

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย

2.1 คำนิยามการประเมินความแข็งแรงอาคารต่อแผ่นดินไหว

ก่อนที่จะเริ่มอธิบายเกี่ยวกับวิธีการประเมินความแข็งแรงอาคารต่อแผ่นดินไหวโดยวิธี Capacity Spectrum จะขอให้นิยามความหมายของคำศัพท์ที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

สมรรถนะ (Capacity) หมายถึง ชีดจำกัดประลัย (ในการรับแรงตามแนวแกน แรงเฉือน และแรงดัด) ของชิ้นส่วนโครงสร้าง ที่ไม่รวมถึงตัวคูณลดกำลัง (Reduction Factor) ในสมการออกแบบโดยวิธีกำลัง โดยทั่วไป ชีดจำกัดประลัยนี้ จะเป็นค่ากำลังชิ้นส่วนหรือโครงสร้างเกิดการครากสำหรับชิ้นส่วนที่ควบคุมโดยการให้ตัว (Deformation-Controlled Components) ชีดจำกัดประลัย จะหมายถึง ค่ากำลังที่เลยผ่านจุดพิกัดยืดหยุ่นและจะมีผลของการเพิ่มกำลังหลังการคราก (Strain Hardening)

เส้นโค้งสมรรถนะ (Capacity Curve) หมายถึง เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงแนวราบทั้งหมดที่กระทำกับโครงสร้าง (V) กับระยะเคลื่อนตัวด้านข้างที่ระดับหลังคา (d) บางครั้งจะเรียกว่า เส้นโค้งผลักประลัย (Pushover Curve) ที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างแบบแรงสถิตไร้เชิงเส้น

สเปกตรัมสมรรถนะ (Capacity Spectrum) หมายถึง เส้นโค้งที่ได้จากการแปลงเส้นโค้งสมรรถนะ ($V-d$, Capacity Curve) ให้อยู่ระบบพิกัดแกนค่าสเปกตรัมความเร่งและสเปกตรัมการเคลื่อนที่ (S_a-S_d , Acceleration-Displacement Response Spectrum, ADRS)

ระดับการตอบสนองต้องการ (Demand) หมายถึง ระดับการตอบสนองของอาคารต่อแรงแผ่นดินไหวหนึ่ง ในการวิเคราะห์แบบไร้เชิงเส้น ระดับการตอบสนองที่ต้องการจะเป็นค่าระดับการเคลื่อนตัวของอาคารที่จะเกิดขึ้น ซึ่งต่างจากการวิเคราะห์เชิงเส้นซึ่งเป็นระดับค่าแรงกระทำด้านข้าง

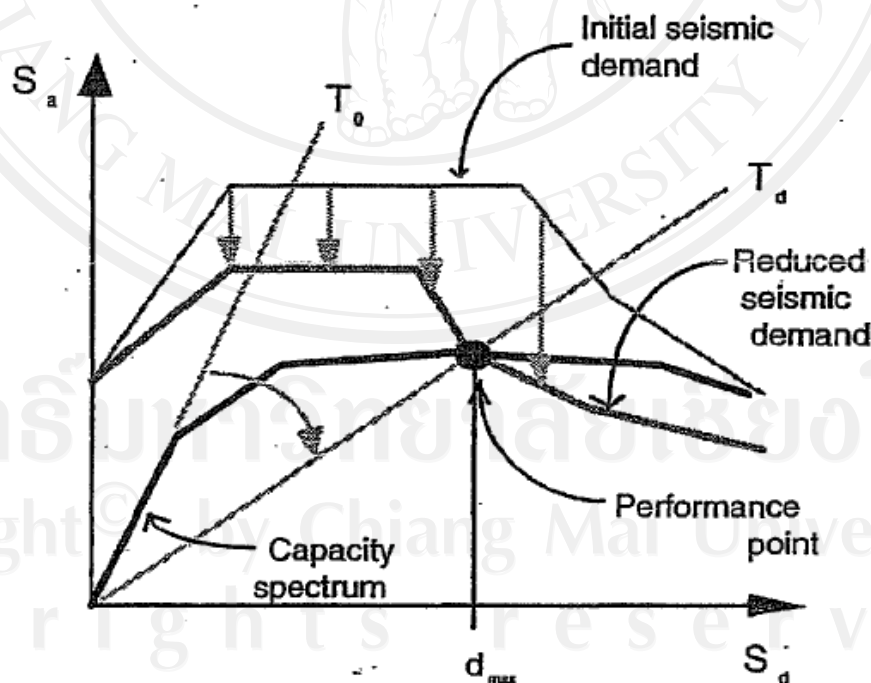
สเปกตรัมการตอบสนองต้องการ (Demand Spectrum) หมายถึง สเปกตรัมการตอบสนองที่แสดงถึงแรงแผ่นดินไหวในการวิเคราะห์แบบ Capacity Spectrum Method

ระดับสมรรถนะ (Performance level) หมายถึง สถานะแสดงระดับความเสียหายทางกายภาพของอาคาร ระดับความเป็นอันตรายต่อชีวิตของผู้คนที่ใช้อาคาร และสภาพการใช้งานของอาคารภายหลังแผ่นดินไหว

ระดับสมรรถนะเป้าหมาย (Performance Objective) หมายถึงระดับสมรรถนะ (Performance Point) ของอาคารที่ต้องการหรือที่ยอมรับได้หรือระดับความเสียหายที่จะยอมรับได้เมื่อเกิดแผ่นดินไหว

พิกัดสมรรถนะ (Performance Point) หมายถึง ระดับค่าการเคลื่อนที่ของอาคารเมื่อเกิดแผ่นดินไหว โดยจะได้จากจุดตัดของเส้นโค้งสเปกตรัมสมรรถนะ (Capacity Spectrum) กับเส้นโค้งสเปกตรัมการตอบสนองต่อการต้องการ (Demand Spectrum)

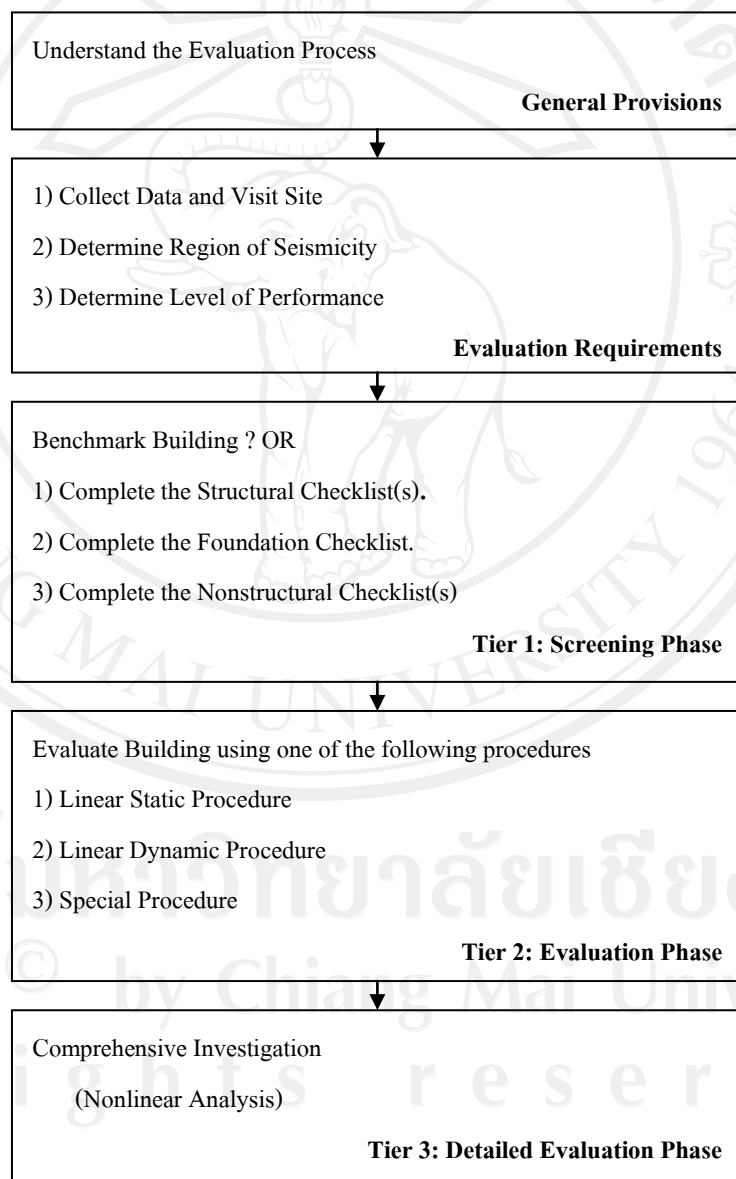
สำหรับการวิเคราะห์ประเมินโดยวิธี Capacity Spectrum นั้นจะเป็นการประเมินการตอบสนองของอาคารจากพิกัดสมรรถนะ (Performance Point) หรือจุดตัดของเส้นโค้งสเปกตรัมสมรรถนะ (Capacity Spectrum) กับเส้นโค้งความต้องการ (Demand Spectrum หรือ Response Spectrum) ซึ่งจะนำไปเทียบกับระดับสมรรถนะเป้าหมาย (Performance Objective) เพื่อให้เห็นว่าอาคารจะมีสภาพเป็นอย่างไรหลังเกิดแผ่นดินไหวขึ้น ดังแสดงในรูป 2.1



รูป 2.1 แนวคิดการวิเคราะห์โดยวิธี Capacity Spectrum

2.2 การวิเคราะห์โดยวิธีแรงสถิตไม่เชิงเส้น (Nonlinear Static Pushover)

การวิเคราะห์โดยวิธี Nonlinear Static Analysis เป็นวิธีการวิเคราะห์เพื่อประเมินความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวที่ละเอียดสูงสุด หรือ ขั้นที่ 3 (Tier 3) ดังแสดงในรูป 2.2 เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยจะให้แรงกระทำด้านข้างที่เป็นชุดแรงกระทำเทียบเคียงกับผลของแผ่นดินไหวหลักเข้ากับโครงสร้างที่จำลองขึ้น ทั้งนี้โดยทั่วไปมักจะกำหนดให้เทียบเคียงกับการตอบสนองอาคารในโหมดพื้นฐาน (Fundamental Vibration Mode) ยกเว้นแต่กรณีที่อาคารที่วิเคราะห์มีความสูงมากหรือมีการบิดตัว



รูป 2.2 ขั้นตอนการประเมินอาคารเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว FEMA 310 (1998)

เนื่องจากการตอบสนองของอาคารในขณะเกิดแผ่นดินไหวที่มีระดับความรุนแรงตามที่ ออกแบบ อาคารจะตอบสนองในช่วงอินเลาสติก ดังนั้น การวิเคราะห์จะเพิ่มขนาดแรงผลักขึ้นเป็น ขั้นเรื่อย ๆ (Increment) เพื่อให้โครงสร้างแสดงพฤติกรรมการคราก (Yielding) จนกระทั่งชิ้นส่วน อาคารเกิดการเสียหาย และแสดงพฤติกรรมไร้เชิงเส้น (Nonlinear) เป็นลำดับมากขึ้นเรื่อย ๆ จนใน ที่สุดอาคารทั้งระบบถึงสภาวะขีดจำกัดประลัย ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะแสดงในรูปของ ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงกระทำด้านข้างและระยะเคลื่อนที่ด้านข้างระดับชั้นหลังคา (Roof Lateral Displacement) เรียกความสัมพันธ์นี้ว่า เส้นโค้งสมรรถนะ (Capacity Curve) โดยจะ แสดงให้เห็นว่า อาคารที่วิเคราะห์นั้นมีพฤติกรรมตามที่ประสงค์หรือไม่ (Performance Objective) ทั้งนี้ จะพิจารณาเส้นโค้งสมรรถนะ ร่วมกับ เส้นโค้งความต้องการ (Demand Curve) ซึ่งโดยทั่วไป จะเขียนในรูปของสเปกตรัมความเร่ง-การเคลื่อนที่ (Acceleration-Displacement Response Spectrum, ADRS) เพื่อให้เป็นปัญหาแบบดีกรีอิสระเดียว (Single Degree Of Freedom System) การวิเคราะห์ความสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารโดยวิธี Nonlinear Static Pushover จะให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องมากกับอาคารที่มีการตอบสนองอยู่ในรูปแบบมูลฐาน (Fundamental Vibration Mode) เป็นหลัก ทั้งนี้เนื่องจากเป็นรูปแบบการตอบสนองที่นำมาพิจารณาแรงผลัก (Applied Technology Council, ATC-40 (1996) ; FEMA-273 (1997)) ขั้นตอนการวิเคราะห์หา ความสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคาร (Capacity Curve) สามารถทำได้ดังนี้

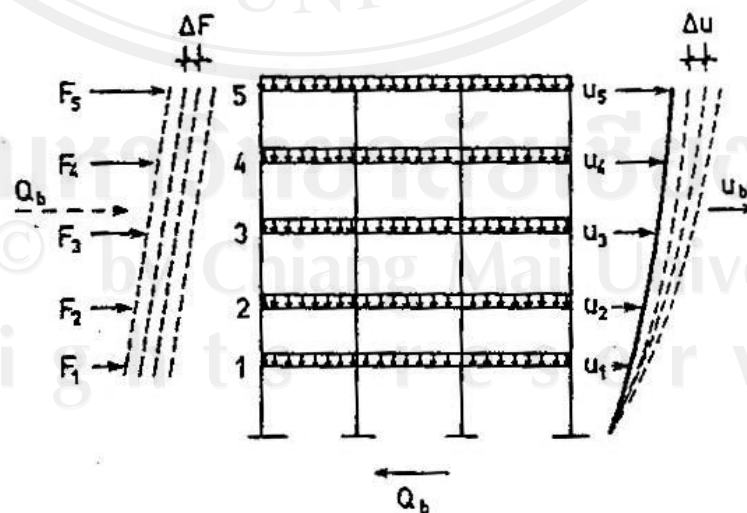
1. รวบรวมข้อมูลและรายละเอียดที่สำคัญของอาคารเพื่อใช้ในการจำลองโครงสร้างเพื่อการ วิเคราะห์ ได้แก่ แบบก่อสร้างทางสถาปัตยกรรมและวิศวกรรมของอาคาร ข้อมูลการสำรวจดิน ณ บริเวณที่ตั้งอาคาร เป็นต้น
2. จัดทำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของอาคาร ที่สามารถนำไปใช้วิเคราะห์หาพฤติกรรม การตอบสนองของอาคารทั้งในช่วงที่การเปลี่ยนรูปของโครงสร้างอยู่ภายในพิสัยยืดหยุ่นและ ในช่วงที่เปลี่ยนรูปเกินพิสัยยืดหยุ่น ทั้งนี้ ด้วยการกำหนดการตอบสนองของวัสดุโครงสร้างและ หน้าตัดโครงสร้างภายหลังการคราก
3. วิเคราะห์การตอบสนองอาคารเนื่องจากแรงสถิตในแนวดิ่ง (Gravity Load) และนำไป กำหนดเป็นสภาวะเริ่มต้น (Initial Condition) ของอาคารสำหรับการวิเคราะห์ในขั้นตอนการให้แรง ผลักด้านข้าง
4. นำแรงสถิตในแนวดิ่งมากระทำต่อแบบจำลองอาคาร โดยกำหนดให้รูปแบบการ กระจายตัวของแรงคล้ายคลึงกับรูปแบบการกระจายตัวของแรงเฉื่อยของมวลอาคารเมื่อเกิดการ โยก ไหวในขณะที่เกิดแผ่นดินไหว

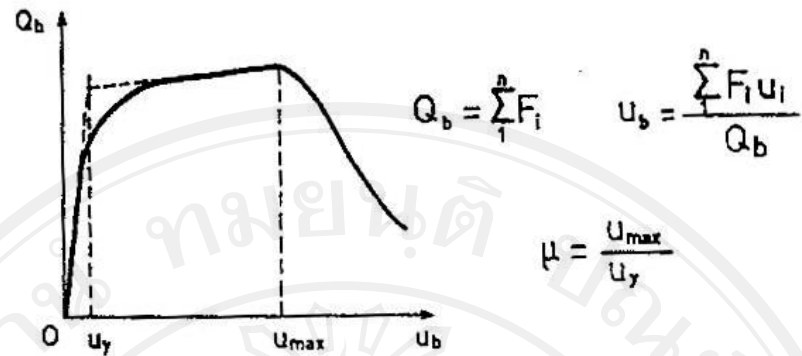
5 วิเคราะห์หาการเปลี่ยนรูป (Lateral Deformation) ของอาคารที่เกิดจากแรงกระทำด้านข้างนี้ โดยค่อย ๆ ปรับระดับของแรงเพิ่มขึ้นเป็นขั้น ๆ ทีละน้อย ในแต่ละขั้นค่ากำลัง (Strength) และค่าความแข็งแรง (Stiffness) ของแต่ละองค์อาคารจะถูกปรับแก้ไข (Update) ให้เป็นไปตามสภาพภายหลังการรับแรงในแต่ละขั้น ทำการวิเคราะห์ในลักษณะนี้อย่างต่อเนื่องโดยปรับค่าแรงด้านข้างเหล่านี้เพื่อ ‘ผลัก’ ให้อาคารมีการเปลี่ยนรูปเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งอาคารเกิดการวิบัติการ

6. นำผลการวิเคราะห์มาแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานอาคาร (Base Shear) กับการเคลื่อนตำแหน่งในแนวด้านข้างที่ยอดอาคาร (Roof Lateral Displacement) แรงเฉือนที่ฐานอาคารในที่นี้มีค่าเท่ากับผลรวมของแรงด้านข้างทั้งหมดที่กระทำต่ออาคาร โดยค่าสูงสุดของ Base Shear ที่พิกัดยืดหยุ่นของอาคารแสดงถึง ‘กำลังต้านทานแรงด้านข้าง’ ของอาคาร และอัตราส่วนระหว่าง ค่าสูงสุดของ Roof Displacement กับค่าที่พิกัดยืดหยุ่นจะแสดงถึง “ความเหนียว” ดังแสดงในรูป 2.3

จากขั้นตอนการวิเคราะห์ดังที่ได้กล่าวขั้นตอน สามารถสรุปได้ดังนี้

- (1) การสร้างเส้นโค้งสมรรถนะ (Capacity Curve) จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์โครงสร้างให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรง-การเคลื่อนตัว ได้แก่ คุณสมบัติวัสดุ และการจำลองพฤติกรรมหลังการคราก และรูปแบบแรงผลัก
- (2) การพิจารณาความรุนแรงแผ่นดินไหว โดยเส้นโค้งความต้องการ (Demand curve)
- (3) การเปรียบเทียบเส้นโค้งทั้งสองเพื่อประเมินการตอบสนองของอาคารร่วมกับพฤติกรรมที่ประสงค์ (Performance objective)





รูป 2.3 การวิเคราะห์โดยวิธี Nonlinear Static Pushover

2.3 การประเมินแรงกระทำด้านข้างเนื่องจากแผ่นดินไหว

การประเมินขนาดของแรงกระทำด้านข้างจากแผ่นดินไหวเทียบเท่าตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ. 1302 (2552) กรมโยธาธิการและผังเมืองกระทรวงมหาดไทย โดยแรงเฉือนที่ฐานอาคาร (Seismic Base Shear, V) จะคำนวณจาก

$$V = C_s W \quad (2.1)$$

เมื่อ

C_s คือ สัมประสิทธิ์ผลตอบสนองแรงแผ่นดินไหว

W คือ น้ำหนักโครงสร้างประสิทธิผลของอาคาร คือ น้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้งของอาคารที่ต้องนำมาพิจารณาในการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหว

น้ำหนักโครงสร้างประสิทธิผล (W) จะต้องรวมน้ำหนักบรรทุกคงที่ทั้งหมดของอาคาร และน้ำหนักบรรทุกประเภทอื่น ๆ ดังต่อไปนี้

1. ร้อยละ 25 ของน้ำหนักบรรทุกจร (Floor Live Load) ในกรณีของอาคารที่ใช้เก็บพัสดุ อื่นๆ อาคารจอดรถยนต์ไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงน้ำหนักในข้อนี้
2. น้ำหนักของผนังอาคาร และผนังกันห้องต่าง ๆ หรือน้ำหนักบรรทุกเทียบเท่าจากน้ำหนักของผนังอาคารที่กระจายลงพื้นทั่วทั้งชั้นอย่างน้อย 480 นิวตันต่อตารางเมตร โดยให้เลือกใช้ค่าที่มากกว่า
3. น้ำหนักของเครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ซึ่งตั้งถาวรในอาคาร

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบสนองแรงแผ่นดินไหว (C_s) คำนวณจาก

$$C_s = S_a \left(\frac{I}{R} \right) \quad \text{และต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 0.01} \quad (2.2)$$

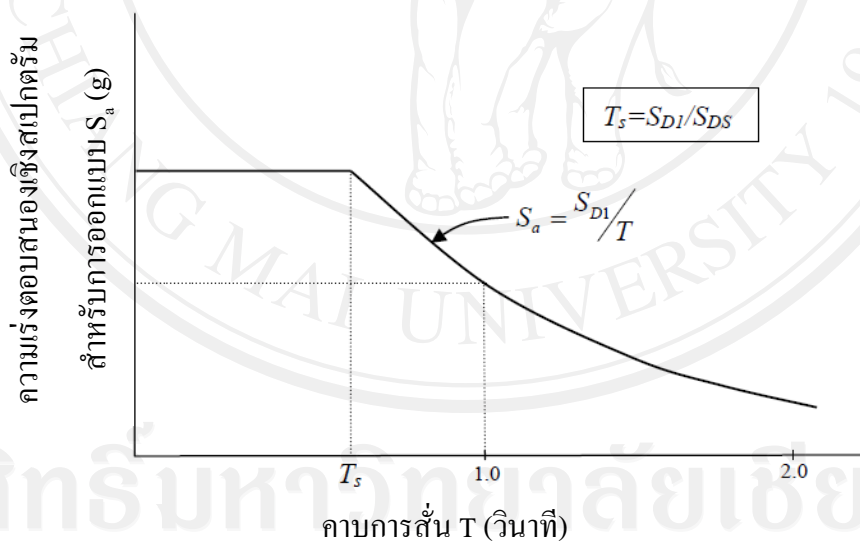
โดยที่

S_a คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร (T) ของพื้นที่ต่าง ๆ ดังแสดงในรูป 2.4 และ รูป 2.5 (ยกเว้นกรุงเทพฯ)

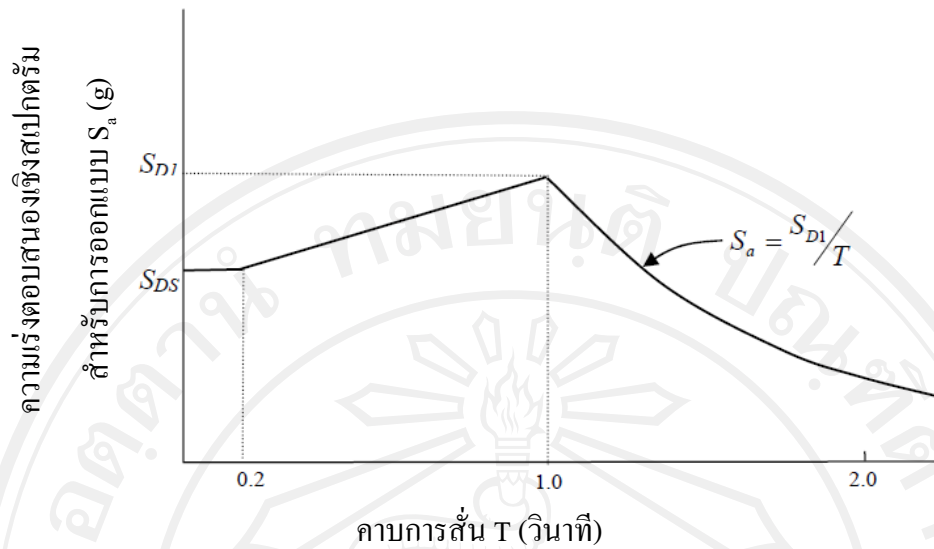
R คือ ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (Response Modification Factor, R) ตามระบบโครงสร้างดังแสดงในตาราง 2.1

I คือ ตัวประกอบความสำคัญของอาคาร (Important Factor) จำแนกตามลักษณะการใช้งานและความสำคัญของอาคารที่มีต่อสาธารณชนและการบรรเทาภัยหลังเกิดเหตุแบ่งออกเป็น 4 ประเภท (Occupancy Category) คือ ประเภท I, II, III, และ IV ดังแสดงในตาราง

2.2



รูป 2.4 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า สำหรับพื้นที่ทั่วประเทศไทย (ยกเว้นแอ่งกรุงเทพฯ) ที่มีค่า $S_{D1} < S_{Ds}$



รูป 2.5 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าสำหรับ พื้นที่ทั่วประเทศไทย (ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า $S_{D1} > S_{DS}$

ตาราง 2.1 ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (Response Modification Factor, R) ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน (System Overstrength Factor, Ω_0) และตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว (Deflection Amplification Factor, C_d)

ระบบโครงสร้างโดยรวม	ระบบต้านแรงด้านข้าง	ค่าตัวประกอบ			ประเภทการออกแบบด้านทานแรงแผ่นดินไหว		
		R	Ω_0	C_d			
					ข	ค	ง
1. ระบบกำแพงรับน้ำหนักบรรทุกแนวดิ่ง (Bearing Wall System)	กำแพงรับแรงเฉือนแบบธรรมดา (Ordinary Reinforce Concrete shear Wall)	4	2.5	4	/	/	x
	กำแพงรับแรงเฉือนแบบที่มีการให้รายละเอียดพิเศษ (Special Reinforced Concrete Shear Wall)	5	2.5	5	/	/	/
	กำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จแบบธรรมดา (Ordinary Precast Shear Wall)	3	2.5	3	/	x	x
	กำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จแบบที่มีการให้รายละเอียดความเหนียวปานกลาง (Intermediate Precast Shear Wall)	4	2.5	4	/	/	x

ตาราง 2.1 ค่าตัวประกอบปรับผลตอบแทน (Response Modification Factor, R) ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน (System Overstrength Factor, Ω_0) และตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว (Deflection Amplification Factor, C_d) (ต่อ)

ระบบโครงสร้างโดยรวม	ระบบต้านแรงดันข้าง	ค่าตัวประกอบ			ประเภทการออกแบบด้านทานแรงแผ่นดินไหว		
		R	Ω_0	C_d			
					ข	ค	ง
2. ระบบโครงอาคาร (Building Frame System)	โครงแกนเหล็กแบบเอียงศูนย์ที่ใช้จุดต่อแบบรับแรงคัตได้ (Steel Eccentrically Braced Frame with Moment-Resisting Connection)	8	2	4	/	/	/
	โครงแกนเหล็กแบบเอียงศูนย์ที่ใช้จุดต่อแบบรับแรงเฉือน (Steel Eccentrically Braced Frame with Non-Moment-Resisting Connection)	7	2	4	/	/	/
	โครงแกนเหล็กแบบตรงศูนย์แบบให้รายละเอียดพิเศษ (Special Steel Concentric Braced Frame)	6	2	5	/	/	/
	โครงแกนเหล็กแบบตรงศูนย์แบบธรรมดา (Ordinary Steel Concentric Braced Frame)	3.5	2	3.5	/	/	X
	กำแพงรับแรงเฉือนแบบที่มีการให้รายละเอียดพิเศษ (Special Reinforce Concrete Shear Wall)	6	2.5	5	/	/	/
	กำแพงรับแรงเฉือนแบบธรรมดา (Ordinary Reinforce concrete Shear Wall)	5	2.5	4.5	/	/	X
	กำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จแบบธรรมดา (Ordinary Precast Shear Wall)	4	2.5	4	/	X	X
	กำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จแบบที่มีการให้รายละเอียดความเหนียวปานกลาง (Intermediate Precast Shear Wall)	5	2.5	4.5	/	/	X

ตาราง 2.1 ค่าตัวประกอบปรับผลตอบแทน (Response Modification Factor, R) ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน (System Overstrength Factor, Ω_0) และตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว (Deflection Amplification Factor, C_d) (ต่อ)

ระบบโครงสร้างโดยรวม	ระบบต้านแรงดันข้าง	ค่าตัวประกอบ			ประเภทการ ออกแบบ ต้านทาน แรงแผ่นดินไหว		
		R	Ω_0	C_d	ข	ค	ง
3. ระบบ โครงสร้างแรงดัด (Moment Resisting Frame)	โครงสร้างแรงดัดเหล็กที่มีความเหนียว (Ductile/Special Steel Moment-Resisting Frame)	8	3	5.5	/	/	/
	โครงสร้างดัดเหล็กที่มีการให้รายละเอียดความ เหนียวเป็นพิเศษ (Special Truss Moment Frame)	7	3	5.5	/	/	/
	โครงสร้างแรงดัดเหล็กที่มีความเหนียวปานกลาง (Intermediate Steel Moment Resisting Frame)	4.5	3	4	/	/	X
	โครงสร้างแรงดัดเหล็กธรรมดา (Ordinary Steel Moment Resisting Frame)	3.5	3	3	/	/	X
	โครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียว (Deuctile/Special Reinforce Concrete Moment Resisting Frame)	8	3	5.5	/	/	/
	โครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความ เหนียว (Moment-Resisting Frame with Limited Ductility/Intermediate RC Moment-Resisting Frame)	5	3	4.5	/	/	X
	โครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบธรรมดา (Ordinary Reinforce Concrete Moment Resisting Frame)	3	3	2.5	/	X	X

ตาราง 2.1 ค่าตัวประกอบปรับผลตอบแทน (Response Modification Factor, R) ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน (System Overstrength Factor, Ω_0) และตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว (Deflection Amplification Factor, C_d) (ต่อ)

ระบบโครงสร้างโดยรวม	ระบบต้านแรงดันข้าง	ค่าตัวประกอบ			ประเภทการ		
		R	Ω_0	C_d	ออกแบบ		
					ด้านทาน		
					แรงแผ่นดินไหว		
				ข	ค	ง	
4. ระบบโครงสร้างแบบผสมที่มีโครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียวที่สามารถต้านทานแรงด้านข้างไม่น้อยกว่าร้อยละ 25 ของแรงที่กระทำกับอาคารทั้งหมด	ร่วมกับโครงแกนเหล็กแบบตรงศูนย์แบบพิเศษ (Special Steel Concentrically Braced Frame)	7	2.5	5.5	/	/	/
	ร่วมกับโครงแกนเหล็กแบบเอียงศูนย์ (Steel Eccentrically Braced Frame)	8	2.5	4	/	/	/
	ร่วมกับกำแพงรับแรงเฉือนแบบที่มีการให้รายละเอียดพิเศษ (Special Reinforce Concrete Shear Wall)	7	2.5	5.5	/	/	/
	ร่วมกับกำแพงรับแรงเฉือนแบบธรรมดา (Ordinary Reinforce Concrete Shear Wall)	6	2.5	5	/	/	X
5. ระบบโครงสร้างแบบผสมที่มีโครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียวจำกัดที่สามารถต้านทานแรงด้านข้างไม่น้อยกว่าร้อยละ 25 ของแรงที่กระทำกับอาคารทั้งหมด (Dual System with Moment Resisting Frame with Limited Ductility/Dual System with Intermediate Moment Resisting Frame)	ร่วมกับโครงแกนเหล็กแบบตรงศูนย์แบบพิเศษ (Special Steel Concentrically Braced Frame)	6	2.5	5	/	/	X
	ร่วมกับกำแพงรับแรงเฉือนแบบที่มีการให้รายละเอียดพิเศษ (Special Reinforce Concrete Shear Wall)	6.5	2.5	5	/	/	/
	ร่วมกับกำแพงรับแรงเฉือนแบบธรรมดา (Ordinary Reinforced Concrete Shear Wall)	5.5	2.5	4.5	/	/	X
6. ระบบปฏิสัมพันธ์ (Shear Wall Frame Interactive System)	ระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างกำแพงรับแรงเฉือนและโครงต้านแรงดัดแบบธรรมดาที่ไม่มีการให้รายละเอียดความเหนียว (Shear Wall Frame Interactive System with Ordinary Reinforce Concrete Moment Frame and Ordinary Concrete Shear Wall)	4.5	2.5	4	/	X	X

ตาราง 2.1 ค่าตัวประกอบปรับผลตอบแทน (Response Modification Factor, R) ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน (System Overstrength Factor, Ω_0) และตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว (Deflection Amplification Factor, C_d) (ต่อ)

ระบบโครงสร้างโดยรวม	ระบบต้านแรงดันข้าง	ค่าตัวประกอบ			ประเภทการออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหว		
		R	Ω_0	C_d	ข	ค	ง
7. ระบบโครงสร้างเหล็กที่ไม่มีการให้รายละเอียดสำหรับรับแรงแผ่นดินไหว (Steel System Not Specifically Detailed for Seismic Resistance)	ระบบโครงสร้างเหล็กที่ไม่มีการให้รายละเอียดสำหรับรับแรงแผ่นดินไหว	3	3	3	/	/	X

ตาราง 2.2 การจำแนกประเภทความสำคัญของอาคาร และค่าตัวประกอบความสำคัญของอาคาร

ประเภทของอาคาร	ประเภทความสำคัญ	ตัวประกอบความสำคัญ
อาคารและโครงสร้างอื่น ๆ ที่มีปัจจัยเสี่ยงอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ค่อนข้างน้อยเมื่อเกิดการพังทลายของอาคารหรือส่วนโครงสร้างนั้น ๆ เช่น - อาคารที่เกี่ยวข้องกับการเกษตร - อาคารชั่วคราว - อาคารเก็บของเล็ก ๆ ซึ่งไม่มีความสำคัญ	I(น้อย)	1
อาคารและโครงสร้างอื่น ๆ ที่ไม่จัดอยู่ในอาคารประเภทความสำคัญน้อย มาก และสูงมาก	II(ปกติ)	1

ตาราง 2.2 การจำแนกประเภทความสำคัญของอาคาร และค่าตัวประกอบความสำคัญของอาคาร
(ต่อ)

ประเภทของอาคาร	ประเภท ความสำคัญ	ตัวประกอบ ความสำคัญ
อาคารและโครงสร้างอื่น ๆ ที่หากเกิดการพังทลาย จะเป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์และสาธารณชนอย่างมาก เช่น - อาคารที่เป็นที่ชุมนุมในพื้นที่หนึ่ง ๆ มากกว่า 300 คน - โรงเรียนประถมหรือมัธยมศึกษาที่มีความจุมากกว่า 250 คน - มหาวิทยาลัยหรือวิทยาลัย ที่มีความจุมากกว่า 500 คน - สถานรักษาพยาบาลที่ความจุคนไข้มากกว่า 50 คน แต่ไม่สามารถทำการรักษากรณีฉุกเฉินได้ - เรือนจำและสถานกักกันนักโทษ	III(มาก)	1.25
อาคารและโครงสร้างที่มีความสำคัญต่อความเป็นอยู่ของสาธารณชน หรือ อาคารที่จำเป็นต่อการบรรเทาภัยหลังเกิดเหตุ เช่น - โรงพยาบาลที่สามารถทำการรักษาฉุกเฉินได้ - สถานีตำรวจ สถานีดับเพลิง และโรงเก็บรถฉุกเฉินต่างๆ - โรงไฟฟ้า - โรงผลิตน้ำประปา ถึงเก็บน้ำและสถานีสูบน้ำที่มีความดันสูงสำหรับการดับเพลิง - อาคารศูนย์สื่อสาร - อาคารศูนย์บรรเทาสาธารณภัย - ท่าอากาศยาน ศูนย์บังคับการบิน และ โรงเก็บเครื่องบิน - อาคารศูนย์บัญชาการแห่งชาติ อาคารและโครงสร้างในส่วนของการผลิต การจัดการ การจัดเก็บ หรือการใช้สารพิษ เชื้อเพลิงหรือสารเคมี อันอาจก่อให้เกิดการระเบิดขึ้นได้	IV(สูงมาก)	1.5

2.3.1 ประเภทของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร

สภาพของชั้นดิน ณ ที่ตั้งของอาคาร สามารถเปลี่ยนแปลงระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวได้ ดังนั้นการนำค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมในตาราง 2.3 มาใช้ในการออกแบบ จึงจำเป็นต้องปรับแก้ค่าให้เหมาะสมกับสภาพดิน ณ บริเวณที่ตั้งของอาคารนั้นๆ

ประเภทของชั้นดินสามารถแบ่งออกได้เป็น 6 ประเภท คือ A (หินแข็ง) B (หิน) C (ดินแข็ง) D (ดินปกติ) E (ดินอ่อน) หรือ F (ดินที่มีลักษณะพิเศษ)

ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลดิน และไม่สามารถทำการสำรวจดินได้ ให้สมมุติว่าประเภทของชั้นดินเป็นประเภท D

2.3.2 การปรับแก้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา ณ บริเวณที่ตั้งของอาคาร สามารถปรับแก้ค่าให้เหมาะสมกับประเภทของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร ได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$S_{MS} = F_a S_s \quad (2.3)$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \quad (2.4)$$

โดยที่

S_{MS} = ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 0.2 วินาที ที่ถูกปรับแก้เนื่องจากผลของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร หน่วยเป็น ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงโลก (g)

S_{M1} = ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 1.0 วินาที ที่ถูกปรับแก้เนื่องจากผลของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร หน่วยเป็น ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงโลก (g)

F_a = สัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร สำหรับคาบการสั่น 0.2 วินาที (ตาราง 2.4)

F_v = สัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร สำหรับคาบการสั่น 1 วินาที (ตาราง 2.5)

S_s = ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบสั้น 0.2 วินาที (ตาราง 2.3)

S_1 = ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบ 1 วินาที (ตาราง 2.3)

ค่าสัมประสิทธิ์ F_a และ F_v แสดงไว้ในตาราง 2.4 และ 2.5

ตาราง 2.3 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบสั้น (S_s) และที่คาบ 1 วินาที (S_1) ของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา (จังหวัดเชียงใหม่)

จังหวัดเชียงใหม่	อำเภอ	ความเร่งตอบสนอง	
		(g)	
		S_s	S_1
เชียงใหม่	กิ่งอำเภอดอยหล่อ	0.832	0.248
	กิ่งอำเภอแม่ออน	0.740	0.187
	จอมทอง	0.796	0.243
	เชียงดาว	0.933	0.266
	ไชยปราการ	0.909	0.262
	ดอยเต่า	0.739	0.237
	ดอยสะเก็ด	0.821	0.225
	ฝาง	0.927	0.271
	พร้าว	0.850	0.237
	เมืองเชียงใหม่	0.878	0.248
	แม่แจ่ม	0.776	0.242
	แม่แตง	0.914	0.260
	แม่ริม	0.896	0.254
	แม่วาง	0.847	0.248
	แม่อาว	0.963	0.283
	เวียงแหง	0.959	0.273
	สะเมิง	0.884	0.258
	สันกำแพง	0.835	0.230
	สันทราย	0.890	0.251
	สันป่าตอง	0.844	0.244
	สารภี	0.847	0.236
	หางดง	0.853	0.243
	อมก๋อย	0.771	0.244

ตาราง 2.4 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดินที่ ณ ที่ตั้งอาคาร F_a

ประเภทของ ชั้นดิน	ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณาที่คาบ 0.2 วินาที(g)				
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.5$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s \geq 1.25$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์การตอบสนองของดินเป็นกรณี ๆ ไป				

ตาราง 2.5 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร F_v

ประเภทของ ชั้นดิน	ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณาที่คาบ 1.0 วินาที(g)				
	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์การตอบสนองของดินเป็นกรณี ๆ ไป				

2.3.3 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_{DS}) และที่คาบการสั่น 1 วินาที (S_{D1}) สามารถคำนวณจากสมการ

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (2.5)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (2.6)$$

2.3.4 การคำนวณค่าคาบการสั่นพื้นฐาน

ค่าคาบการสั่นพื้นฐาน (Fundamental Period, T) ในทิศทางแกนหลักของอาคาร สามารถคำนวณได้โดยวิธีดังต่อไปนี้

วิธีที่ 1

คาบการสั่นพื้นฐาน (หน่วยเป็นวินาที) สามารถคำนวณจากสูตรการประมาณค่าดังนี้

$$\text{อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก} \quad T = 0.02H \quad (2.7)$$

$$\text{อาคารโครงสร้างเหล็ก} \quad T = 0.03H \quad (2.8)$$

โดยที่ H คือความสูงของอาคารวัดจากพื้นดิน มีหน่วยเป็นเมตร

วิธีที่ 2

คาบการสั่นพื้นฐาน (หน่วยเป็นวินาที) สามารถคำนวณจากลักษณะการกระจายมวล (หรือน้ำหนัก) ภายในอาคาร และสถิติของระบบโครงสร้างด้านแรงต้านข้างของอาคาร ด้วยวิธีการวิเคราะห์ที่เหมาะสม และค่าคาบการสั่นพื้นฐานที่คำนวณได้จากวิธีที่ 2 จะต้องไม่เกิน 1.5 เท่าของค่าที่คำนวณได้จากวิธีที่ 1

ค่าคาบการสั่นพื้นฐาน อาจคำนวณจากสมการดังนี้

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \delta_i^2)}{g \sum_{i=1}^n (F_i \delta_i)}} \quad (2.9)$$

โดยที่

- F_i คือ แรงสถิตเทียบเท่าที่กระทำต่อชั้นที่ i (นิวตัน)
 δ_i คือ การเคลื่อนที่ในแนวนอนของอาคารที่ชั้นที่ i ไม่รวมผลของการบิด ณ ตำแหน่งศูนย์กลางมวลของชั้นที่เกิดจากแรงสถิตเทียบเท่า (เมตร)
 g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก (เมตร/วินาที²)
 n คือ จำนวนชั้นของอาคาร
 w_i คือ น้ำหนักโครงสร้างประสิทธิผลของชั้นที่ i (นิวตัน)

2.3.5 การกระจายแรงเฉือนที่ฐานเป็นแรงกระทำทางด้านข้างต่ออาคารในชั้นต่าง ๆ

แรงสถิตเทียบเท่าที่กระทำต่ออาคาร ณ ชั้นใด ๆ ในแนวนอน (F_x) คำนวณจาก

$$F_x = C_{vx} V \quad (2.10)$$

และ

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \quad (2.11)$$

โดยที่

- C_{vx} คือ ตัวประกอบการกระจายในแนวดิ่ง
 w_x คือ น้ำหนักโครงสร้างประสิทธิผลของชั้นที่ x
 h_i และ h_x คือ ความสูงที่ระดับชั้น i และ x ตามลำดับ
 k คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่กำหนดรูปแบบการกระจายแรง ซึ่งมีค่าดังนี้
- | | |
|---------------------------|---------------------------------------|
| $k = 1.0$ | เมื่อ $T \leq 0.5$ วินาที |
| $k = 1 + \frac{T-0.5}{2}$ | เมื่อ 0.5 วินาที $< T < 2.5$ วินาที |
| $k = 2.0$ | เมื่อ $T \geq 2.5$ วินาที |

การกระจายแรงเฉือนในแนวราบ

แรงเฉือน ณ ชั้นใด ๆ ของอาคารที่เกิดจากแรงสถิตเทียบเท่า (V_x) คำนวณจาก

$$V_x = \sum_{i=1}^n F_i \quad (2.12)$$

แรงเฉือน ณ ชั้นใด ๆ (V_x) จะกระจายไปยังองค์อาคารแนวดิ่งที่เป็นส่วนของโครงสร้างต้านแรงด้านข้างในชั้นที่พิจารณาตามสัดส่วนสติเฟนด้านข้างขององค์อาคารเหล่านั้น

2.4 คุณสมบัติของจุดหมุนพลาสติก

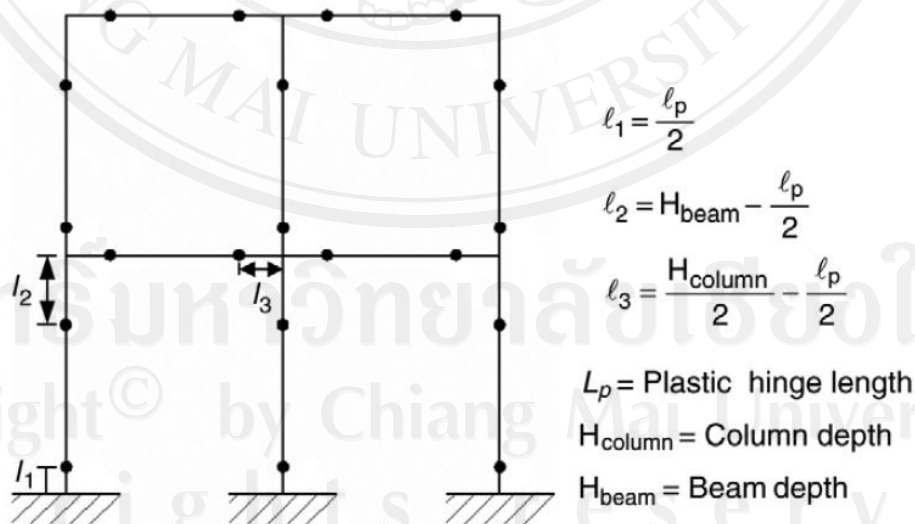
การวิเคราะห์แบบไร้เชิงเส้นแบบสถิต (Nonlinear static procedure, NSP) หรือ วิธีการวิเคราะห์ผลักประลัย (Pushover analysis) ถือเป็นวิธีที่ง่ายเทียบกับการวิเคราะห์แบบไร้เชิงเส้นตามเวลา (Nonlinear time history analysis) และเป็นวิธีที่แนะนำโดยข้อกำหนด FEMA-356 and ATC-40 การจำลองความไร้เชิงเส้นของแต่ละชิ้นส่วนจะต้องมีการกำหนดสมรรถภาพทั้งทางด้านกำลังและการเสียรูปโดยกระทำในรูปของการกำหนดคุณสมบัติของจุดหมุนพลาสติกของชิ้นส่วนนั้น ทั้งนี้ อาจกระทำโดยอาศัยคุณสมบัติมาตรฐานที่แนะนำโดยข้อกำหนด FEMA-356 and ATC-40 (default-hinge properties) ที่ได้มีการกำหนดไว้ในโปรแกรมต่างๆ เช่น DRAIN-2DX (Prakash et al. 1993), DRAIN-3DX (Prakash et al. 1994), PERFORM-2D (<http://www.ramint.com>) และ SAP2000 (CSI, 2002) หรือการสร้างคุณสมบัติที่ระบุเฉพาะกรณีก็ได้ (User-Defined Nonlinear Hinge Properties)

การวิเคราะห์นี้ได้เลือกใช้โปรแกรม SAP2000 เพื่อทำการจำลองโครงสร้างคาน และเสาด้วยชิ้นส่วนเฟรมไร้เชิงเส้นที่กำหนดจุดหมุนพลาสติกที่ปลายทั้งสองด้าน ดังแสดงในรูป 2.6 การกำหนดคุณสมบัติของจุดหมุนพลาสติกจะแสดงด้วยกราฟ 5 จุด (A, B, C, D และ E) บนความสัมพันธ์ระหว่างแรง-การเคลื่อนตัว ดังแสดงในรูป 2.7 จุด B และ C แสดงสภาพชิ้นส่วนเมื่อเกิดการครากและจุดประลัย ตามลำดับ ตำแหน่งของจุดทั้งห้าจะขึ้นกับชนิดของชิ้นส่วน คุณสมบัติวัสดุ เหล็กเสริมตามยาวและตามขวาง และระดับค่าแรงตามแนวแกนในชิ้นส่วน สำหรับตำแหน่ง IO LS และ CP ในรูป 2.7 นั้น ตำแหน่ง IO แสดงถึง ระดับขีดจำกัดของความโค้ง หรือ การหมุนที่เกิดขึ้นที่สภาพโครงสร้างยังคงสามารถมีใช้งานได้ต่อไป (Immediate Occupancy) ตำแหน่ง LS แสดงถึง เกิดความเสียหายแต่ไม่เป็นอันตรายต่อชีวิต (Life Safety) และตำแหน่ง CP แสดงถึง อาคารเกิดการพังทลาย (Collapse Prevention) ตามลำดับ โดยกำหนดให้มีระดับการเสียรูป 10%, 75% และ 90% ของความสามารถในการเสียรูปสูงสุด

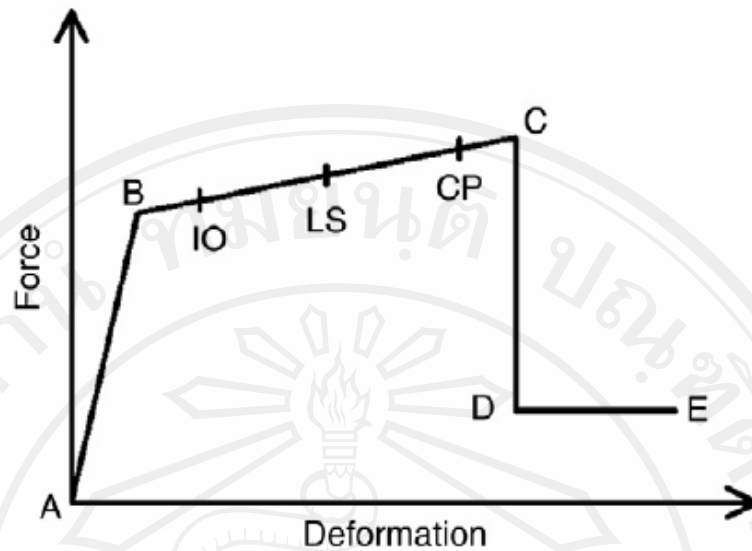
วิธีการวิเคราะห์ที่อาศัยการกำหนดคุณสมบัติจุดหมุนพลาสติกนั้น จะกำหนดจุดหมุนชนิดแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัด 2 ทิศทาง (P-M-M) สำหรับชิ้นส่วนเสาหรือ (P-M3) กรณีวิเคราะห์ 2 มิติและชนิดโมเมนต์ดัดรอบแกนหลัก (M3) สำหรับชิ้นส่วนคานตามลำดับ หากอาศัยโปรแกรมให้กำหนดคุณสมบัติจุดหมุน ในแต่ละชิ้นส่วนการวิเคราะห์จะกระทำเพียงการกำหนดลักษณะของหน้าตัดและเหล็กเสริม รวมทั้งขนาดของแรงกระทำ

สำหรับชิ้นส่วนเสา จะทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โมเมนต์กับความโค้ง (Moment-curvature relationship) โดยพิจารณาข้อมูลหน้าตัดและขนาดแรงตามแนวแกนเมื่อมีแรงกระทำคงที่ร่วมกับแรงกระทำจรร้อยละ 30 (UBC (1988)) สำหรับคานจะสมมติให้แรงตามแนวแกนเป็นศูนย์ ในกรณีที่คอนกรีตที่ใช้ในโครงสร้างมีกำลังต่ำ รวมทั้งการเสริมเหล็กปดลงไม่ดีพออาจส่งผลให้อาคารนั้นเกิดการเสียหายในรูปแบบเฉือนได้ ดังนั้นการจำลองชิ้นส่วนจะต้องพิจารณาการเกิดจุดหมุนพลาสติกเฉือน (Shear hinge) ด้วยทั้งในชิ้นส่วนเสาและคานและเนื่องจากการเสียหายในรูปแบบเฉือนจะเป็นการเสียหายแบบเปราะ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องพิจารณาความเหนียวสำหรับจุดหมุนเฉือนนี้ ดังนั้น จุดหมุนเฉือนจะเกิดขึ้นเมื่อกำลังเฉือนของชิ้นส่วน (Shear strength) มีค่าน้อยกว่าแรงเฉือน (Shear force) ที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วน

รายละเอียดการกำหนดคุณสมบัติของจุดหมุนพลาสติก จะขอก้าวในรายละเอียดในบทต่อไป



รูป 2.6 ตำแหน่งจุดหมุนพลาสติกของเสาและคาน



รูป 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ของจุดหมุนพลาสติกทั่วไป

2.5 คุณสมบัติของวัสดุ

2.5.1 คอนกรีต

คุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีตที่มีผลต่อการศึกษา ได้แก่ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (E_c) ซึ่งเป็นตัวแสดงถึงความต้านทานต่อการเสียรูปของคอนกรีตเมื่อมีน้ำหนักกระทำโดยจะมีค่าแปรเปลี่ยนตามกำลังและหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ACI 318M-05 ได้กำหนดความสัมพันธ์เพื่อหาโมดูลัสของคอนกรีตโดย

$$E_c = w_c^{1.5} 0.043 \sqrt{f'_c} \quad (\text{MPa}) \quad (2.13)$$

สำหรับคอนกรีตมวลธรรมดาโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (\text{MPa}) \quad (2.14)$$

2.5.2 เหล็กเสริม

สำหรับเหล็กเสริมทุกชั้นคุณภาพมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_s) คงที่เท่ากับ 2.04×10^5 MPa และกำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (f_y) และกำลังรับแรงดึงสูงสุด แปรผันตามชั้นคุณภาพ ดังแสดงในตาราง 2.6

ตาราง 2.6 คุณสมบัติทางกลของเหล็กเสริม

ชนิดของเหล็กเสริม	ชั้นคุณภาพ	กำลังจุดคราก (MPa) ไม่น้อยกว่า	กำลังดึงประลัย (MPa) ไม่น้อยกว่า
เหล็กกลมเรียบ	SR24	240	390
เหล็กข้ออ้อย	SD30	300	490
	SD40	400	570
	SD50	500	630

เพื่อกำหนดถึงผลของกำลังครากที่แท้จริงของเหล็กเสริมจึงพิจารณากำลัง ณ จุดครากของเหล็กเสริมร่วมกับ Overstrength factor ของเหล็กตามคุณภาพชั้นดังนี้ Overstrength factor เท่ากับ 1.45 กรณี SR24 1.30 กรณี SD30 และ 1.15 กรณี SD40 ค่าปรับแก้ดังกล่าวพิจารณาทดสอบกำลัง ณ จุดครากของเหล็กเสริมซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตาราง 2.7

ตาราง 2.7 กำลัง ณ จุดครากที่แท้จริงของเหล็กเสริมที่ผลิตภายในประเทศไทย
(Kiattivisanchai,2001)

ชนิดของเหล็กเสริม		กำลัง ณ จุดคราก (MPa) ที่แท้จริงของเหล็กเสริม							
		ATI		Limpsuwon		Suriyawong		Kiattivisanchai(2001)	
		ค่าเฉลี่ย	% สูงกว่า	ค่าเฉลี่ย	% สูงกว่า	ค่าเฉลี่ย	% สูงกว่า	ค่าเฉลี่ย	% สูงกว่า
SR24	240	360	50	345	44	361	51	348	45
SD30	300	387	29	393	31	380	27	390	30
SD40	400	480	20	460	15	485	21	460	15

2.5.3 อิฐก่อ

อิฐก่อที่ใช้ในการก่อสร้างของประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นอิฐมอญ ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของอิฐมอญที่ต้องใช้ในการจำลองแบบกำแพงก่ออิฐ ได้แก่ โมดูลัสยืดหยุ่น กำลังต้านทานแรงอัดและกำลังต้านทานแรงเฉือน จากการทดสอบคุณสมบัติดังกล่าวของอิฐมอญโดย Malaivongs (1967)

Tongpatanakul (1968) และ Sengkhamkhoutlavon (2000) สามารถกำหนดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังต้านทานแรงอัดของกำแพงอิฐก่อได้ดังนี้

$$\text{โมดูลัสยืดหยุ่น } (E_{me}) = 1,300 \quad (\text{MPa})$$

$$\text{กำลังต้านทานแรงอัดของกำแพงอิฐก่อ} = 4 \quad (\text{MPa})$$

2.6 สถิติเริ่มต้นขององค์อาคาร

แรงกระทำด้านข้างอันเนื่องมาจากแรงแผ่นดินไหวต่อโครงสร้างจะกระจายแรงกระทำเข้าสู่องค์อาคารต่าง ๆ ตามสัดส่วนสถิติขององค์อาคารนั้น ๆ ทั้งนี้สถิติขององค์อาคารจะแปรเปลี่ยนไปตามคุณสมบัติของหน้าตัด เช่น โมเมนต์ความเฉื่อยที่หน้าตัดใด ๆ โดยจะมีค่าเปลี่ยนไปตามขนาดและทิศทางของโมเมนต์ จำนวนเหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัด และผลของหน้าตัดที่อยู่ระหว่างรอยร้าว เป็นต้น ดังนั้นการวิเคราะห์จะให้ค่าสถิติขององค์อาคารที่ใช้เป็นค่าเฉลี่ยตลอดความยาวขององค์อาคารซึ่งเป็นค่าสถิติประสิทธิภาพ ค่าโดยประมาณของสถิติเริ่มต้นประสิทธิภาพขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กตามข้อเสนอแนะของ ATC-40 ดังแสดงในตาราง 2.8

ตาราง 2.8 ค่าสถิติเริ่มต้นประสิทธิภาพขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

องค์อาคาร	Flexural Rigidity	Shear Rigidity	Axial Rigidity
คานไม่อัดแรง	$0.50E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	$E_c A_g$
คานอัดแรง	$E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	$E_c A_g$
เสารับแรงอัด	$0.7E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	$E_c A_g$
เสารับแรงดัด	$0.5E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	$E_c A_g$
กำแพงรับแรงไม่แตกร้าว	$0.8E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	$E_c A_g$
กำแพงรับแรงแตกร้าว	$0.5E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	$E_c A_g$
แผ่นพื้นไร้คานไม่อัดแรง	$0.5E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	$E_c A_g$
แผ่นพื้นไร้คานอัดแรง	$0.5E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	$E_c A_g$

หมายเหตุ

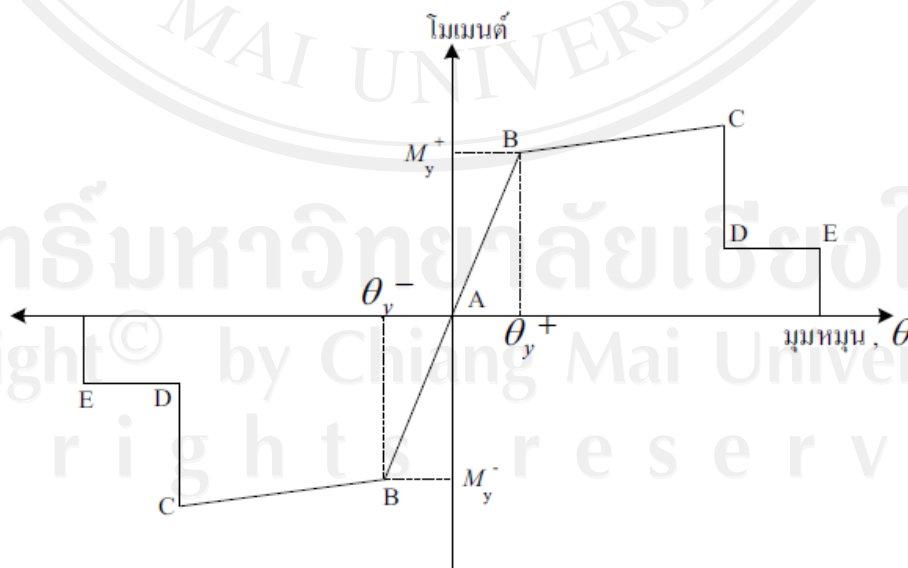
1. E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
2. I_g คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคอนกรีต
3. A_w คือ พื้นที่หน้าตัดส่วนเอว
4. A_g คือ พื้นที่หน้าตัด

2.7 แบบจำลองชิ้นส่วนอาคาร

แบบจำลองอาคารเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหว แตกต่างจากแบบจำลองทั่วไปที่ใช้ในการวิเคราะห์อาคาร เนื่องจากต้องจำลองให้ใกล้เคียงสภาพความเป็นจริงมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่อาคารมีการเปลี่ยนรูปเกินพิกัด ยืดหยุ่น ทั้งนี้ โครงสร้างที่ทำการวิเคราะห์เป็นระบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดโครงข้อแข็งและมีการก่ออิฐในบริเวณช่องระหว่างคานและเสา ดังนั้น รายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการจำลอง ชิ้นส่วนโครงสร้างจะประกอบด้วย (1) ชิ้นส่วนคาน (2) ชิ้นส่วนเสา (3) ส่วนผนังก่ออิฐ และ (4) จุดต่อระหว่างเสาและคาน

2.7.1 คาน

การจำลองชิ้นส่วนคานคอนกรีตเสริมเหล็กจำเป็นต้องคำนึงถึงพฤติกรรมจริงของคานภายใต้แรงกระทำในแนวดิ่งและแรงกระทำด้านข้างที่โครงสร้างต้องรับ เช่น ลักษณะของการวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ดัดหรือแรงเฉือน การลดลงของสติฟเนส และ กำลังของคาน และการกระจายซ้ำของแรงและโมเมนต์ในช่วงอินอีลาสติก คานที่จำลองโดยโปรแกรม SAP2000 มีลักษณะเป็น ชิ้นส่วนเส้นตรงที่มีคุณสมบัติเชิงเส้นตลอดความยาวของคานและประกอบด้วยจุดหมุนพลาสติก เนื่องจากโมเมนต์ดัดที่ปลายทั้งสองข้างของคานมีขนาดเกินโมเมนต์คราก (M_y) โดยความสัมพันธ์ของ Moment-Rotation ที่จุดหมุนพลาสติกแสดงดังรูป 2.8



รูป 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความสามารถในการหมุนของจุดหมุนพลาสติกเนื่องจากโมเมนต์ดัด (ATC-40, 1996)

ในรูป 2.8 ที่จุด B คือจุดครากที่สัมพันธ์ มุมหมุนคราก(θ_y)และ โมเมนต์คราก(M_y)ซึ่งเป็นจุดที่ เหล็กเสริม โมเมนต์คัตเริ่มเกิดการคราก ที่จุด C ระบุถึงกำลังรับโมเมนต์คัตสูงสุดของกาน ความสามารถในการหมุนของจุดหมุนพลาสติกเนื่องจากโมเมนต์คัตที่สภาวะ C และ E ได้จากผล การทดลองซึ่งคำนึงถึงผล ของโมเมนต์คัตและแรงเฉือนที่มีต่อคานร่วมกัน ในการศึกษาจะใช้ ความสามารถในการหมุนของจุดหมุนพลาสติกเนื่องจากโมเมนต์คัตของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ตามข้อแนะนำของ ATC-40 แสดงดังตาราง 2.9 ซึ่งค่าความสามารถในการหมุนของคานคอนกรีต เสริมเหล็กที่ควบคุมการวิบัติโดยโมเมนต์คัตนี้จะแปรผันกับอัตราส่วนเหล็กเสริมตามยาว ($\rho - \rho'$)/ ρ_{bal} ปริมาณเหล็กเสริมตามขวางและขนาดแรงเฉือนที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ในแต่ละขั้นตอนของการ วิเคราะห์โดยวิธี Nonlinear static pushover ค่าแรงเฉือนจะไม่คงที่ ดังนั้นการเลือกค่าจากตาราง 2.9 ในการศึกษาจะสมมติให้ความสามารถของการหมุนพลาสติกขึ้นกับสองตัวแปรเท่านั้นคือ อัตราส่วนเหล็กเสริมตามยาว และ เหล็กเสริมตามขวาง

การวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจำลองจะพิจารณาทั้งการวิบัติเนื่องจากโมเมนต์คัตและ แรงเฉือน โดยกำลังต้านทานแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะเกิดจากความต้านทานแรง เฉือนของคอนกรีต (V_c) และเหล็กเสริมตามขวางหรือเหล็กปลอก (V_s) ตามข้อกำหนดของ ACI (1995) ระบุกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตเท่ากับ

$$V_c = 0.17\sqrt{f'_c}b_wd \quad (\text{MPa}) \quad (2.15)$$

กำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีต โดย Paulay และ Priestley (1992) คำนึงถึงผลของเหล็ก เสริมตามยาวที่มีต่อกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตดังนี้

$$V_c = (0.07 + 10\rho)\sqrt{f'_c}b_wd \leq 0.2\sqrt{f'_c}2b_wd \quad (\text{MPa}) \quad (2.16)$$

กำลังต้านทานแรงเฉือนของเหล็กตามขวางหรือเหล็กปลอกเพื่อป้องกันการวิบัติของคาน เนื่องจากแรงเฉือนซึ่งเป็นผลจากแรงดึงแนวทแยงโดยที่เหล็กปลอกทำมุม 90° กับแกนตามยาวของ คานสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (2.17)$$

ตาราง 2.9 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองในช่วงไร้เชิงเส้น: คานคอนกรีตเสริมเหล็ก(ATC-40, 1996)

Component Type			Modeling Parameter		
			Plastic Rotation Angle, r_d		Residual Strength Ratio
			a	b	c
1.Beam controlled by flexure					
$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$	Transverse Reinforcement			
≤ 0.00	≥ 3	C	0.025	0.050	0.200
≤ 0.00	≥ 6	C	0.020	0.02.20	0.200
≥ 0.50	≤ 3	C	0.020	0.030	0.200
≥ 0.50	≥ 6	C	0.015	0.020	0.200
≤ 0.00	≤ 3	NC	0.020	0.030	0.200
≤ 0.00	≥ 6	NC	0.010	0.015	0.200
≥ 0.50	≤ 3	NC	0.010	0.015	0.200
≥ 0.50	≥ 6	NC	0.005	0.010	0.200
2.Beam controlled by shear					
Stirrup spacing $\leq d/2$			0.000	0.020	0.200
Stirrup spacing $> d/2$			0.000	0.010	0.200
3.Beam controlled by inadequate development or splicing along the span					
Stirrup spacing $\leq d/2$			0.000	0.020	0.000
Stirrup spacing $> d/2$			0.000	0.010	0.000
4.Beam controlled by inadequate development into beam-column join					
			0.015	0.030	0.02

หมายเหตุ

- 1 หากองค์อาคารที่พิจารณาไม่อยู่ใน 4 กรณีดังกล่าวให้ใช้ค่าต่ำสุดที่เหมาะสมของตาราง

2 ในสคมภ์ “transverse reinforcement” “C” คือ Conforming และ “NC” คือ Non-conforming โดยองค์อาคารจะถูกพิจารณาเป็น Conforming เมื่อบริเวณที่เป็นจุดหมุนพลาสติกเนื่องจากโมเมนต์คัตมีคุณสมบัติดังนี้: 1) ระยะห่างเหล็กปลอก $\leq d / 3$ และ 2) กำลังองค์อาคารที่มีความเหนียวปานกลางและมากต้องได้จากเหล็กปลอก (V_s) อย่างน้อย $\frac{1}{4}$ ของแรงเฉือนออกแบบ นอกจากนี้จะพิจารณาเป็น Non-conforming

3 การใช้ค่าเฉลี่ยระหว่างค่าภายในตารางสามารถทำได้

4 $V =$ แรงเฉือนออกแบบ

5 สำหรับคอนกรีตมวลเบาให้ใช้ร้อยละ 75 ของค่าในตาราง

2.7.2 เสา

การจำลองเสาภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนและแรงกระทำด้านข้าง นอกจากจะคำนึงถึงลักษณะการวิบัติเนื่องจากโมเมนต์คัตและแรงเฉือนแล้วยังต้องคำนึงถึงผลของแรงตามแนวแกนที่มีต่อความสามารถต้านทานโมเมนต์คัตของเสาด้วย การจำลองเสาโดยโปรแกรม SAP2000 มีลักษณะเป็นเส้นที่มีคุณสมบัติเชิงเส้นตลอดความยาวของเสาและประกอบด้วยจุดหมุนพลาสติกเนื่องจากแรงตามแนวแกนและโมเมนต์คัตในตำแหน่งที่มีแนวโน้มจะเกิดการวิบัติของเสา จุดหมุนพลาสติกดังกล่าวแสดงพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและความสามารถต้านทานโมเมนต์คัตของเสา แสดงดังรูป 2.9 ความสามารถในการหมุนและขอบเขตของการหมุนของจุดหมุนพลาสติกเนื่องจากแรงตามแนวแกนและโมเมนต์คัตของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามข้อแนะนำของ ATC-40 แสดงดังตาราง 2.10 ตัวแปรที่ใช้ในการเลือกค่าจากตารางดังกล่าวแปรผันกับแรงตามแนวแกนและเหล็กเสริมตามขวางหรือเหล็กปลอก แต่เนื่องจากขนาดของแรงตามแนวแกนของเสาแปรเปลี่ยนตลอดการวิเคราะห์ ดังนั้นแรงตามแนวแกนที่ใช้เพื่อเลือกค่าในตารางได้พิจารณาใช้แรงกระทำในแนวตั้งทั้งหมดที่กระทำต่อโครงสร้างก่อนการรับแรงกระทำด้านข้างของโครงสร้าง การศึกษานี้เสาถูกจำลองเป็นเส้นโดยมีจุดหมุนพลาสติกเนื่องจากโมเมนต์คัตที่ปลายเสาทั้งสองด้าน ซึ่งค่าโมเมนต์ที่จุดครากของเสาสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของแรงกระทำตามแนวแกนกับโมเมนต์คัตโดยแรงกระทำตามแนวแกนมีค่าเริ่มต้นเท่ากับแรงกระทำในแนวตั้งทั้งหมดและทำการปรับแก้ค่าแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ที่จุดครากในแต่ละรอบของการคำนวณ และเพื่อคำนึงถึงผลของ P-Delta ที่มีผลต่อความแข็งแรงและกำลังต้านทานด้านข้างของเสา แบบจำลองเสาหนึ่งต้นจึงถูกจำลองแบ่งเป็นสองส่วน

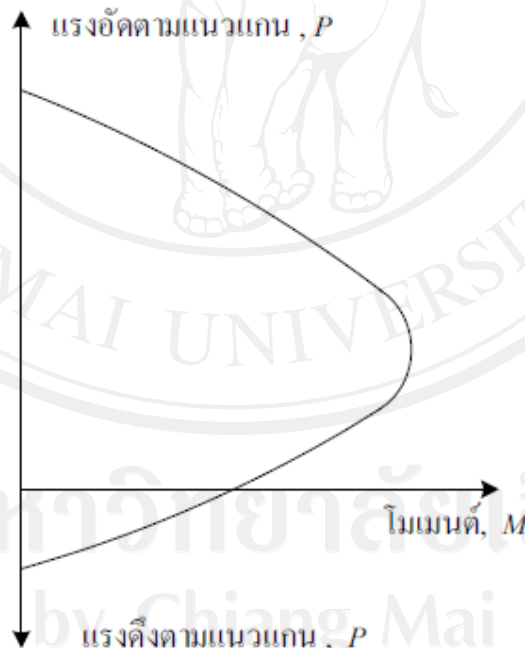
กำลังต้านทานแรงเฉือนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจะเกิดจากความต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีต (V_c) และเหล็กเสริมตามขวางหรือเหล็กปลอก (V_s) เช่นเดียวกับคาน แต่แตกต่างกันที่แรง

ตามแนวแกนของเสาจะมีผลต่อความสามารถรับแรงเฉือนของเสา กำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตที่แนะนำโดย ATC-40 โดยอ้างอิงกับผลการทดสอบสามารถแสดงด้วยความสัมพันธ์ดังนี้

$$V_c = 0.29\lambda \left(k + \frac{N}{14A_g} \right) \sqrt{f'_c} b_w d \quad (\text{MPa}) \quad (2.18)$$

โดยที่

- λ = 0.75 กรณีคอนกรีตมวลเบา
- = 1.00 กรณีคอนกรีตทั่วไป
- k = 1.00 ในบริเวณที่มีความหนืยต่ำ
- = 0.00 ในบริเวณที่มีความหนืยปานกลางและสูง
- N = 0.00 กรณีเป็นแรงดึง
- = เป็นบวกกรณีแรงอัด และ N/A_g มีหน่วยเป็น MPa



รูป 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ค้ดของเสา

กำลังต้านทานแรงเฉือนของเหล็กรับแรงเฉือนหรือเหล็กปลอกที่แนะนำโดย ACT-40 สามารถแสดงด้วยความสัมพันธ์ดังนี้

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{0.6s} \quad (2.19)$$

ตาราง 2.10 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองแบบในช่วงไร้เชิงเส้น: เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (ATC-40, 1996)

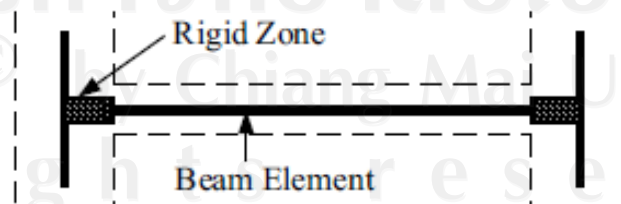
Component Type			Modeling Parameter		
			Plastic Rotation Angle, r_d		Residual Strength Ratio
			a	b	c
1.Column controlled by flexure					
$\frac{P}{A_g f'_c}$	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$	Transverse Reinforcement			
≤ 0.10	≤ 3	C	0.020	0.030	0.200
≤ 0.10	≥ 6	C	0.015	0.025	0.200
≥ 0.40	≤ 3	C	0.015	0.025	0.200
≥ 0.40	≥ 6	C	0.010	0.015	0.200
≤ 0.10	≤ 3	NC	0.010	0.015	0.200
≤ 0.10	≥ 6	NC	0.005	0.005	0.000
≥ 0.40	≤ 3	NC	0.005	0.005	0.000
≥ 0.40	≥ 6	NC	0.000	0.000	0.000
2.Column controlled by shear					
Hoop spacing $\leq d/2$, or			0.000	0.015	0.200
Other cases			0.000	0.000	0.000
3.Column controlled by inadequate development or splicing along the clear height					
Hoop spacing $\leq d/2$			0.010	0.020	0.400
Hoop spacing $> d/2$			0.000	0.010	0.200
4.Column with axial load exceeding 0.70p					
Conforming reinforcement over the entire length			0.015	0.000	0.000

หมายเหตุ

- 1 หากองค์อาคารที่พิจารณาไม่อยู่ใน 4 กรณีดังกล่าวให้ใช้ค่าต่ำสุดที่เหมาะสมของตาราง
- 2 ในสคมภ์ “transverse reinforcement” “C” และ “NC” คือ conforming และ Non-conforming ตามลำดับโดยองค์อาคารจะถูกพิจารณาเป็น Conforming เมื่อบริเวณที่เป็นจุดหมุนพลาสติกเนื่องจากโมเมนต์คัตมีลักษณะดังนี้ : 1) ระยะห่างเหล็กปลอก $\leq d/3$ และ 2) กำลังองค์อาคารที่มีความเหนียวปานกลางและมากต้องได้จากเหล็กปลอก (V_u) อย่างน้อย $\frac{3}{4}$ ของแรงเฉือนออกแบบ นอกจากนี้จะพิจารณาเป็น Non-conforming
- 3 1) เหล็กปลอกในเสาต้องไม่ต่อทาบบริเวณคอนกรีตส่วนหุ้ม และ 2) ส่วน hooks ของเหล็กปลอกต้องฝังอยู่ในส่วนกลางของเสาหรือไม่อยู่ในบริเวณที่สามารถหลุดเกาะเกาะของคอนกรีตส่วนหุ้ม
- 4 การใช้ค่าเฉลี่ยระหว่างภายในตารางสามารถทำได้
- 5 P = แรงตามแนวแกนออกแบบ
- 6 V = แรงเฉือนออกแบบ
- 7 สำหรับคอนกรีตมวลเบาให้ใช้ร้อยละ 75 ของค่าในตาราง

2.7.3 ผลของส่วนพื้นที่แข็งเกร็งของจุดต่อ (Rigid Zone Effects)

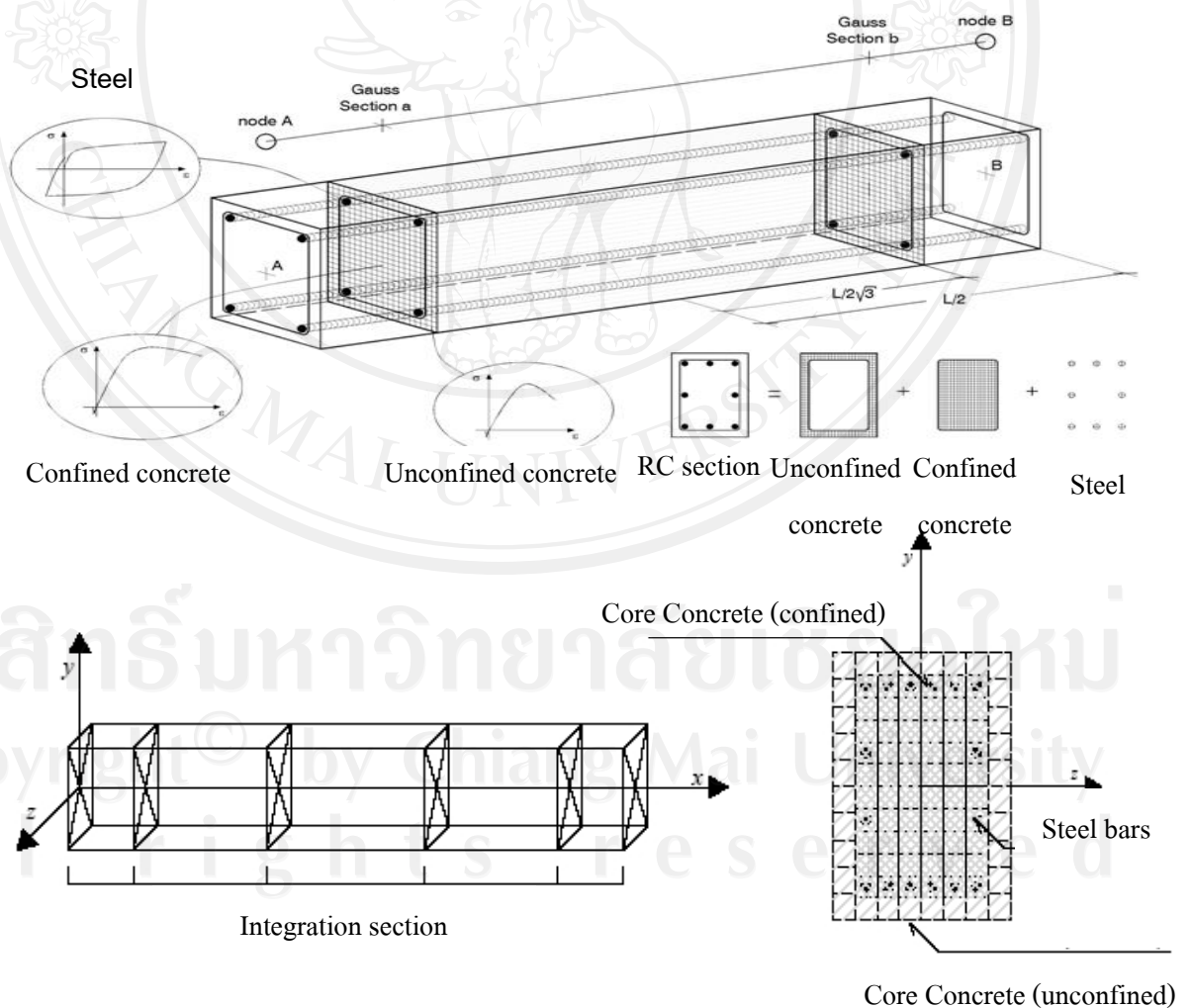
การพิจารณาผลของ Rigid Zone ทำให้สามารถจำลองแบบพฤติกรรมของโครงสร้างได้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงมากยิ่งขึ้น การทำแบบจำลอง Rigid Zone โดยโปรแกรม SAP2000 สามารถทำได้โดยใช้คำสั่ง End Offset ร่วมกับ Rigid-Zone Factor คำสั่ง End Offset เป็นตัวระบุถึงความยาวของช่วง Rigid Zone ซึ่งในการศึกษานี้ใช้ End Offset เท่ากับกึ่งหนึ่งของความกว้างเสาในทิศทางที่รับแรงกระทำด้านข้าง ส่วน Rigid-Zone Factor เป็นตัวกำหนดความสามารถในการเสียรูปเนื่องจากโมเมนต์คัตและแรงเฉือนในช่วงความยาวของ Rigid Zone แสดงดังรูป 2.10



รูป 2.10 แบบจำลองคานที่พิจารณาผลของ Rigid Zone (Macleod, 1990)

2.8 แบบจำลองเส้นใย Fiber Model

แบบจำลองเส้นใย (Fiber Model) เป็นแบบจำลองที่แสดงพฤติกรรมของหน้าตัดโดยการแบ่งพื้นที่หน้าตัดออกเป็นเซลล์ชิ้นส่วนย่อยที่มีความยาวหนึ่ง เรียกชิ้นส่วนย่อยนี้เป็น ชิ้นส่วนเส้นใย (Fiber Element) ซึ่งในแต่ละชิ้นส่วนเส้นใยรับแรงตามแนวแกนเท่านั้น ดังนั้นจึงมีความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดแกนเดียว แบบจำลองในแต่ละชิ้นส่วนเส้นใยประกอบไปด้วย 3 ส่วน ตามแต่ตำแหน่งของเส้นใยบนหน้าตัด คือ (1) ส่วนของเส้นใยที่เป็นหน้าตัดเหล็ก (2) ส่วนของเส้นใยที่เป็นคอนกรีตที่มีการรัดรอบของเหล็กปลอก (Confined concrete) และ (3) ส่วนของเส้นใยที่เป็นคอนกรีตนอกพื้นที่รัดรอบ (Unconfined concrete) สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของหน้าตัดของชิ้นส่วน โครงสร้างจะได้จากการรวมเอา (Integration) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแต่ละเส้นใยในหน้าตัดนั้นๆ ดังแสดงไว้ดังรูป 2.11



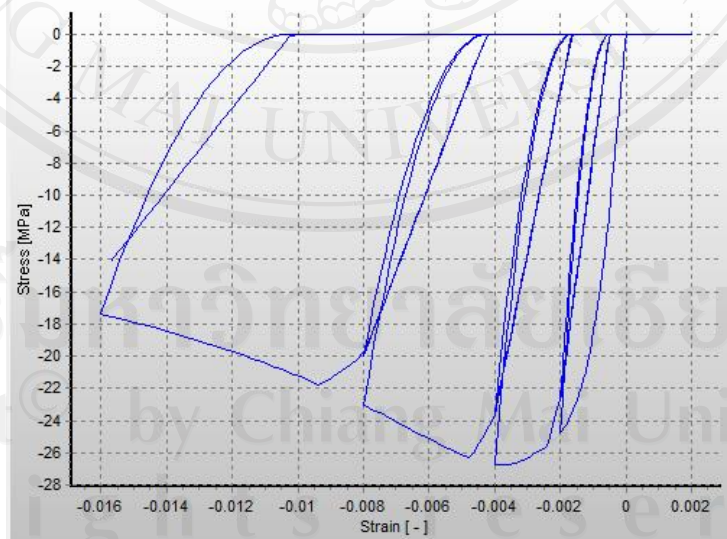
รูป 2.11 แบบจำลองแบบเส้นใย Fiber Model

2.8.1 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดแกนเดียว ของคอนกรีต

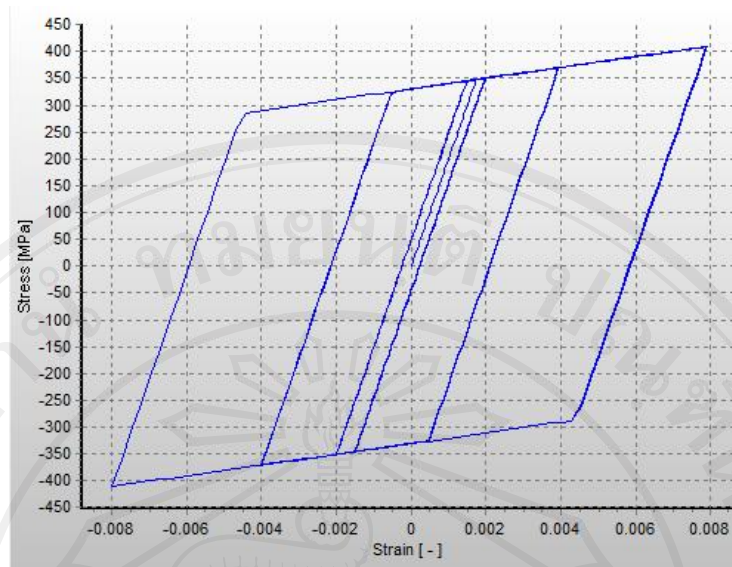
เป็นแบบจำลองพฤติกรรมของคอนกรีตไร้เชิงเส้นรับแรงตามแนวแกน ที่ได้คำนึงถึงผลจากเหล็กกรอบจากข้อมูลงานศึกษา Madas (1993) และ Mander et al. (1988) รวมทั้งการพิจารณาพฤติกรรมการรับแรงแบบวัฏจักร Martinez-Rueda and Elnashai (1997) และการพิจารณาผลจากเหล็กกรอบร่วมกับรับแรงแบบวัฏจักร Madas and Elnashai (1992) โดยระดับของผลการรัดรอบจะแปรตามค่าความเครียดของเหล็กกรอบ (Variable confinement) และค่าแรงตามแนวแกนของชิ้นส่วน ซึ่งจะเปลี่ยนไปในแต่ละขั้นการคำนวณในแต่ละรอบ ลักษณะของพฤติกรรมของคอนกรีตนี้แสดงดังรูป 2.12

2.8.2 ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดแกนเดียวเหล็กเสริม

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมคิดถึงผลกำลังที่เพิ่มหลังการคราก (Strain Hardening) โดยการกำหนดด้วยส่วนเส้นตรงสองส่วน (Bilinear Stress-Strain model) ในช่วงอีลาสติคจะเปลี่ยนแปลงตามกฎของฮุก และในส่วนของช่วงพลาสติกมีความสัมพันธ์แบบเป็นเชิงเส้นตามการเพิ่มขึ้นของความเครียดพลาสติก แบบจำลองนี้ถือเป็นแบบจำลองอย่างง่าย โดยนำค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจริง ลักษณะของพฤติกรรมของเหล็กจากแบบจำลองนี้แสดงดังรูป 2.13



รูป 2.12 ความสัมพันธ์ Stress-Strain ของแบบจำลองคอนกรีต

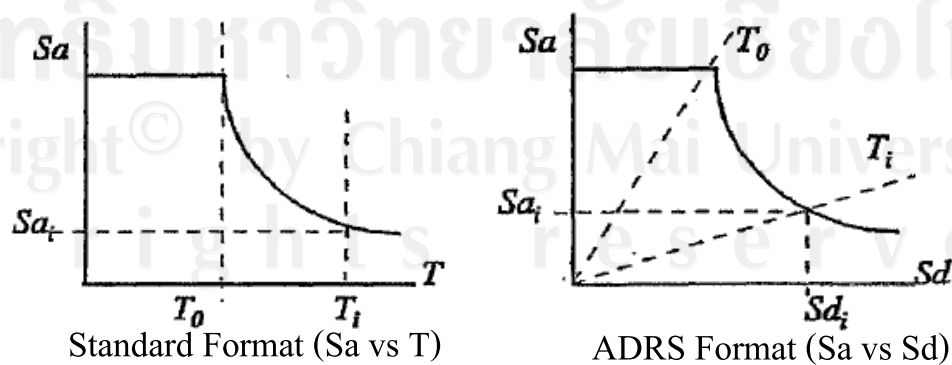


รูป 2.13 ความสัมพันธ์ Stress-Strain ของแบบจำลองเหล็กเสริม

2.9 เส้นโค้งความต้องการ (Demand Spectrum)

เมื่อเกิดการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวอาคารต่างๆจะมีการตอบสนองต่อการสั่นสะเทือนแตกต่างกันไป โดยขึ้นอยู่กับคาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร และปัจจัยอื่น ๆ ดังนั้น ผลตอบสนองของอาคาร จึงแสดงในรูปของ “ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Spectral Acceleration)” ซึ่งมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามคาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร เมื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ของ Spectral Acceleration (S_a) และ Spectral Displacement (S_d) ซึ่งเราเรียกเส้นนี้ว่า “เส้นโค้งความต้องการ (Demand Spectrum)” ซึ่งอยู่ในรูปแบบของ Acceleration-Displacement Response Spectral (ADRS) ดังรูป 2.14

Response Spectrum Conversion



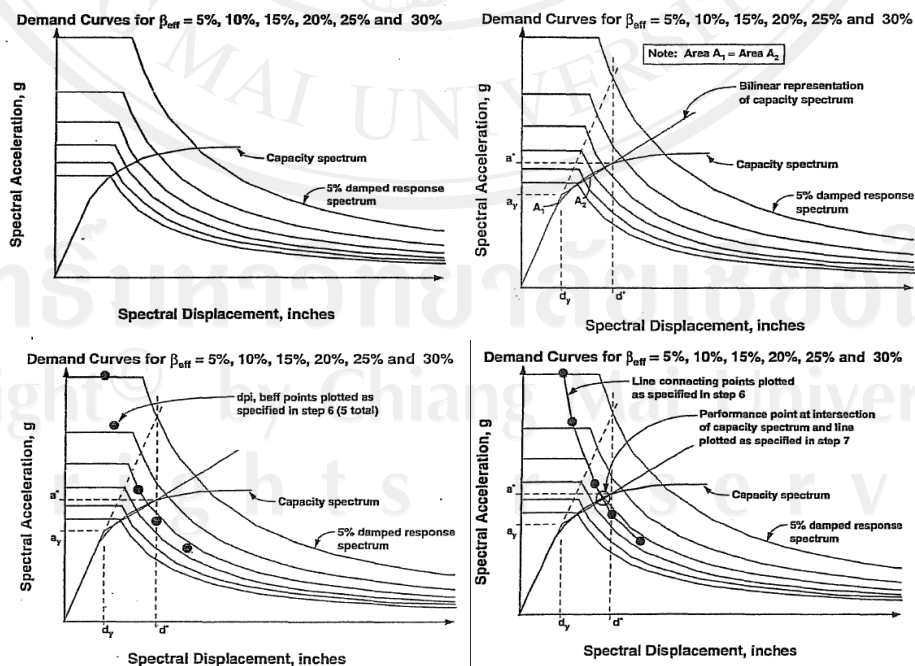
รูป 2.14 แสดงการเปลี่ยนความสัมพันธ์ระหว่าง S_a และ T ให้อยู่ในรูปแบบ S_a และ S_d (ADRS) โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$D_{d1} = \frac{T_i^2}{4\pi^2} S_{ai} g \quad (2.20)$$

2.10 พิกัดสมรรถนะ (Performance Point)

หมายถึง ระดับค่าการเคลื่อนที่ของอาคารเมื่อเกิดแผ่นดินไหว โดยจะได้จากจุดตัดของเส้นโค้งสเปกตรัมสมรรถนะ (Capacity Spectrum) กับเส้นโค้งสเปกตรัมการตอบสนองต้องการ (Demand Spectrum) ในการหาพิกัดสมรรถนะนั้นสามารถหาได้จากสามวิธีจากคำแนะนำของ ATC-40 โดยในการศึกษานี้ได้ใช้วิธีที่ 1 ในการหาค่าพิกัดสมรรถนะโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เมื่อได้เส้นโค้งความต้องการ (5% Damped Response Spectrum) และเส้นโค้งสมรรถนะ (Capacity Spectrum) มาแสดงอยู่ในรูปแบบ (ADRS)
2. เลือกจุดพิกัดสมรรถนะจากการลากเส้นตรงตามช่วงฮิสเทรีติกของเส้นโค้งสมรรถนะจนถึงเส้นโค้งความต้องการ เมื่อถึงจุดตัดให้ลากขนานกับแกน S_d ลงมาตัดกับเส้นโค้งสมรรถนะจะได้จุด a_{pi} และ d_{pi}
3. หาเส้นโค้งความต้องการที่พิจารณาสัมประสิทธิ์ลดค่า (Demand Spectrum) แต่ละจุดในช่วงหลังจุดครากแล้วเชื่อมจุดทั้งหมดต่อกัน
4. พิกัดที่เส้นโค้งความต้องการที่พิจารณาสัมประสิทธิ์ลดค่า ตัดกับเส้นโค้งสมรรถนะที่พิกัด d_i จากอยู่ในช่วง $(0.95d_{pi} \leq d_i \leq 1.05 d_{pi})$ ดังนั้นพิกัด a_{pi} และ d_{pi} นั้นคือพิกัดสมรรถนะ (Performance Point) ดังรูป 2.15



รูป 2.15 การหาพิกัดสมรรถนะ

2.11 การเสริมกำลังของอาคาร

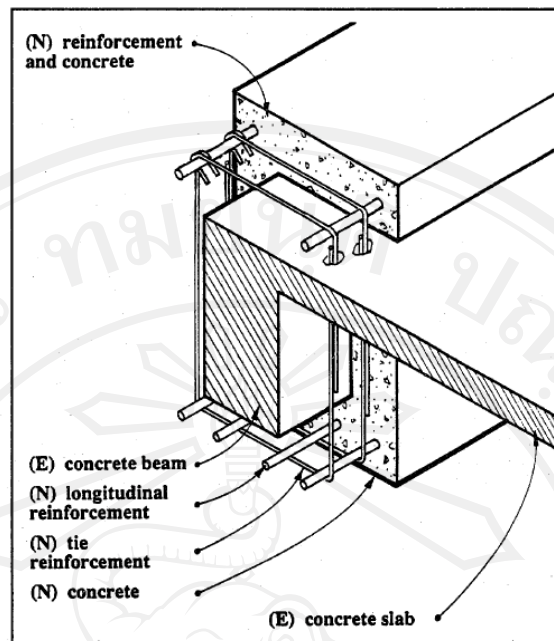
หากอาคารมีความแข็งแรงไม่เพียงพอที่จะต้านทานแรงแผ่นดินไหว เมื่อเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวขึ้น จะเกิดความเสียหายอย่างรุนแรง ทั้งนี้ หากมีการประเมินความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้ล่วงหน้าก็จะทำให้มีแนวทางที่จะตัดสินใจในการเสริมกำลังได้ ทั้งนี้การเสริมกำลังจะมีวัตถุประสงค์เพื่อการเพิ่มกำลัง (Strength) การปรับปรุงค่าสติเฟนส และความเหนียว ทั้งนี้แนวทางเสริมกำลังโดยเอกสารคำแนะนำ FEMA-172 ได้แนะนำแนวทางแยกตามชนิดระบบโครงสร้าง ดังนี้

2.11.1 ระบบโครงสร้างคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

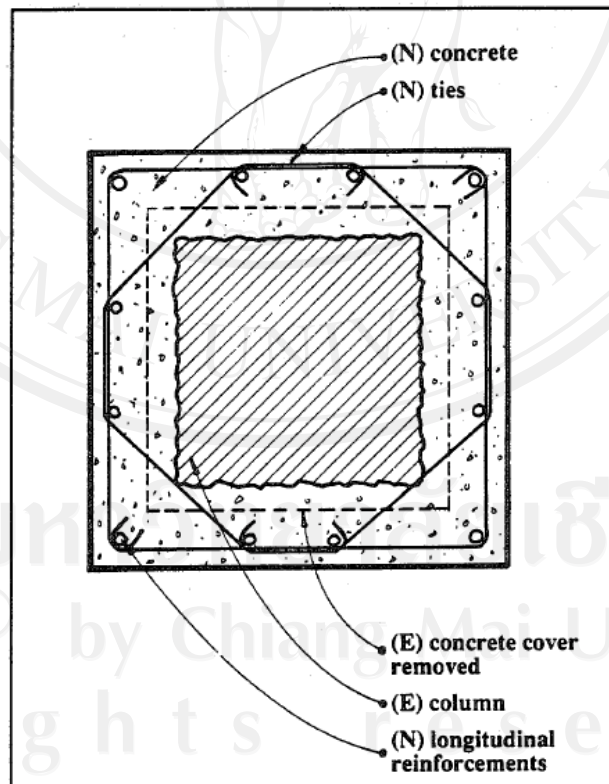
ระบบโครงสร้างชนิดคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีได้ออกแบบเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวอย่างเหมาะสม โดยส่วนใหญ่จะพบปัญหาด้านความเหนียวที่ไม่เพียงพอ กำลังเฉือนในคานและเสาต่ำเกินไป และขาดการเสริมเหล็กที่จะทำให้เกิดการโอบรัด (Confinement) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ตำแหน่งจุดต่อ ทั้งนี้มีแนวทางเพื่อเสริมกำลังแก้ไขที่เป็นไปได้ดังต่อไปนี้

- วิธีที่ 1 เพิ่มความเหนียวและความสามารถของจุดต่อคาน-เสาโดยการขยายหน้าตัดเสา (Column Jacketing) หรือเพิ่มกำลังต้านทานของคานและเสา ดังรูป 2.16 และ 2.17 ตามลำดับ
- วิธีที่ 2 ลดความเค้นที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหวในโครงสร้างโดยการเพิ่มขึ้นส่วนในแนวตั้งที่ตำแหน่งต่าง ๆ เช่น (การเพิ่มจำนวนคาน-เสา ค้ำยัน กำแพงรับแรงเฉือน)
- วิธีที่ 3 การเปลี่ยนระบบโครงสร้างเป็นโครงสร้างที่มีกำแพงรับแรงเฉือนโดยการเติมผนังคอนกรีตเสริมเหล็กในช่องระหว่างคาน-เสา ดังแสดงในรูป 2.18

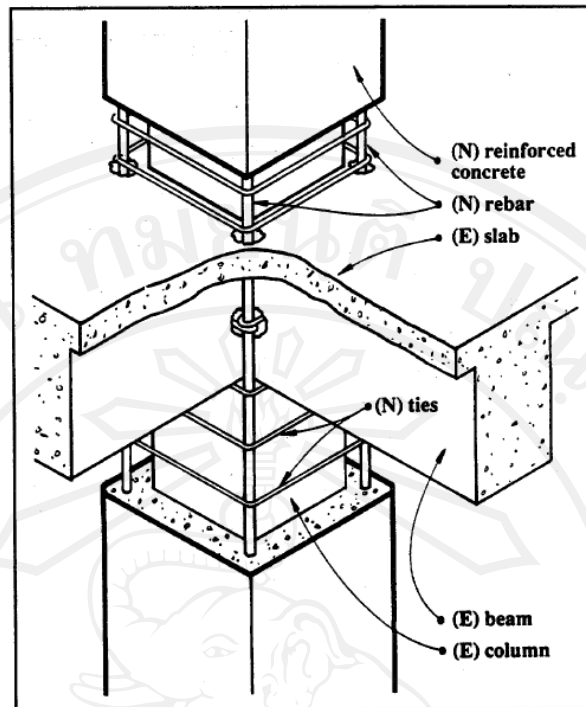
การปรับปรุงความเหนียวและกำลังของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการเสริมเปลือกหุ้ม (วิธีที่ 1) โดยทั่วไปแล้วนั้นไม่คุ้มกับค่าใช้จ่ายที่ต้องเสียไปเนื่องจากการเสริมเหล็กครอบและเหล็กต้านแรงเฉือนใน คาน เสา และบริเวณจุดต่อคาน-เสา จะทำได้ยาก วิธีการเพิ่มกำแพงรับแรงเฉือน (วิธีที่ 2) หรือการเสริมผนังคอนกรีตเสริมเหล็กเข้าไปในช่วงระหว่างคาน-เสา (วิธีที่ 3) จะสามารถทำได้ง่ายกว่า แต่ทั้งสองวิธีนี้อาจทำให้โครงสร้างไม่มีประสิทธิภาพสำหรับแรงด้านข้าง เพราะความแข็งที่มากขึ้นของกำแพงอาจจะเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของแรงทางด้านข้างที่ถูกต้านด้วยกำแพงรวมทั้ง มักต้องการการเสริมฐานรากให้แข็งแรงมากขึ้นด้วย ในสุดท้ายการตัดสินใจว่าจะดำเนินการเสริมกำลังด้วยวิธีใด หรือที่ตำแหน่งใด จะต้องพิจารณาผลกระทบต่อการใช้งานและรูปด้านของอาคารด้วย



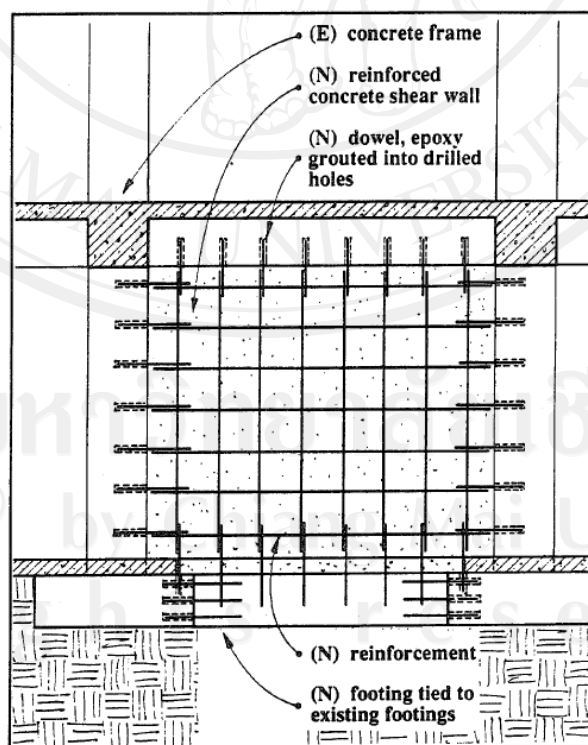
รูป 2.16 การเสริมกำลังด้วยวิธีการหุ้มด้วยคอนกรีตที่คาน



รูป 2.17 การเสริมกำลังด้วยวิธีการหุ้มด้วยคอนกรีตที่เสา



รูป 2.17 การเสริมกำลังด้วยวิธีการหุ้มด้วยคอนกรีตที่เสา (ต่อ)



รูป 2.18 การเสริมกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กในช่องว่างระหว่างคาน – เสา

2.11.2 ระบบโครงสร้างคาน-เสาที่มีชิ้นส่วนผนังในช่องว่าง

โครงสร้างคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีชิ้นส่วนผนังในช่องว่าง พฤติกรรมของโครงสร้างแบบโครงข้อแข็งจะถูกแทนด้วยความแข็งของผนัง สำหรับผนังที่เป็นกำแพงแข็งเกร็งนั้นจะต้านแรงทางด้านข้างได้อย่างชัดเจนเหมือนกับกำแพงรับแรงเฉือน และโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังที่มีความแข็งเกร็งน้อยนั้นจะมีลักษณะการต้านแรงด้านข้างเหมือนกับการเสริมค้ำยันแนวทแยงซึ่งมีลักษณะเป็นชิ้นส่วนรับแรงอัด (compression strut) จุดอ่อนสำคัญของโครงสร้างระบบนี้มีดังนี้

- เกิดการแตกบดอัดของผนังที่ส่วนบนและส่วนล่างเนื่องจากลักษณะการเกิดเสาแรงอัดแนวทแยงของผนัง (Diagonal Compression Strut)
- การเสียหายของคาน หรือ เสา จากการถ่ายเทแรงเฉือนโดยตรง
- การพังด้วยแรงดึงของเสา หรือจุดต่อ เนื่องจากแรงดันขึ้น (Uplift) ที่มีผลเนื่องจากการค้ำยัน
- การแตกของผนังเนื่องจากความเค้นดึงที่กระทำเป็นมุมฉากกับแนวของเสาแรงอัดแนวทแยง (Diagonal Compression Strut)
- การพังของผนังจากแรงกระทำนอกระนาบ (out-of-plane force) เนื่องจากการสูญเสียระยะฝัง หรือ ความชะลูดที่มากเกินไปของผนัง

ทั้งนี้การเสริมกำลังสำหรับระบบโครงสร้างคาน-เสาที่มีชิ้นส่วนผนังในช่องว่าง อาจทำได้ดังนี้

1. ลดผลของผนังด้วยการเสริมช่องว่างระหว่างผนังและโครงสร้างคาน-เสา พร้อมทั้งเสริมการยึดรั้งในทิศทางนอกระนาบ
2. เปลี่ยนผนังเป็นกำแพงรับแรงเฉือน โดยการเสริมกำลังตามวิธีดังนี้

การเสริมกำลังสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

1. เพิ่มกำลังรับแรงเฉือนโดยเพิ่มเหล็กเสริมในทางด้านข้างหรือด้านหน้าของกำแพงและทำการเทคอนกรีตทับ(รูป 2.21)
2. เพิ่มกำลังต้านแรงด้านข้างนอกระนาบโดยการเสริมเหล็กที่กำแพง (รูป 2.20)
3. เพิ่มกำลังรับแรงด้านข้างนอกระนาบโดยการเพิ่มปูนฉาบผิวบาง ๆ ที่ด้านในและด้านนอกของกำแพงและเสริมด้วยตะแกรงเหล็ก
4. แทนที่กระจกหรือประตูด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กหรืออิฐก่อ (รูป 2.21 และ 2.22)

ถ้าโครงสร้างแรงคัตที่ไม่มีกำแพง มีกำลังเพียงพอสำหรับแรงที่กำหนด การแก้ไขที่เหมาะสมนั้นต้องให้จุดเชื่อมต่อระหว่างเสา คานส่วนบน และกำแพง มีความยืดหยุ่นโดยทำให้เสาเกิดการเสียรูปช่วงอีลาสติกของเสาได้โดยไม่มีสิ่งยึดรั้ง (วิธีที่ 1) โดยการตัดให้เป็นช่องว่างระหว่างกำแพงและเสาแล้วเติมช่องว่างนั้นด้วยวัสดุที่มีความยืดหยุ่น หรือ โดยการถอดกำแพงออกและแทนที่ด้วยกำแพงที่รับแรงไม่ได้ (nonstructural) และไม่ยึดรั้งกับเสา

2.11.3 ระบบโครงสร้างกำแพงรับแรงเฉือน

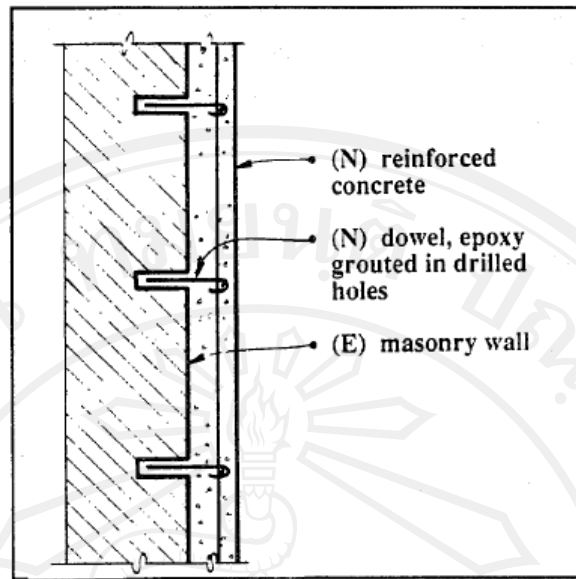
จุดอ่อนที่สำคัญ ของกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กหรือกำแพงอิฐก่อเสริมเหล็กนั้นคือ

- กำลังรับแรงเฉือนไม่เพียงพอ
- กำลังรับแรงคัตไม่เพียงพอ
- กำลังรับแรงเฉือนและกำลังรับแรงคัตในข้อต่อระหว่างคานและกำแพงรับแรงเฉือนไม่เพียงพอ

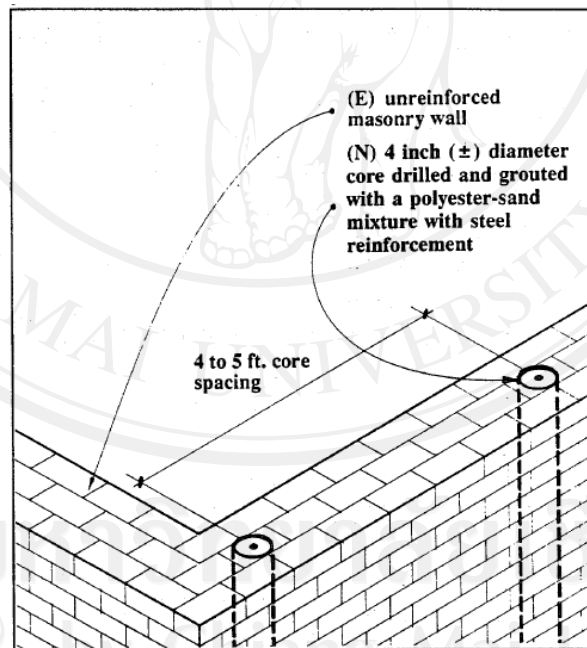
ก การเสริมกำลังกรณีสำหรับกำลังรับแรงเฉือนไม่เพียงพอ

เมื่อผนังคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงเฉือนมีกำลังเฉือนต่ำเกินไปสามารถแก้ไขได้ดังนี้

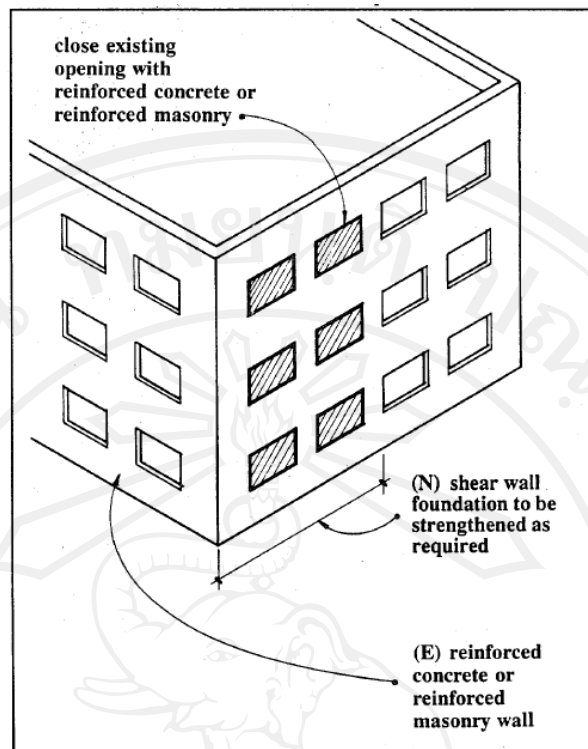
1. เพิ่มประสิทธิภาพของกำแพงโดยการปิดทับหน้าต่างหรือประตูดด้วยกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กหรือกำแพงอิฐก่อเสริมเหล็กดังรูป 2.21 และ 2.22
2. ให้เพิ่มความหนาของกำแพงด้วยการเทเพิ่มในที่ หรือ เสริมเหล็กและระยะฝังทั้งด้านในและด้านนอกดังรูป 2.18
3. ลดความเค้นเฉือนและความเค้นคัตในกำแพงโดยเพิ่มเติมชิ้นส่วนโครงสร้าง เช่น กำแพงรับแรงเฉือน, ค้ำยัน



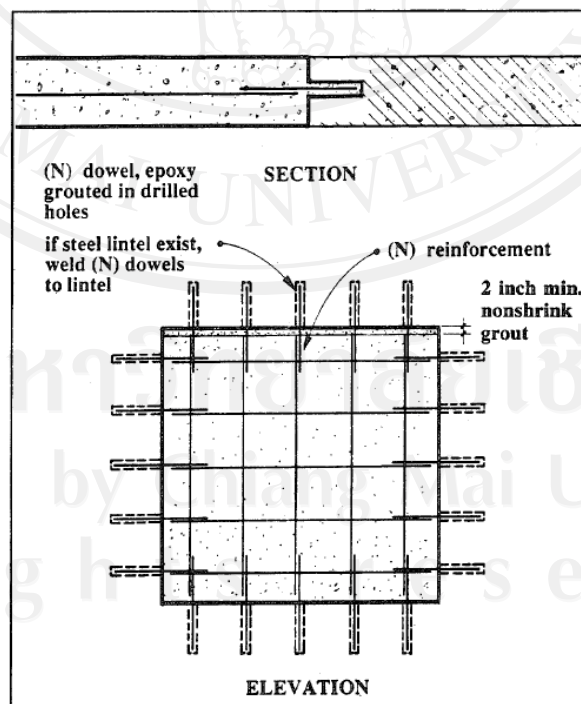
รูป 2.19 การเพิ่มความหนาของกำแพงด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูป 2.20 ตัวอย่างการเสริมเหล็กตรงกลาง



รูป 2.21 การเสริมส่วนที่เป็นช่องเปิดด้วยกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กหรือกำแพงอิฐก่อเสริมเหล็ก



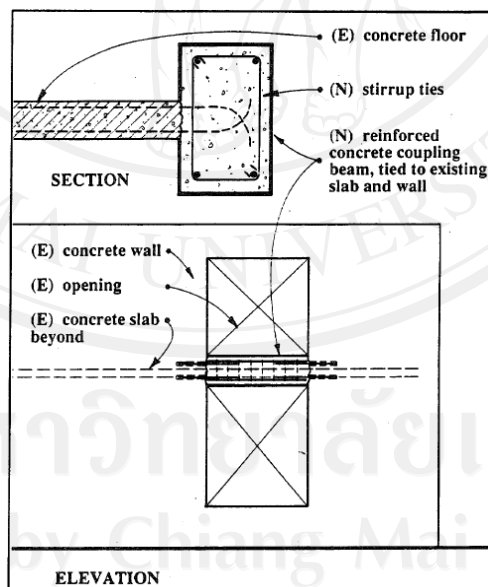
รูป 2.22 รายละเอียดของกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็ก

ข การเสริมกำลังสำหรับโมเมนต์ดัด

เมื่อความสามารถรับกำลังของโมเมนต์ดัดของกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าน้อยเกินไปสามารถแก้ไขได้ด้วยวิธีเดียวกันกับการเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนแต่ต้องแน่ใจว่าเหล็กรับแรงดัดมีกำลังถอนเพียงพอที่จุดต่อระหว่างกำแพงและฐาน กำแพงรับแรงเฉือนที่ครากด้วยแรงดัดจะมีความเหนียวมากกว่ากำแพงที่ครากด้วยแรงเฉือน ส่วนกำแพงที่เสริมเหล็กมาก(มีเปอร์เซ็นต์เหล็กมากกว่า 0.005) นั้นอาจจะเกิดการพังแบบเปราะได้ (Brittle)

ค การเสริมกำลังบริเวณคานเชื่อม(Coupling beams)

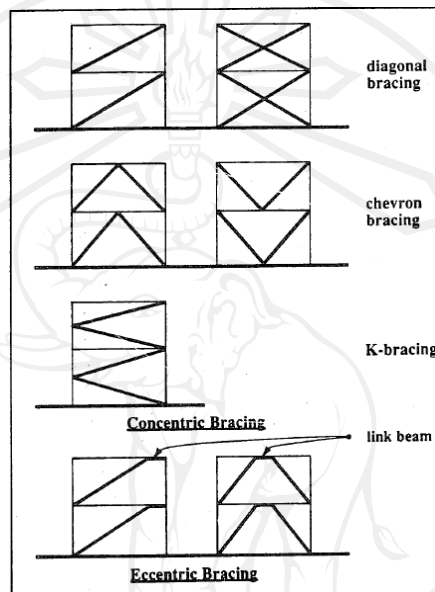
1. เติมช่องว่างด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็ก (รูป 2.20)
2. เอาคานเดิมออกและแทนที่ด้วยคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่แข็งแรงกว่า (รูป 2.21)
3. เพิ่มคอนกรีตเสริมเหล็กหนึ่งหรือทั้งสองด้านของกำแพงและเพิ่มความหนาของกำแพงเดิมที่มีอยู่ด้วย (รูป 2.17)
4. ลดความเค้นเฉือนและความเค้นดัดในจุดต่อของคานโดยให้เพิ่มขึ้นส่วนโครงสร้างเช่น กำแพงรับแรงเฉือน ค้ำยัน



รูป 2.23 ตัวอย่างการเสริมกำลังจุดต่อคานที่กำแพงด้านนอก

2.11.4 ระบบโครงสร้างค้ำยัน

ค้ำยันเป็นส่วน โครงสร้างที่ต้านแรงด้านข้างด้วยแรงดึงและแรงกด ทั้งนี้มีค้ำยันหลัก ๆ อยู่ 2 ประเภท (1) ระบบค้ำยันร่วมศูนย์ (Concentric bracing) ได้แก่ ค้ำยันแนวทแยง (Diagonals) ค้ำยันแบบตัววี (Chevrons) และค้ำยันแบบตัวเค (K-bracing) และ (2) ระบบค้ำยันเยื้องศูนย์ (Eccentric bracing) ดังแสดงในรูป 2.24



รูป 2.24 ประเภทของค้ำยัน

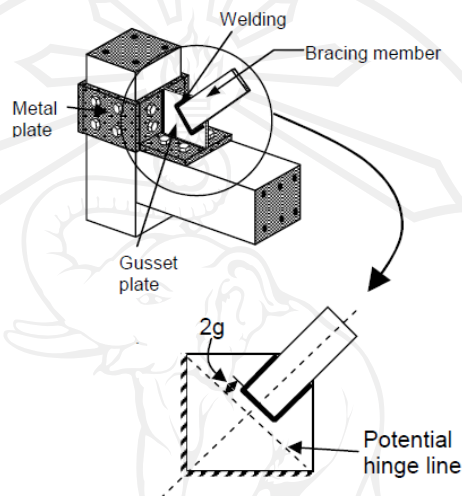
การเสริมค้ำยันช่องระหว่างคาน-เสาด้วยโครงสร้างเหล็กจะสามารถทำได้ง่ายโดยการค้ำยันเหล็กในแนวทแยงนั้น ค้ำยันควรจะอยู่ในแนวตรงกลางระหว่างจุดต่อคาน-เสา ในการออกแบบควรทำตามข้อแนะนำดังต่อไปนี้ (Indian Institute of Technology Kanpur and Gujarat State Disaster Mitigation Authority: IITK-GSDMA, 2005)

1. ค่าความชะลูดของชิ้นส่วนค้ำยันควรน้อยกว่าหรือเท่ากับ $2500/f_y^{0.5}$ เมื่อ f_y คือ หน่วยแรงที่จุดคราก มีหน่วยเป็น MPa
2. อัตราส่วน ความกว้างต่อความหนาของหน้าตัดของค้ำยันควรไม่เกิน $136/f_y^{0.5}$ สำหรับหน้าตัดกลมนั้นอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกต่อความหนาของกำแพงควรไม่เกิน $8960/f_y$ และหน้าตัดสี่เหลี่ยมอัตราส่วนของความกว้างต่อความหนาของกำแพงควรไม่เกิน $288/f_y^{0.5}$
3. ในกรณีของ Chevron Braces จุดที่ต่อกับคานควรจะมี ความแข็งแรงพอที่จะต้านผลกระทบจากแรงในแนวตั้งที่กระทำต่อคานโดยค้ำยัน น้ำหนักส่วนนี้สามารถคำนวณได้โดยใช้ค่าน้อยที่สุด

ของค่ากำลังคราก P_y สำหรับค้ำยันในส่วนที่รับแรงดึง และ ค่ามากที่สุดคือ 0.3 เท่าของน้ำหนัก สำหรับค้ำยันที่รับแรงกด P_{ac}

4. ทั้งส่วนบนและส่วนล่างของคานที่จุดต่อกับค้ำยันควรจะออกแบบให้รับแรงด้นข้าง เท่ากับ 2% ของหน้าตัดเดิม f_{ybr}

5. จุดต่อค้ำยันควรมีความสามารถเพียงพอต่อการต้านการพังในลักษณะแตก และ พังแบบ แรงกระทำนอกระนาบ (out-of-plane failure)



รูป 2.25 รายละเอียดการเสริมกำลังที่จุดต่อค้ำยัน