

การออกแบบและวิเคราะห์กำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านและแบบ
ซ้อนทับกัน

DESIGN AND ANALYSIS OF BACK-TO-BACK AND SUPERIMPOSED
MECHANICALLY STABILIZED EARTH WALLS



วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2560
KMITL-2017-EN-M-093-180

การออกแบบและวิเคราะห์กำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านและแบบซ้อนทับกัน

DESIGN AND ANALYSIS OF BACK-TO-BACK AND SUPERIMPOSED
MECHANICALLY STABILIZED EARTH WALLS



วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-xxx-xxx

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND ANALYSIS OF BACK-TO-BACK AND SUPERIMPOSED
MECHANICALLY STABILIZED EARTH WALLS



A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017
KMITL-2017-EN-M-xxx-xxx

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

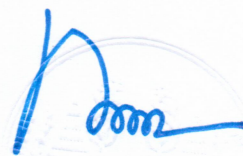
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบและวิเคราะห์กำแพงดินเสริมแรงแบบสองด้านและแบบซ้อนทับกัน
Thesis Title Design and Analysis of Back-to-back and Superimposed Mechanically Stabilized Earth Walls
นักศึกษา นายวุฒิชัย ชชาติพัฒนานันท์
รหัสประจำตัว 59601187
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ธนาตล คงสมบูรณ์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-093-180

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สยาม	ยี่มศิริ	
ผศ.ดร.อาทิตย์	เพชรศศิธร	
ดร.ศลิษา	ไชยพุทธ	
ดร.ชตชนก	อัครตมพงศ์	
ผศ.ดร.ธนาตล	คงสมบูรณ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 5 ตุลาคม พ.ศ. 2560 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
วันที่ 5 ตุลาคม พ.ศ. 2560
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและวิเคราะห์กำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน และแบบซ้อนทับกัน
นักศึกษา	นายวุฒิชัย ชาติพัฒนานันท์
รหัสประจำตัว	59601187
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ธนาดล คงสมบูรณ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการออกแบบและการวิเคราะห์กำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านและกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน ซึ่งกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านนิยมใช้สำหรับเชื่อมต่อส่วนถนนเพื่อยกระดับไปยังส่วนทางขึ้นสะพาน ส่วนกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน จะนิยมใช้ในกรณีที่กำลังกันดินมีข้อจำกัดด้านพื้นที่เสริมแรงในกรณีที่กำแพงมีความสูงมาก โดยการออกแบบกำแพงนิยมออกแบบตามมาตรฐาน FHWA แต่มาตรฐาน FHWA ดังกล่าวไม่แสดงตัวอย่างและรายละเอียดในการออกแบบกำแพงกันดินแบบซ้อนทับกัน และมาตรฐานดังกล่าวยังมีข้อจำกัดในการวิเคราะห์ตรวจสอบค่าเสถียรภาพโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมุ่งขยายตัวอย่างและรายละเอียดการออกแบบคำนวณและการวิเคราะห์กำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านและกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกันสองชั้นเฉพาะกรณีที่กำแพงกันดินใช้โมดูลาร์บล็อกเป็นวัสดุผิวหน้าร่วมตาข่ายเสริมกำลังที่เป็นวัสดุเสริมกำลังเพื่อเป็นตัวอย่างและแนวทางในการออกแบบและวิเคราะห์สำหรับผู้ออกแบบและผู้เกี่ยวข้องต่อไป

Thesis	Design and Analysis of Back-to-back and Superimposed Mechanically Stabilized Earth Walls
Student	Mr. Vuttichai Chatpattananan
Student ID.	59601187
Degree	Master of Engineering
Program	Civil Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Thanadol Kongsomboon

ABSTRACT

This thesis proposes a design and analysis of back-to-back and superimposed mechanically stabilized earth walls. Back-to-back mechanically stabilized earth wall is popularly used as an approaching slab between the highway and the bridge. Superimposed mechanically stabilized earth wall is used when the wall has a limitation in the reinforced length especially with a high wall. FHWA standard is commonly used in designing such walls. However, that FHWA standard lacks of examples and details in designing both the back-to-back and the superimposed retaining walls. Hence, this thesis aims to explain the examples in calculation details and analysis such mechanically stabilized earth walls focusing on the modular block wall facing unit and geogrid reinforcement. The work can be used as an example and concept for designers and other related parties.

II

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ธนาตล คงสมบูรณ์ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา อาจารย์ที่ปรึกษา องค์กรและหน่วยงานจากภาคอุตสาหกรรมและภาควิชาการที่ให้ข้อมูล คำถาม คำตอบ คำชี้แนะตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่านทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

วุฒิชัย ชาติพัฒนานันท์



III

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.4 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 กำแพงกันดินเสริมแรง.....	7
2.1.1 กำแพงกันดิน	7
2.1.2 ประวัติกำแพงกันดินเสริมแรง.....	8
2.1.3 ส่วนประกอบหลักกำแพงกันดินเสริมแรง.....	9
2.1.4 ประเภทกำแพงกันดินเสริมแรง.....	10
2.1.5 ข้อได้เปรียบเสียเปรียบของกำแพงกันดินเสริมแรงและต้นทุน.....	14
2.1.6 กลไกการถ่ายแรงของวัสดุเสริมแรง.....	14
2.2 หลักการออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรง.....	15
2.2.1 การวิเคราะห์ห้ออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรง.....	16
2.2.2 รูปแบบการวิบัติ.....	16
2.2.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพ.....	18
2.2.4 ค่าการเคลื่อนตัว.....	19
2.2.5 วงวิบัติวิกฤตภายในของกำแพงกันดินเสริมแรง.....	20

IV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 กำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านและกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน.....	23
2.3.1 กำแพงกันดินเสริมแรงที่มีรูปทรงซับซ้อน.....	23
2.3.2 รายละเอียดของกำแพงกันดินแบบสองด้านและแบบซ้อนทับกัน ใน FHWA-NHI-00-043.....	27
2.3.3 สรุปบททวนวรรณกรรม.....	31
บทที่ 3 กำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน.....	32
3.1 เกณฑ์การออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน.....	32
3.2 ตัวอย่างโครงการกำแพงกันดินเสริมแรงสองด้าน.....	34
3.2.1 รายละเอียดโครงการ.....	34
3.2.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ.....	34
3.2.3 ความยาวตามเงื่อนไขการออกแบบกำแพงอิสระ.....	35
3.3 การตรวจสอบเสถียรภาพ.....	35
3.3.1 ค่าเสถียรภาพกรณีเป็นกำแพงอิสระ.....	35
3.3.2 เสถียรภาพภายนอก.....	36
3.3.2.1 เสถียรภาพด้านการไถลแนวราบ (sliding stability).....	36
3.3.2.2 เสถียรภาพเชิงศูนย์กลาง (eccentricity stability) ต้านทานการหมุนคว่ำ (overturning)	37
3.3.2.3 กำลังแบกทาน (bearing capacity) ของดินฐานราก.....	38
3.3.3 เสถียรภาพภายใน.....	38
3.3.3.1 การฉีกขาด (rupture).....	39
3.3.3.2 การดึงออก (pullout)	40
3.3.4 เสถียรภาพโดยรวมโดยใช้วิธีสมดุลขีดจำกัด.....	42
3.4 ข้อจำกัดของวิธีสมดุลขีดจำกัด.....	45
3.5 การหาค่าเสถียรภาพโดยรวมโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	49
3.5.1 ค่าพารามิเตอร์ของกำแพงกันดินเสริมแรงสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	49

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.2 การตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน FEM เปรียบเทียบกับ FEM ของกำแพงกันดินเสริมแรงด้านเดียว.....	51
3.5.3 ผลวิเคราะห์ FEM ของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน.....	60
3.6 สรุปผล.....	66
บทที่ 4 กำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน.....	68
4.1 เกณฑ์การออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน.....	68
4.2 ตัวอย่างโครงการในประเทศไทย.....	70
4.3 การตรวจสอบเสถียรภาพของกำแพงกันดินเสริมแรงชั้นล่าง.....	71
4.3.1 การตรวจสอบเสถียรภาพภายนอก (External Stability Checking).....	71
4.3.1.1 น้ำหนักกระทำ (Loads)	71
4.3.1.2 การไถล (Sliding)	72
4.3.1.3 การเยื้องศูนย์กลาง (Eccentricity)	72
4.3.1.4 ความสามารถในการแบกทานที่ฐาน (Bearing capacity at base).....	73
4.3.2 การตรวจสอบเสถียรภาพภายใน (Internal Stability Checking).....	73
4.3.3 การตรวจสอบเสถียรภาพโดยรวม.....	76
4.4 การตรวจสอบเสถียรภาพของกำแพงกันดินเสริมแรงชั้นบน.....	77
4.4.1 การตรวจสอบเสถียรภาพภายนอก (External Stability Checking).....	78
4.4.1.1 น้ำหนักกระทำ (Loads)	78
4.4.1.2 การไถล (Sliding)	78
4.4.1.3 การเยื้องศูนย์กลาง (Eccentricity)	78
4.4.1.4 ความสามารถในการแบกทานที่ฐาน (Bearing capacity at base)....	79
4.4.2 การตรวจสอบเสถียรภาพภายใน (Internal Stability Checking).....	79
4.4.2.1 การฉีกขาด (rupture)	80
4.4.2.2 การดึงออก (pullout)	80
4.5 สรุปผล.....	80

VI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 ผลวิเคราะห์เพิ่มเติมของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านและ	
กำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน.....	81
5.1 เสถียรโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านที่ L/H ที่ 0.6.....	81
5.1.1 ค่าเสถียรโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านที่ $L/H = 0.6$	81
5.1.2 ค่าเสถียรโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านกว้าง 7.5 เมตร.....	86
5.1.3 สรุปผลเสถียรโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านที่ $L/H = 0.6$	93
5.2 ข้อควรระวังในการออกแบบระยะเอียงของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน.....	94
5.3 สรุปส่วนวิเคราะห์เพิ่มเติมของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน	
และแบบซ้อนทับกัน.....	97
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	98
6.1 สรุป.....	98
6.2 ข้อเสนอแนะในการออกแบบ.....	99
6.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป.....	100
บรรณานุกรม.....	101
ประวัติผู้เขียน.....	103

VII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าเสถียรภาพภายใน (global stability) ของ MSE wall สูง 12 เมตร.....	39
3.2 ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุดินและวัสดุผิวหน้าสำหรับวิธีสมมูลขีดจำกัด (LEM).....	42
3.3 ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุเสริมกำลังสำหรับวิธีสมมูลขีดจำกัด (LEM)	42
3.4 ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุดินและวัสดุผิวหน้าสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM).....	49
3.5 ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุเสริมกำลังสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM).....	50
3.6 ค่าแรงดึงสูงสุดของตาข่ายเสริมกำลังเปรียบเทียบกับค่าแรงแนวแกนจาก FEM ของกำแพงกันดินเสริมแรงด้านเดียว.....	59
3.7 ค่าแรงดึงสูงสุดของตาข่ายเสริมกำลังเปรียบเทียบกับค่าแรงแนวแกนจาก FEM ของกำแพงกันดินเสริมแรงสองด้าน.....	61
3.8 เปรียบเทียบค่าเสถียรภาพโดยรวมระหว่าง LEM และ FEM.....	67
4.1 ค่าเสถียรภาพภายในของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน.....	74
4.2 ค่าพารามิเตอร์ของเสถียรภาพโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน.....	76
4.3 ค่าเสถียรภาพภายในของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกันชั้นบน.....	79
5.1 ค่าเสถียรภาพโดยรวมส่วนวิเคราะห์เพิ่มเติมกำแพงกันดินเสริมแรงสองด้านที่ $L/H = 0.6$	93
5.2 ค่าเสถียรภาพภายในของกำแพงซ้อนทับกันชั้นบนที่ระยะเอียง (D') = 1.5 เมตร.....	95

VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 รูปตัดทั่วไปของกำแพงกันดินเสริมแรง (FHWA-NHI-10-024)	2
1.2 กำแพงกันดินเสริมแรงแบบ modular block wall (FHWA-NHI-10-024)	2
1.3 เปรียบเทียบต้นทุนของกำแพงกันดิน (FHWA-NHI-10-024).....	3
2.1 กำแพงกันดินเสริมแรงแบบใช้แถบเหล็ก (FHWA-RD-89-43).....	8
2.2 รูปตัดทั่วไปของกำแพงกันดินเสริมแรง (FHWA-RD-89-043).....	9
2.3 กำแพงกันดินเสริมแรงแบบ segmental precast concrete panel (FHWA-NHI-00-043)...	10
2.4 วัสดุผิวหน้าของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบ modular block wall (FHWA-NHI-00-043).....	11
2.5 รูปตัดทั่วไปของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบ modular block wall (FHWA-NHI-10-024).....	11
2.6 รูปตัดทั่วไปของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบ RSS (FHWA-NHI-10-024).....	12
2.7 กำแพงกันดินเสริมแรง (MSE walls) ที่ใช้วัสดุผิวหน้าต่างๆ (FHWA-NHI-10-024).....	13
2.8 แรงเสียดทานระหว่างดินและวัสดุเสริมแรง (FHWA-RD-89-043).....	15
2.9 แรงต้านจากดินเชิงรับ (แรงแบกทาน) ที่กระทำบนผิววัสดุเสริมแรง (FHWA-RD-89-043).....	15
2.10 วงวิบัติภายนอก ภายใน หรือ โดยรวม (FHWA-NHI-10-024)	17
2.11 รูปแบบการวิบัติของกำแพงกันดินเสริมแรง (FHWA-RD-89-043)	17
2.12 อัตราส่วนความปลอดภัยในการออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรง (FHWA-NHI-00-043).....	18
2.13 ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างที่ของกำแพงกันดินเสริมแรง (FHWA-RD-89-043).....	20
2.14 แนวค่าแรงดึงสูงสุดของวัสดุเสริมแรงเป็นแบบไม่ยึดตัว (FHWA-RD-89-043).....	21
2.15 แนวค่าแรงดึงสูงสุดของวัสดุเสริมแรงเป็นแบบยึดตัว (FHWA-RD-89-043).....	21
2.16 ค่าแรงดึงสูงสุด (maximum tensile force หรือ Tmax) (FHWA-RD-89-043).....	22
2.17 กำแพงกันดินเสริมแรงจะมีรูปทรงซับซ้อน (FHWA-NHI-00-043)	24
2.18 FHWA-NHI-00-043 หน้า 177 สำหรับ แบบ uneven reinforcements.....	25
2.19 สูตรคำนวณค่าหน่วยแรงเพิ่มเติมจากกำแพงชั้นบน (FHWA-NHI-00-043).....	26
2.20 FHWA-NHI-00-043 หน้า 178 สำหรับ back-to-back walls.....	27
2.21 FHWA-NHI-00-043 หน้า 179 สำหรับ back-to-back walls.....	28
2.22 FHWA-NHI-00-043 หน้า 175 สำหรับ superimposed walls.....	29
2.23 FHWA-NHI-00-043 หน้า 176 สำหรับ superimposed walls.....	30
3.1 มาตรฐาน FHWA (หน้า 179) สำหรับ back-to-back walls.....	33
3.2 น้ำหนักกระทำ MSE wall loads (FHWA-NHI-00-043)	36

IX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 หน่วยแรงสูงสุดที่ผ่านระหว่าง active zone และ resistant zone (FHWA-NHI-00-043).....	41
3.4 Active zone และ resistant zone ของ extensible MSE wall (FHWA-NHI-00-043).....	41
3.5 เสถียรภาพโดยรวมจาก LEM ของกำแพงกันดินเสริมแรงด้านเดียว.....	43
3.6 เสถียรภาพโดยรวมจาก LEM ของกำแพงเสริมแรงแบบสองด้านอิสระกว้าง 25 เมตร.....	44
3.7 เสถียรภาพโดยรวมจาก LEM ของกำแพงเสริมแรงแบบสองด้านไม่อิสระกว้าง 15 เมตร.....	44
3.8 FEM stress [Sloped 2007 Engineering Book -Geo-Slope 2007].....	46
3.9 Toe slip normal stress [Sloped 2007 Engineering Book -Geo-Slope 2007].....	47
3.10 Deep slip normal stress [Sloped 2007 Engineering Book -Geo-Slope 2007].....	47
3.11 Normal stress FS [Sloped 2007 Engineering Book -Geo-Slope 2007].....	47
3.12 EM FS [Sloped 2007 Engineering Book -Geo-Slope 2007].....	48
3.13 Reinforcement normal stress [Sloped 2007 Engineering Book -Geo-Slope 2007].	48
3.14 ค่า Young's Modulus ของดิน (Obrzud 2012).....	50
3.15 ตาข่ายรูปทรงการเสถียรภาพจาก FEM ของกำแพงเสริมแรงด้านเดียว.....	54
3.16 ค่าการเคลื่อนตัวทั้งหมดจาก FEM ของกำแพงเสริมแรงด้านเดียว.....	54
3.17 ค่าความเค้นรวมจาก FEM ของกำแพงเสริมแรงด้านเดียว.....	55
3.18 ค่าหน่วยแรงแนวแกนของตาข่ายเสริมแรงชั้นที่ 3 ในกำแพงเสริมแรงด้านเดียว.....	55
3.19 ค่า Safety Analysis ของกำแพงเสริมแรงด้านเดียวแบบลู่เข้า.....	56
3.20 ค่า Safety Analysis ของกำแพงเสริมแรงด้านเดียวแบบไม่ลู่เข้า.....	56
3.21 ค่า total incremental displacement ของกำแพงเสริมแรงด้านเดียวแบบลู่เข้า.....	57
3.22 ค่า total incremental displacement ของกำแพงเสริมแรงด้านเดียวแบบไม่ลู่เข้า.....	57
3.23 ค่าความเค้นรวมของกำแพงเสริมแรงด้านเดียวแบบลู่เข้า.....	58
3.24 ค่าความเค้นรวมของกำแพงเสริมแรงด้านเดียวแบบไม่ลู่เข้า.....	58
3.25 ตาข่ายรูปทรงการเสถียรภาพจาก FEM ของกำแพงเสริมแรงแบบสองด้าน.....	62
3.26 ค่าการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นจาก FEM ของกำแพงเสริมแรงแบบสองด้าน.....	62
3.27 ค่าความเค้นรวมจาก FEM ของกำแพงเสริมแรงแบบสองด้าน.....	63
3.28 แรงแนวแกนของตาข่ายเสริมแรงชั้นที่ 3 ในกำแพงเสริมแรงแบบสองด้านทางด้านขวา.....	63
3.29 แรงแนวแกนของตาข่ายเสริมแรงชั้นที่ 3 ในกำแพงเสริมแรงแบบสองด้านทางด้านซ้าย.....	64
3.30 ค่า Safety Analysis ของกำแพงเสริมแรงสองด้านแบบลู่เข้า.....	64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.31 ค่า total incremental displacement ของกำแพงสองด้านแบบลู่เข้า.....	65
3.32 ค่า Safety Analysis ของกำแพงเสริมแรงสองด้านแบบไม่ลู่เข้า.....	65
3.33 ค่า total incremental displacement ของกำแพงสองด้านแบบไม่ลู่เข้า.....	66
4.1 ระยะเยื้อง (D) ของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน (FHWA-NHI-00-043).....	69
4.2 ความเค้นที่ถ่ายลงกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน (FHWA-NHI-00-043).....	70
4.3 หน้าที่กระทำต่อกำแพงซ้อนทับกันชั้นล่าง (ดัดแปลงจาก FHWA-NHI-00-043).....	72
4.4 พื้นที่รับความเค้นแนวตั้ง (vertical stress)	75
4.5 เส้นวงวิบัติที่แบ่ง active zone และ resistant zone (FHWA-NHI-00-043).....	75
4.6 เสถียรภาพโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน.....	77
5.1 เสถียรภาพโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านที่ $L/H = 0.6$	82
5.2 ค่า Safety Analysis ของกำแพงเสริมแรงแบบสองด้านที่ $L/H = 0.6$	83
5.3 ค่า total incremental displacement แบบลู่เข้า ของกำแพงที่ $L/H = 0.6$	83
5.4 ค่า Safety Analysis แบบไม่ลู่เข้าของกำแพงเสริมแรงแบบสองด้านที่ $L/H = 0.6$	84
5.5 ค่า total incremental displacement แบบไม่ลู่เข้าของกำแพงที่ $L/H = 0.6$	84
5.6 ตาข่ายรูปทรงการเสถียรภาพจาก FEM ของกำแพงเสริมแรงแบบสองด้านที่ $L/H = 0.6$	85
5.7 ค่าการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นจาก FEM ของกำแพงเสริมแรงแบบสองด้านที่ $L/H = 0.6$	85
5.8 ค่าความเค้นรวมจาก FEM ของกำแพงเสริมแรงแบบสองด้านที่ $L/H = 0.6$	86
5.9 เสถียรภาพโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมแรงกว้าง 7.5 เมตร เสริมกำลังสองชั้น.....	87
5.10 เสถียรภาพโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมแรงกว้าง 7.5 เมตร เสริมกำลังชั้นเดียว.....	88
5.11 ค่า Safety Analysis ของกำแพงกันดินเสริมแรงกว้าง 7.5 เมตรแบบลู่เข้า.....	88
5.12 ค่า Safety Analysis ของกำแพงกันดินเสริมแรงกว้าง 7.5 เมตรแบบไม่ลู่เข้า.....	89
5.13 ค่า total incremental displacement กำแพงกว้าง 7.5 เมตรเสริมแรงชั้นเดียวแบบลู่เข้า.....	89
5.14 ค่า total incremental displacement กำแพงกว้าง 7.5 เมตรเสริมแรงสองชั้นแบบไม่ลู่เข้า.....	90
5.15 ตาข่ายรูปทรงการเสถียรภาพจาก FEMของกำแพงกว้าง 7.5 เมตรเสริมแรงชั้นเดียว.....	90
5.16 ตาข่ายรูปทรงการเสถียรภาพจาก FEM ของกำแพงกว้าง 7.5 เมตรเสริมแรงสองชั้น.....	91
5.17 ค่า total incremental displacement กำแพงกว้าง 7.5 เมตรเสริมแรงชั้นเดียว.....	91
5.18 ค่า total incremental displacement กำแพงกว้าง 7.5 เมตรเสริมแรงสองชั้น.....	92
5.19 ค่าความเค้นรวมกำแพงกว้าง 7.5 เมตรเสริมแรงชั้นเดียว.....	92

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.20 ค่าความเค้นรวมกำแพงกว้าง 7.5 เมตรเสริมแรงสองชั้น.....	93
5.21 ผลของความยาวตาข่ายเสริมแรงที่ไม่เท่ากันตาม FHWA-RD-89-043 หน้า 36.....	94
5.22 ความต้านทานการดึงออกตาม FHWA-RD-89-043 หน้า 38.....	95



บทที่ 1

บทนำ

บทนี้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาใน 1.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษา ใน 1.2 ขอบเขตการวิจัยใน 1.3 ที่จะพิจารณาเฉพาะกำแพงกันดินเสริมแรง (mechanically stabilized earth wall หรือ MSE wall หรือ MSEW) แบบโมดูลาร์บล็อก (modular block wall หรือ MBW) ที่ใช้ตาข่ายเสริมแรง (geogrid) เป็นวัสดุเสริมแรงและพิจารณาเฉพาะกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน (back-to-back walls) และกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน (superimposed walls) โดยแสดงลำดับและส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์ใน 1.4

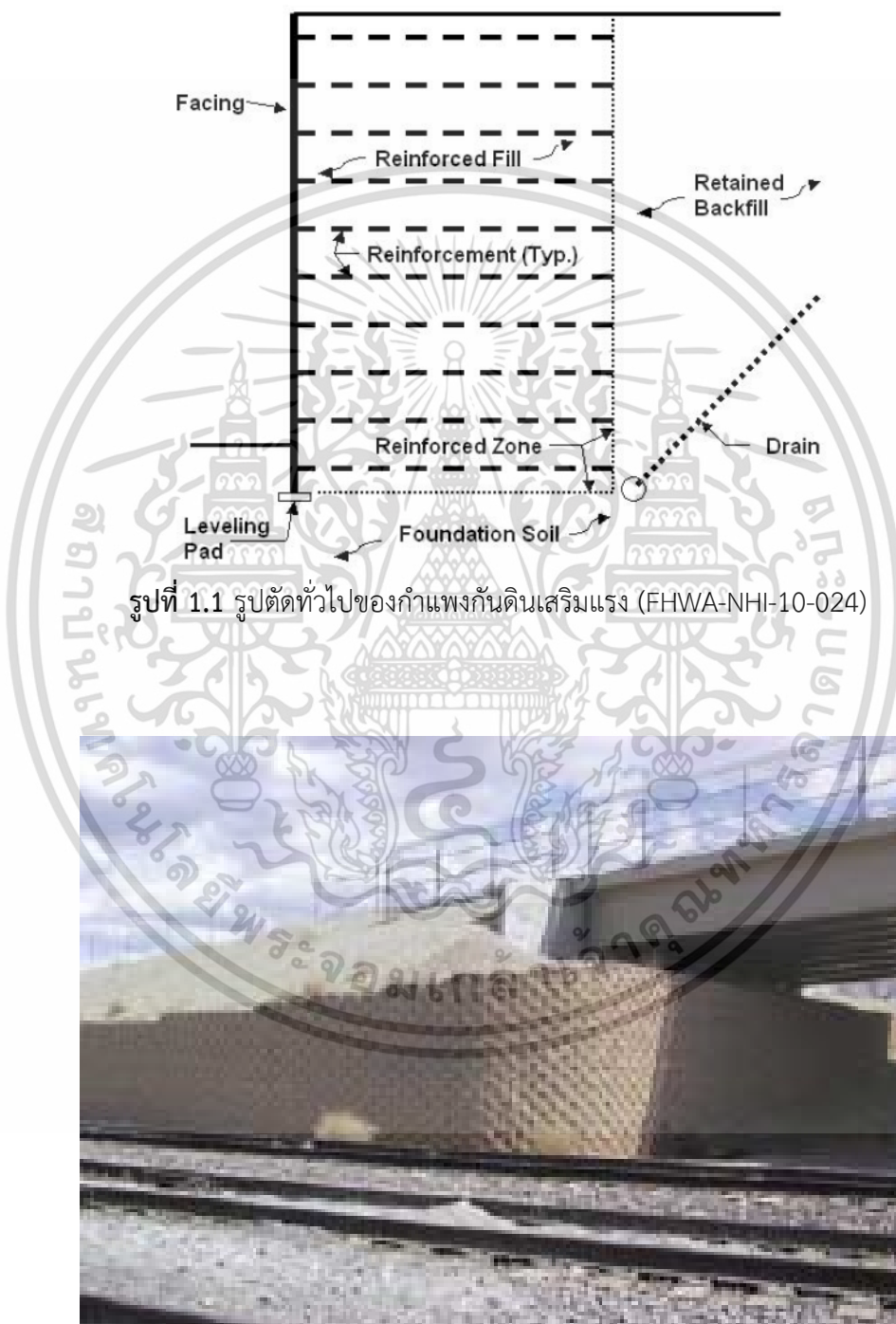
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กำแพงกันดิน (retaining wall) โดยส่วนใหญ่สามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทหลักๆคือ กำแพงกันดินแบบแข็งเกร็ง (rigid) เช่นกำแพงกันดินคอนกรีตหล่อในที่ที่อาศัยน้ำหนักตัวเองรับน้ำหนักดิน (cast-in place หรือ CIP gravity wall) ส่วนอีกแบบเป็นกำแพงกันดินแบบยืดหยุ่น (flexible) เช่นระบบเข็มพืด (sheet pile) หรือระบบสมอดิน (earth anchor) ที่อาศัยแรงดันดินเชิงรับ (passive) ในการรับน้ำหนักแรงดันดินด้านข้าง ซึ่งกำแพงกันดินแบบยืดหยุ่นนี้จะยินยอมให้มีการเคลื่อนตัวด้านข้าง (lateral displacement) มากกว่าแบบแข็งเกร็ง (Budhu Muni. 2010. หน้า 629)

ส่วนกำแพงกันดินเสริมแรง (Mechanically Stabilized Earth Wall, MSE wall หรือ MSEW) เป็นการกำแพงกันดิน (retaining wall) อีกประเภทหนึ่งที่ใช้มวลของดินถม (earth fill) ช่วยเพิ่มน้ำหนักและรับแรงอัดและเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมแรง (reinforcements) (Budhu Muni. 2010. หน้า 666) เพื่อช่วยเสริมกำลังรับแรงดึงเนื่องจากดินมีกำลังรับแรงดึงไม่มากนัก (negligible) (Budhu Muni. 2010. หน้า 135) โดยวัสดุเสริมแรงที่ใช้ในกำแพงกันดินเสริมแรงสามารถใช้เป็นวัสดุแถบเหล็ก (metallic strips) หรือวัสดุจีโอซินเทติกส์ (geosynthetics) ซึ่งเป็นวัสดุประเภทใยสังเคราะห์ และจะอาศัยวัสดุผิวหน้า (facing unit) จำพวกคอนกรีตหล่อสำเร็จ (precast concrete), โมดูลาร์บล็อก (modular block wall หรือ MBW) ซึ่งเป็นอิฐหล่อสำเร็จ, หรือ geosynthetics เพื่อป้องกันการกัดเซาะ (erosion control) ที่ผิวหน้า โดยแนะนำให้ระยะห่างระหว่างชั้นวัสดุเสริมแรงมีค่าไม่เกิน 80 เซนติเมตร จาก FHWA-NHI-10-024. 2009 หน้า 4-38 และ FHWA-NHI-00-043. 2001 หน้า 120)

ประเภทของดินเพื่อในการออกแบบ MSE Wall สามารถแบ่งได้เป็นสามประเภทคือ ดินเดิม (retained soil) ดินเสริมกำลัง (reinforced soil) และดินฐานราก (foundation soil) โดยที่ดินเสริมกำลังที่ใช้ร่วมกับวัสดุเสริมแรง ร่วมกับวัสดุผิวหน้า รับน้ำหนักแรงดันด้านข้างจากดินเดิม และทั้งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบกำแพงกันดินเสริมแรงนี้วางอยู่บนดินฐานรากที่สามารถรับกำลังแบกทานของระบบกำแพงกันดินนี้ได้ โดยที่กำแพงจะวางบนแผ่นปรับระดับ (leveling pad) ที่เป็นคอนกรีต และมีท่อระบายน้ำให้น้ำขังอยู่ในระบบกำแพงกันดินเสริมแรง ดังแสดงในรูปที่ 1.1 และตัวอย่างของโมดูลาร์บล็อกในส่วนคอสะพาน (approaching slab) แสดงในรูปที่ 1.2

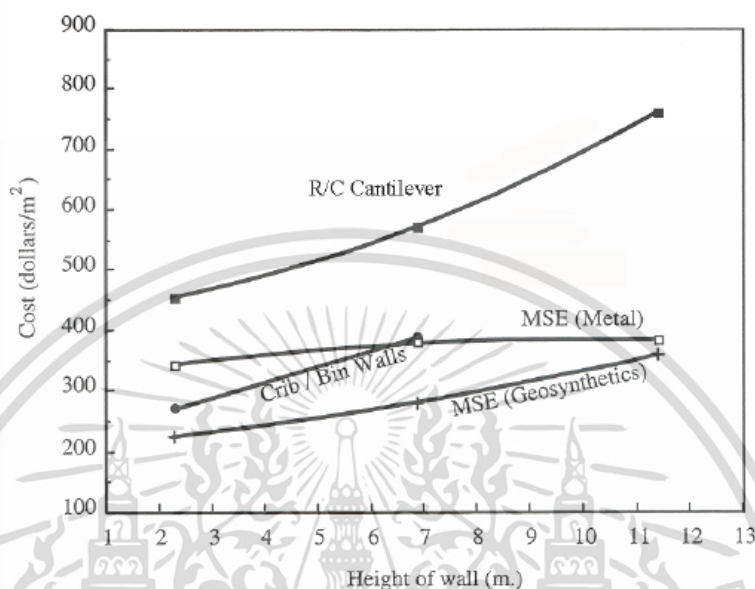


รูปที่ 1.1 รูปตัดทั่วไปของกำแพงกันดินเสริมแรง (FHWA-NHI-10-024)

รูปที่ 1.2 กำแพงกันดินเสริมแรงแบบ modular block wall (FHWA-NHI-10-024)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากกำแพงกันดินเสริมแรงมีคุณสมบัติในการให้ตัวที่มากกว่ากำแพงกันดินแบบแข็งเกร็ง กำแพงกันดินเสริมแรงนี้จะมีราคาต่ำกว่าก่อสร้างที่ต่ำกว่ากำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็ก (FHWA-RD-89-043 หน้า 11 และ FHWA-NHI-00-043 หน้า 17 ดังแสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 เปรียบเทียบต้นทุนของกำแพงกันดิน (FHWA-NHI-10-024)

ขณะที่กำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็กมีในแบบมาตรฐานงานทาง กรมทางหลวงชนบท (2556) หน้า 30 ถึง หน้า 33 (แบบมาตรฐานงานทาง. 2556.) ที่ให้แบบก่อสร้างมาตรฐานสำหรับกำแพงกันดินสูงไม่เกิน 3.5 เมตร และในแบบมาตรฐานงานสะพาน กรมทางหลวงชนบท (2556) หน้า 105 (แบบมาตรฐานงานสะพาน. 2556.) ที่ให้แบบก่อสร้างมาตรฐานสำหรับกำแพงกันดินสูงไม่เกิน 3.5 แต่ยังไม่มียังไม่มีแบบมาตรฐานสำหรับกำแพงกันดินเสริมแรงที่ใช้ในประเทศไทย ถึงแม้ว่าประเทศไทยใช้กำแพงกันดินแบบ segmental precast concrete panel มาเป็นระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งกำแพงกันดินแบบ segmental precast concrete panel หรือ MSE (Metal) ในรูปที่ 1.3 ใช้แผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ (precast concrete panel) เป็นวัสดุผิวหน้า ร่วมกับแถบเหล็ก (metallic strip) เป็นวัสดุเสริมกำลัง แต่กำแพงกันดินอีกแบบคือ modular block wall (MBW) หรือ MSE (geosynthetics) ที่ใช้อิฐสำเร็จโมดูลาร์บล็อก (modular block) เป็นวัสดุผิวหน้า ร่วมกับตาข่ายเสริมแรง (geogrid) ที่ใช้เป็นวัสดุเสริมกำลัง มีต้นทุนการก่อสร้างที่น้อยกว่า ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ยังไม่มีการใช้มากนักในประเทศไทย

ในส่วนการออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรงนั้น จะนิยมใช้ตามมาตรฐาน FHWA BS8006 หรือ EBGFE0 (Galindo. 2012.) โดยที่ FHWA จาก Federal Highway Administration จะนิยมใช้ FHWA-NHI-00-043, FHWA-NHI-10-024, FHWA-RD-89-043, และ AASHTO1997 มาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BS8006. 2010. จาก The British Standards Institution หรือ มาตรฐาน EBGeo. 2011. จาก Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen หรือ German Geotechnical Society) ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอิงมาตรฐาน FHWA เป็นหลักเนื่องจากเป็นมาตรฐานที่พัฒนามาจากมาตรฐาน AASHTO1997 ที่นิยมใช้ในการออกแบบถนนและสะพานในประเทศไทย

การออกแบบ MSE wall จะเป็นการประเมินค่าความปลอดภัยในด้านเสถียรภาพภายนอก (external stability) เสถียรภาพภายใน (internal stability) และเสถียรภาพโดยรวม (global stability) เสถียรภาพภายนอกจะพิจารณา MSE wall เสมือนเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (rigid body) เช่น เป็นกำแพงกันดินคอนกรีต แล้วจะหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (factors of safety, FS) ด้านการลื่นไถล (sliding) การแบกทาน (bearing capacity) และการหมุนคว่ำ (overturning) เสถียรภาพภายในจะพิจารณาอัตราส่วนความปลอดภัยด้านการฉีกขาด (rupture) ของวัสดุเสริมกำลัง (reinforcing elements) และการดึงออก (pullout) ของวัสดุเสริมกำลังหลุดออกจากดิน เสถียรภาพโดยรวม จะเกี่ยวข้องกับเสถียรภาพเชิงลาด (slope stability) โดยจะเป็นการหาวงกลม (slip surface) ที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่น้อยที่สุดซึ่งอาจจะอยู่ภายในหรือภายนอกหรือบางส่วนของ MSE wall

FHWA-NHI-00-043 สามารถใช้ได้ดีในการออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรงแบบปกติชั้นเดียว ด้านเดียว (single tier, one side) โดยมีตัวอย่างแสดงชัดเจน และ FHWA-NHI-00-043 ยังระบุถึงการออกแบบ MSE wall ที่มีรูปทรงซับซ้อนขึ้น (complex geometrics) อีก 4 รูปแบบคือ ตอม่อตัมริมของสะพาน (bridge abutments) กำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน (superimposed walls) กำแพงกันดินที่วัสดุเสริมแรงมีความยาวไม่เท่ากัน (walls with uneven reinforcement lengths) และ กำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน (back-to-back walls) โดยที่มาตรฐาน FHWA-NHI-00-043 มีความไม่ชัดเจนและขาดรายละเอียดเช่นตัวอย่างการคำนวณการออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรงที่มีรูปทรงซับซ้อนขึ้น (complex geometrics) ทั้ง 4 รูปแบบ ขณะที่ทั้ง bridge abutment และ walls with uneven reinforcement lengths ยังสามารถจัดเป็นกำแพงชั้นเดียว ด้านเดียว แต่ขาดตัวอย่างการคำนวณของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน (superimposed walls) รวมถึงสูตรการลดทอนแรงดันดินที่มีค่าไม่ถูกต้องที่แสดงให้เห็นชัดในการหาค่าเสถียรภาพโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน (back-to-back walls) (Han Jie, Leshchinsky Dov. 2010.)

กำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านนิยมใช้สำหรับเชื่อมต่อส่วนถนนเพื่อยกระดับไปยังส่วนทางขึ้นสะพาน ส่วนกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกันนิยมใช้ในกรณีที่ดินที่มีความยาววัสดุเสริมแรงมีข้อจำกัด โดยเฉพาะในกรณีที่กำแพงมีความสูงมาก จึงต้องลดความยาวของวัสดุเสริมแรงในชั้นบน ซึ่ง FHWA-NHI-00-043 ขาดตัวอย่างการคำนวณในส่วนของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน (superimposed walls) และมีจำเป็นต้องใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element

Method หรือ FEM) แทนวิธีสมดุลขีดจำกัด (Limit Equilibrium Method หรือ LEM) ในการหาค่าเสถียรภาพโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมีจุดมุ่งหมายในการให้ตัวอย่างรายละเอียดการออกแบบคำนวณกำแพงกันดินเสริมแรงแบบ modular block wall หรือ MBW ที่ใช้โมดูลาร์บล็อกเป็นวัสดุผิวหน้าร่วมตาข่ายเสริมกำลัง (geogrid) เป็นวัสดุเสริมกำลัง ของกำแพงกันดินเสริมแรงที่เป็นแบบรูปทรงซับซ้อน (complex geometrics) ในส่วนของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน (back-to-back walls) และกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน (superimposed walls) ในส่วนของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน นอกจากแนวทางการออกแบบ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังเปรียบเทียบค่าเสถียรภาพโดยรวม (global stability) ระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method หรือ FEM) และวิธีสมดุลขีดจำกัด (limit equilibrium method หรือ LEM) ที่จำเป็นต้องอาศัยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการหาค่าเสถียรภาพโดยรวมเนื่องจากวิธีสมดุลขีดจำกัดอาจมิได้ให้ค่าเสถียรภาพโดยรวมที่ถูกต้อง ในส่วนของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน นอกจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะให้แนวทางการออกแบบแล้ว ยังให้ข้อควรระวังในการกำหนดระยะเยื้องของกำแพงชั้นบนที่ซ้อนทับกับกำแพงชั้นล่าง ที่หากกำหนดระยะเยื้องไม่ถูกต้องแล้ว อาจก่อให้เกิดอันตรายในการออกแบบที่มีได้ กำหนดความยาวตาข่ายเสริมแรงเพียงพอสำหรับกำแพงชั้นล่าง

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อแสดงรายละเอียดการคำนวณออกแบบในการวิเคราะห์เสถียรภาพภายนอกเสถียรภาพภายใน และค่าเสถียรภาพโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน (back-to-back walls)

1.2.2 เพื่อแสดงรายละเอียดการคำนวณออกแบบในการวิเคราะห์เสถียรภาพภายนอกเสถียรภาพภายใน และค่าเสถียรภาพโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน (superimposed walls)

1.2.3 เพิ่มเติมส่วนวิเคราะห์เพิ่มเติมเช่นการออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรงสองด้านความยาวตาข่ายเสริมกำลังลดลงเป็น 0.6 เท่าของความสูงตามมาตรฐานออกแบบ FHWA-NHI-00-043 และการกำหนดระยะเยื้องของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน

1.3 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พิจารณาเฉพาะกรณีกำแพงกันดินแบบโมดูลาร์บล็อก (modular block wall หรือ MBW) ที่ใช้ตาข่ายเสริมแรง (geogrid) เป็นวัสดุเสริมแรง และพิจารณากำแพงที่มีรูปทรงซับซ้อน (complex geometrics) เฉพาะกรณีที่เป็นกำแพงกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน

(back-to-back walls) และกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน (superimposed walls) ดังรายละเอียดดังนี้

- 1.3.1 วัสดุเสริมกำลัง ของกำแพงกันดินเสริมแรงเป็นแบบตาข่ายเสริมกำลัง
- 1.3.2 วัสดุผิวหน้าของกำแพงกันดินเสริมแรงเป็นแบบโมดูลาร์บล็อก
- 1.3.3 กำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน (back-to-back walls) สูง 12 เมตร
- 1.3.4 กำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน (superimposed walls) มีสองชั้น กำแพงกันดินชั้นบนสูง 2 เมตร วางอยู่บนกำแพงกันดินชั้นล่างความสูง 4 เมตร

1.4 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ให้รายละเอียดในทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 รายละเอียดตัวอย่างการออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านในบทที่ 3 รายละเอียดตัวอย่างการออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกันในบทที่ 4 บทที่ 5 เพิ่มเติมส่วนวิเคราะห์กำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านที่ความยาวตาข่ายเสริมกำลังลดลงเป็น 0.6 เท่าของความสูงตามมาตรฐานออกแบบ FHWA-NHI-00-043 และการกำหนดระยะเยื้องของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน และสรุปผลและข้อเสนอแนะในบทที่ 6

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงรายละเอียดของกำแพงกันดินเสริมแรงใน 2.1 หลักการออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรงใน 2.2 และกำแพงกันดินเสริมแรงที่มีรูปทรงซับซ้อน (complex geometrics) ใน 2.3 เพื่อจะอธิบายและให้รายละเอียดกำแพงกันดินเสริมแรงที่มีรูปทรงซับซ้อนที่เป็นกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน (back-to-back walls) ในบทที่ 3 และกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน (superimposed walls) ในบทที่ 4 ถัดไป

2.1 กำแพงกันดินเสริมแรง

กำแพงกันดินเสริมแรง (reinforced soil wall) เป็นกำแพงกันดิน (retaining wall) ประเภทหนึ่งดังรายละเอียดใน 2.1.1 ซึ่งเริ่มนำมาใช้ตั้งแต่ปีค.ศ. 1970 ดังรายละเอียดใน 2.1.2 กำแพงกันดินเสริมแรงประกอบด้วยส่วนประกอบหลักคือวัสดุเสริมแรง (reinforcement) และวัสดุผิวหน้า (facing) ดังรายละเอียดใน 2.1.3 และสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆตามวัสดุผิวหน้าที่ใช้คือ แบบ segmental precast concrete panel ที่วัสดุผิวหน้าเป็นแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ (precast concrete panel) หรือแบบ modular block wall (MBW) ที่วัสดุผิวหน้าเป็นอิฐสำเร็จโมดูลาร์บล็อก (modular block) ดังรายละเอียดใน 2.1.4 โดยข้อได้เปรียบเสียเปรียบของกำแพงกันดินเสริมแรงและต้นทุนระบุไว้ใน 2.1.5 และกลไกการถ่ายแรงของวัสดุเสริมแรงระบุไว้ใน 2.1.6

2.1.1 กำแพงกันดิน

กำแพงกันดิน (retaining wall) เป็นโครงสร้างที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบทาง (highway design) โครงสร้างกำแพงกันดินนี้ไม่เพียงแต่นิยมใช้สำหรับต่อม่อตบริมของสะพาน (bridge abutment) แต่ยังใช้สำหรับรักษาเสถียรภาพทางลาด (slope stabilization) และช่วยลดระยะเขตทาง (right-of-way) ของคันทางด้านข้าง (embankment) ซึ่งก่อนหน้านี้มักจะใช้เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (reinforced concrete) แบบกำแพงถ่วงน้ำหนัก (gravity wall) หรือแบบกำแพงปีกยื่น (cantilever wall) ซึ่งกำแพงดังกล่าวเป็นกำแพงแบบแข็งเกร็ง (rigid) ที่รับการทรุดตัวไม่เท่ากัน (differential settlement) ได้น้อย นอกจากนี้ และกำแพงกันดินแบบแข็งเกร็งนี้จะมีราคา

ค่าก่อสร้างสูงหากกำแพงมีความสูงมากหรือดินด้านล่าง (subsoil) เป็นดินอ่อนที่แบกทานรับกำลังได้น้อย กำแพงกันดินเสริมแรง (reinforced soil wall) จึงเป็นโครงสร้างกำแพงกันดินที่ประหยัดกว่า

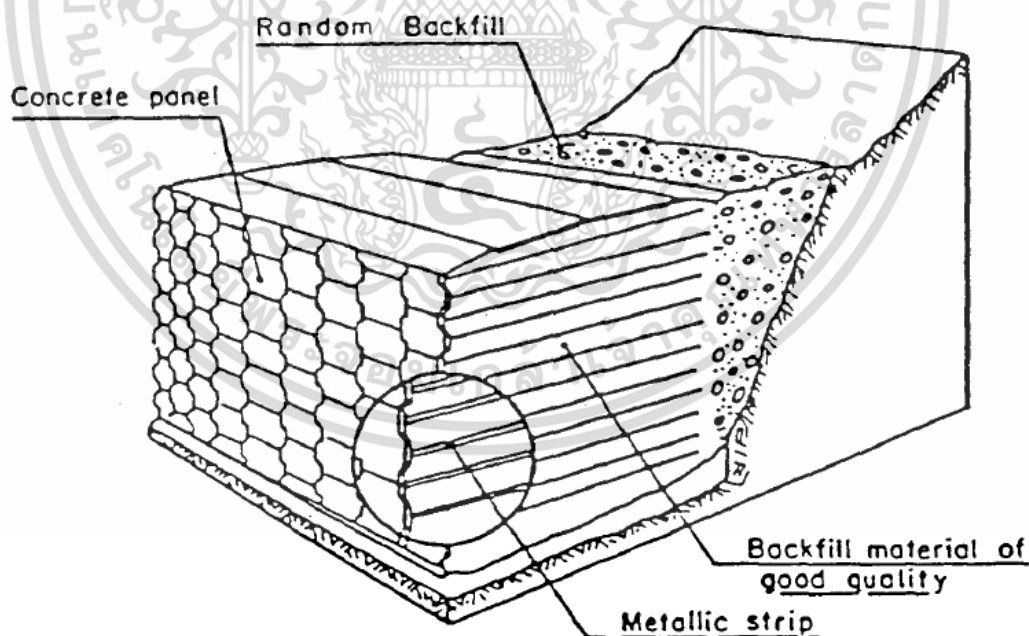
กำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็ก และสามารถต้านทานการทรุดตัวไม่เท่ากัน (differential settlement) ได้น้อย นอกจากนี้ และกำแพงกันดินแบบแข็งเกร็งนี้จะมีราคา

สูงกว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

settlement) ได้มากกว่า โดยการใช้วัสดุเสริมกำลัง (reinforced elements) เช่น แถบเหล็ก (steel strip) ตาข่ายพลาสติก (plastic grid) หรือแผ่นใยสังเคราะห์ (geotextile sheet) ในดินเพื่อเพิ่มความต้านทานในการรับแรงดึง เนื่องจากดินเป็นวัสดุโครงสร้างที่รับแรงดึงได้น้อย กำแพงกันดินเสริมแรงนี้ยังต้องการวัสดุผิวหน้า (facing unit) เพื่อทำหน้าที่ยึดผิวหน้าให้อยู่ด้วยกัน (self supporting)

2.1.2 ประวัติกำแพงกันดินเสริมแรง

กำแพงกันดินเสริมแรง (reinforced soil wall หรือ mechanically stabilized earth wall) เริ่มใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกาประมาณปี.ศ. 1970 (พ.ศ. 2513) โดยนายเฮนรี ไวด์ล (Henry Vidal) ชาวฝรั่งเศส โดยเรียกกำแพงกันดินแบบนี้ว่ากำแพงระบบไวด์ล (Vidal System) และเรียกว่าดินเสริมกำลัง (Reinforced Earth) ที่ใช้แถบเหล็ก (metallic strip) เป็นวัสดุเสริมกำลัง แสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งกำแพงกันดินเสริมแรงมีหลายแบบ โดยที่ Reinforced Earth ระบบไวด์ลนี้จัดเป็นกำแพงกันดินเสริมแรงแบบหนึ่ง และเรียกชื่อทั่วไป (generic term) ของกำแพงกันดินเสริมแรงว่า mechanically stabilized earth wall หรือ MSE wall หรือ MSEW

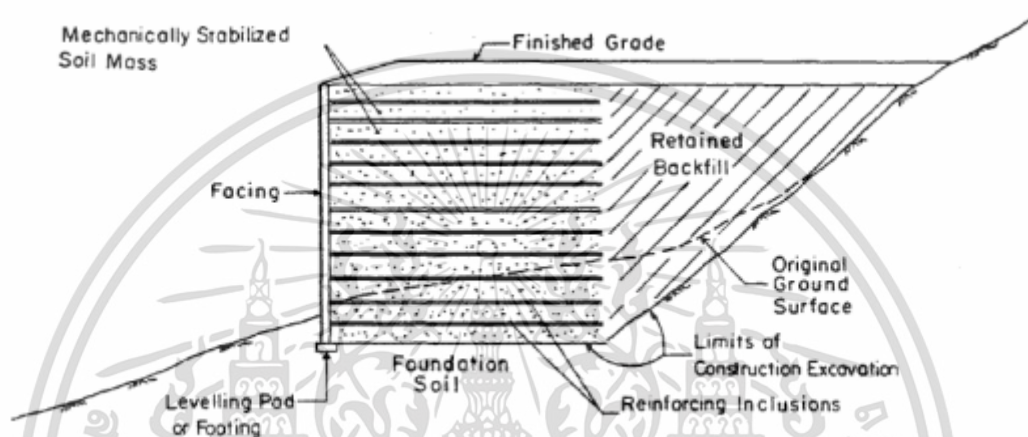


รูปที่ 2.1 กำแพงกันดินเสริมแรงระบบไวด์ล (FHWA-RD-89-043)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ส่วนประกอบหลักกำแพงกันดินเสริมแรง

รูปตัดทั่วไปของกำแพงกันดินเสริมแรง (mechanically stabilized earth wall หรือ mechanically stabilized soil mass) แสดงดังรูปที่ 2.2 โดยมีส่วนประกอบหลักๆคือ วัสดุเสริมแรง (reinforcing inclusion) ดินถม (backfill) และผิวหน้า (facing) โดยที่ผิวหน้าจะวางอยู่บนแผ่นปรับระดับ (levelling pad) หรือฐานราก (footing) ที่ทำด้วยคอนกรีต โดยที่ระบบกำแพงกันดินเสริมแรงวางอยู่บนดินเดิม (foundation soil) เพื่อรับแรงดันด้านข้างจากดินเดิม (retained backfill)



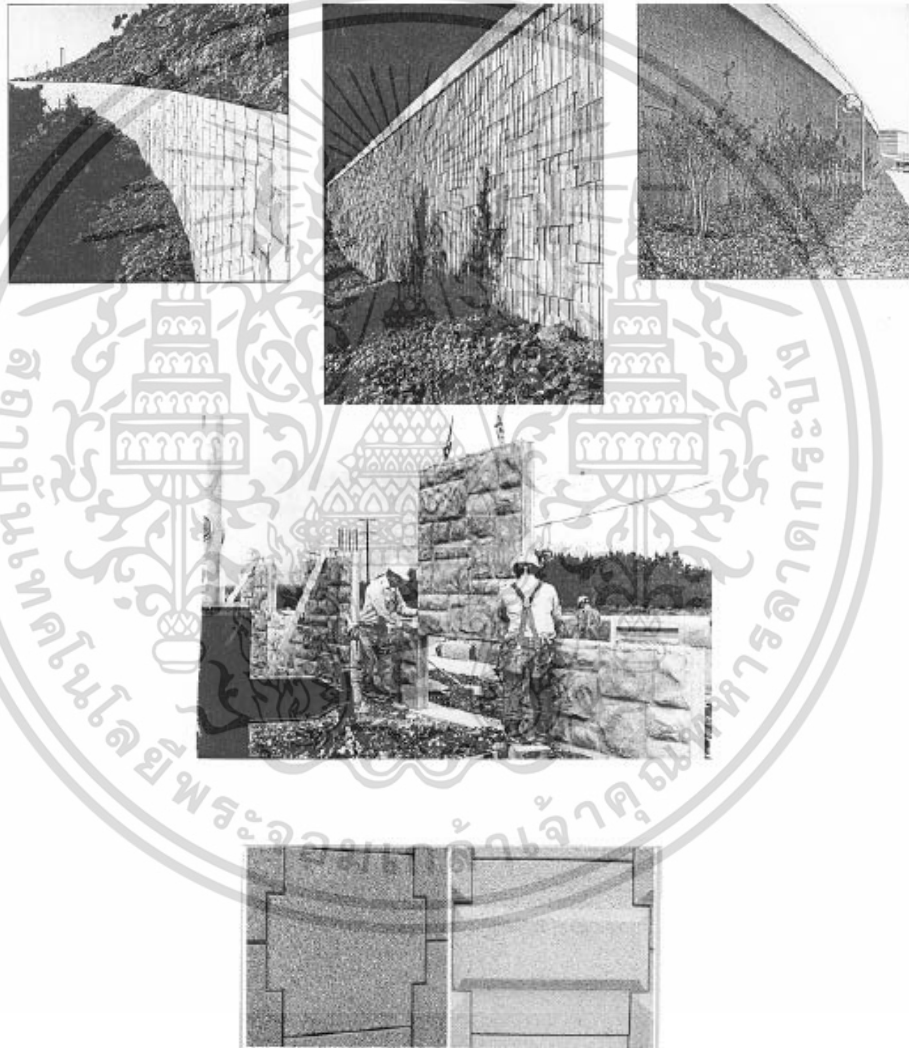
รูปที่ 2.2 รูปตัดทั่วไปของกำแพงกันดินเสริมแรง (FHWA-RD-89-043)

วัสดุเสริมแรง (reinforcing materials) จะเป็นวัสดุประเภทแถบเหล็ก (metallic strip) หรือวัสดุประเภทจีโอซินเทติกส์ (geosynthetics) หรือเรียกว่าแผ่นใยสังเคราะห์ ซึ่งเป็นชื่อเรียกทั่วไป (generic term) ของวัสดุสังเคราะห์ที่ยืดหยุ่นที่ใช้ในงานปฐพีวิศวกรรม (geotechnical engineering) เช่นผ้าใยเสริมแรง (geotextile) แผ่นใยเสริมแรง (geomembrane) โครงตาข่ายเสริมแรง (geonet) หรือตาข่ายพลาสติก (plastic grid) ตาข่ายพลาสติกสามารถเรียกอีกอย่างได้ว่าตาข่ายเสริมแรง (geogrid) โดยวัสดุเสริมแรง

ส่วนผิวหน้า (facing) เป็นอีกองค์ประกอบหนึ่งของกำแพงกันดินเสริมแรง ทำหน้าที่เก็บกันดินที่อยู่ระหว่างชั้นเสริมกำลัง ไม่ให้หลุดร่วงออก (ravel) facing อาจจะเป็นวัสดุประเภทแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ (precast concrete panel) อิฐหล่อสำเร็จหรือโมดูลาร์บล็อก (modular block) แผ่นเหล็ก (metal sheet and plate) เกเบียน (gabion) ลวดตาข่ายเชื่อมแน่น (welded wire mesh) คอนกรีตพ่น (shotcrete) แผ่นไม้ (wood logging and panel) หรือแผ่นใยสังเคราะห์ห่อ (wrapped sheet of geosynthetics)

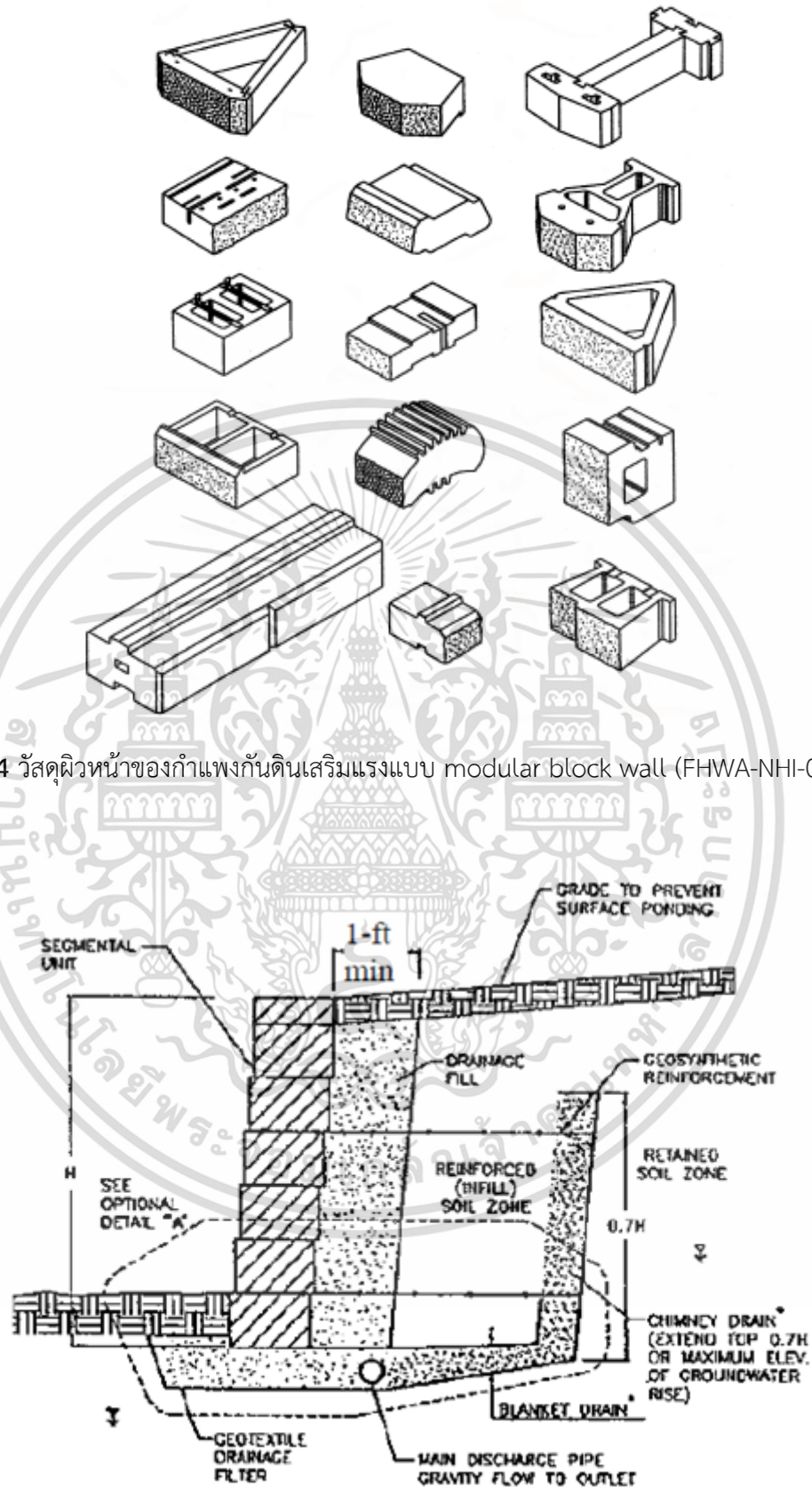
2.1.4 ประเภทกำแพงกันดินเสริมแรง

เมื่อพิจารณาจากผิวหน้า (facing) สามารถแบ่งประเภทของกำแพงกันดินเสริมแรงได้เป็น 2 ระบบคือกำแพงกันดินเสริมแรงแบบ segmental precast concrete panel ที่ผิวหน้าเป็นแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ (precast concrete panel) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และกำแพงกันดินเสริมแรงแบบ modular block wall (MBW) ที่ผิวหน้าเป็นอิฐสำเร็จโมดูลาร์บล็อก (modular block) ที่ใช้การหล่อแห้ง (dry cast) โดยโมดูลาร์บล็อกที่ใช้มีได้หลายรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 กำแพงกันดินเสริมแรงแบบ segmental precast concrete panel (FHWA-NHI-00-043)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



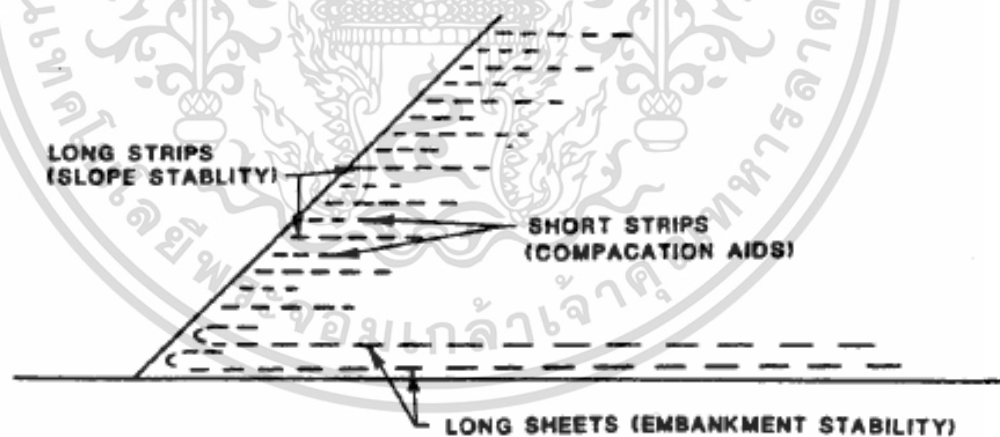
รูปที่ 2.4 วัสดุผิวหน้าของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบ modular block wall (FHWA-NHI-00-043)

รูปที่ 2.5 รูปตัดทั่วไปของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบ modular block wall (FHWA-NHI-10-024)

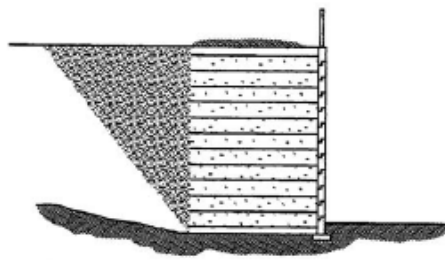
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่หากพิจารณากำแพงกันดินจากวัสดุเสริมแรงแล้ว สามารถแบ่งกำแพงกันดินเสริมแรงได้เป็น 2 ประเภทคือ กำแพงกันดินแบบไม่ยืดตัว (inextensible) และกำแพงกันดินแบบยืดตัว (extensible) ที่ค่าการเสียรูป (deformation) ของวัสดุเสริมแรง (reinforcement) ที่สภาวะวิบัติ (failure) มีค่าน้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับค่าการเสียรูป (deformation) ของดิน ซึ่งกำแพงกันดินเสริมแรงแบบ segmental precast concrete panel ดังรูปที่ 2.3 หรือกำแพงกันดินเสริมแรงแบบไวต์ล ดังรูปที่ 2.1 จะใช้แถบเหล็ก (metallic strip) เป็นวัสดุเสริมแรง สามารถจัดเป็นกำแพงกันดินแบบไม่ยืดตัว (inextensible) ส่วนกำแพงกันดินแบบ modular block wall (MBW) ที่ใช้ตาข่ายเสริมแรง (geogrid) เป็นวัสดุเสริมแรง ดังรูปที่ 2.5 สามารถจัดเป็นกำแพงกันดินแบบยืดตัว (extensible) ซึ่งตาข่ายเสริมแรง (geogrid) จัดเป็นวัสดุเสริมแรงประเภทจีโอซินเทติกส์ (geosynthetic reinforcement) ซึ่งกำแพงกันดินเสริมแรงนี้จะใช้หินกรวดระบายน้ำ (drainage fill) ร่วมกับท่อระบายน้ำ (main discharge pipe) ดังแสดงในรูปที่ 2.5

นอกจากนี้ กำแพงกันดินเสริมแรง (MSE wall) อาจใช้วัสดุผิวหน้าหรือวัสดุเสริมแรงประเภทอื่น ๆ อีกเช่น วัสดุจีโอซินเทติกส์ (geosynthetics) เช่น ใยสังเคราะห์ (geotextile) มาพันทับห่อดินเสริมกำลังทำหน้าที่ต้านทานแรงดันดินด้านข้าง และจะเรียกกำแพงกันดินแบบนี้ว่า เสริมลาดดิน (reinforced soil slope หรือ RSS) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 หรืออาจจะใช้หรือเกเบียน (gabion) ที่เป็นกล่องลวดบรรจุหิน หรือวัสดุใดๆก็ได้เช่นยางรถยนต์ (tire) ดังแสดงในรูปที่ 2.7

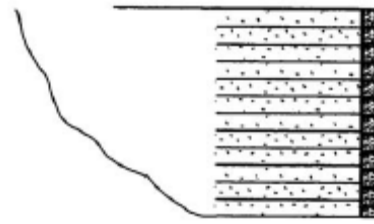


รูปที่ 2.6 รูปตัดทั่วไปของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบ RSS (FHWA-NHI-10-024)



Segmental
Precast Concrete

แผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ



Modular Block Wall Units

อิฐหล่อสำเร็จ



Geotextile
Wrapped-Facing
with Shotcrete Cover

ผ้าใยสังเคราะห์หุ้มด้วยคอนกรีตพ่น



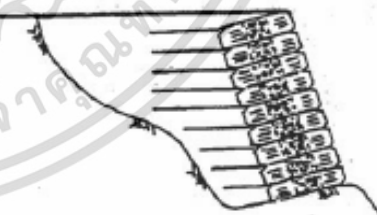
Gabion-Facing

เกเปียนหรือกล่องลวดบรรจุหิน



Full-Height Concrete Panel

แผ่นคอนกรีตเต็มช่วง



Tire-Facing Units

ยางรถยนต์

รูปที่ 2.7 กำแพงกันดินเสริมแรง (MSE walls) ที่ใช้วัสดุผิวหน้าต่างๆ (FHWA-NHI-10-024)

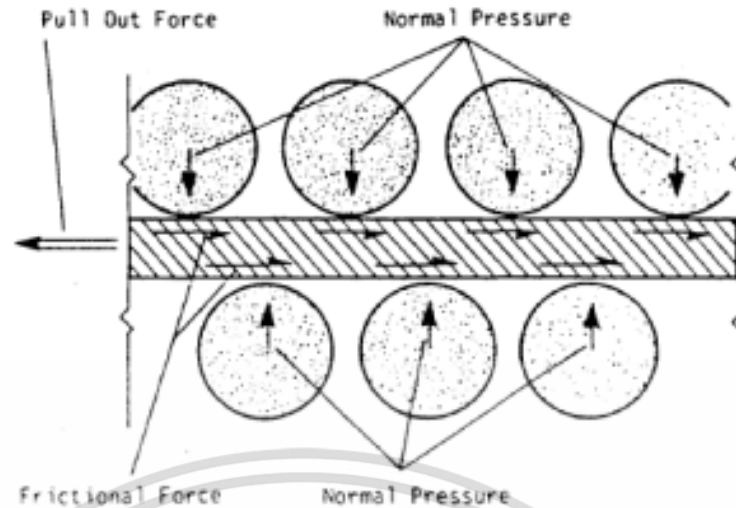
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 ข้อได้เปรียบเสียเปรียบของกำแพงกันดินเสริมแรงและต้นทุน

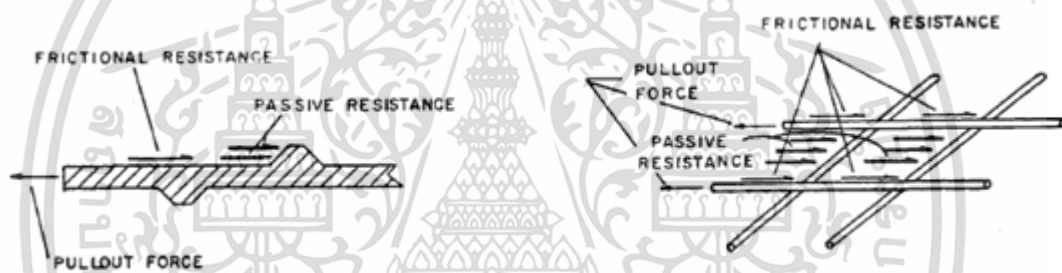
กำแพงกันดินเสริมแรงนี้มีข้อได้เปรียบในด้านการก่อสร้างที่ทำได้สะดวกรวดเร็วและไม่ต้องใช้ความชำนาญมากโดยต้องการเพียงการบดอัดดินเสริมกำลัง (reinforced soil) ให้แน่น สามารถหลุดตัวได้มากทำให้ไม่ต้องการฐานรากที่แข็งแรงมาก ต้องการเพียงแผ่นปรับระดับคอนกรีต (leveling pad หรือ footing ในรูปที่ 2.2) ทำให้กำแพงกันดินเสริมแรงนี้ประหยัดกว่ากำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่กำแพงกันดินเสริมแรงนี้ก็มิข้อเสียเปรียบกว่ากำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็กตรงที่ต้องการเนื้อที่ของดินเสริมแรง (อย่างน้อยประมาณ 70% ของความสูงกำแพงกันดิน) ต้องการวัสดุดินเสริมกำลังประเภทดินเม็ดหยาบ (granular fill) และต้องการระบบระบายน้ำในส่วนดินเสริมกำลัง (reinforced soil) จาก FHWA-RD-89-043 กำแพงกันดินเสริมแรงมีค่าก่อสร้างประหยัดกว่ากำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็กประมาณ 20 – 50 เปอร์เซ็นต์ และต้นทุนกำแพงกันดินเสริมแรงกรณีใช้ผิวหน้าเป็นคอนกรีตหล่อสำเร็จ จะเป็นต้นทุนของวัสดุเสริมแรง (reinforcing material) 10 – 20 เปอร์เซ็นต์ ดินถม (backfill) 30 – 40 เปอร์เซ็นต์ และผิวหน้า (facing) 40 – 50 เปอร์เซ็นต์

2.1.6 กลไกการถ่ายแรงของวัสดุเสริมแรง

กลไกการถ่ายแรง (stress transfer mechanism) ของวัสดุเสริมแรงแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ แบบใช้แรงเสียดทาน (friction) และแบบแรงต้านเชิงรับ (passive resistance) โดยที่แบบใช้แรงเสียด (friction) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ความเค้น (stress) จากดินที่เกิดแรงดึงออก (pull out force) ถ่ายลงวัสดุเสริมแรง (reinforcement) จากแรงเฉือน (shear) บนผิวประสาน (interface) ซึ่งเป็นแรงหลักกรณีที่วัสดุเสริมแรงเป็นแบบเส้นตรง (linear) หรือเป็นแบบระนาบ (planar) เช่นวัสดุเสริมแรงประเภทแถบ (strip) แท่ง (rod) สาย (cables) ตะปู (nail) แผ่นใย (fabric) และแผ่นผ้าใยสังเคราะห์ (geotextile sheet) ส่วนแบบแรงต้านเชิงรับ (passive resistance)) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ความเค้น (stress) จากดินที่เกิดแรงดึงออก (pull out force) ถ่ายลงวัสดุเสริมแรง (reinforcement) จากแรงแบกทาน (bearing) จากชิ้นส่วนด้านขวาง (transverse element) ของวัสดุเสริมแรงที่ต้านกับดิน ซึ่งเป็นแรงหลักกรณีที่วัสดุเสริมแรงที่มีชิ้นส่วนด้านขวางจำนวนมาก เช่น บาร์แมท (bar mat) ตาข่ายกริด (grid) และลวดตาข่ายไวร์เมช (wire mesh)



รูปที่ 2.8 แรงเสียดทานระหว่างดินและวัสดุเสริมแรง (FHWA-RD-89-043)



รูปที่ 2.9 แรงต้านจากดินเชิงรับ (แรงแบกทาน) ที่กระทำบนผิววัสดุเสริมแรง (FHWA-RD-89-043)

2.2 หลักการออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรง

การวิเคราะห์ออกแบบกำแพงกันดินจะเป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพซึ่งสามารถใช้วิธีการวิเคราะห์สมดุลขีดจำกัด (limit equilibrium analysis) เพื่อหาค่าเสถียรภาพภายนอก เสถียรภาพภายใน และเสถียรภาพโดยรวม นอกจากนี้ยังรวมถึงค่าการเคลื่อนตัวด้านข้าง (lateral displacement) ดังรายละเอียดใน 2.2.1 โดยอธิบายเพิ่มเติมถึงรูปแบบการวิบัติใน 2.2.2 และระบุค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (factor of safety หรือ FS) ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ ใน 2.2.3 ค่าประมาณการเคลื่อนตัว (displacement) ใน 2.2.4 รายละเอียดเพิ่มเติมของวงวิบัติวิกฤตภายใน (critical slip surface) ของกำแพงกันดินเสริมแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

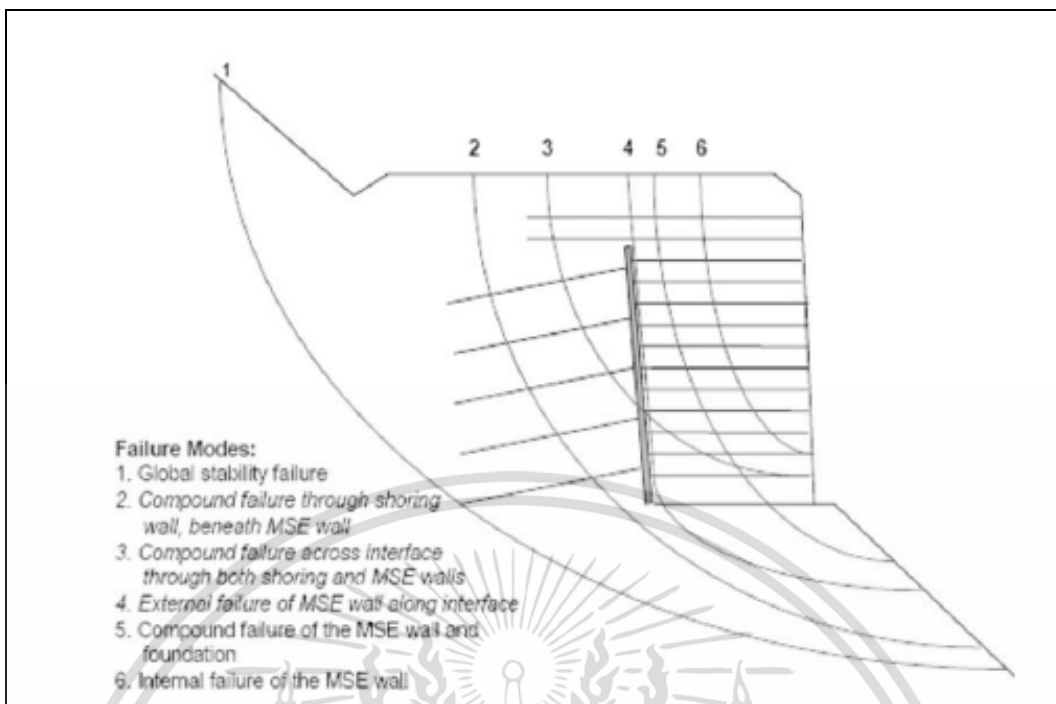
2.2.1 การวิเคราะห์ออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรง

การวิเคราะห์ออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรงจะวิเคราะห์สามด้านคือ การวิเคราะห์ความเค้นใช้งาน (working stress analysis) การวิเคราะห์สมดุลขีดจำกัด (limit equilibrium analysis) และการวิเคราะห์การเสียรูป (deformation) หรือการวิเคราะห์การตอบสนองเคลื่อนตัว (displacement response analysis) ซึ่งการวิเคราะห์ความเค้นใช้งาน (working stress analysis) จะพิจารณาเสถียรภาพของวัสดุเสริมกำลังแต่ละชั้นเป็นหลัก รวมถึงการประมาณค่าการเคลื่อนตัวแนวตั้ง (vertical displacement) และการเคลื่อนตัวแนวราบ (horizontal displacement) ส่วนการวิเคราะห์สมดุลขีดจำกัด (limit equilibrium analysis) จะเป็นการตรวจสอบเสถียรภาพทั่วไป (overall stability) ซึ่งเป็นทวงเส้นไถล (slip surface) หรือระนาบวิบัติ (failure plane) ซึ่งอาจจะอยู่ ภายใน (internal) ภายนอก (external) หรือรวมกัน (combined) ที่บางส่วนของวงวิบัติอยู่ ภายนอกและบางส่วนของวงวิบัติอยู่ภายใน ส่วนการตอบสนองเคลื่อนตัว (displacement response analysis) จะพิจารณาทำนายค่าการเคลื่อนตัวด้านข้าง (lateral displacement) ที่กระทำไต่ยากและไม่แน่นอน (FHWA-RD-89-043 หน้า 30) และทำนายค่าการทรุดตัวแนวตั้งด้วย (vertical settlement) กล่าวโดยสรุปคือ หลักการออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรงจะเกี่ยวข้องกับ การวิเคราะห์เสถียรภาพภายนอก (external stability) การวิเคราะห์เสถียรภาพภายใน (internal stability) การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยรวม (global stability) และค่าการเคลื่อนตัวด้านข้าง (lateral displacement)

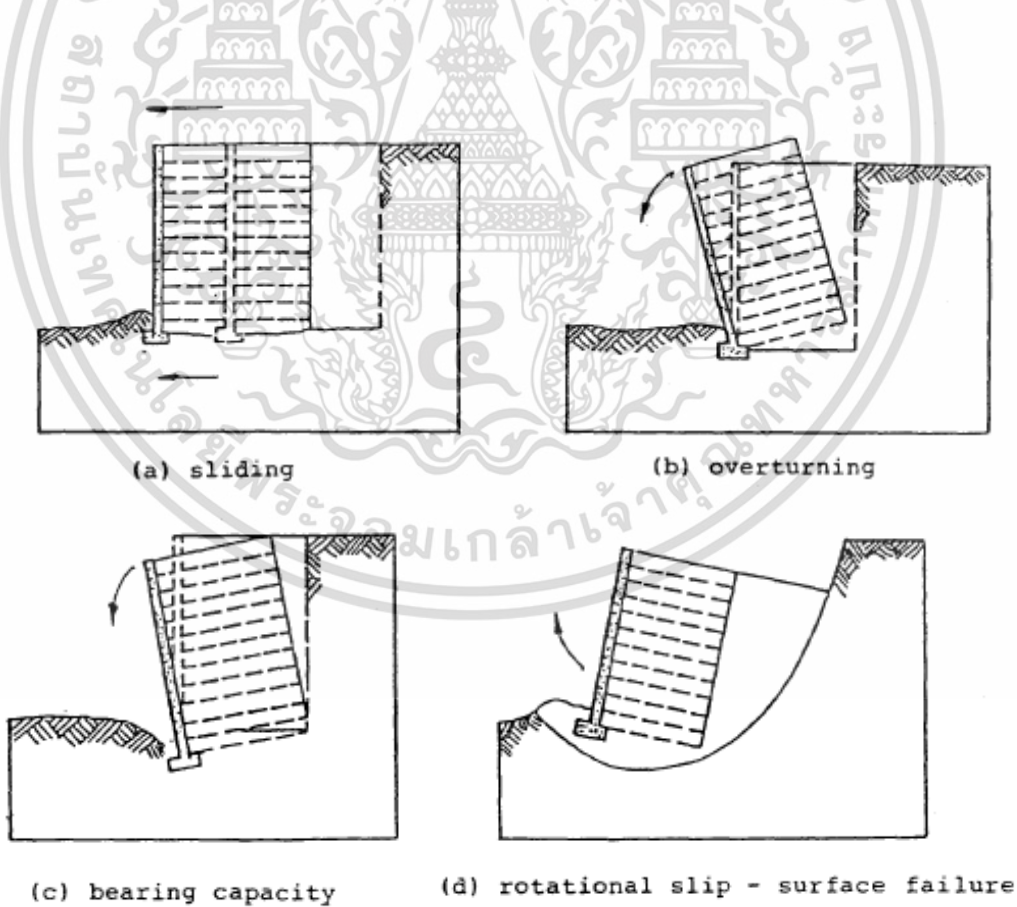
2.2.2 รูปแบบการวิบัติ

รูปแบบการวิบัติ (failure modes) ของระบบกำแพงกันดินเสริมแรงสามารถแยกได้เป็น 3 กรณีตามทวงเส้นไถล (slip surface) ที่อยู่ภายนอก (external) ภายใน (internal) หรือรวมกัน (combined) ของระบบกำแพงกันดินเสริมแรง ดังแสดงในรูปที่ 2.10 วงวิบัติภายใน (internal failure surface) เกิดจากการที่วัสดุเสริมกำลังฉีกขาด (rupture) เนื่องจากแรงดึง หรือวัสดุเสริมกำลังรูดออกจากดินเนื่องจากแรงเสียดทาน (friction) รวมกับแรงต้านเชิงรับ (passive resistance) ไม่สามารถต้านทานแรงดึงออก (pull out force) ได้ วงวิบัติภายนอก (external failure surface) จะเกิดจากการการเลื่อนไถล (sliding) การหมุนคว่ำ (overturning) และการแบกทาน (bearing capacity) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ส่วนวงวิบัติรวมกัน (combined failure surface) อาจเป็นวงวิบัติที่ บางส่วนของวงวิบัติอยู่ภายในและบางส่วนอยู่ภายนอกในระบบกำแพงกันดินเสริมแรง หรือวงวิบัติ ทั้งหมดอยู่ด้านนอกระบบกำแพงกันดินเสริมแรง จนเกิดการลื่นหมุน (rotational slip - surface failure หรือ deep seated) ดังแสดงในรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 วงรีบัตินอก ภายใน หรือ โดยรวม (FHWA-NHI-10-024)



รูปที่ 2.11 รูปแบบการวิบัติของกำแพงกันดินเสริมแรง (FHWA-RD-89-043)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพ

การวิเคราะห์เสถียรภาพ (stability analysis) เป็นการตรวจสอบวงวิบัติ (failure surface) ด้านเสถียรภาพภายนอก (external stability) เสถียรภาพภายใน (internal stability) และเสถียรภาพโดยรวม (global stability) และกำหนดค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (factor of safety, FS) โดยมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยจาก FHWA-NHI-00-043 แสดงดังรูปที่ 2.12

Recommended minimum factors of safety with respect to failure modes are as follows:	
! External Stability	
Sliding	: F.S. \geq 1.5 (MSEW); 1.3 (RSS)
Eccentricity e , at Base	: $\leq L/6$ in soil $L/4$ in rock
Bearing Capacity	: F.S. \geq 2.5
Deep Seated Stability	: F.S. \geq 1.3
Compound Stability	: F.S. \geq 1.3
Seismic Stability	: F.S. \geq 75% of static F.S. (All failure modes)
! Internal Stability	
Pullout Resistance	: F.S. \geq 1.5 (MSEW and RSS)
Internal Stability for RSS	: F.S. \geq 1.3
Allowable Tensile Strength	
for steel strip reinforcement	: $0.55 F_y$
for steel grid reinforcement:	$0.48 F_y$ (connected to concrete panels or blocks)
for geosynthetic reinforcements	: T_a - See design life, below

รูปที่ 2.12 อัตราส่วนความปลอดภัยในการออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรง (FHWA-NHI-00-043)

โดยในด้านเสถียรภาพภายนอกจะพิจารณา MSE wall เสมือนเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (rigid body) เช่นเป็นกำแพงกันดินคอนกรีต จะพิจารณาด้านการลื่นไถล (sliding) การหมุนคว่ำ (overturning) และการแบกทาน (bearing capacity) เสถียรภาพภายในจะพิจารณาด้านการฉีกขาด (rupture) ของวัสดุเสริมกำลัง (reinforcing elements) และการดึงออก (pullout) ของวัสดุเสริมกำลังรูดหลุดออกจากดิน ด้านเสถียรภาพโดยรวม จะเกี่ยวข้องกับเสถียรภาพเชิงลาด (slope stability) โดยจะเป็นการหาวงวิบัติวิกฤต (critical slip surface) ซึ่งเป็นวงวิบัติที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่น้อยที่สุดซึ่งอาจจะอยู่ในหรือภายนอกหรือบางส่วนของ MSE wall

สำหรับ modular block wall ที่ใช้ตาข่ายเสริมกำลัง (geogrid) เป็นวัสดุเสริมกำลังค่า อัตราส่วนความปลอดภัย (FS) เป็นดังนี้

เสถียรภาพภายนอก

- การลื่นไถล (sliding) ($FS \geq 1.5$)
- การหมุนคว่ำ (overturning) (ระยะเอียงศูนย์กลาง $e \leq L/6$)

โดยที่ L คือความยาววัสดุเสริมกำลัง

- การแบกทาน (bearing capacity) ($FS \geq 2.5$)

เสถียรภาพภายใน

- การฉีกขาด (rupture) ($T_{max} \leq T_a$)
- การดึงออก (pullout) ($FS \geq 1.5$)

โดยที่ T_{max} คือ maximum tensile force

T_a คือ allowable tension ของวัสดุเสริมกำลัง

เสถียรภาพโดยรวม ($FS = 1.3$)

2.2.4 ค่าการเคลื่อนตัว

ค่าการเคลื่อนตัว (displacement) สามารถทำนายได้จากการเทียบเคียงกับค่าจากการเก็บ ข้อมูลจากมาตรฐาน FHWA-NHI-00-043 แสดงดังรูปที่ 2.13

โดยค่าการเคลื่อนตัวจากรูปที่ 2.13 เป็นค่าที่ได้จากการวัดจริงจาก FHWA-NHI-00-043 จาก กำแพงกันดินเสริมแรงสูง 6 เมตร ที่น้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน (surcharge load) ที่ 20 kPa และจะ ประมาณเพิ่มขึ้น 25 เปอร์เซ็นต์ต่อกำลัง surcharge ที่เพิ่มขึ้น 20 kPa โดยที่

$$\delta_{T_{max}} = \delta_R H / 250 \quad \text{สำหรับวัสดุเสริมกำลังแบบ inextensible} \quad (2.1)$$

$$\delta_{T_{max}} = \delta_R H / 75 \quad \text{สำหรับวัสดุเสริมกำลังแบบ extensible} \quad (2.2)$$

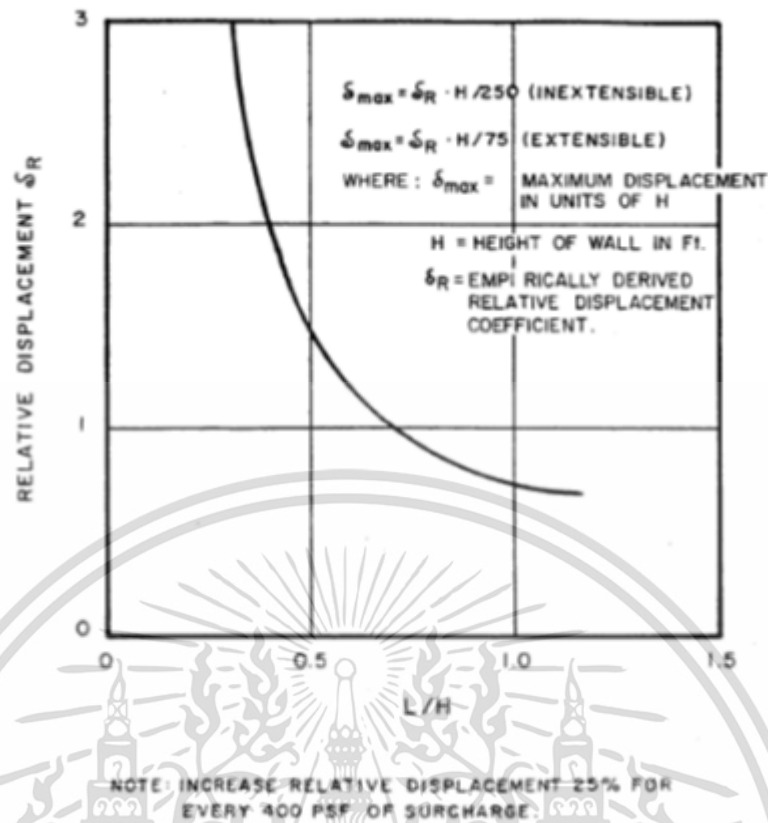
โดยที่

$\delta_{T_{max}}$ คือ ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุด (maximum displacement) หน่วยเป็นเมตร (m)

δ_R คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนตัว ได้จากกราฟในรูปที่ 2.13

H คือ ความสูงของกำแพงกันดินเสริมแรง หน่วยเป็นเมตร (m)

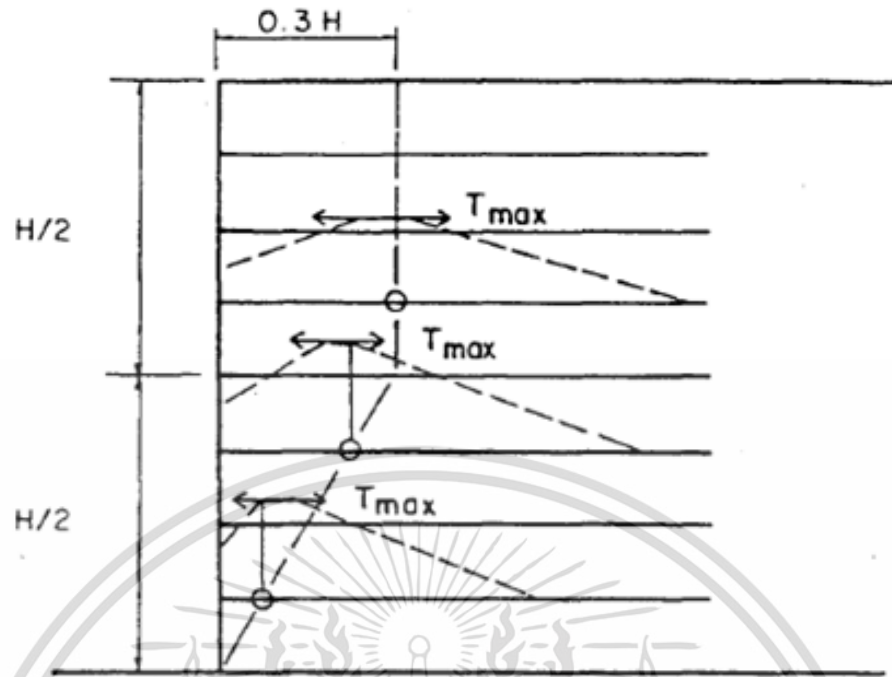
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



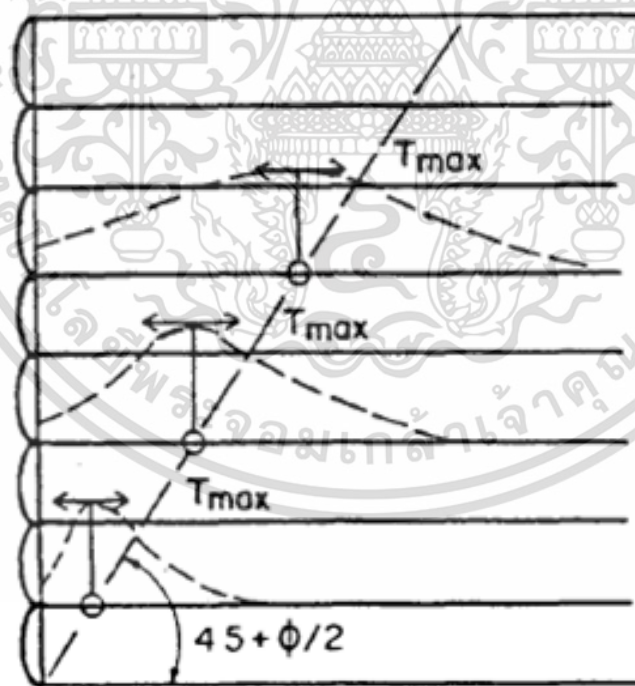
รูปที่ 2.13 ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงกันดินเสริมแรง (FHWA-RD-89-043)

2.2.5 วงวิบัติวิกฤตภายในของกำแพงกันดินเสริมแรง

วงวิบัติวิกฤต (critical slip surface) ภายในของกำแพงกันดินเสริมแรงเป็นวงวิบัติที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่น้อยที่สุดที่อยู่ภายใน MSE wall ซึ่งจะเป็นแนวที่มีค่าแรงดึงสูงสุด (maximum tensile force หรือ T_{max}) ที่จะกำหนดให้เป็นแนววงวิบัติสมมุติ (assumed failure surface) ที่เป็นเส้นประ ซึ่งรวมถึง MSEW แบบไม่ยืดตัว (inextensible) เช่น segmental precast concrete panel ที่ใช้แถบเหล็ก (metallic strip) เป็นวัสดุเสริมกำลัง แสดงดังรูปที่ 2.14 และ MSEW แบบ modular block wall (MBW) ที่ใช้ตาข่ายเสริมแรง (geogrid) เป็นวัสดุเสริมกำลัง แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 แนวค่าแรงดึงสูงสุดของวัสดุเสริมแรงเป็นแบบไม่ยึดตัว (FHWA-RD-89-043)



รูปที่ 2.15 แนวค่าแรงดึงสูงสุดของวัสดุเสริมแรงเป็นแบบยึดตัว (FHWA-RD-89-043)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าแรงดึงสูงสุดในวัสดุเสริมกำลังแต่ละชั้น (maximum tensile force หรือ Tmax) แสดงดังรูปที่ 2.16 ซึ่งเท่ากับค่าความเค้นของดินในแนวราบ หรือ

$$T_{max} = \sigma_h S_v S_H = K \sigma_v S_v S_H \tag{2.3}$$

โดยที่

Tmax คือ ค่าแรงดึงสูงสุดในวัสดุเสริมกำลัง หน่วยเป็นกิโลนิวตัน (kN)

σ_h คือ ค่าความเค้นแนวราบ หน่วยเป็นกิโลนิวตันต่อตารางเมตร (kN/m²) หรือกิโลปาสคาล (kPa)

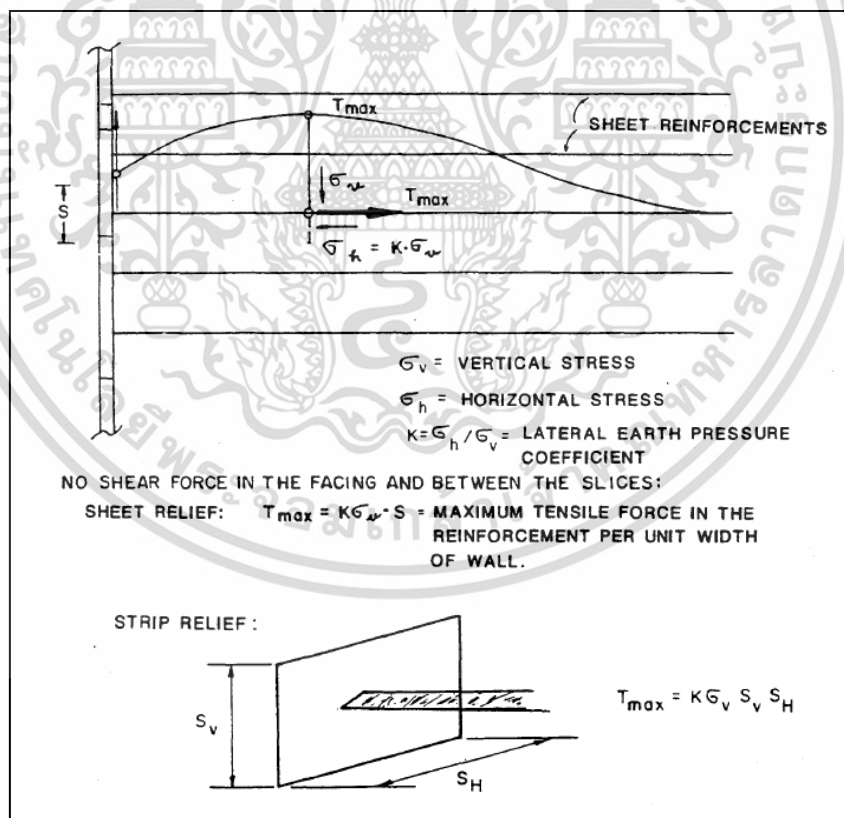
σ_v คือ ค่าความเค้นแนวตั้ง หน่วยเป็นกิโลนิวตันต่อตารางเมตร (kN/m²) หรือกิโลปาสคาล (kPa)

S_v คือ ระยะแนวตั้งระหว่างชั้นของวัสดุเสริมแรง (vertical spacing) หน่วยเป็นเมตร (m)

S_H คือ ระยะแนวราบกรณีเป็นแถบเหล็ก (horizontal spacing) หน่วยเป็นเมตร (m)

K คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง (lateral earth pressure coefficient)

โดยที่ $K = \sigma_h / \sigma_v$ (2.4)



รูปที่ 2.16 ค่าแรงดึงสูงสุด (maximum tensile force หรือ Tmax) (FHWA-RD-89-043)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

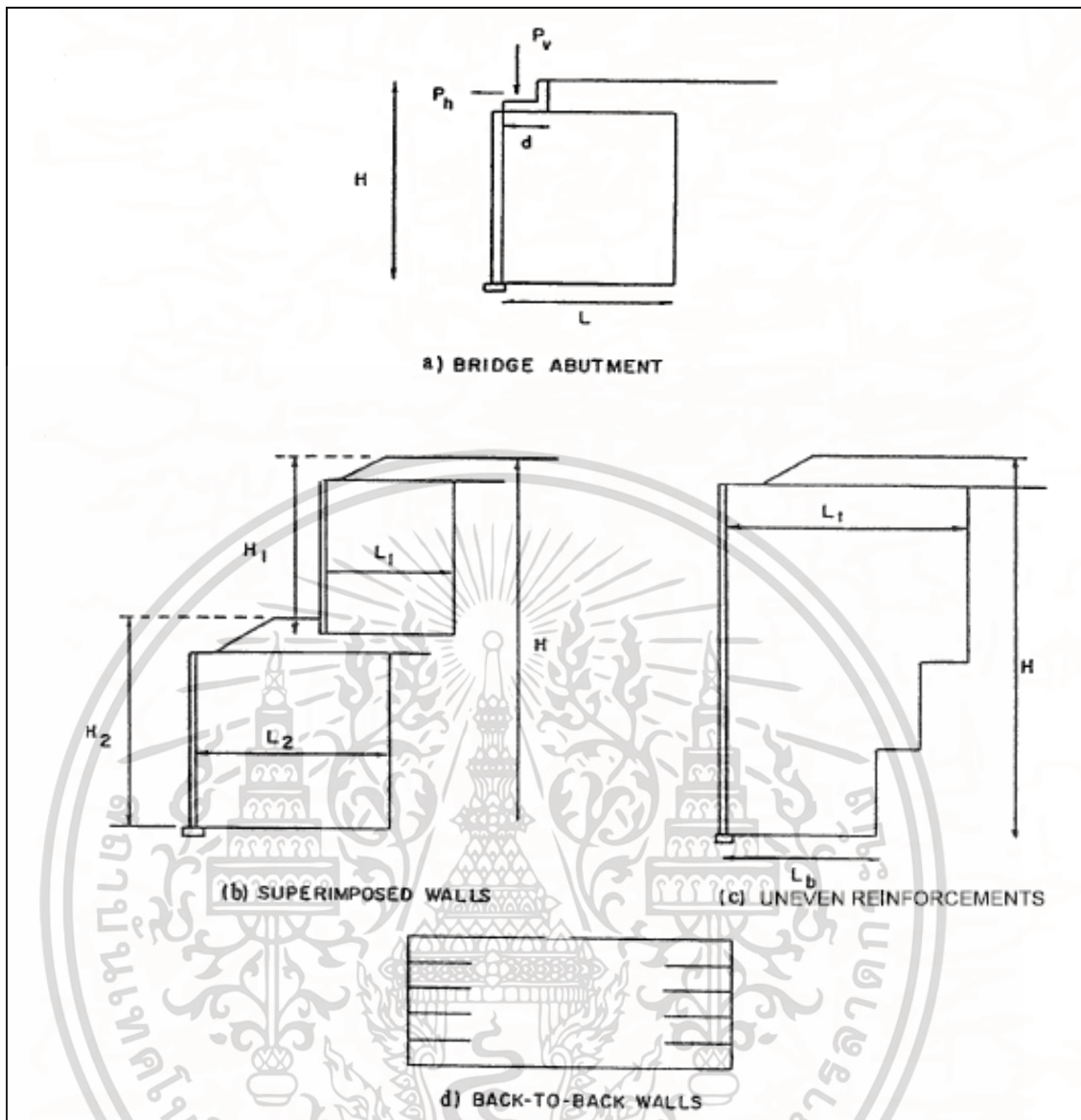
2.3 กำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านและกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน

ในการออกแบบใช้งานจริง จะไม่ใช่เพียงกำแพงกันดินเสริมแรงชั้นเดียวด้านเดียว แต่จะมีการออกแบบเป็นการกำแพงกันดินเสริมแรงที่มีรูปทรงซับซ้อน (complex geometrics) ตามข้อกำหนดของสภาพพื้นที่จริงหรือสภาพการใช้งานจริง ซึ่งมีหลายประเภท เช่นจาก FHWA-NHI-00-043 ให้ไว้ 4 ประเภทดังรายละเอียดใน 2.3.1 แต่มีรายละเอียดการคำนวณที่ไม่ชัดเจนในส่วนของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน ดังรายละเอียดใน 2.3.2 และไม่สามารถหาค่าเสถียรภาพโดยรวมในส่วนของกำแพงกันดินแบบสองด้านได้ ดังที่ระบุใน 2.3.3

2.3.1 กำแพงกันดินเสริมแรงที่มีรูปทรงซับซ้อน

มาตรฐาน FHWA-NHI-00-043 ให้ตัวอย่างกำแพงกันดินเสริมแรงจะมีรูปทรงซับซ้อน (complex geometrics) ไว้ 4 ประเภทคือกำแพงกันดินเสริมแรงที่เป็นส่วนของตอม่อดัดบริมของคอสพาน (bridge abutment) กำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน (superimposed walls) กำแพงกันดินเสริมแรงที่วัสดุเสริมแรงมีความยาวไม่เท่ากัน (uneven reinforcements) และกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน (back-to-back walls) ดังแสดงในรูปที่ 2.17

FHWA-NHI-00-043 ให้รายละเอียดในส่วนของ bridge abutment ไว้จำนวน 4 หน้า จากหน้า 171 ถึงหน้า 174 กำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน จำนวน 2 หน้าจากหน้า 175 ถึงหน้า 176 กำแพงกันดินเสริมแรงที่วัสดุเสริมแรงมีความยาวไม่เท่ากัน (uneven reinforcements) จำนวน 1 หน้า ในหน้า 177 และกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน จำนวน 2 หน้า ในหน้า 176 ถึงหน้า 177



รูปที่ 2.17 กำแพงกันดินเสริมแรงจะมีรูปทรงซับซ้อน (FHWA-NHI-00-043)

FHWA-NHI-00-043 ได้ให้ตัวอย่างการคำนวณออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรงในส่วนของตอม่อตบริมของคอสสะพาน (bridge abutments) ใว้อย่างละเอียดจำนวน 8 หน้า จากหน้า 181 ถึงหน้า 188 การออกแบบ bridge abutments จึงไม่อยู่ในขอบเขตของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขณะที่กำแพงกันดินเสริมแรงที่วัสดุเสริมแรงมีความยาวไม่เท่ากัน (uneven reinforcements) สามารถคำนวณโดยใช้ความยาวเฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ 2.18 ที่แสดงข้อความทั้งหมดจาก FHWA-NHI-00-043 หน้า 177

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 WALLS WITH UNEVEN REINFORCEMENT LENGTHS

Use of this type of reinforcement geometry should be considered only if the base of the MSE structure is in rock or *competent foundation soil* (foundation materials which will exhibit minimal post construction settlements).

The design of these walls requires two analyses:

- (1) A design using simplified design rules for determining external stability.
- (2) A global stability analysis, performed using a reinforced soil stability program.

Simplified design rules for these structures are as follows:

- ! The wall is represented by a rectangular block (L_w, H) having the same total height and the same cross-sectional area as the trapezoidal section for external stability calculations. See figure 49.
- ! The maximum tensile force line is the same as in rectangular walls (bilinear or linear according to the extensibility of the reinforcements).
- ! Minimum base length (L_w) $>$ $0.4 H$, with the difference in length in each zones being less than $0.15 H$.
- ! For internal stability calculations, the wall is divided in rectangular sections and for each section the appropriate L (L_1, L_2, L_3), is used for pullout calculations, using methods developed in chapter 4.

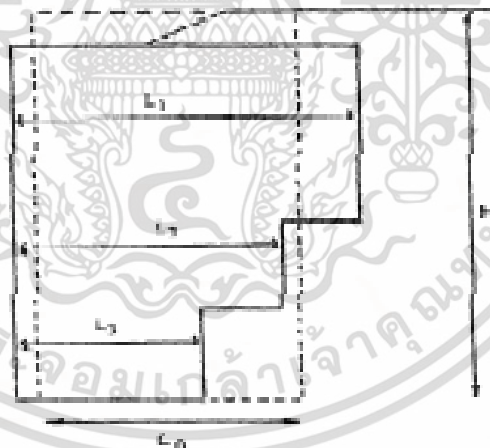
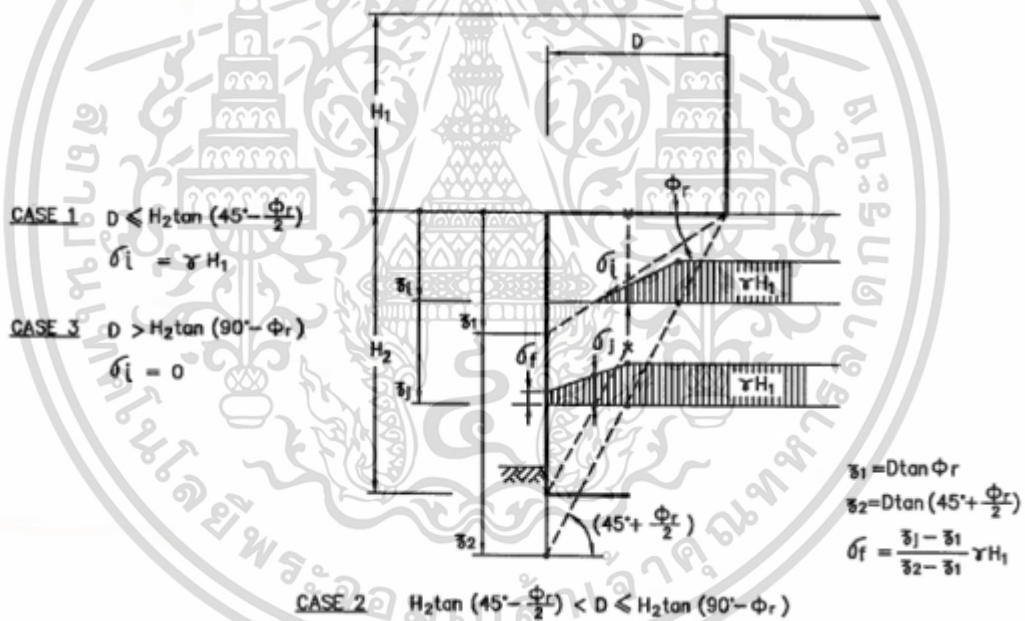


Figure 49. Dimensioning a MSE wall with uneven reinforcement lengths.

ในส่วนของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน (back-to-back walls) ผลจากการวิเคราะห์เสถียรภาพจาก Han Jie, Leshchinsky Dov. 2010. และที่จะแสดงในบทที่ 3 แสดงให้เห็นว่าวิธีสมดุลขีดจำกัด (limit equilibrium หรือ LEM) ไม่สามารถตรวจสอบเสถียรภาพโดยรวม (global stability) ของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านได้ และจำเป็นต้องใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method หรือ FEM) ในการตรวจสอบเสถียรภาพโดยรวมดังที่กล่าวโดย ซึ่งในบทที่ 3 จะแสดงให้เห็นข้อจำกัดและแสดงตัวอย่างการหาเสถียรภาพโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านนี้

นอกจากนี้ ในส่วนของกำแพงกันดินแบบซ้อนทับกัน (superimposed walls) มาตรฐาน FHWA-NHI-00-043 ให้เพียงสูตรคำนวณของค่าหน่วยแรงเพิ่มเติมจากกำแพงชั้นบน (additional vertical stress หรือ σ_f) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 โดยไม่ให้อธิบายรายละเอียด ซึ่งก่อให้เกิดความเข้าใจผิดในการคำนวณและสามารถก่อให้เกิดความเสียหายได้



รูปที่ 2.19 สูตรคำนวณค่าหน่วยแรงเพิ่มเติมจากกำแพงชั้นบน (FHWA-NHI-00-043)

2.3.2 รายละเอียดของกำแพงกันดินแบบสองด้านและแบบซ้อนทับกันใน FHWA-NHI-00-043

ในส่วนนี้ จะแสดงให้เห็นรายละเอียดที่จำกัดของ FHWA-NHI-00-043 ในส่วนของการคำนวณออกแบบกำแพงกันดินแบบสองด้านและกำแพงกันดินแบบซ้อนทับกัน โดยในการคำนวณออกแบบกำแพงกันดินแบบสองด้าน แสดงข้อความทั้งหมดจาก FHWA-NHI-00-043 หน้า 178 ในรูปที่ 2.20 และหน้า 179 ในรูปที่ 2.21 ส่วนในการคำนวณออกแบบกำแพงกันดินแบบซ้อนทับกัน แสดง FHWA-NHI-00-043 หน้า 175 ในรูปที่ 2.22 และหน้า 176 และ รูปที่ 2.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นจำเป็นต้องใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 BACK-TO-BACK WALLS

For walls which are built back-to-back as shown in figure 50, a modified value of backfill thrust influences the external stability calculations. As indicated in figure 50, two cases can be considered.

- ! For Case I, the overall base width is large enough so that each wall behaves and can be designed independently. In particular, there is no overlapping of the reinforcements. Theoretically, if the distance, D , between the two walls is shorter than:

$$D = H_1 \tan(45^\circ - \phi/2) \quad (55)$$

then the active wedges at the back of each wall cannot fully spread out and the active thrust is reduced. However, it is assumed that for values of:

$$D > H_1 \tan(45^\circ - \phi/2) = 0.5 H_1 \quad (56)$$

full active thrust is mobilized.

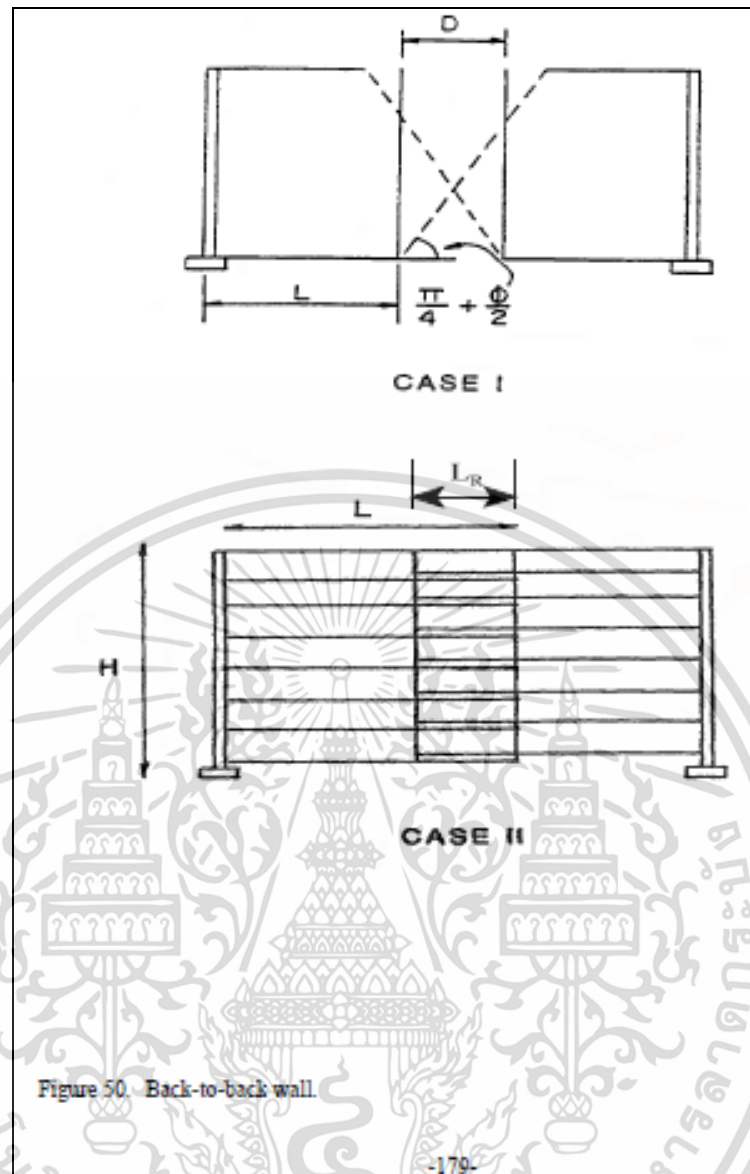
- ! For Case II, there is an overlapping of the reinforcements such that the two walls interact. When the overlap, L_o , is greater than $0.3 H_1$, where H_1 is the shorter of the parallel walls, no active earth thrust from the backfill needs to be considered for external stability calculations. For intermediate geometries between Case I and Case II, the active earth thrust may be linearly interpolated from the full active case to zero. For Case II geometries with overlaps greater than $0.3 H_1$, L/H ratios for each wall as low as 0.6 may be considered.

Considering this case, designers might be tempted to use single reinforcements connected to both wall facings. This alternative completely changes the strain patterns in the structure and results in higher reinforcement tensions such that the design method in this manual is no longer applicable. In addition, difficulties in maintaining wall alignment could be encountered during construction, especially when the walls are not in a tangent section.

Based on a performance review, back-to-back walls with overlapping reinforcements may be designed for static load conditions with a distance between parallel facing as low as $L/H = 0.6$, where H is the height of each wall, and for conditions where the seismic horizontal accelerations at the foundation level is less than $0.05g$. For walls in more seismically active areas (up to $0.19g$) a distance of $1.1H_1$ is presently recommended. For walls subjected to significant seismic loading (up to $0.40g$) successful performance has been observed when the distance between parallel facings was at least $1.2H_1$.

Justification of narrower back-to-back distances ($\approx 1.1H_1$) between faces in seismically active areas require a more detailed analysis be performed to include effects of potential non-uniform distribution of seismic and inertial forces within the wall, as suggested by numerical studies and not provided for in the present design methodology.

รูปที่ 2.20 FHWA-NHI-00-043 หน้า 178 สำหรับ back-to-back walls



รูปที่ 2.21 FHWA-NHI-00-043 หน้า 179 สำหรับ back-to-back walls

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 SUPERIMPOSED WALLS

The design of superimposed MSE walls is made in two steps:

- (1) A design using simplified design rules for calculating external stability and locating the internal failure plane for internal stability as shown in figure 48.
- (2) A stability analysis, including both compound and global stability using a reinforced soil global stability computer program outlined in chapter 6. This is an essential computation.

For preliminary design, the following minimum values for reinforcement length, of L_1 and L_2 , should be used for offsets (D) greater than $[1/20 (H_1 + H_2)]$:

Upper wall: $L'_1 > 0.7 H_1$

Lower wall: $L'_2 > 0.6 H$

where H = total height

Where the offset distance (D) is greater than $H_1 \tan (90-\phi_1)$, walls are not considered superimposed and are independently designed.

For a small upper wall offset; $D < [1/20 (H_1 + H_2)]$, it is assumed that the failure surface does not fundamentally change and it is simply adjusted laterally by the offset distance D . The walls should be designed as a single wall with a height H .

External stability calculations for the upper wall are conventionally performed as outlined in chapter 4. For the lower wall, consider the upper wall as a surcharge in computing bearing pressures. In lieu of a conventional external sliding stability computation, perform a slope stability analysis with failure circles exiting at the base. A minimum factor of safety of 1.5 is generally warranted.

For calculating the internal stability, the maximum tensile force lines are as indicated in figure 48a. These relationships are somewhat empirical and geometrically derived.

For intermediate offset distances, see figure 48a for the location of the failure surface and consider the vertical pressures in figure 48b for internal stress calculations.

For large setback distances, $[D > H_1 \tan (90-\phi_1)]$, the maximum tensile force lines are considered independently, without regard to the geometry of the two superimposed walls. For internal stability computations, the upper wall is neglected.

The balance of the computations remain identical as in chapter 4.

รูปที่ 2.22 FHWA-NHI-00-043 หน้า 175 สำหรับ superimposed walls

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

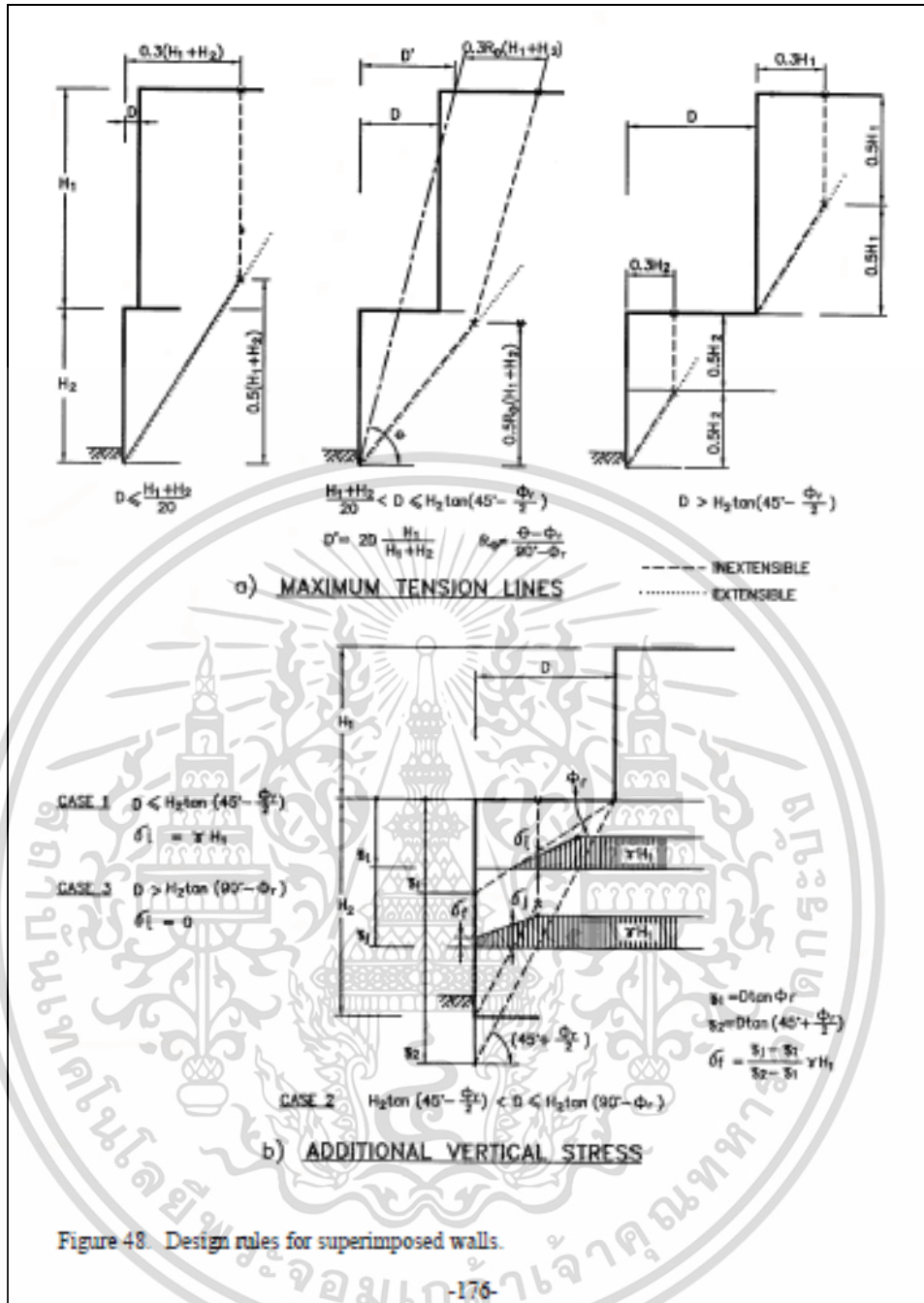


Figure 48. Design rules for superimposed walls.

รูปที่ 2.23 FHWA-NHI-00-043 หน้า 176 สำหรับ superimposed walls

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 สรุปบททวนวรรณกรรม

กำแพงกันดินเสริมแรงมีต้นทุนน้อยกว่ากำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็กในกรณีกำแพงกันดินมีความสูงมากกว่า 2 เมตร ตามรูปที่ 1.3 แต่มาตรฐานงานทาง (แบบมาตรฐานงานทาง. 2556.) และมาตรฐานงานสะพาน (แบบมาตรฐานงานสะพาน. 2556.) ของกรมทางหลวงชนบท ให้เฉพาะแบบมาตรฐานกำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็กที่สูงไม่เกิน 3.5 เมตรเท่านั้น นอกจากนี้กำแพงกันดินเสริมแรงแบบโมดูลาร์บล็อก (MBW) ที่ใช้ถ่ายเสริมแรงเป็นวัสดุเสริมแรง เริ่มมีการนำมาใช้มากขึ้น แทนกำแพงกันดินเสริมแรงแบบ segmental precast concrete panel ที่ใช้แผ่นคอนกรีตสำเร็จร่วมกับแถบเหล็กเป็นวัสดุเสริมแรง เนื่องจาก MBW มีต้นทุนที่น้อยกว่า segmental precast concrete panel

ขณะที่มาตรฐาน FHWA-NHI-00-043 เป็นมาตรฐานหลักในการออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรงชั้นเดียวด้านเดียว แต่ขาดตัวอย่างและรายละเอียดการคำนวณของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านและกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน

ในส่วนกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน ค่าเสถียรภาพโดยรวมจากวิธีสมมูลขีดจำกัด (LEM) ให้ค่าที่ไม่ถูกต้องเมื่อในการระบุค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของค่าเสถียรภาพโดยรวม และจำเป็นต้องตรวจสอบค่าเสถียรภาพโดยรวมโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) Han Jie, Leshchinsky Dov. 2010.) แต่ Han Jie, Leshchinsky Dov. 2010. มิได้ให้ค่าพารามิเตอร์โดยเฉพาะค่า stiffness ของถ่ายเสริมแรงที่จำเป็นต่อการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อใช้ระบุค่าเสถียรภาพโดยรวมด้วยโดย FEM แทนการใช้ LEM สำหรับงานกำแพงกันดินเสริมแรงแบบ MBW ส่วนงานวิจัยอื่นเช่น พิทักษ์ชน ทันมั่ง, วีรยา นิมอ้อย. 2559. เป็นการเปรียบเทียบ FEM กับ LEM ในงานคันดิน ส่วน วารุณี กะการดี, สุทธิศักดิ์ ศรีลัมภ์, รัฐธรรม อิศโรฬาร. 2556. เป็นการเปรียบเทียบ FEM กับ LEM ในงานเสถียรภาพลาดงานขุด

ในกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน แม้มาตรฐาน FHWA-NHI-00-043 จะขาดรายละเอียดการคำนวณออกแบบ แต่มาตรฐาน FHWA/TX-05/0-4485-1 ให้รายละเอียดการคำนวณในส่วนเสถียรภาพภายใน แต่มีรายการคำนวณในส่วนเสถียรภาพภายนอกที่ไม่ครบถ้วน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมุ่งให้ตัวอย่างและรายละเอียดการคำนวณของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านในบทที่ 3 และกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน ในบทที่ 4 และเพิ่มเติมส่วนวิเคราะห์ของเสถียรภาพโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านในกรณีที่กำหนดความยาวตาข่ายเสริมแรงเป็น 0.6 เท่าของความสูงตาม FHWA-NHI-00-043 และข้อควรระวังในการกำหนดระยะเยื้องระหว่างกำแพงชั้นบนและกำแพงชั้นล่างของกำแพงกันดินแบบซ้อนทับกันในบทที่ 5

บทที่ 3

กำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน

บทนี้แสดงส่วนออกแบบและวิเคราะห์กำแพงกันดินเสริมแรง (mechanically stabilized earth wall หรือ MSE wall หรือ MSEW) แบบสองด้าน หรือที่เรียกว่า back-to-back walls ที่เป็นแบบ modular block wall หรือ MBW ที่ใช้อิฐสำเร็จโมดูลาร์บล็อกเป็นวัสดุผิวหน้า (facing) ร่วมกับวัสดุเสริมแรง (reinforcement) ประเภทตาข่ายเสริมแรง (geogrid) โดยระบุเกณฑ์การออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านใน 3.1 ใน 3.2 ระบุตัวอย่างการคำนวณออกแบบและวิเคราะห์ของโครงการกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านเฉพาะรูปตัดที่มีความสูง 12 เมตร ที่ใช้ในส่วนคอสะพาน (embankment) ของถนนกว้าง 15 เมตร ถึงแม้เป็นกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านแบบไม่อิสระ ก็มีความจำเป็นต้องออกแบบเป็นกำแพงกันดินอิสระก่อน โดยจะแสดงส่วนของการตรวจสอบเสถียรภาพแบบกำแพงอิสระด้านเดียวใน 3.3 ที่รวมทั้งเสถียรภาพภายใน เสถียรภาพภายนอก และเสถียรภาพโดยรวมโดยใช้วิธีสมดุลขีดจำกัด (limit equilibrium method หรือ LEM -3.4 ระบุถึงข้อจำกัดของวิธีสมดุลขีดจำกัดซึ่งสามารถแก้ไขโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method หรือ FEM) แสดงใน 3.5 และสรุปผลใน 3.6

3.1 เกณฑ์การออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน

กำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน (back-to-back walls) นิยมใช้ในการสร้างเขื่อนกันดินถม (earth embankment) สำหรับทางขึ้นสะพานหรือคอสะพาน (bridge approaching slab) ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวจะมีความกว้างที่จำกัด และต้องการกำแพงกันดินเสริมแรงทั้งสองด้านแบบ back-to-back walls ซึ่งมาตรฐาน FHWA-NHI-00-043 ที่เหมือนกับ FHWA-NHI-10-024 ให้แนวทางการออกแบบอยู่ในหน้า 178 (รูปที่ 2.20) และ หน้า 179 (รูปที่ 2.21) และแสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งสามารถสรุปได้คือ

$$\text{กรณีที่ 1) } D \geq H \tan(45^\circ - \phi/2) \approx 0.5H \quad (3.1)$$

โดยที่ D คือระยะห่างระหว่างวัสดุเสริมกำลังของกำแพงกันดินเสริมแรงทั้งสองด้าน

กรณีนี้ กำแพงกันดินทั้งสองด้านสามารถพิจารณาเป็นกำแพงอิสระแยกจากกันตามปกติ ที่แต่ละด้านรับแรงดันดินเต็ม ด้วยความยาววัสดุเสริมแรง (reinforcement length, L) ที่

$$0.7 \leq L/H \leq 1.2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

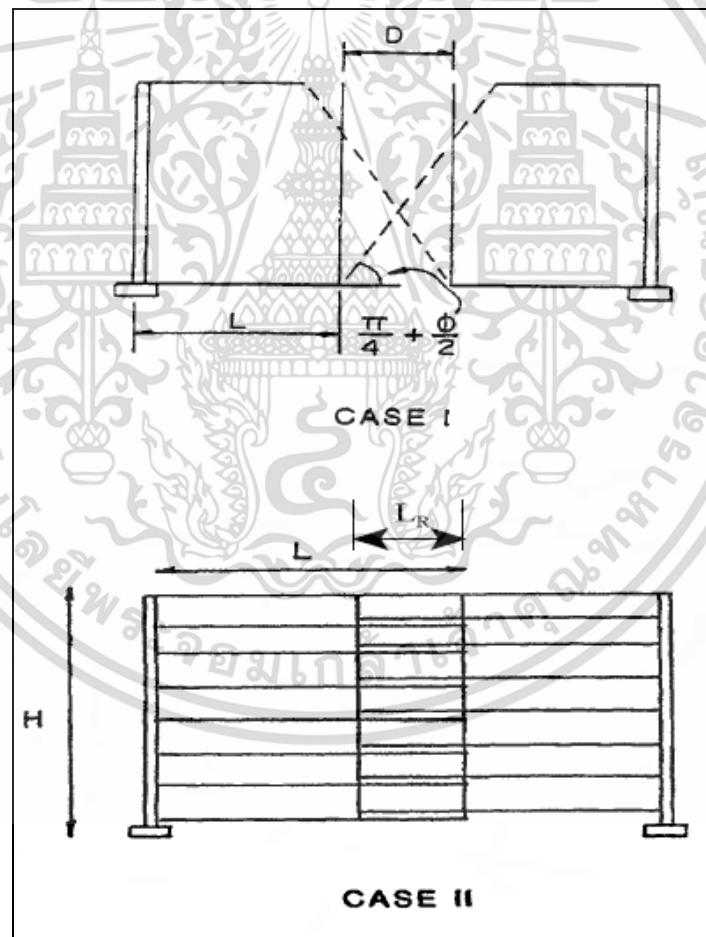
$$\text{กรณีที่ 2) } L_R \geq 0.3H_2 \quad (3.2)$$

โดยที่ L_R คือความยาววัสดุเสริมแรงส่วนที่ซ้อนกัน (overlap reinforcement)

H_2 คือความสูงที่น้อยสุดของกำแพงทั้งสองด้าน ในกรณีนี้จะไม่คิดแรงดันดินเดิม โดยความยาววัสดุเสริมแรง (reinforcement length, L) อาจลดลงเหลือ $L/H = 0.6$

$$\text{กรณีที่ 3) } L_R < 0.3H_2 \text{ ถึง } D < H_1 \tan(45^\circ - \phi/2) \quad (3.3)$$

ซึ่งกรณีที่ 3 อยู่ระหว่างกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 และในกรณีนี้แรงดันดินหลัง MSE wall จะลดทอนลงเป็นสัดส่วนเชิงเส้นตรง แสดงใน FHWA-NHI-00-043 Figure 50 หน้า 179 (รูปที่ 2.21)



รูปที่ 3.1 มาตรฐาน FHWA (หน้า 179) สำหรับ Back-to-back walls

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ตัวอย่างโครงการกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน

รายละเอียดของโครงการกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน (back-to-back walls) แสดงใน 3.2.1 โดยมีพารามิเตอร์ในการออกแบบใน 3.2.2 ส่วนใน 3.2.3 จะกำหนดความยาวเริ่มต้นในการออกแบบของตาข่ายเสริมแรง (geogrid) และตรวจสอบพบว่ากำแพงดังกล่าวเป็นกำแพงไม่อิสระ อย่างไรก็ตาม แม้เป็นกำแพงไม่อิสระ ก็มีความจำเป็นต้องตรวจสอบเสถียรภาพภายนอกและเสถียรภาพภายในแบบกำแพงอิสระ

3.2.1 รายละเอียดโครงการ

ตัวอย่างโครงการที่มีโครงสร้างกันดินแบบสองด้าน (back-to-back walls) เป็นทางหลวงเชื่อมระหว่างเมืองซึ่งเป็นถนนกว้าง 15 เมตรและส่วนคอสะพาน (embankment) เป็นกำแพงกันดินเสริมแรง (mechanically stabilized earth wall หรือ MSE wall) แบบ modular block wall (MBW) ที่มี facing unit เป็น อิฐสำเร็จโมดูลาร์บล็อก (modular block) ที่อิฐสำเร็จแต่ละก้อนมีความสูง 15 เซนติเมตร และมีความกว้าง (width หรือ W) 25 เซนติเมตร และเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมกำลังดินประเภทตาข่ายเสริมกำลัง (geogrid) โดย MSE wall จะมีความสูงไล่ระดับจาก 3 เมตรถึง 12 เมตร วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเสนอเฉพาะที่ความสูง 12 เมตร เพื่อแสดงให้เห็นตัวอย่างของกำแพงไม่อิสระ แต่จะเริ่มจากการออกแบบเป็นกำแพงอิสระก่อนเพื่อกำหนดความยาวตาข่ายเสริมแรง (geogrid) และระยะห่างระหว่างชั้นในแนวตั้ง (vertical spacing) สำหรับระดับน้ำใต้ดินกำหนดให้อยู่ที่ระดับ -13 เมตร

3.2.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ

น้ำหนักบรรทุก (surcharge load) กำหนดให้เท่ากับ $q = 20 \text{ kN/m}^2$ ซึ่งใกล้เคียงกับ Das Braja M. 2006. ที่กำหนดดังนี้

“Buildings on shallow foundations including mat foundation 10 kPa, Highways (live load) 20 kPa, Rural main roads (live loads) 15 kPa, Light traffic roads, footpaths (live loads) 5 kPa”.

ค่าพารามิเตอร์ของดินจะมีค่าความหนาแน่น (density, γ) , ความเชื่อมแน่น (cohesion, c) และมุมเสียดทานภายใน (internal friction angle, ϕ) แสดง ดังนี้

ดินถมหลังกำแพง (reinforced soil, backfill) มีค่า $\gamma_b = 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$, $c_b = 0.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$, $\phi_b = 32^\circ$

ดินเดิมหลังกำแพง (retained soil) มีค่า $\gamma_r = 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$, $c_r = 0.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$, $\phi_r = 28^\circ$

ดินฐานราก (foundation soil) มีค่า $\gamma_f = 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$, $c_f = 0.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$, $\phi_f = 30^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างเชิงรุก (active earth pressure coefficient หรือ K_a) เป็นไปตามทฤษฎีแรงดันดินของแรนคิน (Rankine earth pressure theory) (Bhudu 2011) ที่

$$K_a = \tan^2(45^\circ - \phi/2)$$

ดินถม (reinforced soil),

$$K_{ab} = \tan^2(45^\circ - \phi_b/2) = \tan^2(45^\circ - 32/2) = 0.307$$

ดินเดิม (retained soil) $K_{ar} = \tan^2(45^\circ - \phi_r/2) = \tan^2(45^\circ - 28/2) = 0.361$

3.2.3 ความยาวตามเงื่อนไขการออกแบบกำแพงอิสระ

กำแพงกันดินมีความสูง (H) 12 เมตร แต่ต้องฝังอิฐสำเร็จโมดูลาร์บล็อกหนึ่งก้อนมีความสูง 15 เซนติเมตร เพื่อเป็นระยะฝังใต้ผิวดิน (embedment) ตามการออกแบบ FHWA-NHI-00-043 วัสดุเสริมกำลังที่เป็นตาข่ายเสริมแรง (geogrid) ต้องมีความยาว L อย่างน้อย

$$L \geq 0.7(H) = (0.7)(12.15) = 8.505 \text{ กำหนดใช้ } L = 9 \text{ เมตร}$$

ขณะที่ $H \tan(45^\circ - \phi_b/2) = (12.15) \tan(45^\circ - \frac{32}{2}) = 6.735$ เมตร

Back-to-back walls นี้มีระยะ overlap (L_R) ดังนั้น ระยะห่างวัสดุเสริมแรง (D) = 0

โดยที่ $L_R = 9 + 9 - 15 = 3$ เมตร $\leq 0.3H = (0.3)(12.15) = 3.645$ เมตร

จึงจัดเป็นกรณีที่ 3 ที่เป็น superimposed ใน (3.2)

$$\text{ที่ } L_R \leq 0.3H, \text{ ถึง } D < H \tan(45^\circ - \phi/2)$$

จึงจัดเป็นกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน (superimposed wall) โดยที่แรงดันดินหลัง MSE wall จะลดทอนลงเป็นสัดส่วนเชิงเส้นตรง

Back-to-back walls จะเป็นแบบอิสระก็ต่อเมื่อ MSE wall มีความกว้างอย่างน้อย $9 + 6.735 + 9 = 24.735$ เมตร ดังนั้นกำแพงกันดินเสริมแรงกว้าง 15 เมตร จึงจะพิจารณาเป็นกำแพงไม่อิสระ

3.3 การตรวจสอบเสถียรภาพ

ส่วนนี้จะตรวจสอบเสถียรภาพ (stability checking) ในกรณีเป็นกำแพงอิสระ โดยเสนอค่าตรวจสอบตาม FHWA-NHI-00-043 และ FHWA-RD-89-043 ใน 3.3.1 โดย 3.3.2 เสนอค่าเสถียรภาพภายใน 3.3.3 เสนอค่าเสถียรภาพภายนอก และ 3.3.4 เสนอค่าเสถียรภาพโดยรวมที่วิเคราะห์หาค่าด้วยวิธีสมดุลขีดจำกัด (limit equilibrium method หรือ LEM)

3.3.1 ค่าเสถียรภาพกรณีเป็นกำแพงอิสระ

กรณีเป็นกำแพงอิสระ ค่าตรวจสอบเสถียรภาพ (stability checking) จากน้ำหนักบรรทุกแสดงดังรูปที่ 3.2 ตาม FHWA-NHI-00-043 โดยการกำหนดค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (factor of safety หรือ FS) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

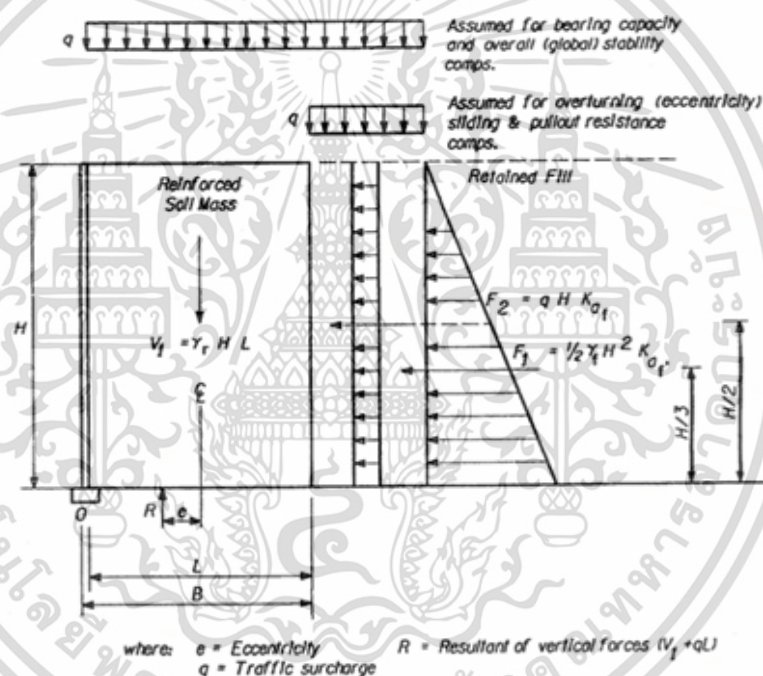
ตรวจสอบเสถียรภาพภายนอก (external stability) ของ MSE wall ในด้านเหล่านี้

- การไถล (sliding) ($FS \geq 1.5$)
- การหมุนพลิกคว่ำ (overturning) ($FS \geq 2.0$) (FHWA-RD-89-043 หน้า 86)
- ร่วมกับระยะเยื้อง (eccentricity หรือ e) ($e \leq L/6$)
- ที่ L คือความยาวของ geogrid
- กำลังแบกทานดินฐานราก (bearing capacity) ($FS \geq 2.5$)

ตรวจสอบเสถียรภาพภายใน (internal stability) ของตาข่ายเสริมแรงในด้านเหล่านี้

- การรูดออก (pullout) ($FS \geq 1.5$)
- การฉีกขาด (rupture) (แรงดึงสูงสุด $T_{max} \leq T_a$ แรงดึงที่ยอมให้ของ geogrid)

ตรวจสอบเสถียรภาพโดยรวม (global stability) ($FS \geq 1.3$)



รูปที่ 3.2 หน้าหนักกระทำ MSE wall loads (FHWA-NHI-00-043)

3.3.2 เสถียรภาพภายนอก

เสถียรภาพภายนอก (external stability) จะเป็นการตรวจสอบความมั่นคงในค่าการไถล (sliding) ระยะเยื้อง (eccentricity) ที่ตรวจสอบการหมุนคว่ำ (overturning) และค่ากำลังแบกทาน (bearing capacity) ของดินฐานราก ดังนี้

3.3.2.1 เสถียรภาพด้านการไถลแนวราบ (sliding stability)

น้ำหนักดินถม (vertical fill) $V_1 = \gamma_r H L = (18)(12.15)(9) = 1,968.3 \text{ kN/m}$

น้ำหนักบรรทุก (vertical surcharge) $V_2 = qL = (20)(9) = 180 \text{ kN/m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวทช.จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันดินเดิม (horizontal retained soil) $F_1 = \frac{1}{2} \gamma_r H^2 K_{ar} = 0.5(18)(12.15)^2(0.361) = 479.7$
kN/m

แรงดันน้ำหน้กับบรรทุก (horizontal surcharge) $F_2 = qHK_{ar} = (20)(12.15)(0.361) = 87.7$ kN/m

แรงต้านรวมในแนวราบ (horizontal resisting force)

$$F_R = F_1 \tan(\min\{\phi_p, \phi_r\}) = 1,968 \tan(\min\{32, 28\}) = 1,046.6 \text{ kN/m}$$

แรงดันรวมในแนวราบ (horizontal driving force) $F_D = F_1 + F_2 = 479.7 + 87.7 = 567.4$ kN/m

อัตราส่วนความปลอดภัยของการเลื่อน FS sliding = $F_R/F_D = 1,046.6/567.4 = 1.84 > 1.5$ OK

สำหรับการเลื่อนที่พิจารณาเฉพาะที่ฐาน MSE wall (sliding ที่ bottom grid)

ค่าความลึกที่ geogrid ชั้นล่างสุดไม่รวมส่วน embedment มีค่า $d_{bg} = 12$ m

ค่าสัมประสิทธิ์แรงดึงออก (pullout interaction coefficient), $C_i = 0.8$ สำหรับ geogrid

แรงต้านรวมในแนวราบ (horizontal resisting force)

$$F_{Rb} = \gamma_s d_{bg} L \tan \phi_p C_i = (18)(12)(9) \tan(32)(0.8) = 971.8 \text{ kN/m}$$

แรงดันรวมในแนวราบ (horizontal driving force) $F_{Db} = F_{D1} + F_{D2} = \frac{1}{2} \gamma_s d_{bg}^2 K_{ar} + q d_{bg} K_{ar}$

$$F_{Db} = (0.5)(18)(12)^2(0.361) + (20)(12)(0.361) = 467.9 + 86.6 = 554.5 \text{ kN/m}$$

อัตราส่วนความปลอดภัยของการเลื่อน FS sliding ที่ bottom grid

$$\text{FS sliding} = F_{Rb}/F_{Db} = 971.8/554.5 = 1.75 > 1.5 \text{ OK}$$

3.3.2.2 เสถียรภาพเยื้องศูนย์ (eccentricity stability) ด้านทานการหมุนคว่ำ (overturning)

โมเมนต์รวมที่จุด O ในรูปที่ 3.2

โมเมนต์ต้าน (resisting moment), $M_{Rp} = F_1 L/2 = (1,968.3)(9)/2 = 8,857.4$ kN-m/m

โมเมนต์ดันหมุน (overturning moment),

$$M_o = F_1 H/3 + F_2 H/2 = (479.7)(12.15/3) + (87.7)(12.15/2) = 2,475.6 \text{ kN-m/m}$$

อัตราส่วนความปลอดภัยหมุนคว่ำ overturning FS = $M_{Rp}/M_o = 8,857.4/2,475.6 = 3.58 > 2$

OK

โมเมนต์ต้านกำลังแบกทาน (resisting moment in bearing pressure),

$$M_{RBP} = F_1 \frac{L}{2} + F_2 \frac{L}{2} = (1,968.3)(9/2) + (180)(9/2) = 9,667.4 \text{ kN-m/m}$$

แรงดันรวมแนวตั้ง (resultant vertical forces), $R = F_1 + F_2 = 1,968.3 + 180 = 2,148.3$ kN/m

ระยะเยื้อง (eccentricity), $e = \frac{L}{2} - \frac{M_{RBP} - M_o}{R} = 9/2 - (9,667.4 - 2,475.6)/2,148.3 = 1.15$

$$\text{โดยที่ } e = 1.15 < \frac{L}{6} = 9/6 = 1.5 \text{ OK}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.3 กำลังแบกทาน (bearing capacity) ของดินฐานราก

แรงต้านสูงสุด (maximum bearing pressure),

$$q_p = \frac{P}{L - 2e} = \frac{3148.8}{9 - 2(1.15)} = 320.9 \text{ kN/m}^2 \text{ จาก AASHTO 1997}$$

แรงแบกทานประลัย (ultimate bearing capacity) ของดินฐานราก

$$q_{ult} = q_f N_c + 0.5(L - 2e) \gamma_f N_\gamma$$

$$= (0.2)(30.1) + 0.5[9 - 2(1.15)](18)(15.7) = 950.1 \text{ kN/m}^2$$

อัตราส่วนความปลอดภัยแบกทาน bearing FS = $q_{ult}/q_p = 950.1/320.9 = 2.96 > 2.5$ OK

โดยที่ค่าปัจจัยแบกทาน (bearing capacity factors) ของค่า N_c, N_q, N_γ จาก Das 2006 เป็นดังนี้

$$N_q = \sigma_f^{\tan(\phi_f)} \tan^2\left(45 + \frac{\phi_f}{2}\right) = \sigma_f^{\tan(30)} \tan^2\left(45 + \frac{30}{2}\right) = 18.4 \text{ Reissner (1924)}$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot(\phi_f) = (18.4 - 1) \cot(30) = 30.1 \quad \text{Pradtl (1921)}$$

$$N_\gamma = (N_q - 1) \tan(1.4\phi_f) = (18.4 - 1) \tan[1.4(30)] = 15.7 \quad \text{Meyerhof (1976)}$$

3.3.3 เสถียรภาพภายใน

เสถียรภาพภายใน (internal stability) เป็นการตรวจสอบวัสดุเสริมกำลังในด้านค่ากำลังต้านทานการฉีกขาด (rupture) ของตาข่ายเสริมกำลัง (geogrid) และค่าดึงออก (pullout) ของตาข่ายเสริมกำลัง (geogrid) รูดหลุดออกจากดิน รายละเอียดของผลการคำนวณค่าเสถียรภาพภายในแสดงดังตารางที่ 3.1 โดยกำหนดระยะห่างระหว่างชั้นตาข่ายเสริมกำลัง (geogrid) เป็น 0.45 เมตร ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 2 เท่าของความกว้าง facing unit block หรือ $2W = (2)(0.25) = 0.5$ เมตร และน้อยกว่า 0.80 เมตร จาก FHWA-NHI-00-043 หน้า 120 สำหรับ segmental precast panel และ หน้า 122 สำหรับ modular block wall

ตารางที่ 3.1 ค่าเสถียรภาพภายใน (internal stability) ของ MSE wall สูง 12 เมตร

Layer	Spacing	Height from top	Grid Area	Maximum Tensile	Active Length	Resistant Length	Total Length	Allowable Tensile	FS
	S (m)	d_i (m)	V_i (m ²)	T_{MAX} (kN/m)	L_a (m)	L_c (m)	L_t (m)	Rupture	Rupture
1	0.30	0.30	0.41	3.22	6.57	0.89	7.57	20	6.21
2	0.45	0.75	0.45	4.63	6.32	0.51	7.32	20	4.32
3	0.45	1.20	0.45	5.75	6.07	0.40	7.07	20	3.48
4	0.45	1.65	0.45	6.87	5.82	0.35	6.82	20	2.91
5	0.45	2.10	0.45	7.99	5.57	0.32	6.57	20	2.50
6	0.45	2.55	0.45	9.11	5.32	0.30	6.32	20	2.19
7	0.45	3.00	0.45	10.23	5.07	0.28	6.07	20	1.95
8	0.45	3.45	0.45	11.35	4.82	0.27	5.82	20	1.76
9	0.45	3.90	0.45	12.47	4.57	0.27	5.57	20	1.60
10	0.45	4.35	0.45	13.59	4.32	0.26	5.32	20	1.47
11	0.45	4.80	0.45	14.71	4.07	0.26	5.07	20	1.36
12	0.45	5.25	0.45	15.83	3.82	0.25	4.82	20	1.26
13	0.45	5.70	0.45	16.95	3.58	0.25	4.58	20	1.18
14	0.45	6.15	0.45	18.07	3.33	0.24	4.33	20	1.11
15	0.45	6.60	0.45	19.19	3.08	0.24	4.08	20	1.04
16	0.45	7.05	0.45	20.31	2.83	0.24	3.83	40	1.97
17	0.45	7.50	0.45	21.43	2.58	0.24	3.58	40	1.87
18	0.45	7.95	0.45	22.55	2.33	0.24	3.33	40	1.77
19	0.45	8.40	0.45	23.67	2.08	0.23	3.08	40	1.69
20	0.45	8.85	0.45	24.79	1.83	0.23	2.83	40	1.61
21	0.45	9.30	0.45	25.91	1.58	0.23	2.58	40	1.54
22	0.45	9.75	0.45	27.03	1.33	0.23	2.33	40	1.48
23	0.45	10.20	0.45	28.15	1.08	0.23	2.08	40	1.42
24	0.45	10.65	0.45	29.27	0.83	0.23	1.83	40	1.37
25	0.45	11.10	0.45	30.39	0.58	0.23	1.58	40	1.32
26	0.45	11.55	0.45	31.51	0.33	0.23	1.33	40	1.27
27	0.45	12.00	0.375	27.19	0.08	0.19	1.08	40	1.47
Embedment	0.15	12.15							

ตัวอย่างการคำนวณเสถียรภาพภายใน (internal stability) ของชั้นที่ 3 ในตารางที่ 3.1 เป็นดังนี้

3.3.3.1 การฉีกขาด (rupture)

พื้นที่รับแรง (grid area) $V_i = \frac{1}{2}(d_3 - d_2) + \frac{1}{2}(d_4 - d_3) = \frac{1.83-0.87}{2} + \frac{1.8-1.83}{2} = 0.45$ m

$T_{MAX} = \sigma_H V_i = K_{cr}(V_B d_i + q) \leq T_a = (0.307)[(18)(1.35) + 20](0.45) = 5.75 < 20$ kN/m

โดยที่ T_{MAX} (maximum tensile strength) คือค่ารับแรงดึงสูงสุดที่เกิดใน geogrid แต่ละชั้น

T_a (allowable tensile strength) คือค่ารับแรงดึงที่ยอมให้ของ geogrid ในแต่ละชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3.2 การดึงออก (pullout)

ความยาวช่วงก่อนแรงต้านแรงดึงออก (Active zone length)

$$L_a = (H - d_f) \tan(45 - \phi_p/2) \quad (3.4)$$

จะได้ $L_a = (12.15 - 1.2) \tan(45 - 32/2) = 6.07 \text{ m}$

ความยาวช่วงต้านแรงดึงออก (resistant zone length)

$$L_r > \frac{1.8T_{max}}{\tan(\phi_p) C_p R_c \alpha} \geq 1 \quad (3.5)$$

จะได้ $L_r = 1.5(5.75) / [(2) \tan(32)(0.8)(18)(1.2)(1.2)(1)(1)] = 0.40$ ใช้ 1 m

โดยที่ R_c คือ ร้อยละของพื้นที่ที่วัสดุเสริมแรงครอบคลุม

(% coverage of reinforcement)

มีค่าจาก 0.71 ถึง 1.0 สำหรับตาข่ายเสริมแรงกำหนดให้ $R_c = 1.0$

C_p คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดึงออก (interaction pullout coefficient) = 0.8

$C = 2$ สำหรับตาข่ายเสริมแรง geogrid

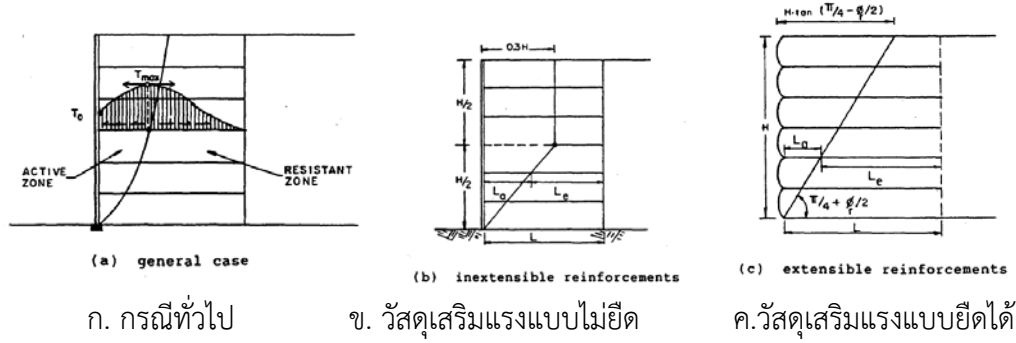
α คือ ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้รูปร่าง (scale effect correction factor) = 1.0

z คือ ค่าสูงของน้ำหนักกดทับ เป็นค่าเดียวกับ d_f ในตารางที่ 3.1

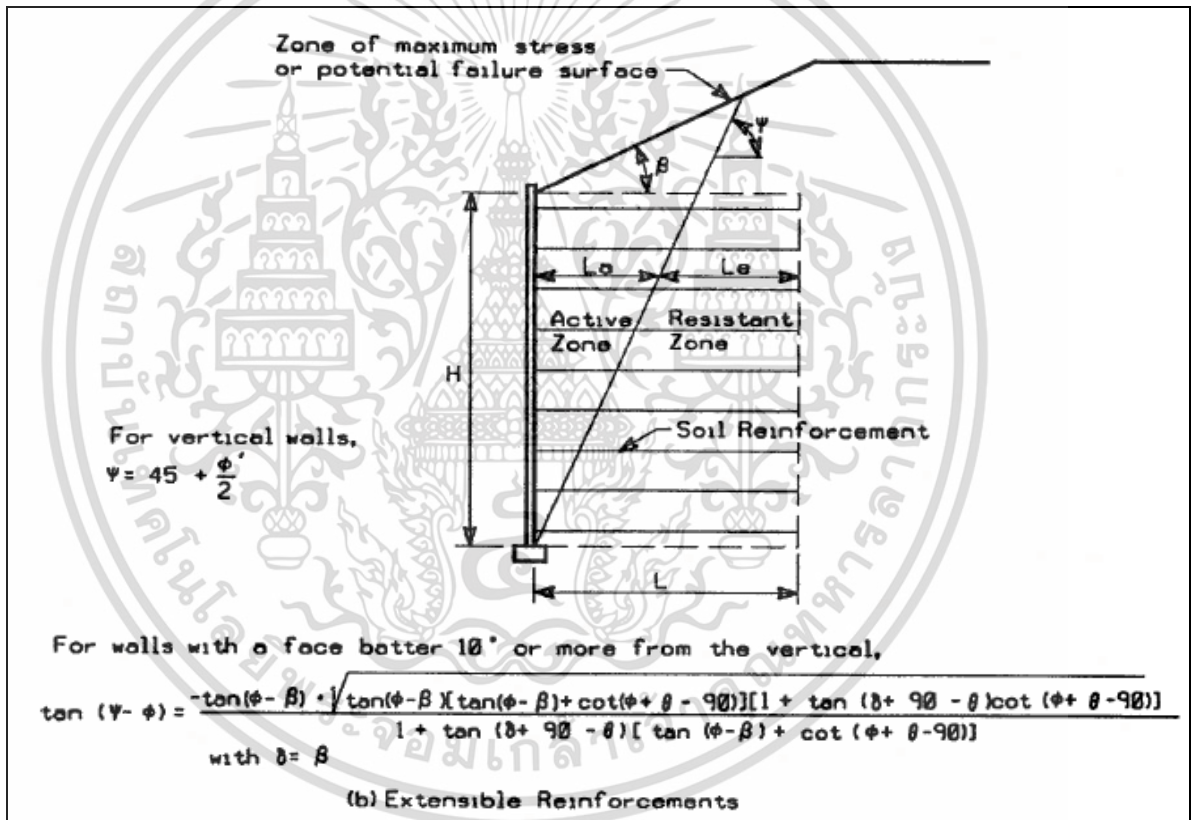
ความยาวรวม (total length), $L_T = L_a + L_r = 6.07 + \max\{0.4, 1\} = 7.07 < 9 \text{ m}$

ซึ่งทุกชั้นของ geogrid ในตารางที่ 3.1 มีค่า L_T สูงสุดที่ 7.57 ซึ่ง $L_T \leq L$

โดยที่ $L = 9$ เมตร และระยะ L_a, L_r แสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งหน่วยแรงดึงสูงสุด (maximum tensile force) จะเป็นแนวเดียวกับวงวิบัติ (failure plane) และจะเป็นเส้นแบ่งระหว่าง active zone และ resistant zone ซึ่งในกรณีของ modular block wall ที่ใช้ตาข่ายเสริมแรง (geogrid) เป็นวัสดุเสริมแรง ซึ่งจัดเป็นวัสดุเสริมแรงแบบยืดได้ (extensible) แนววงวิบัติจะเป็นดังรูปที่ 3.3 ค หรือดังรายละเอียดเพิ่มเติมในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 หน่วยแรงสูงสุดที่ผ่านระหว่าง active zone และ resistant zone (FHWA-NHI-00-043)



รูปที่ 3.4 Active zone และ resistant zone ของ extensible MSE wall (FHWA-NHI-00-043)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 เสถียรภาพโดยรวมโดยใช้วิธีสมดุลขีดจำกัด

การระบุค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพโดยรวม (global stability FS) โดยใช้วิธีสมดุลขีดจำกัด ของกำแพงกันดินเสริมแรง เป็นการหาค่าสมดุลของแรงที่ผ่านระนาบวิบัติต่างๆของเสถียรภาพทางลาด (slope stability) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป (Geo-Slope. 2007.) โดยสรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้คือ ความสูงกำแพงกันดินเสริมแรง 12 เมตร รั้งน้ำหนักบรรทุก 20 kN/m² ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุ (materials) ประเภทดินและวัสดุผิวหน้า (facing) แสดงในตารางที่ 3.2 และค่าพารามิเตอร์ของวัสดุเสริมกำลัง (support) ตาข่ายเสริมแรง (geogrid) แสดงในตารางที่ 3.3 ซึ่งค่ากำลังรับแรงดึง (tensile strength) ในตารางที่ 3.3 เป็นค่ากำลังรับแรงดึงที่ยอมให้ (allowable tensile strength หรือ T_u) และหาค่าสมดุลขีดจำกัด (LEM) โดยวิธี Morgenstern-Price method ด้วย half-sine interslice force function

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุดินและวัสดุผิวหน้าสำหรับวิธีสมดุลขีดจำกัด (LEM)

Material	Facing	Reinforced	Retained	Top Foundation	Bottom Foundation
วัสดุ	วัสดุผิวหน้า	ดินถม	ดินเดิม	ดินฐานรากส่วนบน	ดินฐานรากส่วนล่าง
Model	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
γ (kN/m ³)	22	18	18	18	18
c (kN/m ²)	20	0.2	0.2	0.2	0.2
ϕ (degree)	34	32	28	30	30

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุเสริมกำลังสำหรับวิธีสมดุลขีดจำกัด (LEM)

Geogrid	Model	Tensile Strength (kN/m)
Type 1	Linear	20
Type 2	Linear	40

ค่าเสถียรภาพโดยรวม (global stability) โดยวิธีสมดุลขีดจำกัด (limit equilibrium method หรือ LEM) ที่ FHWA-NHI-00-043 กำหนดค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพโดยรวม (global stability FS) ไว้ที่ 1.3 ดังแสดงในรูปที่ 2.12

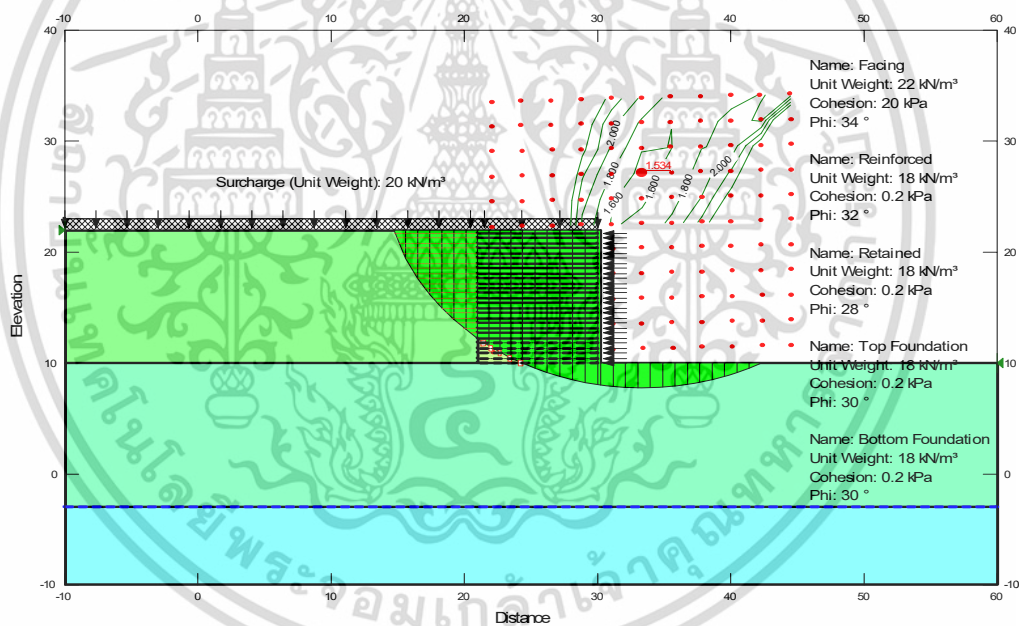
ค่าเสถียรภาพโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมแรงด้านเดียว มีค่าที่อัตราส่วนความปลอดภัย (global stability FS) อยู่ที่ 1.534 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ส่วนกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านที่กำหนดให้ถนนกว้าง 25 เมตร เพื่อให้เป็นกำแพงอิสระที่ถนนต้องกว้างมากกว่า $9 + 6.735 + 9 = 24.735$ เมตร ตาม (3.1) ที่ระยะห่างของตาข่ายเสริมแรงทั้งสองด้าน (D)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D = 25 - 9 - 9 = 7 \geq H \tan(45^\circ - \frac{\phi}{2}) = (12.15) \tan(45^\circ - \frac{32}{2}) = 6.375 \text{ เมตร}$$

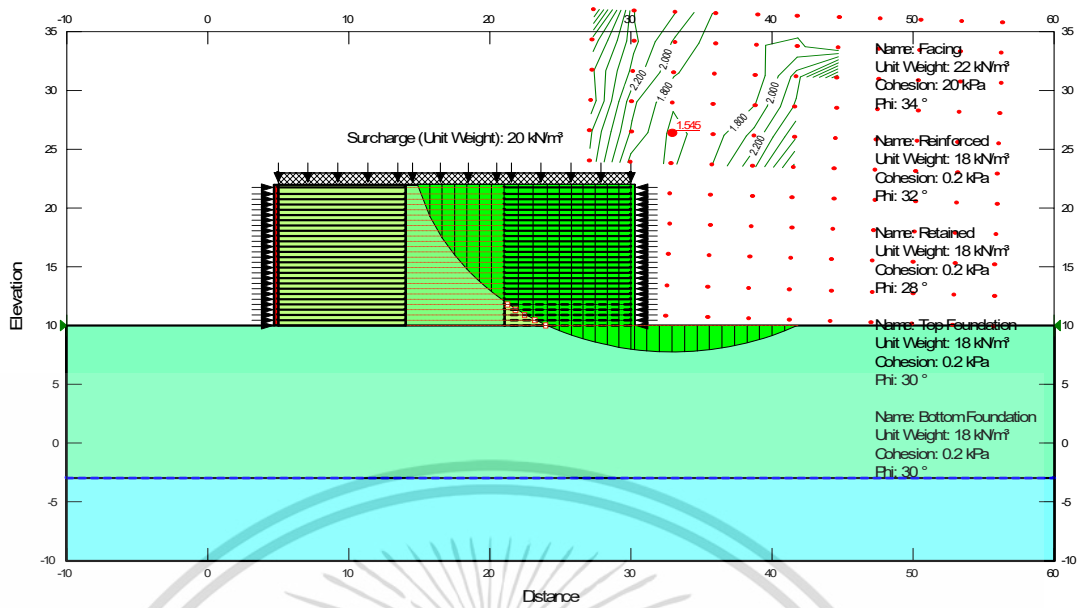
ในส่วนของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน ชั้นตาข่ายเสริมแรงด้านซ้ายทั้งหมดถูกยกขึ้นสูงกว่าด้านขวา 15 เซนติเมตรเพื่อรักษาความหนาของดินเสริมกำลังให้ไม่น้อย 75 มิลลิเมตร (FHWA-NHI-10-024 หน้า 5-47) เพื่อให้เกิดแรงเสียดทาน (R หรือ Interface) ระหว่างดินถมและตาข่ายเสริมแรง

กำแพงเสริมแรงแบบสองด้านอิสระมีค่า global stability FS อยู่ที่ 1.534 แสดงดังรูปที่ 3.6 ซึ่งเป็นค่าเดียวกับกำแพงเสริมแรงด้านเดียว ขณะที่ back-to-back walls ของโครงการที่ถนนกว้าง 15 เมตร เป็นกำแพงกันดินเสริมแรงแบบไม่อิสระ แสดงดังรูปที่ 3.7 มีค่า global stability FS ลดลงเหลือ 1.052 ทั้งๆที่แรงดันดินด้านข้างถูกลดทอนลงตามที่ระบุใน FHWA-NHI-00-043 หน้า 178 ซึ่ง Han (2010) เสนอให้วิเคราะห์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method หรือ FEM) ในการหาค่า global stability FS แทนการใช้วิธีสมดุลขีดจำกัด (limit equilibrium method หรือ LEM)

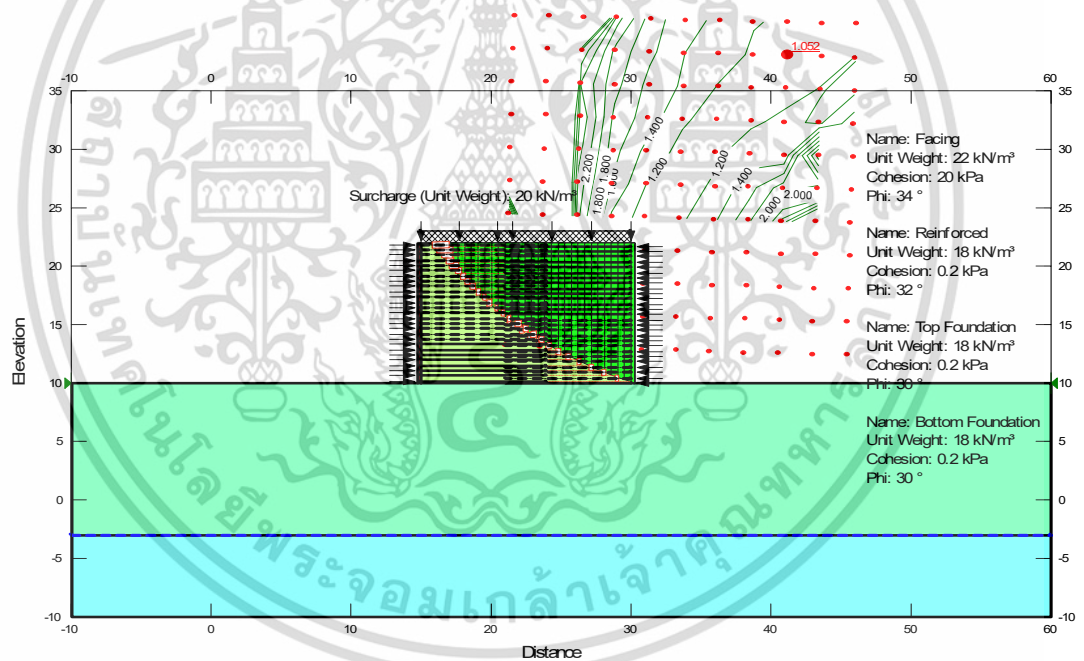


รูปที่ 3.5 เสถียรภาพโดยรวมจาก LEM ของกำแพงกันดินเสริมแรงด้านเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 เสถียรภาพโดยรวมจาก LEM ของกำแพงเสริมแรงแบบสองด้านอิสระกว้าง 25 เมตร



รูปที่ 3.7 เสถียรภาพโดยรวมจาก LEM ของกำแพงเสริมแรงแบบสองด้านไม่อิสระกว้าง 15 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ข้อจำกัดของวิธีสมดุลขีดจำกัด

วิธีสมดุลขีดจำกัด (limit equilibrium method หรือ LEM) อาจจะทำให้ค่าการกระจายของหน่วยแรง (stress distribution) ที่ไม่ถูกต้องจาก Geo-Slope. 2007. เนื่องจากวิธี LEM ใช้ค่า factor of safety ค่าเดียวเพื่อจะสมดุลแรงในรูปหลายเหลี่ยม (polygon) ของแต่ละชิ้นส่วนตัด (slice) ดังรูปที่ 3.8 ซึ่ง Geo-Slope. 2007. เสนอให้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element analysis หรือ FEM) ที่เป็นพิจารณาเรื่องการเคลื่อนตัว (displacement) ช่วยหาค่าหน่วยแรงที่ถูกต้องมากขึ้น

ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3.9 ที่วิธี LEM (LE ในรูปที่ 3.9) ให้ค่าหน่วยแรงตั้งฉากแนววิบัติ (normal stress distribution) ที่ไม่ถูกต้อง ในกรณีที่มีการไถลเกิดที่ปลาย (toe slip surface) ที่ชิ้นส่วนตัด (slice) ด้านปลาย (toe) ที่วิธี LEM ให้ค่า normal stresses ต่ำกว่าวิธี FEM (FE ในรูปที่ 3.9) การไถลแบบลึก (deep slip surface) ในรูป 3.10 วิธี LEM ให้ค่า normal stress ที่ใกล้เคียงกับวิธี FEM

ค่า normal stresses หรือ ค่า N ในสูตรในรูปที่ 3.12 นี้ส่งผลโดยตรงต่อการคำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (factor of safety หรือ FS) ตามสูตรของ GLE (general limit equilibrium method) ที่เสนอโดย Morgenstern and Price (1965) จาก Geo-Slope. 2007. ซึ่งจากรูปที่ 3.12 ค่า FS จะมี 2 สูตรคือ F_m ซึ่งเป็น FS จากการสมดุลโมเมนต์ (moment equilibrium) และ F_f ซึ่งเป็น FS จากการสมดุลแรง (force equilibrium) ซึ่งวิธี Morgenstern and Price (1965) กำหนดให้ $F_m = F_f = F$ ในสูตรในรูปที่ 3.12

ค่า normal stresses ทำให้ค่า FS จากวิธี LEM ต่ำกว่า FS ของวิธี FEM ในรูปที่ 3.11 รูปซ้าย กรณีเป็น toe slip surface ที่ FS คำนวณจากจาก normal stresses ในรูปที่ 3.9 และค่า FS จากวิธี LEM มีค่าใกล้เคียงกับค่า FS ของวิธี FEM ในรูปที่ 3.11 รูปขวา กรณีเป็น deep slip surface ที่ FS คำนวณจาก normal stresses ในรูปที่ 3.10 ซึ่งกรณีที่เกิด toe slope failure ดังในรูปที่ 3.9 นี้มักจะเป็นกรณีที่มีวัสดุเสริมกำลัง reinforcement ทำให้เกิดวงวิบัติที่ชัน (steep slope) ดังแสดงในรูป 3.13

สาเหตุที่ FEM ให้ค่า normal stress ที่ถูกต้องมากกว่า LEM โดยเฉพาะที่บริเวณ toe ดังในรูปที่ 3.9 ส่งผลให้ได้ค่า FS จาก FEM มีค่าถูกต้องกว่า FS จาก LEM ดังรูปที่ 3.11 รูปซ้าย เนื่องจาก LEM คิดค่า normal stress จากน้ำหนัก slice เป็นหลัก ดังสูตรในรูปที่ 3.12 ส่งผลให้ค่า normal stress ที่ toe ในรูปที่ 3.9 มีค่าน้อย ขณะที่ FEM จะพิจารณาทั้ง σ_{xx} (horizontal stress หรือ ความเค้นแนวราบ), σ_{zz} (vertical stress หรือ ความเค้นแนวตั้ง), และ τ_{xz} (shear หรือ ความเค้นเฉือน) ทำให้มีค่า normal stress ที่ toe ของ FEM ในรูปที่ 3.9 มีค่าสูงกว่า normal stress ที่ toe ของ LEM ดังแสดงใน Figure 3-30 และ Figure 3-31 ในรูปที่ 3.8 และในรูปที่ 3.9

นอกจากนี้ ค่าความชันของลาด (α) ในรูปที่ 3.12 ที่มีค่ามาก ทำให้ $\cos(\alpha)$ มีค่าน้อย จึงส่งผลโดยตรงค่าของ N ที่อาจมีค่ามาก F_f ที่อาจมีค่าน้อย F_m ที่อาจมีค่ามาก ซึ่งวิธี Morgenstern-Price method กำหนดให้ $F_m = F_f = F$ จึงทำให้ค่า F หรือ $LEM FS$ มีค่าไม่ถูกต้องตามจริงได้

3.12 Finite element stress-based method

The chapter on Limit Equilibrium Fundamentals discusses stress distributions obtained from limit equilibrium formulations, and shows that these stress distributions are not necessarily representative of the actual field stresses. To repeat, the limit equilibrium formulations give stresses and forces that:

- Aim to provide for force equilibrium of each slice
- Make the factor of safety the same for each slice

These inherent concepts and assumptions mean that it is not always possible to obtain realistic stress distributions along the slip surface or within the potential sliding mass. Some other piece of physics has to be added to the stability analysis to overcome these limitations. The missing piece of physics is a stress-strain relationship. Including such a relationship means displacement compatibility is satisfied, which in turn leads to much more realistic stress distributions.

One way of including a stress-strain relationship in a stability analysis is to first establish the stress distribution in the ground using a finite element analysis and then use these stresses in a stability analysis. This idea has been implemented in SLOPE/W. The ground stresses can be computed using SIGMA/W, and SLOPE/W uses the SIGMA/W stresses to compute safety factors. The following is a description of the implemented procedure.

Figure 3-30 shows a simple 45-degree slope discretized into finite elements. Using a simple gravity turn-on technique, the stresses in the ground can be computed. Using a linear-elastic constitutive relationship, the vertical stresses are as presented in Figure 3-31. This is typical of the information available from a finite element analysis. The basic information obtained from a finite element stress analysis is σ_x , σ_y and τ_{xy} within each element.

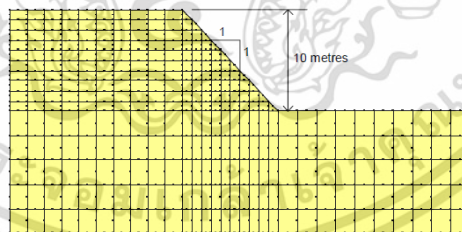


Figure 3-30 Finite element mesh for computing insitu stresses

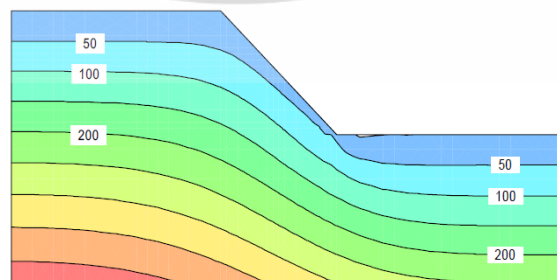
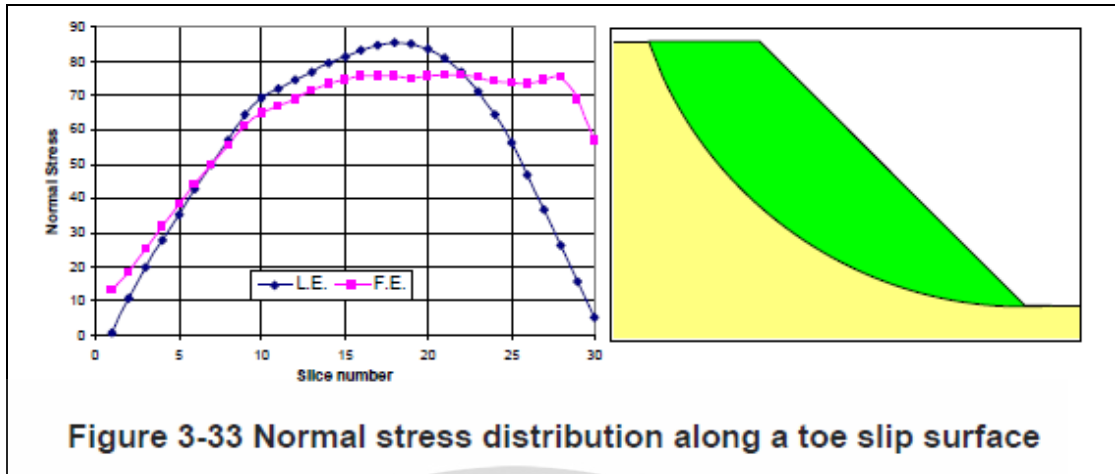


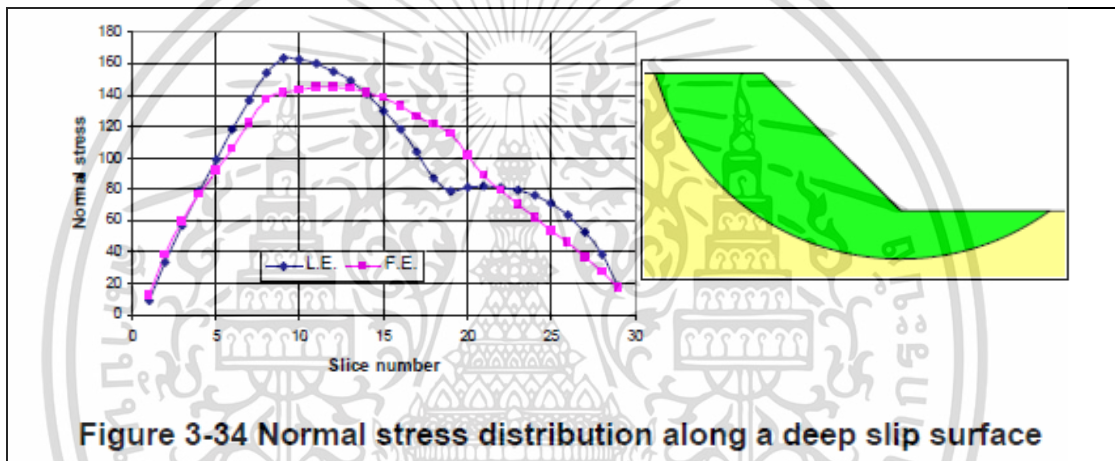
Figure 3-31 Vertical stress contours computed with SIGMA/W

รูปที่ 3.8 FEM stress [Slopew 2007 Engineering Book -Geo-Slope 2007]

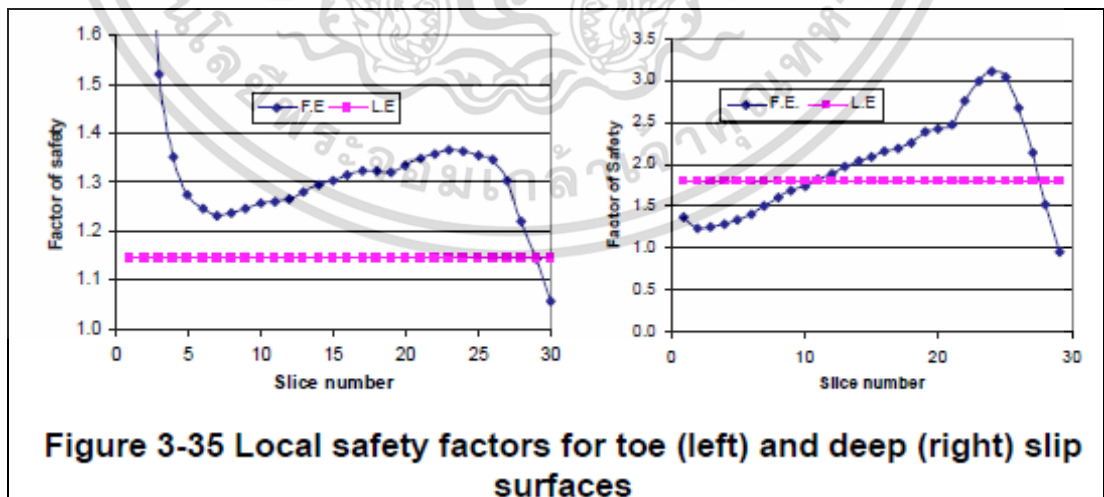
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 Toe slip normal stress [Sloped 2007 Engineering Book -Geo-Slope 2007]

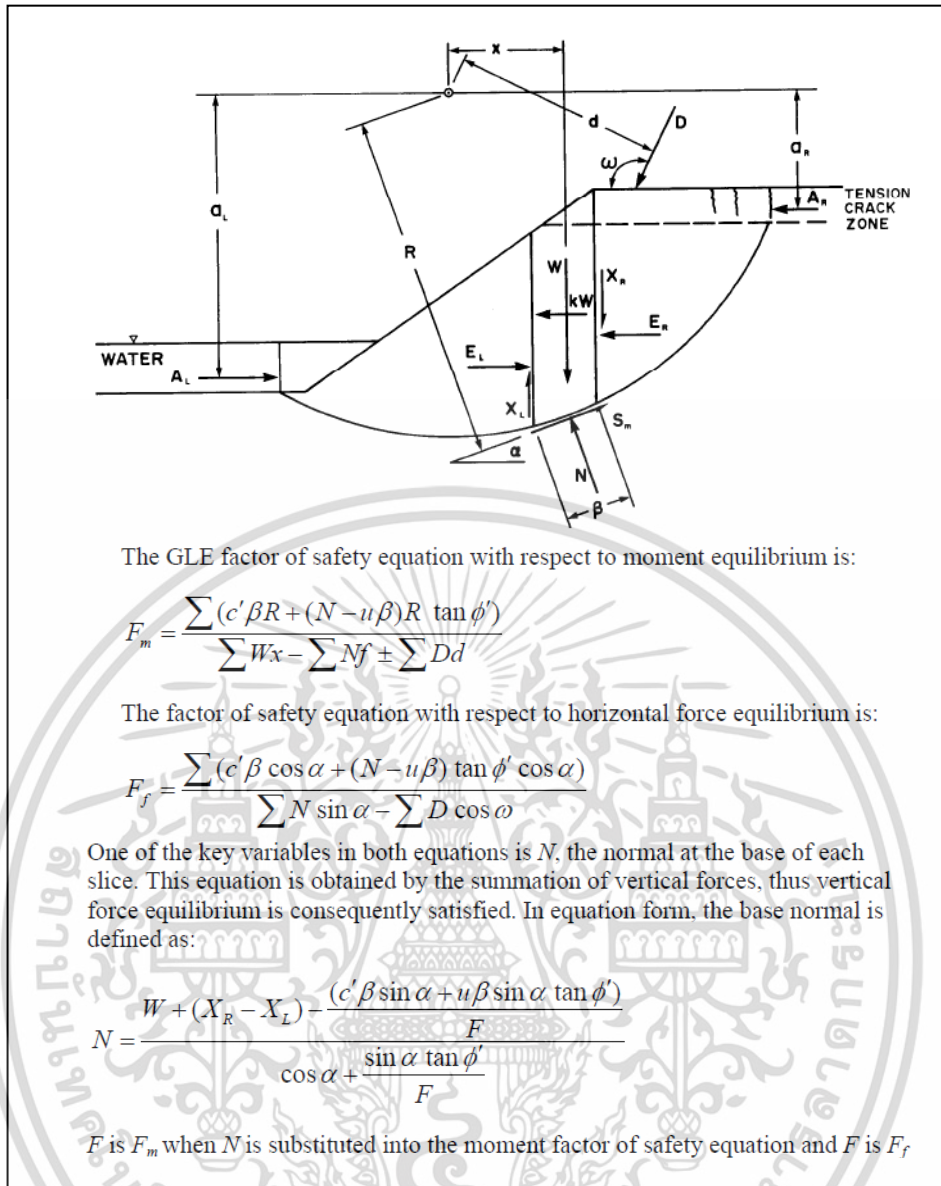


รูปที่ 3.10 Deep slip normal stress [Sloped 2007 Engineering Book -Geo-Slope 2007]

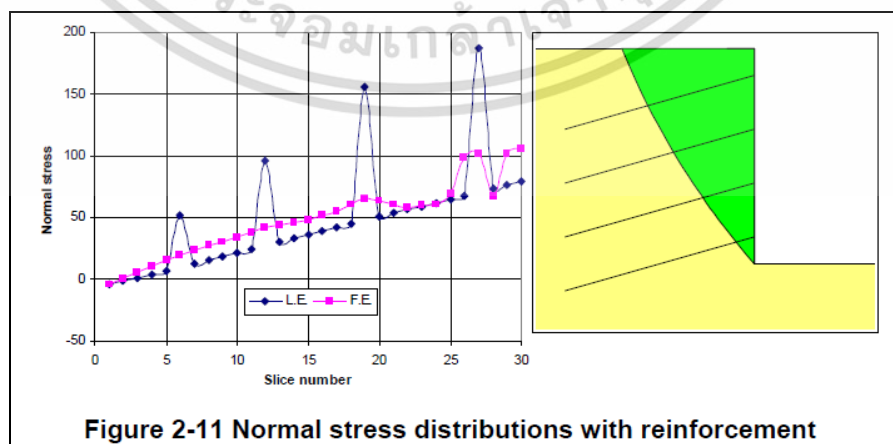


รูปที่ 3.11 Normal stress FS [Sloped 2007 Engineering Book -Geo-Slope 2007]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 LEM FS [Sloew 2007 Engineering Book -Geo-Slope 2007]



รูปที่ 3.13 Reinforcement normal stress [Sloew 2007 Engineering Book -Geo-Slope

2007]
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การหาค่าเสถียรภาพโดยรวมโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ส่วน 3.5.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกำแพงกันดินเสริมแรงสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method หรือ FEM) ตาม วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิค (สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง. 2550.) ซึ่ง FEM จะมีการสมมุติค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นที่ไม่สามารถหาค่าได้โดยตรง จากผลสำรวจดิน (boring log) เช่นค่าโมดูลัส (modulus of elasticity หรือ E_{ref} หรือ E) ของวัสดุ ดินและวัสดุผิวหน้า (facing) รวมถึงค่าสติฟเนส (stiffness) ของตาข่ายเสริมแรง (geogrid) และ จำเป็นต้องตรวจสอบผลของ FEM โดยเฉพาะในด้านการเคลื่อนตัวที่ยอมให้ (allowable displacement) ของกำแพงกันดินเสริมแรงด้านเดียวก่อน ใน 3.5.2 แล้ววิเคราะห์ FEM ของกำแพง กันดินเสริมแรงแบบสองด้าน ใน 3.5.3 และทำการผลเปรียบเทียบค่าเสถียรภาพโดยรวมโดยใช้วิธี สมดุลขีดจำกัดและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใน 3.6

3.5.1 ค่าพารามิเตอร์ของกำแพงกันดินเสริมแรงสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ค่าพารามิเตอร์ของกำแพงกันดินเสริมแรงสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method หรือ FEM) แสดงดังตารางที่ 3.4 ที่แสดงพารามิเตอร์วัสดุ (material) ประเภทดินและวัสดุ ผิวหน้า (facing) ส่วนตารางที่ 3.5 แสดงพารามิเตอร์ของตาข่ายเสริมกำลัง (geogrid)

ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุดินและวัสดุผิวหน้าสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

Material	Facing	Reinforced	Retained	Top Foundation	Bottom Foundation
วัสดุ	วัสดุผิวหน้า	ดินถม	ดินเดิม	ดินฐานรากส่วนบน	ดินฐานรากส่วนล่าง
ประเภทวัสดุ	Concrete	Loose Sand	Soft Clay	Loose Sand	Soft Clay
Model	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Type	Non-porous	Drained	Undrained	Drained	Undrained
γ -Unsat (kN/m ³)	22	18	18	18	18
γ -Sat (kN/m ³)		20	20	20	20
kx (m/day)		1.0	0.01	1.0	0.01
ky (m/day)		1.0	0.01	1.0	0.01
E_{ref} (kN/m ²)	10,000	10,000	5,000	5,000	5,000
ν	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
c-ref (kN/m ²)	20	0.2	0.2	0.2	0.2
ϕ (degree)	34	32	28	30	30
R (Interface)	1.0	0.67	1.0	1.0	1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุเสริมกำลังสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

Support	Material	Tensile Strength (kN/m)		Stiffness
		Working at 5% Strain	Ultimate Strength	
Geogrid	Material			EA (kN/m)
Type 1	Elastic	20	40	400
Type 2	Elastic	40	80	800

ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุดินและวัสดุผิวหน้าในตารางที่ 3.4 จะใช้ค่ากำลังความแข็งแรงของดินในส่วนค่า γ, c, ϕ และแบบจำลองดิน (soil model) แบบมอร์คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb) เช่นเดียวกันกับค่าของวิธีสมมูลขีดจำกัดในตารางที่ 3.2 แต่จะเพิ่มในส่วนค่าโมดูลัสดิน (Modulus of Elasticity หรือ Elasticity หรือ E_{ref} ในตารางที่ 3.4 หรือ E) ที่ $E = \sigma/\epsilon$ หรือเท่ากับค่าความเค้น (stress หรือ $\sigma = F/A$ หรือ แรง F ทหารด้วยพื้นที่ A หน่วยเป็น kN/m^2) ทหารด้วยค่าความเครียด (strain หรือ $\epsilon = \Delta L/L$ หน่วยเป็น m/m) ค่าโมดูลัสดินนั้นได้จัดประเภทวัสดุไว้ในตารางที่ 3.4 ตาม Obrzud R. & Truty, A. 2012. ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ซึ่งตารางที่ 3.4 กำหนดค่าโมดูลัส (E_{ref}) ของวัสดุผิวหน้าเท่ากับดินถม เพื่อให้การเคลื่อนตัว (displacement) ไปในแนวทางเดียวกันเมื่อรับความเค้นเท่ากัน

Typical values of Young's modulus for granular material (MPa) (based on Obrzud & Truty 2012 compiled from Kezdi 1974 and Prat et al. 1995)				
USCS	Description	Loose	Medium	Dense
GW, SW	Gravels/Sand well-graded	30-80	80-160	160-320
SP	Sand, uniform	10-30	30-50	50-80
GM, SM	Sand/Gravel silty	7-12	12-20	20-30

Typical values of Young's modulus for cohesive material (MPa) (based on Obrzud & Truty 2012 compiled from Kezdi 1974 and Prat et al. 1995)					
USCS	Description	Very soft to soft	Medium	Stiff to very stiff	Hard
ML	Silts with slight plasticity	2.5 - 8	10 - 15	15 - 40	40 - 80
ML, CL	Silts with low plasticity	1.5 - 6	6 - 10	10 - 30	30 - 60
CL	Clays with low-medium plasticity	0.5 - 5	5 - 8	8 - 30	30 - 70
CH	Clays with high plasticity	0.35 - 4	4 - 7	7 - 20	20 - 32
OL	Organic silts	-	0.5 - 5	-	-
OH	Organic clays	-	0.5 - 4	-	-

รูปที่ 3.14 ค่า Young's Modulus ของดิน (Obrzud 2012)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนค่าความแข็งแรงของวัสดุเสริมกำลังตาข่ายเสริมแรง (geogrid) ค่ากำลังแรงดึงใช้งาน (working tensile strength) จะเป็นค่าเดียวกันกับค่าในตารางที่ 3.5 ซึ่งเป็นค่าที่ 5 เปอร์เซ็นต์ของค่าความเครียด (strain) ของวัสดุเสริมกำลังโดยที่แบบจำลองวัสดุ (material model) ของวัสดุเสริมกำลังเป็นแบบยืดหยุ่นเส้นตรง (elastic หรือ linear elastic) โดยวัสดุเสริมแรงประเภทตาข่ายเสริมแรง จะมีกำลังรับแรงดึงประลัยเป็น 2 เท่าของกำลังใช้งานที่ 5 เปอร์เซ็นต์ของค่าความเครียด (5% strain) ส่วนค่าสติฟเนส (ความแข็งหรือ stiffness หรือ EA ในตารางที่ 3.5) นั้น มาจากการหาค่ากำลังแรงดึงใช้งานด้วยค่า 5% strain เนื่องจากกำหนดแบบจำลองวัสดุเป็นแบบยืดหยุ่นเส้นตรง (linear elastic) ตาม Plaxis Inc. 2016. หน้า 194 ที่กำหนดให้ $EA = F/(\Delta L/L)$ ค่า EA แสดงในสมการ

$$EA = T_{\%} \text{ at } \% \text{ strain} / \% \text{ strain} \quad (3.6)$$

ซึ่งตาข่ายเสริมแรง (geogrid) ประเภทแรกที่อยู่ชั้นบนของกำแพงกันดินเสริมแรง (Type 1 ในตารางที่ 3.5) มีค่า $T_{\%}$ ที่ 20 kN/m ได้ $EA = 20/0.05 = 400$ kN/m ส่วนตาข่ายเสริมแรงชั้นล่างของกำแพงกันดินเสริมแรง (Type 2 ในตารางที่ 3.5) มีค่า $T_{\%}$ ที่ 40 kN/m ได้ $EA = 40/0.05 = 800$ kN/m

สำหรับค่า R (Interface) ในตารางที่ 3.4 นั้น ใช้ค่าที่ 0.67 หรือ 2/3 เพื่อเป็นการลดค่ากำลังแรงเสียดทานระหว่างดินถม (reinforced soil) กับตาข่ายเสริมกำลัง (geogrid) ที่กำหนดอัตราส่วนความปลอดภัยในส่วนของแรงดึงออก (pull out) ไว้ที่ 1.5 หรือ 3/2 ดังรูปที่ 2.12

3.5.2 การตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน FEM เปรียบเทียบกับ FEM ของกำแพงกันดินเสริมแรง ด้านเดียว

นอกจากตรวจสอบจากการทบทวนวรรณกรรมในการเลือกใช้ค่า FEM พารามิเตอร์เช่นจาก Sri Wulandari Paravita, Tjandra Daniel. 2015. ที่ประมาณค่า FEM parameters สำหรับการใช้ผ้าใยสังเคราะห์ geotextile เสริมความแข็งแรงของคันทาง (embankment) แล้วโดย Sri Wulandari Paravita, Tjandra Daniel. 2015. ให้ค่า EA ของ geotextile จาก 0 ถึง 1,000 kN/m แต่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ค่าความถูกต้อง (validity) ของ FEM พารามิเตอร์ที่ใช้โดยเฉพาะค่าโมดูลัสดินและวัสดุผิวหน้า (E หรือ Eref ในตารางที่ 3.4) และค่าสติฟเนส (stiffness หรือ EA ในตารางที่ 3.5) ของตาข่ายเสริมแรงชั้นบนที่ 400 kN/m จากแรงดึงใช้งาน $T_{\%}$ ที่ 20 kN/m ได้ และตาข่ายเสริมแรงชั้นล่างที่ 800 kN/m จากแรงดึงใช้งาน $T_{\%}$ ที่ 40 kN/m ได้ โดยค่าพารามิเตอร์จะถูกตรวจสอบด้วยค่าการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นทั้งหมด (total incremental displacement) ของกำแพงกันดินเสริมแรงด้านเดียวดังแสดงจากผลของ FEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก (2.2) ค่าประมาณการเคลื่อนตัวสูงสุด (δ_{max}) ของกำแพงกันดินเสริมแรงใช้ตาข่ายเสริมแรง (geogrid) เป็นวัสดุเสริมแรงซึ่งเป็นแบบ extensible มีค่า $\delta_{max} = \delta_r H / 75 = (1.0)(12.15/75) = 0.162$ เมตรสำหรับน้ำหนักบรรทุกทุก 20 kPa ซึ่งเป็นค่าเดียวกันกับน้ำหนักที่ใช้ในโครงการตัวอย่างนี้ที่ 20 kN/m² โดยที่ค่า $\delta_r = 1.0$ มาจากรูปที่ 2.13 ที่ค่า L/H อยู่ที่ประมาณ 0.7

ผลของการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์สำเร็จรูป Plaxis Inc. 2016. แสดงในตาข่ายรูปทรงการเสียรูป (deformed mesh) ที่แสดงลักษณะการเสียรูป ดังแสดงในรูปที่ 3.15 รูปที่ 3.16 ที่แสดงค่าการเคลื่อนตัวทั้งหมด (total displacement) (total incremental displacement) ซึ่งถึงแม้ค่าสูงสุดของค่าการเคลื่อนตัวทั้งหมดในรูปที่ 3.16 มีค่าอยู่ที่ 2.1 เมตร แต่ค่าการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นทั้งหมดในส่วนฐานกำแพงมีค่าลดลงมากอยู่ระหว่าง 0.8 เมตร ถึง 1.0 เมตร และยังมีค่าไม่ใกล้เคียงกับค่าประมาณการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ 0.162 เมตรจาก (2.2) ดังที่กล่าวมา ต่กำแพงกันดินเสริมแรงสองด้านมีค่าการเคลื่อนตัวทั้งหมดที่ฐานที่ใกล้เคียงกับ 0.162 เมตร ดังที่จะแสดงถัดไปใน 3.5.3

ค่าความเค้นรวม (total stresses) แสดงในรูปที่ 3.17 ที่ค่าความเค้นในช่วงของกำแพงกันดินเสริมแรงมีค่าส่วนใหญ่ประมาณ 40 kN/m² ซึ่งใกล้เคียงกับแรงดึงใช้งาน (working tensile strength หรือ T_r) ของตาข่ายเสริมแรง (geogrid) และค่าความเค้นที่ดินฐานรากมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณออกแบบไว้ใน 3.2.2.3 ที่แรงดันสูงสุด (maximum bearing pressure) หรือ $c_r = 320.9$ kN/m²

รูปที่ 3.18 แสดงตัวอย่างของค่าหน่วยแรงแนวแกน (axial force) ของตาข่ายเสริมแรง เฉพาะในชั้นที่ 3 ในกำแพงเสริมแรงด้านเดียว จะเห็นว่าค่าหน่วยแรงแนวแกนขีดสุด (extreme axial force) ของตาข่ายเสริมแรงชั้นที่ 3 จากบน มีค่าเท่ากับ 10.12 kN/m ซึ่งน้อยกว่าค่าที่ออกแบบไว้สำหรับแรงดึงใช้งาน (T_r) ของตาข่ายเสริมแรงชั้นที่ 3 ที่ 20 kN/m

ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพโดยรวม (global stability FS) ของกำแพงกันดินเสริมแรงด้านเดียว แสดงในรูปที่ 3.19 และรูปที่ 3.20 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบ safety analysis ของ Plaxis Inc. 2016. หรือที่เรียกว่าวิธี phi/c reduction ที่ค่า safety factor = available strength / strength at failure หรือ

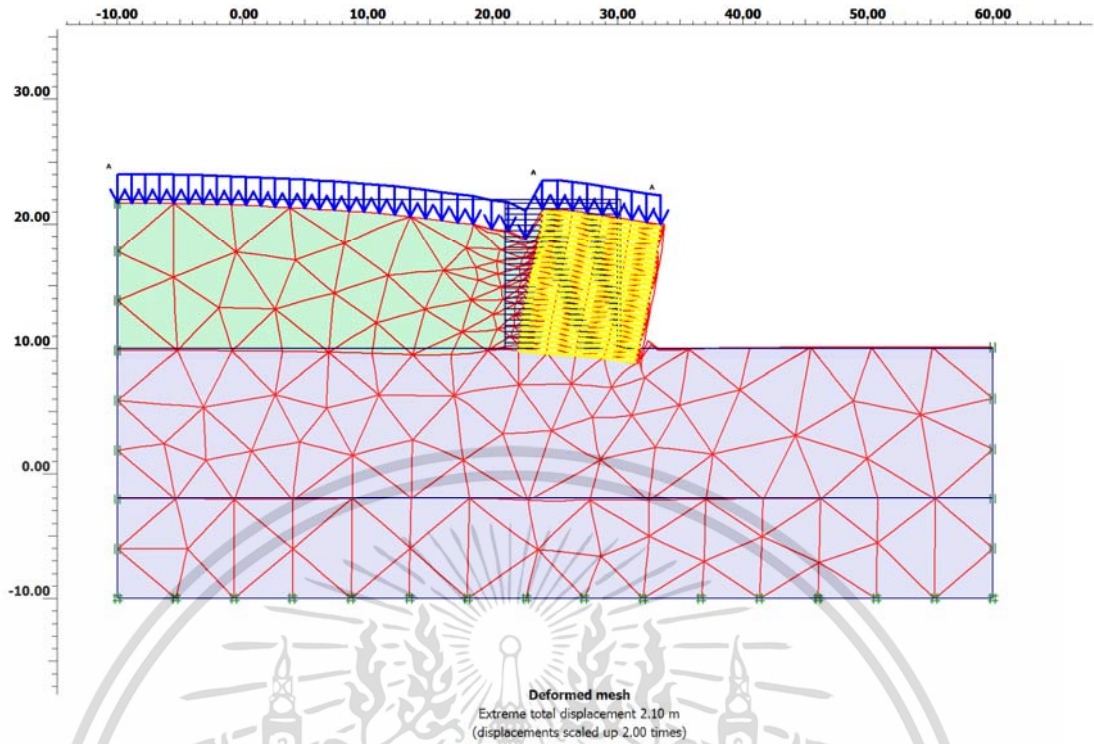
$$\text{Safety factor} = \frac{c - \sigma_r \tan \phi}{c_r - \sigma_r \tan \phi_r} \text{ หรือ } \frac{c}{c_r} = \frac{\tan \phi_r}{\tan \phi} = \sum Msf \quad (3.7)$$

รูปที่ 3.19 เป็นการหาค่า global stability FS จาก FEM แบบควบคุมการเพิ่มน้ำหนักเพื่อให้ค่า global stability FS มีค่าลู่เข้า (converged) และมีค่าที่ 1.170 ขณะที่รูปที่ 3.20 เป็นการหาค่า global stability FS จาก FEM แบบควบคุมการเคลื่อนตัว ทำให้ค่า global stability FS แบบไม่ลู่เข้า (non converged) และมีค่าที่ 1.686 ซึ่งใกล้เคียงกับค่า global stability FS จาก LEM ที่ 1.534 จากรูปที่ 3.5 รูปที่ 3.21 แสดงค่าการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นทั้งหมด (total incremental displacement) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

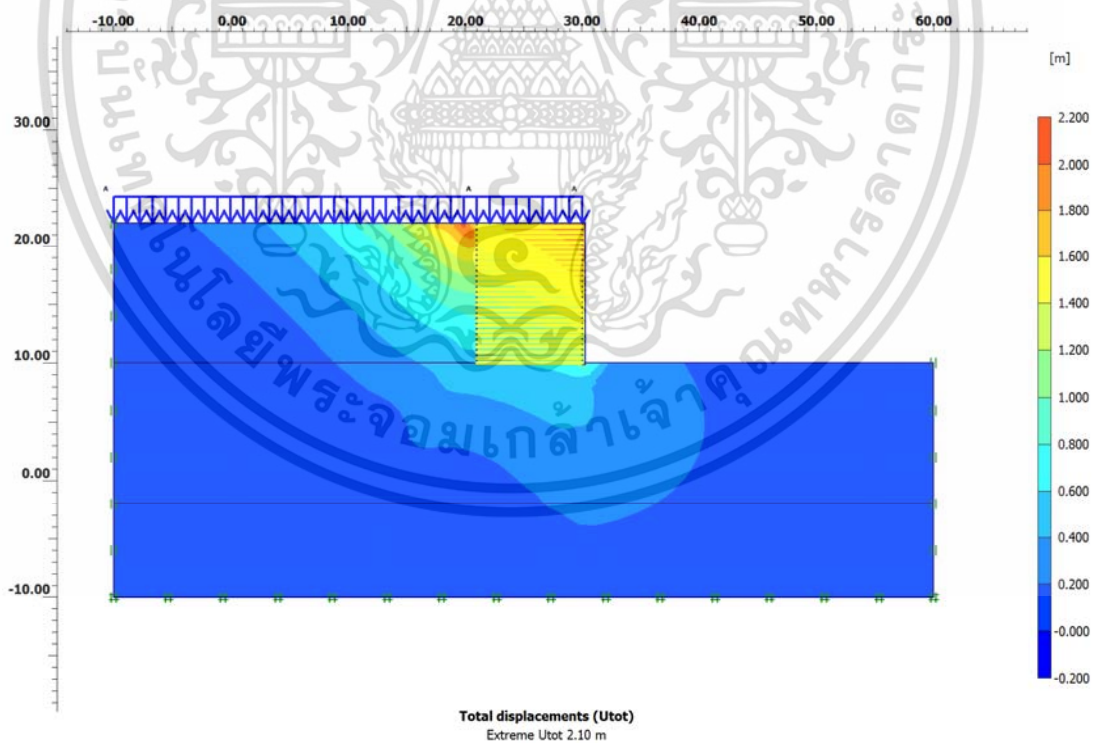
displacement) จาก global stability FS แบบลู่เข้า ซึ่งแสดงระนาบการวิบัติ (failure plane) ตาม Plaxis Inc. 2016. ส่วนรูปที่ 3.22 แสดงค่าการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นทั้งหมด (total incremental displacement) จาก global stability FS แบบไม่ลู่เข้า ซึ่งมีระนาบทั้งสองจาก total incremental displacement มีแนวระนาบใกล้เคียงกับระนาบวิบัติตาม LEM ในรูปที่ 3.5

ตารางที่ 3.6 แสดงค่าหน่วยแรงแนวแกนขีดสุด (extreme axial force) ของตาข่ายเสริมแรงของกำแพงกันดินด้านเดียว ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับค่าเสถียรภาพภายใน (internal stability) ที่คำนวณจาก FHWA-NHI-00-043 ในตารางที่ 3.1 กับค่าหน่วยแรงแนวแกนขีดสุด (extreme axial force) จาก FEM ทั้งในสภาวะใช้งาน (working condition) และสภาวะประลัย (ultimate condition) จาก FEM ที่ใช้การวิเคราะห์แบบ Safety analysis แบบลู่เข้า (converged) ด้วย arc length control option ใน Plaxis 2016 และแบบไม่ลู่เข้า (non converged) ซึ่งค่าหน่วยแรงดึงใน geogrid สามารถประมาณได้จากรูปที่ 3.23 ที่แสดงค่าความเค้นรวมของกำแพงเสริมแรงด้านเดียวแบบลู่เข้า และรูปที่ 3.24 ที่แสดงค่าความเค้นรวมของกำแพงเสริมแรงด้านเดียวแบบไม่ลู่เข้า

งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ค่าการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นทั้งหมด (total incremental displacement) ที่ใช้การหาค่า global stability FS แบบลู่เข้าในการหาค่าเสถียรภาพโดยรวมแบบ FEM เนื่องจาก วงวิบัติ (failure plane) จาก FEM จาก safety analysis แบบไม่ลู่เข้า ที่มี deformation เกิดขึ้นมากที่สุดที่หลังวัสดุเสริม ในรูปที่ 3.22 เทียบกับวงวิบัติจาก safety analysis แบบลู่เข้า ในรูปที่ 3.21 ที่มี deformation เกิดขึ้นมากที่สุดที่ผิวหน้ากำแพง พบว่า safety analysis แบบไม่ลู่เข้า มีแนววงวิบัติใกล้เคียงกับวงวิบัติจาก LEM ในรูปที่ 3.5 และคล้ายกับตาข่ายรูปทรงการเสียดรูปในสภาวะใช้งานในรูปที่ 3.15 และค่าการเคลื่อนตัวทั้งหมดจาก FEM ของกำแพงเสริมแรงด้านเดียวในสภาวะใช้งานในรูปที่ 3.16

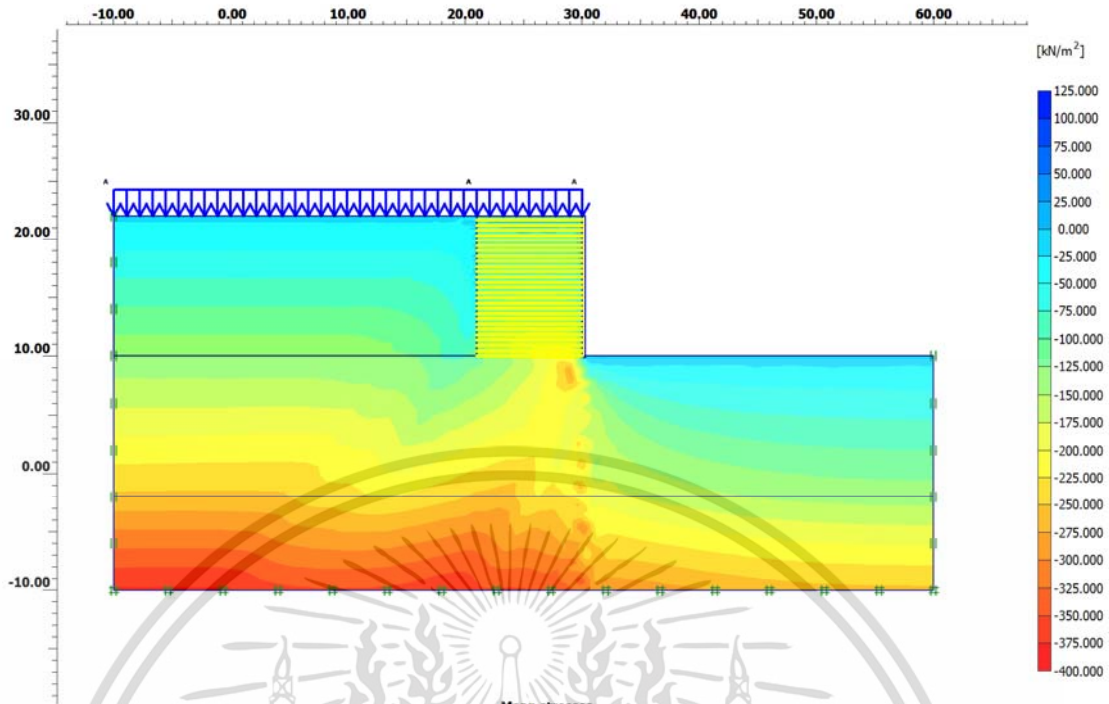


รูปที่ 3.15 ตาข่ายรูปทรงการเสียรูปจาก FEM ของกำแพงเสริมแรงด้านเดียว

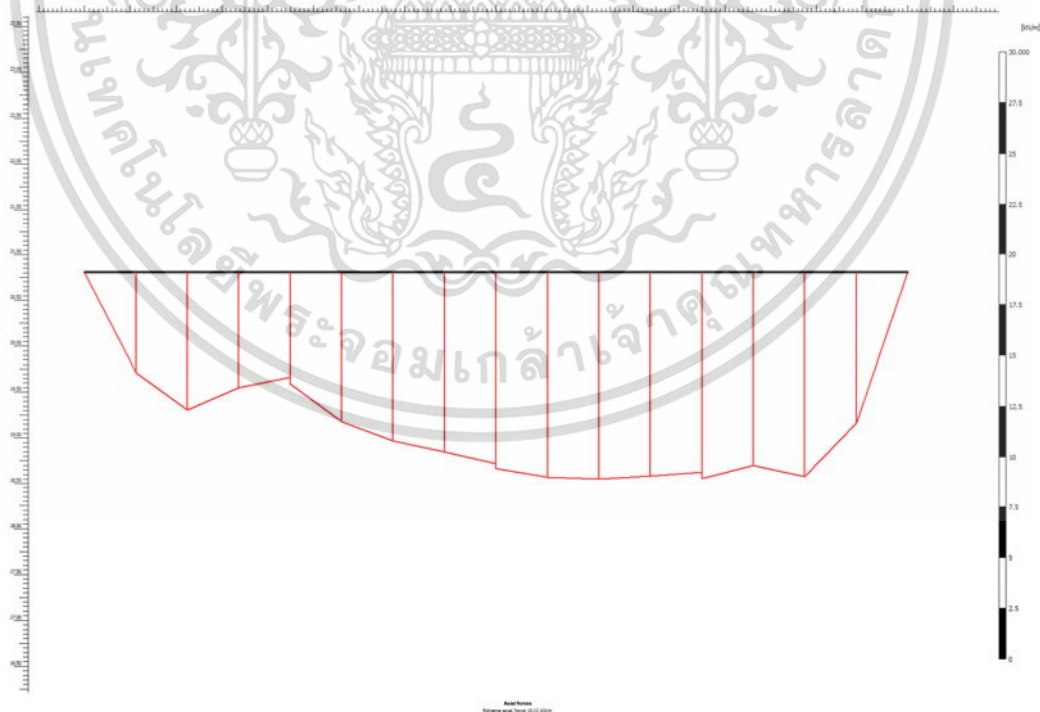


รูปที่ 3.16 ค่าการเคลื่อนตัวทั้งหมดจาก FEM ของกำแพงเสริมแรงด้านเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

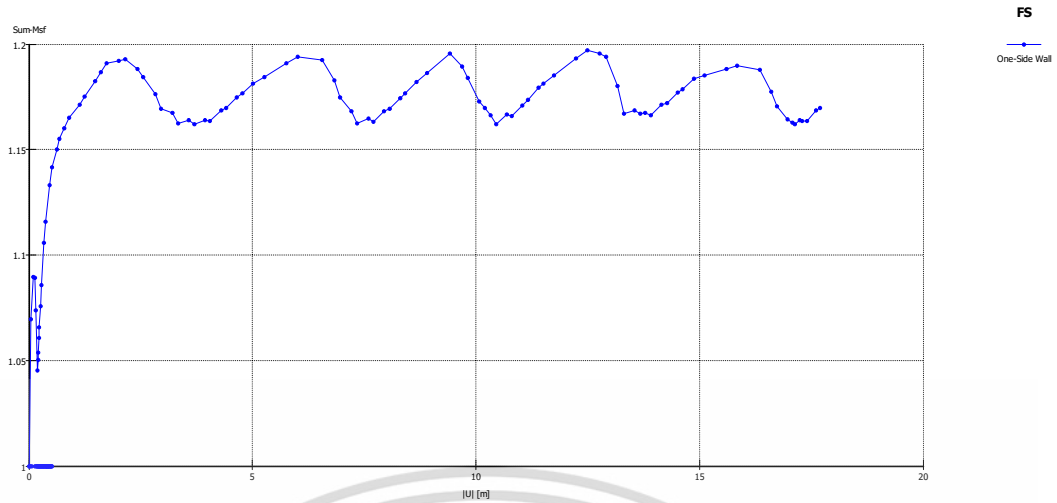


รูปที่ 3.17 ค่าความเค้นรวมจาก FEM ของกำแพงเสริมแรงด้านเดียว

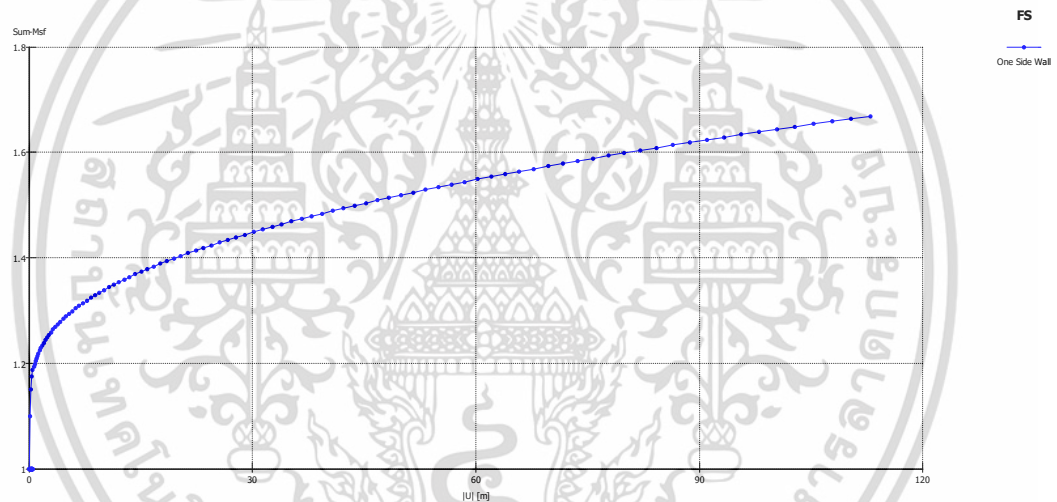


รูปที่ 3.18 ค่าหน่วยแรงแนวแกนของตาข่ายเสริมแรงชั้นที่ 3 ในกำแพงเสริมแรงด้านเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

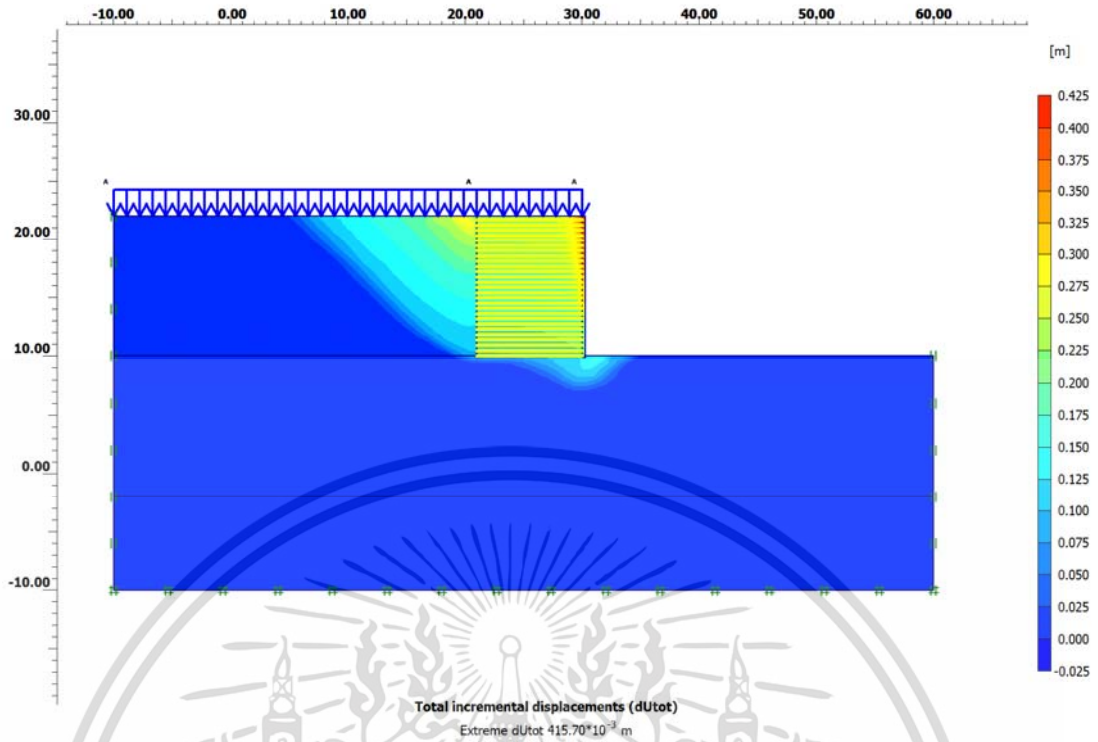


รูปที่ 3.19 ค่า Safety Analysis ของกำแพงเสริมแรงด้านเดียวแบบลู่เข้า

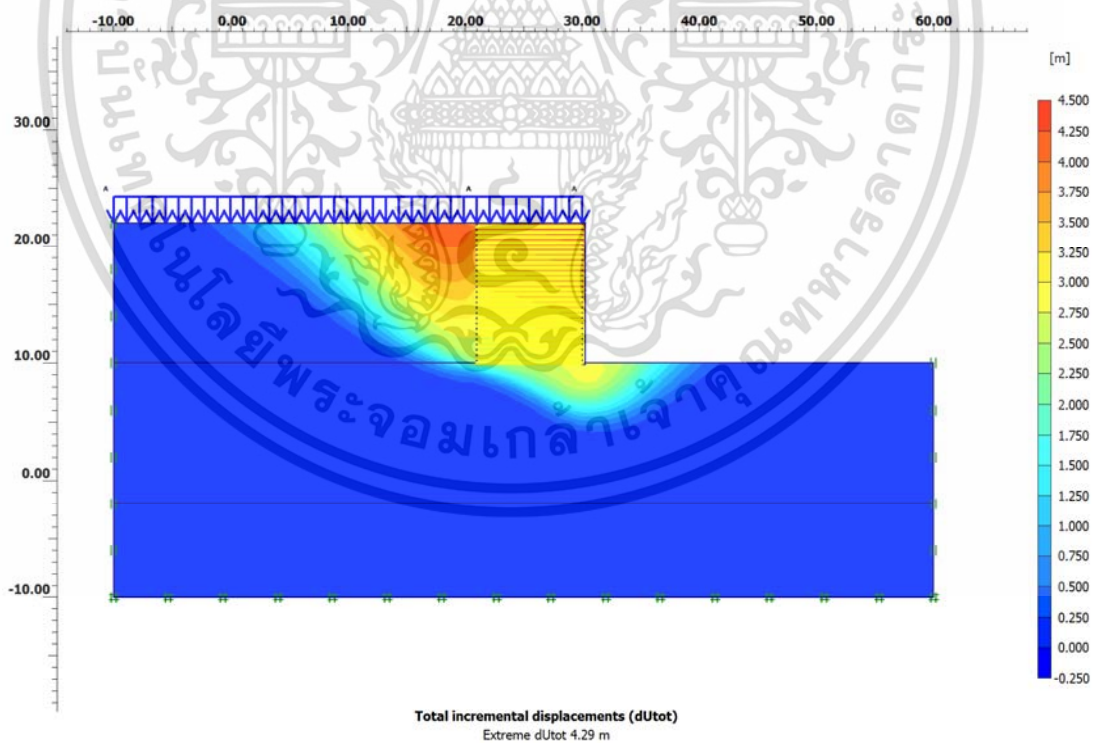


รูปที่ 3.20 ค่า Safety Analysis ของกำแพงเสริมแรงด้านเดียวแบบไม่ลู่เข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

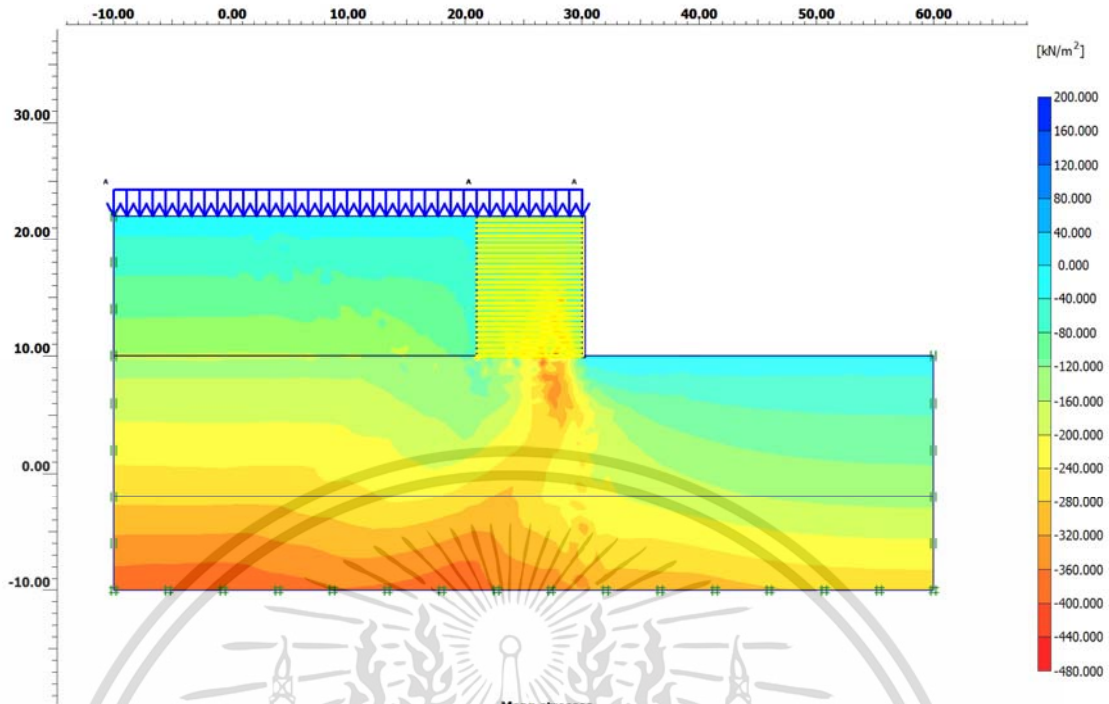


รูปที่ 3.21 ค่า total incremental displacement ของกำแพงเสริมแรงด้านเดียวแบบลู่เข้า

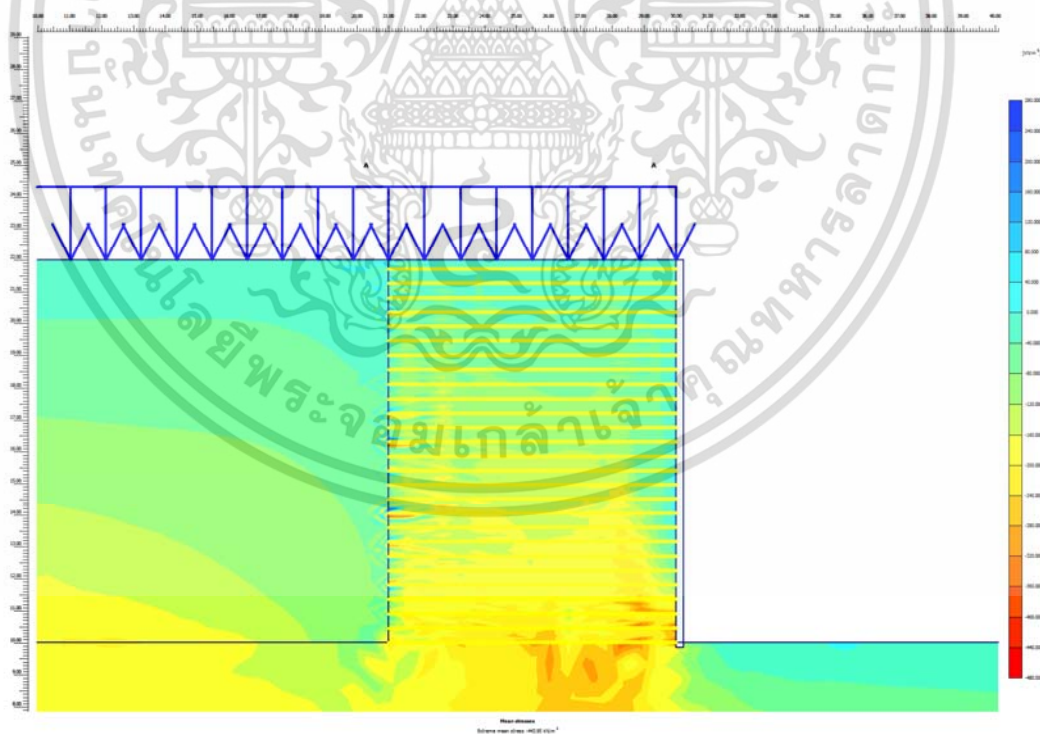


รูปที่ 3.22 ค่า total incremental displacement ของกำแพงเสริมแรงด้านเดียวแบบไม่ลู่เข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 ค่าความเค้นรวมของกำแพงเสริมแรงด้านเดียวแบบลู่เข้า



รูปที่ 3.24 ค่าความเค้นรวมของกำแพงเสริมแรงด้านเดียวแบบไม่ลู่เข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 ค่าแรงดึงสูงสุดของตาข่ายเสริมกำลังเปรียบเทียบกับค่าแรงแนวแกนจาก FEM ของ
กำแพงกันดินเสริมแรงด้านเดียว

ชั้นที่ Grid Layer Number	ระยะห่างชั้น Geogrid (m)	ความสูง วัดจากบน (m)	ความสูง วัดจากฐาน (m)	Tensile Strength (kN/m)		Extreme Axial Force (Geogrid) (kN/m)		
				FHWA (ตารางที่ 3.1)	Working Ta	Working	Safety Analysis	
							แบบลู่เข้า	แบบไม่ลู่เข้า
1	0.30	0.30	11.70	3.22	20	11.90	35.11	53.26
2	0.45	0.75	11.25	4.63	20	11.19	31.42	27.75
3	0.45	1.20	10.80	5.75	20	10.12	26.13	25.25
4	0.45	1.65	10.35	6.87	20	10.68	30.29	31.22
5	0.45	2.10	9.90	7.99	20	11.15	31.74	33.46
6	0.45	2.55	9.45	9.11	20	11.85	29.61	31.97
7	0.45	3.00	9.00	10.23	20	12.56	28.57	32.74
8	0.45	3.45	8.55	11.35	20	13.31	32.85	31.88
9	0.45	3.90	8.10	12.47	20	14.07	40.18	48.72
10	0.45	4.35	7.65	13.59	20	15.36	33.77	34.25
11	0.45	4.80	7.20	14.71	20	18.09	39.89	41.89
12	0.45	5.25	6.75	15.83	20	16.80	38.90	39.20
13	0.45	5.70	6.30	16.95	20	17.35	43.42	38.67
14	0.45	6.15	5.85	18.07	20	17.41	82.50	47.81
15	0.45	6.60	5.40	19.19	20	16.62	58.18	46.21
16	0.45	7.05	4.95	20.31	40	30.46	109.82	73.28
17	0.45	7.50	4.50	21.43	40	29.86	75.89	50.42
18	0.45	7.95	4.05	22.55	40	31.04	82.99	67.02
19	0.45	8.40	3.60	23.67	40	30.41	56.43	77.98
20	0.45	8.85	3.15	24.79	40	31.34	73.93	64.27
21	0.45	9.30	2.70	25.91	40	32.62	76.09	66.26
22	0.45	9.75	2.25	27.03	40	34.85	77.70	70.06
23	0.45	10.20	1.80	28.15	40	36.87	99.61	85.46
24	0.45	10.65	1.35	29.27	40	37.17	76.07	100.02
25	0.45	11.10	0.90	30.39	40	38.10	95.69	115.53
26	0.45	11.55	0.45	31.51	40	40.13	142.02	117.25
27	0.45	12.00	0.00	27.19	40	44.59	180.70	237.78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 ผลวิเคราะห์ FEM ของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน (back-to-back walls) กว้าง 15 เมตร แสดงตาข่ายรูปทรงการเสียรูป (deformed mesh) ในรูปที่ 3.25 และการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นทั้งหมด (total incremental displacement) ในรูปที่ 3.26 โดยมีค่าการเคลื่อนตัวทั้งหมดที่ 0.59857 เมตร โดยค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ฐานมีค่าระหว่าง 0.24 ถึง 0.28 เมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ยอมให้ที่ 0.162 เมตร ใน 3.4.2 ค่าหน่วยความเค้นรวม (total stresses) แสดงดังรูปที่ 3.27 โดยมีค่าหน่วยแรงสูงสุดที่ 431.03 kN/m² ขณะที่ค่าความเค้นสูงสุด (maximum bearing pressure) ของดินฐานรากที่คำนวณใน 3.3.2.3 หรือ $\sigma_r = 320.9$ kN/m²

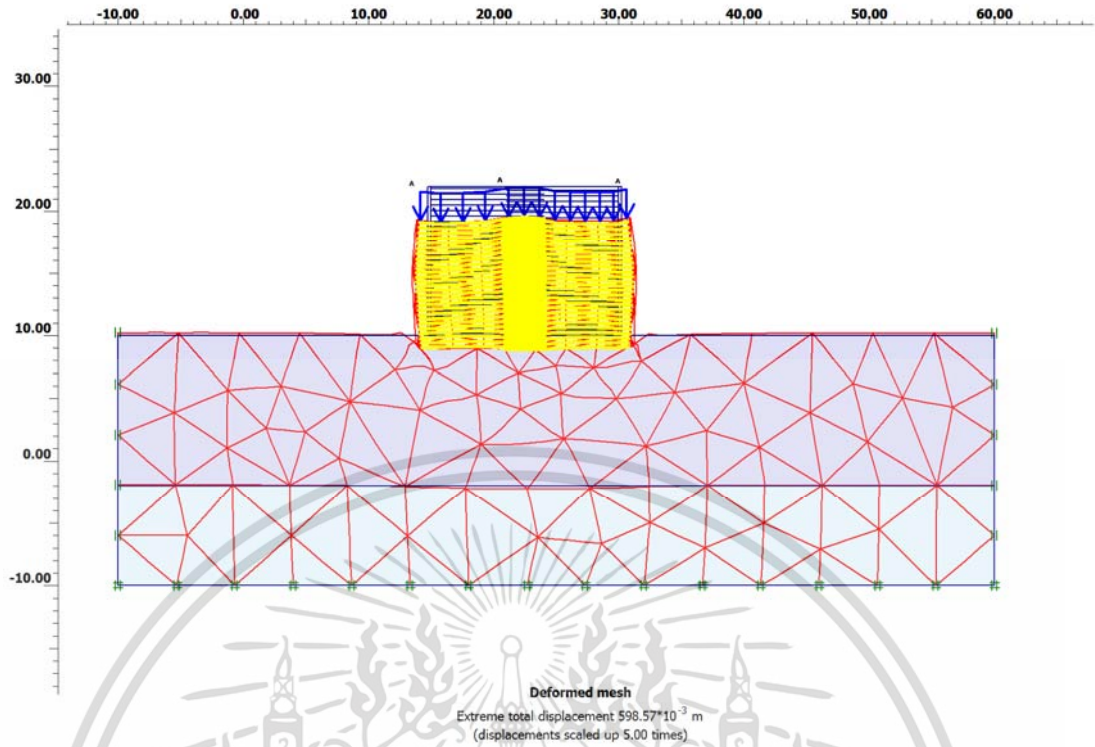
ในส่วนของเสถียรภาพภายใน (internal stability) ผลของค่าหน่วยแรงแนวแกน (axial force) ของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านอิสระ ในส่วนของกำแพงด้านขวาแสดงในรูปที่ 3.28 และในส่วนของกำแพงด้านซ้าย แสดงในรูปที่ 3.29 ที่ชั้นตาข่ายเสริมแรง (geogrid) ถูกยกขึ้นสูงกว่าชั้นตาข่ายเสริมแรงด้านขวา 15 เซนติเมตร เพื่อให้มีดินเสริมกำลังอย่างน้อย 7.5 เซนติเมตร เพื่อให้เกิดแรงเสียดทานที่เพียงพอระหว่างดินถมและตาข่ายเสริมแรงตาม FHWA-NHI-00-043 หน้า 333 โดยที่ค่าหน่วยแรงแนวแกนขีดสุด (extreme axial force) ของตาข่ายเสริมแรงของกำแพงกันดินแบบสองด้านทั้งด้านซ้ายและด้านขวา ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าหน่วยแรงแนวแกนขีดสุด (extreme axial force) ของตาข่ายเสริมแรงทั้งด้านซ้ายและด้านขวามีค่าไม่เกินค่าที่ออกแบบ

ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพโดยรวม (global stability FS) ของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านไม่อิสระ แสดงในรูปที่ 3.30 และรูปที่ 3.32 โดยที่ใช้การวิเคราะห์แบบ safety analysis หรือ วิธี phi/c reduction ของ Plaxis 2016 ดัง (3.7) ค่า global stability FS จาก FEM ของกำแพงแบบสองด้านที่ใช้การวิเคราะห์ safety analysis แบบลู่อ้อมมีค่า global stability FS ที่ 0.021 แสดงในรูปที่ 3.32 ที่ค่า total incremental displacement แสดงในรูปที่ 3.33 จะเห็นว่าวงวิบัติเกิดขึ้นที่วัสดุผิวหน้า ขณะที่ safety analysis แบบไม่ลู่อ้อมมีค่า global stability FS ที่ 2.235 แสดงในรูปที่ 3.34 ที่ค่า total incremental displacement แสดงในรูปที่ 3.35 จะเห็นว่าวงวิบัติเกิดขึ้นที่ฐานรากซึ่งค่า global stability FS ที่ 2.304 และมีค่าน้อยกว่าค่า bearing capacity FS ที่ 2.5 ตาม FHWA-NHI-00-043 ในรูปที่ 2.12

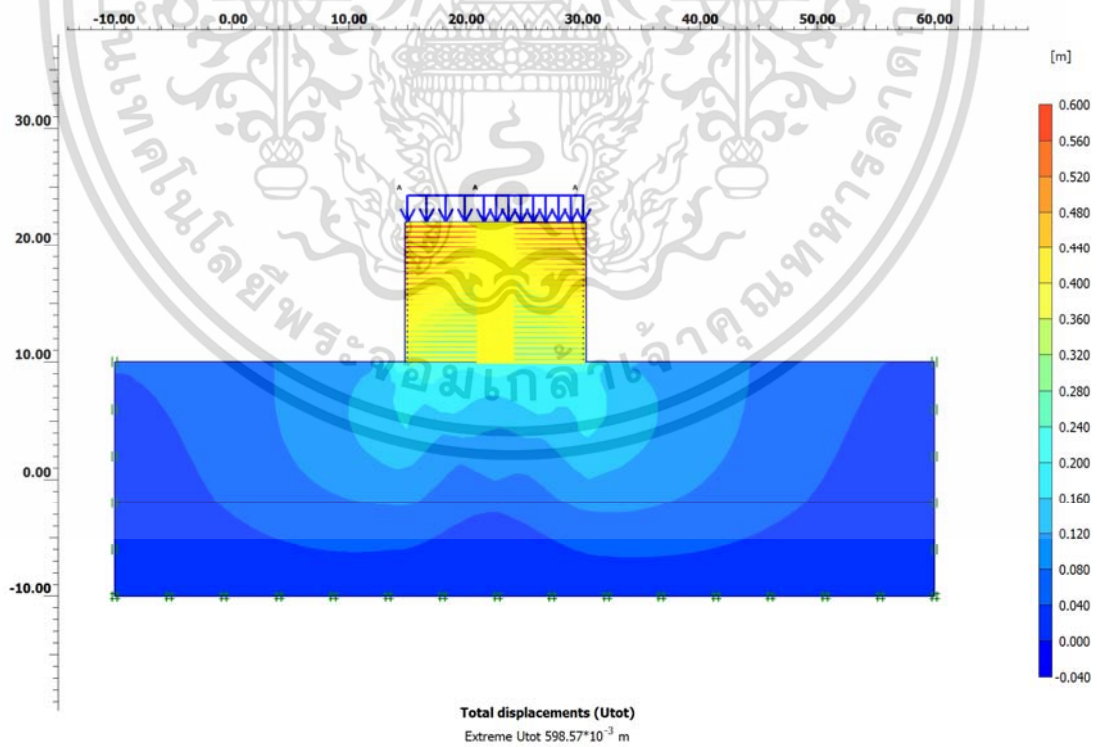
ตารางที่ 3.7 ค่าแรงดึงสูงสุดของตาข่ายเสริมกำลังเปรียบเทียบกับค่าแรงแนวแกนจาก FEM ของ
กำแพงกันดินเสริมแรงสองด้าน

ชั้นที่ Grid Layer Number	ความสูง วัดจากฐาน (m)	Tensile Strength (kN/m)		Working Extreme Axial Force (Geogrid) (kN/m)		
		FHWA (ตารางที่ 3.1)	Working Ta	กำแพงด้านเดียว	กำแพงกันดินเสริมแรงสองด้าน	
					ด้านซ้าย	ด้านขวา
1	11.70	3.22	20	11.90	12.35	13.30
2	11.25	4.63	20	11.19	12.99	13.28
3	10.80	5.75	20	10.12	12.88	13.34
4	10.35	6.87	20	10.68	13.04	13.44
5	9.90	7.99	20	11.15	13.18	13.60
6	9.45	9.11	20	11.85	13.24	13.72
7	9.00	10.23	20	12.56	13.20	13.74
8	8.55	11.35	20	13.31	13.06	13.66
9	8.10	12.47	20	14.07	13.53	13.65
10	7.65	13.59	20	15.36	13.98	14.11
11	7.20	14.71	20	18.09	14.45	14.72
12	6.75	15.83	20	16.80	15.29	15.41
13	6.30	16.95	20	17.35	15.81	16.06
14	5.85	18.07	20	17.41	15.88	15.91
15	5.40	19.19	20	16.62	14.87	14.75
16	4.95	20.31	40	30.46	26.92	26.88
17	4.50	21.43	40	29.86	27.31	26.35
18	4.05	22.55	40	31.04	26.25	26.36
19	3.60	23.67	40	30.41	26.10	25.23
20	3.15	24.79	40	31.34	25.67	24.91
21	2.70	25.91	40	32.62	26.20	25.93
22	2.25	27.03	40	34.85	27.14	27.09
23	1.80	28.15	40	36.87	28.06	27.28
24	1.35	29.27	40	37.17	26.64	25.26
25	0.90	30.39	40	38.10	23.96	23.55
26	0.45	31.51	40	40.13	22.60	27.46
27	0.00	27.19	40	44.59	26.11	31.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

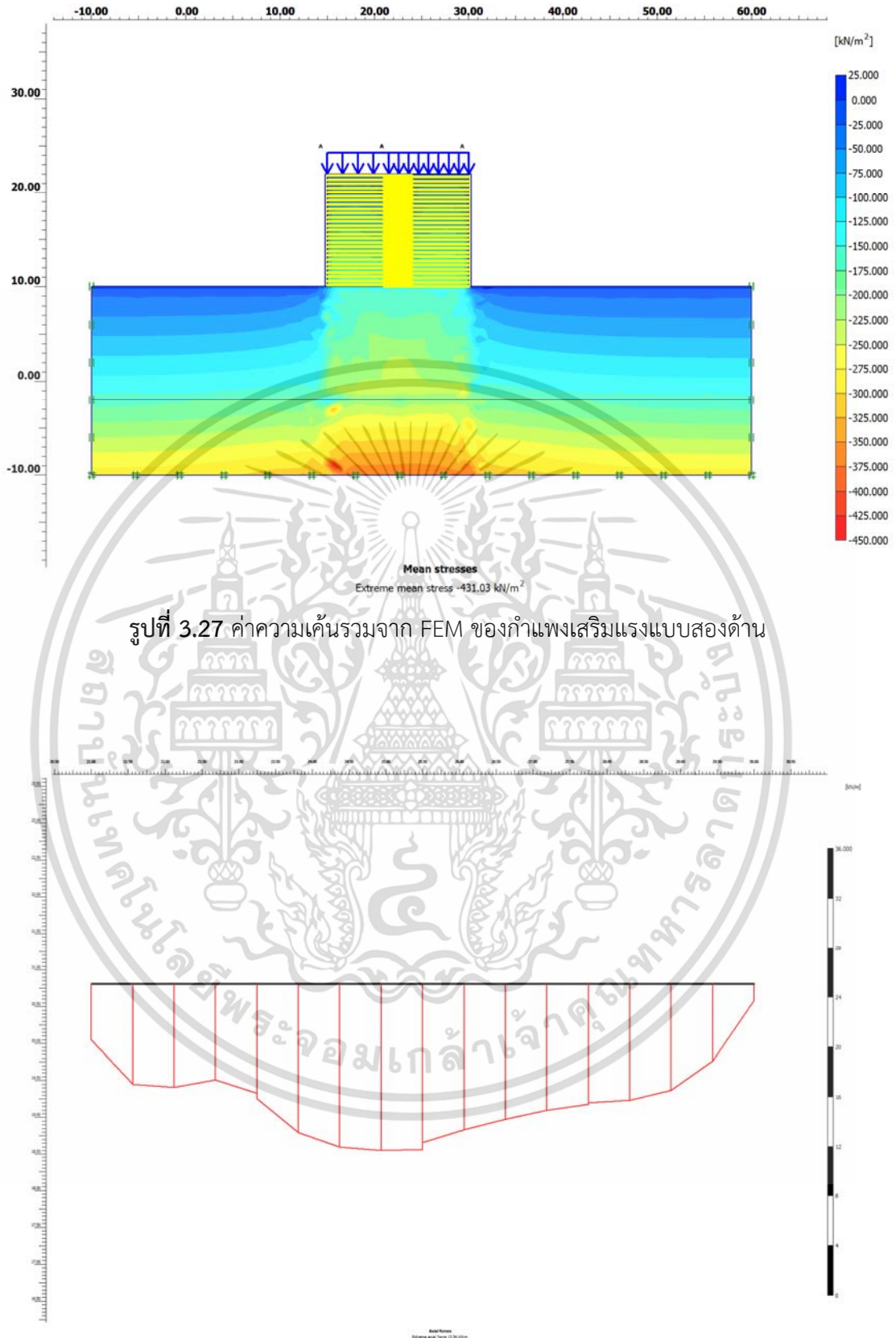


รูปที่ 3.25 ตาข่ายรูปทรงการเสียรูปจาก FEM ของกำแพงเสริมแรงแบบสองชั้น



รูปที่ 3.26 ค่าการเคลื่อนตัวทั้งหมดจาก FEM ของกำแพงเสริมแรงแบบสองชั้น

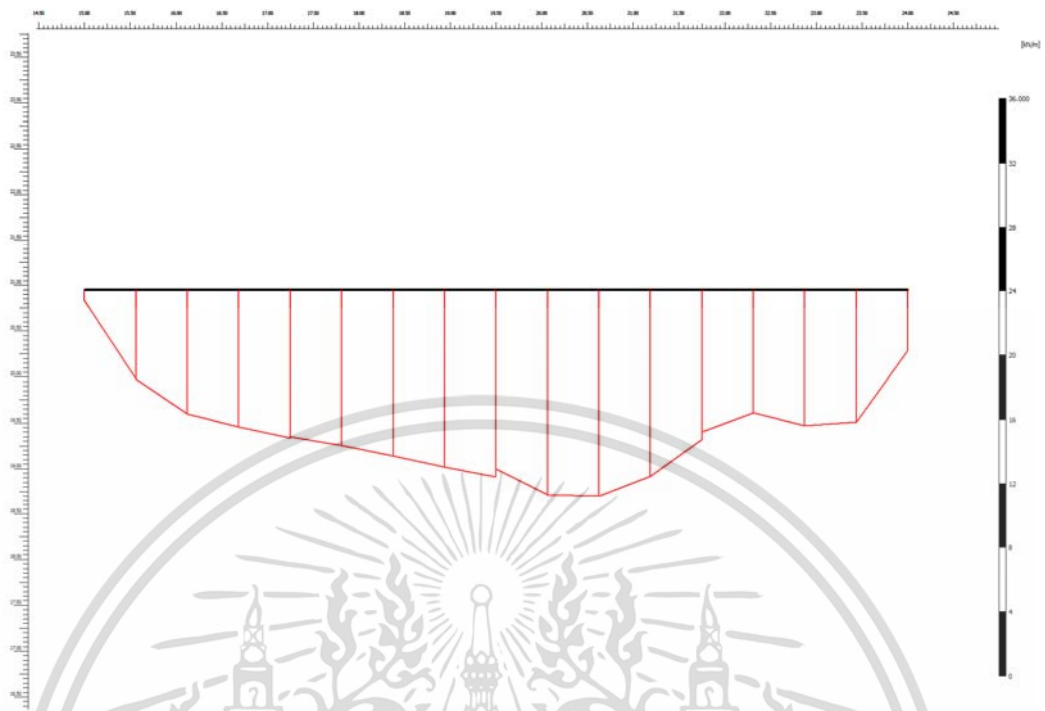
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



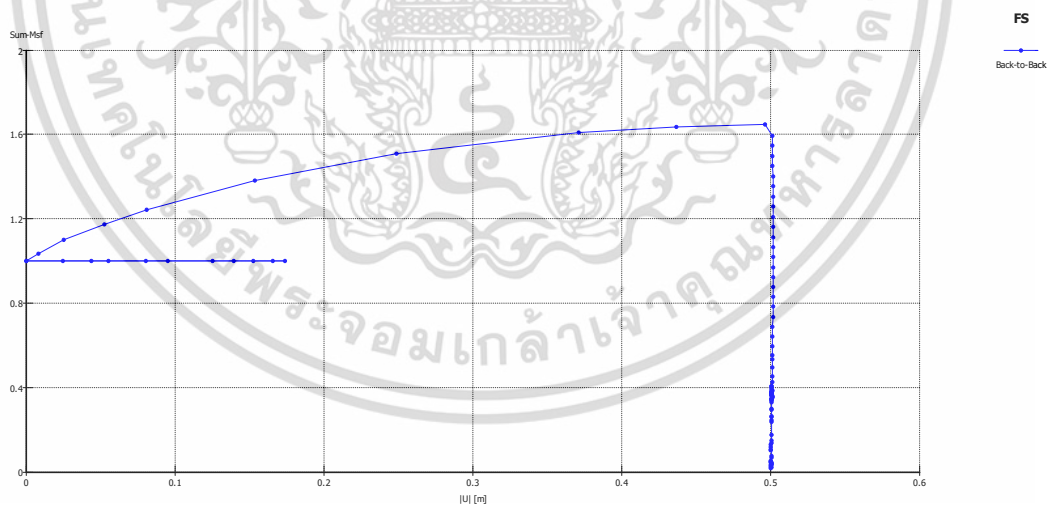
รูปที่ 3.27 ค่าความเค้นรวมจาก FEM ของกำแพงเสริมแรงแบบสองด้าน

รูปที่ 3.28 แรงแนวแกนของตาข่ายเสริมแรงชั้นที่ 3 ในกำแพงเสริมแรงแบบสองด้านทางด้านขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

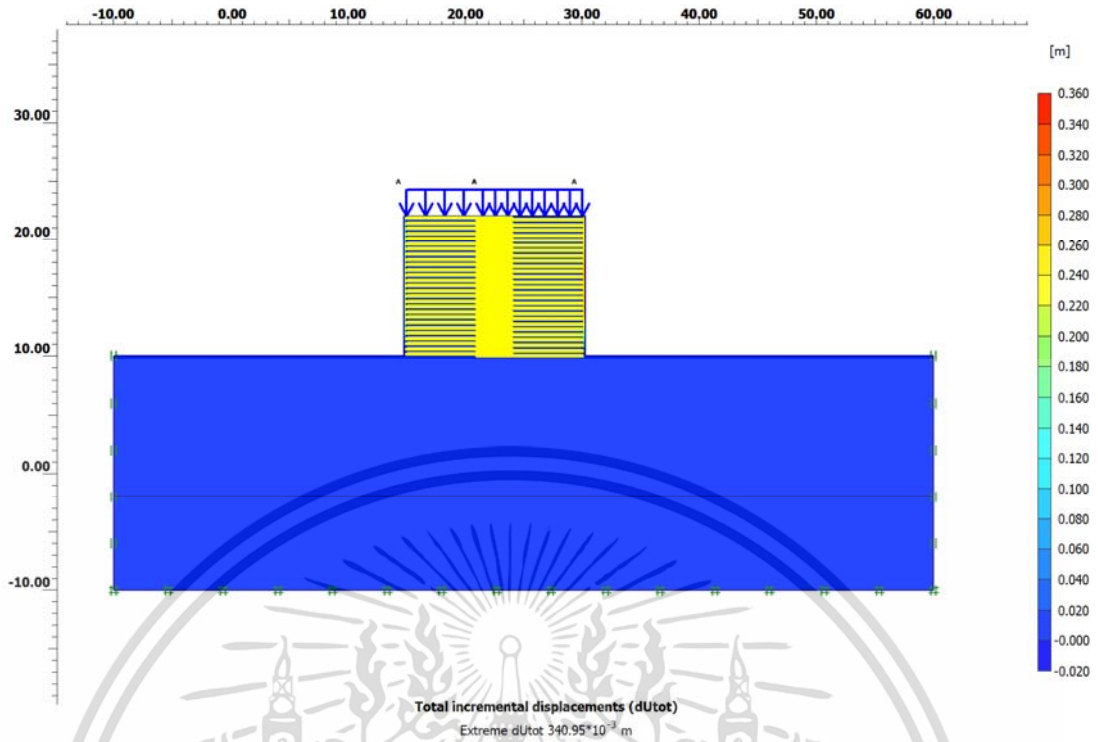


รูปที่ 3.29 แรงแนวแกนของตาข่ายเสริมแรงชั้นที่ 3 ในกำแพงเสริมแรงแบบสองด้านทางด้านซ้าย

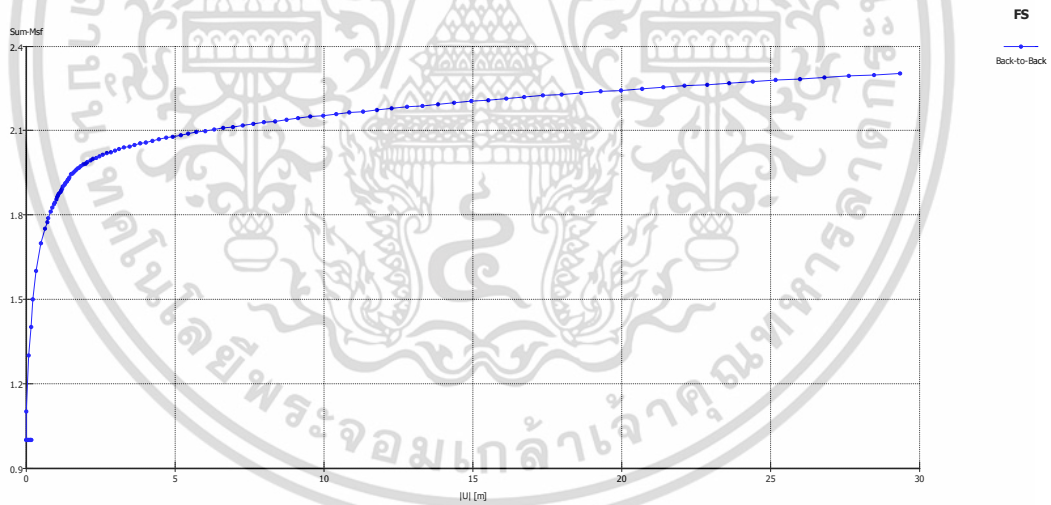


รูปที่ 3.30 ค่า Safety Analysis ของกำแพงเสริมแรงสองด้านแบบลู่วิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

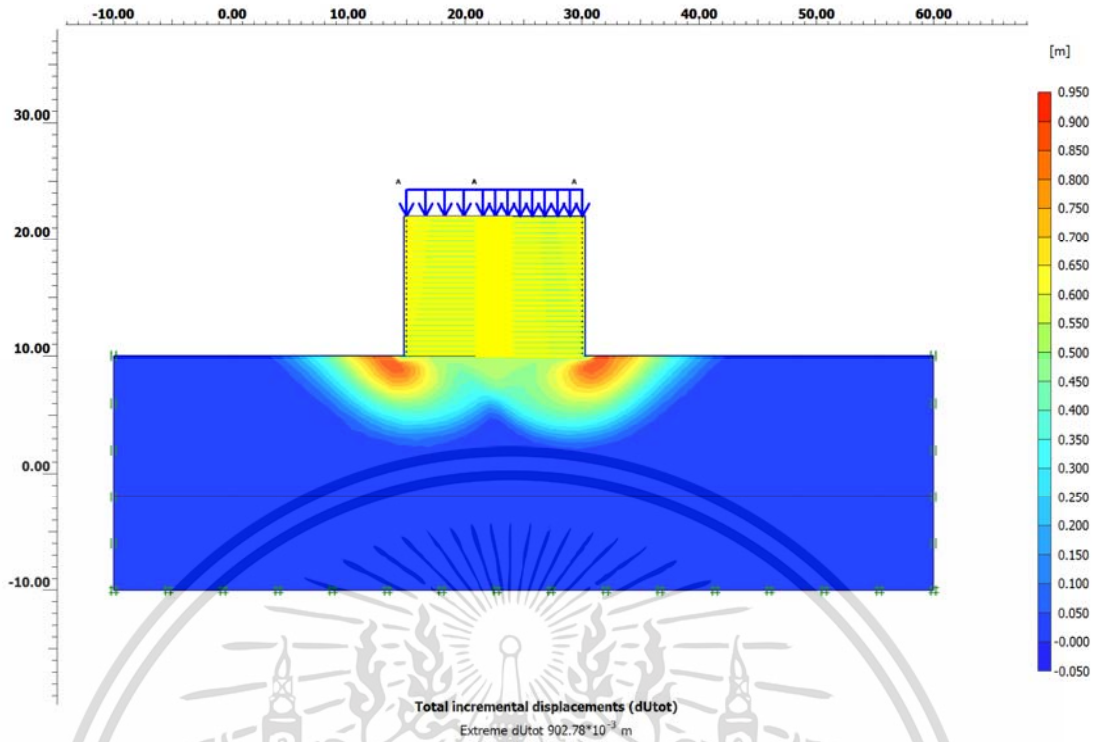


รูปที่ 3.31 ค่า total incremental displacement ของกำแพงสองด้านแบบลู่เข้า



รูปที่ 3.32 ค่า Safety Analysis ของกำแพงเสริมแรงสองด้านแบบไม่ลู่เข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.33 ค่า total incremental displacement ของกำแพงสองด้านแบบไม่ลู่เข้า

3.6 สรุปผล

การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีความยุ่งยากในการสมมุติค่าพารามิเตอร์ต่างๆเช่นค่าโมดูลัสของดินและวัสดุผิวหน้าและค่า stiffness หรือค่า EA ของตาข่ายเสริมแรง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเสนอวิธีการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ FEM โดยเปรียบเทียบกับผลการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้นทั้งหมด (total incremental displacement) จากการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับการเคลื่อนตัวจากสูตรของ FHWA-RD-89-043 ใน (2.2)

จากการเปรียบเทียบค่าเสถียรภาพโดยรวมโดยใช้วิธีสมดุลขีดจำกัดและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพโดยรวม (global stability FS) ของกำแพงกันดินเสริมแรงด้านเดียวและกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านไม่อิสระ แสดงในตารางที่ 3.8 จะเห็นว่า

- วิธีสมดุลขีดจำกัด (limit equilibrium method หรือ LEM) ระบุค่าเสถียรภาพโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน (back-to-back walls) ไม่อิสระ ไม่ถูกต้อง โดยมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพโดยรวม (global stability FS) ลดลงจาก 1.534 เป็น 1.052 ทั้งๆที่แรงดันดินด้านข้างลดลงตาม FHWA-NHI-00-043 หน้า 178 ดังรูปที่ 2.20
- วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method หรือ FEM) ที่ใช้การหาค่า global stability แบบลู่เข้า ที่ควบคุมการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักในการหาวงวิบัติ ยังให้ค่าเสถียรภาพโดยรวม (global stability) ไม่ถูกต้อง คือลดลงจาก 1.166 เป็น 0.021 ทั้งๆที่แรงดันดินด้านข้างที่ลดลง โดยเกิดวงวิบัติที่วัสดุผิวหน้าตามรูปที่ 3.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method หรือ FEM) ที่ใช้การหาค่า global stability แบบไม่ลู่เข้า ที่ควบคุมการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนตัวในการหาวิบัติ ให้ค่าเสถียรภาพโดยรวม (global stability) ที่ถูกต้องมากกว่า คือเพิ่มขึ้นจาก 1.679 เป็น 2.304 ตามแรงดันดินด้านข้างที่ลดลง โดยวงวิบัติเกิดขึ้นที่ดินฐานราก ตามรูปที่ 3.33 ซึ่งมีรูปร่างใกล้เคียงกับการเคลื่อนตัวทั้งหมดในรูปที่ 3.26

ตารางที่ 3.8 เปรียบเทียบค่าเสถียรภาพโดยรวมระหว่าง LEM และ FEM

Global Stability FS	วิธีสมดุลขีดจำกัด	วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	
		FS แบบลู่เข้า	FS แบบไม่ลู่เข้า
กำแพงกันดินเสริมแรงด้านเดียว	1.534	1.170	1.686
กำแพงกันดินเสริมแรงสองด้าน L/H = 0.7	1.052	0.021	2.304

กล่าวโดยสรุปแล้ว ผู้ออกแบบควรตรวจสอบค่าเสถียรภาพโดยรวมโดยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ควบคู่ไปกับการใช้วิธีสมดุลขีดจำกัด

บทที่ 4

กำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน

บทนี้แสดงส่วนออกแบบและวิเคราะห์กำแพงกันดินเสริมแรง (mechanically stabilized earth wall หรือ MSE wall หรือ MSEW) แบบซ้อนทับกัน หรือที่เรียกว่า superimposed walls ที่เป็นแบบ modular block wall หรือ MBW ที่ใช้อิฐสำเร็จโมดูลาร์บล็อกเป็นวัสดุผิวหน้า (facing) ร่วมกับวัสดุเสริมแรง (reinforcement) ประเภทตาข่ายเสริมแรง (geogrid) โดยระบุเกณฑ์การออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกันใน 4.1 ใน 4.2 ระบุตัวอย่างการคำนวณออกแบบและวิเคราะห์ของโครงการกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน ใน 4.3 แสดงการตรวจสอบเสถียรภาพของกำแพงกันดินเสริมแรงชั้นล่างที่รวมเสถียรภาพภายใน เสถียรภาพภายนอก และเสถียรภาพโดยรวม 4.4 เป็นส่วนเพิ่มเติมการคำนวณเสถียรภาพของกำแพงชั้นบนเพื่อความสมบูรณ์ของเนื้อหาในส่วนการออกแบบเพื่อเพื่อใช้เปรียบเทียบกับการออกแบบกำแพงชั้นล่างใน 4.3 และสรุปผลของบทนี้ใน 4.5

4.1 เกณฑ์การออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน

ขณะที่มาตรฐาน FHWA-NHI-00-043 มิได้แสดงรายละเอียดในการออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนกัน (superimposed) มาตรฐาน FHWA/TX-05/0-4485-1 มีความไม่ชัดเจนโดยมิได้แสดงรายละเอียดการคำนวณทั้งหมดในการออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน โดยเฉพาะในเรื่องการตรวจสอบเสถียรภาพโดยรวม (global stability checking) และ การตรวจสอบเสถียรภาพภายนอก (external stability checking)

ในการออกแบบ superimposed walls ตามมาตรฐาน FHWA-NHI-00-043 นั้น ของกำแพงสองชั้น (two-tier wall) นั้น กำหนดให้

กำแพงชั้นบน (upper wall) มีความสูง H_1 และ (geogrid) ยาว L_1 โดย $L_1 \geq 0.7H_1$

กำแพงชั้นล่าง (lower wall) มีความสูง H_2 และ geogrid ยาว L_2 โดย $L_2 \geq 0.6H$

โดยที่ $H = H_1 + H_2$

D คือระยะเอียง (offsets) เป็นระยะห่างระหว่างกำแพงชั้นบนและกำแพงชั้นล่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.1

กรณีที่ 1 กำแพงเดี่ยว สูง $H = H_1 + H_2$ ถ้า $D \leq (H_1 + H_2)/20$ (4.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับ (superimposed walls) สามารถคำนวณเป็นกำแพงชั้นเดียว (single wall) ที่มีความสูง $H = H_1 + H_2$ และกำหนดให้ค่าความเค้น (stress) ของ upper wall ถ่ายลงไปสู่ lower wall ทั้งหมด

กรณีที่ 2 กำแพงอิสระ ถ้า $D > H_2 \tan(90^\circ - \phi)$ (4.2)

จะพิจารณากำแพงชั้นบนเป็นกำแพงอิสระ (independent walls) และสามารถคำนวณแยกกำแพงชั้นบนออกจากกำแพงชั้นล่างและไม่ต้องพิจารณาน้ำหนักจากกำแพงชั้นบนลงกำแพงชั้นล่าง โดยที่ ϕ คือค่าแรงเสียดทานภายในของดิน (internal soil angle friction)

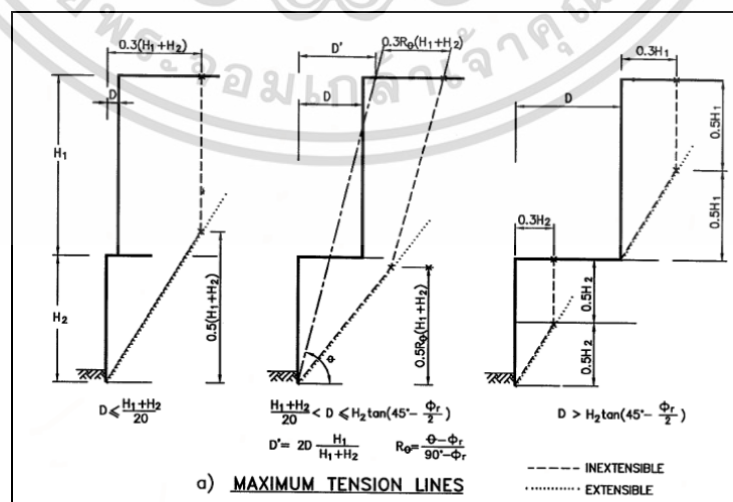
กรณีที่ 3 กำแพงแบบซ้อนทับกัน ถ้า $(H_1 + H_2)/20 < D \leq H_2 \tan(90^\circ - \phi)$ (4.3)

ซึ่งกรณีที่ 3 นี้จัดเป็นกำแพงแบบซ้อนทับกัน (superimposed walls) กำหนดความเค้นแนวตั้ง (vertical stress) จากชั้นบนลงชั้นล่าง แสดงดังในรูปที่ 4.2 ดังนี้คือ

กรณีที่ 1: ถ้า $D \leq H_2 \tan(45^\circ - \phi/2)$, vertical stress $\sigma_1 = \gamma H_1$ (4.4)

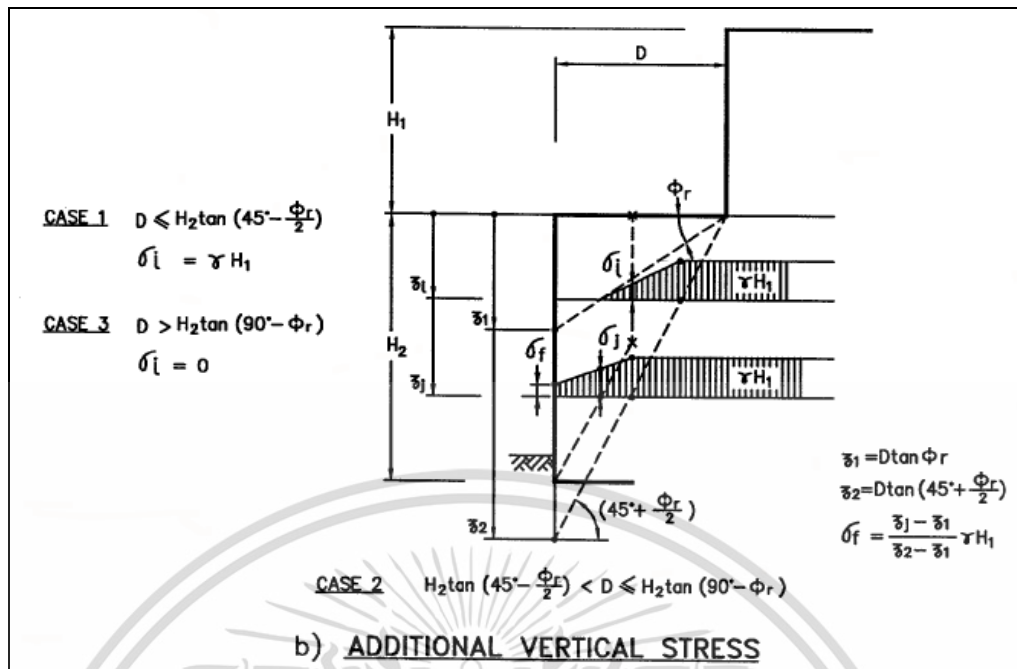
กรณีที่ 2: ถ้า $(H_1 + H_2)/20 < D \leq H_2 \tan(45^\circ - \phi/2)$, vertical stress จะประมาณค่า (interpolating) ตามพื้นที่ (4.5)

กรณีที่ 3: ถ้า $D > H_2 \tan(90^\circ - \phi)$, vertical stress $\sigma_1 = 0$ (4.6)



รูปที่ 4.1 ระยะเยื้อง (D) ของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน (FHWA-NHI-00-043)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ความเค้นที่ถ่ายลงกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน (FHWA-NHI-00-043)

โดยที่

σ_f คือค่าความเค้นที่ผิวกำแพง (face) ที่ชั้นวัสดุเสริมกำลัง i จากกำแพงชั้นบนกระทำต่อชั้นล่าง

σ_i คือค่าความเค้นที่ตำแหน่งใดๆจากผิวที่ชั้นวัสดุเสริมกำลัง i จากกำแพงชั้นบนกระทำต่อชั้นล่าง

z_1, z_2 คือความลึกที่ชั้นวัสดุเสริมกำลัง i

4.2 ตัวอย่างโครงการในประเทศไทย

ตัวอย่างโครงการหนึ่งในประเทศไทยเป็นกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน (superimposed walls) ซึ่งกำแพงด้านบน (H_1) สูง 1.8 เมตร และกำแพงด้านล่าง (H_2) สูง 3.6 เมตร ระยะ offset D อยู่ที่ 2 เมตร โดยมีน้ำหนักบรรทุกทุกที่ 10 kN/m^2 และระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ -6 เมตร โดยจะใช้ตาข่ายเสริมแรง (geogrid) เป็นวัสดุเสริมแรงและใช้อิฐสำเร็จโมดูลาร์บล็อก เป็นวัสดุผิวหน้า (facing) จึงจัดเป็นกำแพงแบบ modular block wall หรือ MBW

ในกรณีนี้ กำแพงด้านบนมีระยะ offset (D) ที่ 2 เมตรและ $H = H_1 + H_2 = 1.8 + 3.6 = 5.4$ และ $D = 2 > (H_1 + H_2)/20 = (1.8 + 3.6)/20 = 5.4/20 = 0.27$ ไม่เป็น single wall ตาม (4.1)

$D = 2 < H_2 \tan(90^\circ - \phi_p) = 3.6 \tan(90 - 32) = 5.76$ ไม่เป็น independent wall ตาม (4.2)

ดังนั้นจะพิจารณาเป็น superimposed walls

ตาข่ายเสริมแรง geogrid กำแพงส่วนบน (L_1) ยาว 2 เมตรซึ่ง $\frac{L_1}{H} = \frac{2}{5.4} = 1.11 > 0.7$ OK

ตาข่ายเสริมแรง geogrid กำแพงส่วนล่าง (L_2) ยาว 4 เมตร

ซึ่ง $\frac{L_2}{H} = \frac{4}{5.4} = 0.74 > 0.6$ OK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพารามิเตอร์ของดินจะมีค่าความหนาแน่น (density, γ) , ความเชื่อมแน่น (cohesion, c) และมุมเสียดทานภายใน (internal friction angle, ϕ) แสดง ดังนี้

ดินถม (reinforced soil, backfill) มีค่า $\gamma_b = 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$, $c_b = 0.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$, $\phi_b = 32^\circ$

ดินเดิม (retained soil) มีค่า $\gamma_r = 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$, $c_r = 0.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$, $\phi_r = 28^\circ$

ดินฐานราก (foundation soil) มีค่า $\gamma_f = 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$, $c_f = 0.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$, $\phi_f = 30^\circ$

ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างเชิงรุก (active earth pressure coefficient หรือ K_a) เป็นไปตามทฤษฎีแรงดันดินของแรนคิน (Rankine earth pressure theory) (Bhudu 2011) ที่

$$K_a = \tan^2(45^\circ - \phi/2)$$

ดินถม (reinforced soil), $K_{ab} = \tan^2(45^\circ - \phi_b/2) = \tan^2(45^\circ - 32/2) = 0.307$

ดินเดิม (retained soil) $K_{ar} = \tan^2(45^\circ - \phi_r/2) = \tan^2(45^\circ - 28/2) = 0.361$

4.3 การตรวจสอบเสถียรภาพของกำแพงกันดินเสริมแรงชั้นล่าง

เสถียรภาพของกำแพงกันดินเสริมแรงจะเป็นการตรวจสอบในด้านเสถียรภาพภายนอก (external stability) ใน 4.3.1 เสถียรภาพภายใน (internal stability) ใน 4.3.2 และเสถียรภาพโดยรวม (global stability) ใน 4.3.3 ในส่วนเสถียรภาพภายนอกจะพิจารณาเสถียรภาพของกำแพงกันดินเสริมแรงเสมือนเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (rigid body) เช่นเป็นกำแพงกันดินคอนกรีต จากน้ำหนัก (load) ใน 4.3.1.1 สามารถหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (factors of safety, FS) ด้านการลื่นไถล (sliding) ใน 4.3.1.2 การหมุนคว่ำ (overturning) หรือการเยื้องศูนย์ (eccentricity) ใน 4.3.1.3 และการแบกทาน (bearing capacity) ใน 4.3.1.4 ใน 4.3.2 เป็นส่วนเสถียรภาพภายในที่พิจารณาอัตราส่วนความปลอดภัยด้านการฉีกขาด (rupture) ของวัสดุเสริมกำลัง (reinforcing elements) และการดึงออก (pullout) ของวัสดุเสริมกำลังหลุดออกจากดิน ใน 4.3.3 เป็นส่วนของเสถียรภาพโดยรวม จะเกี่ยวข้องกับเสถียรภาพเชิงลาด (slope stability) โดยจะเป็นการหาวงวิบัติ (slip surface) ที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่น้อยที่สุดซึ่งอาจจะอยู่ภายในหรือภายนอกหรือบางส่วน ของเสถียรภาพของกำแพงกันดินเสริมแรง ซึ่งในส่วนนี้จะแสดงตัวอย่างการคำนวณเสถียรภาพเฉพาะส่วนกำแพงชั้นล่าง

4.3.1 การตรวจสอบเสถียรภาพภายนอก (External Stability Checking)

ในส่วนนี้จะประกอบด้วย น้ำหนักกระทำใน 3.3.1.1 การไถล ใน 3.3.1.2 การเยื้องศูนย์ ใน 3.3.1.3 และ ความสามารถในการแบกทานที่ฐาน ใน 3.3.1.4

4.3.1.1 น้ำหนักกระทำ (Loads)

แรงแนวตั้งจากกำแพงชั้นบน (Vertical upper fill) $V_1 = \gamma_b H_1 L_1 = (18)(1.8)(2) = 64.8 \text{ kN/m}$

แรงแนวตั้งจากกำแพงชั้นล่าง (Vertical lower fill) $V_2 = \gamma_b H_2 L_2 = (18)(3.6)(4) = 259.2 \text{ kN/m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงแนวตั้งจากน้ำหนักรบรรทุก (Vertical surcharge) $V_2 = q(L_2 - D) = (10)(4 - 2) = 20 \text{ kN/m}$

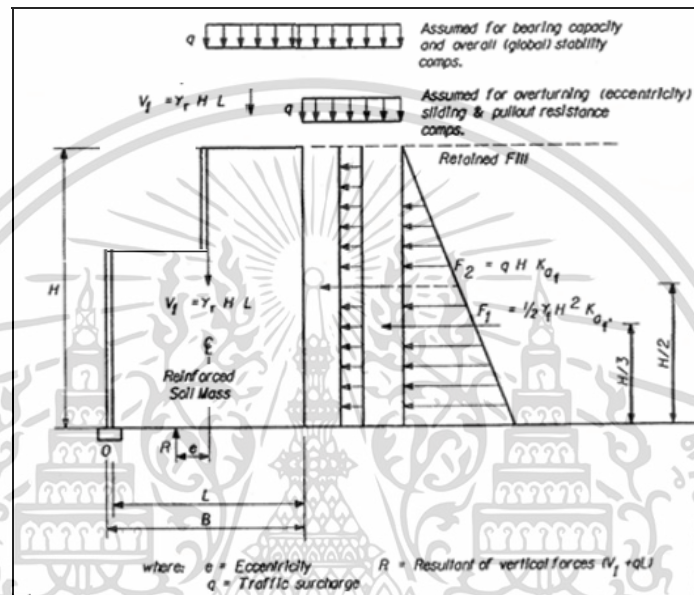
แรงแนวราบจากดิน (Horizontal retained soil)

$$F_1 = \frac{1}{2} \gamma_r H^2 K_{ar} = 0.5(18)(5.4^2)(0.361) = 94.7 \text{ kN/m}$$

แรงแนวราบจากน้ำหนักรบรรทุก (Horizontal surcharge)

$$F_2 = qHK_{ar} = (10)(5.4)(0.361) = 19.5 \text{ kN/m}$$

น้ำหนักกระทำและโมเมนต์มาจากมาตรฐาน FHWA-NHI-00-043 แสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 น้ำหนักกระทำต่อกำแพงซ้อนทับกันชั้นล่าง (ดัดแปลงจาก FHWA-NHI-00-043)

4.3.1.2 การไถล (Sliding)

แรงต้านแนวราบ (Horizontal resisting force)

$$F_R = (V_1 + V_2) \tan(\min\{\phi_r, \phi_s\}) = (259.2 + 64.8) \tan(\min\{32, 28\}) = 172.3 \text{ kN/m}$$

แรงดันแนวราบ (Horizontal driving force) $F_d = F_1 + F_2 = 94.7 + 19.5 = 114.2 \text{ kN/m}$

อัตราส่วนความปลอดภัยต้านการไถล $FS_{\text{sliding}} = F_R / F_d = 172.3 / 114.2 = 1.51 > 1.5 \text{ OK}$

4.3.1.3 การเยื้องศูนย์ (Eccentricity)

โมเมนต์รอบจุด O ของกำแพงด้านล่างแสดงในรูปที่ 4.3

โมเมนต์หมุน Overturning moment,

$$M_o = \frac{F_1 H}{3} + \frac{F_2 H}{2} = (94.7)(5.4/3) + (19.5)(5.4/2) = 223.2 \text{ kN-m/m}$$

โมเมนต์ต้าน Resisting moment,

$$M_{ro} = V_1(L_1/2 + D) + V_2(L_2/2) = (64.8)(2/2 + 2) + (259.2)(4/2) = 712.8 \text{ kN-m/m}$$

อัตราส่วนความปลอดภัยต้านการหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Overturning FS} = M_{RO}/M_O = 712.8/223.2 = 3.19 > 2 \text{ OK}$$

แรงลัพธ์แนวตั้ง (Resultant of vertical forces)

$$R = V_1 + V_2 + V_3 = 259.2 + 64.8 + 20 = 344.0 \text{ kN/m}$$

โมเมนต์ต้านในการแบกทาน (Resisting moment in bearing pressure)

$$M_{RBP} = V_1 \frac{L_1}{2} + V_2 \left(\frac{L_1}{2} + D \right) + V_3 \left[\frac{(L_1 - D)}{2} + D \right]$$

$$= (259.2)(4/2) + (64.8)(2/2 + 2) + (20)[(4-2)/2 + 2] = 772.8 \text{ kN-m/m}$$

ระยะเยื้องศูนย์กลาง (Eccentricity), $e = \frac{L_1}{2} - \frac{M_{RBP} - M_O}{R} = \frac{4}{2} - \frac{772.8 - 223.2}{344.0} = 0.40 < \frac{L_1}{6} = \frac{4}{6} = 0.67 \text{ OK}$

4.3.1.4 ความสามารถในการแบกทานที่ฐาน (Bearing capacity at base)

แรงแบกทานสูงสุด (maximum bearing pressure)

$$\sigma_V = \frac{R}{L_1 - 2e} = \frac{344.0}{4 - 2(0.40)} = 107.7 \text{ kN/m}^2 \text{ จาก AASHTO 1997}$$

ความสามารถในการแบกทานประลัยของดินฐานราก

(Ultimate bearing capacity of foundation soil)

$$q_{ult} = c_f N_c + 0.5 (b_f - 2e) \gamma_f N_\gamma$$

$$= (0)(30.1) + 0.5 [4 - 2(0.40)] (18)(15.7) = 450.6 \text{ kN/m}^2$$

อัตราความปลอดภัยแรงแบกทาน Bearing FS = $q_{ult}/\sigma_V = 450.6/107.7 = 4.2 > 2.5 \text{ OK}$

ค่าปัจจัยแบกทาน (bearing capacity factors) ของค่า N_c, N_γ, N_γ จาก Das 2006

$$N_c = e^{\tan(\phi_f) \phi_f} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi_f}{2} \right) = e^{\tan(28) \phi_f} \tan^2 \left(45 + \frac{28}{2} \right) = 18.4 \text{ Reissner (1924)}$$

$$N_\gamma = (N_c - 1) \cot(\phi_f) = (18.4 - 1) \cot(28) = 30.1 \text{ Pradtl (1921)}$$

$$N_\gamma = (N_c - 1) \tan(1.4 \phi_f) = (18.4 - 1) \tan[(1.4)(28)] = 15.7 \text{ Meyerhof (1976)}$$

4.3.2 การตรวจสอบเสถียรภาพภายใน (Internal Stability Checking)

ผลการตรวจสอบค่าเสถียรภาพภายใน (internal stability) ของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบ

ซ้อนทับกัน (superimposed walls) แสดงดังตารางที่ 4.1 ตามมาตรฐาน FHWA-NHI-00-043

ตารางที่ 4.1 ค่าเสถียรภาพภายในของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกันชั้นล่าง

Layer	Spacing S (m)	Height from top d _i (m)	Grid Area V _i (m ²)	Superimposed Stress		Lower σ _v kN/m ²	Total σ _v kN/m ²	Total σ _h kN/m ²	Tensile T _{MAX} kN/m	Active Length L _a (m)	Resistant Length L _e (m)	Total Length L _T (m)
				σ _f kN/m ²	σ _i kN/m ²							
1	0.45	0.45	0.56	0.00	56.63	8.10	64.73	19.89	11.19	1.75	2.07	3.82
2	0.45	0.90	0.45	0.00	48.54	16.20	64.74	19.89	8.95	1.50	0.83	2.50
3	0.45	1.35	0.45	1.80	40.53	24.30	64.83	19.92	8.96	1.25	0.55	2.25
4	0.45	1.80	0.45	9.89	34.70	32.40	67.10	20.62	9.28	1.00	0.43	2.00
5	0.45	2.25	0.45	17.98	31.96	40.50	72.46	22.26	10.02	0.75	0.37	1.75
6	0.45	2.70	0.45	26.07	32.30	48.60	80.90	24.86	11.19	0.50	0.35	1.50
7	0.45	3.15	0.45	34.16	35.74	56.70	92.44	28.40	12.78	0.25	0.34	1.25
8	0.45	3.60	0.23	42.25	42.25	64.80	107.05	32.89	7.40	0.00	0.17	1.00
Embedment	0.15	3.75										

โดยที่ในตารางที่ 4.1 ความลึก (d_i) และพื้นที่รับแรงของ geogrid (grid area, V_i) คำนวณตาม FHWA-NHI-00-043 โดยที่ตัวอย่างการคำนวณเช่นในชั้นที่ 3 ที่ความลึก (d_i) 1.35 เมตร จะได้ค่า grid area (V) ดังนี้

$$V_3 = \frac{1}{2}(d_3 - d_2) + \frac{1}{2}(d_4 - d_3) = \frac{1.35 - 0.9}{2} + \frac{1.8 - 1.35}{2} = 0.45$$

$$x_2 = D \tan \phi_r = 2 \tan(32) = 1.25 \text{ m}$$

$$x_3 = D \tan(45 + \phi_r/2) = 2 \tan(45 + 32/2) = 3.61 \text{ m}$$

ที่ผิวกำแพง (Wall face) $\sigma_f = \frac{\gamma H_1}{x_2 - x_1} (\gamma_b H_1 + q)$ (4.7)

$$\sigma_f = \frac{18 \times 1.35}{3.61 - 1.25} [(18)(1.8) + 10] = \frac{0.18}{2.36} 42.4 = 1.80 \text{ kN/m}^2$$

พื้นที่ประมาณในการรับแรงจากรูปที่ 4.2 แสดงในรูปที่ 4.4

$$\frac{(\gamma_b H_1 + q) - \sigma_f}{(x_2 - x_1) \tan(45 - \phi_b/2)} = \frac{\sigma_i - \sigma_f}{L_a} \quad (4.8)$$

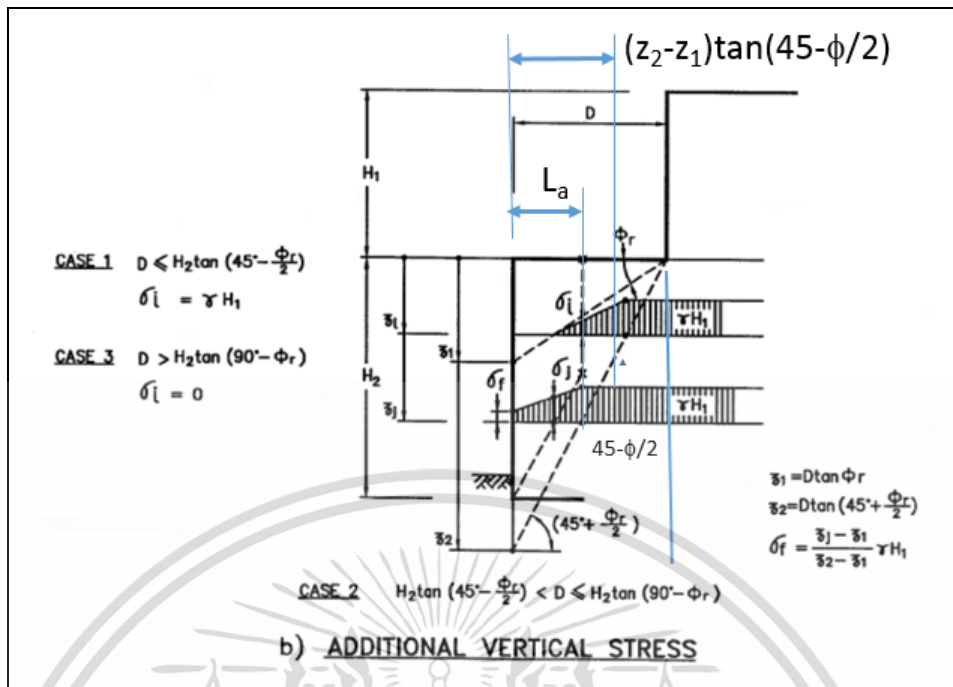
ตัวอย่างการคำนวณที่ชั้น 3 ค่า σ_i ในตารางที่ 4.1 มาจาก

$$\sigma_i = \frac{(\gamma_b H_1 + q) - \sigma_f}{(x_2 - x_1) \tan(45 - \phi_b/2)} L_a + \sigma_f \quad (4.9)$$

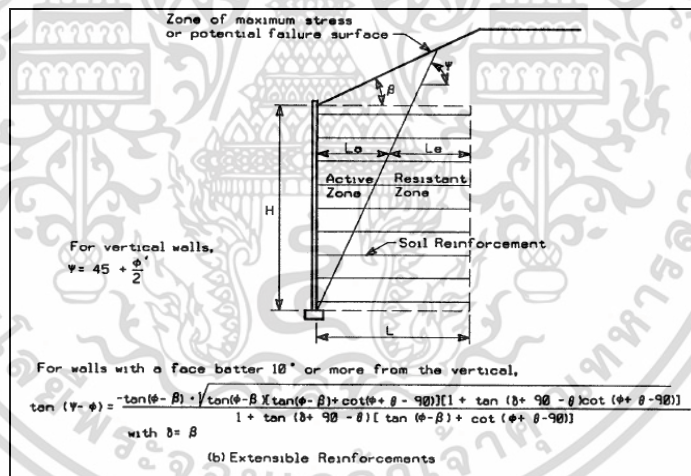
$$\sigma_i = \frac{[(18)(1.8) + 10] - 1.80}{(3.61 - 1.25) \tan(45 - \frac{32}{2})} 1.25 + 1.80 = 40.53 \text{ kN/m}^2$$

โดยที่ $L_a = (H_2 - x_1) \tan(45 - \phi_b/2) = (3.60 - 1.35) \tan(45 - \frac{32}{2}) = 1.25$

ซึ่งเป็นความยาวช่วงแอคทีฟก่อนวงรีบีติ (active length) L_a แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 พื้นที่รับความเค้นแนวตั้ง (vertical stress)



รูปที่ 4.5 เส้นวงวิบัติที่แบ่ง active zone และ resistant zone (FHWA-NHI-00-043)

ความเค้นแนวตั้งกำแพงด้านล่าง (Lower wall vertical stress) $\gamma_2 d_1 = (18)(1.35) = 24.30 \text{ kN/m}^2$

ความเค้นแนวตั้งทั้งหมด $\sigma_i = \sigma_1 + \gamma_2 d_1 = 40.53 + 24.30 = 64.83 \text{ kN/m}^2$

ความเค้นแนวราบ $\sigma_x = K_{ar} \sigma_i = (0.301)(64.83) = 19.92 \text{ kN/m}^2$

แรงดึงสูงสุด $T_{max} = \sigma_x H_1 = (19.92)(0.45) = 8.96 \text{ kN/m}^2$

โดยสมมติให้แรงดึงที่ยอมให้ $T_o = 20 \text{ kN/m}^2$ สำหรับตาข่ายเสริมแรง geogrid

ดังนั้นอัตราส่วนความปลอดภัยด้านการฉีกขาด

$$FS - \text{rupture} = T_a / T_{max} = 20 / 8.96 = 2.2 > 1 \text{ OK}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ pullout จะต้องการ FS > 1.5 และต้องการระยะยึดรั้งตามมาตรฐาน FHWA-NHI-00-043

$$L_p > \frac{1.5F_{max}}{C_{int}(\phi_p)C_i z R_c \alpha} = 1.5(8.96)/[(2)\tan(32)(18)(1.35)(0.8)(1)(1)] = 0.55 \text{ m}$$

โดยที่ R_c คือ ร้อยละพื้นที่วัสดุเสริมแรงครอบคลุม

$$(\% \text{ coverage of reinforcement}) = 1.0$$

C_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดึงออก (interaction pullout coefficient) = 0.8

$C = 2$ สำหรับตาข่ายเสริมแรง geogrid

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้รูปร่าง (scale effect correction factor) = 1.0

z คือ ค่าสูงของน้ำหนักรัดทับ เป็นค่าเดียวกับ d_i ในตารางที่ 4.1

ความยาวรวม (total length), $L_T = L_a + L_p = 1.25 + \max\{0.55, 1\} = 2.25 < 4$

ซึ่งความยาวตาข่ายเสริมแรง geogrid ทุกชั้นในตารางที่ 4.1 มีค่า $L_T \leq L$ ที่ค่าความยาวสูงสุดของ L_T คือ 3.82 เมตรซึ่งน้อยกว่าค่าความยาวตาข่ายเสริมแรง geogrid ที่ใช้คือ 4 เมตร

4.3.3 การตรวจสอบเสถียรภาพโดยรวม

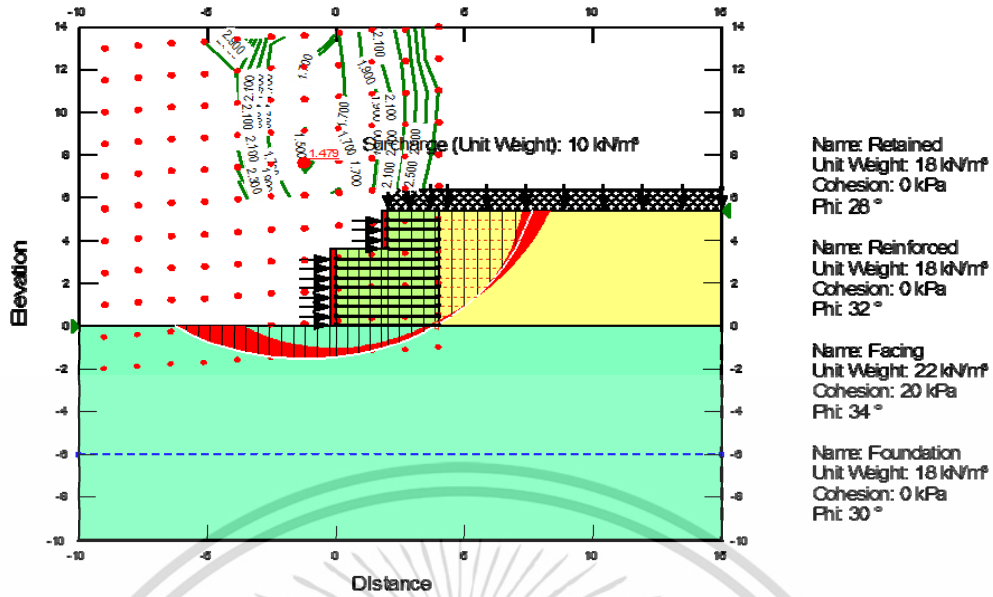
ค่าเสถียรภาพโดยรวมแสดงดังรูปที่ 4.6 ที่แสดงค่าพารามิเตอร์ของวัสดุดิน วัสดุผิวหน้า (facing Unit) และตาข่ายเสริมแรง และสรุปในตารางที่ 4.2 ที่ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป (Geo-Slope. 2007.) ที่ค่าเสถียรภาพโดยรวมด้วยวิธีสมดุลขีดจำกัด (limit equilibrium method หรือ LEM) โดยวิธี Morgenstern-Price method ด้วย half-sine interslice force function ซึ่งมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพโดยรวม (global stability FS) อยู่ที่ 1.479 ที่มากกว่า 1.3 ที่กำหนดตาม FHWA-NHI-00-043 ในรูปที่ 2.12

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของเสถียรภาพโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน

Material	Facing	Reinforced	Retained	Foundation
วัสดุ	วัสดุผิวหน้า	ดินถม	ดินเดิม	ดินรากราก
Model	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
γ (kN/m ³)	22	18	18	18
c (kN/m ²)	20	0	0	0
ϕ (degree)	34	32	28	30

Geogrid	Model	Tensile Strength (kN/m)
Type 1	Linear	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 เสถียรภาพโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน

4.4 การตรวจสอบเสถียรภาพของกำแพงกันดินเสริมแรงชั้นบน

เนื้อหาใน 4.4 นี้เป็นการตรวจสอบเสถียรภาพของกำแพงกันดินเสริมแรงชั้นล่างที่ออกแบบตามปกติเหมือนกำแพงกันดินเสริมแรงชั้นเดียวด้านเดียวทั่วไปเช่นเดียวกับใน 3.3 โดยรายการออกแบบตรวจสอบเสถียรภาพนี้ใช้เพื่อเปรียบเทียบกับการออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรงชั้นบนใน 4.3 ที่เป็นแบบซ้อนทับกัน โดยประกอบด้วยเนื้อหา ดังนี้

เสถียรภาพภายนอก (external stability) ใน 4.4.1 เสถียรภาพภายใน (internal stability) ใน 4.4.2 และเสถียรภาพโดยรวม (global stability) ใน 4.4.3 ในส่วนเสถียรภาพภายนอกจะพิจารณาเสถียรภาพของกำแพงกันดินเสริมแรง จากน้ำหนัก (load) ใน 4.4.1.1 สามารถหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (factors of safety, FS) ด้านการลื่นไถล (sliding) ใน 4.4.1.2 การหมุนคว่ำ (overturning) หรือการเยื้องศูนย์ (eccentricity) ใน 4.4.1.3 และการแบกทาน (bearing capacity) ใน 4.4.1.4 ใน 4.4.2 เป็นส่วนเสถียรภาพภายในที่พิจารณาอัตราส่วนความปลอดภัยด้านการฉีกขาด (rupture) ดังแสดงตัวอย่างใน 4.4.2.1 และการดึงออก (pullout) ดังแสดงตัวอย่างใน 4.4.2.2 โดยในส่วนของเสถียรภาพโดยรวมจะเป็นเช่นเดียวกับใน 4.3.3

กำแพงกันดินเสริมแรงชั้นบนมีความสูง (H_1) 1.8 เมตร และความยาวตาข่ายเสริมแรง (geogrid) (L_1) 2 เมตร ค่าพารามิเตอร์ของดินจะมีค่าความหนาแน่น (density, γ) , ความเชื่อมแน่น (cohesion, c) และมุมเสียดทานภายใน (internal friction angle, ϕ) แสดง ดังนี้

ดินถม (reinforced soil, backfill) มีค่า $\gamma_b = 18 \frac{kN}{m^3}$, $c_b = 0.2 \frac{kN}{m^2}$, $\phi_b = 32^\circ$

ดินเดิม (retained soil) มีค่า $\gamma_r = 18 \frac{kN}{m^3}$, $c_r = 0.2 \frac{kN}{m^2}$, $\phi_r = 28^\circ$

ดินฐานราก (foundation soil) มีค่า $\gamma_f = 18 \frac{kN}{m^3}$, $c_f = 0.2 \frac{kN}{m^2}$, $\phi_f = 32^\circ$

ซึ่งดินฐานรากของกำแพงชั้นบนคือดินถมของกำแพงชั้นล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างเชิงรุก (active earth pressure coefficient หรือ K_a) เป็นไปตามทฤษฎีแรงดันดินของแรนคิน (Rankine earth pressure theory) (Bhudu 2011) ที่

$$K_a = \tan^2(45^\circ - \phi/2)$$

$$\text{ดินถม (reinforced soil), } K_{aR} = \tan^2(45^\circ - \phi_R/2)$$

$$= \tan^2(45^\circ - 32/2) = 0.307$$

$$\text{ดินเดิม (retained soil) } K_{aR} = \tan^2(45^\circ - \phi_r/2) = \tan^2(45^\circ - 28/2) = 0.361$$

4.4.1 การตรวจสอบเสถียรภาพภายนอก (External Stability Checking)

ในส่วนนี้จะประกอบด้วย น้ำหนักกระทำใน 3.3.1.1 การไถล ใน 3.3.1.2 การเยื้องศูนย์ ใน 3.3.1.3 และ ความสามารถในการแบกทานที่ฐาน ใน 3.3.1.4

4.4.1.1 น้ำหนักกระทำ (Loads)

แรงแนวตั้งจากกำแพงชั้นบน (Vertical lower fill) $V_1 = \gamma_s H_1 L_1 = (18)(1.8)(2) = 64.8 \text{ kN/m}$

แรงแนวตั้งจากน้ำหนักบรรทุก (Vertical surcharge) $V_2 = qL_1 = (10)(2) = 20 \text{ kN/m}$

แรงแนวราบจากดิน (Horizontal retained soil)

$$F_1 = \frac{1}{2} \gamma_s H^2 K_{aR} = 0.5(18)(1.8^2)(0.361) = 10.5 \text{ kN/m}$$

แรงแนวราบน้ำหนักบรรทุก (Horizontal surcharge) $F_2 = qH K_{aR} = (10)(1.8)(0.361) = 6.5 \text{ kN/m}$

น้ำหนักกระทำและโมเมนต์มาจากมาตรฐาน FHWA-NHI-00-043 แสดงในรูปที่ 4.3

4.4.1.2 การไถล (Sliding)

แรงต้านแนวราบ (Horizontal resisting force)

$$F_R = V_1 \tan(\min\{\phi_s, \phi_r\}) = 64.8 \tan(\min\{28, 28\}) = 34.5 \text{ kN/m}$$

แรงดันแนวราบ (Horizontal driving force) $F_D = F_1 + F_2 = 10.5 + 6.5 = 17 \text{ kN/m}$

อัตราส่วนความปลอดภัยต้านการไถล FS sliding = $F_R/F_D = 34.5/17 = 2.02 > 1.5 \text{ OK}$

4.4.1.3 การเยื้องศูนย์ (Eccentricity)

โมเมนต์รอบจุด O ของกำแพงด้านล่างแสดงในรูปที่ 5

โมเมนต์หมุน Overturning moment,

$$M_O = F_1 H/3 + F_2 H/2 = (10.5)(1.8/3) + (6.5)(1.8/2) = 12 \text{ kN-m/m}$$

โมเมนต์ต้าน Resisting moment, $M_{RO} = V_1 L_1/2 = (64.8)(2/2) = 64.8 \text{ kN-m/m}$

อัตราส่วนความปลอดภัยต้านการหมุน Overturning FS = $M_{RO}/M_O = 64.8/12 = 6.97 > 2 \text{ OK}$

แรงลัพธ์แนวตั้ง (Resultant of vertical forces) $R = V_1 + V_2 = 64.8 + 20 = 84.8 \text{ kN/m}$

โมเมนต์ต้านในการแบกทาน (Resisting moment in bearing pressure)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_{RRP} = K_1 \frac{L_1}{2} + K_2 \frac{L_2}{2} = (64.8)(2/2) + (20)(2/2) = 84.8 \text{ kN-m/m}$$

ระยะเยื้องศูนย์กลาง (Eccentricity),

$$e = \frac{L_1}{2} - \frac{M_{RRP} - M_D}{R} = \frac{2}{2} - \frac{84.8 - 12}{84.8} = 0.14 < \frac{L_1}{6} = \frac{2}{6} = 0.33 \text{ OK}$$

4.4.1.4 ความสามารถในการแบกทานที่ฐาน (Bearing capacity at base)

แรงแบกทานสูงสุด (maximum bearing pressure)

$$\sigma_V = \frac{R}{L_1 - 2e} = \frac{84.8}{2 - 2(0.14)} = 50 \text{ kN/m}^2 \text{ จาก AASHTO 1997}$$

แรงแบกทานประลัยของดินฐานราก (Ultimate bearing capacity of foundation soil)

$$q_{ult} = \sigma_V N_c + 0.5(L_1 - 2e) \gamma_f N_\gamma \\ = (0)(35.5) + 0.5[2 - 2(0.14)](18)(22.0) = 339.5 \text{ kN/m}^2$$

อัตราความปลอดภัยแรงแบกทาน Bearing FS = $q_{ult}/\sigma_V = 339.5/50 = 6.86 > 2.5$ OK

ค่าปัจจัยแบกทาน (bearing capacity factors) ของค่า N_c, N_γ, N_γ จาก Das 2006

$$N_c = e^{\pi \tan(\phi_f)} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi_f}{2} \right) = e^{\pi \tan(32)} \tan^2 \left(45 + \frac{32}{2} \right) = 23.2 \text{ Reissner (1924)}$$

$$N_\gamma = (N_c - 1) \cot(\phi_f) = (23.2 - 1) \cot(32) = 35.5 \text{ Pradtl (1921)}$$

$$N_\gamma = (N_c - 1) \tan(1.4\phi_f) = (23.2 - 1) \tan[1.4(32)] = 22.0 \text{ Meyerhof (1976)}$$

4.4.2 การตรวจสอบเสถียรภาพภายใน (Internal Stability Checking)

ผลการตรวจสอบค่าเสถียรภาพภายใน (internal stability) ของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน (superimposed walls) ชั้นบนแสดงดังตารางที่ 4.3 ตามมาตรฐาน FHWA-NHI-00-043

ตารางที่ 4.3 ค่าเสถียรภาพภายในของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกันชั้นบน

Layer	Spacing S (m)	Height from top d_i (m)	Grid Area V_i (m ²)	Tensile T_{MAX} kN/m	Active Length L_a (m)	Resistant Length L_e (m)	Total Length L_T (m)	Allowable Tensile Ta (kN/m)	FS Rupture
1	0.45	0.45	0.56	3.68	0.81	0.80	1.81	20	5.44
2	0.45	0.9	0.45	4.26	0.54	0.46	1.54	20	4.70
3	0.45	1.35	0.45	5.57	0.27	0.40	1.27	20	3.59
4	0.45	1.8	0.375	5.74	0	0.31	1.00	20	3.48
Embedment	0.15	1.95							

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณเสถียรภาพภายใน (internal stability) ของชั้นที่ 3 ในตารางที่ 4.3 เป็นดังนี้

4.4.2.1 การฉีกขาด (rupture)

พื้นที่รับแรง (grid area) $V_g = \frac{1}{2}(d_3 - d_2) + \frac{1}{2}(d_4 - d_3) = \frac{1.8-1.35}{2} + \frac{1.8-1.35}{2} = 0.45 \text{ m}$

$$T_{\max} = \sigma_H V_g = K_{\text{act}}(v_0 d_1 + q) \leq T_a = (0.361)[(18)(1.35) + 20](0.45) \\ = 5.57 < 20 \text{ kN/m}$$

โดยที่ T_{\max} (maximum tensile strength)

คือค่าแรงดึงสูงสุดที่เกิดใน geogrid แต่ละชั้น

T_a (allowable tensile strength)

คือค่ารับแรงดึงที่ยอมให้ของ geogrid ในแต่ละชั้น

4.4.2.2 การดึงออก (pullout)

ความยาวช่วงก่อนแรงต้านแรงดึงออก (Active zone length)

$$L_a = (H - d_1) \tan(45 - \phi_p/2) = (1.8 - 1.35) \tan(45 - 28/2) = 0.27 \text{ m}$$

ความยาวช่วงต้านแรงดึงออก (resistant zone length) $L_r \geq \frac{1.5 T_{\max}}{\sigma_{\text{act}}(v_0 d_1 + q)} \geq 1$

$$L_r = 1.5(5.57) / [(2) \tan(28)(0.8)(18)(1.2)(1.2)(1)(1)] = 0.40 \text{ ใช้ } 1 \text{ m}$$

โดยที่

R_c คือ ร้อยละของพื้นที่ที่วัสดุเสริมแรงครอบคลุม

(% coverage of reinforcement)

มีค่าจาก 0.71 ถึง 1.0 สำหรับตาข่ายเสริมแรง กำหนดให้ $R_c = 1.0$

C_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดึงออก (interaction pullout coefficient) = 0.8

$C = 2$ สำหรับตาข่ายเสริมแรง geogrid

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้รูปร่าง (scale effect correction factor) = 1.0

z คือ ค่าสูงของน้ำหนักรัดทับ เป็นค่าเดียวกับ d_1 ในตารางที่ 4.3

ความยาวรวม (total length), $L_T = L_a + L_r = 0.27 + \max\{0.4, 1\} = 1.27 < 2$ เมตร

ซึ่งทุกชั้นของตาข่ายเสริมแรง geogrid ในตารางที่ 4.3 มีค่า L_T สูงสุดที่ 1.81 ซึ่ง $L_T \leq L$

โดยที่ $L = 2$ เมตร

4.5 สรุปผล

กำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกันสองชั้น มีความจำเป็นในการใช้งานจริงเนื่องจาก ปัญหาเช่นข้อจำกัดด้านพื้นที่ ที่จำเป็นต้องลดน้ำหนักจากกำแพงชั้นบน ขณะที่รายละเอียดการ คำนวณกำแพงสองชั้นมีข้อจำกัด เนื้อหาในบทนี้จึงมุ่งขยายขยายรายละเอียดการออกแบบคำนวณ

เพื่อเป็นตัวอย่างและแนวทางสำหรับผู้ออกแบบต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลวิเคราะห์เพิ่มเติมของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน และกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน

บทนี้แสดงส่วนออกแบบและวิเคราะห์กำแพงกันดินเสริมแรง (mechanically stabilized earth wall หรือ MSE wall ทั้งในส่วนกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน (back-to-back walls) ในบทที่ 3 และ กำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน (superimposed walls) ในบทที่ 4 โดยจะเพิ่มเติมส่วนของเสถียรโดยรวมกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านที่อัตราส่วน L/H ที่ 0.6 ใน 5.1 และเพิ่มเติมส่วนข้อควรระวังในการออกแบบระยะเยื้องของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกันใน 5.2 และบทสรุปของส่วนเพิ่มเติมการวิเคราะห์ใน 5.3

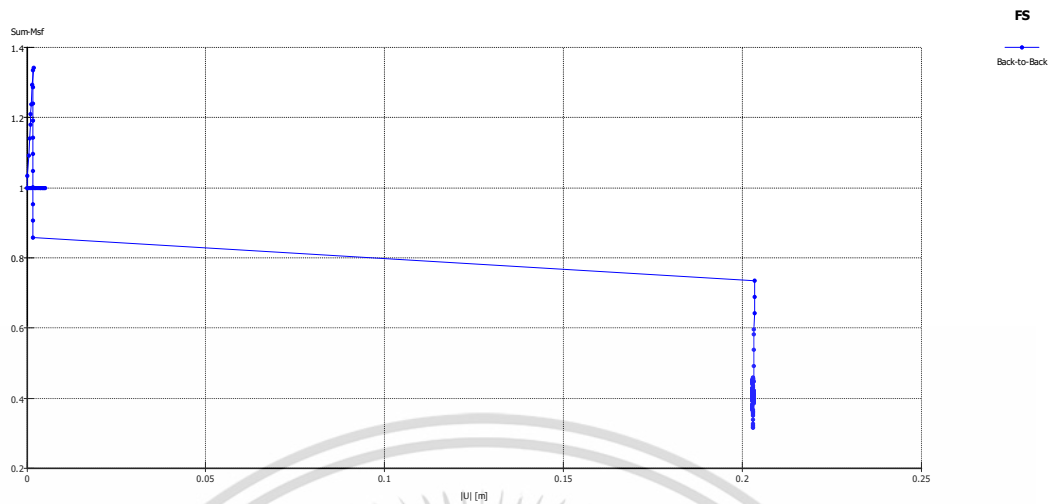
5.1 เสถียรโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านที่ L/H ที่ 0.6

ในส่วนนี้จะแยกการวิเคราะห์เป็นสองส่วนคือ 5.1.1 ค่าเสถียรโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านที่ $L/H = 0.6$ ตามที่แนะนำในมาตรฐาน FHWA-NHI-00-043 สำหรับกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน ที่สูง 12 เมตร กว้าง 15 เมตร ที่ได้ค่าความยาวตาข่ายเสริมแรง geogrid ที่ 7.5 เมตร และ 5.1.2 ที่ลดค่าความกว้างกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านให้แคบสุดที่ 7.5 เมตร ซึ่งเป็นค่าที่ $L/H = 0.6$ ซึ่งจากทั้งสองกรณี จะเห็นได้ว่า ควรใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการหาค่าเสถียรภาพโดยรวมเพื่อแก้ไขข้อจำกัดจากการใช้วิธีสมดุลขีดจำกัด และสรุปผลใน 5.1.3

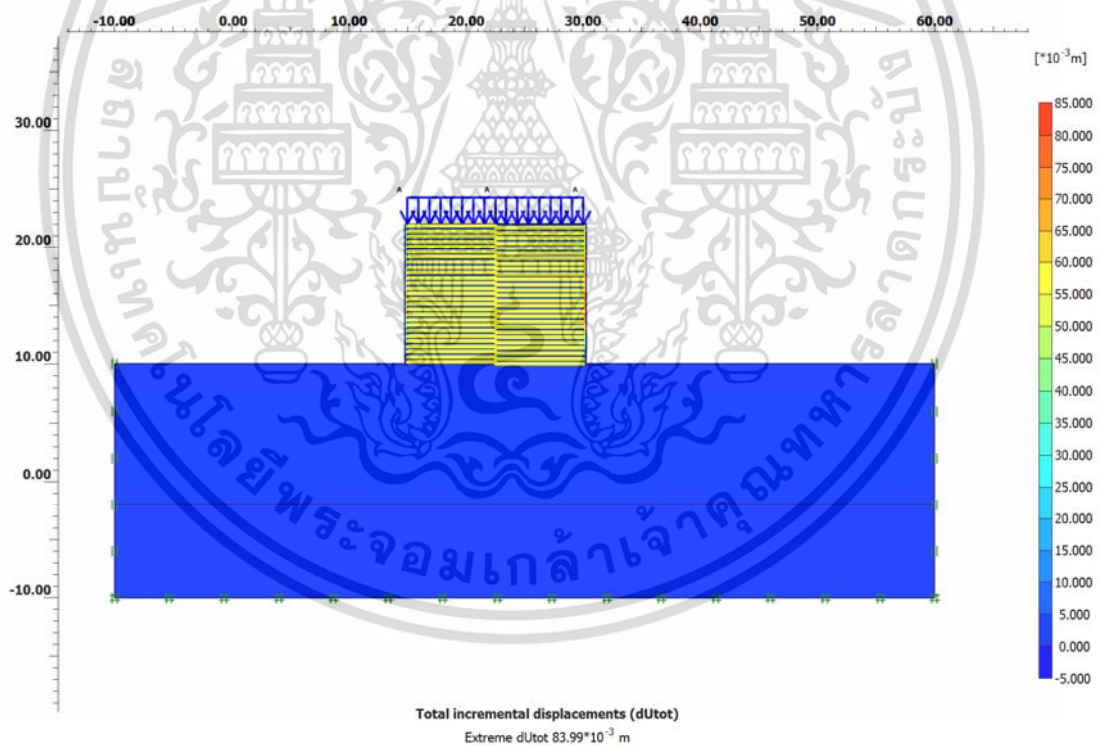
5.1.1 ค่าเสถียรโดยรวมของกันดินเสริมแรงแบบสองด้านที่ $L/H = 0.6$

มาตรฐาน FHWA-NHI-00-043 หน้า 178 ในรูปที่ 2.20 แนะนำความยาวของตาข่ายเสริมแรง geogrid หรือค่า L ที่กำแพงกันดินเสริมแรงสูง H สามารถลดจาก $L/H = 0.7$ เป็น $L/H = 0.6$ ได้ ซึ่งในตัวอย่างโครงการที่กำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านสูง 12 เมตร กว้าง 15 เมตร ที่ $L/H = 0.6$ จะได้ความยาวตาข่ายเสริมแรงเท่ากับ 7.5 เมตร ซึ่งจะได้ $L/H = \frac{7.5}{12} = 0.625 > 0.6$ ค่าเสถียรภาพโดยรวม (global stability) ของกำแพงกันดินโดยวิธีสมดุลขีดจำกัด (limit equilibrium method หรือ LEM) แสดงดังรูปที่ 5.1 ที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพโดยรวม (global stability FS) ที่ 1.051 ขณะที่เสถียรภาพโดยรวม (global stability) โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method หรือ FEM) อยู่ที่ประมาณ 1.3 ดังแสดงในรูปที่ 5.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

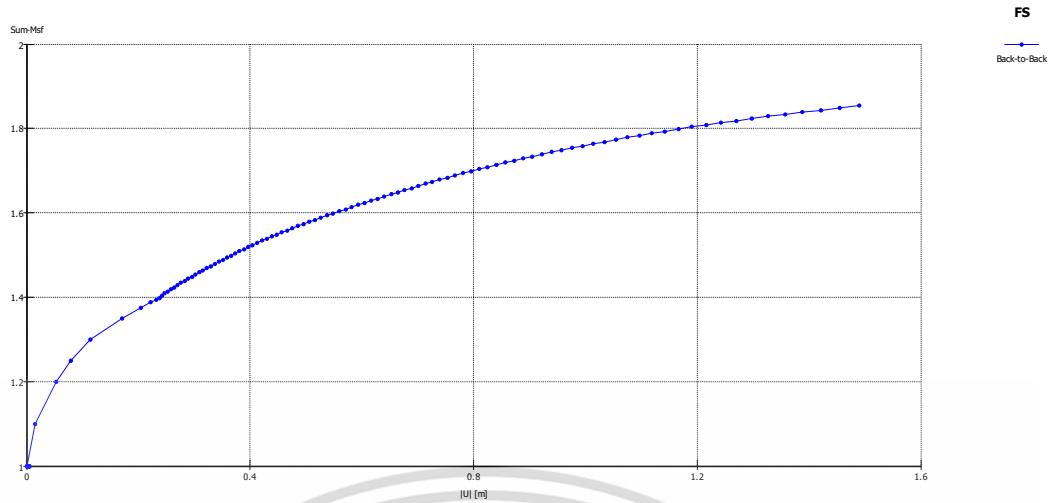


รูปที่ 5.2 ค่า Safety Analysis แบบลู่เข้าของกำแพงเสริมแรงแบบสองด้านที่ $L/H = 0.6$

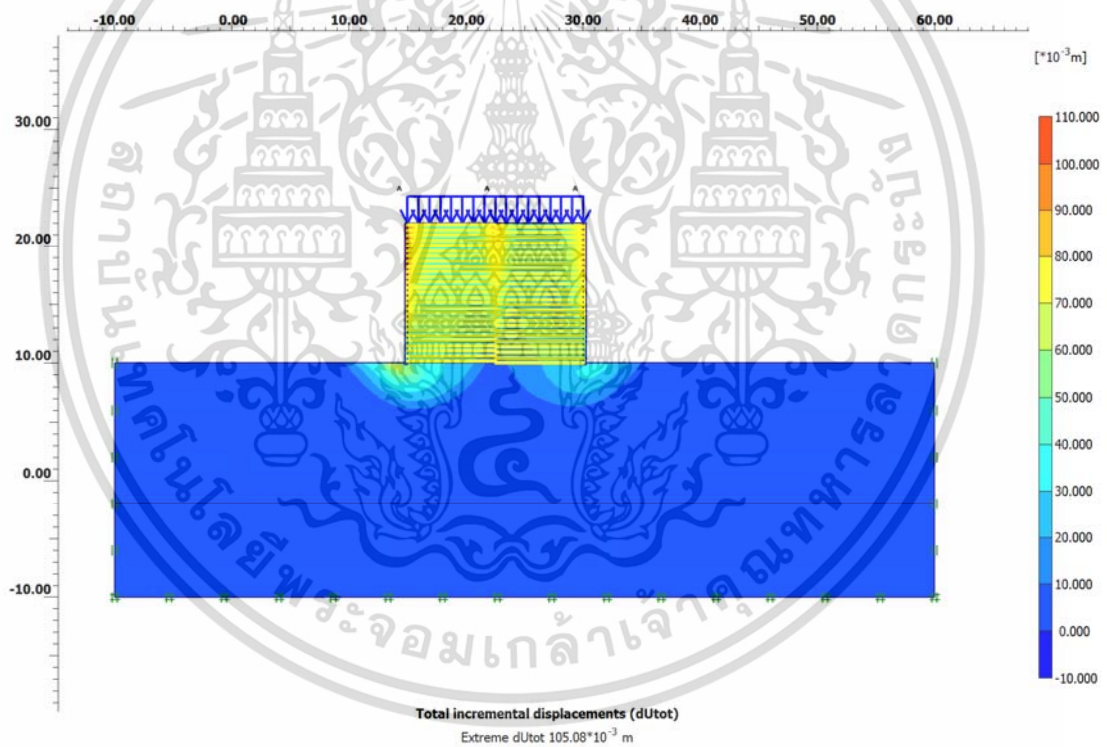


รูปที่ 5.3 ค่า total incremental displacement แบบลู่เข้า ของกำแพงที่ $L/H = 0.6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

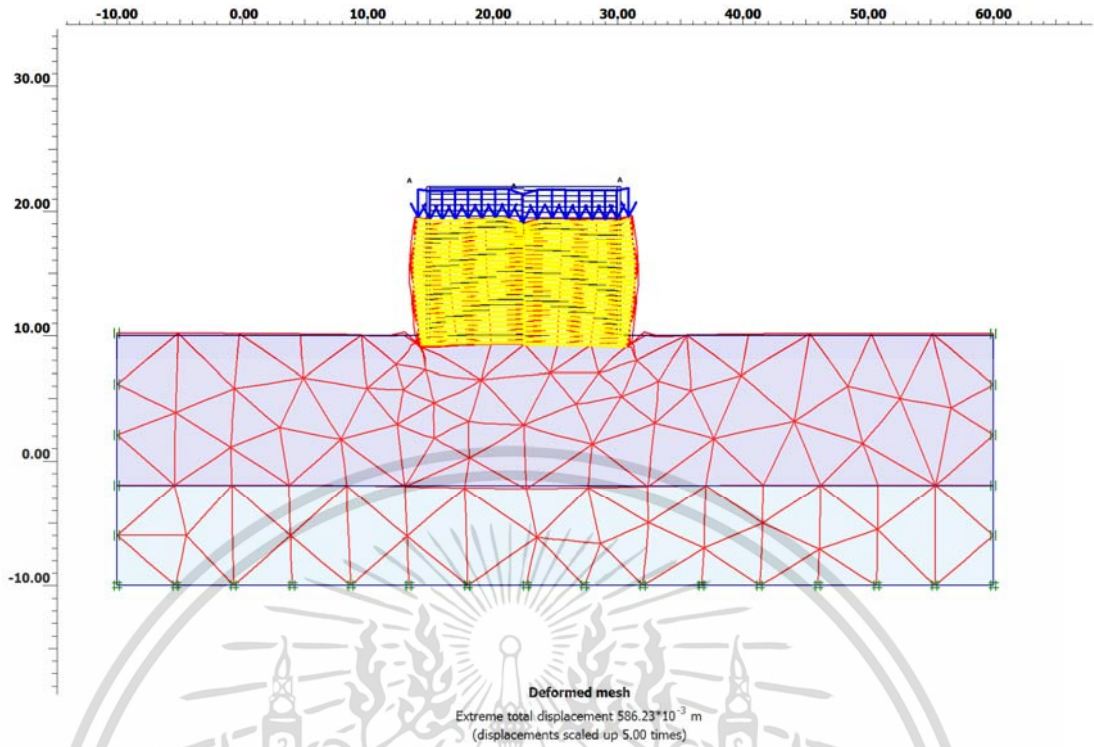


รูปที่ 5.4 ค่า Safety Analysis แบบไม่ลู่เข้าของกำแพงเสริมแรงแบบสองด้านที่ $L/H = 0.6$

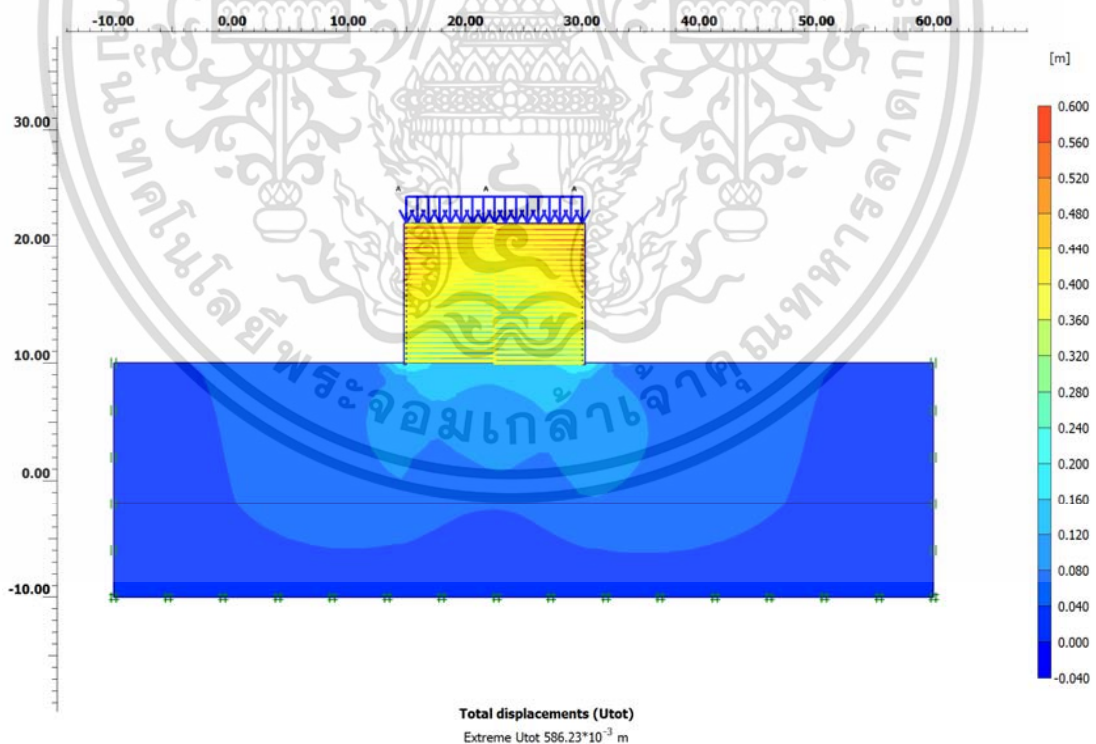


รูปที่ 5.5 ค่า total incremental displacement แบบไม่ลู่เข้าของกำแพงที่ $L/H = 0.6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

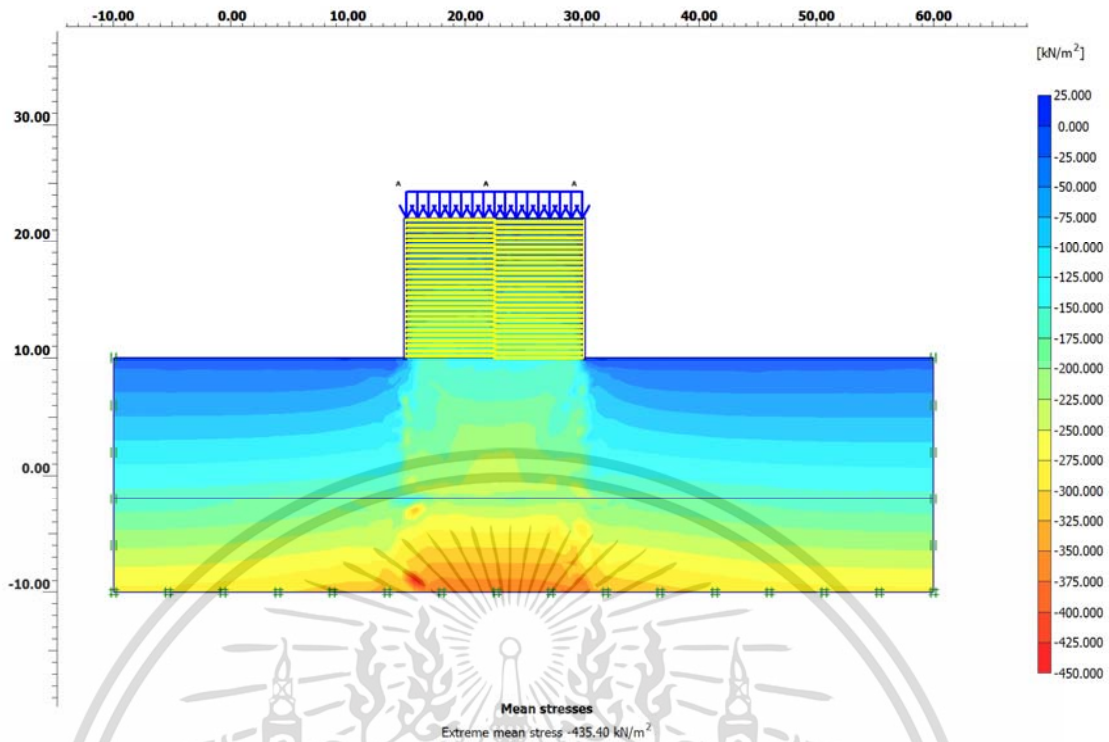


รูปที่ 5.6 ตาข่ายรูปทรงการเสียรูปจาก FEM ของกำแพงเสริมแรงแบบสองด้านที่ $L/H = 0.6$



รูปที่ 5.7 ค่าการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นจาก FEM ของกำแพงเสริมแรงแบบสองด้านที่ $L/H = 0.6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 ค่าความเค้นรวมจาก FEM ของกำแพงเสริมแรงแบบสองด้านที่ $L/H = 0.6$

5.1.2 ค่าเสถียรภาพโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านกว้าง 7.5 เมตร

ส่วนนี้จะเพิ่มเติมกรณีที่กำลังกันดินเสริมแรงมีความกว้าง 7.5 เมตร ซึ่งเท่ากับความยาวตาข่ายเสริมแรงที่ $L/H = 0.6$ โดยจะพิจารณาใน 2 กรณีคือ กรณีที่ 1 เสริมตาข่ายเสริมแรงสองด้าน ทั้งด้านซ้ายและด้านขวาหรือเสริมแรงสองชั้น และกรณีที่ 2 เสริมตาข่ายเสริมแรงด้านเดียวหรือเสริมแรงชั้นเดียว

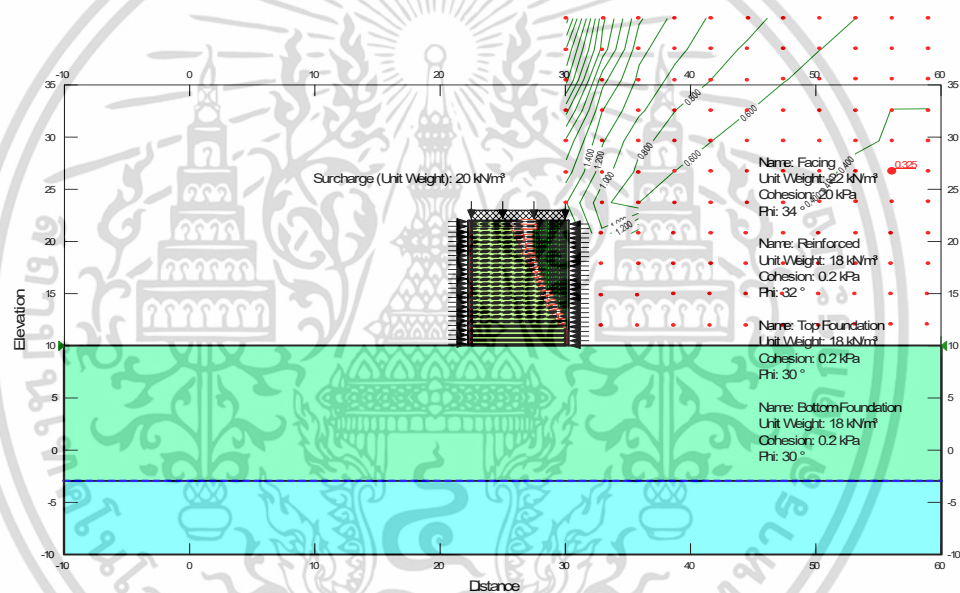
ด้วยวิธีสมมูลขีดจำกัด (limit equilibrium method หรือ LEM) ค่าเสถียรภาพโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมตาข่ายเสริมแรงสองด้านทั้งด้านซ้ายและด้านขวา มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพโดยรวม (global stability FS) ที่ 0.325 ดังแสดงในรูปที่ 5.6 ส่วนค่าเสถียรภาพโดยรวม (global stability) ของกำแพงกันดินกรณีที่เสริมแรงด้านเดียวหรือชั้นเดียว กลับมีค่า global stability FS ที่มากกว่ากำแพงกันดินเสริมแรงสองชั้น โดยมีค่า global stability FS ที่ 1.468 ดังแสดงในรูปที่ 5.6

การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ safety analysis แบบไม่ลู่เข้า ในการหาค่าเสถียรภาพโดยรวม มีค่าเป็นจริงกว่าการใช้วิธีสมมูลขีดจำกัด ที่ค่า safety analysis แบบไม่ลู่เข้า ซึ่งค่า safety analysis แบบไม่ลู่เข้า รูปที่ 5.12 มีค่า global stability FS ที่ 2.234 ดังตารางที่ 5.1 สำหรับกำแพงเสริมแรงสองชั้น ซึ่งมากกว่าค่า global stability FS ที่ 1.799 สำหรับกำแพงเสริมแรงชั้นเดียว ขณะที่ค่า safety analysis แบบลู่เข้า รูปที่ 5.11 วังวิบัติในรูปที่ 5.13 มีค่า global stability FS ที่

0.396 ดังตารางที่ 5.1 สำหรับกำแพงเสริมแรงสองชั้น ขณะที่กำแพงเสริมแรงชั้นเดียวมีค่า global stability FS ที่ 0.328

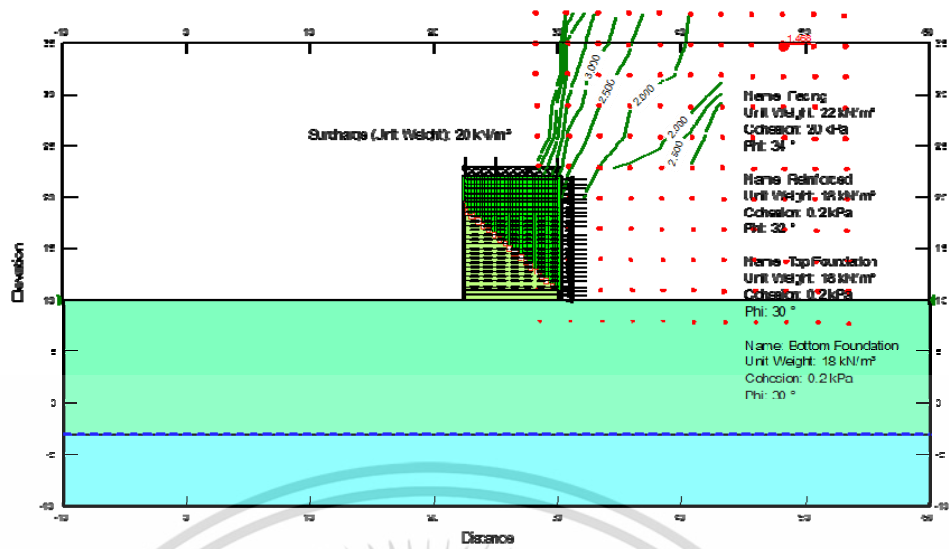
วงวิบัติของกำแพงเสริมแรงสองชั้นจะเป็นตามรูปที่ 5.14 ซึ่งมีรูปทรงใกล้เคียงกับตาข่ายการเสียหาย (deformed mesh) ตามรูปที่ 5.16 ขณะที่วงวิบัติของกำแพงเสริมแรงชั้นเดียวจะเป็นตามรูปที่ 5.13 ซึ่งมีรูปทรงใกล้เคียงกับตาข่ายการเสียหาย (deformed mesh) ตามรูปที่ 5.15

ค่าการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นทั้งหมด (total incremental displacement) ของกำแพงกว้าง 7.5 เมตรเสริมแรงชั้นเดียว ดังรูปที่ 5.17 มีค่ามากที่สุดที่ 0.68415 เมตร ส่วนกำแพงกว้าง 7.5 เมตรเสริมแรงสองชั้น ดังรูปที่ 5.18 ค่าการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นทั้งหมดมีค่ามากที่สุดที่ 0.46882 เมตร ส่วนค่าความเค้นรวม (total stresses) ของกำแพงเสริมแรงชั้นเดียว แสดงในรูปที่ 5.19 และค่าความเค้นรวม (total stresses) ของกำแพงเสริมแรงสองชั้นแสดงในรูปที่ 5.20

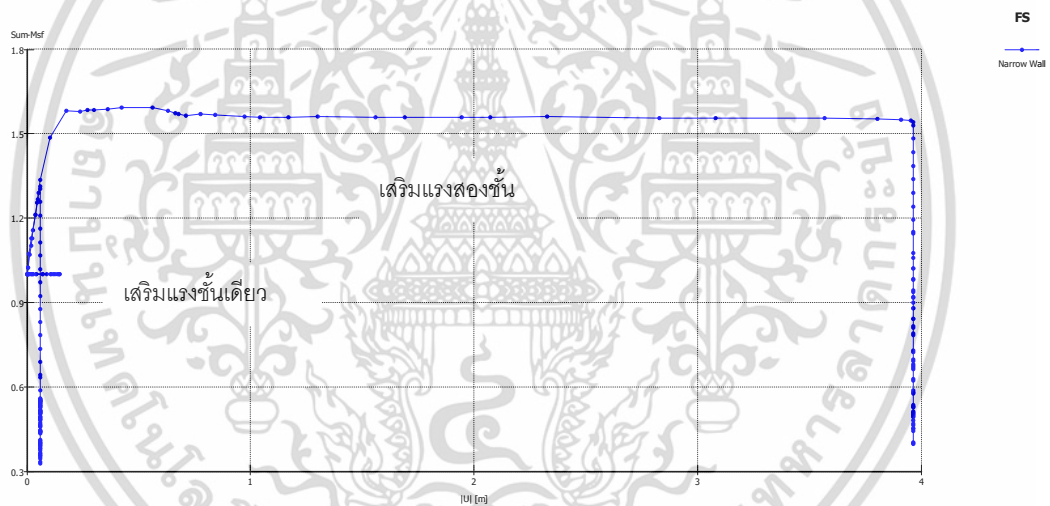


รูปที่ 5.9 เสถียรภาพโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมแรงกว้าง 7.5 เมตร เสริมกำลังสองชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

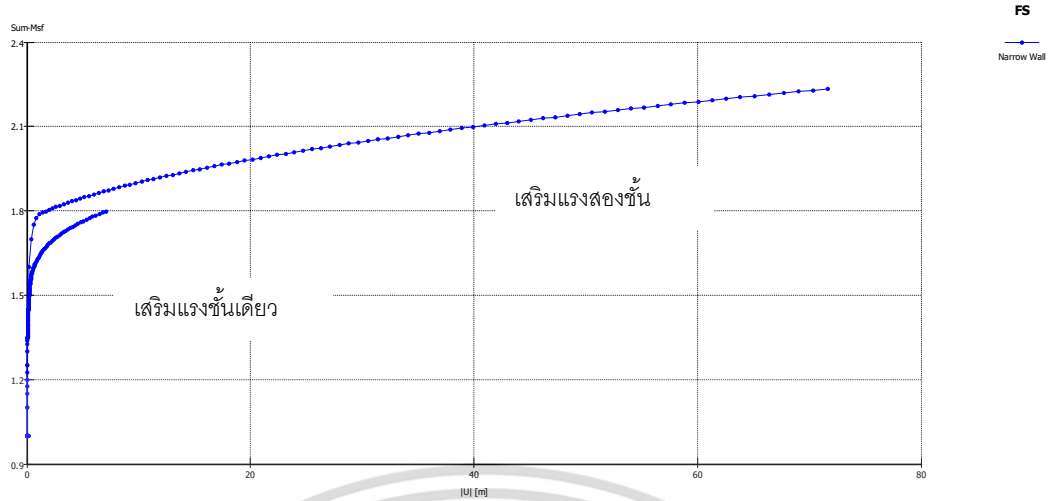


รูปที่ 5.10 เสถียรภาพโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมแรงกว้าง 7.5 เมตร เสริมกำลังชั้นเดียว

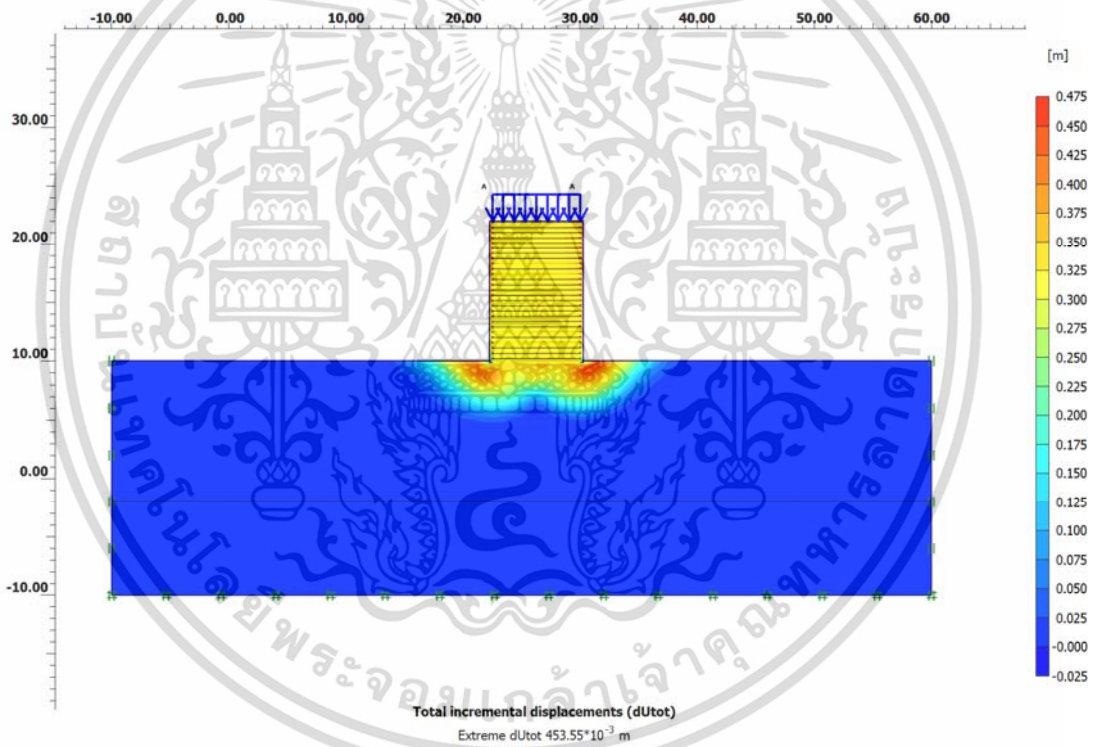


รูปที่ 5.11 ค่า Safety Analysis ของกำแพงกันดินเสริมแรงกว้าง 7.5 เมตรแบบลู่เข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

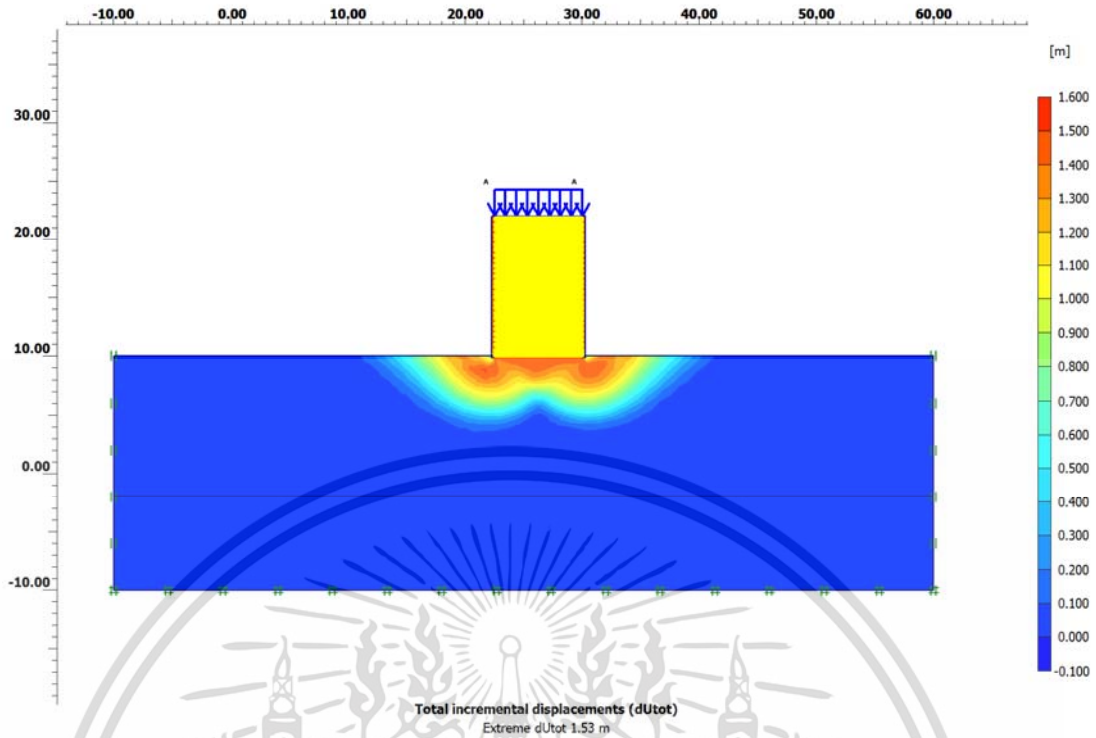


รูปที่ 5.12 ค่า Safety Analysis ของกำแพงกันดินเสริมแรงกว้าง 7.5 เมตรแบบไม่ลู่เข้า

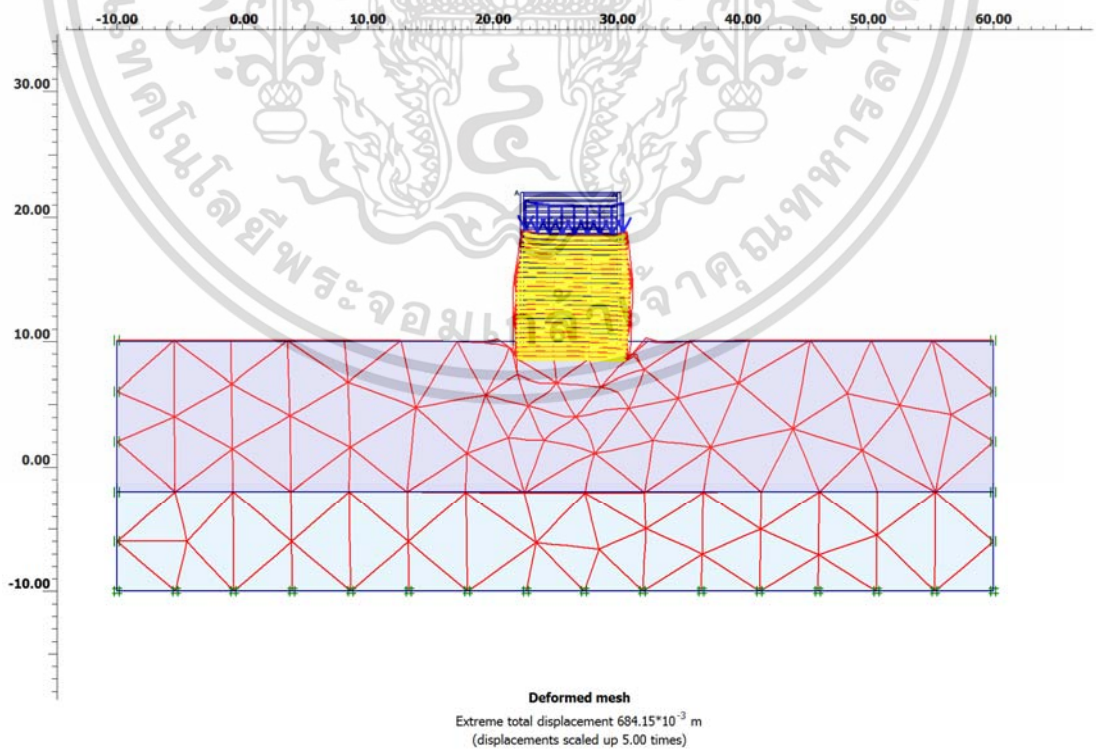


รูปที่ 5.13 ค่า total incremental displacement กำแพงกว้าง 7.5 เมตรเสริมแรงชั้นเดียวไม่ลู่เข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

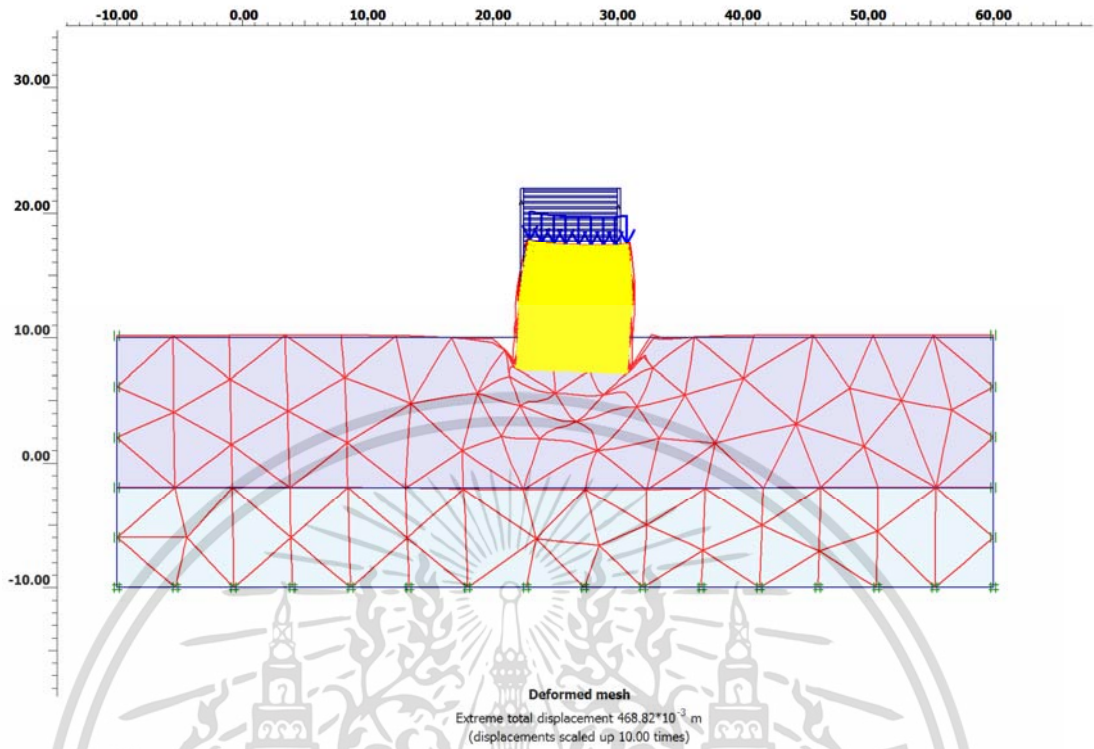


รูปที่ 5.14 ค่า total incremental displacement กำแพงกว้าง 7.5 เมตรเสริมแรงสองชั้นแบบไม่ลู่เข้า

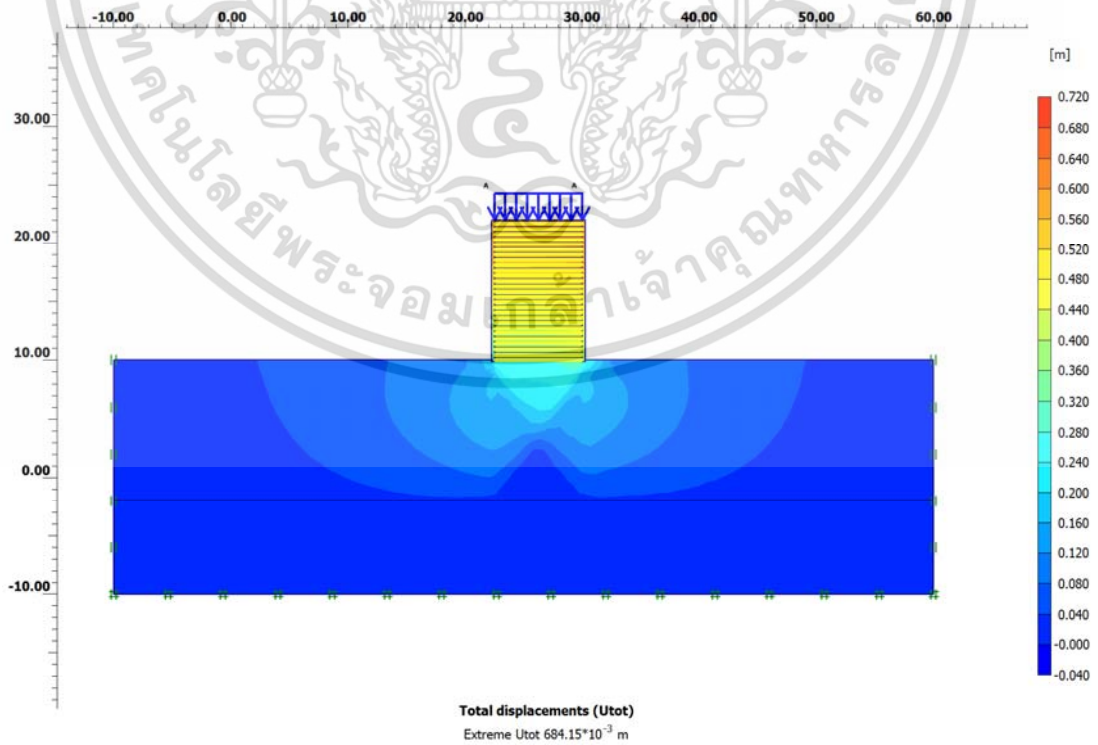


รูปที่ 5.15 ตาข่ายรูปทรงการเสียรูปจาก FEMของกำแพงกว้าง 7.5 เมตรเสริมแรงชั้นเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

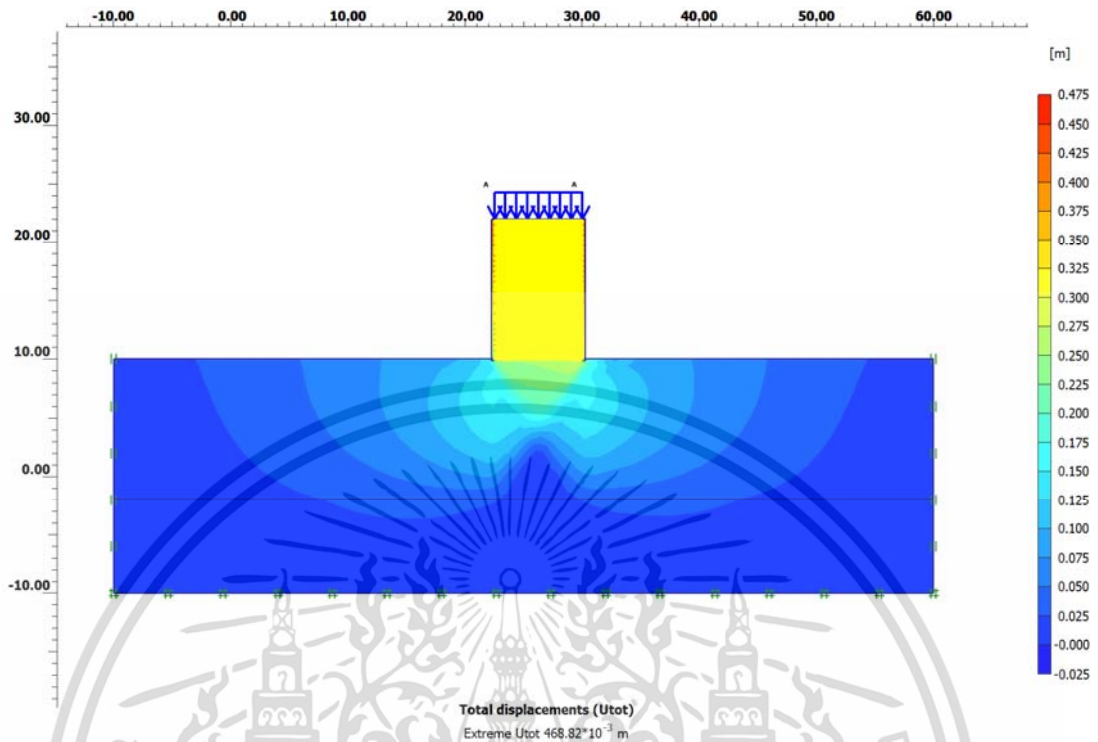


รูปที่ 5.16 ตาข่ายรูปทรงการเสียรูปจาก FEM ของก้ำแพ่งกว้าง 7.5 เมตรเสริมแรงสองชั้น

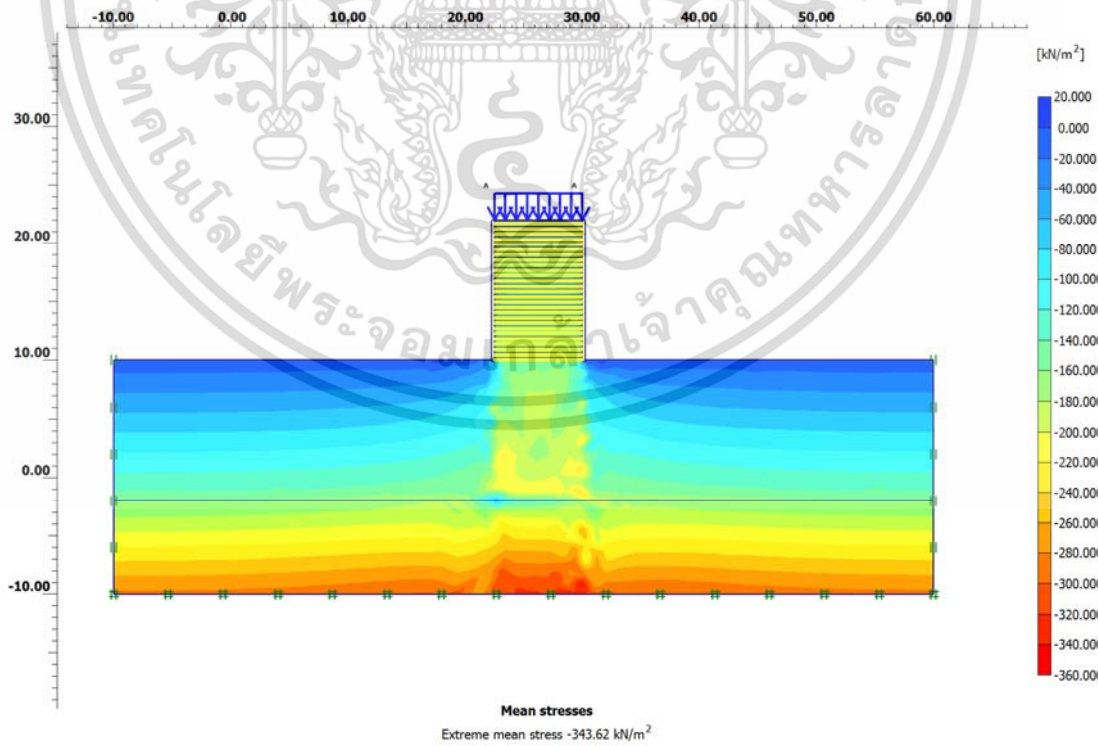


รูปที่ 5.17 ค่า total incremental displacement ก้ำแพ่งกว้าง 7.5 เมตรเสริมแรงชั้นเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

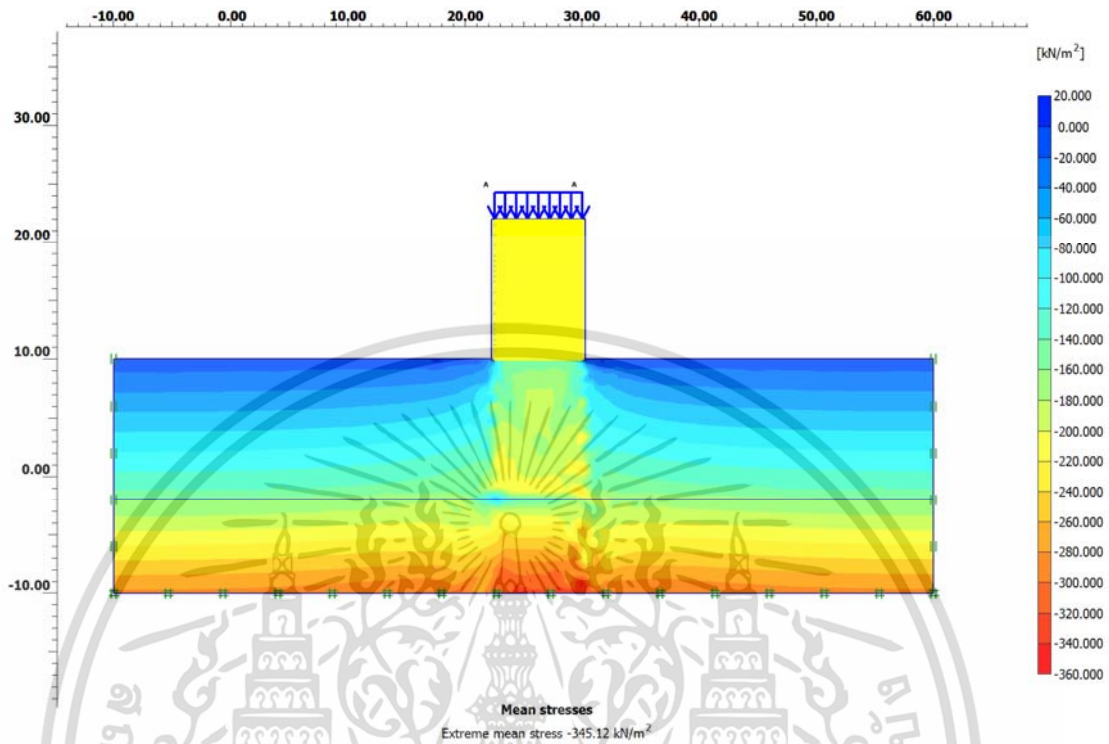


รูปที่ 5.18 ค่า total incremental displacement กำแพงกว้าง 7.5 เมตรเสริมแรงสองชั้น



รูปที่ 5.19 ค่าความเค้นรวมกำแพงกว้าง 7.5 เมตรเสริมแรงชั้นเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.20 ค่าความเค้นรวมก้ำแพงกว้าง 7.5 เมตรเสริมแรงสองชั้น

5.1.3 สรุปผลเสถียรโดยรวมของก้ำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านที่ $L/H = 0.6$

ผลสรุปทั้งกรณี 5.1.1 ในส่วนก้ำแพงกันดินเสริมแรงสองด้านกว้าง 15 เมตร ที่ตาข่ายเสริมแรง geogrid กว้าง 7.5 เมตร (ที่ $L/H = 0.6$) และ กรณี 5.1.2 ที่ก้ำแพงกว้าง 7.5 เมตร (ที่ $L/H = 0.6$) แสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าเสถียรภาพโดยรวมส่วนวิเคราะห์เพิ่มเติมก้ำแพงกันดินเสริมแรง

Global Stability FS	วิธีสมมูลขีดจำกัด	วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	
		FS แบบลู่เข้า	FS แบบไม่ลู่เข้า
ก้ำแพงกันดินเสริมแรงด้านเดียว	1.534	1.170	1.686
ก้ำแพงกันดินเสริมแรงสองด้าน $L/H = 0.7$	1.052	0.021	2.304
ก้ำแพงกันดินเสริมแรงสองด้าน $L/H = 0.6$	1.051	0.316	1.854
ก้ำแพงกันดินกว้าง 7.5 เมตรเสริมแรงชั้นเดียว	0.325	0.328	1.799
ก้ำแพงกันดินกว้าง 7.5 เมตรเสริมแรงสองชั้น	1.468	0.396	2.234

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 5.1 ในกรณี 5.1.1 ที่กำแพงกันดินเสริมแรงกว้าง 15 เมตร ส่วนตาข่ายเสริมแรงยาว 7.5 เมตร (ที่ $L/H = 0.6$) จะเห็นได้ว่าวิธีสมมูลขีดจำกัดให้ค่าเสถียรภาพโดยรวมที่ไม่ผ่าน (global stability FS = 1.051 ในตารางที่ 5.1) ขณะที่ค่าเสถียรภาพโดยรวมจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ safety analysis แบบไม่ลู่เข้า ให้ค่าที่ถูกต้องมากกว่าที่ 1.854

จากตารางที่ 5.1 ในกรณี 5.1.2 ที่กำแพงกันดินเสริมแรงกว้าง 7.5 เมตร จะเห็นได้ว่าวิธีสมมูลขีดจำกัดให้ค่าเสถียรภาพโดยรวมของกำแพงกันดินที่มีตาข่ายเสริมแรงสองชั้นที่ (global stability FS = 0.325 ในตารางที่ 5.1) ที่น้อยกว่าค่าเสถียรภาพโดยรวมของกำแพงกันดินที่มีตาข่ายเสริมแรงชั้นเดียว (global stability FS = 1.468 ในตารางที่ 5.1) ทั้งๆที่กำแพงกันดินเสริมแรงที่มีตาข่ายเสริมแรงสองชั้นควรมีความแข็งแรงมากกว่ากำแพงกันดินเสริมแรงที่มีตาข่ายเสริมแรงชั้นเดียว ซึ่งค่าเสถียรภาพโดยรวมจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ safety analysis แบบไม่ลู่เข้า ให้ค่าที่ถูกต้องมากกว่าโดยให้ค่าเสถียรภาพโดยรวมของกำแพงกันดินที่มีตาข่ายเสริมแรงสองชั้น (global stability FS = 2.234 ในตารางที่ 5.1) มากกว่าค่าเสถียรภาพโดยรวมของกำแพงกันดินที่มีตาข่ายเสริมแรงชั้นเดียวที่ (global stability FS = 1.799 ในตารางที่ 5.1)

5.2 ข้อควรระวังในการออกแบบระยะเยื้องของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน

ในการออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกันนั้น จะต้องระมัดระวังในการวางระยะเยื้อง offset (D) ของกำแพงชั้นบนจากกำแพงชั้นล่าง ดังแสดงในรูปที่ 5.21 ที่แสดงข้อความจาก FHWA-RD-89-043 หน้า 36 ที่นอกจากจะมีปัญหาเรื่องการเพิ่มขึ้นของแรงไถล (sliding) แรงดึง (tensile force) การโก่งตัวด้านข้าง (lateral deflection) แล้ว ยังมีปัญหาในเรื่องการต้านดึงออก (pullout resistance) ที่ไม่เพียงพอ โดยเฉพาะในส่วนของความยาวตาข่ายเสริมแรงของกำแพงด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 5.22 จาก FHWA-RD-89-043 หน้า 38

Structures with Reinforcement Layers of Different Lengths

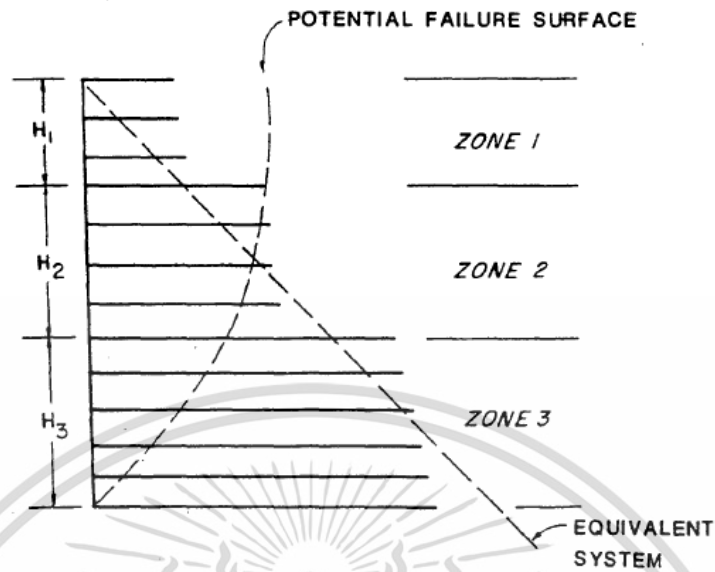
The design methods presented in this manual can be used with (or can lead to) structures where inclusion layers have different lengths provided the length difference between successive layers is not too large. If, for some reason, significant length differences between inclusions are considered, a limit equilibrium analysis must be conducted.

At the conceptual design stage, it may be tempting to consider a cross section of the type shown in figure 13, with inclusion length increasing as depth increases. Such a design must be approached with caution to take into account:

- Potential sliding at all reinforcement levels.
- Increased tensile forces in the lower level reinforcements.
- Increased lateral deflections in the upper zones.
- Inadequate pullout resistance near the top against future surcharge loads.

รูปที่ 5.21 ผลของความยาวตาข่ายเสริมแรงที่ไม่เท่ากันตาม FHWA-RD-89-043 หน้า 36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้ในเชิงวิชาการเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นแบบฉบับระยะเยื้องหน้าในการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.22 ความต้านทานการดึงออกตาม FHWA-RD-89-043 หน้า 38

ซึ่งจากตัวอย่างกำแพงกันดินแบบซ้อนทับกันในบทที่ 4 ที่กำแพงกันดินเสริมแรงชั้นบนสูง (H_1) 1.8 เมตร และมีความยาวตาข่ายเสริมแรง (L_1) 2 เมตร ซ้อนทับบนกำแพงกันดินเสริมแรงชั้นล่างสูง (H_2) 3.6 เมตร และมีความยาวตาข่ายเสริมแรง (L_2) 4 เมตร ด้วยระยะเยื้อง offset (D) 2 เมตร หากเปลี่ยนระยะเยื้อง offset (D') เป็น 1.5 เมตร โดยให้ค่าพารามิเตอร์อื่นๆเหมือนใน 4.4

ตารางที่ 5.2 ค่าเสถียรภาพภายในของกำแพงซ้อนทับกันชั้นบนที่ระยะเยื้อง (D') = 1.5 เมตร

Layer	Spacing S (m)	Height from top d_i (m)	Grid Area V_i (m ²)	Superimposed Stress		Lower σ_v kN/m ²	Total σ_v kN/m ²	Total σ_h kN/m ²	Tensile T_{MAX} kN/m	Active Length L_a (m)	Resistant Length L_e (m)	Total Length L_T (m)
				σ_f kN/m ²	σ_i kN/m ²							
1	0.45	0.45	0.5625	0.00	75.51	8.10	83.61	25.69	14.45	1.75	2.68	4.42
2	0.45	0.90	0.45	0.00	64.72	16.20	80.92	24.86	11.19	1.50	1.04	2.53
3	0.45	1.35	0.45	9.89	51.24	24.30	75.54	23.21	10.45	1.25	0.64	2.25
4	0.45	1.80	0.45	20.68	42.78	32.40	75.18	23.10	10.40	1.00	0.48	2.00
5	0.45	2.25	0.45	31.47	39.81	40.50	80.31	24.68	11.10	0.75	0.41	1.75
6	0.45	2.70	0.45	42.25	42.33	48.60	90.93	27.94	12.57	0.50	0.39	1.50
7	0.45	3.15	0.45	53.04	53.04	56.70	109.74	33.72	15.17	0.00	0.40	1.00
8	0.45	3.60	0.23	63.83	63.83	64.80	128.63	39.52	8.89	0.00	0.21	1.00
Embedment	0.15	3.75										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ในตารางที่ 5.2 ที่ระยะเอียง offset (D') เท่ากับ 1.5 เมตร จะเห็นว่าค่าความยาว geogrid ในชั้นที่ 1 มีความยาว 4.42 เมตร ซึ่งมากกว่าค่าความยาว geogrid ในชั้นที่ 1 ที่มีความยาว 3.82 เมตร ในตารางที่ 4.3 ตาม 4.4 ที่ระยะเอียง offset (D) เท่ากับ 2 เมตร และเลือกใช้ความยาว geogrid ในส่วนของกำแพงชั้นล่างใน 4.4 ที่ 4 เมตร

ตัวอย่างการคำนวณในชั้นที่ 1 ที่ความลึก (d_i) 0.45 เมตร จะได้ค่า grid area (V_i) ดังนี้

$$V_i = d_i + \frac{1}{2}(d_2 - d_1) = 0.45 + \frac{0.8 - 0.45}{2} = 0.5625$$

$$x_1 = D \tan \phi_r = 1.5 \tan(32) = 0.94 \text{ m}$$

$$x_2 = D \tan(45 + \phi_r/2) = 1.5 \tan(45 + 32/2) = 2.71 \text{ m}$$

ที่ผิวกำแพง (wall face) ที่ ชั้น 1 ตาม (4.7) $\sigma_f = \frac{z_1 - z_2}{z_2 - z_1} (\gamma_2 H_1 + q)$

$$\sigma_f = \frac{0.45 - 0.94}{2.71 - 0.94} [(18)(1.8) + 10] = -11.68 \geq 0 \text{ ดังนั้น } \sigma_f = 0 \text{ kN/m}^2$$

พื้นที่ประมาณในการรับแรงจากรูปที่ 4.2 ตาม (4.8) $\frac{(\gamma_2 H_1 + q) - \sigma_f}{(x_2 - x_1) \tan(45 - \phi_2/2)} = \frac{\sigma_1 - \sigma_f}{L_a}$

ค่า σ_1 ที่ชั้น 1 ในตารางที่ 5.2 จาก (4.9) $\sigma_1 = \frac{(\gamma_2 H_1 + q) - \sigma_f}{(x_2 - x_1) \tan(45 - \phi_2/2)} L_a + \sigma_f$

$$\sigma_1 = \frac{[(18)(1.8) + 10] - 0}{(2.71 - 0.94) \tan(45 - \frac{32}{2})} 1.75 + 0 = 75.51 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{โดยที่ } L_a = (H_1 - x_1) \tan(45 - \phi_2/2) = (3.60 - 0.45) \tan(45 - \frac{32}{2}) = 1.75$$

ซึ่งเป็นความยาวช่วงก่อนวงรี (active length) L_a เป็นค่าเดียวกับในตารางที่ 4.3 ความเค้นแนวตั้งของกำแพงด้านล่าง (Lower wall vertical stress)

$$\gamma_2 d_i = (18)(0.45) = 8.10 \text{ kN/m}^2$$

ความเค้นแนวตั้งทั้งหมด $\sigma_v = \sigma_1 + \gamma_2 d_i = 75.51 + 8.10 = 83.61 \text{ kN/m}^2$

ความเค้นแนวราบ $\sigma_h = K_{act} \sigma_v = (0.361)(83.61) = 25.69 \text{ kN/m}^2$

แรงดึงสูงสุด $T_{max} = \sigma_h V_i = (25.69)(0.5625) = 14.45 \text{ kN/m}^2$

โดยสมมติให้แรงดึงที่ยอมให้ $T_a = 20 \text{ kN/m}^2$ สำหรับตาข่ายเสริมแรง geogrid

อัตราส่วนความปลอดภัยต้านการฉีกขาด FS -rupture = $T_a/T_{max} = 20/14.45 = 1.38 > 1$ OK

สำหรับ pullout จะต้องการ FS > 1.5 และต้องการระยะยึดรั้งตามมาตรฐาน FHWA-NHI-00-043

$$L_g > \frac{1.5 T_{max}}{C \tan(\phi_2) C_i z R_c \alpha} = 1.5(14.45)/[(2) \tan(32)(18)(0.45)(0.8)(1)(1)] = 2.68 \text{ m}$$

โดยที่ R_c คือ ร้อยละของพื้นที่ที่วัสดุเสริมแรงครอบคลุม

$$(\% \text{ coverage of reinforcement}) = 1.0$$

C_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดึงออก (interaction pullout coefficient) = 0.8

$C = 2$ สำหรับตาข่ายเสริมแรง geogrid

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้รูปร่าง (scale effect correction factor) = 1.0

z คือ ค่าสูงของน้ำหนักรัดทับ เป็นค่าเดียวกับ d_i ในตารางที่ 4.1

ความยาวรวม (total length), $L_T = L_a + L_g = 1.75 + \max\{2.68, 1\} = 4.42 > 4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมีค่าเกินกว่าความยาวตาข่ายเสริมแรง geogrid ในตารางที่ 4.1 ที่ 4 เมตร ที่ ระยะเยื้อง offset (D) เท่ากับ 1.5 เมตร ดังนั้นจะเห็นได้ว่าระยะเยื้องที่ลดลงจากระยะเยื้อง offset (D) เท่ากับ 2 เมตรใน 4.4 มีผลทำให้ความต้านดึงออก (pullout resistance) ของตาข่ายเสริมแรง มีค่าไม่เพียงพอ

5.3 สรุปส่วนวิเคราะห์เพิ่มเติมของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านและแบบ

ซ้อนทับกัน

ส่วนวิเคราะห์เพิ่มเติมนี้เพิ่มเติมข้อควรระวังในการออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรง โดยเพิ่มเติมเฉพาะส่วนการหาค่าเสถียรโดยรวมของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน และการกำหนดระยะเยื้องของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน

ในส่วนการหาค่าเสถียรภาพโดยรวมกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน ควรจะหาค่าเสถียรภาพโดยรวมโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ safety analysis แบบถูเข้า ประกอบกับการหาค่าเสถียรภาพโดยรวมร่วมกับการใช้วิธีสมมูลขีดจำกัด เพื่อตรวจสอบข้อจำกัดจากการใช้วิธีสมมูลขีดจำกัดที่อาจให้ค่าเสถียรภาพโดยรวมที่ลดลงทั้งๆที่กำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้านมีความแข็งแรงมากขึ้นหรือรับแรงน้อยลง ใน 5.1 ที่รวม 5.1.1 ที่กำแพงกันดินเสริมแรงสองด้านสูง 12 เมตร ตาข่ายเสริมแรงยาว 7.5 เมตร ($L/H = 0.6$) และรวม 5.2 ที่กำแพงกันดินเสริมแรงสองด้านสูง 12 เมตรเท่ากับความยาวตาข่ายเสริมแรงที่ 7.5 เมตร ($L/H = 0.6$)

นอกจากนี้ การออกแบบควรระวังการกำหนดระยะเยื้องของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน ดังใน 5.2 ที่ควรกำหนดให้ความยาวตาข่ายเสริมแรงของกำแพงชั้นบนรวมกับระยะเยื้อง offset (D) มีค่ามากกว่าความยาวตาข่ายเสริมแรงของกำแพงชั้นล่าง เนื่องจากระยะเยื้องที่ลดลงมีผลทำให้ความต้านดึงออก (pullout resistance) ของตาข่ายเสริมแรงของกำแพงชั้นล่างมีค่าไม่เพียงพอ

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

บทนี้ประกอบด้วยสรุปใน 6.1 ข้อเสนอแนะในการออกแบบใน 6.2 และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไปใน 6.3

6.1 สรุป

กำแพงกันดินเสริมแรง (mechanically stabilized earth wall หรือ MSE wall หรือ MSEW) จัดเป็นกำแพงกันดิน (retaining wall) ประเภทหนึ่งซึ่งส่วนประกอบหลักคือวัสดุเสริมแรง (reinforcement) และวัสดุผิวหน้า (facing) โดยจะใช้วัสดุเสริมแรงร่วมกับดินถม (backfill) ที่เป็นดินเสริมกำลัง (reinforced soil) เพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติในการรับแรงดึงของดิน กำแพงกันดินเสริมแรงเริ่มใช้มาประมาณ 50 ปี โดยเริ่มใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกาประมาณปีค.ศ. 1970 (ปี พ.ศ. 2513) เนื่องจากจะประหยัดกว่ากำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็ก (reinforced concrete retaining wall) ในกรณีที่กำลังกันดินมีความสูงมาก เช่นมากกว่า 2 เมตร

กำแพงกันดินเสริมแรง (MSE wall) มีหลายแบบ แต่แบบที่นิยมใช้คือแบบ segmental precast concrete panel ที่ใช้แผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ (precast concrete panel) ที่ใช้เป็นวัสดุผิวหน้า ร่วมกับแถบเหล็ก (metallic strip) ที่ใช้เป็นวัสดุเสริมกำลัง และอีกแบบคือ modular block wall (MBW) ที่ใช้อิฐสำเร็จรูปโมดูลาร์บล็อก (modular block) เป็นวัสดุผิวหน้า ร่วมกับตาข่ายเสริมแรง (geogrid) ที่ใช้เป็นวัสดุเสริมกำลัง เนื่องจากแถบเหล็กมีค่าการยึดตัwn้อย ทำให้กำแพงกันดินแบบ segmental precast concrete panel นี้สามารถจัดเป็นกำแพงกันดินแบบไม่ยึดตัว (inextensible) ขณะที่ตาข่ายเสริมแรง geogrid ให้ค่าการยึดตัวมากกว่า ทำให้กำแพงกันดินเสริมแรงแบบ modular block wall (MBW) สามารถจัดเป็นกำแพงกันดินแบบยึดตัว (extensible) เนื่องจาก MBW มีคุณสมบัติการยึดตัวที่มากกว่า segmental precast concrete panel ทำให้ MBW มีต้นทุนก่อสร้างที่น้อยกว่า segmental precast concrete panel

ขณะที่มาตรฐานงานทาง (แบบมาตรฐานงานทาง. 2556.) และมาตรฐานงานสะพาน (แบบมาตรฐานงานสะพาน. 2556.) ของกรมทางหลวงชนบทให้เฉพาะรายละเอียดของกำแพงกันดินคอนกรีตเสริมเหล็กสูงไม่เกิน 3.5 เมตร ขณะที่ FHWA-NHI-00-043 ไม่ได้ให้รายละเอียดในการคำนวณออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน (back-to-back walls) และกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน (superimposed walls) ซึ่งกำแพงกันดินเสริมแรงสองด้านนิยมใช้สำหรับการก่อสร้างกำแพงกันดินส่วนคอสะพานทางหลวงที่เริ่มนำกำแพงกันดินเสริมแรงแบบ MBW มาใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนกำแพงกันดินเสริมแรงแบบ segmental precast concrete panel ในประเทศไทยเนื่องจากต้นทุนที่น้อยกว่า ขณะที่กำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกันได้เริ่มนำมาใช้ในประเทศไทยเนื่องจากมีรูปทรงที่สวยงามกว่าและอาจช่วยประหยัดเนื้อที่มากกว่า

ในส่วนกำแพงกันดินเสริมแรงแบบสองด้าน จะเห็นได้ว่าต้องใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการหาค่าเสถียรภาพโดยรวมร่วมกับวิธีสมดุลขีดจำกัด เนื่องจากวิธีสมดุลขีดจำกัดอาจให้ค่าเสถียรภาพโดยรวมที่ไม่ถูกต้อง ทว่าการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีความยุ่งยากในการสมมุติค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็น โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ตรวจสอบค่า stiffness ของตาข่ายเสริมแรงหรือค่า EA ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวระหว่างผลการเคลื่อนตัวที่เพิ่มขึ้น (total incremental displacement) จากการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการเคลื่อนตัวจาก FHWA-NHI-00-043 ใน (2.2) ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสถียรภาพโดยรวม (global stability FS) จากการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ค่าที่ถูกต้องเมื่อเทียบกับวิธีสมดุลขีดจำกัด ทั้งในกรณีที่มีความยาวตาข่ายเสริมแรงเป็น $L/H = 0.7$ ใน 3.4 และความยาวตาข่ายเสริมแรงเป็น $L/H = 0.6$ ใน 5.1.1 และกรณีที่กำแพงกันดินเสริมแรงมีความกว้างแคบสุดที่เท่ากับความยาวตาข่ายเสริมแรงที่ $L/H = 0.6$ ใน 5.1.2

ในส่วนของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้รายละเอียดการออกแบบคำนวณในบทที่ 4 และเพิ่มเติมข้อควรระวังในการกำหนดระยะเยื้องระหว่างกำแพงชั้นบนและชั้นล่าง ใน 5.2 ที่ควรกำหนดระยะเยื้อง (D) ให้ความยาวตาข่ายเสริมแรงของกำแพงชั้นบนรวมกับระยะเยื้องมีค่ามากกว่าความยาวตาข่ายเสริมแรงของกำแพงชั้นล่างเพื่อให้ตาข่ายชั้นล่างมีความยาวเพียงพอในการต้านการดึงออก (pullout resistance)

6.2 ข้อเสนอแนะในการออกแบบ

การออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรงสองด้าน ควรใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ควบคู่กับวิธีสมดุลขีดจำกัด ในการหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย เนื่องจากวิธีสมดุลขีดจำกัด อาจจะให้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่คลาดเคลื่อนมากได้ เป็นเพราะวิธีสมดุลขีดจำกัดจะใช้วิธี method of slices ในการหาอัตราส่วนความปลอดภัย ซึ่งการหาอัตราส่วนความปลอดภัยในวิธี method of slices จะต้องมีการกำหนดสมมุติฐานขึ้นกับวิธีการที่ใช้เพื่อให้ได้ค่าความปลอดภัยเพียงค่าเดียว ยกตัวอย่างเช่น วิธี Morgenstern-Price จำเป็นต้องกำหนดให้อัตราส่วนความปลอดภัยจากสมดุลแรงเท่ากับอัตราส่วนความปลอดภัยจากสมดุลโมเมนต์ จึงอาจก่อให้เกิดค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่คลาดเคลื่อนได้

การออกแบบกำแพงกันดินเสริมแรงซ้อนทับกัน จำเป็นต้องระวังผลของระยะเยื้องของกำแพงกันดินเสริมแรงชั้นบนที่จะส่งผลเปรียบเสมือนเป็นน้ำหนักกดทับบนกำแพงกันดินเสริมแรงด้านล่าง ที่ในบางกรณี กำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน อาจต้องการระยะเสริมแรงของ geogrid ที่ยาวกว่าระยะเสริมแรงที่ต้องการสำหรับความสูงรวมทั้งสองชั้นของกำแพงกันดินแบบไม่ซ้อนทับกันที่ไม่มีระยะเยื้อง

6.3 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป

ในส่วนของการกำหนดดินเสริมแรงแบบสองด้าน จะเห็นว่ามีความยุ่งยากในด้านสมมุติฐานของค่าพารามิเตอร์ที่จะใช้ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อที่จะเปรียบเทียบค่าเสถียรภาพโดยรวมจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับค่าเสถียรภาพโดยรวมจากวิธีสมมูลขีดจำกัด งานวิจัยที่อาจทำต่อไปอาจจะเป็นการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ที่จะใช้ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อที่จะเปรียบเทียบค่าเสถียรภาพโดยรวมจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับค่าเสถียรภาพโดยรวมจากวิธีสมมูลขีดจำกัด โดยอาจจำกัดเฉพาะกับกำแพงด้านเดียวใน 3.4.2 เพื่อให้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกำแพงกันดินเสริมแรงด้านเดียวมีค่าที่ถูกต้องมากขึ้น

ในส่วนของการกำหนดดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน อาจตรวจสอบพฤติกรรมในด้านอื่นของกำแพงกันดินเสริมแรงแบบซ้อนทับกัน โดยการตรวจสอบพฤติกรรมด้านอื่นๆตามรูปที่ 5.11 จากการกำหนดระยะเยื้อง (D) ที่ไม่เหมาะสม นอกเหนือจากการต้านดึงออก (pullout resistance) ที่ไม่เพียงพอ เช่นการเพิ่มขึ้นของแรงไถล (sliding) แรงดึง (tensile force) การโก่งตัวด้านข้าง (lateral deflection) เป็นต้น



บรรณานุกรม

- แบบมาตรฐานงานทาง. 2556. “แบบมาตรฐานงานทาง.” สำนักสำรวจและออกแบบ กรมทางหลวงชนบท.
- แบบมาตรฐานงานสะพาน. 2556. “แบบมาตรฐานงานสะพาน.” สำนักสำรวจและออกแบบ กรมทางหลวงชนบท.
- พิทักษ์ชน ทันมั่ง, วีรยา ฉิมอ้อย. 2559. “การเปรียบเทียบการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินด้วยวิธีสมดุลงัดและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์”. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 24 ฉบับที่ 1 มกราคม - มีนาคม 2559.
- วารุณี กะการดี, สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, รัฐธรรม อิศโรฬาร. 2556. การศึกษาความเหมาะสมของการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดงานขุดโดยเปรียบเทียบวิธีสมดุลงัด ไฟไนต์เอลิเมนต์ และสมดุลงัดร่วมกับการพิจารณาหน่วยแรงในมวลดิน. หน้า 339-346. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18. โรงแรมดิเอ็มเพรสเชียงใหม่. เชียงใหม่.
- สุเชษฐ์ ลีจิตเลอสรวง. 2550. “วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิค”. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. หน้า 196.
- AASHTO 1997. “Standard Specifications for Highway Bridges, Figure 5.8.3A Calculation of Vertical Stress for Bearing Capacity Calculations (for Horizontal Backslope Condition)”. American Association of State Highway and Transportation. 1997.
- BS8006. 2010. “Code of Practice for Strengthened/Reinforced Soils and other Fills”. The British Standards Institution.
- Budhu Muni. 2011. “Soil Mechanics and Foundations”. 3rd Edition. John Wiley & Sons.
- Das Braja M. 2006. “Principles of Geotechnical Engineering”. 7th Edition. Cengage Learning.
- EBGIO. 2011. “Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements”. Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen หรือ German Geotechnical Society.
- FHWA-NHI-00-043. 2001. “Mechanical Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design & Construction Guidelines.” Federal Highway Administration and National Highway Institute (NHI). U.S. Department of Transportation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- FHWA-NHI-10-024. 2009. “**Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes – Volume I.**” Federal Highway Administration and National Highway Institute (NHI). U.S. Department of Transportation. 2009.
- FHWA-RD-89-043. 1990. “**Reinforced Soil Structures Volume I. Design and Construction Guidelines.**” U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration.
- FHWA/TX-05/0-4485-1. 2005. **An Examination of Design Procedures for Single and Multi-Tier Mechanically Stabilized Earth Walls.** Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration.
- Galindo Alex. 2012. **Design of Reinforced Soil: Comparative Analysis between FHWA, BS and EBGeo.** First Central American and Caribbean Landslide Congress.
- Geo-Slope. 2007. **Stability Modeling with SLOPE/W.**
- Han Jie, Leshchinsky Dov. 2010. **Analysis of Back-to-back Mechanically Stabilized Earth Walls.** Geotextiles and Geomembranes 28 pp 262–267.
- Plaxis Inc. 2016. **PLAXIS 2D Reference Manual.**
- Obrzud R. & Truty, A. 2012. **The Hardening Soil Model – A Practical Guidebook.** ZSoil publisher.
- Sri Wulandari Paravita, Tjandra Daniel. 2015. **Analysis of Geotextile Reinforced Road Embankment Using PLAXIS 2D.** Procedia Engineering 125 pp 358 – 362.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายวุฒิชัยชาติพัฒนานันท์
ประวัติการศึกษา	2535 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2542 Master of Business Administration. University of Tennessee. USA. 2544 Master of Science (Management Science). University of Tennessee, USA. 2547 Master of Science (Statistics). University of Tennessee, USA. 2547 Doctor of Philosophy (Management Science). University of Tennessee. USA.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้