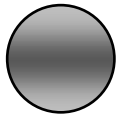
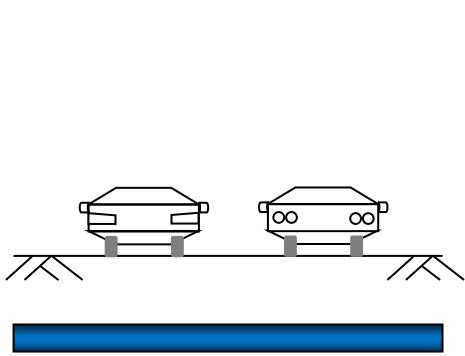


# Building Damage

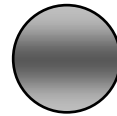
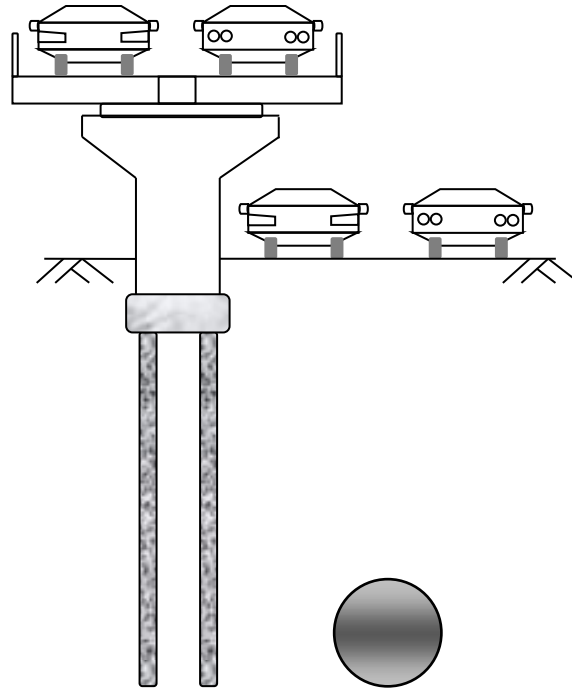
ความเสียหายของอาคาร

โดย... ชินวุฒิ ชาญฉายา

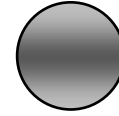
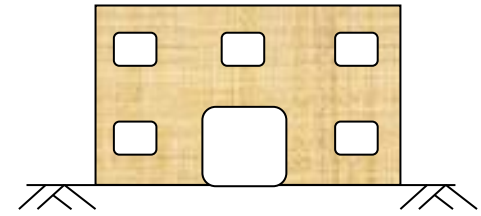
# อุโมงค์ผ่านสิ่งก่อสร้างและโครงสร้างข้างเคียง ในเขตชุมชนเมือง



ก) อุโมงค์ลอดใต้แนวท่อเดิม



ข) อุโมงค์ผ่านเสาเข็มต่อม่อทางด่วน




ค) อุโมงค์ลอดผ่านบ้านพักอาศัย

## หลักการประเมินสภาพความเสียหายของอาคาร (Assessment of Building Damage)

พิจารณาอาคารเป็นคานลึก (**Deep Beam**) ซึ่งตั้งอยู่บนหลักการวิเคราะห์ ดังนี้

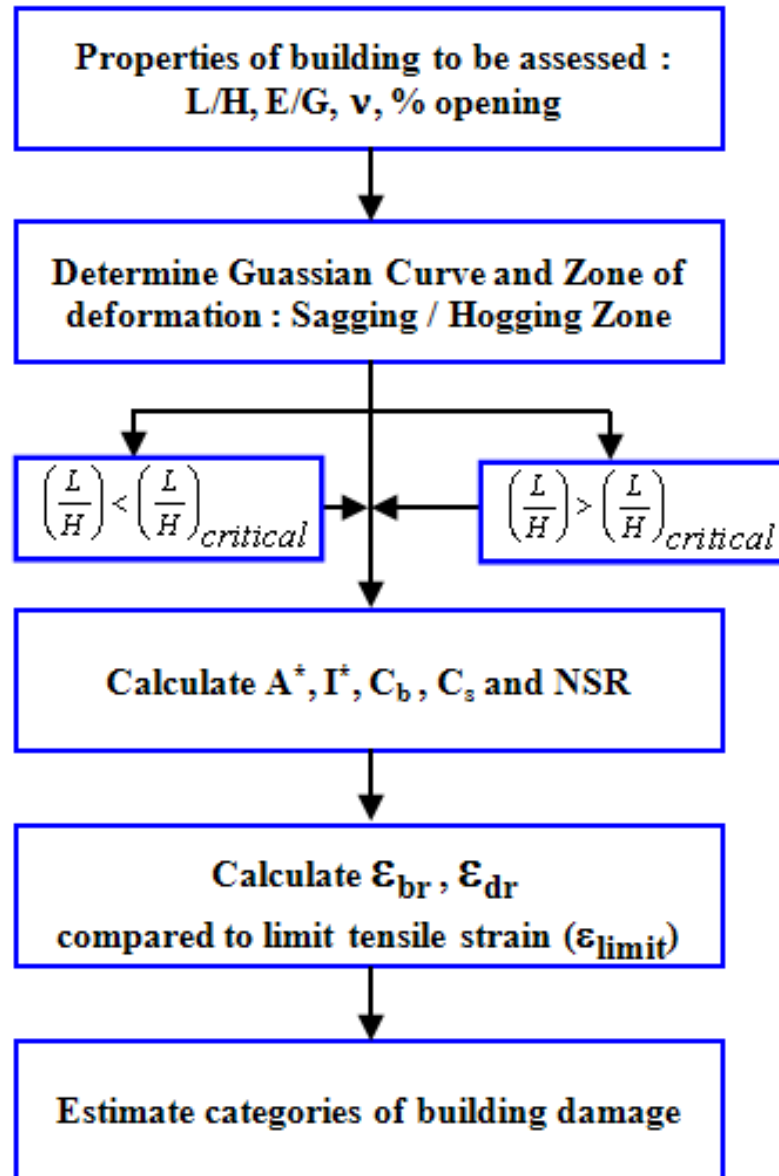
- 1) การเคลื่อนตัวในแนวดิ่งและแนวราบที่ฐานอาคารตลอดความยาวของอาคาร เท่ากับการเคลื่อนตัวทั้งในแนวดิ่งและแนวราบตามแนวเส้น **Gaussian Curve** จากงานชุดเจาะอุโมงค์
- 2) การคำนวณหาค่าความเครียดแรงดึงสูงสุดนั้น พิจารณาคูณสมบัติโครงสร้างเป็น **Isotropic Elastic** เท่านั้น โดยกำหนดค่า “**E/G = 12.5**” เท่ากันตลอดสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
- 3) วิเคราะห์หาค่า **Deflection Ratio ( $\Delta/L$ )** กับค่า **Horizontal Tensile Strain ( $\delta_L$ )** ของอาคาร เทียบกับค่าความเครียดแรงดึงวิกฤติ ( **$\epsilon_{limit}$** )

## ตารางแสดงการจำแนกระดับความเสียหายของอาคาร เทียบกับค่าความเครียดแรงดึงวิกฤติ

ระดับความเสียหาย	ลักษณะความเสียหาย	ลักษณะรายละเอียด รูปแบบความเสียหาย และการซ่อมแซมอาคารผนังวัสดุก่อ	ความกว้างของรอยแตกโดยประมาณ (มม.)	ความเครียดแรงดึงวิกฤติ (%) 
0	ไม่มีผลกระทบ (Negligible)	แตกสวยงาม	น้อยกว่า 0.1 มม.	0 - 0.050
1	เล็กน้อยมาก (Very slight)	เกิดรอยแตกเล็กๆ ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการตกแต่งใหม่ บางกรณีอาจเป็นรอยแตกเดี่ยวเล็กๆ ที่ด้านนอกผนังก่อ ซึ่งมองจากภายนอกได้ในระยะใกล้ๆ	0.1 - 1 มม.	0.050 - 0.075
2	เล็กน้อย (Slight)	รอยแตกสามารถแก้ไขได้โดยง่าย จำเป็นต้องมีการตกแต่งใหม่ แก้ไขช่องเปิด-ปิดของประตู หน้าต่าง ซึ่งอาจเปิด-ปิด "ไม่สะดวก"	1 - 5 มม.	0.075 - 0.150
3	ปานกลาง (Moderate)	รอยแตก ต้องสกัดออก และซ่อมแซมใหม่ ต้องทำการซ่อมแซมผนังภายนอก ประตูและหน้าต่าง เปิด-ปิด "ไม่สะดวก และอาจเกิดช่องว่าง ทำให้ระบบสาธารณสุขปกติอาจขัดข้อง"	5 - 15 มม. หรือ รอยแตกมากกว่า 3 แนว	0.150 - 0.300
4	รุนแรง (Severe)	ต้องทำการซ่อมแซมอย่างมาก รวมถึงการก่อสร้างผนังใหม่ ประตูและหน้าต่างเสียหาย พื้นลาดเอียง คานสูญเสียการรับแรง ซึ่งทำให้ระบบสาธารณสุขปกติขัดข้อง	15 - 25 มม. ทั้งนี้ ขึ้นกับรอยแตกที่เกิดขึ้น	มากกว่า 0.300
5	รุนแรงมาก (Very severe)	จำเป็นต้องซ่อมแซมปรับปรุงอย่างมาก รวมถึงการก่อสร้างใหม่ คานและผนังสูญเสียการรับแรง จำเป็นต้องแก้ไขหน้าต่างที่แตกหัก และบิดเบี้ยว เสียหาย	มากกว่า 25 มม. ทั้งนี้ ขึ้นกับรอยแตกที่เกิดขึ้น	

**อ้างอิง : Burland and Worth (1974) และ Boscardin and Cording (1989)**

# ผังแสดงขั้นตอนการประเมินระดับความเสียหายของอาคาร ในพื้นที่ที่รอดตัวจากงานชุดเจาะอุโมงค์

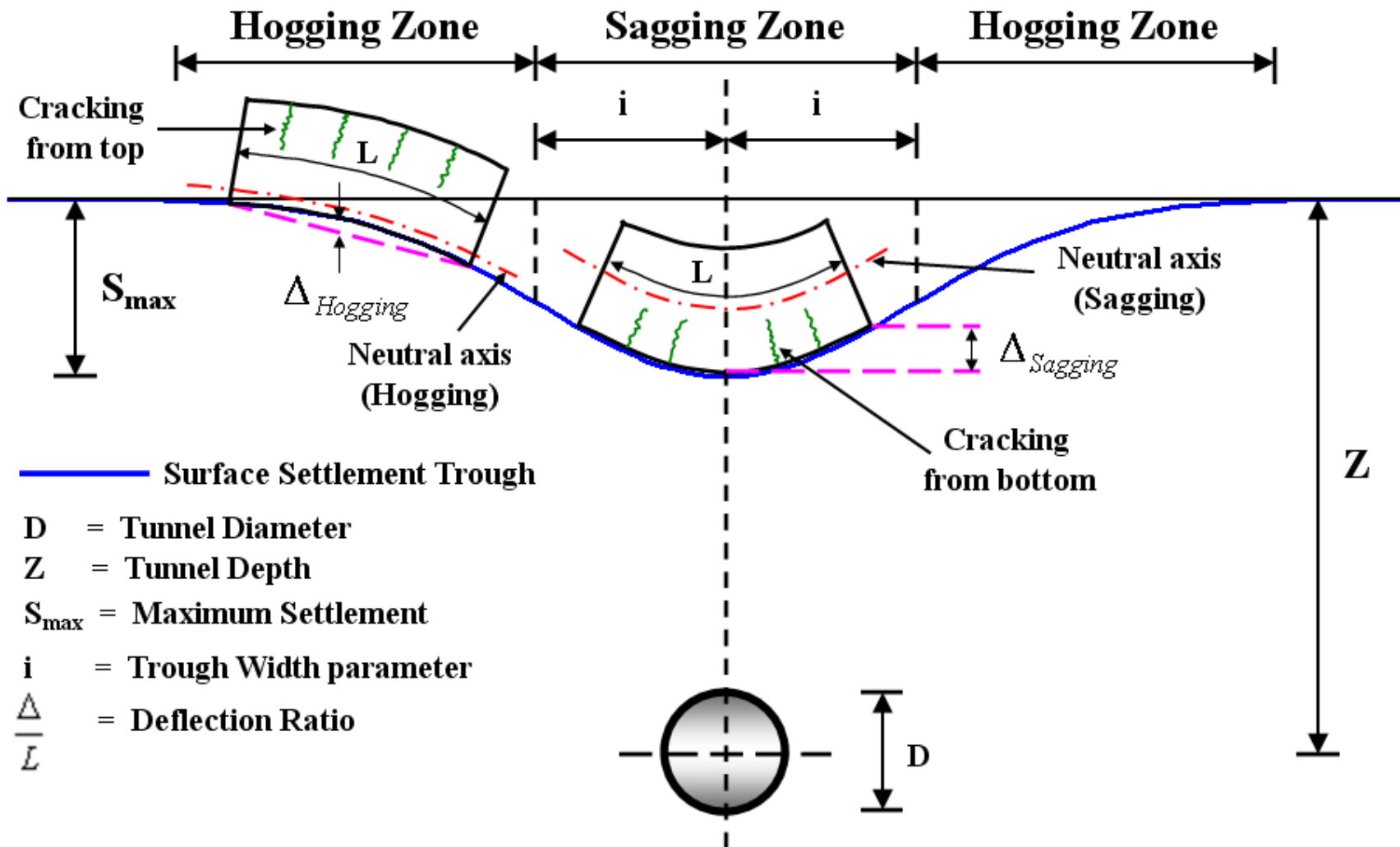


# 1) กรณีอาคารที่ไม่มีช่องเปิด (No opening)

หลักการคำนวณค่า *Deflection Ratio* ( $\Delta/L$ ) และ *Horizontal Tensile Strain* ( $\delta_L$ ) ของอาคาร

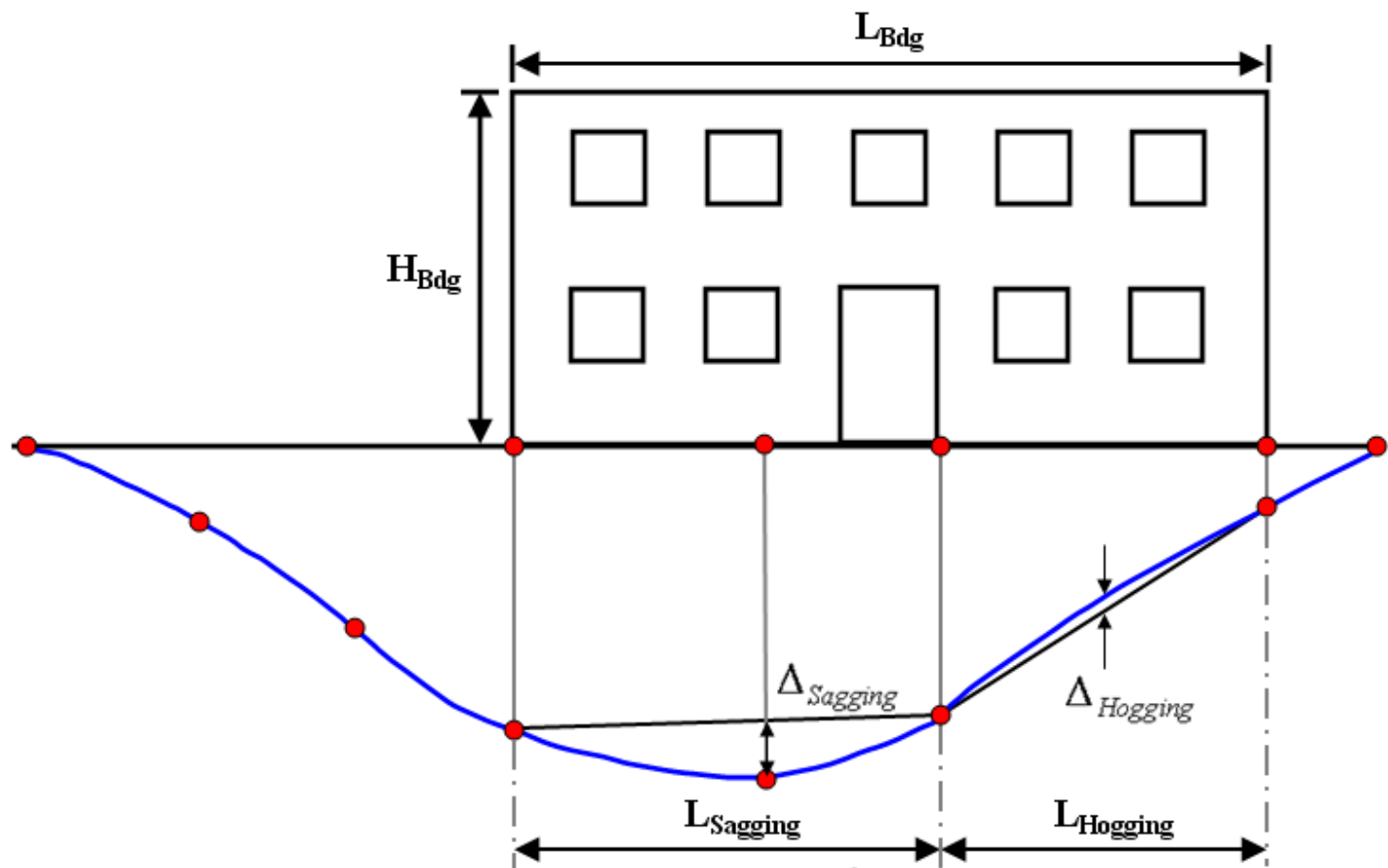
- วิเคราะห์แบบจำลองของคานดัดแอ่นตัว รูปแบบการเกิดรอยแตกร้าวของอาคารในพื้นที่ที่ทรุดตัว
- วิเคราะห์พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินในช่วง *Sagging Zone* หรือ *Hogging Zone*
- พิจารณาดำแหน่งอาคารในพื้นที่ที่ทรุดตัวอยู่ในช่วง *Sagging Zone* หรือ *Hogging Zone*
- วิเคราะห์ค่า *Bending Tensile Strain*, ( $\epsilon_{br}$ ) และ *Shearing Tensile Strain*, ( $\epsilon_{dr}$ )

>> คำนวณหาค่า  $(\Delta/L)/\epsilon_{\text{limit}}$  เทียบกับค่า  $\delta_L/\epsilon_{\text{limit}}$  สำหรับสร้างกราฟความสัมพันธ์เพื่อประเมินระดับความเสียหายของอาคาร



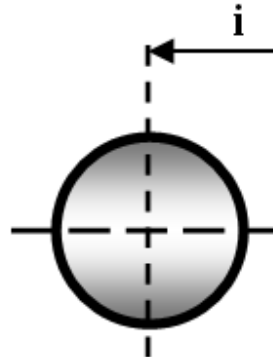
พฤติกรรมเคลื่อนตัวและรอยแตกร้าวของอาคารในโซนพื้นที่ทรุดตัวจากงานขุดเจาะอุโมงค์

- Sagging Zone : ตำแหน่ง Neutral Axis อยู่ที่กึ่งกลางของอาคาร รอย Crack เกิดที่บริเวณด้านล่างสุดของอาคาร
- Hogging Zone : ตำแหน่ง Neutral Axis อยู่ที่ตำแหน่งล่างสุด ใกล้ฐานอาคาร รอย Crack เกิดที่บริเวณด้านบนสุดของอาคาร



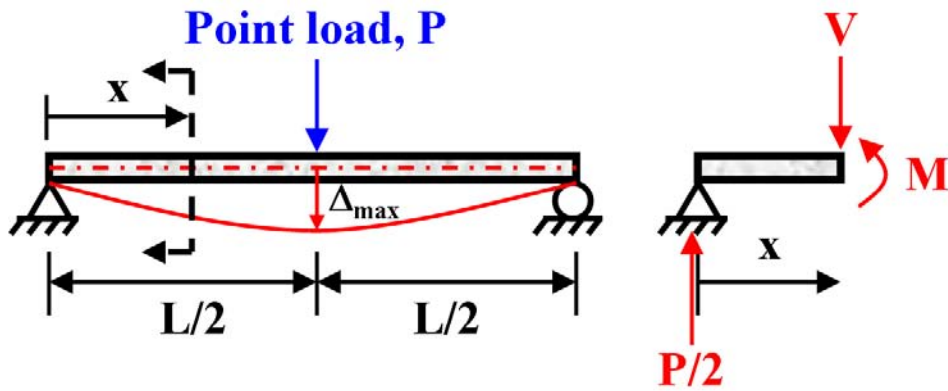
— Surface Settlement Trough

$\left(\frac{\Delta}{L}\right)_{Sagging}$	= Deflection Ratio in sagging zone
$\left(\frac{\Delta}{L}\right)_{Hogging}$	= Deflection Ratio in hogging zone



ค่า Deflection Ratio ในแต่ละช่วงของอาคารในพื้นที่ทรุดตัว





**พิสูจน์สมการสำหรับคำนวณค่า Relative Deflection**

**กรณี Point Load บน Simply Beam**

$$\frac{d^2M}{dx^2} = q = \frac{P}{L}$$

$$\frac{dM}{dx} = \int_{x=0}^{x=L} \frac{P}{L} dx = \frac{P}{L} \cdot x = \frac{P}{L} \left( \frac{L}{2} - 0 \right) = \frac{P}{2}$$

$$M = \int_0^x \frac{P}{2} dx = \frac{P}{2} \cdot x$$

1) Bending :  $\sigma_b = \frac{M \cdot \lambda}{I}$

$$\varepsilon_{b,max} = \frac{\sigma_{b,max}}{E} = \frac{\left[ \frac{M_{max} \cdot \lambda}{I} \right]}{E} = \frac{M_{max} \cdot \lambda}{EI}$$

$$M = \frac{P}{2} \cdot x \Rightarrow x = \frac{L}{2} ; M_{max} = \frac{P \cdot L}{4}$$

$$\therefore \varepsilon_{b,max} = \frac{\left( \frac{P \cdot L}{4} \right) \cdot \lambda}{EI} = \frac{PL\lambda}{4EI} \text{ ---- **}$$

2) Shearing :  $\varepsilon_d = \frac{\tau}{G}$

$$\varepsilon_d = \frac{\frac{P}{A}}{G} = \frac{P}{GA} = \frac{\Delta}{L}$$

$$\varepsilon_{d,max} = \frac{\Delta_{d,max}}{L} = \frac{3PL}{8GA}$$

$$\therefore \varepsilon_{d,max} = \frac{3P}{8GA} \text{ ---- **}$$

$$\frac{d^2\Delta}{dx^2} = \frac{M}{EI} + \frac{q}{kGA} ; k = \frac{2}{3} \text{ for rectangular beam}$$

$$\frac{d^2\Delta}{dx^2} = \frac{P}{2} \cdot \frac{x}{EI} + \frac{P/L}{kGA} \text{ ---- **}$$

$$\frac{d\Delta_b}{dx} = \int \frac{P}{2} \cdot \frac{x}{EI} dx = -\frac{1}{EI} \left( \frac{P \cdot x^2}{4} \right) + C_1$$

$$x = \frac{L}{2} \Rightarrow \frac{d\Delta_b}{dx} = 0 = -\frac{P \cdot \left( \frac{L}{2} \right)^2}{4EI} + C_1 ; C_1 = \frac{PL^2}{16EI}$$

$$\frac{d\Delta_s}{dx} = \int \frac{P/L}{kGA} dx = \frac{P \cdot x}{kGA}$$

$$x = \frac{L}{2} \Rightarrow \frac{d\Delta_s}{dx} = \frac{P \cdot x}{kGA} = \frac{P \cdot (L/2)}{kGA} = \frac{P}{2kGA}$$

$$\frac{d\Delta}{dx} = \frac{P \left( \frac{L^2}{16} - \frac{x^2}{4} \right)}{EI} + \frac{P}{2kGA} \text{ ---- **}$$

$$\Delta_b = \int \frac{P \left( \frac{L^2}{16} - \frac{x^2}{4} \right)}{EI} dx = \frac{P}{EI} \left( \frac{L^2}{16} x - \frac{x^3}{12} \right) + C_2$$

$$x = 0 \Rightarrow \Delta_b = 0 = \frac{P}{EI} \left( \frac{L^2}{16} (0) - \frac{(0)^3}{12} \right) + C_2 ; C_2 = 0$$

$$\Delta = \frac{P \left( \frac{L^2}{16} x - \frac{x^3}{12} \right)}{EI} + \frac{P \cdot x}{2kGA} = \frac{P \cdot x}{EI} \left( \frac{L^2}{16} - \frac{x^2}{12} \right) + \frac{P \cdot x}{2(2/3)GA}$$

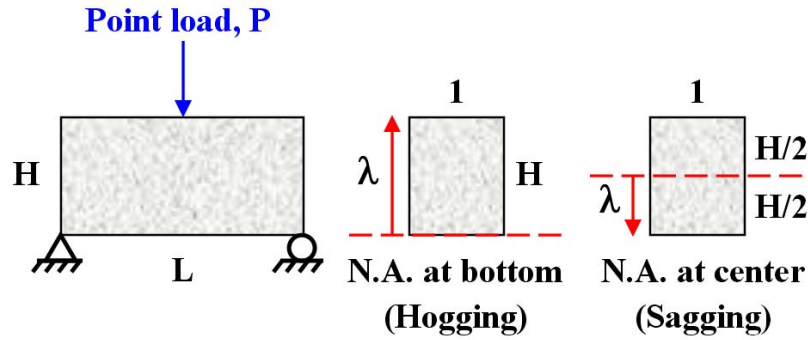
$$\Delta = \frac{P \cdot x}{48EI} (3L^2 - 4x^2) + \frac{3P \cdot x}{4GA}$$

$$x = \frac{L}{2} \Rightarrow \Delta = \frac{P \cdot (L/2)}{48EI} (3L^2 - 4(L/2)^2) + \frac{3P \cdot (L/2)}{4GA}$$

$$\therefore \Delta = \frac{PL^3}{48EI} + \frac{3PL}{8GA} \Rightarrow \frac{\Delta}{L} = \frac{PL^2}{48EI} \left[ 1 + \frac{18EI}{L^2GA} \right] \text{ ---- **}$$

# พิสูจน์สมการ : ความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection Ratio ( $\Delta/L$ ) เทียบกับ Tensile Strain

เนื่องจาก Bending ( $\epsilon_{b,max}$ ) และ Shearing ( $\epsilon_{d,max}$ ) กรณี Point Load บน Simply beam



1) Point Load  $\Rightarrow$  Bending Strain

$$\frac{\Delta}{L} = \frac{PL^2}{48EI} \left[ 1 + \frac{18EI}{L^2GA} \right]$$

$$\frac{\Delta}{L} = \frac{PL^2}{48EI} \left[ 1 + \frac{18EI}{L^2GA} \right] x \frac{\epsilon_{b,max}}{\epsilon_{b,max}}$$

$$\frac{\Delta}{L} = \frac{PL^2}{48EI} \left[ 1 + \frac{18EI}{L^2GA} \right] x \frac{PL\lambda/4EI}{PL\lambda/4EI}$$

$$\left( \frac{\Delta}{L} \right)_b = \left\{ \frac{4EI}{PL\lambda} x \frac{PL^2}{48EI} \left[ 1 + \frac{18EI}{L^2GA} \right] \right\} x \frac{PL\lambda}{4EI}$$

$$\left( \frac{\Delta}{L} \right)_b = \left[ \frac{L}{12\lambda} + \frac{3I}{2\lambda LA} \left( \frac{E}{G} \right) \right] \epsilon_{b,max}$$

$$\left( \frac{\Delta}{L} \right)_b = C_b \epsilon_{b,max} \text{ ---***}$$

$$\therefore C_b = \frac{L}{12\lambda} + \frac{3I}{2\lambda LA} \left( \frac{E}{G} \right)$$

2) Point Loads  $\Rightarrow$  Shearing Strain

$$\frac{\Delta}{L} = \frac{PL^2}{48EI} \left[ 1 + \frac{18EI}{L^2GA} \right]$$

$$\frac{\Delta}{L} = \frac{PL^2}{48EI} \left[ 1 + \frac{18EI}{L^2GA} \right] x \frac{\epsilon_{d,max}}{\epsilon_{d,max}}$$

$$\frac{\Delta}{L} = \frac{PL^2}{48EI} \left[ 1 + \frac{18EI}{L^2GA} \right] x \frac{3P/8GA}{3P/8GA}$$

$$\frac{\Delta}{L} = \left\{ \frac{PL^2}{48EI} x \frac{1}{3P/8GA} \left[ 1 + \frac{18EI}{L^2GA} \right] \right\} x \frac{3P}{8GA}$$

$$\frac{\Delta}{L} = \left\{ \frac{PL^2}{48EI} x \frac{8GA}{3P} \left[ 1 + \frac{18EI}{L^2GA} \right] \right\} x \frac{3P}{8GA}$$

$$\frac{\Delta}{L} = \left\{ \frac{L^2GA}{18EI} \left[ 1 + \frac{18EI}{L^2GA} \right] \right\} x \frac{3P}{8GA}$$

$$\left( \frac{\Delta}{L} \right)_s = \left[ 1 + \frac{L^2A}{18I} \left( \frac{G}{E} \right) \right] \epsilon_{d,max}$$

$$\left( \frac{\Delta}{L} \right)_s = C_s \epsilon_{d,max} \text{ ---***}$$

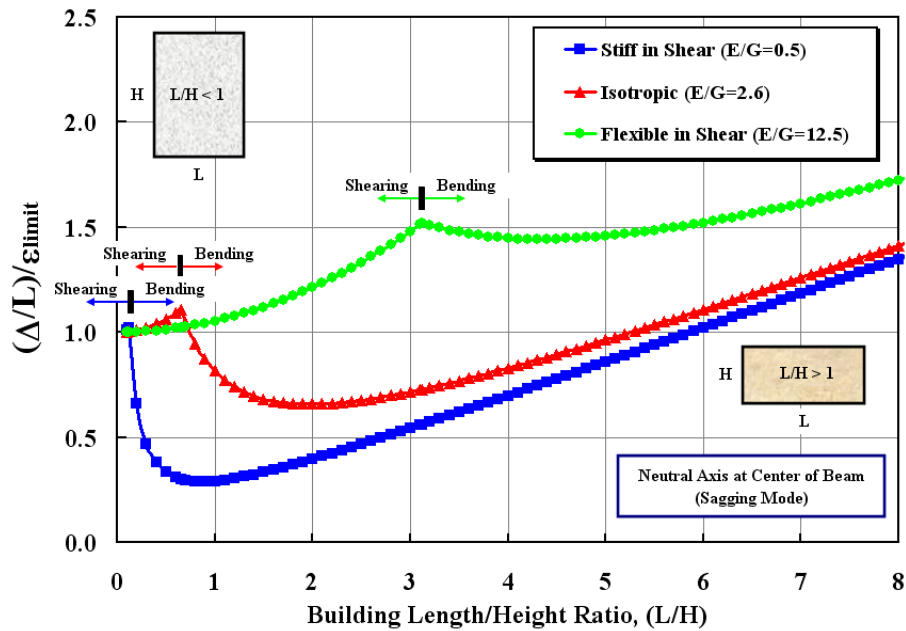
$$\therefore C_s = 1 + \frac{L^2A}{18I} \left( \frac{G}{E} \right)$$

$$(1) \text{ Hogging (N.A. at bottom)} \Rightarrow \lambda = H, I = \frac{(1)(H)^3}{12} + (1)(H) \left( H - \frac{H}{2} \right)^2 = \frac{H^3}{12} + \frac{H^3}{4} = \frac{H^3}{3}$$

$$C_b = \frac{1}{12} \left( \frac{L}{H} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{E}{G} \right) \left( \frac{H}{L} \right); C_s = 1 + \frac{1}{6} \left( \frac{G}{E} \right) \left( \frac{L}{H} \right)^2$$

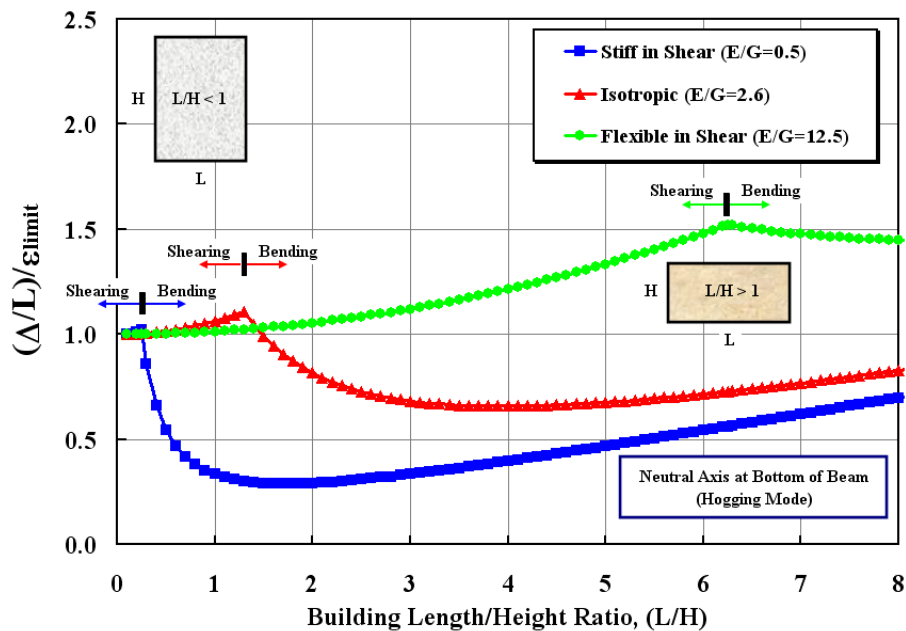
$$(2) \text{ Sagging (N.A. at center)} \Rightarrow \lambda = \frac{H}{2}, I = \frac{(1)(H)^3}{12} = \frac{H^3}{12}$$

$$C_b = \frac{1}{6} \left( \frac{L}{H} \right) + \frac{1}{4} \left( \frac{E}{G} \right) \left( \frac{H}{L} \right); C_s = 1 + \frac{2}{3} \left( \frac{G}{E} \right) \left( \frac{L}{H} \right)^2$$



$$\lll (L/H)_{\text{critical}} = 3.125$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection Ratio  $(\Delta/L)$  ต่อ Limit Tensile Strain ( $\epsilon_{\text{limit}}$ ) กับ อัตราส่วนขนาดอาคาร (L/H) (ไม่รวมค่า  $\delta_L$ )



$\Delta_b / \Delta_s < 1$  : Min. Bending Strain

$\Delta_b / \Delta_s > 1$  : Min. Shearing Strain

# พิจารณารวมค่า Horizontal Tensile Strain, $\delta_L$

ทั้ง Bending Strain ( $\epsilon_{b,max}$ ) และ Shearing Strain ( $\epsilon_{d,max}$ )

$$\epsilon_{br} = \epsilon_{b,max} + \epsilon_x$$

$$\epsilon_{br} = \epsilon_{b,max} + \delta_L \text{ ***}$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\cancel{\sigma_z} - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \text{ for initial stress, } \sigma_z = 0$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [-\nu(\sigma_x + \cancel{\sigma_y})] ; \text{ Plane stress } \Rightarrow \sigma_y = 0$$

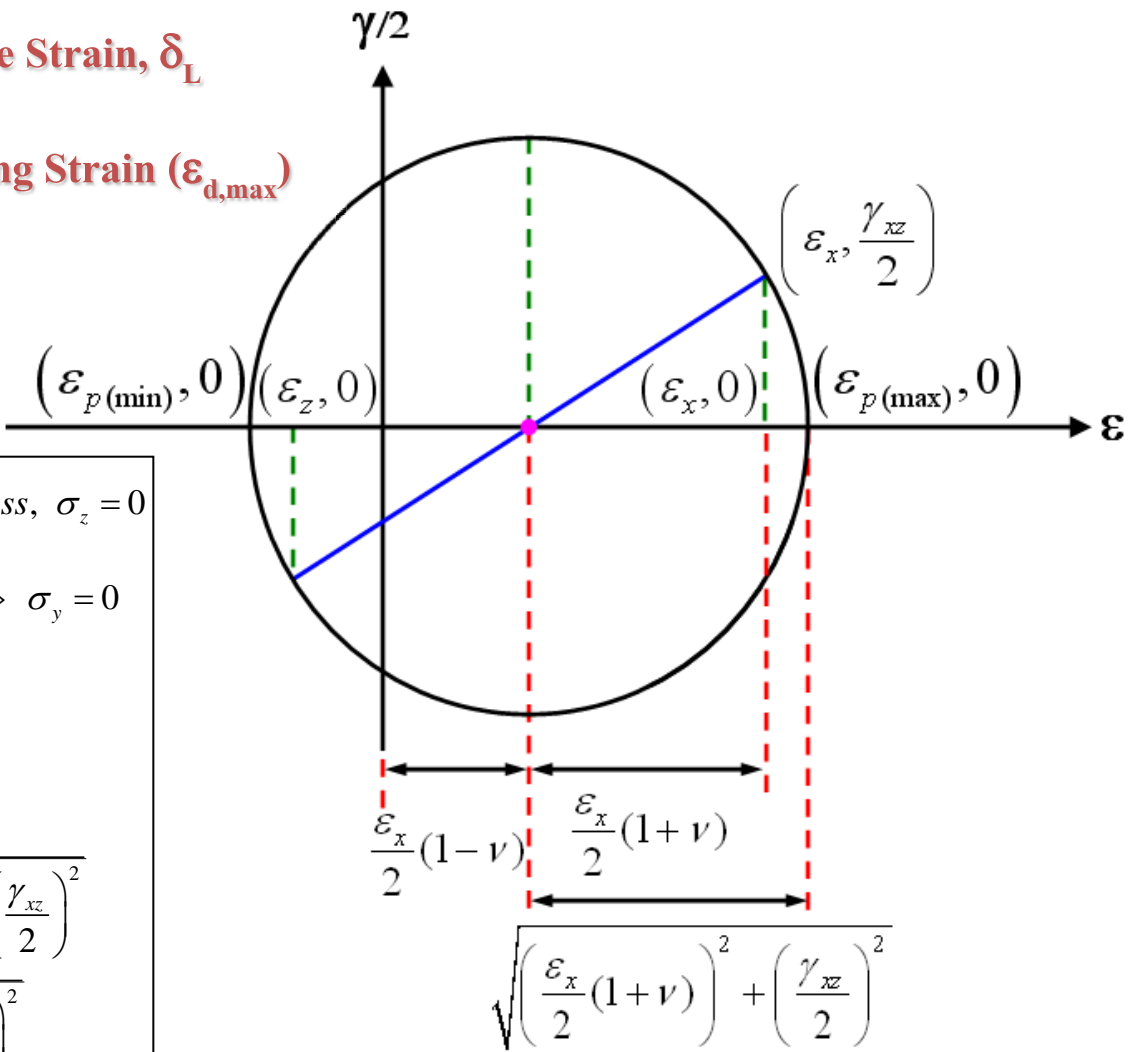
$$\epsilon_z = -\nu \left[ \frac{\sigma_x}{E} \right] = -\nu \epsilon_x$$

$$\frac{\epsilon_x + \epsilon_z}{2} = \frac{\epsilon_x + (-\nu \epsilon_x)}{2} = \frac{\epsilon_x}{2} (1 - \nu)$$

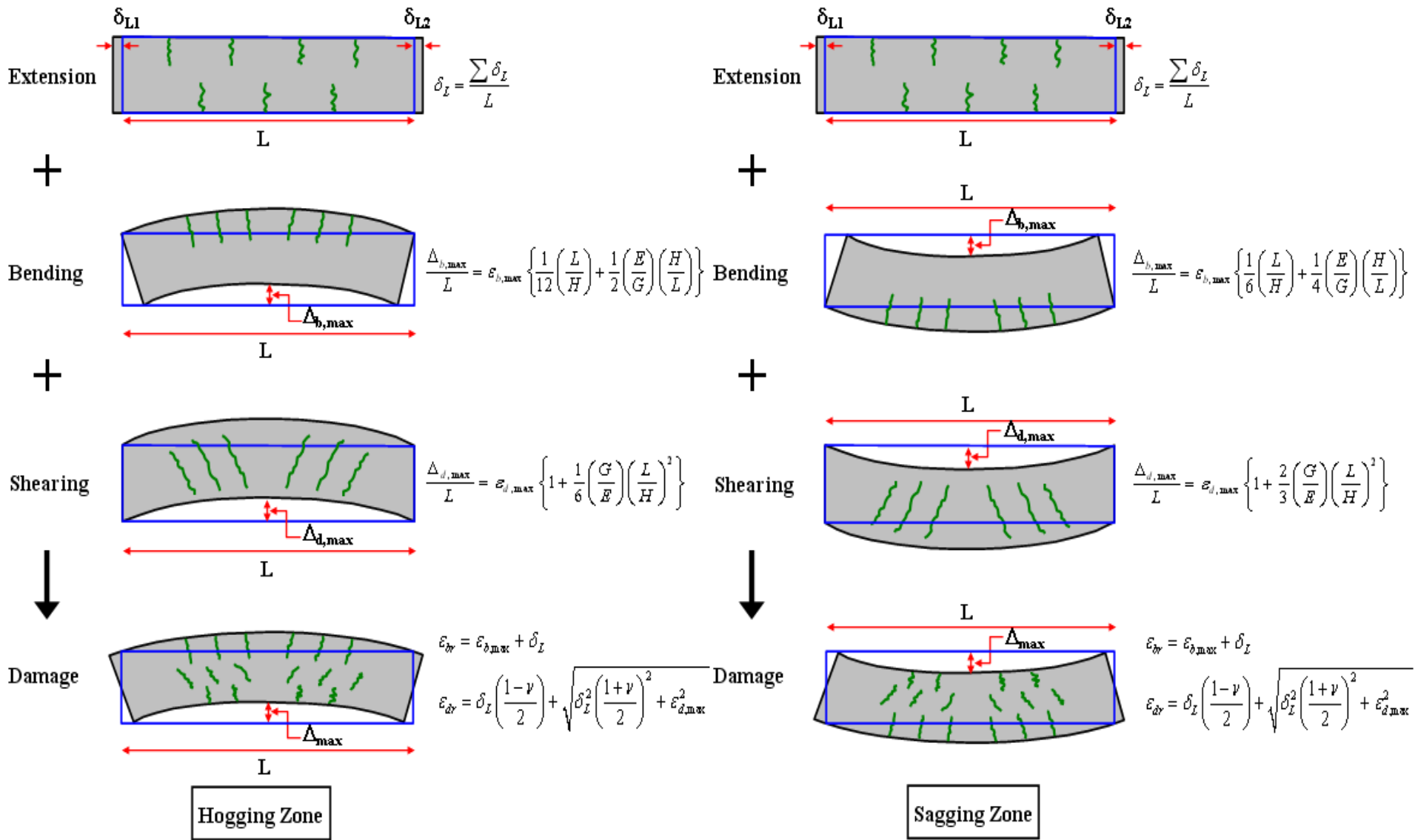
$$\epsilon_{p(max)} = \frac{\epsilon_x}{2} (1 - \nu) + \sqrt{\left( \epsilon_x - \frac{\epsilon_x}{2} (1 - \nu) \right)^2 + \left( \frac{\gamma_{xz}}{2} \right)^2}$$

$$\epsilon_{p(max)} = \frac{\epsilon_x}{2} (1 - \nu) + \sqrt{\left( \frac{\epsilon_x}{2} (1 + \nu) \right)^2 + \left( \frac{\gamma_{xz}}{2} \right)^2}$$

$$\epsilon_{dr} = \frac{\delta_L}{2} (1 - \nu) + \sqrt{\delta_L^2 \left( \frac{1 + \nu}{2} \right)^2 + \epsilon_{d,max}^2} \text{ ***}$$



**Mohr's Circle สำหรับ Diagonal Strain ของอาคาร ในแนว Plane Stress**



รูปแบบการวิเคราะห์ความเครียดแรงดึง (Tensile Strain) ของอาคาร

1) Bending Strain

$$\epsilon_{br} = \epsilon_{limit} = \epsilon_{b,max} + \delta_L$$

$$\epsilon_{b,max} = \epsilon_{limit} - \delta_L$$

$$\left(\frac{\Delta}{L}\right)_b = C_b \cdot \epsilon_{b,max}$$

$$\left(\frac{\Delta}{L}\right)_b = C_b (\epsilon_{limit} - \delta_L) \quad (1)$$

$$\frac{\Delta}{L} = C_b \left(1 - \frac{\delta_L}{\epsilon_{limit}}\right) \quad ***$$

2) Shearing Strain

$$\epsilon_{dr} = \epsilon_{limit} = \delta_L \left(\frac{1-\nu}{2}\right) + \sqrt{\delta_L^2 \left(\frac{1+\nu}{2}\right)^2 + \epsilon_{d,max}^2}$$

$$\epsilon_{d,max} = \sqrt{(\epsilon_{limit} + \nu\delta_L)(\epsilon_{limit} - \delta_L)}$$

$$\left(\frac{\Delta}{L}\right)_s = C_s \cdot \epsilon_{d,max}$$

$$\left(\frac{\Delta}{L}\right)_s = C_s \sqrt{(\epsilon_{limit} + \nu\delta_L)(\epsilon_{limit} - \delta_L)} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta}{L} = C_s \sqrt{\left(1 + \nu \frac{\delta_L}{\epsilon_{limit}}\right) \left(1 - \frac{\delta_L}{\epsilon_{limit}}\right)} \quad ***$$

เส้นตรง



เส้นโค้ง



$$\frac{(1)}{(2)} \Rightarrow \left(\frac{\Delta}{L}\right)_b = \frac{C_b (\epsilon_{limit} - \delta_L)}{C_s \sqrt{(\epsilon_{limit} + \nu\delta_L)(\epsilon_{limit} - \delta_L)}}$$

$$\frac{\Delta_b}{\Delta_s} = \frac{C_b}{C_s} \sqrt{\frac{1 - \frac{\delta_L}{\epsilon_{limit}}}{1 + \frac{\nu\delta_L}{\epsilon_{limit}}}} \quad (3)$$

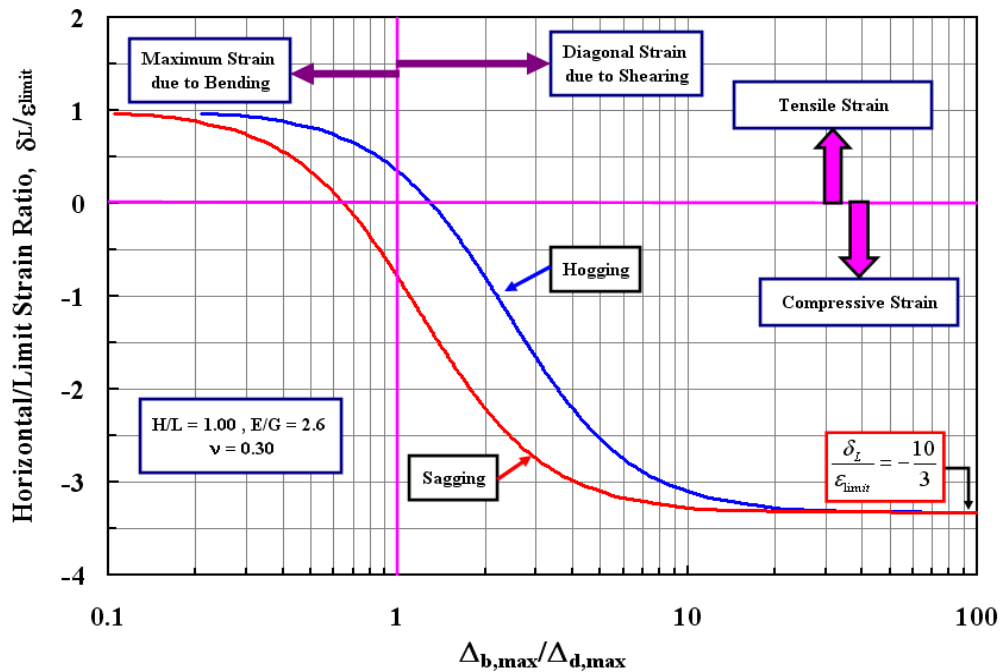
$$1) \frac{\Delta_b}{\Delta_s} = 1 \Rightarrow \frac{\delta_L}{\epsilon_{limit}} = \frac{1 - \left(\frac{C_s}{C_b}\right)^2}{1 + \nu \left(\frac{C_s}{C_b}\right)^2} \quad ***$$

$$2) \frac{\Delta_b}{\Delta_s} > 1, \text{ Minimum Strain due to shearing} \Rightarrow \frac{\delta_L}{\epsilon_{limit}} < \frac{1 - \left(\frac{C_s}{C_b}\right)^2}{1 + \nu \left(\frac{C_s}{C_b}\right)^2} \quad (4)$$

$$3) \frac{\Delta_b}{\Delta_s} < 1, \text{ Minimum Strain due to bending} \Rightarrow \frac{\delta_L}{\epsilon_{limit}} > \frac{1 - \left(\frac{C_s}{C_b}\right)^2}{1 + \nu \left(\frac{C_s}{C_b}\right)^2} \quad (5)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection Ratio ( $\Delta/L$ ) เทียบกับ Limit Tensile Strain ( $\epsilon_{limit}$ )

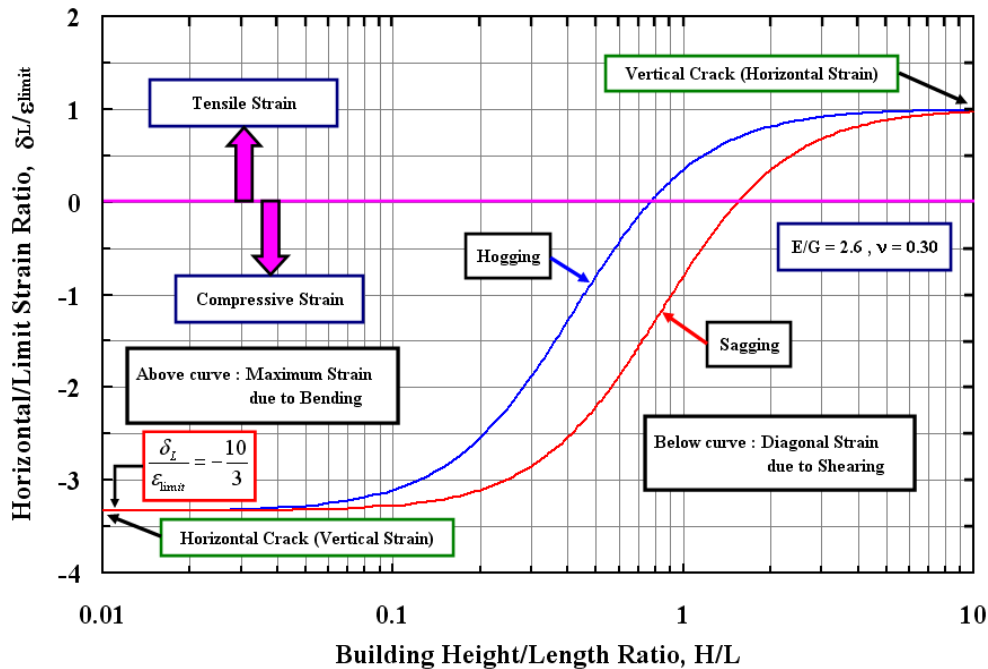
และอัตราส่วนขนาดอาคาร (L/H)



ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\delta_L/\epsilon_{limit}$  กับ  
 $\Delta_{b,max}/\Delta_{d,max}$  ที่อัตราส่วนขนาดอาคาร  
**L/H = 1.00**

**E/G = 2.6 (Isotropic Elastic)**

**$\nu = 0.30$**

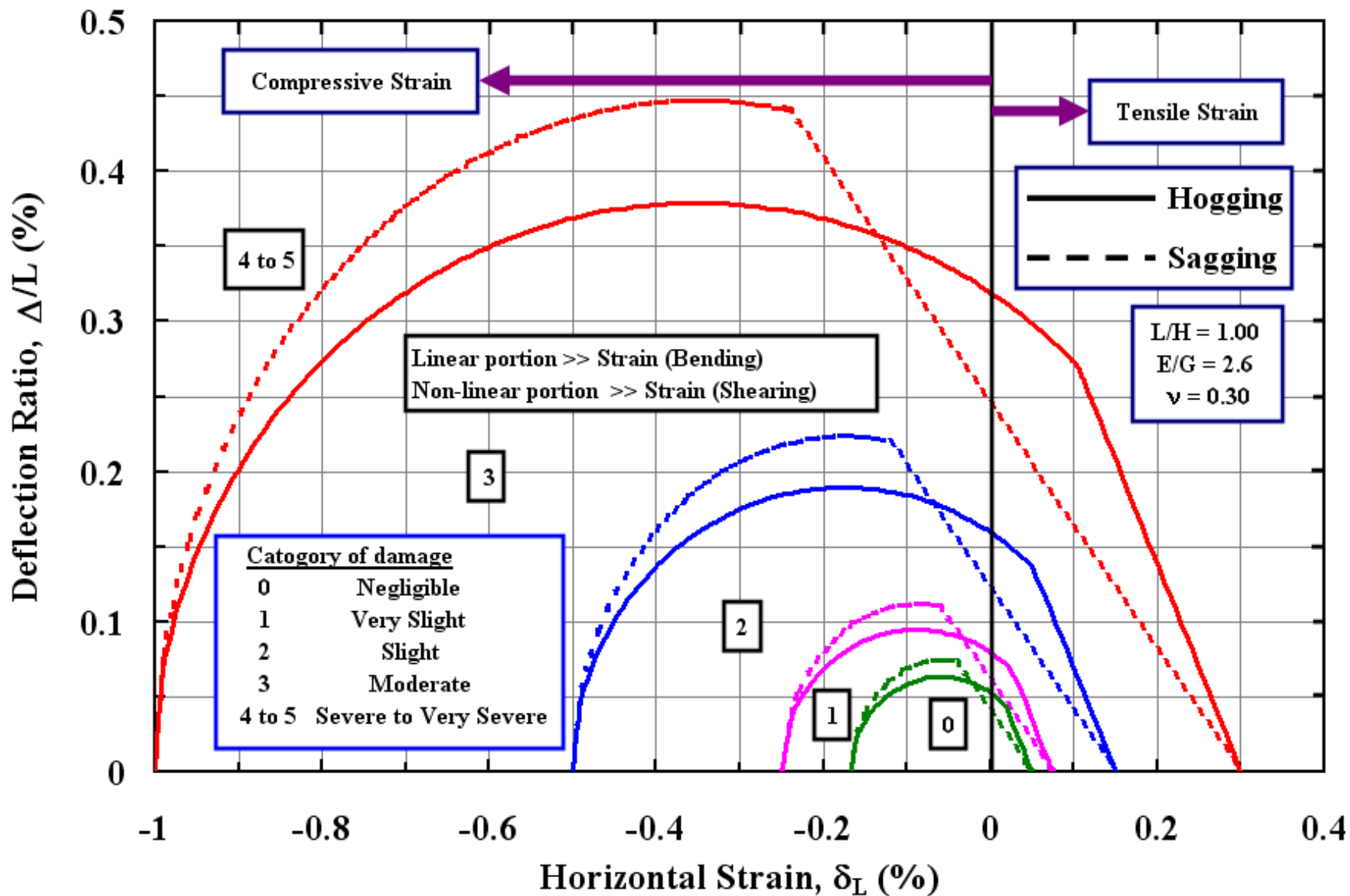


ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\delta_L/\epsilon_{limit}$  กับ  
อัตราส่วนขนาดอาคาร H/L ต่างๆ ที่

$$\Delta_{b,max}/\Delta_{d,max} = 1$$

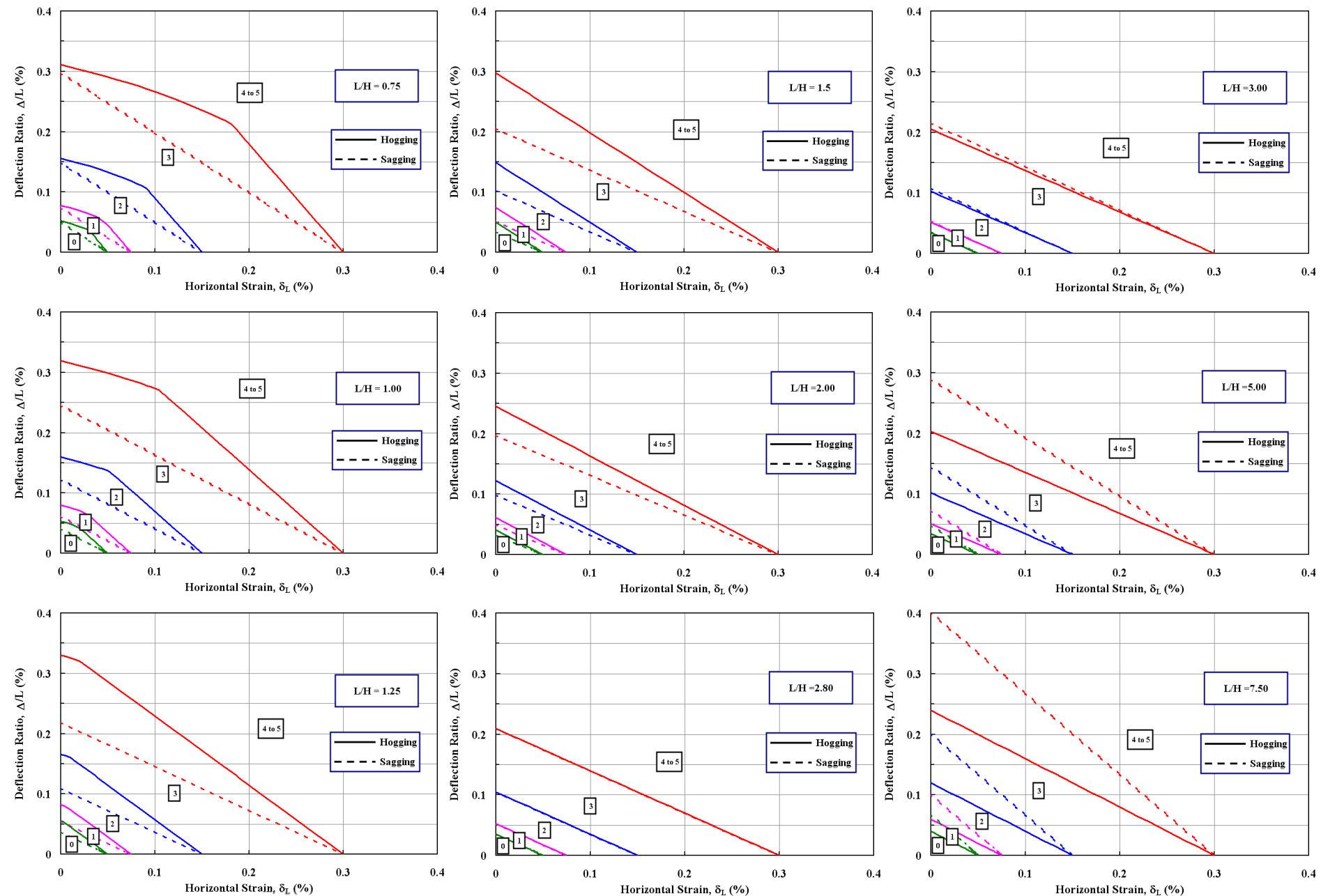
**E/G = 2.6 (Isotropic Elastic)**

**$\nu = 0.30$**

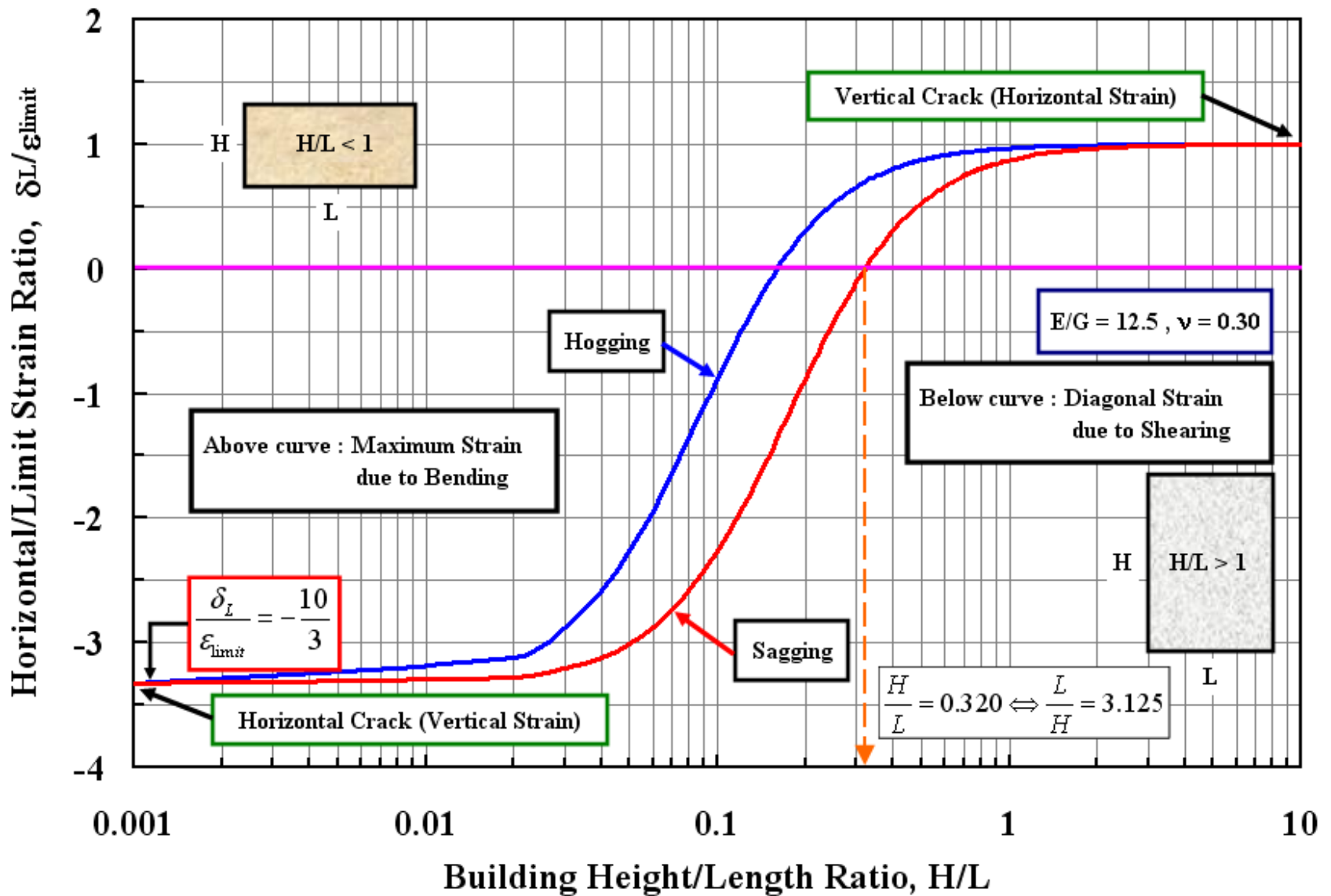


ความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection Ratio, ( $\Delta/L$ ) กับ Horizontal Strain, ( $\delta_L$ ) ที่  $L/H=1.00$

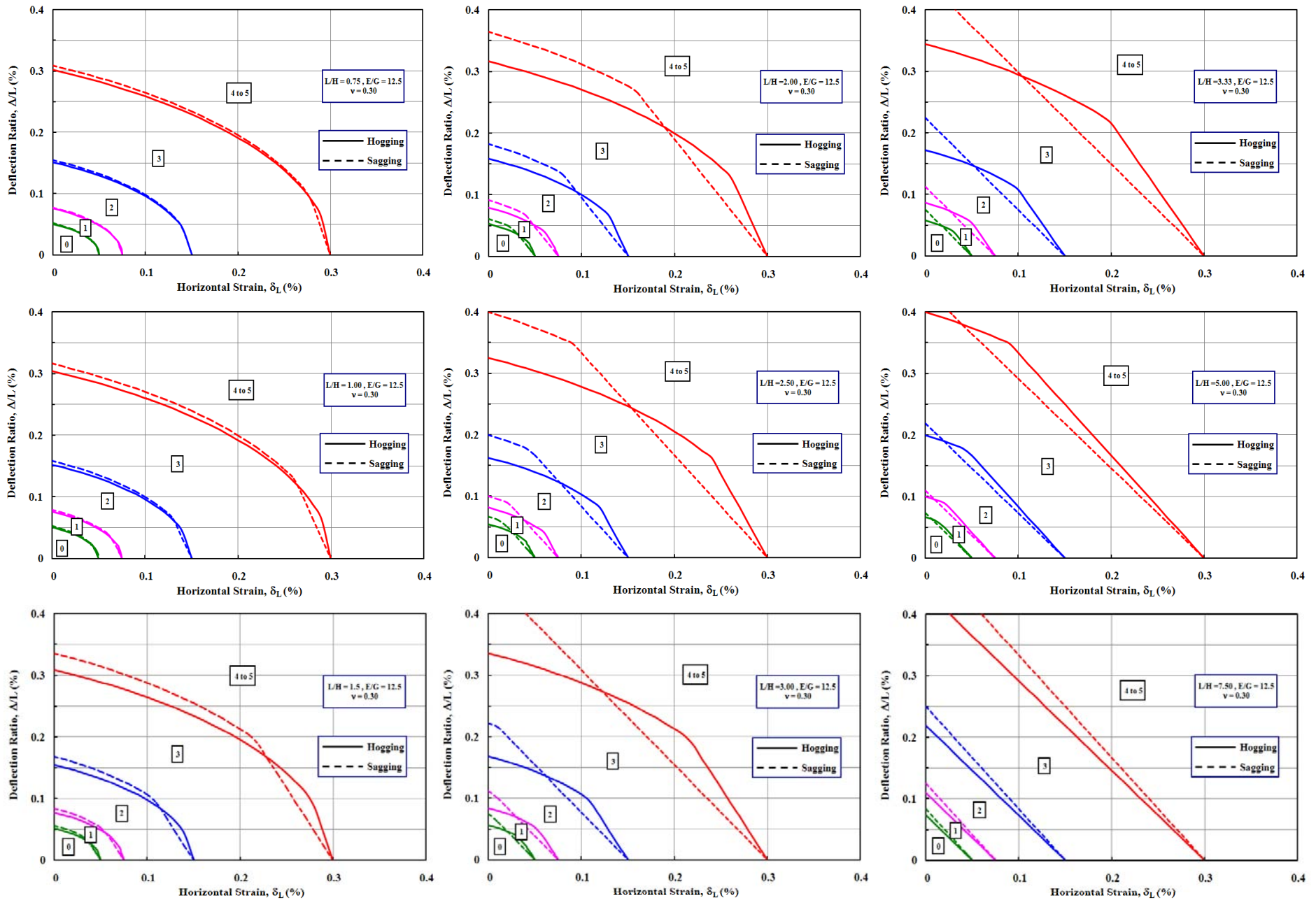




ความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection Ratio ( $\Delta/L$ ) กับ Horizontal Tensile Strain ( $\delta_L$ ) ที่ขนาดอาคาร (L/H) ต่างๆ



ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\delta_L/\epsilon_{limit}$  กับ อัตราส่วนขนาดอาคาร  $H/L$  ต่างๆ ที่  $\Delta_b/\Delta_s = 1$  ( $E/G=12.5$ )



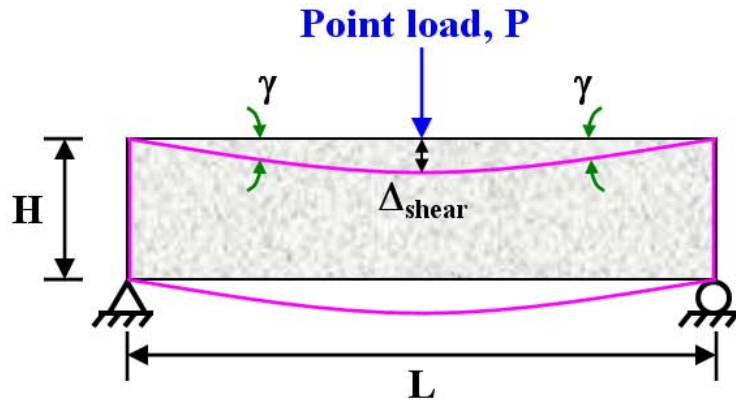
ความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection Ratio ( $\Delta/L$ ) กับ Horizontal Tensile Strain ( $\delta_L$ ) ที่ขนาดอาคาร ( $L/H$ ) ต่างๆ

## 2) กรณีอาคารที่มีช่องเปิด (With opening)

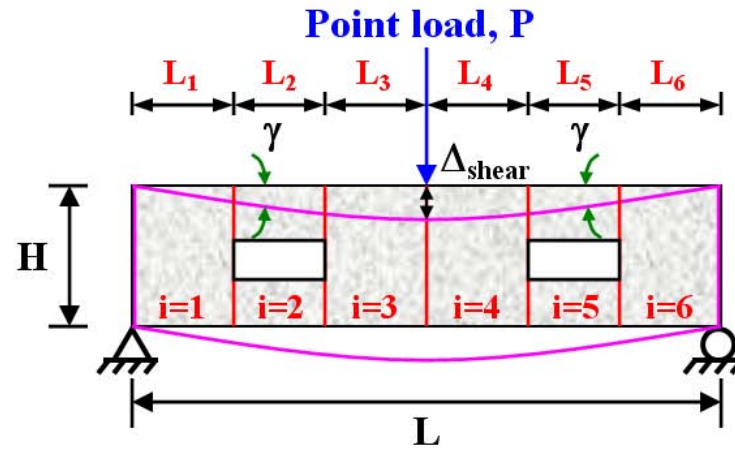
หลักการคำนวณค่า *Equivalent Building Stiffness* ของอาคารที่มีช่องเปิด

- วิเคราะห์ค่า  $I$  และ  $A$  ที่เหมาะสม ของอาคารที่ไม่มีช่องเปิด และอาคารที่มีช่องเปิด
- คำนวณค่า “Normalised Stiffness Ratio (NSR)” เพื่อเปรียบเทียบค่า  $I$  และ  $A$  ของอาคารแต่ละขนาด  $(L/H)$  และที่  $(L/H)_{critical}$  ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการรับแรงของอาคาร
- คำนวณค่า *Equivalent Bending Stiffness* ( $EI^*$ ) กับ *Equivalent Shear Stiffness* ( $GA^*$ ) ของอาคาร

>> คำนวณหาค่า  $(\Delta/L)/\epsilon_{limit}$  เทียบกับค่า  $\delta_L/\epsilon_{limit}$  สำหรับสร้างกราฟความสัมพันธ์เพื่อประเมินระดับความเสียหายของอาคาร



**Plain Beam**



**Beam with openings**

$$\tau = \frac{P}{A}, \quad \gamma = \frac{\Delta}{L}$$

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{P/A}{\Delta/L} = \frac{PL}{\Delta A} \Rightarrow \Delta = \frac{PL}{GA}; \quad A = t.H$$

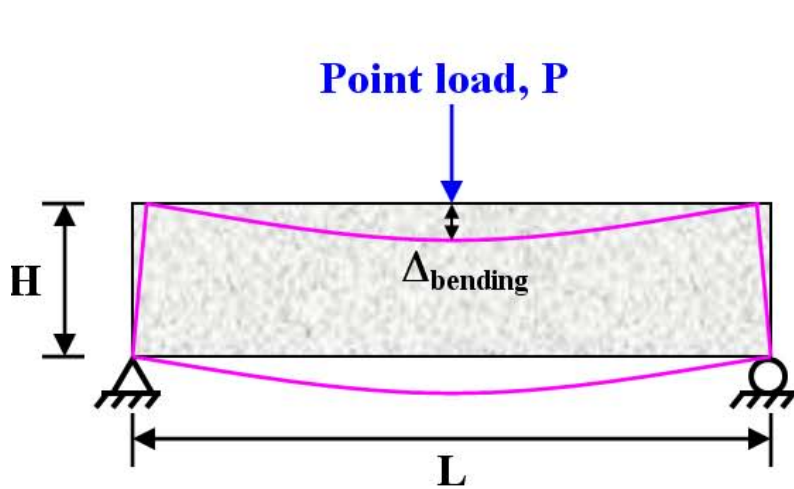
$$\Delta = \frac{P'L}{GA} = \frac{P'}{G} \left( \frac{L_1}{A_1} + \frac{L_2}{A_2} + \dots + \frac{L_m}{A_m} \right)$$

$$A = \frac{L}{\left( \frac{L_1}{A_1} + \frac{L_2}{A_2} + \dots + \frac{L_m}{A_m} \right)}$$

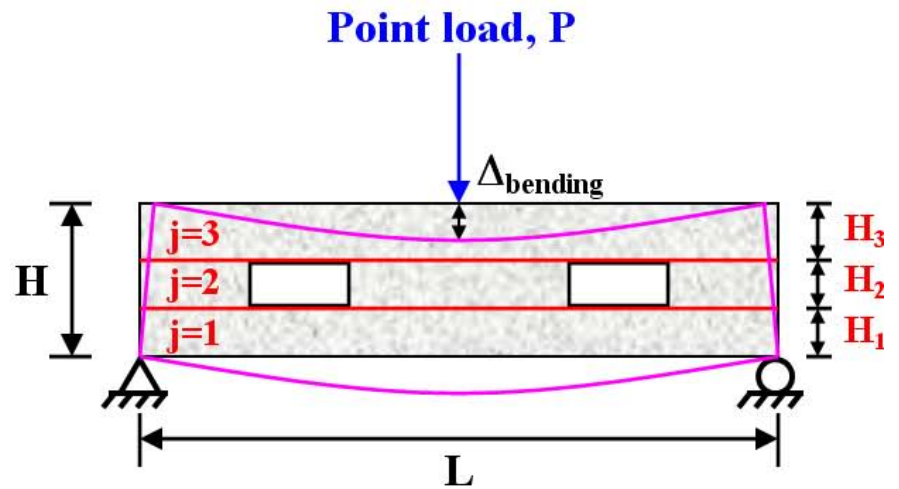
$$A = \frac{L}{\sum_{i=1}^m \left( \frac{L_i}{A_i} \right)}; \quad A_i = t.H - (A_{opening})_i$$

$$\therefore A = \frac{L}{\sum_{i=1}^m \left( \frac{L_i}{t.H - (A_{opening})_i} \right)} \quad ***$$

ความยาวส่วนย่อยของหน้าตัดแบ่งอาคาร สำหรับหาค่า A



**Plain Beam**



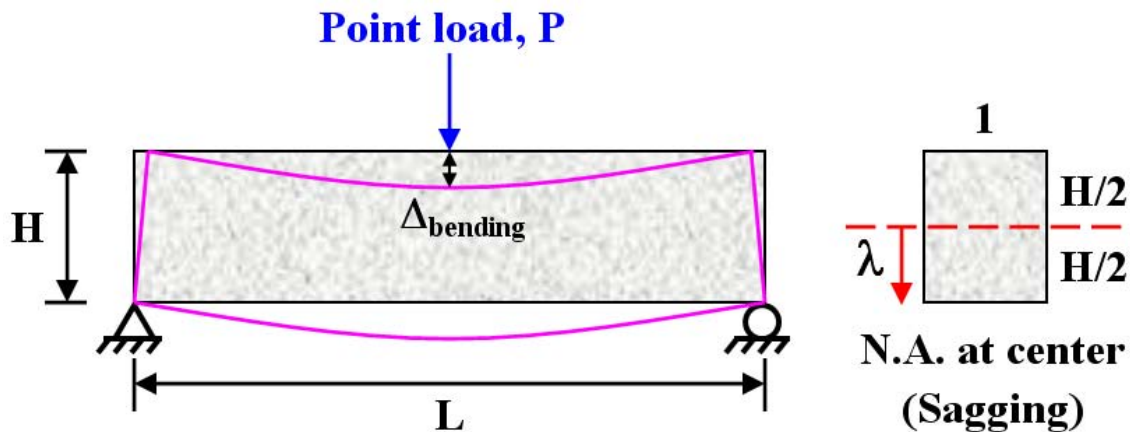
**Beam with openings**

$$I = \frac{1}{12} t.H^3 + t.H.\lambda^2$$

$$I = \frac{1}{12} t_j.H_j^3 + t_j.H_j.\lambda_j^2 ; H_j = \frac{L.h_j - (A_{opening})_j}{L}$$

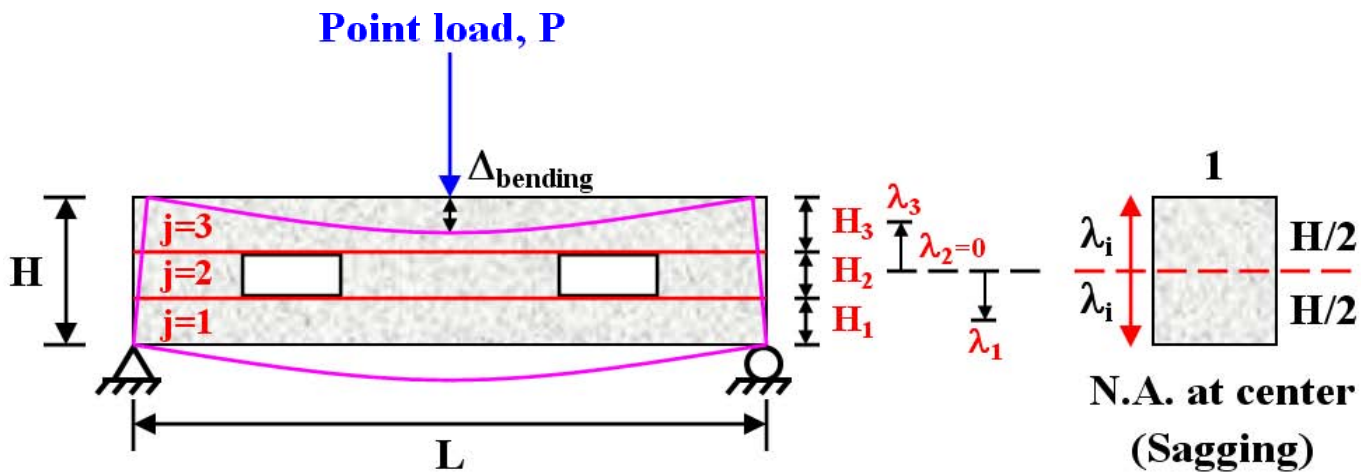
$$\therefore I = \sum_{j=1}^n \left[ \frac{1}{12} t_j \cdot \left\{ \frac{(L.h_j - (A_{opening})_j)}{L} \right\}^3 + t_j \cdot \frac{(L.h_j - (A_{opening})_j)}{L} \cdot \lambda_j^2 \right] \text{---***}$$

**ความสูงส่วนย่อยของหน้าตัดแบ่งอาคาร สำหรับหาค่า I**



**Plain Beam**

a) กรณีอาคารไม่มีช่องเปิด (No openings)

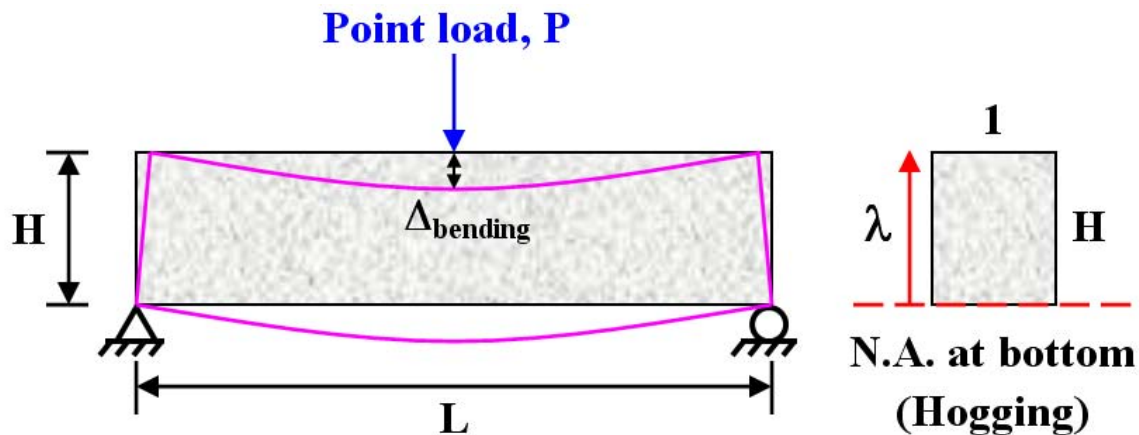


**Beam with openings**

b) กรณีอาคารมีช่องเปิด (With openings)

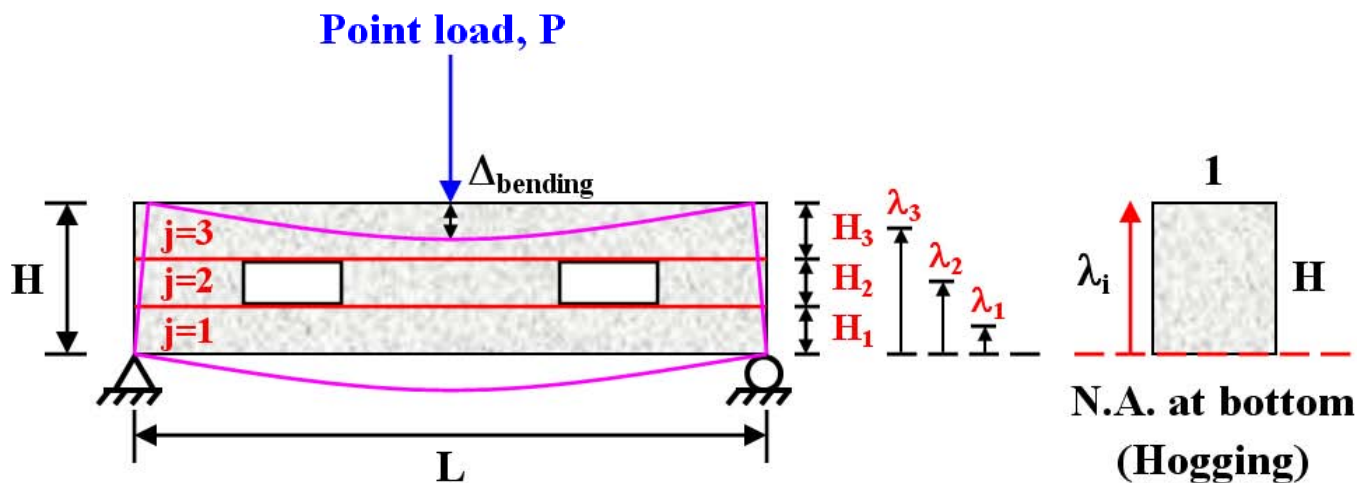
ความสูงส่วนย่อยของหน้าตัดแบ่งอาคาร สำหรับหาค่า  $I$  ในโซน Sagging





**Plain Beam**

a) กรณีอาคารไม่มีช่องเปิด (No openings)

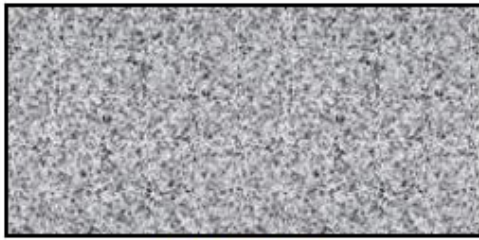


**Beam with openings**

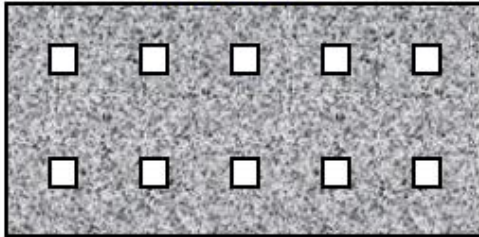
b) กรณีอาคารมีช่องเปิด (With openings)

ความสูงส่วนย่อยของหน้าตัดแบ่งอาคาร สำหรับหาค่า  $I$  ในโซน **Hogging**

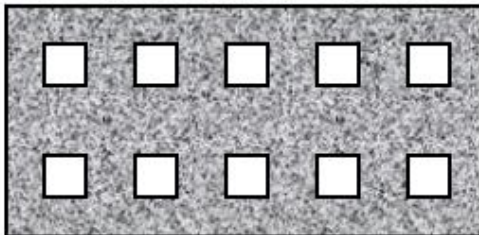




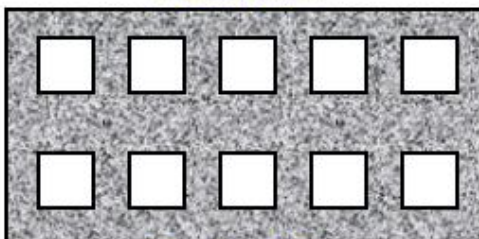
No openings



Opening 10%



Opening 20%



Opening 30%

=> ค่า  $GA^*$  (Equivalent Shear Stiffness for Shearing Mode)

=> ค่า  $EI^*$  (Equivalent Bending Stiffness for Bending Mode)

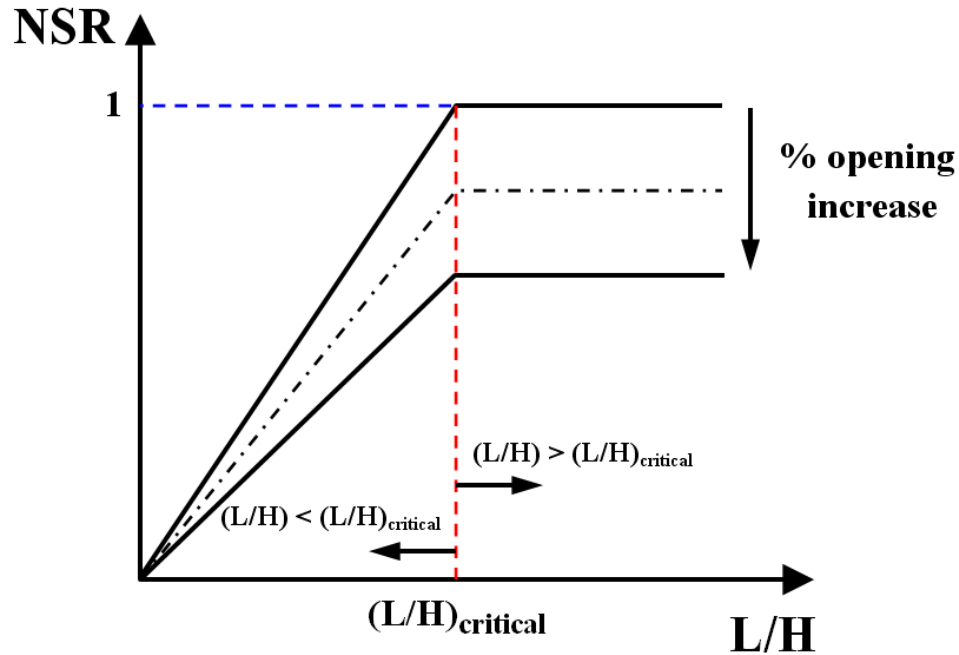
$$K_{plain\ beam} = \frac{P}{\Delta} = \frac{P}{\frac{PL^3}{48EI} + \frac{3PL}{8GA}} = \frac{1}{\frac{L^3}{48EI} + \frac{3L}{8GA}} \Rightarrow Plain\ Beam\ (No\ opening)$$

$$K_{equivalent} = \frac{P}{\Delta} = \frac{P}{\frac{PL^3}{48EI^*} + \frac{3PL}{8GA^*}} = \frac{1}{\frac{L^3}{48EI^*} + \frac{3L}{8GA^*}} \Rightarrow Equivalent\ Beam\ (With\ opening)$$

Normalised Stiffness Ratio ,  $NSR = \frac{K_{equivalent}}{K_{plain\ beam}}$  \*\*\*

รูปจำลองอาคารที่มีขนาดช่องเปิดต่างๆ

# การเปลี่ยนแปลงของค่า Normalised Stiffness Ratio (NSR) ณ ตำแหน่งค่า $(L/H)_{critical}$ และเปอร์เซ็นต์ช่องเปิดของอาคาร



$$\text{Normalised Stiffness Ratio , } NSR = \frac{K_{equivalent}}{K_{plain beam}}$$

$$\frac{NSR}{NSR_{critical}} = \frac{\left(\frac{L}{H}\right)}{\left(\frac{L}{H}\right)_{critical}}$$

$$\frac{NSR}{NSR_{critical}} = \frac{\frac{K_{equivalent}}{K_{plain beam}}}{\frac{K_{critical}}{K_{plain beam}}} = \frac{K_{equivalent}}{K_{critical}}$$

$$\Rightarrow K_{critical} = K_{plain beam} \text{ for } NSR_{critical} \text{ is constant}$$

$$\therefore \frac{K_{equivalent}}{K_{plain beam}} = \frac{\left(\frac{L}{H}\right)}{\left(\frac{L}{H}\right)_{critical}} \quad ***$$

**อ้างอิง : Pickhaver (2006)**

# ปรับแก้ค่า $A^*$ และ $I^*$ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่า Normalised Stiffness Ratio (NSR) ณ ตำแหน่งค่า $(L/H)_{critical}$ ที่แต่ละขนาดอาคาร $(L/H)$

## 1) Only Bending Mode

$$\frac{K_{equivalent}}{K_{plain\ beam}} = \frac{(L/H)}{(L/H)_{critical}}$$

$$\left[ \frac{P}{\left( \frac{PL^3}{48EI^*} \right)} \right] = \frac{(L/H)}{(L/H)_{critical}}$$

$$\left[ \frac{P}{\left( \frac{PL^3}{48EI} \right)} \right] = \frac{(L/H)}{(L/H)_{critical}}$$

$$\Rightarrow \frac{I^*}{I} = \frac{(L/H)}{(L/H)_{critical}}$$

$$\therefore I^* = \frac{(L/H)}{(L/H)_{critical}} \times I \text{ ***}$$

## 2) Only Shearing Mode

$$\frac{K_{equivalent}}{K_{plain\ beam}} = \frac{(L/H)}{(L/H)_{critical}}$$

$$\left[ \frac{P}{\left( \frac{3PL}{8GA^*} \right)} \right] = \frac{(L/H)}{(L/H)_{critical}}$$

$$\left[ \frac{P}{\left( \frac{3PL}{8GA} \right)} \right] = \frac{(L/H)}{(L/H)_{critical}}$$

$$\Rightarrow \frac{A^*}{A} = \frac{(L/H)}{(L/H)_{critical}}$$

$$\therefore A^* = \frac{(L/H)}{(L/H)_{critical}} \times A \text{ ***}$$

## กรณีที่ 1 : $L/H < (L/H)_{critical}$

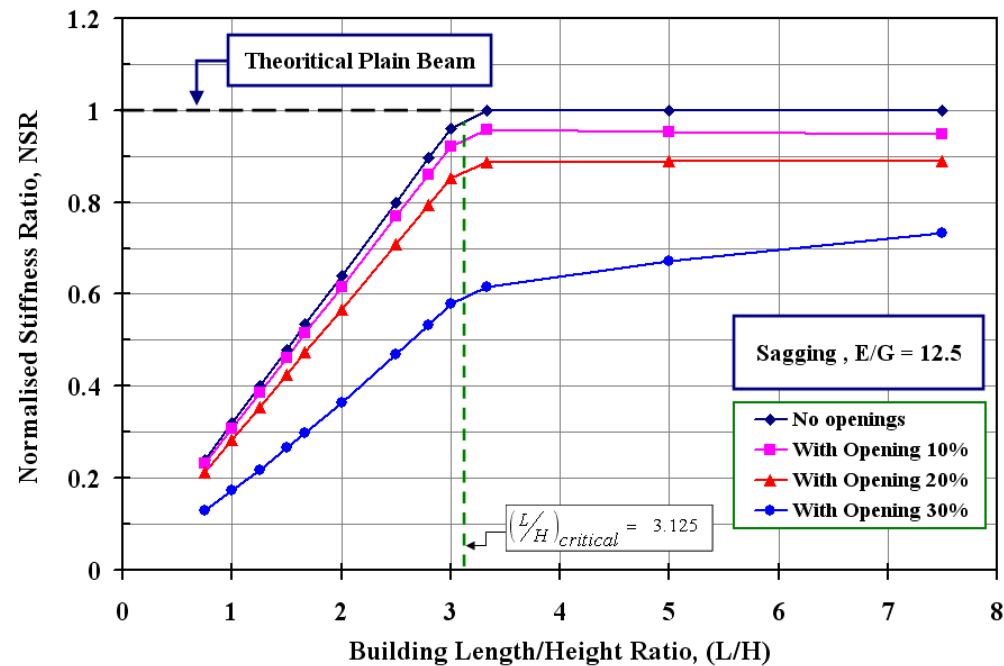
$$A^* = \frac{(L/H)}{(L/H)_{critical}} \times \frac{L}{\sum_{i=1}^m \left( \frac{L_i}{t.H - (A_{opening})_i} \right)}$$

$$I^* = \frac{(L/H)}{(L/H)_{critical}} \times \sum_{j=1}^n \left[ \frac{1}{12} xt \cdot \left\{ \frac{(L.h_j - (A_{opening})_j)}{L} \right\}^3 + t \cdot \frac{(L.h_j - (A_{opening})_j)}{L} \cdot \lambda_j^2 \right]$$

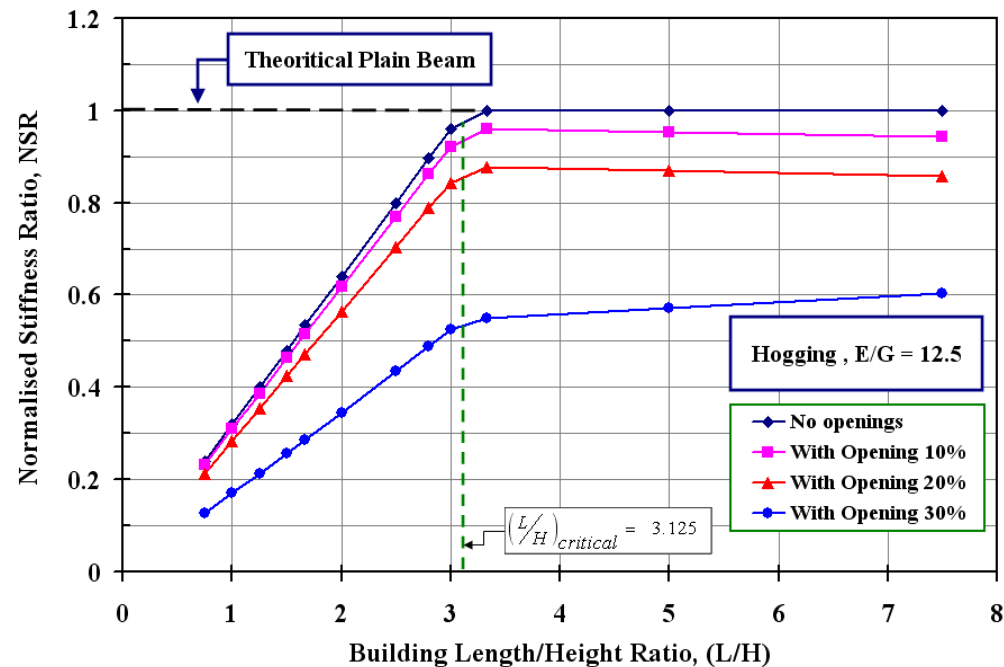
## กรณีที่ 2 : $L/H > (L/H)_{critical}$

$$A^* = A = \frac{L}{\sum_{i=1}^m \left( \frac{L_i}{t.H - (A_{opening})_i} \right)}$$

$$I^* = I = \sum_{j=1}^n \left[ \frac{1}{12} xt \cdot \left\{ \frac{(L.h_j - (A_{opening})_j)}{L} \right\}^3 + t \cdot \frac{(L.h_j - (A_{opening})_j)}{L} \cdot \lambda_j^2 \right]$$



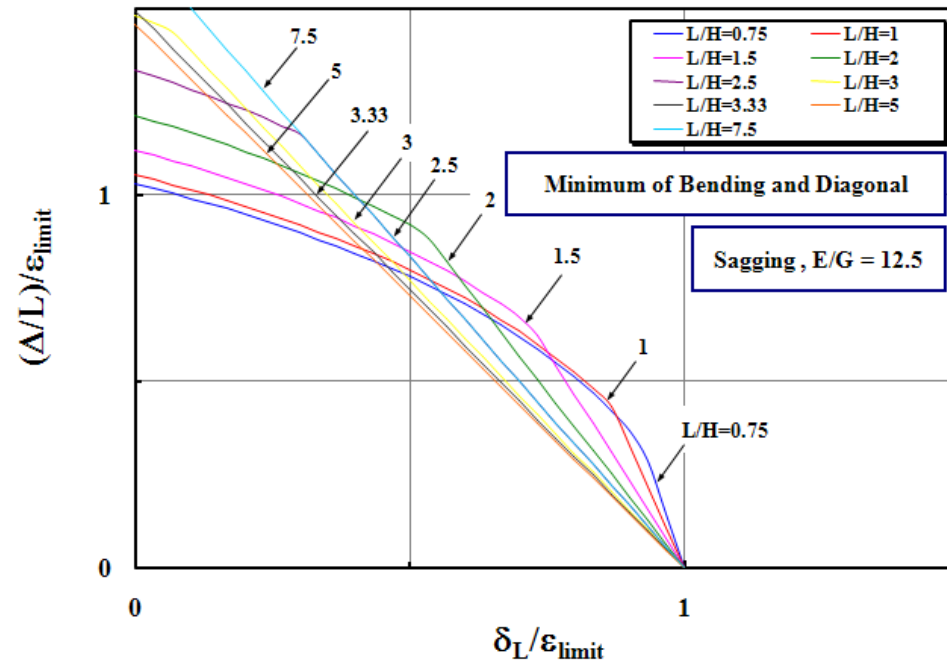
ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalised Stiffness Ratio (NSR) กับ ขนาดอาคาร (L/H) ในช่วง “Sagging Zone”



ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalised Stiffness Ratio (NSR) กับ ขนาดอาคาร (L/H) ในช่วง “Hogging Zone”

## ความสัมพันธ์ระหว่าง $(\Delta/L)/\epsilon_{limit}$ กับ $\delta_L/\epsilon_{limit}$ ที่แต่ละขนาดอาคาร (L/H)

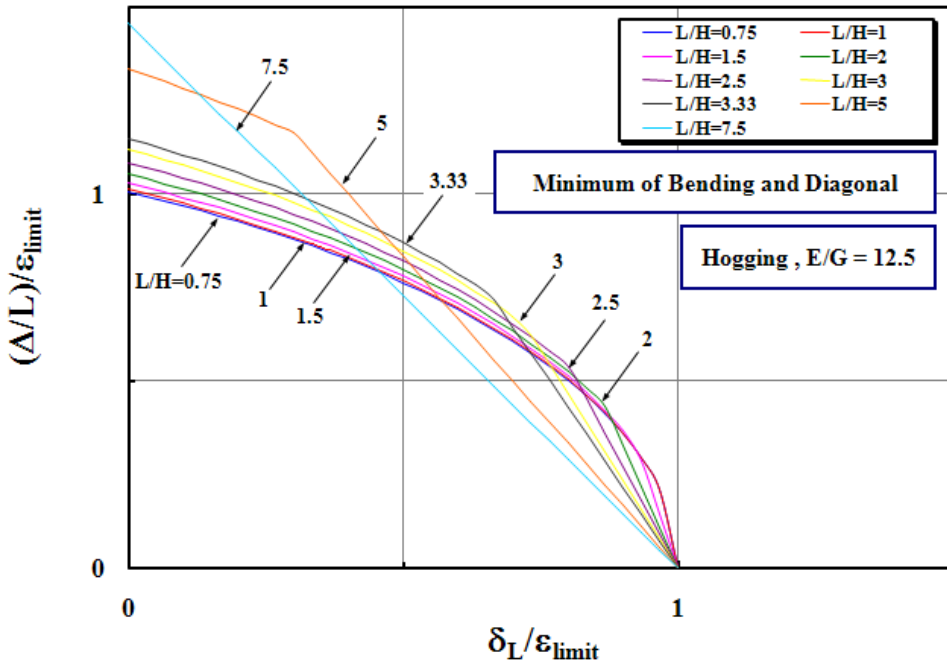
<< กรณีอาคารไม่มีช่องเปิด >>



*Sagging* ( $\lambda = H/2$ )

$$C_s = 1 + \frac{2}{3} \left( \frac{G}{E} \right) \left( \frac{L}{H} \right)^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta}{L \epsilon_{limit}} = C_s \sqrt{\left( 1 + \nu \frac{\delta_L}{\epsilon_{limit}} \right) \left( 1 - \frac{\delta_L}{\epsilon_{limit}} \right)}$$

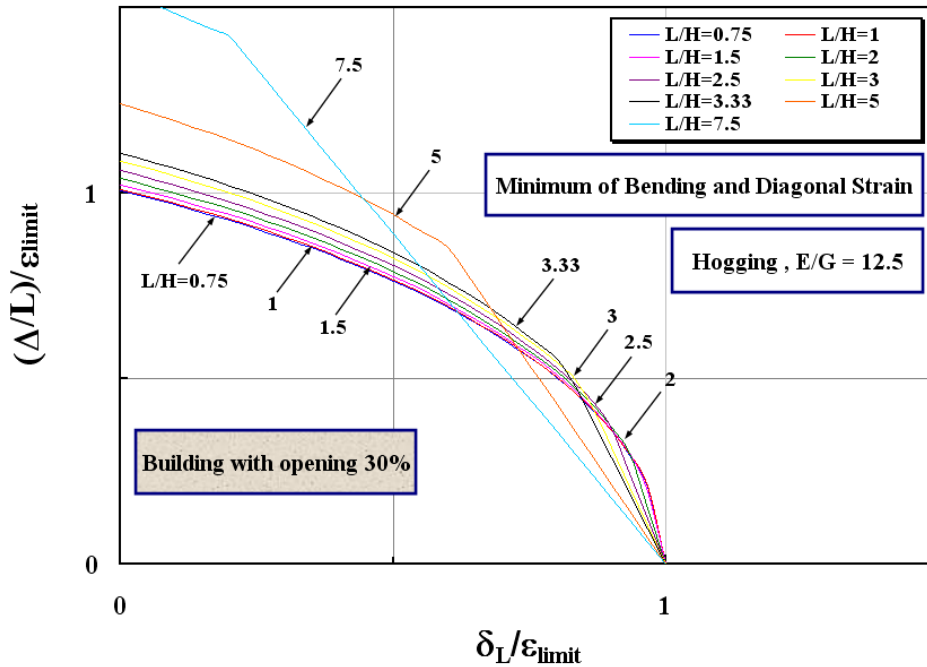
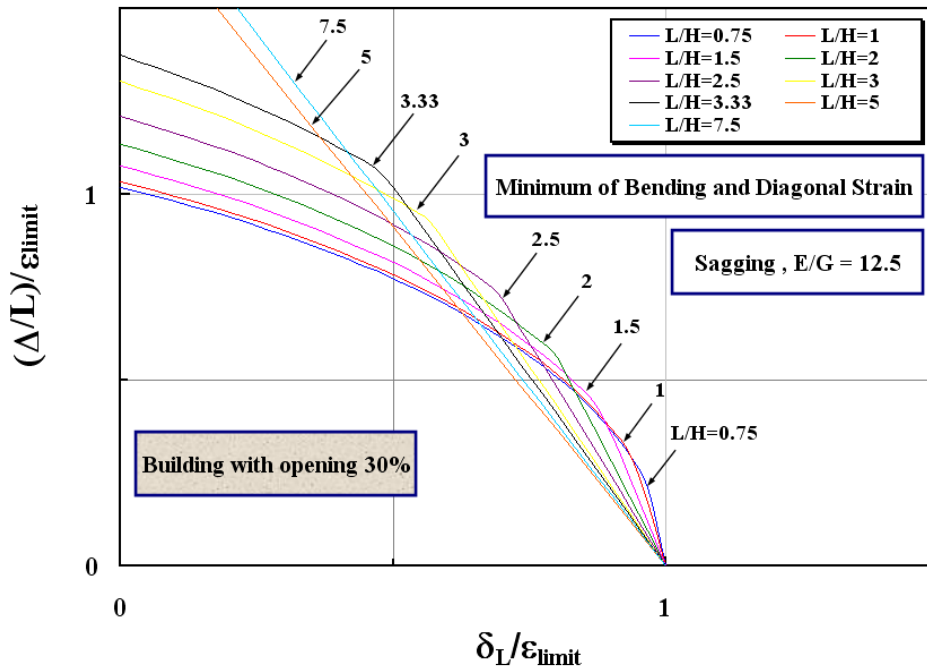
$$C_b = \frac{1}{6} \left( \frac{L}{H} \right) + \frac{1}{4} \left( \frac{E}{G} \right) \left( \frac{H}{L} \right) \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta}{L \epsilon_{limit}} = C_b \left( 1 - \frac{\delta_L}{\epsilon_{limit}} \right)$$



*Hogging* ( $\lambda = H$ )

$$C_s = 1 + \frac{1}{6} \left( \frac{G}{E} \right) \left( \frac{L}{H} \right)^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta}{L \epsilon_{limit}} = C_s \sqrt{\left( 1 + \nu \frac{\delta_L}{\epsilon_{limit}} \right) \left( 1 - \frac{\delta_L}{\epsilon_{limit}} \right)}$$

$$C_b = \frac{1}{12} \left( \frac{L}{H} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{E}{G} \right) \left( \frac{H}{L} \right) \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta}{L \epsilon_{limit}} = C_b \left( 1 - \frac{\delta_L}{\epsilon_{limit}} \right)$$



ความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\Delta/L)/\epsilon_{limit}$  กับ  $\delta_L/\epsilon_{limit}$  ที่แต่ละขนาดอาคาร (L/H)

<< กรณีอาคารมีช่องเปิด 30% >>

Sagging ( $\lambda = H/2$ )

$$C_s = 1 + \frac{L^2 A^*}{18I^*} \left( \frac{G}{E} \right) \Rightarrow \frac{\Delta}{\epsilon_{limit} L} = C_s \sqrt{\left( 1 + \nu \frac{\delta_L}{\epsilon_{limit}} \right) \left( 1 - \frac{\delta_L}{\epsilon_{limit}} \right)}$$

$$C_b = \frac{L}{6H} + \frac{3I^*}{HLA^*} \left( \frac{E}{G} \right) \Rightarrow \frac{\Delta}{\epsilon_{limit} L} = C_b \left( 1 - \frac{\delta_L}{\epsilon_{limit}} \right)$$

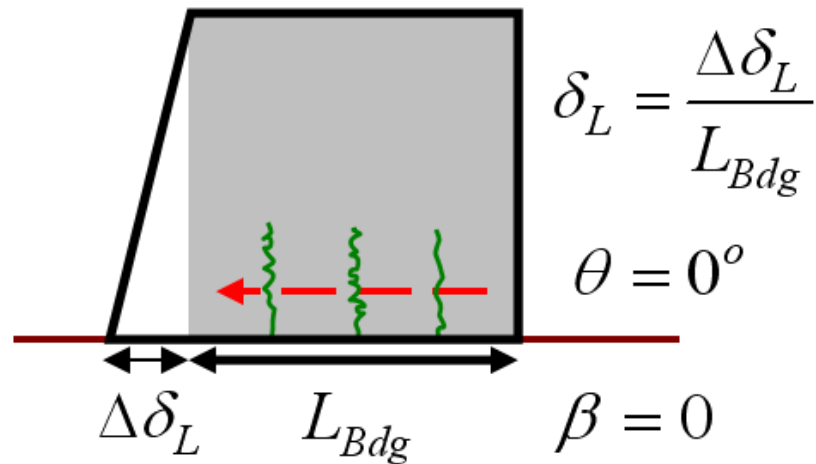
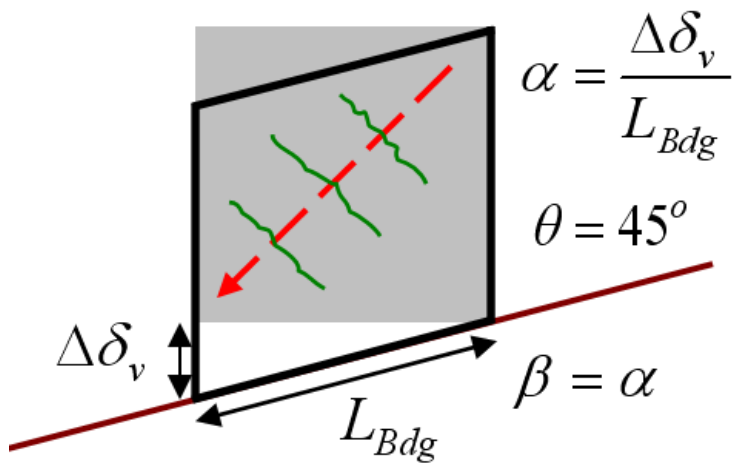
Hogging ( $\lambda = H$ )

$$C_s = 1 + \frac{L^2 A^*}{18I^*} \left( \frac{G}{E} \right) \Rightarrow \frac{\Delta}{\epsilon_{limit} L} = C_s \sqrt{\left( 1 + \nu \frac{\delta_L}{\epsilon_{limit}} \right) \left( 1 - \frac{\delta_L}{\epsilon_{limit}} \right)}$$

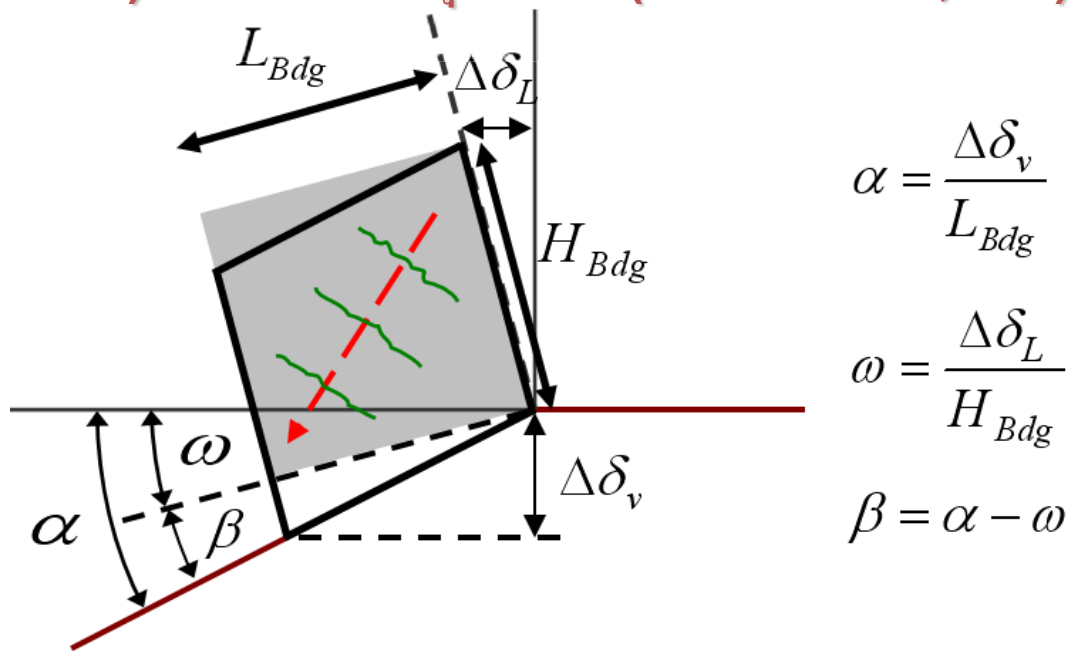
$$C_b = \frac{L}{12H} + \frac{3I^*}{2HLA^*} \left( \frac{E}{G} \right) \Rightarrow \frac{\Delta}{\epsilon_{limit} L} = C_b \left( 1 - \frac{\delta_L}{\epsilon_{limit}} \right)$$

### 3) การเอียงตัวของอาคาร (Angular Distortion)

- วิเคราะห์พฤติกรรมการเอียงตัวของอาคาร สัมพันธ์กับค่าทรุดตัวของอาคาร
- กำหนดระดับความเสียหายของอาคาร กรณีพิจารณาการเอียงตัวของอาคาร
- เสนอกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า *Angular Distortion*,  $\beta$  กับค่า *Deflection Ratio*,  $\Delta/L$  เพื่อประเมินระดับความเสียหายของอาคารของอาคาร



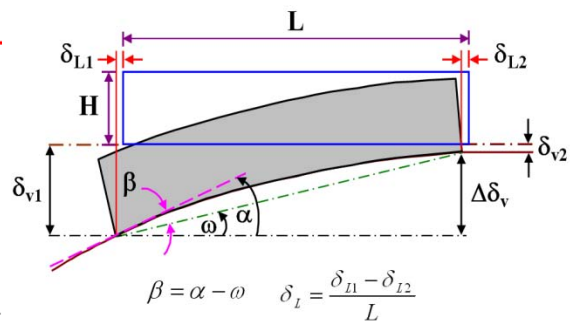
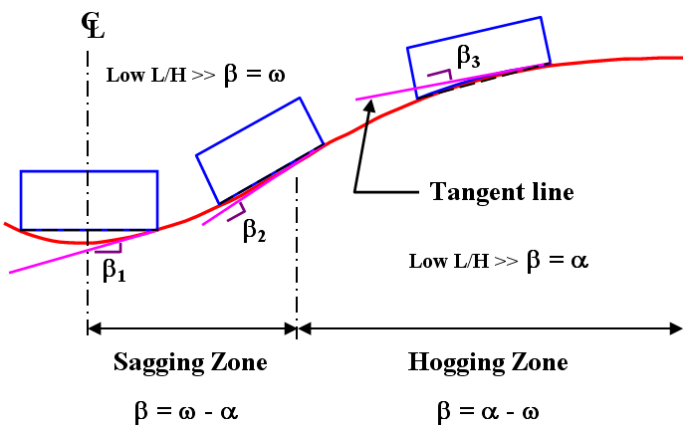
**a) กรณีอาคารไม่หมุนเอียงตัว (No Tilt Effect,  $\omega=0$ )**



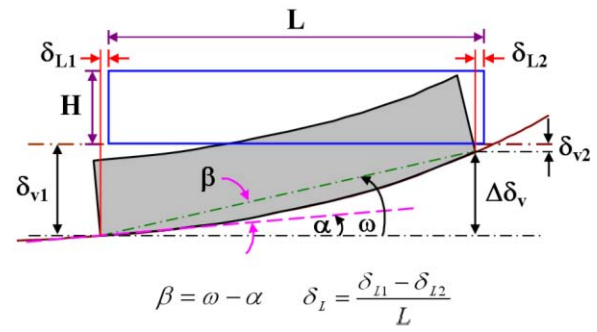
**b) กรณีอาคารหมุนเอียงตัว (Tilt Effect,  $\omega>0$ )**

พฤติกรรมทรุดตัวและหมุนเอียงตัวของอาคาร





(a) **Hogging**



(b) **Sagging**

การทรุดตัวและหมุนเอียงตัวของอาคาร

รูปแบบการวิเคราะห์การทรุดตัว การหมุนเอียงตัว และเคลื่อนตัวในแนวราบของอาคาร

$$\alpha = \frac{\Delta\delta_v}{L_{Bdg}}$$

$\alpha$  = ค่าความชันของดินทรุดตัว (Slope)

$$\omega = \frac{\Delta\delta_L}{H_{Bdg}}$$

$\omega$  = ค่าความชันของการหมุนเอียงตัวของอาคารจากแนวตั้ง (Tilt)

$$\beta = |\alpha - \omega|$$

$\beta$  = ค่าความชันเอียงตัวระหว่างฐานอาคารที่ทรุดตัวกับแนวเส้นทรุดตัว (Angular Distortion)

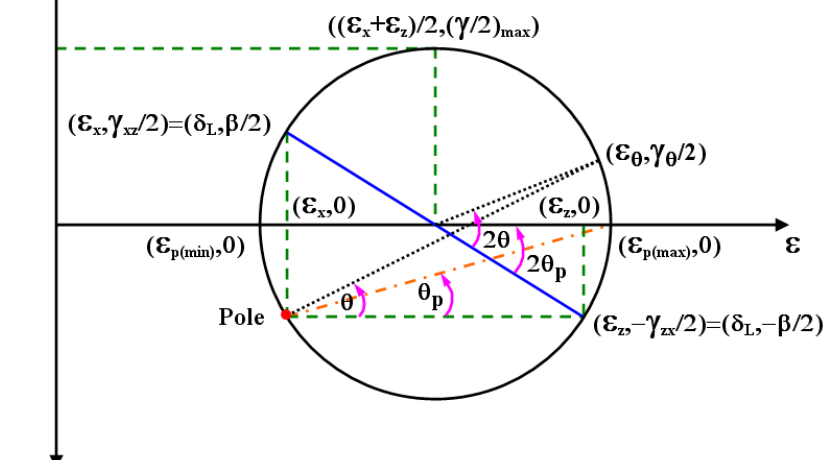
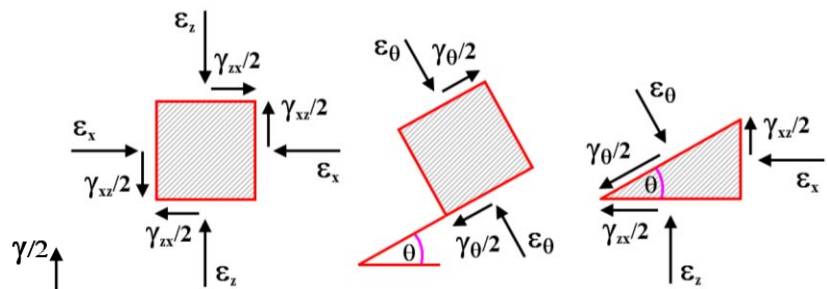
$\theta$  = ค่ามุมของรอย Crack เทียบกับแนวตั้ง

$$\tan(2\theta) = \frac{\beta}{\delta_L}$$

$\delta_L$  = Horizontal Strain

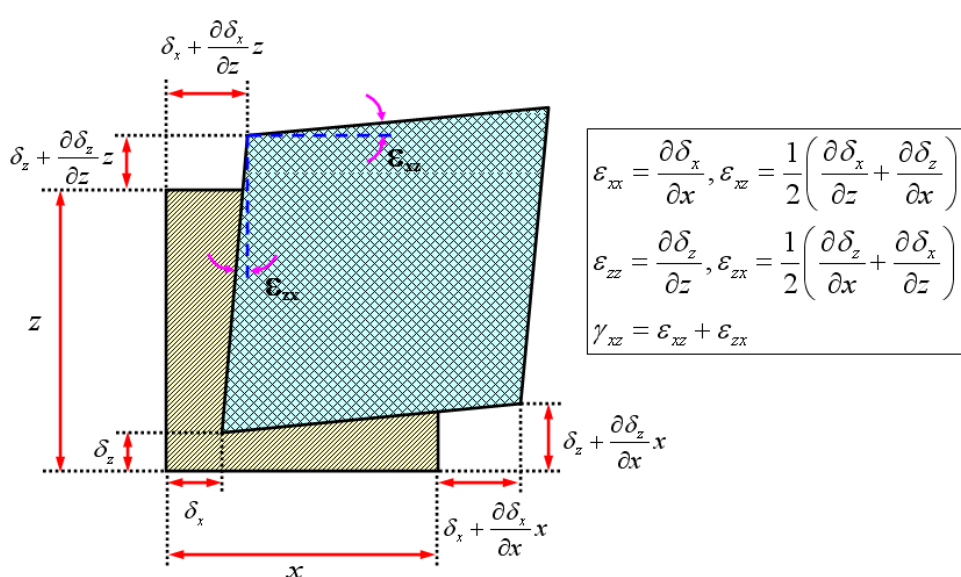
$\epsilon_p$  = Maximum Principal Tensile Strain

$$\epsilon_p = \delta_L \cos^2 \theta + \beta \sin \theta \cos \theta$$



**Mohr's Circle of Strain**

**Strain in rotated of coordinate system**

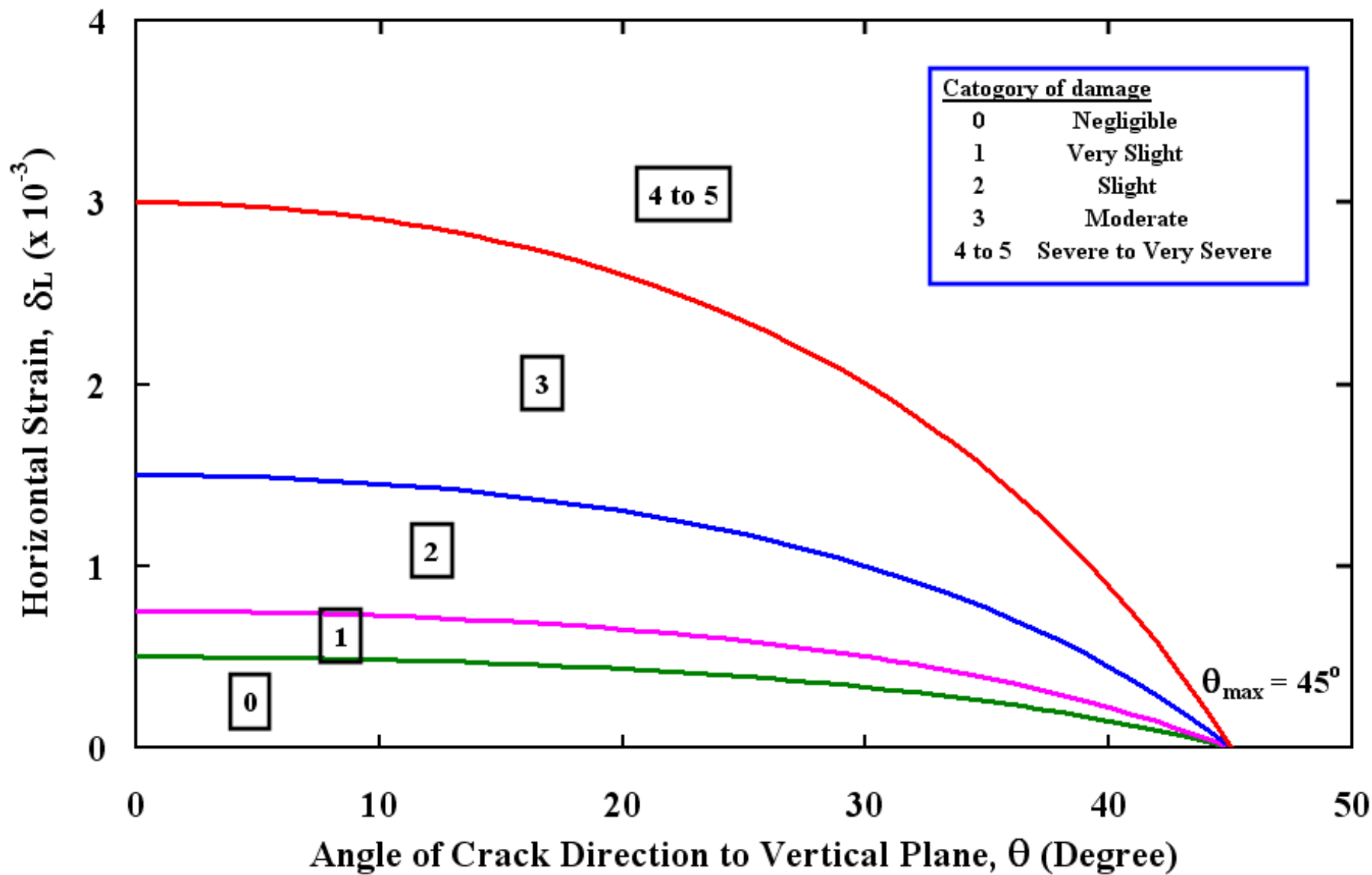


$$\begin{aligned} \epsilon_{xx} &= \frac{\partial \delta_x}{\partial x}, \epsilon_{zz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \delta_x}{\partial z} + \frac{\partial \delta_z}{\partial x} \right) \\ \epsilon_{zz} &= \frac{\partial \delta_z}{\partial z}, \epsilon_{zx} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \delta_z}{\partial x} + \frac{\partial \delta_x}{\partial z} \right) \\ \gamma_{xz} &= \epsilon_{xz} + \epsilon_{zx} \end{aligned}$$

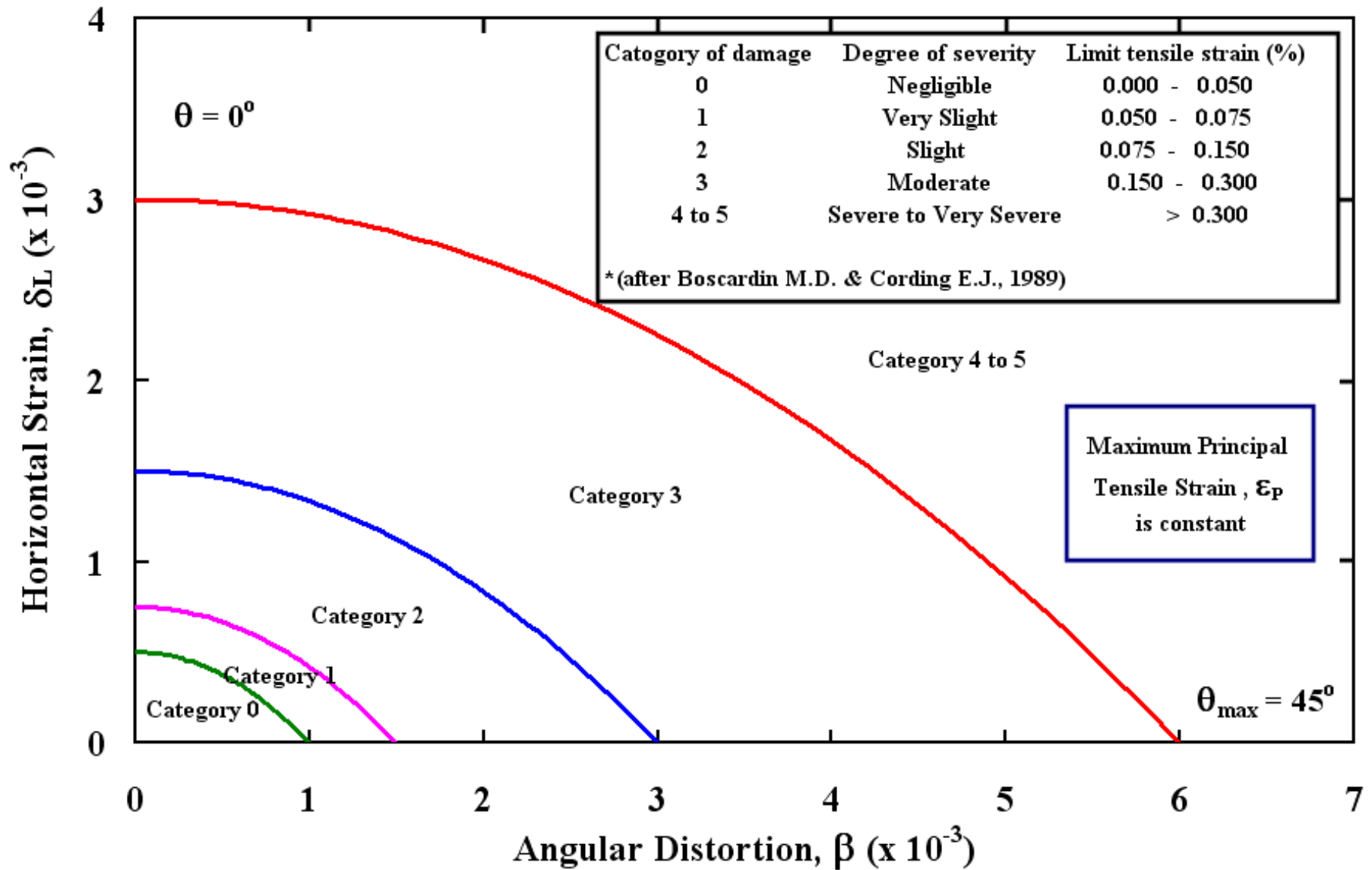
**Strain based on Theory of Elasticity**

$$\begin{aligned} \epsilon_\theta &= \frac{(\epsilon_x + \epsilon_z)}{2} + \frac{(\epsilon_x - \epsilon_z)}{2} \cos 2\theta + \epsilon_{xz} \sin 2\theta; \gamma_{xz} = \epsilon_{xz} + \epsilon_{zx} = 2\epsilon_{xz}; \epsilon_{xz} = \gamma_{xz}/2 \\ \epsilon_\theta &= \frac{(\epsilon_x + \epsilon_z)}{2} + \frac{(\epsilon_x - \epsilon_z)}{2} \cos 2\theta + \frac{\gamma_{xz}}{2} \sin 2\theta; \epsilon_x = \delta_L, \epsilon_z = \epsilon_V = 0 \\ \epsilon_p &= \frac{(\delta_L + 0)}{2} + \frac{(\delta_L - 0)}{2} \cos 2\theta + \frac{\beta}{2} \sin 2\theta; \gamma_{xz} = 2\epsilon_{xz} = \frac{\partial \delta_z}{\partial x} \pm \frac{\partial \delta_x}{\partial z} = \frac{\Delta \delta_V}{L} \pm \frac{\Delta \delta_L}{H} = \alpha \pm \omega = \beta \\ \epsilon_p &= \frac{\delta_L}{2} (1 + \cos 2\theta) + \frac{\beta}{2} (2 \sin \theta \cos \theta); \cos 2\theta = \cos^2 \theta - \sin^2 \theta = 2 \cos^2 \theta - 1 \\ \epsilon_p &= \frac{\delta_L}{2} (2 \cos^2 \theta) + \beta \sin \theta \cos \theta; 1 + \cos 2\theta = 2 \cos^2 \theta \\ \epsilon_p &= \delta_L \cos^2 \theta + \beta \sin \theta \cos \theta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma_\theta &= \frac{(\epsilon_x - \epsilon_z)}{2} \sin 2\theta - \epsilon_{xz} \cos 2\theta; \epsilon_{xz} = \gamma_{xz}/2 \\ \gamma_\theta &= \frac{(\epsilon_x - \epsilon_z)}{2} \sin 2\theta - \frac{\gamma_{xz}}{2} \cos 2\theta \\ \frac{(\epsilon_x - \epsilon_z)}{2} \sin 2\theta &= \frac{\gamma_{xz}}{2} \cos 2\theta; \gamma_\theta = 0 \\ \tan(2\theta) &= \frac{\gamma_{xz}/2}{\frac{1}{2}(\epsilon_x - \epsilon_z)} = \frac{\beta/2}{\frac{1}{2}(\delta_L - 0)} \\ \tan(2\theta) &= \frac{\beta}{\delta_L} \end{aligned}$$



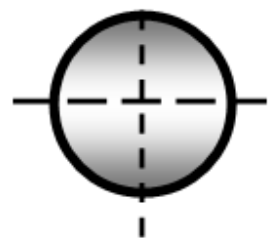
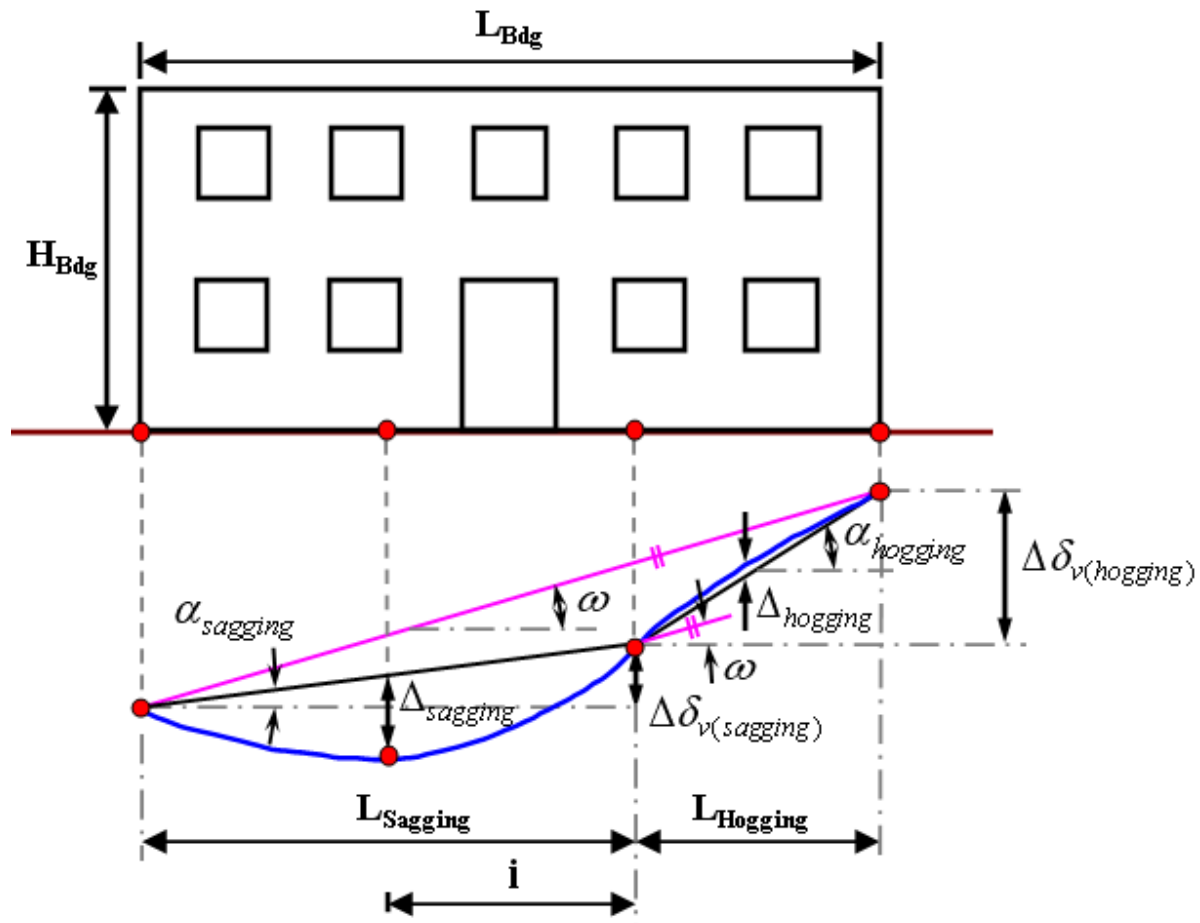
ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเครียดในแนวราบ ( $\delta_L$ ) กับ มุมเฉียงรอย Crack เทียบกับแนวตั้ง ( $\theta$ )



$$\beta = 0, \delta_L = \epsilon_p (\theta = 0^\circ)$$

$$\delta_L = 0, \beta = 2\epsilon_p (\theta_{\max} = 45^\circ)$$

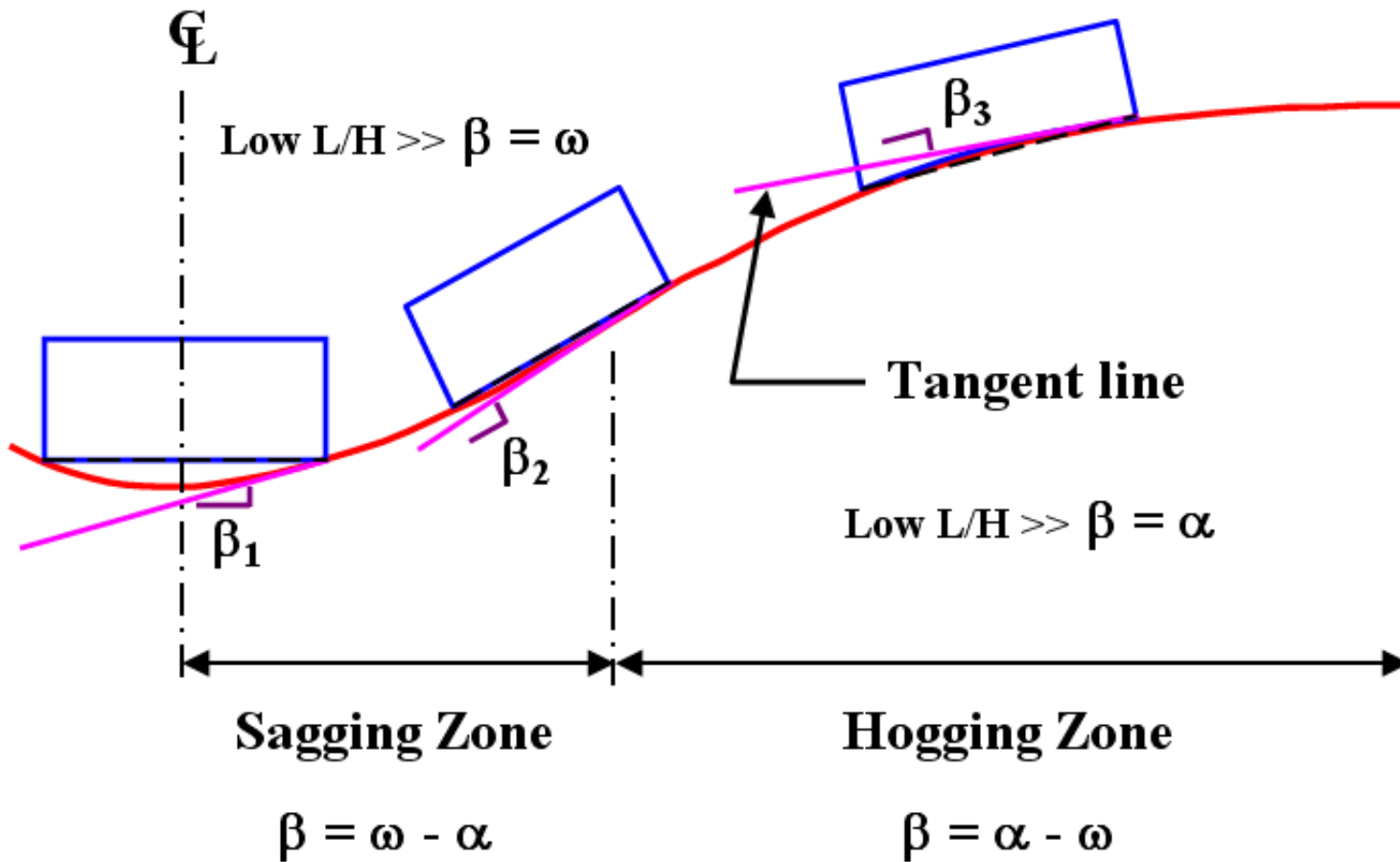
ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเครียดในแนวราบ ( $\delta_L$ ) กับ มุมเอียงของฐานอาคาร ( $\beta$ )



$$\left. \begin{aligned} \beta_{sagging} &= \omega - \alpha_{sagging} \\ \beta_{hogging} &= \alpha_{hogging} - \omega \end{aligned} \right\} \beta = |\alpha - \omega|$$

— Vertical Movement of Soil Surface

การตรวจวัดค่าทรุดตัวและเอียงตัวที่ฐานของอาคาร



**การทรุดตัวและหมุนเอียงตัวของอาคาร**

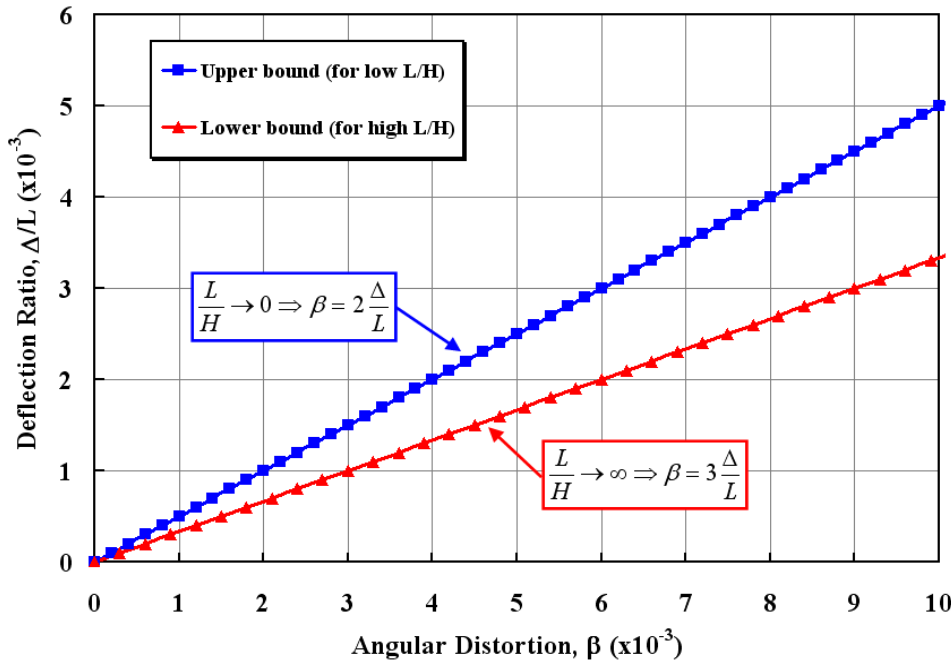
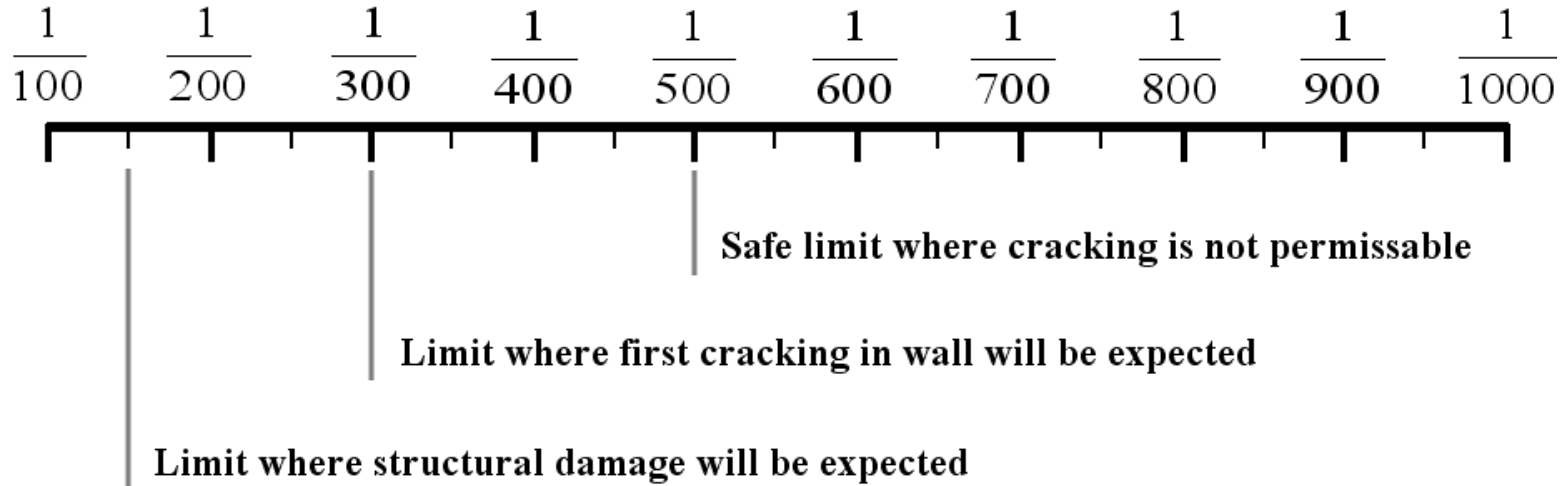
$$\frac{\beta}{\Delta/L} = 3 \left[ \frac{1+12 \left( \frac{E}{G} \right) \cdot \left( \frac{I^*}{L^2 A^*} \right)}{1+18 \left( \frac{E}{G} \right) \cdot \left( \frac{I^*}{L^2 A^*} \right)} \right] \text{***}$$

$\alpha$  = ค่าความชันของดินทรุดตัว (Slope)

$\omega$  = ค่าความชันของการหมุนเอียงตัวของอาคารจากแนวตั้ง (Tilt)

$\beta$  = ค่าความชันเอียงตัวระหว่างฐานอาคารที่ทรุดตัว  
กับแนวเส้นทรุดตัว (Angular Distortion)

# Angular Distortion

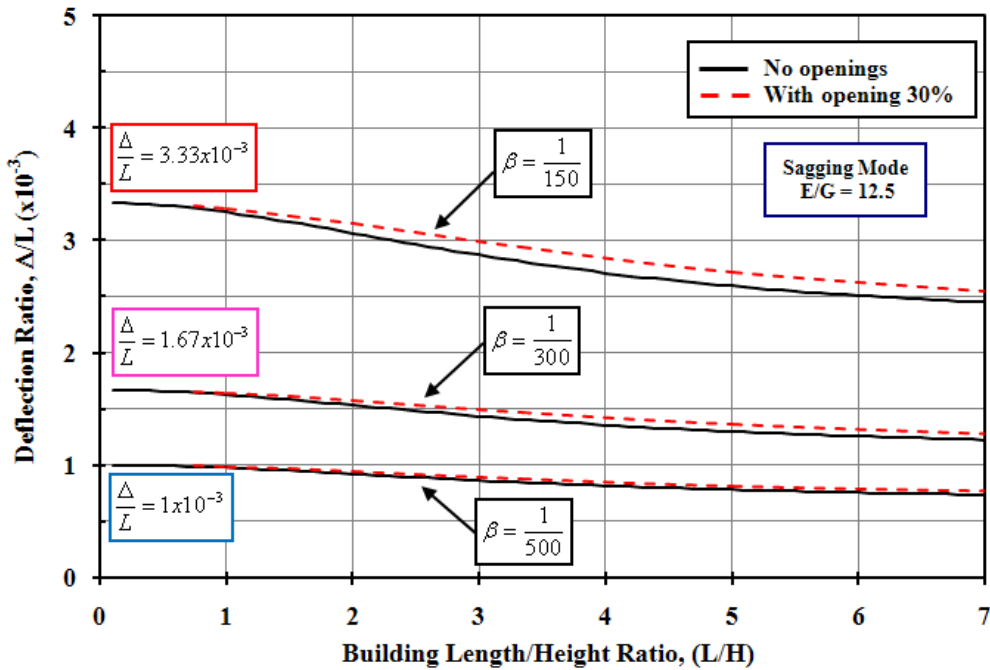


**Rankine (1988) เสนอแนะ :**

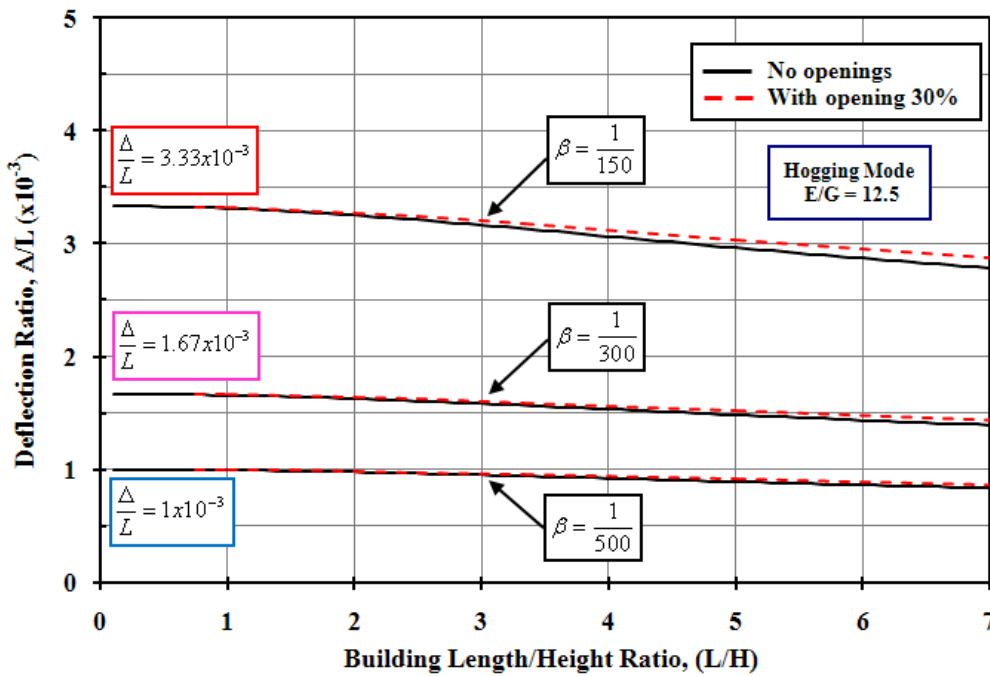
$\beta = 1/500 \Rightarrow$  No crack

$\beta = 1/300 \Rightarrow$  First crack in walls

$\beta = 1/150 \Rightarrow$  Structure is damaged



ความสัมพันธ์ระหว่าง ( $\Delta/L$ ) กับ  $\beta$  ที่แต่ละขนาดอาคาร (L/H)



<กรณีอาคารไม่มีช่องเปิดและมีช่องเปิด 30%>



## การจำแนกระดับความเสียหายของอาคาร เทียบกับค่าความเครียดวิกฤติ

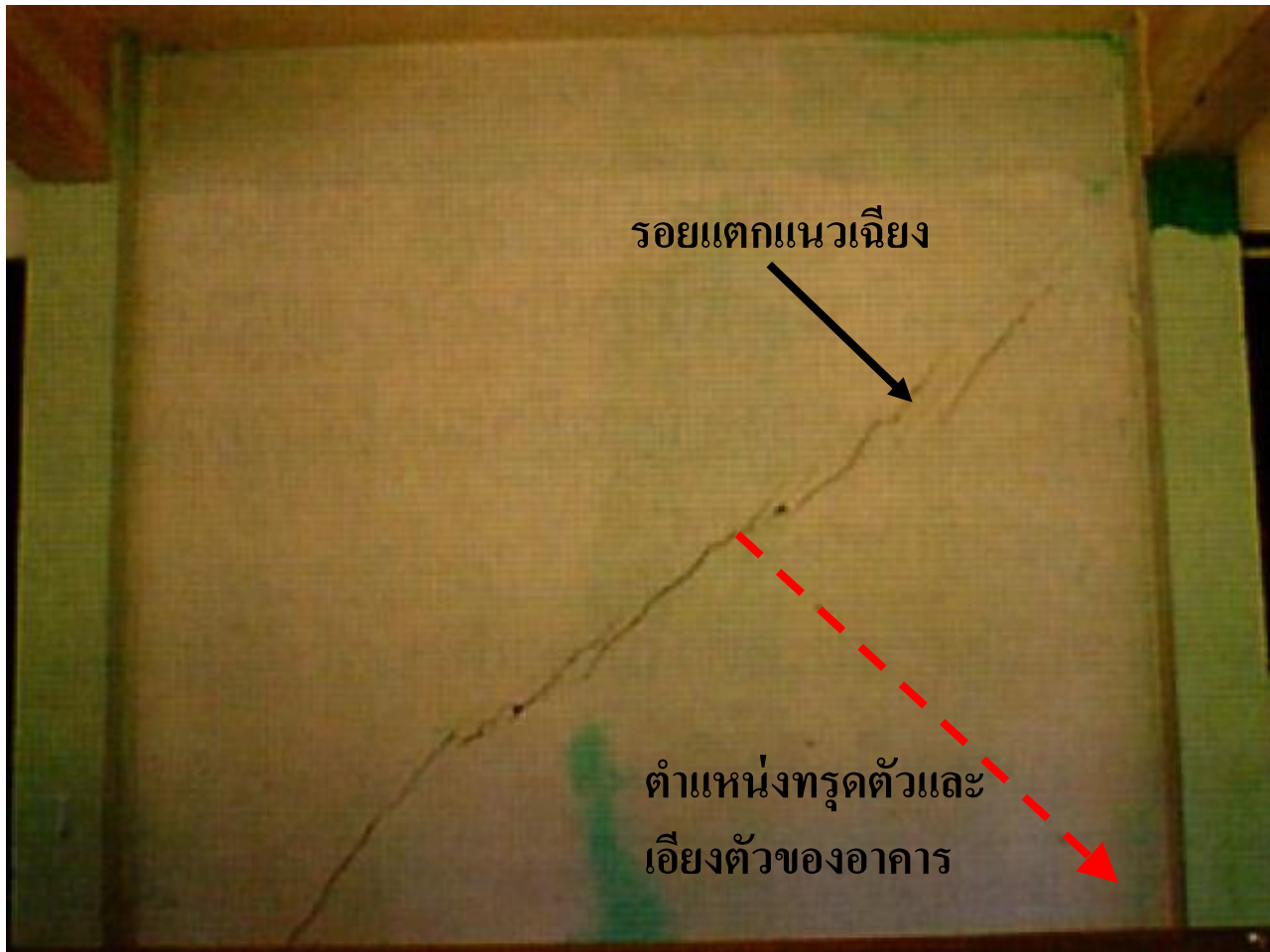
Degree of Damage	Description of typical damage	Approximate crack width (mm)	Limiting tensile strain (%)
0 Negligible	Hairline cracks of less than about 0.1mm are classed as negligible	< 0.1	0.0 – 0.05
1 Very slight	Fine cracks which can easily be treated during normal decoration	1	0.05 – 0.075
2 Slight	Cracks easily filled. Re-decoration probably required. Some repointing may be required externally	5	0.075 – 0.15
3 Moderate	The cracks require some opening up and can be patched by a mason. Recurrent cracks can be masked by suitable linings. Repointing of external brickwork and possibly a small amount of brickwork to be replaced.	5 – 15 or a number of cracks > 3	0.15 – 0.3
4 Severe	Extensive repair work involving breaking-out and replacing sections of walls, especially over doors and windows.	15 – 25 but depends on number of cracks	>0.3
5 Very severe	This requires a major repair job involving partial or complete rebuilding.	> 25 but depends on number of cracks	

กำหนดแนวทางแก้ไข

เมื่อคำนวณหาค่าความเครียด ( $\epsilon_{br}$  และ  $\epsilon_{dr}$ ) หรือความเครียดวิกฤติ ( $\epsilon_p$ ) แล้ว จะนำค่าเหล่านี้

เปรียบเทียบกับ Limit Tensile Strain เพื่อพิจารณาระดับความเสียหายของอาคาร

## รูปลักษณะการเกิดรอยแตกแนวเฉียง จากอาคารทรุดตัวไม่เท่ากัน



**Reference :** ชเนต วีระศิริ (2548). “ประสบการณ์งานแก้ไขอาคารทรุดและยกอาคาร”, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.

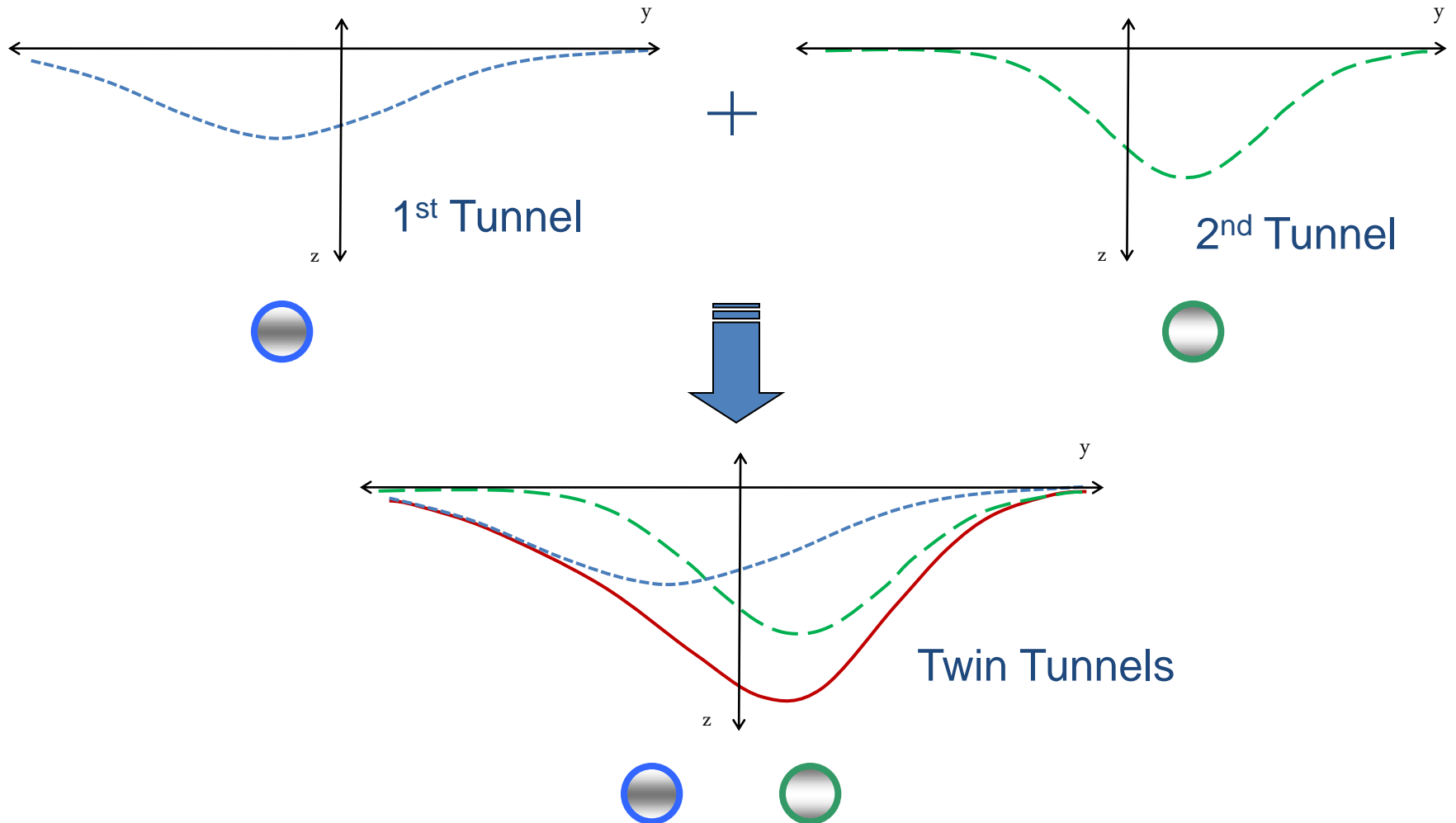
กรุงเทพฯ, พิมพ์ครั้งที่ 2.

## ข้อสำคัญของการวิเคราะห์ความเครียดแรงดึงของอาคารจากงานขุดเจาะอุโมงค์

- 1) การเคลื่อนตัวในแนวตั้งและแนวราบที่ฐานอาคารตลอดความยาวของอาคาร เท่ากับการเคลื่อนตัวทั้งในแนวตั้งและแนวราบตามแนวเส้น Gaussian Curve จากงานขุดเจาะอุโมงค์
- 2) การคำนวณหาค่าความเครียดแรงดึงสูงสุดนั้น พิจารณาคุณสมบัติโครงสร้างเป็น Isotropic Elastic เท่านั้น ซึ่งไม่คำนึงถึงน้ำหนักของอาคารที่กดทับบนผิวดิน และกำหนดค่า “ $E/G = 12.5$ ” เท่ากันตลอดโครงสร้าง
- 3) ปรับแก้ค่า  $I^*$  และ  $A^*$  เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่า NSR ของอาคาร ที่  $(L/H)_{critical}$  และค่า NSR จะลดลง เมื่อเปอร์เซ็นต์ช่องเปิดของอาคารเพิ่มขึ้น สำหรับทุกขนาดอาคาร ส่งผลให้ “ค่า  $\Delta/L$  เพิ่มขึ้นสำหรับพฤติกรรมรับแรงเฉือน” และ “ค่า  $\Delta/L$  ลดลงสำหรับพฤติกรรมรับโมเมนต์แรงดัด”
- 4) วิธีการดังกล่าวสำหรับการประเมินระดับความเสียหายของอาคาร เนื่องจากผลกระทบจากงานขุดเจาะอุโมงค์เดี่ยว เท่านั้น ถ้ากรณีขุดเจาะอุโมงค์คู่ แนวเส้นการทรุดตัวของดินจะไม่สมมาตร ซึ่งหาแนวการทรุดตัวของดิน จากวิธี “*Superposition Curve Technique*” (From Suwansawat and Einstein, 2007)
- 5) การนำเสนอบทความนี้ “ไม่สามารถใช้ได้กับการคำนวณหาค่า  $\Delta/L$  ของอาคาร จากงานขุดเปิดหน้าดินในบริเวณใกล้เคียงกับอาคาร” แต่ทั้งนี้หลักการวิเคราะห์ค่าความเครียดแรงดึงของอาคารจะเหมือนกัน

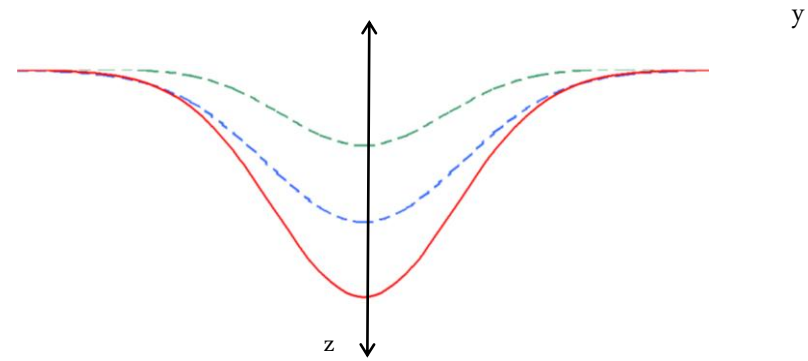
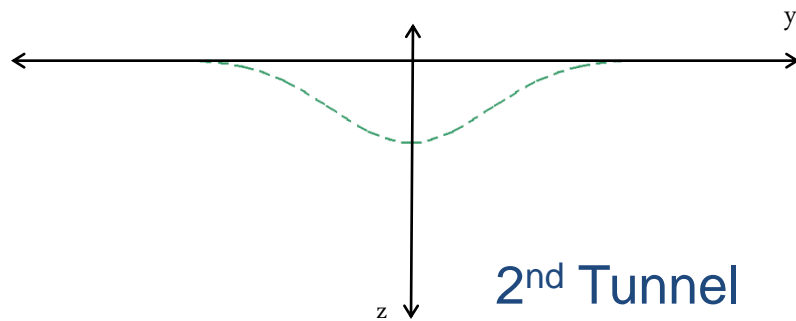
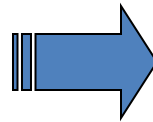
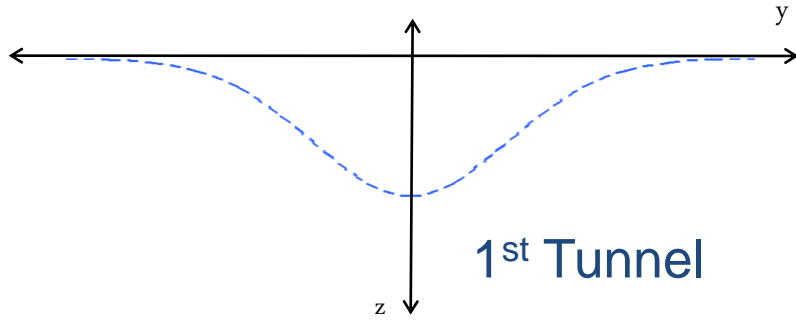
# วิธีทับซ้อนกราฟ (Superposition Curve Technique)

## 1) อุโมงค์คู่ขนาน (Twin Tunnels)



แนวเส้นการทรุดตัว กรณีขุดเจาะอุโมงค์คู่ขนาน (Twin Tunnels) มีลักษณะไม่สมมาตร

## 2) อุโมงค์ค้ำแนวตั้ง (Vertical Stack Tunnels)



Vertical Stack Tunnels

แนวเส้นการทอตัว กรณีขุดเจาะอุโมงค์ค้ำแนวตั้ง (Vertical Stack Tunnels) มีลักษณะสมมาตร

## สรุป

การประเมินความเสียหายของอาคาร จากการวิเคราะห์แนวเส้นการทรุดตัวของดิน จาก Gaussian Curve ได้ฐานอาคาร หรือ จากการตรวจวัดการเคลื่อนตัวและเอียงตัวที่แต่ละมุมของอาคาร เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความเครียดแรงดึงที่เกิดขึ้นกับอาคาร แล้วพิจารณาเปรียบเทียบกับค่า Limit Tensile Strain หรือค่า Angular Distortion ที่กำหนด เพื่อประเมินระดับความเสียหายของอาคาร

ทั้งนี้ การเคลื่อนตัวที่ผิวดินจากงานขุดเจาะอุโมงค์ ซึ่งทำให้เกิดความเครียดแรงดึงของอาคาร จะต้องถูกควบคุมมิให้ความเครียดแรงดึงเกิน 0.15 % นั่นคือ ไม่เกินระดับ 2 หรือระดับความเสียหายเล็กน้อย