การออกแบบระบบโครงสร้างหล่อสำเร็จ ในบริเวณที่มีความเสี่ยงแผ่นดินไหว

ศ.ดร. อมร พิมานมาศ มหาวิทยาลัยเกษตร

รศ.ดร.ชยานนท์ หรรษภิญโญ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รศ.ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน มหาวิทยาลัยพะเยา

ผศ. ดร.เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

โครงการพัฒนาหลักสูตรการเรียนรู้เรื่องการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) พ.ศ. 2568

การออกแบบระบบโครงสร้างหล่อสำเร็จ ในบริเวณที่มีความเสี่ยงแผ่นดินไหว

1. ศ.ดร.อมร พิมานมาศ — พื้นฐานโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปต้านแผ่นดินไหว
2. ผศ.ดร.เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย — แนวทางการออกแบบอาคารโครงสร้าชิ้นส่วนสำเร็จรูป เสา-คาน
3. รศ.ดร.ชยานนท์ หรรษภิญโญ — แนวทางการออกแบบกำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จต้านแผ่นดินไหว (bearing wall)
4. รศ.ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน — ตัวอย่างการออกแบบอาคารที่มีกำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จ

1. พื้นฐานโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปต้านแผ่นดินไหว

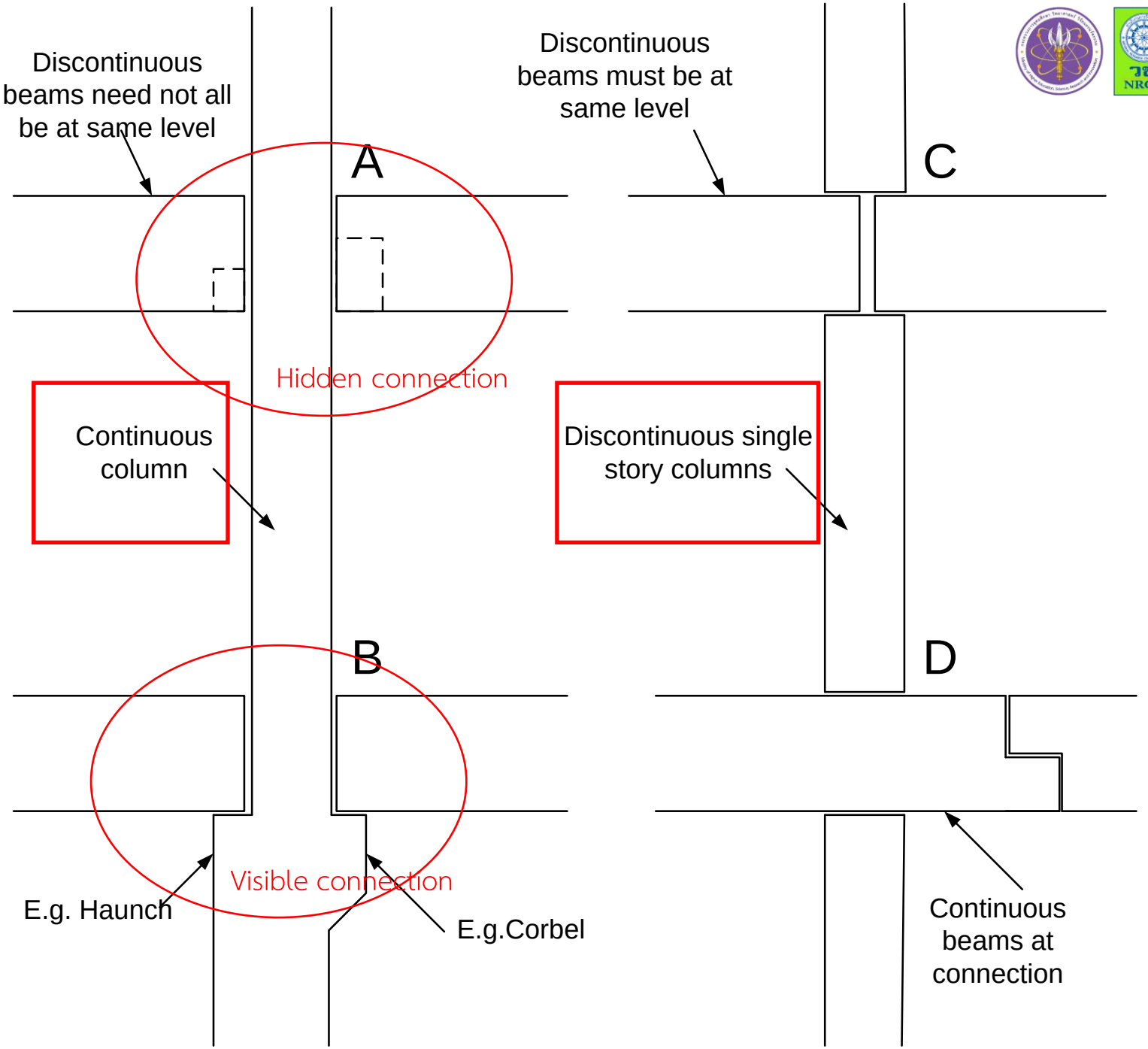
ศ.ดร.อมร พิมานมาศ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โครงการพัฒนาหลักสูตรการเรียนรู้เรื่องการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว
ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) พ.ศ. 2568

- โครงสร้างที่สร้างด้วยระบบชิ้นส่วนสำเร็จรูป (Precast concrete) เป็นการนำชิ้นส่วนย่อยๆ มาต่อกันเป็นท่อนๆ ทำให้เกิดจุดต่อค่อนข้างมาก

- จุดต่อจะเป็นจุดที่อ่อนแอที่สุดของโครงสร้าง ต่างกับจุดต่อของโครงสร้างหล่อในที่ที่มีความแข็งแรง และมีความต่อเนื่อง ซึ่งจะช่วยให้โครงสร้างมีกำลังสำรอง (Reserved strength) จากการถ่ายเทแรงสู่องค์อาคารอื่น


Discontinuous beams need not all be at same level
A
Hidden connection
Continuous column
Discontinuous beams must be at same level
C
Discontinuous single story columns
B
Visible connection
E.g. Haunch
E.g.Corbel
D
Continuous beams at connection











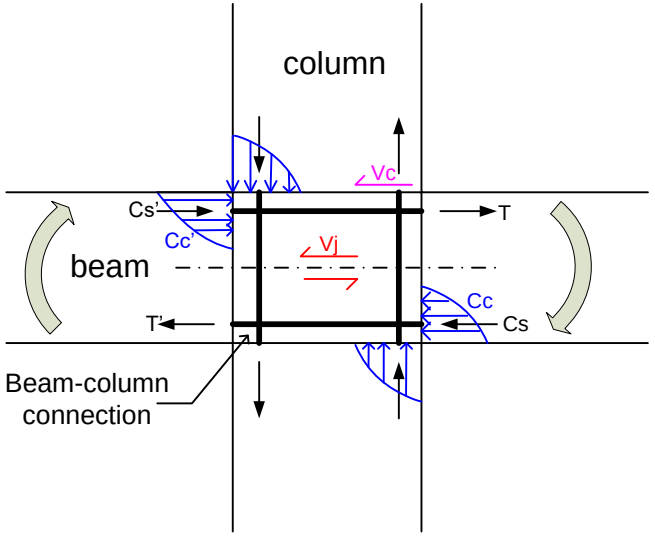




การก่อสร้างระบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปนิยม ทำเป็นระบบ pinned connection เนื่องจากก่อสร้างง่าย และหากก่อสร้างให้เป็นระบบ moment connection จะเสียค่าใช้จ่ายมาก แต่จุดอ่อนของ pinned connection คือ จุดต่อไม่ถ่ายโมเมนต์ทำให้เป็นโครงสร้างที่อ่อนแอ

- แม้กระทั่งในองค์อาคารที่หล่อเป็นเนื้อเดียว จุดต่อก็ยังไม่แข็งแรง
- ภายใต้แรงจากแผ่นดินไหวเป็นแรงกระทำในทิศทางด้านข้าง ทำให้จุดต่อจะต้องรับแรงเฉือนที่มีค่ามาก หากจุดต่อดังกล่าวมีกำลังต้านทานแรงเฉือนไม่เพียงพอ จะทำให้จุดต่อวิบัติซึ่งอาจนำไปสู่การ collapse ของโครงสร้างได้



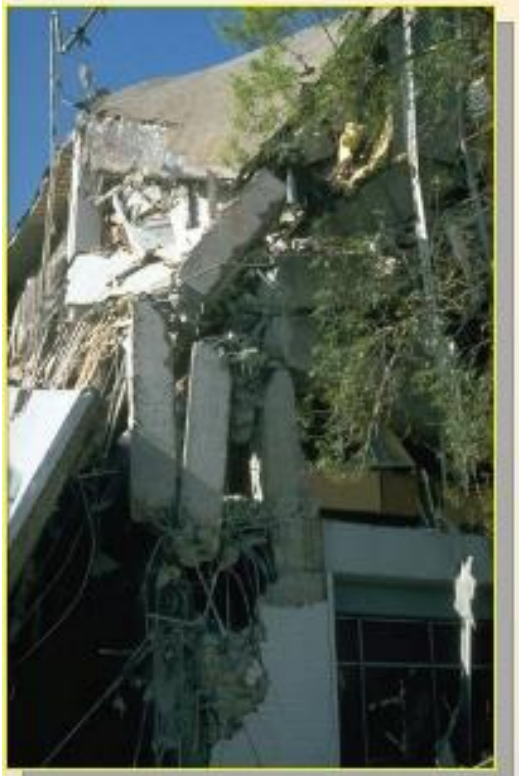


$$V_j = C'_c + C'_s + T - V_c$$



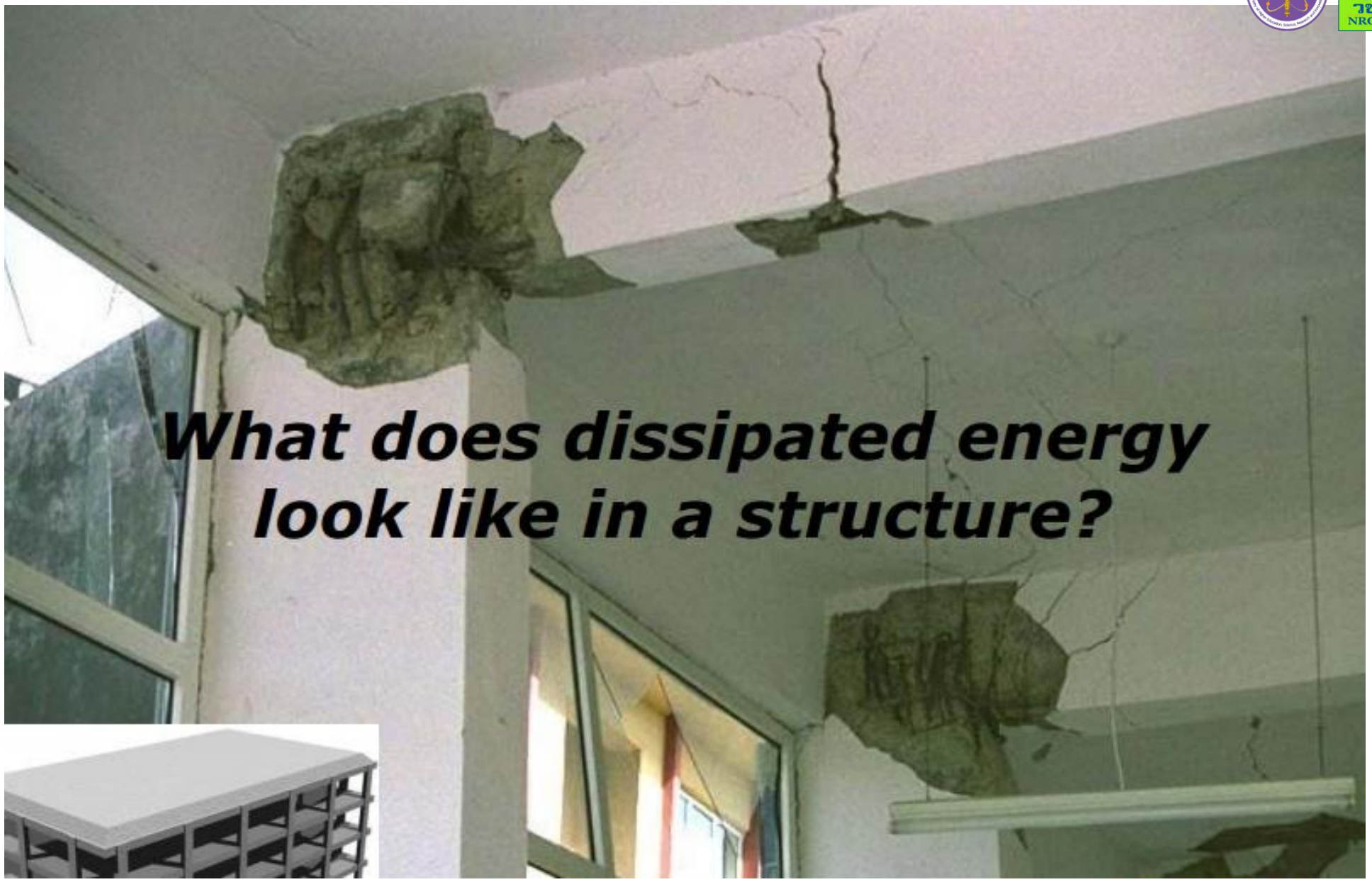


Joint Failures








What does dissipated energy look like in a structure?



Connection failure after 1999 Marmara earthquake, Turkey 7.4 Richter

การวิบัติของจุดต่อแบบยึดหมุน (pinned connection) เปรียบเทียบกับจุดต่อหล่อในที่

ความเป็นมาของระบบ Precast ในประเทศไทย

โครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูป (Precast Concrete)คอนกรีตที่ทำสำเร็จจากที่อื่นแล้ว ยกมาประกอบกัน ณ ที่ก่อสร้าง มีการใช้งานมาก นิยมใช้กับก่อสร้างอาคารที่มีความสูงปานกลาง เช่น อาคารชุด อพาร์ตเมนต์ แฟลต เริ่มมีประมาณ 40 ปีแล้ว

ปัจจุบันการใช้งานเริ่มแพร่หลายมากขึ้น

ข้อดีของระบบ Precast



- สามารถก่อสร้างได้อย่างรวดเร็ว งานไม่ต้องรอกัน
- สามารถที่จะหล่อชิ้นส่วนคู่ขนานไปกับงานฐานราก เมื่อทำฐานรากเสร็จก็สามารถนำชิ้นส่วน precast มาติดตั้งได้เลย
- สามารถที่จะเปิดตัวอาคารใช้งานได้บางส่วน ควบคู่ไปกับงานอื่นๆ ที่กำลังก่อสร้างต่อไป
- ใช้วัสดุในการก่อสร้าง เช่น คอนกรีตอย่างประหยัด และยังช่วยลดความสูญเสียต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบดังกล่าว
- ราคาถูกลง เมื่อมีการผลิตชิ้นส่วนซ้ำๆกันเป็นจำนวนมาก
- ลดมลพิษในระหว่างก่อสร้าง

ข้อดีของระบบ Precast

- สามารถผลิตคอนกรีตที่มีกำลังสูงได้โดยการใช้ admixture และยังสามารถควบคุมคุณภาพของการผลิตได้โดยง่าย (ผลิตในโรงงาน)
- มีความเรียบร้อย และความสวยงามสำหรับผิวสำเร็จของ precast
- ระบบต่างๆ สามารถจัดรวมอยู่ในระบบ precast เป็น module สำเร็จรูปโดยรวมระบบป้องกันความร้อน และระบบปรับอากาศ ระบบไฟฟ้า ติดตั้งแบบ built in รวมอยู่กับระบบโครงสร้าง precast ไปในตัว

ข้อเสียของระบบ Precast

- จะต้องมีการขนย้ายในการติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือเป็นพิเศษและค่าใช้จ่ายสูง
- ต้องใช้แรงงานที่มีความชำนาญในการติดตั้งที่หน้างาน
- โรงงานผลิตต้องเป็นโรงงานขนาดใหญ่และระยะทางไม่ห่างจากหน้างานมากนัก (มีค่าขนส่งชิ้นส่วน)
- จำนวนการผลิตต่อครั้งต้องมีปริมาณมากพอสมควรจึงจะคุ้มกับค่าใช้จ่ายในการทำแบบหล่อ
- มีปัญหารั่วซึมที่บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นส่วน

ระบบ Precast ที่นิยมใช้

➢ ระบบผนังรับแรง (Bearing wall structure)

โครงสร้าง Precast แบบนี้จะเหมาะสำหรับอาคารอพาร์ทเมนท์ ซึ่งมีผนังอิฐก่อค่อนข้างมาก โดยการออกแบบให้กำแพงทำหน้าที่เป็นทั้งผนังกั้นและเสาไปในตัว จากการที่สามารถใช้กำแพง Precast ทำหน้าที่ทั้งสองอย่าง



ดังกล่าวทำให้สามารถสร้างอาคารได้อย่างรวดเร็ว พื้นผิวผนังกำแพงมีความเรียบร้อยและสวยงามมากขึ้น กำแพงสำเร็จรูปที่มีความทึบย่อมสามารถป้องกันเสียง และทนต่อไฟไหม้ได้ดีกว่ากำแพงอิฐธรรมดา



ระบบ Precast ที่นิยมใช้

➢ โครงสร้าง Precast ระบบ Beam-Column Frame และ พื้นสำเร็จ

ระบบ Beam-column frame หมายถึงระบบที่ใช้ คาน และ เสา เป็นคอนกรีตสำเร็จรูป ส่วนพื้นใช้พื้นสำเร็จ ซึ่งมีการผลิตหลายๆรูปแบบ เช่น แผ่นพื้นสำเร็จแบบ solid Plank เหมาะสำหรับพื้นทางเดียวที่มีความยาวช่วงไม่เกิน 5 เมตร ในขณะที่ระบบพื้น Hollow-core สามารถใช้กับ span ได้ยาวถึง 12-13 เมตร

จุดเด่นของงานระบบพื้น Precast ก็คือสามารถทำการก่อสร้างพื้นได้อย่างรวดเร็วโดยไม่ต้องใช้ไม้แบบหรือค้ำยัน (ไม่ใช้ไม้แบบและค้ำยัน)





ระบบ Precast ที่นิยมใช้

➢ Precast บ้าน Module สำเร็จ (Module system หรือ cell system)

ระบบ Precast แบบนี้ เป็นการก่อสร้างบ้านทั้งหลัง หรือบางส่วนของบ้านสำเร็จจากภายนอกและยกมาติดตั้ง

บ้านแบบ Module อาจจะมีการตกแต่งพร้อมเสร็จเมื่อนำมาติดตั้ง โดยระบบไฟฟ้าแสงสว่าง ระบบสุขาภิบาล มาพร้อมกับงานโครงสร้าง

ข้อดีของบ้านระบบนี้ คือ ความรวดเร็วในการเปิดอาคารให้ลูกค้าได้ใช้

ข้อจำกัดอยู่ตรงรูปร่างอาคารจะมีรูปแบบตายตัว และขนาดของ Module ต้องไม่ใหญ่มากนัก มิฉะนั้นจะไม่สะดวกในการขนย้ายจากโรงผลิตมายังสถานที่ก่อสร้างได้

ระบบ Precast ที่นิยมใช้

➢ ระบบแบบผสม

ระบบ Precast แบบนี้ จะเป็นการใช้ระบบ Precast บางส่วนผสมกับการก่อสร้างอย่างอื่นๆ เป็นต้นว่า ผสมกับงานคอนกรีตหล่อกับที่ หรือกับโครงสร้างเหล็ก

ข้อดีของระบบนี้อยู่ที่ความหลากหลายในการก่อสร้าง และไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องมือที่มีน้ำหนักมากในการขนส่งและติดตั้งชิ้นส่วน Precast







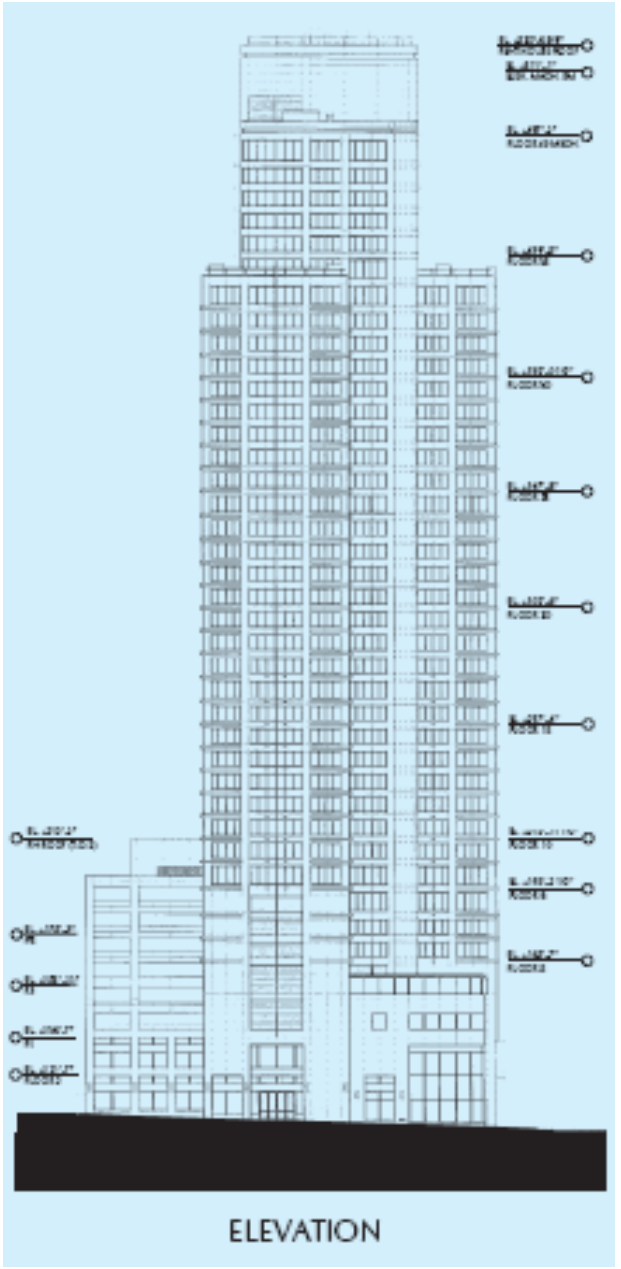
The Paramount

- 418 ft, 41 stories
- Completed in 2002
- Residential
- Hybrid precast moment frame

อาคารสูงใน high seismic zone ก่อสร้างด้วยระบบ Precast?? ถ้าออกแบบและก่อสร้างไม่ถูกวิธี พฤติกรรมจะแย่กว่า RC แต่ถ้าออกแบบและก่อสร้างอย่างถูกวิธีแล้ว (Hybrid)

The Paramount Tallest Precast buildings in Sanfrancisco





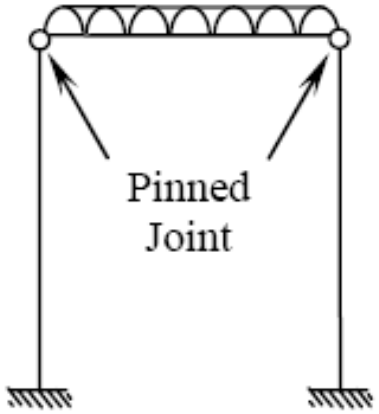
39 stories, 128 m high

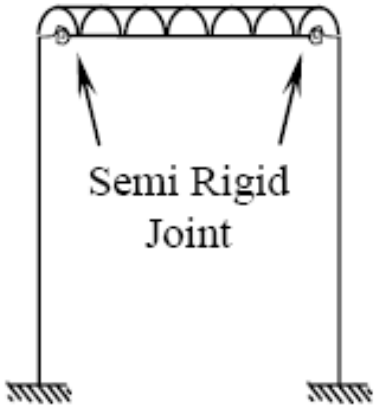
Seismic Zone 4

Precast prestressed concrete frame

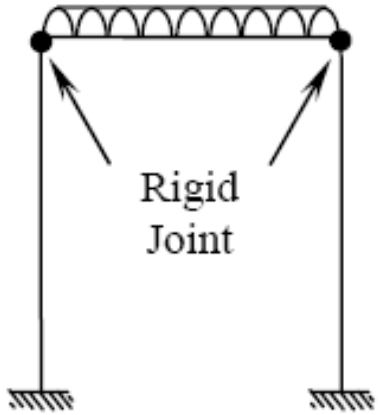
Novel precast hybrid moment resisting frame

Precast





Cast in Place



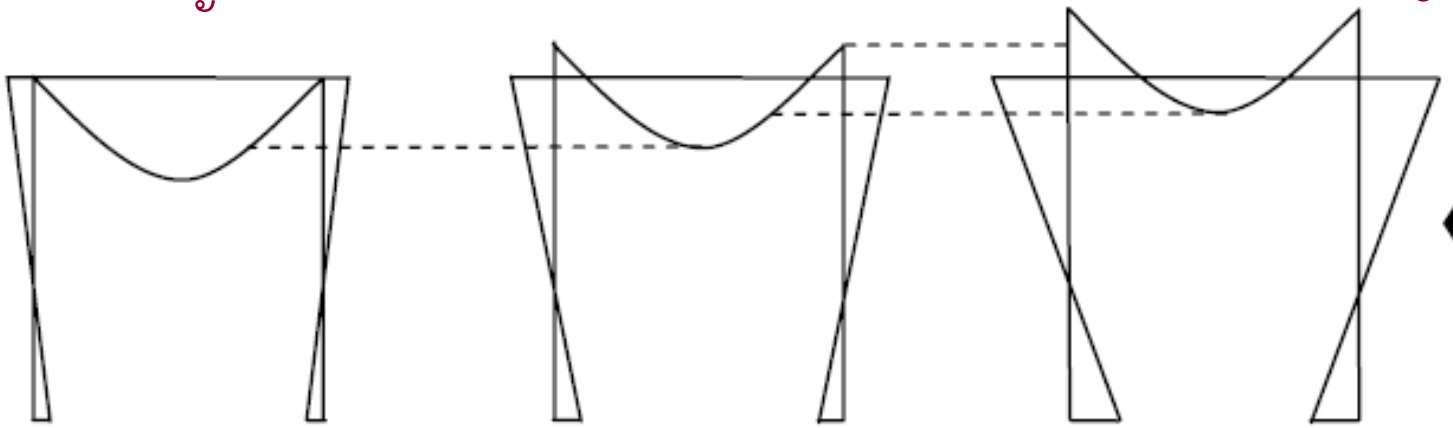
Simple Construction

คานใหญ่ เสาเล็ก

Semi-continuous Construction

Continuous Construction

คานเล็ก เสาใหญ่

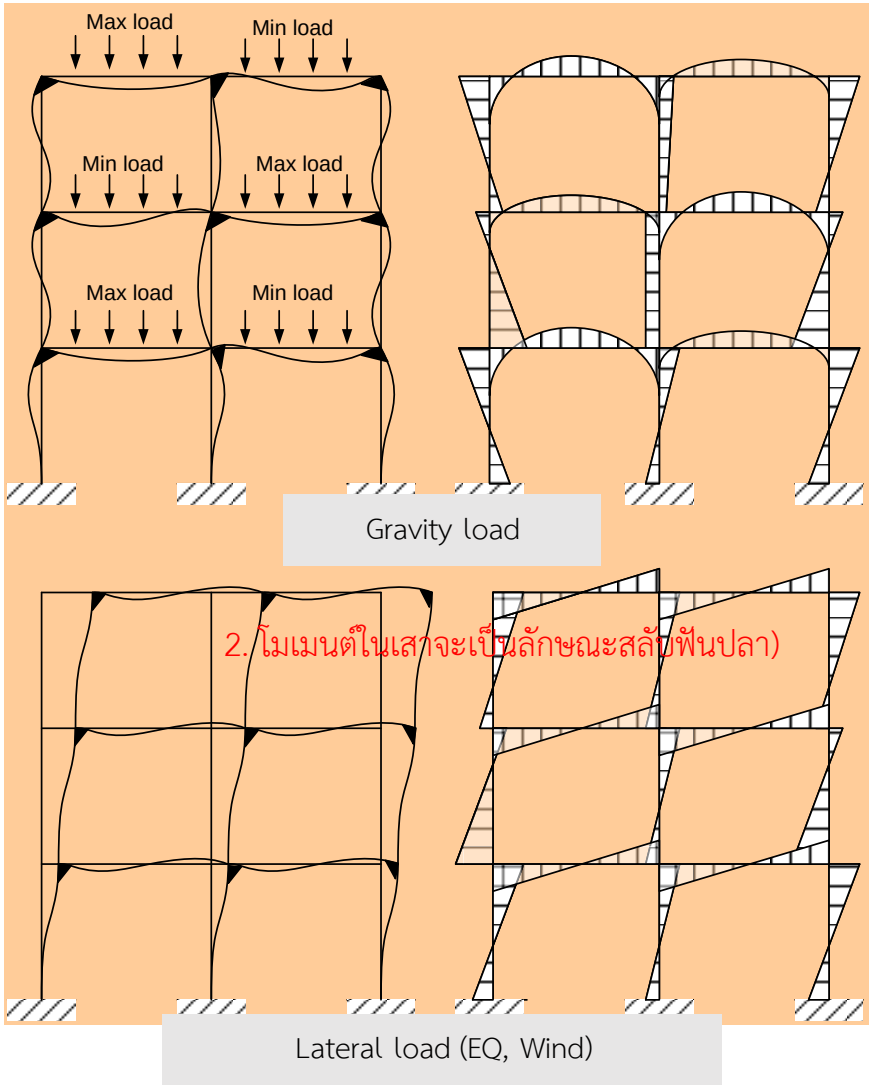


Bending Moment Diagram

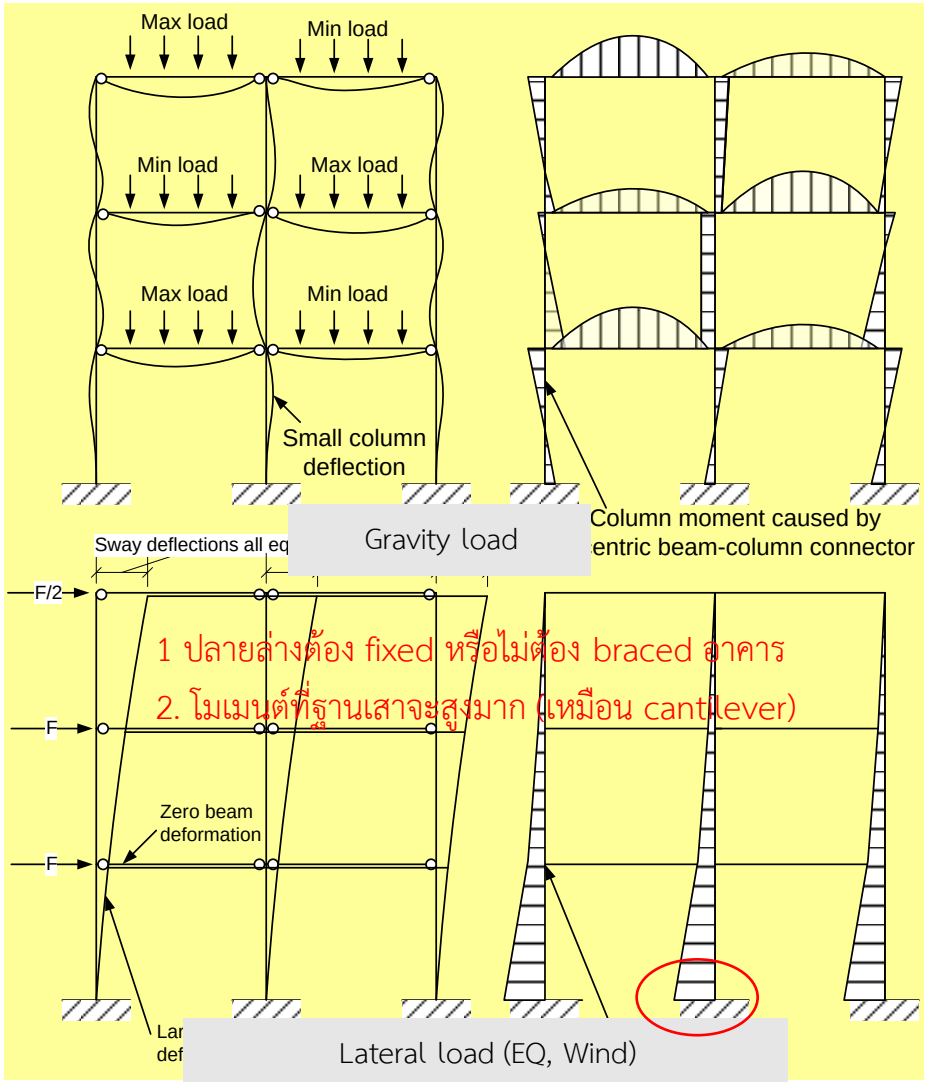
Beam size	>	Beam size	>	Beam size
Column size	<	Column size	<	Column size

เปรียบเทียบการวิเคราะห์โครงสร้างระบบ cast-in-place และ ระบบ precast

Monolithic structure



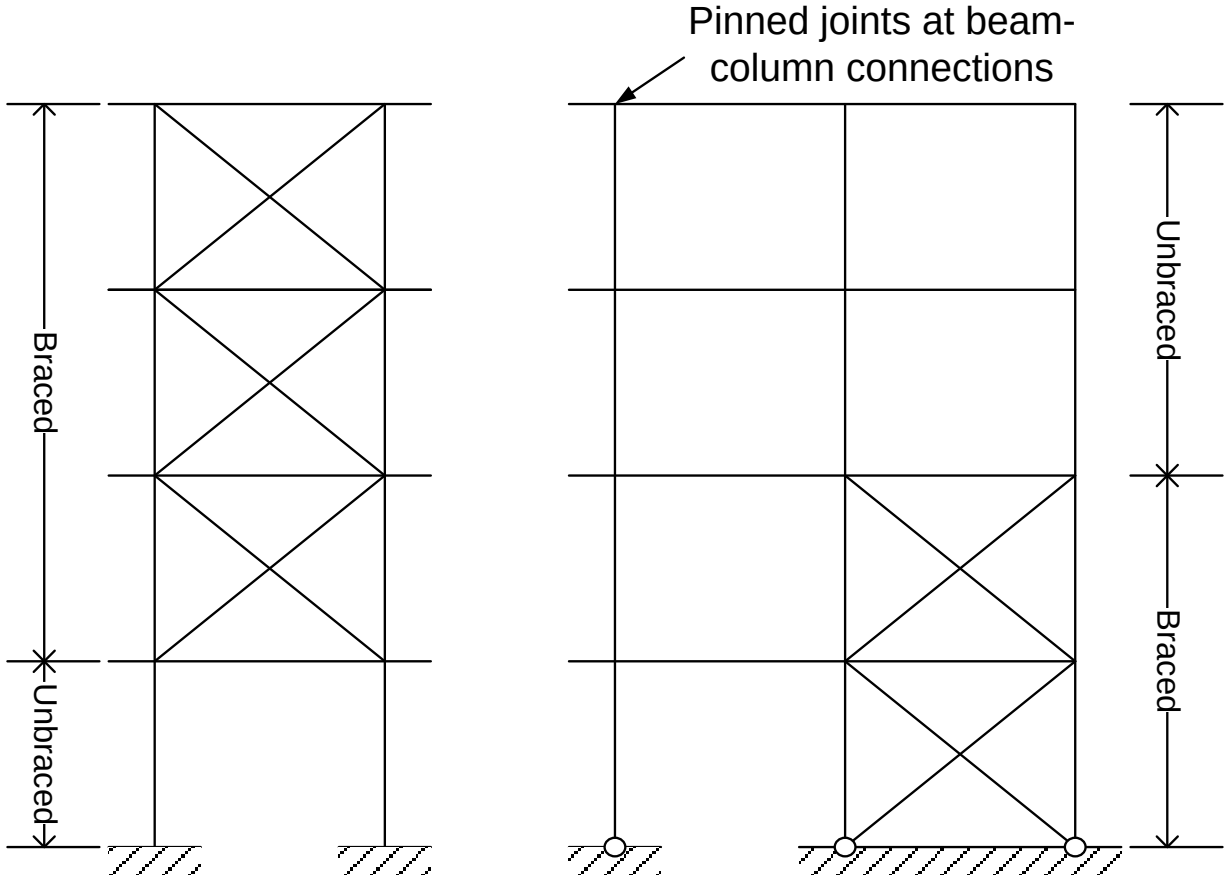
Precast structure



เปรียบเทียบ Deflection และ Moment diagram ระหว่างโครง frame ของอาคารที่หล่อในที่ซึ่งมีความต่อเนื่องกันขององค์อาคารกับ Moment diagram ของ skeletal frame ในระบบ precast

การค้ำยันด้วย bracing หรือกำแพง จำเป็นในระบบ pinned connection

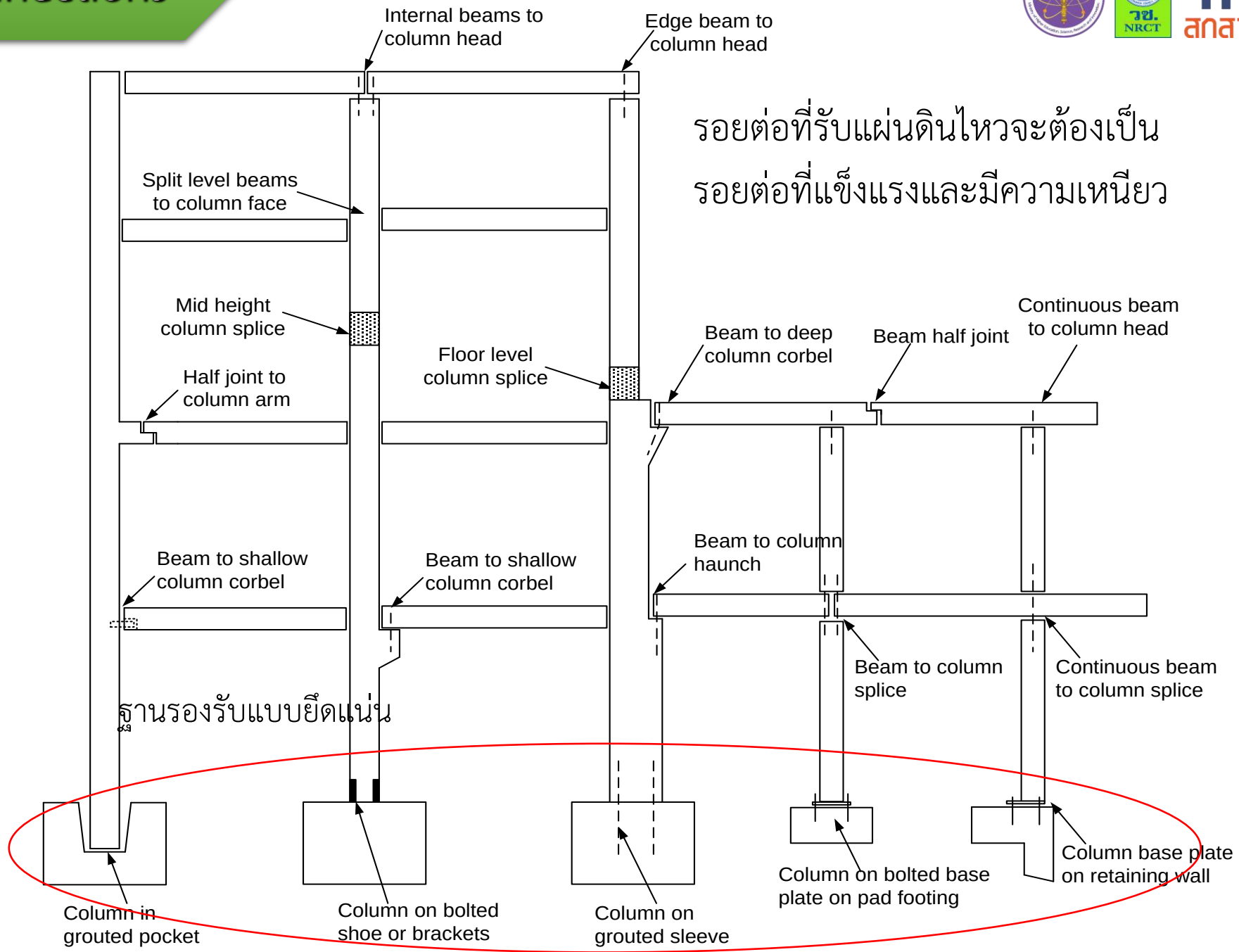
เมื่อโครงสร้างที่มีความสูงมากกว่า 3 ชั้น หรือมากกว่า 10 เมตร พฤติกรรมระบบ precast ในการรับแรงทางด้านข้าง อาจจะทำให้ได้หน้าตัดเสาที่มีขนาดใหญ่เกินไป ซึ่งสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการ brace โครงสร้าง frame ซึ่งอาจทำการ braced ตั้งแต่ในชั้น 2 ขึ้นไปก็ได้



การใส่ brace เหมือนเป็นการใส่กำแพงให้แก่โครงสร้าง

แต่ brace เป็นอุปสรรคต่อการใช้งานอาคาร (space)

Type of connections



รอยต่อที่รับแผ่นดินไหวจะต้องเป็น
รอยต่อที่แข็งแรงและมีความเหนียว

ฐานรองรับแบบยึดแน่น

2. แนวทางการออกแบบอาคารโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปเสา-คาน

ผศ. ดร.เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจธ.)

โครงการพัฒนาหลักสูตรการเรียนรู้เรื่องการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) พ.ศ. 2568

หัวข้อบรรยาย

1. บทเรียนของความเสียหายจากแผ่นดินไหวในอดีต และหลักคิดในการพัฒนาระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป
2. ภาพรวมขั้นตอนการออกแบบอาคารโครงสร้างเสาคาน ฐานรากคอนกรีตสำเร็จรูป
3. การคำนวณแรงและออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว
4. การออกแบบการเชื่อมต่อสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างเสาคาน ฐานรากคอนกรีตหล่อสำเร็จ
5. การทดสอบพฤติกรรมของโครงสร้างเสาคานฐานรากสำเร็จรูปและเกณฑ์การยอมรับ

บทเรียนของความเสียหายจากแผ่นดินไหวในอดีต













Figure 1.1 Collapse of the second level of the Northridge Fashion Center parking garage constructed using precast post-tensioned technology (Photo Credit: J. Dewey, USGS).

(Ref.: Saatcioglu, M., Mitchell, D., Tinawi, R., Gardner, N.J., Gillies, A.G., Ghobarah, A., Anderson, D.L. and Lau, D., 2001. The August 17, 1999, Kocaeli (Turkey) earthquake damage to structures. Canadian Journal of Civil Engineering, 28(4), pp.715-737.)

การศึกษาชิ้นส่วนหล่อสำเร็จในประเทศไทย





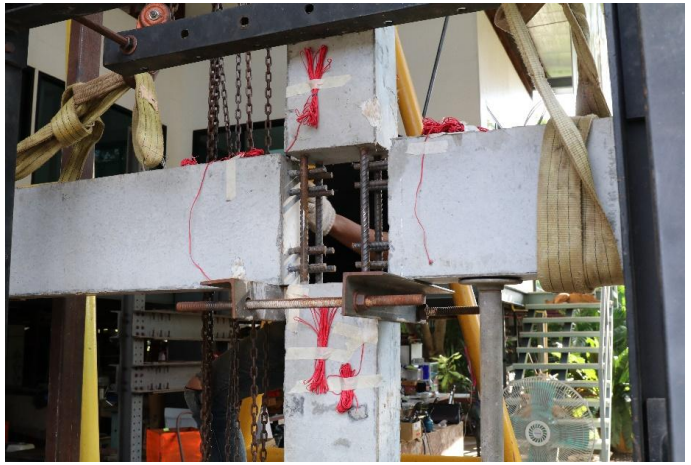


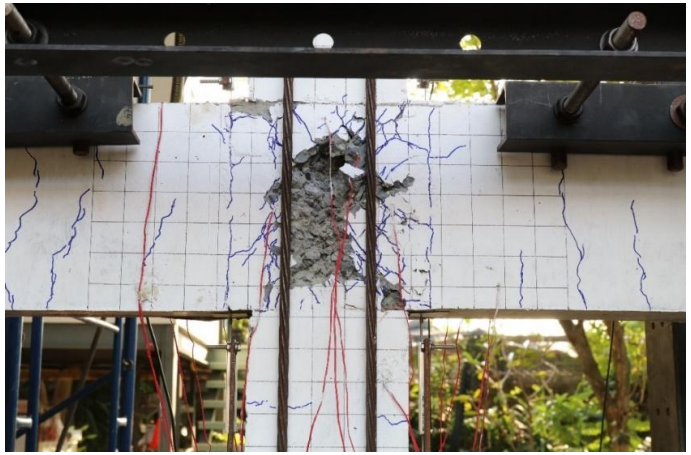




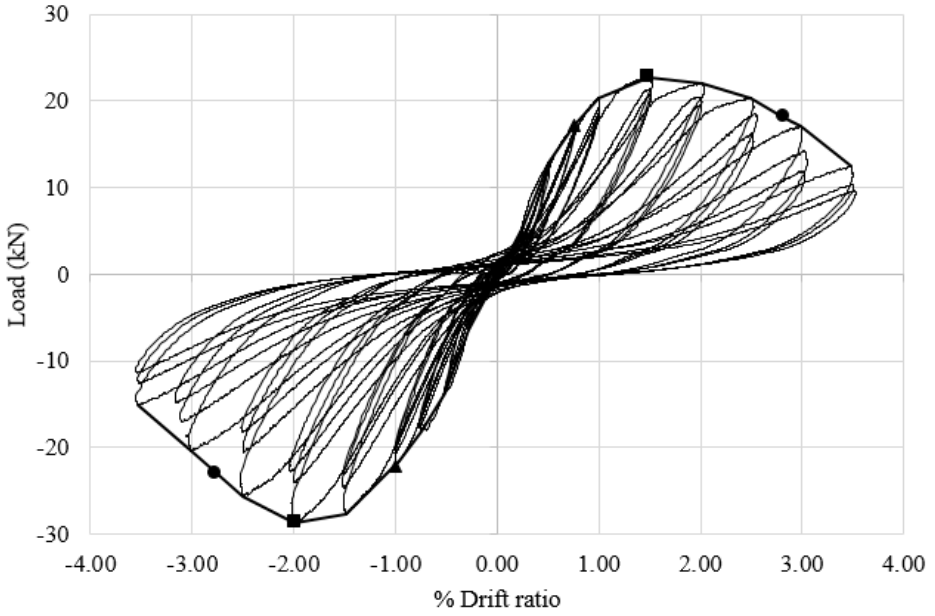
(Ref.: อมร พิมานมาศ และคณะ (2561) โครงการ “ศึกษากำลังต้านแผ่นดินไหวของโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปและการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กต้านแผ่นดินไหวด้วยเส้นใยธรรมชาติ”)

การศึกษาชิ้นส่วนหล่อสำเร็จในประเทศไทย









(Ref.: อมร พิมานมาศ และคณะ (2561) โครงการ “ศึกษากำลังต้านแผ่นดินไหวของโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปและการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กต้านแผ่นดินไหวด้วยเส้นใยธรรมชาติ”)

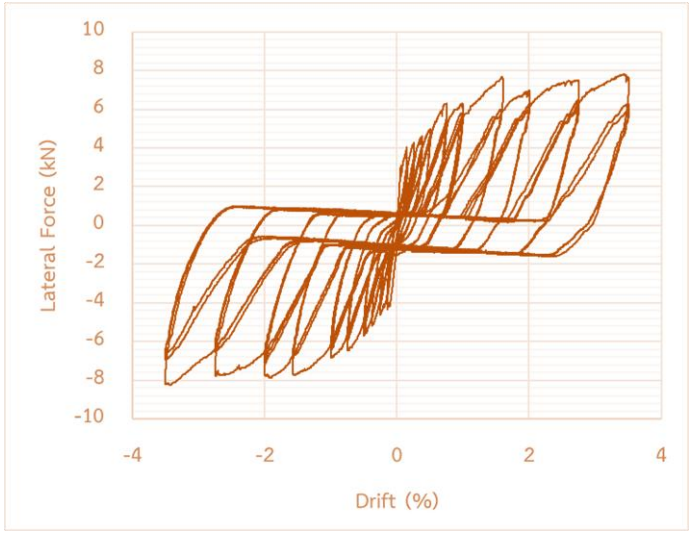
การศึกษาชิ้นส่วนหล่อสำเร็จในประเทศไทย

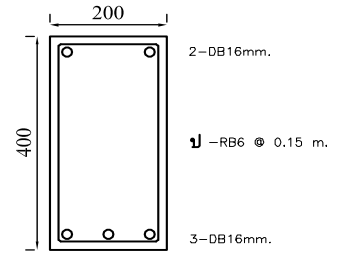


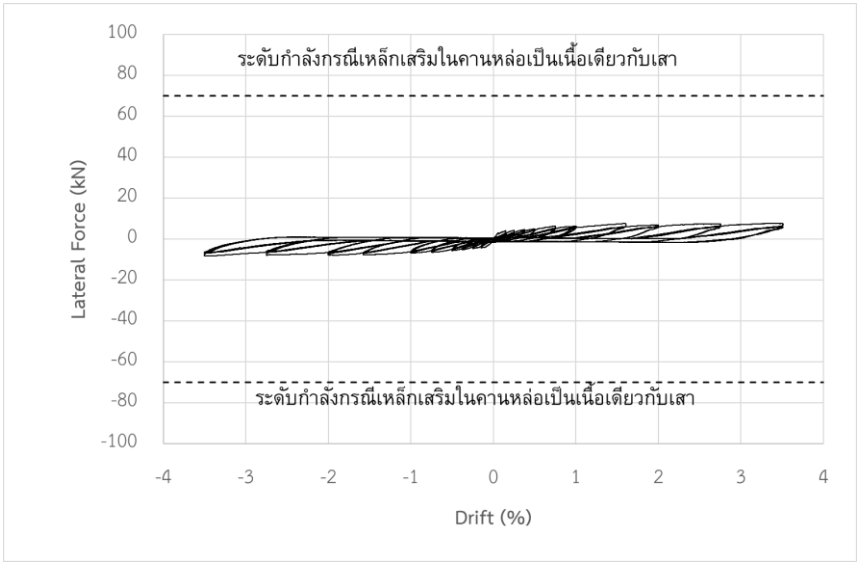












(Ref.: รายงานการศึกษาโครงการจัดทำมาตรฐานงานก่อสร้างอาคารด้วยระบบโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูป, กรมโยธาธิการและผังเมือง)

หลักคิดในการพัฒนาระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป

Precast Concrete Structural Systems



Monolithic Emulation

- Structural systems are designed according to the requirements for cast in place RC construction



Jointed Precast

- Planes of significantly reduced stiffness and strength exist at the interface between adjacent precast concrete structure

หลักคิดในการพัฒนาระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป

Monolithic Emulation



(Ref.: โครงการการศึกษาและวิจัยการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อรับแรงแผ่นดินไหว ในระบบอุตสาหกรรมชิ้นส่วนสำเร็จรูป, การเคหะแห่งชาติ)

หลักคิดในการพัฒนาระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป

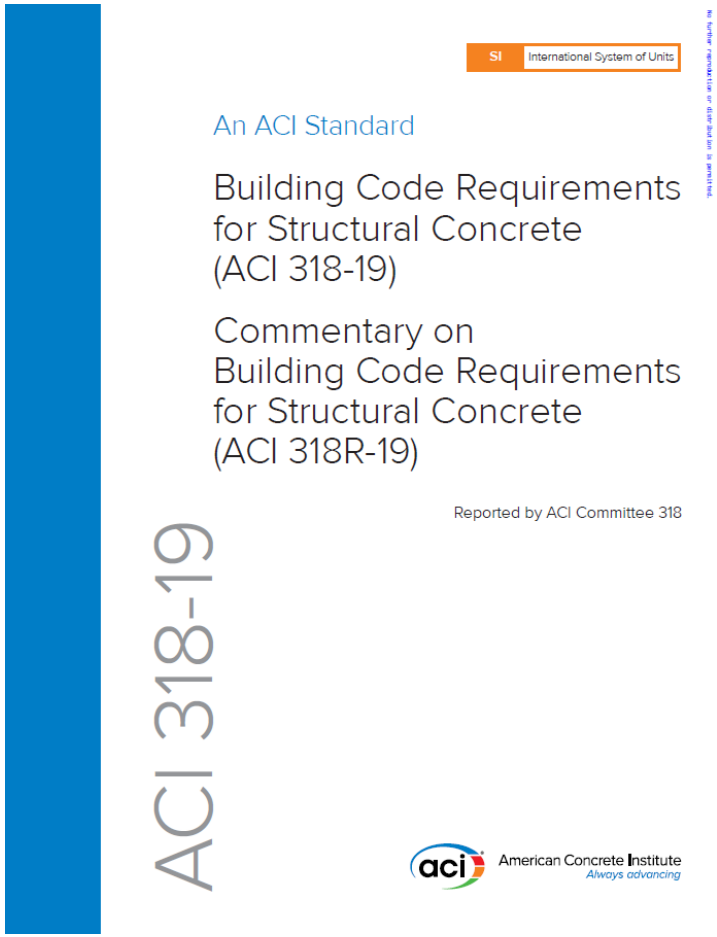
Jointed Precast

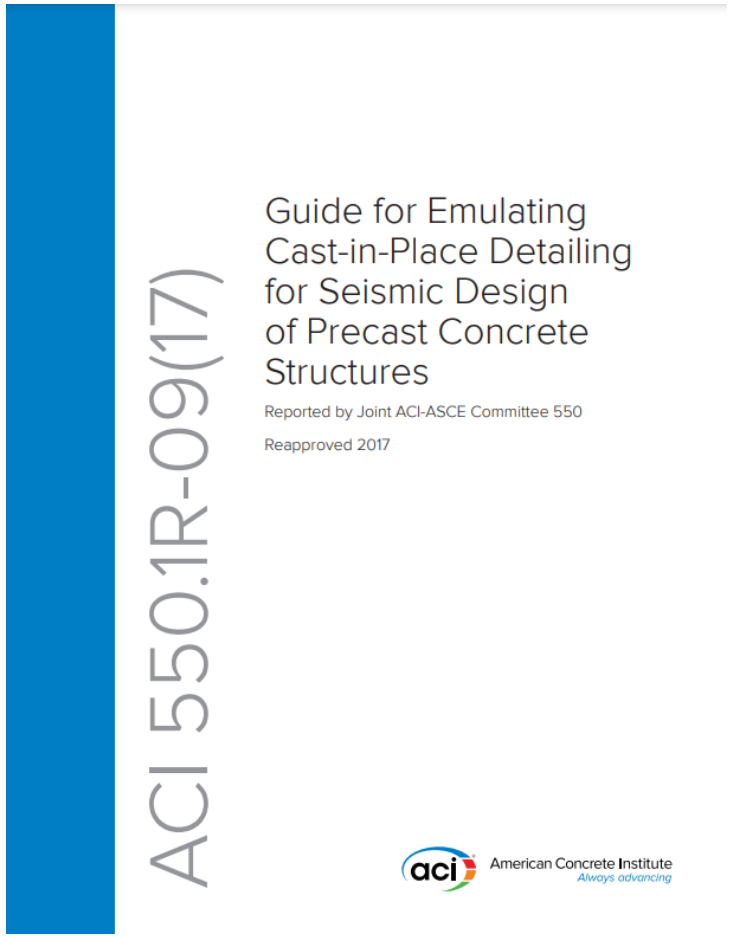


(Ref.: โครงการการศึกษาและวิจัยการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อรับแรงแผ่นดินไหว ในระบบอุตสาหกรรมชิ้นส่วนสำเร็จรูป, การเคหะแห่งชาติ)

ภาพรวมขั้นตอนการออกแบบอาคารโครงสร้างเสาคานฐานรากคอนกรีตสำเร็จรูป

➢ ข้อกำหนดที่ใช้ในการออกแบบ

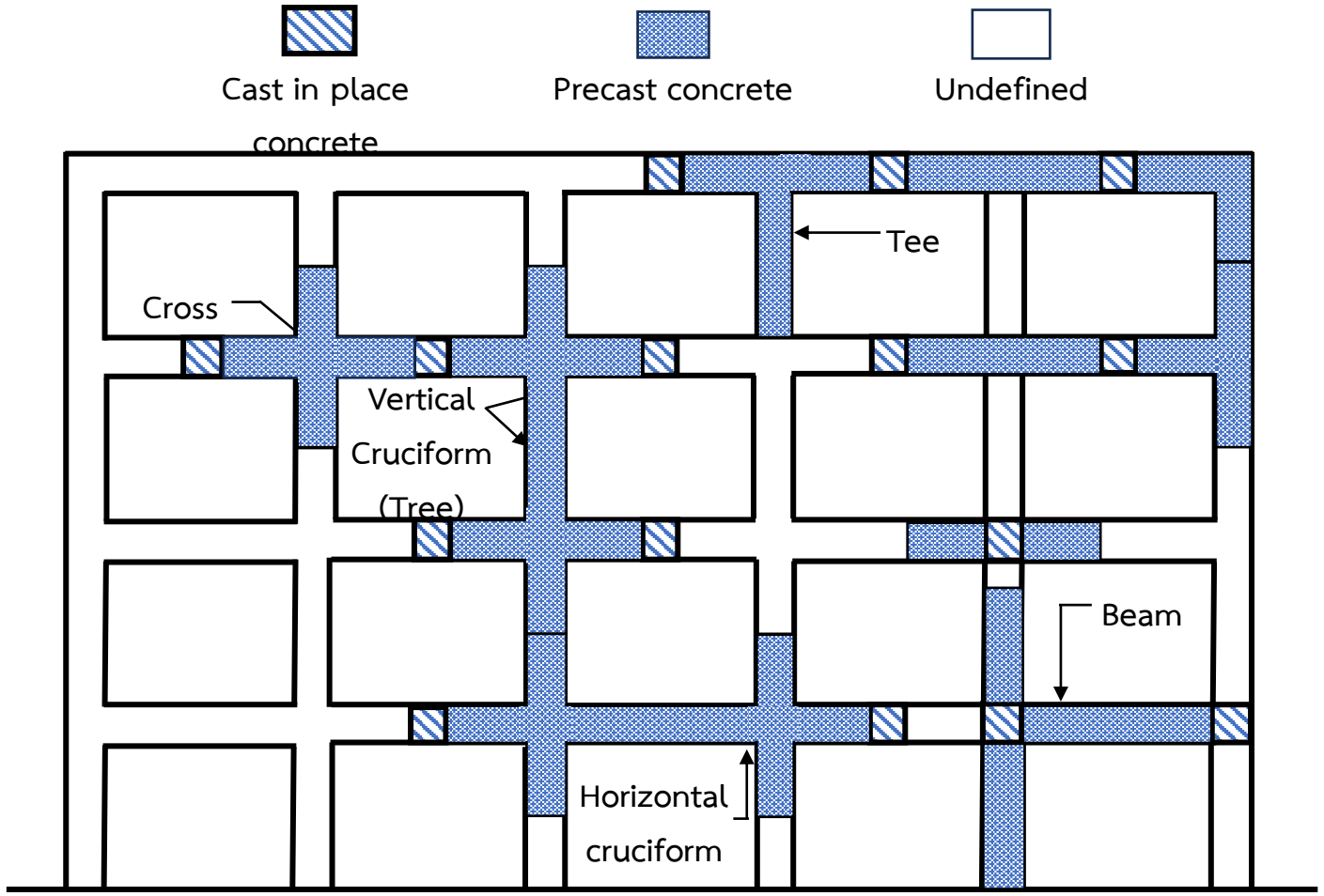






การออกแบบการเชื่อมต่อสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างเสา คาน ฐานรากคอนกรีตหล่อสำเร็จ

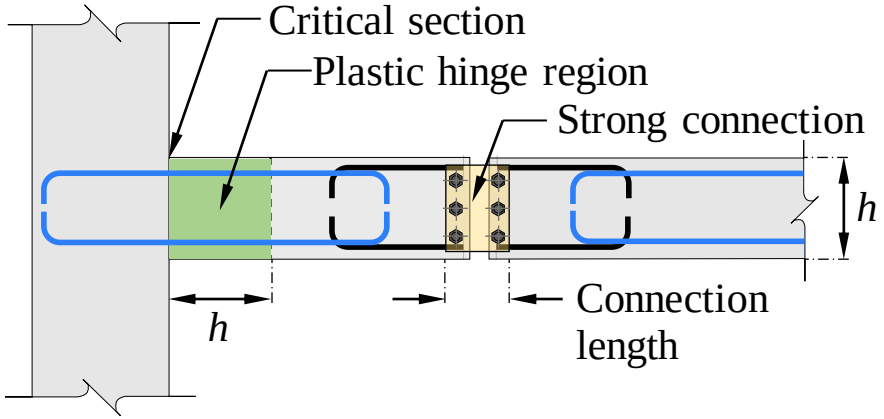
ตำแหน่งของการเลือกจุดเชื่อมต่อโครงสร้างในอาคาร



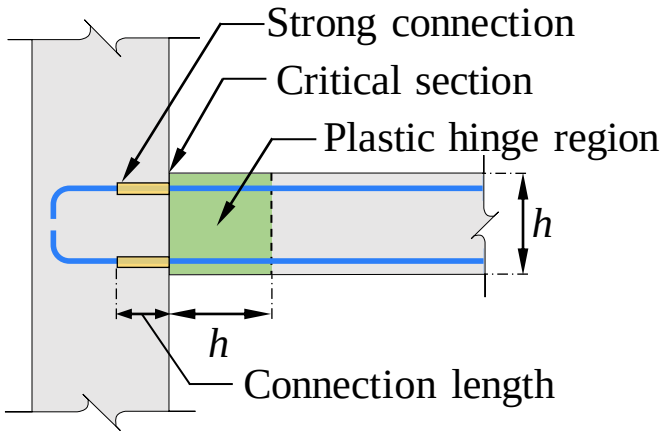
(Ref.: ACI 550.1R-09)

การออกแบบการเชื่อมต่อสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างเสา คาน ฐานรากคอนกรีตหล่อสำเร็จ

➢ จุดต่อโครงสร้างแบบแข็งแรง (Strong Connection) [ACI 318-19]

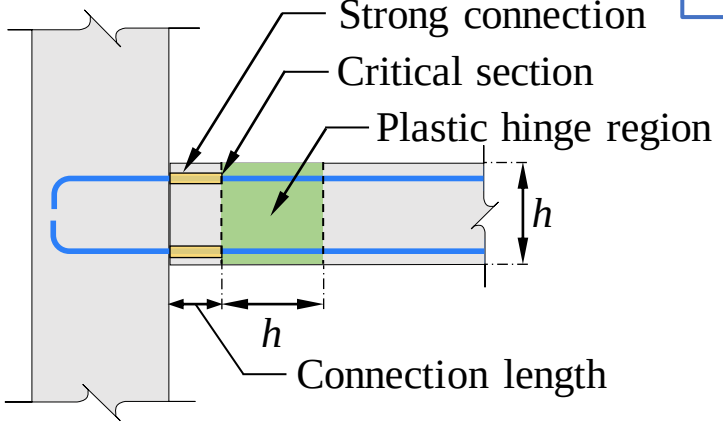


(a) Beam-to-beam connection

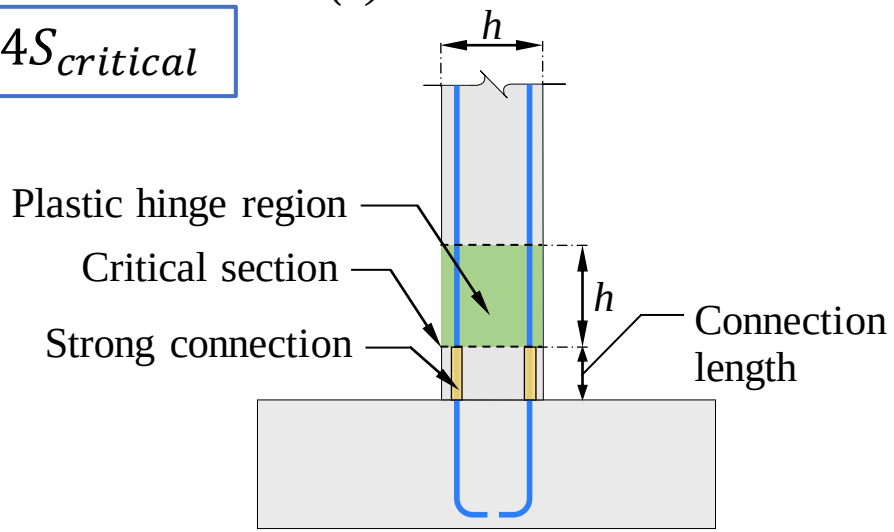


(b) Beam-to-beam connection

$$S_{strong} \geq 1.4 S_{critical}$$



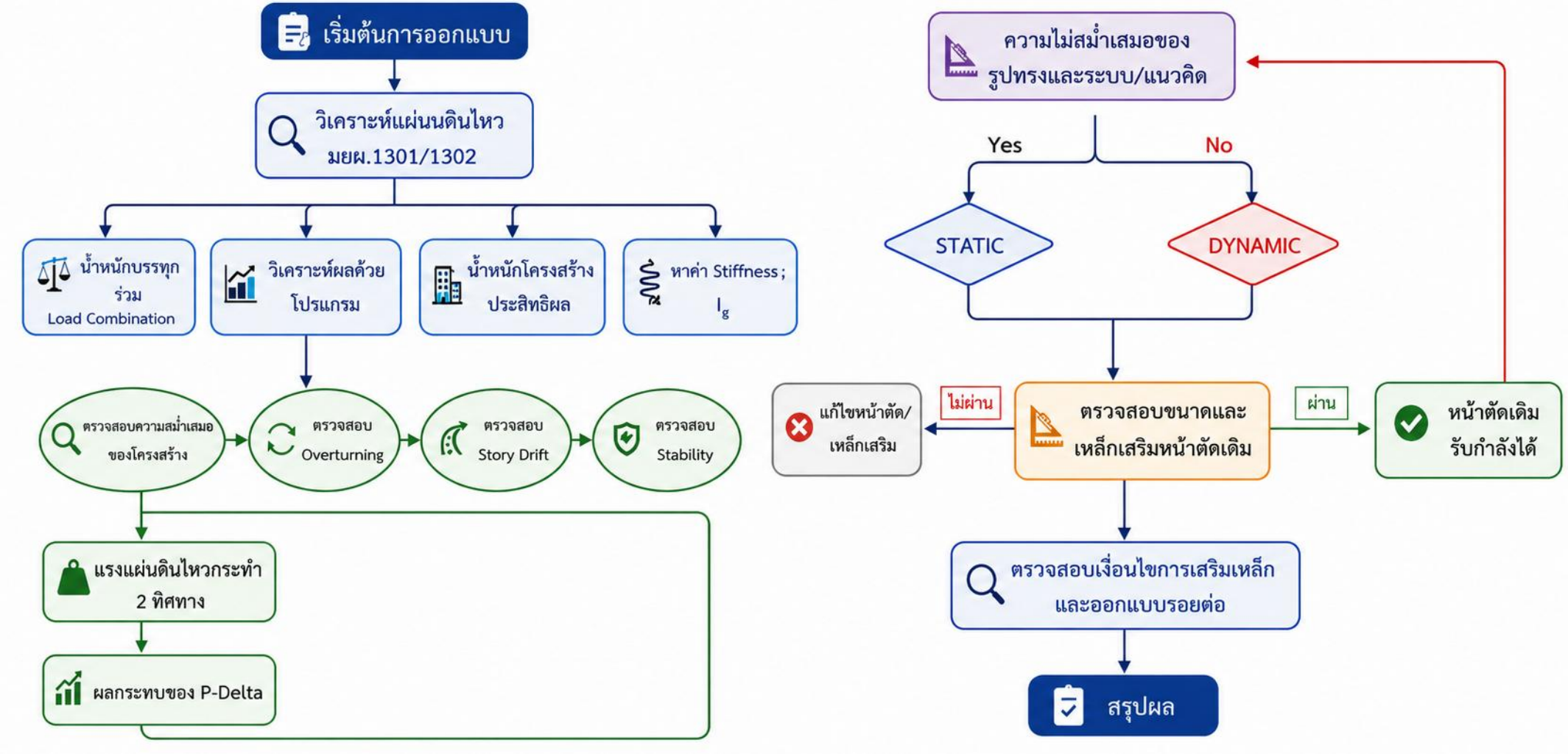
(c) Beam-to-beam connection



(d) Column-to-footing connection

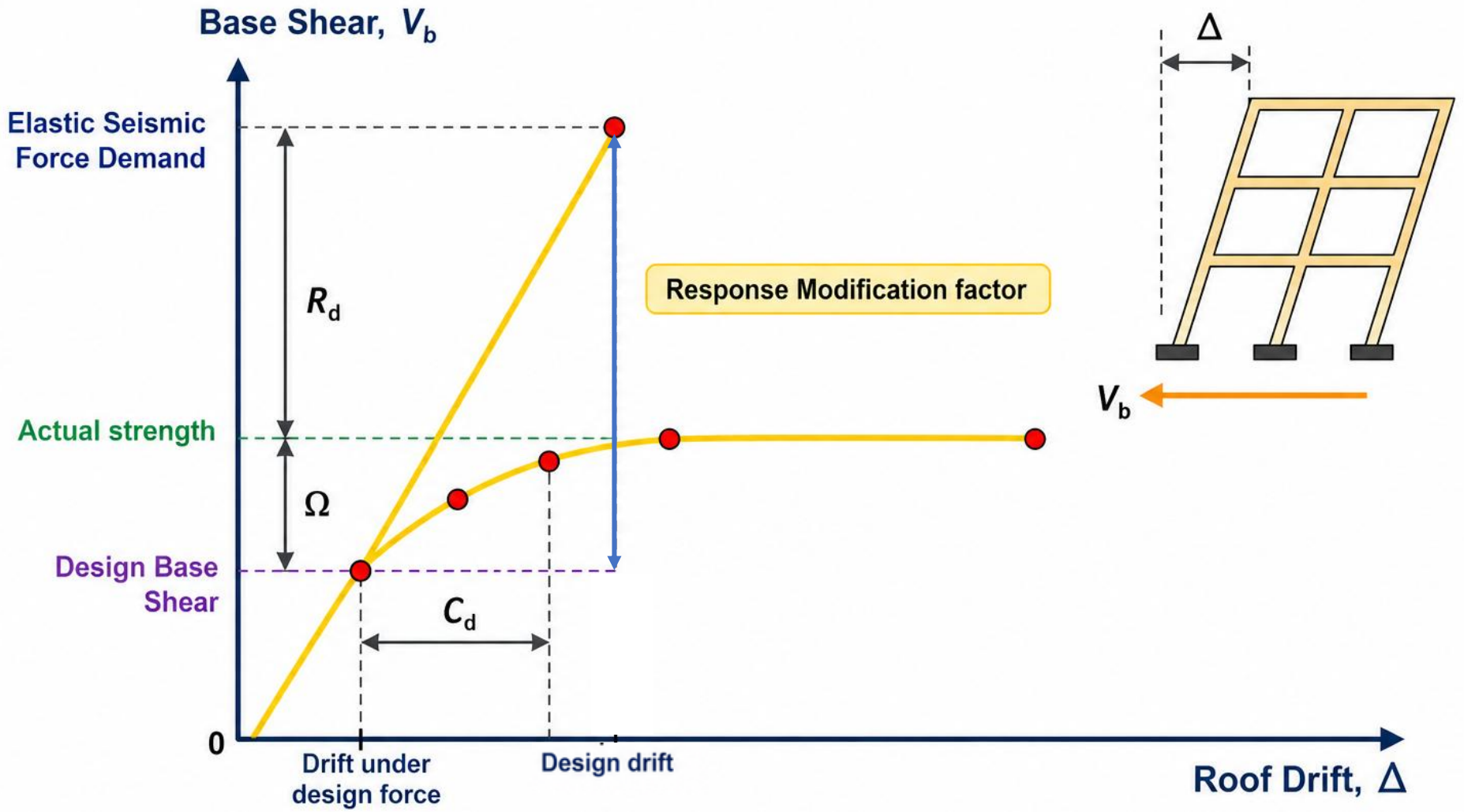
ภาพรวมขั้นตอนการออกแบบอาคารโครงสร้างเสาคานฐานรากคอนกรีตสำเร็จรูป

➢ ข้อกำหนดที่ใช้ในการออกแบบ



การออกแบบการเชื่อมต่อสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างเสา คาน ฐานรากคอนกรีตหล่อสำเร็จ

Inelastic Force-Deformation Curve



การออกแบบการเชื่อมต่อสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างเสา คาน ฐานรากคอนกรีตหล่อสำเร็จ



ตารางที่ 4.2-1 ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง R ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน Ω_0 และตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว C_d สำหรับระบบโครงสร้างต้านทานแรงด้านข้างแบบต่าง ๆ (มยผ. 1301/1302-61 [17] และ ASCE 7 -16 [7])

ระบบโครงสร้างโดยรวม	ระบบต้านแรงด้านข้าง	ตัวประกอบ			ประเภทการออกแบบ		
		R	Ω_0	C_d	ข	ค	ง
ระบบผนังรับน้ำหนักบรรทุกแนวดิ่ง (Bearing Wall System)	ผนังรับแรงเฉือนคอนกรีตหล่อสำเร็จแบบธรรมดา (ข้อ 4.3.2.1)	3	2.5	3	✓	X	X
	ผนังรับแรงเฉือนคอนกรีตหล่อสำเร็จที่มีการให้รายละเอียดความเหนียวปานกลาง (ข้อ 4.3.2.2)	4	2.5	4	✓	✓	X
	ผนังรับแรงเฉือนคอนกรีตหล่อสำเร็จที่มีความเหนียวพิเศษ (ข้อ 4.3.2.3)	5	2.5	5	✓	✓	50 ม.
ระบบโครงอาคาร (Building Frame System)	ผนังรับแรงเฉือนคอนกรีตหล่อสำเร็จแบบธรรมดา (ข้อ 4.3.2.1)	4	2.5	4	✓	X	X
	ผนังรับแรงเฉือนคอนกรีตหล่อสำเร็จที่มีการให้รายละเอียดความเหนียวปานกลาง (ข้อ 4.3.2.2)	5	2.5	4.5	✓	✓	X
	ผนังรับแรงเฉือนคอนกรีตหล่อสำเร็จที่มีความเหนียวพิเศษ (ข้อ 4.3.2.3)	6	2.5	5	✓	✓	50 ม.
ระบบโครงต้านแรงดัด (Moment Resisting Frame System)	โครงต้านแรงดัดคอนกรีตหล่อสำเร็จแบบธรรมดา (ข้อ 4.3.1.1)	3	3	2.5	✓	X	X
	โครงต้านแรงดัดคอนกรีตหล่อสำเร็จที่มีความเหนียวปานกลาง (ข้อ 4.3.1.1)	5	3	4.5	✓	✓	**
	โครงต้านแรงดัดคอนกรีตหล่อสำเร็จที่มีความเหนียวพิเศษ (ข้อ 4.3.1.2 – 4.3.1.4)	8	3	5.5	✓	✓	✓
เสายื่นจากฐานรากโดยเสามาเชื่อมต่อแบบยึดหมุน (Cantilevered Column Systems)	โครงต้านแรงดัดคอนกรีตหล่อสำเร็จแบบธรรมดา (ข้อ 4.3.1.1)	1	1.25	1	11 ม.	X	X
	โครงต้านแรงดัดคอนกรีตหล่อสำเร็จที่มีความเหนียวปานกลาง (ข้อ 4.3.1.1)	1.5	1.25	1.5	11 ม.	11 ม.	X

หมายเหตุ: ตัวเลขในหน่วยเมตรที่แสดงคือขีดจำกัดความสูงของอาคารที่ยอมให้ใช้ระบบต้านแรงด้านข้างนั้นได้ภายใต้ประเภทการออกแบบต่าง ๆ (ASCE 7-16 [7])

X = ไม่อนุญาต

** = ให้เป็นไปตามหัวข้อ 2.3.1.2 และ 2.3.1.3 ในมาตรฐาน มยผ. 1301/1302-61 [17]

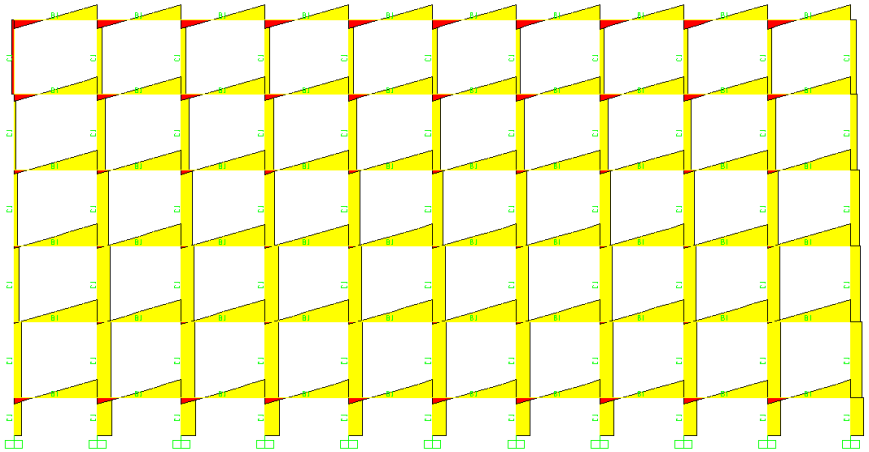
การออกแบบการเชื่อมต่อสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างเสา คาน ฐานรากคอนกรีตหล่อสำเร็จ

➢ การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเสา คาน ฐานรากคอนกรีตหล่อสำเร็จ

Shear diagram

$U_1 = 0.75(1.4D + 1.7L) + \Omega_0 E$

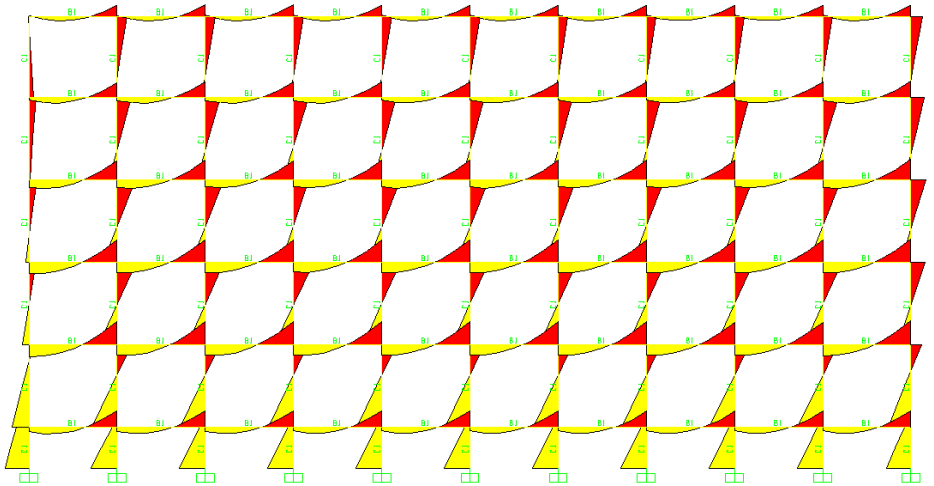
$U_2 = 0.9D + \Omega_0 E$



Moment diagram

$U_1 = 0.75(1.4D + 1.7L) + 1.0E$

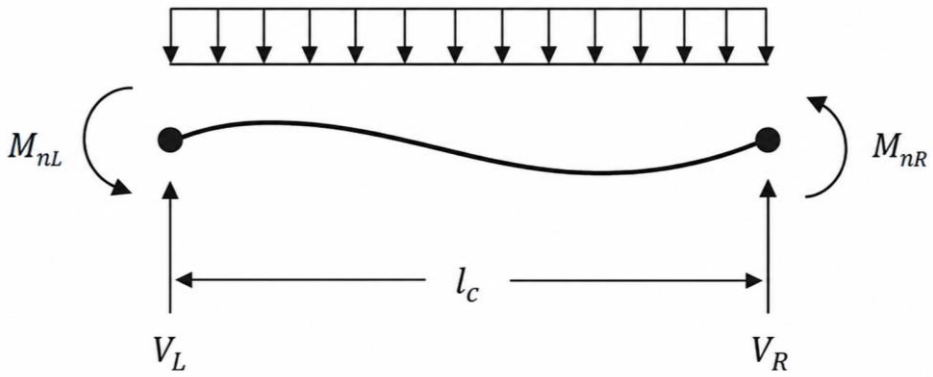
$U_2 = 0.9D + 1.0E$

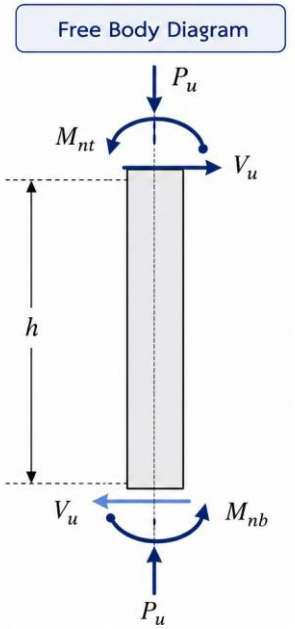


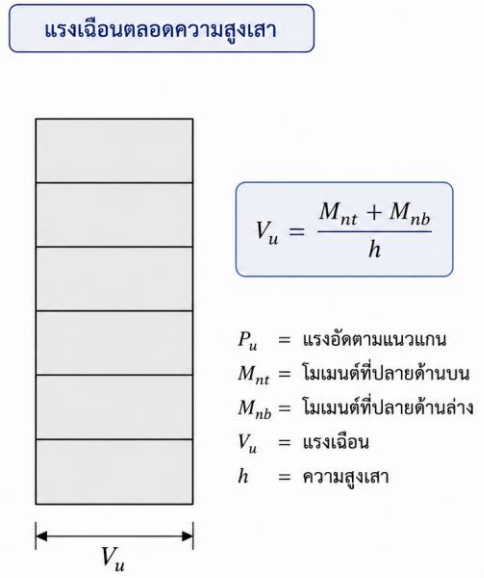
การออกแบบการเชื่อมต่อสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างเสา คาน ฐานรากคอนกรีตหล่อสำเร็จ

➢ การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเสา คาน ฐานรากคอนกรีตหล่อสำเร็จ

$$w_u = 0.75(1.4w_D + 1.7w_L)$$

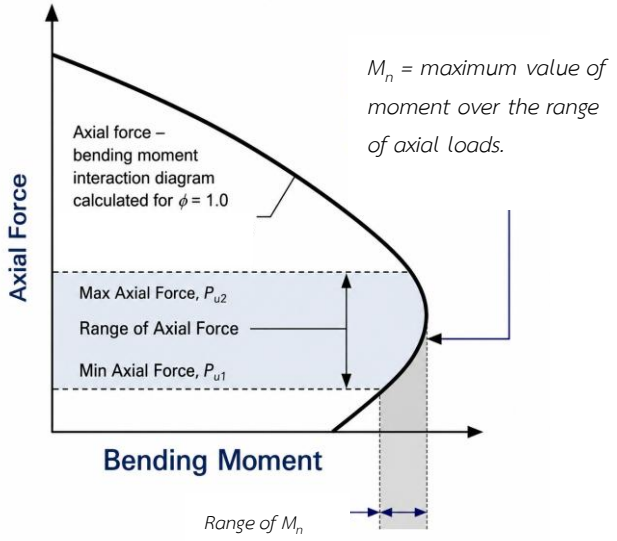






$$V_u = \frac{M_{nt} + M_{nb}}{h}$$

P_u = แรงอัดตามแนวแกน
M_{nt} = โมเมนต์ที่ปลายด้านบน
M_{nb} = โมเมนต์ที่ปลายด้านล่าง
V_u = แรงเฉือน
h = ความสูงเสา



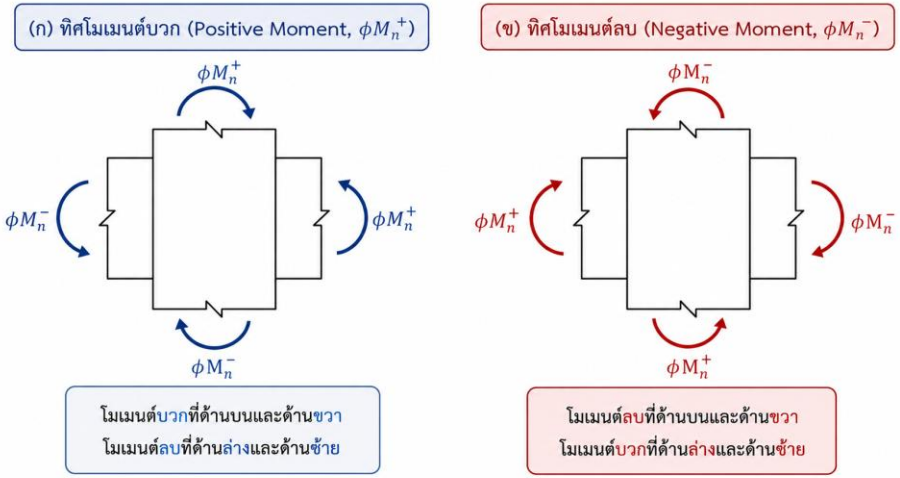
$$V_{b1} = \frac{M_{nL}+M_{nR}}{l_c} + \frac{0.75(1.4W_D+1.7W_L)}{2} l_c$$

$V_{c2\text{-}1} = 0.75(1.4V_D + 1.7V_L) + \Omega_0 V_E$ หรือ $0.75(1.4V_D + 1.7V_L) + 1.0V_{E\text{-}MRSA}$

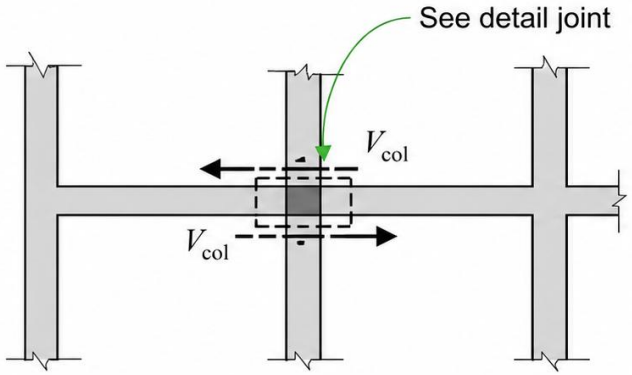
$V_{c2\text{-}2} = 0.9V_D + \Omega_0 V_E$ หรือ $0.9V_D + 1.0V_{E\text{-}MRSA}$

การออกแบบการเชื่อมต่อสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างเสา คาน ฐานรากคอนกรีตหล่อสำเร็จ

➢ การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเสา คาน ฐานรากคอนกรีตหล่อสำเร็จ

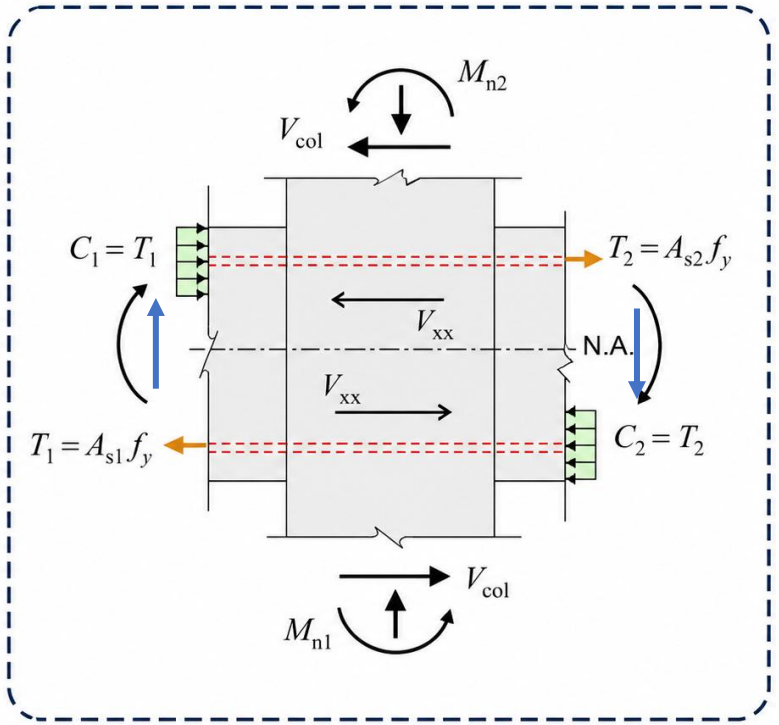


$$(\emptyset_c M_n^+ + \emptyset_c M_n^-)_{column} \geq (\emptyset_b M_n^+ + \emptyset_b M_n^-)_{beam}$$

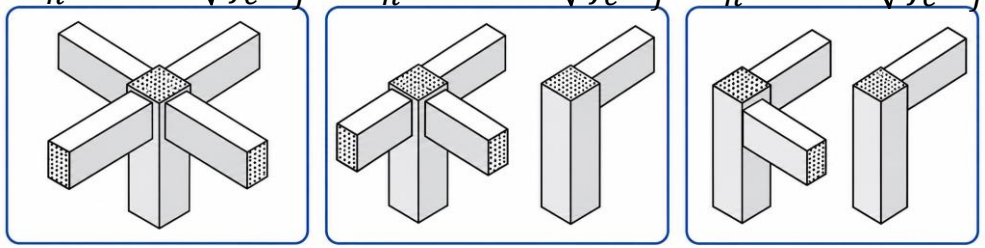


Moment-resisting frame

$$\begin{aligned} V_j &= C_2 + T_2 - V_{col} \\ &= T_1 + T_2 - V_{col} \\ &= (A_{s1} f_y + A_{s2} f_y) - V_{col} \end{aligned}$$



$V_n = 1.7\sqrt{f_c'} A_j$ $V_n = 1.25\sqrt{f_c'} A_j$ $V_n = 1.0\sqrt{f_c'} A_j$



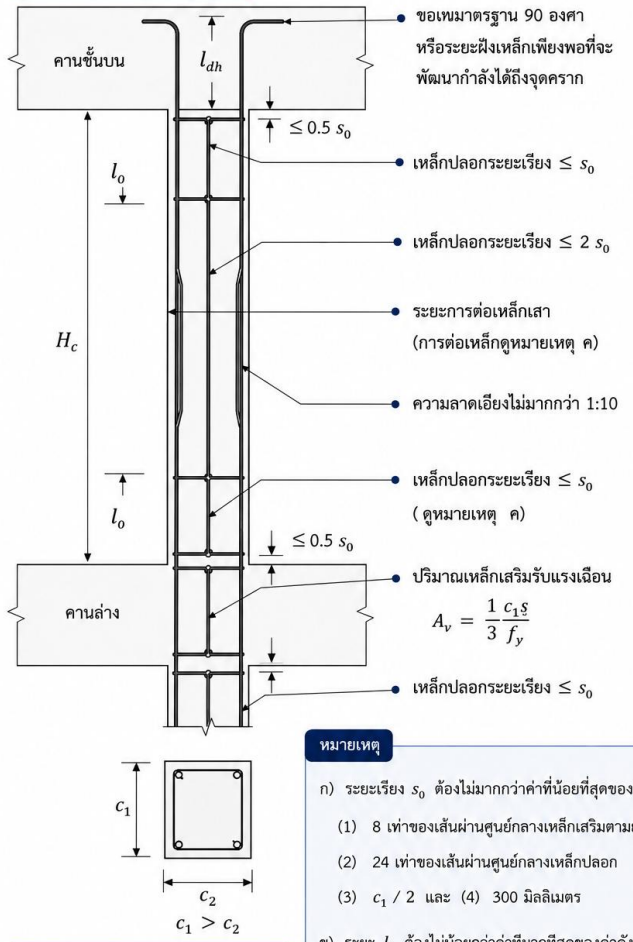
ก ข้อต่อที่ได้รับการยึดรัดจากคานทั้ง 4 ด้าน

ข ข้อต่อที่ได้รับการยึดรัดจากคาน 3 ด้าน หรือคาน 2 ด้านที่อยู่ตรงข้ามกัน

ค ข้อต่ออื่น ๆ

การออกแบบการเชื่อมต่อสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างเสา คาน ฐานรากคอนกรีตหล่อสำเร็จ

รายละเอียดการต่อเหล็กเสา



หมายเหตุ

ก) ระยะเรียง s_0 ต้องไม่มากกว่าค่าที่น้อยที่สุดของค่าดังต่อไปนี้

(1) 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมตามยาวที่มีขนาดเล็กสุด

(2) 24 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กปลอก

(3) $c_1 / 2$ และ (4) 300 มิลลิเมตร

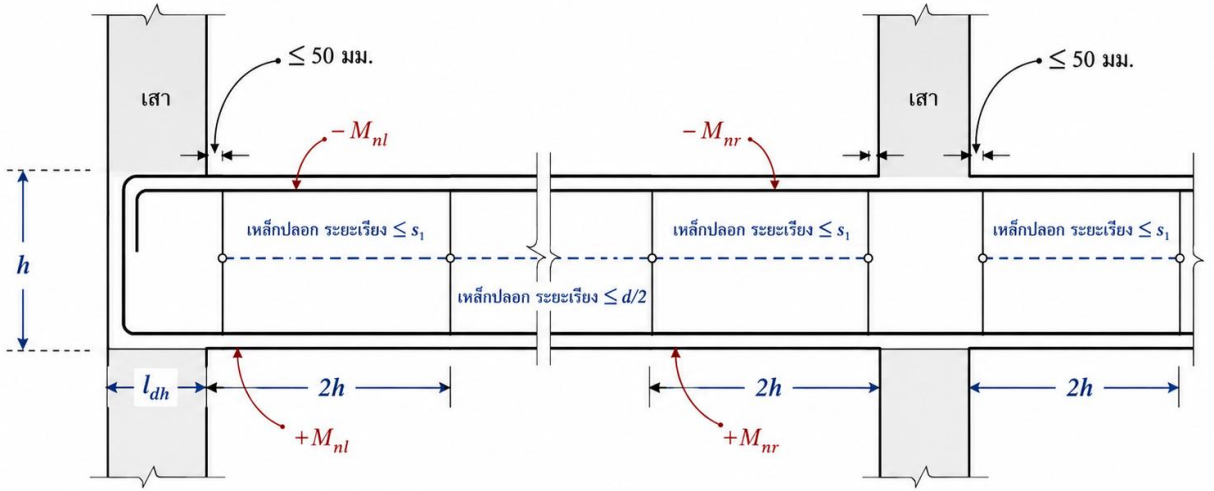
ข) ระยะ l_0 ต้องไม่น้อยกว่าค่าที่มากที่สุดของค่าดังต่อไปนี้

(1) $H/6$ (2) c_1 และ (3) 500 มิลลิเมตร

ค) การต่อเหล็กเสาให้ต่อบริเวณช่วงกลางความสูงเสา

ง) อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัด A_s / A_g ของเสา ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 1 และไม่ควรมากกว่าร้อยละ 6

s_0	=	ระยะเรียงของเหล็กปลอก
l_o	=	ระยะต่อเหล็กเสา
l_{dh}	=	ระยะฝังเหล็กหรือระยะงอปลาย
H_c	=	ความสูงช่วงต่อเหล็กเสา
c_1, c_2	=	ด้านของหน้าตัดเสา ($c_1 > c_2$)
f_y	=	กำลังครากของเหล็กเสริม



หมายเหตุ

ก) ระยะเรียงของเหล็กปลอก s_1 ต้องไม่มากกว่าค่าที่น้อยสุดของค่าดังต่อไปนี้

(1) 1 ใน 4 ของความลึกประสิทธิผล

(2) 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมตามความยาวที่มีขนาดเล็กสุด

(3) 24 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กปลอก และ

(4) 300 มิลลิเมตร

ข) กำลังต้านโมเมนต์ของคานต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

(1) $+M_{nl} \geq (1/3)(-M_{nl})$

(2) $+M_{nr} \geq (1/3)(-M_{nr})$ และ

(3) $+M_n$ และ $-M_n$ ที่หน้าตัดใดๆ $\geq (1/5)$ ของค่าสูงสุดระหว่าง $-M_{nl}$ และ $-M_{nr}$

การออกแบบการเชื่อมต่อสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างเสา คาน ฐานรากคอนกรีตหล่อสำเร็จ

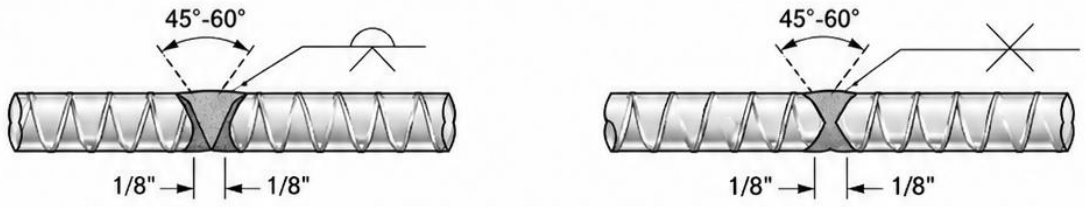
วิธีการเชื่อมต่อที่นิยมใช้ในอาคารสำเร็จรูป

1) *การเชื่อมทาบ (Welding)*: นิยมใช้และประหยัด
2) *การต่อทาบเหล็กเสริม (Lap Splice)*: ต้องมั่นใจว่ามีการโอบรัดด้วยเหล็กปลอกที่ดี
3) *การต่อเหล็กเสริมผ่านท่อ Corrugated*: นิยมใช้สำหรับการเชื่อมต่อเสากับเสาหรือเสากับฐานราก โดยฝังเหล็กเสริมในท่อและกรอกด้วยปูน Non-Shrink Grout ที่มีกำลังอัดสูง

การออกแบบการเชื่อมต่อสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างเสา คาน ฐานรากคอนกรีตหล่อสำเร็จ

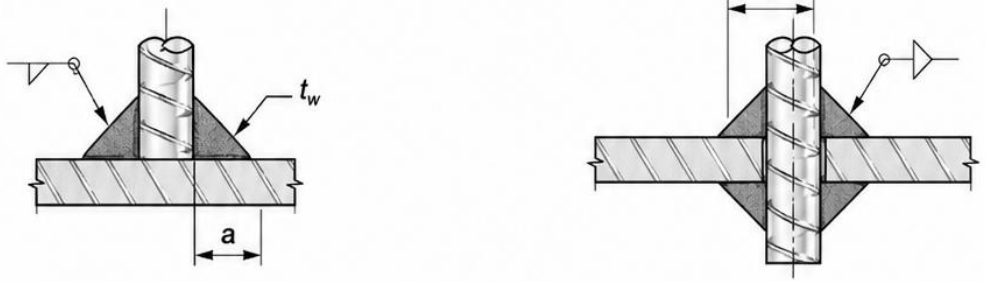
$$\phi R_n = \phi F_{nw}.A_{we}.k_{ds}$$

1. Full-penetration welds

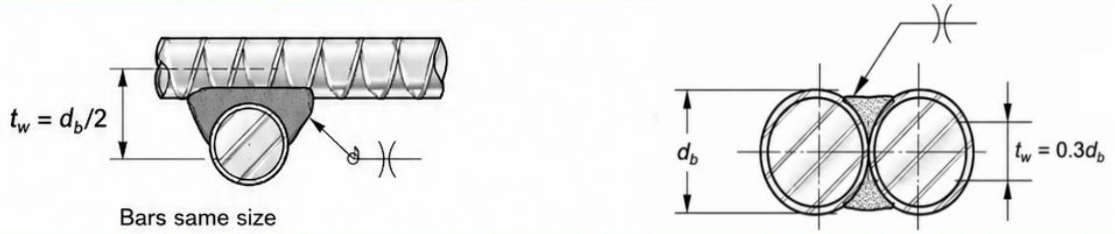


Note: As shown for #9 and larger bars, #8 and smaller bars require appropriate backing.

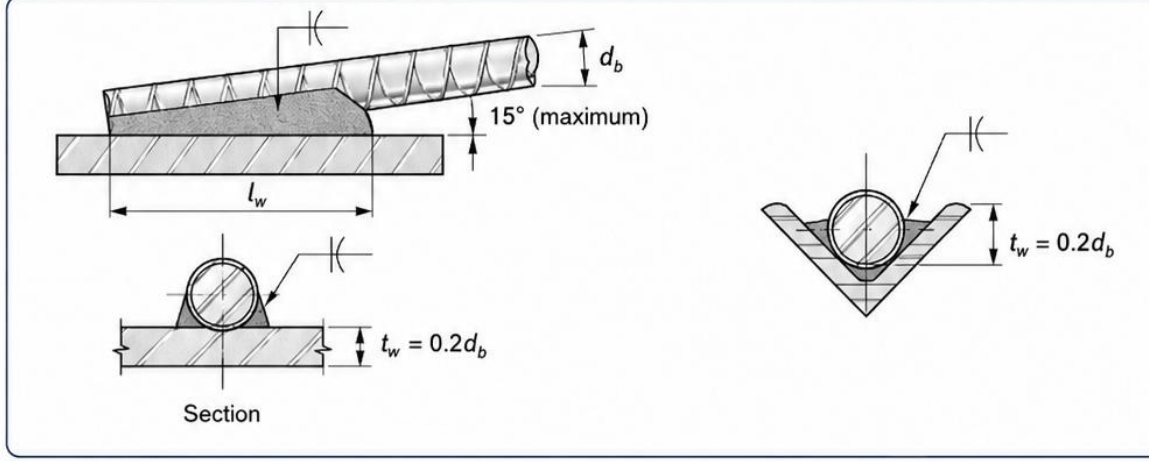
2. Fillet welds



3. Flare-V-groove welds



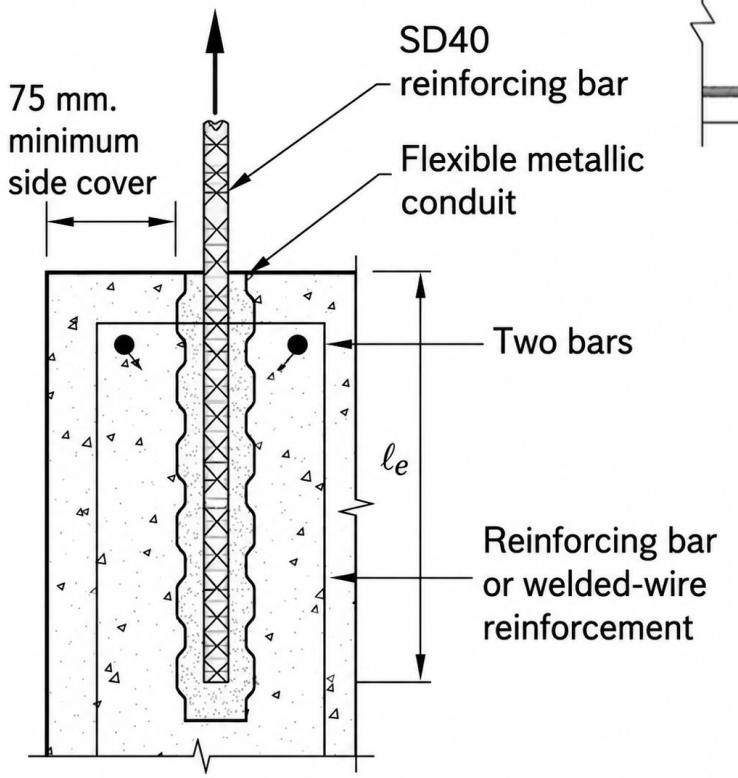
4. Flare-bevel-groove welds

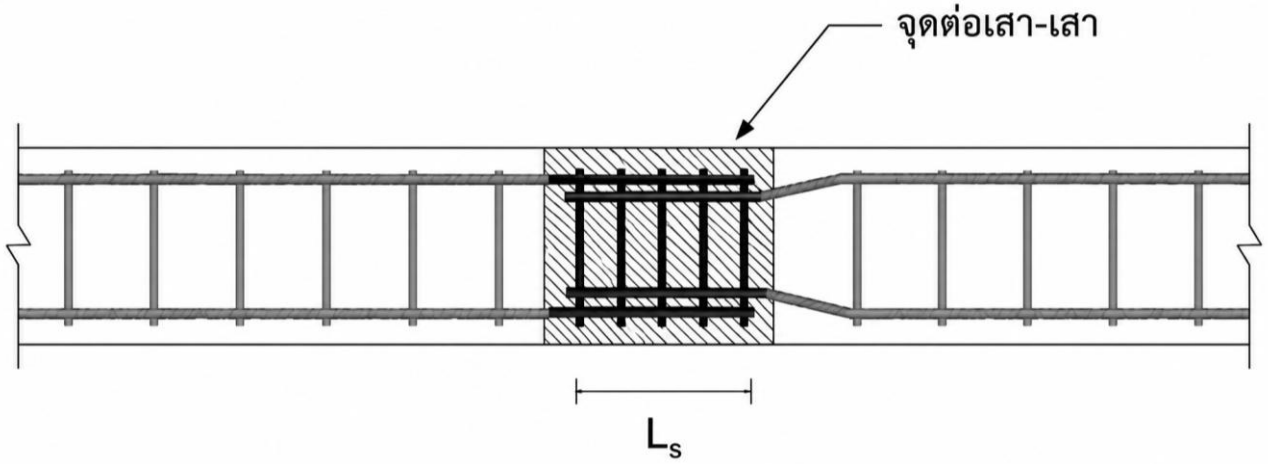


$l_d = \left(\frac{0.8f_y}{1.4\sqrt{f'_c}}\right) d_b$ สำหรับ d_b ไม่เกิน 22 mm

$l_d = \left(\frac{f_y}{1.4\sqrt{f'_c}}\right) d_b$ สำหรับ d_b ใหญ่กว่า 22 m

การออกแบบการเชื่อมต่อสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างเสา คาน ฐานรากคอนกรีตหล่อสำเร็จ





$$L_s = \frac{f_y \psi_t}{2.75\sqrt{f_c'}} d_b$$

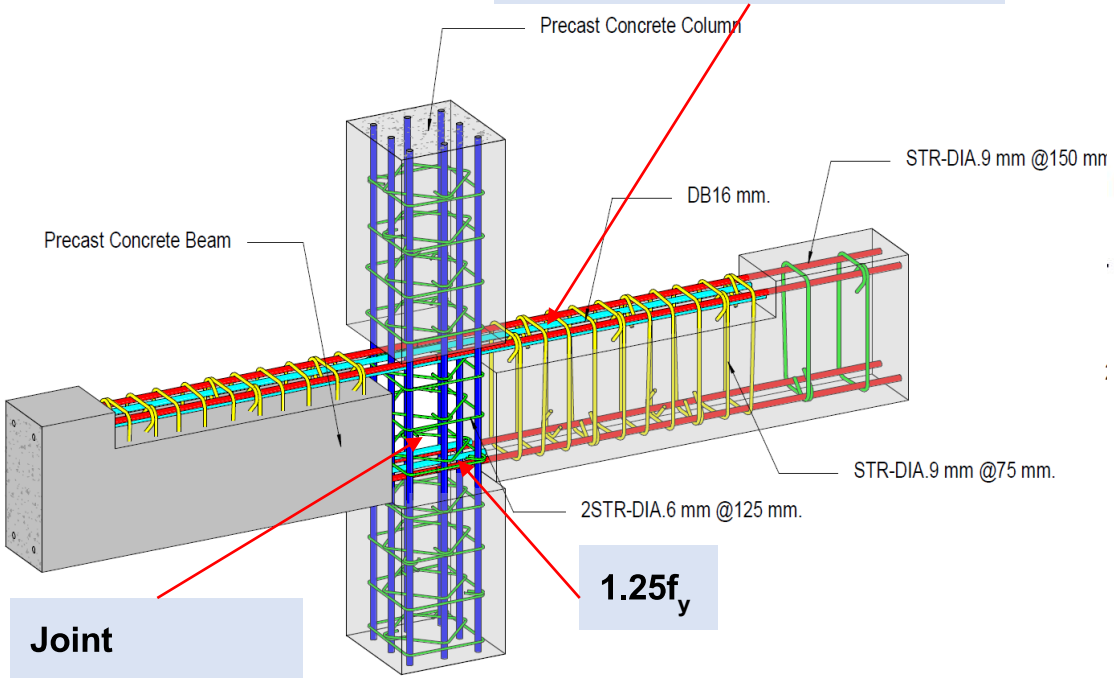
$$\frac{A_{tr}}{s} = \frac{10n}{f_{yt}}(2.5d_b - c_b)$$

ขนาดเหล็ก (mm)	ระยะฝังเหล็กภายในท่อ (mm)
10	300
12	300
16	300
20	375
25	675

การออกแบบการเชื่อมต่อสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างเสา คาน ฐานรากคอนกรีตหล่อสำเร็จ

➢ การจุดต่อโครงสร้างชิ้นส่วนหล่อสำเร็จ

hoops shall be provided over a length of at least 2h

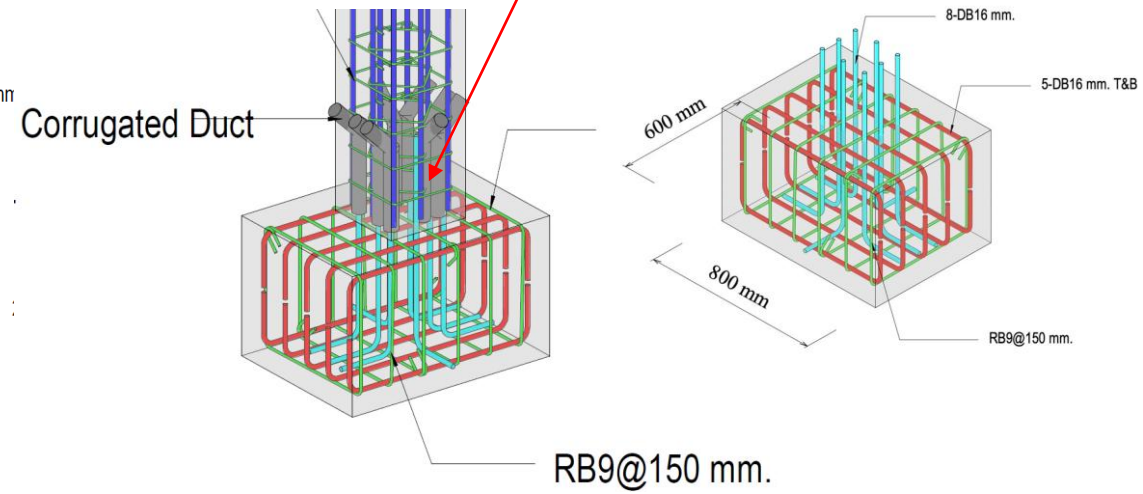


1.25f_y

Joint reinforcement

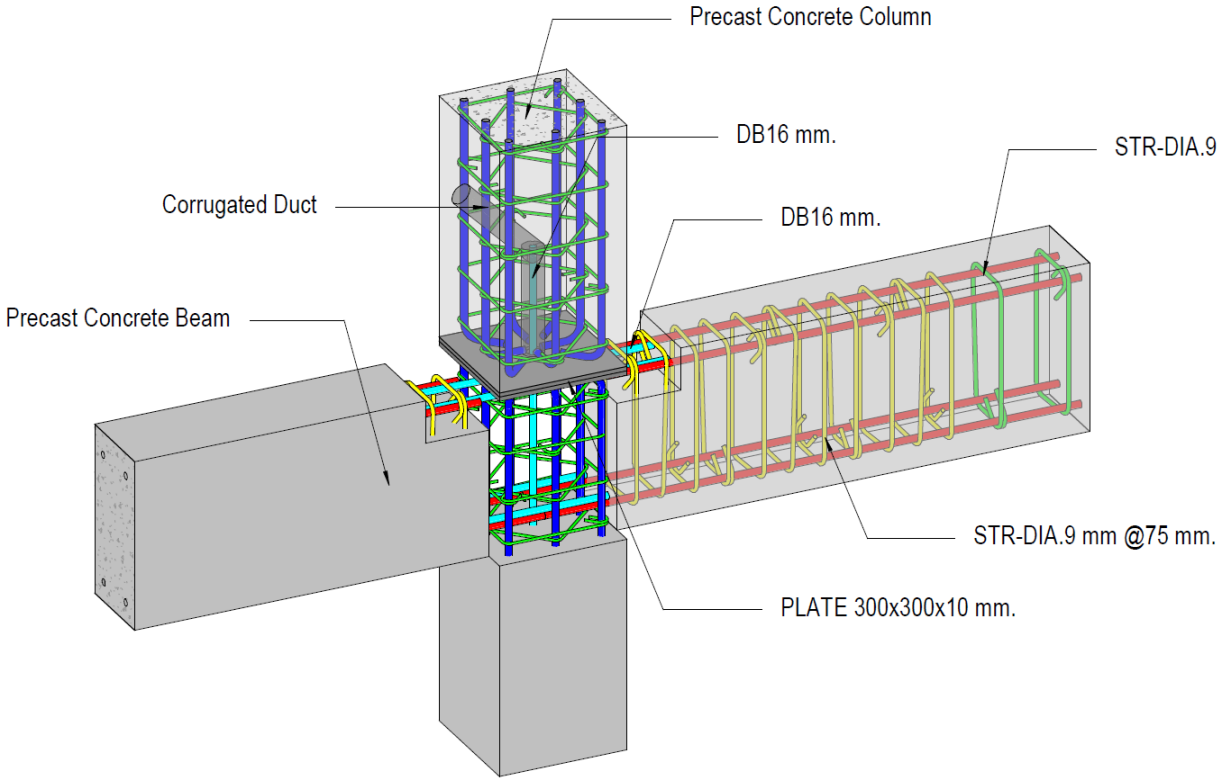
$$\sum M_{nc} \geq \sum M_{nb}$$

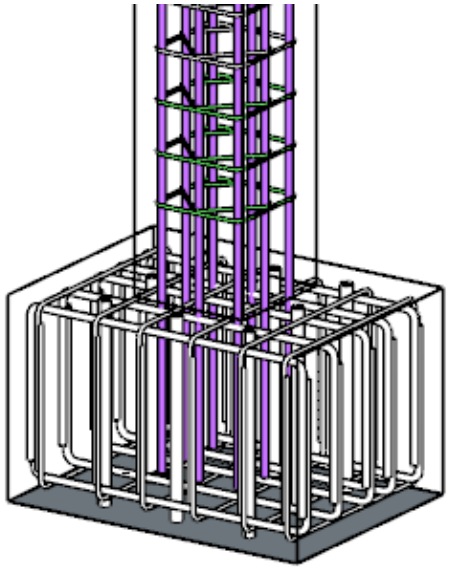
hoops shall be provided over a length of at least l_0

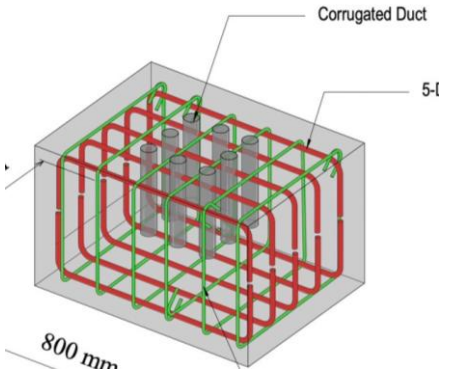


การออกแบบการเชื่อมต่อสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างเสา คาน ฐานรากคอนกรีตหล่อสำเร็จ

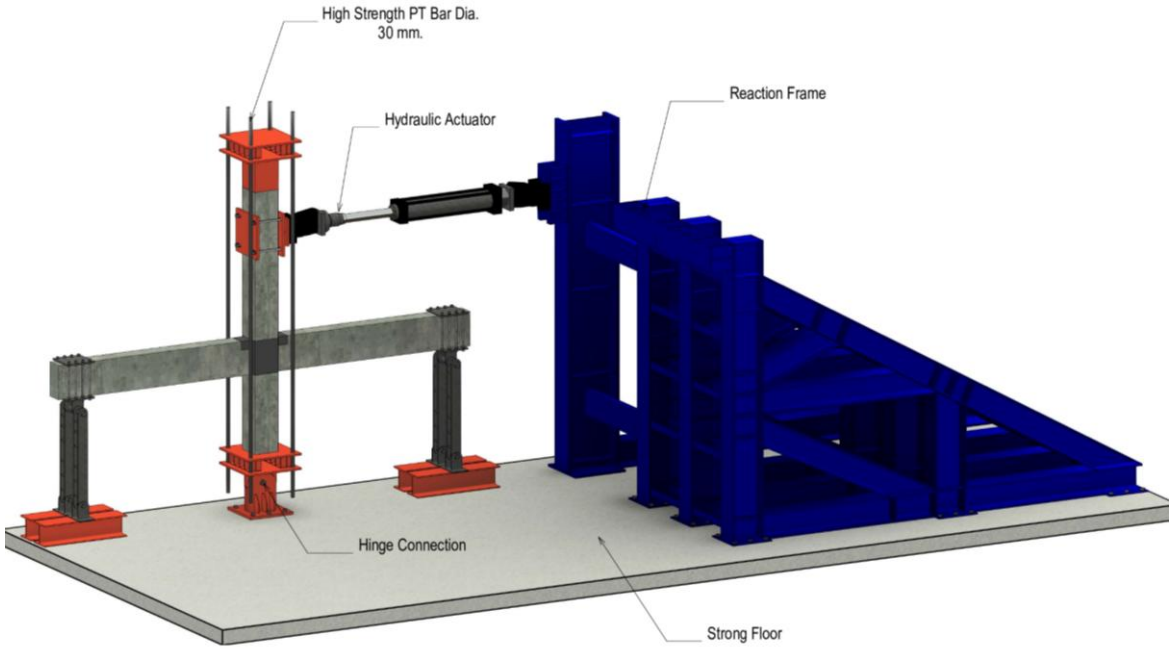
➢ การจุดต่อโครงสร้างชิ้นส่วนหล่อสำเร็จ

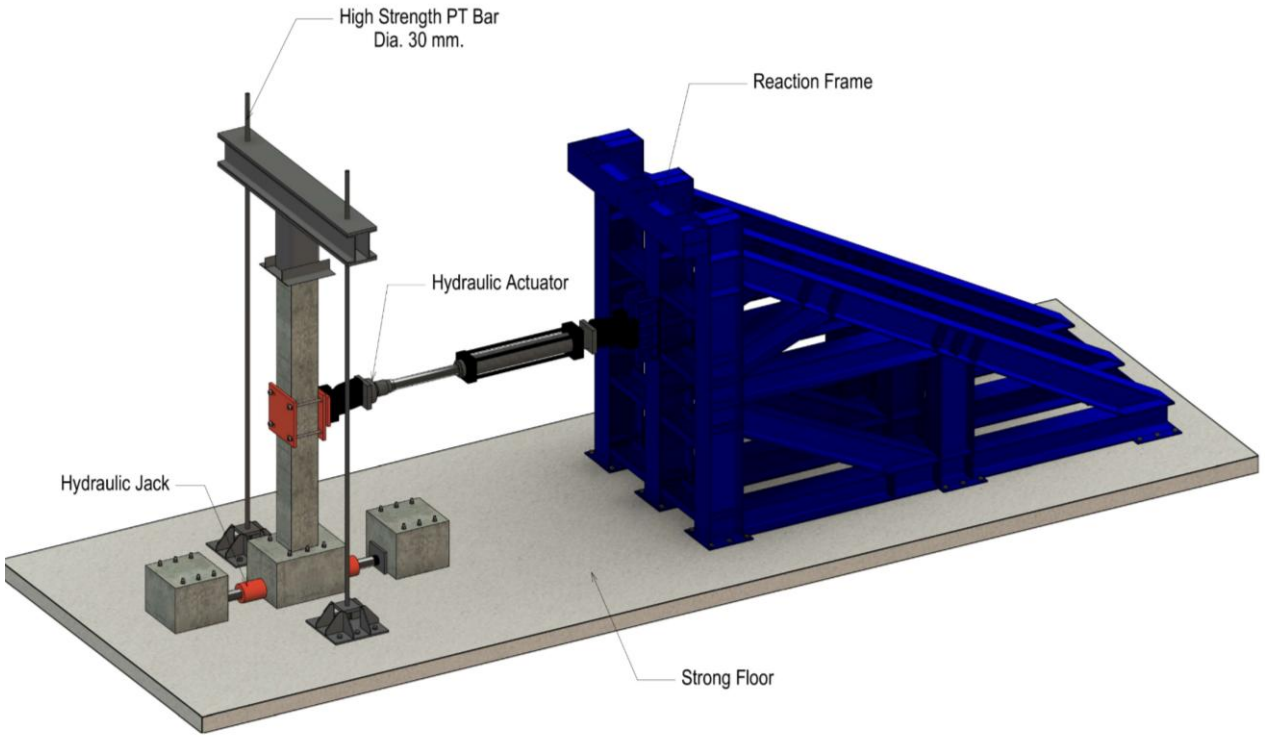




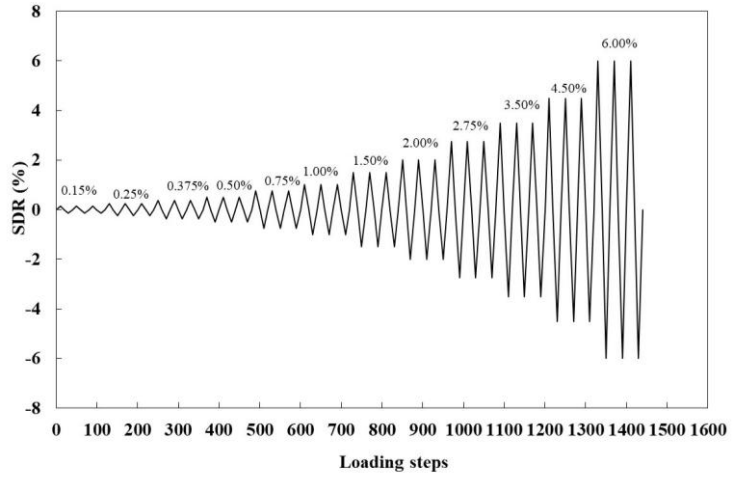


การทดสอบพฤติกรรมของโครงสร้างเสาคานฐานราก สำเร็จรูปและเกณฑ์การยอมรับ

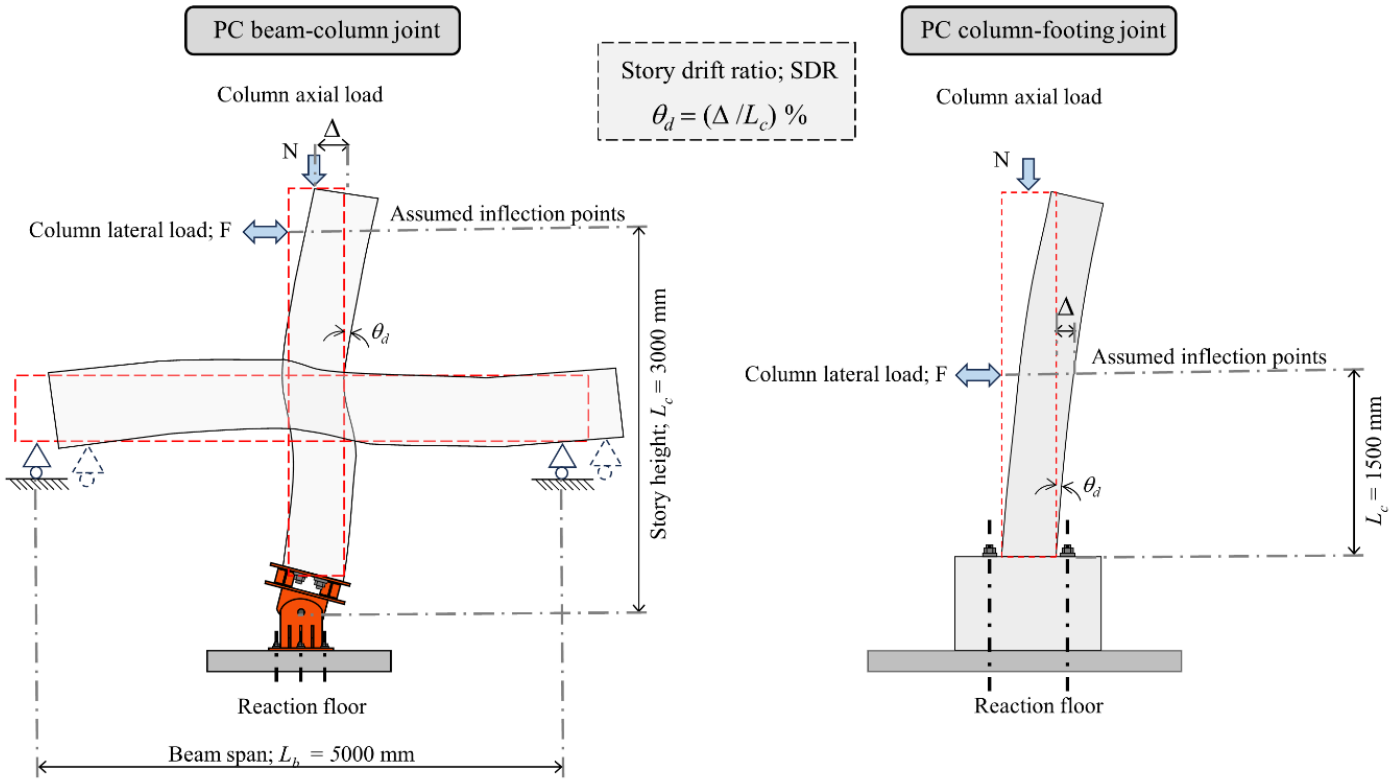




การทดสอบพฤติกรรมของโครงสร้างเสาคานฐานราก สำเร็จรูปและเกณฑ์การยอมรับ







การทดสอบพฤติกรรมของโครงสร้างเสาคานฐานรากสำเร็จรูปและเกณฑ์การยอมรับ

เกณฑ์การยอมรับตามมาตรฐาน ACI 374.1

(1) Strength

(2) Energy dissipation

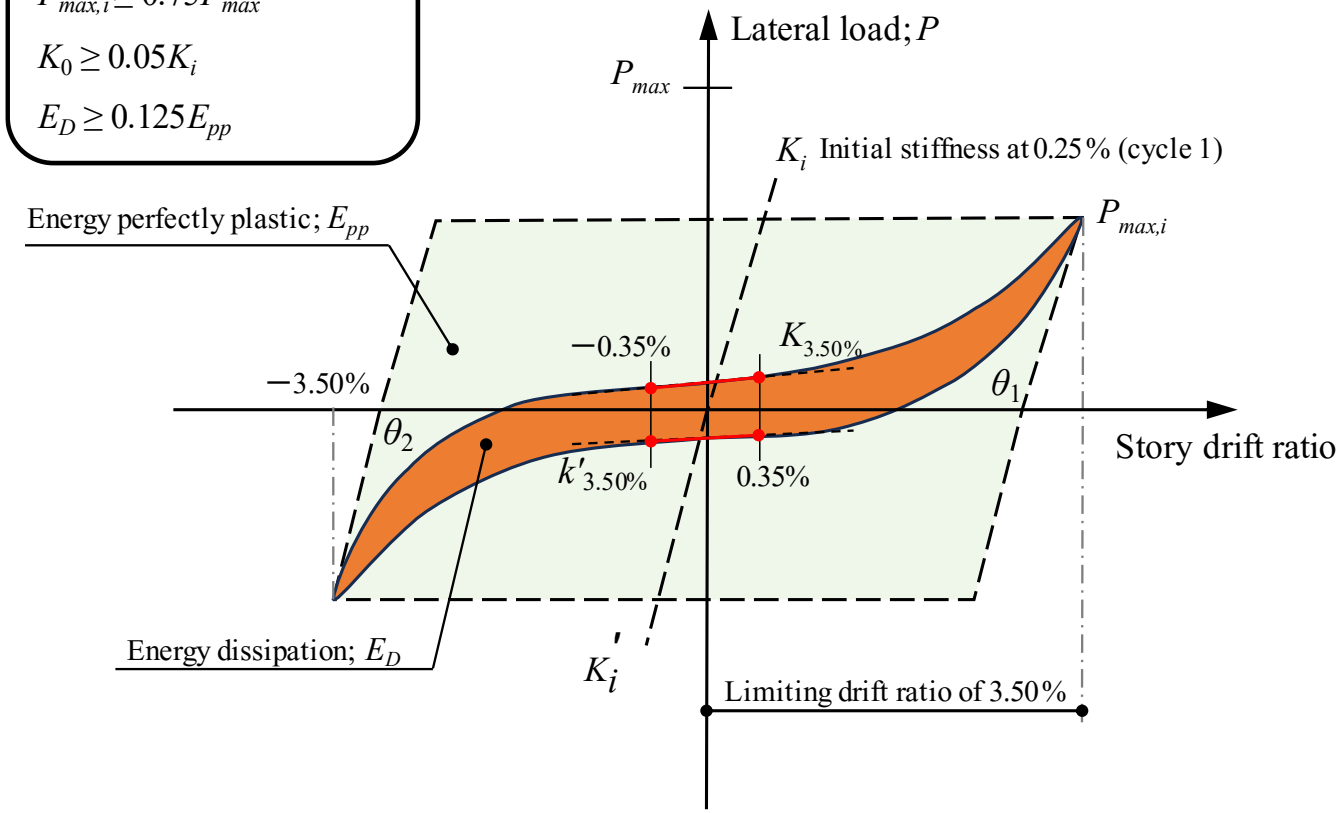
(3) Pinching stiffness

For acceptance criteria

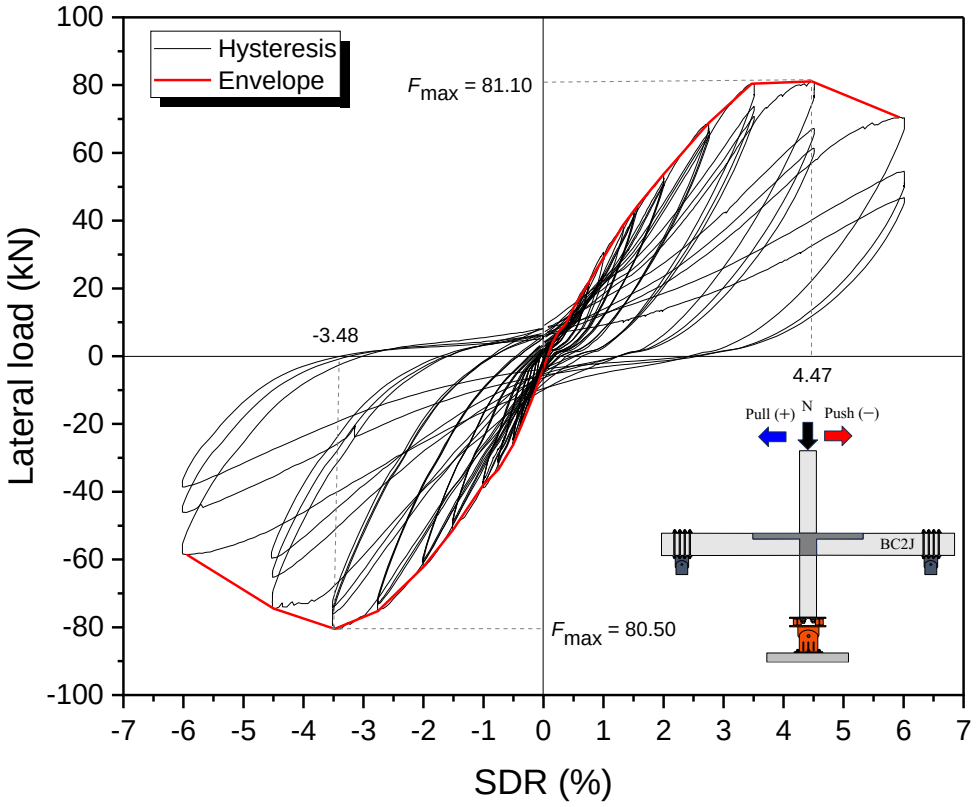
$P_{max,i} \geq 0.75 P_{max}$

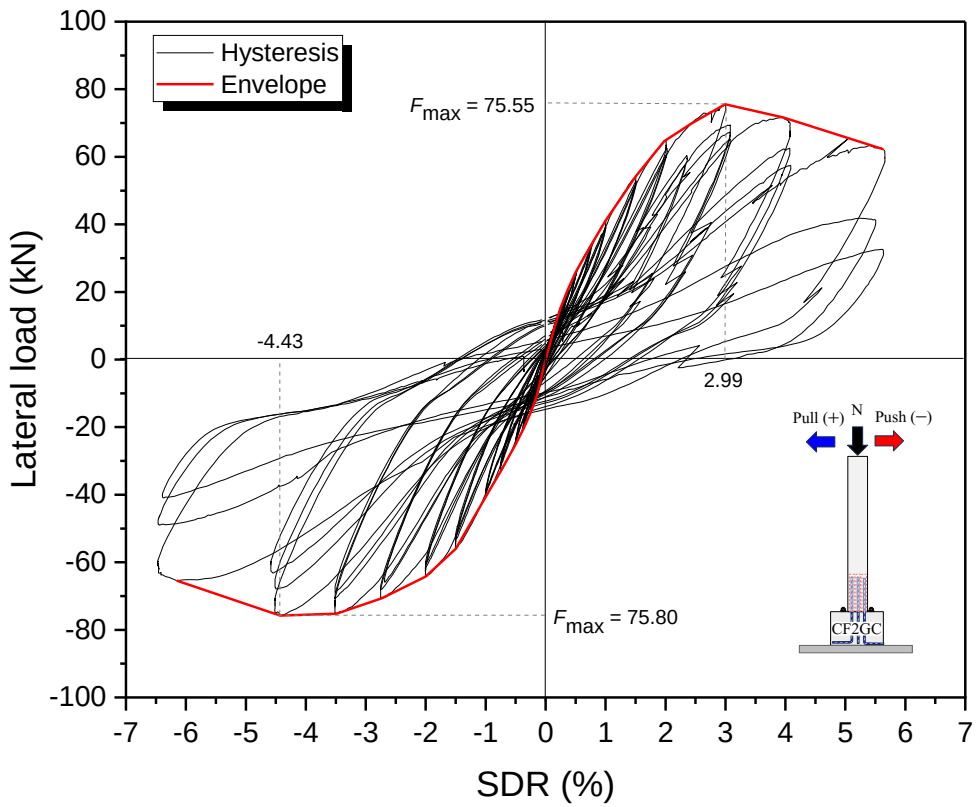
$K_0 \geq 0.05 K_i$

$E_D \geq 0.125 E_{pp}$



การทดสอบพฤติกรรมของโครงสร้างเสาคานฐานราก สำเร็จรูปและเกณฑ์การยอมรับ



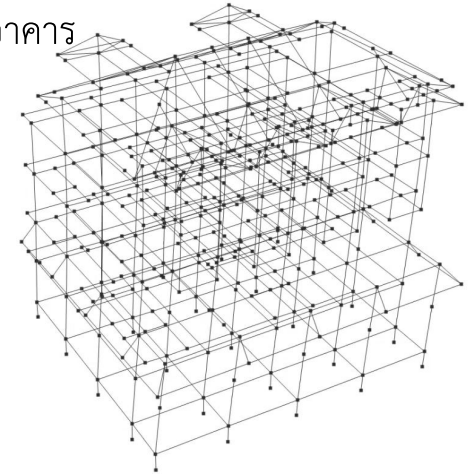


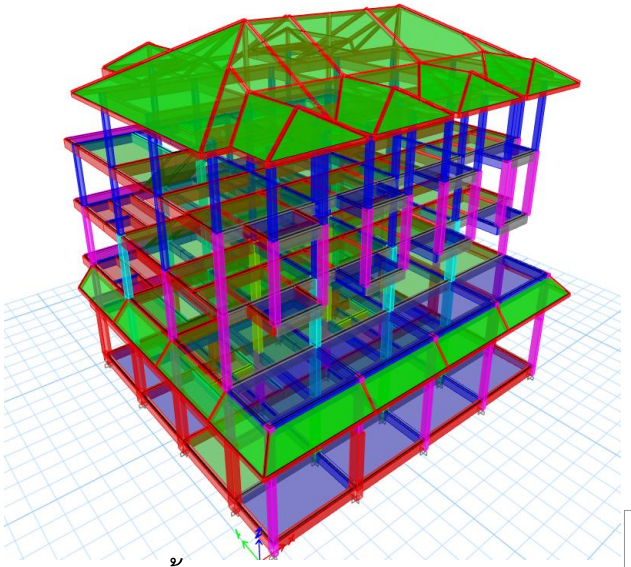
การทดสอบพฤติกรรมของโครงสร้างเสาคานฐานราก สำเร็จรูปและเกณฑ์การยอมรับ

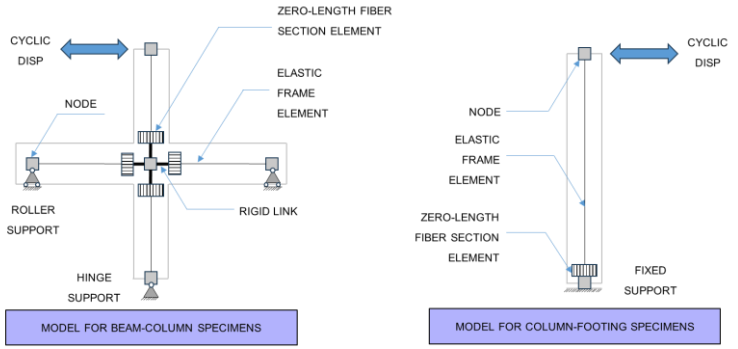
ตัวอย่างทดสอบ	เกณฑ์การยอมรับ		ผลทดสอบ	ค่าที่ต้องการ	ผ่านเกณฑ์
โครงสร้างเชื่อมต่อเสา-คาน	ค่าแรงกระทำที่ 3.5% Drift (kN)	+	70.75	60.82 ($0.75P_{max}$)	✓
		–	74.20	60.38 ($0.75P_{max}$)	✓
	ค่าอัตราส่วนการสลายพลังงาน		0.21	0.125	✓
	ค่า Secant Stiffness (kN/mm)		0.33	0.09 ($0.05K_i$)	✓
โครงสร้างเชื่อมต่อเสา-ฐานราก	ค่าแรงกระทำที่ 3.5% Drift (kN)	+	65.30	56.66 ($0.75P_{max}$)	✓
		–	68.95	56.85 ($0.75P_{max}$)	✓
	ค่าอัตราส่วนการสลายพลังงาน		0.18	0.125	✓
	ค่า Secant Stiffness (kN/mm)		0.59	0.258 ($0.05K_i$)	✓

ภาพรวมขั้นตอนการออกแบบ

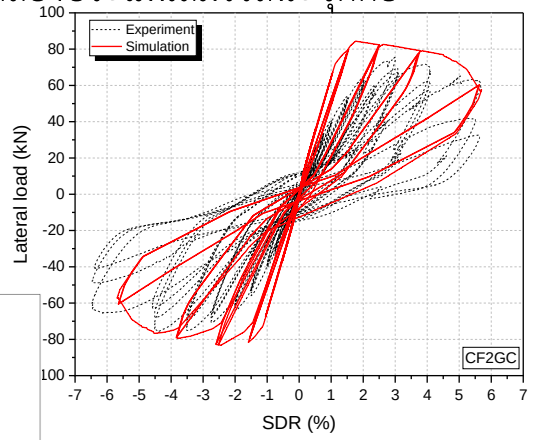
1. ออกแบบอาคาร







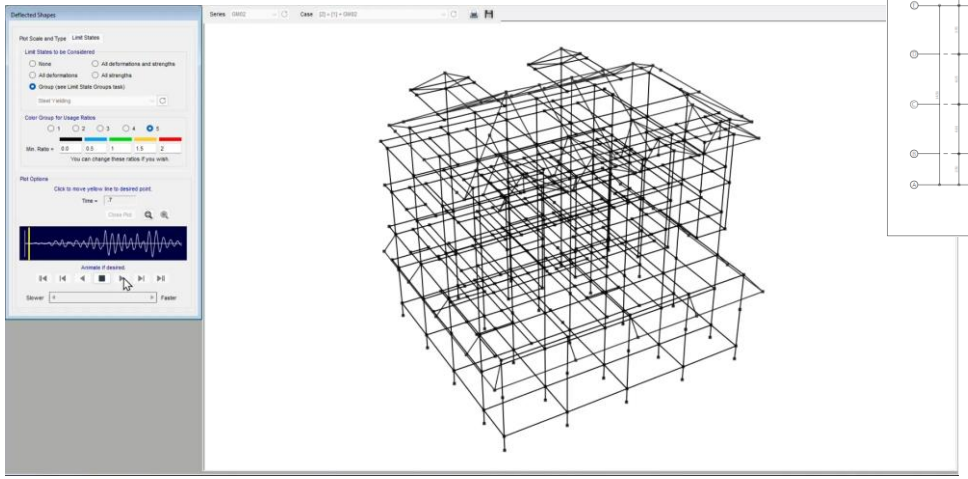
3. สร้างแบบจำลองประเมินสมรรถนะจุดต่อ



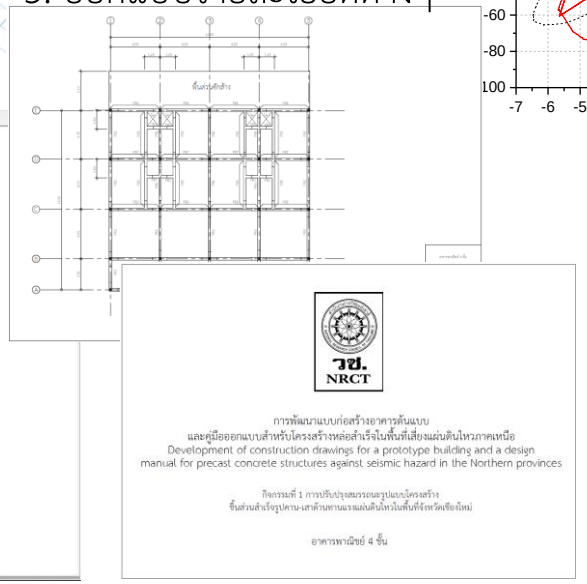
2. ทดสอบสมรรถนะของจุดต่อ



4. ประเมินสมรรถนะอาคารทั้งหลัง



5. ออกแบบรายละเอียดต่างๆ



สรุปเนื้อหาการบรรยาย

- ระบบรอยต่อคอนกรีตสำเร็จรูปสามารถออกแบบให้มีสมรรถนะต้านทานแผ่นดินไหวได้ โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มความซับซ้อนของกระบวนการก่อสร้างมากนัก
- การออกแบบรอยต่อควรส่งเสริมให้เกิดกลไกการเสียหายแบบ Strong Column–Weak Beam เพื่อจำกัดความเสียหายให้อยู่ในตำแหน่งที่ควบคุมได้
- แนวทางการออกแบบรอยต่อสำเร็จรูปควรคำนึงถึงทั้ง ความสามารถรับแรง ความเหนียว ความสามารถในการสลายพลังงาน และความง่ายในการก่อสร้างควบคู่กัน โดยใช้หลักการออกแบบที่เลียนแบบระบบหล่อในที่
- การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปไม่ควรถูกจำกัดด้วยรูปแบบรอยต่อ แต่ควรถูกกำหนดด้วยสมรรถนะที่พิสูจน์ได้ โดยรอยต่อสามารถออกแบบได้หลากหลาย ตราบใดที่ผ่านเกณฑ์การประเมินด้านพฤติกรรมแผ่นดินไหวตาม ACI 374
- ผลการศึกษาสนับสนุนศักยภาพของระบบคอนกรีตสำเร็จรูปสำหรับการประยุกต์ใช้ในอาคารเขตแผ่นดินไหวระดับปานกลางของประเทศไทย

3. แนวทางการออกแบบกำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จต้านแผ่นดินไหว

รศ.ดร.ชยานนท์ หรรษภิญโญ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

เอกสารบรรยาย และเอกสารอ้างอิงประกอบ

เอกสารบรรยาย

มยผ.1108-65 มาตรฐานงานก่อสร้างอาคารด้วยระบบโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูป

มยผ. 1305-65 มาตรฐานประกอบการออกแบบอาคาร ที่ก่อสร้างด้วยระบบโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูป เพื่อต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว

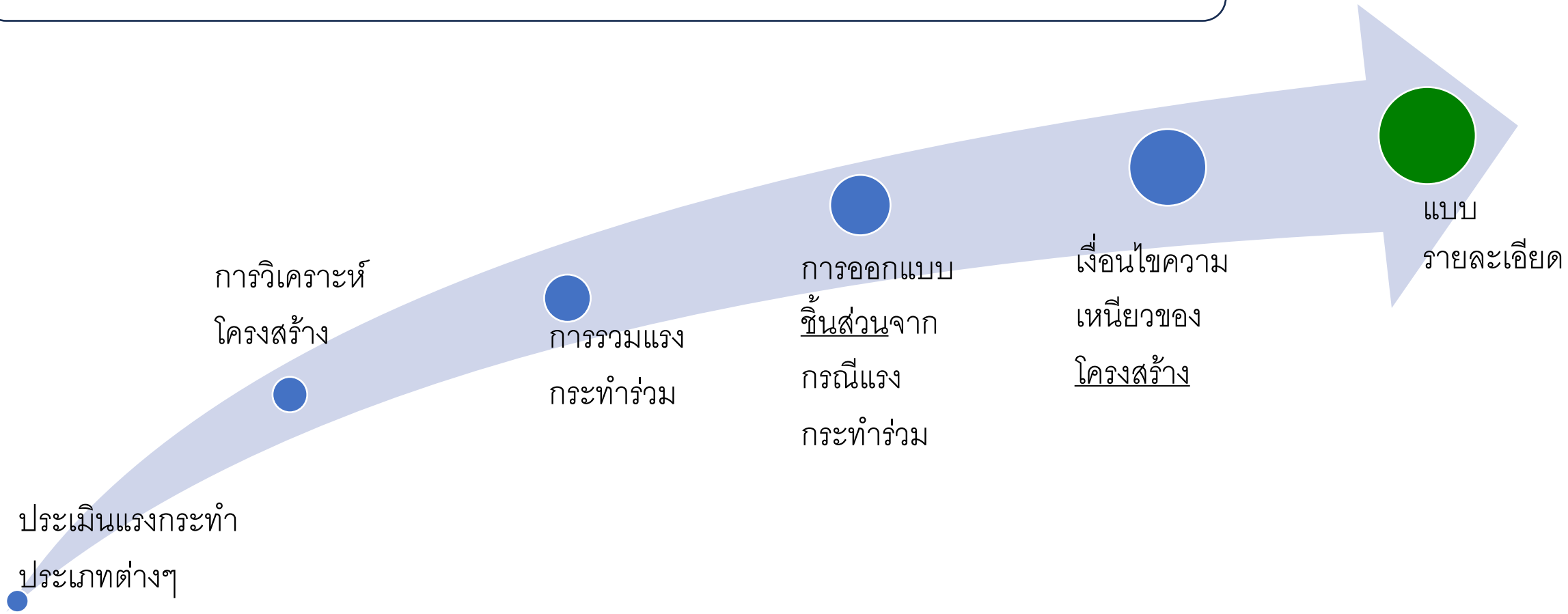
https://www.google.com/

ACI318-25

เนื้อหาบรรยายส่วนที่ 3

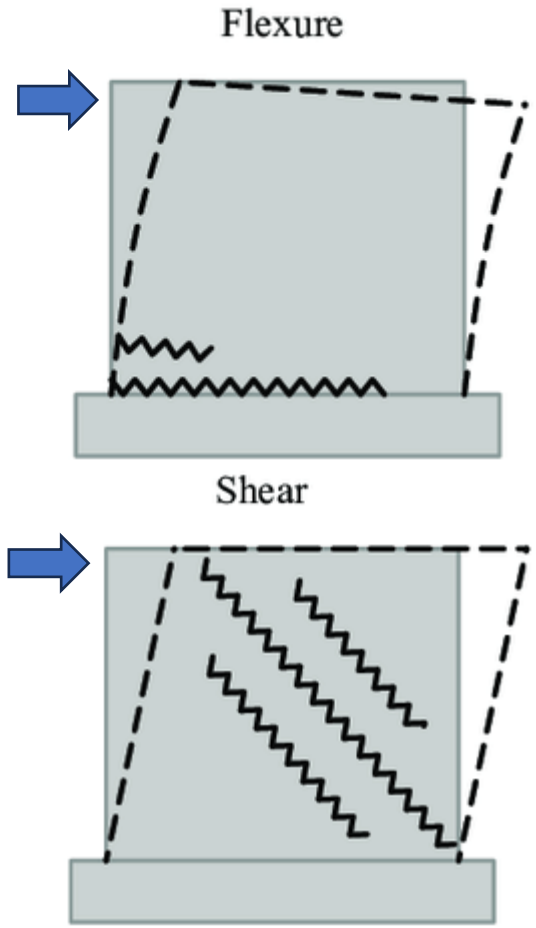
1. แนวคิดการวิเคราะห์และออกแบบ 50%
2. การออกแบบชิ้นส่วนผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก 20%
3. การวิเคราะห์โครงสร้างผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จที่พิจารณาจุดต่อ 30%

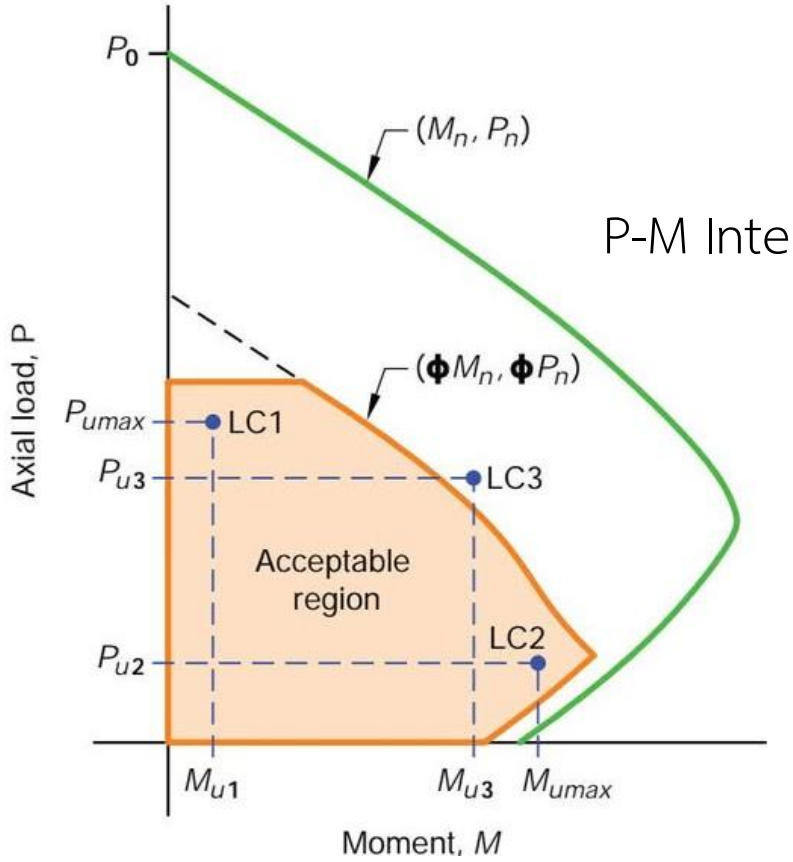
Cast-in-place กับ Precast structures ออกแบบต่างกันอย่างไร?



Cast-in-place กับ Precast structures ออกแบบต่างกันอย่างไร

- ระดับ Member หรือ Section เหมือนกัน





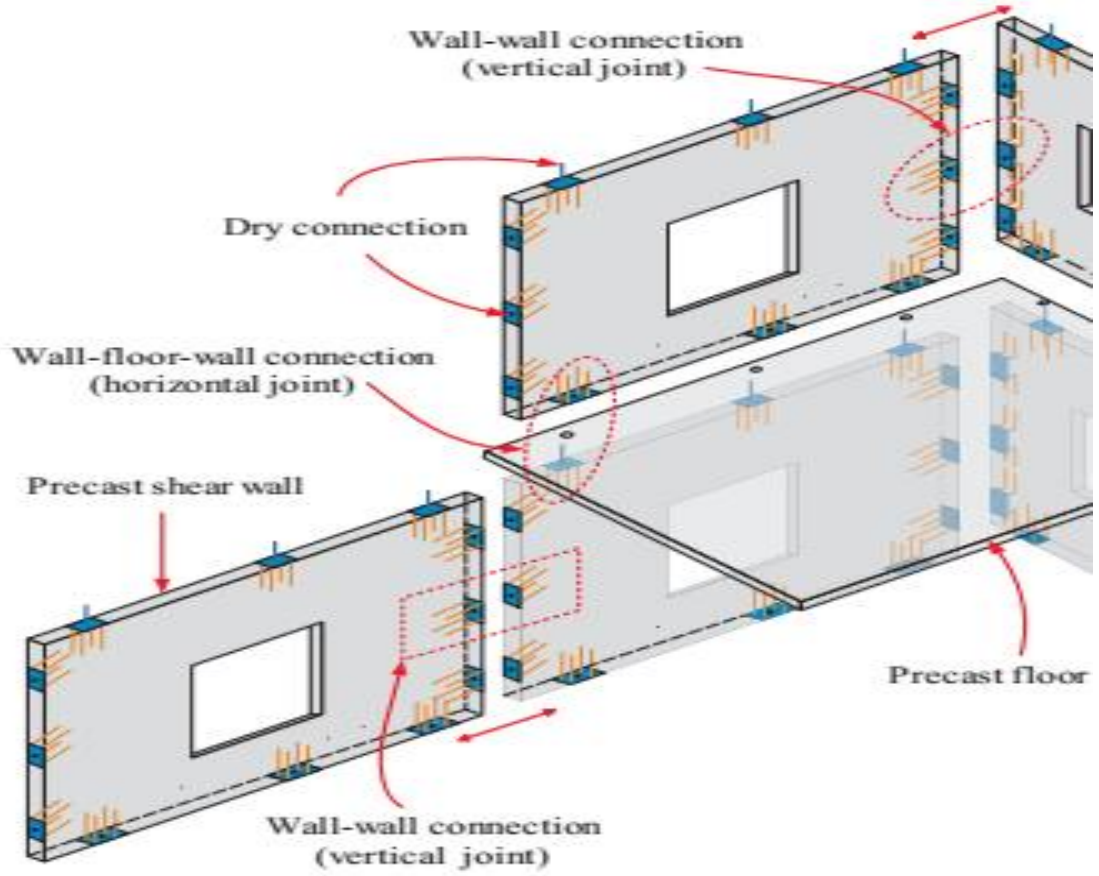
P-M Interaction diagram

Structural System Requirements

- Strength, Stiffness, Stability
- โครงสร้างต้องมี **load path ที่ต่อเนื่อง** เพื่อถ่ายแรงจากแผ่นดินไหวลงสู่ฐานราก
- **โครงสร้างมีความเหนียว** => หลัก **Capacity Design** ที่ทำให้เกิดเงื่อนไข “Fail safe”
- **structural integrity** และ **robustness** ของระบบ ป้องกัน **progressive collapse**

Precast ต้องมีจุดต่อ connections เพื่อเชื่อมต่อระหว่าง panel

สามารถถ่ายแรง **axial, shear และ moment**



ที่มา: Guo, W. et. al. Seismic performance assessment of low-rise precast wall panel structure with bolt connections, Engineering Structures, 181 (2019)

1. แนวคิดการวิเคราะห์และออกแบบ

ACI318-25

4.12—Requirements for specific types of construction

4.12.1 *Precast concrete systems*

4.12.1.2 Design of precast concrete members and connections shall include loading and restraint conditions from initial fabrication to end use in the structure, including form removal, storage, transportation, and erection.

สภาพแรงกระทำ และการยึดรั้งของชิ้นส่วนหล่อสำเร็จอาจแตกต่างกันตามช่วงเวลา เช่น DL อาจกระจายตัวโดยมีการยึดที่ปลายในลักษณะที่คานหรือพื้นเป็น Simple support เมื่อทำการยึดชิ้นส่วนแต่ละชิ้นต่อเนื่องกันจะทำให้เป็น คานหรือพื้นนั้นมีความต่อเนื่องเพื่อรับน้ำหนัก LL

4.12.1.4 When precast members are incorporated into a structural system, the forces and deformations occurring in and adjacent to connections shall be included in the design.

พิจารณา Connection เป็นชิ้นส่วนหนึ่งของระบบโครงสร้าง

Loads & Structural Analysis

- load combinations และ strength design

$$\text{design strength} \geq \text{required strength}$$
$$\phi S_n \geq U$$

- Precast Seismic Walls ต้องพิจารณา stiffness ของ connection

- ต้องรวม nonlinear behavior ของ joint สำหรับการใช้ nonlinear response history analysis (Appendix A – Design Verification Using Nonlinear Response History Analysis, ACI318-25)

Analysis Method

6.2.3 Methods of analysis permitted by this chapter shall be (a) through (e):

(a) The simplified method for analysis of continuous beams and one-way slabs for gravity loads in 6.5
(b) Linear elastic first-order analysis in 6.6
(c) Linear elastic second-order analysis in 6.7
(d) Inelastic analysis in 6.8
(e) Finite element analysis in 6.9

- ตัวคูณ ประมาณค่าโมเมนต์ดัด
- ต้องพิจารณาเพิ่ม individual member slenderness ($P\delta$) effects and sidesway ($P\Delta$) effects

ประเภทของผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก

18.2.1.6 Structural systems designated as part of the seismic-force-resisting system shall be restricted to those designated by the general building code, or determined by other authority having jurisdiction in areas without a legally adopted building code. Except for SDC A, for which Chapter 18 does not apply, (a) through (h) shall be satisfied for each structural system designated as part of the seismic-force-resisting system, in addition to 18.2.1.3 through 18.2.1.5:

(a) Ordinary moment frames shall satisfy 18.3

(b) Ordinary reinforced concrete structural* walls need not satisfy any detailing provisions in Chapter 18, unless required by 18.2.1.3 or 18.2.1.4

(c) Intermediate moment frames shall satisfy 18.4

(d) Intermediate precast walls shall satisfy 18.5

(e) Special moment frames shall satisfy 18.2.3 through 18.2.8 and 18.6 through 18.8

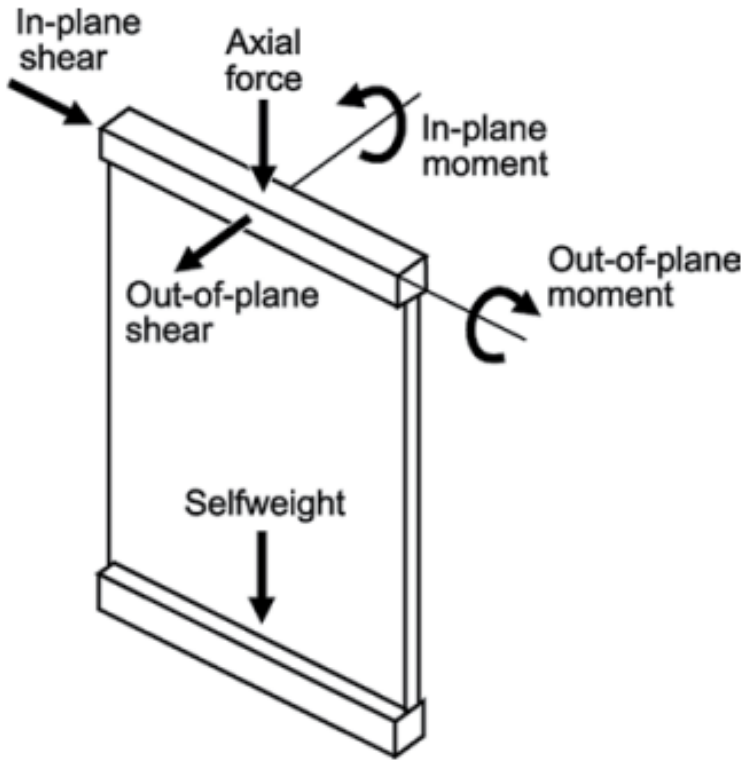
(f) Special moment frames constructed using precast concrete shall satisfy 18.2.3 through 18.2.8 and 18.9

(g) Special structural walls shall satisfy 18.2.3 through 18.2.8 and 18.10

(h) Special structural walls constructed using precast concrete shall satisfy 18.2.3 through 18.2.8 and 18.11

Chapter 11

*อธิบายตัวอย่าง



Design to resist

- In-plane shear
- In-plane moment + Axial force

ข้อกำหนดตาม มยผ.1301-02

ตารางที่ 2.3-1 ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (Response Modification Factor, R) ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน (System Overstrength Factor, Ω_0) และ ตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว (Deflection Amplification Factor, C_d)

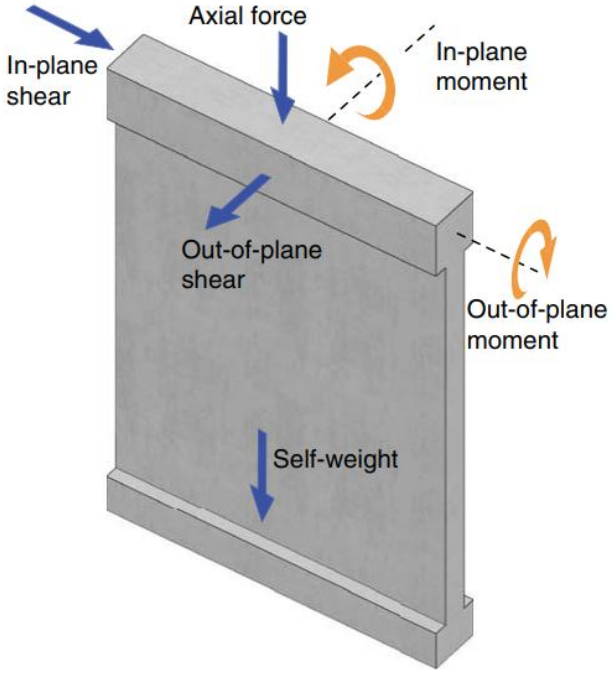
ระบบโครงสร้างโดยรวม	ระบบต้านแรงด้านข้าง	ค่าตัวประกอบ			ประเภทการออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหว		
		R	Ω_0	C_d	ข	ค	ง
1. ระบบกำแพงรับน้ำหนักบรรทุกแนวดิ่ง (Bearing Wall System)	กำแพงรับแรงเฉือนแบบธรรมดา (Ordinary Reinforced Concrete Shear Wall)	4	2.5	4	√	√	*
	กำแพงรับแรงเฉือนแบบที่มีการให้รายละเอียดพิเศษ (Special Reinforced Concrete Shear Wall)	5	2.5	5	√	√	√
	กำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จแบบธรรมดา (Ordinary Precast Shear Wall) ++	3	2.5	3	√	X	X
	กำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จแบบที่มีการให้รายละเอียดความเหนียวปานกลาง (Intermediate Precaset Shear Wall)++	4	2.5	4	√	√	X

ข้อกำหนดตาม มยผ.1301-02

2. ระบบโครงอาคาร (Building Frame System)	โครงแกงแนงเหล็กแบบเยื้องศูนย์ที่ใช้จุดต่อแบบรับแรงดัดได้ (Steel Eccentrically Braced Frame with Moment-Resisting Connections)	8	2	4	√	√	√
	โครงแกงแนงเหล็กแบบเยื้องศูนย์ที่ใช้จุดต่อแบบรับแรงเฉือน (Steel Eccentrically Braced Frame with Non-Moment-Resisting Connections)	7	2	4	√	√	√
	โครงแกงแนงเหล็กแบบตรงศูนย์แบบให้รายละเอียดพิเศษ (Special Steel Concentric Braced Frame)	6	2	5	√	√	√
	โครงแกงแนงเหล็กแบบตรงศูนย์แบบธรรมดา (Ordinary Steel Concentric Braced Frame)	3.5	2	3.5	√	√	X
	กำแพงรับแรงเฉือนแบบที่มีการให้รายละเอียดพิเศษ (Special Reinforced Concrete Shear Wall)	6	2.5	5	√	√	√
	กำแพงรับแรงเฉือนแบบธรรมดา (Ordinary Reinforced Concrete Shear Wall)	5	2.5	4.5	√	√	*
	กำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จแบบธรรมดา (Ordinary Precast Shear Wall) ++	4	2.5	4	√	X	X
	กำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จแบบที่มีการให้รายละเอียดความเหนียวปานกลาง (Intermediate Precast Shear Wall) ++	5	2.5	4.5	√	√	X

Walls (ชิ้นส่วน) (Chapter 11 – ACI318)

- ความหนาขั้นต่ำ
- การออกแบบกำลังรับแรงดัดและแรงอัด
- การออกแบบแรงเฉือน
- อัตราส่วนเหล็กเสริมขั้นต่ำ
- การจัดวางเหล็กเสริม

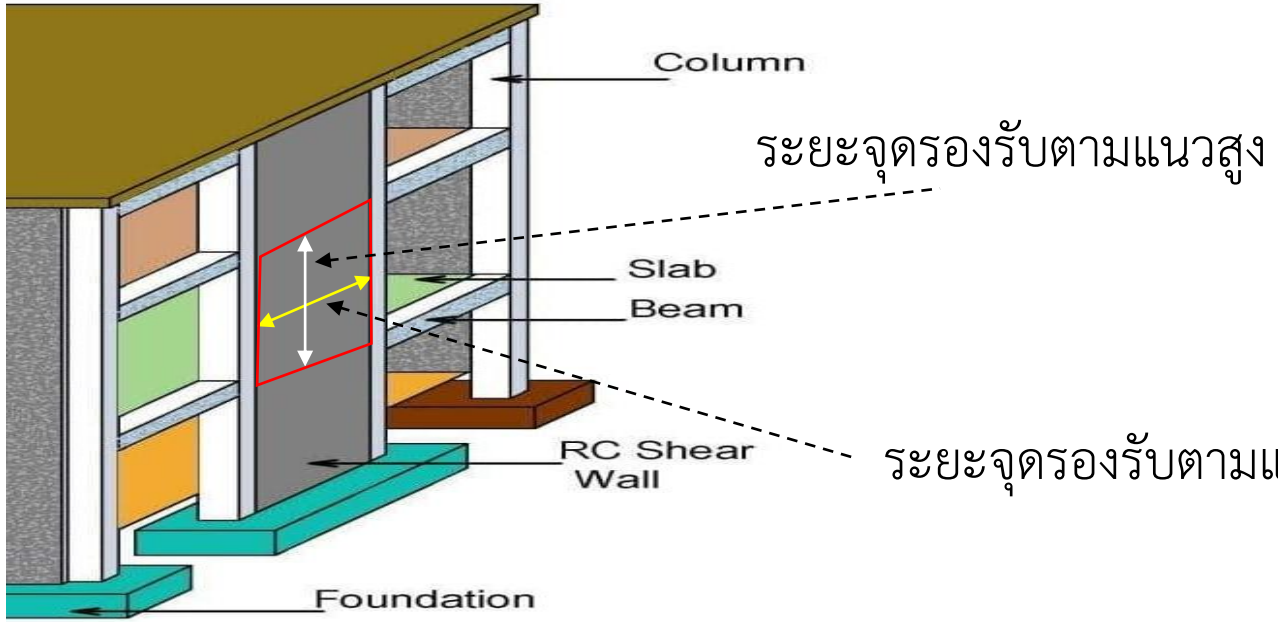


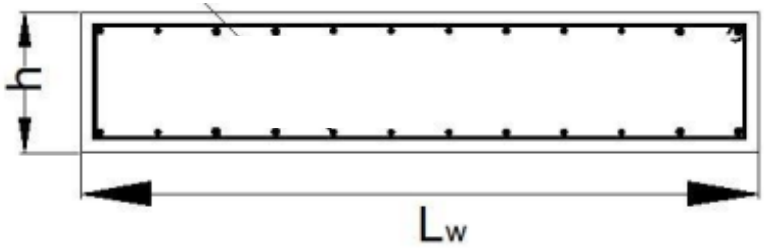
การออกแบบกำลังของผนังหล่อสำเร็จยังคงใช้หลักการเดียวกับ cast-in-place แต่ต้องพิจารณา discontinuity ที่ joints

2.การออกแบบชิ้นส่วนผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก

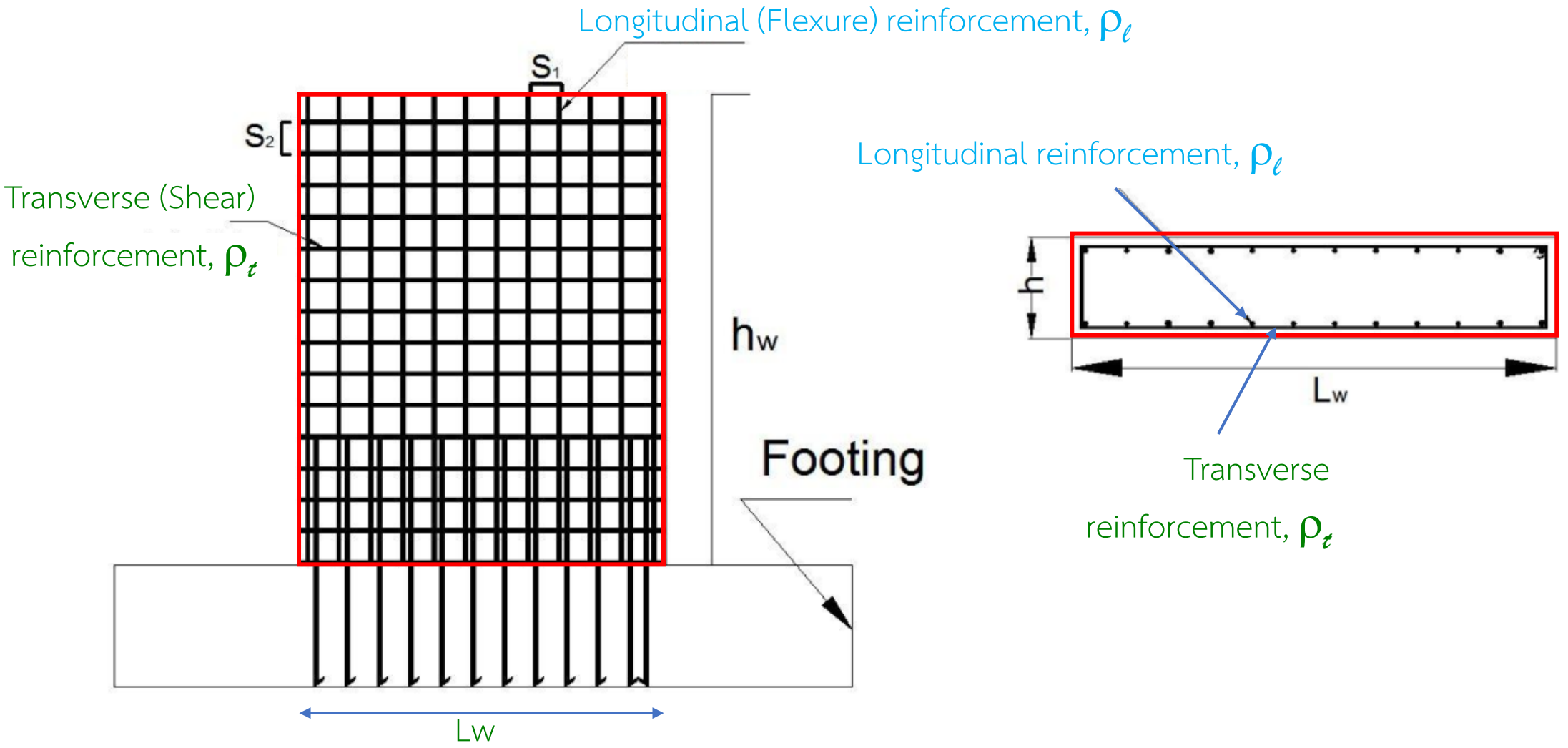
ตารางที่ 8.7 ความหนาขั้นต่ำของผนัง h

ชนิดของผนัง		ความหนาขั้นต่ำของผนัง h
ผนังรับแรงกด	ค่าที่มากกว่าระหว่าง	100 mm
		1/25 ของระยะระหว่างจุดรองรับของแนวยาว และแนวสูง
ผนังไม่รับแรงกด	ค่าที่มากกว่าระหว่าง	100 mm
		1/30 ของระยะระหว่างจุดรองรับของแนวยาว และแนวสูง



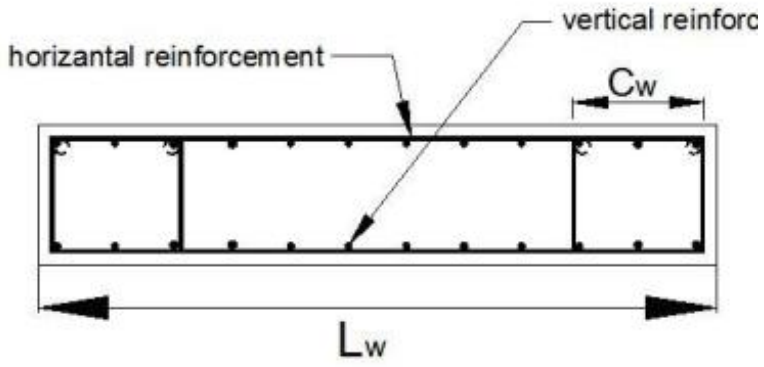


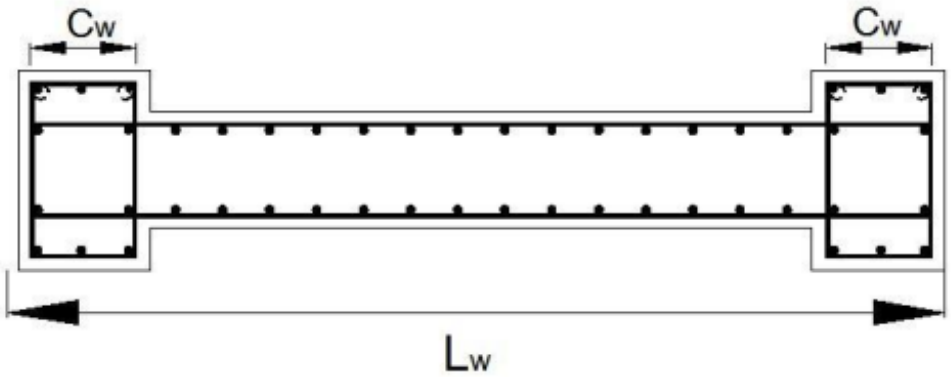
การเสริมเหล็ก



การเสริมเหล็ก

- กรณีโมเมนต์ดัดมากจะต้องเสริมเหล็กแนวตั้งมาก
- วางเหล็กในบริเวณปลายของหน้าตัดผนัง และ/หรือ การขยายพื้นที่ปลายผนัง Cw
- เรียกว่า Boundary element





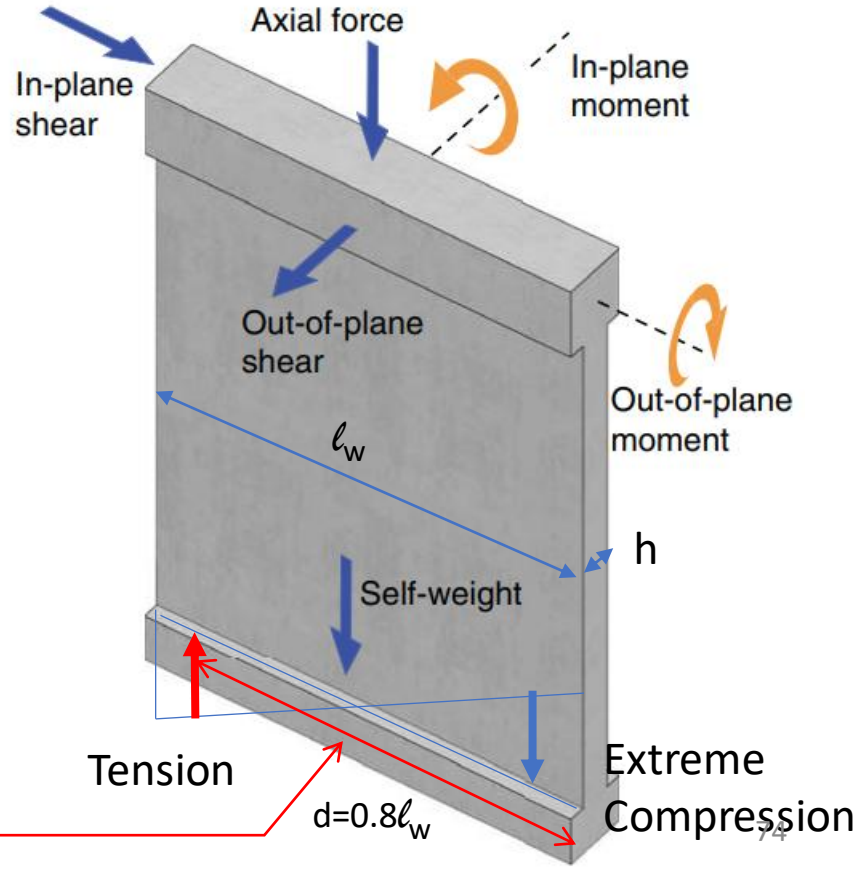
Design Strengths:

- Bending Strength $\phi Mn > Mu$
  - Mn คำนวณจาก Strain compatibility + Equilibrium

- Shear strength $\phi V_n \geq V_u$

$$V_n = V_c + V_s$$

shear force, as stated in ACI 11.5.4.2. A larger value of d, equal to the distance from extreme compression fiber to center of force of all reinforcement in tension, be permitted if the center of tension is calculated by a strain compatibility analysis.



กรณี 1: $Vu < \phi Vc / 2$

Table 11.6.1—Minimum reinforcement for walls with in-plane $V_u \leq 0.5\phi\alpha_c\lambda\sqrt{f_c'}A_{cv}$

Wall type	Type of nonprestressed reinforcement	Bar/wire size	f_y, MPa	Minimum longitudinal[1], ρ_ℓ	Minimum transverse, ρ_t
Cast-in-place	Deformed bars	DB16 ≤ No. 16	≥ 420 MPa	0.0012	0.0020
			< 420 MPa	0.0015	0.0025
		> No. 16	Any	0.0015	0.0025
	Welded-wire reinforcement	≤ MW200 or MD200	Any	0.0012	0.0020
Precast[2]	Deformed bars or welded-wire reinforcement	Any	Any	0.0010	0.0010

[1]Walls with an average compressive stress, due to effective prestress force only, of at least 1.6 MPa need not meet the requirement for minimum longitudinal reinforcement ρ_ℓ.
[2]In one-way precast, prestressed walls not wider than 3.6 m and not mechanically connected to cause restraint in the transverse direction, the minimum reinforcement requirement in the direction normal to the flexural reinforcement need not be satisfied.

กรณี 2: $\phi Vc / 2 \leq Vu < Vc$

- เหล็กตามแนวตั้งผนัง ρ_ℓ *คำนวณโดย (*ACI11.6.2) แต่ไม่เกิน ρ_t ในตารางกรณี 1

$$\rho_l \geq 0.0025 + 0.50\left(2.5 - \frac{h_w}{l_w}\right)(\rho_t - 0.0025) \geq 0.0025$$

- เหล็กตามแนวขวางผนัง ρ_t *ไม่น้อยกว่า 0.0025*

กรณี 3: $Vu > \phi Vc$

- เหล็กตามแนวขวางผนัง ρ_t *คำนวณโดย* (ACI11.5.4.3) เพื่อให้ $\phi V_n \geq V_u$

$$V_n = (\alpha_c \lambda \sqrt{f_c'} + \rho_t f_{yt}) A_{cv} \qquad (11.5.4.3)$$

where:
$\alpha_c = 0.25$ for $h_w/\ell_w \leq 1.5$
$\alpha_c = 0.17$ for $h_w/\ell_w \geq 2.0$
α_c varies linearly between 0.25 and 0.17 for $1.5 < h_w/\ell_w < 2.0$

$\alpha_c = 0.80$ for $\frac{h_w}{\ell_w} \leq 1.5$

$\alpha_c = 0.53$ for $\frac{h_w}{\ell_w} \geq 2.0$

mks (ksc)

11.5.4.2 V_n at any horizontal section shall not exceed $0.66\sqrt{f_c'}A_{cv}$.

$2.12\sqrt{f_c'}\,A_{cv}$ mks (ksc)

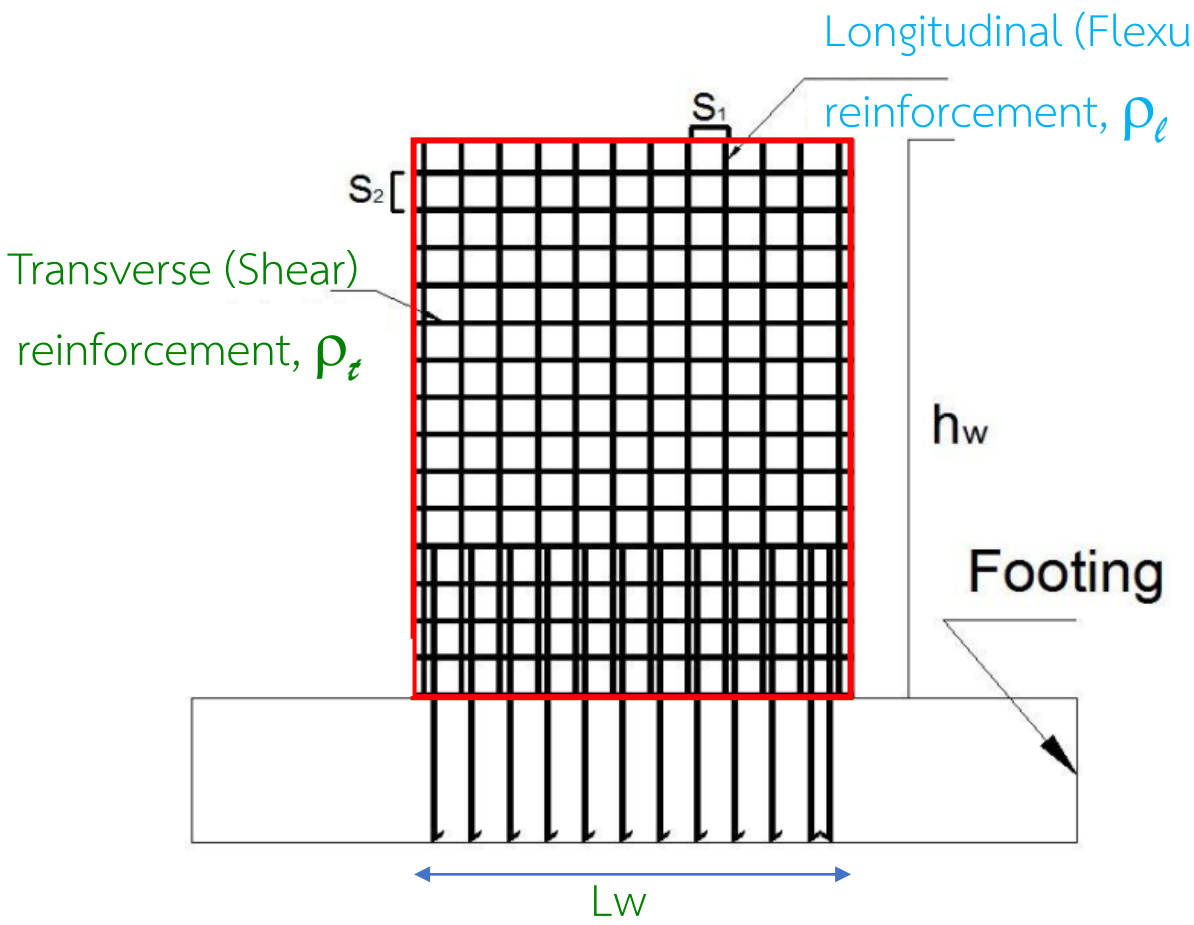
ระยะเรียงสูงสุด:

- Transverse Reinforcement (S2)

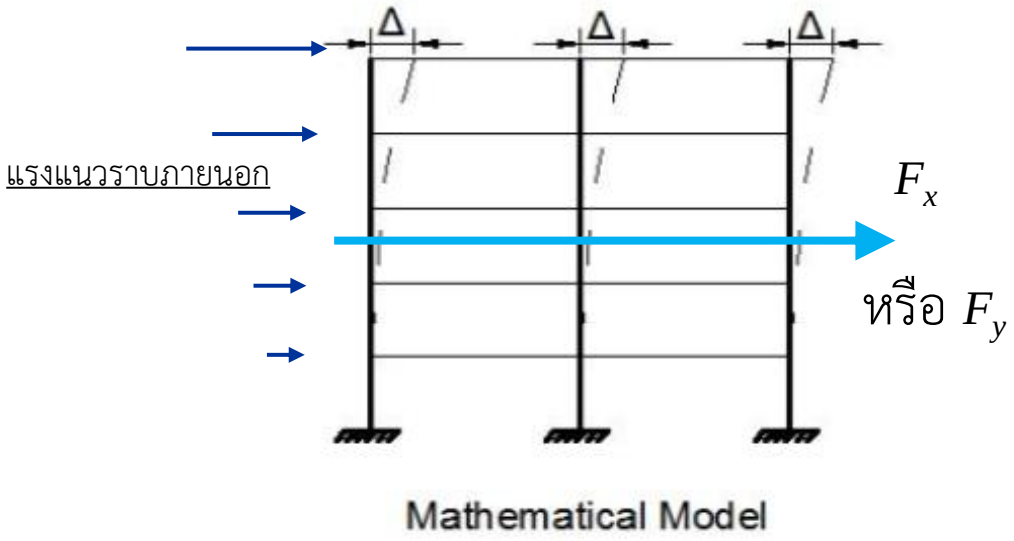
  Based on ACI 11.7.3.1,
  smallest of $l_w/5, 3h, 45\,cm$.

- Longitudinal Reinforcement (S1)

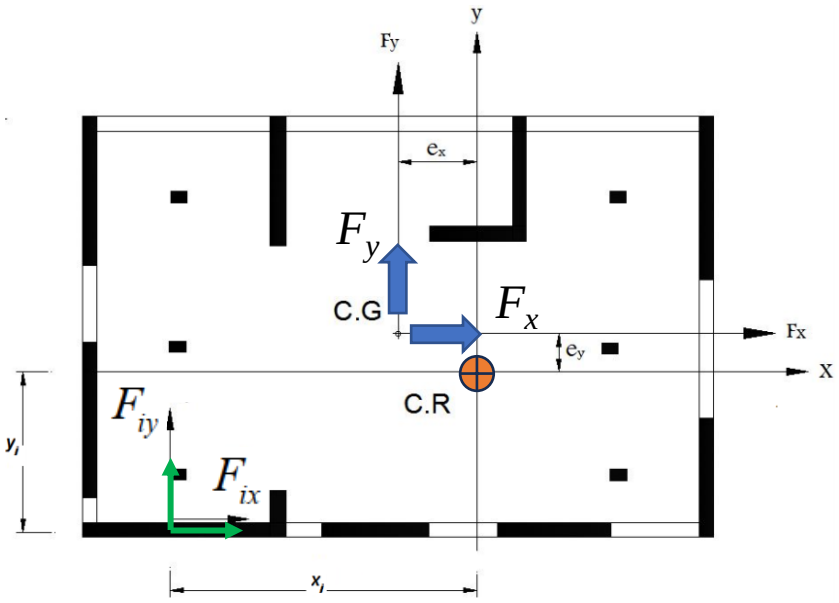
  Based on ACI 11.7.2.1,
  smallest of $l_w/3, 3h, 45\,cm$.



การกระจายแรงแนวราบไปที่กำแพงแต่ละแผ่น



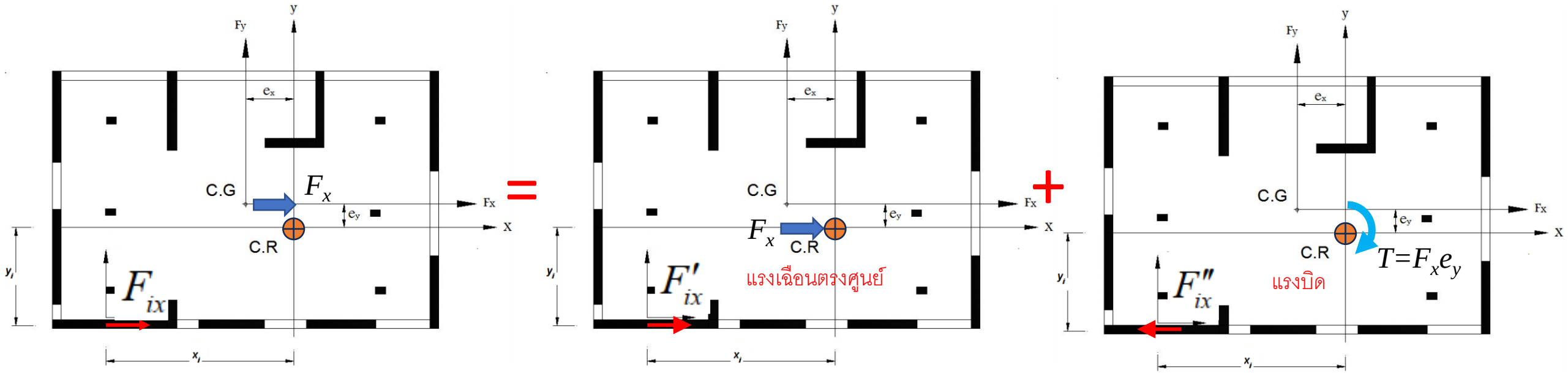
Mathematical Model



Shear Wall Arrangement

- พื้นอาคารทำหน้าที่เป็นแผ่นพื้นแข็ง (diaphragms) : บังคับให้ตำแหน่งของกำแพงต่างๆ เคลื่อนไปด้วยกัน ไม่เกิดการเปลี่ยนระยะเชิงสัมพัทธ์
- พิจารณากำแพงไม่สามารถต้านทานแรงในทิศทางแกนรองได้

การกระจายแรงแนวราบ (ทิศ X) ไปที่กำแพงแต่ละแผ่น



$$F_{ix} = F'_{ix} \pm F''_{ix}$$

i คือ กำแพงชิ้นที่ i

F'_{ix} = load induced in wall by inter-story translation only, in x-direction

F'_{iy} = load induced in wall by inter-story translation only, in y-direction

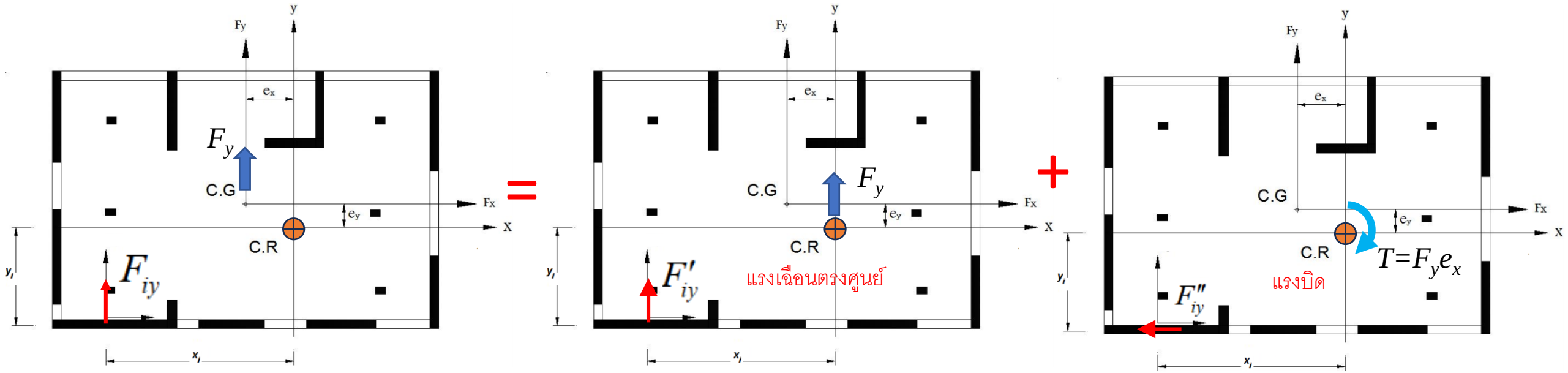
F''_{ix} = load induced in wall by inter-story torsion only, in x-direction

F''_{iy} = load induced in wall by inter-story torsion only, in y-direction

F_{ix} = total external load to be resisted by a wall, in x-direction

F_{iy} = total external load to be resisted by a wall, in y-direction

การกระจายแรงแนวราบ (ทิศ y) ไปที่กำแพงแต่ละแผ่น



$$F_{iy} = F'_{iy} \pm F''_{iy}$$

i คือ กำแพงชิ้นที่ i

F'_{ix} = load induced in wall by inter-story translation only, in x-direction

F'_{iy} = load induced in wall by inter-story translation only, in y-direction

F''_{ix} = load induced in wall by inter-story torsion only, in x-direction

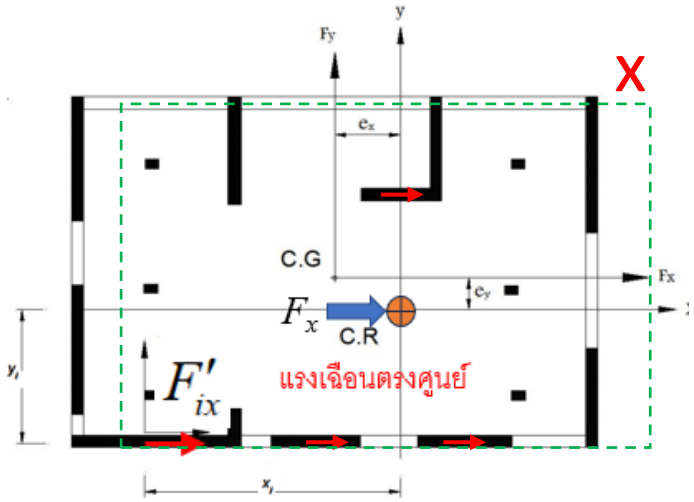
F''_{iy} = load induced in wall by inter-story torsion only, in y-direction

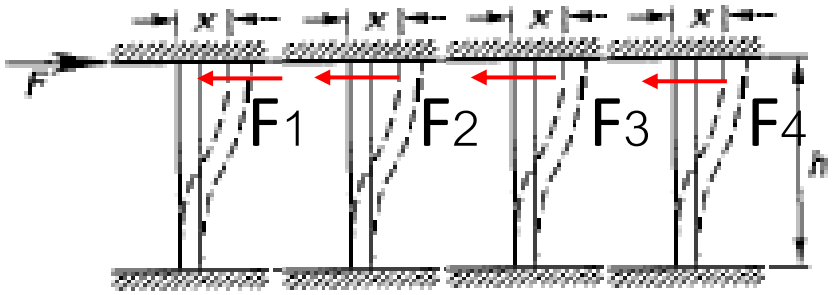
F_{ix} = total external load to be resisted by a wall, in x-direction

F_{iy} = total external load to be resisted by a wall, in y-direction

1. แรงเฉือนในผนังจากแรงกระทำตรงศูนย์

- สัดส่วนขนาดของแรงที่จะกระจายไปแต่ละผนังในทิศทางหนึ่งๆ ขึ้นกับอัตราส่วนของสติฟเนสการดัดของกำแพง





$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4$

$= k_1x + k_2x + k_3x + k_4x = (\Sigma k)x$

$x = F/(\Sigma k)$

$F_1 = k_1[F/(\Sigma k)]$, $k = 12EI/h^3$

F_x = total external load to be resisted by all walls, in x-direction

F_y = total external load to be resisted by all walls, in y-direction

I_{ix} = second moment of area of a wall section about x axis

I_{iy} = second moment of areas of a wall section about y axis

$\sum I_{ix}$ = total second moment of areas of all walls in x-direction

$\sum I_{iy}$ = total second moment of area of all walls in y-direction

$$F'_{ix} = \frac{F_x I_{iy}}{\sum I_{iy}} \qquad F'_{iy} = \frac{F_y I_{ix}}{\sum I_{ix}}$$

2. แรงเฉือนในผนังจากแรงกระทำเยื้องศูนย์ (แรงบิด)

- in x-direction

$$F''_{ix} = \frac{\left(F_x\, e_y \pm accidental\ torsion\right) y_i\, I_{iy}}{\sum\left(x_i^2 I_{ix} + y_i^2 I_{iy}\right)}$$

$=F_x(0.05L_y)$

- in y-direction $=F_y(0.05L_x)$

$$F''_{iy} = \frac{\left(F_y\, e_x \pm accidental\ torsion\right) x_i\, I_{ix}}{\sum\left(x_i^2 I_{ix} + y_i^2 I_{iy}\right)}$$

x_i = x-coordinate of a wall with respect to the center of rigidity C.R of the lateral load resisting system

y_i = y-coordinate of a wall with respect to the center of rigidity C.R of the lateral load resisting system

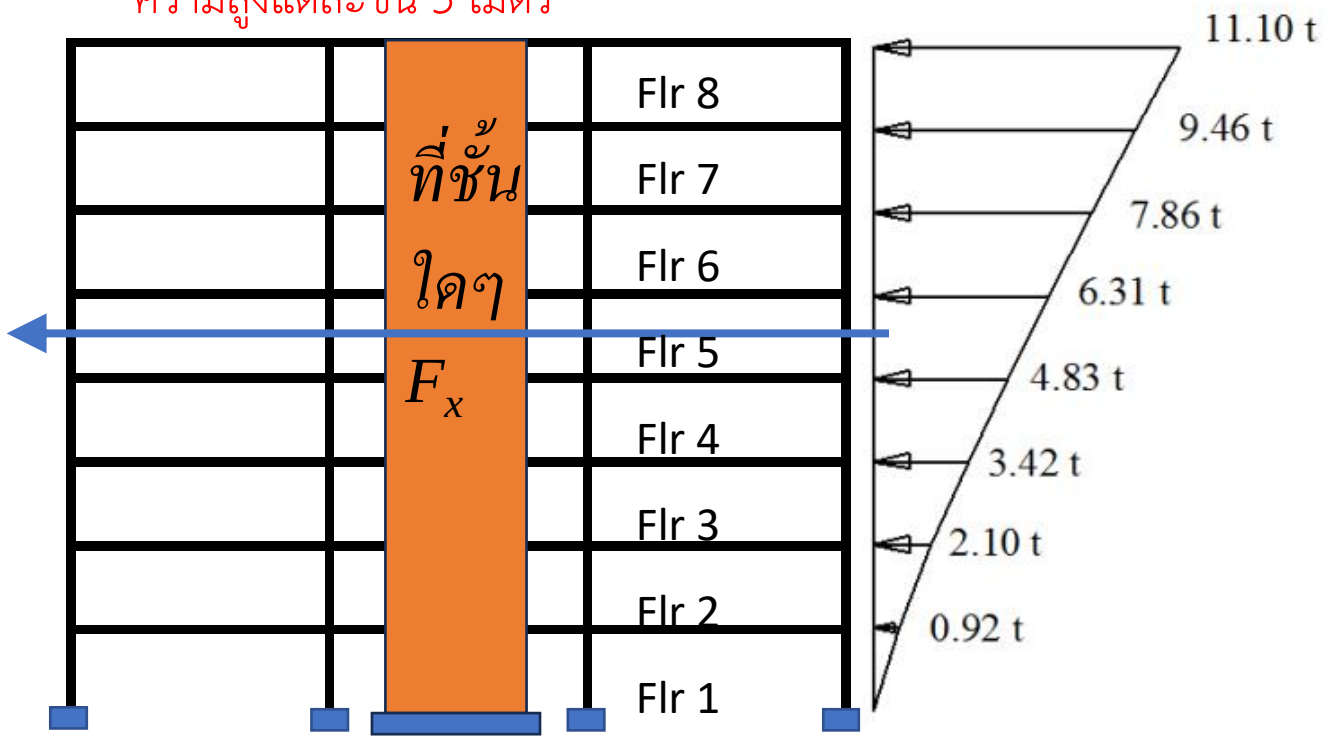
e_x = eccentricity resulting from non-coincidence of center of gravity C.G and center of rigidity C.R, in x-direction

e_y = eccentricity resulting from non-coincidence of center of gravity C.G and center of rigidity C.R, in y-direction

2.การออกแบบชิ้นส่วนผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก

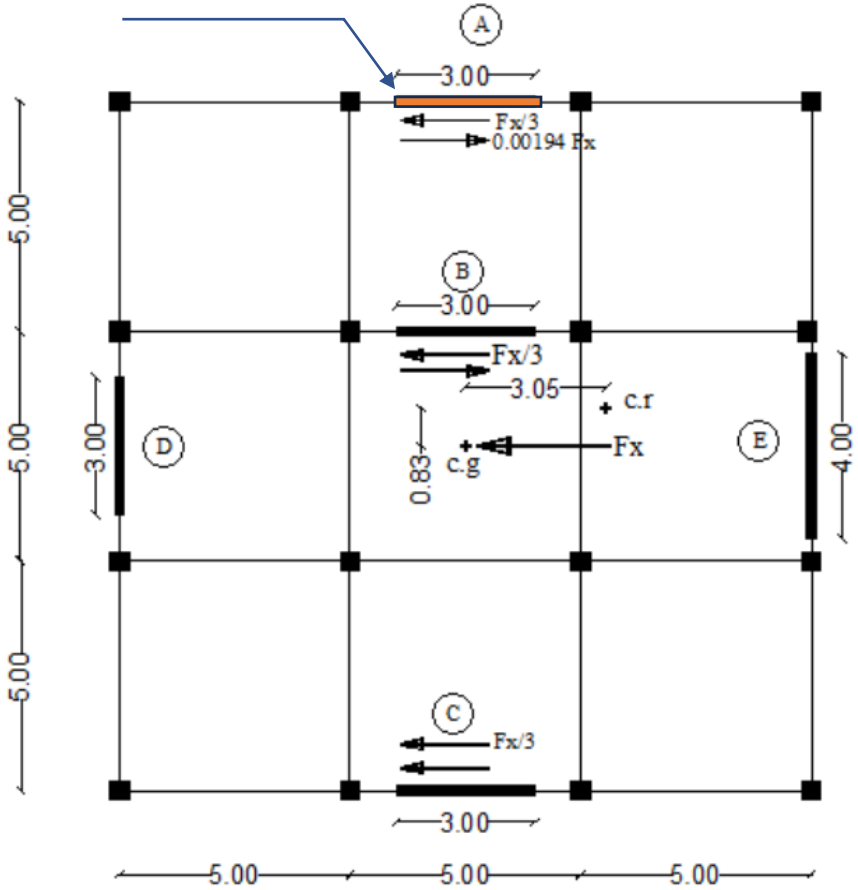
ตัวอย่างการคำนวณแรงเฉือนในกำแพงใดๆ
(เนื่องจากแรงแผ่นดินไหวในทิศ x)

- ความหนาของทุกผนัง 20 เซนติเมตร
- ความสูงแต่ละชั้น 3 เมตร



Vertical Distribution of Forces

คำนวณแรงเฉือนใน shear wall "A".



แรงแผ่นดินไหวที่คำนวณได้ในแต่ละชั้น

ความหนาขั้นต่ำ

ตารางที่ 8.7 ความหนาขั้นต่ำของผนัง h

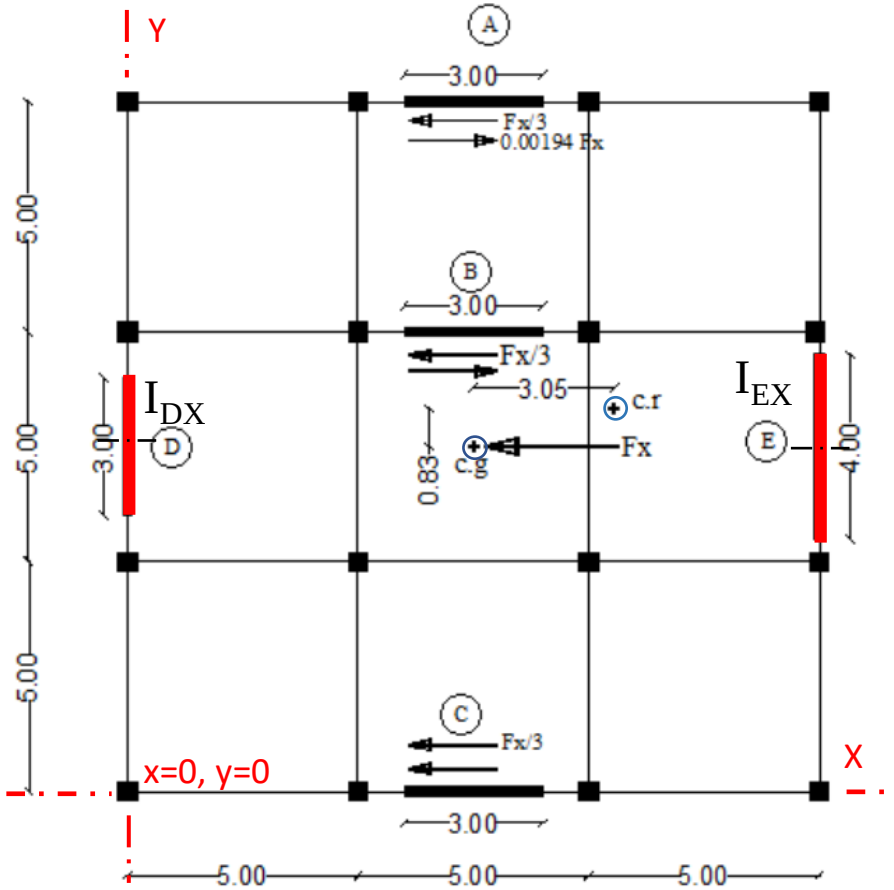
ชนิดของผนัง		ความหนาขั้นต่ำของผนัง h
ผนังรับแรงกด	ค่าที่มากกว่าระหว่าง	100 mm
		1/25 ของระยะระหว่างจุดรองรับของแนวยาว และแนวสูง

1/25(300) = 12 ซม

ดังนั้น ความหนาผนังที่เลือกใช้ 20 ซม. => ใช้ได้

ตัวอย่างแรงกระทำต่อ กำแพง A:

1. หาศูนย์กลางแรงต้าน, c.r. (Center of Rigidity), ศูนย์กลางแรงกระทำ, ระยะเยื้องทาง x และ y



❑ Eccentric x

Take moment of I about axis y@x=0

$$I_{Dx} = 0.2(3)^3/12 = 0.45m^4$$
$$I_{Ex} = 0.2(4)^3/12 = 1.067m^4$$
$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{2} I_{ix}\, x_i}{\sum_{i=1}^{2} I_{ix}} = \frac{0+1.067(15)}{0.45+1.067} = 10.55m$$
$$e_x = 10.55 - 7.5 = 3.05m$$

❑ Eccentric y

Take moment of I about axis x@y=0

$$I_{Ay} = I_{By} = I_{Cy} = 0.2(3)^3/12 = 0.45m^4$$
$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{3} I_{iy}\, y_i}{\sum_{i=1}^{3} I_{iy}} = \frac{0+0.45(10)+0.45(15)}{3(0.45)} = 8.33m$$
$$e_y = 8.33 - 7.5 = 0.83m$$

2. แรงเฉือนในผนัง A

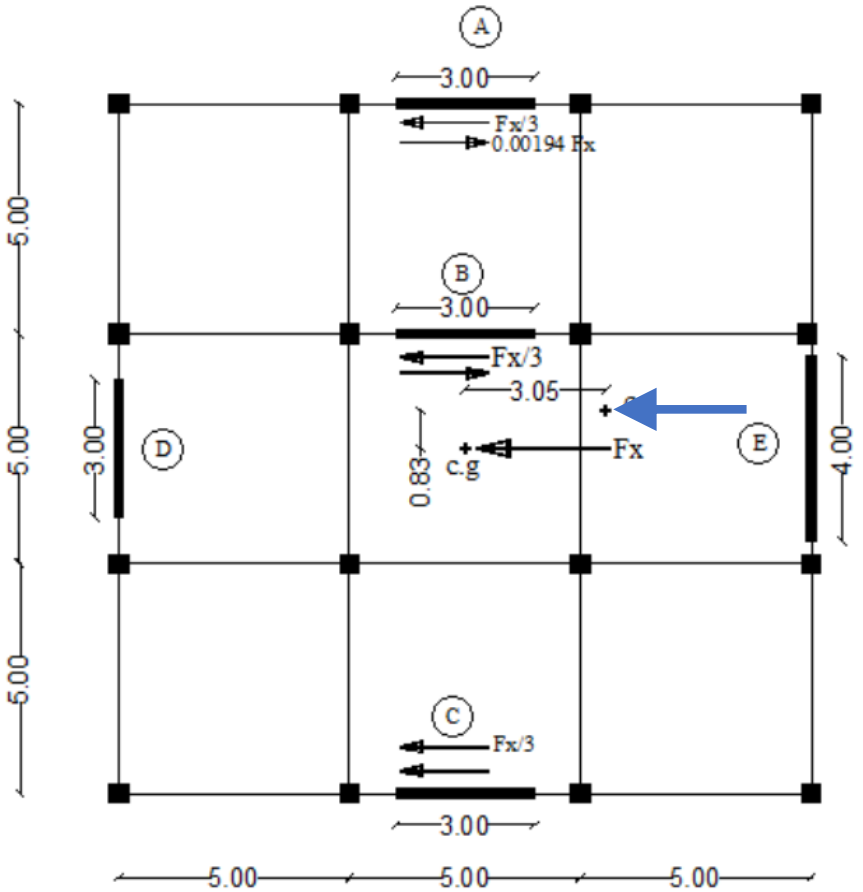
Horizontal distribution of forces for wall A:

$$F_{Ax} = F'_{Ax} \pm F''_{Ax}$$

1. แรงเฉือนในผนังจากแรงกระทำตรงศูนย์

$$F'_{ix} = \frac{F_x I_{iy}}{\sum I_{iy}}$$

$$F'_{Ax} = \frac{0.45}{3(0.45)} F_x = 0.333 F_x$$



2. แรงเฉือนในผนังจากแรงกระทำเยื้องศูนย์ (แรงบิด)

$$F''_{ix} = \frac{(F_x\, e_y \pm accidental\ torsion)\, y_i\, I_{iy}}{\sum (x_i^2 I_{ix} + y_i^2 I_{iy})}$$

$$F''_{Ax} = \frac{(T)\, y_i\, I_{Ay}}{\sum (x_i^2 I_{ix} + y_i^2 I_{iy})} = \frac{(T)(6.67)(0.45)}{0.45(10.55)^2 + 1.067(4.45)^2 + 0.45(8.33)^2 + 0.45(1.67)^2 + 0.45(6.67)^2}$$

"D" "E" "C" "B" "A"

$$F''_{Ax} = 0.02426\,T$$

Maximum eccentricity= 0.83 + 0.05 (15) = 1.58 m

Minimum eccentricity= 0.83 - 0.05 (15) = 0.08 m

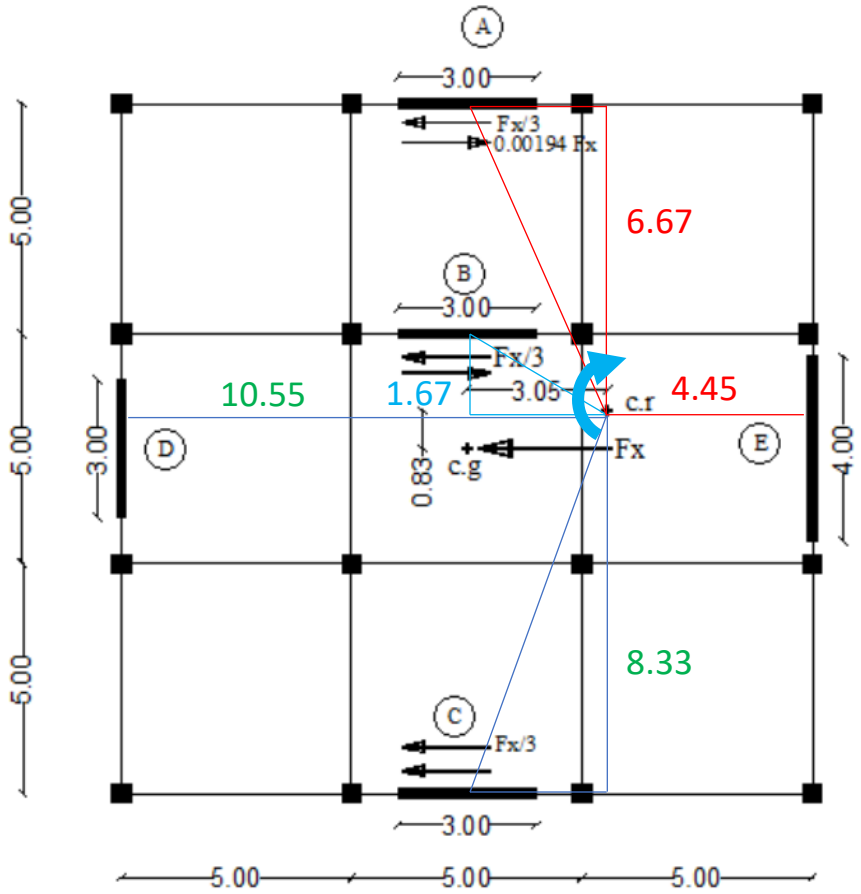
$$F''_{Ax,min.} = 0.02426\,(0.08)\,F_x = 0.00194\,F_x$$

สังเกตว่า แรงเฉือนจากการบิดมีทิศตรงข้ามกับแรงเฉือนตรงศูนย์ จึงพิจารณา accidental torsion ในทิศทางที่มีผลต่ำ

$$F_{Ax} = F'_{Ax} \pm F''_{Ax}$$ ➡ รวม (1) แรงเฉือนตรงศูนย์ + (2) แรงเฉือนบิด

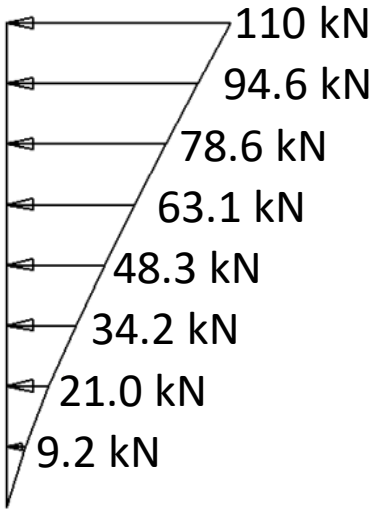
$$F_{Ax} = (0.333 - 0.00194)\,F_x$$

$$F_{Ax} = 0.33\,F_x$$ ➡ มีแรงเฉือนทิศทาง X ที่ระดับชั้นใดๆ Fx จะทำให้เกิดแรง F_{AX} ในผนัง A



3. คำนวณแรงของผนัง A ในแต่ละชั้น

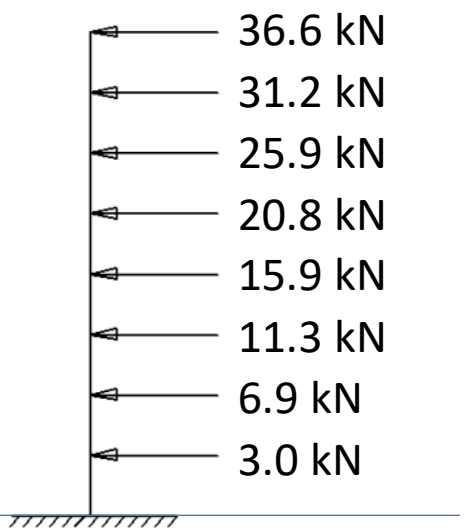
Fx (ทั้งอาคารในทิศ x)



Vertical Distribution of Forces

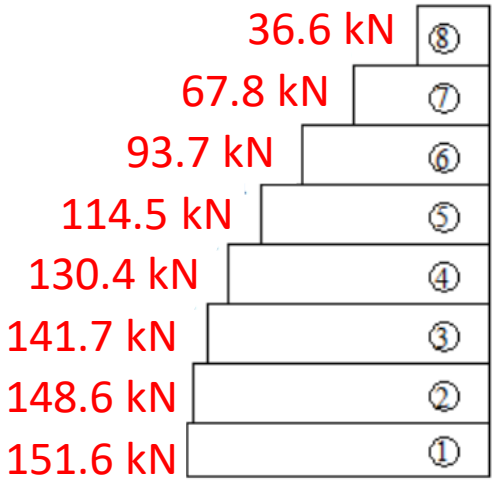
FAx (แรงในผนัง A เนื่องจากแรงในทิศ x)

$$F_{Ax} = 0.33 F_x$$



Wall Forces

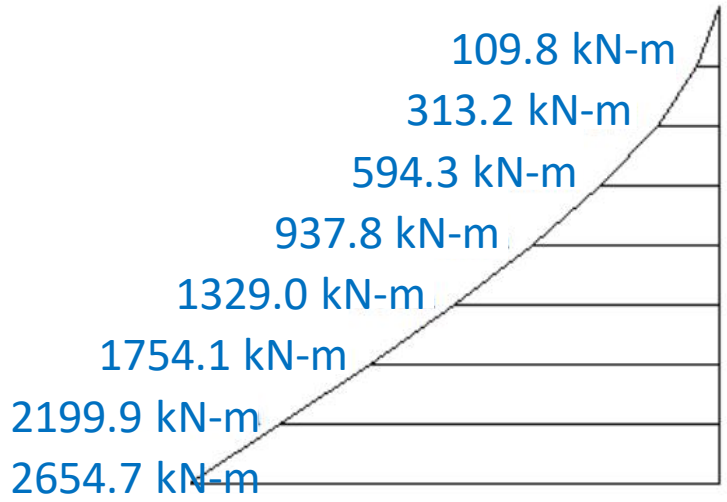
แรงเฉือนในผนัง A แต่ละชั้นเนื่องจากแรงในทิศ x



SHEAR FORCES

$V = \Sigma(Fi)$

โมเมนต์ดัดในผนัง A แต่ละชั้นเนื่องจากแรงในทิศ x



Bending Moments

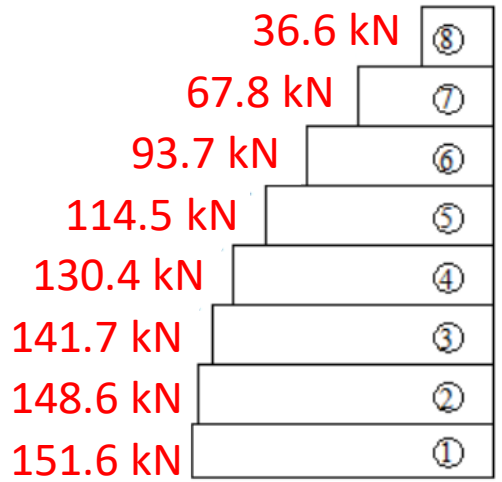
$M = \Sigma(Fi)(xi)$

4. Design for shear: กำลังเฉือนออกแบบสูงสุด

	A	B	C	D	E	F
1	Shear Design					
2				fc' =	28	MPa
3	$V_{n,max} = 0.66\sqrt{f_c'}A_{cv}$			lw =	3,000	mm
4				h =	200	mm
5				Acv =	600,000	sq.mm
6				Vn,max =	2,095,435.04	N
7					2,095.44	kN
8				(Phi)Vn,max =	1,781.12	kN
9				Vu, max =	151.6	kN
10					OK	

D	E	F
fc' =	28	MPa
lw =	3000	mm
h =	200	mm
Acv =	=E3*E4	sq.mm
Vn,max =	=0.66*SQRT(E2)*E5	N
	=E6/1000	kN
(Phi)Vn,max =	=0.85*E7	kN
Vu, max =	151.6	kN
	=IF(E8>E9,"OK","Not OK")	

แรงเฉือนกระทำ



แรงเฉือนกระทำสูงสุด ไม่เกิน กำลังเฉือนออกแบบสูงสุด

4. Design for shear: ข้อกำหนดการเสริมเหล็ก

where:
$\alpha_c = 0.25$ for $h_w/\ell_w \le 1.5$
$\alpha_c = 0.17$ for $h_w/\ell_w \ge 2.0$
α_c varies linearly between 0.25 and 0.17 for $1.5 < h_w/\ell_w < 2.0$

	A	B	C	D	E
11					
12	Transverse and Longitudinal reinforcement				
13		$V_n = (\alpha_c \lambda \sqrt{f_c'} + \rho_t f_{yt}) A_{cv}$		(11.5.4.3)	
14					
15		hw =	24,000	mm	
16		lw =	3,000	mm	
17		hw/lw =	8		
18		alpha_c =	0.17		
19		Vc=	539,733.27	N	
20			539.73	kN	
21		(phi)Vc=	458.77	kN	
22		0.5(phi)Vc=	229.39	kN	
23		กรณีการเสริมเหล็ก		กรณี 1: $Vu < \phi Vc / 2$	

15		hw =	=3000*8	mm
16		lw =	=E3	mm
17		hw/lw =	=C15/C16	
18		alpha_c =	0.17	
19		Vc=	=C18*SQRT(E2)*E5	N
20			=C19/1000	kN
21		(phi)Vc=	=0.85*C20	kN
22		0.5(phi)Vc=	=0.5*C21	kN
23		กรณีการเสริมเหล็ก		

Table 11.6.1—Minimum reinforcement for walls with in-plane $V_u \le 0.5\phi\alpha_c\lambda\sqrt{f_c'}A_{cv}$

เลือกใช้เหล็ก SD40 ขนาดไม่เกิน DB16

Wall type	Type of nonprestressed reinforcement	Bar/wire size	f_y, MPa	Minimum longitudinal[1], ρ_t	Minimum transverse, ρ_t
Cast-in-place	Deformed bars	DB16 ≤ No. 16	≥ 420 MPa	0.0012	0.0020
			< 420 MPa	0.0015	0.0025
		> No. 16	Any	0.0015	0.0025

4-1 Transverse shear reinforcement: S_2

$\rho_t = 0.0020$ = At/(S_2h)

$$S_2 = \text{the smaller of} \begin{cases} l_w / 5 = 60cm \\ 3h = 60cm \\ 45cm \end{cases}$$

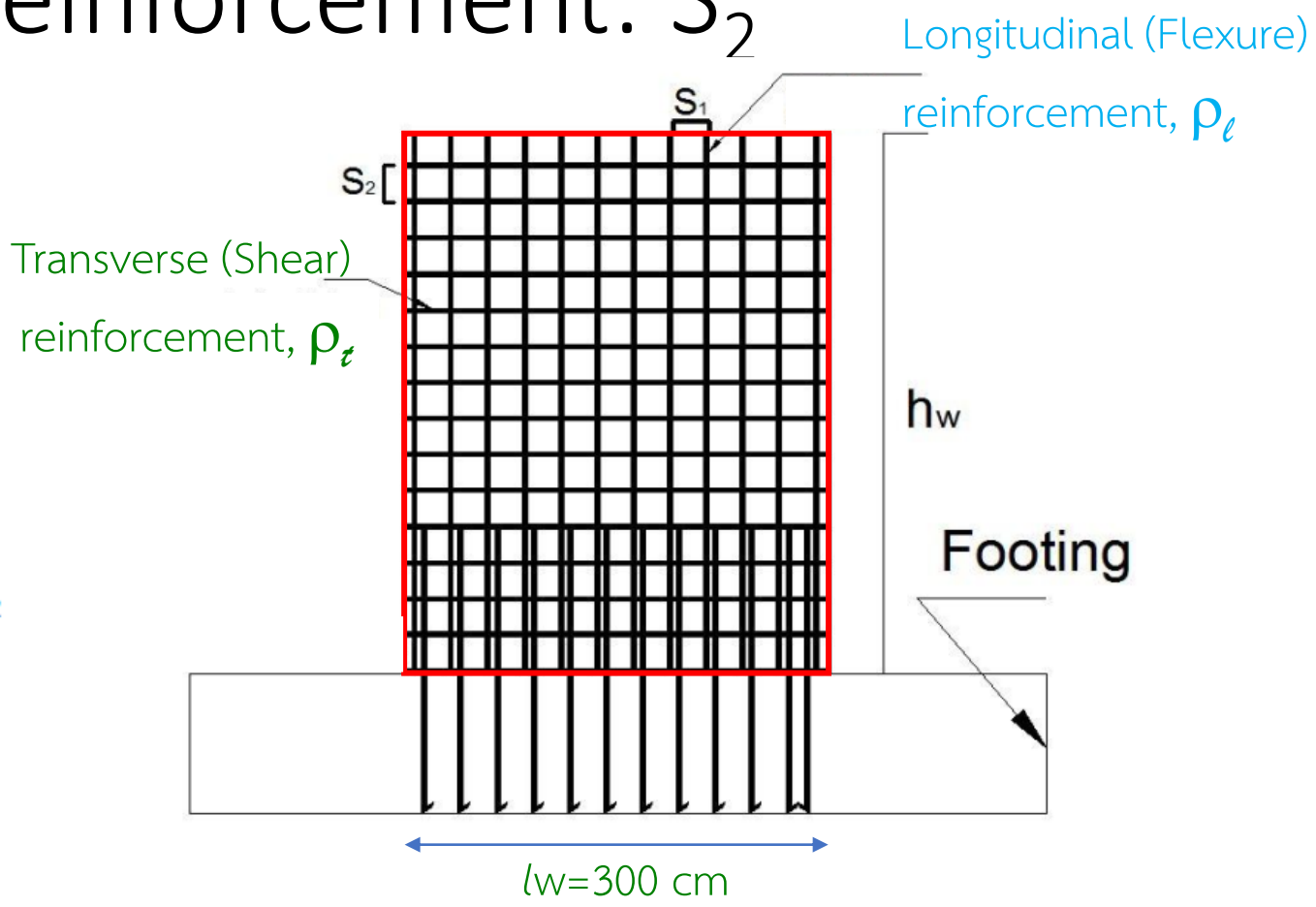
or $S_{2,\max} = 45cm$

$$\frac{A_t}{S_2} = 0.0020h = 0.0020(20) \text{ and } \frac{A_t}{S_2} = 0.04cm^2/cm$$

เลือกใช้ DB12 (1-As = 1.13 ตร.ซม.) เสริม 2 ชั้น

S_2 = 2(1.13)/0.04 = 56.5 ซม (เกิน 45 ซม)

เสริม DB12@45 cm (2 layers)

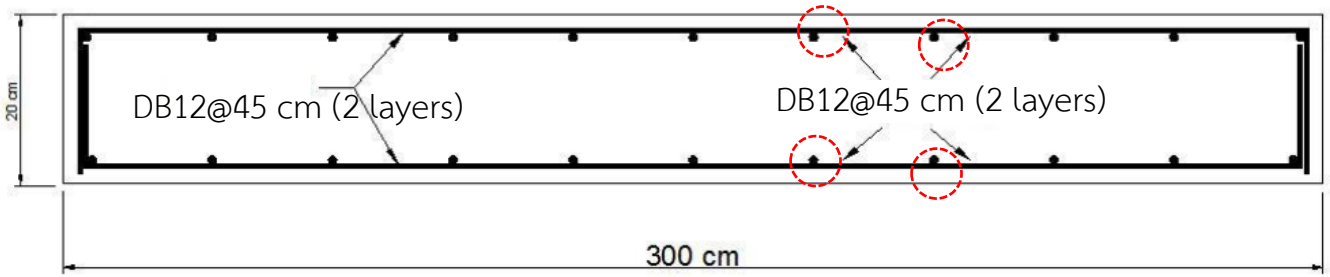


4-2 Longitudinal shear reinforcement: S_1

$\rho_l = 0.0012$ = $A_t/(S_1 h)$

$$S_1 = \text{the smaller of} \begin{cases} l_w / 3 = 100cm \\ 3h = 60cm \\ 45cm \end{cases}$$

or $S_{1,max} = 45cm$

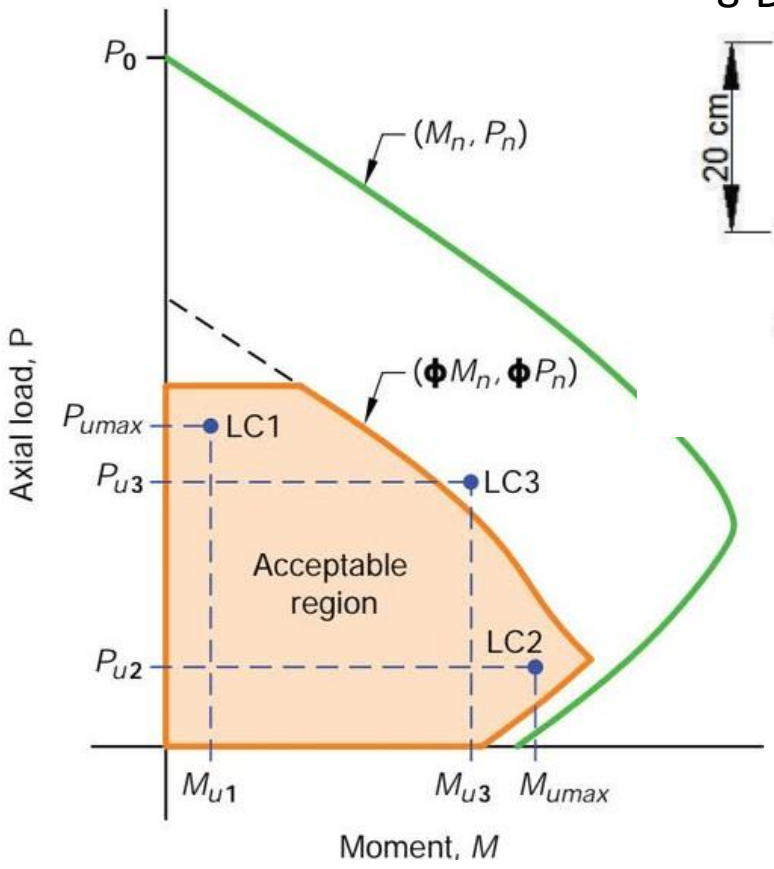


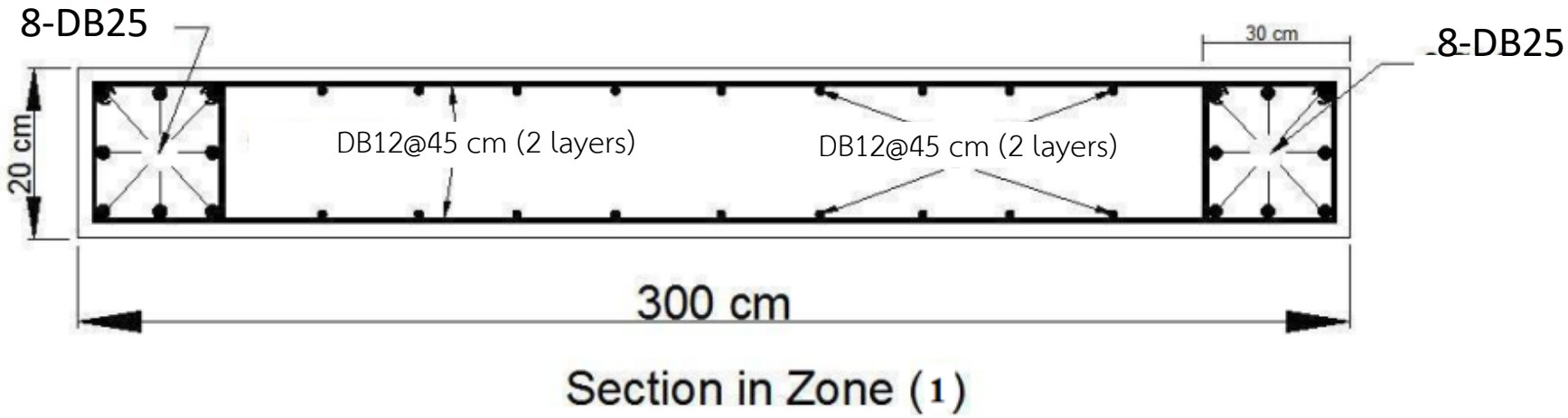
เลือกใช้ DB12 (1-As = 1.13 ตร.ซม.) เสริม 2 ชั้น

S_1 = 2(1.13)/(0.0012x20) = 94.2 ซม (เกิน 45 ซม)

เสริม DB12@45 cm (2 layers)

5 Design for flexure and axial loads:



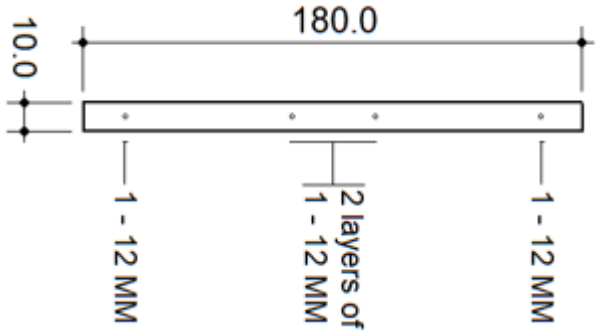


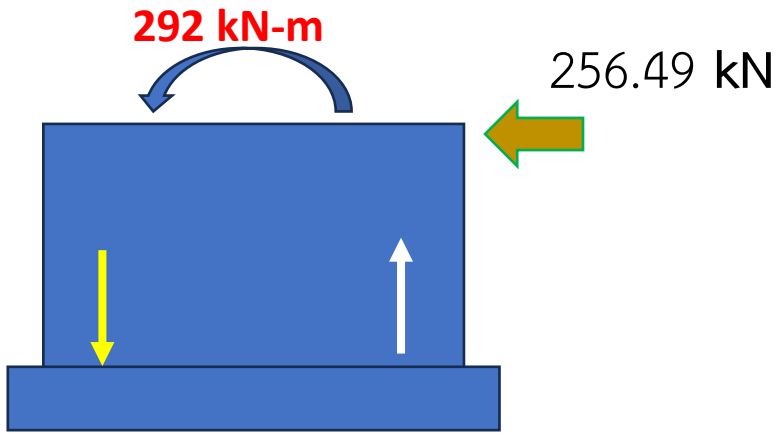
ข้อกำหนดตาม มยผ.1301-02

2.3.1.3 ระบบโครงสร้างแบบหล่อสำเร็จ (Precast Systems)

ในกรณีที่เลือกใช้ระบบโครงสร้างแบบหล่อสำเร็จ จะต้องพิจารณาออกแบบองค์อาคารและจุดต่อให้มีกำลังเพียงพอ และมีการให้รายละเอียดเพื่อความเหนียวที่เหมาะสม สอดคล้องกับระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว ทั้งนี้องค์อาคารและจุดต่อต้องสามารถรับแรงในแนวแกน แรงเฉือน โมเมนต์ดัด และโมเมนต์บิด ที่เกิดขึ้นได้ การออกแบบองค์อาคารและจุดต่อ ต้องใช้รูปแบบและวิธีการคำนวณด้วยมาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับ และมีพื้นฐานอยู่บนหลักการทางวิศวกรรมที่เหมาะสม ในกรณีที่ต้องการเลือกใช้รูปแบบที่แตกต่างไป ที่ยังไม่เคยมีการศึกษาหรือการทดสอบในห้องปฏิบัติการ จะต้องมีผลการศึกษาหรือผลการทดสอบตัวอย่างโครงสร้างในห้องปฏิบัติการ เพื่อแสดงให้เห็นว่าองค์อาคารและจุดต่อนั้น ๆ มีพฤติกรรมและความสามารถในการต้านทานแรง ความสามารถในการสลายพลังงาน และรูปแบบการวิบัติ เทียบเท่าองค์อาคารและจุดต่อของระบบโครงสร้างที่มีค่าตัวประกอบ และเท่าเทียมกันกับระบบที่เลือกใช้ ในกรณีที่องค์อาคารที่ใช้มีกำลังต้านทานด้านหนึ่งอ่อนแอกว่าอีกด้านหนึ่งมาก จะต้องคำนึงถึงการวิบัติแบบต่อเนื่อง (Progressive collapse) ของอาคารรวมหรืออาคารบางส่วน และออกแบบเพื่อป้องกันการวิบัติลักษณะนี้

กำลังรับแรงดัดที่ Horizontal joint (วิเคราะห์ด้วย Response2000)

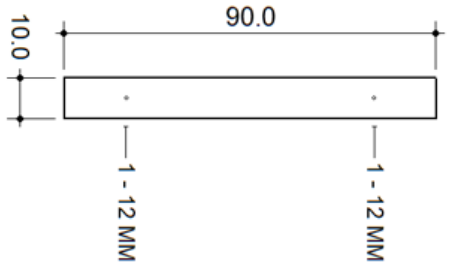




กรณีมีพฤติกรรมยกตัวเป็นแผ่นใหญ่ (4DB12)

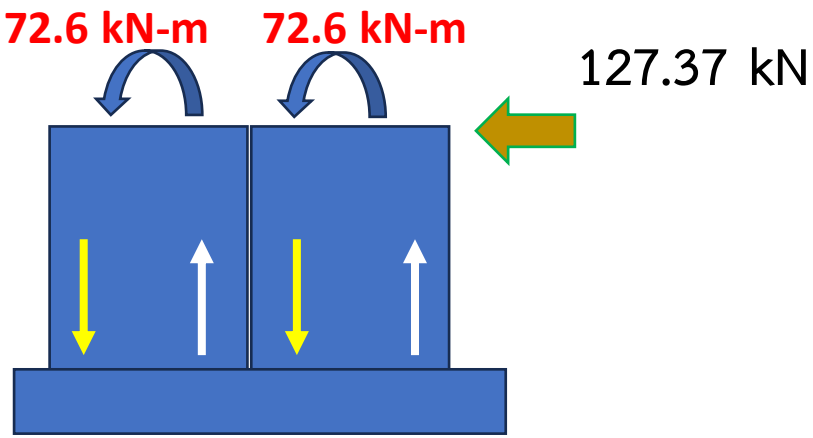
กำลังรับโมเมนต์ดัดสูงสุด = 292.4 kN-m

กำลังรับแรงดัดสูงสุด = 292.4/1.14 = 256.49 kN



$$V_n = (\alpha_c \lambda \sqrt{f_c'} + \rho_t f_{yt}) A_{cv} \qquad (11.5.4.3)$$

กำลังเฉือนผนังเท่ากันทั้งสองกรณี



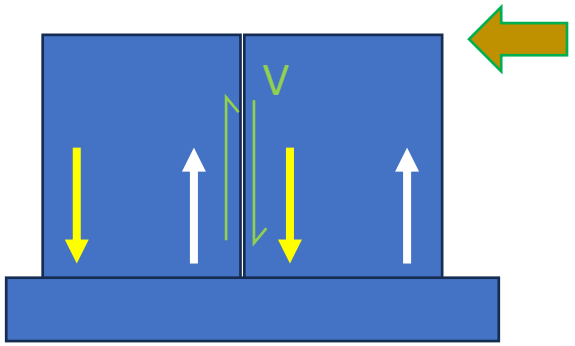
กรณีมีพฤติกรรมยกตัวเป็นแผ่นเล็กแยกกัน 2 แผ่น (2DB12)

กำลังรับโมเมนต์ดัดสูงสุด 1 แผ่น = 72.6 kN-m

กำลังรับแรงดัดสูงสุด 1 แผ่น = 72.6/1.14 = 63.68 kN

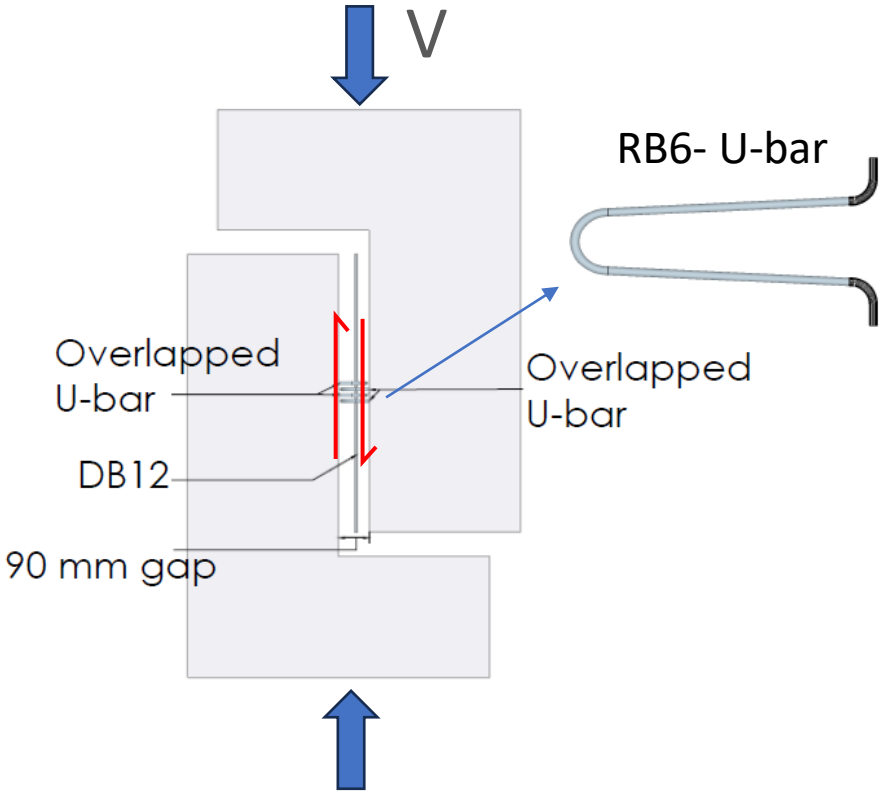
กำลังรับแรงดัดสูงสุดรวม 2 แผ่น = 63.68+63.68 = 127.37 kN

ผนังมีพฤติกรรมเป็น 1 แผ่น
หรือ 2 แผ่นแยกกัน



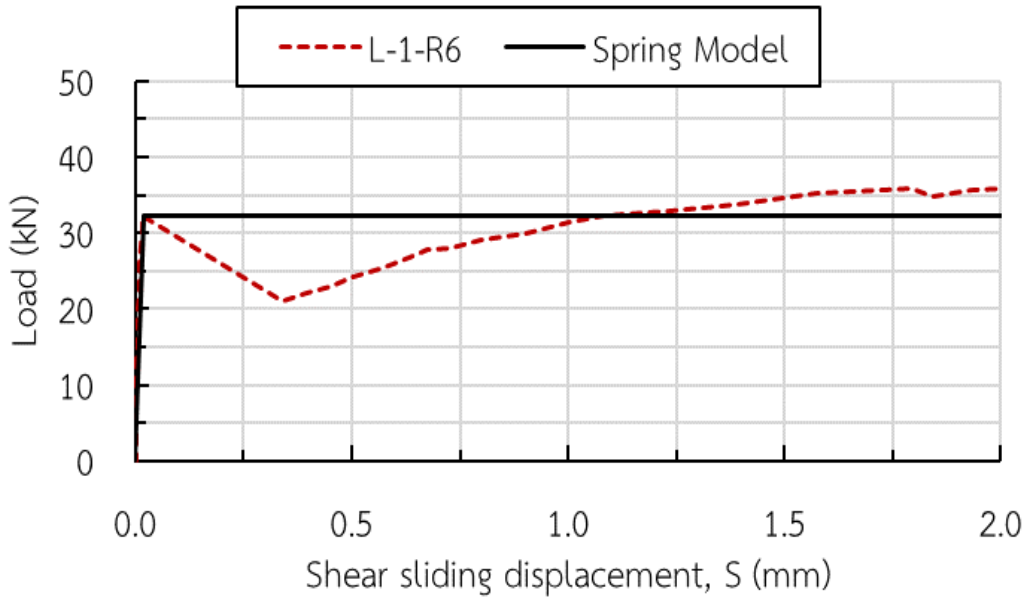
วิธีการทดสอบ Push-off test ในการทดสอบได้จำลองพฤติกรรมจริงของจุดต่อแนวดิ่งระหว่างผนังคอนกรีต

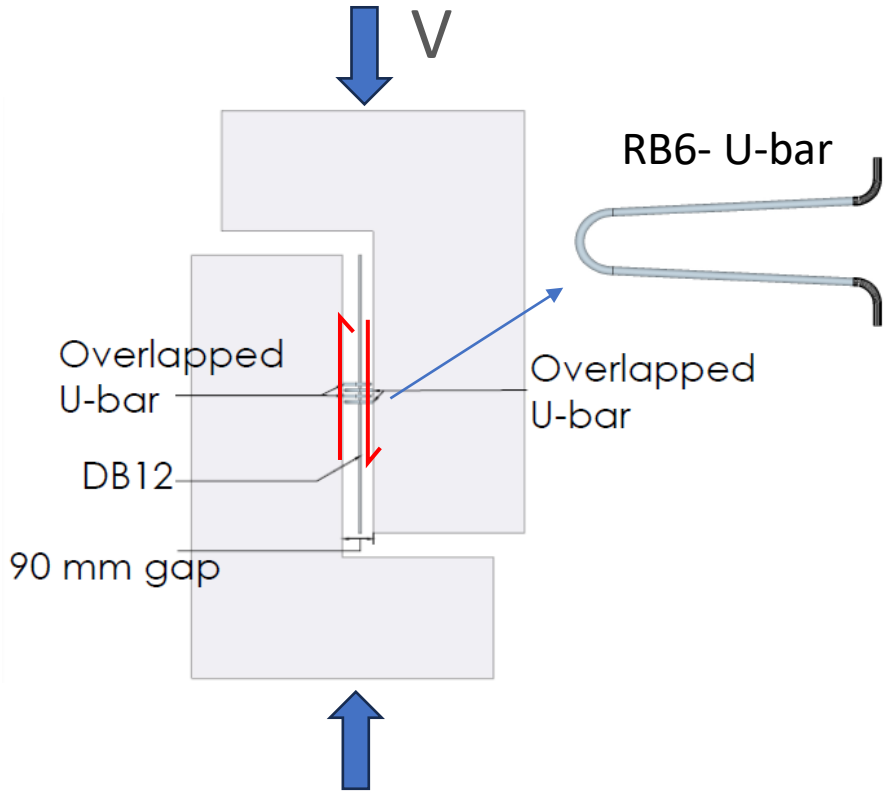




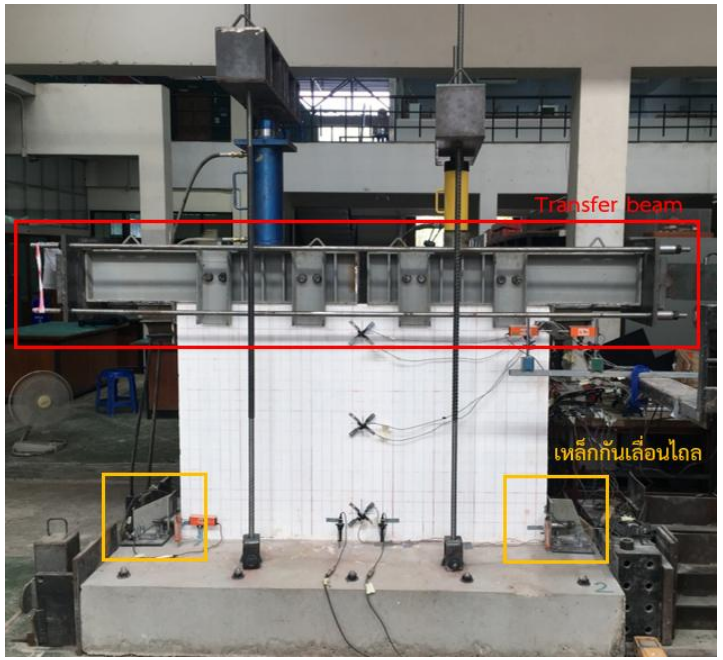
แบบจำลอง Spring Model ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงเฉือน-การเคลื่อนที่เฉือน (1 จุด)

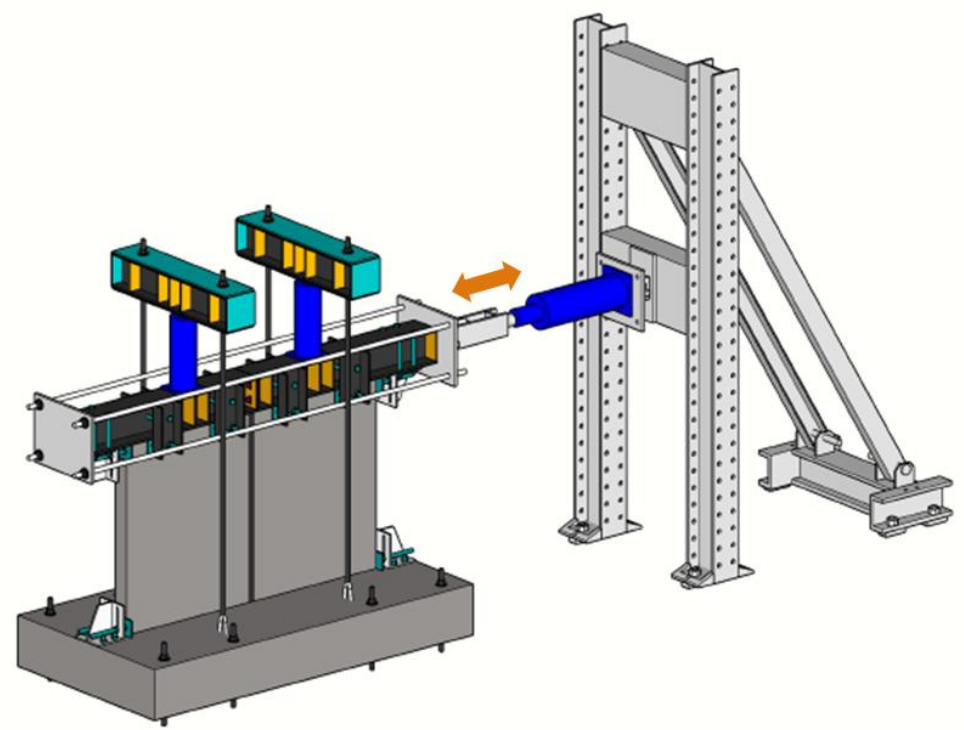
Initial stiffness (N/mm)	$K_0 = 380\sqrt{f_{cmg}}\,\frac{A}{w_j}$
Nominal Ultimate strength (N)	$V_u = 0.004Af_{cmg} + 0.86A_s f_s$
Cracking Slip (mm)	0.02



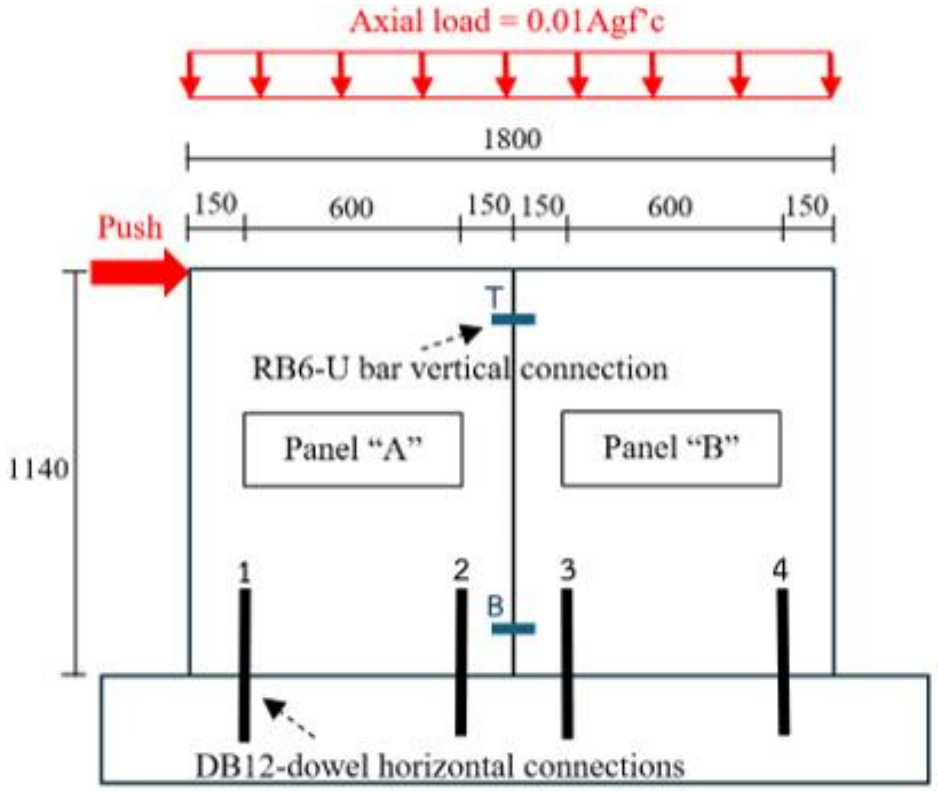


การทดสอบและการวิเคราะห์ผนังสำเร็จรูปรับแรงด้านข้าง

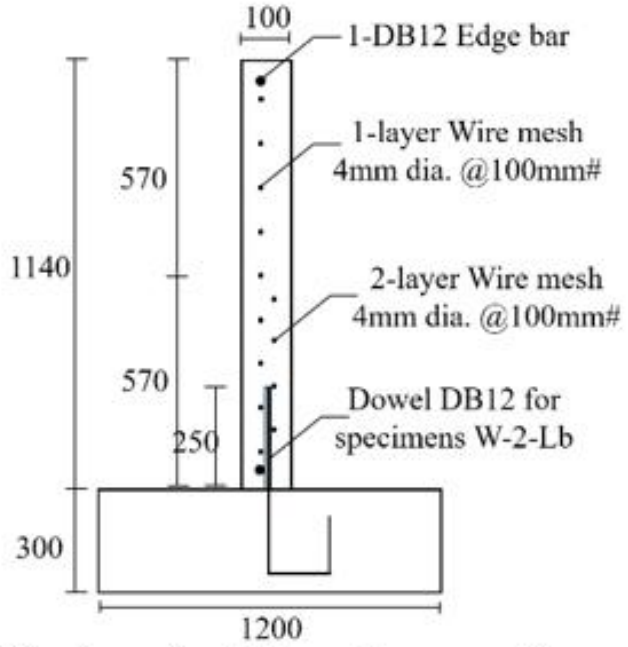




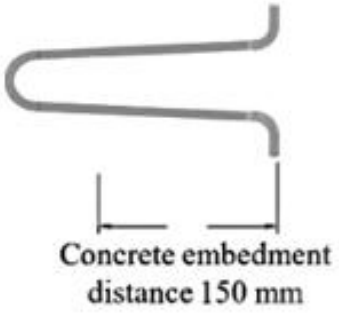
3 การวิเคราะห์โครงสร้างผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จที่พิจารณาจุดต่อ



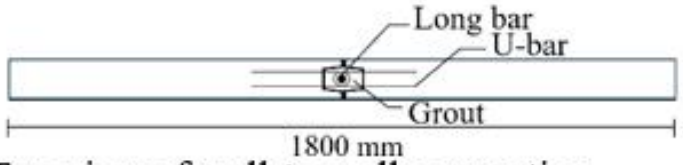
Front view of wall-to-wall connection



Sideview of wall-to-wall connection

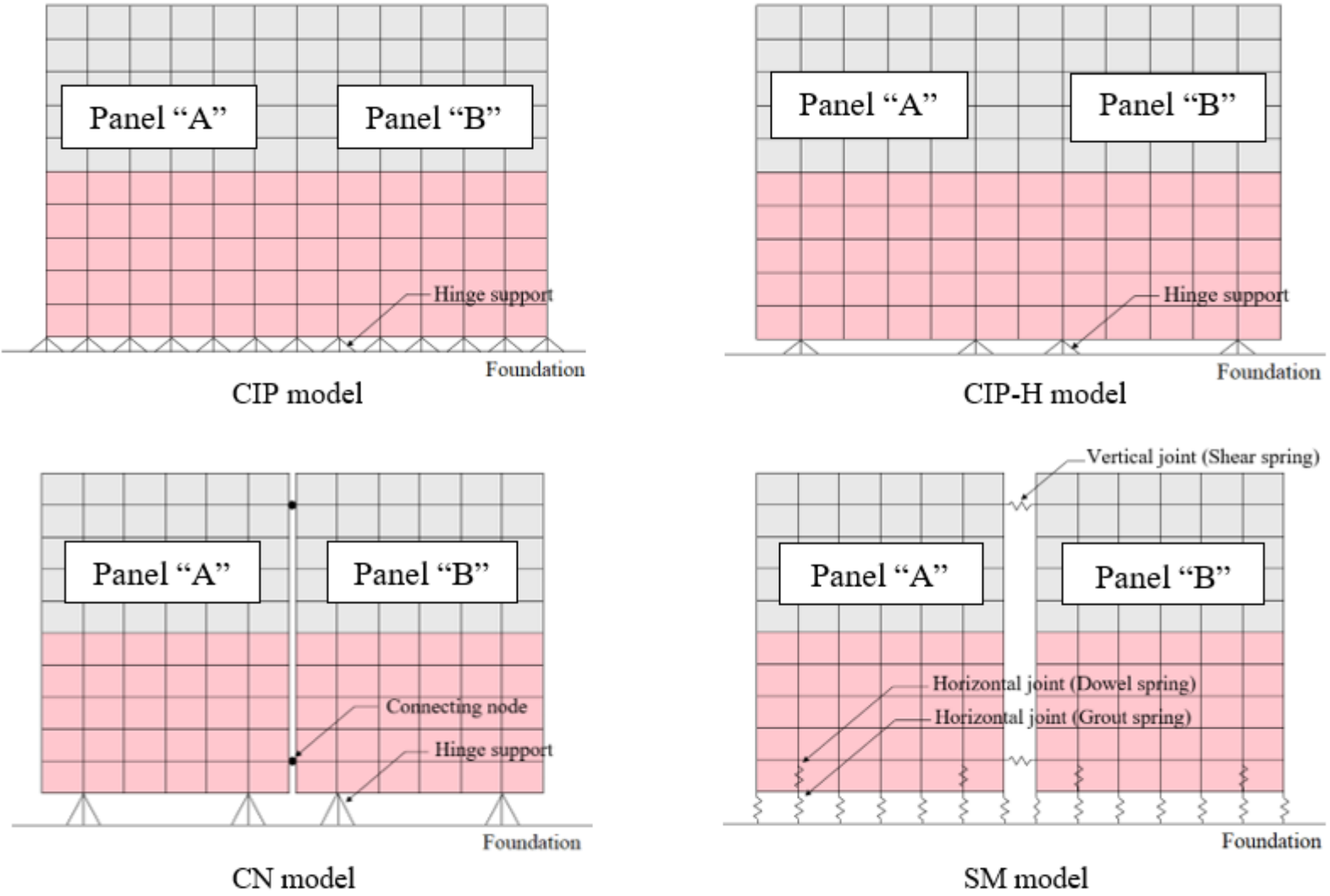


Vertical connection
(U-bar)



Top view of wall-to-wall connection

3 การวิเคราะห์โครงสร้างผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จที่พิจารณาจุดต่อ



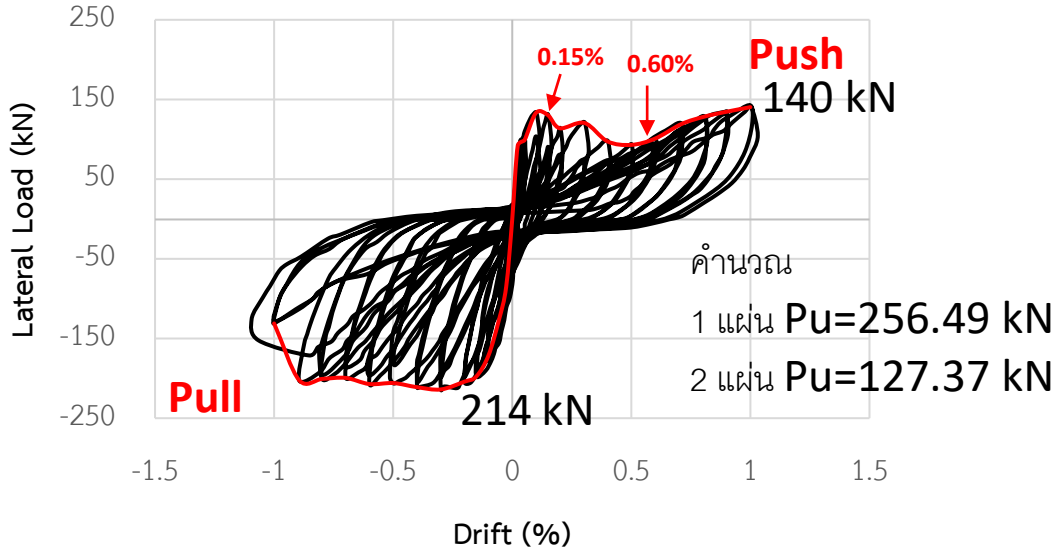
(b) Modeling of precast concrete wall

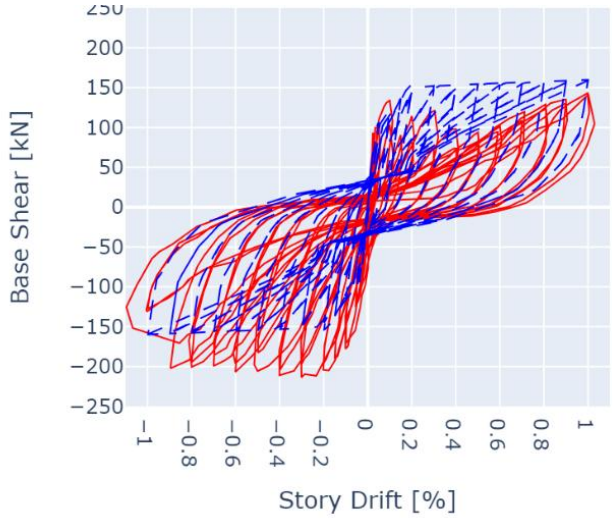
Figure 1. Finite element analyses of a precast concrete wall

พฤติกรรมการจำลองจุดต่อ 4 แบบ

- The Cast-in-place (CIP) and
- Cast-in-place with hinge-joint support (CIP-H) models
- The Connecting Node (CN) and
- Spring Model (SM)

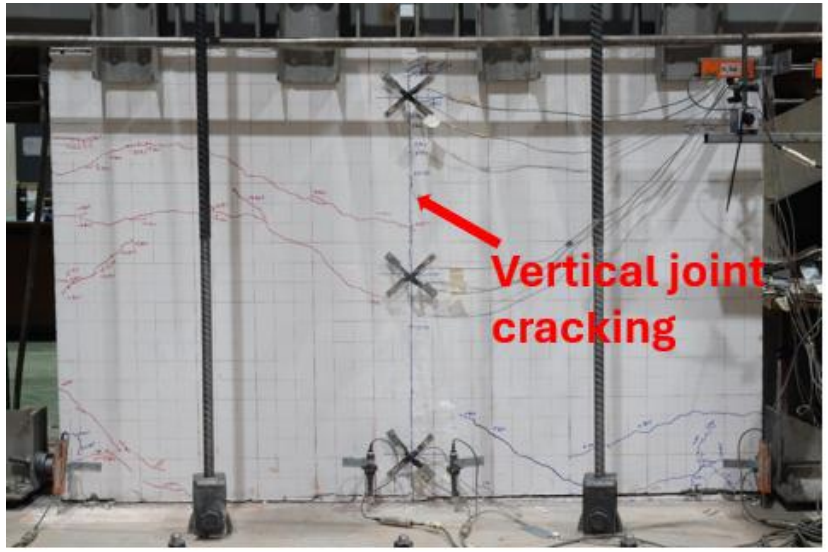
3 การวิเคราะห์โครงสร้างผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จที่พิจารณาจุดต่อ

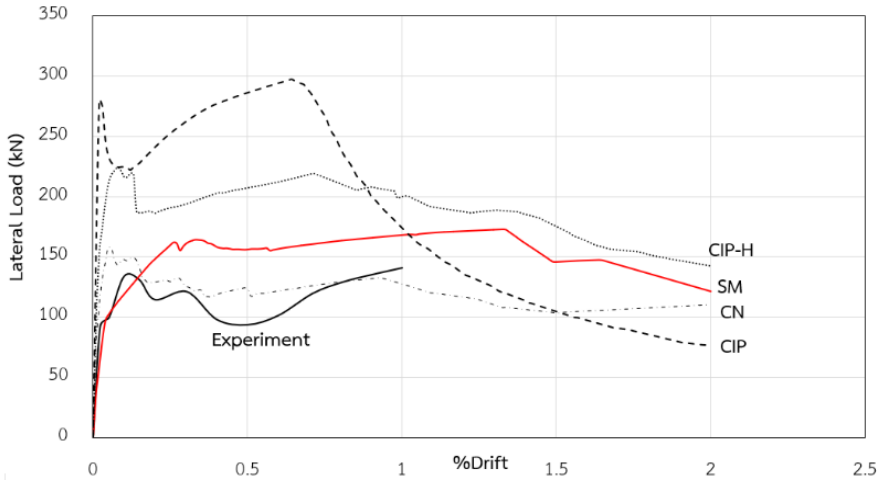




เปรียบเทียบผลการทดสอบและการวิเคราะห์

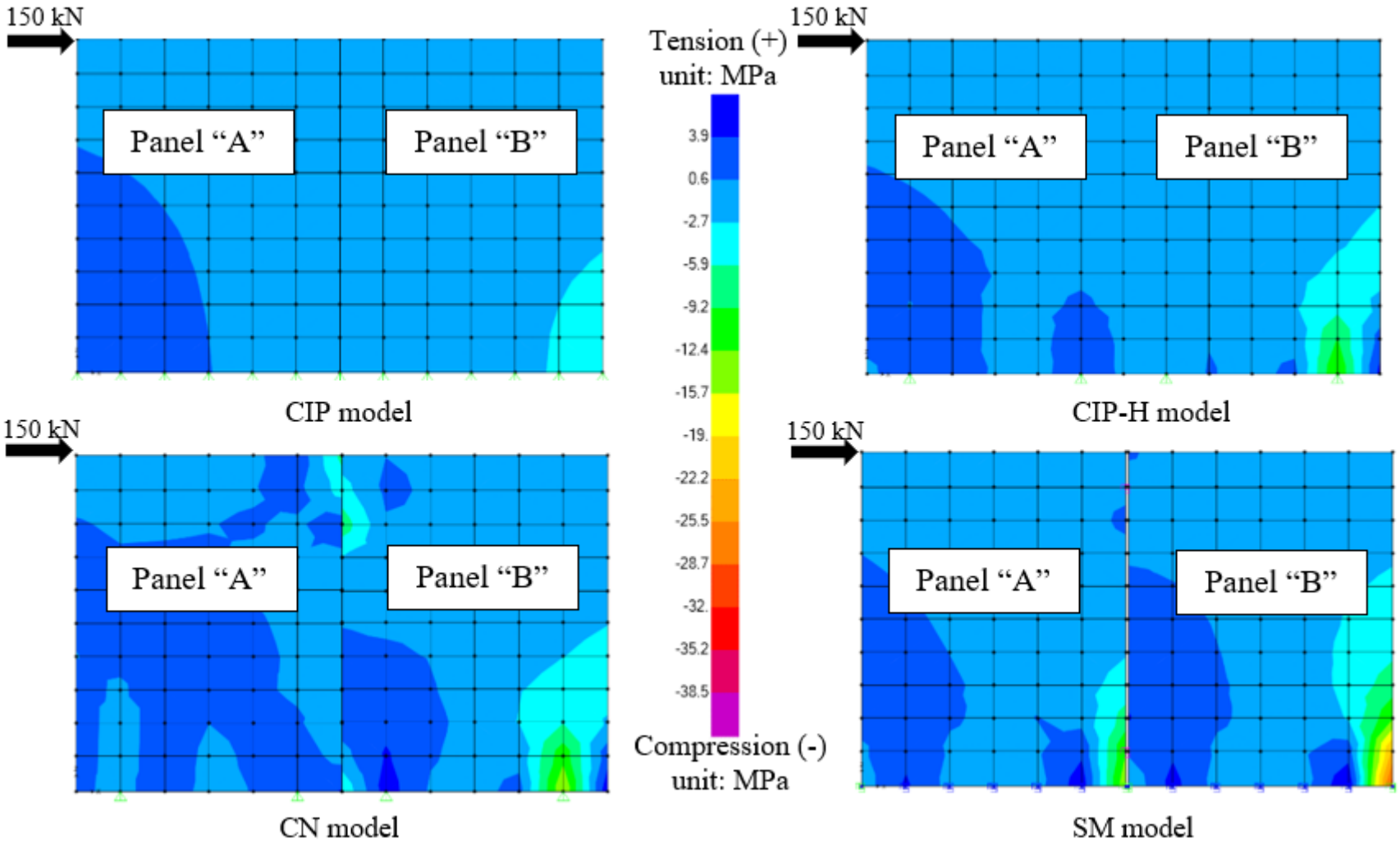
การเกิดรอยร้าวที่จุดต่อแนวดิ่ง



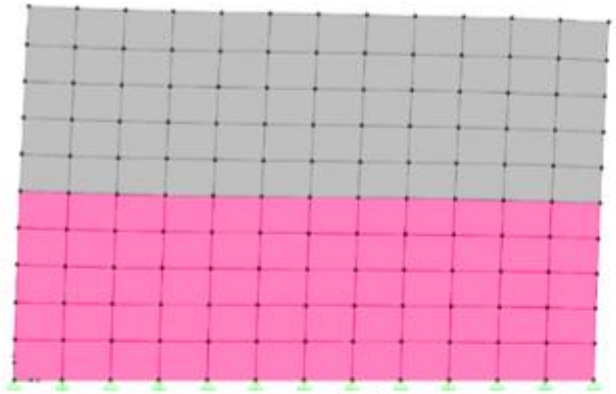


เปรียบเทียบผลการทดสอบและการวิเคราะห์ (เส้นขอบ)

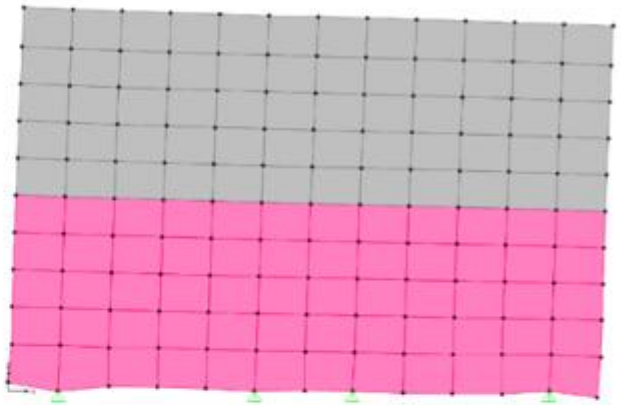
หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในผนังมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ส่งผลต่อการให้รายละเอียดเหล็กเสริมที่ต่างกัน



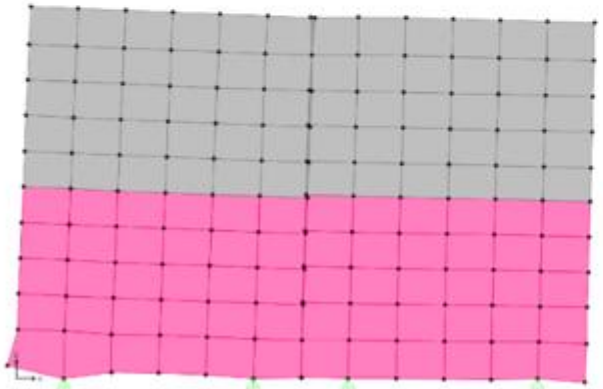
การควบคุมการเสียรูปที่ต่างกันของแต่ละแบบจำลอง



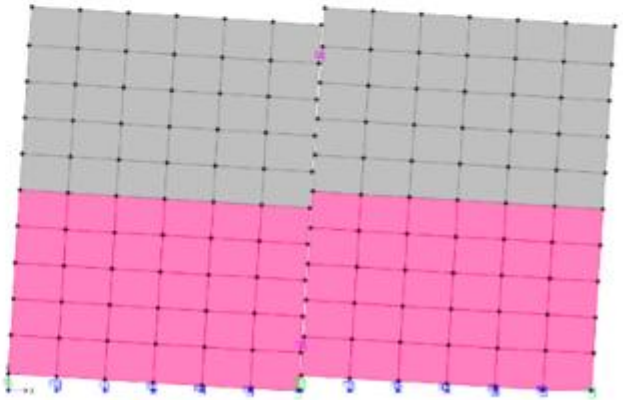
CIP model



CIP-H model

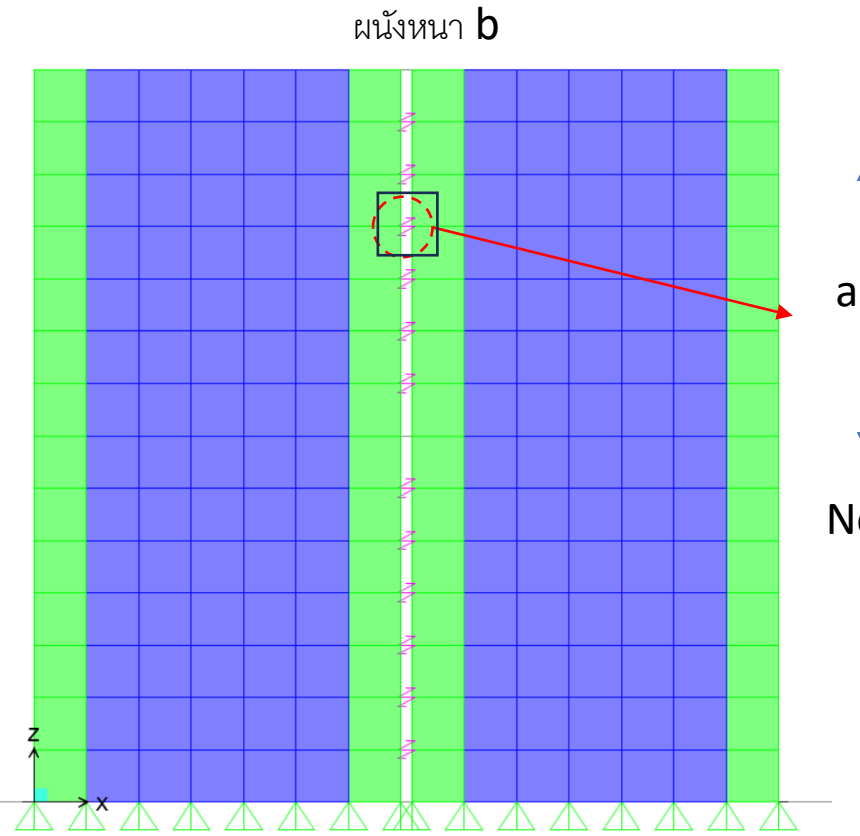


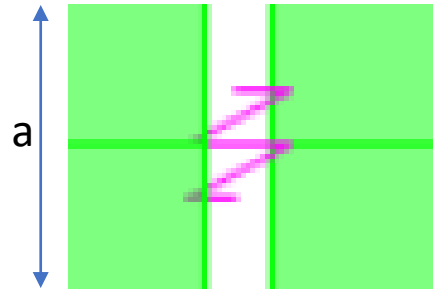
CN model



SM model

แบบจำลองสปริง



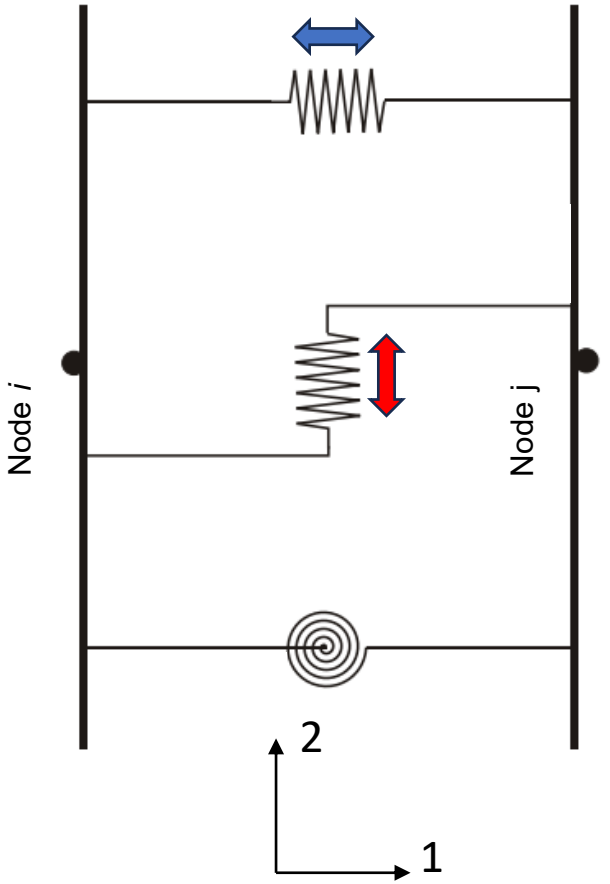


Node i L Node j

A =(a)x(b)

2 node link element

แบบจำลองสปริงแต่ละตำแหน่งประกอบด้วย



1. Axial Spring
จากคอนกรีต

2. Shear Spring
จากคอนกรีต+เหล็กเสริม

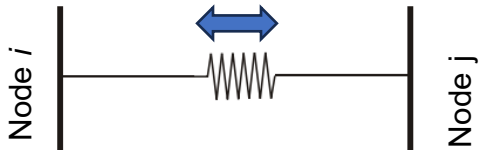
3. Pure Bending Spring:
(ไม่ได้ใช้ในการศึกษานี้)

3 การวิเคราะห์โครงสร้างผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จที่พิจารณาจุดต่อ

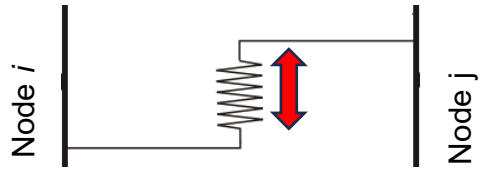
แบบจำลองสปริง

1. Axial Spring กำหนดให้มีพฤติกรรมแบบ Linear Elastic โดยมีค่า stiffness คือ:

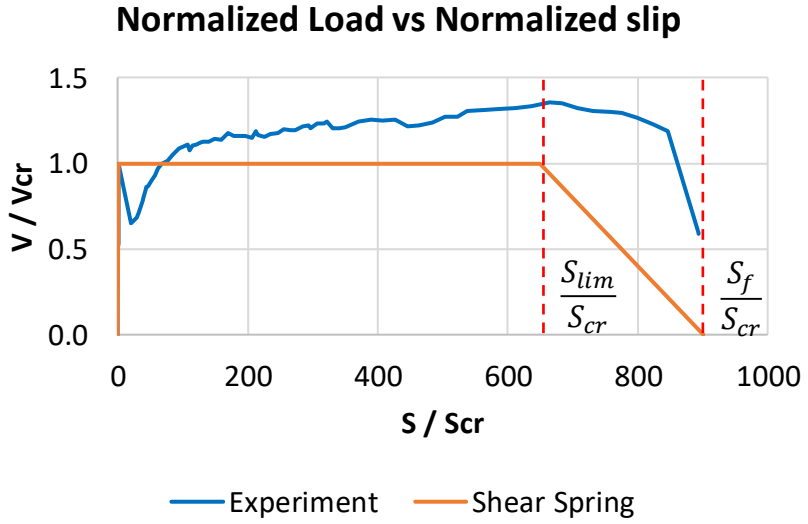
$$K = \frac{AE_g}{w_j}$$



2. Shear Spring กำหนดให้มีพฤติกรรมแบบ Multi-Linear Elastic



Initial Stiffness	$K_0 = 380\sqrt{f_{\text{cmg}}}\frac{A}{w_j}$	(N/mm)
Nominal Ultimate Capacity	$V_{cr} = 0.004Af_{\text{cmg}} + 0.86A_s f_s$ (N)	
Limit Slip	$S_{lim} = 650S_{cr}$	(mm)
Fracture Slip	$S_f = 900S_{cr}$	(mm)



โดยที่

E_g	คือ Elastic Modulus of grout	(MPa)
f_{cmg}	คือ กำลังอัดของคอนกรีตบริเวณจุดต่อ (cube)	(MPa)
f_y	คือ กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมต้านทานการเฉือน	(MPa)
A	คือ พื้นที่แนวดิ่งของจุดต่อ	(mm^2)
A_s	คือ พื้นที่เหล็กเสริมต้านทานการเฉือน	(mm^2)
w_j	คือ ความกว้างจุดต่อ	(mm)
S_{cr}	คือ ระยะเคลื่อนตัวของจุดต่อเมื่อเริ่มเกิดการแตกร้าว =0.02	(mm)
S_u	คือ ระยะเคลื่อนตัวของจุดต่อที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด	(mm)
S_f	คือ ระยะเคลื่อนตัวของจุดต่อเมื่อเกิดการแตกหัก	(mm)

3. แนวทางการออกแบบกำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จต้านแผ่นดินไหว

จบการบรรยาย

4. ตัวอย่างการออกแบบอาคารที่มีกำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จ

รศ.ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

โครงการพัฒนาหลักสูตรการเรียนรู้เรื่องการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว
ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) พ.ศ. 2568

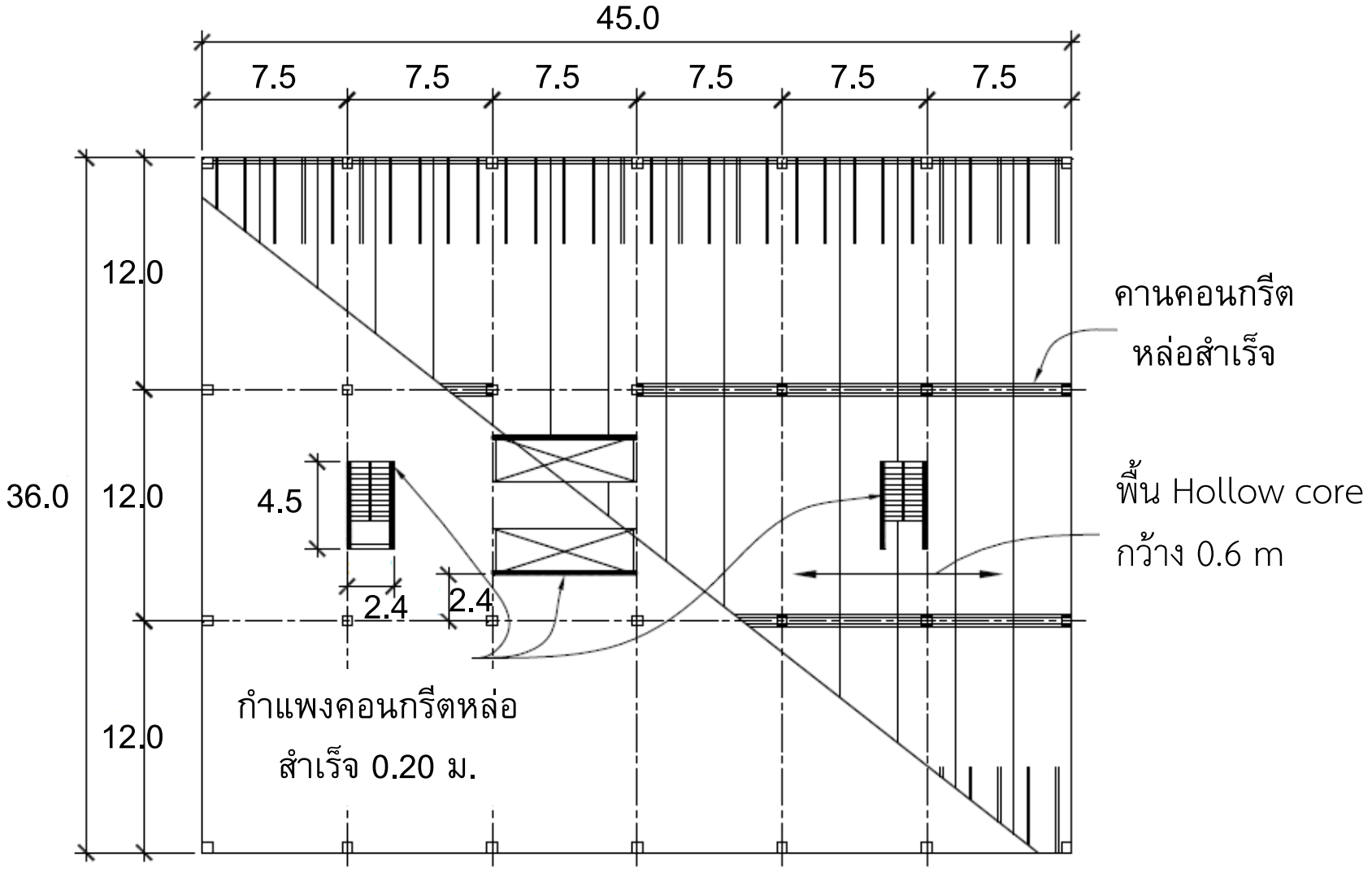
ตัวอย่างการออกแบบอาคารที่มีกำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จ

ตัวอย่างนี้เป็นอาคารที่สามารถต้านทานแผ่นดินไหวขนาดเล็กถึงปานกลาง ด้วยระบบโครงสร้างที่มีกำแพงรับแรงเฉือนที่มีการให้รายละเอียดความเหนียวปานกลาง (intermediate precast shear wall) มาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง 1301/1302-61 อนุญาตให้ใช้การออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวในประเภท ข และ ค

มาตรฐาน ACI318 ต้องการให้เกิดการครากระหว่างผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ หรือ ระหว่างผนังกับฐานราก โดยให้เกิดการครากในเหล็กเสริม และต้องการให้จุดต่อที่เกิดการครากนั้นสามารถต้านทานแรงกระทำไปได้อีกจนถึงค่า 80 เปอร์เซ็นต์ของกำลังต้านทานจากการเสียรูปที่ได้ออกแบบไว้ (design displacement)

อาคารในตัวอย่างนี้เป็นอาคารสำนักงาน 3 ชั้น ตั้งอยู่ใน อ.เมือง จังหวัดสุโขทัย พื้นดินประเภท C หรือดินแข็ง อาคารมีความกว้างของพื้น hollow core กว้าง 3 ม. ความยาว 12 ม. ตั้งแต่พื้นชั้นที่ 1 จนถึงหลังคา ใช้คอนกรีตเททับหน้าหนา 5 ซม. ตัวอย่างนี้จะแสดงการออกแบบกำแพงรับแรงเฉือนเท่านั้น แต่จะไม่แสดงการคำนวณไดอะแฟรมพื้น

ตัวอย่างการออกแบบอาคารที่มีกำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จ



กำหนดให้กำแพงคอนกรีตหล่อสำเร็จ

ความหนา 20 ซม.

f'_c ผนังสำเร็จ= 350 ksc

f_y = 4000 ksc

f'_c ฐานราก = 280 ksc

อาคารสูงชั้นละ 3.5 ม.

ตัวอย่างการออกแบบอาคารที่มีกำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จ

ตัวแปรในการออกแบบ (design parameter)

ตัวแปรในการออกแบบ	ค่าที่ใช้ในการออกแบบ	ข้อกำหนดของ มยผ 1301/1302-61
ความสำคัญของอาคาร (I)	1.0	ตารางที่ 1.5-1
ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบสั้น (S_s)	0.449	ตารางที่ 1.4-1
ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบสั้น (S_1)	0.117	ตารางที่ 1.4-1
พื้นดินประเภท	C	โจทย์กำหนด
สัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร สำหรับคาบการสั่น 0.2 วินาที (F_a)	1.320	ตารางที่ 1.4-2
สัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร สำหรับคาบการสั่น 1 วินาที (F_v)	1.683	ตารางที่ 1.4-3
ความเร่งตอบสนองปรับแก้ (คาบการสั่น0.2วินาที)	0.449x1.32=0.593	(1.4-1)
ความเร่งตอบสนองปรับแก้ (คาบการสั่น 1 วินาที)	0.117x1.683=0.197	(1.4-2)

ตัวอย่างการออกแบบอาคารที่มีกำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จ

ตัวแปรในการออกแบบ (design parameter)

ตัวแปรในการออกแบบ	ค่าที่ใช้ในการออกแบบ	ข้อกำหนดของ มยผ 1301/1302-61
ความเร่งตอบสนองสำหรับออกแบบ ที่คาบการสั่น 0.2 วินาที	0.593*(2/3)=0.395	(1.4-3)
ความเร่งตอบสนองสำหรับออกแบบ ที่คาบการสั่น 1 วินาที	0.197*(2/3)=0.131	(1.4-4)
ประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว	ค.	ตารางที่ 1.6-1, 1.6-2
ระบบโครงสร้างโดยรวม	โครงอาคาร (Building frame system)	ตารางที่ 2.3-1
ระบบต้านทานแรงด้านข้าง	กำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จแบบที่มีการให้รายละเอียดความเหนียวปานกลาง (Intermediate Precast shear wall)	ตารางที่ 2.3-1
ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R)	4	ตารางที่ 2.3-1
ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน (Ω_0)	2.5	ตารางที่ 2.3-1
ตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว (C_d)	4	ตารางที่ 2.3-1

คำนวณแรงแผ่นดินไหว

คำนวณน้ำหนักอาคาร พิจารณาน้ำหนักจากพื้น 2 ชั้นและน้ำหนักหลังคา

น้ำหนักแผ่นพื้น	155 กก./ม.^{2}
น้ำหนักคาน	60 กก./ม.^{2}
น้ำหนักเสา	22 กก./ม.^{2}
น้ำหนักบรรทุกตายตัวเพิ่มเติมเพิ่มเติม	50 กก./ม.^{2}
น้ำหนักบรรทุกจากผนังกั้นห้อง	100 กก./ม.^{2}
รวมน้ำหนักทั้งหมด	387 กก./ม.^{2}

ตัวอย่างการออกแบบอาคารที่มีกำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จ

น้ำหนักบรรทุกในแต่ละชั้นรวมน้ำหนักผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ มีค่าเท่ากับ

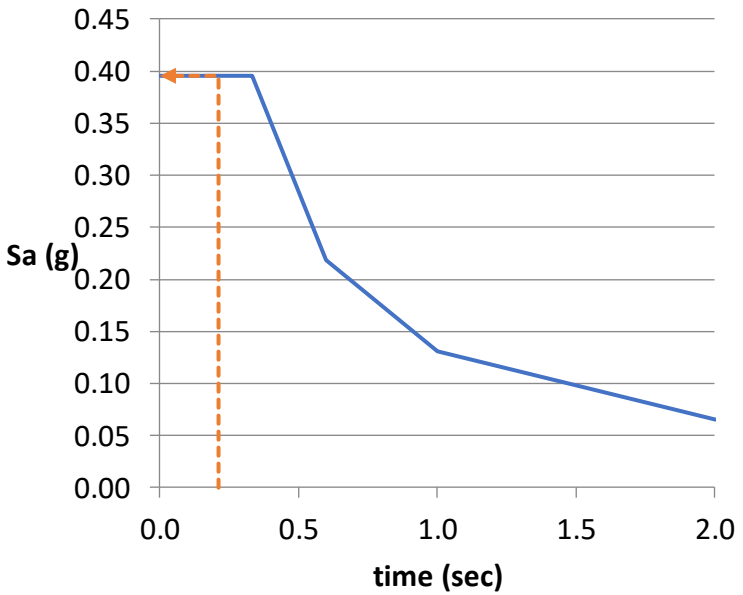
$$W = \left[45\times36\times387 + 0.2\times\left(4\times4.5+2\times7.5\right)\times3.5\times2,400\right]/1,000 = 682.38 \text{ ตัน}$$

น้ำหนักรวมทั้ง 3 ชั้น เท่ากับ $W = 3\times682.38 = 2,047.14$ ตัน

แรงเฉือนที่ฐานอาคาร (มยผ.1301/1302-61) ด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า

$V = C_s.W$

$$C_s = S_a\left(\frac{I}{R}\right)$$



R เป็นตัวประกอบปรับผลตอบสนอง ในตัวอย่างนี้ = 4

I เป็นตัวประกอบความสำคัญอาคาร = 1

S_a เป็นค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร (T)

เมื่อ T = 0.02H H เป็นความสูงอาคาร = 3x3.5 = 10.5 ม.

T = 0.02x10.5 = 0.21 วินาที อ่านค่าจากกราฟได้ S_a = 0.395g

ดังนั้นแรงเฉือนที่ฐาน $V=C_s.W = 0.395x(1/4) \times W = 0.0988\ W = 0.0988 \times 2{,}047.14 = 202.26$ ตัน

กระจายแรงเฉือนที่ฐานไปยังแต่ละชั้น $F_x = C_{vx}V$

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^{n} w_i h_i^k}$$

เมื่อ F_x เป็นแรงกระทำในแต่ละชั้น

C_{vx} เป็นตัวประกอบการกระจายในแนวดิ่ง

W_x เป็นน้ำหนักโครงสร้างประสิทธิผลของชั้นที่ x

h_i และ h_x เป็นความสูงที่ระดับชั้น i และ x ตามลำดับ

k เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่กำหนดรูปแบบการกระจายแรง = 1.0 เนื่องจากคาบ T = 0.21 < 0.5 วินาที

ตัวอย่างการออกแบบอาคารที่มีกำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จ

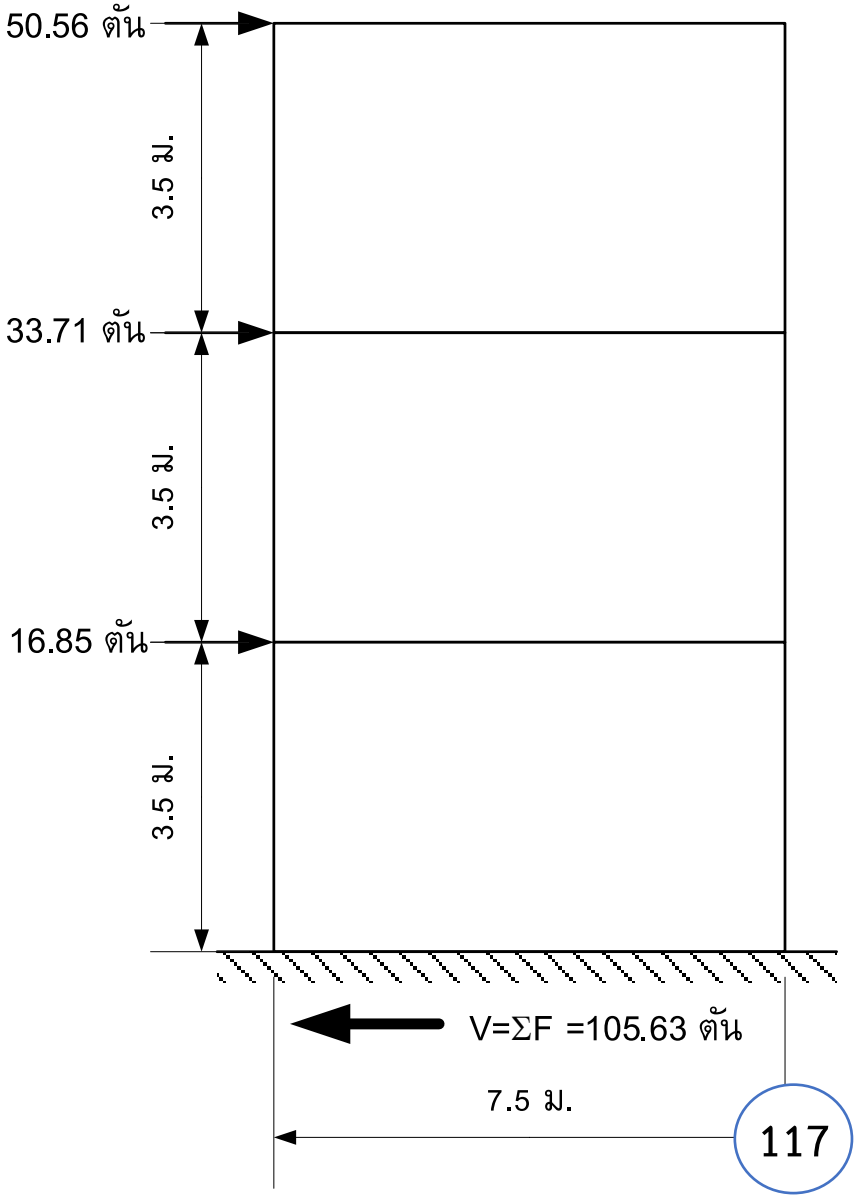
กระจายแรงเฉือนขึ้นแต่ละชั้น

ชั้นที่	W_i	h_i	$w_i.h_i$	C_{vx}	V	$F_x=C_{vx}.V$
R	682.38	10.5	7,165	0.500	202.26	101.13
3	682.38	7.0	4,777	0.333	202.26	67.42
2	682.38	3.5	2,388	0.167	202.26	33.71
sum	2,047.10		14,330			202.26

ตัวอย่างการออกแบบอาคารที่มีกำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จ

พิจารณาตามแนวยาวอาคาร

ตามแนวยาวมีกำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จยาว 7.5 ม. จำนวน 2 แผง โดยให้แต่ละแผงรับแรงเท่าๆ กัน ดังนั้นแรงกระทำในกำแพงรับแรงเฉือนของแต่ละชั้นจะมีค่าเท่ากับ



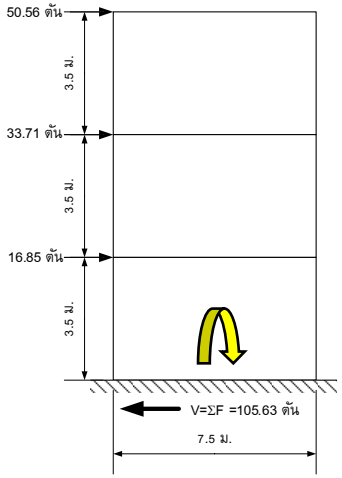
การคำนวณปริมาณเหล็กเสริมในกำแพงรับแรงเฉือนตามยาว

สมมุติให้น้ำหนักบรรทุกตายตัวถ่ายลงสู่กำแพงสำเร็จ P_{DL} = 210.96 ตัน

น้ำหนักบรรทุกจรถ่ายลงสู่กำแพงสำเร็จ P_{LL} = 21.6 ตัน

ผลรวมโมเมนต์จากแรงแผ่นดินไหว M_E = 16.85 x 3.5 + 33.71x7.0 + 50.56x10.5 = 825.88 ตัน-ม.

ใช้ชุดการรวมแรงที่รวมผลของน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่ง



$P_{max} = 0.75x(1.4P_{DL}+1.7P_{LL})\pm 1.0P_{EQ} = 0.75 \times (1.4x210.96+1.7x21.6) +0 = 249.05$ ตัน

$P_{min} = 0.9P_{DL}\pm 1.0P_{EQ} = 0.9x210.96 +0 = 189.86$ ตัน

แรงกระทำในแนวดิ่งมีค่าประมาณ $P_{max}/A_g = 249.05 \times 1000/(20x750) = 16.60$ ksc

ซึ่งมีค่าน้อยมาก $P_{max}/A_g = 0.047f'_cA_g$

ตัวอย่างการออกแบบอาคารที่มีกำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จ

แรงดึงในเหล็กเสริมที่ปลายกำแพงรับแรงเฉือนสำเร็จรูปคำนวณจาก

$T_u = (M/jd) - P_{min}/2 = 825.88/(7.0) - 189.86/2 = 23.05$ ตัน

เมื่อแขนของโมเมนต์ jd = 7.5-2x0.25 = 7.0 ม.

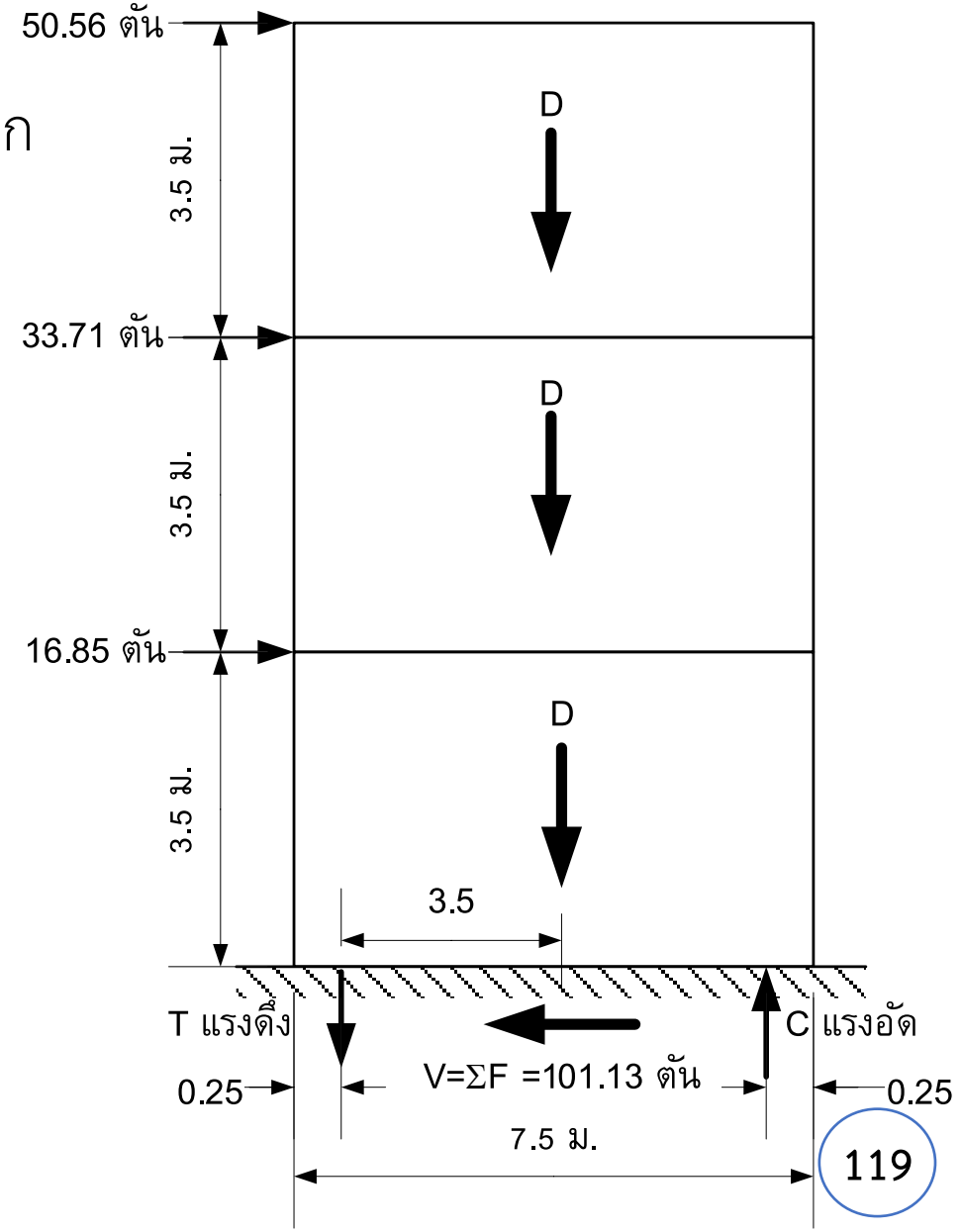
ปริมาณเหล็กที่ต้องการ $T_u/(\phi f_y)$

$= 23.05 \times 1000/ (0.9 \times 4000) = 6.40$ ซม.^{2}

เลือกใช้ DB20 จำนวน 3 เส้น As = 3x3.14 = 9.42 ซม.^{2}

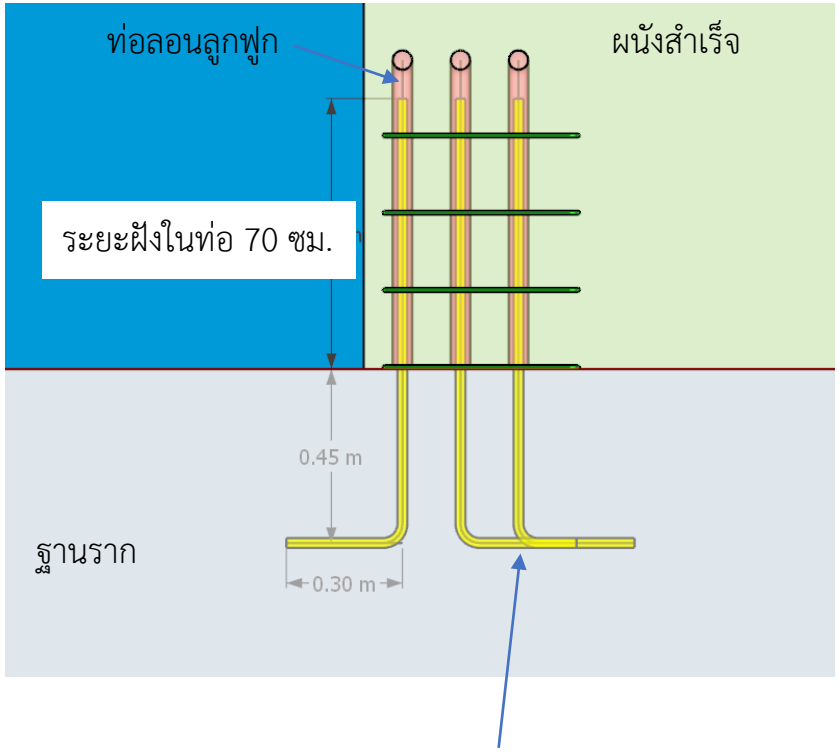
ที่ปลายของกำแพงทั้ง 2 ด้าน ฝากที่ฐานราก

และสวมเข้ากับท่อลอนลูกฟูกที่ฝังในผนังสำเร็จ



คำนวณระยะฝังเหล็ก DB20

รายการ	ค่า	ตรวจสอบ
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม d_b (cm) =	2.0	
พื้นที่หน้าตัด As (cm^2) =	3.14	
กำลังอัดของคอนกรีต f'_c (ksc) =	350	
กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม f_y (ksc) =	4,000	
ความยาวระยะฝังที่ต้องการ, $l_d = 0.06.A_b.f_y/sqrt(f'c)$, cm	40.3	
modification factor	1.4	
ระยะฝังที่ต้องการ (cm) modify factor x l_d	56.4	
ระยะฝังขั้นต่ำ, $l_{dmin} = 0.11db.fy/sqrt(f'c)$, cm	47.0	
ระยะฝังต้องไม่น้อยกว่า (cm)	30	
ระยะฝังจริงในเสาเข็มไม่น้อยกว่า (cm)	70.0	OK
กำลังต้านทานแรงดึง, $0.9.f_y.A_s$ (kg) =	11,310	
ระยะฝังสำหรับการงอขอ 90 องศา, $l_{dh}=0.08d_b.f_y/sqrt(f'c)$, cm	34.21	
ระยะฝังจริงสำหรับงานทำงอขอ, cm	45	OK
ระยะปลาย 12db, cm	24	
ระยะยื่นปลายจริงใช้, cm	30	OK



DB20 ฝังในฐานรากงอขอ 90 องศา
ฝัง 45 ซม. ยื่นปลาย 30 ซม.

คำนวณความลึกของแกนสะเทิน

- แรงอัดทั้งหมด $A_s f_y + P_{max}$ = 9.42 x 4000 + 249.05 x 1000 = 286,728 กก.

- ความลึกประสิทธิผลของพื้นที่รับแรงอัด $a = \frac{A_s f_y + P_{\max}}{0.85 f_c' b} = \frac{286,728}{0.85 \times 350 \times 20} = 48.19\, cm$

- ความลึกแกนสะเทิน c = a/ $\beta 1$ = 48.19/0.8 = 60.24 cm

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05\left(\frac{f_c' - 280}{70}\right) = 0.85 - 0.05\left(\frac{350 - 280}{70}\right) = 0.80 : 280 \le f_c' \le 560$$

มาตรฐาน ACI318 กำหนดให้ความลึกแกนสะเทินสูงสุดไม่เกิน (c_{max}) โดยปราศจาก boundary element

$$c_{max} \leq \frac{l}{600(\delta_u / h_w)}$$

เมื่อ l เป็นความยาวของผนังคอนกรีตรับแรงเฉือน สำหรับตัวอย่างนี้เท่ากับ 750 ซม.

δ_u เป็นการเคลื่อนตัวของผนังรับแรงเฉือน

h_w เป็นความสูงของผนังรับแรงเฉือน

มาตรฐาน ACI318 /มยผ.1301/1302-61 กำหนดให้อัตราส่วน $\delta_u/h_w \leq 0.007$

เมื่อแทนค่าจะได้ c_{max} = 750/(600x0.007) = 179 ซม. > 60.24 ซม. ใช้ได้

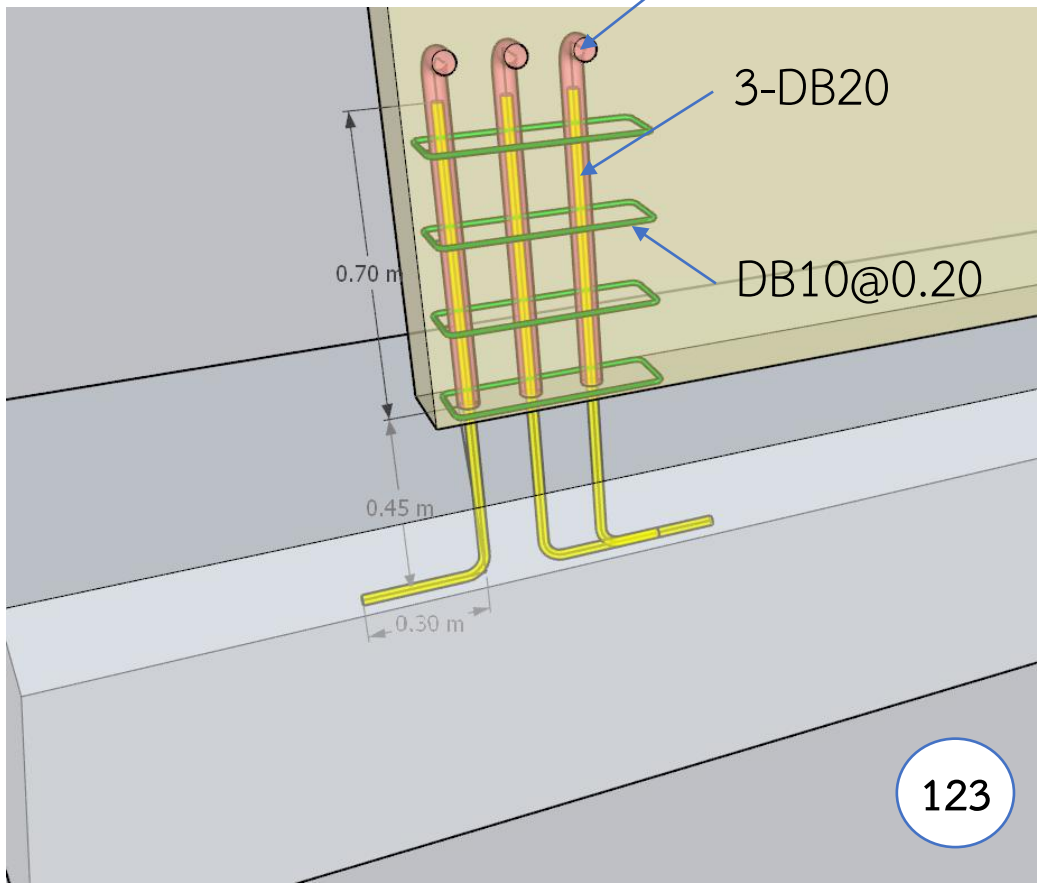
ตัวอย่างการออกแบบอาคารที่มีกำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จ

ตรวจสอบหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นภายในกำแพง

$$\sigma = \frac{P}{A} + \frac{Mc}{I} = \frac{249.05 \times 1,000}{20 \times 750} + \frac{825.88 \times 1,000 \times 100 \times (750/2)}{\left(\frac{20 \times 750^3}{12}\right)} = 46\ ksc$$

หน่วยแรงที่ยอมให้ < 0.2f'c = 70 ksc > 46 ksc

อย่างไรก็ตามเสริมเหล็กรับแรงเฉือนที่ปลายของผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ DB10@0.20m เป็นเหล็กโอบรัดเพื่อความมั่นใจ



<u>ออกแบบรอยต่อต้านแรงเฉือน</u>

ปกติการออกแบบต้านแรงเฉือนจะใช้จะคำนวณจากแรงเสียดทานเฉือน (shear friction) แต่สำหรับตัวอย่างนี้จะใช้แผ่นเหล็กฉากเสริมกลางที่เชื่อมระหว่างผนังกับฐานราก เพื่อป้องกันการเลื่อนไถลจากแรงเฉือน

แรงเฉือนที่ใช้ออกแบบคำนวณจาก

$$1.5\frac{M_y}{M_E}V_{base}$$

เมื่อ M_y เป็นกำลังต้านโมเมนต์ดัดของผนังสำเร็จ $A_s f_y jd + P_{\max}(jd/2)$

M_E เป็นโมเมนต์ที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหว

V_{base} เป็นแรงเฉือนที่ฐาน

พิจารณาตามยาวอาคาร

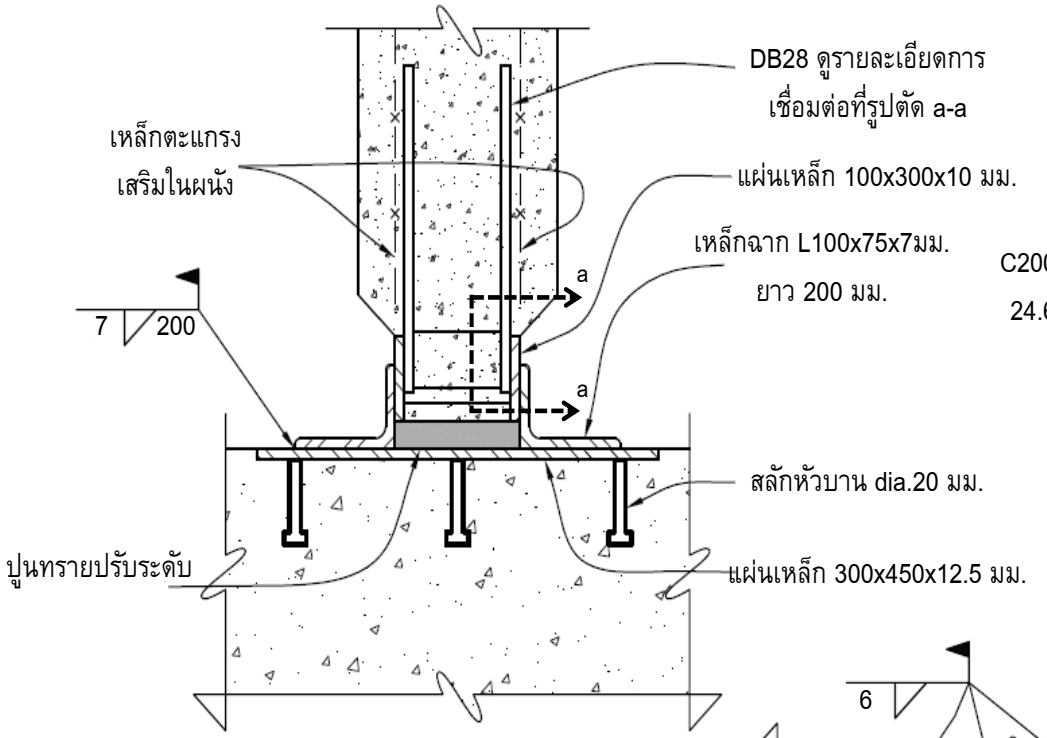
$M_y = A_s f_y jd + P_{max}(jd/2) = (9.42 \times 4000 \times 7.0 + 249.05 \times 7.0/2)/1000 = 1135.43$ ton-m

M_E = 825.88 ton-m

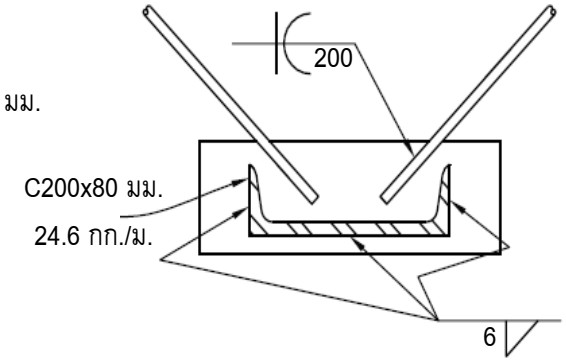
V_{base} = 101.13 ton

$$1.5\frac{M_y}{M_E}V_{base} = 1.5 \times \frac{1135.43}{825.88} \times 101.13 = 208.55 \text{ ton}$$

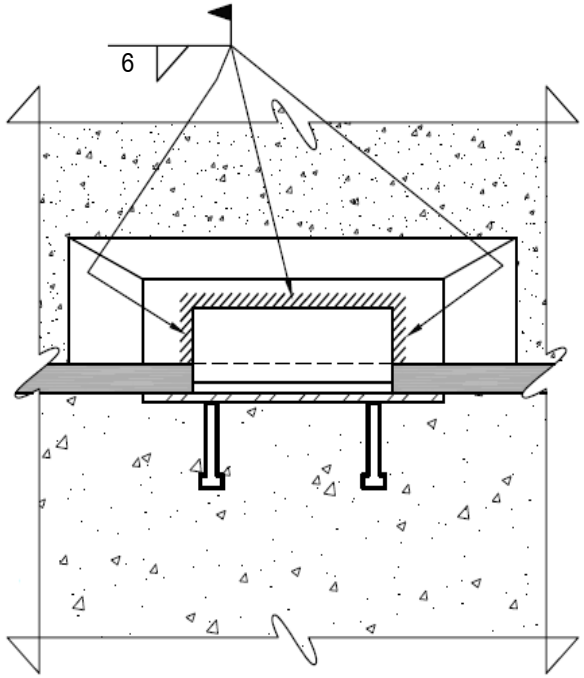
รูปแบบของจุดต่อต้านทานแรงเฉือนที่ฐาน แสดงในรูป จะเห็นว่ารอยต่อดังกล่าวมีความแข็งแกร่งสูงในการต้านทานแรงเฉือน แต่มีความยืดหยุ่นในแนวดิ่ง เนื่องจากต้องการให้เกิดการคราก ซึ่งหากทำให้เกิดความแข็งแกร่งสูงในแนวดิ่งแล้ว จะเป็นเพิ่มความต้องการกำลังต้านทานแรงเฉือนที่สูงไปด้วย



(ก) รูปตัดของจุดต่อต้านทานแรงเฉือน



(ข) รูปตัด a-a รายละเอียดการฝังแผ่นเหล็กในผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก



(ค) รูปด้านจุดต่อต้านทานแรงเฉือน

ตัวอย่างการออกแบบอาคารที่มีกำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จ

กำลังต้านทานแรงเฉือนของจุดต่อสามารถตรวจสอบได้จาก

- กำลังต้านทานแรงเฉือนของเหล็กฉาก 2 แผ่น 100x75x7mm ยาว 20 cm

$$\phi V_n = 2\left[\phi\left(0.6F_u\right)tl\right] = 2\left[0.75\times\left(0.6\times 4000\right)\times 0.7\times 20\right]/1,000 = 50.4\ ton$$

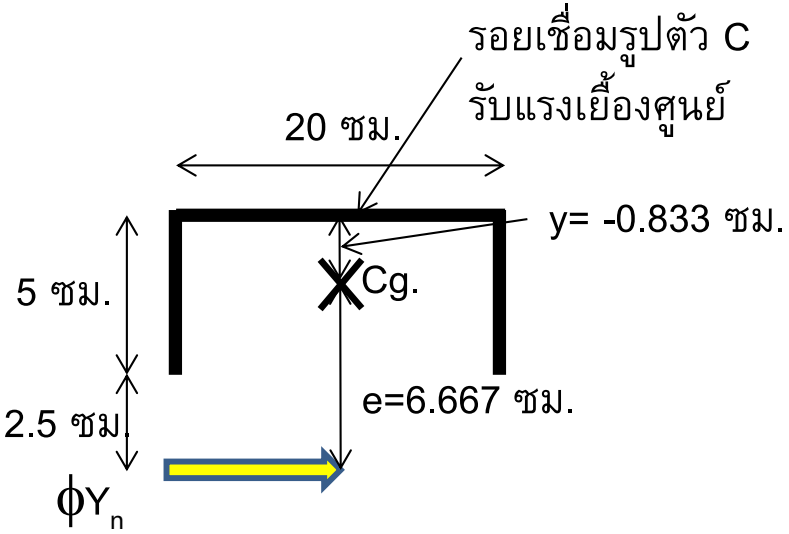
- กำลังต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมเหล็กฉากกับแผ่นเหล็กฝังในฐานราก

เมื่อความยาวรอยเชื่อม l_w = 20 cm ความหนารอยเชื่อม t_w = 7 mm ลวดเชื่อม E70xx F_u=4,900 ksc

$$\phi V_n = \phi n(0.6F_{Exx})l_w\left(0.707t_w\right) = 0.75\left[2\times\left(0.6\times 4,900\right)\times 20\times\left(0.707\times 0.7\right)\right]/1,000 = 43.65\ ton$$

ตัวอย่างการออกแบบอาคารที่มีกำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จ

- กำลังต้านทานแรงเฉือนของรอยเชื่อมเหล็ก C ฝังในผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ รอยเชื่อมดังกล่าวเป็นรูปตัว C



คำนวณโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วจาก

$$J = \sum J_i = \sum\left(\frac{1}{12}L^3 + L\left(x^2 + y^2\right)\right)$$

$$J = \left(\frac{1}{12}\times 5^3 + 5\left(0^2 + 2.5^2\right)\right) + \left(\frac{1}{12}\times 20^3 + 20\left(10^2 + 5^2\right)\right) + \left(\frac{1}{12}\times 5^3 + 5\left(20^2 + 2.5^2\right)\right) = 5,250\ cm^3$$

หน่วยแรงเฉือนของรอยเชื่อม เมื่อ ความหนารอยเชื่อม t_w = 7 mm ลวดเชื่อม E70xx F_u=4,900 ksc

$$q = \phi n(0.6F_{Exx})l_w\left(0.707t_w\right) = 0.75\times\left(0.6\times 4,900\right)\times\left(0.707\times 0.7\right) = 1091.25\ \ kg/cm$$

ตัวอย่างการออกแบบอาคารที่มีกำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จ

แรงเฉือนตรง $q_{dx} = \frac{P_y}{\sum L} = \frac{\phi Y_n}{30} = 0.033\phi Y_n$ kg/cm

แรงเฉือนจากแรงบิด

ศูนย์กลางรอยเชื่อม $c.g. = \frac{20 \times 0 + 2 \times 5 \times (-2.5)}{20 + 2 \times (5)} = -0.833$ cm

$$q_{tx} = \frac{Ty}{J} = \frac{\phi Y_n \times (7.5 - 0.833)}{5{,}250} = 0.0013\phi Y_n \quad \text{kg/cm}$$

แรงเฉือนลัพธ์ $q_r = \sqrt{(q_{dx} + q_{tx})^2 + (q_{dy} + q_{ty})^2} = \sqrt{(0.033\phi Y_n + 0.0013\phi Y_n)^2 + 0}$

$$q_r = 0.034\phi Y_n$$

ให้แรงเฉือนลัพธ์ เท่ากับ หน่วยแรงเฉือนจากลวดเชื่อม แก้สมการหาค่า ϕY_n $(1091.25/1{,}000) = 0.034\phi Y_n$

$$\phi Y_n = 32.10\ ton$$

รอยเชื่อมมี 2 ด้านดังนั้น $\phi Y_n = 2 \times 32.10 = 64.20$ ตัน

- กำลังต้านทานแรงเฉือนที่ฐานจากสลักเกลียวหัวบาน

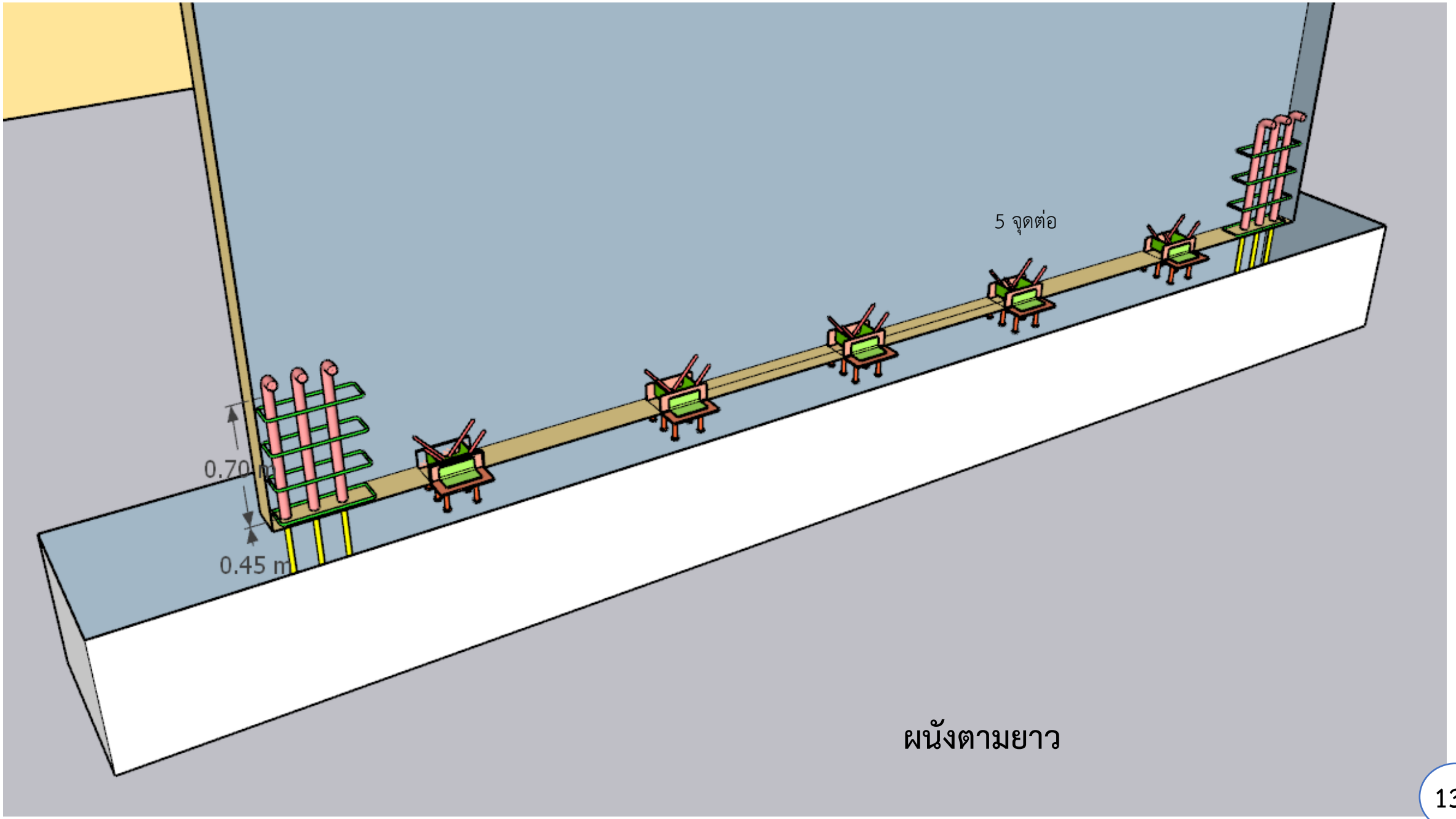
$$\phi V_{sa} = \phi n A_{se} f_{uta} = \left[0.75 \times 6 \times \left(\frac{\pi}{4} \times 2^2\right) \times 4{,}140\right] / 1{,}000 = 58.53 \text{ ตัน}$$

สรุป กำลังต้านแรงเฉือนในจุดต่อต่าง ๆ มีดังนี้

- กำลังต้านแรงเฉือนในเหล็กฉาก 2 แผ่น 50.4 ตัน
- กำลังต้านแรงเฉือนในรอยเชื่อมเหล็กฉากกับแผ่นเหล็กฝังในฐานราก 43.65 ตัน
- กำลังต้านแรงเฉือนที่ฐานจากสลักเกลียวหัวบาน 58.53 ตัน

Min shear= 43.65 ตัน

จำนวนจุดต่อรับแรงเฉือนในทิศตามยาว = 208.55/43.65 = 4.8 ใช้ 5 จุดต่อ



ผนังตามยาว

- คำนวณปริมาณเหล็กเสริมในผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ

ตรวจสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนด้วยคอนกรีตในผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จที่ชั้น 1

$$\phi V_c = \phi 0.53\sqrt{f'_c}\,bd = \left[0.85 \times 0.53 \times \sqrt{350} \times 20 \times 727.5\right]/1{,}000 = 122.63$$ ตัน > V_{base} = 101.13 ตัน

อย่างไรก็ตามกำลังต้านแรงเฉือนดังกล่าวจะไม่เพียงพอภายหลังเหล็กตามยาวในผนังคราก มาตรฐาน ACI กำหนดให้เสริมเหล็กขั้นต่ำ โดยมีอัตราส่วนแนวราบ > ρ_h = 0.0025

$$A_v = 0.0025bh = 0.0025 \times 20 \times 100 = 5\ cm^2/m$$

ดังนั้นใช้เหล็กตะแกรงสาน 2-#DB10@0.25 $A_v = 2 \times \left(\frac{\pi}{4} \times 1.0^2\right)/0.25 = 6.28\ cm^2/m$









โครงการพัฒนาหลักสูตรการเรียนรู้ เรื่องการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรม
จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) พ.ศ. 2568

จบการบรรยาย