การวิเคราะห์เปรียบเทียบการออกแบบกำแพงกันดินคอนกรีตคานยื่นและกำแพงกันดินเสริมแรงเพื่อรับแรงแผ่นดินไหว

A Comparative Analysis in Designing Cantilever Concrete Retaining Wall and Mechanically Stabilized Earth Wall in Resisting Seismic Loads

วุฒิชัย ชาติพัฒนานันท์[1,*] ชัยณรงค์ อธิสกุล[2] และ สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์[3]

[1,2,3] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

**Corresponding author; E-mail address: vuttich@hotmail.com*

บทคัดย่อ

บทความนี้แสดงการคำนวณออกแบบกำแพงกันดินคอนกรีตคานยื่นและกำแพงกันดินเสริมแรงในส่วนของเสถียรภาพภายนอกเพื่อรับแรงแผ่นดินไหว ที่จำเป็นต้องพิจารณาในการออกแบบโดยเฉพาะในเขตพื้นที่ภาคเหนือและภาคตะวันตะวันตกในประเทศไทย โดยที่ตัวอย่างการออกแบบดังกล่าวยังไม่ปรากฏแพร่หลายนัก โดยแสดงตัวอย่างการออกแบบกำแพงกันดินคอนกรีตคานยื่นและกำแพงกันดินเสริมแรงทั้งกรณีที่มีแรงแผ่นดินไหวโดยการใช้สมการ *M-O* ในการประมาณแรงดันดินด้านข้างพลศาสตร์ แล้วทำการเปรียบเทียบการออกแบบกำแพงกันดินในกรณีที่ไม่มีแรงแผ่นดินไหวโดยใช้แรงดันดินด้านข้างสถิตย์ศาสตร์ โดยใช้ตัวอย่างกำแพงกันดินที่ความสูง 2.5 เมตร โดยออกแบบตามรูปแบบของการวิบัติ จากค่าความเร่งสูงสุดที่ 0.4g และค่าความเร่งผิวดินแนวราบที่ 0.12g โดยกำแพงกันดินคอนกรีตคานยื่นใช้ดินถมน้อยกว่า เนื่องจาก CCRW ใช้น้ำหนักของคอนกรีตช่วยในการรับแรง ขณะที่ MSEW ใช้น้ำหนักดินเพียงอย่างเดียวในการรับแรง นอกจากนี้ กำแพงกันดินคอนกรีตคานยื่นและกำแพงกันดินเสริมแรงที่มีรูปทรงมวลดินเสริมแรงเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าคล้ายกัน มีความสามารถในการรับแรง โมเมนต์ และอัตราส่วนความปลอดภัยที่ต่างกันหากพิจารณาถึงผลของรูปทรง แรงเฉื่อยและมุมเสียดทานกำแพงที่ต่างกัน

คำสำคัญ: การออกแบบกำแพงกันดินรับแรงแผ่นดินไหว, กำแพงกันดินคอนกรีตคานยื่น, กำแพงกันดินเสริมแรง

Abstract

This article presents the calculation and design of a cantilever concrete retaining wall and a mechanically stabilized earth wall by considering the external stability to withstand the seismic force that is needed in the design especially if the construction sites are in northern or western Thailand. While the calculation design examples are not widespread, this article exemplifies the calculation details in designing both reinforced concrete retaining walls and mechanically stabilized earth walls in resisting seismic load using M-O equation to estimate the dynamic lateral earth pressure and then compare the result with the design with no seismic force with the static lateral earth pressure. This article uses a 2.5-meters retaining wall example design guided by its failure modes. Using a maximum acceleration at 0.4g and a ground acceleration at 0.12g shows that the cantilever concrete retaining wall requires less backfill soil because the cantilever concrete retaining wall also uses concrete weight in resisting forces while the mechanically stabilized earth wall uses only backfill soil weight. Furthermore, both the cantilever concrete retaining wall and the mechanically stabilized earth wall with similar rectangular backfill soil shapes have different capabilities in resisting forces, moments, and different factors of safety if considering the effects of different shapes, inertia forces, and wall friction angles.

Keywords: mechanically stabilized earth wall, cantilever concrete retaining wall, retaining wall seismic design

1. คำนำ

ในการออกแบบโครงสร้างและการออกแบบกำแพงกันดินที่จะใช้ในเขตพื้นที่ภาคเหนือและภาคตะวันตะวันตกในประเทศไทยมีความจำเป็นต้องคำนึงถึงแรงจากแผ่นดินไหว โดยกำแพงกันดินแบ่งได้เป็นสองประเภทคือ กำแพงกันดินแบบแข็งแกร็ง (rigid) และกำแพงกันดินแบบยืดหยุ่น (flexible) กำแพงกันดินแบบแข็งแกร็งจะใช้คอนกรีตและอาศัยน้ำหนักถ่วง (gravity) ในการรับแรงดันดิน ซึ่งกำแพงคอนกรีตนี้จะมีหลายรูปทรง เช่นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูโน้มถ่วง (gravity) คานยื่น (cantilever) แบบป้อมกำบัง (counterfort) หรือแบบค้ำยัน (buttress) ส่วนกำแพงกันดินแบบยืดหยุ่น (flexible) ที่ใช้วัสดุเรียวยาวเช่นเหล็ก คอนกรีต ไม้ พลาสติก ปัก

ลงในดินเพื่อรับแรงดันดิน และอาจจะมีการใช้ร่วมกับสมอยึดรั้ง (anchor) หรือค้ำยัน (prop) [1] นอกจากนี้ยังมีกำแพงกันดินเสริมแรง (mechanically stabilized earth wall) ที่ใช้วัสดุเสริมแรง (reinforcement) เช่นแถบเหล็ก (metal strip) หรือ ตาข่ายเสริมแรง (geogrid) ช่วยรับแรงดึงในดินเสริมกำลัง (reinforced soil) และใช้ร่วมกับวัสดุผิวหน้า (facing) เช่นแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป (precast concrete panel) หรือโมดูลาร์บล๊อค (modular block) ซึ่งกำแพงกันดินเสริมแรงนี้จะมีความยืดหยุ่นมากกว่ากำแพงกันดินคอนกรีต

รูปแบบการวิบัติของกำแพงกันดินอาจจะเกิดจากด้านเสถียรภาพภายนอก (external stability) เสถียรภาพภายใน (internal stability) และเสถียรภาพโดยรวม (global stability) กำแพงกันดินแบบแข็งแกร็งจะต้องพิจารณาเสถียรภาพภายนอกในด้านการเลื่อนตัว (translation) การหมุน (rotation) กำลังรับน้ำหนักแบกทาน (bearing capacity) เสถียรภาพภายใน (internal stability) จากการวิบัติของวัสดุ เสถียรภาพโดยรวมที่เป็นการวิบัติวงนอกกำแพง (deep seat failure) ส่วนกำแพงกันดินแบบยืดหยุ่นจะมีรูปแบบการวิบัติที่ต่างจากแบบแข็งเกร็ง โดยการวิบัติอาจจะเกิดจากเสถียรภาพภายนอกที่เกิดจากการหมุนที่ฐาน การหมุนที่สมอหรือค้ำยัน เสถียรภาพภายนอกที่เกิดจากโมเมนต์ดัดที่เข็มพืด สมอขาดหรือค้ำยันหัก หรือจากเสถียรภาพโดยรวมจากการวิบัติวงนอกกำแพง

บทความนี้จะพิจารณาเฉพาะกำแพงกันดินคอนกรีตคานยื่น (cantilever concrete retaining wall หรือ CCRW) เปรียบเทียบกับกำแพงกันดินเสริมแรง (mechanically stabilized earth wall หรือ MSEW) จากภาวะที่มีและไม่มีแรงแผ่นดินไหว โดยจะพิจารณาเฉพาะเสถียรภาพภายนอกเท่านั้น เนื่องจากทั้ง CCRW และ MSEW มีรูปทรงมวลดินเสริมแรงและมีการตรวจสอบเสถียรภาพภายนอกที่ใกล้เคียงกัน คือมีรูปทรงมวลดินเสริมแรงเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า และต้องตรวจสอบเสถียรภาพภายนอกในด้านการไถล (sliding) การพลิกคว่ำ (overturning) และกำลังรับน้ำหนักแบกทาน (bearing capacity)

ในส่วนของเสถียรภาพภายใน CCRW สามารถปรับปริมาณเหล็กเสริมและการจัดวาง เช่นเดียวกับ MSEW ที่สามารถปรับปริมาณวัสดุเสริมแรงและการจัดวาง ส่วนเสถียรภาพโดยรวมนั้นสามารถตรวจสอบได้โดยใช้วิธีสมดุลขีดจำกัด (limit equilibrium method หรือ LEM) หรือวิธีสมดุลไฟไนต์อิลีเมนต์ (finite element method หรือ FEM) โดยใช้โปรแกรมเช่น Slope/W สำหรับ LEM หรือ Plaxis สำหรับ FEM

บทความนี้เริ่มจากตัวอย่างการออกแบบกำแพงกันดินคอนกรีตคานยื่นที่ความสูง 2.5 เมตรโดยมีรูปทรงและพารามิเตอร์และพารามิเตอร์แผ่นดินไหวจาก [3] โดยจะแสดงพารามิเตอร์และสมการ M-O (Mononobe–Okabe) [4] ที่ใช้ประมาณแรงดันดินด้านข้างแบบพลศาสตร์ (dynamic lateral earth pressure) รวมถึงสมการแรงดันดินด้านข้างแบบคูลอมบ์ (Coulomb) [5] และสมการแรงดันดินด้านข้างแบบแรนคิน (Rankine) ที่ใช้ประมาณแรงดันดินด้านข้างแบบสถิตย์ศาสตร์ (static lateral earth pressure) หลังจากนั้นบทความนี้จะแสดงตัวอย่างการคำนวณการออกแบบกำแพงกันดินคอนกรีตคานยื่น (CCRW) ที่ความสูง 2.5 เมตร ที่พิจารณาแรงแผ่นดินไหว และเปรียบเทียบผลกับกำแพงกันดินคอนกรีตคานยื่นที่ความสูง 2.5 เมตร ที่ไม่พิจารณาแรงแผ่นดินไหว แล้วทำการเปรียบเทียบกับกำแพงกันดินเสริมแรง (MSEW) ที่ความสูง 2.5 เมตร ที่พิจารณาและไม่พิจารณาแรงแผ่นดินไหว โดยใช้มาตราฐานการออกแบบ MSEW ตาม FHWA [6]

บทความนี้มีวัตถุประสงค์ให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้แรงดันดินด้านข้าง M-O สำหรับแรงแผ่นดินไหวในในการออกแบบกำแพงกันดินคอนกรีตคานยื่น (CCRW) และกำแพงกันดินเสริมแรง ที่มีรูปทรงมวลดินเสริมแรงเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดย CCRW มีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแนวตั้งมากกว่า MSEW โดยบทความนี้แสดงให้เห็นถึงผลของแรงเฉื่อยเมื่อมีแรงแผ่นดินไหว และผลของมุมเสียดทานกำแพงที่ต่างกัน โดย CCRW เป็นคอนกรีตแข็งเกร็ง (rigid) มีมุมเสียดทานกำแพงที่ต่างกันกับ MSEW ที่วัสดุผิวหน้าเป็นแบบให้ตัวได้ (flexible) แล้ว ส่งผลให้ CCRW มีอัตราส่วนความปลอดภัยที่มากกว่า MSEW ผลการศึกษานี้สามารถนำไปคาดการณ์พฤติกรรมของ CCRW และ MSEW ที่ความสูงใดๆได้ ไม่เฉพาะที่ความสูง 2.5 เมตรในบทความนี้เท่านั้น เนื่องจากทั้ง CCRW และ MSEW ยังคงมีสัดส่วนของรูปทรงใกล้เคียงสัดส่วนเดิม

2. พารามิเตอร์และแรงดันดินด้านข้าง

ในส่วนนี้จะแสดงพารามิเตอร์และสมการที่ใช้ในตัวอย่างออกแบบ

2.1 น้ำหนักบรรทุก พารามิเตอร์คอนกรีตและพารามิเตอร์ดิน

แสดงในตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 น้ำหนักบรรทุก พารามิเตอร์คอนกรีตและดิน

หัวข้อ	สัญญลักษณ์	ค่า	หน่วย
ความหนาแน่นคอนกรีต (concrete density)	γ_c	24	kN/m^3
น้ำหนักบรรทุก (surcharge)	S	10	kN/m^2
ความเชื่อมแน่นดิน(soil cohesion)	c	0	kN/m^2
แรงเสียดทานภายในดิน (soil internal friction angle)	ϕ	30	องศา
ความหนาแน่นของดิน (soil density)	γ_s	18	kN/m^3

**สมมุติให้ดินหลังกำแพง (retained soil) และดินฐานรากเป็นดินเดียวกัน*

2.2 พารามิเตอร์แรงแผ่นดินไหว (Seismic parameters)

กำหนดให้ o_l คือความเร่งผิวดินแนวราบ (horizontal ground acceleration), o_l e $_e$ a_h (1)

โดยที่

e $_e$ คือค่าความเร่งแผ่นดินไหว (maximum seismic acceleration) จากคาบย้อนกลับ *(return period)* ที่ *500* ปี e $_e$ มีค่าที่ *0.3g, 0.35g, 0.4g* ตาม *ULS (ultimate limit state) design case* โดยที่ $_g$ คือค่า gravity acceleration ที่ *9.81 m/s^2* ซึ่ง มยผ 1302 [2] หาค่าความเร่งแรงแผ่นดินไหวจากค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปคตรัมที่

คาบสั้น *0.2* วินาที หรือ W_H และค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปคตรัมที่คาบ 1 วินาที หรือ W_{H5}

A_{topo} คือ topographic amplication factor ปัจจัยขยายทางภูมิประเทศ ซึ่งมีค่าจาก *1.0* ถึง *1.4* แสดงในตารางที่ 2 ดังนี้

ตารางที่ 2 ค่า A_{topo} (Topographic amplication factor)

กรณี	ลักษณะ	A_{topo}
1	หน้าผา (cliff) ที่ความกว้างส่วนยอดหน้าผามีค่าใกล้เคียงกับความสูง มีความสูงมากกว่า 30 เมตร	1.2
2	สันเขา (ridge) ที่ความกว้างส่วนยอดสันเขาค่าน้อยกว่าส่วนฐานมาก มีความสูงมากกว่า 30 เมตร มีความชันโดยเฉลี่ยมากกว่า 30 องศา	1.4 ที่ยอดและลดลงเป็น 1.0 ที่ฐาน
3	สันเขา (ridge) ที่ความกว้างส่วนยอดสันเขาค่าน้อยกว่าส่วนฐานมาก มีความสูงมากกว่า 30 เมตร สันเขามีความชันโดยเฉลี่ย 15 องศาถึง 30 องศา	1.2 ที่ยอดและลดลงเป็น 1.0 ที่ฐาน
4	ลาดดิน (slope) มีความชันโดยเฉลี่ยน้อยกว่า 15 องศา	1.2

W_d คือ wall displacement factor ปัจจัยทางด้านการเคลื่อนตัวของกำแพง ซึ่งจะมีอยู่ *6* กรณี และมีค่าจาก *0.3* ถึง *0.7* แสดงในตารางที่ 3 ดังนี้

ตารางที่ 3 ค่า Wd (Wall displacement factor)

กรณี	ลักษณะ	A_{topo}
1	กำแพงกันดินเป็นส่วนหนึ่งของอาคาร	0.5, 0.7
2	กำแพงกันดินรองรับอาคาร	0.5
3	กำแพงกันดินรองรับดินฐานรากอาคาร	0.5
4	กำแพงกันดินใช้ป้องกันลาดดินติดอาคาร	0.4
5	กำแพงกันดินที่ไม่รับแรงอาคาร	0.3
6	กำแพงกันดินที่ไม่รับแรงอาคารและมีความสูงมากกว่า 3 เมตร	0.3

2.3 แรงดันดินด้านข้าง (Lateral earth pressure)

แรงดันดินด้านข้างจะมีทั้งแบบสถิตย์ที่ใช้ในกรณีไม่พิจารณาแรงแผ่นดินไหวและแรงดันดินด้านข้างแบบพลศาสตร์ที่ใช้ในกรณีพิจารณาแรงแผ่นดินไหว ซึ่งแรงดันดินด้านข้างแบบสถิตย์ สามารถใช้สมการแรงดันดินด้านข้างแบบคูลอมบ์ (Coulomb) [5] และสมการแรงดันดินด้านข้างแบบแรนคิน (Rankine) [1] ในการประมาณ ส่วนแรงดันดินด้านข้างแบบพลศาสตร์ สามารถใช้สมการ M-O (Mononobe–Okabe) [4] ในการประมาณ

2.3.1 แรงดันดินด้านข้างแบบสถิตย์ (Static lateral earth pressure)

สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างเชิงรุกของคูลอมบ์ (Coulomb's active lateral earth pressure coefficient, o_{eG}) แสดงดังนี้ [5]

$$o_{eG} \quad \frac{\quad}{H} \qquad (2)$$

$$H_{eG} \quad 5 \quad \frac{m_1 \quad m_1}{s}^{6} \qquad (3)$$

โดยที่

θ แรงเสียดทานผิวสัมผัส เท่ากับ = 30 องศา

สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างเชิงรับของคูลอมบ์ (Coulomb's passive lateral earth pressure coefficient, o_{G}) [5] แสดงดังนี้

$$o_{G} \quad \frac{\quad}{H} \qquad (4)$$

$$H_{G} \quad 5 \quad \frac{m_1 \quad m_1}{}^{6} \qquad (5)$$

ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยที่

คือ มุมลาดดินหลังกำแพง (backslope angle)

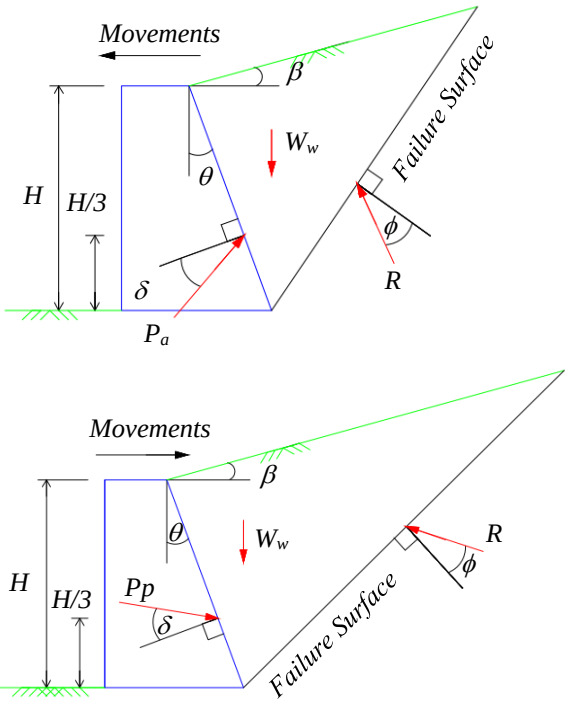
คือ มุมเอียงหน้ากำแพง (inclination of wall)

θ คือ มุมของแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกำแพง (angle of interface wall friction)

$_e$ คือแรงดันดินด้านข้างเชิงรุก

คือแรงดันดินด้านข้างเชิงรับ

a คือน้ำหนักดินในพื้นที่สามเหลี่ยมรูปลิ่มวิบัติ (failure wedge)



รูปที่ 1 แรงดันดินด้านข้างของคูลอมบ์ [5]

ซึ่งหากค่า θ มีค่าเป็นศูนย์ สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างของคูลอมบ์จะเท่ากับสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างของแรนคิน (Rankine) ที่สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างเชิงรุกของแรนคิน o_{eV} e 6 89 6 และสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างเชิงรับของแรนคิน o_{V} e 6 89 6 หรือ o_{eV} o_{eG} และ o_{V} o_{G} ที่ θ 4 องศา

2.3.2 แรงดันดินด้านข้างแบบพลศาสตร์ (Dynamic Lateral Earth Pressure)

สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างเชิงรุกของ Mononobe–Okabe หรือ M-O (M-O active lateral earth pressure coefficient, $o_{e\ s}$) [4] แสดงดังนี้

$$o_{e\ s} \quad \frac{\qquad}{H} \qquad (6)$$

$$H_{e\ s} \quad 5 \quad \frac{m \quad m}{s}^{6} \qquad (7)$$

$$e \quad \frac{}{5} \qquad (8)$$

โดยที่ o คือ ความเร่งผิวดินแนวดิ่ง (vertical ground acceleration) สามารถกำหนดให้มีค่าเป็น 0 ได้สำหรับการออกแบบกำแพงกันดินโดยเฉพาะในกรณีที่ ค่า o_l มีค่าน้อยกว่า 0.35g หรือค่าความเร่งผิวดินสูงสุด (peak ground acceleration) มีค่าน้อยกว่า 0.4g ดังนั้นในการออกแบบกำแพงกันดิน ที่ o = 0 จาก (8) จะได้

$$e \quad o_l \qquad (9)$$

สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างเชิงรับของ Mononobe–Okabe หรือ M-O (M-O passive lateral earth pressure coefficient, $o \quad _S$) [4] แสดงดังนี้

$$o \quad s \quad \frac{\qquad}{H} \qquad (10)$$

$$H \quad s \quad 5 \quad \frac{m \quad m}{}^{6} \qquad (11)$$

ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสมการแรงดันดินแล้ว จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างของคูลอมป์จะพิจารณาค่า θ เนื่องจากตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่มีแรงเสียดทานระหว่างดินและผิวกำแพง ส่วนสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างของแรนคินจะไม่พิจารณาค่า θ เนื่องจากตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ไม่มีแรงเสียดทานระหว่างดินและผิวกำแพง และสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างเชิงรับของ Mononobe–Okabe (M-O) จะพิจารณาค่า ที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหว

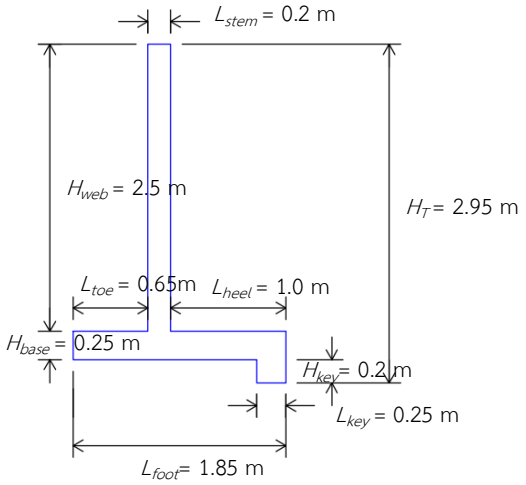
3. กำแพงกันดินคอนกรีตคานยื่น (Cantilever Concrete Retaining Wall หรือ CCRW)

3.1 ลักษณะทางกายภาพ (Physical properties)

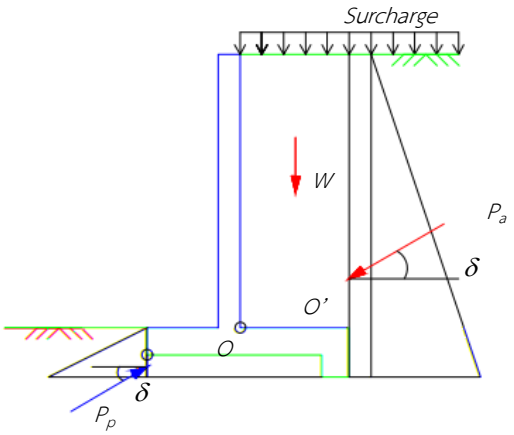
CCRW มีรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2 และแรงกระทำแสดงในรูปที่ 3 โดย CCRW มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือส่วนแกน (stem) ส่วนฐาน (base) และส่วนกุญแจ (key) โดยในรูปที่ 3 กำหนดให้ θ = 30 องศา, = 0 องศา, = 0 องศา

3.2 สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง (Lateral earth pressure coefficients)

กำหนดให้ CCRW มีค่า $e \quad _e$ = 0.4g, = 1.0, a_h = 0.3 ซึ่งเป็นกรณีที่ 5 ที่เป็นกำแพงกันดินที่ไม่รับแรงอาคาร ดังนั้น ค่า o = 0.4x1.0x0.3 = 0.12 ส่วน $e \quad ^5o_l$ = 6.84 จาก (9) โดยสัมประสิทธิ์ค่าแรงดันดินด้านข้างแสดงในตารางที่ 4



รูปที่ 2 รูปทรงของ CCRW



รูปที่ 3 แรงกระทำต่อกำแพง CCRW

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์ค่าแรงดันดินด้านข้าง

หัวข้อ	ค่า	สนการที่ใช้
$o_{e\ s}$	4!7^{7}4	^{4}
$H_{e\ s}$	6!^{5}74	^{5}
o_{eG}	4!6$^{7\ 5}$	6
H_{eG}	6!^{7}58	7
$o \quad s$	^{5}!$^{4\ 4}$6	54
$H \quad s$	4!565	55
$o \quad G$	54!4^{7}9	8
$H \quad G$	4!4$^{6\ 4}$	9
$o_{e\ s}$ o_{eG}	4!7^{7}4 4!6$^{7\ 5}$ 5!755	^{4} 6
$o \quad G$ $o \quad s$	54!4^{7}9 ^{5}!$^{4\ 4}$6 5!75^5	8 54

3.3 รูปแบบการวิบัติ (Modes of failure)

รูปแบบการวิบัติของ CCRW จะประกอบด้วยการหมุนคว่ำ (overturning) กำลังรับน้ำหนักแบกทาน (bearing capacity) การไถล (sliding) และโมเมนต์ดัดที่แกน (stem) ของ CCRW สำหรับกรณีพิจารณาแรงแผ่นดินไหว จะต้องพิจารณาค่าแรงเฉื่อย (inertia force, I) ร่วมด้วย โดยกำหนดให้

$L \quad L_{\ if} \quad L_{fe\ i} \quad L_{\ i}$ = 2.95 เมตร ความสูงรวม

P P_i P_i P_{liii} = 1.85 เมตร ความกว้างรวม

a P $L_{fe\,i}$ = 11.1 kN/m น้ำหนักส่วน foot

a_i P_i L_i = 1.2 kN/m น้ำหนักส่วน key

a_i P_i L_{if} = 12 kN/m น้ำหนักส่วน stem

a_m P_{liii} L_{if} = 45 kN/m น้ำหนักดิน

a_W WP_{liii} = 10 kN/m น้ำหนักบรรทุกส่วนบนเหนือฐานกำแพง

M a o_l = 1.332 kN/m แรงเฉื่อยส่วน foot

M_i a_i o_l = 0.144 kN/m แรงเฉื่อยส่วน key

M_i a_i o_l = 1.44 kN/m แรงเฉื่อยส่วน stem

M_m a_m o_l = 5.4 kN/m แรงเฉื่อยจากดิน

3.3.1 การหมุนคว่ำ (Overturning) ที่จุด O ในรูปที่ 3

e 4!9o_e s L^6 = 30.52 kN/m แรงดันดินด้านข้างเชิงรุก

el e s θ = 26.43 kN/m, e e θ = 15.26 kN/m

eW o_e $_sWL$ = 11.50 kN/m แรงดันดินด้านข้างจากน้ำหนักบรรทุก โดยที่ eW eW s θ = 9.96 kN/m, eW eW θ = 5.75 kN/m

el el $\frac{L}{7}$ L_i e l $\frac{L}{6}$ L_i = 33.40 kN-m/m โมเมนต์จากแรงในแนวราบ

e e eW P = 38.86 kN-m/m โมเมนต์จากแรงในแนวดิ่ง

W W P $\frac{P}{6}$ = 13.5 kN-m/m โมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกในส่วนบนเหนือฐานกำแพง

M M_i M_m $\frac{L_{if}}{6}$ $L_{fe\,i}$ M $\frac{L_{fe\,i}}{6}$ M_i $\frac{L}{6}$ = 10.41 kN-m/m โมเมนต์จากแรงเฉื่อย

K a $\frac{P}{6}$ a_i P_i $\frac{P_i}{6}$ a_i P $\frac{P}{6}$ a_m P $\frac{P}{6}$ = 82.12 kN-m/m โมเมนต์จากน้ำหนักบรรทุกคงที่

e W K = 134.48 kN-m/m โมเมนต์ต้าน

h el M = 43.81 kN-m/m โมเมนต์ขับ

อัตราส่วนปลอดภัยในการหมุนคว่ำ (factor of safety in overturning), WS h = 3.06 มากกว่า 2.0 OK [6]

ระยะเยื้องศูนย์ (eccentricity)

i el M e W K = -90.67 kN-m/m ค่าโมเมนต์รวมสุทธิที่ toe

a a_i a_i a_m e eW a_W = 100.31 kN/m น้ำหนักแรงทั้งหมดในแนวดิ่ง

P_i $_i$ = 0.904 เมตร ซึ่งอยู่ในช่วงหนึ่งในสามของฐานหรือ 0.617 = P 7 P_i 6P 7 = 1.233 OK [6]

3.3.2 กำลังรับน้ำหนักแบกทานดิน (Soil bearing capacity)

ความกว้างฐานรากประสิทธิผล, F_i $6P_i$ = 1.80 น้อยกว่า P = 1.85 OK

ความสามารถในการแบกทานประลัยของดินฐานราก (ultimate bearing capacity of foundation soil),

4!9F_i = 326.9 kN/m^2 โดยที่ [7]

i r e ^{6} 89 $\frac{}{6}$ = 18.4

5 = 30.1

6 5 e = 20.1

Fi = 55.48 kN/m^2 ความเค้นแนวดิ่ง

อัตราส่วนปลอดภัยในกำลังแบกทานดิน (factor of safety in bearing capacity), WF = 5.89 มากกว่า 2.5 OK [6]

3.3.3 ความต้านทานการไถล (Sliding resistance)

l el eW M_i M_m M M_i = 44.70 kN/m แรงทั้งหมดในแนวราบ

4!9O s $L_{fe\,i}$ L_i ^{6} = 18.40 kN/m แรงดันดินด้านข้างเชิงรับ

a_{mi} P $P_{fe\,i}$ L_i = 5.76 kN/m น้ำหนักบรรทุกใต้ฐานกำแพง

a_{mi} θ e = 55.59 kN/m แรงเสียดทานต้านการไถล

s θ = 71.53 kN/m แรงต้านการไถล

อัตราส่วนปลอดภัยต้านทานการไถล (factor of safety in sliding), WW l = 1.6 มากกว่า 1.5 OK [6]

3.3.4 กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของส่วนแกน (Stem bending strength)

e 4!9o_e s $L^6{}_{if}$ = 30.52 kN/m แรงดันด้านข้างจากดิน

eW o_e $_sWL$ $_{if}$ = 9.74 kN/m แรงดันดินด้านข้างจากน้ำหนักบรรทุก

if e s $\theta\frac{L_{if}}{7}$ eW s $\theta\frac{L_{if}}{6}$ M_i $\frac{L_{if}}{6}$ = 29.79 kN-m/m ค่าโมเมนต์รวมสุทธิที่ฐานแกนที่จุด *O'* ในรูปที่ *3* ซึ่งจะต้องคำนวณเหล็กเสริมในคอนกรีตให้รับโมเมนต์ดังกล่าว

3.4 กรณีไม่พิจารณาแรงแผ่นดินไหว (Modes of failure)

ในกรณีนี้ กำหนดให้ความเร่งผิวดินแนวราบ o_l มีค่าเป็นศูนย์ ทำให้จะไม่พิจารณาผลของแรงเฉื่อย (inertia force) นอกจากนี้เนื่องจาก o_l มีค่าเป็นศูนย์ ทำให้ มีค่าเป็นศูนย์ ใน (8) และจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินเชิงรับแบบพลศาสตร์มีค่าเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินแบบสถิตย์ นั่นคือ o_e $_s$ เท่ากับ o_{eG} และ o $_s$ เท่ากับ o_G โดยแสดงผลเปรียบเทียบในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการออกแบบของ CCRW

หัวข้อ	*คำอธิบาย (หน่วย)*	*กรณี 1 มีแรงแผ่นดินไหว*	*กรณี 2 ไม่มีแรงแผ่นดินไหว*	*อัตราส่วน*
k_a	*สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างเชิงรุก*	*0.390*	*0.297*	*1.31*
k_p	*สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างเชิงรับ*	*7.66*	*10.10*	*0.76*
M_r	*โมเมนต์ต้านทานการหมุน (kN-m/m)*	*134.48*	*125.26*	*1.07*
M_d	*โมเมนต์ขับ (kN-m/m)*	*43.81*	*25.47*	*1.72*
FSO	*อัตราส่วนปลอดภัยในการหมุนคว่ำ*	*3.07*	*4.92*	*0.62*
F_v	*แรงในแนวดิ่ง (kN/m)*	*55.48*	*45.53*	*1.22*
FSB	*อัตราส่วนปลอดภัยกำลังแบกทาน*	*5.89*	*8.32*	*0.71*
F_r	*แรงต้านการไถล (kN/m)*	*71.53*	*68.65*	*1.04*
P_h	*แรงในแนวราบ (kN/m)*	*44.70*	*27.75*	*1.61*
FSS	*อัตราส่วนปลอดภัยในการไถล*	*1.60*	*2.47*	*0.65*
M_{web}	*ค่าโมเมนต์รวมสุทธิที่ฐานแกน*	*29.80*	*21.35*	*1.40*

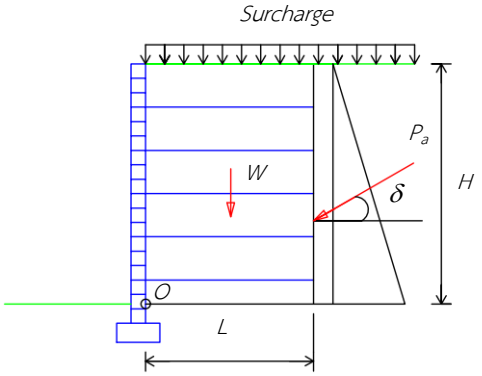
**อัตราส่วนหาโดยใช้ค่าจากกรณีมีแผ่นดินไหวหารด้วยค่าจากกรณีไม่มีแผ่นดินไหว*

จากตารางที่ 5 จะเห็นว่า สำหรับกำแพงคอนกรีตคานยื่น CCRWเมื่อมีแรงแผ่นดินไหว สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างเชิงรุกจะเพิ่มเป็น 1.31 เท่า แรงในแนวราบเพิ่ม 1.61 เท่า แรงในแนวดิ่งเพิ่ม 1.22 เท่า และอัตราส่วนความปลอดภัยในการหมุนคว่ำ กำลังรับน้ำหนักแบกทาน และการไถลจะลดลงไปประมาณ 0.6 เท่า ซึ่งแรงส่วนเพิ่มในแนวราบและแนวดิ่ง สะท้อนให้ถึงสัดส่วนแรงที่เพิ่มขึ้นเมื่อเกิดแผ่นดินไหว

4. กำแพงกันดินเสริมแรง (Mechanically Stabilized Earth Wall หรือ MSEW)

รูปแบบการวิบัติของ MSEW จะประกอบด้วยการหมุนคว่ำ (overturning) กำลังรับน้ำหนักแบกทาน (overturning) การไถล (sliding) สำหรับกรณีพิจารณาแรงแผ่นดินไหว จะต้องพิจารณาค่าแรงเฉื่อย (inertia force, I) ร่วมด้วย โดยจะพิจารณาเฉพาะน้ำหนักดินถมเสริมกำลัง (reinforced soil) จะไม่พิจาณาน้ำหนักของวัสดุผิวหน้า (facing unit) ตาม [6] และความสูง L ในรูปที่ 4 เท่ากับ 2.5 เมตร ซึ่งเท่ากับ L_{if} ในรูปที่ 2 และระยะ P ในรูปที่ 4 เท่ากับ $4!^{5}L$ ตามที่กำหนดใน [6] ซึ่งเป็นความยาวขั้นต่ำของวัสดุเสริมแรง (reinforcements) โดยมีความยาวเท่ากับ 0.7x1.25 = 1.75 เมตร นอกจากนี้ [6] ยังกำหนดให้ θ ในรูปที่ 4 มีค่าเป็นศูนย์

รายละเอียดของผลการออกแบบของ MSEW แสดงในตารางที่ 6 ซึ่งจะแสดงกรณีที่พิจารณาที่แรงแผ่นดินไหวและกรณีไม่มีแรงแผ่นดินไหวที่ o_l เป็นศูนย์ รวมถึงกรณีที่มีแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกำแพงที่ θ เท่ากับ 30 องศาและกรณีแรงเสียดทานที่ไม่มีผิวสัมผัสกำแพงที่ θ เป็นศูนย์



รูปที่ 4 รูปทรงและแรงกระทำต่อกำแพง MSEW

ตารางที่ 6 ผลการออกแบบของ MSEW

หัวข้อ	*กรณี 1 มีแรงแผ่นดินไหว* $\delta = 30$ *L/H = 0.7*	*กรณี 2 ไม่มีแรงแผ่นดินไหว* $\delta = 30$ *L/H = 0.7*	*กรณี 3 มีแรงแผ่นดินไหว* $\delta = 0$ *L/H = 0.7*	*กรณี 4 ไม่มีแรงแผ่นดินไหว* $\delta = 0$ *L/H = 0.7*	*กรณี 5 มีแรงแผ่นดินไหว* $\delta = 0$ *L/H = 0.85*
k_a	*0.390*	*0.297*	*0.411*	*0.333**	*0.411*
k_p	*7.66*	*10.10*	*2.78*	*3.00**	*2.78*
M_r	*111.92*	*105.35*	*84.22*	*84.22*	*124.18*
M_d	*38.18*	*20.11*	*43.90*	*26.04*	*46.43*
FSO	*2.93*	*5.24*	*1.92***	*3.23*	*2.67*
F_v	*85.17*	*68.83*	*114.88*	*79.62*	*87.84*
FSB	*2.79*	*4.13*	*1.32***	*2.75*	*2.74*
F_r	*64.71*	*62.54*	*55.57*	*55.57*	*67.48*
P_h	*36.87*	*20.91*	*42.82*	*27.08*	*44.84*
FSS	*1.76*	*2.99*	*1.30***	*2.05*	*1.50*
M_{web}	*28.00*	*21.35*	*32.08*	*26.04*	*32.08*

**สัมประสิทธิ์แรงดันดินแบบ Coulomb ที่ δ เท่ากับศูนย์มีค่าเท่ากับแรงดันดินแบบสัมประสิทธิ์แบบ Rankine, **อัตราส่วนความปลอดภัยไม่ผ่านเกณฑ์การออกแบบตาม [6]*

จากตารางที่ 6 ผลการออกแบบแสดงให้เห็นว่าหากออกแบบ MSEW ที่มีความยาวน้อยสุดของวัสดุเสริมแรงที่ 0.7 (*L/H* = 0.7) มีความยาวเพียงพอที่สามารถรับแรงแผ่นดินไหวได้ ดังแสดงในกรณีที่ 1, 2 และ 4 แต่หากสมมุติให้มุมแรงเสียดทานกำแพง θ เป็นศูนย์ อัตราส่วนความปลอดภัยจะไม่เพียงพอดังแสดงในกรณีที่ 3 ซึ่งควรจะเพิ่มอัตราส่วนความยาววัสดุเสริมเป็น 0.85 ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดในช่วง 0.7 ถึง 1.1 [6]

5. CCRW MSEW

ตารางที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบแรงกระทำและอัตราส่วนความปลอดภัยในการออกแบบ CCRW และ MSEW โดยกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 เปรียบเทียบ CCRW และ MSEW ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันที่ค่า θ เท่ากันที่ 30 องศา สำหรับกรณีที่ 3 และกรณีที่ 4 เปรียบเทียบตามมาตราฐานการ

ออกแบบ CCRW [3] และ MSEW [6] โดยมีรายละเอียดของกรณีในตารางที่ 7 ดังนี้

กรณีที่ 1 มีแรงแผ่นดินไหว MSEW มี θ = 30 และ *L/H* = 0.7
กรณีที่ 2 ไม่มีแรงแผ่นดินไหว MSEW มี θ = 30 และ *L/H* = 0.7
กรณีที่ 3 มีแรงแผ่นดินไหว MSEW มี θ = 0 และ *L/H* = 0.85
กรณีที่ 4 ไม่มีแรงแผ่นดินไหว MSEW มี θ = 0 และ *L/H* = 0.7

ในตารางที่ 7 ในส่วนของแรงกระทำ CCRW จะมีแรงกระทำในแนวดิ่งน้อยกว่าเนื่องจากกำแพงมีความกว้างน้อยกว่า โดยมีสัดส่วนที่เป็นดินถมที่ P_{lii} L_{if} = 1.0/2.5 = 0.4 เทียบกับ MSEW ที่มีค่า *L/H* ที่ 0.7 โดย CCRW มีแรงกระทำในแนวดิ่ง (*Fv*) น้อยกว่าจากปริมาณดินถมหลังกำแพงที่น้อยกว่าที่ 0.4*L/H* ขณะที่ MSEW ใช้ปริมาณดินถมที่ 0.7*L/H* แต่ CCRW รับแรงในแนวราบมากกว่าเนื่องจากมีความสูงมากกว่าในการหาแรงดันดินด้านข้างโดย CCRW ใช้ความสูงรวมทั้งหมด (H_T) แต่ MSEW ใช้เฉพาะความสูงส่วนแกน (H_{web}) ที่มีค่าน้อยกว่า H_T

ตารางที่ 7 อัตราส่วนค่าของ CCRW ในตารางที่ 5 กับ MSEW ในตารางที่ 6

หัวข้อ	*คำอธิบาย*	*กรณี 1 CC มีแรงแผ่นดินไหว MSE กรณี 1*	*กรณี 2 CC ไม่มีแรงแผ่นดินไหว MSE กรณี 2*	*กรณี 3 CC มีแรงแผ่นดินไหว MSE กรณี 5*	*กรณี 4 CC ไม่มีแรงแผ่นดินไหว MSE กรณี 4*
F_v					

ไม่มีค่ามุมแรงเสียดทานกำแพง θ 4 ตาม [6] ที่เป็นกรณีที่ 3 และกรณีที่ 4 จะเห็นว่าทั้งกรณีที่มีและไม่มีแรงแผ่นดินไหว CCRW จะรับแรงในแนวดิ่งน้อย แต่รับรับแรงในแนวราบและโมเมนต์ดัดใกล้เคียงกับ MSEW เนื่องจากผลของมุมแรงเสียดทานกำแพงที่ส่งผลมุมแรงดันดินที่มากระทำ ซึ่งทำให้อัตราส่วนความปลอดภัยของ CCRW สูงกว่า MSEW ดังแสดงในรูปที่ 6

แม้ CCRW จะมีอัตราส่วนความปลอดภัยของ CCRW สูงกว่า MSEW เนื่องจากการใช้มุมแรงเสียดทานกำแพงที่ต่างกันของ CCRW และ MSEW c แต่หากโครงสร้างกำแพงกันดินเกิดการวิบัติเช่นในกรณีการเกิดแผ่นดินไหว CCRW ที่เป็นกำแพงกันดินแบบแข็งเกร็ง (rigid) และเป็นวัสดุคอนกรีต จะเกิดความเสียหายและเป็นอันตรายมากกว่า MSEW ที่ใช้วัสดุมวลดินและเป็นโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่นให้ตัวได้มากกว่า

6. บทสรุป

สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างแบบ M-O สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบกำแพงกันดินเพื่อรับแรงแผ่นดินไหว โดยในการออกแบบกำแพงกันดินรับแรงแผ่นดินไหว จำเป็นจะต้องคำนึงถึงผลของแรงเฉื่อยและมุมเสียดทานกำแพง (δ) จากการเปรียบเทียบกำแพงกันดินคอนกรีตคานยื่น (CCRW) และกำแพงกันดินเสริมแรง (MSEW) ที่มีรูปทรงมวลดินเสริมแรงเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าเหมือนกัน แต่ CCRW มีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแนวตั้งมากกว่า ซึ่งนอกจากรูปทรงของกำแพงที่ส่งผลต่อแรงเฉื่อยแล้ว มุมเสียดทานกำแพงที่ต่างกันของ CCRW ที่เป็นคอนกรีตแข็งเกร็งที่มีค่ามุมเสียดทานกำแพง (δ) ที่ 30 องศา และ MSEW ที่วัสดุผิวหน้าเป็นแบบให้ตัวได้ ที่มีมุมเสียดทานกำแพง (δ) ที่ 0 องศา ส่งผลให้ CCRW มีอัตราส่วนความปลอดภัยที่มากกว่า แต่ควรจะพิจารณาอันตรายหากวิบัติประกอบด้วย ผลการศึกษานี้สามารถนำไปคาดการณ์พฤติกรรมของ CCRW และ MSEW ที่ความสูงใดๆได้ เนื่องจากทั้ง CCRW และ MSEW ยังคงมีสัดส่วนของรูปทรงใกล้เคียงสัดส่วนเดิม

เอกสารอ้างอิง

[1] Muni Budhu (2007). Soil Mechanics and Foundations. 3rd Edition. John Wiley & Sons. pp. 630-632.

[2] มยผ.1301/1302-61. (2561). มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทาน การสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย พ.ศ. 2561

[3] New Zealand Geotechnical Society. (2017). Earthquake geotechnical engineering practice, Module 6: Earthquake resistant retaining wall design.

[4] Mononobe, N. and H. Matsuo. (1929). On the Determination of Earth Pressures During Earthquakes, Proceedings of the World Engineering Congress.

[5] Ebeling, R.M. and E.E. Morrison (1992). The Seismic Design of Waterfront Retaining Structures, U.S. Army, Technical Report ITL-92-11. U.S. Department of the Army, Waterways Experiment Station, United States Army Corps of Engineers.

[6] FHWA-NHI-00-043. (2001). Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines. U.S. Department of Transportation – Federal Highway Administration.

[7] Bowles, J.E. (1996). *Foundation and Analysis Design*. The McGraw-Hill Companies, Inc., pp.220.