมการดังกล่าวมี R^2 เท่ากับ 1

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงผลการทดสอบแรง (Wide-Width Tensile Test) ของ RSS ในเงื่อนไข SS (RSS-SS) จำนวน 2 ตัวอย่าง และเงื่อนไข DS (RSS-DS) จำนวน 2 ตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ความหนา (mm)	แรงดึงสูงสุด (N)	หน่วยแรงดึงสูงสุด (N/m)
RSS-SS-01	2.929	86.23	431.15
RSS-SS-02	3.909	128.80	644.00
RSS-DS-01	7.235	212.60	1063.00
RSS-DS-02	7.591	262.63	1313.15

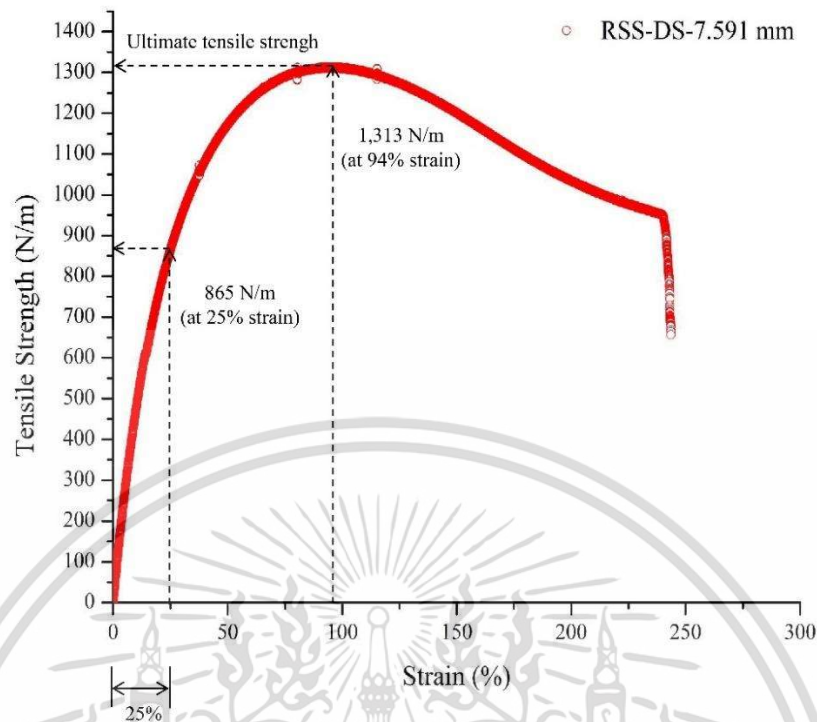


รูปที่ 3.13 แผนภาพเงื่อนไขการทดสอบความความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและกำลังรับแรงดึงสูงสุดของ RSS ในเงื่อนไข RSS-SS และ RSS-DS



รูปที่ 3.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและกำลังรับแรงดึงสูงสุดของ RSS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง tensile strength กับ strain ของ RSS ในเงื่อนไข RSS-DS-02

3.2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติ Axial Stiffness (EA) ของ RSS

ดังที่ทราบดีว่าค่า axial stiffness (EA) ของวัสดุใด ๆ นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.7 แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติดังกล่าวจำเป็นต้องทดสอบ wide-width strip method ก่อน เพื่อหากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง tensile strength กับ strain ของวัสดุ โดยรูปที่ 3.15 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง tensile strength กับ strain ของ RSS ซึ่งเป็นตัวแทนผลการทดสอบจากตัวอย่าง RSS-DS-02 ซึ่งมีความหนา 7.591 มิลลิเมตร จากผลการทดสอบในรูปที่ 3.15 แสดงให้เห็นว่ามีค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) เท่ากับ 1.313 กิโลนิวตันต่อเมตร (kN/m) และสามารถคำนวณค่า axial stiffness (EA) ของ RSS มีค่าเท่ากับ 3.460 กิโลนิวตันต่อเมตร (kN/m) ที่เปอร์เซ็นต์ strain เท่ากับ 25% ซึ่งยังมีความเป็น elastic อยู่ โดยค่าดังกล่าวถูกนำไปใช้ต่อไปในส่วนของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D

วิธีการคำนวณ

EA หรือ axial stiffness ของ RSS ที่ 25% strain (0.865 kN/m)

คำนวณด้วยสมการที่ 2.7 โดยจากรูปที่ 3.15 มีค่า $T = 0.865$ kN/m มีค่า $\Delta L/L = 0.25$

$$EA = \frac{T}{\Delta L/L}$$

$$EA = \frac{0.865}{0.25} = 3.460 \text{ kN/m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

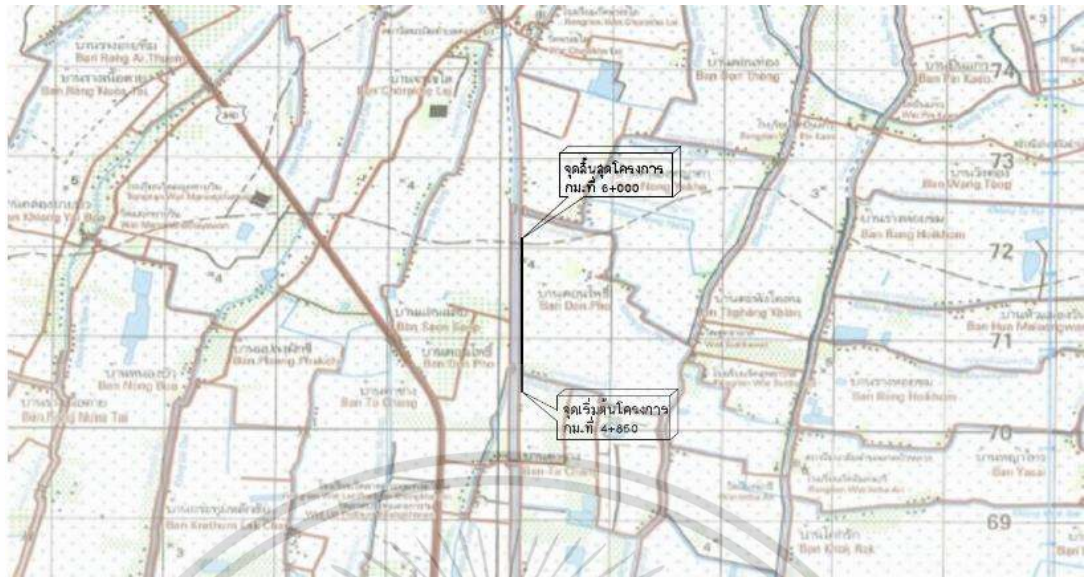
3.3 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ของการเสริมกำลัง RSS-Geogrid ในคันดินต่างชนิด

3.3.1 ขอบเขตการศึกษา

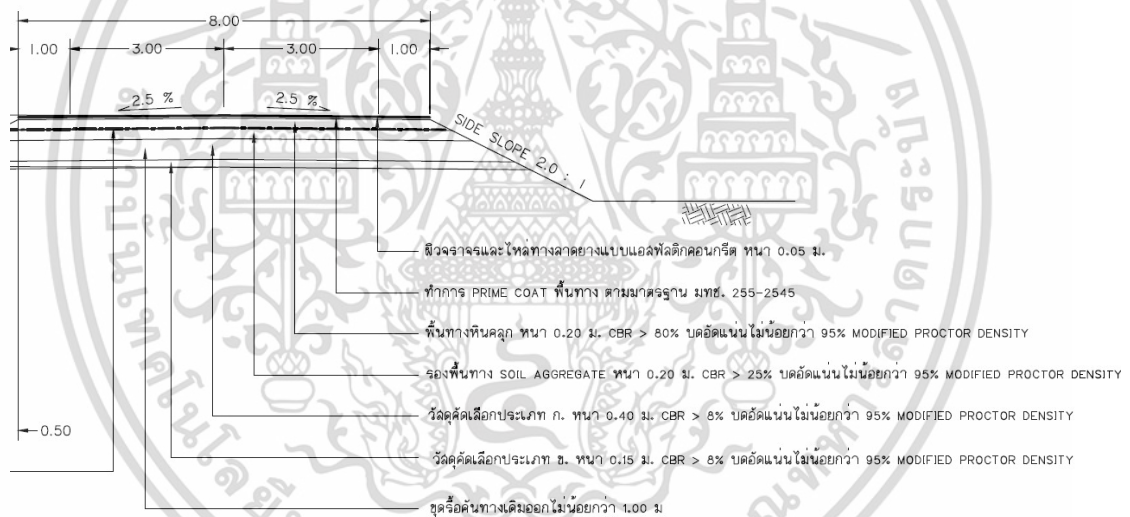
1. ใช้ PLAXIS 2D connect edition V20 ในการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ภายใต้เงื่อนไข plane strain condition สอดคล้องกับความยาวของถนนในแนวแกน z
2. ใช้ข้อมูลดินเดิมจากพื้นที่ศึกษาสายทาง อย.5034 ต.ดอนทอง อ.ลาดบัวหลวง และ อ.เสนา จ.พระนครศรีอยุธยา
2. เปรียบเทียบความถูกต้องของข้อมูลดินเดิมและแบบจำลอง (validate) จากข้อมูลการตรวจวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างของดินในสนามที่ 462 วัน ด้วย inclinometer
3. ใช้ Mohr-Coulomb model (MCM) และ soft soil model (SSM) ในการจำลองพฤติกรรมของดิน
4. ใช้ข้อมูลดินในส่วนคันดิน (embankment) จากงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์แล้ว โดยคันดินถนน (road embankment) อ้างอิงจาก Wulandari and Tjandra (2015) และคันดินทราย (sand embankment) อ้างอิงจาก Chaiyaput et al. (2014) ซึ่งเป็นคันดินที่มีวัสดุเดียวกันทั้งคันดิน
5. ใช้แนวคิดอัตราส่วนต่อความสูง u/H และ $h(N-1)/H$ ในการหาตำแหน่งที่เหมาะสม
6. ใช้ factor of safety (FS) เป็นตัวบ่งบอกเสถียรภาพของลาดดิน โดยวิธี phi-c reduction

3.3.2 พื้นที่ศึกษาและข้อมูลเบื้องต้นของโครงการ (Study Area)

โครงการปรับปรุงเสริมกำลังคันทางในพื้นที่ดินอ่อน สายทาง อย.5034 ตั้งแต่ กม.ที่ 4+850 ถึง กม.ที่ 6+000 เป็นโครงการที่เกิดขึ้นโดยสำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา กรมทางหลวงชนบท ตั้งอยู่ที่ ต.ดอนทอง อ.ลาดบัวหลวง และ อ.เสนา จ.พระนครศรีอยุธยา เป็นสายทางที่ผ่านพื้นที่ 2 อำเภอดังกล่าว (รูปที่ 3.16) มีลักษณะเป็นผิวทางลาดยางกว้าง 6.00 m และไหล่ทางกว้างข้างละ 1.00 m เป็นถนนที่ติดกับคลองสาธารณะหรือคลองชลประทาน (คลองขุนศรี) หนึ่งด้าน มีรายละเอียดของชั้นผิวทางและภาพตัดของถนนดังแสดงในรูปที่ 3.17 (กรมทางหลวงชนบท, 2560) และข้อมูลชั้นดินมี boring log หมายเลข BH-1 จากการสำรวจสายทาง อย.5034 กม.ที่ 6+200 ซ้ายทาง ต.ดอนทอง อ.เสนา จ.พระนครศรีอยุธยา ดังแสดงในรูปที่ 3.18 (กรมทางหลวงชนบท, 2559) ซึ่งระดับน้ำในคลองขุนศรีอยู่ที่ระดับ -1.50 เมตร จากระดับดินเดิม (ดู boring log รูปที่ 3.18)

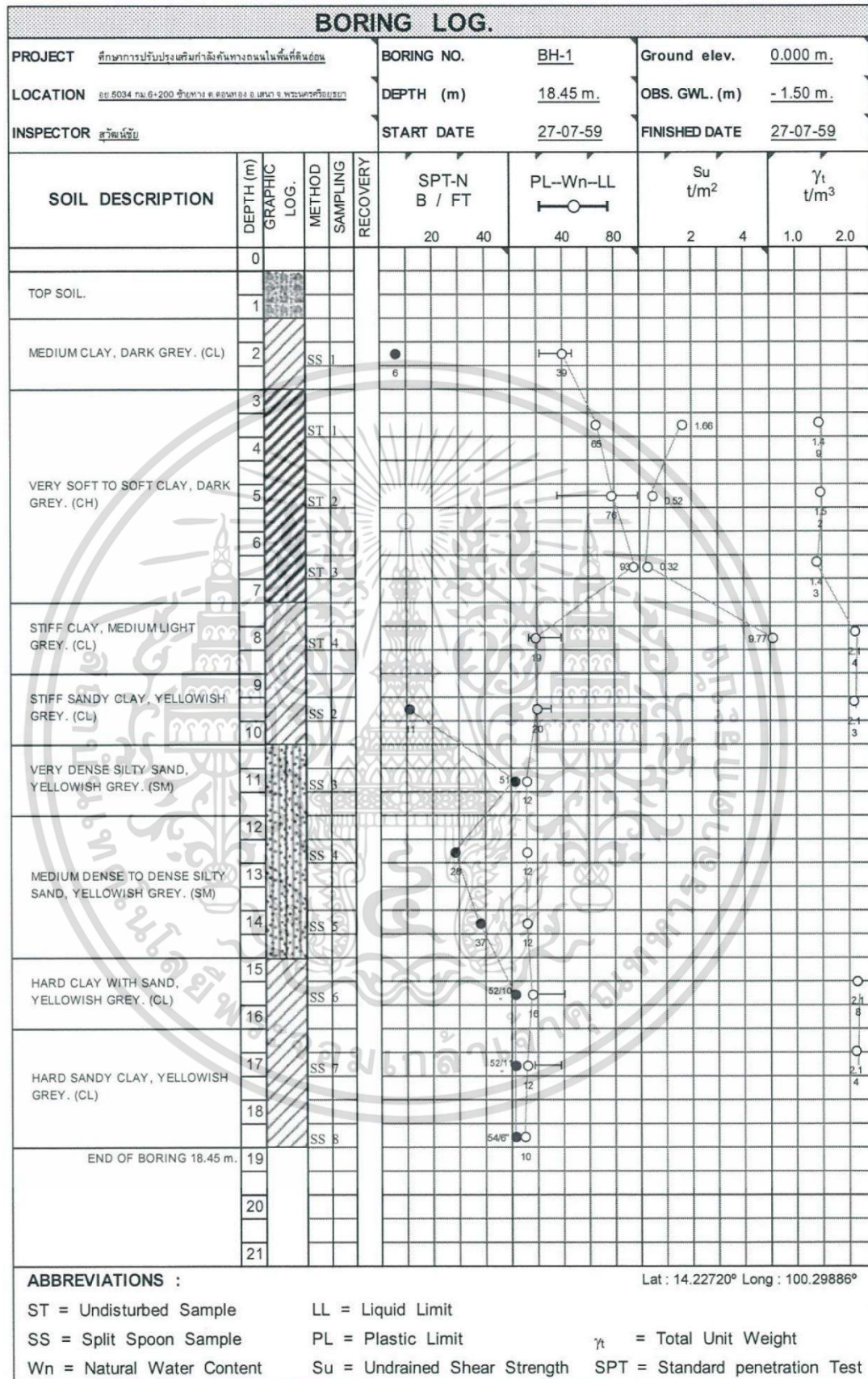


รูปที่ 3.16 แผนที่บริเวณที่ตั้งของสายทาง อย.5034 (กรมทางหลวงชนบท, 2560)



รูปที่ 3.17 รายละเอียดของชั้นผิวทางและภาพตัดของถนนสายทาง อย.5034 (กรมทางหลวงชนบท, 2560)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



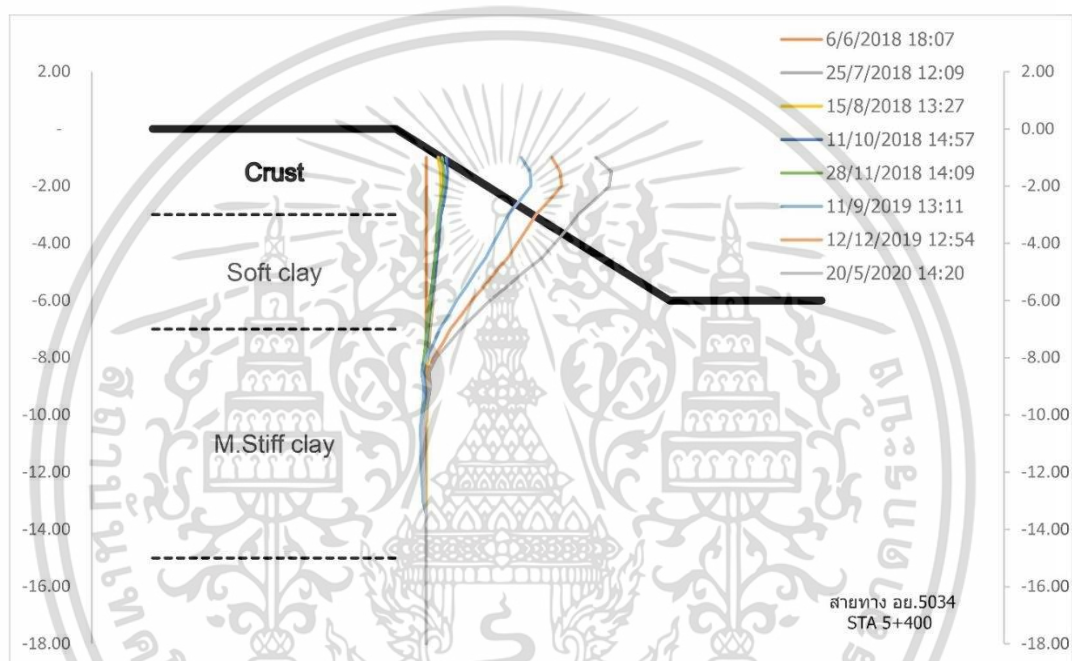
รูปที่ 3.18 ข้อมูลชั้นดินมี boring log หมายเลข BH-1 จากการสำรวจสายทาง อย.5034 กม.ที่

6+200 (กรมทางหลวงชนบท, 2559)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถนนสายทาง อย.5034 เป็นถนนที่สร้างบนชั้นดินอ่อน ติดกับคลองขุนศรี ซึ่งระดับน้ำในคลองขุนศรีอยู่ที่ระดับ -1.50 เมตรจากระดับดินเดิม (ดู boring log รูปที่ 3.18) ทำให้ถนนสายนี้เกิดการวิบัติโดยมีการเคลื่อนตัวด้านข้างแบบเล็กน้อยเกิดขึ้น กรมทางหลวงชนบทจึงทำการติดตั้ง inclinometer เพื่อวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างของคันดิน ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำไป validate กับผลการเคลื่อนตัวด้านข้างของดินที่จำลองในโปรแกรม PLAXIS เพื่อเป็นการสนับสนุนว่าข้อมูลดินที่ใช้ในโปรแกรมนั้นถูกต้อง โดยในการศึกษานี้อ้างอิงข้อมูลการเคลื่อนตัวของดินบริเวณ กม.ที่ 5+400 เก็บข้อมูลวันที่ 11/09/2019 หรือ 462 วันนับจากวันแรกที่ติดตั้งเครื่องตรวจวัดเป็นหลัก (รูปที่ 3.19)



รูปที่ 3.19 ข้อมูลการเคลื่อนตัวของดินทางด้านข้างของคันทางถนนสาย อย.5034 กม.ที่ 5+400 (กรมทางหลวงชนบท)

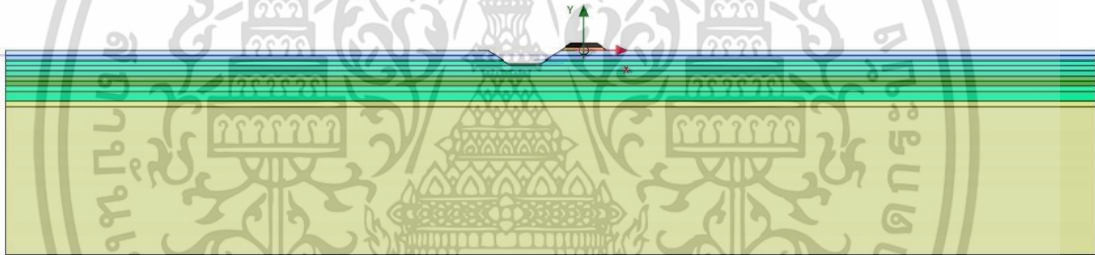
3.3.3 การสร้างแบบจำลองดินเดิม (Subsoil) และคันดิน (Embankment)

ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม PLAXIS สองมิติ (2D) connect edition V20 ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของคันดิน เป็นโปรแกรมที่มีความสามารถสูงในการประมวลผลและวิเคราะห์ปัญหาทางธรณีเทคนิค งานวิจัยนี้ได้ใช้ชนิดของแบบจำลองเป็น plane strain condition ด้วยกับ element 15-noded ใช้หน่วยของความยาว แรง และเวลา เป็นหน่วย เมตร (m), กิโลนิวตัน (kN) และ วัน (day) ตามลำดับ โดยขอบเขตของแบบจำลอง $x(\min)$, $x(\max)$, $y(\min)$, และ $y(\max)$ เท่ากับ -175, 155, -60, 4 m ตามลำดับ ซึ่งขอบเขตของแบบจำลองมากกว่า 5 เท่าของความสูงของคันดิน จึงเพียงพอสำหรับการสร้าง boundary condition ในแบบจำลอง

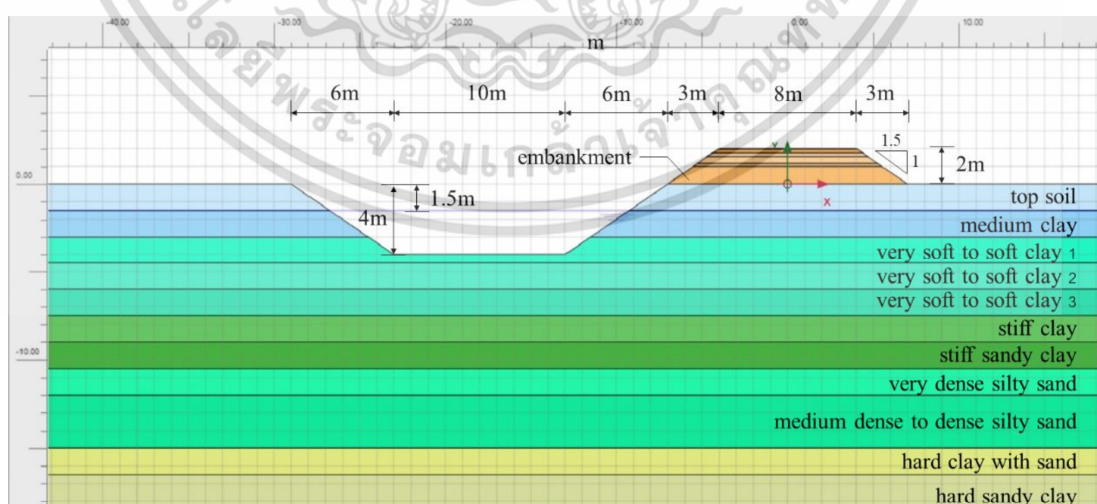
จากรูปที่ 3.20 แสดงถึงรูปทรงเรขาคณิตและขนาด (geometry and dimensions) ของแบบจำลองทั้งหมดที่นำมาใช้ใน numerical modeling และรูปที่ 3.21 แสดงถึงรูปทรงเรขาคณิต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแบบจำลองในส่วนเฉพาะบริเวณคันทาง อย.5034 พร้อมทั้งระบุขนาดความกว้างของคันทางและ
 คลองขุนศรีด้วย โดยคันทางมีความสูง 2 เมตร จากชั้นดินเดิม มีความกว้างของถนนรวมไหล่ทาง
 ทั้งหมด 8 เมตร มีความชันด้านข้าง (side slope) $y : x$ เท่ากับ $1 : 1.5$ นอกจากนี้ยังแสดง
 รายละเอียดของความกว้างใต้คลองเท่ากับ 10 เมตร และความลึกคลองจากผิวถนนมีค่าเท่ากับ 6
 เมตร และมีความชันด้านข้างเช่นเดียวกับคันทาง (คือ $1 : 1.5$) มีระดับน้ำในคลองขุนศรีอยู่ที่ระดับ
 -1.50 เมตร จากระดับดินเดิม (ดู boring log รูปที่ 3.18) ในรูปดังกล่าวแสดงลักษณะชั้นดินใต้คัน
 ทางว่ามีลักษณะเป็นชั้นดินทั้งหมด 11 ชั้นอ้างอิงจากการเจาะสำรวจ โดยชั้นดินจากชั้นบนสุดจนถึงใต้
 สุดมีชื่อเรียกดังนี้ คือ top soil, medium clay, very soft to soft clay 1, very soft to soft clay
 2, very soft to soft clay 3, stiff clay, stiff sandy clay, very dense silty sand, medium
 dense to dense silty sand, hard clay with sand, และ hard sandy clay ตามลำดับ ในส่วน
 ของรายละเอียดของแบบจำลองนั้น ชั้นดินที่ 1 – 5 (top soil ถึง very soft to soft clay 3) ถูก
 จำลองโดยใช้แบบจำลอง soft soil model (SSM) และชั้นดินที่ 6 – 11 (stiff clay ถึง hard sandy
 clay) ถูกจำลองโดยใช้แบบจำลอง Mohr-Coulomb model (MCM)



รูปที่ 3.20 รูปทรงเรขาคณิต (geometry) ของแบบจำลองในภาพรวมทั้งหมด



รูปที่ 3.21 รูปทรงเรขาคณิตและขนาด (geometry and dimensions) ของคันทาง อย.5034 ใน

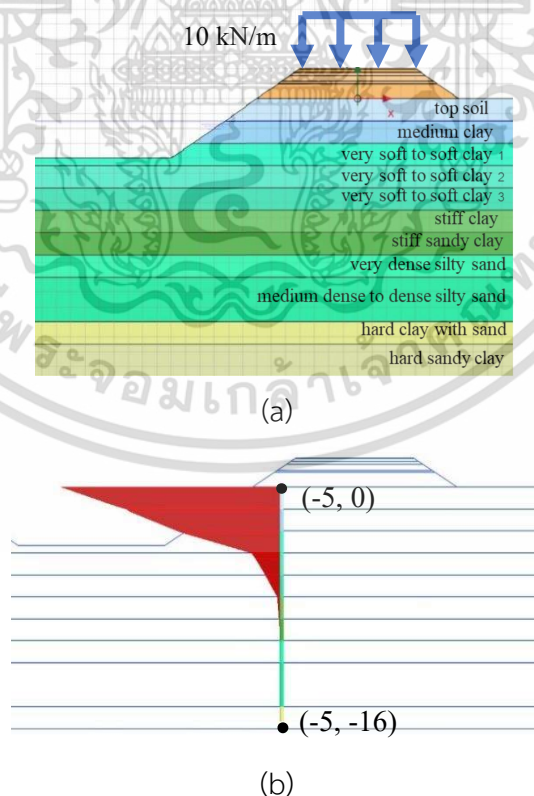
แบบจำลองพร้อมพิกัดของรูปทรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

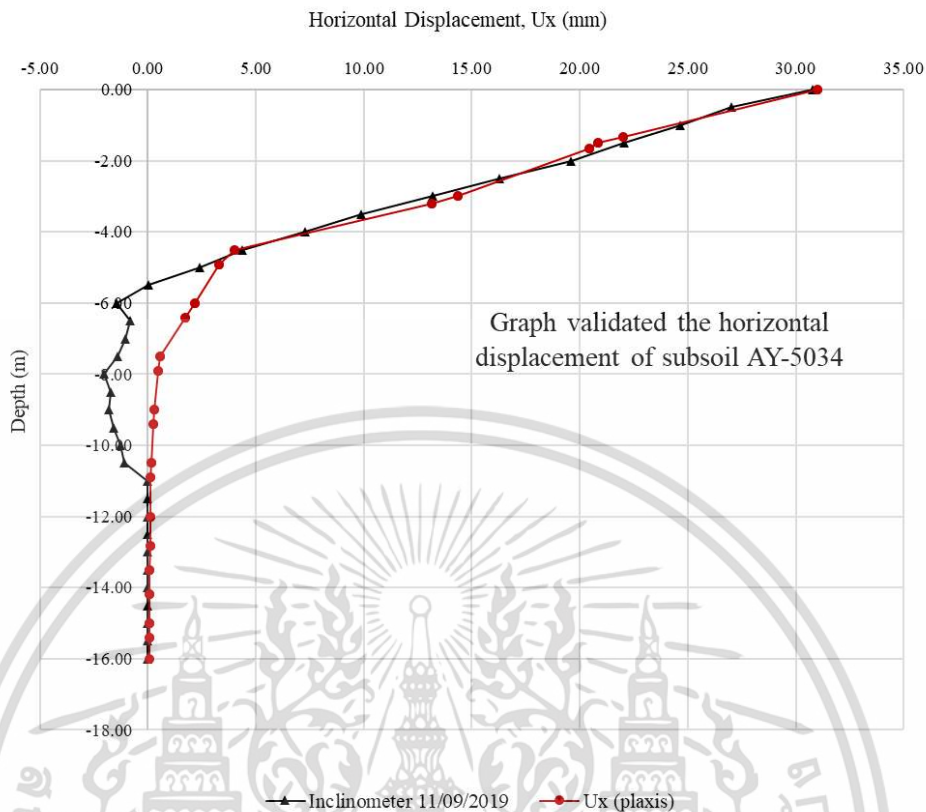
3.3.4 การเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง (Numerical Model Validation)

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ในงานวิจัยนี้ใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวราบ (u_x) กับความลึกของชั้นดิน (depth) เปรียบเทียบระหว่างค่าการเคลื่อนที่วัดได้จริงในสนาม และผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D จากรูปที่ 3.22 แสดงให้เห็นถึงการประมาณการเคลื่อนที่ด้านข้างของดินเดิมในแบบจำลอง มีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดอยู่ที่ 31.02 มิลลิเมตร โดยมีขั้นตอนคือให้น้ำหนักบนดินเดิมจากการสร้างคันดิน (embankment) (ดูคุณสมบัติของคันดินที่ให้น้ำหนักที่ภาคผนวก ค. ตาราง ค.1) และน้ำหนักจาก load เป็นค่าเท่ากับ 10.00 กิโลนิวตันต่อเมตร จากนั้นทำการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ด้านข้างของดินเดิมจากจุดพิกัด (-5, 0) ถึง (-5, -16) อ้างอิงจากการวัดจริงในสนาม จากนั้นทำการเปรียบเทียบระยะเวลาการเคลื่อนที่ด้านข้างของแบบจำลองและในสนาม ดังแสดงในรูปที่ 3.23 แสดงถึงการเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวราบ (u_x) กับความลึกของชั้นดิน (depth) ระหว่างค่าที่วัดได้จริง ณ วันที่ 11/09/2019 (ตัวทำเครื่องหมายสามเหลี่ยม) เทียบกับค่าที่ประมาณจาก PLAXIS (ตัวทำเครื่องหมายวงกลม) สังเกตเห็นได้ว่าค่าคุณสมบัติของดินที่ใส่ในแบบจำลองนั้นถูกปรับแก้และได้รับการยืนยันจากค่าการเคลื่อนที่จริงแล้ว และชุดข้อมูลทั้งสองเป็นไปในแนวทางเดียวกัน จึงถือว่าเป็นค่าที่เชื่อถือได้



รูปที่ 3.22 การเปรียบเทียบข้อมูลดินเดิม (a) ให้น้ำหนักแก่ดินเดิม (b) ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ในแนวราบ (u_x) ในแบบจำลองมีค่าสูงสุดที่ 31.02 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 การเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวราบ (u_x) กับความลึกของชั้นดิน (depth) ระหว่างค่าที่วัดได้จริง ณ วันที่ 11/09/2019 เทียบกับค่าที่ประมาณจาก PLAXIS

3.3.5 คุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้อง (Material Properties)

3.3.5.1 คุณสมบัติของดินเดิม (Subsoil)

คุณสมบัติของดินเดิม (subsoil) ที่ผ่านการปรับเทียบแล้วจากข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวราบในสนาม ถูกแสดงในตารางที่ 3.4

3.3.5.2 คุณสมบัติของคันดินถนนและคันดินทราย (Road and Sand Embankment)

คุณสมบัติของคันดินถนนและคันดินทราย (road and sand embankment) ได้รับมาจากการวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์แล้ว โดยคันดินถนน (road embankment) อ้างอิงจาก Wulandari and Tjandra (2015) และคันดินทราย (sand embankment) อ้างอิงจาก Chaiyaput et al. (2014) ดังตารางที่ 3.5 ซึ่งเป็นคันดินที่มีวัสดุเดียวกันทั้งคันดินมีลักษณะเป็น unpaved road

3.3.5.3 คุณสมบัติของ RSS-Geogrid

คุณสมบัติของ RSS-Geogrid ที่ได้รับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ไม่ว่าจะมีความหนา (thickness), wide-width tensile strength, และ axial stiffness (EA) ดังตารางที่ 3.6 ซึ่งมีกำลังเทียบเท่ากับ geogrid ในตลาดบางประเภท (ดูตารางที่ 2.10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของดินเดิม (subsoil) ที่ผ่านการปรับเทียบแล้วในแบบจำลอง

No.	Material	Depth (m)	Model	Material behavior	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{un} (kN/m ³)	E_{ref} (kPa)	ν'	λ^*	K^*	c' (kPa)	ϕ' (deg)	OCR
1	Top soil	0-1.5	SSM	Undrained	15.00	13.00			0.17	0.020	14.02	25.00	1.2
2	Medium clay	1.5-3.0	SSM	Undrained	16.50	14.50			0.12	0.020	15.00	25.00	1.2
3	Very soft to soft clay 1	3.0-4.5	SSM	Undrained	15.00	13.00			0.10	0.009	14.00	25.00	1.2
4	Very soft to soft clay 2	4.5-6.0	SSM	Undrained	15.00	13.00			0.03	0.009	10.00	25.00	1.2
5	Very soft to soft clay 3	6.0-7.5	SSM	Undrained	15.00	13.00			0.03	0.009	10.00	25.00	1.2
6	Stiff clay	7.5-9.0	MCM	Undrained	21.00	19.00	19000.00	0.25			95.00	-	
7	Stiff sandy clay	9.0-10.5	MCM	Undrained	21.00	19.00	21000.00	0.25			105.00	10.00	
8	Very dense silty sand	10.5-12.0	MCM	drained	22.00	20.00	53000.00	0.30			5.00	40.00	
9	Medium dense to dense silty sand	12.0-15.0	MCM	drained	22.00	20.00	53000.00	0.30			5.00	35.00	
10	Hard clay with sand	15.0-16.5	MCM	Undrained	21.00	19.00	30000.00	0.25			150.00	10.00	
11	Hard sandy clay	16.5-19.0	MCM	Undrained	22.00	20.00	54000.00	0.25			270.00	10.00	

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของคันดินถนนและคันดินทรายที่อ้างอิงจาก Wulandari and Tjandra (2015) และ Chaiyaput et al. (2014) ตามลำดับ

No.	Material	Material Behavior	γ_{unsat}	γ_{sat}	E	c	ϕ	ψ	R_{in}
			(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kPa)	(kPa)	(°)	(°)	
1	Fill material (road embankment)	MCM	18	18	50000	1.0	33.00	3.00	0.8
2	Sand (sand embankment)	MCM	18	20	7500	11.3	35.63		0.8

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติของ RSS-geogrid ซึ่งมีกำลังเทียบเท่ากับ geogrid ในตลาดบางประเภท (ดูตารางที่ 2.10)

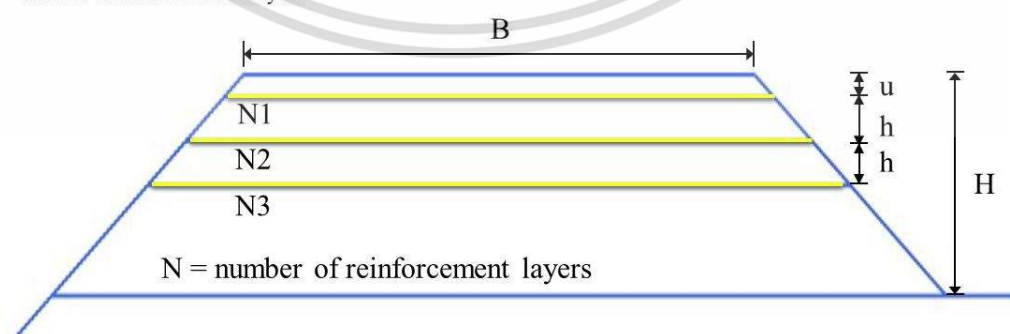
No.	Properties	RSS-geogrid
1	Mesh type	Rectangular apertures
2	Apertures size (mm)	20 x 20
3	Gauge length (mm)	100
4	Width of sample (mm)	200
5	Thickness (mm)	7.591
6	Ultimate tensile strength, T_{ult} (kN/m)	1.313
7	Axial stiffness, EA (kN/m)	3.460

3.3.6 การกำหนดตัวแปร (Variable Assignment)

3.3.6.1 การกำหนดสัญลักษณ์ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

เป็นส่วนที่สำคัญมาก ๆ ในงานวิจัยในส่วนการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D โดยทำการกำหนดตัวแปรดังรูปที่ 3.24 กล่าวคือให้ตัวแปร u หมายถึงระยะห่างของชั้นเสริมกำลังชั้นแรกกับผิวถนนที่รับแรง (distance of topmost layer from the road surface), ตัวแปร h หมายถึงระยะห่างระหว่างชั้นเสริมกำลังแต่ละชั้น (distance between reinforcement layers), ตัวแปร H หมายถึงความสูงทั้งหมดของคันดิน (height of embankment), ตัวแปร B หมายถึงความกว้างของคันดินหรือความกว้างของถนน (width of road embankment), และตัวแปร N หมายถึงจำนวนชั้นเสริมกำลังในคันดิน (number of reinforcement layers)

B = width of road embankment (m)
 u = distance of topmost layer (1st layer) from the road surface (m)
 h = distance between reinforcement layers (m)
 H = height of embankment (m)
 N = number of reinforcement layers



รูปที่ 3.24 การกำหนดสัญลักษณ์ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับรูปร่างคันดินและตำแหน่งเสริมกำลังในงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6.2 แนวคิดอัตราส่วนต่อความสูงของ u/H และ $h(N-1)/H$

แนวคิดอัตราส่วนต่อความสูงของ u/H และ $h(N-1)/H$ จะถูกนำมาใช้เป็นแนวคิดหลักในการกำหนดตัวแปรตำแหน่งการเสริมกำลัง (variables of reinforcement positions) โดยอัตราส่วนต่อความสูงของคันดิน (embankment) ขึ้นอยู่กับตัวแปร u , h , H , และ N คือ ระยะห่างของชั้นเสริมกำลังชั้นแรกกับผิวถนนที่รับแรง, ระยะห่างระหว่างชั้นเสริมกำลังแต่ละชั้น, ความสูงทั้งหมดของคันดิน, และจำนวนชั้นเสริมกำลังในคันดิน ตามลำดับ ซึ่งจะถูกนำเสนอในรูปแบบของตัวแปร u/H และ $h(N-1)/H$ โดยตัวแปรทั้งหมดมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.4 เรียกสมการนี้ว่า ‘สมการทั่วไปของอัตราส่วนต่อความสูง u/H และ $h(N-1)/H$ ’

$$u+(N-1)h \leq H \quad (3.4)$$

ซึ่งตัวแปรตำแหน่งการเสริมกำลังที่ใช้แนวคิดอัตราส่วนต่อความสูง (คือ u/H และ $h(N-1)/H$) มีเงื่อนไขการใช้งาน คือ สำหรับกรณีจำนวนชั้นเสริมกำลัง N เท่ากับ 1 ชั้น ($N=1$) เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 3.4 แล้ว ค่าตัวแปร u/H ที่ได้จะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 ($u/H \leq 1$) และไม่มีค่าตัวแปรในเทอมของ $h(N-1)/H$ แต่สำหรับกรณีจำนวนชั้นเสริมกำลัง N มีค่ามากกว่า 1 ชั้น ($N=2, 3$) เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 3.4 แล้ว ค่าตัวแปร u/H ที่ได้จะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.5 ($u/H \leq 0.5$) และค่าตัวแปร $h(N-1)/H$ ที่ได้จะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.5 ($h(N-1)/H \leq 0.5$) เช่นกัน

โดยเงื่อนไขการใช้งานตัวแปรตำแหน่งการเสริมกำลังที่ใช้แนวคิดอัตราส่วนต่อความสูง (คือ u/H และ $h(N-1)/H$) สามารถสรุปได้ดังนี้

สำหรับ $N=1$	เงื่อนไข	u/H	≤ 1
สำหรับ $N=2, 3$	เงื่อนไข	u/H	≤ 0.5
		$h(N-1)/H$	≤ 0.5

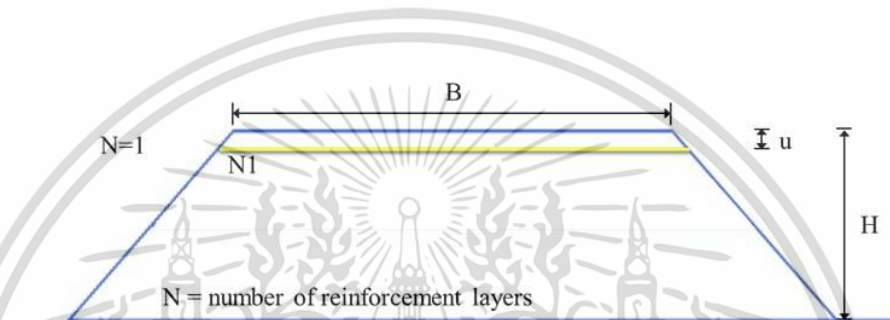
เงื่อนไขการใช้งานที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นถูกกำหนดขึ้นเพื่อไม่ให้ชั้นเสริมกำลังอยู่ต่ำกว่าระดับดินเดิม (subsoil) เนื่องจากวัตถุประสงค์หลักของการเสริมกำลังในงานวิจัยนี้คือ เสริมกำลังในชั้นคันดิน (embankment) เท่านั้น และหมายเหตุที่เลือกวิเคราะห์การเสริมกำลังสูงสุดเพียงแค่ 3 ชั้นนั้น เนื่องจากงานวิจัยของ Esmaili et al. (2018) ที่ชื่อว่า Investigating the Effect of Geogrid on Stabilization of High Railway Embankments ได้ทำการทดลองในแบบจำลองคันดินถมที่ไม่ได้เสริมแรงด้วย geogrid และแบบจำลองที่มีการเสริมกำลังด้วย geogrid ตั้งแต่ 1 - 4 ชั้น (layers) จากผลการทดลองได้ระบุไว้ว่าการเพิ่มจำนวนชั้นของ geogrid เสริมกำลังจะเพิ่มกำลังรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักแบกทานและลดการทรุดตัวของคันดินถมอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตามการเพิ่มจำนวนชั้นของ geogrid มากขึ้นไป จะส่งผลต่อการเสริมกำลังน้อยลง โดยข้อสรุปคือเมื่อเสริมกำลัง 4 ชั้น จะไม่ส่งผลให้กำลังรับน้ำหนักแบกทานเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญแล้ว

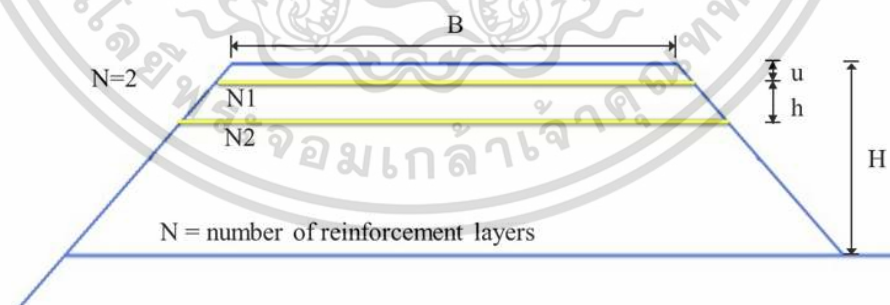
3.3.6.3 ที่มาและการพิสูจน์สมการทั่วไปของอัตราส่วนต่อความสูง u/H และ $h(N-1)/H$

ในส่วนของที่มาและการพิสูจน์สมการดังกล่าว (สมการที่ 3.4) นั้นสามารถอธิบายได้ โดยง่ายจากรูปที่ 3.25, 3.26, และ 3.27 ซึ่งเป็นการแสดงรูปภาพพร้อมคำอธิบายที่มาของสมการอย่างละเอียด ดังนี้



รูปที่ 3.25 ตัวแปรตำแหน่งการเสริมกำลังในกรณี N=1

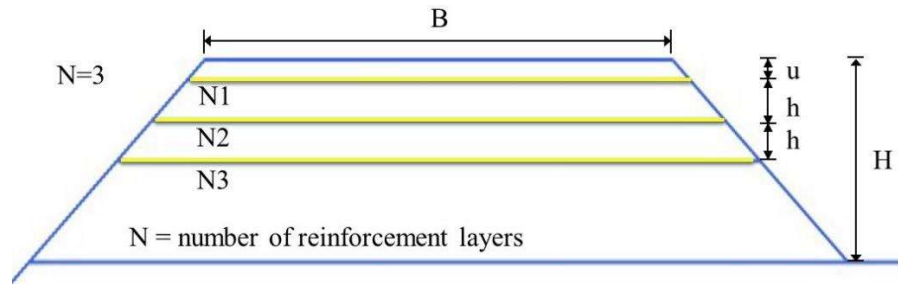
จากรูปที่ 3.25 เขียนสมการได้ว่า $u+0(h) \leq H$
 โดย $N = 1$ ดังนั้นอยู่ในรูปทั่วไปของ $u+(N-1)(h) \leq H$
 จะได้ $u_{\min}=0H, u_{\max}=1H$



รูปที่ 3.26 ตัวแปรตำแหน่งการเสริมกำลังในกรณี N=2

จากรูปที่ 3.26 เขียนสมการได้ว่า $u+1(h) \leq H$
 โดย $N = 2$ ดังนั้นอยู่ในรูปทั่วไปของ $u+(N-1)(h) \leq H$
 จะได้ $u_{\min}=0H, u_{\max}=0.5H$
 $(1)h_{\min}=0H, (1)h_{\max}=0.5H$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 ตัวแปรตำแหน่งการเสริมกำลังในกรณี N=3

จากรูปที่ 3.27 เขียนสมการได้ว่า

$$u+2(h) \leq H$$

โดย $N = 3$ ดังนั้นอยู่ในรูปทั่วไปของ

$$u+(N-1)(h) \leq H$$

จะได้

$$u_{\min}=0H, \quad u_{\max}=0.5H$$

$$(2)h_{\min}=0H, \quad (2)h_{\max}=0.5H$$

โดยการสื่อความหมายของตัวแปรในเทอมต่าง ๆ ยกตัวอย่างได้ดังนี้ เช่น กำหนดให้ระยะ H ของคันดินเท่ากับ 2 เมตร และจำนวนชั้นเสริมกำลัง N เท่ากับ 3 ถ้าหากเมื่อ u/H เท่ากับ 0.2 ($u/H=0.2$) อ่านว่าระยะ u ต่อระยะ H มีอัตราส่วนเท่ากับ 0.2 หมายความว่าระยะ u เท่ากับ 20% ของระยะ H คือ u เท่ากับ 0.4 เมตร ในขณะเดียวกันถ้าหากเมื่อ $h(N-1)/H$ เท่ากับ 0.2 อ่านว่าระยะ $h(N-1)$ ต่อระยะ H มีอัตราส่วนเท่ากับ 0.2 หมายความว่าระยะ $h(N-1)$ เท่ากับ 20% ของระยะ H คือ $h(N-1)$ เท่ากับ 0.4 เมตร เมื่อแทนค่า N เท่ากับ 3 จะได้ $h(2)$ เท่ากับ 0.4 เมตร หรือ h เท่ากับ 0.2 เมตร เป็นต้น

ข้อจำกัดของการใช้สมการทั่วไปของอัตราส่วนต่อความสูง u/H และ $h(N-1)/H$ มีดังนี้

1. กำหนดให้ load คงที่และกระทำเป็นระยะเท่ากับความกว้างถนน B
2. สนใจเฉพาะ u , h , และ N ที่เปลี่ยนแปลง โดย H คงที่ (งานวิจัยนี้ $H=2$ เมตร)
3. ไม่สนใจผลกระทบเนื่องจาก side slope ที่เปลี่ยนแปลง

3.3.7 เงื่อนไขการศึกษา (Study Condition)

3.3.7.1 การศึกษาจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังคันดินถนน

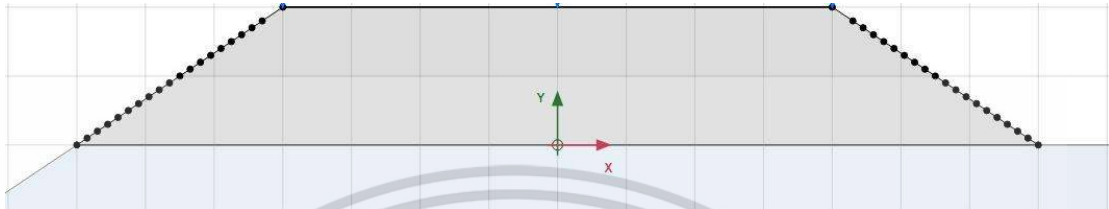
หนึ่งในวัตถุประสงค์หลักในงานวิจัยก็คือเพื่อศึกษาจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังคันดินถนน (road embankment) ซึ่งมีคุณสมบัติตามตารางที่ 3.5 ด้วย RSS-geogrid เมื่อจำลองด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D ซึ่งประยุกต์ใช้แนวคิดอัตราส่วนต่อความสูง u/H และ $h(N-1)/H$ เป็นตัวแปรบอกตำแหน่งการเสริมกำลัง โดยทำการศึกษาทั้งหมด 4 เงื่อนไขใหญ่ คือ $N=0$, $N=1$, $N=2$, และ $N=3$ (ดังแสดงในตารางที่ 3.7, 3.8,

3.9, และ 3.10 ตามลำดับ) ทั้งหมด 61 เงื่อนไขย่อย โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่า N , h , และ u (ค่า H

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คงที่เท่ากับ 2 เมตร) ซึ่งต้องคำนึงถึงเงื่อนไขการใช้งานตัวแปรตำแหน่งการเสริมกำลังที่ใช้แนวคิดอัตราส่วนต่อความสูงด้วย

ในแต่ละเงื่อนไขจะมีชื่อเรียกหรือชื่อย่อเพื่อแทนเงื่อนไขนั้น ๆ โดยในกรณี $N=0$ (non-reinforced condition) มีเงื่อนไขย่อยเพียงหนึ่ง คือ $N0$ (รูปที่ 3.28) ดังตารางที่ 3.7

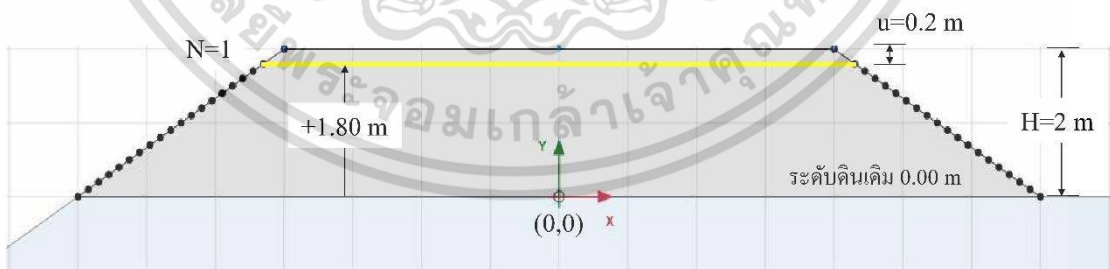


รูปที่ 3.28 เงื่อนไขไม่เสริมกำลัง $N0$ ของคันดินถนน

ในกรณีถัดมา $N=1$ (number of RSS-geogrid reinforcement layer = 1) โดยมีเงื่อนไขย่อยทั้งหมด 10 เงื่อนไขดังตารางที่ 3.8 ตัวอย่างการเรียกชื่อย่อในเงื่อนไข เช่น $N1-u_1$ หมายถึง เสริมกำลังด้วย RSS-geogrid 1 ชั้น ($N1$) ด้วยตำแหน่งการเสริมกำลังชั้นแรกที่ $u/H=0.1$ (u_1) (ดังแสดงภาพตำแหน่งการเสริมกำลังในรูปที่ 3.29) เช่นเดียวกันในเงื่อนไข $N1-u_2$ หมายถึง เสริมกำลังด้วย RSS-geogrid 1 ชั้น ($N1$) ด้วยตำแหน่งการเสริมกำลังชั้นแรกที่ $u/H=0.2$ (u_2) และในเงื่อนไขย่อยอื่น ๆ ก็แปลความหมายในลักษณะเดียวกัน

$N1-u_1$ condition

- $N1$ หมายถึง $N=1$ เสริมกำลัง 1 ชั้น
 - u_1 หมายถึง เสริมกำลังชั้น 1 ที่ $u/H=0.1$
- เมื่อ $H=2$ เมตร จะได้ $u=0.1 \times 2 = 0.2$ เมตร (จากผิวถนน)
จะได้ตำแหน่งเสริมกำลังชั้น 1 ที่ระดับ $+1.80$ เมตร (จากดินเดิม)



รูปที่ 3.29 ตัวอย่างตำแหน่งการเสริมกำลังของคันดินถนนในเงื่อนไข $N1-u_1$

ในกรณีถัดมา $N=2$ (number of RSS-geogrid reinforcement layer = 2) โดยมีเงื่อนไขย่อยทั้งหมด 25 เงื่อนไขดังตารางที่ 3.9 ตัวอย่างการเรียกชื่อย่อในเงื่อนไข เช่น $N2-h_1u_1$ หมายถึง เสริมกำลังด้วย RSS-geogrid 2 ชั้น ($N2$) ด้วยตำแหน่งการเสริมกำลังชั้นแรกที่ $u/H=0.1$ (u_1) และเสริมกำลังชั้นถัดมาอีก 'หนึ่งชั้น' ด้วยระยะห่าง $h(N-1)/H=0.1$ (h_1) (ดังแสดงภาพตำแหน่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเสริมกำลังในรูปที่ 3.30) เช่นเดียวกันในเงื่อนไข $N2-h_1u_2$ หมายถึง เสริมกำลังด้วย RSS-geogrid 2 ชั้น (N2) ด้วยตำแหน่งการเสริมกำลังชั้นแรกที่ $u/H=0.2$ (u_2) และเสริมกำลังชั้นถัดมาอีก 'หนึ่งชั้น' ด้วยระยะห่าง $h(N-1)/H=0.1$ (h_1) และในเงื่อนไขย่อยอื่น ๆ ก็แปลความหมายในลักษณะเดียวกัน

N2- h_1u_1 condition

- N2 หมายถึง N=2 เสริมกำลัง 2 ชั้น

- u_1 หมายถึง เสริมกำลังชั้น 1 ที่ $u/H=0.1$

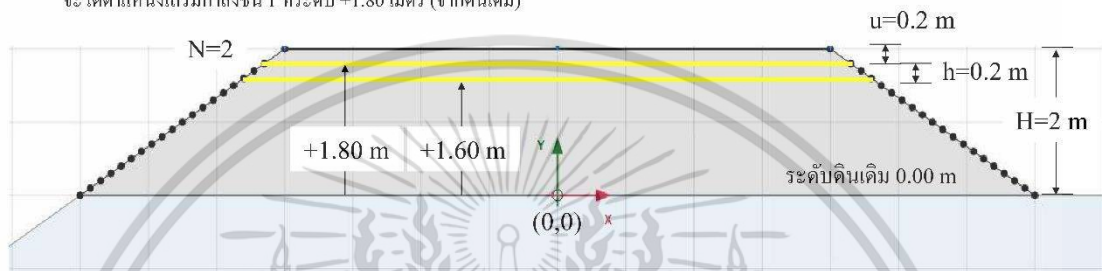
เมื่อ $H=2$ เมตร จะได้ $u=0.1 \times 2 = 0.2$ เมตร (จากผิวถนน)

จะได้ตำแหน่งเสริมกำลังชั้น 1 ที่ระดับ +1.80 เมตร (จากดินเดิม)

- h_1 หมายถึง เสริมกำลังชั้น 2 ด้วยระยะห่าง $h(N-1)/H=0.1$

เมื่อ $H=2$ เมตร จะได้ $h(2-1)=0.1 \times 2$, $h=0.2$ เมตร (จากชั้น 1)

จะได้ตำแหน่งเสริมกำลังชั้น 2 ที่ระดับ +1.60 เมตร (จากดินเดิม)



รูปที่ 3.30 ตัวอย่างตำแหน่งการเสริมกำลังของคันดินถนนในเงื่อนไข $N2-h_1u_1$

ในกรณีถัดมา $N=3$ (number of RSS-geogrid reinforcement layer = 3) โดยมีเงื่อนไขย่อยทั้งหมด 25 เงื่อนไขดังตารางที่ 3.10 ตัวอย่างการเรียกชื่อย่อในเงื่อนไข เช่น $N3-h_1u_1$ หมายถึง เสริมกำลังด้วย RSS-geogrid 3 ชั้น (N3) ด้วยตำแหน่งการเสริมกำลังชั้นแรกที่ $u/H=0.1$ (u_1) และเสริมกำลังชั้นถัดมาอีก 'สองชั้น' ด้วยระยะห่าง $h(N-1)/H=0.1$ (h_1) (ดังแสดงภาพตำแหน่งการเสริมกำลังในรูปที่ 3.31) เช่นเดียวกันในเงื่อนไข $N3-h_1u_2$ หมายถึง เสริมกำลังด้วย RSS-geogrid 3 ชั้น (N3) ด้วยตำแหน่งการเสริมกำลังชั้นแรกที่ $u/H=0.2$ (u_2) และเสริมกำลังชั้นถัดมาอีก 'สองชั้น' ด้วยระยะห่าง $h(N-1)/H=0.1$ (h_1) และในเงื่อนไขย่อยอื่น ๆ ก็แปลความหมายในลักษณะเดียวกัน

N3- h_1u_1 condition

- N3 หมายถึง N=3 เสริมกำลัง 3 ชั้น

- u_1 หมายถึง เสริมกำลังชั้น 1 ที่ $u/H=0.1$

เมื่อ $H=2$ เมตร จะได้ $u=0.1 \times 2 = 0.2$ เมตร (จากผิวถนน)

จะได้ตำแหน่งเสริมกำลังชั้น 1 ที่ระดับ +1.80 เมตร (จากดินเดิม)

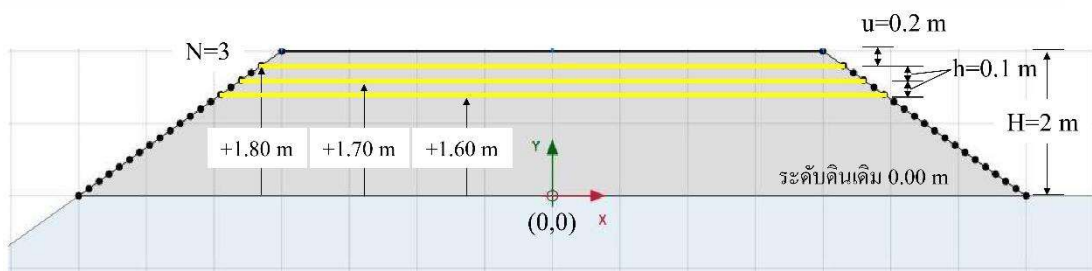
- h_1 หมายถึง เสริมกำลังชั้น 2 และ 3 ด้วยระยะห่าง $h(N-1)/H=0.1$

ชั้น 2 : เมื่อ $H=2$ เมตร จะได้ $h(3-1)=0.1 \times 2$, $h=0.1$ เมตร (จากชั้น 1)

ชั้น 3 : เมื่อ $H=2$ เมตร จะได้ $h(3-1)=0.1 \times 2$, $h=0.1$ เมตร (จากชั้น 2)

จะได้ตำแหน่งเสริมกำลังชั้น 2 ที่ระดับ +1.70 เมตร (จากดินเดิม)

จะได้ตำแหน่งเสริมกำลังชั้น 3 ที่ระดับ +1.60 เมตร (จากดินเดิม)



รูปที่ 3.31 ตัวอย่างตำแหน่งการเสริมกำลังของคันดินถนนในเงื่อนไข $N3-h_1u_1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 เงื่อนไขการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของคันดินถนน (road embankment) ในเงื่อนไข N เท่ากับ 0 ($N=0$) เพื่อศึกษาจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมของคันถนน โดยมีความสูงของคันดิน H เท่ากับ 2 เมตร ($H=2$)

Number of RSS Layers, N	Conditions	Reinforced Positions				Level (m)		
		Spacing		From the Top Surface		From the Bottom		
		$h(N-1)$	$h(m)$	u	u (m)	N1	N2	N3
N=0	N0	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 3.8 เงื่อนไขการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของคันดินถนน (road embankment) ในเงื่อนไข N เท่ากับ 1 ($N=1$) เพื่อศึกษาจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมของคันถนน โดยมีความสูงของคันดิน H เท่ากับ 2 เมตร ($H=2$)

Number of RSS Layers, N	Conditions	Reinforced Positions				Level (m)		
		Spacing		From the Top Surface		From the Bottom		
		$h(N-1)$	$h(m)$	u	u (m)	N1	N2	N3
N=1	N1-u ₁	-	-	0.1H	0.20	1.80	-	-
	N1-u ₂	-	-	0.2H	0.40	1.60	-	-
	N1-u ₃	-	-	0.3H	0.60	1.40	-	-
	N1-u ₄	-	-	0.4H	0.80	1.20	-	-
	N1-u ₅	-	-	0.5H	1.00	1.00	-	-
	N1-u ₆	-	-	0.6H	1.20	0.80	-	-
	N1-u ₇	-	-	0.7H	1.40	0.60	-	-
	N1-u ₈	-	-	0.8H	1.60	0.40	-	-
	N1-u ₉	-	-	0.9H	1.80	0.20	-	-
	N1-u ₁₀	-	-	1.0H	2.00	0.00	-	-

ตารางที่ 3.9 เงื่อนไขการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของคันดินถนน (road embankment) ในเงื่อนไข N เท่ากับ 2 ($N=2$) เพื่อศึกษาจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมของคันถนน โดยมีความสูงของคันดิน H เท่ากับ 2 เมตร ($H=2$)

Number of RSS Layers, N	Conditions	Reinforced Positions				Level (m)		
		Spacing		From the Top Surface		From the Bottom		
		$h(N-1)$	$h(m)$	u	u (m)	N1	N2	N3
N=2	N2-h ₁ u ₁	0.1H	0.20	0.1H	0.20	1.80	1.60	-
	N2-h ₁ u ₂			0.2H	0.40	1.60	1.40	-
	N2-h ₁ u ₃			0.3H	0.60	1.40	1.20	-
	N2-h ₁ u ₄			0.4H	0.80	1.20	1.00	-
	N2-h ₁ u ₅			0.5H	1.00	1.00	0.80	-
	N2-h ₂ u ₁	0.2H	0.40	0.1H	0.20	1.80	1.40	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N=2	N2-h ₂ u ₂			0.2H	0.40	1.60	1.20	-
	N2-h ₂ u ₃			0.3H	0.60	1.40	1.00	-
	N2-h ₂ u ₄			0.4H	0.80	1.20	0.80	-
	N2-h ₂ u ₅			0.5H	1.00	1.00	0.60	-
	N2-h ₃ u ₁	0.3H	0.60	0.1H	0.20	1.80	1.20	-
	N2-h ₃ u ₂			0.2H	0.40	1.60	1.00	-
	N2-h ₃ u ₃			0.3H	0.60	1.40	0.80	-
	N2-h ₃ u ₄			0.4H	0.80	1.20	0.60	-
	N2-h ₃ u ₅			0.5H	1.00	1.00	0.40	-
	N2-h ₄ u ₁	0.4H	0.80	0.1H	0.20	1.80	1.00	-
	N2-h ₄ u ₂			0.2H	0.40	1.60	0.80	-
	N2-h ₄ u ₃			0.3H	0.60	1.40	0.60	-
	N2-h ₄ u ₄			0.4H	0.80	1.20	0.40	-
	N2-h ₄ u ₅			0.5H	1.00	1.00	0.20	-
	N2-h ₅ u ₁	0.5H	1.00	0.1H	0.20	1.80	0.80	-
	N2-h ₅ u ₂			0.2H	0.40	1.60	0.60	-
	N2-h ₅ u ₃			0.3H	0.60	1.40	0.40	-
	N2-h ₅ u ₄			0.4H	0.80	1.20	0.20	-
	N2-h ₅ u ₅			0.5H	1.00	1.00	0.00	-

ตารางที่ 3.10 เงื่อนไขการวิเคราะห์ที่อัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของคันดินถนน (road embankment) ในเงื่อนไข N เท่ากับ 3 (N=3) เพื่อศึกษาจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมของคันดิน โดยมีความสูงของคันดิน H เท่ากับ 2 เมตร (H=2)

Number of RSS Layers, N	Conditions	Reinforced Positions				Level (m)		
		Spacing		From the Top Surface		From the Bottom		
		h(N-1)	h(m)	u	u (m)	N1	N2	N3
N=3	N3-h ₁ u ₁	0.1H	0.10	0.1H	0.20	1.80	1.70	1.60
	N3-h ₁ u ₂			0.2H	0.40	1.60	1.50	1.40
	N3-h ₁ u ₃			0.3H	0.60	1.40	1.30	1.20
	N3-h ₁ u ₄			0.4H	0.80	1.20	1.10	1.00
	N3-h ₁ u ₅			0.5H	1.00	1.00	0.90	0.80
	N3-h ₂ u ₁	0.2H	0.20	0.1H	0.20	1.80	1.60	1.40
	N3-h ₂ u ₂			0.2H	0.40	1.60	1.40	1.20
	N3-h ₂ u ₃			0.3H	0.60	1.40	1.20	1.00
	N3-h ₂ u ₄			0.4H	0.80	1.20	1.00	0.80
	N3-h ₂ u ₅			0.5H	1.00	1.00	0.80	0.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N=3	N3-h ₃ u ₁	0.3H	0.30	0.1H	0.20	1.80	1.50	1.20
	N3-h ₃ u ₂			0.2H	0.40	1.60	1.30	1.00
	N3-h ₃ u ₃			0.3H	0.60	1.40	1.10	0.80
	N3-h ₃ u ₄			0.4H	0.80	1.20	0.90	0.60
	N3-h ₃ u ₅			0.5H	1.00	1.00	0.70	0.40
	N3-h ₄ u ₁	0.4H	0.40	0.1H	0.20	1.80	1.40	1.00
	N3-h ₄ u ₂			0.2H	0.40	1.60	1.20	0.80
	N3-h ₄ u ₃			0.3H	0.60	1.40	1.00	0.60
	N3-h ₄ u ₄			0.4H	0.80	1.20	0.80	0.40
	N3-h ₄ u ₅			0.5H	1.00	1.00	0.60	0.20
	N3-h ₅ u ₁	0.5H	0.50	0.1H	0.20	1.80	1.30	0.80
	N3-h ₅ u ₂			0.2H	0.40	1.60	1.10	0.60
	N3-h ₅ u ₃			0.3H	0.60	1.40	0.90	0.40
	N3-h ₅ u ₄			0.4H	0.80	1.20	0.70	0.20
	N3-h ₅ u ₅			0.5H	1.00	1.00	0.50	0.00

3.3.7.2 การศึกษาการเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid ของคันดินถนนและคันดินทราย

หลังจากที่ได้ทำการศึกษารายงานจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังคันดินถนน (road embankment) ด้วย RSS-geogrid แล้วในบทที่ 3.3.7.1 จากนั้นนำข้อสรุปจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมเพียงตำแหน่งเดียวมาประยุกต์ใช้ต่อในส่วนนี้ โดยส่วนนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของคันดินถนน (road embankment) และคันดินทราย (sand embankment) เมื่อเปรียบเทียบกรณีไม่เสริมกำลังและเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid ในสภาวะจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสม เมื่อจำลองด้วยแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D โดยแน่นอนจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดจะถูกบอกในเทอมของตัวแปรอัตราส่วนต่อความสูง u/H และ $h(N-1)/H$ เช่นเดียวกันกับบทที่ผ่านมา

ในขั้นตอนนี้เป็นการเปรียบเทียบการเสริมกำลังในคันดินที่แตกต่างกัน คือ คันดินถนน (road embankment) และคันดินทราย (sand embankment) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเสริมกำลังของ RSS-geogrid ในดินที่แตกต่างกัน ซึ่งงานวิจัยของ Arwaedo et al. 2020 ได้สรุปว่า RSS-geogrid มีประสิทธิภาพในการเสริมกำลังในชั้นดินอ่อน (CBR ต่ำกว่า) มากกว่าดินแข็ง (CBR สูงกว่า) โดยเงื่อนไขการศึกษามีทั้งหมด 4 เงื่อนไข ดังแสดงในตารางที่ 3.11 และ คุณสมบัติของคันดินถนนและคันดินทรายอ้างอิงจาก Wulandari and Tjandra (2015) และ Chaiyaput et al. (2014)

ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.11 เงื่อนไขการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของคันดินถนน และคันดินทรายเมื่อเปรียบเทียบกรณีไม่เสริมกำลังและเสริมกำลัง

Embankment	Material	Conditions	Reinforced position		
			N	u/H	h(N-1)/H
Road embankment	Fill material	Non-reinforced (RE-N0)	-	-	-
		Reinforced with optimal position (RE-N _r -h _r u _r)	Optimal position from chapter 3.3.7.1		
Sand embankment	Sand	Non-reinforced (SE-N0)	-	-	-
		Reinforced with optimal position (SE-N _r -h _r u _r)	Optimal position from chapter 3.3.7.1		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ประสิทธิภาพของ RSS-Geogrid สำหรับการเสริมกำลังในดินลูกรัง

ดินลูกรัง E2 ในกรณีไม่เสริมกำลัง (CBR=40.56%) มีค่า CBR ที่น้อยกว่าดินลูกรัง E1 ไม่เสริมกำลัง (CBR=64.53%) (ดูตาราง 4.1 และ 4.2) จากผลการทดสอบพบว่าค่ากำลัง CBR ของดินลูกรัง E1 กรณีเสริมกำลัง (E1-RSS) เปรียบเทียบกับกรณีดินลูกรัง E1 ไม่เสริมกำลัง (E1) นั้นมีค่าลดลงเล็กน้อย คือ ลดลง 0.34% ส่วนในกรณีดินลูกรัง E2 เสริมกำลัง (E2-RSS) ค่า CBR มีค่าเพิ่มขึ้น 23.15% เมื่อเทียบกับกรณีดินลูกรัง E2 ไม่เสริมกำลัง (E2) (ดูตาราง 4.3) ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแผ่นยางพารารวมควันที่ทำหน้าที่ geogrid (RSS-geogrid) สามารถเสริมกำลังดินลูกรังชนิด E ได้ โดย RSS-geogrid มีประสิทธิภาพที่ดีในการเสริมกำลังเมื่อดินลูกรังมีค่า CBR น้อย ในขณะที่ RSS-geogrid นำมาใช้เสริมกำลังดินลูกรังที่มีค่า CBR สูงพบว่า ค่า CBR ของดินลูกรังที่ถูกเสริมกำลังจะลดลง เนื่องจาก RSS-geogrid จะมีลักษณะเป็นชั้นวัสดุที่มีกำลังต่ำ (weak layer) แทรกอยู่ระหว่างชั้นดินแข็ง

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบ CBR ของดิน E1 ในเงื่อนไขไม่เสริมกำลัง (E1 condition)

ตัวอย่างที่	CBR (%)
1	62.73
2	66.33
ค่าเฉลี่ย	64.53

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบ CBR ของดิน E2 ในเงื่อนไขไม่เสริมกำลัง (E2 condition)

ตัวอย่างที่	CBR (%)
1	44.92
2	36.20
ค่าเฉลี่ย	40.56

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบดินลูกรัง E ที่เสริมกำลัง (E1-RSS และ E2-RSS conditions) และดินลูกรัง E ไม่เสริมกำลัง (E1 และ E2 conditions)

กรณีการเสริมกำลัง	ตัวอย่างที่	CBR กรณีเสริมกำลัง (%)	CBR กรณีเสริมกำลังเฉลี่ย (%)	CBR กรณีไม่เสริมกำลังเฉลี่ย (%)	การเปลี่ยนแปลง CBR จากการเสริมกำลังด้วย RSS
ดิน E แบบที่ 1 เสริมกำลัง 1 ชั้น (E1-RSS)	1	59.74	64.31	64.53	ลดลง 0.34 %
	2	68.88			
ดิน E แบบที่ 2 เสริมกำลัง 1 ชั้น (E2-RSS)	1	49.09	49.95	40.56	เพิ่มขึ้น 23.15 %
	2	50.82			

4.2 จำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังคันดินถนนด้วย RSS-Geogrid

4.2.1 ผลการคำนวณอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของคันดินถนนในทุกเงื่อนไข

เพื่อทำการศึกษานับจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังคันดินถนน (road embankment) (ตารางที่ 3.5) ด้วย RSS-geogrid จึงได้ทำการคำนวณอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ทั้งหมด 4 เงื่อนไขใหญ่ แบ่งเป็น 61 เงื่อนไขย่อย ซึ่งมีจำนวนชั้น (N) และตำแหน่งการเสริมกำลัง ($h(N-1)/H$ และ u/H) โดยใช้แนวคิดอัตราส่วนต่อความสูงดังแสดงในตารางที่ 3.7 ถึงตารางที่ 3.10 โดยตารางที่ 4.4 แสดงผลการคำนวณของทุกเงื่อนไขย่อย ดังนี้

ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของคันดินถนน (road embankment) ในทุกเงื่อนไขใหญ่ ทั้งหมด 61 เงื่อนไขย่อย

เงื่อนไข (Conditions)	จำนวนชั้น RSS-geogrid	$h(N-1)/H$	u/H	อัตราส่วนความปลอดภัย (FS)
N0	ไม่เสริมกำลัง	-	-	1.255
N1-u ₁	1 ชั้น	-	0.1	1.415
N1-u ₂		-	0.2	1.393
N1-u ₃		-	0.3	1.396
N1-u ₄		-	0.4	1.357
N1-u ₅		-	0.5	1.342
N1-u ₆		-	0.6	1.329

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N1-u ₇	1 ชั้น	-	0.7	1.296
N1-u ₈		-	0.8	1.276
N1-u ₉		-	0.9	1.259
N1-u ₁₀		-	1.0	1.234
N2-h ₁ u ₁	2 ชั้น	0.1	0.1	1.417
N2-h ₁ u ₂			0.2	1.390
N2-h ₁ u ₃			0.3	1.390
N2-h ₁ u ₄			0.4	1.365
N2-h ₁ u ₅			0.5	1.348
N2-h ₂ u ₁		0.2	0.1	1.418
N2-h ₂ u ₂			0.2	1.392
N2-h ₂ u ₃			0.3	1.386
N2-h ₂ u ₄			0.4	1.361
N2-h ₂ u ₅			0.5	1.331
N2-h ₃ u ₁		0.3	0.1	1.456
N2-h ₃ u ₂			0.2	1.388
N2-h ₃ u ₃			0.3	1.387
N2-h ₃ u ₄			0.4	1.365
N2-h ₃ u ₅			0.5	1.328
N2-h ₄ u ₁		0.4	0.1	1.475
N2-h ₄ u ₂			0.2	1.390
N2-h ₄ u ₃			0.3	1.386
N2-h ₄ u ₄			0.4	1.366
N2-h ₄ u ₅			0.5	1.345
N2-h ₅ u ₁	0.5	0.1	1.468	
N2-h ₅ u ₂		0.2	1.390	
N2-h ₅ u ₃		0.3	1.393	
N2-h ₅ u ₄		0.4	1.357	
N2-h ₅ u ₅		0.5	1.332	
N3-h ₁ u ₁	3 ชั้น	0.1	0.1	1.394
N3-h ₁ u ₂			0.2	1.387

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N3-h ₁ u ₃	3 ชั้น	0.1	0.3	1.370
N3-h ₁ u ₄			0.4	1.342
N3-h ₁ u ₅			0.5	1.327
N3-h ₂ u ₁		0.2	0.1	1.410
N3-h ₂ u ₂			0.2	1.389
N3-h ₂ u ₃			0.3	1.392
N3-h ₂ u ₄			0.4	1.367
N3-h ₂ u ₅			0.5	1.330
N3-h ₃ u ₁		0.3	0.1	1.411
N3-h ₃ u ₂			0.2	1.391
N3-h ₃ u ₃			0.3	1.399
N3-h ₃ u ₄			0.4	1.367
N3-h ₃ u ₅			0.5	1.335
N3-h ₄ u ₁		0.4	0.1	1.413
N3-h ₄ u ₂			0.2	1.389
N3-h ₄ u ₃			0.3	1.389
N3-h ₄ u ₄			0.4	1.357
N3-h ₄ u ₅			0.5	1.342
N3-h ₅ u ₁		0.5	0.1	1.413
N3-h ₅ u ₂			0.2	1.392
N3-h ₅ u ₃			0.3	1.386
N3-h ₅ u ₄			0.4	1.367
N3-h ₅ u ₅			0.5	1.344

4.2.2 การวิเคราะห์หาจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังคันดินถนน ด้วย RSS-Geogrid

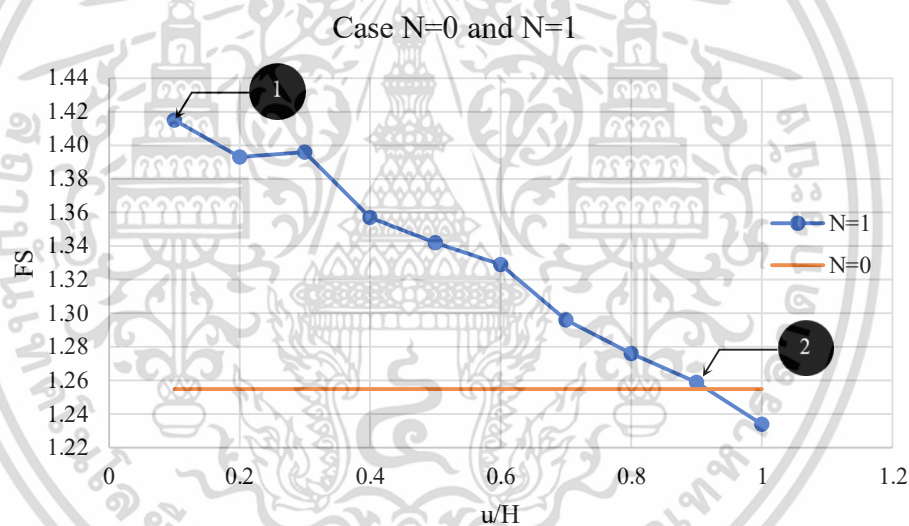
4.2.2.1 ผลการวิเคราะห์เงื่อนไข N=0 และ N=1

หากเปรียบเทียบเฉพาะอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของเงื่อนไขไม่เสริมกำลัง (N=0) และเงื่อนไขเสริมกำลัง RSS-geogrid 1 ชั้น (N=1) ในทุกเงื่อนไขย่อย โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง FS และ u/H จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.1 จากรูปดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเงื่อนไข N1-u₁ (หรือเงื่อนไขเสริมกำลัง 1 ชั้น โดยเสริมกำลังชั้นแรกที่ u/H เท่ากับ 0.1) ให้ค่า FS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากที่สุดเท่ากับ 1.415 และแสดงให้เห็นว่าเมื่อตำแหน่งการเสริมกำลังของเงื่อนไข $N=1$ มีค่า u/H มากกว่า 0.9 นั้นทำให้ค่า FS ที่ได้ มีค่าต่ำกว่าค่า FS ในเงื่อนไขไม่เสริมกำลัง ($N=0$) กล่าวคือมีเสถียรภาพน้อยกว่าการไม่เสริมกำลัง เนื่องจากวิธี phi-c reduction เป็นวิธีที่ลดกำลังความแข็งแรงของวัสดุไปถึงค่าหนึ่ง เมื่อวิเคราะห์ plastic point ที่เกิดขึ้นเมื่อเสริมกำลังที่ $u/H = 0.9$ และ 1.0 มีลักษณะการพังทลายที่คล้ายกันกับเงื่อนไขไม่เสริมกำลัง ($N=0$) คือพังทลายในส่วนของ embankment แต่ในเงื่อนไขไม่เสริมกำลังมีวัสดุรองรับเป็นดินเดิมที่มีความแข็งแรง ซึ่งแตกต่างกับเงื่อนไข $u/H = 0.9$ และ 1.0 ที่รองรับด้วยวัสดุกำลังต่ำ (weak layer) คือ RSS-geogrid เมื่อวิเคราะห์ด้วย phi-c reduction จึงทำให้มีค่าเสถียรภาพที่น้อยกว่า

ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบเฉพาะสองเงื่อนไขใหญ่ ($N=0$ และ $N=1$) สามารถสรุปได้ว่า ตำแหน่งการเสริมกำลังชั้นแรกของเงื่อนไข $N=1$ ที่ $u/H=0.1$ ให้ค่า FS สูงที่สุด และเมื่อเสริมกำลังที่ตำแหน่ง $u/H > 0.9$ (มากกว่า 0.9) จะทำให้ค่า FS มีค่าต่ำกว่ากรณีไม่เสริมกำลัง ($N=0$)

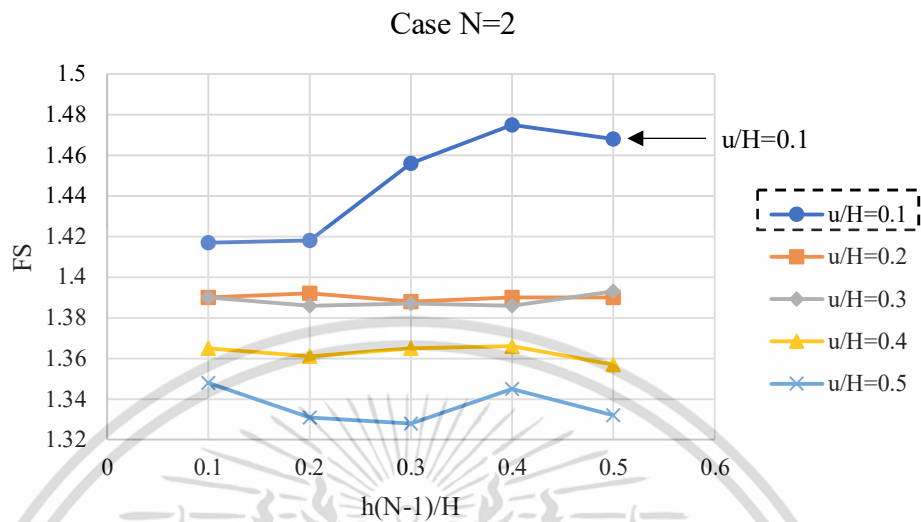


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของ FS ของคันดินถนนกรณีไม่เสริมกำลัง ($N=0$) และเสริมกำลัง 1 ชั้น ($N=1$) เมื่อเปลี่ยน $u/H = 0.1$ ถึง 1.0 โดยหมายเลข 1 หมายถึงเงื่อนไข $N=1$, $u/H=0.1$ ให้ค่า FS สูงสุด และหมายเลข 2 หมายถึงเงื่อนไข $N=1$, $u/H > 0.9$ ให้ค่า FS ต่ำกว่าเงื่อนไข $N=0$

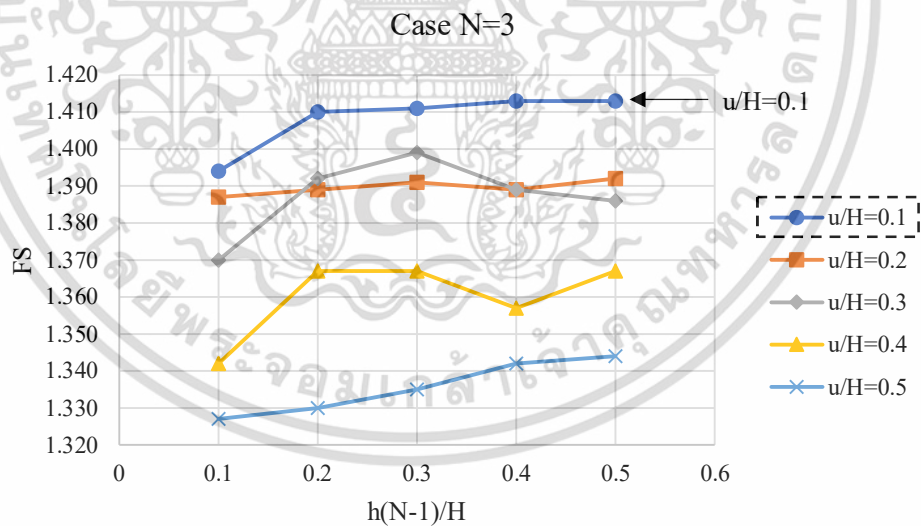
4.2.2.2 ผลการวิเคราะห์เงื่อนไข $N=2$ และ $N=3$

ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของเงื่อนไขเสริมกำลัง RSS-geogrid 2 ชั้น ($N=2$) และ 3 ชั้น ($N=3$) ในทุกเงื่อนไขย่อย สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง FS และ $h(N-1)/H$ โดยมี u/H ที่เปลี่ยนแปลงไปได้ สำหรับเงื่อนไข $N=2$ เขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.2 และในเงื่อนไข $N=3$ เขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.3 จากรูปทั้งสองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าในทุกเงื่อนไขย่อย (ของ $N=2$ และ $N=3$) ตำแหน่งการเสริมกำลังที่ $u/H=0.1$ ให้ค่า FS สูงที่สุดในทุกเงื่อนไข (ยกเว้นเงื่อนไขเดี่ยวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ $N=3$ ที่ $h(N-1)/H=0.1$ ซึ่งเป็นเส้นกราฟที่อยู่สูงที่สุด โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับการวิเคราะห์ในเงื่อนไข $N=0$ และ $N=1$ ที่ $u/H=0.1$ ให้ค่า FS สูงสุดเช่นกัน



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของ FS ของคั่นดินถนนกรณีเสริมกำลัง 2 ชั้น ($N=2$) เมื่อเปลี่ยน $h(N-1)/H$ ตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.5 และมีค่า u/H ที่ต่างกันตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.5 โดยที่ $u/H=0.1$ ให้ค่า FS สูงที่สุดในทุกเงื่อนไข



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของ FS ของคั่นดินถนนกรณีเสริมกำลัง 3 ชั้น ($N=3$) เมื่อเปลี่ยน $h(N-1)/H$ ตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.5 และมีค่า u/H ที่ต่างกันตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.5 โดยที่ $u/H=0.1$ ให้ค่า FS สูงที่สุดในทุกเงื่อนไขยกเว้นที่ $h(N-1)/H=0.1$

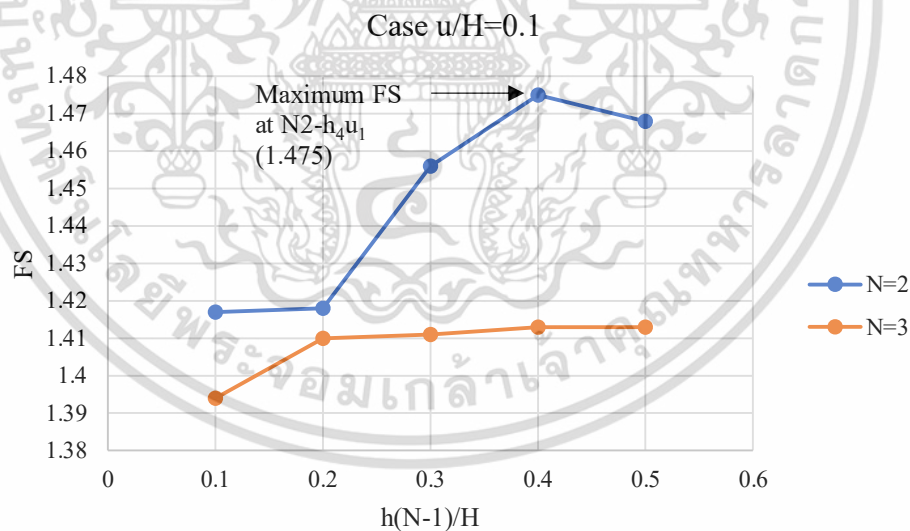
ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของคั่นดินถนนในเงื่อนไข $N=2$ และ $N=3$ มีผลสอดคล้องกับเงื่อนไข $N=0$ และ $N=1$ อย่างเห็นได้ชัดว่า $u/H=0.1$ เป็นตำแหน่งที่ให้ค่า FS เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงที่สุดในทุกเงื่อนไข (ยกเว้นเงื่อนไขเดียว คือ $N=3$ ที่ $h(N-1)/H=0.1$) จึงสรุปได้เบื้องต้นว่า $u/H=0.1$ นั้นเป็นตำแหน่งการเสริมกำลังชั้นแรกที่ทำให้ FS ของคันดินถนนมีค่ามากที่สุด

จากนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์ตัวแปรตำแหน่งอีกหนึ่งตัวแปร นั่นคือ $h(N-1)/H$ ซึ่งมีวิธีการวิเคราะห์ คือ วิเคราะห์โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง FS และ $h(N-1)/H$ (เท่ากับ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, และ 0.5) โดยเจาะจงไปที่ $u/H=0.1$ (ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการเสริมกำลังชั้นแรก) โดยมีค่า N เปลี่ยนแปลง ($N=2$ และ $N=3$) ดังแสดงในรูปที่ 4.4

จากรูปที่ 4.4 เมื่อเจาะจงตำแหน่งการเสริมกำลังที่ $u/H=0.1$ โดย $h(N-1)/H$ เปลี่ยนแปลง เทียบกันระหว่าง $N=2$ และ $N=3$ พบว่า ที่เงื่อนไขการเสริมกำลัง 2 ชั้น ($N=2$) ที่ $h(N-1)/H=0.4$ และ $u/H=0.1$ เป็นตำแหน่งการเสริมกำลังที่ให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) มากที่สุด (เท่ากับ 1.475) ในทุก ๆ เงื่อนไขย่อย ซึ่งตำแหน่งการเสริมกำลังดังกล่าวสอดคล้องและใกล้เคียงกับตำแหน่งการเสริมกำลังของ Esmaeili et al. (2018) คือ $u/H=0.144$ (ใกล้เคียงกับ $u/H=0.1$) และ $h(N-1)/H=0.384$ (ใกล้เคียงกับ $h(N-1)/H=0.4$) ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2.7.2 (ดูบทที่ 2.7.2 จำนวนชั้นและตำแหน่งการเสริมกำลังที่เหมาะสมของ Esmaeili et al. 2018)

ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ในทุกเงื่อนไขสามารถสรุปได้ว่า เงื่อนไข $N=2-h_{4u_1}$ เป็นเงื่อนไขที่จำนวนชั้นและตำแหน่งเหมาะสมที่สุดในการเสริมกำลังคันดินถนนด้วย RSS-geogrid



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง FS และ $h(N-1)/H$ (เท่ากับ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, และ 0.5) โดยเจาะจงไปที่ $u/H=0.1$ ซึ่งที่ $h(N-1)/H=0.4$ ให้ FS มากที่สุด กล่าวคือเงื่อนไข $N=2-h_{4u_1}$ เป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด

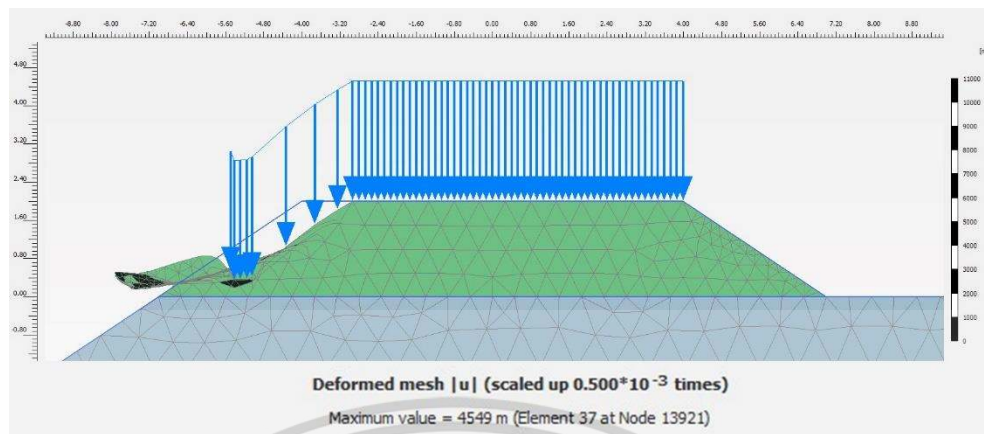
4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของคันดินถนนและคันดินทรายเมื่อเปรียบเทียบกรณีไม่เสริมกำลังและเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid ภายใต้เงื่อนไขจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสม

เมื่อวิเคราะห์หาจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังคันดินถนน (road embankment) ด้วย RSS-geogrid แล้ว ผลที่ได้คือจำนวนชั้นเสริมกำลัง 2 ชั้น ($N=2$) ที่ตำแหน่ง $h(N-1)/H=0.4$ และ $u/H=0.1$ เป็นจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด หรือกล่าวได้ว่าเงื่อนไข $N2-h_4u_1$ เป็นสภาวะการเสริมกำลังที่ให้เสถียรภาพสูงสุด ดังนั้นจึงนำสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ในคันดินถนน (road embankment) และคันดินทราย (sand embankment) เมื่อเปรียบเทียบกรณีไม่เสริมกำลัง (N0) และกรณีเสริมกำลัง ณ สภาวะจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด ($N2-h_4u_1$) โดยศึกษาทั้งหมด 4 เงื่อนไข (ดังแสดงในตารางที่ 3.11) คือ road embankment ไม่เสริมกำลัง (RE-N0), road embankment เสริมกำลัง ณ สภาวะเหมาะสม (RE-N2- h_4u_1), sand embankment ไม่เสริมกำลัง (SE-N0), และ sand embankment เสริมกำลัง ณ สภาวะเหมาะสม (SE-N2- h_4u_1) มีผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ดังตารางที่ 4.5 และมี deform mesh และ failure mechanism (incremental displacement) ของเงื่อนไข RE-N0, RE-N2- h_4u_1 , SE-N0, และ SE-N2- h_4u_1 ดังแสดงในรูปที่ 4.5, 4.6, 4.7, และ รูปที่ 4.8 ตามลำดับ โดยแนวการพังทลาย หรือ failure mechanism จะถูกอธิบายด้วย incremental displacement ที่จุดพังทลาย (failure) ของเงื่อนไขนั้น (PLAXIS 2D-tutorial manual last update: June 04, 2020)

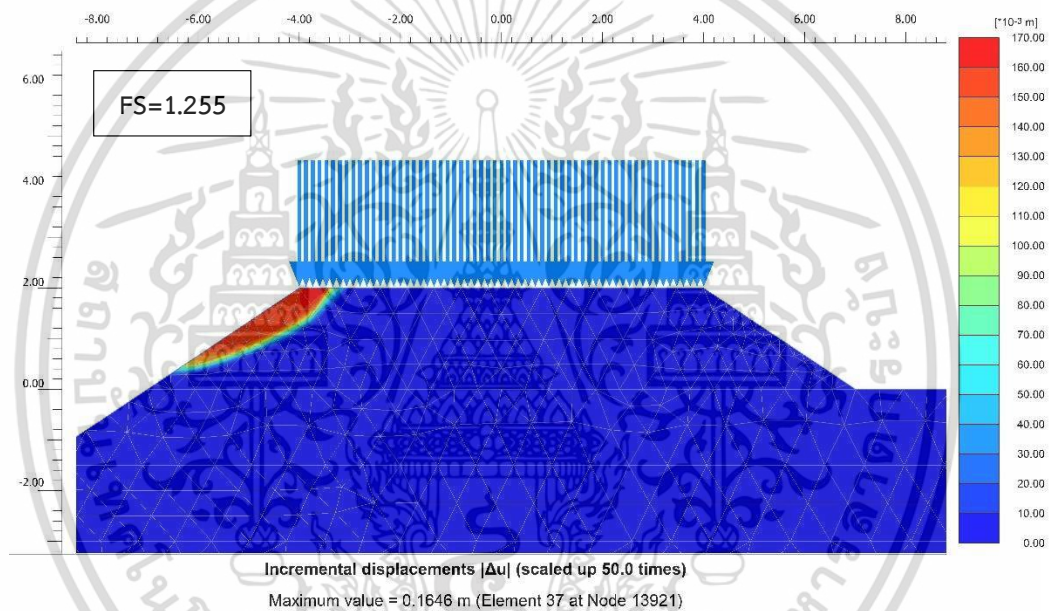
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย (FS) รวมถึงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของ FS ของคันดินถนนและคันดินทรายในเงื่อนไขไม่เสริมกำลังและเสริมกำลังในสภาวะเหมาะสม และลักษณะการพังทลายของดินที่จำลองใน PLAXIS สองมิติ

ชนิดคันดิน	วัสดุ	เงื่อนไข (Conditions)	FS	% ความแตกต่าง FS จากเงื่อนไข N0	ลักษณะการ พังทลาย
Road embankment	Fill material ¹	RE-N0	1.255	เพิ่มขึ้น 17.53 %	รูปที่ 4.5 (b)
		RE-N2- h_4u_1 (สภาวะเหมาะสม)	1.475		รูปที่ 4.6 (b)
Sand embankment	Sand material ²	SE-N0	1.599	เพิ่มขึ้น 2.44 %	รูปที่ 4.7 (b)
		SE-N2- h_4u_1 (สภาวะเหมาะสม)	1.638		รูปที่ 4.8 (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



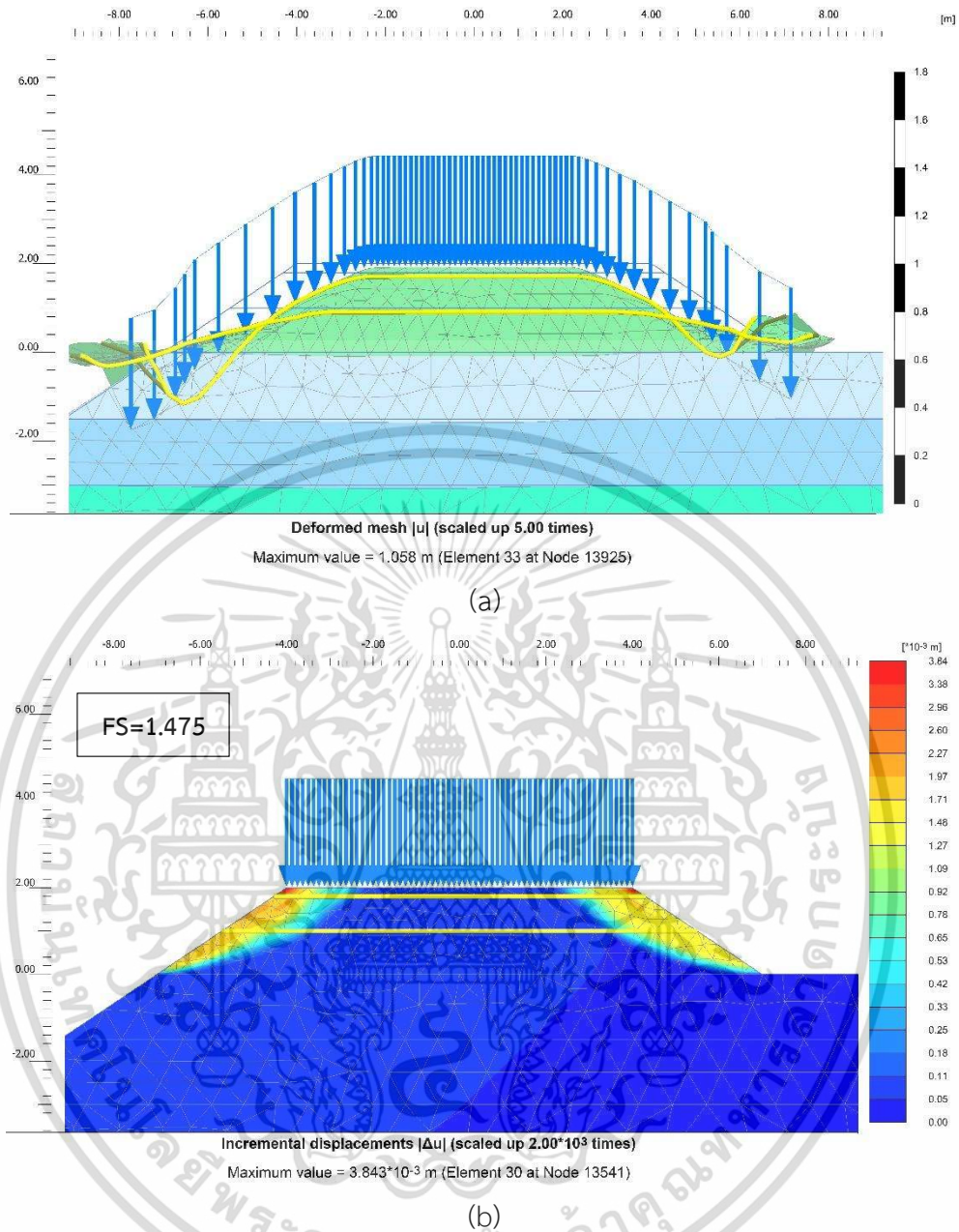
(a)



(b)

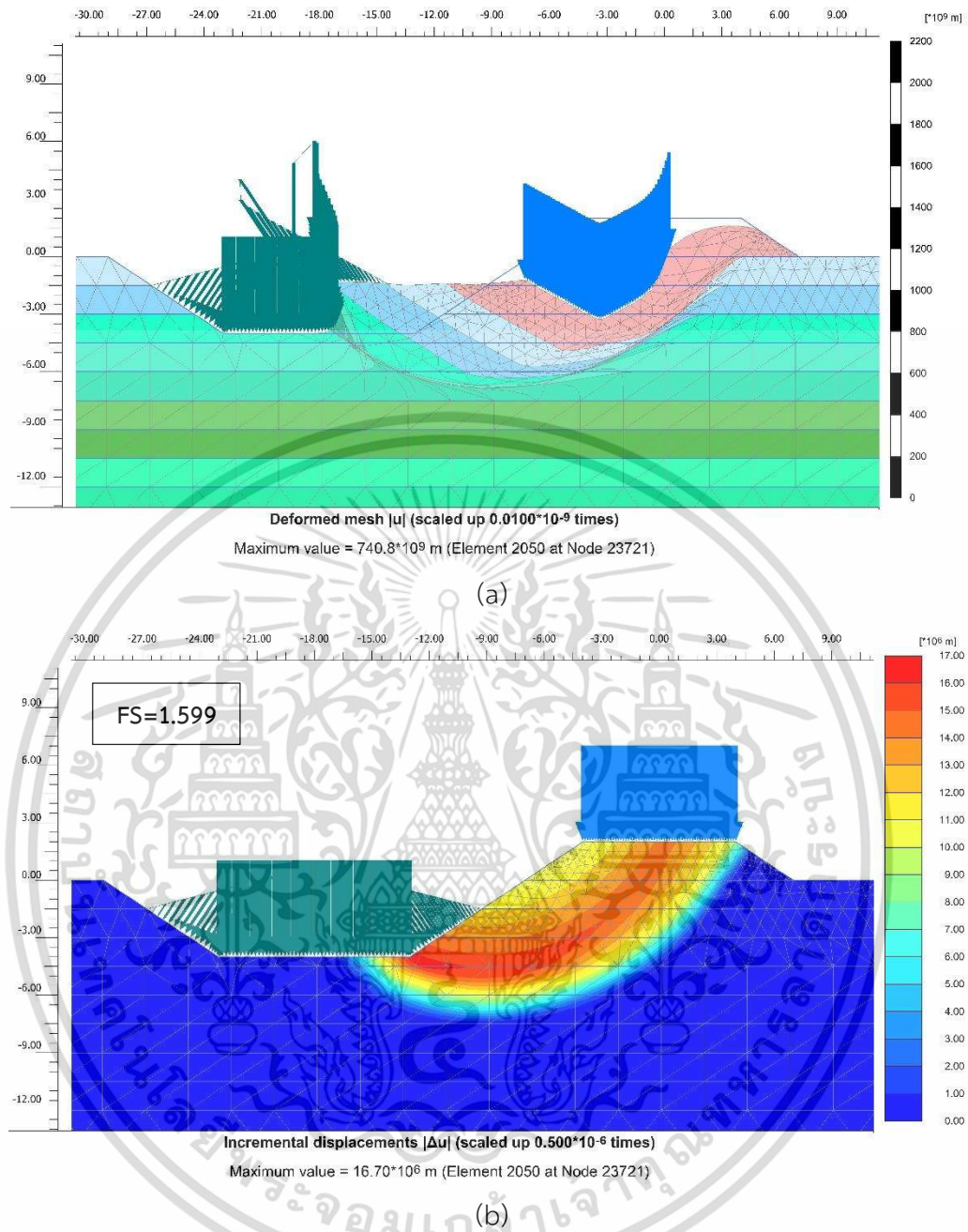
รูปที่ 4.5 เสาอนไฮ road embankment ไม่เสริมกำลัง (RE-N0) โดย a. การเคลื่อนตัวของ mesh (deform mesh) และ b. ลักษณะการพังทลายโดยมี global FS เท่ากับ 1.255

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



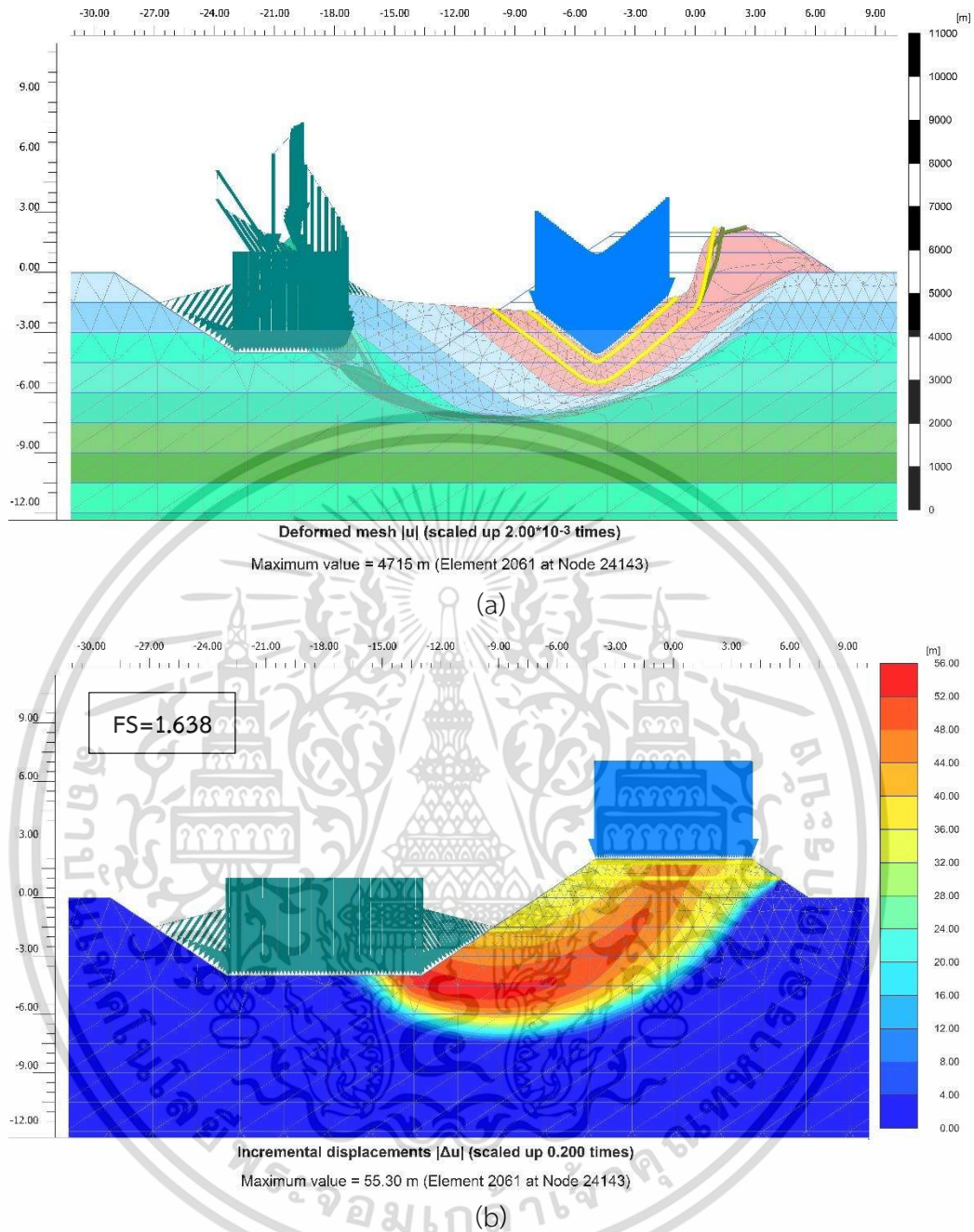
รูปที่ 4.6 เงื่อนไช road embankment เสริมกำลัง ณ สภาวะเหมาะสม (RE-N2-h_{4u1}) โดย a. การเคลื่อนตัวของ mesh (deform mesh) และ b. ลักษณะการพังทลายโดยมี global FS เท่ากับ 1.475

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 เงื่อนไข sand embankment ไม่เสริมกำลัง (SE-N0) โดย a. การเคลื่อนตัวของ mesh (deform mesh) และ b. ลักษณะการพังทลายโดยมี global FS เท่ากับ 1.599

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 เงื่อนไซ sand embankment เสริมกำลัง ณ สภาวะเหมาะสม (SE-N2-h_{4u1}) โดย a. การเคลื่อนตัวของ mesh (deform mesh) และ b. ลักษณะการพังทลายโดยมี global FS เท่ากับ 1.638

จากรูปที่ 4.5 (a) และ (b) แสดงถึงการเคลื่อนตัวของ mesh (deform mesh) และลักษณะการพังทลาย (failure mechanism) ของคันดินถนน (road embankment) ในเงื่อนไซไม่เสริมกำลัง (RE-N0) ซึ่งมีแนวการพังทลายผ่านส่วนบนของคันดิน (embankment) ทางด้านซ้าย (ติดกับคลองขุนศรี) มีค่า FS เท่ากับ 1.255 ในขณะเดียวกันจากรูปที่ 4.6 (a) และ (b) แสดงถึงการเคลื่อนตัวของ mesh และลักษณะการพังทลายของคันดินถนน (road embankment) ในเงื่อนไซเสริมกำลัง ณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะเหมาะสม ($RE-N2-h_4u_1$) ซึ่งมีแนวการพังทลายที่ต่างกับกับเงื่อนไขไม่เสริมกำลัง คือ แนวการพังทลายผ่านส่วนบนของคันดิน (embankment) ทั้งทางด้านซ้าย (ติดกับคลองขุนศรี) และทางด้านขวาของคันดินด้วย และมีค่า FS ที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.475 (เพิ่มขึ้น +17.53%) จึงสามารถสรุปได้ว่าชั้นการเสริมกำลังของ RSS-geogrid สามารถเสริมเสถียรภาพของคันดินถนน (road embankment ในงานวิจัยนี้) ได้ดี และทำให้แนวการพังทลายของดินเปลี่ยนแปลงอีกด้วย

จากรูปที่ 4.7 (a) และ (b) แสดงถึงการเคลื่อนตัวของ mesh และลักษณะการพังทลายของคันดินทราย (sand embankment) ในเงื่อนไขไม่เสริมกำลัง (SE-N0) ซึ่งมีแนวการพังทลายผ่านส่วนบนของคันดิน (embankment) และผ่านชั้นดินเดิมด้วย ในทางด้านซ้าย (ติดกับคลองขุนศรี) มีค่า FS เท่ากับ 1.599 ในขณะเดียวกันจากรูปที่ 4.8 (a) และ (b) แสดงถึงการเคลื่อนตัวของ mesh และลักษณะการพังทลายของคันดินทราย (sand embankment) ในเงื่อนไขเสริมกำลัง สภาวะเหมาะสม ($SE-N2-h_4u_1$) ซึ่งมีแนวการพังทลายเช่นเดียวกันกับเงื่อนไขไม่เสริมกำลัง คือ แนวการพังทลายผ่านส่วนบนของคันดิน (embankment) และผ่านชั้นดินเดิมด้วย ในทางด้านซ้าย (ติดกับคลองขุนศรี) มีค่า FS ที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.638 (เพิ่มขึ้น +2.44% เท่านั้น) จึงสามารถสรุปได้ว่าชั้นการเสริมกำลังของ RSS-geogrid สามารถเสริมเสถียรภาพของคันดินทราย (sand embankment ในงานวิจัยนี้) ได้น้อย และแนวการพังทลายไม่ได้เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเสริมกำลัง

จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้โดยรวมว่าการเสริมกำลัง RSS-geogrid ในคันดินถนน (road embankment) ซึ่งมีค่า E สูง ($E=50,000$ kPa) และมีค่า c, phi ต่ำ ($c=1.0$ kPa, $\phi=33.00^\circ$) (ดูตารางที่ 3.5 ตามคุณสมบัติของ Wulandari and Tjandra. 2015) เมื่อเทียบกับการเสริมกำลัง RSS-geogrid ในคันดินทราย (sand embankment) ซึ่งมีค่า E ต่ำ ($E=7,500$ kPa) และมีค่า c, phi สูง ($c=11.3$ kPa, $\phi=35.63^\circ$) (ดูตารางที่ 3.5 ตามคุณสมบัติของ Chaiyaput et al. 2014) พบว่า RSS-geogrid มีประสิทธิภาพในการเพิ่มอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) หรือประสิทธิภาพในการเสริมเสถียรภาพคันดินถนน (road embankment) ซึ่งเป็นดินที่มีเสถียรภาพต่ำในเงื่อนไขไม่เสริมกำลัง ได้ดีกว่าคันดินทราย (sand embankment) ซึ่งเป็นดินที่มีเสถียรภาพสูงอยู่แล้วในเงื่อนไขไม่เสริมกำลัง และยังสอดคล้องกับงานวิจัยในห้องปฏิบัติการ (ดูบทที่ 4.1) ที่ได้ข้อสรุปในทำนองเดียวกันว่า ประสิทธิภาพในการเพิ่มกำลังดินลูกรังเมื่อเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid จะลดลง เมื่อค่า CBR ของดินลูกรังในกรณีไม่เสริมกำลังเพิ่มขึ้น

4.4 การประยุกต์ใช้จำนวนชั้นและตำแหน่งการเสริมกำลัง RSS-geogrid ในงาน

ก่อสร้างถนน

จำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid ดังกล่าว คือ เสริมกำลัง 2 ชั้น ($N=2$) ที่ $h(N-1)/H=0.4$ และ $u/H=0.1$ สามารถใช้ได้จริงทั้งในงานถนนประเภทไม่ปูผิว (unpaved road) และถนนลาดยาง (paved road) โดยมีข้อแนะนำในการใช้งานดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กรณี unpaved road: หน้าที่ทราบกันดีว่าถนน unpaved road มีลักษณะเป็นคันดินวัสดุเดียวกันที่ถูกบดอัดบนชั้นดินเดิม โดยมีคันดินเป็นวัสดุดินลูกรัง (มาตรฐานวัสดุรองพื้นทาง มยผ. 2102-57) ซึ่งมีลักษณะ geometry ตรงกับเงื่อนไขของงานวิจัยนี้คือเป็นคันดินวัสดุเดียวกัน และได้รับการยืนยันในบทที่ 4.1แล้วว่า RSS-geogrid สามารถเสริมกำลังดินลูกรังได้ ดังนั้นสามารถประยุกต์ใช้จำนวนชั้นและตำแหน่งการเสริมกำลังจากงานวิจัยได้โดยตรงในชั้นดินลูกรังของถนน unpaved road

2. กรณี paved road: ในถนน paved road มีลักษณะเป็นคันดินที่มีวัสดุบดอัดหลากหลายชนิด เช่น วัสดุคัดเลือกเพื่อปรับระดับ, วัสดุชั้นรองพื้นทาง (ดินลูกรัง), วัสดุชั้นพื้นทาง (หินคลุก), และวัสดุชั้นผิวทาง (ยางมะตอย) เป็นต้น เนื่องจากโดยปกติการใช้งาน geogrid สามารถใช้ได้ในทุกวัสดุในชั้นทางขึ้นอยู่กับการเสริมกำลังที่ชั้นใด (ดูบทที่ 2.10.2 และ 2.10.3 การออกแบบและใช้งาน geogrid ในงานก่อสร้างถนน paved roads-base courses และ paved roads-pavements) อย่างไรก็ตามการเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid ในถนน paved road ควรเลือกเสริมกำลังเพียงแค่ชั้นใดชั้นหนึ่งเท่านั้น โดยประยุกต์ใช้จำนวนชั้นและตำแหน่งการเสริมกำลังที่เหมาะสม ($N=2$, $h(N-1)/H=0.4$, และ $u/H=0.1$) และคำนวณจากความสูงของชั้นนั้น

งานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาในส่วนที่เกี่ยวข้องกับอายุการใช้ของวัสดุ RSS-geogrid เมื่อนำไปใช้งานจริง อย่างไรก็ตามมีข้อสังเกตสำคัญในเรื่องอายุการใช้งานของวัสดุ คือ ระยะเวลาการสลายตัวของวัสดุเสริมกำลังอาจไม่ส่งผลต่อค่าความปลอดภัยของคันดินถล่มแล้วเมื่อคันดินเข้าสู่สภาวะที่เรียกว่า “แรงดันน้ำเข้าสู่สภาวะสมดุล” (ดูบทที่ 2.11 แรงดันน้ำ หน่วยแรงประสิทธิผล และค่าความปลอดภัยของดินถล่ม) กล่าวคือ เมื่อคันดินถล่มเข้าสู่สภาวะดังกล่าว ค่าความปลอดภัยจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไป

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงกำลังรับน้ำหนักแบกทานแบบ CBR ของดินลูกรังต่างชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่เสริมกำลังและเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อเสริมกำลัง RSS-geogrid ในดินลูกรังต่างชนิด (E1, E2) ซึ่งค่า CBR ของดินลูกรัง E2 (40.56%) มีค่าต่ำกว่า CBR ของดินลูกรัง E1 (64.53%) เมื่อทำการเสริมกำลังดินลูกรังทั้งสองในเงื่อนไขเสริมกำลัง E1-RSS และ E2-RSS แล้ว พบว่า RSS-geogrid สามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักแบกทานแบบ CBR ของดินลูกรัง E2 ได้ในเงื่อนไขเสริมกำลัง (+23.15%) แต่ลดกำลังรับน้ำหนักแบกทานแบบ CBR ของดินลูกรัง E1 (-0.34%) จึงได้ข้อสรุปว่าประสิทธิภาพในการเพิ่มกำลัง CBR ของดินเมื่อเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid จะลดลง เมื่อค่า CBR ของดินในกรณีไม่เสริมกำลังเพิ่มขึ้น จนถึงค่า CBR ค่าหนึ่งการติดตั้งแผ่นยางพาราธรรมดานั้นจะลดความแข็งแรงของดินเนื่องจากจะมีลักษณะเป็นชั้นวัสดุที่มีกำลังต่ำ (weak layer) แทรกอยู่ระหว่างดินแข็ง

ในส่วนการศึกษาจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังคันดินถนนด้วย RSS-geogrid เมื่อจำลองด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข ทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 4 เงื่อนไขใหญ่ (N=0, N=1, N=2, และ N=3) ทั้งหมด 61 เงื่อนไขย่อย โดยประยุกต์ใช้แนวคิดอัตราส่วนต่อความสูง u/H และ $h(N-1)/H$ เพื่อระบุตำแหน่งในการเสริมกำลัง RSS-geogrid จากผลการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ในแต่ละเงื่อนไขย่อยสามารถสรุปได้ว่าจำนวนชั้นและตำแหน่งการเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid ที่เหมาะสมที่สุด คือ 2 ชั้น (N=2) ที่ $h(N-1)/H=0.4$ และ $u/H=0.1$ หรือกล่าวได้ว่าเงื่อนไขการเสริมกำลัง RSS-geogrid ที่มีสภาวะเหมาะสมในคันดินถนน คือ เงื่อนไข N2-h₄u₁

สุดท้ายการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) ของคันดินถนนและคันดินทรายเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่เสริมกำลังและเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid ในสภาวะจำนวนชั้นและตำแหน่งที่เหมาะสม เมื่อจำลองด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งนำสภาวะเหมาะสมในการเสริมกำลังที่ได้จากการวิเคราะห์ก่อนหน้านี้ คือ N2-h₄u₁ มาประยุกต์ใช้ต่อในส่วนนี้ โดยทำการศึกษาทั้งหมด 4 เงื่อนไข คือ road embankment ไม่เสริมกำลัง (RE-N0), road embankment เสริมกำลัง ณ สภาวะเหมาะสม (RE-N2-h₄u₁), sand embankment ไม่เสริมกำลัง (SE-N0), และ sand embankment เสริมกำลัง ณ สภาวะเหมาะสม (SE-N2-h₄u₁) จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าการเสริมกำลัง RSS-geogrid ในคันดินถนน (road embankment) ซึ่งมีค่าคุณสมบัติดินตาม Wulandari and Tjandra (2015) เมื่อเทียบกับการเสริมกำลัง RSS-geogrid ในคันดินทราย (sand embankment) ซึ่งมีค่าคุณสมบัติดินตาม Chaiyaput et al. (2014) พบว่า RSS-geogrid มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพในการเพิ่มอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) หรือเสริมเสถียรภาพในคันดินถนน (road embankment) ซึ่งเป็นดินที่มีเสถียรภาพต่ำในเงื่อนไขไม่เสริมกำลัง ได้ดีกว่าคันดินทราย (sand embankment) ซึ่งเป็นดินที่มีเสถียรภาพสูงอยู่แล้วในเงื่อนไขไม่เสริมกำลัง และยังสอดคล้องกับงานวิจัยในห้องปฏิบัติการที่ได้ข้อสรุปในทำนองเดียวกันว่าประสิทธิภาพในการเพิ่มกำลังดินเมื่อเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid จะลดลง เมื่อค่า CBR ของดินในกรณีไม่เสริมกำลังเพิ่มขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นยังพบว่า FS ของคันดินถนน (road embankment) คันดินทราย (sand embankment) เพิ่มขึ้นเมื่อเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการนำ RSS-geogrid ไปใช้ในงานก่อสร้างถนนจริง

1. การนำ RSS-geogrid ไปใช้งานจริงในสนามควรนำไปใช้เสริมกำลังที่มี CBR ต่ำ (ดินอ่อน) เนื่องจาก RSS-geogrid มีประสิทธิภาพการเสริมกำลังต่ำ เมื่อใช้ในพื้นที่ที่มี CBR สูง (ดินแข็ง)
2. กรณี unpaved road: มีลักษณะเป็นคันดินวัสดุเดียวกันที่ถูกบดอัดบนชั้นดินเดิม โดยส่วนใหญ่เป็นวัสดุดินลูกรังบดอัด สามารถประยุกต์ใช้จำนวนชั้นและตำแหน่งการเสริมกำลังจากงานวิจัยได้โดยตรงในชั้นดินลูกรังของถนน unpaved road และได้รับการสนับสนุนแล้วว่า RSS-geogrid สามารถเสริมกำลังในดินลูกรังได้
3. กรณี paved road: ในถนน paved road มีลักษณะเป็นคันดินที่มีวัสดุบดอัดหลากหลายชนิด อย่างไรก็ตามการเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid ในถนน paved road ควรออกแบบเสริมกำลังทีละชั้น โดยประยุกต์ใช้จำนวนชั้นและตำแหน่งการเสริมกำลังที่เหมาะสม ($N=2$, $h(N-1)/H=0.4$, และ $u/H=0.1$) และคำนวณจากความสูงชั้นที่พิจารณาเท่านั้น

การนำงานวิจัยนี้ไปศึกษาต่อเพิ่มเติมในอนาคต

1. งานวิจัยนี้ผ่านการทดลองในห้องปฏิบัติการ และผ่านการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมแบบจำลองเชิงตัวเลข PLAXIS 2D เท่านั้น ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการเสริมกำลังในหน้างานจริง
2. ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับน้ำหนักแบกทาน CBR ของดินเมื่อเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid โดยดินในกรณีไม่เสริมกำลังมีค่า CBR ที่ต่างกันและหลากหลายเพิ่มขึ้น
3. ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลกระทบทางด้านเศรษฐศาสตร์และอายุการใช้งานของวัสดุ
4. นำแนวคิดอัตราส่วนต่อความสูง u/H และ $h(N-1)/H$ ในการหาตำแหน่งที่เหมาะสมไปประยุกต์ในต่อกับกรณีศึกษาอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- กรมทางหลวง. 2532. “มาตรฐานรองพื้นทางวัสดุมวลรวม.”
- กรมทางหลวงชนบท. 2559. “โครงการศึกษาการปรับปรุงเสริมกำลังคันทางถนนในพื้นที่ดินอ่อน รายงานกำหนดวิธีการปรับปรุง/ก่อสร้างให้มีความเหมาะสม สายทาง อย.5034.”
- กรมทางหลวงชนบท. 2560. “แบบแก้ไขคันทางทรุดตัวถนนสาย อย.5034 แยกทางหลวงชนบท อย.3006 - บ้านดอนทอง (ตอนที่ 1) อ.ลาดบัวหลวง และอ.เสนา จ.พระนครศรีอยุธยา.”
- กรมทางหลวงชนบท. 2561. “เอกสาร AY-5034-5+400.” สำนักวิเคราะห์ วิจัย และพัฒนา. (2018-2020).
- กรมโยธาธิการและผังเมือง. 2557. “มาตรฐานวัสดุรองพื้นทาง มยผ.2102-57.” กระทรวงมหาดไทย.
- กาญจนา ปิ่นวิเศษ. 2560. “การพัฒนาถนนดินซีเมนต์ผสมน้ำยางพารา.” วิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- การยางแห่งประเทศไทย. 2561. “ข้อมูลวิชาการยางพารา ปี 2561.” สถาบันวิจัยยาง การยางแห่งประเทศไทย. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- จตุรงค์ เสาวภาคย์ไพบูลย์, เตนนิส ที เบอร์กาโด, และธนวิทย์ กฤตภัครพงษ์. 2559. “การเพิ่มคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินลูกรังด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และ น้ำยาโพลีเมอร์เคมโรด.” บทความทางวิชาการวิศวกรรมโยธา.
- ชลธิ เร่บ้านเกาะ. 2554. “คู่มือปฏิบัติการทดลองปฐพีกลศาสตร์.” โครงการงานบัณฑิตศึกษา. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ธติพิงศ์ หล่อพิศาลชัย และคณะ. 2556. “การศึกษาคุณสมบัติทางด้านกำลังดินของดินซีเมนต์ผสมน้ำยางพารา.” วิทยานิพนธ์. สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม.
- พีรวัฒน์ ปลาเงิน. 2557. “การประยุกต์ใช้น้ำยางพาราและดินซีเมนต์พัฒนาสระน้ำด้านภัยแล้ง. รายงานการวิจัย.” สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม.
- มานิต ช่วยงาน. 2554. “ปฐพีกลศาสตร์ (Soil Mechanics).” เอกสารการสอน. สาขาวิชาช่างก่อสร้าง วิทยาลัยเทคนิคเชียงใหม่.
- ระพีพันธ์ แดงตันกี. 2559. “ถนนต้นแบบยางพาราดินซีเมนต์.” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วรรณวรางค์ รัตนานิกม. 2560. “ความถูกต้องและความแม่นยำของผลการทดสอบ Atterberg limit จากการทดสอบหลายวิธี.” รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน). ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560. มหาวิทยาลัยบูรพา
- ศลิษา ไชยพุทธ. 2561. “เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพชั้นดิน (Ground Improvement Techniques).” ศูนย์จำหน่ายตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สำนักงานกองทุนการวิจัยแห่งชาติ (สกว.). 2549. “คู่มือการทดสอบทางปฐพีกลศาสตร์ (Soil Mechanics Laboratory) คู่มือการทดลองเล่มที่ 1.” โครงการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับงานปฏิบัติการทดสอบวัสดุทางด้านวิศวกรรมโยธา. งบประมาณการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2547-2548.
- AASHTO. 1986. "Guide for Design of Pavement Structures." Washington, DC.
- Abd El Halim, A. O., Haas, R., and Chang, W. A. 1983. "Geogrid Reinforcement of Asphalt Pavements and Verification of Elastic Layer Theory." Research Board Record No. 949. TRB. 55-65.
- Ahmed Kamel, M., Chandra, S., and Kumar, P. 2004. “Behaviour of subgrade soil reinforced with geogrid.” *International Journal of Pavement Engineering*, 5(4), 201-209.
- Al-Omari, R.R., and Fekheraldin, M.K. 2012. “Measurement of Tensile Properties of Geogrids.” *Second International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment*. Kuala Lumpur, Malaysia.
- Artidteang, S., Bergado, D.T., Chaiyaput, S. 2012. “Stability Analyses of Embankment with Limited Life Woven Geosynthetics (LLGs) Reinforced on Soft Clay.” *Advances in Geotechnical Infrastructure*. Geotechnical Society of Singapore (GeoSS).
- Arwaedo, N., Chaiyaput, S., Sukchaisit, O., Auephattayakorn, K., Deawtipsukon, S. 2020. “Effect of Ribbed Smoked Sheet on CBR Strength of Lateritic Soil.” *The 5th International Conference on Smart Materials and Nanotechnology (SmartMat@2020)*. 332-338. Pattaya, Thailand.
- ASTM D1557. 2007. “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)).” *ASTM International*. West Conshohocken, PA.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ASTM D1883. 1999. "Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils." **ASTM International**. West Conshohocken, PA.
- ASTM D4318. 2000. "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils." **ASTM International**. West Conshohocken, PA.
- ASTM D4595. 2009. "Standard Test Method for Tensile Properties of Geotextiles by the Wide-Width Strip Method." **ASTM International**. West Conshohocken, PA.
- Brown, S. F., Brodrick, B. V., and Hughes, D. A. B. 1984. "Tensor Reinforcement of Asphalt: Laboratory Studies." **Proceedings of the Symposium on Polymer Grid Reinforcement in Civil Engineering**. Institution of Civil Engineers. 158-165.
- Calvarano, L.S., Palamara, R., Leonardi, G., Moraci, N. 2016. "Unpaved Road Reinforced with Geosynthetics." **Procedia Engineering**. Volume 158. p296-301.
- Carroll, R. G., Jr., Walls, J. G. and Haas, R. 1987. "Granular Base Reinforcement of Flexible Pavements Using Geogrids." **Proceedings of the Geosynthetics '87 Conference**. IFAI. 46-57.
- Chaiyaput, S., Bergado, D.T., and Artidteang, S. 2014. "Measured and Simulated Results of A Kenaf Limited Life Geosynthetics (LLGs) Reinforced Test Embankment on Soft Clay." **Geotextiles and Geomembranes**, 42 (1). 39-47.
- Chen, Q. 2007. "An Experimental Study on Characteristics and Behavior of Reinforced Soil Foundation." Doctoral Dissertations of Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College.
- Christopher, B.R. 2010. "Geogrids in Roadway and Pavement Systems." NAUE GmbH & Co. KG, and Global Synthetics Pty Ltd. 23 Nov. – 1 Dec., 2010.
- Esmaili, M., Naderi, B., Neyestanaki, H.K., and Khodaverdian, A. 2018. "Investigating The Effect of Geogrid on Stabilization of High Railway Embankments." *Soils and Foundations*, 58(2). 319–332. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.02.005>
- Giroud, J.P. and Han, J. 2004a. "Design Method for Geogrid Reinforced Unpaved Roads–Part I: Theoretical Development." **ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**.
- Giroud, J.P., Ah-Line, C., and Bonaparte, R. 1984. "Design of Unpaved Roads and Trafficked Areas with Geogrids." **Proceedings of the symposium on Polymer Grid Reinforcement in Civil Engineering**. Institute of Civil Engineers. 116-127.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Haas, R. 1984. "Structural Behavior of Tensar Reinforced Pavements and Some Field Applications." **Proceedings of the Symposium on Polymer Grid Reinforcement in Civil Engineering**. Institution of Civil Engineers. 166-170.
- Haliburton, T.A., Lawmaster, J.D. and McGuffey, V.C. 1981. "**Use of Engineering Fabrics in Transportation Related Applications.**" Federal Highway Administration, FHWA DTFH61-80-C-00094.
- Han, B., Ling, J., Shu, X., Gong, H., and Huang, B. 2018. "Laboratory Investigation of Particle Size Effects on The Shear Behavior of Aggregate-Geogrid Interface." **Construction and Building Materials**. Volume 158. p1015-1025. ISSN 0950-0618
- Hogentogler, C.A. 1936. "Essentials of Soil Compaction." Proceedings of the Highway Research Board. **National Research Council, Washington D. C.** 309-316.
- Johnson, A.W., and Sallberg, J.R. 1960. "**Factors that Influence Field Compaction of Soil (Compaction Characteristics of Field Equipment).**" Highway Research Board, Bullentin 272. pp.206
- Kennepohl, G.J.A. and Kamel, N. I. 1984. "Construction of Tensar Reinforced Asphalt Pavements," **Proceedings of the Symposium on Polymer Grid Reinforcement in Civil Engineering**. Institution of Civil Engineers. 171-175.
- Koerner, R. M. 1997. "**Designing with Geosynthetics, 5th Edition.**" Geosynthetic Institute Emeritus Professor of Drexel University. Pearson Education, Inc. United States of America.
- Molenaar, A.A.A. and Nods, M. 1996. "Design Method for Plain and Geogrid Reinforced Overlays on Cracked Pavements." **Proceedings of the 3rd International RILEM Conference**. edited by L. Francken, E. Beuving, and A.A.A. Molenaar. E & FN Spon. 311-320.
- Nagrare, P.P., Sawant, P.H. and Pusadkar, S.S. 2010. "Laboratory Investigation of Reinforced Sub Grade Soils." **Indian Geotechnical Conference, GEOTrendz**.
- PLAXIS. 2020. "**PLAXIS 2D-Reference Manual Last Updated: September 01, 2020, Connect Edition 20.04.**" Bentley.
- PLAXIS. 2020. "**PLAXIS 2D-Tutorial Manual Last Update: June 04, 2020, Connect Edition 20.03.**" Bentley.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wulandari, P.S., and Tjandra, D. 2015. "Analysis of Geotextile Reinforced Road Embankment using PLAXIS 2D." *Procedia Engineering* 125. 358-362.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effect of Ribbed Smoked Sheet on CBR Strength of Lateritic Soil

Nakib Arwaedo¹, Salisa Chaiyaput^{1*}, Ochakkraphat Sukchaisit¹, Kantinan Auephattayakorn¹,
Sahatsawat Deawtipsukon¹

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok 10520, Thailand

*email: salisa.fern@gmail.com; salisa.ch@kmitl.ac.th

Abstract. The government's policy has attempted to improve the para rubber prices, which has a continuously decreasing trend. This research developed the application of para rubber parallel with the infrastructure development by investigating the strength and elastic properties of ribbed smoked sheet (RSS) used in a geogrid function for road construction. RSS can be classified into 6 grades (RSS1X to RSS5), which follow the top grade to the low grade, respectively. The wide-width tensile strength was carried out in the laboratory to determine and proposed the suitable RSS-geogrid pattern as reinforced material for road construction. The performance of proposed RSS-geogrid pattern was evaluated in the laboratory by California Bearing Ratio (CBR) test with lateritic soil (type E). Due to the effect of subsoil strength, the lateritic soil grade E was classified into E1 (CBR = 64.53%) and E2 (CBR = 40.56%). The CBR testing was carried out and compared under 4 conditions, which were E1, E2, E1 was reinforced with RSS-geogrid (E1-RSS), E2 was reinforced with RSS-geogrid (E2-RSS), respectively. The results revealed that the tensile strength of RSS was positively correlated with the increase of the RSS thickness. The RSS grade 3 (RSS3) with square-opening (20 mm x 20 mm) was suitable pattern. The CBR of E1-RSS (CBR = 64.31%) was found to be lower than the CBR of E1, while the CBR of E2-RSS (CBR = 49.95%) was found to be higher than the CBR of E2. Therefore, the RSS-geogrid was strongly recommended as reinforced material to improve the strength in lateritic soil, which had the low CBR values.

Keywords: RSS; para rubber; reinforcement; geogrid.

Introduction

In the past, para rubber was one of the most important economic crop of Thailand, which made high export income, causing many farmers interested to para rubber plantation. On the other hand, para rubber prices are currently experiencing the problem. Natural rubber can produce latex, block rubber, and RSS. Many researchers offered to applied concentrated latex to improve the strength of soil cement roads and increase the price of para rubber [1,2]

According to technical data of rubber in 2018 by Rubber Authority of Thailand (2018), RSS is made from the coagulated latex sheets, which are smoked in an oven at suitable temperature [3]. The oven process can reduce moisture and control elasticity of RSS. Moreover, the qualities of RSS depend on many factors such as purity, elasticity, colors, air bubbles, defections, shape, and moisture. The RSS can be classified into 6 grades; RSS grade 1X (RSS1X), RSS grade 1 (RSS1), RSS grade 2 (RSS2), RSS grade 3 (RSS3), RSS grade 4 (RSS4), and RSS grade 5 (RSS5). RSS1X is the best quality but RSS5 is the worst quality [3,4].

Geosynthetic materials has become one alternative to use as reinforced material for road construction. Geogrid, which is one of geosynthetic materials, is made from polymer such as polypropylene, high density polyethylene, polyester, or other polymer with high elastic properties. Biaxial geogrid can distribute load in both directions, machine direction (MD) and cross direction (CD). Geogrid produces the interlocking between aggregates and forming a confined zone with 3 functions, which are lateral restraint, bearing capacity increment, and membrane support [5,6,7,8]. Many researchers investigated the effect of geogrid reinforcement on road and railway construction.

The results can confirm that the geogrid reinforcement can increase the bearing capacity and remarkably decreased the settlement [9,10]. Geogrid with small opening size can reduce the pavement rutting, and geogrid with high strength also can reduce the pavement rutting [11]. Moreover, Ziegler (2017) investigated that the high-strength geogrids can be used for the steep slopes construction and bridge abutments [10].

RSS is an elastic material, which is the same with geogrid material. Therefore, the aim of this research is to intensive study the performance of RSS as geogrid functions to improve the strength of lateritic soil based on the CBR from the laboratory testing. The CBR results were compared under 4 conditions, which were E1, E2, E1-RSS and E2-RSS, respectively.

Ribbed Smoked Sheet Rubber (RSS)

RSS grade 3 was performed to investigate the properties of RSS for road reinforcement. According to ASTM D5199 [12], the thickness of RSS was measured. The thickness of RSS was found between 2.90 mm to 3.90 mm. Moreover, the tensile strength properties of RSS were tested by wide-width strip method.

The RSS sample was prepared in shape of square, which was dimension 200 x 200 mm. The RSS sample was gripped between two clamps with a separation of 100 mm. To prevent the RSS damage due to clamping, the RSS sample was taped on both sides as shown in Figure 1.

ASTM D4595 [13] standard test method to determine the tensile properties of RSS, called the wide-width strip method, was obtained by using universal testing machine (Instron 5567) at a speed of 10 mm/min (10% strain rate) with a gauge length of 100 mm as shown Figure 2. Then, the load was applied until RSS failure.

Lateritic Soil

According to the standard of DH-S 205/2532 [14] of the Thailand Department of Highways has classified the grade of lateritic soil base on the grain size distributions for applying as subbase material (Table 1). Lateritic soil is classified into five grades; A, B, C, D and E. Grade A is the best property of lateritic soil with the highest maximum dry density and CBR values but the lowest optimum water content value. Meanwhile the last order grade is E in which the lateritic soil has the lowest maximum dry density and CBR but the highest optimum water content [15].



Figure 1. The RSS sample was taped on both sides.

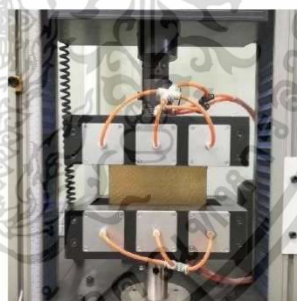


Figure 2. The wide-width strip method with universal testing

Table 1. Grain size distributions for subbase course classification by the Thailand Department of Highways.

Sieve size	Percent passing by weight [%]				
	Grade A	Grade B	Grade C	Grade D	Grade E
2" (50.00 mm)	100	100	-	-	-
1" (25.00 mm)	-	-	100	100	100
3/8" (9.50 mm)	30-65	40-75	50-85	60-100	-
No.10 (2.00 mm)	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100
No.40 (0.425 mm)	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50
No.200 (0.075 mm)	2-8	5-20	5-15	5-20	6-20

The lateritic soil grade E was used in this research. Gradation of lateritic soil was performed by sieve analysis in order to determine the grain sizes distribution as shown in Figure 3. For lateritic soil grade E with high CBR (E1), the percent passing through sieve no. #10, #40, and #200 of the lateritic soil was 70.00 wt%, 31.00 wt%, and 6.00 wt%, respectively. For lateritic soil grade E with low CBR (E2), the percent passing through sieve no. #10, #40, and #200 of the lateritic soil was 75.67 wt%, 37.10 wt%, and 13.51 wt%, respectively.

The liquid limit (LL), plastic limit (PL), and plasticity index (PI) of lateritic soil were characterized by Atterberg's limits test base on standard AASHTO T 89 and AASHTO T 90 [16,17]. The LL and PL of E1 (CBR = 64.53%) were 48.00% and 21.54%, respectively. The PI of E1 was 26.46% (PI = LL - PL). Moreover, The LL and PL of E2 (CBR = 40.56%) were 48.00% and 23.23%, respectively. The PI of E2 was 24.77%. The average optimum moisture content (OMC) of lateritic soil was 14% at the maximum dry densities of 1.86 g/cm³ as shown in Table 2.

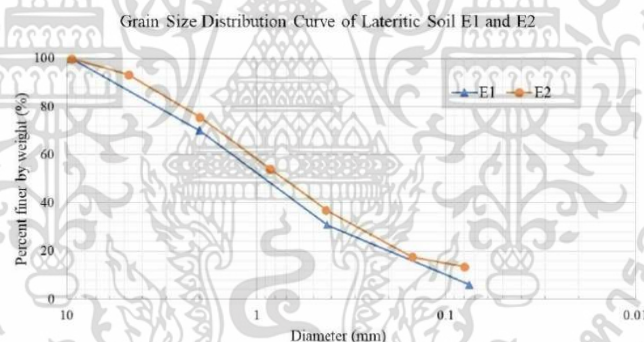


Figure 3. Grain size distributions of lateritic soil E1 and E2.

Table 2. Atterberg's limit, optimum moisture content, and dry density of E1 and E2.

Soil Types	OMC [%]	Dry Density γ_{dry} [g/cm ³]	LL [%]	PL [%]	PI [%]	CBR [%]
E1	14.00	1.86	48.00	21.54	26.46	64.53
E2	14.00	1.86	48.00	23.23	24.77	40.56

CBR Testing

RSS-Geogrid. The RSS was prepared to investigated as a geogrid function, called RSS-geogrid, to reinforced the lateritic soil based on CBR test. According to the CBR molds (cylindrical molds with 152.4 mm inner diameter and 177.8 mm height), the RSS with apertures size 20 x 20 mm was cut as a circular shape (Figure 4).

Testing Conditions. The CBR testing was carried out and compared under 4 conditions, which were lateritic soil E1 non-reinforcement (E1), lateritic soil E2 non-reinforcement (E2), lateritic soil E1 with RSS-geogrid reinforcement (E1-RSS), and lateritic soil E2 with RSS-geogrid reinforcement (E2-RSS), respectively. The lateritic soil was transferred into cylindrical molds of 152.4 mm in diameter in sequential order of five equal amounts of soil sample up to the top surface of mold. The RSS-geogrid was placed between layers 2 and 3 from the bottom of mold. Figure 5 and 6 illustrated the installation of RSS-geogrid between lateritic soil layer in the CBR mold.



Figure 4. The circular shape of RSS-geogrid with apertures size 20 x 20 mm.



Figure 5. RSS-geogrid installation in the CBR mold.

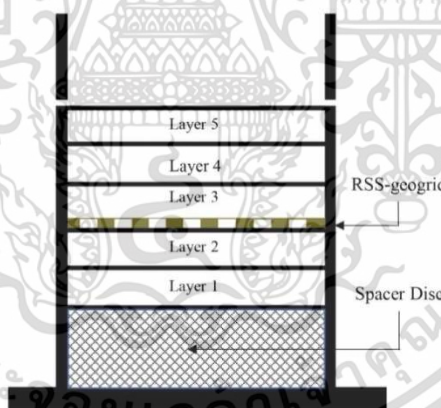


Figure 6. RSS-geogrid reinforced between layer 2 and 3 of lateritic soil in the CBR mold.

CBR Testing Method. ASTM D1883 [18] was a standard of CBR testing method. The standard is tested under condition of OMC, which obtained from compaction of soil using modified effort test, ASTM D1557 [19]. Dry density and OMC of E1 and E2 were 1.86 g/cm³ and 14.00 %, respectively. CBR under non-reinforcement condition (E1 and E2), lateritic soil E1 and E2 were mixed homogeneously with tap water of OMC (14.00 %) from compaction test. The soil samples were transferred into cylindrical molds with 152.4 mm inner diameter and 177.8 mm height and compacted by a 10.00 lbf (44.48 N) rammer, which dropped from 457.2 mm height. Compacted soil was separated in 5 layers for a mold. Each layer of soil sample was compacted 56 blows. After compaction, the perforated base plate and spacer disk were taken out. The molds containing compacted soil samples were weighed and recorded. A disk of coarse filter paper was placed on the top of the soil sample prior to overturn the CBR mold. In penetration testing, a steel penetration piston with 50 mm-diameter connected to proving ring was inserted through the center point and the penetration performed. The load measurements corresponding to the deformation of every 0.64 mm (0.025 in) were taken to calculate the bearing capacity of lateritic soil E1 and E2.

For CBR under reinforcement conditions (E1-RSS and E2-RSS) were the same preparation procedure with non-reinforcement conditions (E1 and E2). On the other hand, the RSS-geogrid was placed at the top of the layer 2 of compacted lateritic soil.

Result and Discussions

CBR. Table 3 showed the CBR results in E1, E2, E1-RSS, and E2-RSS. To determine the effect of RSS reinforcement on the CBR of lateritic soil, E1 (64.53%) and E2 (40.56%) were representative of the lateritic soil in case of high CBR and low CBR, respectively. Consideration the effect of RSS reinforced lateritic soil in high CBR value, E1 and E1-RSS were compared. The CBR value in the case of E1-RSS (64.31%) was lower than the case of E1 (64.53%). This result showed that the CBR of lateritic soil in case of RSS reinforcement was decreases by 0.34%. Whereas, the E2 and E2-RSS were compared to determine the effect of RSS reinforced lateritic soil in low CBR value. The CBR value in the case of E2-RSS (49.95%) was higher than the E2 case (40.56%) with a percentage difference of 23.15%.

Relationship between Thickness and Maximum Tensile Forced. The RSS grade 3 was investigated under 2 conditions, which were single sheet (RSS-SS) and double sheets (RSS-DS). In each condition of the experiment, two RSS-samples were prepared and tested. As the results, the wide-width tensile strength of RSS was positively correlated with the increase of the RSS thickness as shown in Table 4. According to the relationship between maximum tensile forced and thickness of RSS, the equation of maximum tensile forced and thickness was proposed as shown in Figure 7. The equation was obtained as follows:

$$y = 7.628x^3 - 111.59x^2 + 537.12x - 721.39. \quad \text{with } R^2=1 \quad (1)$$

where; y is maximum tensile forced, x is the RSS thickness.

Table 3. The comparison of CBR value in E1, E2, E1-RSS, and E2-RSS.

Soil Types	Conditions	CBR [%]	Percentage Difference [%]
E1	Non-reinforced (E1)	64.53	-0.34
	Reinforced 1 layer (E1-RSS)	64.31	(Decreased)
E2	Non-reinforced (E2)	40.56	+23.15
	Reinforced 1 layer (E2-RSS)	49.95	(Increased)

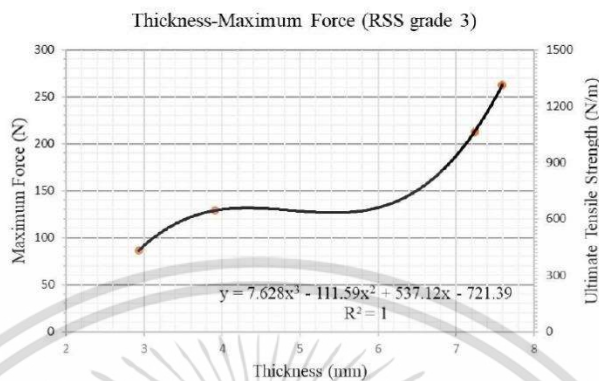


Figure 7. The relationship between thickness and maximum tensile forced of RSS.

Table 4. The wide-width tensile strength of RSS under RSS-SS and RSS-DS conditions.

Sample No.	Thickness [mm]	Maximum Forced [N]	Ultimate Tensile Strength [N/m]
RSS-SS-01	2.929	86.23	431.15
RSS-SS-02	3.909	128.80	644.00
RSS-DS-01	7.235	212.60	1063.00
RSS-DS-02	7.591	262.63	1313.15

Summary

This research investigated the effect of RSS reinforcement as geogrid functions, called RSS-geogrid, on the CBR strength of lateritic soil under 4 conditions, which were lateritic soil in high CBR (E1), lateritic soil in low CBR (E2), E1 with RSS-geogrid reinforcement (E1-RSS), and E2 with RSS-geogrid reinforcement (E2-RSS), respectively. The findings are as follows:

1. The RSS-geogrid is strongly recommended as reinforced material to improve the strength in lateritic soil, which has the low CBR values. In the case of RSS-geogrid reinforcement in high CBR values of soil, it is not recommended as reinforced material because it acts as a weak layer in a hard soil.
2. The wide-width tensile strength of RSS depends on the thickness of RSS.

References

- [1] S. Pahasuwanno, K. Inkliang, B. Hanhongart, A study of para soil cement road construction. 11th THAICID National Symposium. (2018) 265-276 (in Thai).
- [2] K. Pinwiset, W. Raksuntorn, and B. Wittehayangkoon, An investigation and test of natural rubber latex soil cement road. International Transaction Journal of Engineering Management & Applied Sciences & Technologies, 9(2) (2018) 67-74.
- [3] Rubber Authority of Thailand, Technical data of rubber in 2018. Retrieved June 2, 2020, from https://www.rubber.co.th/download/technical_data_of_rubber_61.pdf (in Thai).

- [4] S. Nualsuwan, Natural rubber reinforced with silica from rice husk. Master thesis, Department of Material Science, Chulalongkorn University, Thailand, 1995 (in Thai).
- [5] T.A. Haliburton, J.D. Lawmaster, and V.C. McGuffey, Use of engineering fabrics in transportation related applications, Federal Highway Administration, FHWA DTFH61-80-C-00094. (1981).
- [6] J.P. Giroud, C. Ah-Line, and R. Bonaparte, Design of unpaved roads and trafficked areas with geogrids. Proceedings of the symposium on Polymer Grid Reinforcement in Civil Engineering. Institute of Civil Engineers. (1984) 116-127.
- [7] R.M. Koerner, Designing with Geosynthetics, 5th Edition. Geosynthetic Institute Emeritus Professor of Drexel University. Pearson Education, Inc. United States of America, 1997.
- [8] B.R. Christopher, Geogrids in roadway and pavement systems. NAUE GmbH & Co. KG, and Global Synthetics Pty Ltd. 23 Nov. – 1 Dec., 2010. 10-12.
- [9] M. Esmaeili, B. Naderi, H.K. Neyestanaki, and A. Khodaverdian, Investigating the effect of geogrid on stabilization of high railway embankments. Soils and Foundations. 58(2) (2018) 319–332. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.02.005>.
- [10] M. Ziegler, Application of geogrid reinforced constructions: history, recent and future developments. Procedia Engineering. 172 (2017) 42–51.
- [11] K. Songsri, and W. Gasaluck, Behavior of the base course reinforced with geogrid. Research and Development Journal. The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage. 27(3), July-September 2016. 7-15 (in Thai).
- [12] ASTM. Standard test method for measuring the nominal thickness of geosynthetics. D5199-12. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [13] ASTM. Standard test method for tensile properties of geotextiles by the wide-width strip method. D4595-09. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.
- [14] Department of Highway, Thailand. The standard of subbase course. Standards for highway construction. DH-S 205/2532, 1989 (in Thai).
- [15] S. Ruedeeviroj, and P. Duangdeun, Effect of gradation and fine particles in soil mass on engineering properties of lateritic soil mixed with fly ash. Proceedings of the 10th National Convention on Civil Engineering, Engineering Institute of Thailand, Pataya, Pattaya, Thailand, 2005 (in Thai).
- [16] AASHTO. Standard method of test for determining the liquid limit of soils, Edition, 2013. AASHTO T 89. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
- [17] AASHTO. Standard method of test for determining the plastic limit and plasticity index of soils, Edition, 2020. AASHTO T 90. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
- [18] ASTM. Standard test method for CBR (California Bearing Ratio) of laboratory-compacted soils. D1883-99. ASTM International, West Conshohocken, PA, 1999.
- [19] ASTM. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)). D1557-07. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.



ภาคผนวก ข.

ผลการทดสอบ CBR และการבודอัดดินในห้องปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



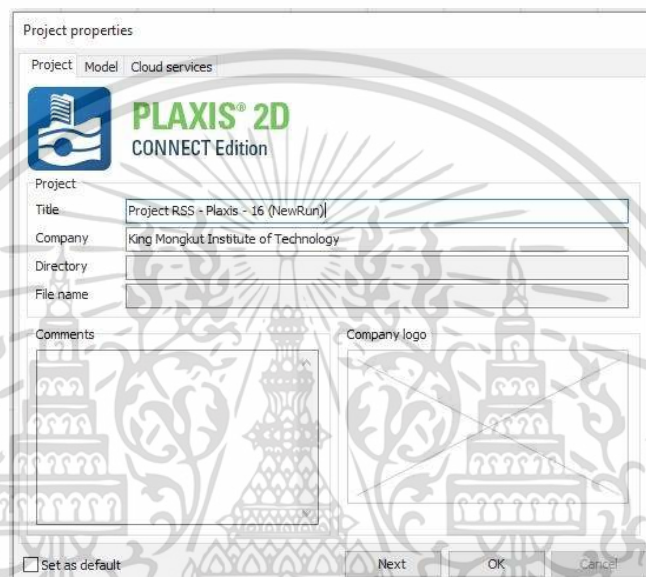
ภาคผนวก ค.
วิธีการสร้างแบบจำลองด้วย PLAXIS 2D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

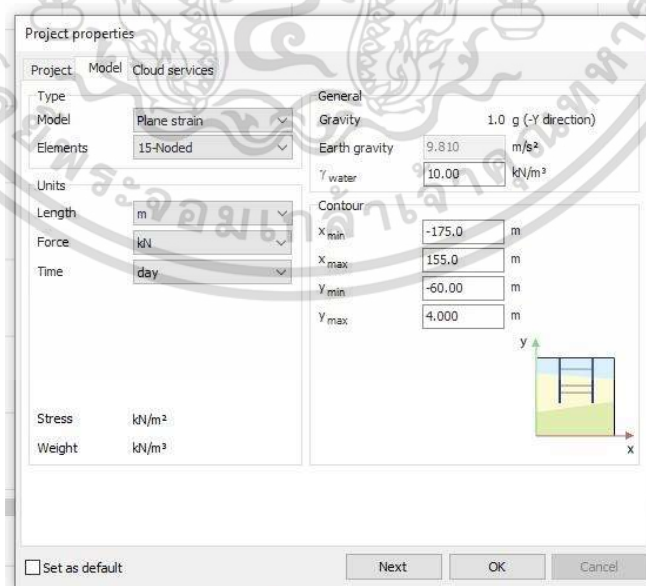
1. การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินทางแนวราบ u_x เพื่อปรับเทียบดินเดิม

Project Properties

1. ในส่วน project ให้สร้างโปรเจกใหม่ และกำหนดชื่อของโปรเจก (รูปที่ ค.1)
2. ในส่วน model กำหนดให้เป็น plane strain และ elements 15-node ให้ค่าหน่วยน้ำหนักน้ำเท่ากับ 10.00 kN/m^3 โดยขอบเขตของแบบจำลอง $x(\text{min})$, $x(\text{max})$, $y(\text{min})$, และ $y(\text{max})$ เท่ากับ -175 , 155 , -60 , 4 m ตามลำดับ (รูปที่ ค.2)



รูปที่ ค.1 project properties ในส่วน project



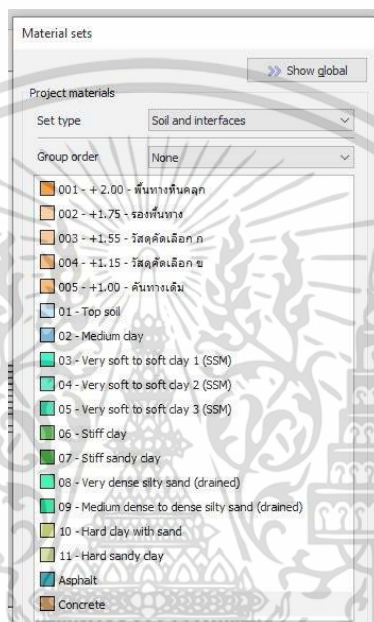
รูปที่ ค.2 project properties ในส่วน model

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

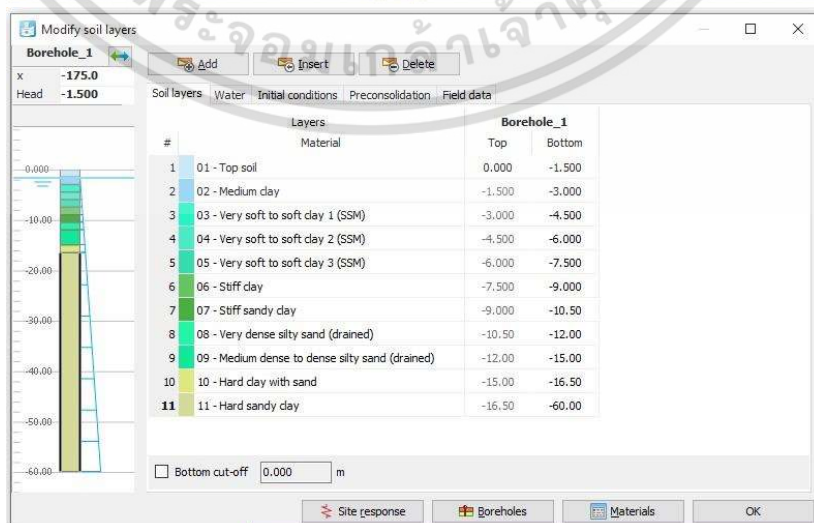
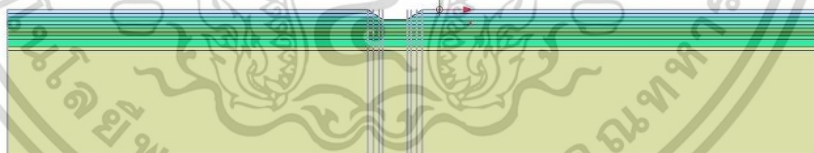
Soil

3. กำหนดข้อมูลของดิน (material sets) ในประเภท soil and interfaces ตามชั้นดินที่ได้แบ่งชั้นดินไว้ (รูปที่ ค.3)

4. สร้าง borehole ทั้งหมด 9 หลุมตามลักษณะของชั้นดิน พร้อมทั้งกำหนดค่า modify soil layers ในแต่ละหลุมตามชั้นดินที่ได้แบ่งไว้ ซึ่งรูปที่ ค.4 แสดงถึง geometry และตัวอย่างการกำหนดค่าใน borehole หมายเลข 1



รูปที่ ค.3 material sets



รูปที่ ค.4 geometry และตัวอย่างการกำหนดค่าใน borehole หมายเลข 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ภายในเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Structure

5. สร้างคันดินโดยใช้ปุ่ม create soil polygon ดังแสดงในรูปที่ ค.5 และสร้างคันดินเพื่อให้น้ำหนักชั้นดินเดิมดังแสดงในรูปที่ ค.6 คือ สี่เหลี่ยมที่มีพิกัดเท่ากับ (-4,2), (4,2), (-7,0), และ (7,0) และมีข้อมูลชั้นดินดังแสดงในตารางที่ ค.1 ซึ่งแบ่งชั้นตามรายละเอียดของชั้นผิวทางและภาพตัดของถนนสายทาง อย.5034 ดังรูปที่ 3.17

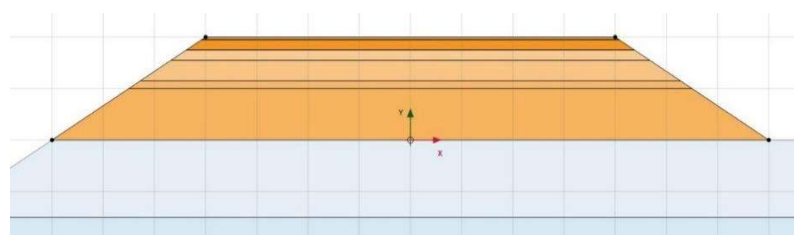
6. ให้น้ำหนักเพิ่มเติมโดยใช้ปุ่ม create line load เพื่อสร้างน้ำหนักกระจายคงที่ กำหนดให้เท่ากับ 10.00 กิโลนิวตันต่อเมตร มีทิศลง และรายละเอียดดังรูปที่ ค.7

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลชั้นดินที่ให้น้ำหนักดินเดิมเพื่อเปรียบเทียบ (validate) ข้อมูลดิน

No.	Material	Depth (m)	Model	Material behavior	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{un} (kN/m ³)	E_{ref} (kPa)	ν'	c' (kPa)	ϕ' (deg)	ψ (deg)
0	concrete ผิวทาง		linear elastic	non porous	-	24	30000000	0.10			
1	พื้นทางหินคลุก หนา 0.25 ม. (+ผิว 0.05)	+2.00	MCM	drained	20	18	55000	0.30	1.00	33.00	3
2	รองพื้นทาง Soil aggregate หนา 0.2 ม.	+1.75	MCM	drained	20	18	45000	0.30	1.00	25.00	3
3	วัสดุคัดเลือกประเภท ก. หนา 0.40 ม.	+1.55	MCM	drained	19	17	30000	0.30	5.00	20.00	1
4	วัสดุคัดเลือกประเภท ข. หนา 0.15 ม.	+1.15	MCM	drained	19	17	30000	0.30	5.00	20.00	0
5	ขุดรื้อคันทางเดิม 1 ม.	+1.00	MCM	drained	19	17	15000	0.30	5.00	20.00	0

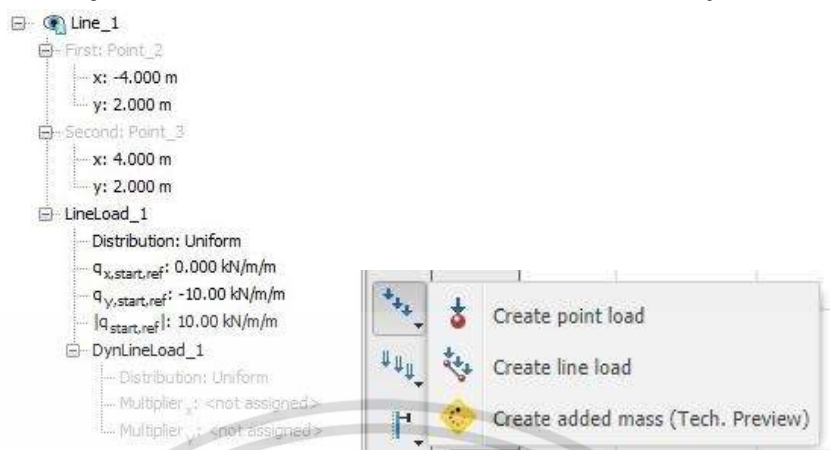


รูปที่ ค.5 create soil polygon



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค.6 คำนดินที่ให้นำหน้าบนดินเดิมเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลดิน



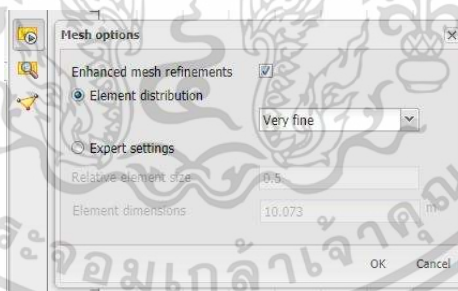
รูปที่ ค.7 create line load เพื่อสร้างน้ำหนักกระจายคงที่

Mesh

7. กดปุ่ม generate mesh เพื่อสร้าง mesh ขึ้นมา ในส่วน mesh options ให้กำหนด element distribution ความละเอียดระดับละเอียดมาก (very fine) ดังรูปที่ ค.8

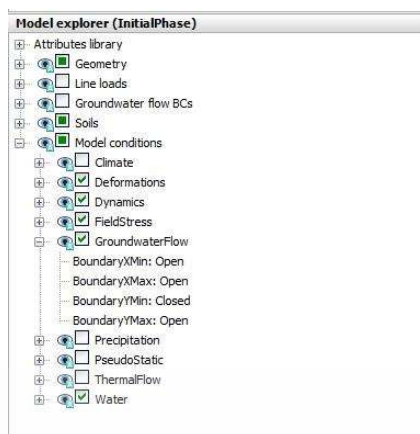
Initial Phase (Flow Condition)

8. ในส่วนของ flow condition ให้กำหนดใน model explorer คือ มี groundwater flow condition และกำหนดระดับน้ำโดยใช้ global water level ตาม borehole water level (-1.50 เมตร) ดังแสดงในรูปที่ ค.9 และรูปที่ ค.10

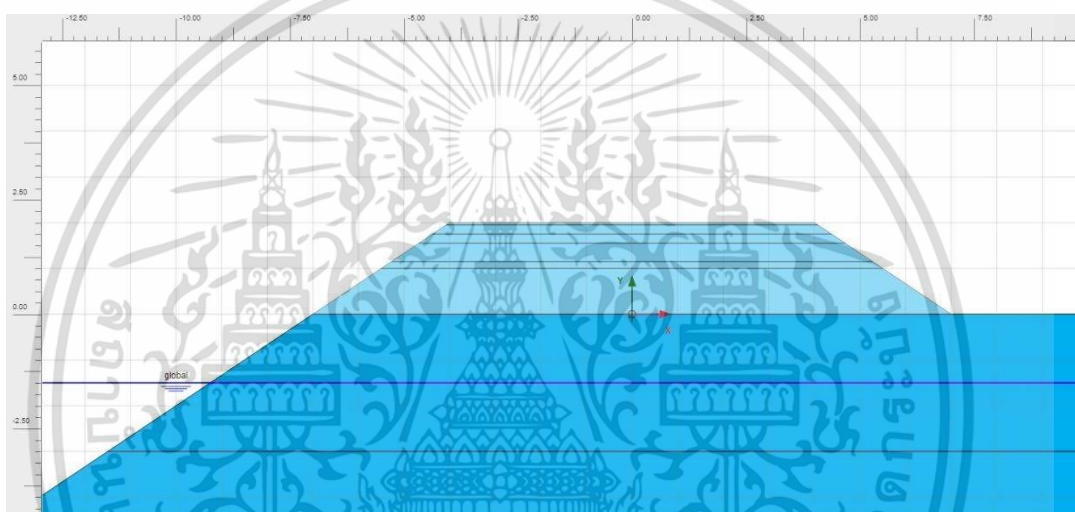


รูปที่ ค.8 generate mesh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.9 groundwater flow condition



รูปที่ ค.10 global water level ตาม borehole water level (-1.50 เมตร)

Stage of Construction

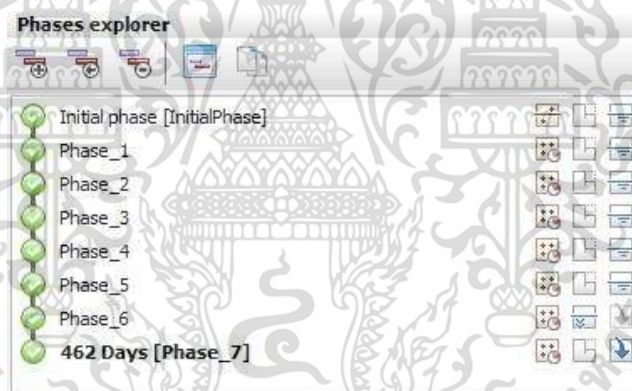
9. หลังจากสร้าง initial phase แล้ว ในขั้นตอนนี้เป็นการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างจริง โดยทำการก่อสร้างทั้งหมด 7 phase (รูปที่ ค.11) มีรายละเอียดดังนี้

- phase 1: สร้างคันทางเดิม 1 เมตร และวัสดุคัดเลือกประเภท ข. 0.15 เมตร โดยใช้ประเภทการคำนวณแบบ consolidation ประเภทการให้น้ำหนักแบบ stage construction ด้วยกับเวลา time interval เท่ากับ 2 วัน
- phase 2: ทำการปล่อยให้ดินเกิดการอัดตัวคายน้ำ (consolidation) ด้วยกับเวลา time interval เท่ากับ 30 วัน โดยไม่ก่อสร้างเพิ่มเติม
- phase 3: สร้างวัสดุคัดเลือกประเภท ก. 0.40 เมตร และชั้นรองพื้นทางหนา 0.2 เมตร โดยใช้ประเภทการคำนวณแบบ consolidation ประเภทการให้น้ำหนักแบบ stage construction ด้วยกับเวลา time interval เท่ากับ 2 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

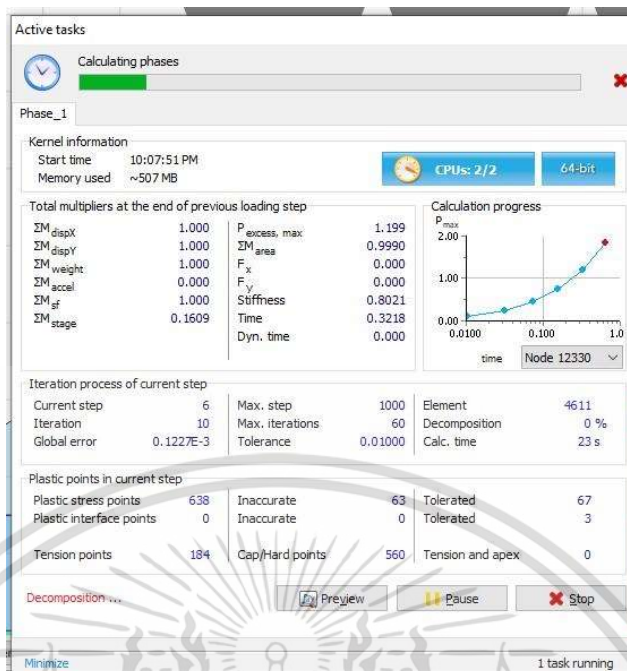
- phase 4: ทำการปล่อยให้ดินเกิดการอัดตัวคายน้ำ (consolidation) ด้วยกับเวลา time interval เท่ากับ 30 วัน โดยไม่ก่อสร้างเพิ่มเติม
- phase 5: สร้างวัสดุพื้นทางหินคลุกหนา 0.25 เมตร และชั้นผิวทางหนา 0.05 เมตร โดยใช้ประเภทการคำนวณแบบ consolidation ประเภทการให้น้ำหนักแบบ stage construction ด้วยกับเวลา time interval เท่ากับ 1 วัน
- phase 6: ทำการปล่อยให้ดินเกิดการอัดตัวคายน้ำ (consolidation) โดยให้น้ำหนักแบบ minimum excess pore water pressure กล่าวคือ ให้ดินมีการอัดตัวคายน้ำจนมีความดันน้ำส่วนเกินถึงจุดที่กำหนด (กำหนดไว้ที่ 1.000 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร)
- phase 7: เป็นขั้นตอนที่ทำการให้น้ำหนักบนดินโดยใช้ line load ขนาด 10.00 กิโลนิวตันต่อเมตร ทำการ activate line load ในขั้นตอนการก่อสร้างนี้ โดยใช้งานถนนไปเป็นเวลา time interval เท่ากับ 462 วัน เพื่อให้เทียบเท่ากับการวัดในสนามจริงที่เวลาผ่านไปเท่ากัน

10. ทำการคำนวณโดยกดปุ่ม calculate ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงท้ายสุด (รูปที่ ค.12)



รูปที่ ค.11 construction phase

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

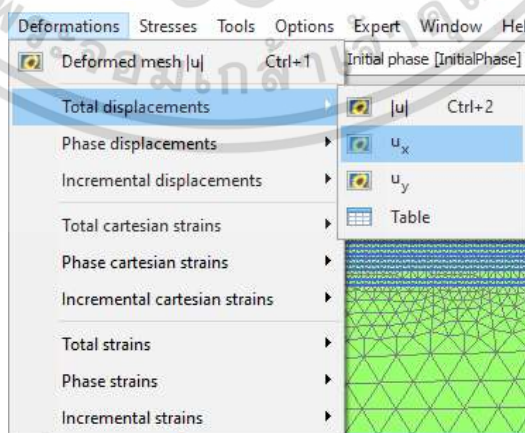


รูปที่ ค.12 การแสดงผลระหว่างทำการคำนวณ (calculating phase)

Result

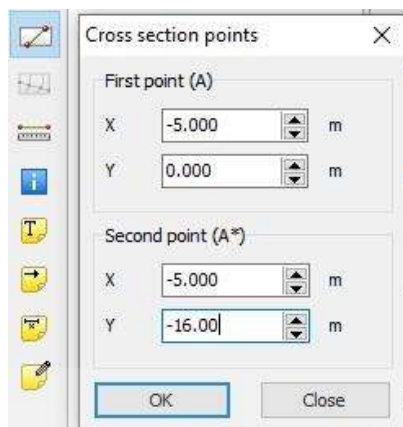
11. เมื่อคำนวณเสร็จแล้วให้เข้าสู่โปรแกรมส่งออก (output) โดยการกดที่ปุ่ม view calculation result โดยสิ่งหลักที่สนใจในส่วนนี้คือการเคลื่อนตัวด้านข้างของดินเดิม (เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลในสนาม) โดยไปที่ deformation > total displacement > u_x ซึ่งหมายถึงระยะการเคลื่อนตัวในแนวราบ (รูปที่ ค.13)

12. จากนั้นกดปุ่ม line cross section เพื่อหาการเคลื่อนตัวในแนวราบ (u_x) จุดพิกัด (-5, 0) ถึง (-5, -16) ดังแสดงในรูปที่ ค.14 และได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.22 (b)



รูปที่ ค.13 การแสดงผลค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของดินเดิมเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลในสนาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

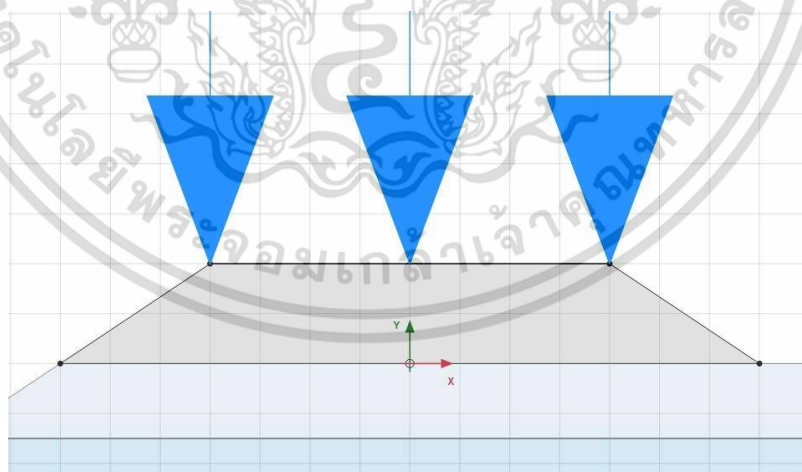


รูปที่ ค.14 cross section point เพื่อหาการเคลื่อนตัวในแนวราบ (u_x) จุดพิกัด (-5, 0) ถึง (-5, -16)

2. การวิเคราะห์หาอัตราส่วนปลอดภัย (FS) ด้วย Phi-C Reduction

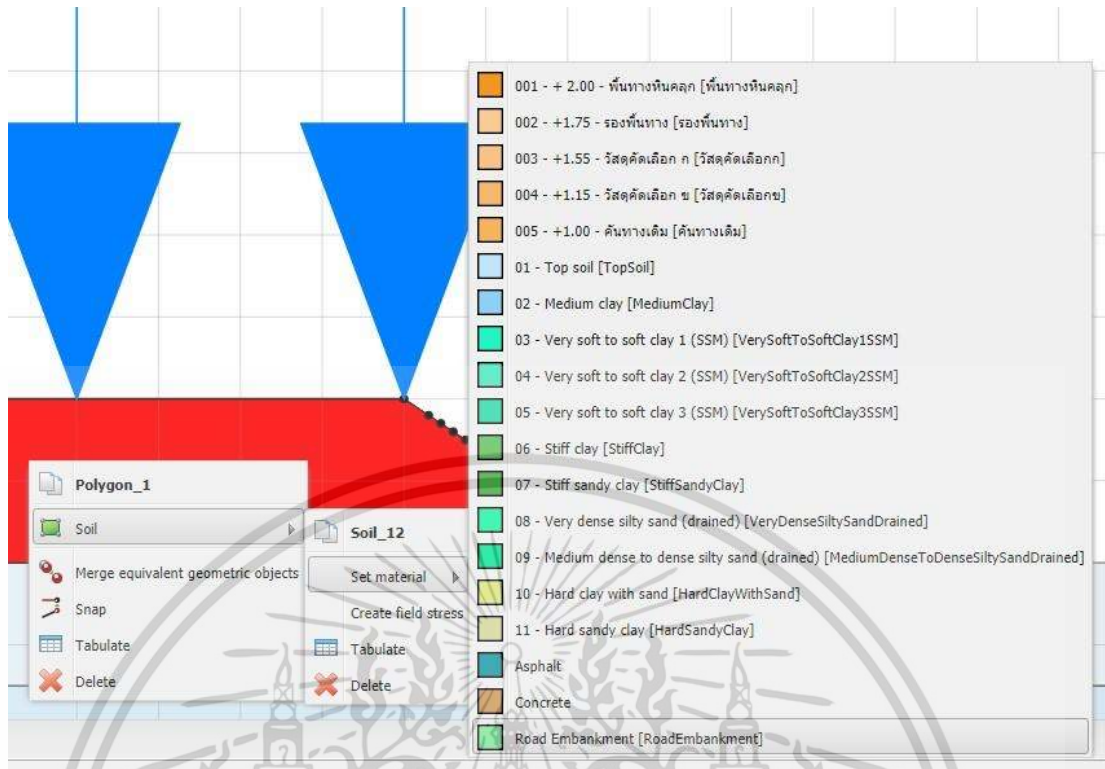
2.1 กรณีไม่เสริมกำลัง (Non-Reinforced)

1. ตั้งค่าในส่วน project properties และในส่วน soil เหมือนกับค่าที่กำหนดใน รูปที่ ค.1 ถึงรูปที่ ค.4 เนื่องจาก geometry, borehole, และ material data set ของดินเดิมเหมือนกัน
2. สร้างคันดินโดยใช้ปุ่ม create soil polygon ดังแสดงในรูปที่ ค.15 โดยเป็นสี่เหลี่ยมที่มีพิกัดเท่ากับ (-4,2), (4,2), (-7,0), และ (7,0) โดยไม่ต้องตัดคันดินให้เป็นชั้น
3. กำหนดข้อมูลดินของคันดินโดยใช้คำสั่ง set material เลือกที่ชั้นดินที่ต้องการ รูปที่ ค.16 แสดงถึงตัวอย่างการกำหนดข้อมูลดินของคันดินถนน (road embankment) ในเงื่อนไข NO



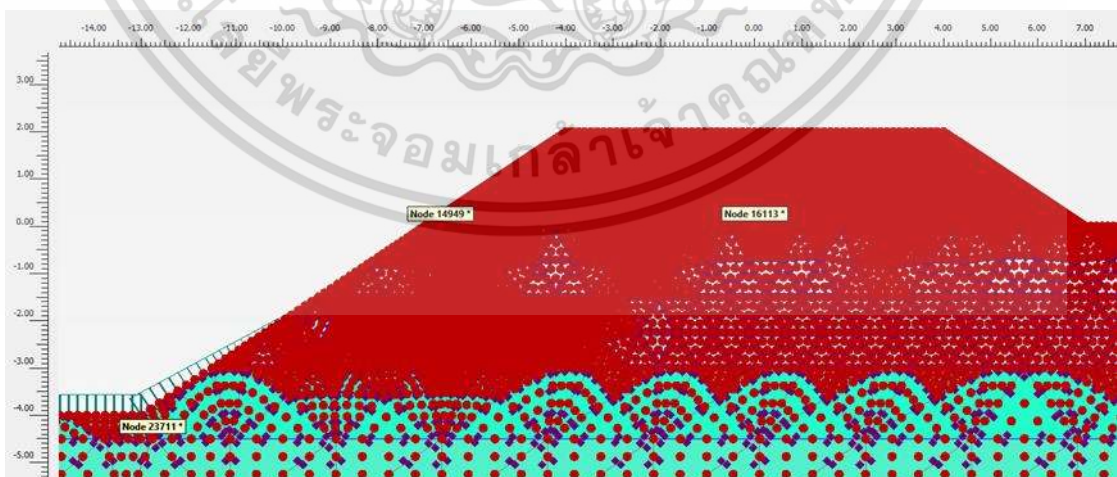
รูปที่ ค.15 สร้างคันดินโดยใช้ create soil polygon

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



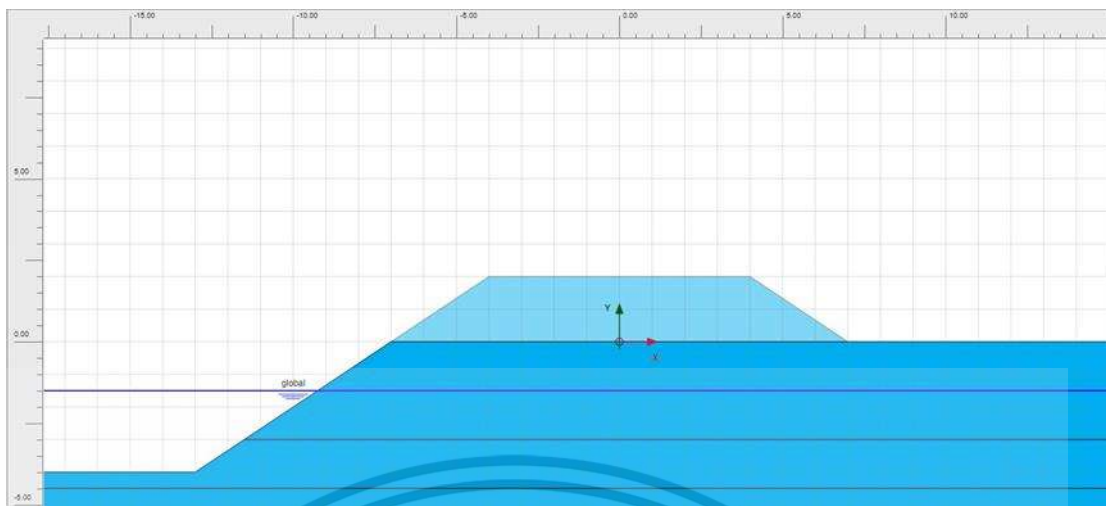
รูปที่ ค.16 ตัวอย่างการกำหนดคุณสมบัติดินถนน (road embankment) เป็นวัสดุ fill material

4. กดปุ่ม generate mesh เพื่อสร้าง mesh ขึ้นมา ในส่วน mesh options ให้กำหนด element distribution ความละเอียดระดับละเอียดมาก (very fine) จากนั้นทำการกดปุ่ม select point for curves เพื่อทำการเลือก node โดยในงานวิจัยนี้เลือกที่จุด (0,0), (-6.65,0), และ (-12.77,-4.50) เนื่องจากมีโอกาสที่แนวการพังทลายผ่านจุดเหล่านั้น ดังแสดงในรูปที่ ค.17



รูปที่ ค.17 การเลือก node โดยใช้คำสั่ง select point for curves

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.18 global water level ตาม borehole water level (-1.50 เมตร) ของ road embankment

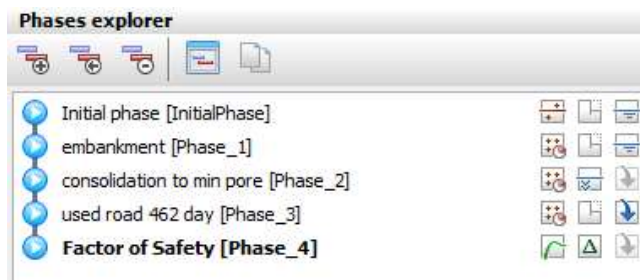
5. ในส่วนของ initial phase (flow condition) ให้กำหนดใน model explorer คือ มี groundwater flow condition และกำหนดระดับน้ำโดยใช้ global water level ตาม borehole water level (-1.50 เมตร) ดังแสดงในรูปที่ ค.18

6. หลังจากสร้าง initial phase แล้ว ในขั้นตอนนี้เป็นการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างจริง โดยทำการก่อสร้างทั้งหมด 4 phase (รูปที่ ค.19) มีรายละเอียดดังนี้

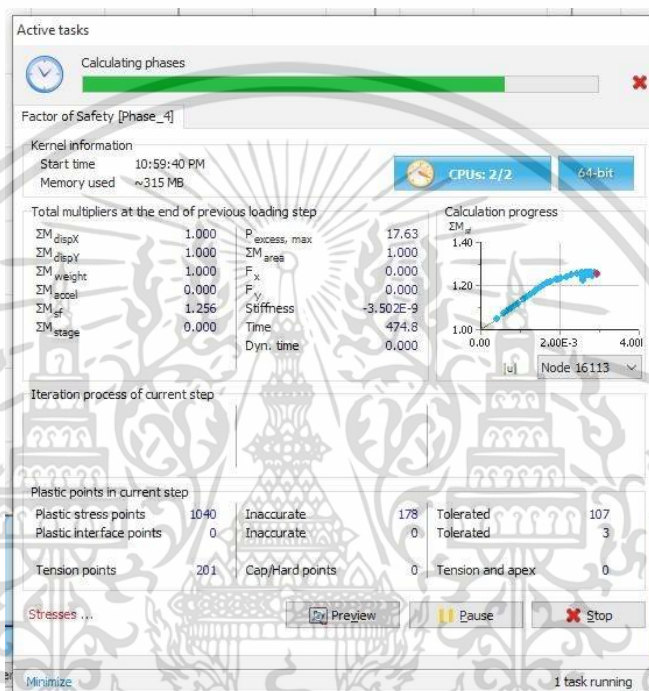
- embankment [phase 1]: สร้างคันดินถนน (road embankment) ความสูง 2 เมตร โดยใช้ประเภทการคำนวณแบบ consolidation ประเภทการให้น้ำหนักแบบ stage construction ด้วยกับเวลา time interval เท่ากับ 2 วัน
- consolidation to min pore [phase 2]: ทำการปล่อยให้ดินเกิดการอัดตัวคายน้ำ (consolidation) โดยให้น้ำหนักแบบ minimum excess pore water pressure กล่าวคือ ให้ดินมีการอัดตัวคายน้ำจนมีความดันน้ำส่วนเกินถึงจุดที่กำหนด (กำหนดไว้ที่ 1.000 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร)
- used road 462 day [phase 3]: ให้น้ำหนักแก่คันดินโดยใช้ line load ขนาด 10.00 กิโลนิวตันต่อเมตร ทำการ activate line load ในขั้นตอนการก่อสร้างนี้ โดยใช้งานถนนไปเป็นเวลา time interval เท่ากับ 462 วัน
- factor of safety [phase 4]: เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดโดยใช้ประเภทการคำนวณแบบ safety ใช้ประเภทการให้น้ำหนักแบบ incremental multipliers กำหนดให้ค่าเริ่มต้นของ M_{sf} เท่ากับ 0.1000

7. ทำการคำนวณโดยกดปุ่ม calculate ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงท้ายสุด (รูปที่ ค.20)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.19 construction phase ของการก่อสร้าง road embankment



รูปที่ ค.20 การแสดงผลระหว่างการคำนวณ (calculating phase)

2.2 กรณีเสริมกำลังด้วย RSS-Geogrid

ในกรณีเสริมกำลังมีเงื่อนไขการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D เหมือนกันกับกรณีไม่เสริมกำลัง (non-reinforced) ทุกประการ ยกเว้นเพียงข้อแตกต่างบางประการดังนี้ คือ

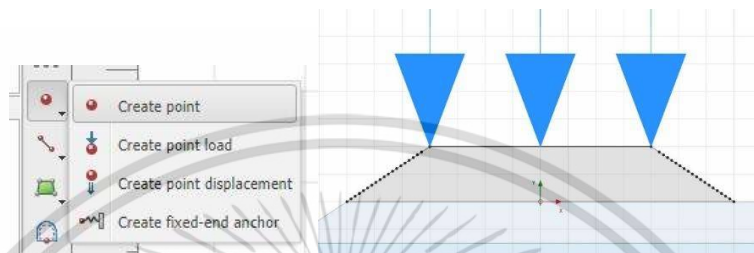
1. หลังจาก create soil polygon แล้วให้ทำการสร้างจุดอ้างอิงโดยใช้คำสั่ง create point เพื่อเป็นจุดอ้างอิงในการเสริมกำลัง RSS-geogrid ดังแสดงในรูปที่ ค.21

2. สร้างวัสดุเสริมกำลังใหม่โดยใช้คำสั่ง material sets และไปที่หมวด geogrid เพื่อสร้างวัสดุเสริมกำลังใหม่ให้เป็น RSS-geogrid โดยกำหนดค่า axial stiffness (EA) เท่ากับ 3.460 กิโลนิวตันต่อเมตรและเป็นแบบ isotropic ดังแสดงในรูปที่ ค.22

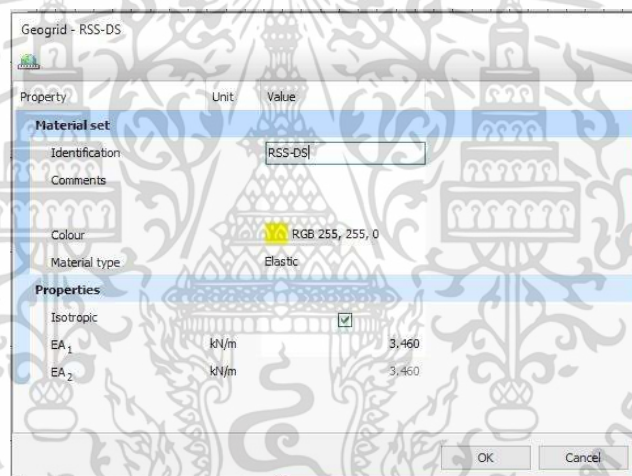
3. สร้างชั้นเสริมกำลังโดยใช้คำสั่ง create geogrid (รูปที่ ค.23) โดยวางตำแหน่งเสริมกำลังตามเงื่อนไขที่ต้องการทดสอบ เช่น เงื่อนไข N1-u₁ หมายถึงเสริมกำลังด้วย RSS-geogrid 1 ชั้น (N1) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยตำแหน่งการเสริมกำลังชั้นแรกที่ $u/H=0.1$ (u_1) ซึ่งเมื่อ H เท่ากับ 2 เมตร จะได้ตำแหน่งเสริมกำลังชั้นแรกก็จะเท่ากับ +1.80 เมตร เป็นต้น พร้อมทั้งทำการสร้าง positive interface และ negative interface ที่ชั้นเสริมกำลังด้วย ดังแสดงในรูปที่ ค.24

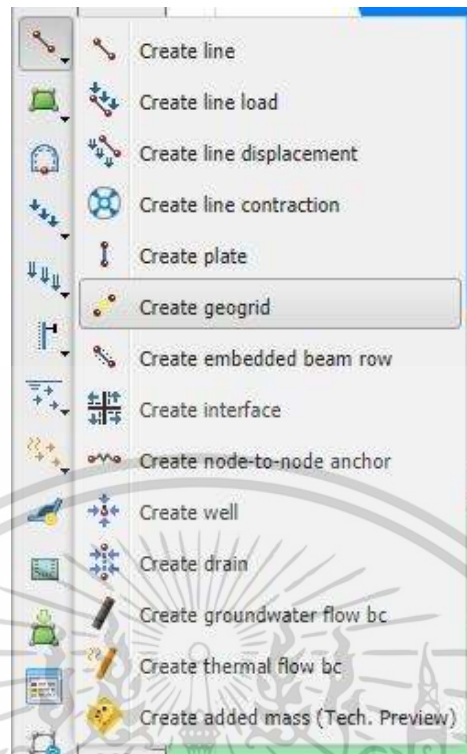
4. หลังจากนั้นก็ทำการตั้งค่าลำดับการก่อสร้างและคำนวณเช่นเดียวกันกับกรณีไม่เสริมกำลัง เพียงแค่ต้องทำการ activate ชั้นเสริมกำลัง RSS-geogrid ด้วยเมื่อก่อสร้างคันดิน



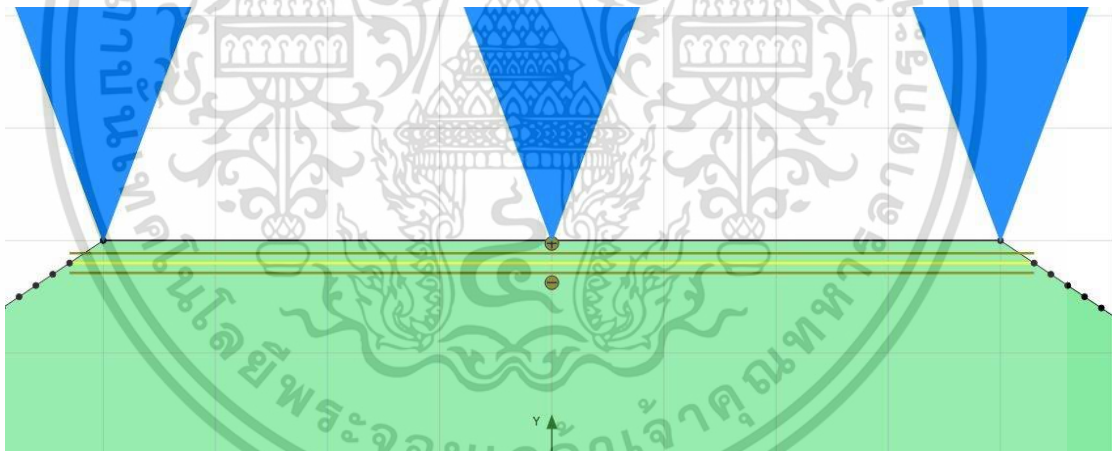
รูปที่ ค.21 สร้างจุดอ้างอิงโดยใช้คำสั่ง create point



รูปที่ ค.22 สร้างวัสดุเสริมกำลังใหม่โดยใช้คำสั่ง material sets โดยมีค่า EA เท่ากับ 3.460 kN/m



รูปที่ ค.23 คำสั่ง create geogrid เพื่อสร้างชั้นเสริมกำลัง



รูปที่ ค.24 ชั้นเสริมกำลัง RSS-geogrid ที่ถูกสร้างแล้วพร้อมกับ positive และ negative interface ในตัวอย่างเงื่อนไข N1-u₁

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PLAXIS[®] 2D
CONNECT Edition

Project description : RoadEm-N0 (Plaxis-FS) u.r
Company : King Mongkut Institute of Technology
Project filename : RoadEm-N0 (Plaxis-FS) u.r
Output : Calculation information

Output Version 20.4.0.790

Date : 27/4/2021

Page : 1

Step info

Phase Factor of Safety [Phase_4]
Step Initial
Calculation mode Classical mode
Step type Safety
Updated mesh False
Solver type Picos
Kernel type 64 bit
Extrapolation factor 2.000
Relative stiffness -1.952E-9

Multipliers

Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	0.04258E-3	ΣM_{sf} 1.255
Time	Increment	0.000	End time 474.0

Staged construction

Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000

Forces

F_x 0.000 kN/m
 F_y 0.000 kN/m

Consolidation

Realised $P_{\text{Excess,Max}}$ 22.84 kN/m²



PLAXIS[®] 2D
CONNECT Edition

Project description : RoadEm-N1-u1 (Plaxis-FS) Embankment stage and max step edit re2
Company : King Mongkut Institute of Technology
Project filename : RoadEm-N1-u1 (Plaxis-FS) Embankment stage and max step edit re2
Output : Calculation information

Output Version 20.4.0.790

Date : 27/4/2021

Page : 1

Step info

Phase Factor of Safety [Phase_4]
Step Initial
Calculation mode Classical mode
Step type Safety
Updated mesh False
Solver type Picos
Kernel type 64 bit
Extrapolation factor 2.000
Relative stiffness 3.198E-6

Multipliers

Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	2.613E-3	ΣM_{sf} 1.415
Time	Increment	0.000	End time 474.3

Staged construction

Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000

Forces

F_x 0.000 kN/m
 F_y 0.000 kN/m

Consolidation

Realised $P_{\text{Excess,Max}}$ 22.46 kN/m²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		Output Version 20.4.0.790	
Project description	: RoadEm-N1-u2 (Plaxis-FS) น้	Date	: 27/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page	: 1
Project filename	: RoadEm-N1-u2 (Plaxis-FS) น้		
Output	: Calculation information		

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	-5.459E-9		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	0.8623E-3	ΣM_{sf} 1.393
Time	Increment	0.000	End time 474.6
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	24.27 kN/m ²		

		Output Version 20.4.0.790	
Project description	: RoadEm-N1-u3 (Plaxis-FS) น้	Date	: 27/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page	: 1
Project filename	: RoadEm-N1-u3 (Plaxis-FS) น้		
Output	: Calculation information		

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	0.06653E-9		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	1.581E-3	ΣM_{sf} 1.396
Time	Increment	0.000	End time 474.6
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	17.52 kN/m ²		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PLAXIS[®] 2D
CONNECT Edition

Project description : RoadEm-N1-u4 (Plaxis-FS) ๙
Company : King Mongkut Institute of Technology
Project filename : RoadEm-N1-u4 (Plaxis-FS) ๙
Output : Calculation information

Output Version 20.4.0.790

Date : 27/4/2021
Page : 1

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	0.06095E-6		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	1.016E-3	ΣM_{sf} 1.357
Time	Increment	0.000	End time 475.0
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	17.75 kN/m ²		



PLAXIS[®] 2D
CONNECT Edition

Project description : RoadEm-N1-u5 (Plaxis-FS) ๙
Company : King Mongkut Institute of Technology
Project filename : RoadEm-N1-u5 (Plaxis-FS) ๙
Output : Calculation information

Output Version 20.4.0.790

Date : 27/4/2021
Page : 1

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	-0.01911E-6		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	1.591E-3	ΣM_{sf} 1.342
Time	Increment	0.000	End time 475.2
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	16.13 kN/m ²		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PLAXIS 2D
CONNECT Edition

Project description : RoadEm-N1-u6 (Plaxis-FS) un **Output Version 20.4.0.790**
 Company : King Mongkut Institute of Technology
 Project filename : RoadEm-N1-u6 (Plaxis-FS) un Date : 27/4/2021
 Output : Calculation information Page : 1

Step info

Phase Factor of Safety [Phase_4]
 Step Initial
 Calculation mode Classical mode
 Step type Safety
 Updated mesh False
 Solver type Picos
 Kernel type 64 bit
 Extrapolation factor 2.000
 Relative stiffness -2.155E-9

Multipliers

Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	0.3366E-3	ΣM_{sf} 1.329
Time	Increment	0.000	End time 476.2

Staged construction

Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000

Forces

F_x 0.000 kN/m
 F_y 0.000 kN/m

Consolidation

Realised $P_{\text{Excess,Max}}$ 15.41 kN/m²



PLAXIS 2D
CONNECT Edition

Project description : RoadEm-N1-u7 (Plaxis-FS) un **Output Version 20.4.0.790**
 Company : King Mongkut Institute of Technology
 Project filename : RoadEm-N1-u7 (Plaxis-FS) un Date : 27/4/2021
 Output : Calculation information Page : 1

Step info

Phase Factor of Safety [Phase_4]
 Step Initial
 Calculation mode Classical mode
 Step type Safety
 Updated mesh False
 Solver type Picos
 Kernel type 64 bit
 Extrapolation factor 0.5000
 Relative stiffness -4.683E-9

Multipliers

Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	0.07775E-3	ΣM_{sf} 1.296
Time	Increment	0.000	End time 476.8

Staged construction

Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000

Forces

F_x 0.000 kN/m
 F_y 0.000 kN/m

Consolidation

Realised $P_{\text{Excess,Max}}$ 34.02 kN/m²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		Output Version 20.4.0.790	
Project description	: RoadEm-N1-u8 (Plaxis-FS) ๙	Date	: 27/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page	: 1
Project filename	: RoadEm-N1-u8 (Plaxis-FS) ๙		
Output	: Calculation information		

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	0.5000		
Relative stiffness	-1.471E-9		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-0.4767E-3	ΣM_{sf} 1.276
Time	Increment	0.000	End time 477.7
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	16.18 kN/m ²		

		Output Version 20.4.0.790	
Project description	: RoadEm-N1-u9 ๙	Date	: 27/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page	: 1
Project filename	: RoadEm-N1-u9 ๙		
Output	: Calculation information		

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	0.5000		
Relative stiffness	-1.016E-9		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-9.163E-6	ΣM_{sf} 1.259
Time	Increment	0.000	End time 480.3
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	10.90 kN/m ²		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		Output Version 20.4.0.790	
Project description	: RoadEm-N1-u10 (Plaxis-FS) แกว	Date	: 27/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page	: 1
Project filename	: RoadEm-N1-u10 (Plaxis-FS) แกว		
Output	: Calculation Information		

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	-0.01033E-6		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-0.09819E-3	ΣM_{sf} 1.234
Time	Increment	0.000	End time 500.4
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	12.93 kN/m ²		

		Output Version 20.4.0.790	
Project description	: RoadEm-N2-h1u1 (Plaxis-FS) แก้วตืด	Date	: 24/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page	: 1
Project filename	: RoadEm-N2-h1u1 (Plaxis-FS) แก้วตืด		
Output	: Calculation Information		

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	0.5000		
Relative stiffness	-0.05422E-6		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	5.000E-3	ΣM_{sf} 1.417
Time	Increment	0.000	End time 474.6
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	23.72 kN/m ²		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PLAXIS[®] 2D
CONNECT Edition

Project description	: RoadEm-N2-h1u2 (Plaxis-FS) un	Output Version 20.4.0.790
Company	: King Mongkut Institute of Technology	
Project filename	: RoadEm-N2-h1u2 (Plaxis-FS) un	Date : 26/4/2021
Output	: Calculation information	Page : 1

Step info

Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	0.5000		
Relative stiffness	-0.02460E-6		

Multipliers

Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-0.7466E-3	ΣM_{sf} 1.390
Time	Increment	0.000	End time 475.0

Staged construction

Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000

Forces

F_x	0.000 kN/m
F_y	0.000 kN/m

Consolidation

Realised $P_{\text{Excess,Max}}$	17.59 kN/m ²
----------------------------------	-------------------------



PLAXIS[®] 2D
CONNECT Edition

Project description	: RoadEm-N2-h1u3 (Plaxis-FS) un	Output Version 20.4.0.790
Company	: King Mongkut Institute of Technology	
Project filename	: RoadEm-N2-h1u3 (Plaxis-FS) un	Date : 26/4/2021
Output	: Calculation information	Page : 1

Step info

Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	0.5000		
Relative stiffness	1.960E-9		

Multipliers

Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-0.3303E-3	ΣM_{sf} 1.390
Time	Increment	0.000	End time 475.2

Staged construction

Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000

Forces

F_x	0.000 kN/m
F_y	0.000 kN/m

Consolidation

Realised $P_{\text{Excess,Max}}$	18.85 kN/m ²
----------------------------------	-------------------------

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		Output Version 20.4.0.790	
Project description	: RoadEm-N2-h1u4 (Plaxis-FS) แกรี	Date	: 26/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page	: 1
Project filename	: RoadEm-N2-h1u4 (Plaxis-FS) แกรี		
Output	: Calculation information		

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	-0.01422E-6		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-0.3362E-3	ΣM_{sf} 1.365
Time	Increment	0.000	End time 475.8
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{\text{Excess,Max}}$	17.59 kN/m ²		

		Output Version 20.4.0.790	
Project description	: RoadEm-N2-h1u5 (Plaxis-FS) แกรี	Date	: 26/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page	: 1
Project filename	: RoadEm-N2-h1u5 (Plaxis-FS) แกรี		
Output	: Calculation information		

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	0.5000		
Relative stiffness	0.07749E-6		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	1.123E-3	ΣM_{sf} 1.348
Time	Increment	0.000	End time 475.4
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{\text{Excess,Max}}$	16.35 kN/m ²		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PLAXIS 2D
CONNECT Edition

Project description : RoadEm-N2-h2u1 (Plaxis-FS) แก่งจืดผัด
Company : King Mongkut Institute of Technology
Project filename : RoadEm-N2-h2u1 (Plaxis-FS) แก่งจืดผัด
Output : Calculation information

Output Version 20.4.0.790

Date : 24/4/2021

Page : 1

Step info

Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	-0.09861E-6		

Multipliers

Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	3.880E-3	ΣM_{sf} 1.418
Time	Increment	0.000	End time 474.5

Staged construction

Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000

Forces

F_x	0.000 kN/m
F_y	0.000 kN/m

Consolidation

Realised $P_{Excess,Max}$	21.07 kN/m ²
---------------------------	-------------------------



PLAXIS 2D
CONNECT Edition

Project description : RoadEm-N2-h2u2 (Plaxis-FS) Embankment stage and max step edit re2
Company : King Mongkut Institute of Technology
Project filename : RoadEm-N2-h2u2 (Plaxis-FS) Embankment stage and max step edit re2
Output : Calculation information

Output Version 20.4.0.790

Date : 24/4/2021

Page : 1

Step info

Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	-0.1306E-12		

Multipliers

Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	0.5702E-3	ΣM_{sf} 1.392
Time	Increment	0.000	End time 475.4

Staged construction

Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000

Forces

F_x	0.000 kN/m
F_y	0.000 kN/m

Consolidation

Realised $P_{Excess,Max}$	19.11 kN/m ²
---------------------------	-------------------------

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PLAXIS[®] 2D
CONNECT Edition

Project description : RoadEm-N2-h2u3 (Plaxis-FS) แก่จุดตัด
Company : King Mongkut Institute of Technology
Project filename : RoadEm-N2-h2u3 (Plaxis-FS) แก่จุดตัด
Output : Calculation information

Output Version 20.4.0.790

Date : 24/4/2021

Page : 1

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	-0.3473E-6		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-0.7486E-3	ΣM_{sf} 1.386
Time	Increment	0.000	End time 475.3
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_X	0.000 kN/m		
F_Y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{\text{Excess,Max}}$	17.48 kN/m ²		



PLAXIS[®] 2D
CONNECT Edition

Project description : RoadEm-N2-h2u4 (Plaxis-FS) แก่
Company : King Mongkut Institute of Technology
Project filename : RoadEm-N2-h2u4 (Plaxis-FS) แก่
Output : Calculation information

Output Version 20.4.0.790

Date : 26/4/2021

Page : 1

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	0.5000		
Relative stiffness	-0.4867E-9		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-0.1247E-3	ΣM_{sf} 1.361
Time	Increment	0.000	End time 475.6
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_X	0.000 kN/m		
F_Y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{\text{Excess,Max}}$	16.87 kN/m ²		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PLAXIS 2D
CONNECT Edition

Project description : RoadEm-N2-h2u5 (Plaxis-FS) ๙๙
Company : King Mongkut Institute of Technology
Project filename : RoadEm-N2-h2u5 (Plaxis-FS) ๙๙
Output : Calculation information

Output Version 20.4.0.790

Date : 26/4/2021
Page : 1

Step info

Phase	Factor of Safety [Phase_4]
Step	Initial
Calculation mode	Classical mode
Step type	Safety
Updated mesh	False
Solver type	Picos
Kernel type	64 bit
Extrapolation factor	2.000
Relative stiffness	-0.09087E-6

Multipliers

Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sr}	-1.210E-3	ΣM_{sr} 1.331
Time	Increment	0.000	End time 476.9

Staged construction

Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000

Forces

F_x	0.000 kN/m
F_y	0.000 kN/m

Consolidation

Realised $P_{\text{Excess,Max}}$	22.55 kN/m ²
----------------------------------	-------------------------



PLAXIS 2D
CONNECT Edition

Project description : RoadEm-N2-h3u1 (Plaxis-FS) ๙๙
Company : King Mongkut Institute of Technology
Project filename : RoadEm-N2-h3u1 (Plaxis-FS) ๙๙
Output : Calculation information

Output Version 20.4.0.790

Date : 26/4/2021
Page : 1

Step info

Phase	Factor of Safety [Phase_4]
Step	Initial
Calculation mode	Classical mode
Step type	Safety
Updated mesh	False
Solver type	Picos
Kernel type	64 bit
Extrapolation factor	0.5000
Relative stiffness	-0.7268E-9

Multipliers

Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sr}	-2.627E-3	ΣM_{sr} 1.456
Time	Increment	0.000	End time 474.7

Staged construction

Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000

Forces

F_x	0.000 kN/m
F_y	0.000 kN/m

Consolidation

Realised $P_{\text{Excess,Max}}$	23.17 kN/m ²
----------------------------------	-------------------------

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Project description : RoadEm-N2-h3u2 (Plaxis-FS) แค้น **Output Version 20.4.0.790**
 Company : King Mongkut Institute of Technology
 Project filename : RoadEm-N2-h3u2 (Plaxis-FS) แค้น Date : 26/4/2021
 Output : Calculation information Page : 1

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	0.4903E-9		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	2.224E-3	ΣM_{sf} 1.388
Time	Increment	0.000	End time 475.1
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	21.83 kN/m ²		


Project description : RoadEm-N2-h3u3 (Plaxis-FS) แค้น **Output Version 20.4.0.790**
 Company : King Mongkut Institute of Technology
 Project filename : RoadEm-N2-h3u3 (Plaxis-FS) แค้น Date : 26/4/2021
 Output : Calculation information Page : 1

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	-2.805E-9		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-1.763E-3	ΣM_{sf} 1.387
Time	Increment	0.000	End time 475.7
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	17.58 kN/m ²		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


		Output Version 20.4.0.790
Project description	: RoadEm-N2-h3u4 (Plaxis-FS) ๙กั	Date : 26/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page : 1
Project filename	: RoadEm-N2-h3u4 (Plaxis-FS) ๙กั	
Output	: Calculation information	

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	-3.608E-9		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-0.7647E-3	ΣM_{sf} 1.365
Time	Increment	0.000	End time 476.6
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{stage}	0.000	ΣM_{stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	17.55 kN/m ²		


		Output Version 20.4.0.790
Project description	: RoadEm-N2-h3u5 (Plaxis-FS) ๙กั	Date : 26/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page : 1
Project filename	: RoadEm-N2-h3u5 (Plaxis-FS) ๙กั	
Output	: Calculation information	

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	-0.03714E-6		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-0.5688E-3	ΣM_{sf} 1.328
Time	Increment	0.000	End time 479.0
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{stage}	0.000	ΣM_{stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	16.46 kN/m ²		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		Output Version 20.4.0.790	
Project description	: RoadEm-N2-h4u1 (Plaxis-FS) ตรี	Date	: 26/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page	: 1
Project filename	: RoadEm-N2-h4u1 (Plaxis-FS) ตรี		
Output	: Calculation information		

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	0.5000		
Relative stiffness	0.2831E-9		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-2.571E-3	ΣM_{sf} 1.475
Time	Increment	0.000	End time 474.9
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	24.01 kN/m ²		

		Output Version 20.4.0.790	
Project description	: RoadEm-N2-h4u2 (Plaxis-FS) Embankment stage and max step edit re2	Date	: 26/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page	: 1
Project filename	: RoadEm-N2-h4u2 (Plaxis-FS) Embankment stage and max step edit re2		
Output	: Calculation information		

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	-0.06567E-6		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-0.4543E-3	ΣM_{sf} 1.390
Time	Increment	0.000	End time 475.7
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	23.04 kN/m ²		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		Output Version 20.4.0.790	
Project description	: RoadEm-N2-h4u3 (Plaxis-FS) un	Date	: 26/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page	: 1
Project filename	: RoadEm-N2-h4u3 (Plaxis-FS) un		
Output	: Calculation information		

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	-1.310E-9		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-1.156E-3	ΣM_{sf} 1.386
Time	Increment	0.000	End time 476.7
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{stage}	0.000	ΣM_{stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	17.51 kN/m ²		

		Output Version 20.4.0.790	
Project description	: RoadEm-N2-h4u4 (Plaxis-FS) un	Date	: 27/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page	: 1
Project filename	: RoadEm-N2-h4u4 (Plaxis-FS) un		
Output	: Calculation information		

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	-0.1826E-9		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	0.7337E-3	ΣM_{sf} 1.366
Time	Increment	0.000	End time 477.2
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{stage}	0.000	ΣM_{stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	17.27 kN/m ²		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		Output Version 20.4.0.790
Project description	: RoadEm-N2-h4u5 (Plaxis-FS) ไม้	Date : 27/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page : 1
Project filename	: RoadEm-N2-h4u5 (Plaxis-FS) ไม้	
Output	: Calculation information	

Step info

Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	-0.5271E-9		

Multipliers

Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sr}	0.9688E-3	ΣM_{sr} 1.345
Time	Increment	0.000	End time 481.8

Staged construction


Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000

Forces

F_x	0.000 kN/m
F_y	0.000 kN/m

Consolidation

Realised $P_{Excess,Max}$	16.57 kN/m ²
---------------------------	-------------------------

		Output Version 20.4.0.790
Project description	: RoadEm-N2-h5u1 (Plaxis-FS) ไม้	Date : 27/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page : 1
Project filename	: RoadEm-N2-h5u1 (Plaxis-FS) ไม้	
Output	: Calculation information	

Step info

Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	-0.06460E-9		

Multipliers

Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sr}	-0.5472E-3	ΣM_{sr} 1.468
Time	Increment	0.000	End time 475.5

Staged construction

Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000

Forces

F_x	0.000 kN/m
F_y	0.000 kN/m


Consolidation

Realised $P_{Excess,Max}$	23.99 kN/m ²
---------------------------	-------------------------

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		Output Version 20.4.0.790	
Project description	: RoadEm-N2-h5u2 (Plaxis-FS) un ¹	Date	: 27/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page	: 1
Project filename	: RoadEm-N2-h5u2 (Plaxis-FS) un ¹		
Output	: Calculation information		

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	-0.6659E-9		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	2.278E-3	ΣM_{sf} 1.390
Time	Increment	0.000	End time 477.1
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	18.24 kN/m ²		


		Output Version 20.4.0.790	
Project description	: RoadEm-N2-h5u3 (Plaxis-FS) un ¹	Date	: 27/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page	: 1
Project filename	: RoadEm-N2-h5u3 (Plaxis-FS) un ¹		
Output	: Calculation information		

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	0.5000		
Relative stiffness	-1.257E-9		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	0.05473E-3	ΣM_{sf} 1.393
Time	Increment	0.000	End time 477.5
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	19.17 kN/m ²		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		Output Version 20.4.0.790	
Project description	: RoadEm-N2-h5u4 (Plaxis-FS) un	Date	: 27/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page	: 1
Project filename	: RoadEm-N2-h5u4 (Plaxis-FS) un		
Output	: Calculation information		

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	0.5000		
Relative stiffness	-0.01611E-6		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	0.1828E-3	ΣM_{sf} 1.357
Time	Increment	0.000	End time 481.8
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{\text{Excess,Max}}$	16.65 kN/m ²		

		Output Version 20.4.0.790	
Project description	: RoadEm-N2-h5u5 (Plaxis-FS) un	Date	: 27/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page	: 1
Project filename	: RoadEm-N2-h5u5 (Plaxis-FS) un		
Output	: Calculation information		

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	0.5000		
Relative stiffness	-0.01222E-6		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	0.05739E-3	ΣM_{sf} 1.332
Time	Increment	0.000	End time 501.9
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{\text{Excess,Max}}$	17.88 kN/m ²		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PLAXIS 2D
CONNECT Edition

Project description : RoadEm-N3-h1u1 (Plaxis-FS) แฝ **Output Version 20.4.0.790**
 Company : King Mongkut Institute of Technology
 Project filename : RoadEm-N3-h1u1 (Plaxis-FS) แฝ Date : 25/4/2021
 Output : Calculation information Page : 1

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	1.000		
Relative stiffness	0.05410E-3		
Multipliers			
Soil weight			ΣM_{Weight} 1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	2.309E-3	ΣM_{sf} 1.394
Time	Increment	0.000	End time 474.3
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	24.36 kN/m ²		



PLAXIS 2D
CONNECT Edition

Project description : RoadEm-N3-h1u2 (Plaxis-FS) แฝ **Output Version 20.4.0.790**
 Company : King Mongkut Institute of Technology
 Project filename : RoadEm-N3-h1u2 (Plaxis-FS) แฝ Date : 25/4/2021
 Output : Calculation information Page : 1

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	0.5000		
Relative stiffness	-0.01781E-6		
Multipliers			
Soil weight			ΣM_{Weight} 1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	0.6301E-3	ΣM_{sf} 1.387
Time	Increment	0.000	End time 474.5
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	17.94 kN/m ²		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PLAXIS 2D
CONNECT Edition

Project description : RoadEm-N3-h1u3 (Plaxis-FS) วน
Company : King Mongkut Institute of Technology
Project filename : RoadEm-N3-h1u3 (Plaxis-FS) วน
Output : Calculation information

Output Version 20.4.0.790

Date : 28/4/2021

Page : 1

Step info

Phase Factor of Safety [Phase_4]
Step Initial
Calculation mode Classical mode
Step type Safety
Updated mesh False
Solver type Picos
Kernel type 64 bit
Extrapolation factor 0.5000
Relative stiffness -0.1040E-6

Multipliers

Soil weight			ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-1.105E-3	ΣM_{sf}	1.370
Time	Increment	0.000	End time	475.0

Staged construction

Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area}	1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage}	0.000

Forces

F_x 0.000 kN/m
 F_y 0.000 kN/m

Consolidation

Realised $P_{\text{Excess,Max}}$ 17.96 kN/m²



PLAXIS 2D
CONNECT Edition

Project description : RoadEm-N3-h1u4 (Plaxis-FS) วน
Company : King Mongkut Institute of Technology
Project filename : RoadEm-N3-h1u4 (Plaxis-FS) วน
Output : Calculation information

Output Version 20.4.0.790

Date : 25/4/2021

Page : 1

Step info

Phase Factor of Safety [Phase_4]
Step Initial
Calculation mode Classical mode
Step type Safety
Updated mesh False
Solver type Picos
Kernel type 64 bit
Extrapolation factor 0.5000
Relative stiffness -0.02804E-6

Multipliers

Soil weight			ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-1.948E-3	ΣM_{sf}	1.342
Time	Increment	0.000	End time	476.1

Staged construction

Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area}	1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage}	0.000

Forces

F_x 0.000 kN/m
 F_y 0.000 kN/m

Consolidation

Realised $P_{\text{Excess,Max}}$ 17.39 kN/m²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PLAXIS[®] 2D
CONNECT Edition

Project description : RoadEm-N3-h1u5 (Plaxis-FS) Embankment stage and max step edit re2
Company : King Mongkut Institute of Technology
Project filename : RoadEm-N3-h1u5 (Plaxis-FS) Embankment stage and max step edit re2
Output : Calculation information

Output Version 20.4.0.790

Date : 25/4/2021

Page : 1

Step info

Phase Factor of Safety [Phase_4]
Step Initial
Calculation mode Classical mode
Step type Safety
Updated mesh False
Solver type Picos
Kernel type 64 bit
Extrapolation factor 0.5000
Relative stiffness -9.569E-9

Multipliers

Soil weight			ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-0.3105E-3	ΣM_{sf}	1.327
Time	Increment	0.000	End time	476.6

Staged construction

Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area}	1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage}	0.000

Forces

F_x 0.000 kN/m
 F_y 0.000 kN/m

Consolidation

Realised $P_{\text{Excess,Max}}$ 16.19 kN/m²



PLAXIS[®] 2D
CONNECT Edition

Project description : RoadEm-N3-h2u1 (Plaxis-FS) and
Company : King Mongkut Institute of Technology
Project filename : RoadEm-N3-h2u1 (Plaxis-FS) and
Output : Calculation information

Output Version 20.4.0.790

Date : 28/4/2021

Page : 1

Step info

Phase Factor of Safety [Phase_4]
Step Initial
Calculation mode Classical mode
Step type Safety
Updated mesh False
Solver type Picos
Kernel type 64 bit
Extrapolation factor 0.5000
Relative stiffness -0.4762E-6

Multipliers

Soil weight			ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-2.390E-3	ΣM_{sf}	1.410
Time	Increment	0.000	End time	474.6

Staged construction

Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area}	1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage}	0.000

Forces

F_x 0.000 kN/m
 F_y 0.000 kN/m

Consolidation

Realised $P_{\text{Excess,Max}}$ 22.07 kN/m²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PLAXIS 2D
CONNECT Edition

Project description : RoadEm-N3-h2u2 (Plaxis-FS) un **Output Version 20.4.0.790**
 Company : King Mongkut Institute of Technology
 Project filename : RoadEm-N3-h2u2 (Plaxis-FS) un Date : 28/4/2021
 Output : Calculation information Page : 1


Step info				
Phase	Factor of Safety [Phase_4]			
Step	Initial			
Calculation mode	Classical mode			
Step type	Safety			
Updated mesh	False			
Solver type	Picos			
Kernel type	64 bit			
Extrapolation factor	2.000			
Relative stiffness	-0.06650E-9			
Multipliers				
Soil weight			ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	0.6576E-3	ΣM_{sf}	1.389
Time	Increment	0.000	End time	474.9
Staged construction				
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area}	1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage}	0.000
Forces				
F_x	0.000 kN/m			
F_y	0.000 kN/m			
Consolidation				
Realised $P_{Excess,Max}$	20.47 kN/m ²			

PLAXIS 2D
CONNECT Edition


Project description : RoadEm-N3-h2u3 (Plaxis-FS) un **Output Version 20.4.0.790**
 Company : King Mongkut Institute of Technology
 Project filename : RoadEm-N3-h2u3 (Plaxis-FS) un Date : 28/4/2021
 Output : Calculation information Page : 1

Step info				
Phase	Factor of Safety [Phase_4]			
Step	Initial			
Calculation mode	Classical mode			
Step type	Safety			
Updated mesh	False			
Solver type	Picos			
Kernel type	64 bit			
Extrapolation factor	0.5000			
Relative stiffness	-1.077E-9			
Multipliers				
Soil weight			ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-0.3445E-3	ΣM_{sf}	1.392
Time	Increment	0.000	End time	475.0
Staged construction				
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area}	1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage}	0.000
Forces				
F_x	0.000 kN/m			
F_y	0.000 kN/m			
Consolidation				
Realised $P_{Excess,Max}$	19.63 kN/m ²			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		Output Version 20.4.0.790
Project description	: RoadEm-N3-h2u4 (Plaxis-FS) un	Date : 25/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page : 1
Project filename	: RoadEm-N3-h2u4 (Plaxis-FS) un	
Output	: Calculation information	

Step info				
Phase	Factor of Safety [Phase_4]			
Step	Initial			
Calculation mode	Classical mode			
Step type	Safety			
Updated mesh	False			
Solver type	Picos			
Kernel type	64 bit			
Extrapolation factor	0.5000			
Relative stiffness	-0.01390E-6			
Multipliers				
Soil weight			ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-0.3241E-3	ΣM_{sf}	1.367
Time	Increment	0.000	End time	476.1
Staged construction				
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area}	1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage}	0.000
Forces				
F_x	0.000 kN/m			
F_y	0.000 kN/m			
Consolidation				
Realised $P_{Excess,Max}$	17.04 kN/m ²			

		Output Version 20.4.0.790
Project description	: RoadEm-N3-h2u5 (Plaxis-FS) un	Date : 25/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page : 1
Project filename	: RoadEm-N3-h2u5 (Plaxis-FS) un	
Output	: Calculation information	

Step info				
Phase	Factor of Safety [Phase_4]			
Step	Initial			
Calculation mode	Classical mode			
Step type	Safety			
Updated mesh	False			
Solver type	Picos			
Kernel type	64 bit			
Extrapolation factor	2.000			
Relative stiffness	0.1669E-6			
Multipliers				
Soil weight			ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	0.3128E-3	ΣM_{sf}	1.330
Time	Increment	0.000	End time	477.3
Staged construction				
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area}	1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage}	0.000
Forces				
F_x	0.000 kN/m			
F_y	0.000 kN/m			
Consolidation				
Realised $P_{Excess,Max}$	18.33 kN/m ²			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


	PLAXIS[®] 2D CONNECT Edition		
Project description	: RoadEm-N3-h3u1 (Plaxis-FS) un	Output Version 20.4.0.790	
Company	: King Mongkut Institute of Technology		
Project filename	: RoadEm-N3-h3u1 (Plaxis-FS) un	Date : 26/4/2021	
Output	: Calculation information	Page : 1	

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	-0.2428E-6		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-1.672E-3	ΣM_{sf} 1.411
Time	Increment	0.000	End time 475.2
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{\text{Excess,Max}}$	22.69 kN/m ²		


	PLAXIS[®] 2D CONNECT Edition		
Project description	: RoadEm-N3-h3u2 (Plaxis-FS) un	Output Version 20.4.0.790	
Company	: King Mongkut Institute of Technology		
Project filename	: RoadEm-N3-h3u2 (Plaxis-FS) un	Date : 26/4/2021	
Output	: Calculation information	Page : 1	

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	2.310E-9		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	0.1074E-3	ΣM_{sf} 1.391
Time	Increment	0.000	End time 474.8
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{\text{Excess,Max}}$	19.87 kN/m ²		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		Output Version 20.4.0.790
Project description	: RoadEm-N3-h3u3 (Plaxis-FS) Embankment stage and max step edit re2	
Company	: King Mongkut Institute of Technology	
Project filename	: RoadEm-N3-h3u3 (Plaxis-FS) Embankment stage and max step edit re2	Date : 26/4/2021
Output	: Calculation information	Page : 1

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	0.08807E-9		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	0.7577E-3	ΣM_{sf} 1.399
Time	Increment	0.000	End time 475.4
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	18.73 kN/m ²		

		Output Version 20.4.0.790
Project description	: RoadEm-N3-h3u4 (Plaxis-FS) แท	
Company	: King Mongkut Institute of Technology	
Project filename	: RoadEm-N3-h3u4 (Plaxis-FS) แท	Date : 26/4/2021
Output	: Calculation information	Page : 1

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	2.039E-9		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-0.4854E-3	ΣM_{sf} 1.367
Time	Increment	0.000	End time 476.1
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	17.22 kN/m ²		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		Output Version 20.4.0.790	
Project description	: RoadEm-N3-h3u5 (Plaxis-FS) un	Date	: 26/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page	: 1
Project filename	: RoadEm-N3-h3u5 (Plaxis-FS) un		
Output	: Calculation information		

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	0.5000		
Relative stiffness	-0.04401E-6		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	0.5388E-3	ΣM_{sf} 1.335
Time	Increment	0.000	End time 479.2
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	16.35 kN/m ²		


		Output Version 20.4.0.790	
Project description	: RoadEm-N3-h4u1 (Plaxis-FS) un	Date	: 26/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page	: 1
Project filename	: RoadEm-N3-h4u1 (Plaxis-FS) un		
Output	: Calculation information		

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	0.5000		
Relative stiffness	0.6108E-6		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	3.602E-3	ΣM_{sf} 1.413
Time	Increment	0.000	End time 475.2
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	20.90 kN/m ²		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		Output Version 20.4.0.790	
Project description	: RoadEm-N3-h4u2 (Plaxis-FS) un	Date	: 26/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page	: 1
Project filename	: RoadEm-N3-h4u2 (Plaxis-FS) un		
Output	: Calculation information		

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	1.946E-9		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	0.2518E-3	ΣM_{sf} 1.389
Time	Increment	0.000	End time 475.9
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	20.57 kN/m ²		

		Output Version 20.4.0.790	
Project description	: RoadEm-N3-h4u3 (Plaxis-FS) un	Date	: 26/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page	: 1
Project filename	: RoadEm-N3-h4u3 (Plaxis-FS) un		
Output	: Calculation information		

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	-3.996E-9		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-1.162E-3	ΣM_{sf} 1.389
Time	Increment	0.000	End time 477.1
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	18.40 kN/m ²		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		Output Version 20.4.0.790
Project description	: RoadEm-N3-h4u4 (Plaxis-FS) ๙	Date : 26/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page : 1
Project filename	: RoadEm-N3-h4u4 (Plaxis-FS) ๙	
Output	: Calculation information	

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	-0.5388E-9		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-1.410E-3	ΣM_{sf} 1.357
Time	Increment	0.000	End time 478.5
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	17.14 kN/m ²		


		Output Version 20.4.0.790
Project description	: RoadEm-N3-h4u5 (Plaxis-FS) ๙	Date : 26/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page : 1
Project filename	: RoadEm-N3-h4u5 (Plaxis-FS) ๙	
Output	: Calculation information	

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	-0.06517E-6		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-0.5266E-3	ΣM_{sf} 1.342
Time	Increment	0.000	End time 480.9
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	16.22 kN/m ²		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		Output Version 20.4.0.790	
Project description	: RoadEm-N3-h5u1 (Plaxis-FS) uní	Date	: 26/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page	: 1
Project filename	: RoadEm-N3-h5u1 (Plaxis-FS) uní		
Output	: Calculation information		

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	0.02919E-6		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	3.999E-3	ΣM_{sf} 1.413
Time	Increment	0.000	End time 475.8
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	21.15 kN/m ²		


		Output Version 20.4.0.790	
Project description	: RoadEm-N3-h5u2 (Plaxis-FS) uní	Date	: 26/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page	: 1
Project filename	: RoadEm-N3-h5u2 (Plaxis-FS) uní		
Output	: Calculation information		

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	0.03888E-6		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	2.455E-3	ΣM_{sf} 1.392
Time	Increment	0.000	End time 476.2
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	18.68 kN/m ²		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		Output Version 20.4.0.790
Project description	: RoadEm-N3-h5u3 (Plaxis-FS) ตรี	Date : 26/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page : 1
Project filename	: RoadEm-N3-h5u3 (Plaxis-FS) ตรี	
Output	: Calculation information	

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	0.1765E-9		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	0.2151E-3	ΣM_{sf} 1.386
Time	Increment	0.000	End time 477.9
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	19.47 kN/m ²		

		Output Version 20.4.0.790
Project description	: RoadEm-N3-h5u4 (Plaxis-FS) ตรี	Date : 26/4/2021
Company	: King Mongkut Institute of Technology	Page : 1
Project filename	: RoadEm-N3-h5u4 (Plaxis-FS) ตรี	
Output	: Calculation information	

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	-0.5588E-9		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	0.2338E-3	ΣM_{sf} 1.367
Time	Increment	0.000	End time 480.8
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	17.42 kN/m ²		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


		Output Version 20.4.0.790
Project description	: RoadEm-N3-h5u5 (Plaxis-FS) un	
Company	: King Mongkut Institute of Technology	
Project filename	: RoadEm-N3-h5u5 (Plaxis-FS) un	Date : 26/4/2021
Output	: Calculation information	Page : 1

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	0.5000		
Relative stiffness	-3.244E-9		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	0.8418E-3	ΣM_{sf} 1.344
Time	Increment	0.000	End time 500.4
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	17.41 kN/m ²		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	PLAXIS[®] 2D CONNECT Edition	Output Version 20.4.0.790
Project description	: SandEm-N0 (Plaxis-FS) Embankment stage and max step edit (optimal position)	
Company	: King Mongkut Institute of Technology	
Project filename	: SandEm-N0 (Plaxis-FS) Embankment stage and max step edit (optimal position)	Date : 27/1/2021
Output	: Calculation information	Page : 1

Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	-0.02850E-15		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-1.062E-6	ΣM_{sf} 1.599
Time	Increment	0.000	End time 476.1
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	2688 kN/m ²		

	PLAXIS[®] 2D CONNECT Edition	Output Version 20.4.0.790
Project description	: SandEm-N2-h4u1 (Plaxis-FS) Embankment stage and max step edit (optimal position)	
Company	: King Mongkut Institute of Technology	
Project filename	: SandEm-N2-h4u1 (Plaxis-FS) Embankment stage and max step edit (optimal position)	Date : 27/1/2021
Output	: Calculation information	Page : 1

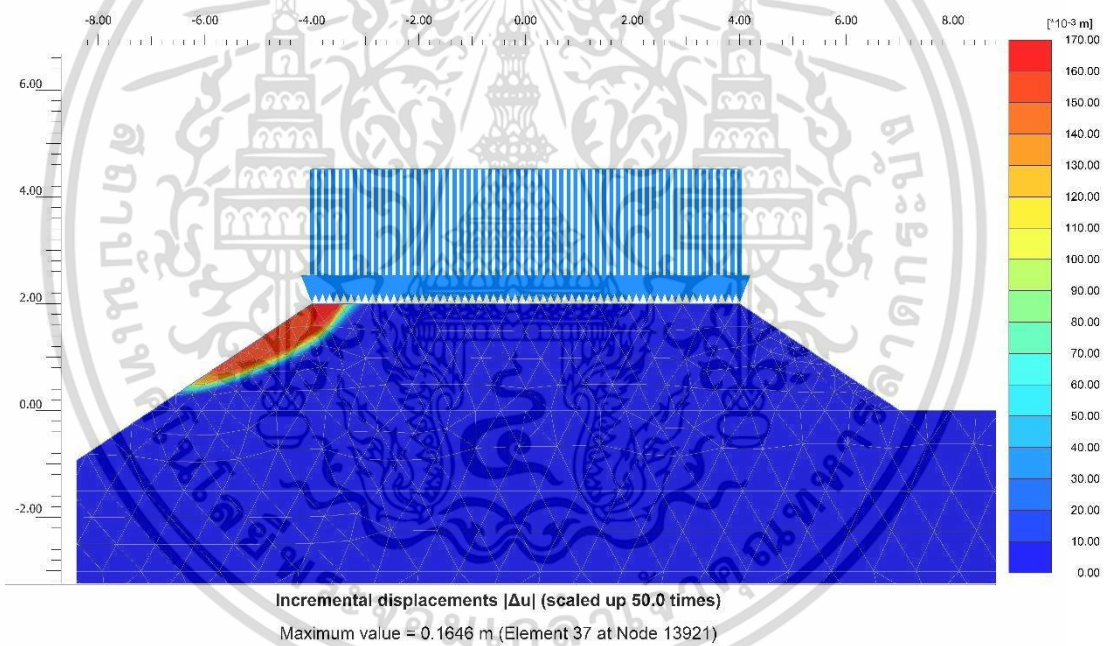
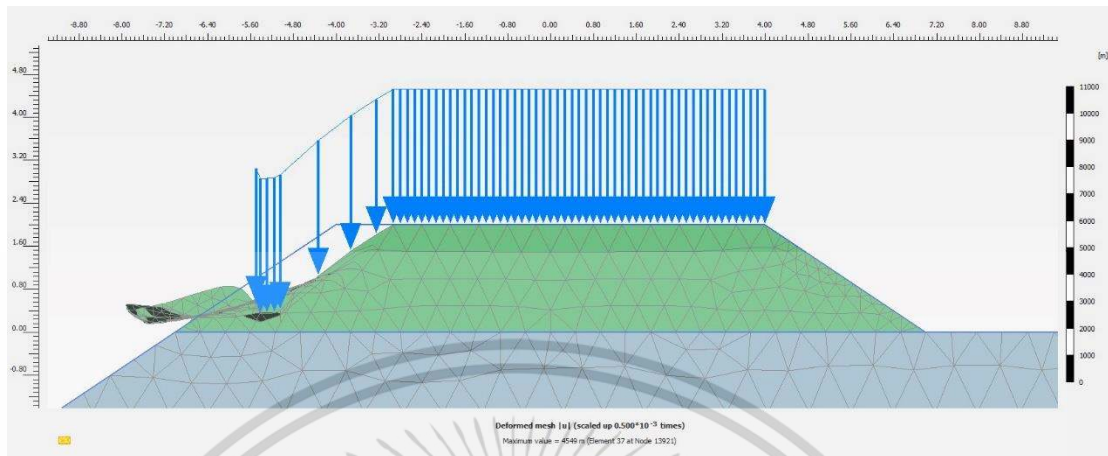
Step info			
Phase	Factor of Safety [Phase_4]		
Step	Initial		
Calculation mode	Classical mode		
Step type	Safety		
Updated mesh	False		
Solver type	Picos		
Kernel type	64 bit		
Extrapolation factor	2.000		
Relative stiffness	-0.1990E-9		
Multipliers			
Soil weight		ΣM_{Weight}	1.000
Strength reduction factor	M_{sf}	-6.130E-6	ΣM_{sf} 1.638
Time	Increment	0.000	End time 477.2
Staged construction			
Active proportion total area	M_{Area}	0.000	ΣM_{Area} 1.000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0.000	ΣM_{Stage} 0.000
Forces			
F_x	0.000 kN/m		
F_y	0.000 kN/m		
Consolidation			
Realised $P_{Excess,Max}$	94.05 kN/m ²		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



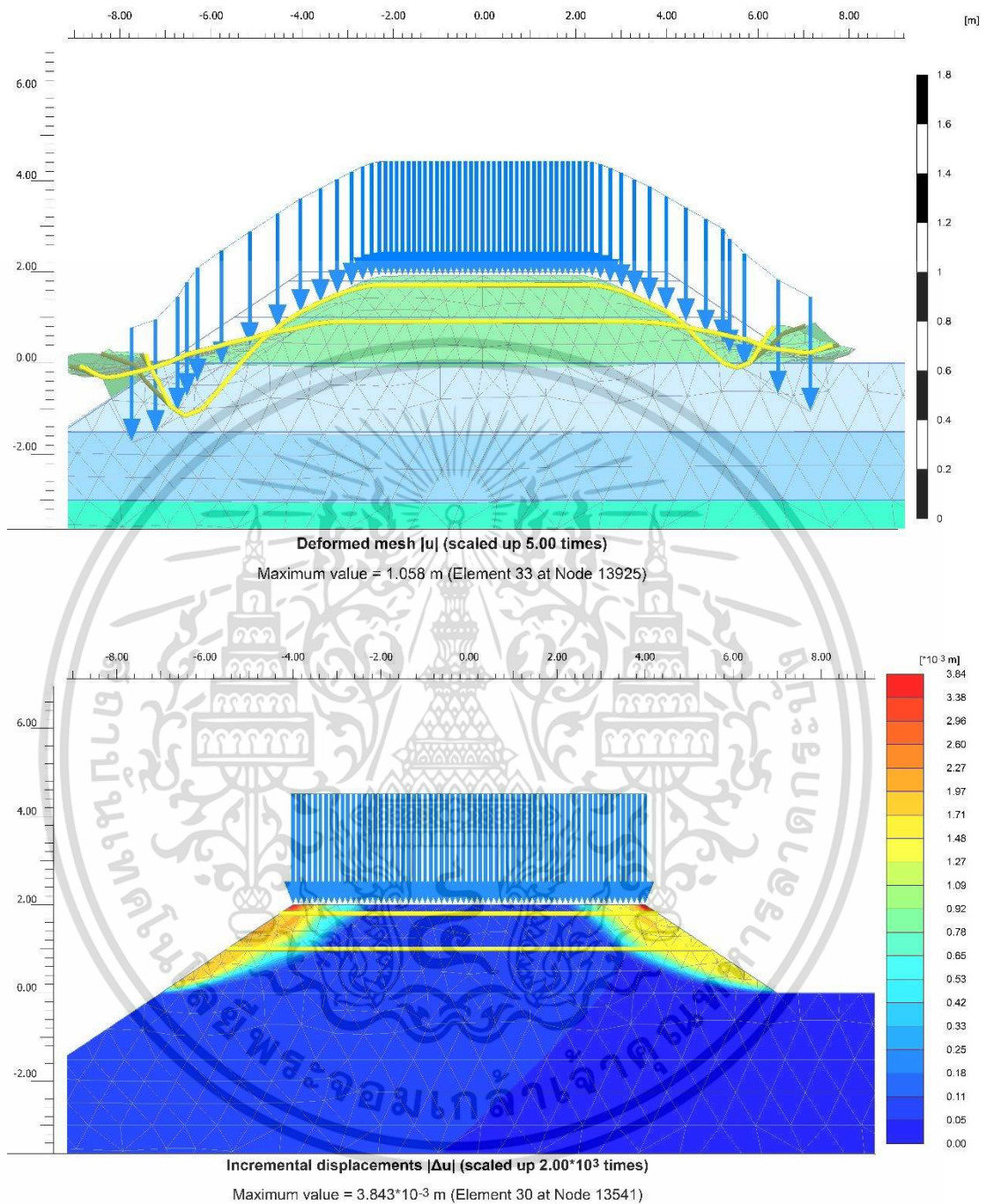
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไข road embankment ไม่เสริมกำลัง (RE-N0)



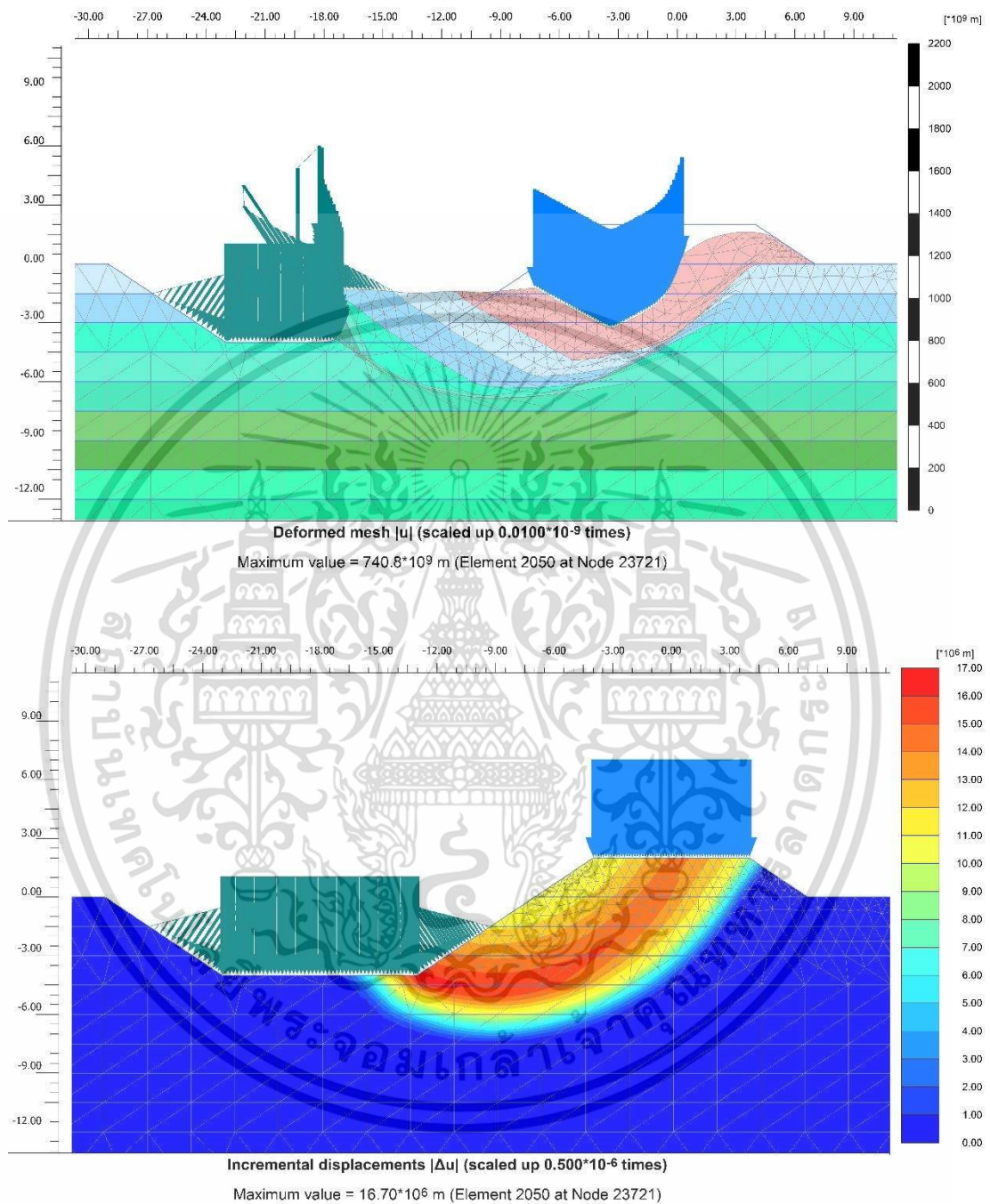
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไข road embankment เสริมกำลัง ณ สภาวะเหมาะสม (RE-N2-h₄u₁)



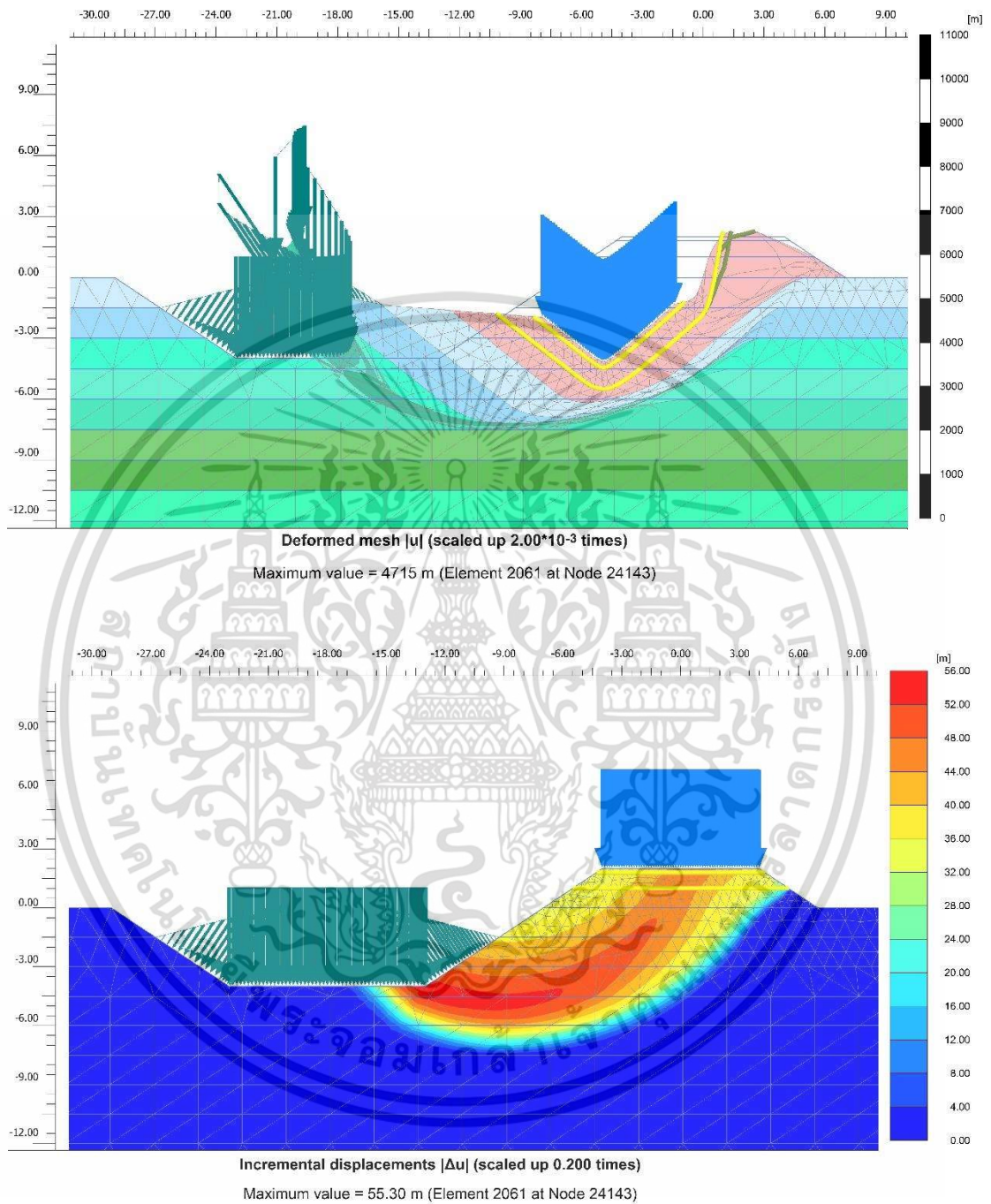
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไข sand embankment ไม่เสริมกำลัง (SE-N0)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไข sand embankment เสริมกำลัง ณ สภาวะเหมาะสม (SE-N2-h_{4u})



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล	นายณกั๊บ อาแวโด
วัน เดือน ปีเกิด	30 พฤษภาคม 2540 ที่ยะลา
ที่อยู่	69/1 ซ.สีโรรส6 ถ.สีโรรส6 ต.สะเตง อ.เมือง จ.ยะลา 95000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2562 หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (เกียรติ นิยมอันดับ 2)
ความชำนาญเฉพาะด้าน	การวิเคราะห์แบบจำลองคันดินด้วย PLAXIS 2D
ผลงาน เกียรติประวัติ และประสบการณ์ทำงาน	
พ.ศ. 2564	ศลิษา ไชยพุทธ, จิรัชญา อายะวรรณ, ธนาตล คงสมบูรณ์, อุบะ ศิริแก้ว และณกั๊บ อาแวโด. 2564. สมบัติความแข็งแรงของ ดินสปอยล์ จากการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์: กรณีศึกษาโครงการ ปรับปรุงถนนเลียบบคลองระบายน้ำสุวรรณภูมิ. Engineering Journal of Research and Development, 32(2), 79-90.
พ.ศ. 2563	Arwaedo, N., Chaiyaput, S., Sukchaisit, O., Auephattayakorn, K., Deawtipsukon, S. 2020. Effect of Ribbed Smoked Sheet on CBR Strength of Lateritic Soil. The 5th International Conference on Smart Materials and Nanotechnology (SmartMat@2020). 332-338. Thailand.
พ.ศ. 2563	ศลิษา ไชยพุทธ, ณกั๊บ อาแวโด. 2563. สมการคาดการณ์เวลาการ ก่อสร้างได้อาแฟรมวอลล์ ด้วยหัวเจาะแบบเคเบิลเชิงกล: กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้ามหานคร สายสีส้ม ของสถานี ราชวัจ ค ล า . Engineering Journal of Research and Development, 31(2), 83-92.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้