

การศึกษาพฤติกรรมของกำแพงดินเสริมกำลังภายใต้แรงกระทำเคลื่อนที่บนราง
รถไฟด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

INVESTIGATION OF MSE WALL BEHAVIOR UNDER DYNAMIC TRAIN
LOAD BY FINITE ELEMENT METHOD



โอจักรพรรดิ สุขชัยสิทธิ์

Ochakkraphat Sukchaisit

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโยธา สิ่งแวดล้อม และการจัดการงานก่อสร้าง

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2566

KMITL-2023-EN-M-097-135

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INVESTIGATION OF MSE WALL BEHAVIOR UNDER DYNAMIC TRAIN
LOAD BY FINITE ELEMENT METHOD

Ochakkraphat Sukchaisit

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND
CONSTRUCTION MANAGEMENT

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาพฤติกรรมของกำแพงดินเสริมกำลังภายใต้แรงกระทำเคลื่อนที่บนรางรถไฟด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์
นักศึกษา	โอจักรพรรดิ สุขชัยสิทธิ์
รหัสประจำตัว	63601133
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	สาขาวิศวกรรมโยธา สิ่งแวดล้อม และการจัดการงานก่อสร้าง
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ศลิษา ไชยพุทธ

บทคัดย่อ

กำแพงกันดินเสริมกำลัง เป็นโครงสร้างเสริมกำลังของลาดดิน ช่วยเพิ่มเสถียรภาพ และความลาดชันของลาดดิน เพิ่มพื้นที่การใช้ประโยชน์บริเวณที่ก่อสร้างให้มีมากขึ้น ในปัจจุบันการก่อสร้างกำแพงกันดินเสริมกำลังถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เช่น การก่อสร้างบริเวณคอสะพาน โดยเฉพาะในงานถนน ในขณะที่การก่อสร้างกำแพงกันดินเสริมกำลังยังไม่ถูกพัฒนาและก่อสร้างให้รองรับโครงสร้างทางรถไฟอย่างกว้างขวาง งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมของกำแพงกันดินที่ก่อสร้างบนชั้นดินแข็ง รองรับแรงกระทำเคลื่อนที่จากการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟด้วยความเร็วต่างๆ ได้แก่ 100, 150 และ 200 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบ 3 มิติ แบบจำลองโครงสร้างทางรถไฟ มีขนาดกว้าง 4.10 เมตร วางอยู่บนกำแพงกันดินเสริมกำลัง ขนาดกว้าง 20.4 เมตร สูง 6 เมตร ตรวจสอบพฤติกรรมของกำแพงกันดินเสริมกำลังภายใต้การเปลี่ยนแปลงความเร็ว ได้แก่ การเคลื่อนที่ตัวด้านข้าง การทรุดตัว และ ความเครียดที่เกิดขึ้นในแถบวัสดุเสริมกำลัง จากการศึกษาพบว่าการเคลื่อนที่ตัวด้านข้างและการทรุดตัวมีค่ามากขึ้นเมื่อความเร็วของน้ำหนักกระทำมากขึ้น ความเค้นในวัสดุเสริมกำลังมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วเพียงเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Investigation of MSE Wall Behavior under Dynamic Train Load by Finite Element Method
Student	Ochakkrapat Sukchaisit
Student ID.	63601133
Degree	Master of Engineering
Program	Civil Engineering Environmental Engineering and Construction Management
Year	2023
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Salisa Chaiyaput

Abstract

Railway system nowadays consists of mechanically stabilized earth (MSE) Wall, due to its serviceability and lower cost than conventional retaining wall. MSE wall must subject to dynamics loading induced by moving of the train, so it requires study and research about MSE wall and dynamics loading to understand it's behavior. This research study the behavior of MSE wall support the moving load of train in varied constant speed at 100, 150, 200 Km/hr. by finite element modeling method. The model consists of 4.10 m wide rail track structure on top of 20.4 m wide and 6 m high MSE wall. Then investigate the MSE wall's behavior lateral displacement, settlement, and strain in reinforce material. The result show that lateral displacement and settlement increase as the speed increase. The strain in the reinforcing material undergoes only small variations due to changes in velocity.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาและเอาใจใส่จากท่านอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ศลิษา ไชยพุทธ ที่ให้คำแนะนำปรึกษาและช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาตั้งแต่เริ่มต้นการวิจัยและสามารถผ่านอุปสรรคปัญหา รวมไปถึงได้มอบความรู้และประสบการณ์จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จในที่สุด

ขอขอบคุณมารดาของข้าพเจ้าที่เป็นผู้สนับสนุนในทุกด้าน เป็นกำลังสำคัญที่ทำให้ข้าพเจ้าสามารถแก้ไขปัญหาตั้งแต่วันแรกของการศึกษาจนถึงวันนี้

และขอขอบคุณรุ่นพี่รุ่นน้องคณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือข้าพเจ้า ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้บิดามารดา คนที่ข้าพเจ้ารัก ตลอดจนครูบาอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

โอจักรพรรดิ สุขชัยสิทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ||| ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์	4
2.1 กำแพงกันดินเสริมกำลัง.....	4
2.2 ความเป็นมา.....	4
2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของกำแพงกันดินเสริมกำลัง.....	6
2.3.1 กลไกการถ่ายโอนความเค้น.....	6
2.3.2 รูปแบบการทำงานของวัสดุเสริมกำลัง.....	7
2.4 ข้อดี-ข้อเสียของกำแพงกันดินเสริมกำลัง.....	7
2.4.1 ข้อดีของกำแพงกันดินเสริมกำลัง.....	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา IV นี้ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 ข้อเสียของกำแพงดินเสริมกำลัง.....	8
2.5 ส่วนประกอบของกำแพงดินเสริมกำลัง.....	9
2.5.1 วัสดุถมกลับ.....	9
2.5.2 วัสดุเสริมกำลัง.....	9
2.5.3 ผิวหน้ากำแพง.....	10
2.6 ภาพรวมการออกแบบกำแพงดินเสริมกำลัง.....	12
2.6.1 วิธีการออกแบบ การเสริมกำลังแบบไม่ยึดหยุ่น.....	14
2.6.2 วิธีการออกแบบ, การเสริมกำลังแบบยึดหยุ่น.....	14
2.7 เสถียรภาพภายนอกของกำแพงกันดินเสริมกำลัง.....	14
2.7.1 กำหนดขนาดรูปร่างของกำแพงและคุณสมบัติของดิน.....	16
2.7.2 กำหนดคุณสมบัติหรือสมรรถนะของกำแพง.....	16
2.7.3 การกำหนดขนาดเบื้องต้น.....	17
2.7.4 แรงดันดินสำหรับเสถียรภาพภายนอก.....	17
2.7.5 การคำนวณแรงดันดินในแนวตั้ง.....	21
2.7.6 เสถียรภาพต่อการสไลด์.....	23
2.7.7 เสถียรภาพของดินใต้ฐาน.....	24
2.7.8 เสถียรภาพโดยรวม (Overall Stability).....	26
2.8 เสถียรภาพภายใน (Internal stability).....	26
2.8.1 ผิวหน้าวิกฤต.....	28
2.8.2 การคำนวณแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นในวัสดุเสริมแรงแต่ละชั้น.....	29
2.8.3 เสถียรภาพภายในต่อการดึงออก.....	35
2.9 โครงสร้างทางรถไฟ.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา v ะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9.1 ราง (rail).....	37
2.9.2 เครื่องยึดเหนี่ยวราง (Fastening).....	38
2.9.3 หมอนรองราง (Tie หรือ Sleeper).....	40
2.9.4 หินโรยทาง.....	41
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42
บทที่ 3 วิธีการศึกษา.....	44
3.1 กำแพงกันดินเสริมกำลังที่ก่อสร้างจริง.....	45
3.2 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลัง.....	46
3.2.1 ลักษณะแบบจำลอง.....	46
3.2.2 ขั้นตอนการจำลอง (Phase Construction).....	50
3.3 แบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ.....	51
3.3.1 ลักษณะแบบจำลอง.....	51
3.3.2 แบบจำลองทางรถไฟ.....	52
3.3.3 แบบจำลองน้ำหนักรถไฟ.....	54
3.3.4 ขั้นตอนการจำลอง (Phase Construction).....	56
3.4 ระนาบการตรวจวัด (Measuring section).....	58
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	59
4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	60
4.2 การเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VI ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การทบทวนของกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ.....	66
4.4 ความเครียดในวัสดุเสริมกำลังของกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ.....	68
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	76
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	76
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	77
บรรณานุกรม.....	78



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **vii** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 Bearing Capacity Factor (FHWA-96-071,1997).....	25
2.2 ส่วนประกอบทางเคมีของรางรถไฟตามมาตรฐาน UIC 860 grade 900A.....	38
3.1 ขั้นตอนการจำลองการก่อสร้างกำแพงกันดินเสริมกำลัง.....	50
3.2 คุณสมบัติดินฐานราก (foundation soil).....	51
3.3 คุณสมบัติวัสดุถมกลับ (backfill).....	51
3.4 คุณสมบัติของวัสดุเสริมกำลัง.....	52
3.5 คุณสมบัติของผิวหน้าคอนกรีต (Concrete Panel Facing).....	52
3.6 คุณสมบัติของวัสดุทางในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์.....	53
3.7 ขั้นตอนการจำลองการก่อสร้างกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **viii** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปตัดทั่วไปของกำแพงกันดินเสริมกำลัง (FHWA-96-071,1997).....	4
2.2 ตัวอย่างบล็อกประกอบหล่อแห้งสำหรับผิวหน้ากำแพงกันดินเสริมกำลัง (FHWA-96-071,1997).....	12
2.3 ลักษณะการวิบัติจากเสถียรภาพภายนอกของกำแพงกันดินเสริมกำลัง (FHWA-96-071,1997).....	15
2.4 ฟังก์ชันตอนการคำนวณเสถียรภาพภายนอกสำหรับกำแพงกันดินเสริมกำลัง (FHWA-96-071,1997).....	16
2.5 ขั้นตอนการคำนวณแรงดันดินแบบ Active (Coulomb analysis) (FHWA-96-071,1997).....	18
2.6 การวิเคราะห์เสถียรภาพภายนอก: แรงดันดิน, จุดศูนย์ถ่วง ดินถมหลังกำแพงแนวราบและมีน้ำหนักจาก การจราจร (FHWA-96-071,1997).....	19
2.7 การวิเคราะห์เสถียรภาพภายนอก กรณีดินถมหลังกำแพงเป็นลาดชัน (FHWA-96-071,1997).....	20
2.8 การวิเคราะห์เสถียรภาพภายนอก: แรงดันดิน,จุดศูนย์ถ่วง กรณีดินถมหลังกำแพงเป็นลาดดินหลังหัก (FHWA-96-071,1997).....	21
2.9 การคำนวณความเค้นแนวตั้ง ที่ระดับฐานราก (FHWA-96-071,1997).....	22
2.10 ฟังก์ชันตอนการคำนวณเสถียรภาพภายในสำหรับกำแพงกันดินเสริมกำลัง (FHWA-96-071,1997).....	27
2.11 ตำแหน่งของแนววิบัติสำหรับเสถียรภาพภายในของกำแพงกันดินเสริมกำลัง (FHWA-96-071,1997).....	29
2.12 อัตราส่วนความเค้น ตามความลึกของกำแพงกันดินเสริมกำลัง (FHWA-96-071,1997).....	30
2.13 การคำนวณความเค้นแนวตั้งสำหรับกรณีดินถมหลังกำแพงเป็นรากคันดิน (FHWA-96-071,1997).....	32
2.14 ลักษณะการกระจายของความเค้นจากน้ำหนักแบบจุดในแนวตั้งสำหรับการคำนวณเสถียรภาพภายใน และภายนอก (FHWA-96-071,1997).....	33
2.15 ความเค้นจากน้ำหนักแบบจุดในแนวราบ (FHWA-96-071,1997).....	34
2.16 โครงสร้างทางรถไฟ (ความรู้เบื้องต้นวิศวกรรมรถไฟ,เจน บุญชื้อ).....	36
2.17 ส่วนประกอบหน้าตัดรางรถไฟ (ความรู้เบื้องต้นวิศวกรรมรถไฟ,เจน บุญชื้อ).....	37
2.18 หน้าตัดราง BS 100 A (ความรู้เบื้องต้นวิศวกรรมรถไฟ,เจน บุญชื้อ).....	38
2.19 เครื่องยึดเหนี่ยวรางยี่ห้อ Vossloh.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา IX ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20 เครื่องยึดเหนี่ยวรางยี่ห้อ Pandrol.....	39
2.21 แบบหมอนคอนกรีตอัดแรง (ความรู้เบื้องต้นวิศวกรรมรถไฟ,เจน บุญชื้อ).....	41
3.1 ผังแสดงขั้นตอนการศึกษา.....	44
3.2 รายละเอียดหน้าตัดแบบจำลองกำแพงดินเสริมกำลังเหมือนโครงสร้างขนาดจริง.....	46
3.3 รายละเอียดการปูวัสดุเสริมกำลังกำแพงดินเสริมกำลังเหมือนโครงสร้างขนาดจริง.....	47
3.4 ตำแหน่งตรวจวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างแบบจำลองกำแพงดินเสริมกำลังเหมือนโครงสร้างขนาดจริง.....	47
3.5 ตำแหน่งตรวจวัดการทรุดตัวแบบจำลองกำแพงดินเสริมกำลังเหมือนโครงสร้างขนาดจริง.....	48
3.6 แบบจำลองกำแพงดินเสริมกำลังเหมือนโครงสร้างขนาดจริง.....	49
3.7 รายละเอียดหน้าตัดแบบจำลองกำแพงดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ.....	52
3.8 หน้าตัดมาตรฐานชั้นทางรถไฟของการรถไฟแห่งประเทศไทย.....	53
3.9 ระยะห่างระหว่างหมอนรองรางรถไฟ.....	53
3.10 การจำลองโครงสร้างทางรถไฟด้วยโปรแกรม Plaxis 3D.....	54
3.11 ตำแหน่งน้ำหนักกดเพลลาบนแบบจำลองกำแพงดินเสริมกำลัง.....	55
3.12 ลักษณะของน้ำหนักกดเพลลาสำหรับจำลองน้ำหนักรถไฟ.....	55
3.13 ขนาดแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ.....	56
3.14 แบบจำลองแบบจำลองกำแพงดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ.....	56
3.15 ตำแหน่งทางรถไฟบนแบบจำลองกำแพงดินเสริมกำลังรับน้ำหนักรถไฟ.....	57
4.1 ตำแหน่งหน้าตัดสังเกตของแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ.....	59
4.2 การเคลื่อนตัวทั้งหมดของแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลัง (Total displacement).....	60
4.3 การเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงกันดินเสริมกำลังที่ก่อสร้างจริงและแบบจำลอง.....	61
4.4 การทรุดตัวของกำแพงกันดินเสริมกำลังที่ก่อสร้างจริงเทียบกับแบบจำลองที่หน้าตัดที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง-แถบโลหะ.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา x ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 การทรุดตัวของกำแพงกันดินเสริมกำลังที่ก่อสร้างจริงเทียบกับแบบจำลองที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังชนิดพอลิโพรพิลีน-แถบโลหะ.....	63
4.6 การทรุดตัวของกำแพงกันดินเสริมกำลังที่ก่อสร้างจริงเทียบกับแบบจำลองที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังชนิดพอลิเอสเตออร์-ตะแกรงเหล็ก.....	64
4.7 การเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงดินเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงแต่ละความเร็วของน้ำหนัก.....	65
4.8 การเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงดินเสริมกำลังด้วยแถบโลหะแต่ละความเร็วของน้ำหนัก.....	66
4.9 การทรุดตัวเนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำหนักรถไฟที่ระดับ +5.50 เมตร.....	67
4.10 การทรุดตัวของกำแพงดินตามแนวการเคลื่อนที่ของน้ำหนักรถไฟ.....	68
4.11 การเคลื่อนตัวด้านข้างของแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟที่หน้าตัดสังเกต (Phase lateral displacement).....	69
4.12 ความเครียดในวัสดุเสริมกำลังพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรับน้ำหนักรถไฟที่ความเร็ว 100 ก.ม./ชม.....	70
4.13 ความเครียดในวัสดุเสริมกำลังพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรับน้ำหนักรถไฟที่ความเร็ว 150 ก.ม./ชม.....	71
4.14 ความเครียดในวัสดุเสริมกำลังพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรับน้ำหนักรถไฟที่ความเร็ว 200 ก.ม./ชม.....	72
4.15 ความเครียดในวัสดุเสริมกำลังแถบโลหะรับน้ำหนักรถไฟที่ความเร็ว 100 ก.ม./ชม.....	73
4.16 ความเครียดในวัสดุเสริมกำลังแถบโลหะรับน้ำหนักรถไฟที่ความเร็ว 150 ก.ม./ชม.....	74
4.17 ความเครียดในวัสดุเสริมกำลังแถบโลหะรับน้ำหนักรถไฟที่ความเร็ว 200 ก.ม./ชม.....	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา XI ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เมื่อโลกพัฒนาขึ้นและเข้าสู่ยุคโลกาภิวัตน์ ระบบการขนส่งทางรางก็ถูกลดความสำคัญด้วยการเข้ามาของการขนส่งทางการบิน และรถยนต์ที่มีราคาถูกลง จนผู้คนทั่วไปสามารถครอบครองได้ จนกระทั่งประเทศญี่ปุ่นเป็นประเทศแรกที่ก่อสร้าง และเริ่มใช้งานระบบรถไฟความเร็วสูง นับจากวันนั้นทั่วโลกได้ตระหนักถึงความสำคัญของระบบการขนส่งทางราง มีการก่อสร้างรถไฟความเร็วสูงทั่วโลก เป็นกระแสของการพัฒนาระบบโครงสร้างพื้นฐานการขนส่งทางราง ระบบในการขนส่งมวลชน และโลจิสติกส์ก็มีการเพิ่มขึ้นของความต้องการใช้ระบบขนส่งทางรางมากขึ้น เนื่องด้วยการจราจรที่หนาแน่น และน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น ทำให้โครงสร้างพื้นฐานของระบบรางนั้นจำเป็นต้องมีเสถียรภาพและความสามารถในการให้บริการที่มากขึ้น ดังนั้นจึงต้องมียานวิจัยที่สามารถตอบสนองความต้องการ

ดินเป็นวัสดุที่รับแรงอัดได้ดี ในขณะที่กำลังการรับแรงดึงต่ำ จึงนำมาสู่แนวความคิดเสริมกำลังด้วยชั้นรับแรงดึงเพื่อเพิ่มกำลังให้ดินถม ซึ่งเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางในงานด้านวิศวกรรมปฐพี การเริ่มติดตั้งแถบเหล็ก (metal strip) เสริมกำลังในปี พ.ศ. 2513 ตามมาด้วยผ้าใยสังเคราะห์ และตาข่ายเสริมกำลังวัสดุพอลิเมอร์ (geotextile and geogrid) นำไปสู่ยุคใหม่ของการออกแบบโครงสร้างดินเสริมกำลัง กำแพงดินเสริมกำลัง (mechanically stabilized earth) กำแพงเสริมกำลังวัสดุสังเคราะห์ (geosynthetics MSE wall) ถูกใช้อย่างแพร่หลายด้วยการรวมกันของคันดินที่เสริมกำลังด้วยวัสดุสังเคราะห์เสริมกำลังดิน เพื่อใช้ในงานถนน ทางเท้า และ สนามบิน เป็นต้น แนวทางการออกแบบมากมายพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการออกแบบกำแพงดินเสริมกำลัง ซึ่งให้ผลลัพธ์ในการออกแบบที่ต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับแนวทางการประยุกต์ใช้กับโครงการ เสถียรภาพภายในและภายนอกของกำแพงดินเสริมกำลังขึ้นอยู่กับ กำลังของวัสดุเสริมกำลัง กำลังของดินถมกลับ อิทธิพลของน้ำหนักบรรทุก วิธีการออกแบบ และวิธีการก่อสร้าง ของกำแพงดินเสริมกำลัง

เนื่องจากกำแพงกันดินเสริมกำลังเป็นโครงสร้างที่มีเสถียรภาพ และต้นทุนในการก่อสร้างต่ำเมื่อเทียบกับการก่อสร้างกำแพงดินแบบดั้งเดิม ทำให้กำแพงดินเสริมกำลังเป็นที่นิยมในการก่อสร้างและการใช้งาน ไม่วั้นแม้แต่ในระบบการขนส่งทางราง เสถียรภาพของคันดินเสริมกำลังนั้นมีความสำคัญต่อความสามารถในการให้บริการของระบบราง และแรงกระทำของรางรถไฟในขณะที่ใช้งานมีลักษณะเป็นแรงกระทำแบบพลวัต

การศึกษานี้จะศึกษาพฤติกรรมของกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ โดยวัสดุเสริมกำลังในกำแพงกันดินเสริมกำลังสามารถจำแนกประเภทได้หลายลักษณะ แต่การจำแนกวัสดุเสริมกำลังที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการรับแรง และ การวิบัติของกำแพงกันดินเสริมกำลังคือการจำแนกวัสดุเสริมกำลังตามการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 1 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยืดหยุ่น ได้แก่ วัสดุเสริมกำลังชนิดยืดหยุ่นได้ (extensible reinforcement) และชนิดไม่ยืดหยุ่น (inextensible reinforcement) โดยในการศึกษานี้จะศึกษาพฤติกรรมของกำแพงกันดินเสริมกำลังด้วย พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE geogrid) และ แถบโลหะ (metal strip) เมื่อรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟที่ความเร็ว 100, 150 และ 200 ก.ม./ชม. ว่าความเร็วจะส่งผลต่อพฤติกรรม การเคลื่อนตัวด้านข้าง, การทรุดตัว และความเครียดที่เกิดขึ้นในวัสดุเสริมกำลังทั้งสองชนิดอย่างไร และจะต้องมีข้อพิจารณาเพิ่มเติมในการออกแบบกำแพงกันดินเสริมกำลังเมื่อรับน้ำหนักรถไฟเคลื่อนที่หรือไม่

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

ศึกษาพฤติกรรมของกำแพงกันดินเสริมกำลังเมื่อรองรับน้ำหนักการเคลื่อนที่ของรถไฟบนโครงสร้างทางรถไฟ ได้แก่ การเคลื่อนตัวด้านข้าง, การทรุดตัว และความเครียดในวัสดุเสริมกำลัง

1.3) ขอบเขตงานวิจัย

- 1.) งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมของกำแพงกันดินเสริมกำลังที่ถูกเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมกำลัง 2 ชนิด ได้แก่ วัสดุเสริมกำลังที่เป็นตาข่ายเสริมกำลังดินชนิดทำจากโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE geogrid) และเสริมกำลังด้วยแถบโลหะ (metal strip)
- 2.) ศึกษาความเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยด้านความเร็วเพียงอย่างเดียว
- 3.) ศึกษาเฉพาะดินฐานรากที่มีคุณสมบัติเป็นดินแข็ง (ชั้นดินเหนียวแข็งสลับชั้นทรายปนดินเหนียว)

1.4) ขั้นตอนการศึกษา

การวิจัยนี้เริ่มต้นด้วยการศึกษาข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต และศึกษาข้อมูลตรวจวัดของกำแพงกันดินเสริมกำลังขนาดจริงที่ถูกก่อสร้างของการศึกษาก่อนหน้านี้เพื่อนำคุณสมบัติเหล่านั้นมาตรวจสอบความถูกต้องด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่มีขนาดรูปร่างเหมือนกำแพงกันดินเสริมกำลังที่ก่อสร้างจริง

เมื่อตรวจสอบความถูกต้องแล้วจึงนำคุณสมบัติและลักษณะหน้าตัดของกำแพงกันดินเสริมกำลังนั้นมาสร้างแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลังที่มีความยาวมากขึ้น และมีการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างทางรถไฟอยู่เหนือกำแพงกันดินเสริมกำลังนั้น จากนั้นจึงคำนวณแบบจำลองให้มีการเคลื่อนที่ของน้ำหนักรถไฟบนโครงสร้างทางรถไฟที่ความเร็ว 100, 150 และ 200 ก.ม./ชม. เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของกำแพงกันดินเสริมกำลังภายใต้น้ำหนักเคลื่อนที่ ที่ความเร็วต่างกัน

1.5) ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การวิจัยนี้สามารถทำให้ทราบและเข้าใจถึงพฤติกรรมของกำแพงกันดินเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมกำลังชนิดยืดหยุ่นได้ (extensible reinforcement) และชนิดไม่ยืดหยุ่น (inextensible reinforcement) และบ่งชี้ความเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมเนื่องจากน้ำหนักเคลื่อนที่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 3 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดลาดคันดินในกรณีที่ดินที่ก่อสร้างมีจำกัด หลายปีที่ผ่านมากำแพงกันดินล้นถูกออกแบบและก่อสร้างเป็นกำแพงคอนกรีตเสริมกำลังที่ออกแบบมาเป็นลักษณะ Gravity wall และ กำแพงแบบคานงัด (Cantilever wall) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ลักษณะแข็งแรงและไม่สามารถยอมให้เกิดการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันเว้นแต่จะถูกสร้างอยู่บนเสาเข็ม ถ้าหากต้องออกแบบก่อสร้างกำแพงที่มีความสูงมากขึ้น ดินฐานรากมีคุณสมบัติด้วยลง ต้นทุนในการก่อสร้างกำแพงกันดินก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย

กำแพงกันดินเสริมกำลัง (Mechanically Stabilized Earth Walls) หรือ MSE Walls และลาดคันดินเสริมกำลัง (Reinforce Soil Slope) หรือ RSS เป็นโครงกำแพงกันดินที่มีต้นทุนต่ำ และสามารถรองรับการทรุดตัวต่างกันได้มากกว่ากำแพงกันดินที่สร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยการเสริมวัสดุเสริมกำลังลงไปบนดินทำให้ดินมีกำลังมากขึ้น ดินที่เสริมกำลังสามารถรองรับผิวหน้าตั้งฉากของดินเองได้ วัสดุป้องกันผิวหน้ามีหน้าที่ในการป้องกันการหลุดร่วง และกัดเซาะจากสภาพอากาศของดิน ทำให้สามารถสร้างโครงสร้างดินถมที่มีลาดแคบหรือผิวหน้าตั้งฉากได้อย่างปลอดภัย ในบางกรณีวัสดุเสริมกำลังสามารถต้านทานการตัดอันเกิดจากการแรงเฉือนซึ่งทำให้โครงสร้างมีเสถียรภาพมากขึ้น

การใช้วัสดุเสริมกำลังดินในการเพิ่มกำลังให้กับดินถูกใช้ตั้งแต่ยุคก่อนประวัติศาสตร์ การใช้ฟางเพื่อเสริมกำลังให้กับก้อนอิฐดินเผาถูกใช้ตั้งช่วงเริ่มต้นของประวัติศาสตร์ของมนุษย์ มนุษย์ยุคโบราณใช้กิ่งไม้และฟางไม้ในการเสริมกำลังที่อยู่อาศัยซึ่งทำมาจากดินโคลน ในศตวรรษที่ 17 และ 18 ผู้อพยพย้ายถิ่นฐานจากฝรั่งเศสได้สร้างผนังจากดินโคลนเสริมกำลังบริเวณอ่าวฟีนประเทศแคนาดา อีกตัวอย่างการสร้างผนังกันน้ำจากดินเสริมกำลังในยุคเริ่มแรกคือจีนที่ใช้ผนังจากดินเสริมกำลังเมื่อ 1000 ปีก่อน และผนังในแม่น้ำมีสซิสซิปปีในปี 1880 สำหรับตัวอย่างอื่นคือการใช้หมุดไม้ป้องกันดินสไลด์ในประเทศอังกฤษ และใช้ไม้ไผ่หรือลวดตาข่ายในการป้องกันการกัดเซาะ รากไม้สามารถเสริมกำลังดินได้อีกด้วย

การเสริมกำลังดินในยุคปัจจุบันนั้นบุกเบิกโดยสถาปนิกชาวฝรั่งเศส อ็องรี ไวดาล (Henri Vidal) ในช่วงต้น 1960 งานวิจัยของอ็องรีนำไปสู่การพัฒนาวิธีการเสริมกำลังดิน ซึ่งเป็นเสริมกำลังด้วยแถบเหล็ก (steel strip) โครงสร้างแรกที่ใช้วิธีการก่อสร้างนี้อยู่ที่รัฐแคลิฟอร์เนียประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี 1972 ภายใน 20 ปีที่ผ่านมา มีมากกว่า 20,000 โครงสร้างดินเสริมกำลังถูกก่อสร้างใน 37 ประเทศทั่วโลก เฉพาะในสหรัฐอเมริกามีกำแพงดินเสริมกำลังมากกว่า 7,000 แห่งถูกก่อสร้างตั้งแต่ปี 1972 เป็นต้นมา กำแพงดินเสริมกำลังที่สูงที่สุดที่เคยสร้างในอเมริกาสูง 28 เมตร

นับตั้งแต่การเริ่มใช้งานโครงสร้างกำแพงดินเสริมกำลัง ข้อกำหนดการออกแบบทั้งที่มีกรรมสิทธิ์ และไม่มีกรรมสิทธิ์ถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างกำแพงดินมากมาย ปัจจุบันสิทธิบัตรเกี่ยวกับการออกแบบและก่อสร้างกำแพงดินเสริมกำลังส่วนใหญ่หมดอายุลงแล้ว ส่งผลให้การก่อสร้างกำแพงดินเสริมกำลังมีความแพร่หลายมากขึ้นโดยสิทธิบัตรที่ยังคงบังคับใช้อยู่ส่วนใหญ่จะเกี่ยวกับระบบการยึดวัสดุเสริมกำลังกับผิวหน้ากำแพง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 5 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วง 20 ปีแรกของการสร้างกำแพงดินเสริมกำลังมีการกำหนดลักษณะวัสดุผิวหน้าชัดเจนคือเป็นแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2-2.5 ตารางเมตร แต่ปัจจุบันมีการใช้แผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จขนาดใหญ่ขึ้นจนถึง 5 ตารางเมตร และมีการใช้แผ่นคอนกรีตหล่อแห้ง (dry-cast) ขนาดเล็กมาใช้ในงานกำแพงดินเสริมกำลังด้วย

การประยุกต์ใช้ผ้าใยสังเคราะห์ (geotextile) ในกำแพงดินเสริมกำลังเริ่มหลังจาก การรับรู้ประโยชน์ของการเสริมผ้าใยสังเคราะห์ในงานถนนบนดินเดิมที่อ่อน กำแพงดินเสริมกำลังด้วยผ้าใยสังเคราะห์ ถูกสร้างในปี 1971 ในฝรั่งเศส และถูกสร้างในอเมริกาครั้งแรกในปี 1974 และตั้งแต่ปี 1980 เป็นต้นมาการใช้โครงสร้างกำแพงดินเสริมกำลังด้วยผ้าใยสังเคราะห์ ก็แพร่หลายมากขึ้น

ตาข่ายเสริมกำลังดิน (geogrid) ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกในปี 1980 และมีการเริ่มใช้งานในปี 1981 ก่อนจะมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในปี 1983

2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของกำแพงดินเสริมกำลัง

มวลดินเสริมกำลังมีความคล้ายคลึงกับคอนกรีตเสริมเหล็ก คือคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุสามารถเพิ่มได้ด้วยการใส่วัสดุเสริมกำลังขนานกับทิศทางของความเค้นหลัก เพื่อทดแทนการขาดกำลังต้านแรงดึงของดิน การเพิ่มขึ้นของกำลังต้านแรงดึงเป็นผลมาจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างวัสดุเสริมกำลังและดินเป็นวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. ดินและวัสดุเสริมกำลังถ่ายโอนความเค้นอย่างต่อเนื่องตลอดความยาวของวัสดุเสริมกำลัง
2. มวลดินจะต้องถูกเสริมกำลังอย่างสม่ำเสมอ ไม่มีการเสริมกำลังเฉพาะจุด

2.3.1 กลไกการถ่ายโอนความเค้น

ความเค้นถูกถ่ายโอนระหว่างมวลดินและวัสดุเสริมกำลังด้วยแรงเสียดทาน หรือแรงต้านจากชิ้นส่วนเสริมกำลังตามขวาง (passive resistance) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุเสริมกำลัง

(1) แรงเสียดทาน

เกิดขึ้นที่บริเวณที่เกิดความสัมพันธ์ระหว่างการเสียดรูปเนื่องจากแรงเฉือนและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างดินและวัสดุเสริมกำลัง วัสดุเสริมกำลังซึ่งมีแรงเสียดทานเป็นคุณสมบัติสำคัญควรถูกจัดวางในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนตัวของดิน ตัวอย่างวัสดุเสริมกำลังดังกล่าวเช่น แถบเหล็ก, ชิ้นส่วนตามยาวในตาข่ายเสริมกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 6 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) แรงต้านทานเนื่องจากชั้นส่วนเสริมกำลังตามขวาง (passive resistance)

เกิดขึ้นเป็นลักษณะกำลังรับอัดที่บริเวณชั้นส่วนตามขวางซึ่งเป็นชั้นส่วนที่ทำมุมฉากกับทิศทางการเคลื่อนตัวของดิน แรงต้านทานเนื่องจากชั้นส่วนเสริมกำลังตามขวางถือเป็นพฤติกรรมพื้นฐานของ ตาข่ายเสริมกำลังดิน เหล็กเส้นสานตาข่าย และลวดตาข่าย

ลักษณะการกระจายแรงบนวัสดุเสริมกำลังขึ้นอยู่กับความขรุขระของผิว, แรงกดทับเนื่องจากน้ำหนักโครงสร้างเอง ขนาดช่องเปิด ความหนาของชั้นส่วนตามขวาง และพฤติกรรมการยึดของวัสดุเสริมกำลัง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินที่ถูกเสริมกำลังได้แก่ ขนาดเม็ดดิน, ขนาดคละ, รูปร่างเม็ดดิน, ความหนาแน่น, ความชื้น, ความเหนียว และความแข็ง

2.3.2 รูปแบบการทำงานของวัสดุเสริมกำลัง

หน้าที่หลักของวัสดุเสริมกำลังคือการจำกัดการเสียรูปของดิน ในการจำกัดการเสียรูปดินจะถ่ายโอนความเค้นไปยังวัสดุเสริมกำลัง ความเค้นถูกรองรับด้วยวัสดุเสริมกำลังได้ในสองลักษณะ

(1) แรงดึง

เป็นลักษณะการรับแรงที่เกิดขึ้นมากที่สุด ในชั้นส่วนเสริมกำลังตามยาว (ชั้นส่วนเสริมกำลังที่มีทิศทางเดียวกับการเคลื่อนตัวของดิน) ทั้งหมดจะได้รับความเค้นดึงสูง นอกจากนี้แรงดึงยังเกิดที่วัสดุเสริมกำลังที่ตัดผ่านเส้นการวิบัติจากแรงเฉือน

(2) แรงเฉือนและการตัด

ชั้นส่วนเสริมกำลังตามขวางที่มีความแข็งระดับหนึ่งสามารถต้านแรงเฉือนและการตัดได้

2.4 ข้อดี-ข้อเสียของกำแพงดินเสริมกำลัง

2.4.1 ข้อดีของกำแพงดินเสริมกำลัง

กำแพงดินเสริมกำลังมีข้อได้เปรียบหลายประการเทียบกับกำแพงกันดินแบบดั้งเดิม

1. วิธีการก่อสร้างมีความสะดวกและรวดเร็ว ไม่ต้องใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ในการก่อสร้าง
2. ไม่ต้องใช้ช่างฝีมือเฉพาะทางในการก่อสร้าง
3. การก่อสร้างจำเป็นต้องมีการเตรียมการน้อยกว่าการก่อสร้างกำแพงแบบอื่น

4. ใช้พื้นที่บริเวณด้านหน้ากำแพงน้อย ระหว่างการก่อสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ลดการเวนคืนที่ดิน
6. ไม่ต้องการฐานรากที่มีความแข็งแรงเนื่องกำแพงดินเสริมกำลังสามารถรองรับการเสีรูปได้
7. มีต้นทุนต่ำ
8. ในทางเทคนิคสามารถก่อสร้างได้สูงถึง 25 เมตร

ด้วยความต้องการวัสดุก่อสร้างในปริมาณน้อย ความรวดเร็วในการก่อสร้าง และการแข่งขันระหว่างผู้ถือสิทธิบัตรวิธีการออกแบบ ส่งผลให้การก่อสร้างกำแพงดินเสริมกำลังมีต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับการสร้างกำแพงดินเสริมกำลังแบบดั้งเดิม กำแพงดินเสริมกำลังกลายเป็นกำแพงกันดินที่มีต้นทุนต่ำที่สุดสำหรับ กำแพงที่มีความสูงตั้งแต่ 2 เมตรเป็นต้นไปเนื่องกำแพงดินแบบดั้งเดิมอาจจำเป็นต้องมีการเตรียมฐานรากให้รองรับน้ำหนักได้

หนึ่งในข้อได้เปรียบที่สำคัญที่สุดของกำแพงดินเสริมกำลัง คือความสามารถในรองรับการเสีรูปเนื่องจากดินฐานรากอ่อน และโครงสร้างกำแพงดินเสริมกำลังสามารถรองรับน้ำหนักกระทำในลักษณะการสั่นสะเทือนได้ดีกว่ากำแพงกันดินคอนกรีตที่มีความแข็งแรง

แผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จที่เป็นวัสดุผิวหน้าของกำแพงดินเสริมกำลังสามารถออกแบบได้หลายรูปร่างและพื้นผิวเพื่อความสวยงาม ทั้งนี้สามารถใช้หินแกะสลัก ไม้ซุง หรือกองตาข่ายบรรจุหิน เพื่อความกลมกลืนกับสภาพแวดล้อม

2.4.2 ข้อเสียของกำแพงดินเสริมกำลัง

ข้อเสียเปรียบต่อไปนี้เป็นของโครงสร้างดินเสริมกำลังโดยทั่วไป ได้แก่

1. ต้องการพื้นที่หลังกำแพงเพื่อเป็นพื้นที่เสริมกำลังให้เพียงพอต่อเสถียรภาพภายในและภายนอก
2. กำแพงกันดินเสริมกำลัง ต้องใช้วัสดุกลับที่เป็นวัสดุคัดเลือกเม็ดหยาบ (หากพื้นที่ก่อสร้างไม่มีแหล่งวัสดุคัดเลือกเม็ดหยาบอาจส่งผลให้ค่าขนขนทำให้โครงสร้างไม่คุ้มค่าต่อการก่อสร้าง)
3. หลักการออกแบบที่เหมาะสมจะต้องพิจารณาการกัดกร่อนของวัสดุเสริมกำลังที่ทำจากโลหะ รวมถึงการเสื่อมสภาพของวัสดุพื้นผิวหน้ากำแพงที่สัมผัสกับสภาพแวดล้อมเช่นการเสื่อมของผ้าใยสังเคราะห์เนื่องรังสีอัลตราไวโอเล็ต และการเสื่อมสภาพของวัสดุพอลิเมอร์ในดิน
4. เนื่องจากการออกแบบกำแพงดินเสริมกำลังยังคงถูกพัฒนาอยู่จนถึงปัจจุบันทำให้ข้อกำหนดต่างๆ ยังไม่ได้ถูกกำหนดอย่างเป็นมาตรฐานเดียวกัน
5. โครงสร้างกำแพงดินเสริมกำลังขึ้นอยู่กับวัสดุจากผู้จัดหา และเจ้าของโครงการ รวมถึงผู้เชี่ยวชาญทางธรณีวิทยา แต่ขอบเขตของงานมักจะกำหนดโดยวิศวกรโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 8 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ส่วนประกอบของกำแพงดินเสริมกำลัง

2.5.1 วัสดุถมกลับ

สำหรับกำแพงกันดินเสริมกำลัง ต้องการวัสดุถมกลับที่มีคุณภาพดี มีความคงทน สามารถระบายน้ำได้ดี และมีปฏิสัมพันธ์ที่เกิดแรงเสียดทานสูงกับวัสดุเสริมกำลัง ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวมีในวัสดุเม็ดหยาบที่มีขนาดคละดี (well graded soil) กำแพงกันดินเสริมกำลังโดยทั่วไปจะมีเสถียรภาพที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติด้านแรงเสียดทานเป็นหลัก ทำให้วัสดุที่นำมาก่อสร้างครจะมีคุณสมบัติดังกล่าวด้วย ในบางวิธีการออกแบบจะใช้กลไกกำลังรับแรงดันของวัสดุเสริมกำลัง แต่ในกรณีนั้นวัสดุถมกลับมักจะต้องทำให้มีส่วนของดินเหนียวสูง

ถ้าหากมองในมุมมองของวัสดุเสริมกำลัง ดินที่กำลังต่ำหรือคุณภาพไม่ดีก็สามารถนำมาก่อสร้างกำแพงกันดินเสริมกำลังได้ แต่อย่างไรก็ตามวัสดุเม็ดหยาบคุณภาพสูง มีข้อได้เปรียบในด้านการระบายน้ำ ทำให้วัสดุเสริมกำลังชนิดทำจากโลหะมีความคงทนมากกว่า และต้องใช้วัสดุเสริมกำลังลดลง ยังมีข้อดีในการติดตั้งและบดอัดระหว่างการก่อสร้างที่ได้ง่ายกว่า เพิ่มอัตราการแข็งตัวของกำแพงและทำให้การวางแนวของกำแพงมั่นคงขึ้นอีกด้วย

2.5.2 วัสดุเสริมกำลัง

ประเภทของวัสดุเสริมกำลังนั้นสามารถแบ่งได้ประเภทได้ตามหลากหลายปัจจัยเช่น ลักษณะรูปร่าง ลักษณะชนิด, กลไกการถ่ายเทความเค้น, ชนิดเนื้อของวัสดุเสริมกำลัง, ความสามารถในการยึดหยุ่นและไม่ยึดหยุ่น, วิธีการเชื่อมต่อกับผิวหน้ากำแพง

(1) การแบ่งประเภทตามลักษณะรูปร่างทางเลขาคณิต

1. เชิงเส้น ทิศทางเดียว (linear unidirectional) เป็นแถบ เช่น แถบเหล็กหรือโลหะเรียบ, วัสดุเสริมกำลังดินสังเคราะห์ (geosynthetics) ที่มีลักษณะพอลิเมอร์เคลือบเส้นใยเสริมกำลัง
2. เชิงประกอบ ทิศทางเดียว (composite unidirectional) ตาข่ายหรือเหล็กเส้นสานเป็นตารางโดยจะมีระยะระหว่างชิ้นส่วนเสริมกำลังใหญ่กว่า 150 มิลลิเมตร
3. แผ่นแบน สองทิศทาง (planar bidirectional) มีลักษณะเป็นแผ่นต่อเนื่องของวัสดุเสริมกำลังดินสังเคราะห์ (geosynthetics), ตาข่ายหรือตะแกรงลวดโลหะ, เหล็กเส้นสาน ที่มีระยะระหว่างชิ้นส่วนเสริมกำลังน้อยกว่า 150 มิลลิเมตร

(2) การแบ่งประเภทตามเนื้อวัสดุ

1. วัสดุเสริมกำลังเนื้อโลหะ (metallic reinforcements) โดยทั่วไปจะเป็นเหล็ก ทั้งนี้เหล็กที่นำมาเป็นวัสดุเสริมกำลังมักจะผ่านการกลวไนซ์หรือเคลือบด้วย epoxy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 9 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เสริมกำลังเนื้อไมใช่โลหะ (nonmetallic reinforcements) โดยทั่วไปจะเป็นวัสดุพอลิเมอร์ ได้แก่ พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน หรือพอลิเอสเตออร์

(3) การแบ่งประเภทตามการยืดหยุ่น

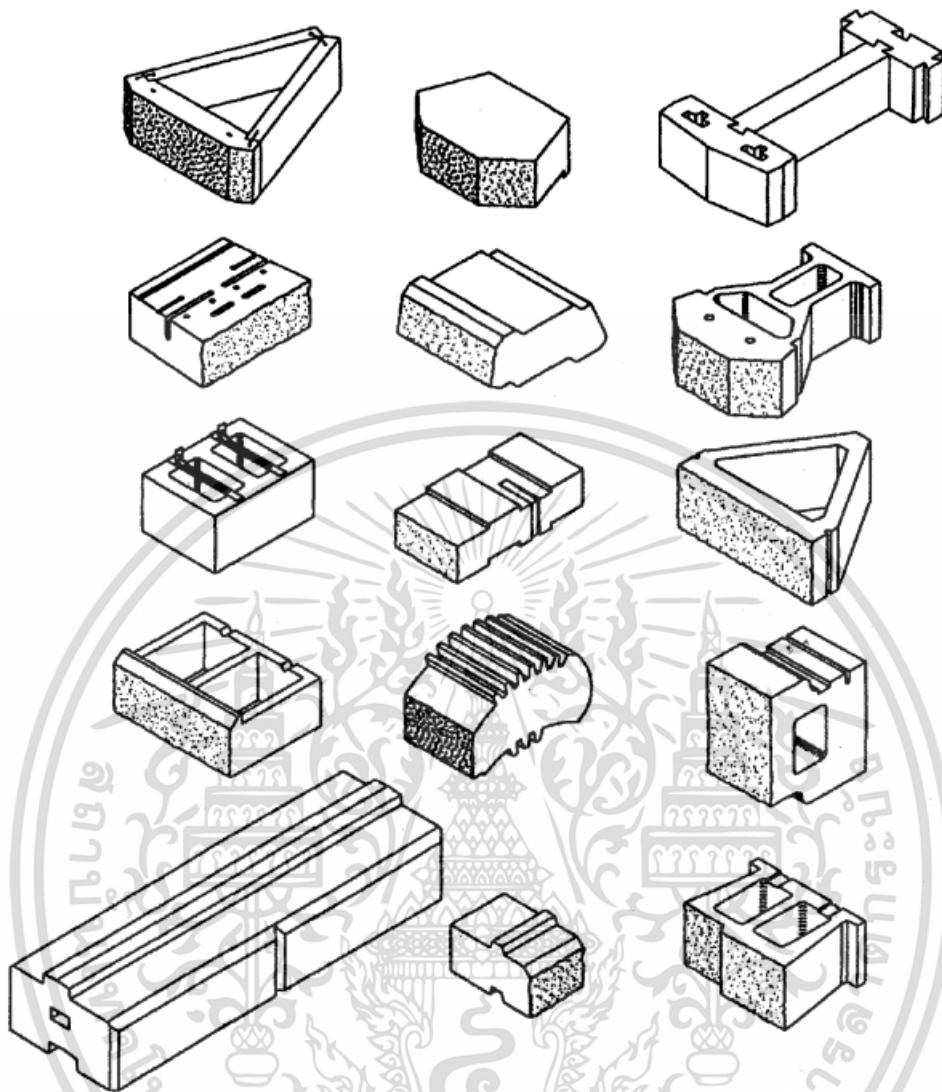
1. วัสดุเสริมกำลังชนิดไม่ยืดหยุ่น (inextensible) หมายถึงวัสดุมีการยืดตัวเมื่อถึงจุดวิบัติเล็กน้อยมากเมื่อเทียบกับการเสียรูปของดิน
2. วัสดุเสริมกำลังชนิดยืดหยุ่น (extensible) หมายถึงวัสดุมีการยืดตัวเมื่อถึงจุดวิบัติเท่าๆกับหรือมากกว่าการเสียรูปของดิน

2.5.3 ผิวหน้ากำแพง

ชนิดของผิวหน้ากำแพงกันดินเสริมกำลังเป็นตัวกำหนดความสวยงามของโครงสร้างเพราะผิวหน้ากำแพงเป็นส่วนประกอบเดียวที่สามารถมองเห็นได้ โดยวัสดุผิวหน้าสามารถผลิตให้มีพื้นผิวและสีที่หลากหลาย นอกจากนั้นผิวหน้ายังทำหน้าที่ป้องกันการหลุดร่วงของดิน และการกัดเซาะจากสภาพอากาศ ในบางกรณีผิวหน้ากำแพงจะถูกออกแบบให้เป็นเส้นทางระบายน้ำชนิดของผิวหน้ากำแพงโดยทั่วไปมีดังนี้

1. **แผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จ (segmental precast concrete panels)** แผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จมาความหนาอย่างน้อย 140 มิลลิเมตร มีรูปร่างเป็นไม้กางเขน, สี่เหลี่ยมจัตุรัส, สี่เหลี่ยมผืนผ้า, รูปเพชร หรือรูปหกเหลี่ยม กำลังการรับแรงดึงถูกออกแบบต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นส่วนระหว่างแผ่นคอนกรีตที่อยู่ติดกันในแนวตั้งมักจะขึ้นด้วย shear pin
2. **บล็อกประกอบหล่อแห้ง (dry cast modular block wall units)** มีลักษณะเป็นก้อนคอนกรีตขนาดเล็กที่ถูกออกแบบและผลิตเพื่อการก่อสร้างกำแพงดินเสริมกำลัง มวลของบล็อกประกอบโดยทั่วไปอยู่ในช่วง 15 ถึง 50 กิโลกรัม และบล็อกที่มีน้ำหนักระหว่าง 35 ถึง 50 กิโลกรัมมักถูกใช้ในโครงการก่อสร้างทาง บล็อกมีความสูงระหว่าง 100 ถึง 200 มิลลิเมตร ขึ้นกับผู้ผลิต ความยาวในด้านที่หันออกหน้ากำแพงมีความยาวในช่วง 200 ถึง 450 มิลลิเมตร มีความหนา (วัดตั้งฉากกับผิวหน้ากำแพง) โดยทั่วไป 200 ถึง 600 มิลลิเมตร บล็อกสามารถผลิตให้เป็นบล็อกตันหรือมีการเจาะรู ระหว่างชิ้นส่วนที่อยู่ติดกันในแนวตั้งจะขึ้นด้วย shear pin, lip หรือ key
3. **ผิวหน้าโลหะ (metallic facing)** กำแพงกันดินเสริมกำลังแรกที่ถูกก่อสร้างขึ้นมีโลหะกัลวาไนซ์ที่ขึ้นรูปเป็นครึ่งทรงกระบอกเป็นวัสดุผิวหน้า ถึงแม้ปัจจุบันแผ่นคอนกรีตหล่อสำเร็จจะถูกใช้โดยทั่วไปในการก่อสร้าง แต่ผิวหน้าโลหะอาจถูกใช้ในโครงการที่มีการเข้าถึงพื้นที่ได้ยากหรือข้อจำกัดของเครื่องจักรที่ใช้ยกและติดตั้งวัสดุผิวหน้าเพราะวัสดุผิวหน้าโลหะมีน้ำหนักเบากว่า
4. **ตาข่ายลวดเชื่อม (welded wire grids)** ลวดโลหะถูกสานและขึ้นรูปเพื่อเป็นวัสดุผิวหน้า

5. **กล่องตาข่ายบรรจุหิน (gabion facing)** สามารถใช้เป็นวัสดุผิวหน้ากำแพงดินเสริมกำลัง โดยมีตาข่ายลวดเชื่อม, เหล็กเส้นสาน หรือวัสดุเสริมกำลังดินสังเคราะห์ติดตั้งระหว่างกล่องตาข่ายบรรจุหิน
6. **ผิวหน้าวัสดุเสริมกำลังดินสังเคราะห์ (geosynthetics facing)** ฝ้ายสังเคราะห์ ซึ่งมีเนื้อเป็นวัสดุพอลิเมอร์ ถูกนำมาปกคลุมผิวหน้าของกำแพง แต่ผิวหน้าชนิดนี้ จะเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต และความเสียหายจากการเกิดไฟไหม้ แต่ถ้าหากใช้วัสดุเสริมกำลังสังเคราะห์ลักษณะเป็นตาข่ายมาปกคลุมผิวหน้าทำให้สามารถปลูกพืชบริเวณผิวหน้าซึ่งช่วยป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต และเป็นรูปลักษณ์ที่สวยงาม
7. **ผิวหน้าหลังการก่อสร้าง (postconstruction facing)** สำหรับกำแพงดินเสริมกำลังที่ก่อสร้างโดยการห่อดินบริเวณผิวหน้า (การใช้ตาข่ายเสริมกำลังดินหรือฝ้ายสังเคราะห์) ผิวหน้าของกำแพงสามารถถูกก่อสร้างภายหลังการก่อสร้างกำแพงไปแล้วได้เช่น การ shotcrete หรือการหล่อในที่ หรือใช้ผิวหน้าที่สร้างให้สามารถเชื่อมต่อกับกำแพงโดยเฉพาะ การทำเช่นนี้ก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายที่มากขึ้น แต่เหมาะสมในกรณีที่การก่อสร้างเกิดการหลุดตัวในช่วงแรกเป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างบล็อกประกอบหล่อแห้งสำหรับผิวหน้ากำแพงกันดินเสริมกำลัง (FHWA-96-071,1997)

2.6 ภาพรวมการออกแบบกำแพงกันดินเสริมกำลัง

นับตั้งแต่มีการพัฒนาแนวคิดวิธีการเสริมกำลังดิน และนำมาประยุกต์กับกำแพงกันดินเสริมกำลัง ก็มีวิธีการออกแบบมากมายถูกนำเสนอ นำไปใช้ และปรับปรุง วิธีการที่ใช้กันในปัจจุบันจะพิจารณาถึงลักษณะเลขาคณิต (ขนาดรูปร่าง) และ การเสริมกำลังที่จำเป็น เพื่อป้องกันการวิบัติภายในและภายนอกด้วยวิธีวิเคราะห์ Limit Equilibrium (LE)

การวิเคราะห์เสถียรภาพภายนอกของ กำแพงกันดินเสริมกำลัง ทำโดยการมองว่าพื้นที่ของกำแพงกันดินเสริมกำลังที่มีการเสริมกำลังเป็นดินเนื้อเดียวกัน จากนั้นก็วิเคราะห์เสถียรภาพภายนอกเหมือนกับที่วิเคราะห์กับกำแพงกันดินแบบดั้งเดิม (gravity type wall) ความแตกต่างจะอยู่ที่การคำนวณเสถียรภาพภายในที่ต้องพิจารณาเพื่อหาการเสริมกำลังที่จำเป็น โดยหลักแล้วจะเป็นการคำนวณแรงดันดินด้านข้างที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 12 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นในตำแหน่งที่เป็นแนวการวิบัติ เสถียรภาพภายในจะเป็นการคำนวณหน่วยการเสริมกำลัง (ชั้นของวัสดุเสริมกำลัง) ที่แยกกันต้านแรงดันดิน ในการออกแบบมีข้อแนะนำให้ควบคุมการเสีรูปร่างของโครงสร้างจากการเสริมกำลัง ไม่ใช่มวลดิน ซึ่งอาจฟังดูไม่สอดคล้องเพราะเป็นโครงสร้างที่มีมวลดินเป็นส่วนประกอบส่วนใหญ่ ทั้งนี้การคำนวณการเสีรูปร่างจะไม่อยู่ในขั้นตอนการออกแบบ

จากวิธีการและการวิจัยที่เกิดขึ้นในทศวรรษที่ผ่านมา ทำให้ได้ข้อตกลงร่วมกันว่าการออกแบบควรประกอบไปด้วยองค์ประกอบดังนี้

1. วิเคราะห์ หน่วยแรงใช้งาน (Working stress analysis)
2. วิเคราะห์ ขีดจำกัดสมดุล (limit equilibrium analysis)
3. คำนวณการเสีรูปร่าง (deformation)
4. การวิเคราะห์แรงใช้งานของโครงสร้างกำแพงกันดินเสริมกำลัง

(1) การวิเคราะห์หน่วยแรงใช้งาน

ประกอบไปด้วย

1. เลือกบริเวณที่จะเสริมกำลัง และ ตรวจสอบว่า แรงที่เกิดกับดินสอดคล้องกับคุณสมบัติของดินหรือไม่
2. คำนวณเสถียรภาพที่ระดับของแต่ละชั้นการเสริมกำลัง และคาดคะเนการเกิดการวิบัติแบบก้าวหน้า (progressive failure) วิเคราะห์ ขีดจำกัดสมดุล

(2) วิเคราะห์ ขีดจำกัดสมดุล

การวิเคราะห์ขีดจำกัดสมดุลประกอบไปด้วยการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยภาพรวมของโครงสร้าง ชนิดของเสถียรภาพที่ต้องพิจารณาคือ ภายใน ภายนอก และโดยรวม

1. เสถียรภาพภายนอกครอบคลุม เสถียรภาพโดยรวมของมวลดินที่เสริมกำลัง พิจารณาให้เป็นวัตถุเดียว แล้วพิจารณาแนวการวิบัตินอกมวลดินที่เสริมกำลัง
2. ภายใน ประกอบไปด้วยการพิจารณาแนวการวิบัติที่สามารถเกิดขึ้นในมวลดินที่เสริมกำลัง
3. ในบางกรณีแนวการวิบัติที่เกิดขึ้นอาจอยู่นอกมวลดินที่เสริมกำลังแต่มีบางส่วนอยู่ในมวลดินที่เสริมกำลัง จึงจำเป็นต้องมีการพิจารณาร่วมกัน

(3) คำนวณการเสีรูปร่าง

การคำนวณการเสีรูปร่างคือการคาดการณ์ความสามารถในการเคลื่อนที่ในแนวราบและแนวตั้งของโครงสร้าง โดยที่ผลกระทบของวัสดุเสริมกำลังที่ใช้ในโครงสร้างสามารถกำหนดได้ การเคลื่อนที่ในแนวราบจะวิเคราะห์ได้ยากและมีความแน่นอนน้อยที่สุดในการคำนวณ ในหลายกรณีที่มีการเคลื่อนตัวแนวราบได้มาจากการประมาณ หรือการสมมติว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (safety factor) เสถียรภาพภายนอกและภายในที่มากพอจะจำกัดการเสีรูปร่างในแนวราบให้อยู่ขอบเขตที่ยอมรับได้ ส่วนการเคลื่อนตัวในแนวตั้งสามารถคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 13 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้จาก การคำนวณการทรุดตัวทั่วไป โดยจะเน้นไปที่การทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน การทรุดตัวตามแนวยาวของ ผิวหน้ากำแพง การทรุดตัวในแนวตั้งฉากจากผิวหน้าแพง ผลลัพธ์อาจนำไปสู่การเลือกประเภทของผิวหน้า กำแพง หรือชนิดของวัสดุถมกลับ

2.6.1 วิธีการออกแบบ การเสริมกำลังแบบไม่ยึดหยุ่น

การวิเคราะห์ขีดจำกัดสมดุลในปัจจุบัน จะใช้วิธีที่สอดคล้องกับวิธีของกำแพงแรงโน้มถ่วงในการ พิจารณาเสถียรภาพภายนอก ของมวลดินเสริมกำลังทั้งหมด ซึ่งเหมือนกับการคำนวณเสถียรภาพภายนอกของ กำแพงกันดินแรงโน้มถ่วงทั่วไป สำหรับเสถียรภาพภายในจะพิจารณาเป็นแนวการวิบัติที่เป็นเส้นตรงสองเส้น แบ่งพื้นที่ของดินที่เสริมกำลังออกเป็น พื้นที่กระทำ (active zone) และ พื้นที่ต้านทาน (resistant zone) และ สมดุลจะต้องคำนวณได้จากเงื่อนไข

สำหรับเสถียรภาพภายนอกจะสมมติให้เป็นไปตามแรงของคูลอมบ์ โดยมีแรงเสียดทานของผิวกำแพง เท่ากับศูนย์ ส่วนเสถียรภาพภายในจะขึ้นอยู่กับแรงดันดินด้านข้าง K_a (active earth pressure) ในงานวิจัย ที่ผ่านมา (FHWA RD 89-043) ได้พัฒนาสมการความเค้นของเสถียรภาพภายใน โดยตัวแปรในสมการนี้จะ ประกอบไปด้วย K_a , ชนิดของวัสดุเสริมกำลัง (geotextile, geogrid, metal strip, metal grid) และความ ลึกจากผิวดินหลังกำแพง ผลลัพธ์จากการพัฒนาสมการกลายเป็นวิธีการออกแบบที่ชื่อว่า simplified coherent gravity method ซึ่งจะใช้ในการออกแบบต่อไป

2.6.2 วิธีการออกแบบ, การเสริมกำลังแบบยึดหยุ่น

สำหรับการคำนวณเสถียรภาพภายนอก จะสมมติให้ขนาดและการกระจายของความเค้น มีลักษณะ คล้ายกับการคำนวณแบบที่การเสริมกำลังแบบไม่ยึดหยุ่น

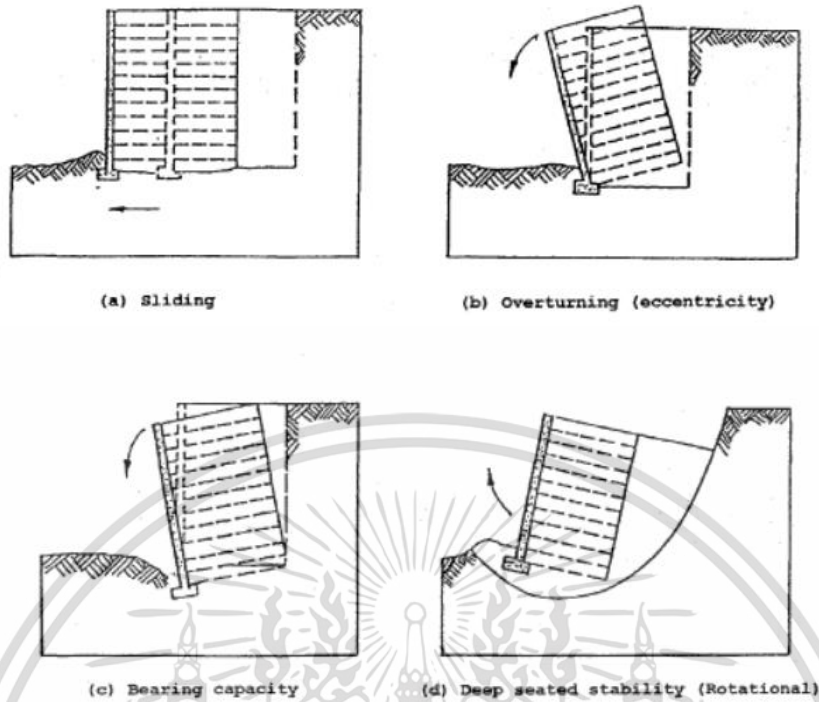
ส่วนเสถียรภาพภายใน จะใช้วิธีการ simplified coherent gravity method สัมประสิทธิ์แรงดันดิน ภายใน (K_a) ก็ยังคงขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุเสริมกำลัง โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ที่น้อยที่สุด (K_{a0}) จะถูกใช้กับการ ก่อสร้างกำแพงกันดินที่เสริมกำลังด้วย geotextile และ geogrid และการคำนวณเสถียรภาพภายในนี้จะใช้ แนวการวิบัติของ Rankine เพราะวัสดุเสริมกำลังสามารถยึดตัวได้มากกว่าดินก่อนการวิบัติของวัสดุถมกลับ

2.7 เสถียรภาพภายนอกของกำแพงกันดินเสริมกำลัง

จากการคำนวณเสถียรภาพของกำแพงกันดินแบบแรงโน้มถ่วงทั่วไป กลไกการวิบัติ 4 รูปแบบถูกยก มาพิจารณาแสดงในรูป 2.3 ซึ่งประกอบไปด้วย

1. การเลื่อนไถล
2. การพลิกคว่ำ
3. เสถียรภาพของดินใต้ฐาน
4. เสถียรภาพโดยรวม (การเลื่อนไถลในแนวที่อ่อนแอ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 14 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

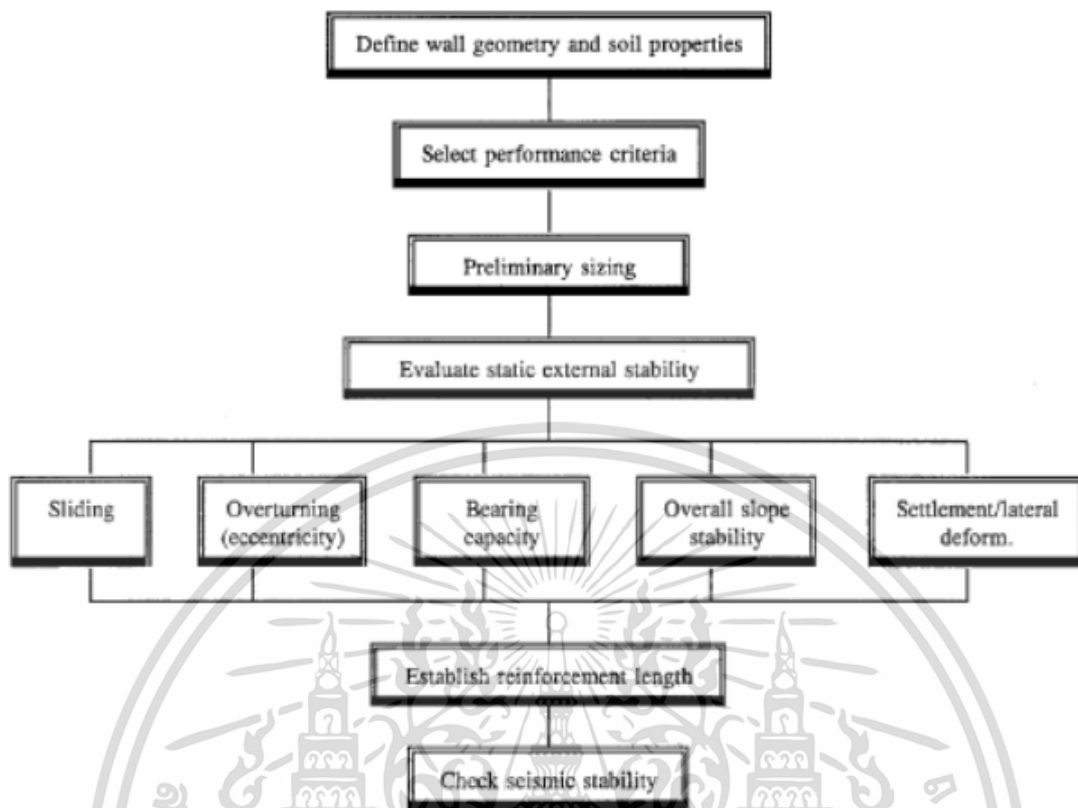


รูปที่ 2.3 ลักษณะการวิบัติจากเสถียรภาพภายนอกของกำแพงกันดินเสริมกำลัง (FHWA-96-071,1997)

เนื่องจากประสิทธิภาพและความยืดหยุ่นของกำแพงกันดินเสริมกำลังในสนาม ทำให้ค่า safety factor ในการออกแบบจะใช้น้อยกว่าที่ใช้ในการออกแบบกำแพงกันดินแบบแรงโน้มถ่วง ตัวอย่างเช่น safety factor สำหรับการคำนวณ bearing capacity มีค่าเท่ากับ 2.5 แต่โครงสร้างอื่นที่มีความแข็งแกร่งมากกว่ากลับใช้ค่า safety factor ที่มากกว่า

เช่นเดียวกัน คุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นของโครงสร้างกำแพงกันดินเสริมกำลัง นั้นทำให้การวิบัติแบบหมุนคว่ำแตกต่างจากกำแพงกันดินทั่วไป อย่างไรก็ตามการคำนวณการหมุนคว่ำแบบกำหนดระยะของแรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นจะช่วยลดการเสียรูปด้านข้าง ด้วยการจำกัดการเอียงที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงเป็นข้อตกลงให้ใช้การคำนวณแบบนี้กับการวิบัติแบบหมุนคว่ำ (overturning)

ลำดับการคำนวณเสถียรภาพภายนอกถูกแสดงอยู่ในแผนผังดังนี้



รูปที่ 2.4 ผังขั้นตอนการคำนวณเสถียรภาพภายนอกสำหรับกำแพงกันดินเสริมกำลัง (FHWA-96-071,1997)

2.7.1 กำหนดขนาดรูปร่างของกำแพงและคุณสมบัติของดิน

ตัวแปรต่อไปนี้ต้องถูกกำหนดโดยผู้ออกแบบ

1. ความสูงของกำแพง, แนวปะทะ
2. น้ำหนักกดทับทับของดิน, น้ำหนักบรรทุกจร และ น้ำหนักบรรทุกคงที่
3. น้ำหนักเนื่องจากแผ่นดินไหว
4. คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินฐานราก (γ, c, ϕ)
5. คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่นำมาถมกลับ (γ, c, ϕ)
6. ลักษณะเงื่อนไขของน้ำใต้ดิน

2.7.2 กำหนดคุณสมบัติหรือสมรรถนะของกำแพง

คุณสมบัติของกำแพงที่กำหนด ควรสะท้อนถึงเงื่อนไขของพื้นที่ก่อสร้าง (ลักษณะพื้นที่เป็นเช่นไร) และเจ้าของโครงการ

1. ค่าเพื่อความปลอดภัยของเสถียรภาพภายนอก (factor of safety for external stability)
2. ค่าเพื่อความปลอดภัยของเสถียรภาพทั้งหมด (global stability)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 16 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การทรุดตัวสูงสุดที่ยอมรับได้
4. การเคลื่อนตัวในแนวตั้งที่น้อยที่สุดที่ยอมรับได้
5. ส่วนเพื่อความปลอดภัยสำหรับแรงแผ่นดินไหว
6. อายุการใช้งาน

2.7.3 การกำหนดขนาดเบื้องต้น

ขั้นตอนการกำหนดขนาดของโครงสร้างเริ่มโดยบวกระยะที่จะฝังฐานรากของกำแพงลงในดิน ซึ่งจะไปตามข้อกำหนดของโครงการกับความสูงของแพ่ง เพื่อให้ได้ความสูงของกำแพงที่ออกแบบทั้งหมดเพื่อจะพิจารณาในส่วนต่อไป และการก่อสร้างที่ทำแบบจากล่างขึ้นบน เงื่อนไขนี้จะใช้จนกว่าการก่อสร้างจะเสร็จสิ้น

การกำหนดความยาวของวัสดุเสริมกำลังในเบื้องต้น จะกำหนดให้ยาวกว่า 0.7H และ 2.5 m เมื่อ H คือความสูงของโครงสร้าง โครงสร้างที่มีดินถมหลังกำแพงเป็นคันดินลาด (slope) หรือมีหนักหนักกระทำมาก เหมือนดินถมของสะพาน โดยทั่วไปจะต้องกำหนดระยะเสริมกำลังที่มากขึ้น โดยส่วนใหญ่นิยมใช้ 0.8H และ 0.1H

2.7.4 แรงดันดินสำหรับเสถียรภาพภายนอก

การคำนวณเสถียรภาพของกำแพงที่มีผิวหน้าเป็นแนวตั้งสามารถทำได้โดย สมมติให้มวลของกำแพงกั้นดินเสริมกำลังประพฤติเสมือนเป็นวัตถุแข็งเกร็ง มีแรงดันดินด้านข้างกระทำที่บริเวณแนวเส้นสุดความยาวของวัสดุเสริมกำลัง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และ 2.8

สัมประสิทธิ์แรงดันดินแบบ Active สำหรับกำแพงที่มีผิวหน้าเป็นแนวตั้ง (เอียงน้อยกว่า 10 องศา) และดินถมหลังกำแพงเป็นแนวราบ สามารถคำนวณได้จาก

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (1)$$

สำหรับกำแพงที่มีผิวหน้าเป็นแนวตั้งและมีดินถมลาดชันจะใช้สมการ

$$K_a = \cos \beta \frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}} \quad (2)$$

เมื่อ β = มุมของลาดคันดินหลังกำแพง

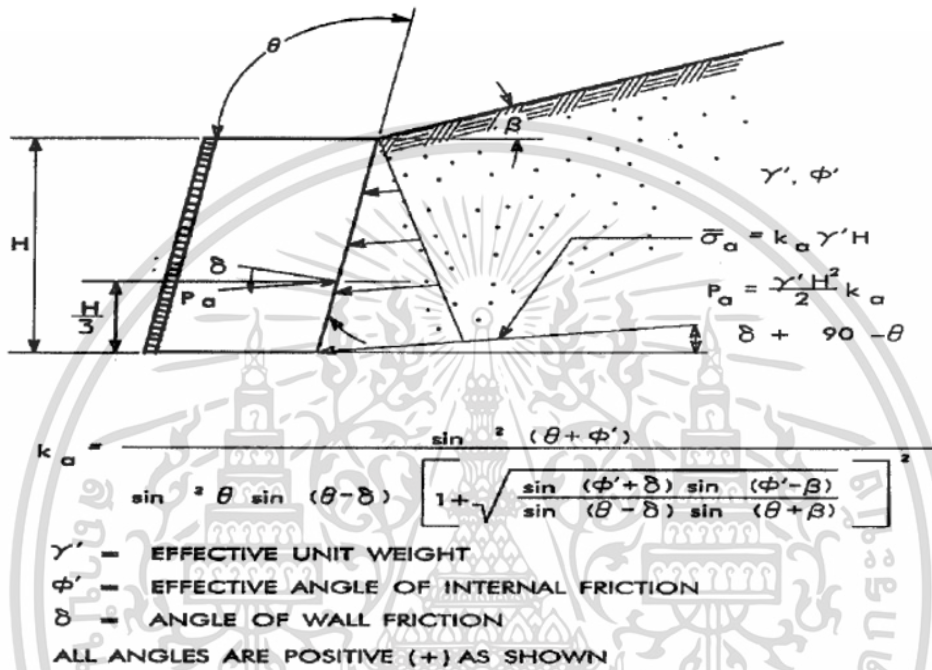
สำหรับลาดดินถมหลังกำแพงแบบหลังหัก มุม I (รูปที่ 2.7) จะถูกแทนด้วยลาดคันดินที่ยาวไม่สั้นสุด และเอียงเป็นมุม β

สำหรับผิวหน้ากำแพงแบบเอียงมากกว่า 10 องศา สามารถคำนวณได้สมการทั่วไปของคูลอมบ์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 17 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

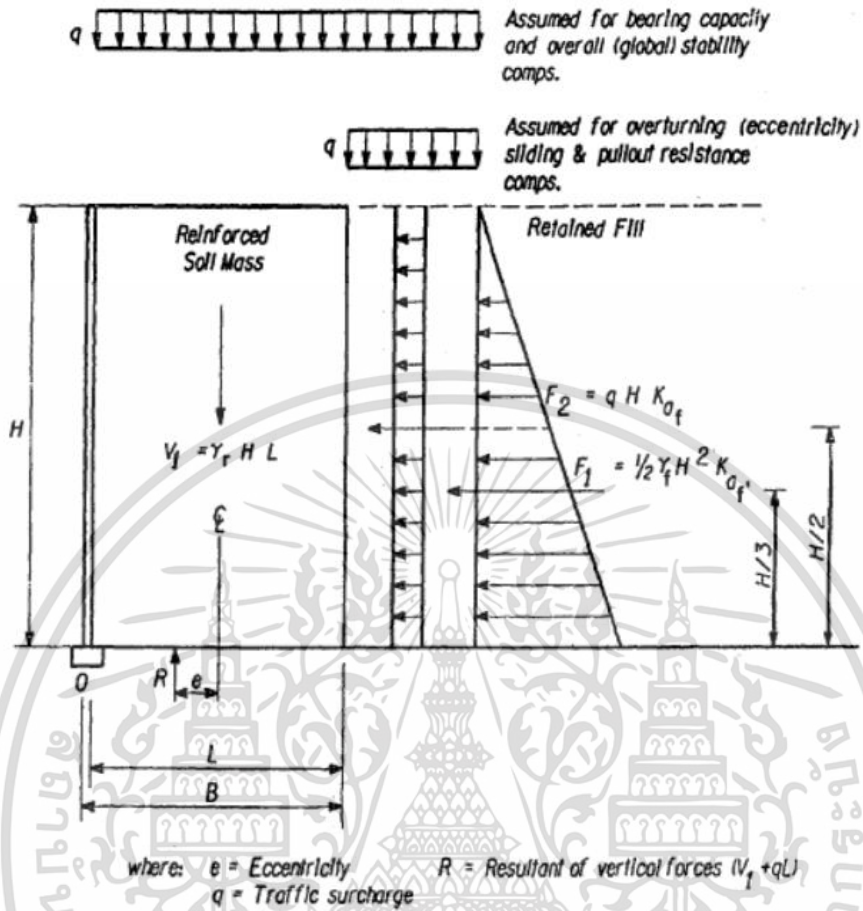
$$K_a = \frac{\sin^2(\theta + \phi)}{\sin^2 \theta \sin(\theta - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\sin(\phi - \delta) \sin(\phi + \beta)}} \right]^2} \quad (3)$$

เมื่อ θ คือมุมของผิวหน้ากำแพงกับแนวนอน และ β คือมุมของลาดดินถมหลังกำแพง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 มุมเสียดทานของกำแพง δ ประมาณให้เท่ากับ β



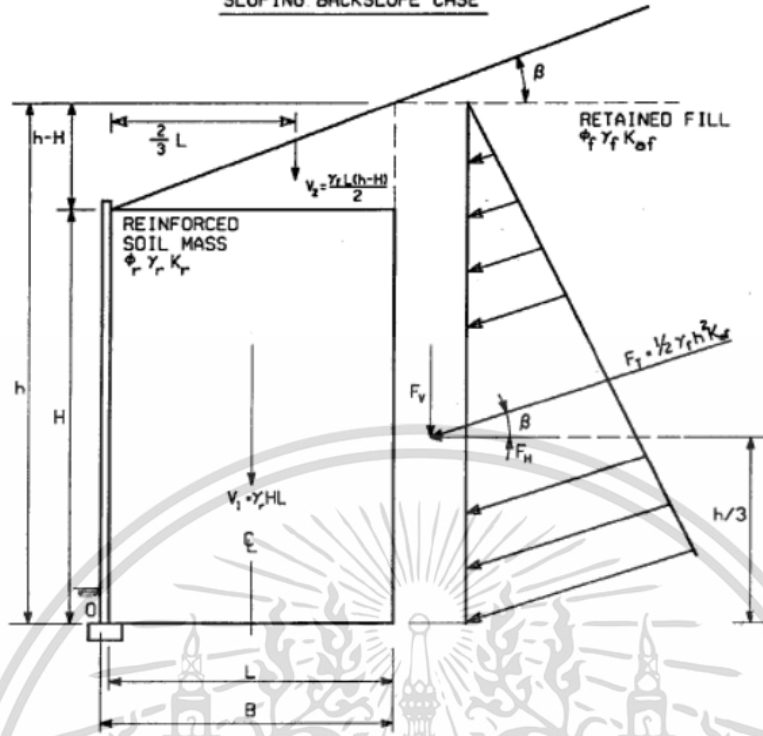
รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการคำนวณแรงดันดินแบบ Active (Coulomb analysis) (FHWA-96-071,1997)

Horizontal Backslope With Traffic Surcharge



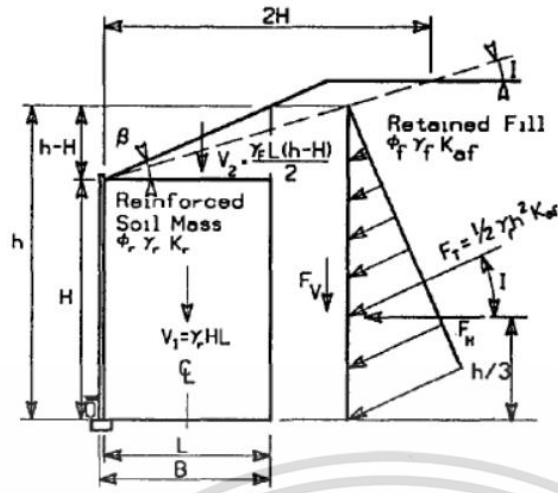
รูปที่ 2.6 การวิเคราะห์เสถียรภาพภายนอก: แรงดันดิน, จุดศูนย์ถ่วง ดินถมหลังกำแพงแนวราบและมีน้ำหนักร
 จากการจราจร (FHWA-96-071,1997)

SLOPING BACKSLOPE CASE



Note: For relatively thick facing elements (e.g., segmental concrete facing blocks) it may be desirable to include the facing dimensions and weight in sliding and overturning calculations (i.e. use "B" in lieu of "L").

รูปที่ 2.7 การวิเคราะห์เสถียรภาพภายนอก กรณีดินถมหลังกำแพงเป็นลาดชัน (FHWA-96-071,1997)



$$F_H = F_T \cos(I)$$

$$F_V = F_T \sin(I)$$

FOR INFINITE SLOPE $I = \beta$

K_{af} For Retained Fill Using $\delta = \beta = I$

$$K_{af} = \frac{\sin^2(\theta + \phi')}{\sin^2 \theta \sin(\theta - \delta) \left[1 + \frac{\sin(\phi' + \delta) \sin(\phi' - I)}{\sin(\theta - \delta) \sin(\theta + I)} \right]^2}$$

Note: For relatively thick facing elements (e.g., segmental concrete facing blocks) it may be desirable to include the facing dimensions and weight in sliding and overturning calculations (i.e. use "B" in lieu of "L").

รูปที่ 2.8 การวิเคราะห์เสถียรภาพภายนอก: แรงดันดิน, จุดศูนย์ถ่วง กรณีดินถมหลังกำแพงเป็นลาดดินหลังหัก (FHWA-96-071, 1997)

2.7.5 การคำนวณแรงดันดินในแนวตั้ง

การคำนวณแรงดันดินในแนวตั้งบริเวณฐานกำแพงจากความสูง h แสดงอยู่ในรูปที่ 2.8 และน้ำหนักของผิวหน้ากำแพงจะถูกนำมาคิดในการคำนวณ การคำนวณแรงดันดินแนวตั้งสามารถทำได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

- (1) คำนวณ

$$F_T = \frac{1}{2} K_{af(\phi, \beta)} \gamma_f h^2 \quad (4)$$

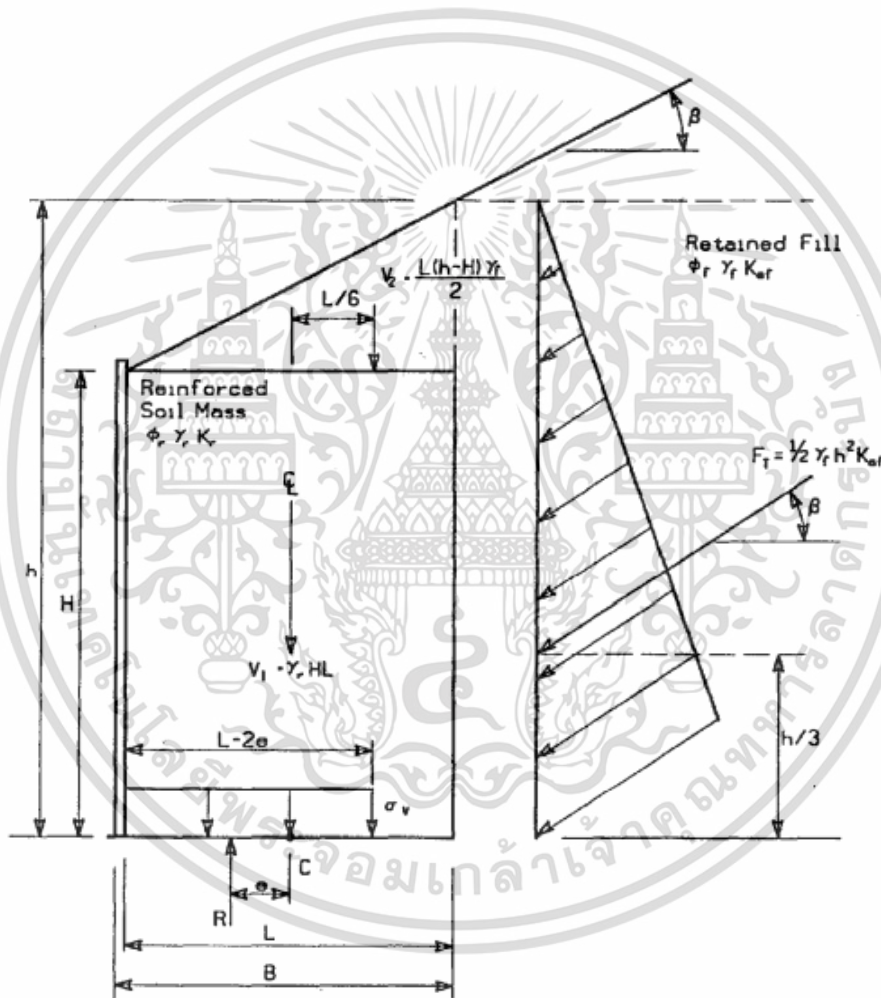
- (2) คำนวณจุดศูนย์ถ่วง e ที่ฐานของกำแพงโดยการคำนวณโมเมนต์ของมวลของพื้นที่เสริมกำลังรอบเส้นกึ่งกลางของมวลดินเสริมกำลัง และ R ในรูปที่ 2.9 จะต้องเท่ากับผลรวมของแรงในแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 21 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (3) e ต้องมีค่าน้อยกว่า $L/6$ สำหรับดิน หรือ $L/4$ สำหรับหิน ถ้าหาก e มีค่ามากกว่าให้เพิ่มความยาวของวัสดุเสริมกำลัง
- (4) คำนวณแรงกระจายเทียบเท่าที่กระทำที่ฐาน, σ_v

$$\sigma_v = \frac{V_1 + V_2 + F_T \sin \beta}{L - 2e} \quad (5)$$

- (5) เพิ่มอิทธิพลของน้ำหนักบรรทุกทุกกระจายและแบบจุดให้กับ σ_v



R = Resultant of vertical forces

Note: For relatively thick facing elements (e.g., segmental concrete facing blocks) it may be desirable to include the facing dimensions and weight in bearing capacity calculations (i.e., use "B" in lieu of "L").

รูปที่ 2.9 การคำนวณความเค้นแนวตั้ง σ_v ที่ระดับฐานราก (FHWA-96-071,1997)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 22 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.6 เสถียรภาพต่อการไถล

ตรวจสอบจากขนาดของโครงสร้างเบื้องต้นและสามารถคำนวณเสถียรภาพต่อการไถลได้จากสมการ

$$FS_{sliding} = \frac{\sum \text{horizontal resisting force}}{\sum \text{horizontal driving force}} = \frac{\sum P_R}{\sum P_d} \geq 1.5 \quad (6)$$

โดยที่แรงต้านทานการไถล เกิดจากกำลังต้านทานแรงเฉือนที่ชั้นของดินที่ฐานของกำแพงกันดินเสริมกำลัง และแรงที่ผลักกำแพงคือแรงดันของดินที่อยู่หลังกำแพง

แรงดันดินแบบ Passive ที่หน้ากำแพงจะไม่ถูกนำมาคำนวณเนื่องจากอาจมีการนำดินนั้นออกไปจากการกัดเซาะในธรรมชาติ หรือถูกนำออกโดยมนุษย์เองไยระหว่างอายุการใช้งาน กำลังรับแรงเฉือนของวัสดุปิดผิวหน้ากำแพงจะไม่ถูกนำมาคำนวณเช่นเดียวกันเพื่อเป็นส่วนเผื่อในการออกแบบ

น้ำบรรทุกเพิ่มเติมคือน้ำบรรทุกคงที่ (Dead load) และน้ำหนักบรรทุกจร (live load)

ขั้นตอนการคำนวณของกำแพงกันดินเสริมกำลังที่ผิวหน้าเอียงมีดังนี้

(1) คำนวณ

$$F_t = K_{af(\varphi, \beta)} \frac{1}{2} \gamma_f h^2 \quad (7)$$

โดยที่

$$h = H + L \tan \beta$$

(2) คำนวณแรงดันดินด้านหลังจากสมการ

$$P_d = F_H = F \cos \beta \quad (8)$$

(3) พิจารณาเลือกคุณสมบัติแรงเสียดทานที่ฐานของกำแพงให้เลือก φ ที่มีค่าน้อยที่สุดจากความเป็นไปได้ 3 กรณี

- การไถลของดินใต้ฐานรากหาก (c_f, φ_f) ของดินฐานรากมีค่าน้อยกว่าดินที่เป็นวัสดุถมกลับ
- การไถลของดินถมกลับที่เสริมกำลัง (φ_r)
- สำหรับวัสดุเสริมกำลังที่มีลักษณะแผ่น การไถลเกิดขึ้นที่ผิวหน้าที่อ่อนแอกว่าระหว่างผิวหน้าดินด้านบนวัสดุเสริมกำลังหรือดินด้านล่างวัสดุเสริมแรง โคนแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเสริมกำลังและดิน (ρ) ต้องมาจากการทดสอบ direct shear ของผิวหน้า หรือใช้ค่า $\frac{2}{3} \tan \varphi$

(4) คำนวณแรงเสียดทานต่อความยาวของกำแพงกันดิน

$$P_R = (V_1 + V_2 + F_T \sin \beta) \cdot \mu \quad (9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 23 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$\mu = \min[\tan \phi_f, \tan \phi_r, \text{ or (for continuous reinforcement) } \tan \rho] \quad (10)$$

แรงภายนอกอื่นๆที่เพิ่มแรงต้านทานการไถลจะนำมารวมในการคำนวณ ก็ต่อเมื่อแรงนั้นเป็นแรงถาวรตัวอย่างเช่นน้ำหนักบรรทุกจรจากการจราจรไม่ควรนำมาคำนวณร่วมด้วย

- (5) ค่าผสมสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยเสถียรภาพต่อการสไลด์ว่ามีค่ามากกว่าค่าที่ปลอดภัยหรือไม่
- (6) ถ้าหากสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยนั้นน้อยกว่าค่าที่ออกแบบให้เพิ่มระยะวัสดุเสริมกำลัง L, ค่าผสมใหม่อีกครั้ง

2.7.7 เสถียรภาพของดินใต้ฐาน

การวิบัติของดินใต้ฐานรากมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ การวิบัติแรงเฉือนทั่วไป (general shear failure) และ การวิบัติของแรงเฉือนเฉพาะจุด (local shear failure) โดยการวิบัติเฉพาะจุดจะถูกรเรียกว่า “การบีบ (squeezing)” ของดินฐานรากเมื่อดินฐานรากเป็นหลวมหรือดินอ่อนใต้กำแพง

(1) การวิบัติแรงเฉือนทั่วไป (general shear failure)

เพื่อป้องกันการวิบัติของดินฐานราก ความเค้นในแนวตั้งที่ได้จากการคำนวณ Meyerhof distribution ไม่มากกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของดินฐานราก และมีสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยมากกว่า 2.5 โดยเป็นไปตั้งสมการ

$$\sigma_v \leq q_a = \frac{q_{ult}}{FS} \quad (11)$$

สัมประสิทธิ์ความปลอดภัยที่ยอมรับอาจลดเหลือ 2.0 หากมีการวิเคราะห์ทางธรณีวิทยาาร่วมด้วย ขั้นตอนการคำนวณของกำแพงกันดินเสริมกำลังที่มีดินหลังกำแพงลาดเอียงมีดังนี้

- (1) หาค่าการเยื้องศูนย์ e จากแรงลัพธ์ที่ฐานของกำแพง โดยหาค่าการเยื้องศูนย์ของขนาดกำแพงเบื้องต้นมีค่ามากกว่า $\frac{L}{6}$ จะต้องเพิ่มระยะของวัสดุเสริมกำลังที่ฐาน
- (2) ค่าความเค้นแนวตั้ง σ_v ที่ฐานรากตามสมมติฐานของ Myerhof distribution

$$\sigma_v = \frac{V_1 + V_2 + F_T \sin \beta}{L - 2e} \quad (12)$$

- (3) พิจารณา ultimate bearing capacity ของแรงเยื้องศูนย์ที่ฐานราก โดยใช้สมการปฏิพิกลศาสตร์ดั้งเดิม

$$q_{ult} = c_f N_c + 0.5(L - 2e)\gamma_f N_\gamma \quad (13)$$

(4) ตรวจสอบ

$$\sigma_v \leq q_a = \frac{q_{ult}}{FS} \quad (14)$$

(5) จากขั้นตอนที่ 2 และขั้นตอนที่ 3 σ_v สามารถลดลงและเพิ่ม q_{ult} โดยเพิ่มระยะของวัสดุเสริมกำลัง ถ้าหากการเพิ่มของระยะวัสดุเสริมกำลังยังไม่สามารถทำให้เกิดเสถียรภาพของดินได้ฐานรากหรือการเพิ่มระยะวัสดุเสริมกำลังจะเป็นการเพิ่มต้นทุนอย่างมีนัยสำคัญ ควรจะมีการปรับปรุงดินได้ฐานรากแทน (การบดอัด, แทนที่ดินเดิม, stone column, precompression)

ตารางที่ 2.1 Bearing Capacity Factor (FHWA-96-071,1997)

ϕ	N_c	N_q	N_r	ϕ	N_c	N_q	N_r
0	5.14	1.00	0.00	26	22.25	11.85	12.54
1	5.38	1.09	0.07	27	23.94	13.20	14.47
2	5.63	1.20	0.15	28	25.80	14.72	16.72
3	5.90	1.31	0.24	29	27.86	16.44	19.34
4	6.19	1.43	0.34	30	30.14	18.40	22.40
5	6.49	1.57	0.45	31	32.67	20.63	25.90
6	6.81	1.72	0.57	32	35.49	23.18	30.22
7	7.16	1.88	0.71	33	38.64	26.09	35.19
8	7.53	2.06	0.86	34	42.16	29.44	41.06
9	7.92	2.25	1.03	35	46.12	33.30	48.03
10	8.35	2.47	1.22	36	50.59	37.75	56.31
11	8.80	2.71	1.44	37	55.63	42.92	66.19
12	9.28	2.97	1.69	38	61.35	48.93	78.03
13	9.81	3.26	1.97	39	67.87	55.96	92.25
14	10.37	3.59	2.29	40	75.31	64.20	109.41
15	10.98	3.94	2.65	41	83.86	73.90	130.22
16	11.63	4.34	3.06	42	93.71	85.38	155.55
17	12.34	4.77	3.53	43	105.11	99.02	186.54
18	13.10	5.26	4.07	44	118.37	115.31	224.64
19	13.93	5.80	4.68	45	133.88	134.88	271.76
20	14.83	6.40	5.39	46	152.10	158.51	330.35
21	15.82	7.07	6.20	47	173.64	187.21	403.67
22	16.88	7.82	7.13	48	199.26	222.31	496.01
23	18.05	8.66	8.20	49	229.93	265.51	613.16
24	19.32	9.60	9.44	50	266.89	319.07	762.89
25	20.72	10.66	10.88	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 25 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) การวิบัติของแรงเฉือนเฉพาะจุด (local shear failure)

เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวที่มีขนาดใหญ่ในดินเม็ดละเอียด

$$\gamma H \leq 3c \quad (15)$$

ถ้าหากดินฐานรากไม่สามารถรองรับโครงสร้าง นำมาให้มีการปรับปรุงดินฐานราก

2.7.8 เสถียรภาพโดยรวม (Overall Stability)

เสถียรภาพโดยรวมถูกพิจารณา โดยการวิเคราะห์การหมุนและการวิเคราะห์แบบลิ้ม (rotational or wedge analyses) โดยสามารถพิจารณาจากการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดคั่นดินแบบดั้งเดิม มีโปรแกรมคอมพิวเตอร์หลายโปรแกรมถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพในข้อนี้ กำแพงดินที่ถูกเสริมกำลังจะถือว่าเป็นวัตถุแข็งเกร็ง ยกตัวอย่างเช่นโครงสร้างที่มีรูปร่างอย่างง่ายซึ่งมีการเสริมกำลังแต่ละชั้นระยะห่างเท่าๆ กัน แนวการวิบัติที่พาดผ่านส่วนที่ได้รับการเสริมกำลังและส่วนที่ไม่ได้รับการเสริมกำลังจะไม่ถูกนำมาพิจารณาในเสถียรภาพในข้อนี้ ถึงอย่างไรก็ตามหากมีกรณีที่ซับซ้อนเช่นนี้เกิดขึ้นเช่นการเปลี่ยนแปลงของดินเสริมกำลัง, ระยะระหว่างการเสริมกำลัง, การมีน้ำหนักระบายที่มากกว่าปกติ โครงสร้างที่มีผิวหน้าเอียง, โครงสร้างซ้อนกัน การวิบัติที่พาดผ่านทั้งส่วนเสริมกำลังและส่วนไม่เสริมกำลังจะต้องถูกพิจารณาด้วย

ถ้าหากสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยของโครงสร้างมีค่าน้อยกว่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยที่แนะนำควรที่จะมีการเพิ่มระยะของวัสดุเสริมกำลังหรือมีการพัฒนาเสถียรภาพของดินฐานราก

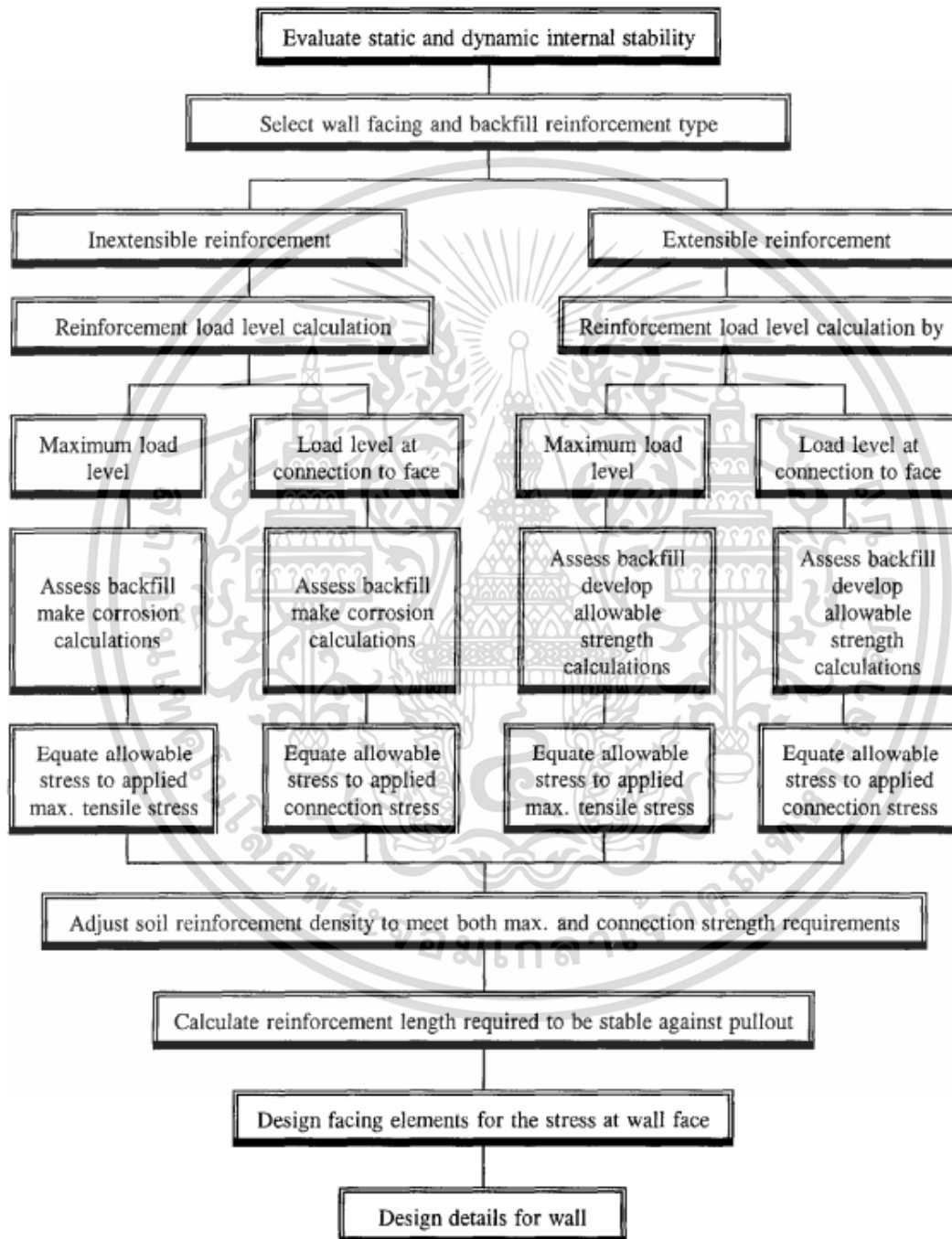
2.8 เสถียรภาพภายใน (Internal stability)

การวิบัติของสภาพภายในของกำแพงกันดินเสริมกำลัง สามารถเกิดขึ้นได้ 2 กรณี

1. แรงดึง (แรงเฉือน ในกรณีของวัสดุเสริมกำลังแข็งเกร็ง) ที่เกิดขึ้นในวัสดุเสริมกำลังมีค่ามากส่งผลให้การยึดตัวของวัสดุเสริมกำลังมีขนาดใหญ่ตามไปด้วยนำไปสู่การเคลื่อนตัวที่มีขนาดใหญ่และส่งผลให้เกิดการพังทลายของโครงสร้าง การวิบัติรูปแบบนี้เรียกว่าการวิบัติโดยการยึดหรือขาดของวัสดุเสริมกำลัง
2. แรงดึงที่เกิดในวัสดุเสริมกำลังมีค่ามากกว่ากำลังต้านการดึงออก (Pull out) ซึ่งคือกำลังต้านทานที่ทำให้วัสดุเสริมกำลังไม่หลุดออกจากมวลดินจากเหตุการณ์นี้จะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินที่มากขึ้นและทำให้สามารถเกิดการพังทลายของโครงสร้างได้การทางรูปแบบนี้เรียกว่าการทางจากการถูกดึงออก

ขั้นตอนในการหาขนาดและออกแบบเพื่อตอบสนองต่อสภาพภายในของโครงสร้างจะประกอบไปด้วยการคำนวณเพื่อหาแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้น, ตำแหน่งของแรงดึงสูงสุดและกำลังต้านทานที่ได้มาจากคุณสมบัติของวัสดุเสริมกำลังทั้งการต้านทานการดึงออกและการต้านทานแรงดึง

จากข้อความดังกล่าวขั้นตอนในการออกแบบเสถียรภาพภายในของโครงสร้างเป็นไปดังนี้



รูปที่ 2.10 พังขั้นตอนการคำนวณเสถียรภาพภายในสำหรับกำแพงกันดินเสริมกำลัง (FHWA-96-071,1997)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 27 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนในการออกแบบเสถียรภาพภายในของโครงสร้างมีดังนี้

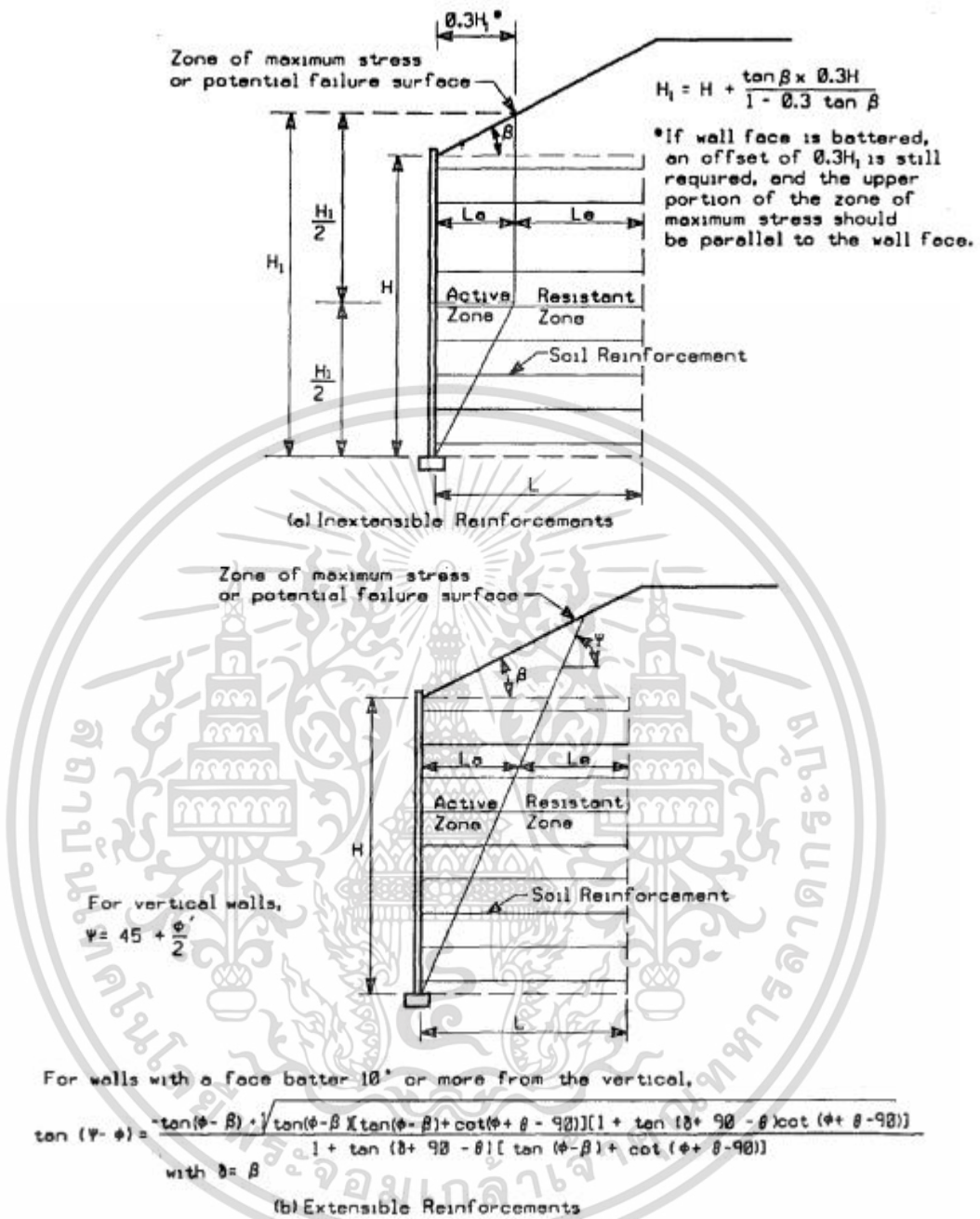
1. เลือกประเภทของวัสดุเสริมกำลัง (แบบยึดตัวและแบบไม่ยึดตัว)
2. เลือกตำแหน่งของผิวหน้าวิกฤต
3. เลือกระยะห่างระหว่างชั้นเสริมกำลังเทียบกับผิวหน้า
4. คำนวณแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นในวัสดุเสริมกำลังแต่ละชั้น ทั้งแบบสถิตและแบบพลวัต
5. คำนวณแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นใน connector กับผิวหน้า
6. คำนวณกำลังต้านการดึงออกของวัสดุเสริมกำลังแต่ละชั้น

2.8.1 ผิวหน้าวิกฤต

ผิวหน้าวิกฤตของโครงสร้างกำแพงดินเสริมกำลังจะตรงกับเส้นแนวแรงดึงสูงสุด (ตำแหน่งของจุดที่มีแรงดึงสูงสุดของวัสดุเสริมกำลังแต่ละชั้น) รูปร่างและตำแหน่งของเส้นนี้รู้ได้จากการทดลองและการศึกษาทางทฤษฎีมากมาย

ผิวหน้าแรงดึงสูงสุดถูกกำหนดให้เป็นลักษณะของเส้นตรงสองเส้นสำหรับวัสดุเสริมกำลังที่ไม่สามารถยึดตัวได้ และกำหนดให้เป็นเส้นตรง 1 เส้นสำหรับวัสดุที่สามารถยึดตัวได้ และเส้นนี้จะลากผ่านบริเวณอยู่ผิวหน้าด้านข้างสุดของกำแพงทั้งสองกรณี

เมื่อเกิดการวิบัติวัสดุเสริมกำลังอาจจะเกิดการยึดตัวและเสียรูปในจุดที่วัสดุเสริมกำลังตัดผ่านหน้าตัด วิบัติผลที่ตามมาทำให้แรงดึงในวัสดุเสริมกำลังจะมีค่ามากขึ้น ผลที่ตามมาคือวัสดุเสริมกำลังในตำแหน่งหน้าตัดวิกฤต สามารถเพิ่มขึ้นเพื่อให้เกิดเสถียรภาพมากขึ้น และในส่วนอื่นๆสามารถลดลง แต่จะไม่ส่งผลกับวัสดุเสริมกำลังที่มีความแข็งแรงเช่นตะแกรงเหล็ก แต่จะมีนัยยะสำคัญกับวัสดุเสริมกำลังเช่น geosynthetics ความสัมพันธ์ของแรงดันดินของคูลอมบ์ สามารถแสดงแนวการวิบัติสำหรับกำแพงที่มีผิวหน้าเอียงมากกว่า 10 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ตำแหน่งของแนววิบัติสำหรับเสถียรภาพภายในของกำแพงกันดินเสริมกำลัง (FHWA-96-071,1997)

2.8.2 การคำนวณแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นในวัสดุเสริมกำลังแต่ละชั้น

จากการศึกษาเมื่อไม่นานมานี้แสดงให้เห็นว่าแรงดึงที่เกิดขึ้นในวัสดุเสริมกำลังสูงสุดขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุเสริมกำลังเอง นั่นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเช่น Modulus, การยึดตัวและความหนาแน่นของวัสดุเสริมกำลัง จากพื้นฐานของงานวิจัยนี้ความสัมพันธ์ระหว่างประเภทของวัสดุเสริมกำลังและความเห็นจากดินถมถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 29 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

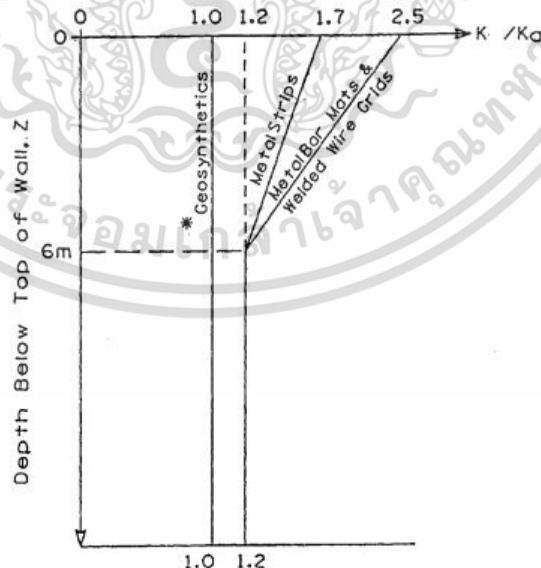
พัฒนาขึ้น จากความสัมพันธ์แสดงค่า K_a สำหรับวัสดุเสริมกำลังที่ไม่สามารถยึดตัวได้มีค่าลดลงจากบริเวณบนสุดของกำแพงและจะมีค่าคงที่ตั้งแต่ระยะ 6 เมตรเป็นต้นไป

เพื่อให้การออกแบบนั้นง่ายขึ้นการคำนวณดังที่กล่าวมาจึงถูกนำออกไป โดยการพัฒนาแนวทางการออกแบบที่มีอยู่แล้วเช่น coherent gravity method (AASHTO, 1994 Interims) และ the structure stiffness method (FHWA RD 89-043) จะได้เป็นวิธีการออกแบบ The simplified coherent gravity method ซึ่งมีรากฐานจากการออกแบบทั้งสองข้างต้น

แนวทางการออกแบบนี้ถูกพัฒนาโดยการคำนวณย้อนกลับ (Back Analysis) สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง K จากข้อมูลในสนามซึ่งแรงดันที่เกิดขึ้นในวัสดุเสริมกำลังถูกวัดและนำมาวิเคราะห์ ข้อมูลถูกนำมาประมวลให้เป็นฟังก์ชันของสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างแบบ Active จากภาพแสดงให้เห็นอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างของวัสดุเสริมกำลัง โดยที่แรงดันดินในแนวตั้งคือความเค้นที่เกิดจากดินถม (Overburden stress) ข้อมูลเหล่านี้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบสำหรับกำแพงดินที่มีวัสดุเป็นดินถมเม็ดหยาบทั้งหมดข้อมูล ในอนาคตอาจถูกนำมาเพิ่มเติมและพัฒนาความสัมพันธ์ใหม่สำหรับวัสดุเสริมกำลังประเทศใหม่

สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง K สามารถคำนวณได้โดย นำตัวคูณสัมประสิทธิ์แรงดันดิน สำหรับแรงดันดินแบบ Active ถูกคำนวณด้วยความสัมพันธ์ของแรงดันดินของคูลอมบ์ จะสมมุติว่าไม่มีแรงเสียดทานกับกำแพงและมุมมีค่าเท่ากับศูนย์ สำหรับกำแพงที่เป็นแนวตั้งจะใช้ความสัมพันธ์แรงดันดินของ Rankine

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi'}{2} \right) \quad (16)$$



*Does not include polymer strip reinforcement

รูปที่ 2.12 อัตราส่วนความเค้น ตามความลึกของกำแพงกันดินเสริมกำลัง (FHWA-96-071,1997)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 30 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกำแพงที่มีผิวหน้าทำมุมมากกว่า 10 องศากับแนวดิ่งจะใช้สมการของคูลอมบ์อย่างง่ายดังต่อไปนี้

$$K_a = \frac{\sin^2(\theta + \phi')}{\sin^3 \theta \left(1 + \frac{\sin \phi'}{\sin \theta}\right)^2} \quad (17)$$

โดยที่ θ คือมุมเอียงของหลังคาผิวหน้าของกำแพงวัดกับแนวราบเริ่มจากบริเวณหน้ากำแพง

ความเค้นในแนวดิ่ง คือผลของแรงโน้มถ่วงจากน้ำหนักดินในโครงสร้าง และดินที่อยู่เหนือกำแพงดินเสริมกำลัง รวมไปถึงน้ำหนักบรรทุกใดๆ ความเค้นในแนวดิ่งที่ใช้ในการคำนวณแรงดึงในวัสดุเสริมกำลังสูงสุดแสดงดังภาพ

มีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

- (1) คำนวณความเค้นในแนวราบของวัสดุเสริมกำลังแต่ละชั้นในบริเวณตำแหน่งที่ตัดกับเส้นแรงดึงสูงสุดซึ่งเกิดจากน้ำหนักของดินในโครงสร้างเอง $\gamma_r Z$ น้ำหนักแบบกระจายเหนือโครงสร้าง q หรือน้ำหนักแบบจุดเหนือโครงสร้าง $\Delta\sigma_v$ และ $\Delta\sigma_h$

$$\sigma_h = K\sigma_v + \Delta\sigma_h \quad (18)$$

โดยที่

$$\sigma_v = \gamma_r Z + \sigma_2 + q + \Delta\sigma_v \quad (19)$$

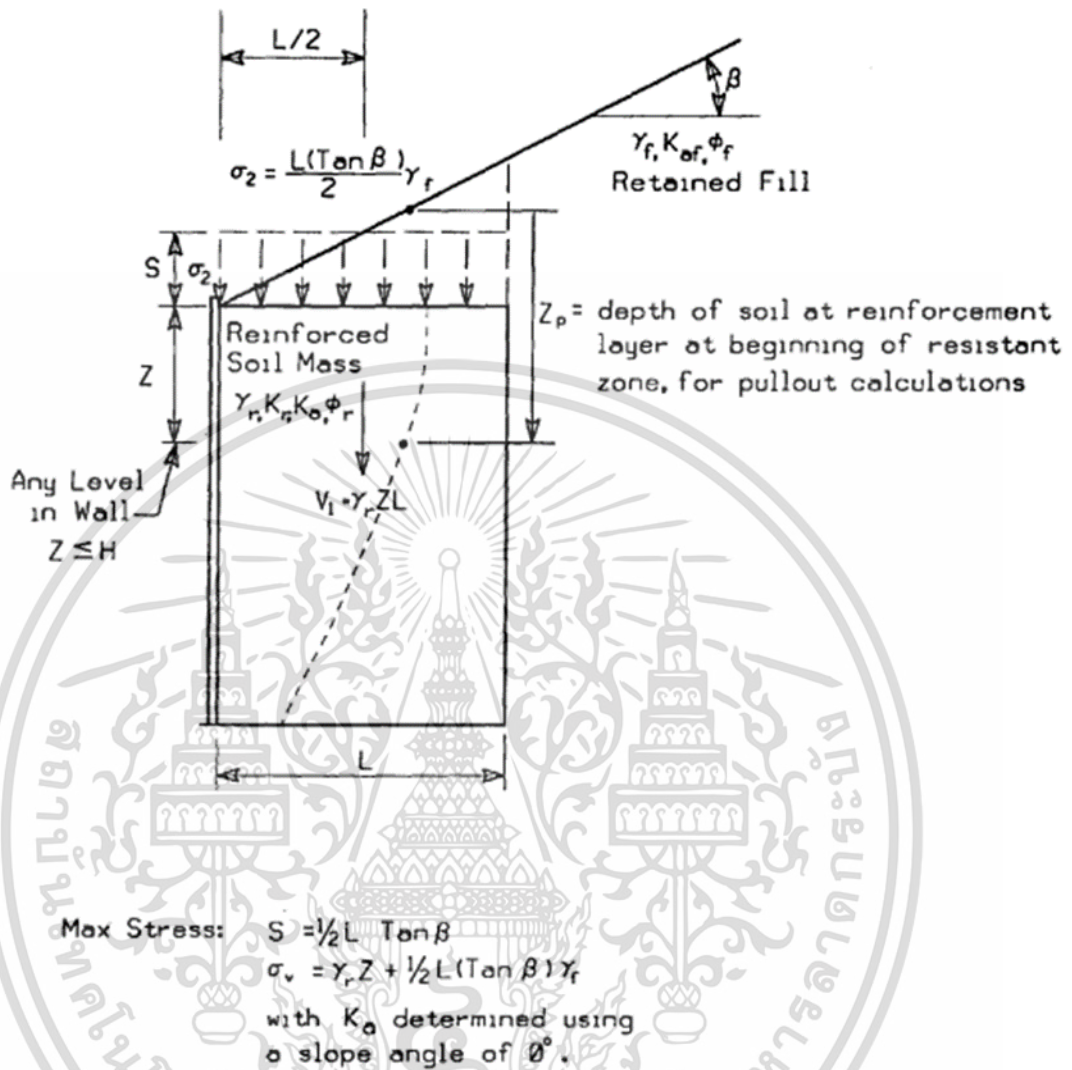
โดยที่ $K = K(z)$ แสดงในภาพ Z คือความลึกจากบนสุดของกำแพง

$\Delta\sigma_v$ คือความเค้นแนวดิ่งที่เกิดจากแรงกระทำแนวดิ่งแบบจุดและใช้ลักษณะการกระจายแบบ $2V:1H$ ดังแสดงในภาพ

$\Delta\sigma_h$ คือความเค้นในแนวราบที่เกิดจากแรงแนวราบแบบจุด กรณีที่มีการคำนวณแรงที่เกิดจากการจราจรให้ใช้แรงสถิตย์เทียบเท่า (equivalent load) และ สำหรับ barrier จราจรควรมีการคำนวณร่วมด้วย

- (2) คำนวณแรงดึงสูงสุด T_{max} ในแต่ละชั้นของวัสดุเสริมกำลังต่อความกว้างของกำแพงจากระยะห่างระหว่างชั้นของวัสดุเสริมกำลัง S_v ดังสมการ

$$T_{max} = \sigma_H \cdot S_v \quad (20)$$

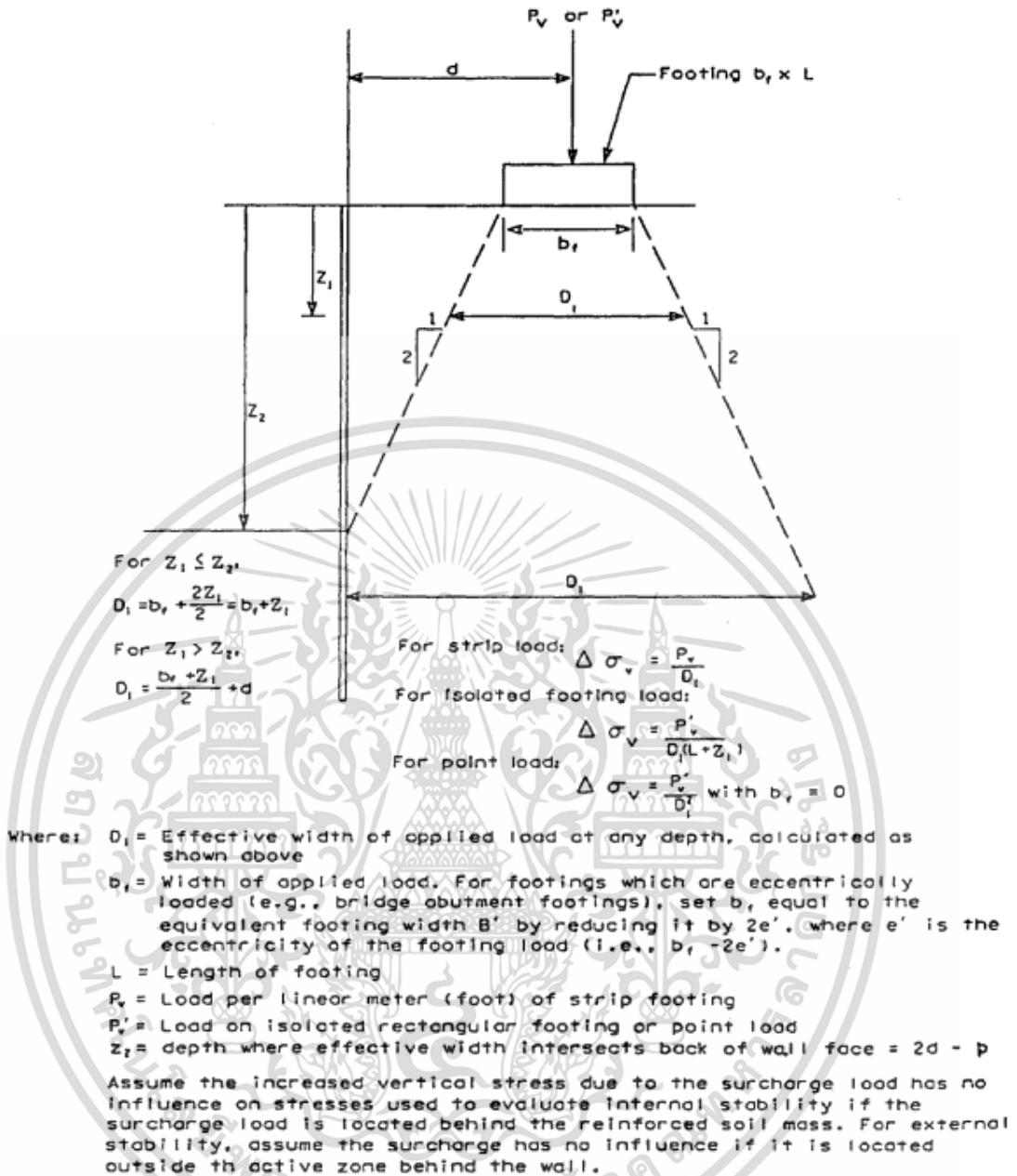


Note: H is the total height of the wall at the face.

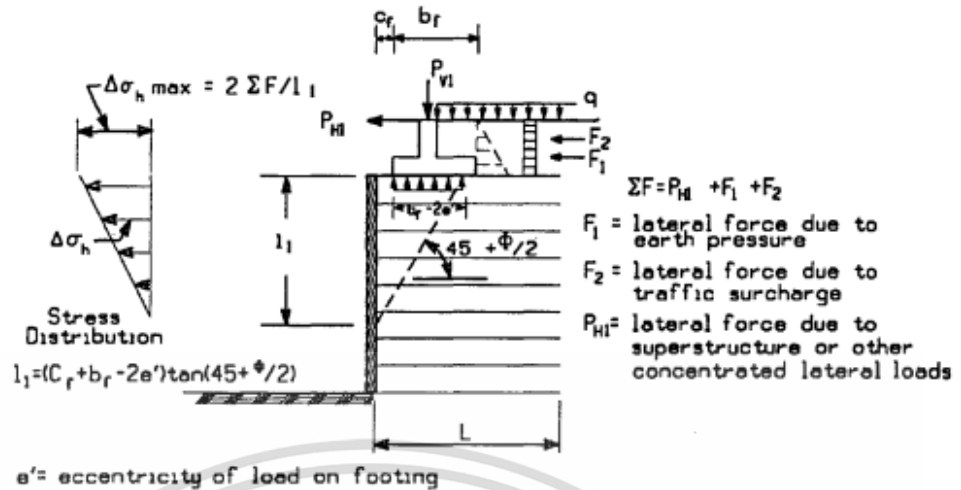
รูปที่ 2.13 การคำนวณความเค้นแนวดิ่งสำหรับกรณีดินถมหลังกำแพงเป็นรากค้ำดิน

(FHWA-96-071,1997)

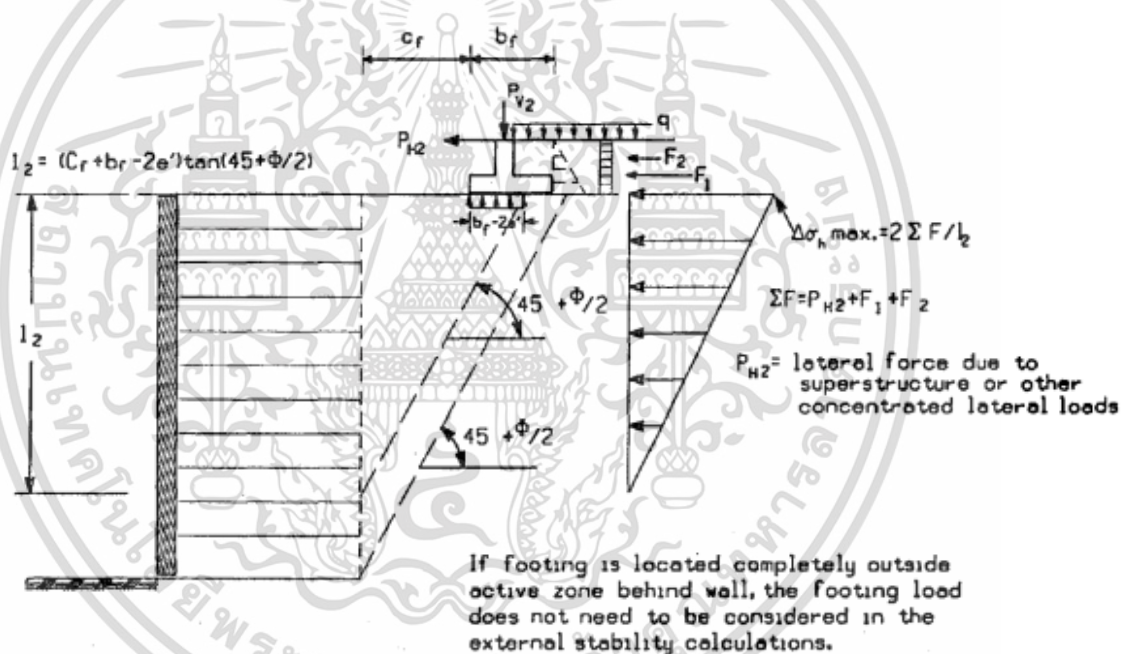
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 32 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 ลักษณะการกระจายของความเค้นจากน้ำหนักแบบจุดในแนวตั้งสำหรับการคำนวณเสถียรภาพภายในและภายนอก (FHWA-96-071,1997)



a. Distribution of Stress for Internal Stability Calculations.



b. Distribution of Stress for External Stability Calculations.

รูปที่ 2.15 ความเค้มจากน้ำหนักแบบจุดในแนวราบ (FHWA-96-071,1997)

T_{max} อาจถูกคำนวณในแต่ละชั้นของวัสดุเสริมกำลังต่อหน่วยความยาวของผิวหน้ากำแพง

(3) คำนวณสภาพภายในต่อการวิบัติของวัสดุเสริมกำลังซึ่งหาได้จาก

$$T_a \geq \frac{T_{max}}{R_c} \quad (21)$$

โดยที่ R_c เคลือบตาการครอบคลุม $\frac{b}{S_H}$ และ b คือความกว้างของวัสดุเสริมกำลัง ส่วน S_H คือ

ระยะห่างจากศูนย์กลางถึงศูนย์กลางระหว่างชั้นของวัสดุเสริมกำลัง T_a คือแรงดึงสูงสุดที่ยอมให้ต่อ

ความกว้างของวัสดุเสริมกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 34 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Connector ระหว่างวัสดุเสริมกำลังและผิวหน้าจะถูกออกแบบตาม T_{max} ในทุกกรณี (1998 AASHTO Interim)

2.8.3 เสถียรภาพภายในต่อการดึงออก

เสถียรภาพต่อการดึงออกของวัสดุเสริมกำลังจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังนี้

$$T_{max} \leq \frac{1}{F_{SP0}} F^* \gamma Z_P L_e C R_c \alpha \quad (22)$$

โดยที่ F_{SP0} = อัตราส่วนความปลอดภัยต่อการดึงออก ≥ 1.5

T_{max} = แรงดึงสูงสุดในวัสดุเสริมกำลัง

C = 2 สำหรับแถบเหล็ก ตะแกรง และวัสดุเสริมกำลังประเภทแผ่น

α = สัมประสิทธิ์ปรับแก้ขนาด

F^* = สัมประสิทธิ์ต้านทานการดึงออก

R_c = อัตราส่วนการครอบคลุม

γZ_P = แรงดันดินถม รวมถึงแรงกระจายจากน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่

L_e = ระยะล้าของวัสดุเสริมกำลัง

โดยที่ระยะล้าที่ต้องการใน ส่วนของมวลดินที่ต้านทานการดึงออกสามารถหาได้จากสมการ

$$L_e \geq \frac{1.5 T_{max}}{C F^* \gamma Z_P R_c \alpha} \geq 1m \quad (23)$$

น้ำหนักบรรทุกจากการจราจรจะไม่นำมาคำนวณร่วมกับ T_{max}

ถ้ากำแพงดินที่ออกแบบไม่ผ่านเงื่อนไขข้างต้นให้เพิ่มระยะล้าของวัสดุเสริมกำลัง หรือเปลี่ยนชนิดของวัสดุเสริมกำลังที่มีกำลังต้านทานการดึงออกมากขึ้น

ดังนั้นความยาวทั้งหมดของวัสดุเสริมกำลังมีค่าเท่ากับ

$$L = L_a + L_e \quad (24)$$

โดยที่ L_a สามารถคำนวณได้ตามที่แสดงในภาพตำแหน่งของแนววิบัติสำหรับเสถียรภาพภายในของกำแพงกันดินเสริมกำลัง

สำหรับวัสดุเสริมกำลังที่สามารถยึดตัวได้ มีผิวหน้าตั้งฉาก และดินหลังกำแพงเป็นแนวราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 35 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_a = (H - Z) \tan\left(45 - \frac{\phi'}{2}\right) \quad (25)$$

โดยที่ Z คือความลึกจากบนสุดถึงระดับของชั้นเสริมกำลัง

สำหรับวัสดุเสริมกำลังที่ไม่สามารถยึดตัวได้จากฐานถึงระดับ $\frac{H}{2}$

$$L_a = 0.6(H - Z) \quad (26)$$

สำหรับวัสดุเสริมกำลังที่ไม่สามารถยึดตัวได้จากฐานถึงระดับที่สูงกว่า $\frac{H}{2}$

$$L_a = 0.3H \quad (27)$$

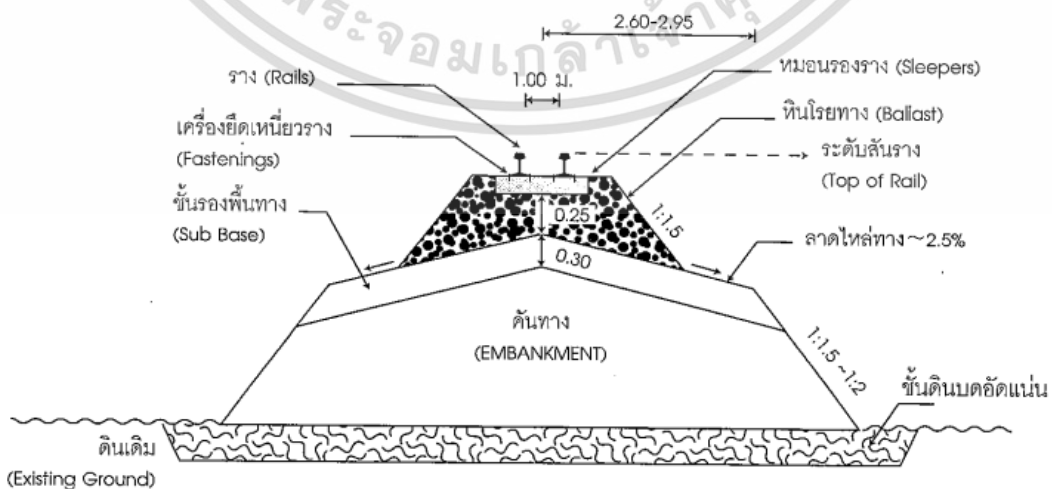
ในการก่อสร้างมักจะเลือกจากระยะเสริมกำลังสูงสุดที่ต้องการ อย่างไรก็ตามการเสริมกำลังในแต่ละชั้นสามารถเปลี่ยนระยะเสริมกำลังที่จำเป็นเท่านั้น โดยเพิ่มความยาวและความสูงของกำแพง

2.9 โครงสร้างทางรถไฟ

โครงสร้างทางรถไฟโดยทั่วไปในปัจจุบันมีอยู่ 2 รูปแบบที่ก่อสร้างใช้งานได้แก่

1. โครงสร้างแบบหินโรยทาง (ballast track)
2. โครงสร้างแบบ slab-track (ballastless track)

ซึ่งโครงสร้างที่นิยมก่อสร้างในประเทศคือโครงสร้างทางรถไฟแบบหินโรยทางเนื่องจากมีต้นทุนการก่อสร้างต่ำกว่าโครงสร้างแบบ slab track และโครงสร้างแบบหินโรยทางยังมีคุณสมบัติยืดหยุ่น เหมาะกับการรับน้ำหนักกระแทกของรถไฟ โครงสร้างแบบหินโรยทางจะประกอบด้วย หินโรยทาง หมอนรองราง เครื่องยึดเหนี่ยวราง เหนี่ยวราง จานรองราง และรางรถไฟ ประกอบกันเป็นทางรถไฟ

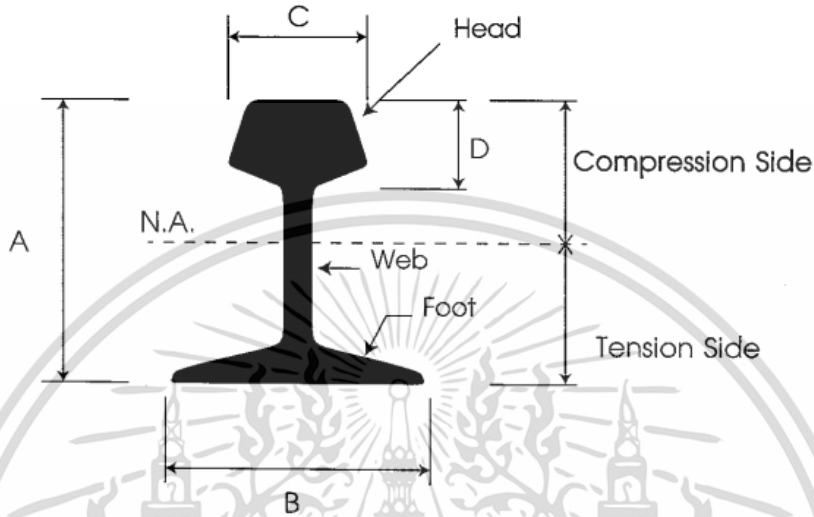


รูปที่ 2.16 โครงสร้างทางรถไฟ (เจน บุญชื้อ, 2554)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 36 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

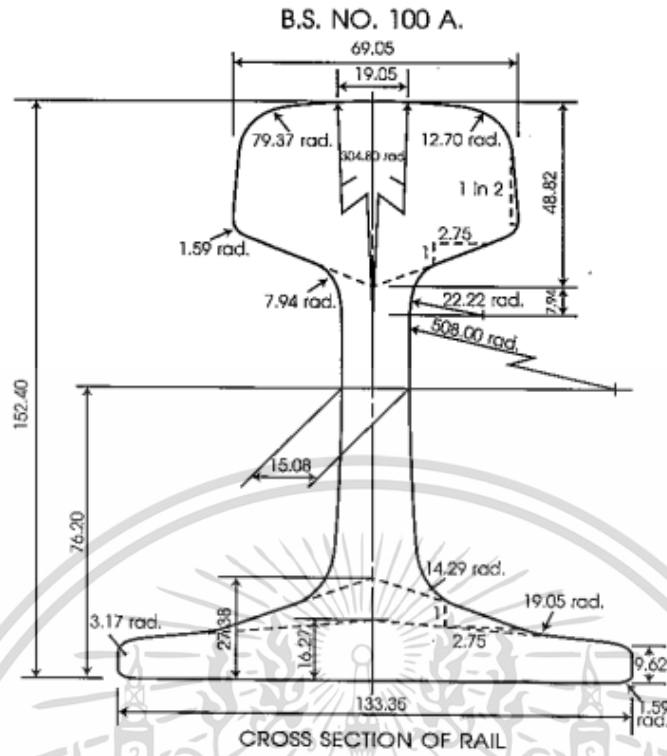
2.9.1 ราง (rail)

เป็นเส้นทางสำหรับรถไฟวิ่งบนพื้นผิว มักประกอบด้วยเหล็กหรือเหล็กกล้าที่มีความทนทานสูงต่อน้ำหนักและแรงเสียดทาน โดยทั่วไปรางรถไฟมีหน้าตัดคล้ายเหล็กรูปตัวไอ หน้าตัดของรางรถไฟ (profile) ประกอบด้วยหัวราง (head) เอวราง (web) และฐานราง (foot)



รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบหน้าตัดรางรถไฟ (เจน บุญชื้อ, 2554)

ขนาดรางจะกำหนดเป็นน้ำหนักของรางต่อความยาวเช่น รางขนาด 100 A ปอนด์ เป็นหน้าตัดตามมาตรฐาน BS (British Standard) คือรางที่มีน้ำหนัก 100 ปอนด์ต่อหลา หรือราง 50 N เป็นหน้าตัดรางในมาตรฐานญี่ปุ่น (JIS) คือหน้าตัดรางที่มีน้ำหนัก 50 กิโลกรัมต่อเมตร ขนาดของรางเป็นส่วนที่กำหนดความสามารถในการรับน้ำหนักของทางรถไฟ ในประเทศไทยการรถไฟกำหนดขนาดรางที่ใช้กับทางประธานสามารถรับน้ำหนักเปล่าได้ 20 ตัน ความเร็ว 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง คือราง 100 A ปอนด์ ตามมาตรฐาน BS มีเนื้อวัสดุตามมาตรฐาน UIC 860 Grade 900A ซึ่งโดยทั่วไปมีคุณสมบัติ Ultimate Tensile Strength ระหว่าง 7,000-13,000 กก./ซม.²



รูปที่ 2.18 หน้าตัดราง BS 100 A (เจน บุญชื้อ, 2554)

ส่วนประกอบทางเคมีจะแตกต่างกันไปตามมาตรฐานของแต่ละการรถไฟ ส่วนมาตรฐาน UIC กำหนดส่วนประกอบทางเคมีไว้ดังนี้

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบทางเคมีของรางรถไฟตามมาตรฐาน grade 900A (UIC 860)

UIC 860	C	Si	Mn	P	S	UTS (กก./ซม. ²)	Elongation (%)
ราง Grade 900 A	0.60-0.80	0.10-0.50	0.80-1.30	≤0.05	≤0.04	≥8,000	≥10
ราง Grade 900 B	0.55-0.75	0.10-0.50	1.30-1.70	≤0.04	≤0.04	≥10,300	

โดยความแข็งของหัวรางจะกำหนดไว้ประมาณ 250 – 300 บริเนลล์

2.9.2 เครื่องยึดเหนี่ยวราง (Fastening)

เป็นอุปกรณ์ที่มีหน้าที่ในการยึดรางกับหมอนรองรางไว้ด้วยกันและเป็นตัวที่กำหนดขนาดทางหรือระยะระหว่างรางรถไฟ (gauge) ตามต้องการ ในอดีตหมอนรองส่วนใหญ่เป็นหมอนไม้เครื่องยึดเหนี่ยวของหมอนไม้ได้แก่ตะปูราง หรือสลักเกลียวปล่อย แต่ปัจจุบันหมอนรองรางเป็นหมอนคอนกรีตอัดแรงซึ่งถูกออกแบบเป็น spring type เพื่อยึดรางและป้องกันรางเดิน และเนื่องจากหมอนคอนกรีตเหมาะสมจะใช้งานกับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 38 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

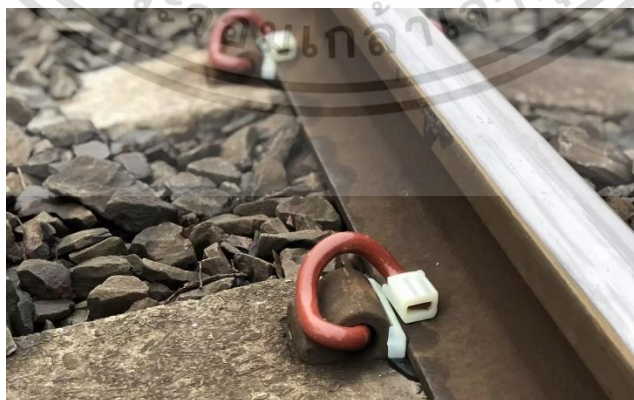
รางเชื่อมยาว เครื่องยึดเหี่ยวจึงจำเป็นต้องใช้แบบ spring clip ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันไปแล้วแต่ผู้ผลิต เช่น Pandrol ของประเทศอังกฤษ Vossloh ของประเทศเยอรมัน โดยเครื่องยึดเหี่ยวรางที่เหมาะสมจะมีคุณสมบัติโดยทั่วไปดังนี้

1. สามารถรักษาขนาดทางได้ดี
2. ให้แรงกดที่ฐานรากได้ดี ตลอดการใช้งานเดินรถ
3. มีคุณสมบัติรับแรงสั่นสะเทือนได้ดี ไม่เกิดการล้าตลอดอายุการใช้งาน
4. มีการคงรูปที่ดี ไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของราง
5. มีแรงกดสูงเพียงพอต้านทานการเดินของราง
6. อยู่ในรูปแบบที่ติดตั้งแล้วคงทนถาวรไม่หลุดออกง่าย
7. สามารถถอดออกและนำกลับมาใส่ใหม่ได้ง่าย
8. มีจำนวนส่วนประกอบน้อย เพื่อง่ายต่อการติดตั้งและบำรุงรักษา
9. ควรป้องกันการขโมยได้ดี
10. ควรเป็นชนิดที่นิยมใช้งานแพร่หลาย เพื่อความสะดวกต่อการรักษา และสำรองอะไหล่ในอนาคต
11. ควรมาราคาถูก อายุใช้งานยาวนานเช่นเดียวกับหมอนคอนกรีต



รูปที่ 2.19 เครื่องยึดเหี่ยวรางยี่ห้อ Vossloh

(ที่มา: www.vossloh.com/en/products-and-solutions/product-finder/product_10947.php)



รูปที่ 2.20 เครื่องยึดเหี่ยวรางยี่ห้อ Pandrol

(ที่มา: <https://www.pandrol.com/product/re-system>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 39 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.3 หมอนรองราง (Tie หรือ Sleeper)

หมอนรองรางเป็นส่วนประกอบที่ทำหน้าที่กระจายน้ำหนักจากรถไฟ และกระจายลงสู่ชั้นหินโรยทาง ปัจจุบันมีหมอนที่ยังคงใช้งานอยู่ 3 ประเภทได้แก่

1. หมอนไม้
2. หมอนคอนกรีต
3. หมอนเหล็ก

(1) **หมอนไม้** ไม้ที่นำมาใช้เป็นหมอนรองรางจะกำหนดให้เป็นไม้เนื้อแข็ง เพื่อความคงทน และอายุการใช้งานที่ยาวนาน แต่ถ้าหากไม้ที่นำมาเป็นหมอนเป็นไม้เนื้อแข็งปานกลาง จะต้องมีการอาบน้ำยา treatment เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของเนื้อไม้ โดยหมอนไม้มีข้อดีข้อเสียดังนี้

ข้อดีของหมอนไม้

1. ง่ายต่อการผลิต
2. ช่วยดูดซับแรงกระแทกได้ดี
3. ง่ายต่อการขนส่งและบรรทุก
4. ง่ายต่อการซ่อมบำรุงในการแก้ไขขนาดทางและระยะหมอนได้ง่าย
5. สามารถใช้งานร่วมกับหินโรยทางได้ดี
6. สามารถใช้เป็นไม้หมอนบนสะพานได้
7. เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี

ข้อเสียของหมอนไม้

1. อายุการใช้งานไม่ยาวนาน เสื่อมตามสภาพอากาศ
2. เมื่อเสื่อมสภาพ ยากต่อการรักษาสภาพทางให้ดีดังเดิม
3. ติดไฟง่าย

หมอนไม้ที่ใช้กับทางรถไฟไทย เป็นหมอนไม้เนื้อแข็งขนาดความกว้าง 20 ซม. หน้า 15 ซม. ยาว 200 ซม.

(2) **หมอนคอนกรีต** เนื่องจากการขาดแคลนหมอนไม้ทำให้หมอนคอนกรีตเป็นที่นิยมมากขึ้นในปัจจุบัน โดยสามารถผลิตหมอนคอนกรีตในต้นทุนที่ต่ำกว่าหมอนไม้ในปัจจุบัน หมอนคอนกรีต มี 2 ประเภท ได้แก่ Prestress Concrete และ Post Tension Concrete

ข้อดีของหมอนคอนกรีต

1. มีความแข็งแรงสูง น้ำหนักของหมอนช่วยต้านทานการเคลื่อนตัวของรางได้ดี
2. อุปกรณ์ยึดเหนี่ยวรางที่ใช้กับหมอนคอนกรีตมีความทนทานสูง
3. เป็นฉนวนกันไฟฟ้าที่ดี
4. อายุการใช้งานยาวนานโดยทั่วไปกำหนดไว้ 50 ปี

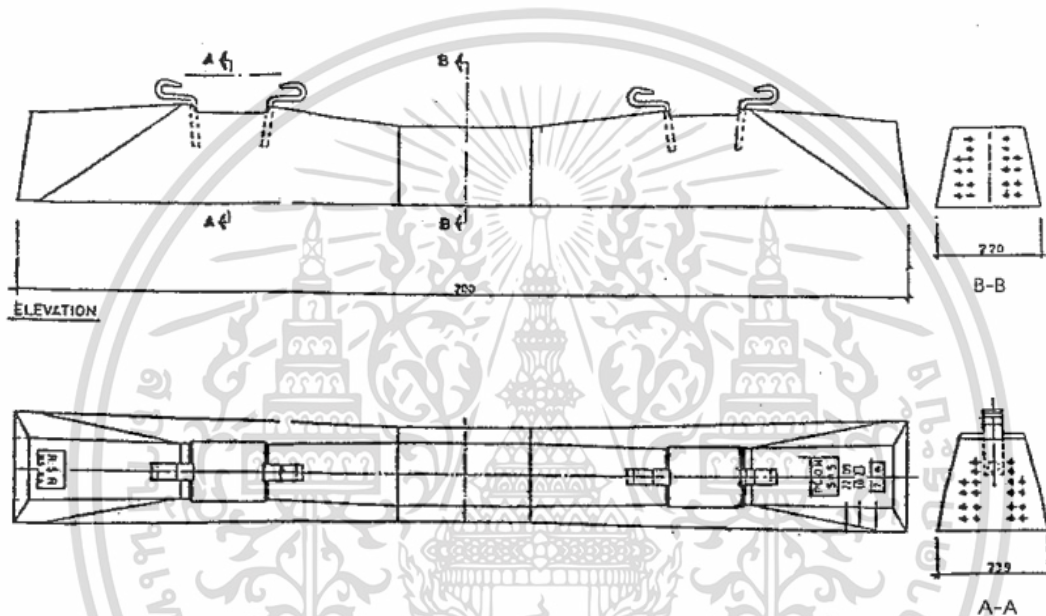
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 40 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สามารถผลิตได้จำนวนมาก

ข้อเสียของหมอนคอนกรีต

1. การขนส่งยากกว่าหมอนไม้เนื่องจากน้ำหนักที่มากกว่า
2. การบำรุงรักษา ต้องใช้เครื่องมือกลหนัก เช่น รถอัดหิน
3. หากเกิดเหตุรถตกราง หมอนจะมีการชำรุดมากและเปลี่ยนหมอนใหม่ยากกว่าหมอนไม้

หมอนคอนกรีตในประเทศไทย ใช้หมอนคอนกรีตแบบ Prestress Concrete ที่มีขนาดโดยประมาณกว้าง 25 ซม. หนา 22 ซม. และยาว 200 ซม.



รูปที่ 2.21 แบบหมอนคอนกรีตอัดแรง (ความรู้เบื้องต้นวิศวกรรมรถไฟ, เจน บุญซื่อ)

2.9.4 หินโรยทาง

หินโรยทางเป็นหินย่อยขนาดใหญ่จากโรงโม่ โดยทั่วไปใช้เป็นหินปูน และหินแกรนิต สำหรับหมอนคอนกรีตนิยมใช้หินแกรนิตเนื่องจากความแข็งแรงที่มากกว่า ทำให้ทนต่อน้ำหนักที่มากของหมอนคอนกรีตได้ดีมวลรวมตลของหินโรยทางจะเป็นหินที่มีขนาดใหญ่ ปราศจากมวลขนาดเล็ก หรือฝุ่นที่ทำให้เกิดฝุ่นโคลนหรือความสกปรกในชั้นหินโรยทางได้ หินโรยทางโดยทั่วไปควรมีคุณสมบัติดังนี้

1. ช่วยกระจายน้ำหนักจากใต้หมอนแผ่กระจายลงยังผิวคันทางให้สม่ำเสมอ
2. ให้ความต้านทานการเคลื่อนตัวทั้งแนวยาวและแนวขวางได้ดี
3. มีการระบายน้ำที่ดี
4. มีความหนาแน่น อัดตัวกันได้ดีเมื่อได้รับการอัดหินแล้ว
5. มีความยืดหยุ่นในการรับน้ำหนักแรงกระแทกได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 41 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้วัสดุที่จะนำมาเป็นหินโรยทางควรจะมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. มีราคาถูก
2. มีความแข็ง คงทนต่อการสึกหรอได้ดี
3. มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมคม
4. มีโครงสร้างที่เกาะยึดกันแล้วมีโพรงเพื่อระบายน้ำได้ดี

ซึ่งขนาดผลของหินโรยทางจะแตกต่างกันไปแต่ละประเทศ ขึ้นอยู่กับการทดลองใช้และปรับแก้ขนาดผลจนมีคุณสมบัติเป็นที่พอใจต่อการใช้งาน

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย The use of polymeric and metallic geogrid on a full-scale MSE wall/embankment on hard foundation: a comparison of field data with simulation

งานวิจัยของ Baral และคณะ (2016) ศึกษาพฤติกรรมของกำแพงกันดินเสริมกำลังที่ก่อสร้างจริงบนถนนหมายเลข 11 ช่วงอุตรดิตถ์-พิษณุโลกกิโลเมตรที่ 12 มีการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดได้แก่ settlement plate, inclinometer และ stain guage ในวัสดุเสริมกำลัง เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมต่างๆของกำแพงกันดินเสริมกำลังจากนั้นนำตัวแปรที่วัดได้จากกำแพงดินเสริมกำลังขนาดจริงมาสร้างเป็นแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลังด้วยโปรแกรม Plaxis 3D เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของแบบจำลองว่าสามารถทำนายพฤติกรรมของกำแพงกันดินเสริมกำลังขนาดจริงได้หรือไม่ ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลังด้วยโปรแกรม Plaxis 3D ได้ทำนายพฤติกรรมของกำแพงกันดินเสริมกำลังไปในทิศทางเดียวกันกับกำแพงกันดินขนาดจริง

งานวิจัย ANALYSIS OF VIBRATION BY RAIL TRAFFIC USING PLAXIS 3D

งานวิจัยของ Ramil K M. (2021) งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของดินฐานรากใต้ทางรถไฟซึ่งได้รับผลกระทบจากน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ในงานวิจัยนี้น้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟจะถูกจำลองเป็นลักษณะของแรงกดกระทำบนจุดเต็มซ้ำๆหรือ Time-Shear Signal ผลการวิจัยพบว่า การเคลื่อนตัวในแนวตั้ง ความเร็ว และความเร่งจะมีค่าลดลงเมื่ออยู่ห่างจากศูนย์กลางรางมากขึ้น และมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มค่า Modulus ของ Ballast ส่วนการเพิ่ม Modulus ของดินฐานรากจะลด การเคลื่อนตัวแนวตั้งเพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 42 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัย Numerical simulation of the response of a reinforced wall to a high speed train passage

Corfdir และคณะ (2017) ศึกษาพฤติกรรมกำแพงดินเสริมกำลังต่อแรงกระทำของรถไฟความเร็วสูง ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่ตรวจสอบความถูกต้องด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical approach) และจำลองน้ำหนักรถไฟบนทางรถไฟด้วยน้ำหนักกระจายเทียบเท่า ผลการวิจัยพบว่า ถ้าหากวัสดุถมกลับของกำแพงกันดินที่มีคุณสมบัติทั่วไป ความเร็วของน้ำหนักกดทับจะมีผลต่อโครงสร้างน้อยมาก โดยการเคลื่อนตัวแนวตั้งสูงสุดที่ Ballast ชั้นล่างเพิ่มขึ้น 11% เมื่อเทียบกับน้ำหนักกระทำที่หยุดนิ่ง ส่วนวัสดุถมกลับที่มีคุณสมบัติต่ำ ลงผลของความเร็วของน้ำหนักกระทำจะส่งผลให้ การเคลื่อนตัวและความเครียดแนวตั้งเพิ่มขึ้น ส่วนบนของผิวหน้ากำแพงมีการเคลื่อนตัวมากขึ้นตลอดความยาวของรถไฟ

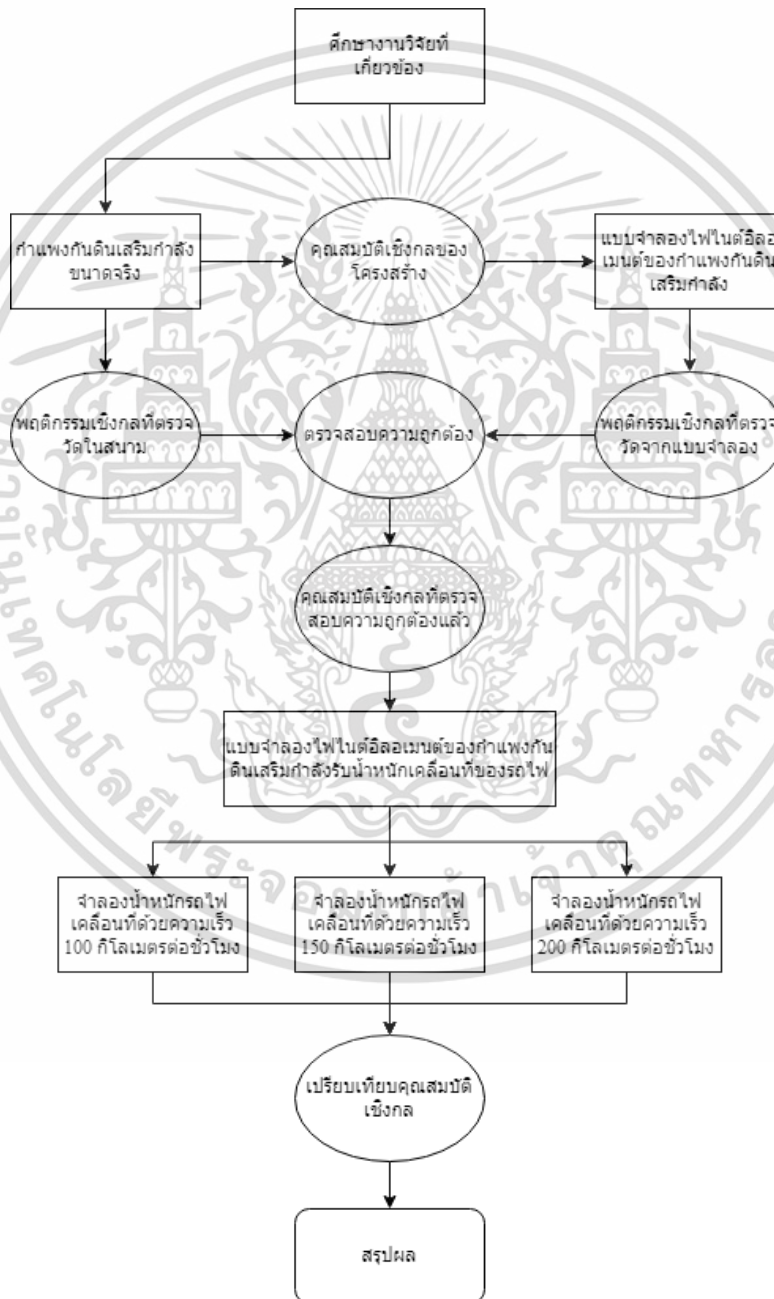
งานวิจัย Ground Motion Induced by Train Passage

Paolucci และคณะ (2006) ได้ศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical model) Spectral Element Method เพื่อจำลองการเกิดคลื่นสั่นสะเทือนเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของรถไฟโดยการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยทฤษฎีเชิงวิเคราะห์ (Analytical Approach) ผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงการลดลงอย่างรวดเร็วของการสั่นสะเทือนในดินอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของรถไฟเมื่อรถไฟเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำกว่าความเร็วของคลื่น Rayleigh ในดิน ซึ่งคลื่น Rayleigh wave เป็นคลื่นบนพื้นผิวชนิดหนึ่งที่มีตัวกลางเป็นของแข็ง และ จะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของวัตถุ Rayleigh wave จะเหนี่ยวนำให้เกิดการเคลื่อนตัวทั้งทิศเดียวกับการเคลื่อนที่ และทิศที่ขวางการเคลื่อนที่ (longitudinal and transverse motions) ความเร็วของ Rayleigh wave ขึ้นอยู่กับ young modulus และ passion ratio ของตัวกลาง

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

ในการศึกษานี้เริ่มจากการศึกษาพฤติกรรมของกำแพงกันดินเสริมกำลังที่ก่อสร้างจริง จากการศึกษาในอดีตเพื่อนำตัวแปรของพฤติกรรมเหล่านั้นมาตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เมื่อได้ตัวแปรที่ตรวจสอบความถูกต้องแล้วจึงนำตัวแปรเหล่านั้นมาสร้างแบบจำลองกำแพงการดินเสริมกำลังที่รองรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟบนโครงสร้างชั้นทางรถไฟ ลำดับการดำเนินการวิจัยเป็นตามแผนภูมิข้างล่างนี้



รูปที่ 3.1 ผังแสดงขั้นตอนการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 44 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 กำแพงกันดินเสริมกำลังที่ก่อสร้างจริง

Beral et al. (2016) ได้ศึกษาพฤติกรรมของกำแพงกันดินเสริมกำลังที่ก่อสร้างจริง เป็นการก่อสร้างและออกแบบกำแพงกันดินเสริมกำลังความสูง 6 ม. โดยกรมทางหลวง ใกล้เคียงบริเวณถนนหมายเลข 11 พิษณุโลก-อุตรดิตถ์ที่ กม. ที่ 12 กำแพงกันดินเสริมกำลังมีความยาว 18 ม. และ กว้างที่สุด 15 ม. ที่ด้านบนและความยาวที่ฐานเท่ากับ 20.4 ม. ด้านหนึ่งกำแพงลาดดินเสริมกำลังก่อสร้างโดยมีผิวหน้าลาดเอียง 70° จากแนวราบ และ ประกอบด้วยถุดดินเป็นวัสดุผิวหน้า ด้านอีกด้านหนึ่ง ผนังดินที่มีการเสริมด้วยวัสดุชนิดโลหะ และ ถูกติดตั้งด้วยแผ่นคอนกรีตขนาด 1.5 x 1.5 ม. เป็นวัสดุผิวหน้า มีการติดตั้งวัสดุเสริมชนิดพอลิเมอร์ 3 ชนิดในผนังดินที่กำแพงลาดดินเสริมกำลัง และมีการติดตั้งวัสดุเสริมชนิดโลหะ 2 ชนิดในอีกด้าน ระยะห่างระหว่างชั้นเสริมกำลังเท่ากับ 0.5 ม. และความยาวของวัสดุเสริมกำลังคือ 5 ม. อุปกรณ์ติดตั้งเพื่อตรวจสอบการเคลื่อนที่แนวตั้ง และแนวราบ แรงเค้น ระดับน้ำใต้ดินและความเค้นในวัสดุเสริม ประกอบด้วย inclinometer, settlement plate, stain guage นอกจากนี้ ยังติดตั้งบ่อสังเกตการณ์สองแห่งเพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงในระดับน้ำใต้ดิน

การก่อสร้างกำแพงกันดินเสริมกำลังเริ่มต้นด้วยการปรับปรุงพื้นที่การก่อสร้าง เพื่อระบุตำแหน่งที่จะก่อสร้าง หลังจากนั้นวัสดุผิวหน้าคอนกรีตชั้นแรกจะถูกวางลงตำแหน่งโดยเครื่องจักร และมีการตรวจสอบระดับทั้งแนวตั้งและแนวราบของแผ่นหน้าคอนกรีต โดยจะใช้ลิ้มไม้ตอกเข้าระหว่างแผ่นผิวหน้าเพื่อในการปรับตำแหน่งของผิวหน้าคอนกรีตในแนวตั้ง และยึดด้วยอุปกรณ์ยึดที่ทำมาจากไม้และแท่งเหล็กเพื่อตรึงไม่ให้ผิวหน้าคอนกรีตที่ปรับตำแหน่งแล้วมีการเคลื่อนตัว วัสดุเสริมกำลังชนิดตาข่ายเสริมกำลังดินที่ทำจากพอลิเมอร์ (geogrid) ที่ผลิตออกมาในลักษณะของม้วน ซึ่งแต่ละม้วนมีความยาวประมาณ 100 ม. ถูกตัดให้มีความยาว 7 ม. ในแต่ละแผ่น และถูกติดตั้งระบบตรวจวัดที่หน้างาน ตาข่ายโลหะและแถบเหล็กที่มีความยาว 5 ม. ถูกติดตั้งเข้ากับแผ่นผิวหน้าคอนกรีตอุปกรณ์ตรวจวัดถูกติดตั้งเข้ากับวัสดุเสริมกำลังนี้ที่บริเวณหน้างานเช่นเดียวกัน จากนั้นจึงมีการถมวัสดุถมทับ ซึ่งเป็นทรายปนทรายแป้งถูกกระจายบริเวณด้านหลังของแผ่นผิวหน้าคอนกรีต และมีการบดอัดโดยรถบดอัดสันสี่เหลี่ยมให้ดินถมมีความหนาแน่นเท่ากับร้อยละ 95 proctor density ส่วนบริเวณที่ใกล้กับผิวหน้าคอนกรีตหรืออุปกรณ์ตรวจวัดจะบดอัดโดยเครื่องบดอัดขนาดเล็ก หลังจากเสร็จสิ้นงานบดอัดดินถมในชั้นที่ 1 จึงมีการติดตั้งตะแกรงโลหะชั้นแรกเข้ากับผิวหน้าคอนกรีตโดยระหว่างแผ่นวัสดุเสริมกำลังจะใช้การเชื่อมกันเป็นการเชื่อมต่อระหว่างวัสดุเสริมกำลังในการเชื่อมต่อนี้จะถูกยึดโดยการสอดเหล็กข้ออ้อยเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ม.ม. เข้าระหว่างช่องเปิดของวัสดุเสริมกำลังที่บริเวณรอยเชื่อม ระยะหลังจากหักลบความยาวในการเชื่อมแล้วของตาข่ายโลหะมีค่าเท่ากับ 5 ม. แถบโลหะในชั้นแรกถูกติดตั้งเข้ากับแผ่นผิวหน้าคอนกรีตเช่นเดียวกันโดยใช้ตัวยึด (bolt) เส้นผ่าศูนย์กลาง 12 ม.ม. ส่วนตาข่ายเสริมกำลังดินถูกติดตั้งลงในตำแหน่งและม้วนขึ้นบริเวณผิวหน้าของกำแพงลาดชันโดยจะต้องเหลือระยะของวัสดุเสริมกำลังให้ม้วนขึ้นมีความยาวอย่างน้อย 1 ม. และระยะม้วนนี้จะไปอยู่บริเวณด้านล่างของวัสดุเสริม

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 45 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

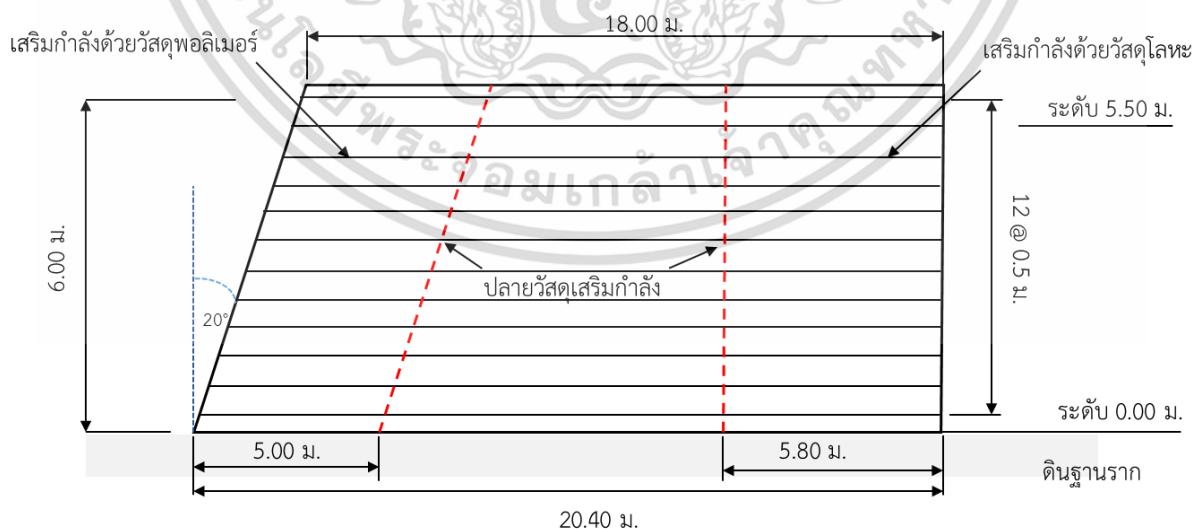
กำลังในชั้นถัดไป เมื่อติดตั้งวัสดุเสริมกำลังทั้งหมดในชั้นที่ 1 เสร็จสิ้น จึงตามด้วยวัสดุของผสมกับในชั้นถัดๆ มา ซึ่งแต่ละชั้นมีความหนาเท่ากับ 0.5 ม. มีการบดอัดเช่นเดียวกับชั้นก่อนหน้า ถึงความสูงที่กำหนดจึงมีการติดตั้งแผ่นผิวหน้าคอนกรีตชั้นถัดไป และก่อสร้างในลักษณะเช่นนี้จนกระทั่งกำแพงกันดินเสริมกำลังมีความสูงเท่ากับ 6 ม. ในระหว่างการก่อสร้างจะต้องมีการทดสอบความหนาแน่นของดินด้วยการทดสอบ sand cone replacement method เพื่อให้มั่นใจว่าวัสดุถมกับมีความหนาแน่นอย่างน้อย ร้อยละ 95 proctor density

เมื่อกำแพงกันดินเสริมกำลังถูกก่อสร้างเสร็จสิ้นแล้วจึงตรวจวัดคุณสมบัติทางกลของกำแพงกันดินเสริมกำลัง ได้แก่ การทรุดตัวการเคลื่อนตัวด้านข้างของผิวหน้า และ ความเครียดในวัสดุเสริมกำลัง

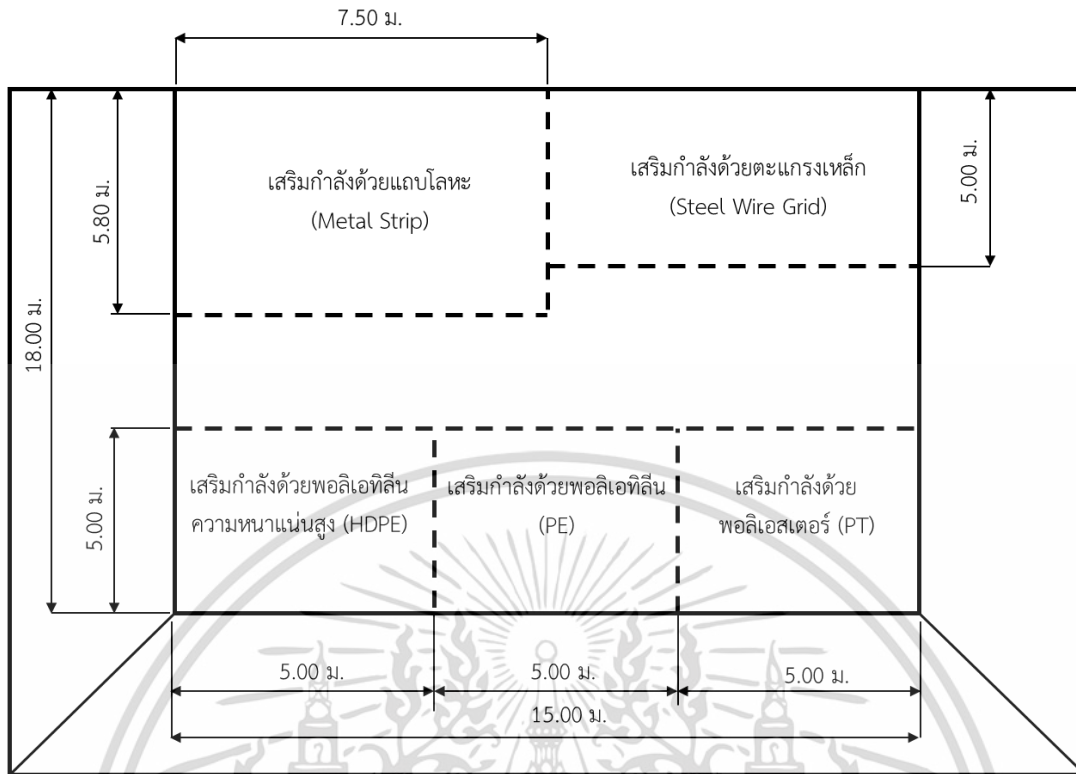
3.2 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลัง

3.2.1 ลักษณะแบบจำลอง

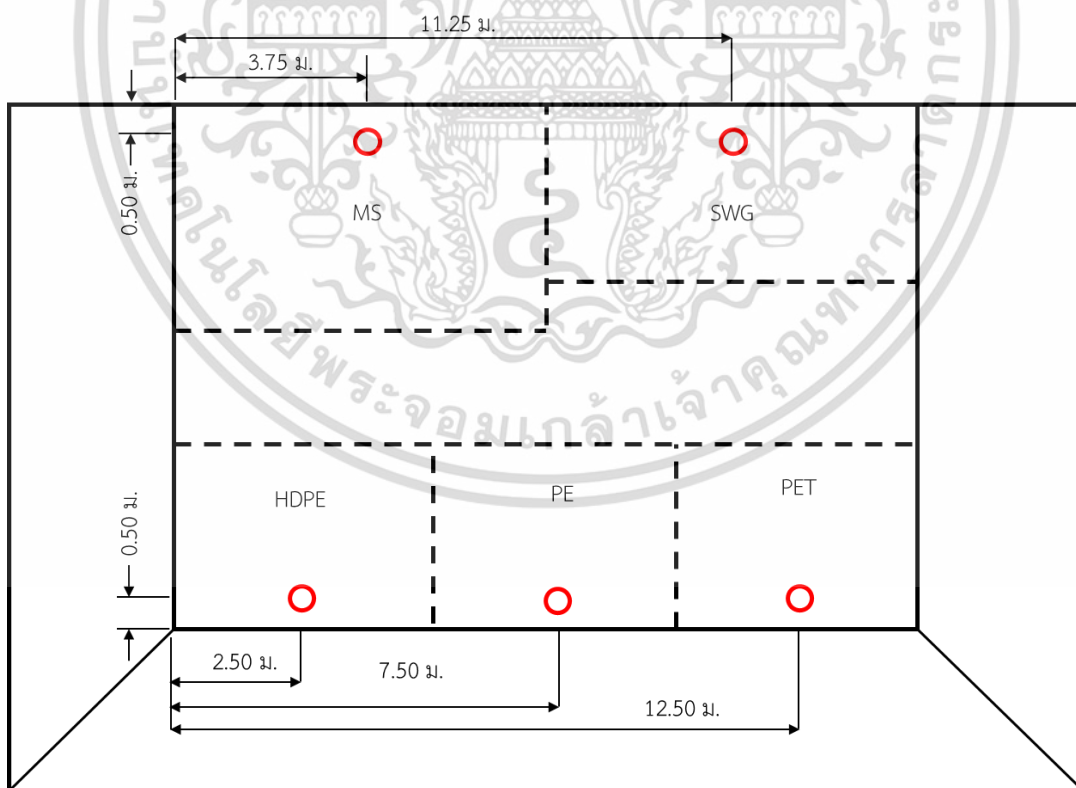
แบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลังถูกจำลองด้วยโปรแกรม Plaxis 3D โดยมีลักษณะเหมือนกับกำแพงกันดินเสริมกำลังที่ก่อสร้างจริงที่มีขนาดความกว้าง 20.4 ม. และความกว้างสูงสุดที่บริเวณด้านบนสุดของกำแพงกันดินเท่ากับ 18 ม. มีความสูง 6 ม. กำแพงกันดินนี้ถูกเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมกำลัง 5 ชนิด ได้แก่ ทรายเสริมกำลังดินชนิดทำจากพอลิเมอร์ 3 ชนิดตะแกรงโลหะและแถบเหล็ก แบบจำลองกันดินเสริมกำลังถูกสร้างอยู่บนดินฐานรากที่มีคุณสมบัติเหมือนกับดินฐานรากของกำแพงกันดินขนาดจริง โดยการจำลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของตัวแปรที่นำมาใช้ในการจำลอง



รูปที่ 3.2 รายละเอียดหน้าตัดแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลังเหมือนโครงสร้างขนาดจริง

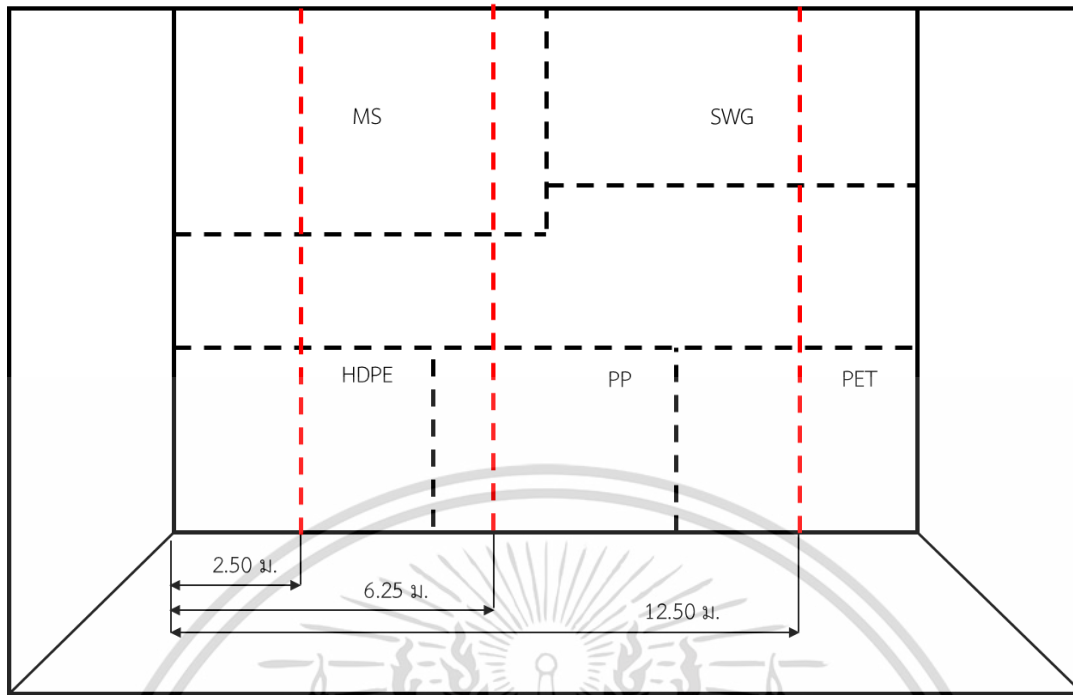


รูปที่ 3.3 รายละเอียดการปูวัสดุเสริมกำลังกำแพงดินเสริมกำลังเหมือนโครงสร้างขนาดจริง

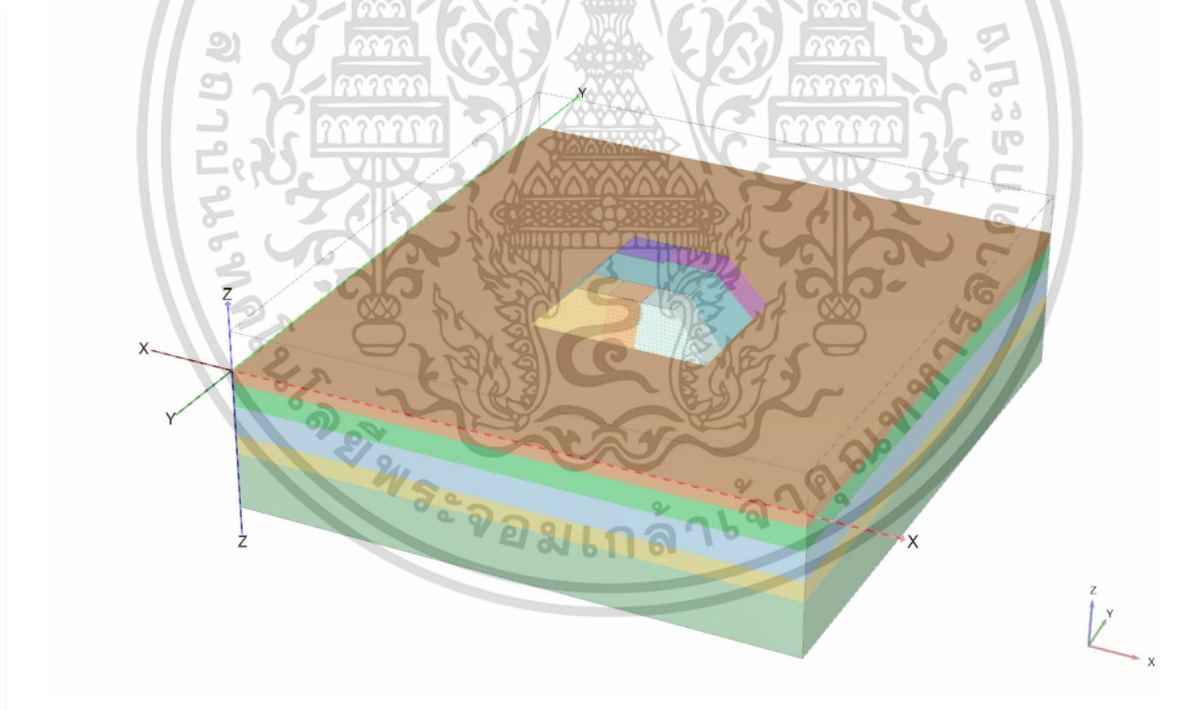


รูปที่ 3.4 ตำแหน่งตรวจวัดการเคลื่อนตัวด้านข้างแบบจำลองกำแพงดินเสริมกำลังเหมือนโครงสร้างขนาดจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 47 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

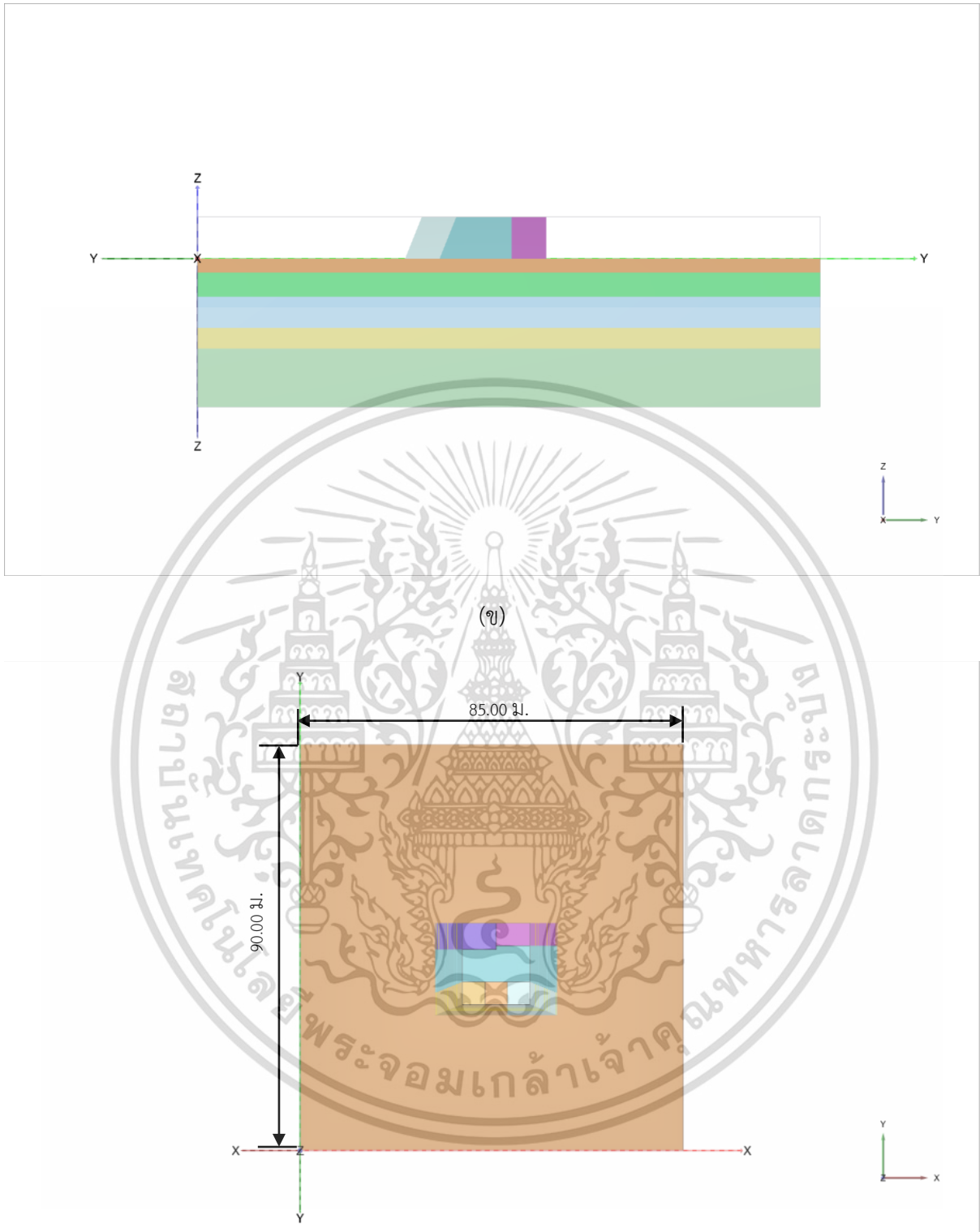


รูปที่ 3.5 ตำแหน่งตรวจวัดการทรุดตัวแบบจำลองกำแพงดินเสริมกำลังเหมือนโครงสร้างขนาดจริง



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 48 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

รูปที่ 3.6 แบบจำลองกำแพงดินเสริมกำลังเหมือนโครงสร้างขนาดจริง : (ก) Perspective view, (ข) side view, (ค) Top view

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 49 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ขั้นตอนการจำลอง (Phase Construction)

ขั้นตอนการจำลองแบบจำลองกำแพงการดินเสริมกำลังที่มีลักษณะเหมือนกับโครงสร้างขนาดจริงนั้น เริ่มต้นด้วยการจำลองดินฐานรากซึ่งมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับข้อมูลดินในสนาม จากนั้นจึงเริ่มสร้างชั้นดินชั้นแรกที่มีความสูง 0.235 ม. พร้อมกับผิวหน้ากำแพงที่จำลองด้วยวัตถุประเภท Plate รวมไปถึงวัสดุเสริมกำลังที่จำลองด้วยวัตถุประเภท Geogrid และให้วัสดุเสริมกำลังมี Interface ทั้ง 2 ด้านของวัสดุเสริมกำลังจากนั้นจึงจำลองดินเพิ่มอีก 1 ชั้นที่มีความหนา 0.5 ม. พร้อมกับวัสดุเสริมกำลังบนชั้นนั้นเมื่อความสูงของดินถมไปจนถึงชั้นที่ 4 ซึ่งมีความสูงมากกว่าแผ่นผิวหน้าคอนกรีตจึงจำลองแผ่นผิวหน้าคอนกรีตในชั้นถัดมาทำซ้ำเช่นนี้ในแต่ละขั้นตอนการจำลองจนกระทั่งกำแพงกันดินเสริมกำลังมีความสูงเท่ากับ 5.735 ม. ซึ่งเป็นชั้นของวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 12 จึงปิดชั้นบนสุดด้วยดินถมความหนา 0.265 ม. ในขั้นตอนสุดท้ายจะมีการจำลองแรงกดทับเทียบเท่าดินถมความหนา 1.2 ม. และปล่อยให้มีการปรับตัวคายน้ำเป็นระยะเวลา 61 วัน รวมระยะเวลาในการจำลองการก่อสร้างทั้งสิ้น 186 วันเป็นขั้นตอน 16 ขั้นตอน จากนั้นจึงเริ่มการคำนวณแบบจำลอง (Run) ตรวจสอบคุณสมบัติทางกลต่าง ๆ เปรียบเทียบกับคุณสมบัติที่ได้จากโครงสร้างแบบจำลองขนาดจริงในสนามว่าคุณสมบัติดังกล่าวมีความถูกต้องในการสร้างแบบจำลองหรือไม่

ตารางที่ 3.1 ขั้นตอนการจำลองการก่อสร้างกำแพงกันดินเสริมกำลัง

ขั้นตอน (Phase)	ระยะเวลา (วัน)	รายละเอียด
Initial	0	จำลองดินฐานราก
Phase 1	10	จำลองการก่อสร้าง ดินถมชั้นที่ 1 สูง 0.235 ม. พร้อมวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 1 และผิวหน้าคอนกรีตชั้นที่ 1
Phase 2	12	จำลองการก่อสร้าง ดินถมชั้นที่ 2 สูง 0.5 ม. พร้อมวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 2
Phase 3	12	จำลองการก่อสร้าง ดินถมชั้นที่ 3 สูง 0.5 ม. พร้อมวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 3
Phase 4	12	จำลองการก่อสร้าง ดินถมชั้นที่ 4 สูง 0.5 ม. พร้อมวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 4 และผิวหน้าคอนกรีตชั้นที่ 2
Phase 5	12	จำลองการก่อสร้าง ดินถมชั้นที่ 5 สูง 0.5 ม. พร้อมวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 5
Phase 6	11	จำลองการก่อสร้าง ดินถมชั้นที่ 6 สูง 0.5 ม. พร้อมวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 6
Phase 7	7	จำลองการก่อสร้าง ดินถมชั้นที่ 7 สูง 0.5 ม. พร้อมวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 7 และผิวหน้าคอนกรีตชั้นที่ 3
Phase 8	7	จำลองการก่อสร้าง ดินถมชั้นที่ 8 สูง 0.5 ม. พร้อมวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 8
Phase 9	7	จำลองการก่อสร้าง ดินถมชั้นที่ 9 สูง 0.5 ม. พร้อมวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 9
Phase 10	7	จำลองการก่อสร้าง ดินถมชั้นที่ 10 สูง 0.5 ม. พร้อมวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 10 และผิวหน้าคอนกรีตชั้นที่ 4
Phase 11	7	จำลองการก่อสร้าง ดินถมชั้นที่ 11 สูง 0.5 ม. พร้อมวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 11
Phase 12	8	จำลองการก่อสร้าง ดินถมชั้นที่ 12 สูง 0.5 ม. พร้อมวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 12

Cover 25 cm	1	จำลองการก่อสร้าง ดินถมชั้นที่ 13 สูง 0.275 ม.
Surcharge (1.2 m fill)	12	จำลองแรงกดทับ เทียบเท่าดินถมหนา 1.2 ม.
Consolidation	61	จำลองการอัดตัวคลายน้ำ

3.3 แบบจำลองกำแพงดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ

3.3.1 ลักษณะแบบจำลอง

แบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟถูกสร้างให้มีลักษณะหน้าตัดมีความกว้าง 20.4 ม. สูง 6 ม. ความสูงระหว่างชั้นเสริมกำลัง 0.5 ม. ด้านหนึ่งเสริมกำลังด้วยวัสดุแถบโลหะส่วนอีกด้านหนึ่งเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมกำลังชนิดที่ทำจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ผิวหน้าทั้ง 2 ด้าน ตั้งฉากกับแนวราบมีวัสดุผิวหน้าเป็นแผ่นคอนกรีตขนาด 1.5 x 1.5 ม. จำนวน 4 ชั้น จากนั้นแบบจำลองจะมีการยึดออกในด้านลึกเป็นลักษณะของกำแพงกันดินที่มีความยาว 60 ม. เพื่อรองรับความยาวของโครงสร้างแบบจำลองทางรถไฟ แบบจำลองทางรถไฟจึงถูกจำลองขึ้นที่บริเวณกึ่งกลางของหลังกำแพงกันดินเสริมกำลังนี้ โดยตัวแปรคุณสมบัติที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง รวมไปถึงหน้าตัดที่ใช้ได้ตรวจสอบความถูกต้องโดยแบบจำลองที่สร้างเหมือนกับกำแพงกันดินขนาดจริงแล้ว

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติดินฐานราก (foundation soil)

ชนิดของดิน	ความ หนา (m)	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{unsat} (kN/m ³)	ν	E (kpa)	c' (kpa)	ϕ' (°)	แบบจำลอง
Hard clay	2.00	17.50	15.50	0.35	80,000	100	28	MC
Loose clayey sand	3.50	19.00	17.00	0.30	18,000	1	33	MC
Stiff to very stiff clay	4.50	17.00	15.00	0.35	40,000	50	24	MC
Medium dense clayey sand	3.00	18.00	16.00	0.30	37,500	5	34	MC
Very stiff clay	8.45	17.00	15.00	0.35	50,000	80	26	MC

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติวัสดุถมกลับ (backfill)

ชนิดของดิน	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{unsat} (kN/m ³)	ν	E (kpa)	c' (kpa)	ϕ' (°)	k (m/day)	แบบจำลอง
Silty sand	22.7	21	0.3	20000	10	37	0.0864	MC

หมายเหตุ : MC = Mohr coulomb model

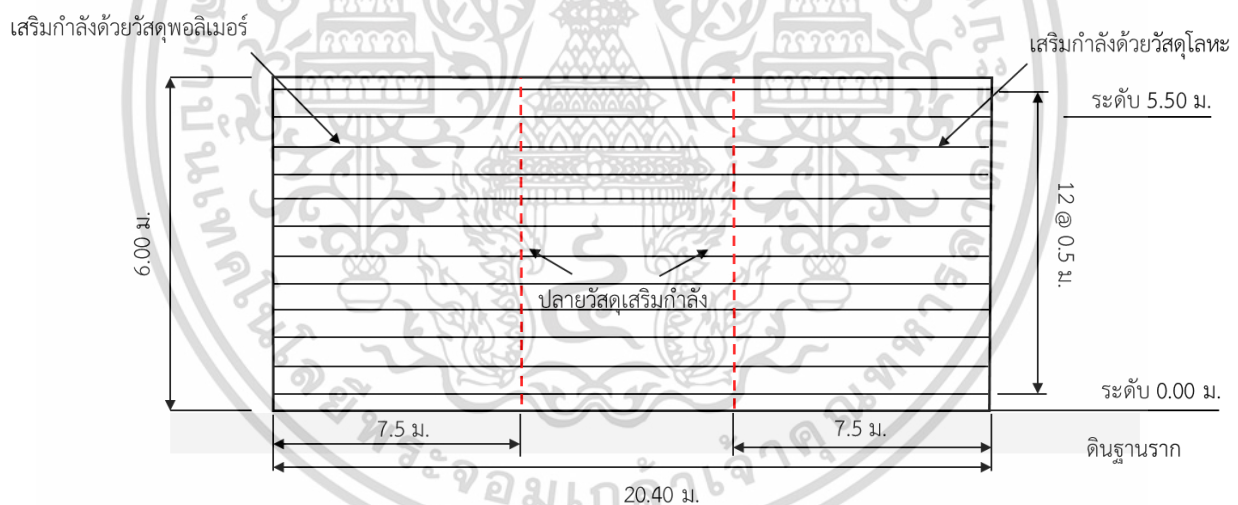
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 51 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของวัสดุเสริมกำลัง

ชื่อวัสดุเสริมกำลัง	กำลังรับแรงดึง (kN/m)	ความหนา (mm)	ความแข็ง, EA (kN/m)	R_{inter}	แบบจำลอง
โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE)	85.8	1.91	1320	0.77	Geogrid
พอลิโพรพิลีน (PP)	91.9	1.45	1360	0.83	Geogrid
พอลิเอสเตอร์ (PET)	83.6	1.50	925	0.79	Geogrid
แถบโลหะ (Metal strip)	277.6	4.00	88,000	0.87	Geogrid
ตะแกรงเหล็ก (Steel Wire Grid)	128.1	6.00	35,000	1.00	Geogrid

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของผิวหน้าคอนกรีต (Concrete Panel Facing)

แบบจำลอง	Material Type	EA (kN/m)	EI (kN/m ² /m)	ความหนา (m)	น้ำหนัก (kN/m/m)	ν
Plate	Elastic	42,000,000	78,500	0.15	3.6	0.15

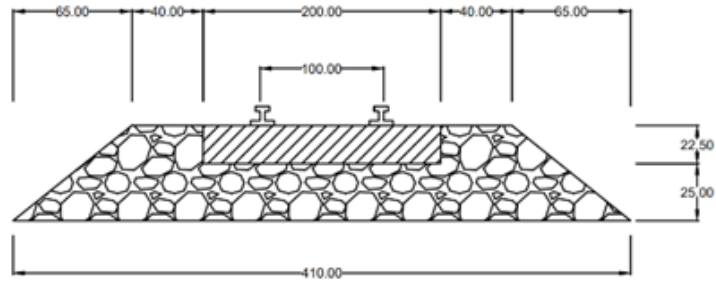


รูปที่ 3.7 รายละเอียดหน้าตัดแบบจำลองแบบจำลองกำแพงดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ

3.3.2 แบบจำลองทางรถไฟ

แบบจำลองโครงสร้างทางรถไฟอ้างอิงขนาดและลักษณะมาจากแบบมาตรฐานฝ่ายการช่างโยธา การรถไฟแห่งประเทศไทย ที่มีความกว้างที่ถ้ามของชั้นหินโรยทางเท่ากับ 4.10 ม. และความกว้างของหลังชั้นหินโรยทางเท่ากับ 2.80 ม. ระยะห่างระหว่างรางเท่ากับ 1 ม. วางอยู่บนหมอนที่มีความยาว 2 ม. ระยะห่างระหว่างหมอนเท่ากับ 0.60 ม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 52 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 หน้าตัดมาตรฐานชั้นทางรถไฟของการรถไฟแห่งประเทศไทย



รูปที่ 3.9 ระยะห่างระหว่างหมอนรองรางรถไฟ

คุณสมบัติของวัสดุประกอบทางคือหินโรยทาง, หมอนรองราง, เครื่องยึดเหนี่ยว และรางรถไฟอ้างอิงจากงานวิจัยของ Linli et al. (2018) และ Moormann et al. (2016) ที่ได้ศึกษาพฤติกรรมของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของทางรถไฟ (ตารางที่ 3.6)

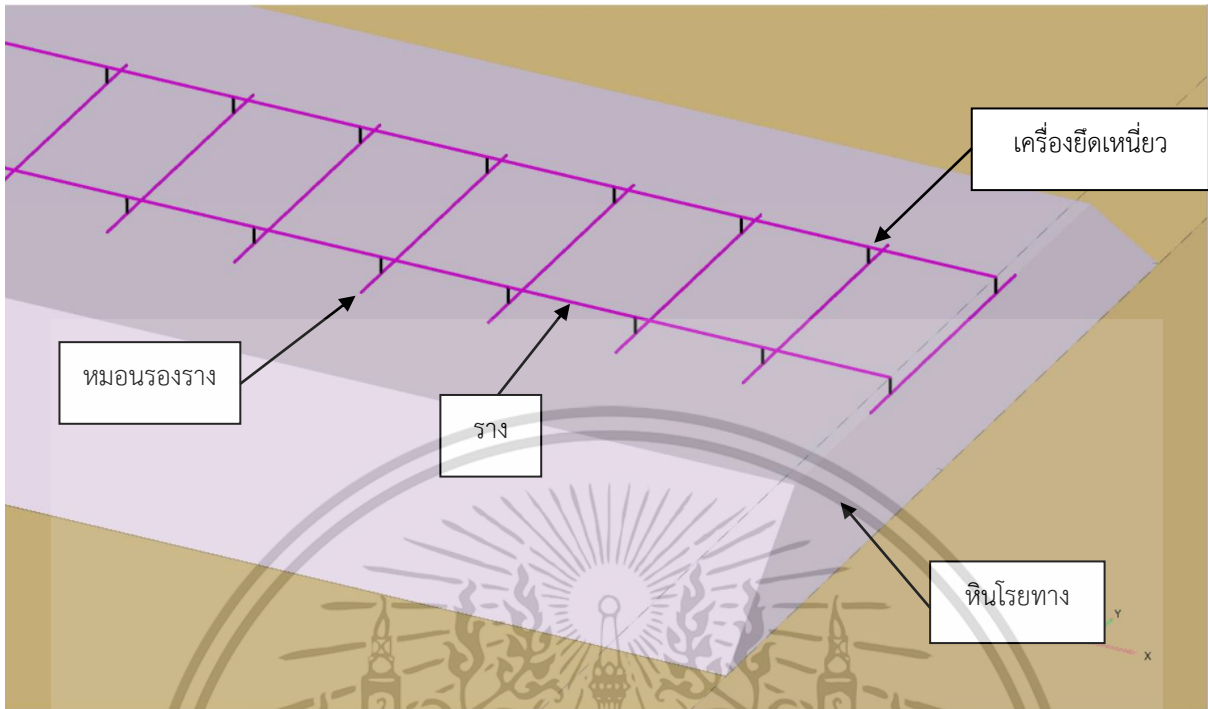
ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติของหินโรยทางในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

วัสดุ	แบบจำลอง	γ (kN/m ³)	E (kN/m ²)	ν	Plastic stress (N/m ²)	ϕ' (°)	ψ' (°)	c' (kPa)	พื้นที่หน้าตัด (m ²)	I_2 (m ⁴)	I_3 (m ⁴)
หินโรยทาง (Linli et al., 2018)	MC	17	2.00×10^8	0.25	1,000	50	30	1			
รางเหล็ก (Moormann et al., 2016)	Beam	78	2.00×10^8						7.7×10^{-3}	5.13×10^{-6}	30.55×10^{-4}
หมอนคอนกรีต (Moormann et al., 2016)	Beam	25	3.6×10^7						5.13×10^{-2}	2.45×10^{-4}	2.53×10^{-2}

หมายเหตุ : MC = Mohr coulomb model

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 53 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

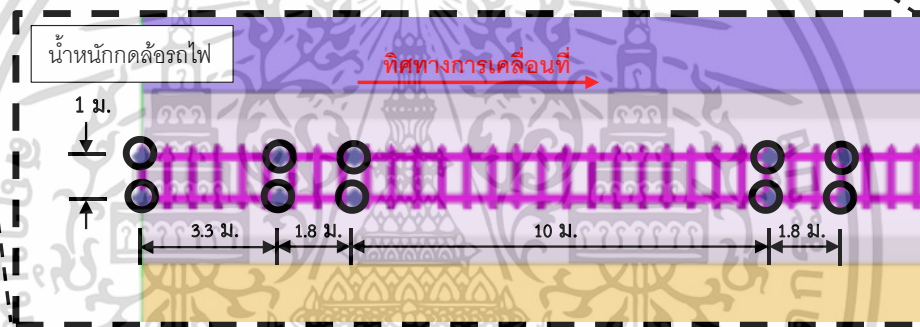
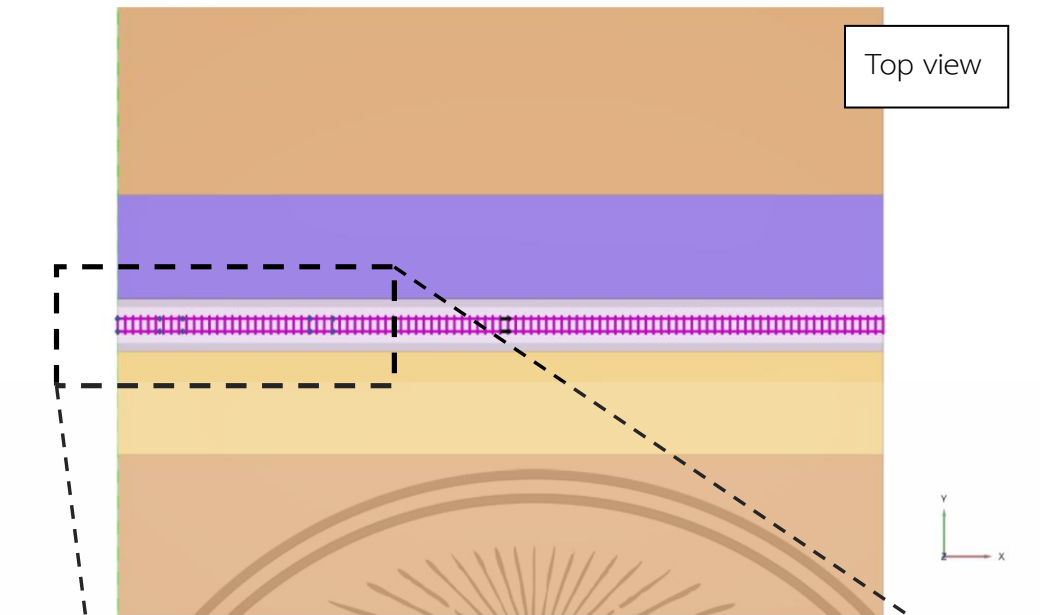


รูปที่ 3.10 การจำลองโครงสร้างทางรถไฟด้วยโปรแกรม Plaxis 3D

การจำลองโครงสร้างทางรถไฟด้วยโปรแกรม Plaxis 3D ทำได้โดยจำลองหินโรยทางเป็นมวลดิน มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู จากนั้นจำลองหมอนรองราง และ ราง เป็นวัตถุประเภทคาน (beam) ที่จุดตัดระหว่างหมอนรองรางและราง จะจำลองเครื่องมือยึดเหนี่ยวรางด้วย node to node anchored ดังแสดงในรูปที่ 3.9

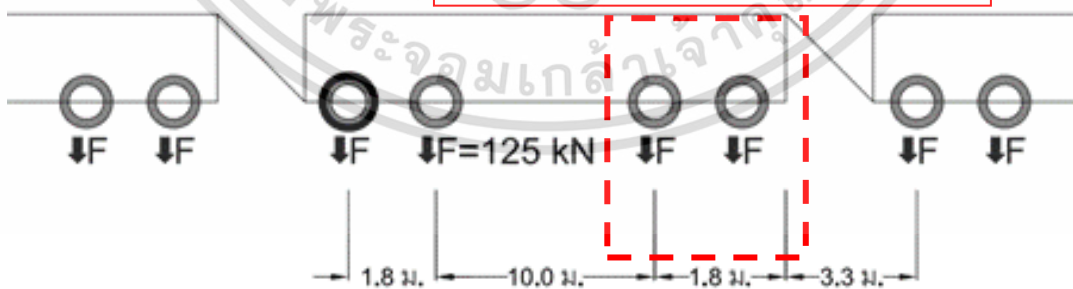
3.3.3 แบบจำลองน้ำหนักรถไฟ

ปัจจุบันฝ่ายการช่างโยธาการรถไฟแห่งประเทศไทย ได้กำหนดให้โครงสร้างทางรถไฟนั้นต้องสามารถรับน้ำหนักของรถไฟได้ไม่น้อยกว่า 20 ตันเพลา (U-20) ดังนั้นน้ำหนักกดของเพลารถไฟจะถูกจำลองเป็นลักษณะน้ำหนักแบบจุดโดยตำแหน่งจะอยู่บนราง ทั้งนี้ระยะห่างระหว่างน้ำหนักกด หรือเป็นระยะห่างระหว่างเพลาขึ้นขึ้นอยู่กับชนิดของแคร่ล้อ การศึกษาวิจัยกำหนดระยะห่างและการวางตำแหน่งของน้ำหนักกดเพลารถไฟอ้างอิงตามงานวิจัยของ Linli et al. (2018) ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับระยะแคร่ล้อที่ใช้ในประเทศไทย โดยจะจำลองน้ำหนักกดทั้งสิ้น 10 จุดหรือ 5 เพลาโดย รถไฟ 1 คัน จะประกอบไปด้วย 2 แคร่ล้อ ใน 1 แคร่ล้อมี 2 เพลา และเพลาละ 2 ล้อ สรุปได้ว่าจะเป็นการจำลองของรถไฟ 1 คันกับ เพลาหลังของคันถัดไปเนื่องจากเมื่อสังเกตการเลื่อนผ่านของน้ำหนักกด ณ จุดหนึ่งบนทางรถไฟ ที่ความเร็วคงที่เมื่อขบวนรถผ่านไป 1 คัน จนถึงเพลาหน้าของคันถัดไป ความถี่ของการเกิดแรงกด จะมีรูปแบบซ้ำเดิม



รูปที่ 3.11 ตำแหน่งน้ำหนักกดเพลลาบนแบบจำลองกำแพงดินเสริมกำลัง

1 แคร่ (Bogie) ประกอบด้วย 2 เพลลา

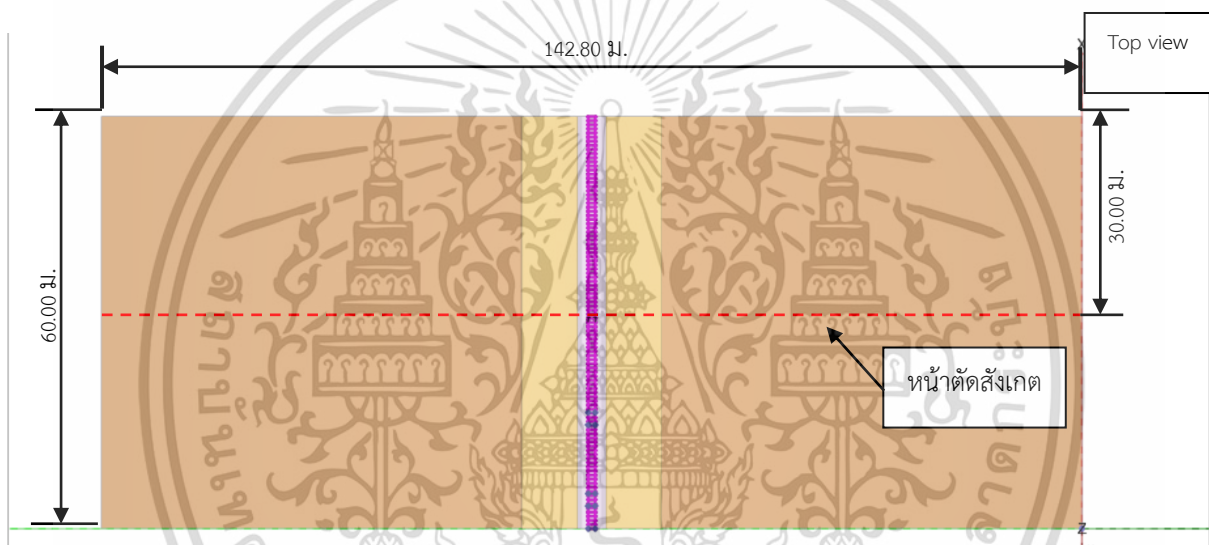


รูปที่ 3.12 ลักษณะของน้ำหนักรถเพลลาสำหรับจำลองน้ำหนักรถไฟ

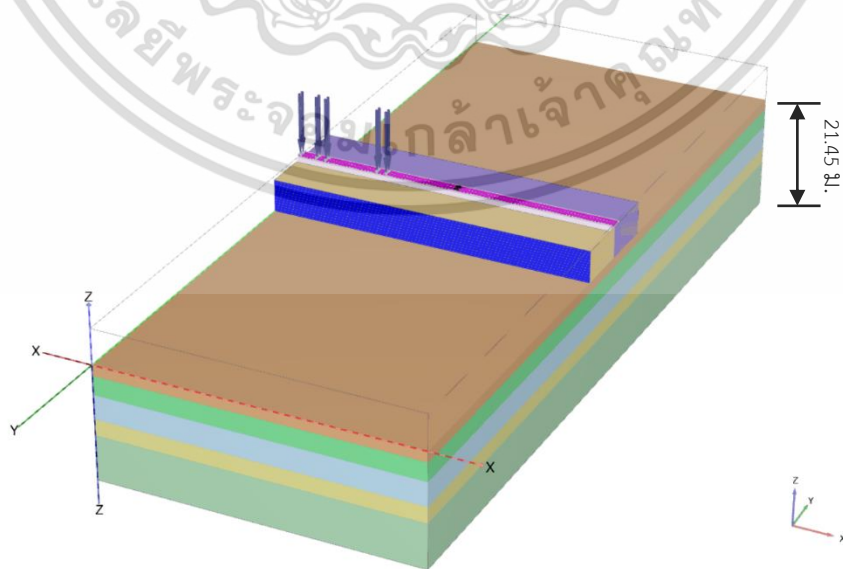
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 555 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 ขั้นตอนการจำลอง (Phase Construction)

การจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟถูกจำลองให้มีความกว้าง 60 ม. ยาว 142.8 ม. ซึ่งมีขนาดเป็น 7 เท่าของความกว้างกำแพง (ระยะออกจากผิวหน้าด้านละ 3 เท่าของขนาดความกว้างกำแพง) เพื่อหลีกเลี่ยง Boundary effect (Plaxis Vietnam Seminar, 2008) แล้วจึงจำลองดินฐานรากที่มีความลึก 21.45 ม. สมบัติดังตารางที่ 3.2 จากนั้นเริ่มจำลองวัสดุของกับผนังผิวหน้าคอนกรีต และ วัสดุเสริมกำลังในชั้นที่ 1 และเพิ่มทีละชั้นในแต่ละชั้นจนกำแพงมีความสูง 6 ม. จากนั้นจำลองการปรับตัวคาน้ำภายใต้แรงกดของดินถม 1.2 ม. เป็นระยะเวลา 61 วัน แล้วจึงจำลองโครงสร้างทางรถไฟ และน้ำหนักคนลดไฟในขั้นตอนต่อมา



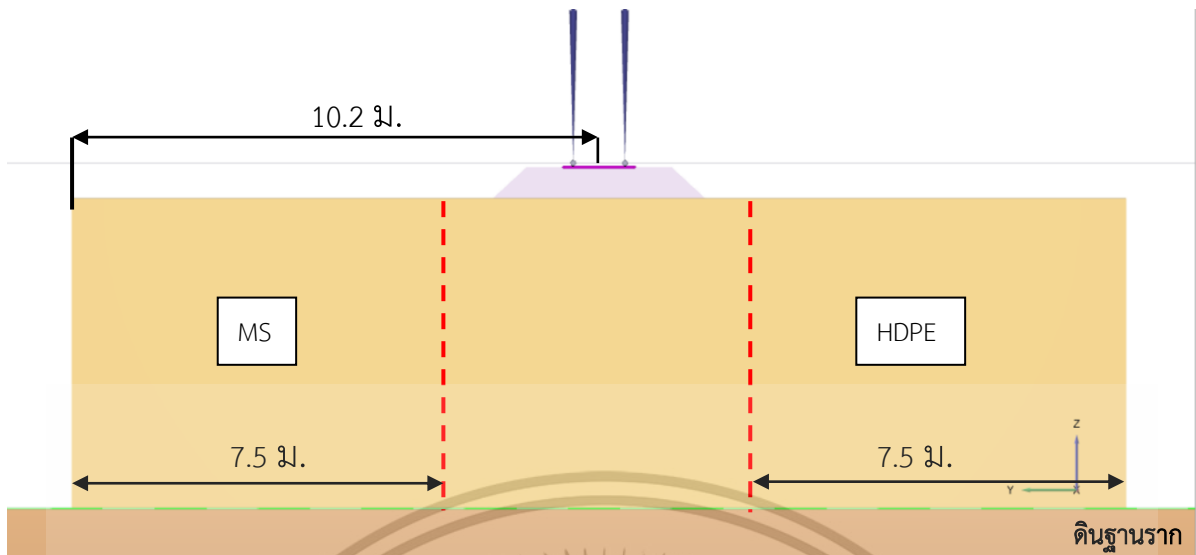
รูปที่ 3.13 ขนาดแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ



รูปที่ 3.14 แบบจำลองแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นแก่ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 56 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 ตำแหน่งทางรถไฟบนแบบจำลองกำแพงดินเสริมกำลังรับน้ำหนักรถไฟ

ในการจำลองการเคลื่อนที่ที่ใช้การจำลองแบบพลวัตเพื่อกำหนดให้น้ำหนักครรถไฟเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 100, 150 และ 200 ก.ม./ชม. เนื่องจากรางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงจนมีความเร็วสูงสุดเท่ากับ 200 ก.ม./ชม. จะถือว่าเป็นรถไฟความเร็วสูงตามนิยามของ International Union of Railways (Pyrgidis, 2016) เพื่อเปรียบเทียบผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่มีต่อคุณสมบัติทางกลของกำแพงดินเสริมกำลังที่อยู่ใต้ทางรถไฟโดยการจำลองในแต่ละความเร็ว จะกำหนดให้น้ำหนักครรถไฟเคลื่อนที่เป็นระยะทาง 30 ม. ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางของแบบจำลอง และกำหนดให้จุดสังเกตเพื่อเก็บข้อมูลคุณสมบัติเชิงกลของแบบจำลองกำแพงดินบริเวณหน้าตัดกึ่งกลางหรือที่ 30 ม. โดยเมื่อครรถไฟเคลื่อนที่เป็นระยะทาง 30 ม. จะทำให้เพลาสุดท้ายจะอยู่เหนือจุดสังเกตพอดีในเวลากำหนด จากนั้นจึงเก็บข้อมูลการเคลื่อนที่ตัวด้านข้างของผิวหน้ากำแพง การทรุดตัวที่ระดับ 5.5 ม. และความเครียดที่เกิดขึ้นในวัสดุเสริมกำลัง

ตารางที่ 3.7 ขั้นตอนการจำลองการก่อสร้างกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ

ขั้นตอน (Phase)	ระยะเวลา	วิธีการคำนวณ	รายละเอียด
Initial	0	K0 procedure	จำลองดินฐานราก
Phase 1	10 วัน	Plastic	จำลองการก่อสร้าง ดินถมชั้นที่ 1 สูง 0.235 ม. พร้อมวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 1 และผิวหน้าคอนกรีตชั้นที่ 1
Phase 2	12 วัน	Plastic	จำลองการก่อสร้าง ดินถมชั้นที่ 2 สูง 0.5 ม. พร้อมวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 2
Phase 3	12 วัน	Plastic	จำลองการก่อสร้าง ดินถมชั้นที่ 3 สูง 0.5 ม. พร้อมวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 3
Phase 4	12 วัน	Plastic	จำลองการก่อสร้าง ดินถมชั้นที่ 4 สูง 0.5 ม. พร้อมวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 4 และผิวหน้าคอนกรีตชั้นที่ 2

Phase 5	12 วัน	Plastic	จำลองการก่อสร้าง ดินถมชั้นที่ 5 สูง 0.5 ม. พร้อมวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 5
Phase 6	11 วัน	Plastic	จำลองการก่อสร้าง ดินถมชั้นที่ 6 สูง 0.5 ม. พร้อมวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 6
Phase 7	7 วัน	Plastic	จำลองการก่อสร้าง ดินถมชั้นที่ 7 สูง 0.5 ม. พร้อมวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 7 และผิวหน้าคอนกรีตชั้นที่ 3
Phase 8	7 วัน	Plastic	จำลองการก่อสร้าง ดินถมชั้นที่ 8 สูง 0.5 ม. พร้อมวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 8
Phase 9	7 วัน	Plastic	จำลองการก่อสร้าง ดินถมชั้นที่ 9 สูง 0.5 ม. พร้อมวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 9
Phase 10	7 วัน	Plastic	จำลองการก่อสร้าง ดินถมชั้นที่ 10 สูง 0.5 ม. พร้อมวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 10 และผิวหน้าคอนกรีตชั้นที่ 4
Phase 11	7 วัน	Plastic	จำลองการก่อสร้าง ดินถมชั้นที่ 11 สูง 0.5 ม. พร้อมวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 11
Phase 12	8 วัน	Plastic	จำลองการก่อสร้าง ดินถมชั้นที่ 12 สูง 0.5 ม. พร้อมวัสดุเสริมกำลังชั้นที่ 12
Cover 25 cm	1 วัน	Plastic	จำลองการก่อสร้าง ดินถมชั้นที่ 13 สูง 0.275 ม.
Surcharge (1.2 m fill)	12 วัน	Plastic	จำลองแรงกดทับ เทียบเท่าดินถมหนา 1.2 ม.
Consolidation	61 วัน	Consolidation	จำลองการอัดตัวคลายน้ำ
Ballast	1 วัน	Plastic	จำลองหินโรยทาง
Track	1 วัน	Plastic	จำลองเครื่องประกอบรางได้แก่ หมอนรองราง, เครื่องยึดเหนี่ยว และ รางรถไฟ
Train Loading	1 วัน	Plastic	จำลองน้ำหนักรถไฟที่จุดเริ่มต้นการเคลื่อนที่
Train Moving	-	Dynamic	จำลองการเคลื่อนที่ของน้ำหนักรถไฟ

3.4 ระบายการตรวจวัด (Measuring section)

ในการศึกษาสัมบัติเชิงกลของแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ จะถูกตรวจวัดในระนาบกึ่งกลางความยาวของแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลัง เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากขอบของแบบจำลอง (boundary effect) ซึ่งอยู่ห่างจากขอบของแบบจำลอง 30 ม. ดังแสดงในรูปที่ 3.13

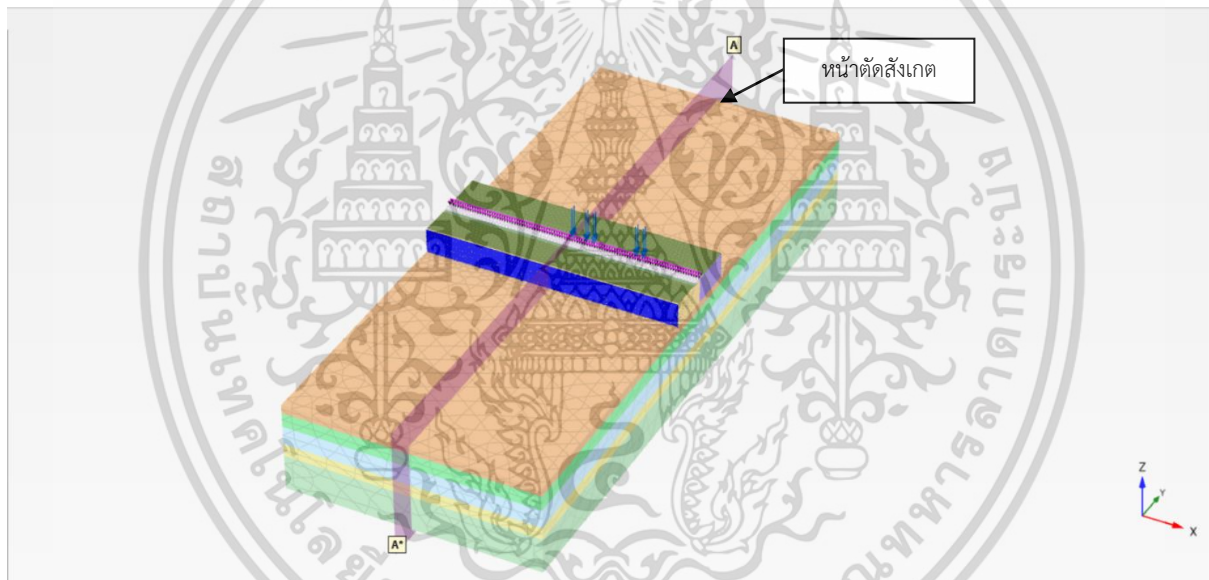
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 58 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

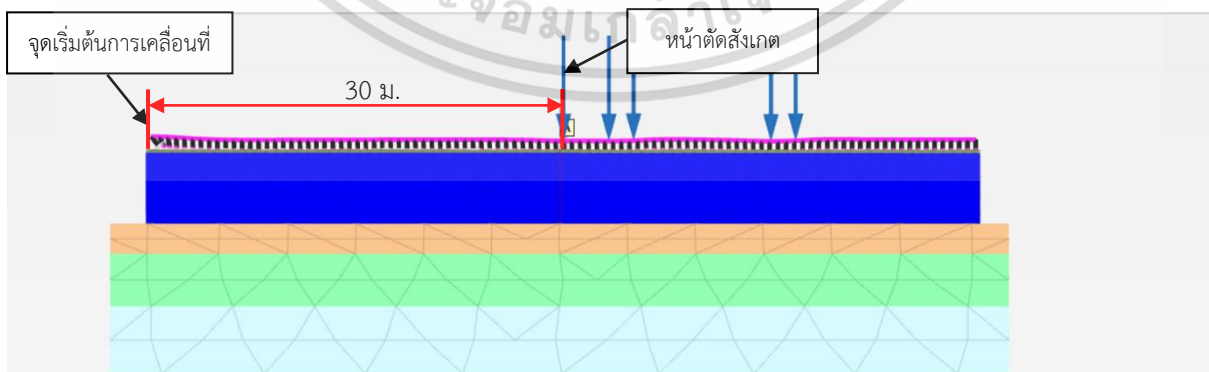
ผลการทดลอง

ผลการทดลองถูกนำเสนอในรูปแบบของข้อมูลพฤติกรรมเชิงกลของแบบจำลอง ได้แก่ พฤติกรรมของแบบจำลองที่เหมือนกับกำแพงกันดินเสริมกำลังที่ก่อสร้างจริง (Beral et al., 2016) เพื่อเปรียบเทียบและตรวจสอบความถูกต้องของสมบัติที่นำมาสร้างแบบจำลอง และพฤติกรรมของกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ ได้แก่ การเคลื่อนตัวด้านข้าง การทรุดตัวที่ระดับความสูง 5.5 เมตรจากผิวดิน และความเครียดในวัสดุเสริมกำลัง

พฤติกรรมของแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ ถูกตรวจวัดที่หน้าตัดสังเกตบริเวณกึ่งกลางของแบบจำลอง แสดงในรูปที่ 4.1



(ก)

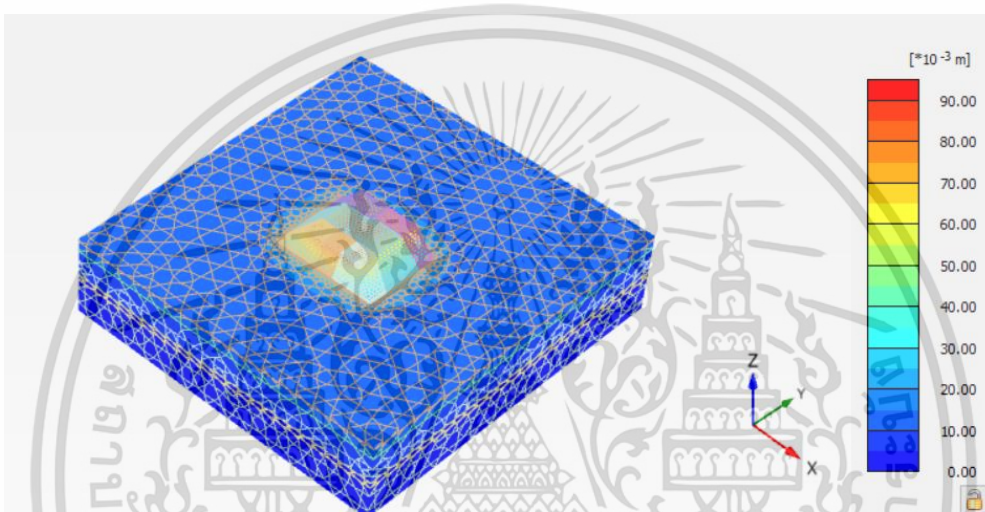


(ข)

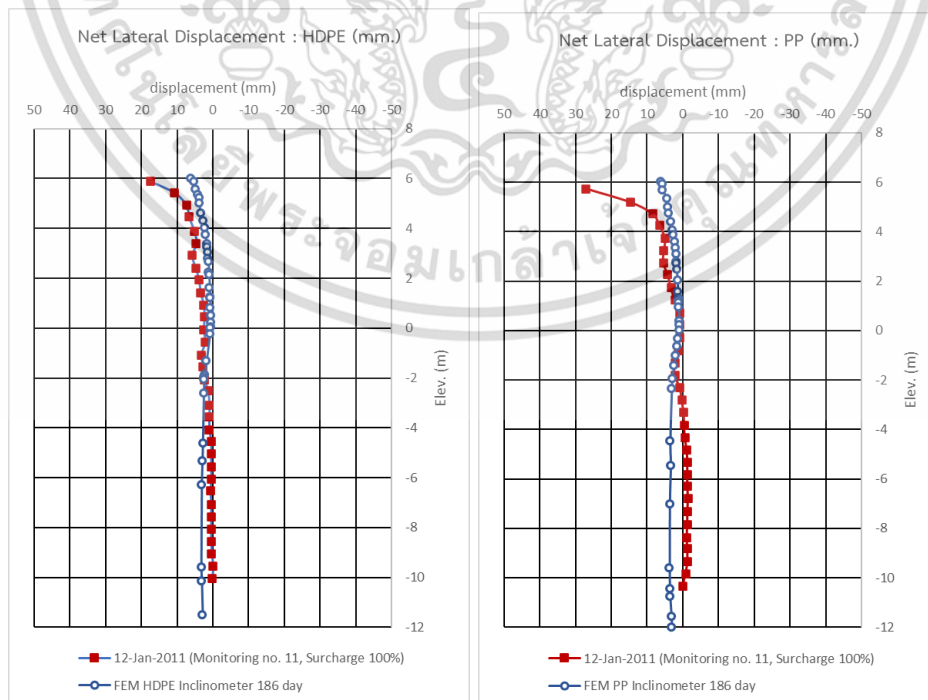
รูปที่ 4.1 ตำแหน่งหน้าตัดสังเกตของแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 59 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

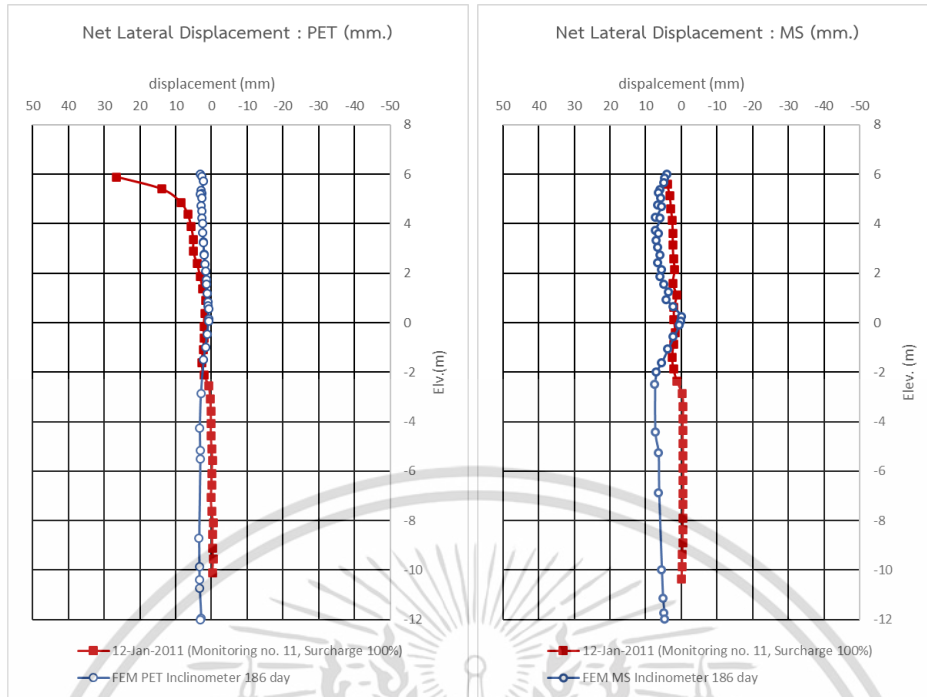
แบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลังถูกจำลองให้มีมีลักษณะเช่นเดียวกับกำแพงกันดินเสริมกำลังที่ก่อสร้างจริงบนพื้นดินแข็ง (Beral et al., 2016) จากผลการทดสอบพบว่า แบบจำลองมีพฤติกรรมเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงด้านที่เสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมกำลังชนิดทำจากพอลิเมอร์ มีลักษณะและขนาดใกล้เคียงกับข้อมูลที่ตรวจวัดของกำแพงกันดินเสริมกำลังที่ก่อสร้างจริงในสนาม (รูปที่ 4.3 ก-จ) นอกจากนี้การทรุดตัวที่หน้าตัดผ่านวัสดุเสริมกำลังแต่ละชนิดของแบบจำลอง มีแนวโน้มเช่นเดียวกับพฤติกรรมกำแพงกันดินเสริมกำลังที่ก่อสร้างจริง (รูปที่ 4.4-4.6)



รูปที่ 4.2 การเคลื่อนตัวทั้งหมดของแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลัง (Total displacement)

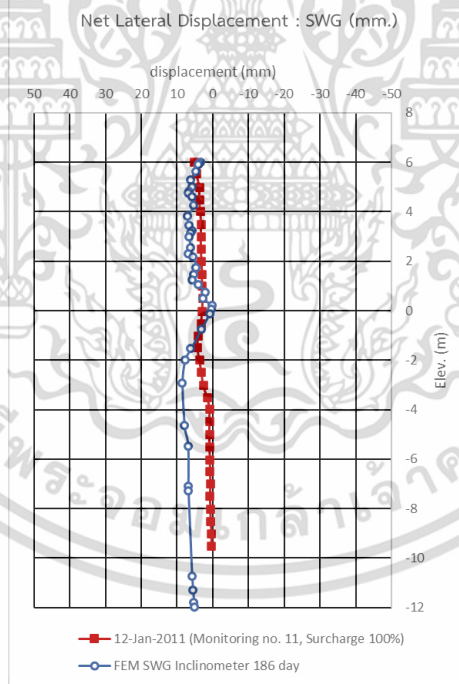


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (ก) (ข)
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 60 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

(ง)

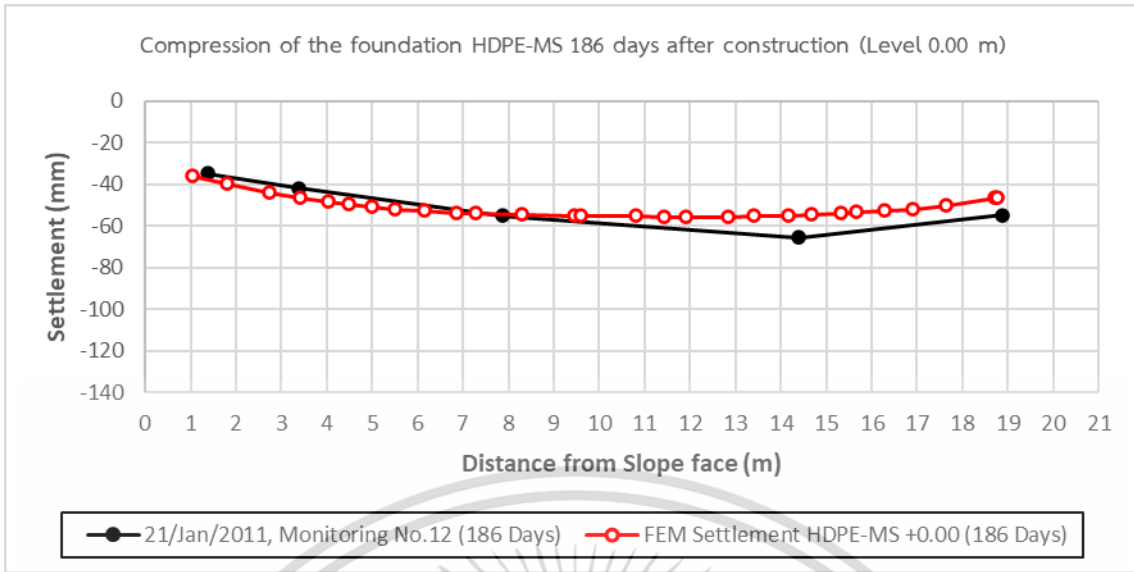


(จ)

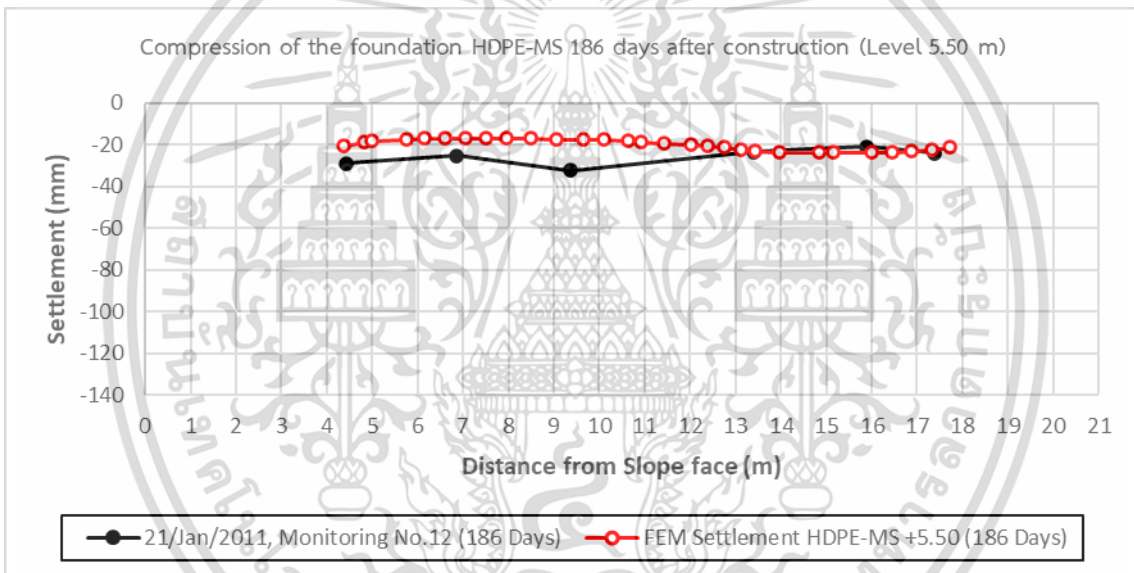
รูปที่ 4.3 การเคลื่อนด้านข้างของกำแพงกันดินเสริมกำลังที่ก่อสร้างจริงและแบบจำลอง : (ก.) เสริมกำลังด้วย
 ตาข่ายเสริมกำลังชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง, (ข.) เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังชนิดพอลิโพรพิลีน,
 (ค.) เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังชนิดพอลิเอสเทอร์, (ง.) เสริมกำลังด้วยแถบโลหะ, (จ.) เสริมกำลังด้วย

ตะแกรงเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 61 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

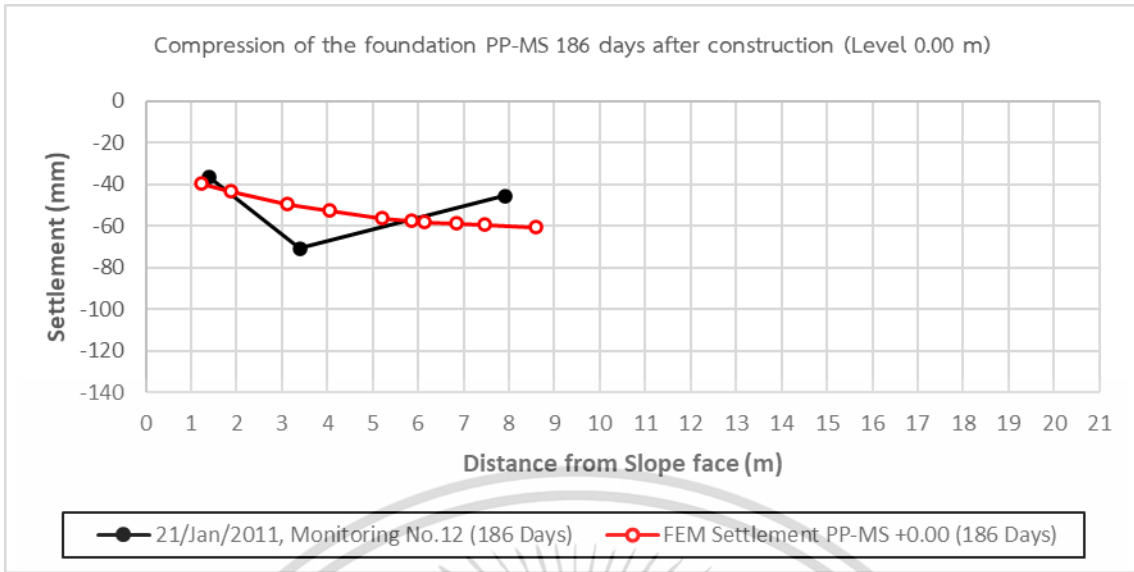


(ก)

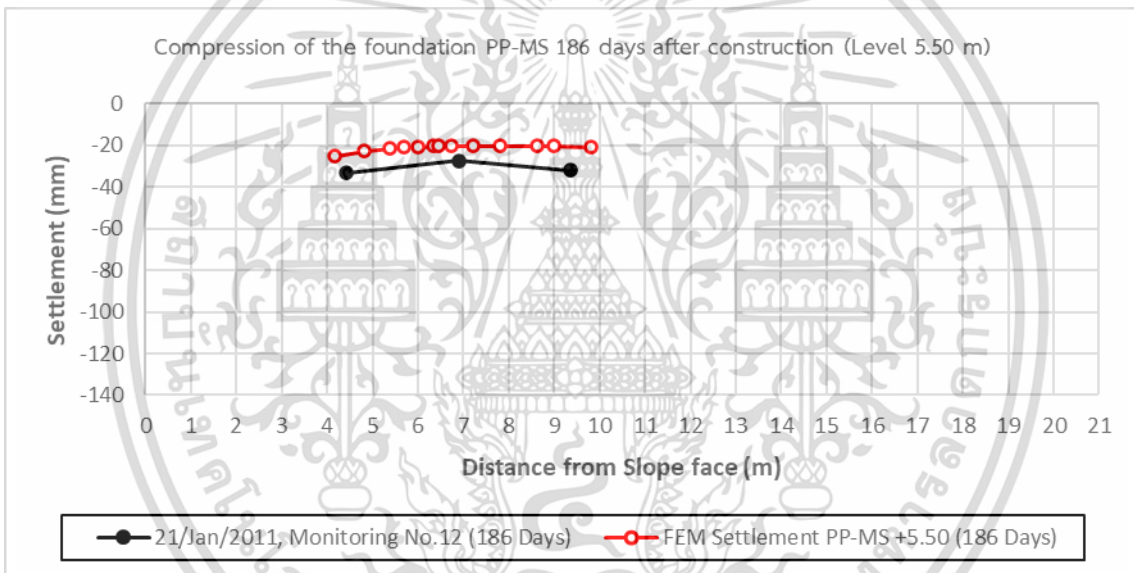


(ข)

รูปที่ 4.4 การทรุดตัวของกำแพงกันดินเสริมกำลังที่ก่อสร้างจริงเทียบกับแบบจำลองที่หน้าตัดที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง-แถบโลหะ: (ก) ระดับ +0.00 ม., (ข) ระดับ +5.50 ม.

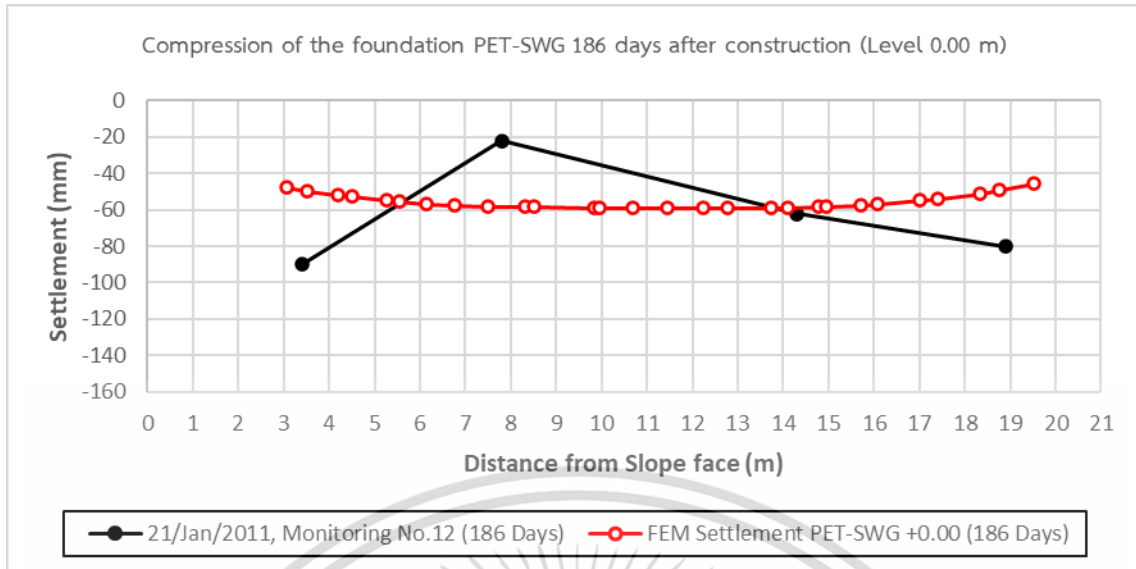


(ก)

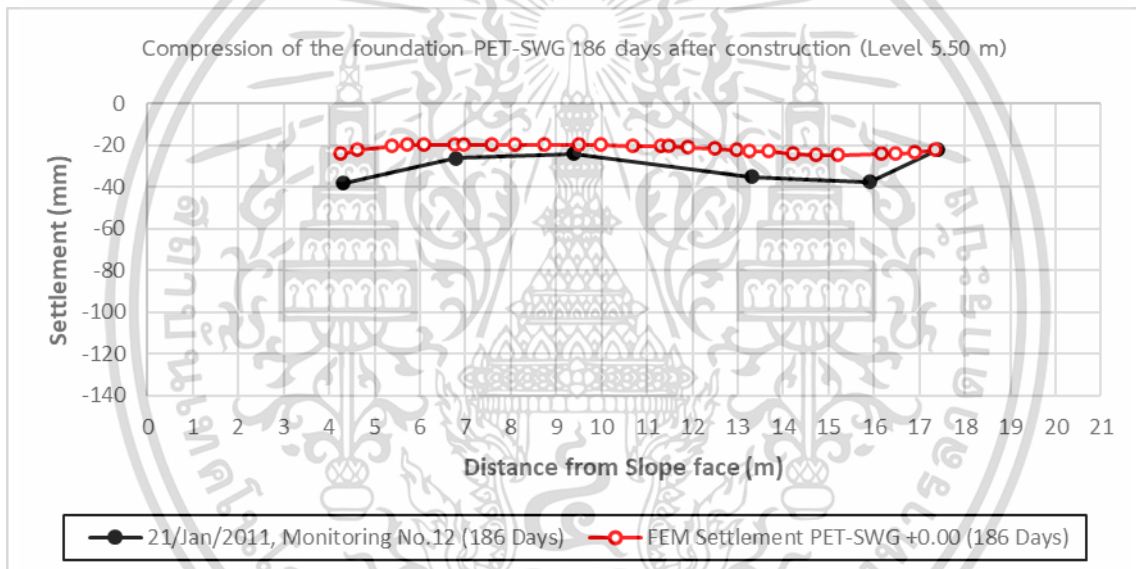


(ข)

รูปที่ 4.5 การทรุดตัวของกำแพงกันดินเสริมกำลังที่ก่อสร้างจริงเทียบกับแบบจำลองที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังชนิดพอลิโพรพิลีน-แถบโลหะ: (ก) ระดับ +0.00 ม., (ข) ระดับ +5.50 ม.



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.6 การทรุดตัวของกำแพงกันดินเสริมกำลังที่ก่อสร้างจริงเทียบกับแบบจำลองที่เสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังชนิดพอลิเอสเตอร์-ตะแกรงเหล็ก : (ก) ระดับ +0.00 ม., (ข) ระดับ +5.50 ม.

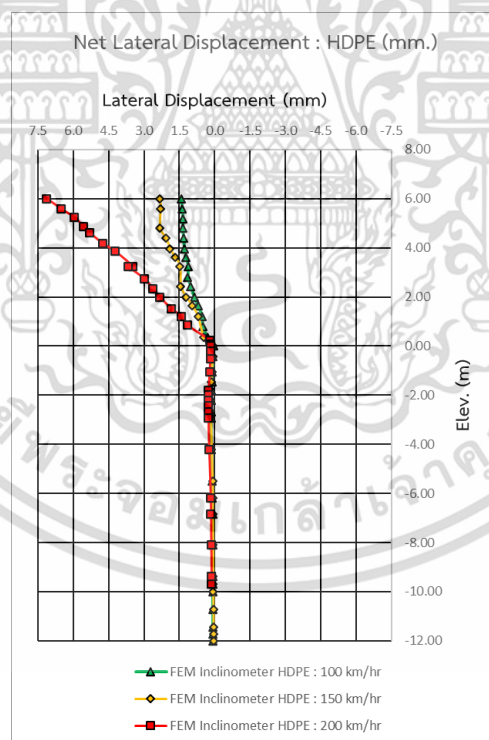
4.2 การเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ

การศึกษาแบบกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ ถูกจำลองให้มีความกว้าง 20.40 ม. สูง 6 ม. ด้านหนึ่งเสริมกำลังด้วยพอลิเอทีลีนความหนาแน่นสูง และอีกด้านหนึ่งเสริมกำลังด้วยแถบโลหะ มีระยะเสริมกำลังลึก 7.5 ม. ทั้งสองชนิด การเคลื่อนตัวด้านข้างในแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ ของด้านที่เสริมกำลังด้วยพอลิเอทีลีนความหนาแน่นสูง และ แถบโลหะ ถูกเปรียบเทียบที่ความเร็ว 100, 150 และ 200 ก.ม./ชม. กำแพงกันดินด้านที่เสริมกำลังด้วยพอลิเอทีลีนความ

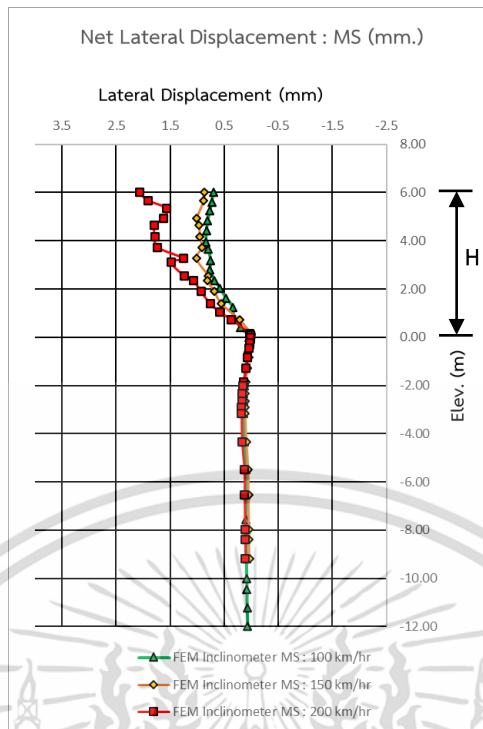
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 64 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนาแน่นสูง ที่ความเร็ว 100 ก.ม./ชม. มีการเคลื่อนตัวสูงสุดเท่ากับ 1.43 ม.ม. เมื่อความเร็วของน้ำหนักรถไฟเพิ่มขึ้นเป็น 150 และ 200 ก.ม./ชม. การเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงมีค่ามากขึ้น เป็น 2.32 ม.ม. และ 7.13 ม.ม. ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยทุกความเร็วของน้ำหนักรถไฟ การเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดเกิดที่บริเวณบนสุดของกำแพง (ระดับ +6.00) ส่วนกำแพงกันดินด้านที่เสริมกำลังด้วยแถบโลหะ ที่ความเร็วของน้ำหนักรถไฟ 100 ก.ม./ชม. ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 0.84 ม.ม. ที่ความเร็วของน้ำหนักรถไฟ 150 ก.ม./ชม. มีการเคลื่อนตัวสูงสุดเท่ากับ 1.02 ม.ม. และที่ความเร็วของน้ำหนักรถไฟ 200 ก.ม./ชม. การเคลื่อนตัวสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2.07 ม.ม. ที่บริเวณบนสุดของกำแพง ดังแสดงในรูปที่ 4.8

การเคลื่อนตัวของมวลดิน จากบริเวณกึ่งกลางทางรถไฟทำให้เกิดการเคลื่อนตัวด้านข้างใกล้กับผิวหน้ากำแพง โดยที่ความเร็ว 100 และ 150 ก.ม./ชม. ผลกระทบจากความเร็วจะสังเกตได้เพียงเล็กน้อย แต่ที่ความเร็ว 200 ก.ม./ชม. มีการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนตัวของมวลดินสูงชันอย่างมาก และทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของผิวหน้ากำแพง ผลลัพธ์การเคลื่อนตัวด้านข้างนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Corfdir et al. (2017) และเนื่องจากโดยทั่วไปแถบโลหะมี stiffness ที่สูงกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ทำให้การเคลื่อนตัวมีค่าน้อยกว่า



รูปที่ 4.7 การเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงดินเสริมกำลังด้วยตาข่ายเสริมกำลังชนิดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงแต่ละความเร็วของน้ำหนักรถไฟ



รูปที่ 4.8 การเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงดินเสริมกำลังด้วยแถบโลหะแต่ละความเร็วของน้ำหนักรถไฟ

4.3 การทรุดตัวของกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ

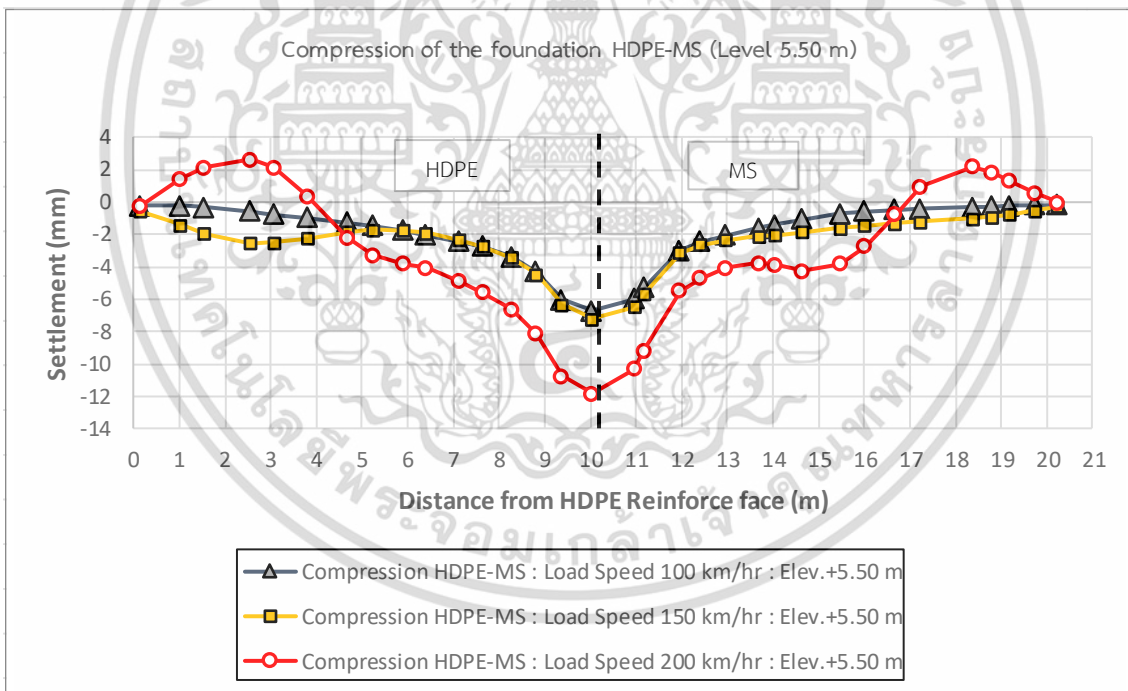
การทรุดตัวของกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟจะถูกตรวจวัดที่ระดับความสูง 5.5 เมตร จากผิวดิน ซึ่งเป็นการทรุดตัวเนื่องจากน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ โดยแสดงเป็นการทรุดตัวที่วัดตำแหน่งโดยการวัดระยะจากผิวหน้าเสริมกำลังพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง รูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วของการเคลื่อนที่มีค่ามากขึ้นจาก 100 ก.ม./ชม. เป็น 150 ก.ม./ชม. นั้นการทรุดตัวจะมีค่ามากขึ้นโดยมีค่าสูงสุดที่บริเวณกึ่งกลางและเมื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 200 ก.ม./ชม. การทรุดตัวก็มีค่ามากขึ้น การทรุดตัวของกำแพงกันดินเสริมกำลังในด้านที่เสริมกำลังด้วยพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และ ด้านที่เสริมกำลังด้วยแถบโลหะ มีพฤติกรรมคล้ายกันในทุกความเร็วเคลื่อนที่ของน้ำหนักรถไฟ สอดคล้องกับการศึกษาของ Bergado et al (2021) สำหรับกำแพงกันดินเสริมกำลังที่ก่อสร้างอยู่บนดินแข็ง

นอกจากนี้ สามารถสังเกตการเคลื่อนตัวแนวตั้งในทิศขึ้นหรือดินปูด (heave) ของดิน มีค่าสูงสุดที่บริเวณ 2.5 ม. และ 18.5 ม. จากผิวหน้าเสริมกำลังพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง การปูด (heave) ของดินนี้สามารถอธิบายได้ด้วยรูปที่ 4.10 เมื่อน้ำหนักของรถไฟเคลื่อนที่ด้วยความเร็วจะเกิดแถบการทรุดตัวในแนวขวางผ่านเคลื่อนที่ตรงกับบริเวณแคร่ล้อพอดี และแถบการทรุดตัวนี้จะมีลักษณะเฉียงออกด้านตรงข้ามกับทิศการเคลื่อนที่ ทั้งนี้แคร่ล้อที่อยู่ในรถคันเดียวกันมีระยะห่างระหว่างกัน ทำให้มีระยะห่างระหว่างแถบการทรุดตัวเช่นเดียวกัน และในช่องว่างระหว่างแถบการทรุดตัวนี้ก็เกิดการเคลื่อนที่เป็นทิศตรงข้ามหรือดินปูดเกิดขึ้น ที่ความเร็ว 150 ก.ม./ชม. แถบการทรุดตัวไม่ได้พาดผ่านบริเวณหน้าตัดสังเกต แต่เมื่อความเร็วมากขึ้นแถบการเอกสทรานเป็นเอกสทรานที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 66 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

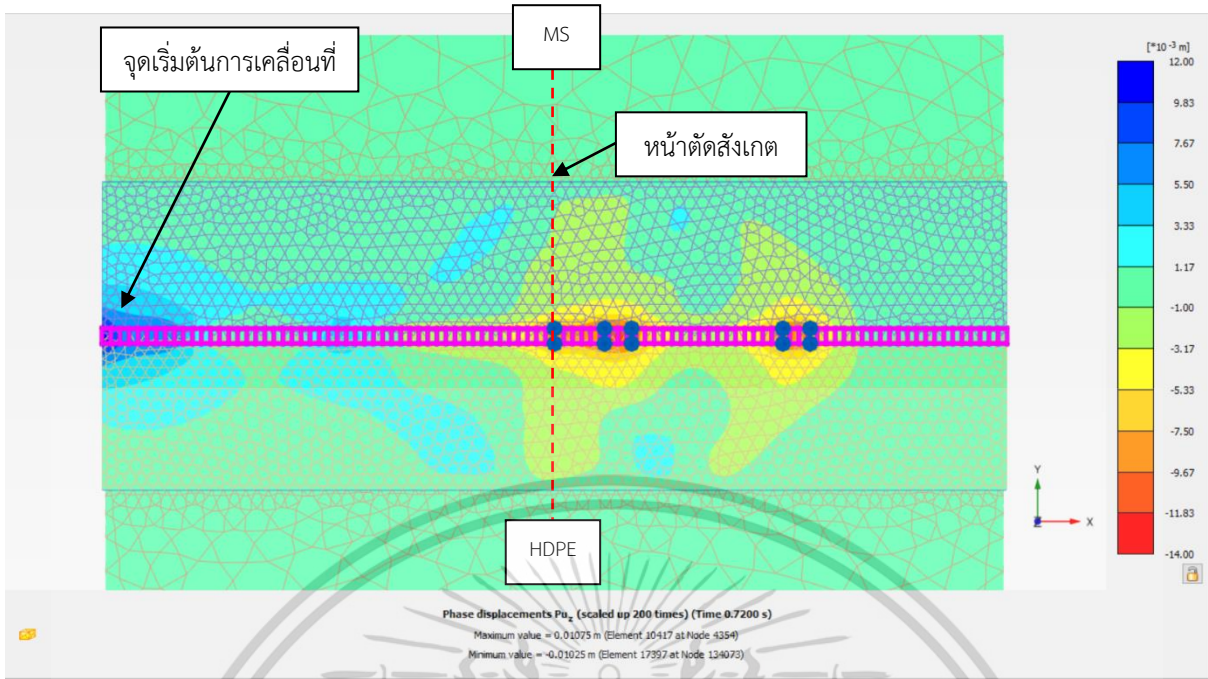
ทรุดตัวและดินปุด จะเคลื่อนตัวไปบริเวณตรงข้ามกับการเคลื่อนที่มากขึ้น จนที่ความเร็ว 200 ก.ม./ชม. ทำให้แถบดินปุดพาดผ่านบริเวณหน้าตัดสังเกต

ทั้งนี้ดินปุด เกิดขึ้นที่บริเวณใกล้ผิวหน้ากำแพงทั้งสองด้านทั้งที่เสริมกำลังด้วยพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และแถบโลหะ จากผลการตรวจวัดแบบจำลองนี้สอดคล้องกับการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงกันดินเสริมกำลัง คือเมื่อความเร็วของน้ำหนักรถไฟมีค่ามากขึ้น ดินใต้ทางรถไฟที่บริเวณกึ่งกลางจะเคลื่อนตัวออกไปยังบริเวณผิวหน้า ความกว้างของดินปุดด้านที่เสริมกำลังด้วยพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงอยู่ในช่วงระยะ 0 ถึง 4.5 เมตรจากผิวหน้า ซึ่งกว้างกว่าด้านที่เสริมกำลังด้วยแถบโลหะที่เกิดในช่วง 17-20.4 เมตรจากผิวหน้าเสริมกำลังพอลิเมอร์ เนื่องจากมวลดินที่เสริมกำลังด้วยโลหะจะมีการเสียรูปน้อยกว่ามวลดินที่เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์

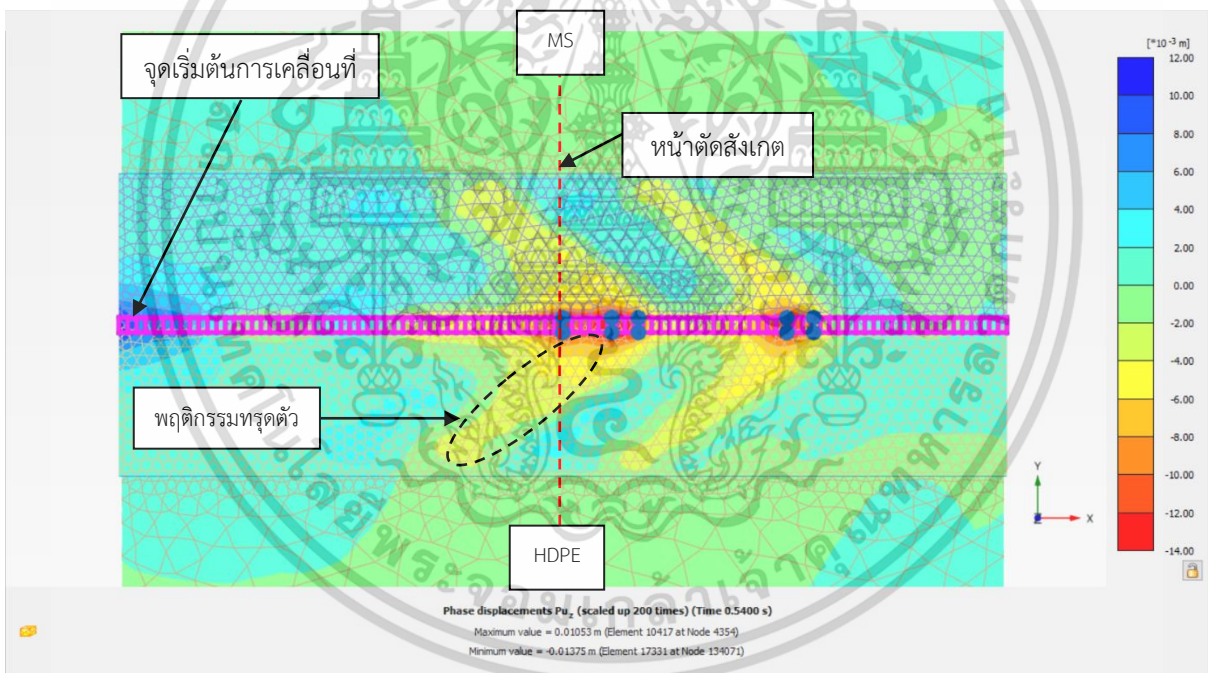
ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Paolucci et al. (2006) โดยเรียกลักษณะการเกิดคลื่นบนผิวดินในรูปที่ 4.10 ว่า Mach cone เกิดจากความเร็วน้ำหนักรถไฟเคลื่อนที่ของรถไฟเข้าใกล้ Rayleigh wave velocity แล้วส่งผลทำให้ขนาด ของการเคลื่อนตัวของผิวดินนี้สูงขึ้นเป็นอย่างมาก



รูปที่ 4.9 การทรุดตัวเนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำหนักรถไฟที่ระดับความสูง +5.50 เมตร



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.10 การทรุดตัวของกำแพงดินตามแนวการเคลื่อนที่ของน้ำหนักรถไฟ: (ก.) ความเร็วน้ำหนัก 150 ก.ม./ชม., (ข.) ความเร็วน้ำหนัก 200 ก.ม./ชม.

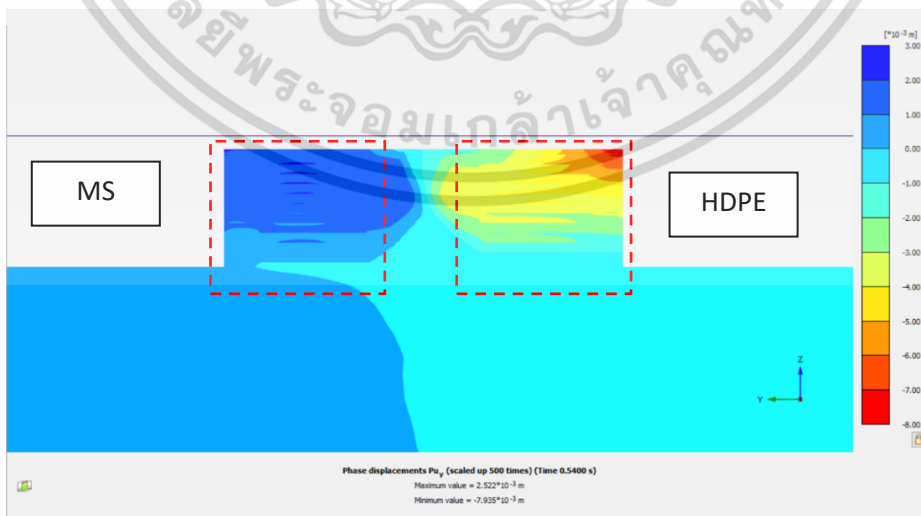
4.4 ความเครียดในวัสดุเสริมกำลังในกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ

ความเครียดในวัสดุเสริมกำลังของกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ ด้านที่เสริมกำลังด้วยพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และ ที่เสริมกำลังด้วยแถบโลหะ ในขณะที่ไม่ได้รับน้ำหนักเคลื่อนที่ของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 68 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

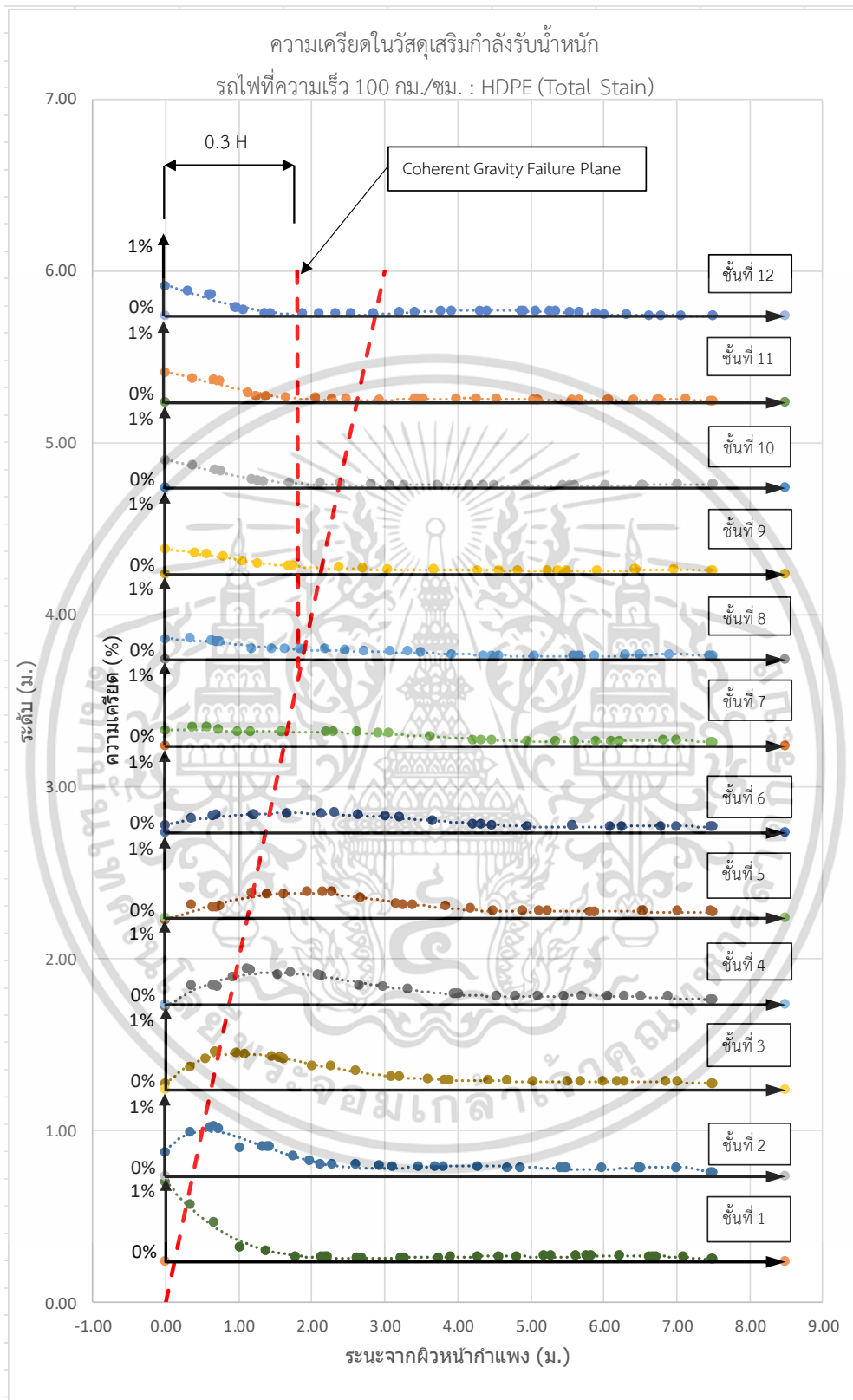
รถไฟ จะมีแนวของตำแหน่งความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นเป็นไปตามทฤษฎี Bilinear Coherent Gravity Method (Victor et al.,1997) ที่มีแนวเส้นความเครียดสูงสุดแนวตั้งห่างจากผิวหน้าประมาณ 0.3H (H คือ ความสูงของกำแพง) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Beral et al. (2016) ซึ่งเป็นกำแพงกันดินเสริมกำลังบนดินแข็งในภาวะสถิต และเมื่อกำแพงกันดินด้านที่เสริมกำลังพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงได้รับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟ ส่งผลให้ความเครียดในวัสดุเสริมกำลังเพิ่มขึ้นตามความเร็วที่มากขึ้น ที่น้ำหนักรถไฟเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 200 ก.ม./ชม. ความเครียดในวัสดุเสริมกำลังจะเพิ่มขึ้นในชั้นเสริมกำลังชั้นที่ 9 ถึง 12 โดยที่ความเปลี่ยนแปลงความเครียดสูงสุดเกิดในชั้นที่ 12 และน้อยลงในชั้นที่อยู่ถัดลงมา เนื่องมาจากการเคลื่อนตัวของมวลดินที่บริเวณผิวดินตามการศึกษาของ Corfdir et al. (2017) และ Paolucci et al. (2006) ความเครียดในวัสดุเสริมกำลังที่รับน้ำหนักเคลื่อนที่ ถูกแสดงในรูปที่ 4.12 ถึง 4.14

สำหรับความเปลี่ยนแปลงความเครียดที่เกิดขึ้นในวัสดุเสริมกำลังแถบโลหะจะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย แต่ไม่มีนัยยะสำคัญต่อโครงสร้างกำแพงกันดินเสริมกำลัง ทำให้ความเครียดในวัสดุเสริมกำลังของกำแพงกันดินด้านที่เสริมกำลังด้วยพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และแถบโลหะเมื่อรองรับน้ำหนักรถไฟเคลื่อนที่ จะยังมีเส้นที่ลากผ่านจุดความเครียดสูงสุดบนวัสดุเสริมกำลังตามทฤษฎี Bilinear Coherent Gravity Method

วัสดุเสริมกำลังพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและแถบโลหะ ในสถานะที่ไม่มีน้ำหนักเคลื่อนที่ จะมีความเครียดสูงสุดตามทฤษฎี Bilinear Coherent Gravity Method ทั้ง 2 ชนิด ตามการศึกษาของ Bergado et al. (2016) แต่ความเครียดในวัสดุเสริมกำลังพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงจะมีขนาดมากกว่าเนื่องจากมีความยืดตัวที่มากกว่าแถบโลหะ และเมื่อได้รับน้ำหนักเคลื่อนที่ความเร็วเพิ่มขึ้น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงจะมีความเปลี่ยนแปลงที่บริเวณชั้นบน แต่แถบโลหะจะมีความเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แต่วัสดุเสริมกำลังทั้ง 2 ชนิดก็ยังคงมีแนวความเครียดสูงสุดตามทฤษฎี Bilinear Coherent Gravity Method

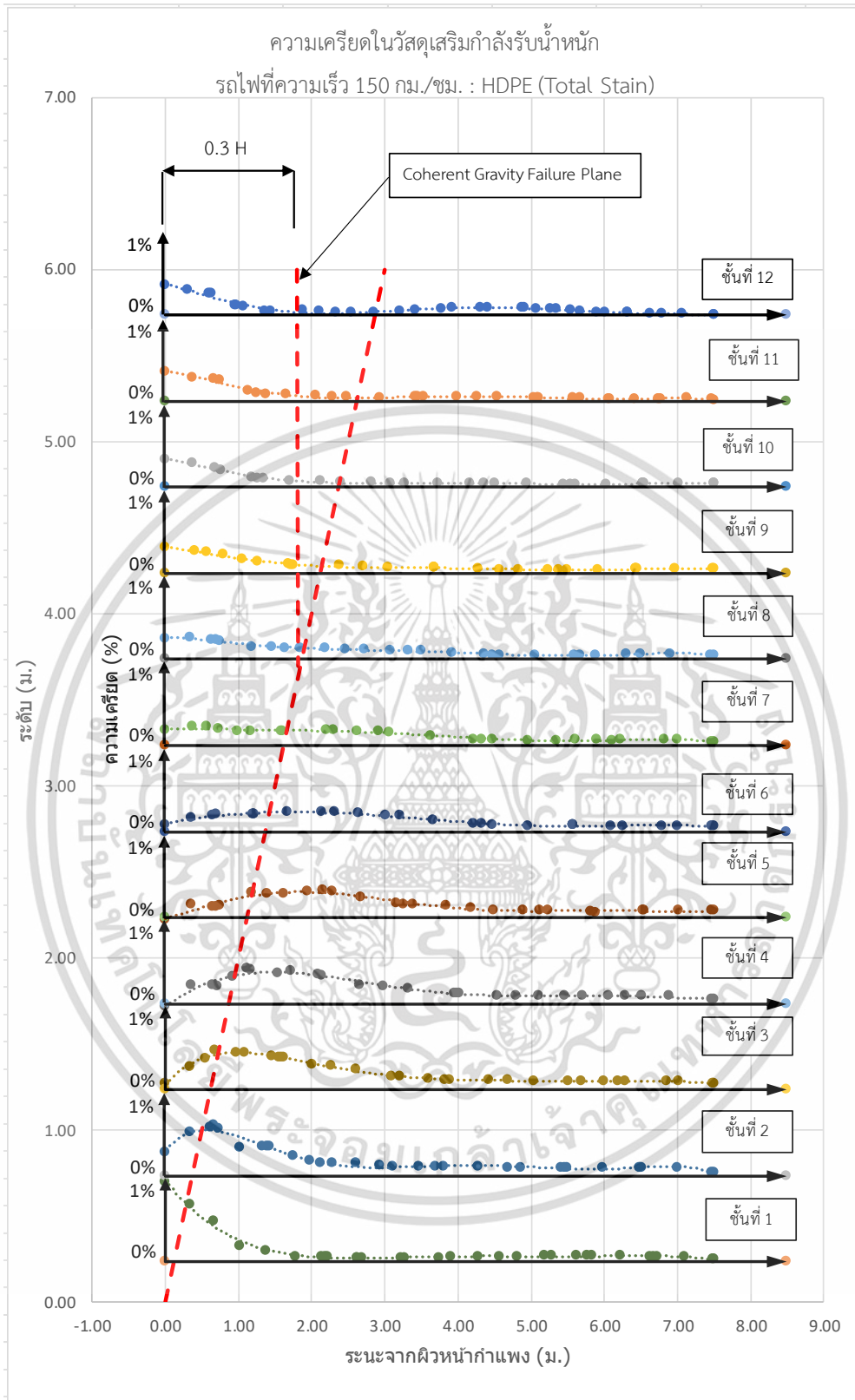


รูปที่ 4.11 การเคลื่อนตัวด้านข้างของแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟที่หน้าตัดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในคู่มือการศึกษานี้ เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



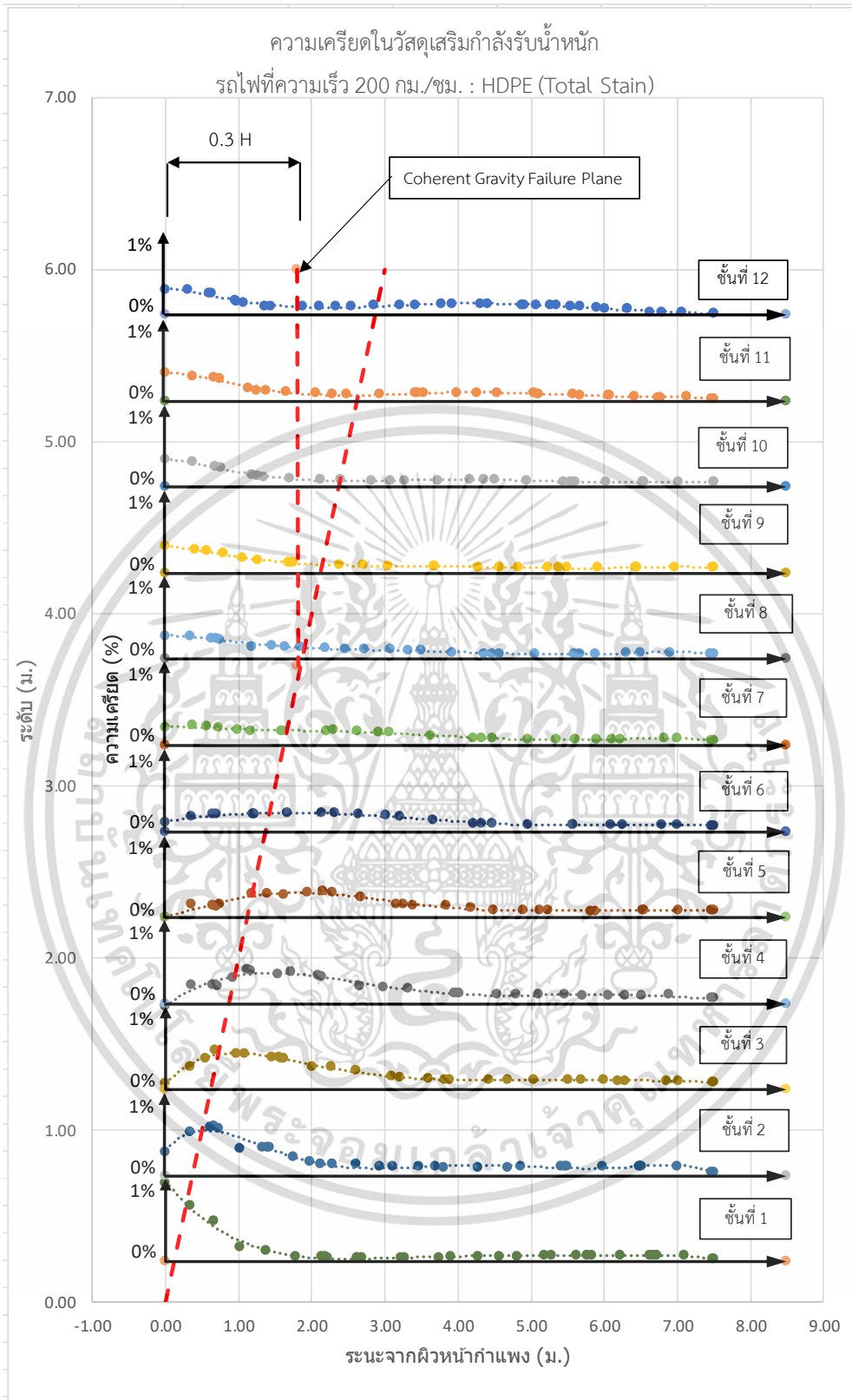
รูปที่ 4.12 ความเครียดในวัสดุเสริมกำลังพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรับน้ำหนักรถไฟที่ความเร็ว 100 ก.ม./ชม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 70 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



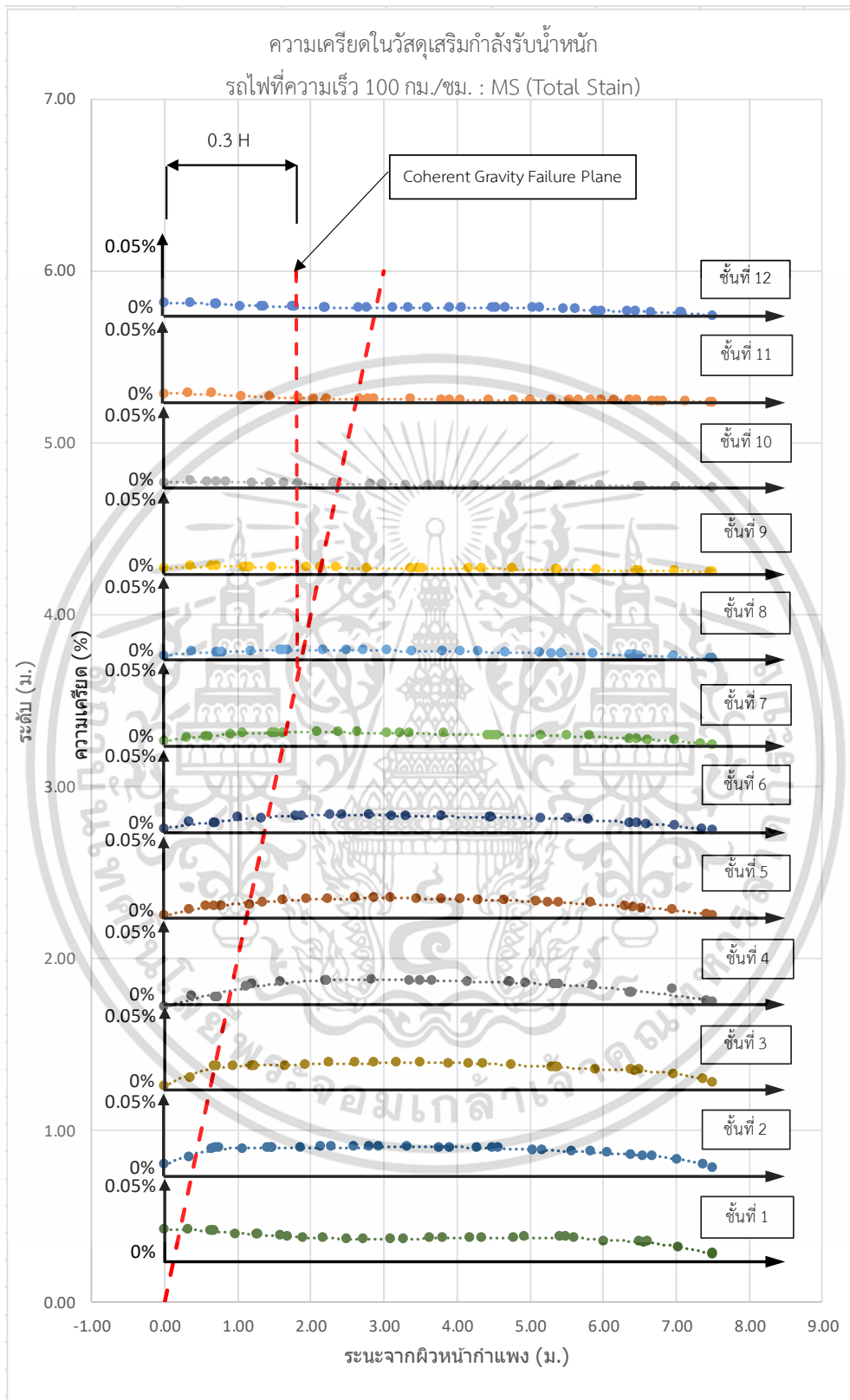
รูปที่ 4.13 ความเครียดในวัสดุเสริมกำลังพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรับน้ำหนักรถไฟที่ความเร็ว 150 ก.ม./ชม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 71 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



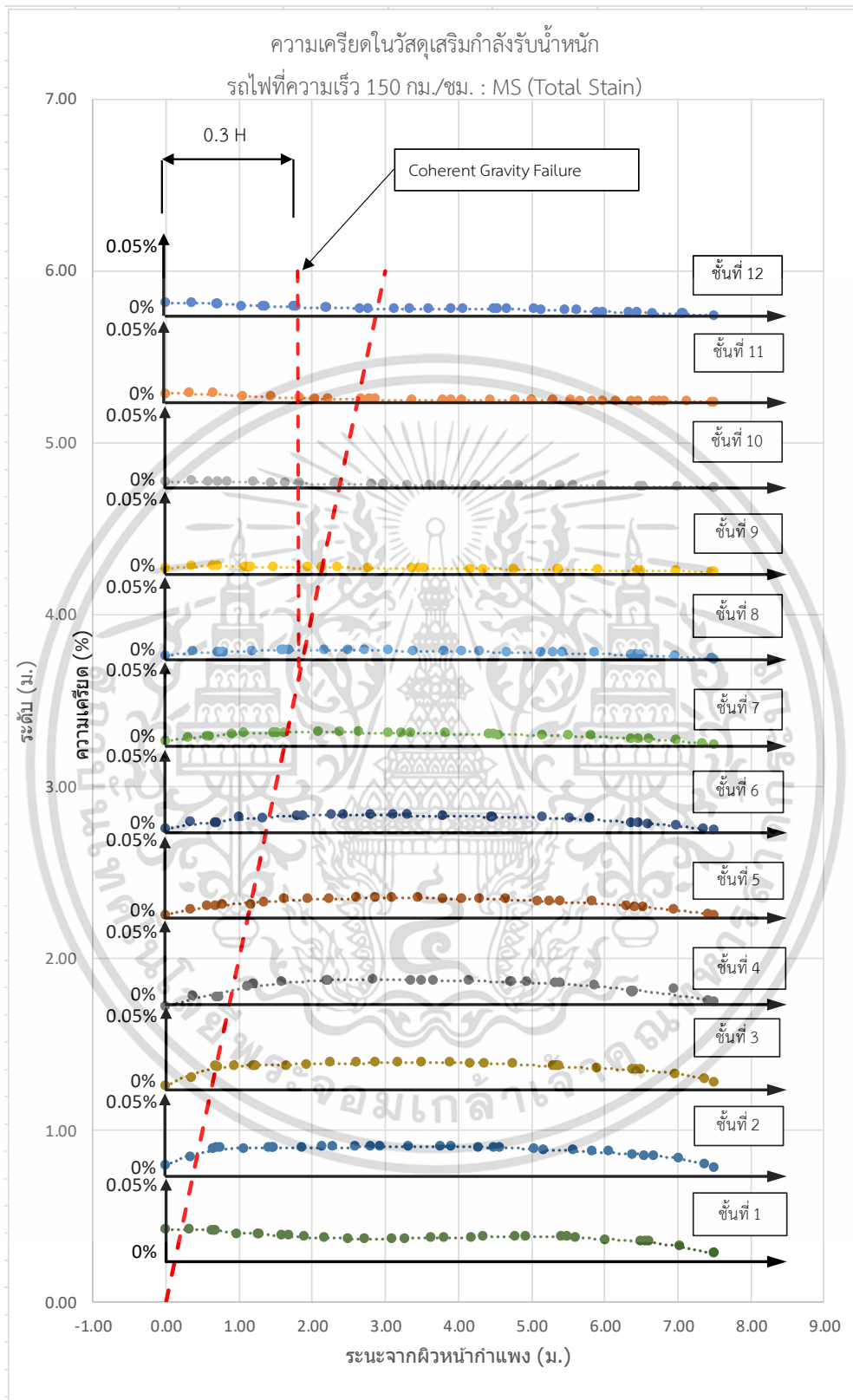
รูปที่ 4.14 ความเครียดในวัสดุเสริมกำลังพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงรับน้ำหนักรถไฟที่ความเร็ว 200 ก.ม./ชม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 72 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



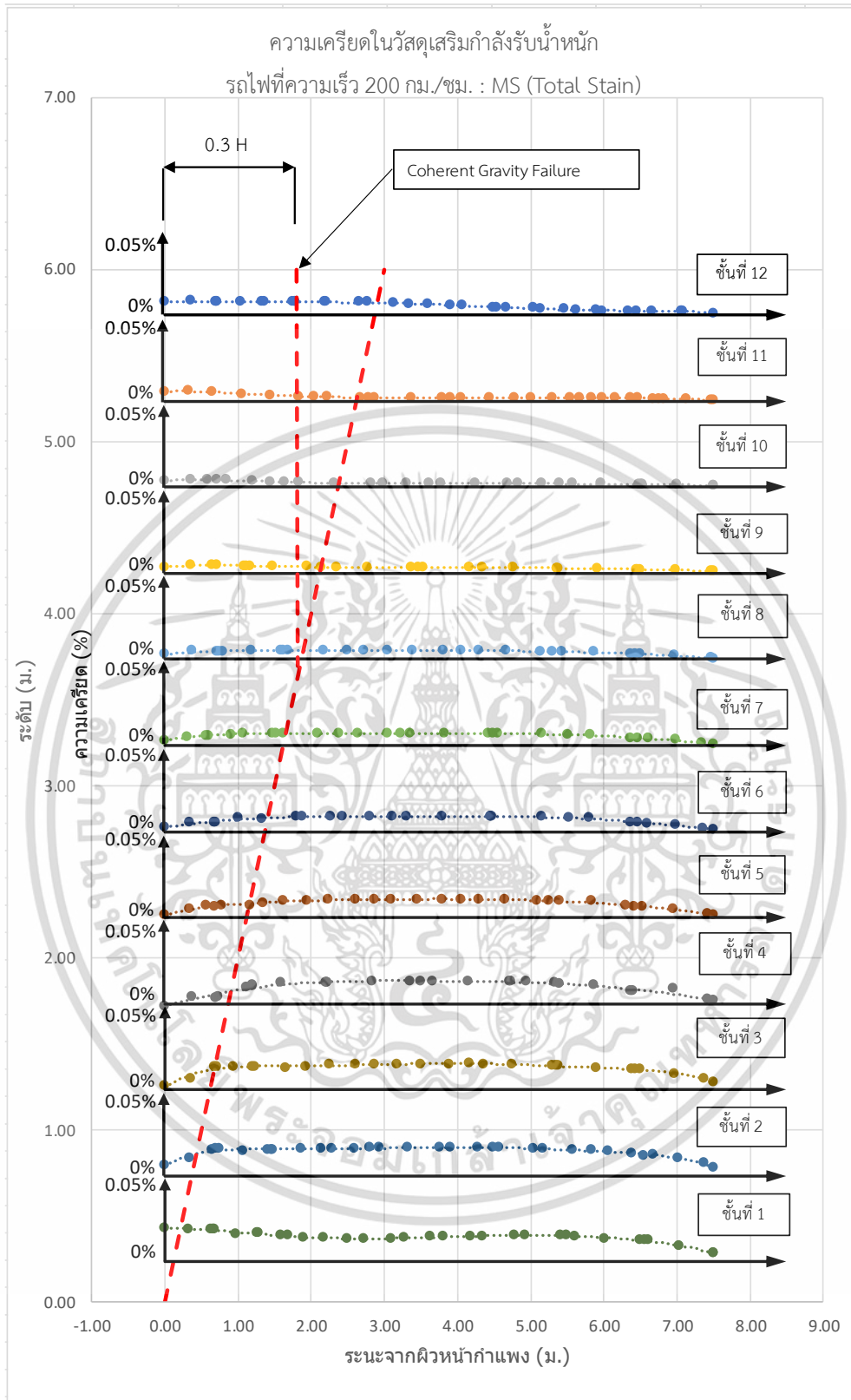
รูปที่ 4.15 ความเครียดในวัสดุเสริมกำลังแถบโลหะรับน้ำหนักรถไฟที่ความเร็ว 100 ก.ม./ชม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 73 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ความเครียดในวัสดุเสริมกำลังแถบโลหะรับน้ำหนักรถไฟที่ความเร็ว 150 ก.ม./ชม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 74 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ความเครียดในวัสดุเสริมกำลังแถบโลหะรับน้ำหนักรถไฟที่ความเร็ว 200 ก.ม./ชม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 75 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลังและโครงสร้างทางรถไฟเพื่อจำลองการรับน้ำหนักกระทำเคลื่อนที่โดยการอ้างอิงข้อมูลจากการก่อสร้างกำแพงกันดินในสนาม ข้อมูลเชิงกลที่ได้จากแบบจำลองได้แก่ การเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพง, การทรุดตัว และความเครียดที่เกิดขึ้นในวัสดุเสริมกำลัง ถูกแสดงอยู่ในผลการทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบผลของความเร็วน้ำหนักกระทำที่ส่งผลต่อคุณสมบัติดังกล่าวว่า และสามารถสรุปได้ดังนี้

1) การเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงกันดินเสริมกำลังมีค่ามากขึ้นเมื่อความเร็วของน้ำหนักรถไฟเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่บริเวณบนสุดของผิวหน้ากำแพง ทั้งด้านที่เสริมกำลังด้วยพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และด้านที่เสริมกำลังด้วยแถบโลหะ เนื่องจากเมื่อน้ำหนักรถไฟเคลื่อนที่ผ่านกำแพงกันดินเสริมกำลัง มวลดินที่บริเวณใต้โครงสร้างทางรถไฟจะเคลื่อนที่ออกจากจุดศูนย์กลางทางรถไฟ ไปยังบริเวณผิวหน้าของกำแพงกันดินเสริมกำลัง ด้านที่เสริมกำลังด้วยแถบโลหะจะมีการเคลื่อนตัวของดินน้อยกว่าด้านที่เสริมกำลังด้วยพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง เนื่องจากมวลดินเสริมกำลังแถบโลหะมีการเสียรูปน้อยกว่า

2) การทรุดตัวของแบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลังมีค่ามากขึ้นที่บริเวณกึ่งกลาง เมื่อความเร็วของน้ำหนักรถไฟเคลื่อนที่มีค่าเพิ่มขึ้น และที่ความเร็ว 200 ก.ม./ชม. ที่บริเวณกึ่งกลาง สามารถสังเกตเห็นแนวการทรุดตัวกึ่งกลางของโครงสร้างทางรถไฟ นอกจากนี้การเคลื่อนที่ของน้ำหนักกระทำจะทำให้เกิดแถบของการทรุดตัววางตัวจากศูนย์กลางทางไปยังผิวหน้ากำแพงในลักษณะเฉียงไปทางด้านหลังของทิศทางการเคลื่อนที่ และเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นขนาดของแถบการทรุดตัวนี้มีค่าน้อยลงแต่มีค่าการทรุดตัวมากขึ้น และช่องว่างระหว่างระหว่างแถบการทรุดตัวดินจะเกิดพฤติกรรมดินปูด

3) แบบจำลองกำแพงกันดินเสริมกำลังรับน้ำหนักรถไฟเคลื่อนที่ มีความเครียดสูงสุดในวัสดุเสริมกำลัง แต่ละชั้นเป็นแบบ Bilinear Coherent Gravity method มีแนวเส้นความเครียดสูงสุดแนวตั้งห่างจากผิวหน้าประมาณ $0.3H$ (H คือความสูงของกำแพง) ทั้งด้านที่เสริมกำลังด้วยพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และแถบโลหะ

ชั้นเสริมกำลังที่อยู่เหนือกึ่งกลางความสูงของกำแพงจะมีความเครียดที่บริเวณผิวหน้ากำแพง ซึ่งเกิดจากการยึดรั้งผิวหน้ากำแพงที่เคลื่อนตัวไปบริเวณหน้ากำแพงเนื่องจากการเคลื่อนตัวด้านข้าง

จากการศึกษาพฤติกรรมทั้ง 3 อย่าง ของกำแพงกันดินเสริมกำลังด้วยพอลิทีลีนความหนาแน่นสูง และ แอบลอหะ พบว่ามีพฤติกรรมการทรุดตัว ความเครียดสูงสุดในวัสดุเสริมกำลัง คล้ายกันสำหรับวัสดุเสริมกำลัง ทั้ง 2 ชนิด ทั้งในสภาวะที่ไม่ได้รับน้ำหนักเคลื่อนที่ และในสภาวะที่รับน้ำหนักเคลื่อนที่ความเร็วต่างๆ เนื่องจาก กำแพงการดินเสริมกำลังถูกจำลองอยู่บนชั้นดินแข็งและสอดคล้องตามการศึกษาของ Bergado et al (2021) ส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างของกำแพงที่เสริมกำลังด้วยพอลิทีลีนความหนาแน่นสูง เมื่อได้รับความเร็วมากขึ้น จะมีการเคลื่อนตัวที่สูงกว่าด้านที่เสริมกำลังด้วยแอบลอหะเป็นอย่างมาก

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ากำแพงกันดินเสริมกำลัง สามารถรองรับน้ำหนักเคลื่อนที่ของรถไฟบน โครงสร้างทางรถไฟได้ ผลจากความเร็วจะมีผลต่อความเครียดในวัสดุเสริมกำลังเพียงเล็กน้อย โดยพฤติกรรม ความเครียดสูงสุดสอดคล้องกับการศึกษาของ Beral (2016) แต่จะต้องพิจารณาการเสียรูปด้านข้างซึ่งสามารถ ควบคุมได้ด้วยชนิดของวัสดุเสริมกำลัง

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1.) ให้มีการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมของกำแพงกันดินเสริมกำลังที่เสริมกำลังด้วยวัสดุชนิด ยืดหยุ่นได้ หรือที่เป็นวัสดุเสริมกำลังทำจากพอลิเมอร์ กับวัสดุชนิดที่ยืดหยุ่นไม่ได้ หรือที่เป็นวัสดุเสริมกำลังทำ จากโลหะภายใต้เงื่อนไขที่เหมือนกันเช่นความลาดของผิวหน้ากำแพงชนิดของวัสดุผิวหน้ากำแพงระยะการ เสริมกำลัง เป็นต้น
- 2.) ศึกษาผลกระทบของตำแหน่งของโครงสร้างทางรถไฟที่อยู่เหนือกำแพงกันดินเสริมกำลังพฤติกรรม ของกำแพงกันดินเสริมกำลังอย่างไร
- 3.) ศึกษาถึงปัจจัยของคุณสมบัติของวัสดุที่มีผลต่อการรับน้ำหนักแบบพลวัตเทียบกับแบบสถิต
- 4.) ศึกษาปัจจัยของความแข็งของดินฐานรากที่ส่งผลต่อกำแพงกันดินเสริมกำลังและการรับน้ำหนัก ของรถไฟ
- 5.) ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลทางด้านปฐพีวิศวกรรมของหินรยทาง ที่มีรายการละเอียดจำเพาะตรงกับ หินรยทางของการรถไฟแห่งประเทศไทยสำหรับการสร้างแบบจำลอง

บรรณานุกรม

- Baral, P.; Bergado, D.T.; Duangkhae, S. The use of polymeric and metallic geogrids on a full scale MSE wall/embankment on hard ground: a comparison of field data with simulation. *International Journal of Geo-Engineering*. 2016, 7, 20, <https://doi.org/10.1186/s40703-016-0035-6>.
- Bergado, D.T.; Chaiyaput, S.; Basilio, R.M.; Hino, T.; Sukchaisit, O. Maximum Tension Lines of MSE Embankments with Polymer and Metallic Reinforcements on Different Foundations Types. *Lowland Technology International*. 2021, 23(3), 26 – 41
- Corfdir, A.; Bourgeois E.; Payeur, J.-B. Numerical simulation of the response of a reinforced wall to a high-speed train passage. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2017, 41(11), 1285-1303, <https://doi.org/10.1002/nag.2674>.
- Elias, V.; Christopher, B.R. Mechanical Stabilized Earth Walls and Reinforce Soil Slope Design and Construction Guidelines. U.S. Department of Commerce National Technical Information Service. 1997, 57-151.
- Hossain, M.S.; Kibria, G.; Khan, M.S.; Hossain, J.; and Taufiq, T. Effects of backfill soil on excessive movement of MSE wall. *J. Perform. Constr. Facil.* 2012, 26(6), 793-802. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000281](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000281).
- Hulagabali, A.M.; Solanki, C.H.; Dodagoudar, G.R.; Shettar, M.P. Effect of reinforcement, backfill and surcharge on the performance of reinforced earth retaining wall. *Asian Research Publishing Network (ARPN). ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018, 13(9), 3224-3230
- Indraratna, B.; Nimbalkar, S. Stress-strain degradation response of railway ballast stabilized with geosynthetics. *J Geotech Geoenviron*. 2013, 139(5), 684–700.
- Indraratna, B.; Lackenby, J.; Christie, D. Effect of confining pressure on the degradation of ballast under cyclic loading. *Géotechnique*. 2005, 55(4), 325–8.

Li, J.; Tang, C.; Wang, D.; Pei, X.; Shi, B. Effect of discrete fiber-reinforcement on soil tensile strength. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2014, 6(2), 133-137. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.01.003>.

Li, L.; Nimbalkar, S.; Zhong, R. Finite element model of ballasted railway with infinite boundaries considering effects of moving train loads and Rayleigh waves. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2018, 114, 147-153. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.06.033>.

Moormann, C.; Lehn, J.; Aschrafi, J.; Sarkar, D. Numerical Investigations on Track-Substructure System Considering the Effect of Different Train Speeds. *International Conference on Transportation Geotechnics*. 2016, 143, 1093-1099.

Moudabel, O.A.M.; Gregory, G.H.; Yang, X.; Cross, SA. A case study of MSE wall stability: comparison of limit equilibrium and numerical methods. *Ground Improvement and Geosynthetics*. GSP. 2014, 238, 464-470. <https://doi.org/10.1061/9780784413401.046>.

Nuakliang, M. Behavior of MSE wall/embankment with geogrid and metallic reinforcements on hard foundation. M. Eng. Thesis No. GE-10-5, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 2011.

Pyrgidis, Christos, N. *Railway Transportation Systems: Design, Construction and Operation*. CRC Press, 2016, 279-239.

Paolucci, R.; Spinelli, D. Ground motion induced by train passage. *Journal of Engineering Mechanics*. 2006, 132(2), 201-210.

Ramil K.M. Analysis of Vibration by Rail Traffic Using Plaxis 3D. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2021, 8(2), e-ISSN: 2395-0056, p-ISSN: 2395-0072.

Voottipruex, P. Interaction of hexagonal wire reinforcement with silty sand backfill soil and behavior of full-scale embankment reinforced with hexagonal wire. D.Eng dissertation No. GT-99-01, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand. 2000,

Won, M.S.; Langcuyan, C.P.; Ann, S.J.; Lee, S.D. Behavior of MSE wall with strips and geogrids reinforcement subjected to compaction loadings. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSRJMCE). 2018, 15(2), 01-09.

Yang, G.Q.; Ding, J.X.; Zhouetal, Q.Y. Field behavior of a geogrid reinforced soil retaining wall with a wrap-around facing. Geotechnical Testing Journal. 2010, 33(1), 1-6. <https://doi.org/10.1520/GTJ102410>.

เจน บุญชื้อ. ความรู้เบื้องต้นวิศวกรรมรถไฟ. ห้างหุ้นส่วนจำกัด แฉงไทย. 2554, 1-26

เอกสารประกอบการบรรยาย Advance Computational Geotechnics Plaxis. Vietnam Seminar. Vietnam. 2008.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 80 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้