

斛ลกสูตร การออกแบบโครงสร้างอาคารสูง

ศาสตราจารย์ ดร.ออกสิทธิ์ ลีมสุวรรณ

## SHEAR WALL DESIGN

๗๙

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาฯ  
ช่วงกับ  
ฝ่ายการศึกษาต่อเนื่อง จุฬาฯ

ผนังต้านแรงเฉือน

SHEAR WALL

โดย

ศาสตราจารย์ ดร.เอกลักษณ์ สิมสุวรรณ  
ภาควิชาภิสุวรรณโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ฉบับที่ 923

## สารบัญ

1. บทนำ
2. พฤติกรรมการต้ามแยงของผู้นั้น
3. การกระจายแรงดันส่วนตัว ๆ ของผู้นั้น
4. การออกแบบสำหรับผู้ตัดและผู้อัด
5. การออกแบบสำหรับผู้เดิน
6. การนำไปใช้ของผู้ต้ามแยงเชิงอาชญากรรม
7. บทสรุป

## ผนังต้านแรงเฉือน

### SHEAR WALL

ศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ สืบสุวรรณ

#### 1. บทนำ

ผนังต้านแรงเฉือนตามส่วนของการรับแรงจริงจะเป็นพฤติกรรมร่วมระหว่างแรงอัคตานแน่นใจจากแรงดึงดูดของโลก และแรงตัวร่วมและแรงเฉือนอันเกิดจากแรงทางราบจากแรงลมหรือแผ่นดินไหว โดยทั่วไปความหนาของผนังจะถูกควบคุมด้วยขนาดและเทคนิคการก่อสร้าง ดังนี้ แรงอัด แรงตัว และแรงเฉือน ในอาคารที่หรืออาคารสูงปานกลางจะไม่วิกฤต แต่ในอาคารสูงค่าแรงตัวสูงจะมีค่าสูง โดยเฉพาะคือแรงในทางราบอันเกิดจากแรงลมและแรงจากแผ่นดินไหว ผลกระทบความสูง หากการวางแผนดำเนินของผนังได้ไปติด牙จะมีแรงบิดเสริมเข้ามาส่งผลให้การวิเคราะห์และการคำนวณออกแบบเพิ่มความซึ่งยากมากขึ้นเป็นลำดับ

การออกแบบผนังต้านแรงเฉือน จะต้องเริ่มจากการกำหนดโครงสร้างทั้งระบบในทางราบ และในทางตั้ง เพื่อให้คลอบคลุมแรงได้ทุกอย่างและทุกกรณี ระบบโครงสร้างในเริ่มแรกจะต้องจัดให้ลงตัว (Soway) ทั้งนี้เกี่ยวกับตำแหน่ง ขนาด ความหนา ลักษณะเชิงเรขาคณิต และคุณสมบัติหน้าตัดเชิงกล มีอิฐเคราะห์แรงทางราบอันเกิดจากแรงลมและแรงจากแผ่นดินไหว อาจวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ตามแล้ว ระดับความสูงหรือขึ้นต่างๆ ก็สามารถถือค่าแรงเฉือน แรงอัด และแรงตัว รวมทั้งแรงบิดที่ถ่ายลงสู่ผนังในชั้นนั้น ๆ

หากความนี้จะคลอบคลุมถึงพฤติกรรมการต้านแรงของผนัง การกระจายแรงเข้าสู่ส่วนต่าง ๆ ของผนัง และการออกแบบต้านแรงอัด แรงตัว และแรงเฉือน และแรงบิด ทั้งนี้จะให้เป็นไปตามมาตรฐาน การออกแบบของ ACI-318-89 มีตัวอปี๊กและกรณีศึกษาประกอบ อันเกี่ยวกับกรณีของอาคารสูง

#### 2. พฤติกรรมการต้านแรงของผนัง

เม้นท์ทรายกันโดยทั่วไปในอาคารสูงปล่องลิฟท์หรืออิลิฟต์ เดหนีไฟ หรือ Utility Core จะสนับสนุนจากออกแบบเป็นส่วนขององค์อาคาร ในระบบโครงสร้างแนวตั้ง เหตุต้านแรงในแผนกว่างตื้อข้าง มีประสิทธิผล การจัดให้ส่วนของโครงสร้างเหล่านี้มีความสมารถต้านแรงได้สูงได้นับเป็นหัวใจอันสำคัญใน

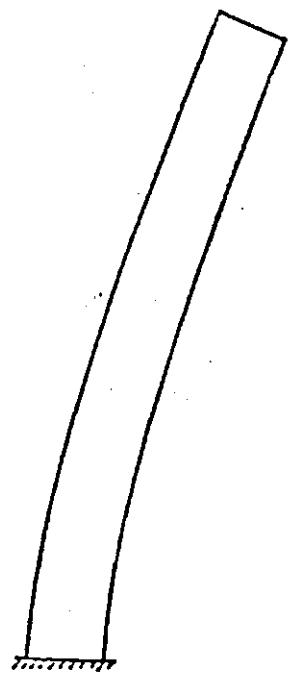
การออกแบบตึกสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากสามารถให้ขึ้นล่นทางโครงสร้างไปเป็นอิฐส่วนทางสถาปัตยกรรมจะสามารถประยุกต์หรือลดส่วนต่าง ๆ ของเหล่านั้นลงได้

ในการสูงหากออกแบบให้ผนังรับแรงเฉือนหักเหด พฤติกรรมของหนังจะมีลักษณะคล้าย ๆ กับคานยื่น (Cantilever Beam) ดังแสดงในรูปที่ 1 มีการตัดเพียงโถงเดียว ดังนั้นการจัดผนังจะง่ายจะต้องพิจารณาให้รับแรงได้ทั้ง 2 แนว และจะต้องพยายามลดภาระของแรงในอาคาร อย่างไรก็ต้องการออกแบบให้เพิ่มรับแรงทางงานเพียงอย่างเดียว ก็จะทำให้เกิดการไมกด้วยสูง เพราะโครงสร้างมีอ่อนตัวมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2 แต่โดยทั่วไปอาคารสูงจะมีพฤติกรรมร่วมระหว่างหนังและเพิ่ม ดังแสดงในรูปที่ 3 จะเห็นว่าพฤติกรรมจะเปลี่ยนไป กล่าวคือการตัดจะมีจุดตัดกลับและแรงที่ถ่ายลงผนังในแต่ละชั้นจะไม่เท่ากัน อาจมีหักแรงในพื้นที่หักเดียวกับหน้าบานหน้าบานหรือต้านกันได้ ซึ่งอยู่กับลักษณะการตัดกลับของผนังตามลักษณะทางเรขาคณิต ความสูง และ หรือ Spanness ของผนังและโครงสร้างประกอบกัน

การวิเคราะห์หัวแรงที่ถ่ายลงผนังทำได้โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ร่วมของผนังและเพิ่ม แต่อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ตัวผู้อุดมวิธีเพิ่มสมัย (Subsuperframe) ก็ให้ผลได้ดีพอควร ในการคำนวณแรงลงผนังหลังการวิเคราะห์หัวแรงโครงสร้างควรจะมีแรงเฉือนทางงานที่ Nodal point จุดต่อระหว่างชั้นของอาคาร ซึ่งจะสามารถคำนวณแรงเฉือน แรงดึง ในแต่ละระดับชั้นได้ไม่ยากเลย สำหรับชั้นในแนวตั้งอาจจะต้องหักห้ามห้ามกันที่ร่องรับหัวสอดคล้องกัน (Arbitrary area) สำหรับแรงนิodicคำนวณได้ในทำนองเดียวกันกับแรงเฉือนหรือแรงดึง แต่จะต้องพิจารณาจากครุฑ์แรงกระทำ กับศูนย์กลางของหน้าตัดกัน ซึ่งหากจะให้การออกแบบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพจะต้องทราบแรงดึงตามชั้นความสูงด้วยจะทำให้เห็นพฤติกรรมต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจนมากขึ้น ดังทัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 4 อันจะประกอบด้วยแรงเฉือน แรงดึง แรงอัด และแรงบิด เป็นตน

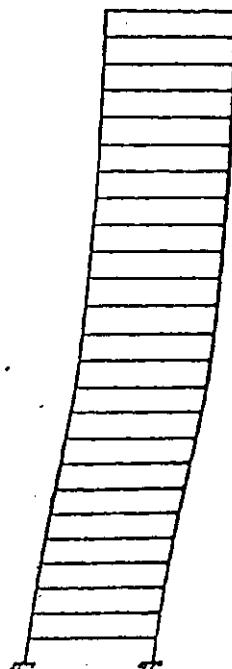
### 3. การกระจายแรงเฉือนตามส่วนของผนัง

ในการวิเคราะห์โครงสร้างร่วมระหว่างผนังกับเพิ่ม โดยทั่วไปจะยุบผนังรับแรงเฉือนเป็นหน่วยเดียวสมัยผนังแห่งเดียว แต่ในส่วนที่ริงผนังอาจมีตัวหลายแห่ง หรือหลายกล่อง ร่วมกันรับแรงตามความแกร่ง (Ringstiffy) ของผนังเหล่านั้น ในกระบวนการตรวจสอบผนังจะมีการพิจารณาจากความบางของผนัง เป็นเกณฑ์หากความหนาของผนังคงที่ แต่หากความหนาของแต่ละผนังไม่เท่ากันจะต้องคิดเป็นตัวปรับร่วมการคิดค่าความแกร่งด้วย



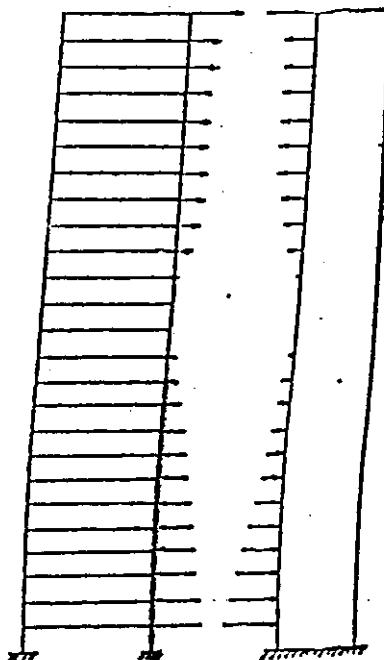
Free Wall .

รูปที่ 1 ลักษณะการโถงงอนของผนังรับแรงเฉือน เมื่อให้ผนังรับแรงอย่างเดียว



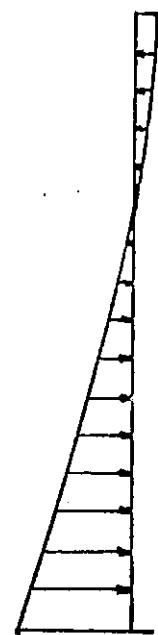
Free Frame

รูปที่ 2 การโถงงอนของเฟรม เมื่อให้เฟรมรับแรงอย่างเดียว

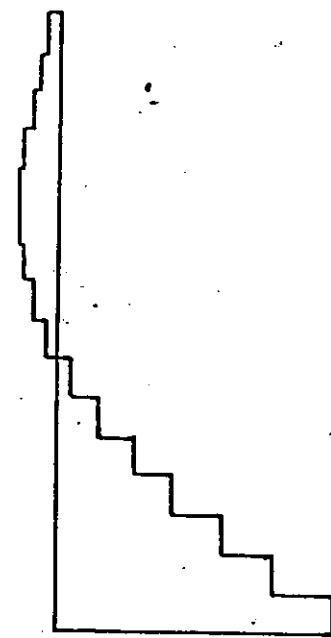


Combined Frame & Wall

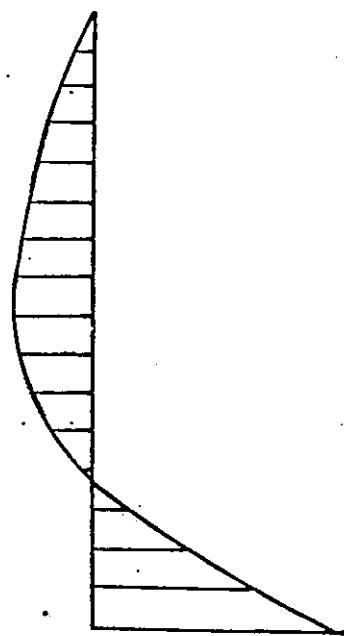
รูปที่ ๓ ผู้ศึกษาร่วมการรับแรงของ เหล็กและผนังรับแรงเฉือน



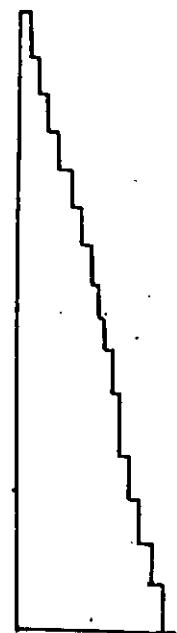
น้ำฝนทั้งหมด  
(Wu)



แรงเฉือน  
(Vu)



แรงต้าน  
(Mu)



น้ำวัด  
(Nu)

รูปที่ 4 กราฟแสดงแรงต้าน ๆ บนผังรับแรงเฉือน

โดยที่ไปเมื่อแรงเฉือนมีการหักต่อผนัง สามารถแยกออกได้เป็นสองส่วน คือ แรงเฉือนโดยตรง และแรงเฉือนเบิด ทั้งนี้เพราะตำแหน่งของแรงที่กระทำมักจะไม่ตรงศูนย์ของหน้าตัด และเมื่อคำนวณหาแรงเฉือนรวมทั้งสองลักษณะต้องนำแรงทั้งสองมารวมกันทั้งทิศทาง แล้วจึงนำไปใช้ในการออกแบบผนังแต่ละส่วน

### ขั้นตอนการคำนวณแรงที่กระเจาในแบบผนัง แยกเป็นลำดับคือ

#### ก. ตำแหน่งของศูนย์กลางความแกร่ง (Center of Rigidity)

ตามที่แสดงในรูปที่ 5 ศูนย์กลางความแกร่งสามารถคำนวณจากความยาวของผนังแต่ละผนังในแผนนี้ ๆ ทั้งนี้โดยเด็ดขาดว่าแรงเฉือนจะมีความแกร่งแนวนานของผนังเท่านั้น ส่วนในแนวตั้งจากกับผนังด้านขวาไม่รับแรง ดังนั้นจากกฎอพาร์คามานูได้คือ

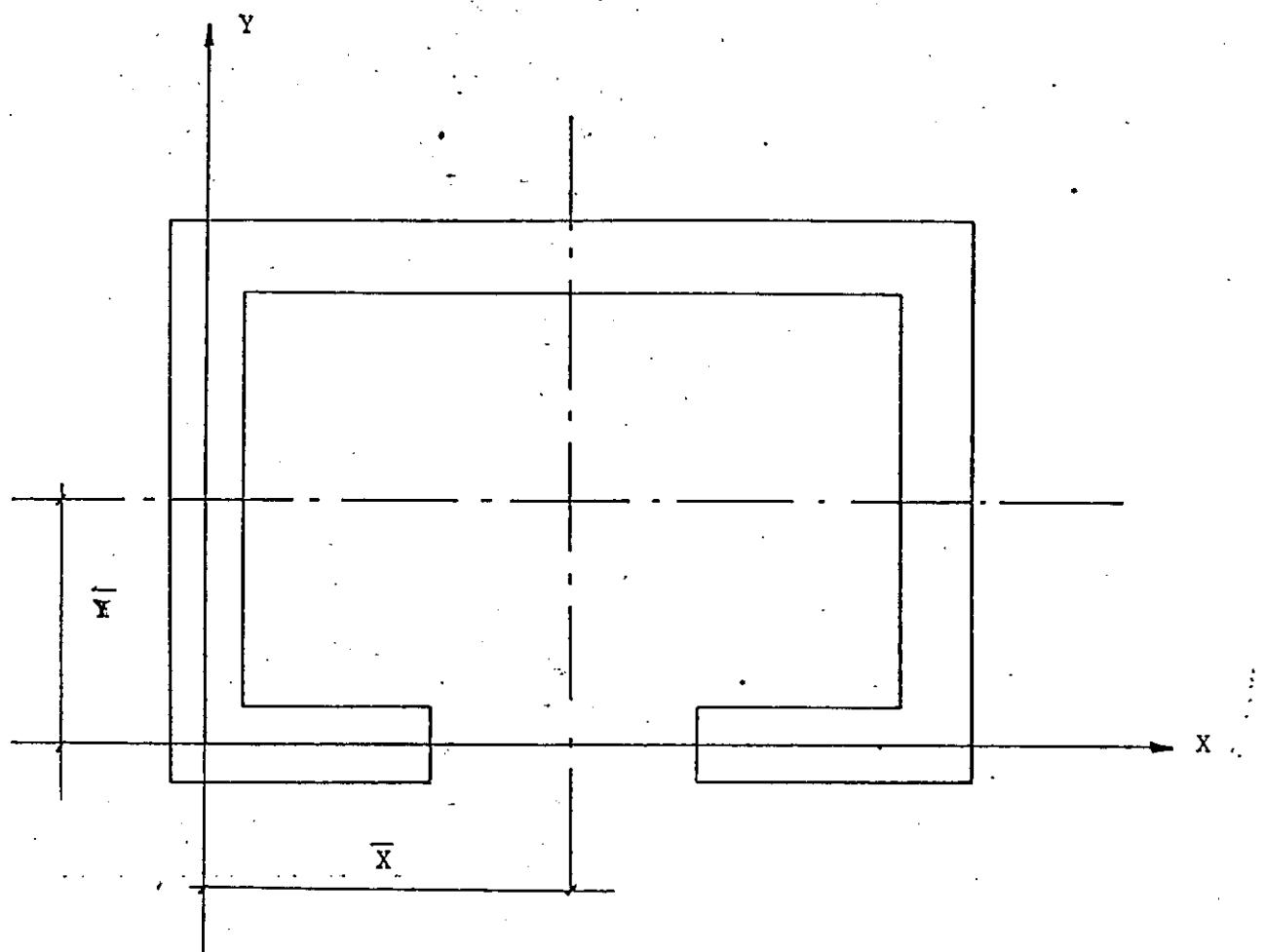
$$\bar{x} = \frac{\sum (\text{Rigidity} \cdot x)}{\sum \text{Rigidity}} = \frac{\sum (r_{ii} \cdot x)}{\sum r_{ii}} \quad (1)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum (\text{Rigidity} \cdot y)}{\sum \text{Rigidity}} = \frac{\sum (r_{ii} \cdot y)}{\sum r_{ii}} \quad (2)$$

ทั้งนี้เมื่อ	$r_{ii}$	เป็นความยาวของผนังที่ขนานกับแกน x
	$r_{ij}$	เป็นความยาวของผนังที่ขนานกับแกน y
	x	เป็นระยะห่างจากแกน x
	y	เป็นระยะห่างจากแกน y

#### ก. แรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear)

จะเป็นแรงเฉือนที่กระเจาในแนวตัวแทนที่ขนานกับทิศทางของแรงเฉือน โดยกำหนดให้การรับแรง เป็นไปตามความแกร่งในแนวนั้น ดังนั้นหากให้ค่าแรงเฉือนรวมเป็นค่า V แรงเฉือนคงในแบบผนังจะหาได้จาก



รูปที่ 5 การหาสูญเสียการความแกร่งของผัง

$$\begin{aligned}
 F_{\text{wall}} &= \frac{\text{Rigidity of Wall } 1}{\text{Total Rigidity of Wall // to V}} & [V] \\
 &= \frac{1}{\sum I_{\text{wall}}} & [V]
 \end{aligned} \tag{3}$$

หรืออาจเขียนได้ว่า

$$F_{\text{wall}} = \frac{1}{\sum I_{\text{wall}}} [V] \tag{4}$$

โดยกำหนดให้	$F_{\text{wall}}$	เป็นแรงเฉือนโดยตรงในแนวนอน
	$\frac{1}{\sum I_{\text{wall}}}$	เป็นความยาวของผนังแนวที่ $\pi$
	$I_{\text{wall}}$	เป็นความยาวของผนังที่นานกับแรง $V$
		( $\Sigma$ หมายถึง ให้รวมทุกแผงที่นานกับแรง )
	$V$	เป็นแรงเฉือนในแนวที่พิจารณา

ตัวอย่างตามที่แสดงในรูปที่ 6 แรงเฉือนโดยตรงจากแรง  $V$  จะเกิดขึ้นเฉพาะในผนังที่ 1, 3 และ 5 เท่านั้น โดยมีค่าคือ

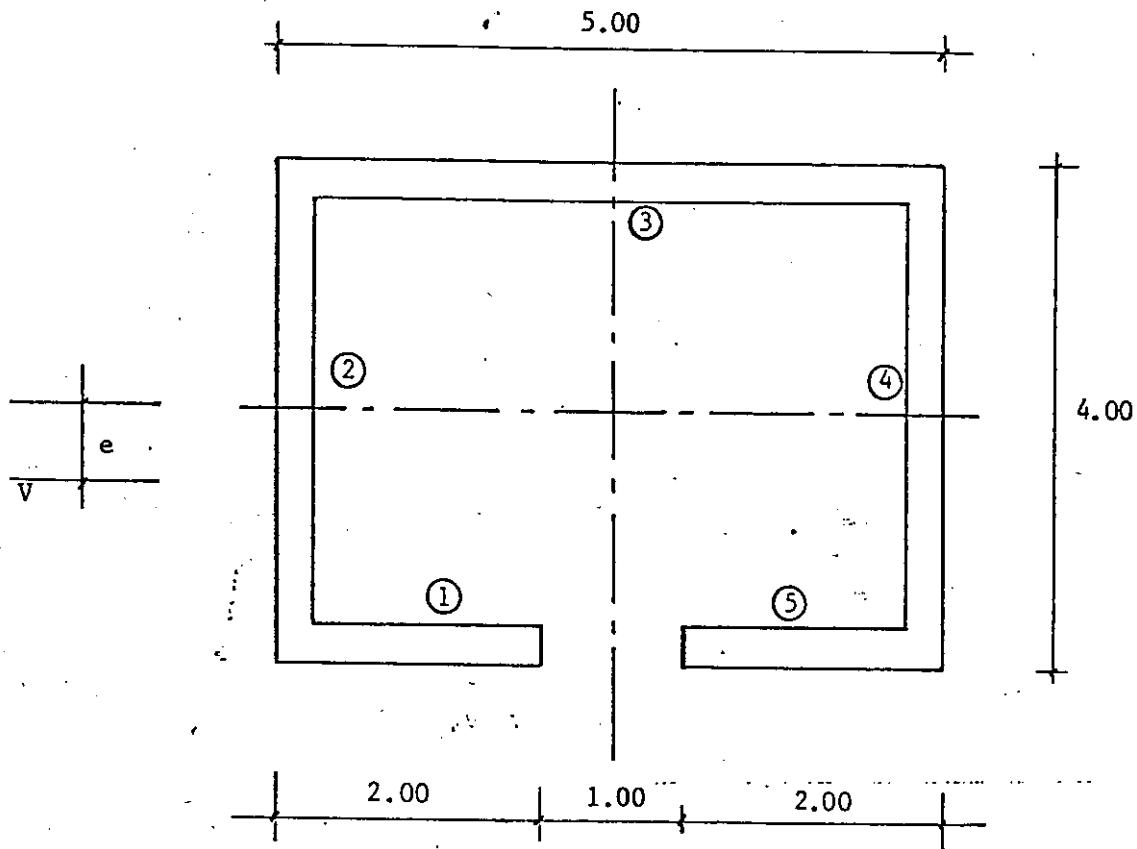
$$F_{\text{wall}} = F_{\text{wall}} = \frac{2.0}{(2.0+5.0+2.0)} \cdot V = \frac{2}{9} V$$

$$F_{\text{wall}} = \frac{5.0}{(2.0+5.0+2.0)} \cdot V = \frac{5}{9} V$$

การกระจายของแรงเฉือนโดยตรงอาจแสดงดังรูปที่ 7 โดยที่ค่าแรงเฉือนตรงในผนังที่ 2 และ ผนังที่ 4 มีค่าเป็นศูนย์

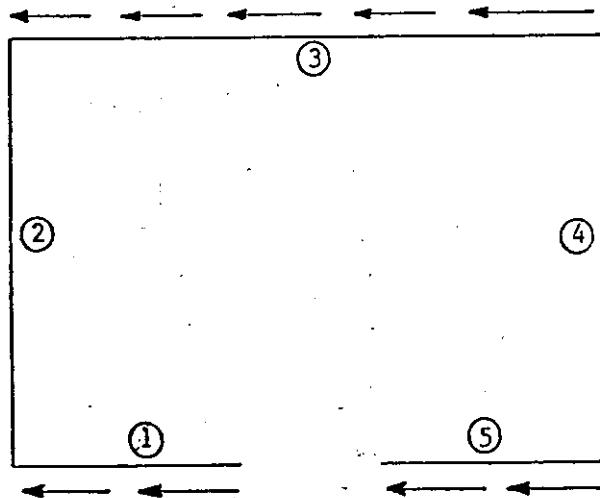
### ๓. แรงเฉือนบิด (Torsional Shear)

แรงเฉือนบิดจะเกิดขึ้นในทุกผนังที่ส่วนการถอดออกแรงด้านการบิดได้ โดยจะขึ้นอยู่กับระบบหัวใจ



รูปที่ 6 ตัวอย่างการกระชายแรงเฉือนในผนัง

$$F_{a3} = \frac{5}{9} V$$



$$F_{a1} = \frac{2}{9} V$$

$$F_{a5} = \frac{2}{9} V$$

รูปที่ 7 การกระจายแรงเฉือนโดยตรง

สูญญ์กลางความแกร่ง (CR) กับแนวแรงดังนี้แรงบิดรวม อาจเขียนได้ด้วยสมการ

$$M = \Sigma (F_{\text{arm}}) \quad (5)$$

$$= V \cdot c \quad (6)$$

แต่เพื่อให้การคำนวณเป็นไปได้ง่ายขึ้น อาจจะคิดในเหมือนของผังหนึ่งผังนั้นไว้ เช่น หากจะให้อยู่ในลักษณะของผังที่ 1 โดยกำหนดค่ากันว่าแรงเฉือนล้มพันธ์

$$f = \frac{1(\text{Unit Rigidity of Wall})(\text{arm}_1)}{1(\text{Unit Rigidity of Wall})(\text{arm}_1) + 1(\text{Unit Rigidity of Wall})(\text{arm}_2) + \dots + 1(\text{Unit Rigidity of Wall})(\text{arm}_n)} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{และ } J &= f \cdot \text{arm}_1 \\ &= f \cdot \text{arm}_1 + f \cdot \text{arm}_2 + \dots + f \cdot \text{arm}_n \end{aligned} \quad (8)$$

สมการนี้จะอยู่ในเหมือนร่วมของ  $F_u$

ดังนี้จากสมดุลย์ของแรง แรงบิดจากภายนอกเท่ากับแรงบิดต่อต้าน สมการเทียบได้ดังนี้

$$J \cdot F_u = M \quad (9)$$

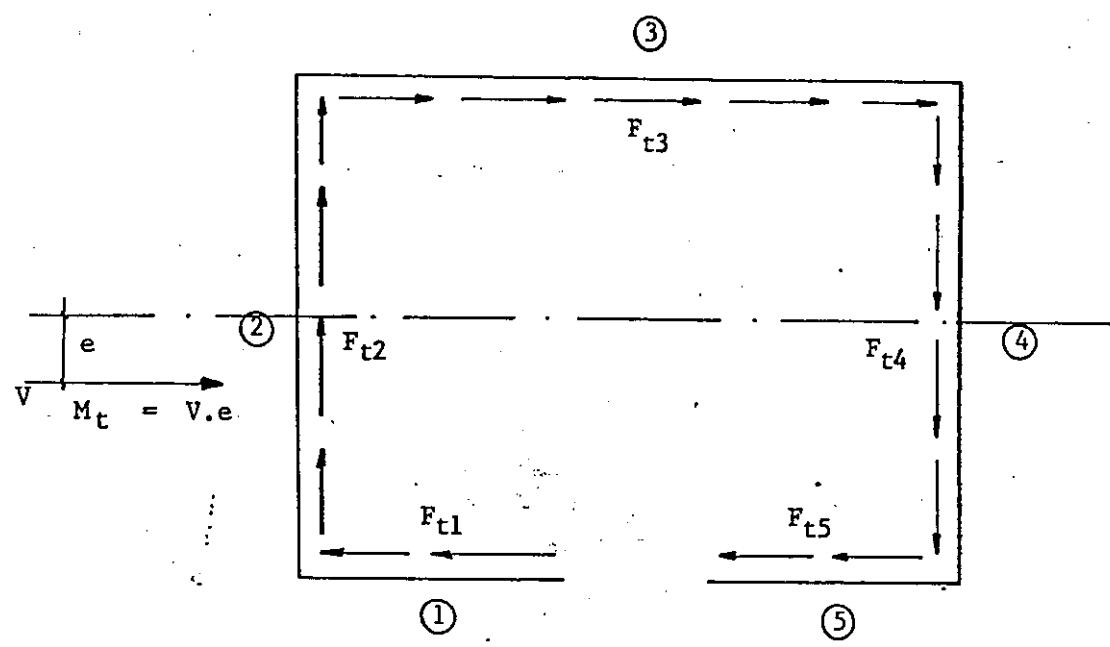
$$F_u = \frac{M}{J} \quad (10)$$

$$\text{และ } F_u = f_n \cdot F_u \quad (11)$$

ซึ่งแรงที่กระจาบในแต่ละผังคือ  $F_u$  เป็นแรงเฉือนบิดก์สมการถูกคำนวณได้ ตามตัวอย่างในรูปที่ 6 อาจเขียน การกระจาบแรงเฉือนบิดได้ตามรูปที่ 8

## ๒. แรงเฉือนรวม

การกระจาบแรงเฉือนใน (๑) และ (๒) เมื่อรวมกันจะต้องพิจารณาทวนทิศทางและครีองหมาย ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 6 จะทำให้เกิดแรงเฉือนโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ (๗) และแรงเฉือนบิดดังแสดง



รูปที่ 8 การกระจายแรงเรื่องมิติ

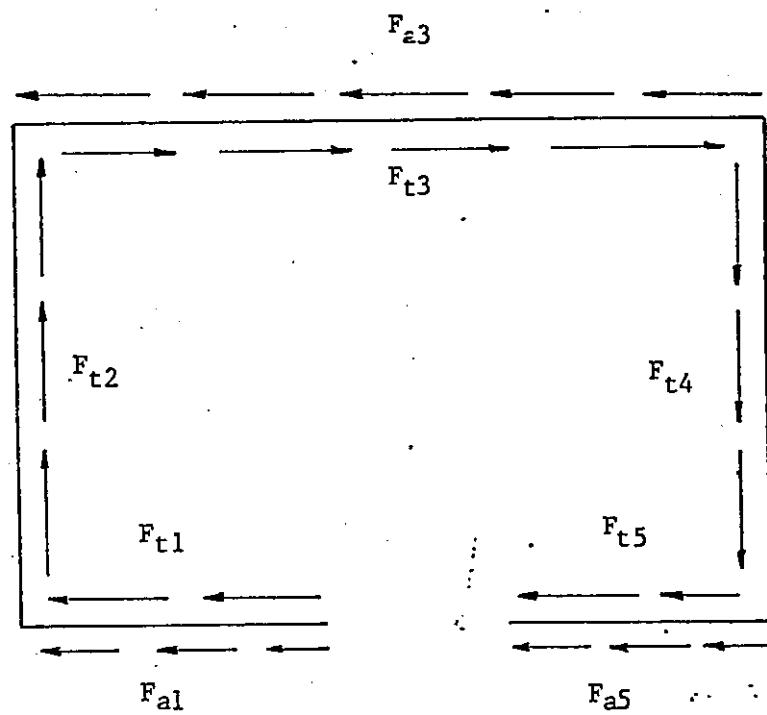
ในรูปที่ 8 ซึ่งมีอนุพัตติสทางมาพิจารณาไว้ในรูปที่ 9 จะพบว่าแรงในแต่ละผืนจะมีค่าแฟลกทิศทางตามข้อ  
แรงเดือนที่กำหนด ดังนี้จะได้แรงรวมในแน็งด้านๆ คือ

$$\begin{aligned}
 F_1 &= F_{11} + F_{12} \\
 F_2 &= F_{21} \\
 F_3 &= F_{31} + F_{32} \\
 F_4 &= F_{41} \\
 F_5 &= F_{51} + F_{52}
 \end{aligned} \tag{12}$$

อย่างไรก็ตามหากทิศทางของลมเปลี่ยนจากเดิมเป็นทิศทางกลับกัน แรงที่เกิดในแน็งจะเปลี่ยนไป  
ทาง กล่าวคือ แรงเดือนโดยตรงจะกลับทิศทางจากเดิมจากขวาไปซ้าย จะเปลี่ยนเป็นจากซ้ายไปขวาแทน ใน  
ท่านองเดียวกัน แรงเดือนโดยตรงจะเปลี่ยนเป็นทิศทางตรงกันข้ามกับเดิม จึงทำให้ผลรวมในแน็งที่ 1  
และแน็งที่ 5 ยังคงจะรวมกัน ระหว่างแรงเดือนโดยตรง และแรงเดือนบิด ในขณะที่แน็งที่ 3 จะหักล้างกัน  
แต่แน็งที่ 2 และ 4 ซึ่งไม่มีผลจากแรงเดือนโดยตรง ยังคงค่าเท่าเดิม แต่เปลี่ยนทิศทางไป

อีก หากแรงลมบีบหักกับอาคารในแนวที่垂直 ก็จะหักกับแนวเดิม พฤติกรรมการกระชายแรงภายในจะ  
เปลี่ยนไปโดยสิ้นเชิง กล่าวคือ ผนังที่ 1, 3 และ 5 จะไม่มีการต่อต้านแรงเดือนโดยตรง แต่จะต่อต้านเฉพาะ  
แรงเดือนบิดเท่านั้น ในท่านองเดียวกับผนัง 2 และ 4 จะมีหักแรงเดือนโดยตรง และแรงเดือนบิด และแรง  
เดือนรวม จะต้องพิจารณารวมกันตามทิศทางการต่อต้าน

ถ้ากันนำไปใช้ในการออกแบบ โดยเฉพาะที่เกี่ยวกับขนาดความหนาของผนัง และปริมาณเหล็กเสริม  
ในแนวนอนจะต้องบิดกีดีจากค่าสูงสุดในหลาย ๆ กรณี ที่พิจารณาคลอบคลุบๆ แนวโน้มของ  
แรงลมหรือแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ ๙ ถ้าการพิจารณาความของแรงที่กระเจียดระหว่างแรงเฉือน  
และแรงเฉือนบิด

#### 4. การออกแบบนั้งต้านแรงตัวและแรงตัว

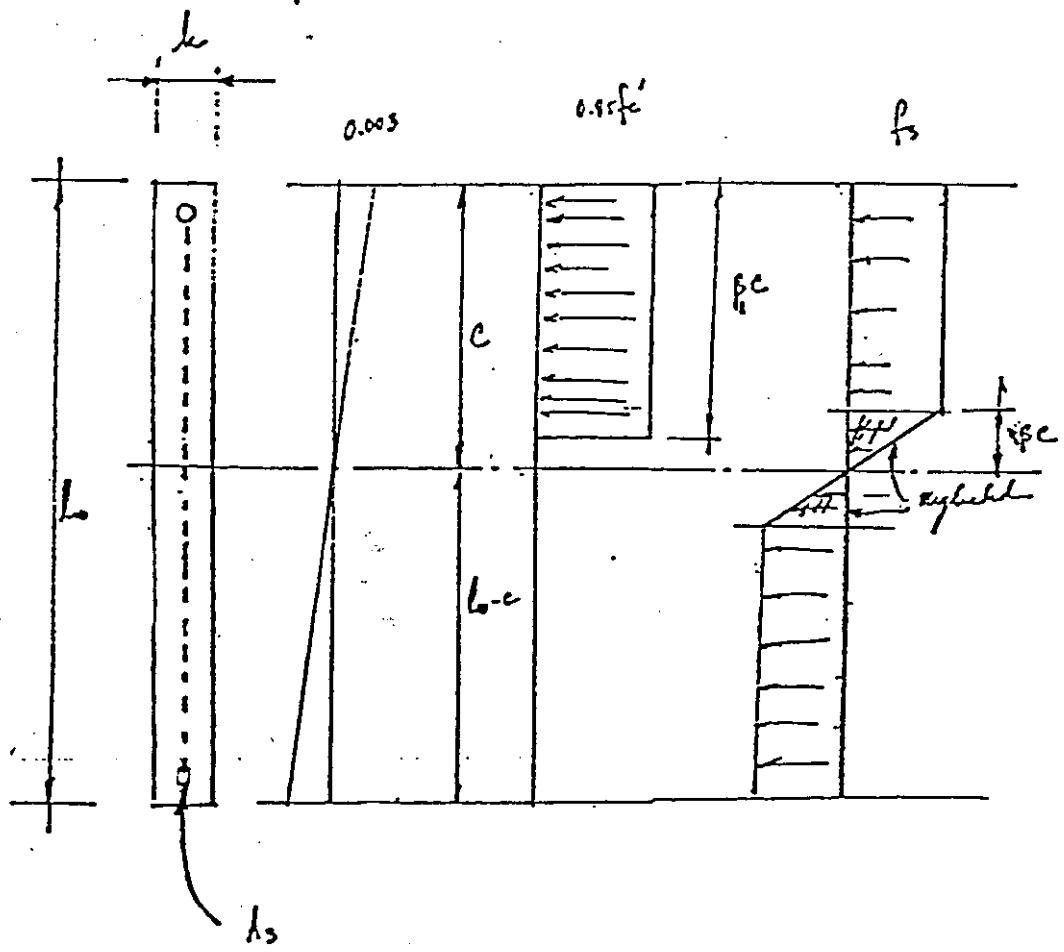
เป็นที่เข้าใจกันอย่างชัดเจนว่ามีหัวหน้าจากแรงศูนย์ต่างของโลก จะเป็นต้นต่อให้เกิดแรงในแนวตั้ง อาจจะประกอบด้วยน้ำหนักขององค์อาคาร และน้ำหนักบรรทุกจานในอาคาร ซึ่งจะถูกเข้าสู่นั้งเป็นแรงตัวในแนวแกน, N<sub>u</sub> ในขณะเดียวกันแนวอุกอือกแบบให้ต้านแรงลมหรือแรงแผ่นดินไหว ซึ่งจะเป็นแรงทางขวา อันจะส่งผลลูกมาเป็นแรงตัว, M<sub>u</sub> หรือแรงเฉือน, V<sub>u</sub>, ตั้งกล่าวมาแล้วในตอนต้น และในบางครั้งอาจจะเป็นแรงบิด T<sub>u</sub> หรือ M<sub>t</sub> ตั้งที่กล่าวมาแล้วเช่นกัน

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาเฉพาะแรงตัวกับแรงอัด ซึ่งมีผลโดยตรงต่อขนาดความหนาของผนัง และปริมาณเหล็กเสริมยืน กล่าวโดยพูดคิกรวมนั้นวับแรง แรงเฉือนทำให้หน้าที่คล้าย ๆ กับความลึก หากแต่ความหนา ความยาว และความสูง หรือขนาดรูป่าง จะต้องจัดให้เป็นองค์อาคารรับแรงเฉือนได้โดยปราศจากปัญหาทางเสถียรภาพ เช่น Lateral buckling หรือ Torsional lateral buckling เป็นต้น เพื่อให้การออกแบบเป็นไปได้ง่าย อาจสมมุติหน้าตัดให้เป็นรูปสี่เหลี่ยม (เป็นแรงหรือเป็นแรงเฉพะด้านที่รับแรงเฉือน) บางครั้งพิจารณาเป็นกล่อง (Box section) หรือรูปตัวซี รูปตัวไอ (C-section or I-section) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการจัดและวางตำแหน่งให้สอดคล้องกับการรับแรง ควบคู่กับการใช้สอยทางสถาปัตยกรรมด้วย

เพื่อให้เป็นกรณีตามความเข้าใจถึงพฤติกรรมการรับแรงของผนัง จึงอาจพิจารณาหน้าตัดดังที่แสดงในรูปที่ 10 กล่าวคือให้ความหนา คือความยาวของผนัง l<sub>w</sub> และให้ความสูงระหว่างจุดรองรับ l<sub>c</sub> หากกำหนดให้เหล็กเสริมตามแนวอนุวารเรียงอย่างสม่ำเสมอ โดยปริมาณเหล็กเสริมรวม = A<sub>s</sub> ตั้งนั้นเมื่อได้รับแรงตัวและแรงอัดร่วมกันจะมีพฤติกรรมดังแสดงในรูป ภายใต้สภาวะกำลังประจำ ความเครียดของผนัง ด้านรับแรงอัดจะถึงพิกัด  $\epsilon_{cu} = 0.003$  ส่วนความเครียดของผนังด้านรับแรงดึงอาจจะเกิดจุดคลากของเหล็กเสริมได้ หากจะพิจารณาที่ภาวะสมดุลย์ แรงภายในการแยกแจ้งได้คือ

แรงตัวในคอนกรีตหนึ่งยกนะกัน c เป็นระยะ a =  $\beta_1 c$  ซึ่งเป็นสมการรับแรงอัด

$$c = 0.85\beta_1 c \cdot \beta_1 c \cdot h \quad (13)$$



หน้าตัก ความเคี่ยค หน่วยแรง  
ในคอนกรีต หน่วยแรง  
ในเหล็กเสริม

รูปที่ 10 แรงภายในของผนัง

โดยที่	C	เป็นแรงอัดส่วนที่ค่อนกรีทแบบกับ
	fc'	กำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน
	$\beta_1$	ตัวคูณตามกำลังของคอนกรีต (Conc. มีรากเขียนบ่อ)
	c	ระยะจากยกน้ำหนักเม็ดผิวบันแรงอัด
	h	ความกางของแผ่น

แรงอัดในเหล็กเสริม จะพิจารณาเฉพาะที่มีความเครียดถึงจุดคลาก โดยให้รับจากยกน้ำหนัก  $\beta_1$  แรกที่มีความเครียดถึงจุดคลาก ,  $\epsilon_y$  เป็นระยะ  $B_c$  โดยที่  $\beta$  เป็นตัวคูณกับระยะ c ในส่วนที่ความเครียด ถูกกว่า  $\epsilon_y$  จะไม่พิจารณากำลังรับแรงตัดหรือแรงอัดในหน้าตัด (แสดงในรูป) ดังนั้นแรงอัดในเหล็กเสริม จะประกอบด้วย

$$C = \rho_n h(c - c).fy \quad (14)$$

โดยที่	C	เป็นแรงอัดส่วนที่เหล็กเสริมแบบกับ
	h	ความกางของหน้าตัดแผ่น
	$c - B_c$	ความยาวของแผ่นที่เหล็กกับแรงอัด
	$\rho_n$	ปริมาณเหล็กเสริมต่อหน่วยพื้นที่ในแนวนอน = $\frac{A_s}{h.w}$
	fy	กำลังคลากของเหล็กเสริม
	$\beta$	$\frac{\epsilon_y}{0.003} \sim \frac{fy}{6000}$

แรงดึงในเหล็กเสริม จะพิจารณาเฉพาะเหล็กที่มีการยึดตัวที่มีความเครียดเกินจุดคลาก จากรูปที่ 9 จะพบว่า เป็นส่วนที่ห่างจากยกน้ำหนัก  $B_c$  พื้นที่รับแรงดึงของแผ่นจะเหลือเท่ากับ  $b(lw - c - B_c)$  ดังนั้นแรงดึงรวมจะ มีค่า

$$T = \rho_n . b(lw - c - B_c).fy \quad (15)$$

โดยที่	T	เป็นแรงดึงส่วนที่เหล็กเสริมรับ
	$\rho_n$	ปริมาณเหล็กเสริมต่อหน่วยพื้นที่

$Iw \cdot c \cdot \beta c$	ความยาวของบานหนันรับแรงดึง
$h$	ความหนาของหน้าตัดหนัน
$f_y$	กำลังคลากของเหล็กเสริม
$\beta$	พื้นที่คุณ $\sim \frac{f_y}{0.003} \sim \frac{f_y}{6000}$

ภายใต้ความสมดุลของแรง แรงภายในประกอบด้วย  $C_c$ ,  $C_s$ , และ  $T_s$  ในขณะที่แรงภายนอกประกอบด้วย  $N_u$  และ  $M_u$  ซึ่งในที่สุดจะได้สมการกำลังตัดและกำลังอัด คือ

$$M_u = As.f_y.l_w [(1 + \frac{N_u}{As.f_y})(\frac{1}{2} - \frac{c}{2l_w}) - \frac{c^2}{l_w^2}(1 + \frac{\beta^2}{3}\beta_1)] \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} \\ \frac{c}{l_w} &= \frac{q + \alpha}{0.85\beta_1 + 2q} \\ q &= \frac{As.f_y}{l_w.h.fc'} \\ \alpha &= \frac{N_u}{l_w.h.fc'} \\ \beta &= \frac{f_y}{6000} \end{aligned}$$

แต่เนื่องจาก  $\beta_1$  มีค่าใกล้เคียง 1.0 และ  $c/l$  มีค่าน้อย เมื่อยกกำลังสองค่าบวกจะน้อยลงไปอีก หัวข้อลังจึงอาจตัดทิ้งได้ สมการกำลังโดยประมาณอาจเขียนได้คือ

$$M_u \sim \frac{As.f_y.l_w}{2} (1 + \frac{N_u}{As.f_y})(1 - \frac{c}{l_w}) \quad (17)$$

สมการที่ 17 สามารถใช้คำนวณหาปริมาณเหล็กเสริมได้โดยง่าย ทั้งนี้โดยที่ข้อกำหนดเบื้องต้นคือความหนา  $h$  ความกว้าง  $l_w$  และความสูง  $l_c$  จะต้องได้รับการตรวจสอบให้ผ่านตาม ACI-318-89 ว่าตัวยعنั้นในบทที่ 14 โดยการตรวจสอบจาก Empirical Design Method

$$\theta P_{ew} = 0.55 \theta f_c A_g [1 - (\frac{k_l c}{32h})^2] \quad (18)$$

เมื่อ	$\phi P_{tw}$	เป็น係数ออกแบบของแรงอัดอย่างเดียว
	Ag	พื้นที่หน้าตัด
	lc	ความสูงของผนัง (ระหว่างดูรองรับ)
	h	ความหนาของผนัง
	$\theta$	ตัวคูณกำลัง = 0.70

การออกแบบเหล็กเสริมในแนวขวาง เมื่อพิจารณาเหล็กเสริมน้อยสุดจะต้องให้คลุมตาม ACI-318-89

#### SECT. 14.3 คือ

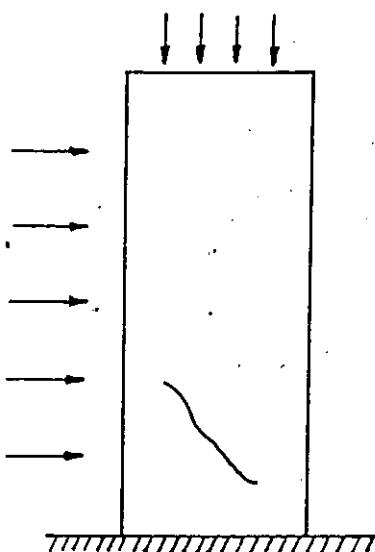
$\rho_s(\text{mm})$	=	0.0012	สำหรับเหล็กข้ออ้อย SD-30, SD-40
	=	0.0015	สำหรับเหล็กข้ออ้อยอื่น ๆ
	=	0.0012	สำหรับเหล็กตะแกรงเชื่อมสำเร็จ (WWF)
S	≠	3h or 45 ซม.	

#### 5. การออกแบบบันไดรั้งเฉือน

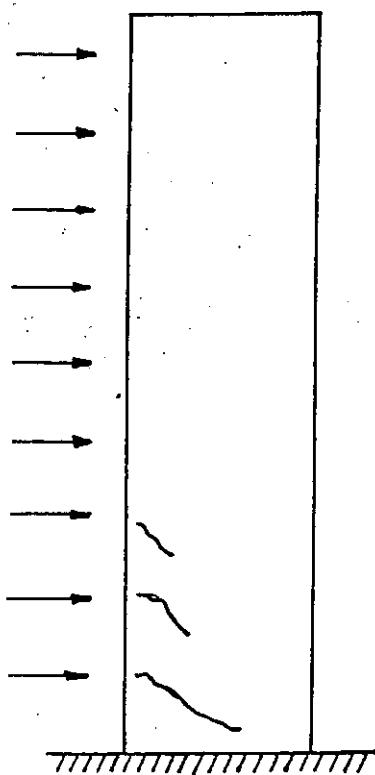
จากที่ได้เคยกล่าวแล้วในตอนต้นว่ากำแพงรั้งเฉือนจะมีพฤติกรรมคล้ายกระแทกตัวของผนัง ผนังเคลื่อนไหวที่แสดงในรูปที่ 11 มีความสูงน้อย ทำให้มีพฤติกรรมของแรงเฉือนเด่นชัด และเกิดรอยแตกร้าวในแนวหะย่างจากผลของแรงดึง โดยที่ไปคลุมบริเวณดึงหะย่างได้สูงสุดประมาณ  $1.1 \sqrt{fc}$  แต่ในกรณีของผนังในรูปที่ 12 มีความสูงมากทำให้เกิดพฤติกรรมร่วมระหว่างแรงดึงและแรงเฉือนร้อย แตกร้าวอาจจะเริ่มต้นจากแรงดึงก่อน แล้วจึงมีผลของแรงดึงหะย่างเข้ามาสนิมร่องภายในหลัง รอยแตกร้าวจะปรากฏที่จุดซึ่งมีแรงดึง แรงเฉือนสูงที่สุด ซึ่งค่าแรงดึงหะย่างสูงสุดที่ค่อนกรีดจะรับได้ถึง  $1.6 \sqrt{fc}$

การออกแบบบันไดรั้งเฉือนในแนวขวางต้องพิจารณาทั้ง 2 กรณี ซึ่งนอกจากจะถูกควบคุมด้วยความสูงและความยาวของผนังแล้ว ยังขึ้นอยู่กับขนาดของแรงเฉือนแรงดึง และแรงดึง แรงเฉือนในแนวขวางพิจารณาตามขั้นตอนคือ

Nu



รูปที่ 11 แรงเฉือนล้วน (Pure Shear)



รูปที่ 12 แรงเฉือนตื้น (Flexural Shear)

### แรงเฉือนล้าน

$$V_c = \frac{0.90\sqrt{f_c} \cdot h \cdot d}{500Ag} + \underline{N_u} \quad (19)$$

### แรงเฉือนตัด

$$V_c = \frac{(0.16\sqrt{f_c} + \frac{700V_{ud}}{Mu}) \cdot h \cdot d}{Mu} \quad (20)$$

ทั้งนี้เมื่อ  $V_c$  เป็นค่าแรงเฉือนที่หน้าตัดคอนกรีตรับได้ให้พิจารณาจากค่าต่ำกว่าจากสมการที่ 19 หรือ 20 แต่ในกรณีใด ๆ ก็ตาม ค่า  $V_c$  ไม่ควรน้อยกว่าค่าที่กำหนดต่อไปนี้

เมื่อ  $N_u$  เป็นแรงอัด (ค่า  $N_u$  เป็นมาก)

$$V_c \geq 0.53\sqrt{f_c} \cdot h \cdot d \quad (21)$$

เมื่อ  $N_u$  เป็นแรงดึง (ค่า  $N_u$  เป็นเล็ก)

$$V_c \geq 0.53(1 + \frac{N_u}{500Ag})\sqrt{f_c} \cdot h \cdot d \quad (22)$$

แต่จะเดียวกัน ค่า  $V_c$  ไม่ควรจะเกิน

$$V_c \leq 1.3\sqrt{f_c} \cdot h \cdot d \quad (23)$$

$d$  เป็นความสูงประสีห์ผลของหน้าตัด ~ 0.8 l\_w

$N_u$  แรงดึงหรือแรงอัดในหน้าตัดผนัง

$Ag$  หน้าตัดรวมของผนัง ~ h.l\_w

$V_{ud}$  แรงเฉือนบนหน้าตัด (คุณตัวคุณน้ำหนักแล้ว)

$Mu$  แรงดึงบนหน้าตัด (คุณตัวคุณน้ำหนักแล้ว)

ในการออกแบบผนังรับแรงเฉือน  $V_u$  ในหลักการจะให้คอนกรีตแบ่งรับไปส่วนหนึ่ง  $V_c$  ตามค่าในสมการ

19 หรือ 20 ครั้งส่วนตัวค่าค่าสูดคัวสมการที่ 21 หรือ 22 และค่าสูงสุดตาม สมการที่ 23 ส่วนที่เหลือจะให้เหล็กเสริมทางรากเป็นส่วนรับไป ในการคำนวณอาจใช้ตามสมการที่ 24-25

$$V_s = \frac{V_u - V_c}{\phi} \quad (24)$$

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{S} \quad (25)$$

โดยที่	$V_s$	เป็นแรงเฉือนที่แบ่งกับด้วยเหล็กเสริม
	$A_v$	พื้นที่หัวน้าตัดของเหล็กตามแนวโน้มต่อข้อ
	$d$	ความลึกประสีทิผลของคาน $\sim 0.8 l_w$ ของผนัง
	$S$	ระยะห่างของเหล็กเสริมนอน

แรงเฉือนที่เหล็กเสริมไม่ควรจะเกิน 4 เท่าของ  $V_c$  และอาจจะต้องพิจารณาถึงขนาดของเหล็กและการเรียบเหล็กประกอบอีกด้วย เหล็กเสริมในแนวนอน ตาม ACI-318-89 Sect. 14.3 จะดูความคุ้มไว้ดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \rho_h &= 0.0020 && \text{สำหรับเหล็กข้ออ้อย SD30, SD-40} \\ &= 0.0025 && \text{สำหรับเหล็กข้ออ้อย ชนิดอื่น ๆ} \\ &= 0.0020 && \text{สำหรับเหล็กตะแกรงเชื่อมสำเร็จ (WWF)} \\ S &= 3b \text{ หรือ } 45 \text{ ซม.} \end{aligned}$$

## 6. การนิพิเศษของผนังด้านแรงเฉือน

ผนังด้านแรงเฉือนไม่ได้ทำหน้าที่เพียงเฉพาะการรับแรงเฉือนเพียงอย่างเดียว หากแต่ยังรับแรงดึงจากแรงในแนวนอน และแรงอัด จากน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่ง แต่การจะออกแบบให้ผนังรับแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ได้จะต้องพิจารณาอย่างละเอียด ในหลายประเด็นดังนี้

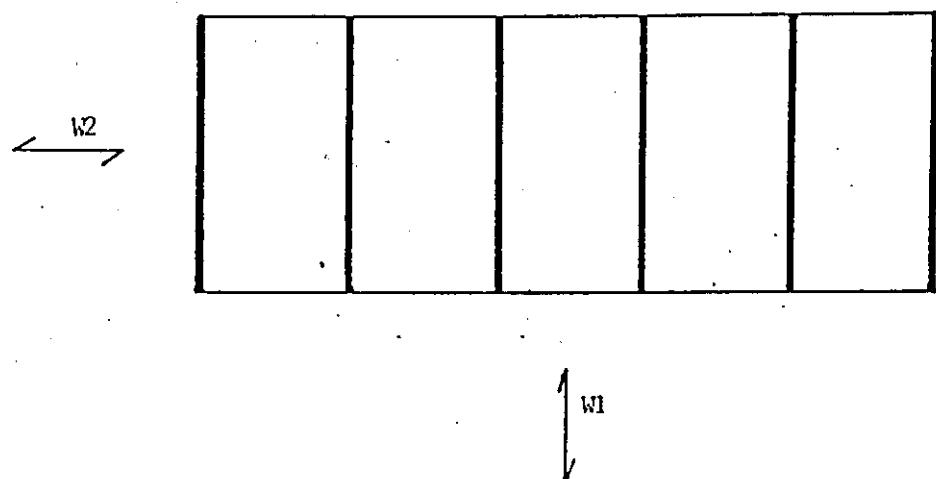
## 6.1 ผนังเรียงແດງ (Stagger Shearwall)

ตามปกติผนังจะรับแรงเฉือนได้ตามแนวผนังแต่จะรับแรงเฉือนไม่ได้เลยในแนวตั้งจากกันผนังดังนั้นการออกแบบจะจัดโครงสร้างเป็นระนาบ (plane) ดังตัวอย่างในรูปที่ 13 การรับแรงในแนว W1 จะให้กำลังต่อต้านได้ดี แต่หากแรงเกิดขึ้นในแนว W2 จะทำให้การรับแรงมีจุดอ่อนตามความบางของอาคาร การออกแบบต้านแรงในแนว W1 แล้วจะหักดิ่งต้องตรวจสอบแรงในแนว W2 ด้วย โดยให้ความสำคัญเท่าเทียมกัน หากต้าน W2 รับแรงได้ไม่มีประสิทธิผล อาจจะต้องจัดผนังเพิ่มเติมเพื่อให้ต่อต้านแรงคงได้ดังตัวอย่างในรูปที่ 14

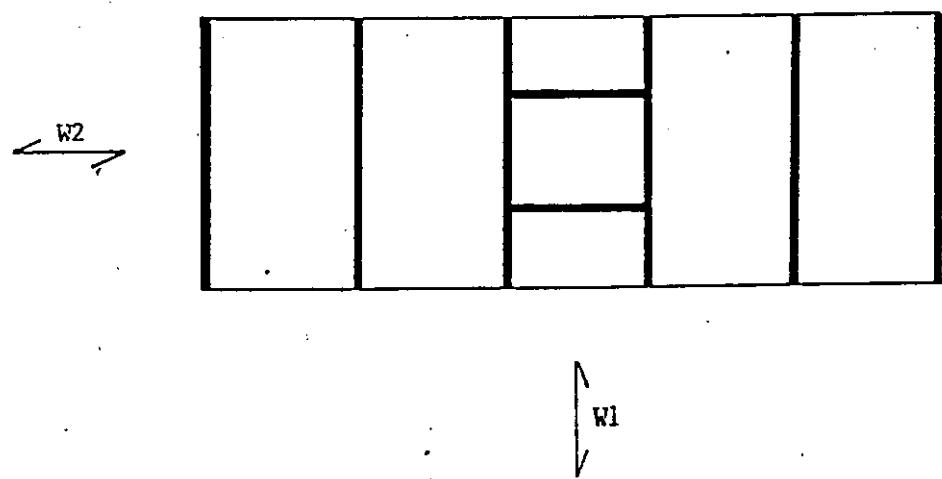
## 6.2 ผนังคู่ (Couple Shearwall)

ในบางกรณีของการออกแบบจะต้องจัดผนังแยกออกจากกันเป็นผนังคู่ เพื่อประโยชน์ทางสถาปัตยกรรม การตัดช่องกลางหรือการแยกผนังออกจากกัน จะทำให้ Stiffness ของผนังลดลงอย่างมาก กลั้งต้านแรงเฉือนจะลดลงอย่างมหาศาล อิกทึ้งการยื่นตัวจะเหมือนขึ้นเป็นหลายเท่า ดังตัวอย่างที่แจ้งจะให้เห็นในรูปที่ 15 การเขียนต่อระหว่างผนังคู่อาจทำได้หลายกรณี ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 16 ตัวอย่างเช่น การเขียนต่อด้วยแผ่นพื้น ผนังทึ้งคู่จะตัดตัวได้อย่างอิสระ แต่จะต้องเคลื่อนตัวไปด้วยกัน ดังรูป ก. ในลักษณะ เช่นนี้จะทำให้การยื่นตัวของอาคารจะสูงเปรียบเทียบได้ใกล้เคียงกับกรณีที่ผนัง 2 แผงแยกกัน แต่ในกรณีดังรูป ง. ผนังทึ้งสองเขื่อมต่อด้วยผนังมีการเจาะช่องเพียงเล็กน้อย ยังนี้จะให้ Stiffness สูง กล่าวคือ ผนังที่เขื่อมต่อจะทำให้ผนังคู่ทำงานแม่นยำผนังเป็นแผงเดียว แต่ความบางเท่ากัน 2 ผนัง จึงทำให้ Stiffness เกินกว่า 8 เท่าของแผงเดียว ส่วนในกรณี ข. เมื่อการเขียนต่อด้วยคอนกรีตและกรณี ค. เมื่อการเขียนต่อถาวรคลาสิก ซึ่งทั้งคู่จะมีพฤติกรรมกึ่งระหว่างกรณี ก. และ ง.

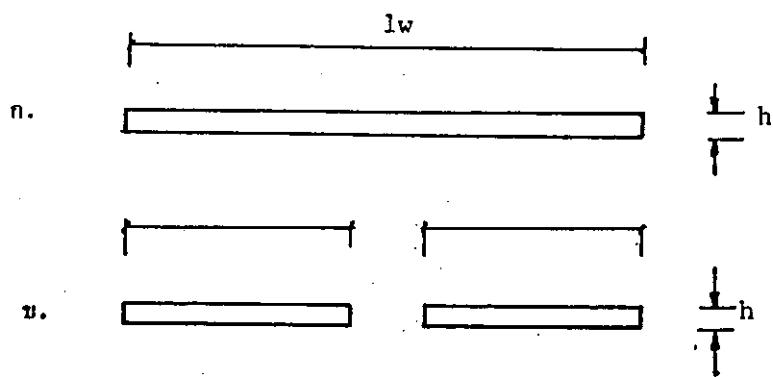
อย่างไรก็ตามในการออกแบบគิริยาการเขียนต่อระหว่างผนังคู่จะวิกฤติ เพราะมีแรงตัดและแรงเฉือนสูงมากที่สุดเขื่อมต่อบริเวณขอบผนังกับคานเขื่อม การวิเคราะห์บางครั้งอาจจะต้องตรวจสอบด้วยวิธีการของเคราะห์ Finite Element ประกอบ การคำนวณจะอึดเหล็กเสริมจะต้องให้คลอบคลุมถึงกรณีที่พิสูจน์ของแรงเปลี่ยนแปลงหรือกลับกัน ขนาดของคานเขื่อมโดยทั่วไปจะถูกควบคุมด้วยการยื่นตัวของอาคาร หากมีความลึกพอควรคานเขื่อมอาจใช้รายละเอียดเหล็กเสริมตั้งแสดงในรูปที่ 17 เพื่อรับ แรงตัด แรงเฉือน และแรงกลับพิศ (แรงลมหรือแผ่นดินไหว) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



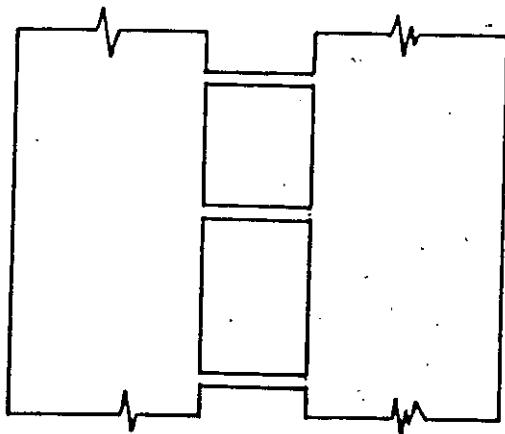
รูปที่ 13 การจัดผังในระนาบตั้งจากกันอาคาร



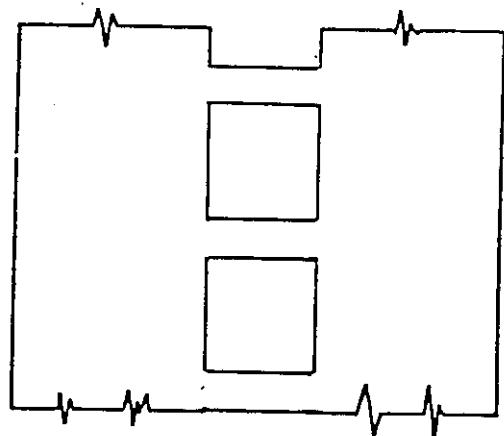
รูปที่ 14 การจัดผังด้านแรงดันทางนานกันอาคาร



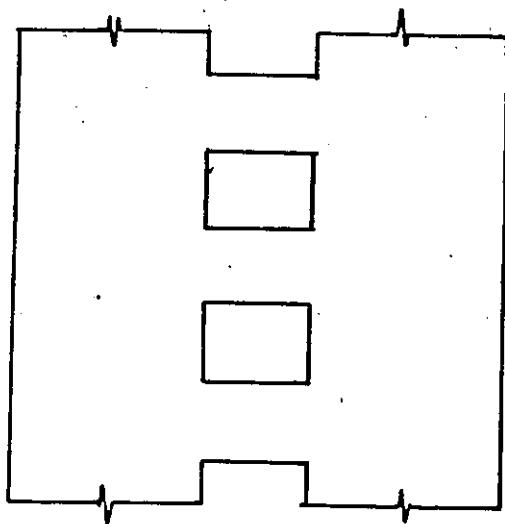
รูปที่ 15 ผลกรากบทคือกำลังของหนังเยื่อไม้ค่อเนื่อง



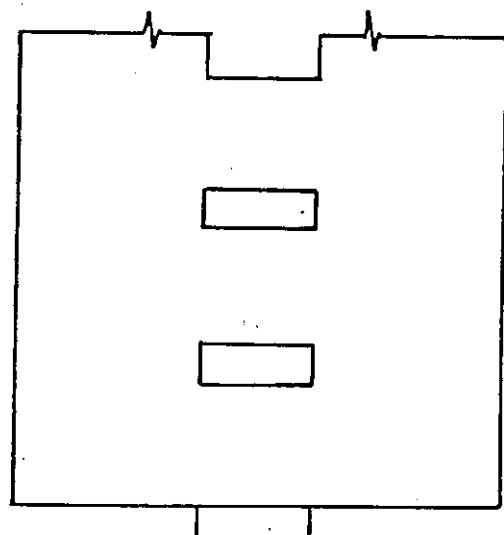
ก. พื้นเรือน



ข. คานเรือน

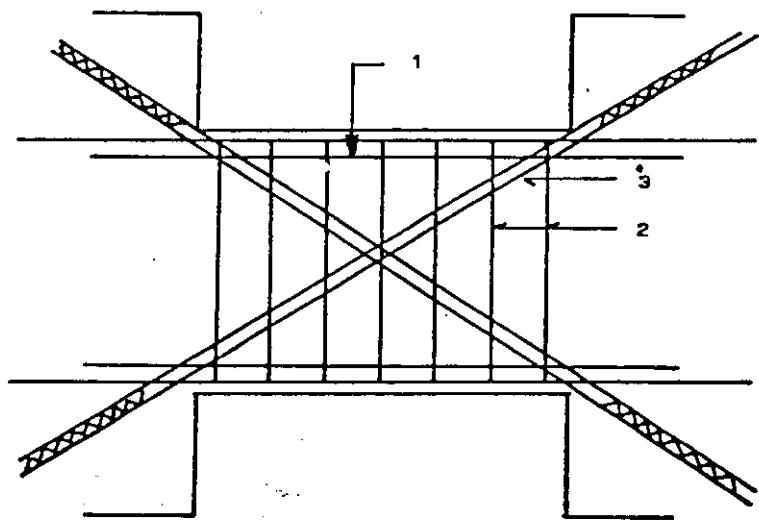


ก. ภารถิกเรือน



ข. หนังเจาะช่อง

รูปที่ 16 การเชื่อมคอกำลังรับแรงเฉือน



รูปที่ 17 รายละเอียดเหล็กเสริมความเชื่อมนังค์

### 6.3 ผนังรับแรงเฉือนทางจัตุรัสหนา (Anti-Symmetrical Shearwall)

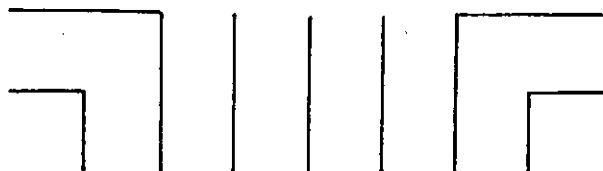
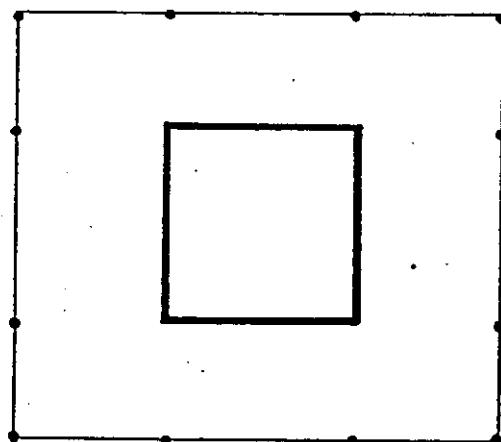
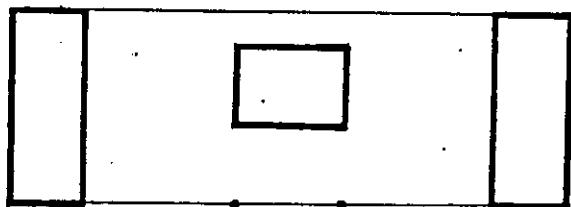
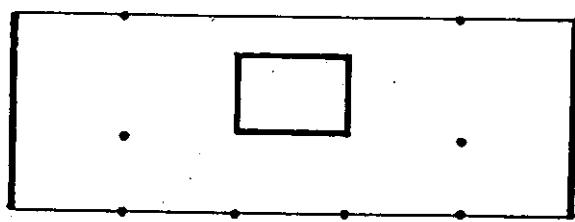
ผนังรับแรงเฉือนทางจัตุรัสหนาให้เกิดสภาพ ไร้สมมาตรแล้วแรงที่กระทำจะทำให้เกิดแรงบิดหันในตัวผนังและต่ออาคาร การวิเคราะห์และออกแบบอาจทำได้ตามที่กล่าวแล้วในหัวข้อที่ (3) แต่ในการดึงของอาคารสูง การจัดตั้งหนาของผนังรับแรงเฉือนควรจะให้เกิดความสมมาตรมากที่สุดเพื่อให้มีประสิทธิภาพการรับแรงได้ดี ตัวอย่างการเรียนผนังรับแรงเฉือนให้เกิดความสมมาตรในการรับแรงได้แสดงในรูปที่ 18

หากจำเป็นจะต้องให้มีการเยื่องศูนย์หรือไร้สมมาตร การวิเคราะห์โครงสร้างควรจะต้องทำใน 3 มิติ ประกอบด้วยเสนอเพื่อให้รู้ถึงลักษณะการบิดตัว และการแยกตัวของอาคาร แล้วจึงนำไปใช้ตรวจสอบพิสดารต่าง ๆ และเพื่อการออกแบบบรรยายต่อและภาระครึ่งต่าง ๆ ผลกระทบของกรอบบิดตัวหรือการแยกตัวที่ไม่เท่ากัน บางครั้งก่อให้เกิดปัญหาอย่างมาก many ทั้งในล่วนที่เกี่ยวกับทางวิศวกรรมโครงสร้าง และทางสถาปัตยกรรม

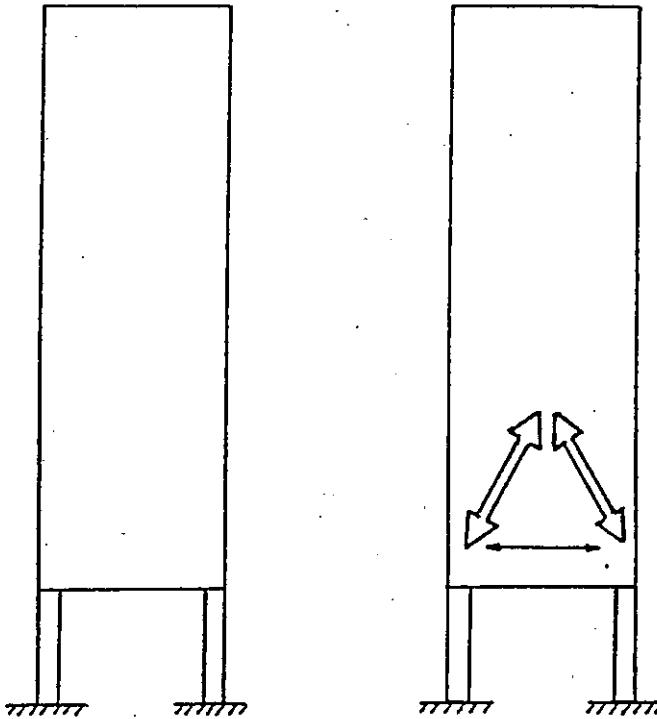
### 6.4 ผนังวางบนเฟรม 2 ขา

ข้อจำกัดเกี่ยวกับพื้นที่ใช้สอยของอาคารบางครั้งมีผลต่อการจัดระบบโครงสร้างให้เท่ากัน ขั้นบนเป็นโครงสร้างหรือหอพัก แต่ขั้นล่างเป็นที่จอดรถหรือใช้งานอย่างอื่นที่เปิดโล่งไม่มีกันหลัง หากใช้ระบบโครงสร้างผนังรับแรง จึงอาจจะต้องเปลี่ยนหน้าตัดจากผนังมาเป็นเฟรม 2 ขา ซึ่งค่านะเมีย Stiffness สูงมาก ดังนี้แรง Uniform load จากขั้นบน ๆ จะพยายามจะถ่ายเข้าเสาหัน 2 ขา ในบริเวณขั้นล่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 19 ความเครียดและหน่วยแรงบริเวณหัวเสาจะวิกฤติ หากตั้งสมมุติฐานให้การรับแรงท่านูน  $45^{\circ}$  ที่หัวเสาจะทำหน้าที่เสมือน Tie ค่อนกรีตเสริมเหล็กรับแรงตัว จึงต้องตรวจสอบกำลังการรับแรงอัตราของผนังในโซนนี้ด้วย โดยพิจารณาหน้าตัดประสิทธิผลตัวบุน  $45^{\circ}$  ในขณะเดียวกันส่วนล่างสุดของผนังจะทำหน้าที่เสมือน Tie ซึ่งรับแรงดึง ซึ่งจะต้องออกแบบให้เหล็กเสริมรับน้ำหนักจากพื้นอาคารที่อยู่ในโซน  $45^{\circ}$  นี้จะกระจายให้ขับล่างแบบรับน้ำหนักเสมือนคานล็อก

อนึ่ง เสาหัน 2 ขาจะต้องมีหน้าตัดให้พอเพียงในการรับแรงเฉือน แรงตัว และแรงอัตราได้อย่างสมบูรณ์ พฤติกรรมการรับแรงเฉือนทางราบ รอบต่อรอบกว่าผนังกับเสาหัน 2 ขา จะเป็นจุดวิกฤติ การก่อสร้างจะต้องให้ความสนใจเป็นพิเศษเพื่อรายละเอียดแน่นมาก หากควบคุมได้ไม่ถูกจะส่งผลเสียต่อโครงสร้างได้



รูปที่ 18 ผังรับแรงเฉือนที่สมมาตร



ก. ลักษณะผังรับแรงบนเพรน 2 ชั้น

ข. การกระจายแรงบริเวณทัวเสา

รูปที่ 19 ผังรับแรงเฉือนวางบนเพรน 2 ชั้น

## 6.5 ผนังวางบนเพร์ม

ในอาคารสูงโดยเฉพาะที่ออกแบบเพื่อรองรับการใช้สัญญาณประปา มักจะมีปุ่มห้าเกียวกับการจัดระบบโครงสร้าง ระบบที่มีผนังรับแรงเฉือนเพื่อตัวลงบนเพร์ม ตั้งแสดงในรูปที่ 20 ควรจะหลีกเลี่ยง ทั้งนี้เพราะจุดที่เปลี่ยน *RF mess* ของผนังไปสู่ระบบเพร์มที่มี *RF mess* น้อยกว่ามากจึงควรถูกต้องในแบบของกำลังและการอยู่ตัว และให้สมรรถนะการต้านแรงลมและแรงจากแผ่นดินไหวได้น้อย บริเวณรอยเชื่อมต่ออาจเกิดรอยแตกร้าวได้

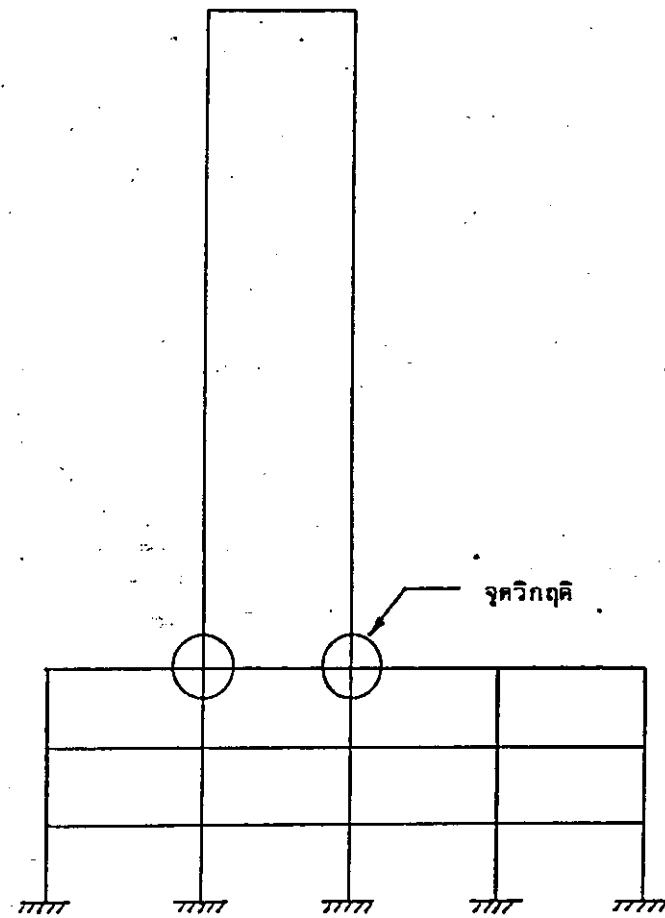
ผนังของอาคารสูงหากเชื่อมต่อกับเพร์มในส่วนของอาคารตัว หากก่อสร้างไปพร้อม ๆ กัน บังจะมีผลในเบรนของ การหดตัวไม่เท่ากัน และหากพิจารณาอย่างต่อท่อสร้าง (*Coatscrews joint*) จะเพิ่มจุดอ่อนให้กับโครงสร้าง อย่างไรก็ตามในการผนังนี้คำแนะนำและสังเขปการถ่ายแรงกันตาม *RF mess* การออกแบบจะต้องตรวจสอบการอยู่ตัวและการโยงผนังที่ปลาย ในขณะที่เสาะหาต้องออกแบบให้รับแรงได้ทุกอย่างและควบคุมการอยู่ตัวให้อยู่ในพิกัดที่กำหนด

## 7. บทสรุป

ผนังรับแรงเฉือนจะมีอานุภาพมากในการต่อต้านแรงเฉือน ส่วนรับอาคารสูงปานกลางคือประมาณ 30-40 ชั้น จะสามารถควบคุมพฤติกรรมทางโครงสร้างเกียวกับการอยู่ตัวให้อยู่ในพิกัดได้จาก พฤติกรรมร่วมระหว่างผนังรับแรงเฉือนกับเพร์มระบบโครงสร้างจะสามารถจัดให้มีประสิทธิภาพสูงและประหยัดค่าก่อสร้างได้อย่างมาก

ขนาด จำนวน และตำแหน่ง ของผนังรับแรงเฉือน จะถูกควบคุมด้วยความสูง ตำแหน่งที่ตั้ง และการใช้สอยพื้นที่ของอาคาร การจัดระบบผนังรับแรงเฉือนควรจะให้สมมาตรกับแนวแรงและมีประสิทธิผลต่อการต้านแรง หากสามารถจัดให้ต่อเนื่องจากตอม่อถังของอาคารได้ จะส่งผลประหยัดและให้ประสิทธิภาพสูงสุด แต่หากเป็นอย่างอื่น เช่น วางแผนเพร์ม เจาะช่อง หรือถูกแยกเป็นผนังคู่ จะต้องจัด และวิเคราะห์ให้สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงอย่างครบท้วน

การออกแบบผนังรับแรงเฉือนในอาคารสูง ได้เสนอแนะวิธีการกำลังประดับเพื่อการออกแบบ การตรวจสอบขนาด และความหนาที่เหมาะสมของการกระจายแรงในผนังแต่ละส่วน การออกแบบต้านแรงด้วย



รูปที่ 20 ผังวางบนเฝรน

และการออกแบบต้านแรงเฉือน

8. เอกสารอ้างอิง

- 1) Park, R., Paulay T., "Reinforced Concrete Structures", Chapter 12 Shearwall of Multistory Buildings, John-Wiley & Sons; New York, 1975.
- 2) Gardenas, A.E., Hanson, J.M., Corley, W.G. and Hognestad, E. "Design Provision for Shear Wall", Journal ACI, Vol 70 No. 3, Mar. 1973.
- 3) PCA "Design of Combined Frames and Shear Wall", Advanced Engineering Bulletin No. 14, Portland Cement Association, Skokie, Ill. 1965.
- 4) Rosman, R., "Approximate Analysis of Shear Wall Subjected to Lateral Loads", Journal ACI, Vol.61, June 1964.