

การประเมินระดับความเสียหายของอาคารข้างเคียงในพื้นที่ที่ทรุดตัวจากงานขุดเจาะอุโมงค์
Assessment of Adjacent Building Damage Categories in Influenced Zone due
to Tunnel Excavation

นายชินวุฒิ ชาญฉายา
Mr. Chinawut Chanchaya

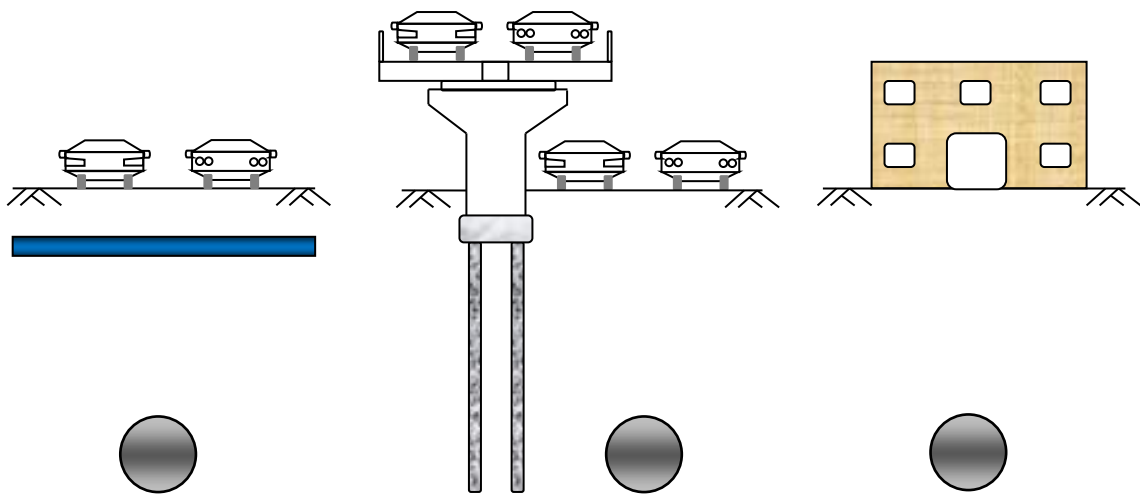
บทคัดย่อ

งานก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินโดยเฉพาะในเขตชุมชนเมืองนั้น อาคารสิ่งปลูกสร้างทั้งบนดินและใต้ดินที่อยู่ใกล้เคียง บริเวณพื้นที่ก่อสร้างอาจได้รับผลกระทบเกิดความเสียหายต่อโครงสร้างอาคารได้ จึงจำเป็นต้องทำการสำรวจ เบื้องต้น และประเมินสภาพของโครงสร้างอาคารที่อยู่ในพื้นที่บริเวณคาดว่าจะได้รับผลกระทบจากการเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากงานขุดเจาะอุโมงค์ แล้ววิเคราะห์ความเสียหายของอาคาร เทียบกับเกณฑ์จำแนกระดับความเสียหายของอาคาร เพื่อหามาตรการป้องกันและลดความเสี่ยงต่อความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอาคาร การประเมินระดับความเสียหายของอาคารจะพิจารณาค่าการเคลื่อนตัวที่ผิวดินบริเวณตำแหน่งฐานของอาคารใน บริเวณพื้นที่ที่ทรุดตัว เพื่อหาค่าความเครียดแรงดึงในแนวราบของอาคาร และค่าความชันเอียงตัวของอาคาร กรณีอาคารที่มีช่องเปิดและไม่มีช่องเปิด ขนาดอัตราส่วนความยาวต่อความสูง และค่า Stiffness แตกต่างกัน โดยเสนอการคำนวณค่า “*Normalised Stiffness Ratio (NSR)*” ในโซน Sagging และโซน Hogging ของ แนวเส้นการทรุดตัวที่ผิวดิน (Gaussian Curve) เพื่อหาค่าเทียบเท่า *Bending Stiffness (EI*)* และ *Shear Stiffness (GA*)* สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีเชิงวิเคราะห์คานลึก (Deep Beam Model) อ้างอิงเทียบกับค่าความเครียดแรงดึงวิกฤติ ที่ระดับ 1-5 เพื่อนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน ค่าแตกต่างทรุดตัวของดินต่อความยาวของอาคาร กับค่าความเครียดแรงดึงในแนวราบของอาคาร เทียบกับค่า ความเครียดแรงดึงวิกฤติ สำหรับอาคารที่มีเปอร์เซ็นต์ช่องเปิด และขนาดอัตราส่วนความยาวต่อความสูงต่างๆ เพื่อทำนายระดับความเสียหายของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับผลกระทบจากการเคลื่อนตัวของดินจาก งานขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดินได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว

1. บทนำ

ปัจจุบัน ระบบสาธารณูปโภคที่จำเป็น เพื่อตอบสนองต่อชีวิตประจำวันของประชากรที่อยู่ในเขตเมืองใหญ่ ชุมชนแออัด และประชากรหนาแน่น ได้แก่ ระบบรางขนส่งมวลชน ระบบท่อร้อยสายไฟฟ้า ระบบระบายน้ำ ระบบส่งน้ำประปา ระบบบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น ได้มีการขยายขอบเขตการให้บริการอย่างต่อเนื่อง และอย่างเพียงพอ พร้อมเทคโนโลยีที่มีความล้ำสมัยมากขึ้น ในทางตรงข้าม พื้นที่บนดินกลับถูกจำกัดจากการพัฒนาที่ดินเป็นอสังหาริมทรัพย์ บ้าน อาคาร หรือตึกสูง ที่มีการใช้งาน ดังนั้น อุโมงค์ใต้ดินเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ถูกพิจารณา และนำระบบสาธารณูปโภคต่างๆ ที่อยู่บนดิน ย้ายลงสู่ใต้ดิน โดยการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน ซึ่งจะออกแบบขนาดอุโมงค์ ความลึกของอุโมงค์จากผิวดิน กำหนดขอบเขตและแนวอุโมงค์ ตามลักษณะชั้นดินการใช้งาน และพื้นที่ของหน่วยงานนั้นที่รับผิดชอบ

งานก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน ทำให้เกิดการทรุดตัวที่ผิวดิน และส่งผลกระทบต่ออาคารเคลื่อนตัวของโครงสร้างข้างเคียง ดังรูปที่ 1 โดยเฉพาะในเขตเมืองที่มีสิ่งปลูกสร้างบนดิน ตั้งแต่บ้านพักอาศัยที่ก่อสร้างด้วยฐานรากตื้น กระทั่งอาคารสูงที่มีฐานรากเสาเข็มลึก และโครงสร้างใต้ดิน ได้แก่ แนวท่อน้ำประปา แนวท่อร้อยสายไฟฟ้าและโทรศัพท์ แนวอุโมงค์ระบายน้ำ ฐานรากเสาเข็มทางด่วน เสาเข็มสะพานข้ามคลอง เป็นต้น ทำให้โครงสร้างข้างเคียงที่อยู่ในพื้นที่บริเวณคาดว่าจะได้รับผลกระทบจากงานขุดเจาะอุโมงค์ เกิดการเคลื่อนตัวทั้งในแนวตั้งและแนวราบ แม้ว่าการควบคุมหัวเจาะอุโมงค์ได้ดำเนินการขุดเจาะดินตามวิธีการและขั้นตอนการก่อสร้างที่จะลดการทรุดตัวที่ผิวดินให้น้อยที่สุด แต่ก็ยังต้องมีการตรวจวัดพฤติกรรมอาคารเคลื่อนตัวของดินและโครงสร้างอาคารข้างเคียงแนวขุดเจาะอุโมงค์ เพื่อใช้ประเมินความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น และเตรียมหาแนวทางแก้ไข ซ่อมแซม อาคารดังกล่าว ไม่ให้เกิดการวิบัติ



(ก) อุโมงค์ลอดใต้แนวท่อเดิม

(ข) อุโมงค์ผ่านเสาเข็มตอม่อทางด่วน

(ค) อุโมงค์ลอดผ่านบ้านพักอาศัย

รูปที่ 1 อุโมงค์ผ่านโครงสร้างข้างเคียง ในเขตเมือง

ในอดีต [7]Meyerhof,1947 ; [15]Skempton and MacDonald,1956 ; [11]Polshin and Tokar,1957 ; [1]Bjerrum,1963 ได้นำเสนอค่าแตกต่างทรุดตัว, $\Delta\delta_v$, ต่อระยะห่างระหว่างตำแหน่ง 2 จุด, L ซึ่งกำหนดในรูปแบบค่าพารามิเตอร์, $\Delta\delta_v/L$ ที่เรียกว่า “Slope” ซึ่งเป็นค่าความชันของอาคารที่เอียงตัว โดยกำหนดระดับความเสียหายของโครงสร้างอาคาร จากกรณีศึกษาความเสียหายของอาคารที่ได้มีการรวบรวมข้อมูล แยกเป็นความเสียหายต่อโครงสร้าง และรอยแตกร้าวที่กำแพง แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงเกณฑ์จำแนกความเสียหายของอาคาร จากค่า Slope, $\Delta\delta_v/L$

ผู้ที่เคยศึกษาวิจัย	โครงสร้างเสียหาย (Structural Damage)	รอยแตกร้าวที่กำแพง (Cracks in walls)
[7]Meyerhof (1947)	1/250	1/500
[15]Skempton and MacDonald (1956)	1/150	1/300
[11]Polshin and Tokar (1957)	1/200	1/500
[1]Bjerrum, (1963)	1/150	1/500

วิธีวิเคราะห์จากค่าความชัน เป็นวิธีการอย่างง่าย ที่ใช้ประเมินความเสียหายของอาคาร โดยพิจารณาการทรุดตัวที่แตกต่างระหว่าง 2 ตำแหน่ง ไม่ได้พิจารณาถึงองค์ประกอบรวมของอาคาร และคุณสมบัติของโครงสร้าง ที่จะมีผลต่อการเคลื่อนตัวของอาคาร และไม่ได้แบ่งระดับความเสียหายของอาคารอย่างชัดเจน เป็นการคาดคะเนจากงานวิจัยที่ได้ศึกษารวบรวมข้อมูลหลายๆ กรณีศึกษาอาคารเสียหายจากงานขุดดินลึกและอุโมงค์ ผู้ศึกษาวิจัยหลายท่านได้พัฒนาวิธีการประเมินระดับความเสียหายของอาคาร โดยได้พิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้กำหนดเกณฑ์ระดับความเสียหายในรูปแบบการวิเคราะห์การแอ่นตัวของโครงสร้าง ตามลักษณะการทรุดตัวที่ผิวดินใต้ฐานอาคาร และค่าการเอียงตัวของโครงสร้าง ดังตารางที่ 2

วิธีวิเคราะห์จากการพิจารณาการแอ่นตัวของโครงสร้าง เพื่อหาแนวทางที่จะประเมินความเสียหายของอาคารในแต่ละวิธี จะมีความแตกต่างกัน โดยวิธีคานลิกและคานลิกประกยุคต์ จะเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Δ/L , δ_L และ β ซึ่งได้กำหนดช่วงระดับความเสียหายอย่างชัดเจน แต่ไม่ได้พิจารณาช่องเปิด วิธีรายละเอียดโครงสร้าง จะประเมินระดับความเสียหายจากความกว้างรอยแตก ซึ่งค่าดังกล่าว อาจมีสาเหตุจากปัจจัยอื่น และอาจทำให้การทำนายค่าดังกล่าวคลาดเคลื่อน ขณะเดียวกัน วิธีตัวแปรประกยุคต์ พิจารณาค่า Deflection ratio, ϵ_h จากแนวเส้นทรุดตัวใน Sagging และ Hogging Zone ร่วมกับค่า Stiffness อาคาร แต่ไม่ได้แยกค่าความเครียดเนื่องจากโมเมนต์แรงดัดและแรงเฉือน ส่วนวิธีคานซ้อนหลายชั้น มีความละเอียดในเรื่องค่า Stiffness ขององค์อาคารรวมหลายชั้น และค่าความชันเอียงตัวของอาคาร เพื่อใช้คำนวณค่า Δ/L ในแต่ละลักษณะของโมเมนต์แรงดัดและแรงเฉือน แต่ไม่ได้รวมค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบของอาคาร และยังไม่มีการความสัมพันธ์ที่จะใช้อธิบายระดับความเสียหายของอาคารอย่างชัดเจนและสะดวก นอกจากนี้ วิธีดัชนีบ่งชี้ความเสียหาย พิจารณาค่า ϵ_p เฉพาะ Hogging Zone โดยโมเดล

ความไม่แน่นอน ยังมีความแปรปรวนของค่า β และ δ_L ทำให้การประเมินความเสียหายของอาคาร ยังต้องทำการวิเคราะห์จากหลายๆ กรณีศึกษาต่อไป

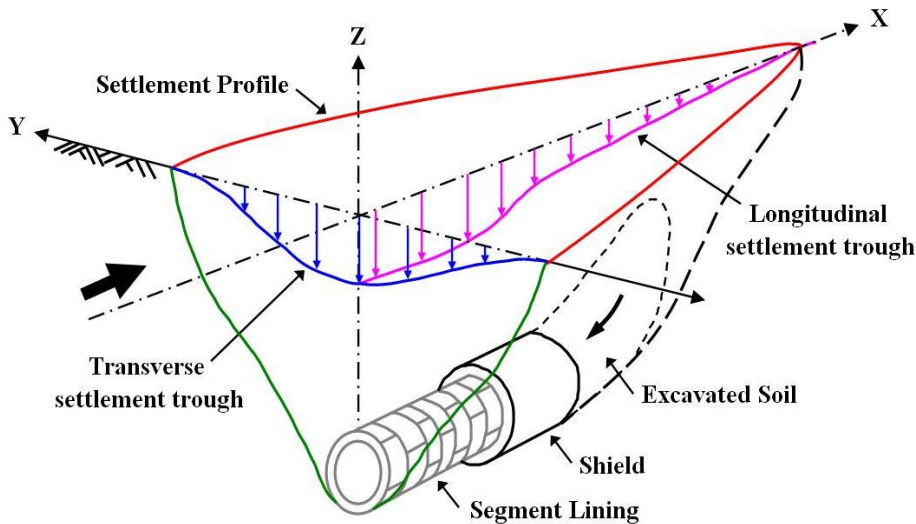
ตารางที่ 2 แสดงวิธีวิเคราะห์ความเสียหายของอาคาร จากการแอ่นตัวของโครงสร้าง

วิธีวิเคราะห์	ผู้ทำการศึกษา	ค่าพารามิเตอร์	รายละเอียด
คานลึก (Deep Beam)	[5]Burland and Wroth (1974)	$\Delta/L, \delta_L$	ค่า E/G, L/H และตำแหน่ง Neutral axis
คานลึกประยุกต์ (Extended Deep Beam)	[3]Boscardin and Cording (1989)	β, δ_L	L/H =1 และพิจารณาเฉพาะ Hogging Zone
รายละเอียดโครงสร้าง (Detailed Structure)	[2]Boone (1996)	ความกว้างรอยแตก	พิจารณาองค์ประกอบรวมของค่า L/H, E/G, $\Delta\delta_v, \delta_L$ คำนวณหา ϵ_p, ϵ_t
ตัวแปรประยุกต์ (Modification Factors)	[12]Potts and Addenbrooke (1997)	$DR_{sag}, \epsilon_{hc}, DR_{hog}, \epsilon_{ht}$	พิจารณาค่า Relative Bending Stiffness, ρ^* และ Relative Axial Stiffness, α^*
คานซ้อนหลายชั้น (Laminate Beam)	[6]Finno et al. (2005)	Δ/L	พิจารณาค่า Shearing strain และความชันเอียงตัวของอาคาร
ดัชนีบ่งชี้ความเสียหาย (DPI Model)	[14]Schuster et al. (2009)	Damage Potential Index (DPI)	พิจารณาค่า ϵ_p เทียบกับ 1/200 (ค่า $\beta = 1/100, \delta_L = 0$ และ $\theta_{max} = 45$ องศา)

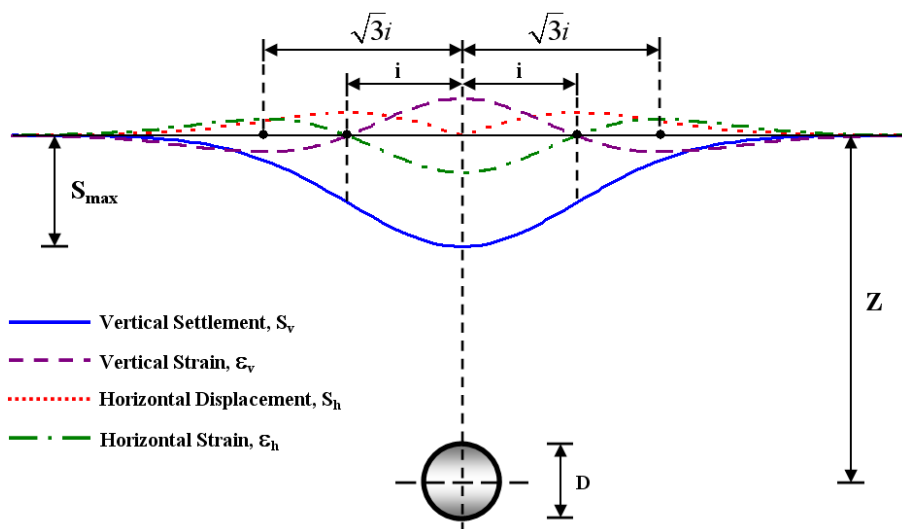
ดังนั้น บทความนี้จะได้นำเสนอวิธีวิเคราะห์การประเมินความเสียหายของอาคาร ที่จะใช้การพิจารณาองค์ประกอบรวม คุณสมบัติของอาคาร ค่าการเคลื่อนตัวของอาคารทั้งแนวตั้งและแนวนอน เพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\Delta/L, \delta_L$ และ β เพื่อใช้ทำนายและประเมินความเสียหายของอาคารได้อย่างถูกต้องรวดเร็ว ก่อนที่จะมีการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน และเมื่อก่อสร้าง ก็สามารถติดตามผลกระทบ เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ เพื่อเตรียมหามาตรการป้องกันความเสียหายของอาคารได้อย่างทัน่วงที

2. ลักษณะการเคลื่อนตัวของผิวดินจากการขุดเจาะอุโมงค์

ลักษณะการเคลื่อนตัวของผิวดินจากการขุดเจาะอุโมงค์จะมีลักษณะอยู่ 3 ลักษณะ คือ ทิศทางเดียวกับแนวขุดเจาะ (X-Longitudinal Direction) ทิศทางแนวขวาง (Transverse Y-Direction) และทิศทางในแนวระนาบ (Plan Z-Direction) ดังรูปที่ 2 โดยบทความนี้จะพิจารณาการเคลื่อนตัวของดินในทิศทางขวางกับแนวขุดเจาะ เพื่อพิจารณาการเคลื่อนตัวของโครงสร้างอาคารข้าง ซึ่งจะมีลักษณะสมมาตร ดังรูปที่ 3 โดยสามารถคำนวณหาค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและแนวราบ ดังนี้



รูปที่ 2 ลักษณะการเคลื่อนตัวของผิวดิน จากงานขุดเจาะอุโมงค์ [16] Suwansawat and Einstein,2002



รูปที่ 3 ลักษณะการเคลื่อนตัวของผิวดิน ในทิศทางแนวขวาง จากงานขุดเจาะอุโมงค์

2.1) การเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง (Vertical Movements)

แนวเส้นการเคลื่อนตัวหรือแนวการทรุดตัวที่ผิวดิน (Gaussian Curve) ซึ่งนำเสนอโดย [10]Peck,1969 และความเครียดในแนวดิ่ง คำนวณจากสมการที่ (1) และ (2) ดังนี้

$$S_v = S_{\max} \exp\left(-\frac{y^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

$$\varepsilon_v = \frac{S_v}{z} \left(\frac{y^2}{i^2} - 1\right) \quad (2)$$

โดย	S_v	คือ	ค่าทรุดตัวที่ผิวดิน
	ε_v	คือ	ค่าความเครียดที่ผิวดินในแนวดิ่ง
	S_{\max}	คือ	ค่าทรุดตัวที่ผิวดินสูงสุด
	y	คือ	ระยะตามแนวแกนขวางของอุโมงค์
	i	คือ	ระยะจากกึ่งกลางอุโมงค์ถึงจุดเปลี่ยนโค้ง
	z	คือ	ค่าความลึกจากผิวดินถึงกึ่งกลางอุโมงค์

2.2) การเคลื่อนตัวในแนวราบ (Horizontal Movements)

แนวเส้นการเคลื่อนตัวที่ผิวดินในทิศทางแนวราบและความเครียดในแนวราบ คำนวณจากสมการที่ (3) และ (4) ดังนี้

$$S_h = \frac{y}{z} S_v \quad (3)$$

$$\varepsilon_h = \frac{S_v}{z} \left(1 - \frac{y^2}{i^2}\right) \quad (4)$$

โดย	S_h	คือ	ค่าเคลื่อนตัวในแนวราบที่ผิวดิน
	ε_h	คือ	ค่าความเครียดที่ผิวดินในแนวราบ

[8]O'Reilly and New,1982 ได้นำเสนอวิธีการประมาณหาค่า i ดังสมการที่ (5) และ [16]Suwansawat and Einstein,2002 เสนอค่า k จากกรณีศึกษาโครงการอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงิน ในชั้นดินกรุงเทพฯ ดังนี้

$$i = k.z \quad (5)$$

โดย	k	คือ	ค่าคงที่
		เท่ากับ	0.40-0.50 สำหรับชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ
		เท่ากับ	0.30-0.40 สำหรับชั้นดินทรายกรุงเทพฯ

3. หลักการประเมินระดับความเสียหายของอาคาร

การวิเคราะห์ความเสียหายของอาคาร จะพิจารณาจากค่าความเครียดแรงดึงของอาคารที่เกิดการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งและแนวราบที่ฐานอาคาร ซึ่งเท่ากับการเคลื่อนตัวที่ผิวดินทั้งในแนวดิ่งและแนวราบตามแนวเส้นการทรุดตัวที่ผิวดินจากการขุดเจาะอุโมงค์ โดยคุณสมบัติของโครงสร้างอาคารเป็นอีลาสติก

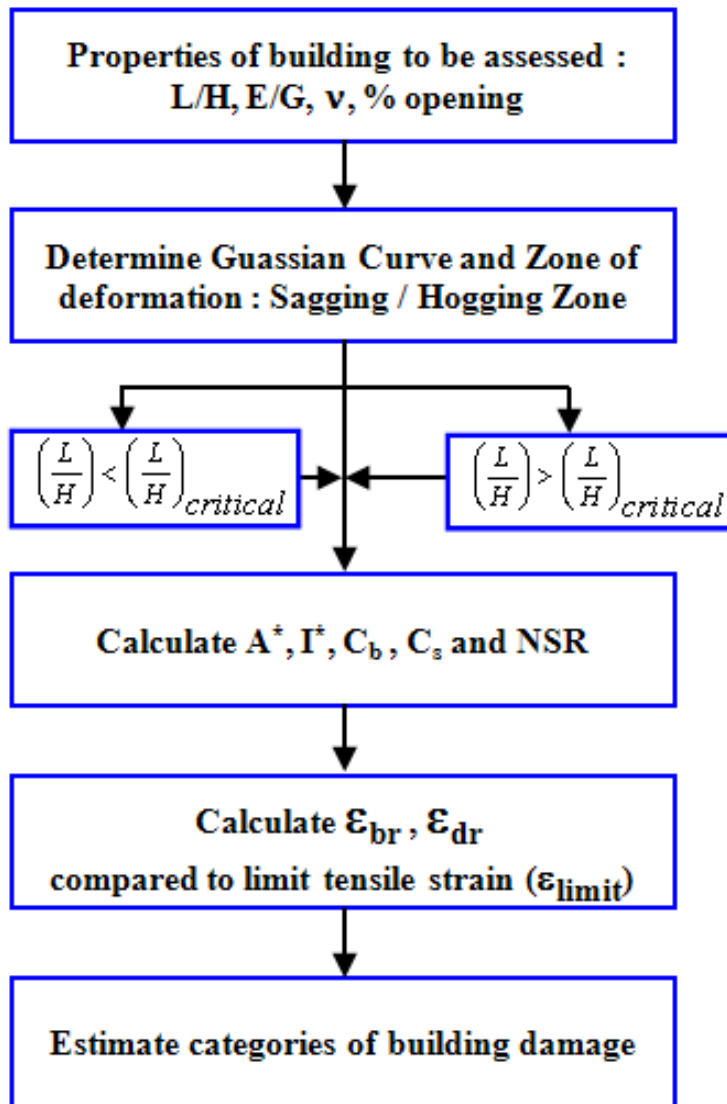
[4]Burland et al.,1977 และ [3]Boscardin and Cording,1989 ได้จำแนกระดับความเสียหายของอาคารที่ได้รับผลกระทบจากการเคลื่อนตัวของดิน โดยพิจารณาความกว้างของรอยแตกโดยประมาณ (Crack Width) และค่าความเครียดแรงดึงวิกฤติ (Limit Tensile Strain, ϵ_{limit}) ตามลำดับ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงเกณฑ์กำหนดระดับความเสียหายของอาคาร

ระดับความเสียหาย	ลักษณะความเสียหาย	ลักษณะรายละเอียด รูปแบบความเสียหาย และการซ่อมแซมอาคารผนังวัสดุก่อ	ความกว้างของรอยแตกโดยประมาณ (มม.)	ความเครียดแรงดึงวิกฤติ (%)
0	ไม่มีผลกระทบ (Negligible)	แตกกลางๆ	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 ทำให้ระบบสาธารณูปโภคอาจขัดข้อง	5 - 15 มม. หรือ รอยแตกมากกว่า 3 แนว	0.150 - 0.300
4	รุนแรง (Severe)	ต้องทำการซ่อมแซมอย่างมาก รวมถึงการก่อสร้างผนังใหม่ ประตูและหน้าต่างเสียหาย พื้นลาดเอียง คานสูญเสียการรับแรง ซึ่งทำให้ระบบสาธารณูปโภคขัดข้อง	15 - 25 มม. ทั้งนี้ ขึ้นกับรอยแตกที่เกิดขึ้น	มากกว่า 0.300
5	รุนแรงมาก (Very severe)	จำเป็นต้องซ่อมแซมปรับปรุงอย่างมาก รวมถึงการก่อสร้างใหม่ คานและผนังสูญเสียการรับแรง จำเป็นต้องแก้ไขหน้าต่างที่แตกหัก และบิดเบี้ยว เสียหาย	มากกว่า 25 มม. ทั้งนี้ ขึ้นกับรอยแตกที่เกิดขึ้น	

ลำดับขั้นตอนการประเมินระดับความเสียหายของอาคารในพื้นที่ทรุดตัว แบ่งเป็น 6 ขั้นตอน ดังนี้

- (1) พิจารณาค่า L/H, E/G, ν และช่องเปิดของอาคาร
- (2) คำนวณแนวเส้นทรุดตัวที่ผิวดินใต้ฐานอาคาร พิจารณาแยก Sagging และ Hogging Zone
- (3) พิจารณาค่า L/H เปรียบเทียบกับ $(L/H)_{critical}$
- (4) คำนวณค่า A^* , I^* , C_b , C_s , NSR
- (5) คำนวณค่า ϵ_{br} และ ϵ_{dr} เทียบกับ ϵ_{limit}
- (6) ประเมินระดับความเสียหายของอาคาร



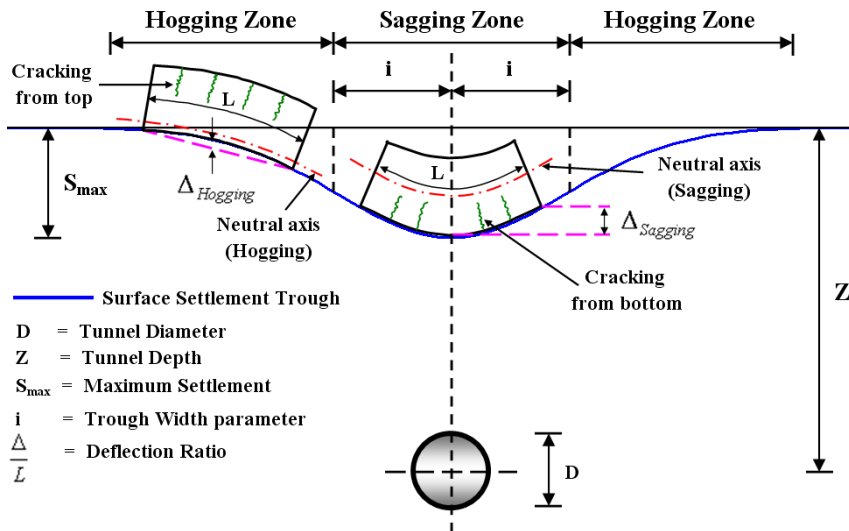
รูปที่ 4 ผังแสดงขั้นตอนการประเมินระดับความเสียหายของอาคารในพื้นที่ทรุดตัวจากงานก่อสร้างอุโมงค์

ผังลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่า Deflection Ratio ของอาคารทั้งกรณีอาคารมีช่องเปิดและกรณีอาคารไม่มีช่องเปิด ที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ทรุดตัวจากงานขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดิน ดังรูปที่ 4 ซึ่งหลักการวิเคราะห์ดังกล่าวทั้งหมด ตั้งอยู่บนสมมติฐาน คือ “การเคลื่อนตัวในแนวดิ่งและแนวราบที่ฐานอาคารตลอดความยาวของอาคาร เท่ากับการเคลื่อนตัวที่ผิวดินทั้งในแนวดิ่งและแนวราบตามแนวเส้นการทรุดตัวที่ผิวดินจากการขุดเจาะอุโมงค์” ทั้งนี้ คุณสมบัติของโครงสร้างอาคารต้องเป็นไปตาม *Theory of Elasticity*

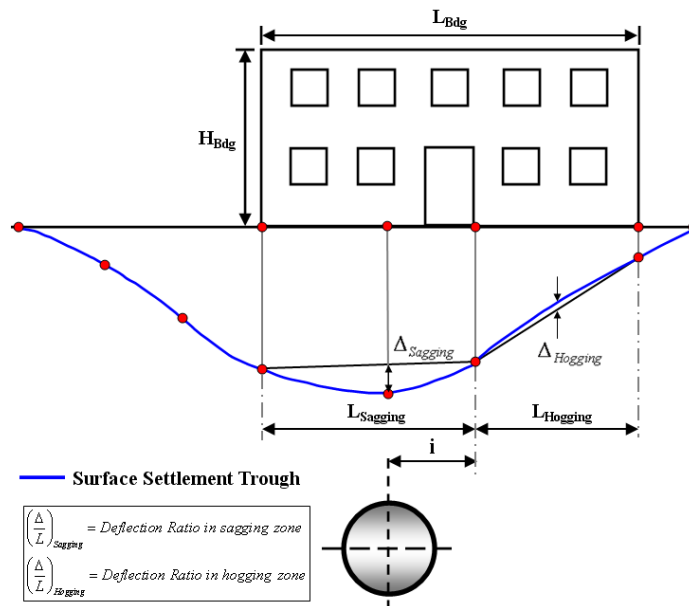
จากหลักการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่กล่าวมาข้างต้น จำเป็นต้องทำความเข้าใจในค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แบบจำลองของคานที่อ่อนตัว รูปแบบการเกิดรอยแตกร้าวในพื้นที่ทรุดตัว พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดิน และแนวคิดการวิเคราะห์ค่าการเสียรูปของคาน เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องนี้ สำหรับประเมินระดับความเสียหายของอาคาร พร้อมตัวอย่างการวิเคราะห์และประเมิน

3.1) ค่าความเครียดแรงดึงของอาคาร (Tensile Strain, TS Method)

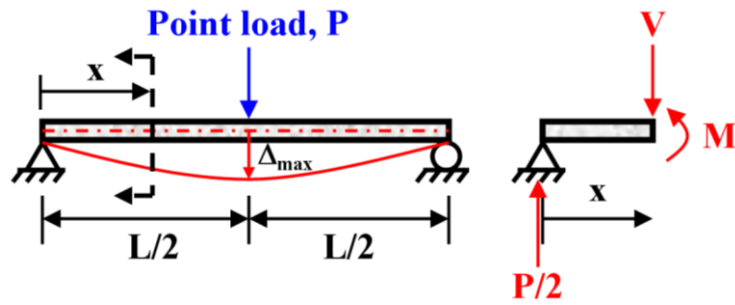
การประเมินระดับความเสียหายของอาคารในบริเวณพื้นที่ทรุดตัวจากงานขุดเจาะอุโมงค์ จะพิจารณาขนาดและ Stiffness ของอาคาร ตำแหน่งโซนพื้นที่ทรุดตัว และค่าทรุดตัวของผิวดินระหว่าง 2 จุด ที่ตำแหน่งฐานอาคารที่ทรุดตัว ดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6



รูปที่ 5 โซนของการทรุดตัวที่ผิวดินจากการขุดเจาะอุโมงค์



รูปที่ 6 จำแนกค่าอัตราส่วนทรุดตัว (Deflection Ratio) ในโซนพื้นที่ทรุดตัวใต้ฐานอาคาร



รูปที่ 7 รูปแบบการวิเคราะห์ค่าแอนตัวของคาน กรณี Point Load

พิจารณาอาคารเป็นคานลึก (Deep beam) เกิดการแอนตัวเนื่องจากแรงกระทำเป็นจุด (Point Load) ดังรูปที่ 7 ซึ่งทำการวิเคราะห์โมเมนต์แรงดัดและแรงเฉือนของหน้าตัดคาน ที่ระยะ x จากจุดรองรับคาน เพื่อคำนวณหาค่าอัตราส่วนค่าแตกต่างทรุดตัวของดินต่อความยาวของอาคาร ดังสมการที่ (6), (7), (8)

$$\frac{d^2\Delta}{dx^2} = \frac{M}{EI} + \frac{q}{kGA} \quad (6)$$

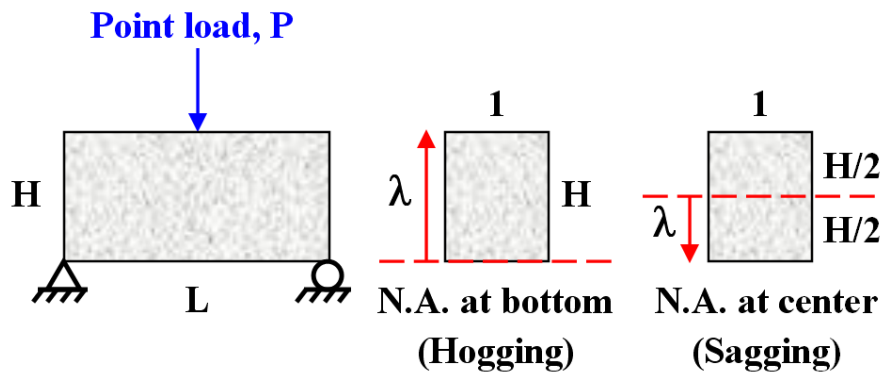
$$\frac{d\Delta}{dx} = \frac{P}{48EI}(3L^2 - 12x^2) + \frac{P}{2kGA} \quad (7)$$

$$\frac{\Delta}{L} = \frac{PL^2}{48EI} \left[1 + \frac{18EI}{L^2GA} \right] \quad (8)$$

โดย	Δ	คือ	ค่าแตกต่างทรุดตัว (Relative deflection)
	M	คือ	โมเมนต์แรงดัด (Bending Moment)
	q	คือ	แรงกระทำแผ่สม่ำเสมอ (Uniform Load)
	P	คือ	แรงกระทำเป็นจุด (Point Load)
	L	คือ	ความยาวของอาคารในพื้นที่ทรุดตัว
	EI	คือ	ความแข็งแรงต้านโมเมนต์แรงดัด (Bending Stiffness)
	GA	คือ	ความแข็งแรงต้านแรงเฉือน (Shear Stiffness)
	k	คือ	สัมประสิทธิ์แรงเฉือน (Shear Coefficient)

เท่ากับ 2/3 สำหรับรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยม

เนื่องจากตำแหน่ง Neutral Axis สำหรับการวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของอาคารของแต่ละโซน พื้นที่ทรุดตัวได้ฐานอาคาร ต่างกัน จึงทำให้เกิด Bending Stiffness และ Deflection ของอาคาร มีค่าแตกต่างกัน โดยพิจารณาพื้นที่ทรุดตัวได้ฐานอาคารเป็น 2 Zone ดังนี้



รูปที่ 8 การวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia) แต่ละโซนการทรุดตัว

(1) โซนแอ่นทรุดตัว (Sagging Zone)

เป็นบริเวณทรุดตัวช่วงกลาง ภายในระยะค่า i จากแนวศูนย์กลางอุโมงค์ทั้งสองด้าน ซึ่งตำแหน่ง Neutral axis อยู่ที่กึ่งกลางของอาคาร และรอย Crack เกิดขึ้นที่บริเวณด้านล่างสุดของอาคาร

(2) โซนด้นบวมตัว (Hogging Zone)

เป็นบริเวณทรุดตัวช่วงปลายสองข้าง ที่ระยะมากกว่า i ซึ่งตำแหน่ง Neutral axis อยู่ที่ตำแหน่งล่างสุดใกล้ฐานของอาคาร และรอย Crack เกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนสุดของอาคาร

โซนพื้นที่ทรุดตัว จะกำหนดตำแหน่ง Neutral axis ต่างกัน ดังรูปที่ 8 โดยค่าความเครียดสูงสุดของอาคารคำนวณจากสมการที่ (9) และ (10) ซึ่งสรุปค่าพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 4 ดังนี้

ตารางที่ 4 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับหาค่า Deflection Ratio ในสมการที่ (9) และ (10)

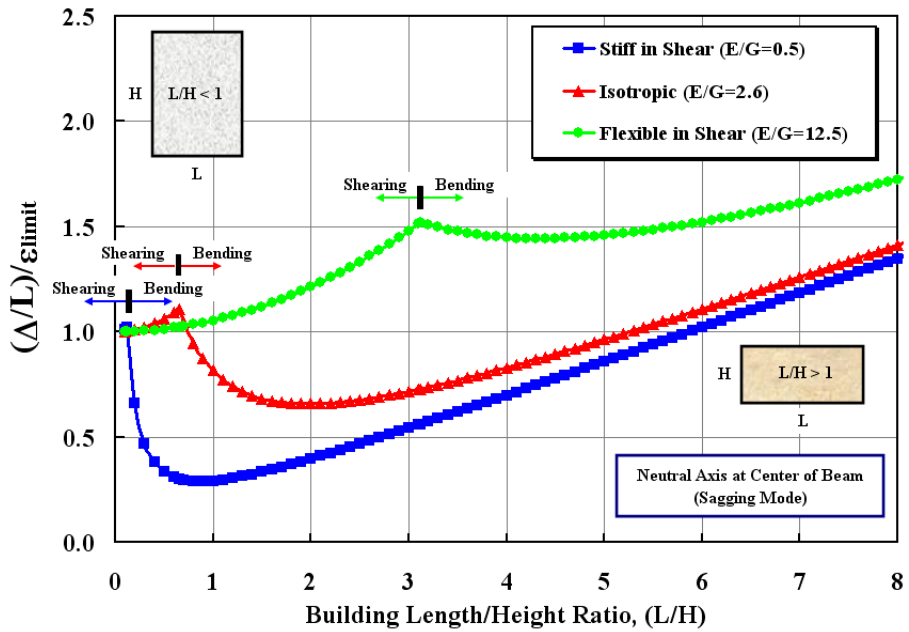
Zone	λ	I	C_b	C_s
Hogging	H	$\frac{H^3}{3}$	$\frac{1}{12}\left(\frac{L}{H}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{E}{G}\right)\left(\frac{H}{L}\right)$	$1 + \frac{1}{6}\left(\frac{G}{E}\right)\left(\frac{L}{H}\right)^2$
Sagging	$\frac{H}{2}$	$\frac{H^3}{12}$	$\frac{1}{6}\left(\frac{L}{H}\right) + \frac{1}{4}\left(\frac{E}{G}\right)\left(\frac{H}{L}\right)$	$1 + \frac{2}{3}\left(\frac{G}{E}\right)\left(\frac{L}{H}\right)^2$

$$\frac{\Delta}{L} = C_b \varepsilon_{b,\max} \quad (9)$$

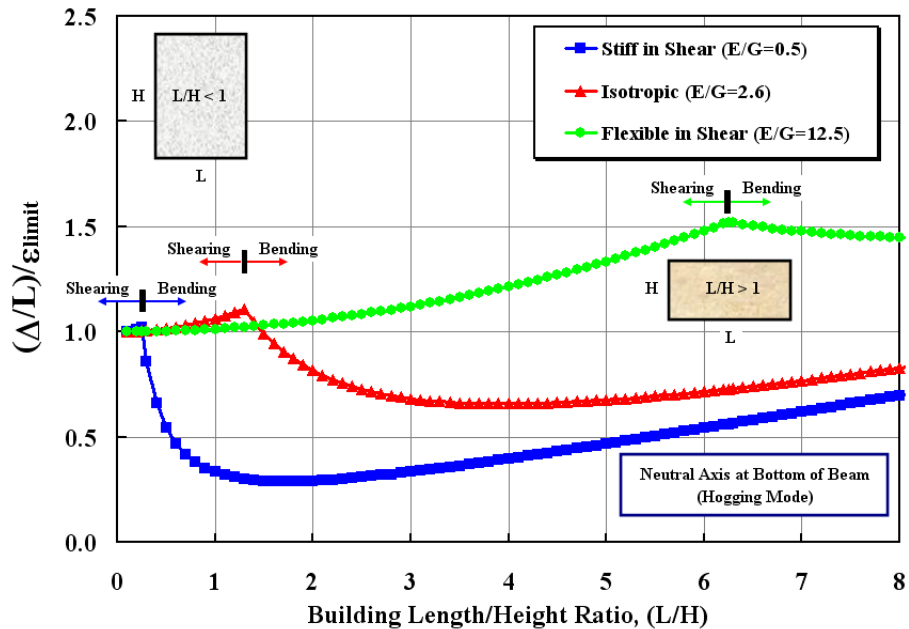
$$\frac{\Delta}{L} = C_s \varepsilon_{d,\max} \quad (10)$$

- โดย $\frac{\Delta}{L}$ คือ อัตราส่วนค่าแตกต่างทรุดตัวต่อความยาวของอาคาร (Deflection Ratio)
- $\varepsilon_{b,\max}$ คือ ค่าความเครียดสูงสุดเนื่องจากโมเมนต์แรงดัด (Maximum Bending Strain)
- $\varepsilon_{d,\max}$ คือ ค่าความเครียดสูงสุดเนื่องจากแรงเฉือน (Maximum Shearing Strain)

- λ คือ ระยะจากตำแหน่ง Neutral axis ถึงปลายขอบอาคาร
- $\frac{L}{H}$ คือ อัตราส่วนขนาดความยาวต่อความสูงของอาคาร
- E คือ ค่าโมดูลัสของอาคาร (Elastic Modulus)
- G คือ ค่าโมดูลัสเฉือนของอาคาร (Shear Modulus)
- C_b, C_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเครียดเนื่องจากโมเมนต์แรงดัดและแรงเฉือน ตามลำดับ



(ก) โซนแอ่นทรุดตัว (Sagging Zone)



(ข) โซนด้นบวมตัว (Hogging Zone)

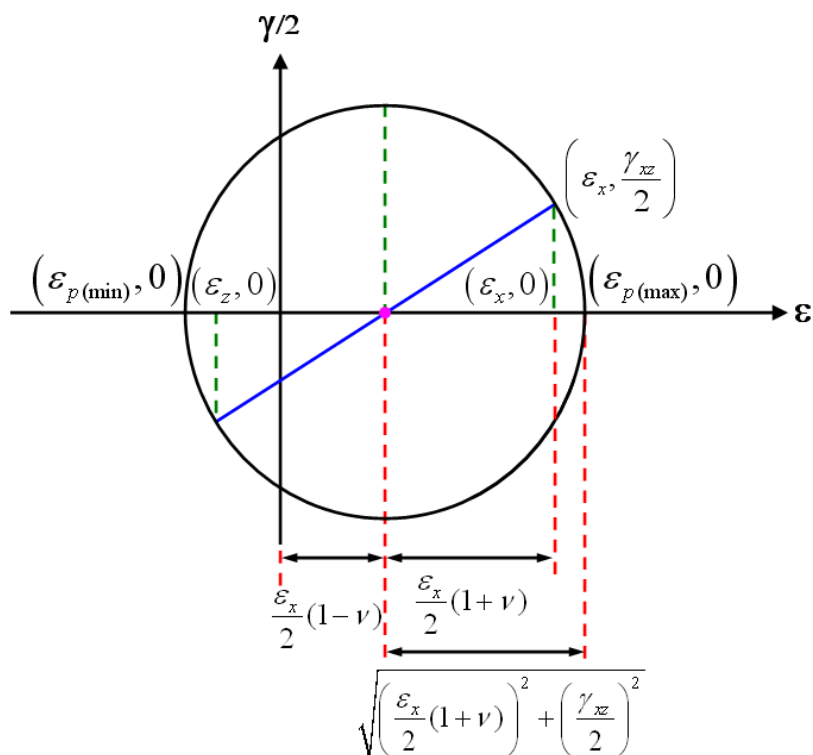
รูปที่ 9 อิทธิพลของค่า Stiffness ของอาคาร และตำแหน่ง Neutral Axis ต่อค่า $\frac{\Delta}{L}$

เนื่องจาก Deflection Ratio ขึ้นกับอัตราส่วนขนาดอาคาร และค่า Stiffness ของอาคาร ซึ่งอาคาร จะเกิดค่าความเครียดแรงดึงที่น้อยสุดก่อน คือ ค่าความเครียดเนื่องจากแรงเฉือน ส่วนค่าความเครียดเนื่องจาก โมเมนต์แรงดัด จะเกิดขึ้นที่อัตราส่วนขนาดอาคารค่าหนึ่งสำหรับแต่ละชนิดโครงสร้างอาคาร ทั้งนี้ [5]Burland and Wroth,1974 ได้จำแนกค่า E/G ตามชนิดของโครงสร้าง ดังนี้

- (1) $E/G = 0.5$ สำหรับอาคารที่มี Shear Wall ต้านการเฉือนจากการทรุดตัวของฐานรากอาคาร
- (2) $E/G = 2.6$ สำหรับอาคารที่ก่อสร้างด้วยอิฐก่อ ถ่ายแรงลงสู่กำแพงรับน้ำหนัก (Bearing Wall)
- (3) $E/G = 12.5$ สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ลักษณะโครงสร้างเป็นชั้น (Frame Structure)

ในอดีต อาคารสิ่งปลูกสร้างมักจะก่อสร้างด้วยอิฐก่อ แต่ปัจจุบันอาคารมีขนาดใหญ่ เพื่อใช้สอย ประโยชน์ภายในพื้นที่ที่ถูกจำกัด จึงก่อสร้างเป็นลักษณะโครงสร้างหลายชั้นหรือคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้น อิทธิพลของค่า Stiffness ของอาคาร และตำแหน่ง Neutral Axis จะมีผลต่อการทรุดตัวของอาคาร ดังรูปที่ 9 โดยไม่คำนึงถึงค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง, δ_L ของอาคาร จากการวิเคราะห์อิทธิพลของค่า Stiffness Ratio และ Neutral axis ต่อค่า Deflection Ratio ของอาคาร ในพื้นที่ที่ทรุดตัวจากงานขุดเจาะอุโมงค์ พบว่า โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเป็น Frame Structure ($E/G=12.5$) เกิดค่า Deflection Ratio มากกว่า ความเครียดแรงดึงวิกฤต (Limit Tensile Strain) สำหรับทุกขนาดของอาคาร

นอกจากค่า $\epsilon_{b,max}$ และ $\epsilon_{d,max}$ แล้ว ยังต้องคำนึงถึงค่า δ_L ที่ตำแหน่งฐานอาคาร 2 จุด ดังสมการที่ (11) เพื่อคำนวณหาความเครียด, ϵ_{br} โดยวิธี Superposition และค่าความเครียด, ϵ_{dr} (เท่ากับ Maximum Principal Strain, $\epsilon_{p(max)}$) โดย Mohr's Circle ดังรูปที่ 10 ดังสมการที่ (12) และ (13)



รูปที่ 10 Mohr's Circle สำหรับ Diagonal Strain ของอาคาร ในแนว Plane Stress

$$\delta_L = \frac{\Delta\delta_L}{L} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{br} = \varepsilon_{b,\max} + \delta_L \quad (12)$$

$$\varepsilon_{dr} = \delta_L \left(\frac{1-\nu}{2} \right) + \sqrt{\delta_L^2 \left(\frac{1+\nu}{2} \right)^2 + \varepsilon_{d,\max}^2} \quad (13)$$

โดย	δ_L	คือ	ค่าความเครียดในแนวราบของอาคาร
	$\Delta\delta_L$	คือ	ค่าแตกต่างค่าเคลื่อนตัวในแนวราบของดิน
	ε_{br}	คือ	ค่าความเครียดเนื่องจากโมเมนต์แรงดัด (Bending Tensile Strain)
	ε_{dr}	คือ	ค่าความเครียดเนื่องจากแรงเฉือน (Shearing Tensile Strain)
	ν	คือ	อัตราส่วนปัวส์ซองของอาคาร

การวิเคราะห์ความเสียหายของอาคาร จากการพิจารณาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจากการแอ่นตัว ในลักษณะโมเมนต์แรงดัดและแรงเฉือน กับค่าเคลื่อนตัวในแนวราบ เนื่องจากการเคลื่อนตัวของดิน ทำให้เกิดความเครียดของคานขึ้น 2 ลักษณะ คือ ความเครียดเนื่องจากโมเมนต์แรงดัด และความเครียดเนื่องจากแรงเฉือน ซึ่งรวมค่าความเครียดในแนวราบของอาคารแล้วนั้น จะพิจารณาค่าความเครียดน้อยที่สุดที่เกิดขึ้นก่อน (Minimum Tensile Strain) โดยเปรียบเทียบค่าดังกล่าว ดังสมการที่ (14), (15) และ (16) ทั้ง 3 กรณี เพื่อวิเคราะห์หาค่า Deflection Ratio สำหรับกรณีอัตราส่วนขนาดอาคารต่างๆ อ้างอิงเกณฑ์กำหนดระดับความเสียหายของอาคาร จากค่าความเครียดแรงดึงวิกฤติ, ε_{limit} ที่ได้สรุปในตารางที่ 3 ดังนี้

$$\frac{\Delta_b}{\Delta_s} = \frac{C_b}{C_s} \sqrt{\frac{\left(1 - \frac{\delta_L}{\varepsilon_{limit}}\right)}{\left(1 + \frac{\nu\delta_L}{\varepsilon_{limit}}\right)}} \quad (14)$$

กรณีที่ 1 $\frac{\Delta_b}{\Delta_s} = 1$ ค่า Deflection เนื่องจากค่า Shearing Strain เท่ากับค่า Bending Strain

$$\frac{\delta_L}{\varepsilon_{limit}} = \frac{1 - \left(\frac{C_s}{C_b}\right)^2}{1 + \nu \left(\frac{C_s}{C_b}\right)^2} \quad (15)$$

กรณีที 2 $\frac{\Delta_b}{\Delta_s} > 1$ ค่า Deflection เนื่องจากค่า Shearing Strain น้อยกว่าค่า Bending Strain

$$\frac{\delta_L}{\varepsilon_{limit}} < \frac{1 - \left(\frac{C_s}{C_b}\right)^2}{1 + \nu \left(\frac{C_s}{C_b}\right)^2} \quad (16)$$

กรณีที 3 $\frac{\Delta_b}{\Delta_s} < 1$ ค่า Deflection เนื่องจากค่า Bending Strain น้อยกว่าค่า Shearing Strain

$$\frac{\delta_L}{\varepsilon_{limit}} > \frac{1 - \left(\frac{C_s}{C_b}\right)^2}{1 + \nu \left(\frac{C_s}{C_b}\right)^2} \quad (17)$$

โดย δ_L คือ ค่าความเครียดในแนวราบของอาคาร

ε_{limit} คือ ค่าความเครียดแรงดึงวิกฤติ (พิจารณาระดับความเสียหาย จากตารางที่ 3)

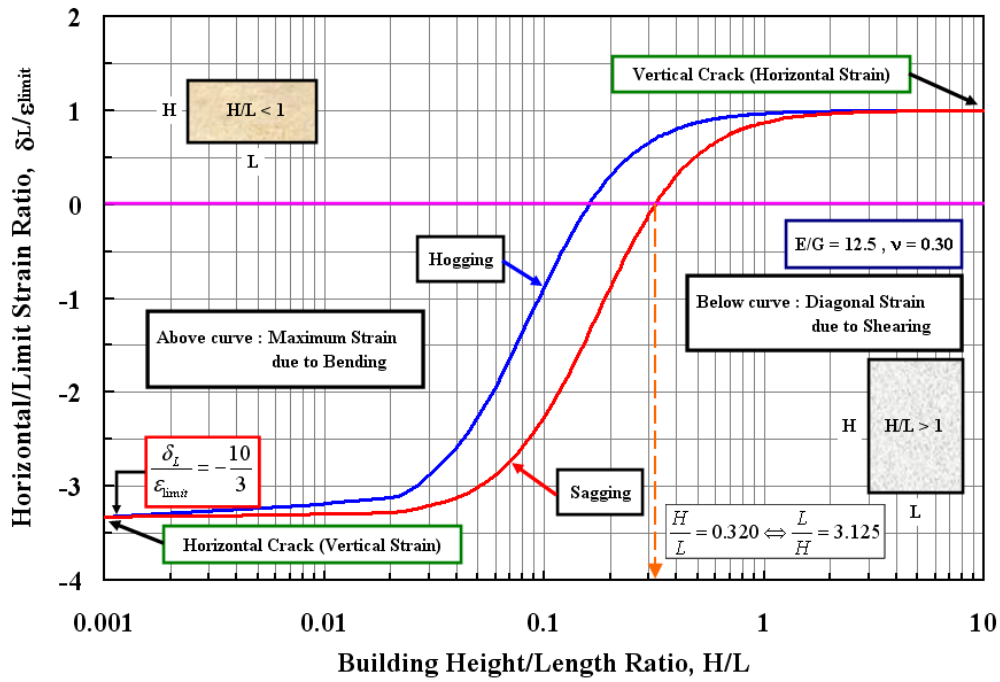
เมื่อคำนวณค่าความเครียดในแนวราบของอาคารแล้ว สามารถวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่า Deflection Ratio ได้ โดยการแทนค่า ε_{br} และ ε_{dr} ด้วยค่า ε_{limit} ดังสมการที่ (18) และ (19) ดังนี้

$$\frac{\frac{\Delta}{L}}{\varepsilon_{limit}} = C_b \left(1 - \frac{\delta_L}{\varepsilon_{limit}} \right) \quad (18)$$

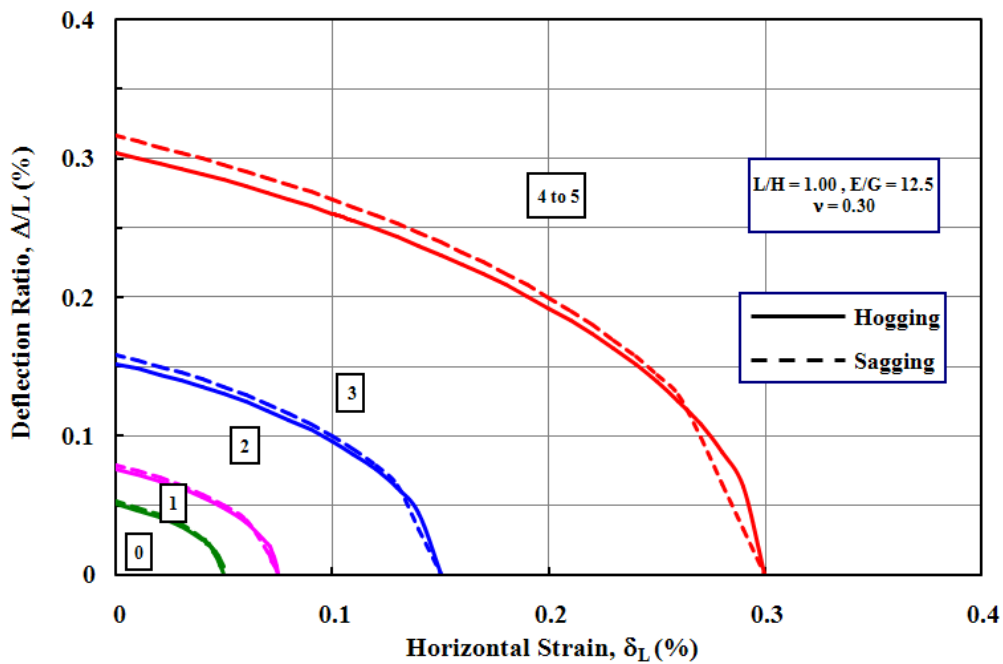
$$\frac{\frac{\Delta}{L}}{\varepsilon_{limit}} = C_s \sqrt{\left(1 + \nu \frac{\delta_L}{\varepsilon_{limit}} \right) \left(1 - \frac{\delta_L}{\varepsilon_{limit}} \right)} \quad (19)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\frac{\delta_L}{\varepsilon_{limit}}$ กับอัตราส่วนขนาดอาคาร L/H ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (15) จะพิจารณาเฉพาะค่าความเครียดแรงดึงในแนวราบ (ค่าบวก) เท่านั้น โดยอัตราส่วนขนาดอาคาร L/H ที่น้อยสุดเท่ากับ 3.125 ดังรูปที่ 11 ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการรับแรงของอาคาร จากการวิเคราะห์หิทธิพลของค่า Stiffness Ratio และ Neutral axis ต่อค่า Deflection Ratio ของอาคาร รูปที่ 9 ซึ่งค่า Deflection Ratio เปลี่ยนแปลงจากคานที่เกิดความเครียดเนื่องแรงเฉือนเป็นโมเมนต์แรงดัดที่ L/H น้อยสุดเท่ากับ 3.125 เช่นเดียวกัน

จากที่กล่าวมาข้างต้น สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\frac{\Delta}{L}$ และค่า δ_L เทียบกับค่าความเครียดแรงดึงวิกฤติ, ε_{limit} จากสมการที่ (18) และ (19) ที่อัตราส่วนขนาดอาคารค่าๆ หนึ่ง ดังรูปที่ 12 เป็นกรณีขนาดอาคาร L/H เท่ากับ 1 และ E/G เท่ากับ 12.5 สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก



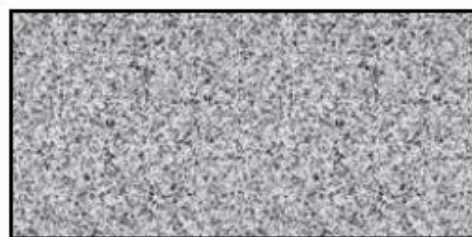
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\frac{\delta_L}{\epsilon_{limit}}$ กับอัตราส่วนขนาดอาคาร (กรณี $\frac{\Delta_b}{\Delta_s} = 1$ และ $\frac{E}{G} = 12.5$)



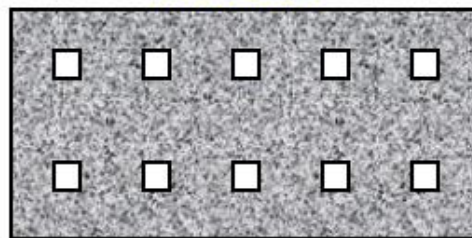
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Deflection Ratio, $\frac{\Delta}{L}$ กับค่า δ_L (กรณี $\frac{L}{H} = 1$ และ $\frac{E}{G} = 12.5$)

3.2) ค่าความเครียดแรงดึงของอาคารที่มีช่องเปิด (Tensile Strain of Building with Opening)

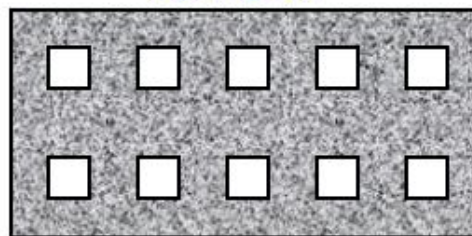
โดยทั่วไป บ้านพักอาศัยหรืออาคารจะถูกก่อสร้างให้มีช่องเปิด เช่น ประตู หน้าต่าง ช่องระบายอากาศ ที่ผนังอาคาร ซึ่งเปอร์เซ็นต์ช่องเปิดของอาคารจะมีผลต่อการวิเคราะห์ค่า Stiffness ของอาคาร บทความนี้จะได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาค่า Deflection Ratio และค่าความเครียดแรงดึงในแนวราบเทียบกับค่าความเครียดแรงดึงวิกฤติ ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องเปิด โดยจำลองรูปแบบของอาคารที่มีเปอร์เซ็นต์ช่องเปิดต่างๆ ดังรูปที่ 13 ทั้งนี้ หลักการคำนวณค่าเครียดแรงดึงสำหรับกรณีอาคารที่มีช่องเปิด จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าความเครียดแรงดึงเนื่องจากแรงเฉือนเป็นโมเมนต์แรงดัด ที่อัตราส่วนขนาดอาคารต่างๆ โดยคำนึงถึงอิทธิพลของค่า Stiffness และผลรวมค่าความเครียดแรงดึงในแนวราบของอาคาร



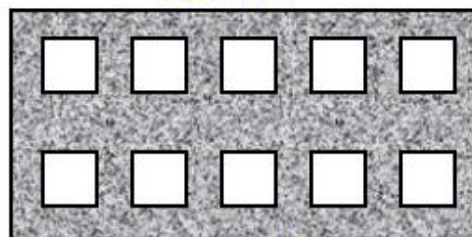
No openings



Opening 10%



Opening 20%



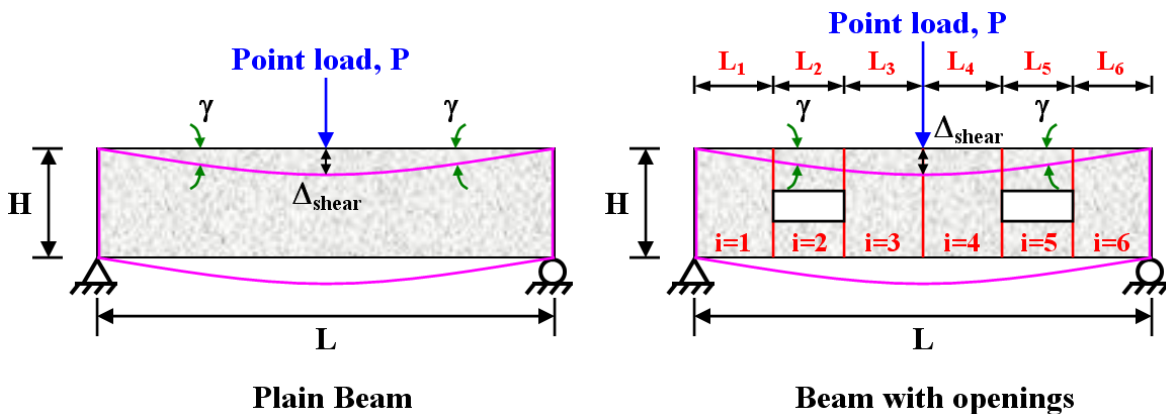
Opening 30%

รูปที่ 13 จำลองอาคารที่มีเปอร์เซ็นต์ช่องเปิดของอาคาร ที่ 0%, 10%, 20% และ 30% ตามลำดับ

เนื่องจากอาคารที่มีช่องเปิด จะมีค่า Stiffness ของอาคาร ที่แตกต่างจากอาคารที่ไม่มีช่องเปิด โดยหลักกลศาสตร์คำนวณทางด้านวัสดุ สามารถหาค่า Equivalent Stiffness ดังนี้

3.2.1) ความแข็งแรงต้านแรงเฉือนเทียบเท่า, GA^* (Equivalent Shear Stiffness)

ความแข็งแรงต้านแรงเฉือนจะขึ้นกับพื้นที่หน้าตัดของอาคาร ซึ่งจำลองพฤติกรรมการแอ่นตัวของอาคารเป็นคานาเหล็ก แยกเป็นกรณีอาคารที่ไม่มีช่องเปิด (Plain Beam) และกรณีอาคารที่มีช่องเปิด (Beam with openings) โดยแบ่งชิ้นส่วนย่อยของหน้าตัดอาคาร ดังรูปที่ 14 เพื่อคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดรวมของอาคาร ดังสมการที่ (20)



(ก) อาคารที่ไม่มีช่องเปิด (Plain Beam)

(ข) อาคารที่มีช่องเปิด (Beam with Openings)

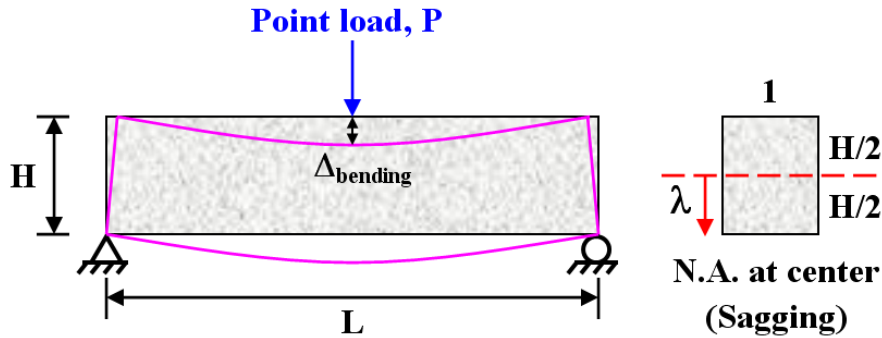
รูปที่ 14 ความยาวส่วนย่อยของหน้าตัดแบ่งอาคารในแนวนอน สำหรับหาค่า A^*

$$A^* = \frac{L}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{L_i}{t.H - (A_o)_i} \right)} \quad (20)$$

- โดย A^* คือ พื้นที่หน้าตัดเทียบเท่า
 $(A_o)_i$ คือ พื้นที่ช่องเปิดตามแนวความยาวส่วนย่อย i
 L_i คือ ความยาวส่วนย่อยของหน้าตัดแบ่ง i
 L คือ ความยาวของอาคารในพื้นที่ท่จรดตัว
 H คือ ความสูงของอาคารในพื้นที่ท่จรดตัว
 t คือ ความหนาของผนังอาคาร

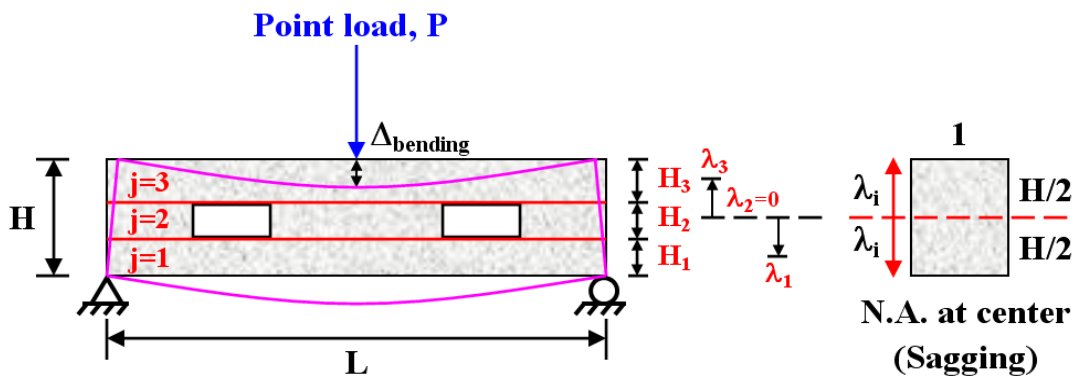
3.2.2) ความแข็งแรงต้านโมเมนต์แรงดัดเทียบเท่า, EI^* (Equivalent Bending Stiffness)

ความแข็งแรงต้านโมเมนต์แรงดัดเทียบเท่า จะขึ้นกับค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่รอบแนวแกน Neutral Axis ของหน้าตัดอาคาร ซึ่งจำลองพฤติกรรมการแอ่นตัวของอาคารเป็นคานาลึก แยกเป็นกรณีอาคารที่ไม่มีช่องเปิด (Plain Beam) และกรณีอาคารที่มีช่องเปิด (Beam with openings) โดยแบ่งขึ้นส่วนย่อยของหน้าตัดอาคาร ดังรูปที่ 15 และ 16 เพื่อคำนวณหาโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดรวมของอาคาร ดังสมการที่ (21)



Plain Beam

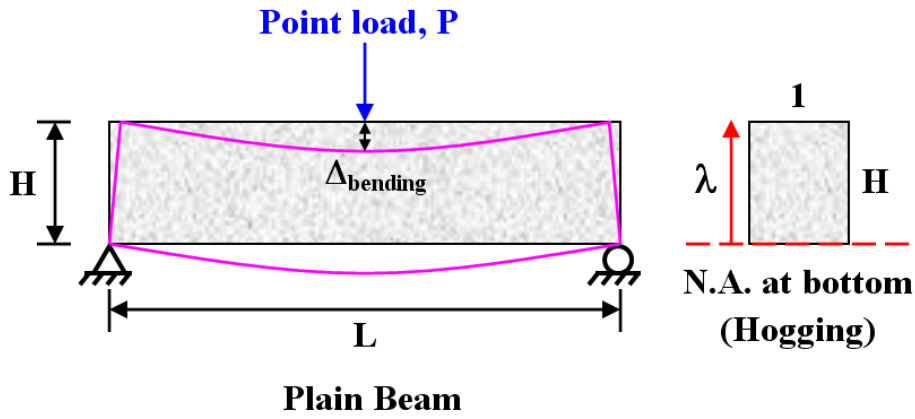
(ก) อาคารที่ไม่มีช่องเปิด (Plain Beam)



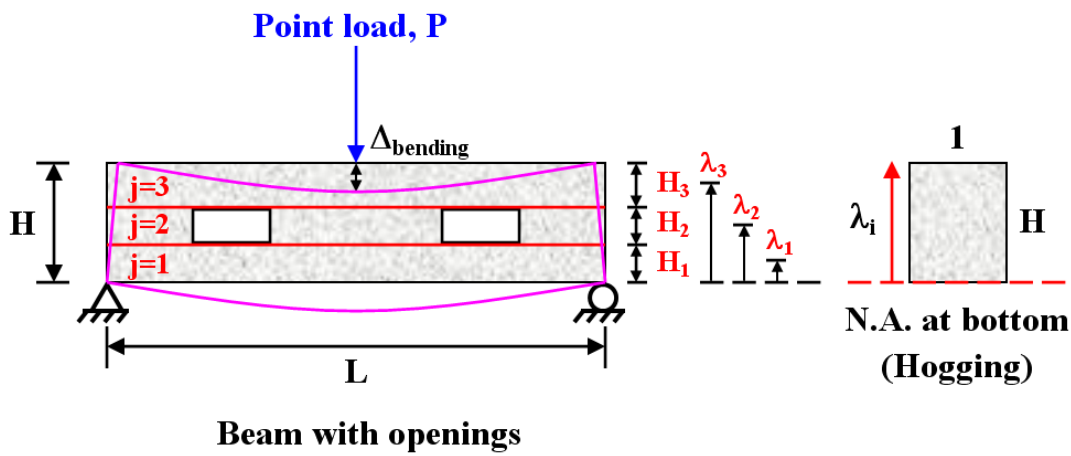
Beam with openings

(ข) อาคารที่มีช่องเปิด (Beam with Openings)

รูปที่ 15 ความสูงส่วนย่อยของหน้าตัดแบ่งอาคารในแนวตั้ง ของโซน Sagging สำหรับหาค่า I^*



(ก) อาคารที่ไม่มีช่องเปิด (Plain Beam)



(ข) อาคารที่มีช่องเปิด (Beam with Openings)

รูปที่ 16 ความสูงส่วนย่อยของหน้าตัดแบ่งอาคารในแนวดิ่ง ของโซนHogging สำหรับหาค่า I^*

$$I^* = \sum_{j=1} \left[\frac{1}{12} \cdot t \cdot \left\{ \frac{(L \cdot h_j - (A_o)_j)}{L} \right\}^3 + t \cdot \frac{(L \cdot h_j - (A_o)_j)}{L} \cdot \lambda_j^2 \right] \quad (21)$$

โดย	I^*	คือ	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเทียบเท่า
	$(A_o)_j$	คือ	พื้นที่ช่องเปิดตามแนวความสูงส่วนย่อย j
	h_j	คือ	ความสูงส่วนย่อยของหน้าตัดแบ่ง j
	λ_j	คือ	ระยะจาก Neutral axis ถึงตำแหน่งของหน้าตัดแบ่งย่อย j
	L	คือ	ความยาวของอาคารในพื้นที่ที่รุดตัว
	H	คือ	ความสูงของอาคารในพื้นที่ที่รุดตัว
	t	คือ	ความหนาของผนังอาคาร

3.2.3) ค่า Normalised Stiffness Ratio, NSR

ค่า Stiffness ของอาคาร พิจารณาจากค่าแรงกระทำต่อค่าการแอ่นตัวของคานในรูปแบบของค่าแรงกระทำเป็นจุด P ที่กึ่งกลางคาน ทหารด้วยค่า Deflection ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (8) นำค่าดังกล่าวเปรียบเทียบกับกรณีอาคารที่ไม่มีช่องเปิด (คานทึบ) และอาคารที่มีช่องเปิด เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่า NSR ในรูปพารามิเตอร์ค่า Stiffness ของอาคาร ดังสมการที่ (24) ดังนี้

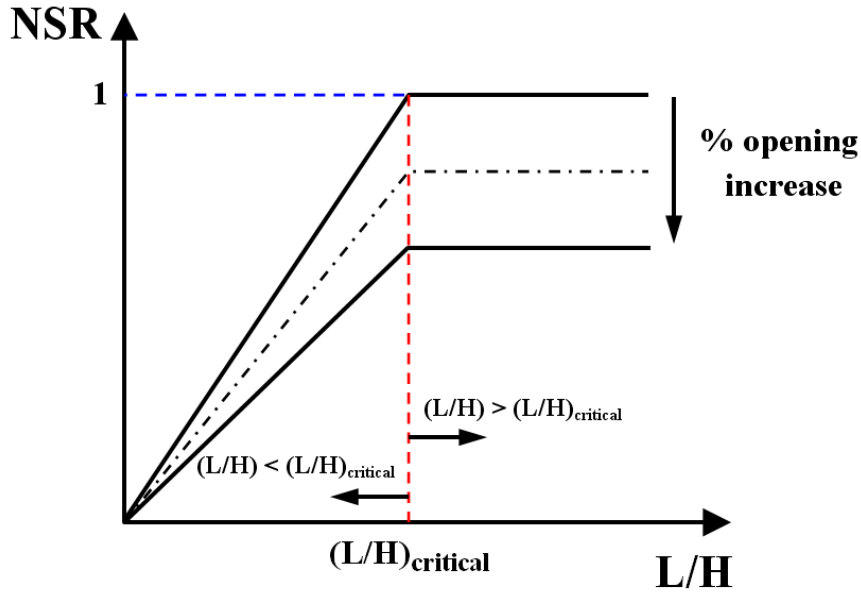
$$K_{plain\ beam} = \frac{1}{\frac{L^3}{48EI} + \frac{3L}{8GA}} \quad \text{สำหรับกรณีอาคารที่ไม่มีช่องเปิด} \quad (22)$$

$$K_{equivalent} = \frac{1}{\frac{L^3}{48EI^*} + \frac{3L}{8GA^*}} \quad \text{สำหรับกรณีอาคารที่มีช่องเปิด} \quad (23)$$

$$NSR = \frac{K_{equivalent}}{K_{plain\ beam}} \quad (24)$$

โดย	NSR	คือ	Normalised Stiffness Ratio
	$K_{plain\ beam}$	คือ	ค่า Stiffness ของอาคาร (คานทึบ)
	$K_{equivalent}$	คือ	ค่า Stiffness ของอาคาร (ช่องเปิด)
	EI	คือ	ความแข็งแรงต้านโมเมนต์แรงดัด
	GA	คือ	ความแข็งแรงต้านแรงเฉือน
	EI^*	คือ	ความแข็งแรงต้านโมเมนต์แรงดัดเทียบเท่า
	GA^*	คือ	ความแข็งแรงต้านแรงเฉือนเทียบเท่า
	L	คือ	ความยาวของอาคารในพื้นที่ทรุดตัว

ทั้งนี้ปรับแก้ค่า EI^* และ GA^* ของอาคาร จากกรณีการเปลี่ยนแปลงของค่า Deflection Ratio กับค่าความเครียดแรงดึง (Tensile Strain) ของอาคาร เนื่องจากพฤติกรรมการรับแรงน้อยสุดของอาคาร จากค่าความเครียดแรงเฉือนเป็นโมเมนต์แรงดัด ที่อัตราส่วนขนาดอาคารน้อยสุดหรือ $\left(\frac{L}{H}\right)_{critical}$ เท่ากับ 3.125 โดยกรณีนี้ [9]Pickhaver,2006 ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Stiffness ของทั้งอาคารที่มีช่องเปิดและไม่มีช่องเปิด กับอัตราส่วนขนาดอาคาร (L/H) กรณีแรงกระทำโค้งพาราโบลา (Parabolic Load) ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ ในโซนพื้นที่ทรุดตัวทั้ง Sagging Zone และ Hogging Zone ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง NSR กับ L/H ดังรูปที่ 17 ซึ่งสรุปได้ว่าค่า NSR จะแปรผันโดยตรงกับอัตราส่วนขนาดอาคาร (L/H) ดังสมการที่ (25)



รูปที่ 17 การเปลี่ยนแปลงค่า NSR ณ ตำแหน่งค่า $(L/H)_{critical}$ และเปอร์เซ็นต์ช่องเปิดของอาคาร [9]Pickhaver,2006

$$\frac{K_{equivalent}}{K_{plain beam}} = \frac{(L/H)}{(L/H)_{critical}} \quad (25)$$

ทั้งนี้ กรณีการเปลี่ยนแปลงค่า Equivalent Bending Stiffness (EI^*) และ Equivalent Shear Stiffness (GA^*) ขึ้นกับอัตราส่วนขนาดอาคาร (L/H) แยกออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

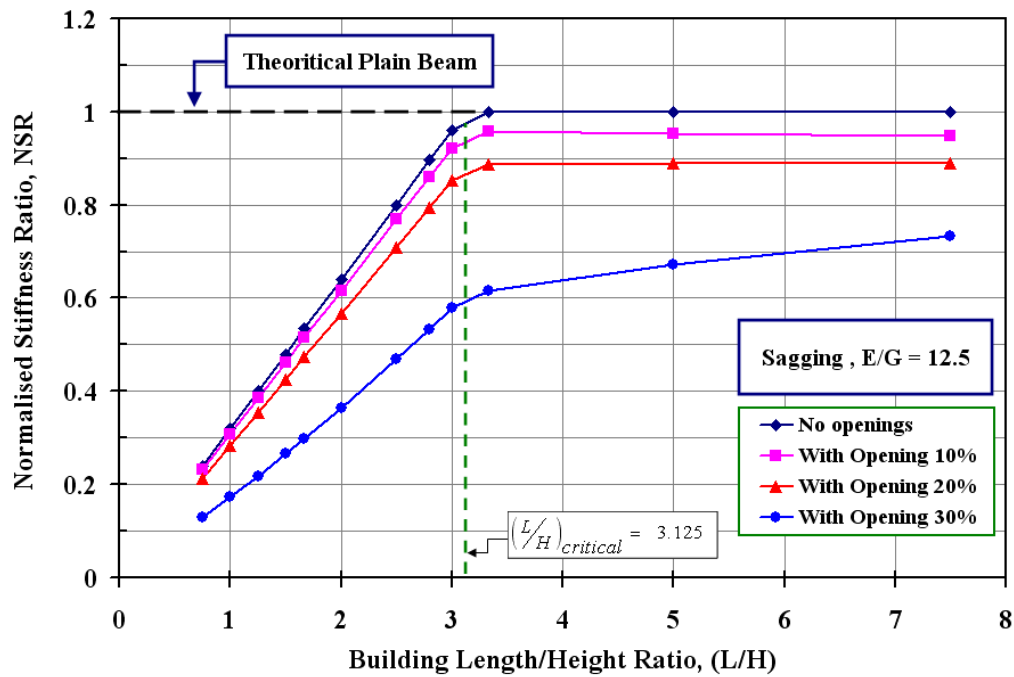
กรณีที่ 1 $\left(\frac{L}{H}\right) < \left(\frac{L}{H}\right)_{critical}$ ค่า A^* และ I^* ปรับแก้ตามอัตราส่วนขนาดอาคาร $\left(\frac{L}{H}\right)_{critical}$ ดังสมการที่ (26) และ (27)

$$A^* = \frac{(L/H)}{(L/H)_{critical}} \cdot \frac{L}{\sum_{i=1} \left(\frac{L_i}{t.H - (A_o)_i} \right)} \quad (26)$$

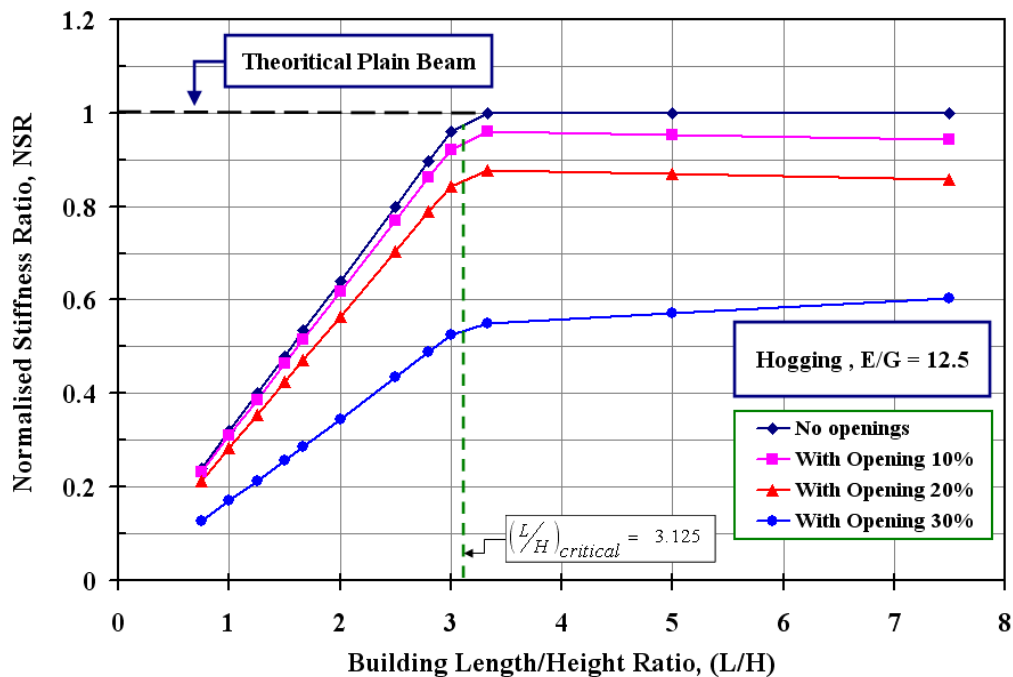
$$I^* = \frac{(L/H)}{(L/H)_{critical}} \cdot \sum_{j=1} \left[\frac{1}{12} \cdot t \cdot \left\{ \frac{(L.h_j - (A_o)_j)}{L} \right\}^3 + t \cdot \frac{(L.h_j - (A_o)_j)}{L} \cdot \lambda_j^2 \right] \quad (27)$$

กรณีที่ 2 $\left(\frac{L}{H}\right) > \left(\frac{L}{H}\right)_{critical}$ ค่า A^* และ I^* ไม่ปรับแก้ตามอัตราส่วนขนาดอาคาร $\left(\frac{L}{H}\right)_{critical}$ ยังคงพิจารณาจากสมการที่ (20) และ (21) เช่นเดิม ซึ่งได้ทำการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่าง NSR กับ

L/H ที่เปอร์เซ็นต์ช่องเปิดของอาคารจำลอง เท่ากับ 0%, 10%, 20% และ 30% ตามลำดับ สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (E/G เท่ากับ 12.5) ในพื้นที่ทรุดตัว Sagging Zone และ Hogging Zone ดังรูปที่ 18



(ก) โซนแอ่นทรุดตัว (Sagging Zone)



(ข) โซนด้นบวมตัว (Hogging Zone)

รูปที่ 18 การเปลี่ยนแปลงค่า NSR ณ ตำแหน่งค่า $(L/H)_{critical}$ และเปอร์เซ็นต์ช่องเปิดของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ในพื้นที่ทรุดตัวจากงานขุดเจาะอุโมงค์

เมื่อวิเคราะห์ค่า NSR ของอาคารทั้งในช่วงโชน Sagging และโชน Hogging พบว่า กรณีที่ 1 ต้องปรับแก้ค่า A, I เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่า NSR ที่มีค่าเพิ่มขึ้น ตามอัตราส่วนขนาดอาคาร และกรณีที่ 2 ไม่ต้องปรับแก้ ค่า A, I เนื่องจากค่า NSR คงที่ ไม่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ ค่า NSR จะมีค่าน้อยลง เมื่อเปอร์เซ็นต์ช่องเปิดของอาคารเพิ่มขึ้นสำหรับทุกกรณี นั่นคือ ค่า Equivalent Bending Stiffness (EI*) และ Equivalent Shear Stiffness (GA*) ของอาคารลดลง ตามเปอร์เซ็นต์ช่องเปิดที่เพิ่มขึ้น

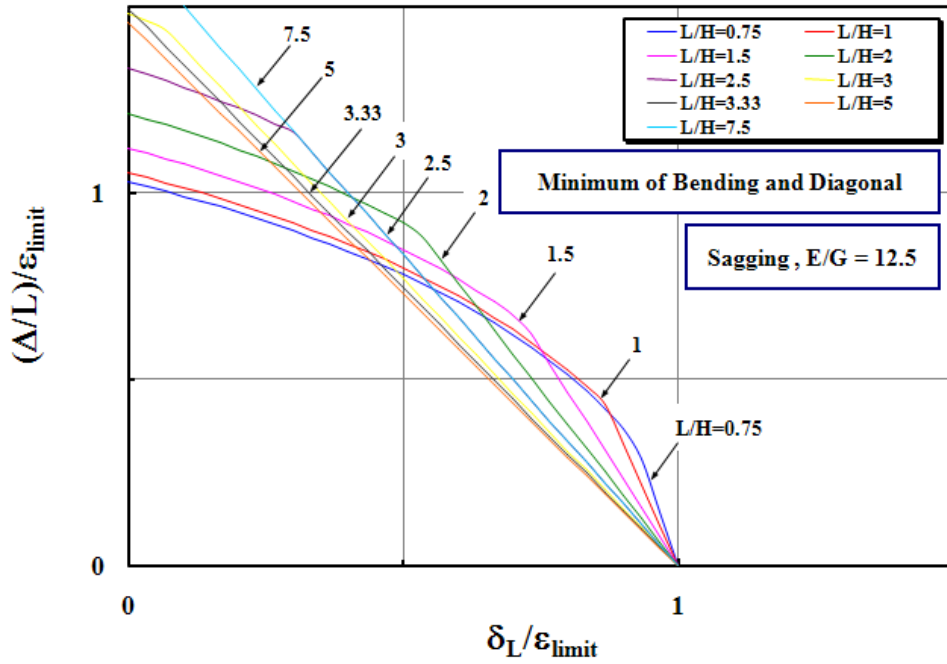
การประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นของอาคารที่มีช่องเปิด จะพิจารณาจากค่า Deflection Ratio ของอาคาร ค่าความเครียดแรงดึงในแนวราบ และค่าความเครียดแรงดึงวิกฤต เช่นเดียวกับการประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นของอาคารทึบ (ไม่มีช่องเปิด) โดยคำนวณจากสมการที่ (3) ถึง (7) แต่ค่า C_b และ C_s ในกรณีอาคารมีช่องเปิด จะคำนวณจากสมการที่ (28) และ (29) ดังนี้

$$C_b = \frac{L}{12\lambda} + \frac{3I^*}{2\lambda LA^*} \left(\frac{E}{G} \right) \quad (28)$$

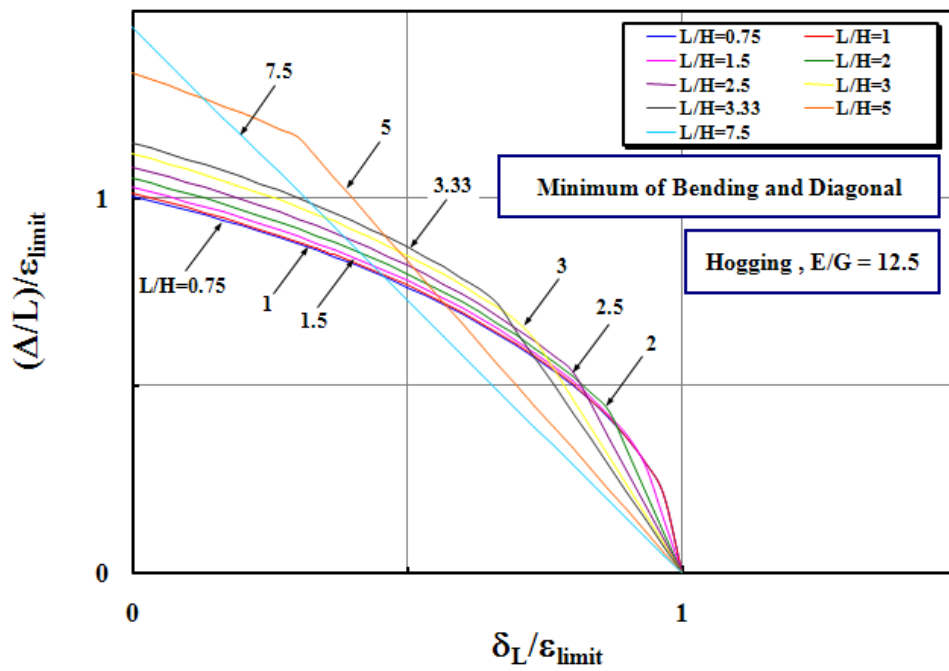
$$C_s = 1 + \frac{L^2 A^*}{18I^*} \left(\frac{G}{E} \right) \quad (29)$$

อย่างไรก็ตาม ยังคงพิจารณาตำแหน่ง Neutral axis ขึ้นกับโชนการหลุดตัวที่ผิวดิน ภายใต้เงื่อนไขเดียวกับการคำนวณค่าความเครียดแรงดึงในกรณีอาคารทึบไม่มีช่องเปิด ซึ่งคำนวณค่า Deflection Ratio เทียบกับ ϵ_{limit} จากสมการที่ (9) ถึง (13) โดยเลือกค่า Deflection Ratio เนื่องจากการเกิดระหว่างค่า Bending Strain (ϵ_{br}) หรือ Diagonal Strain (ϵ_{dr}) ที่น้อยกว่า มาวิเคราะห์

จากหลักการคำนวณค่า Equivalent Stiffness ของอาคาร เพื่อพิจารณาค่า EI* และ GA* ที่เหมาะสม ในรูปแบบ Normalised Stiffness Ratio, (NSR) สำหรับอัตราส่วนขนาดอาคาร L/H ต่างๆ โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\Delta/L}{\epsilon_{limit}}$ กับ $\frac{\delta_L}{\epsilon_{limit}}$ สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (กรณี E/G เท่ากับ 12.5) ยกตัวอย่าง กรณีอาคารไม่มีช่องเปิด (Plain beam) ดังรูปที่ (19) และกรณีอาคารที่มีช่องเปิด (Beam with openings) 30% ดังรูปที่ (20) ซึ่งจะพบว่า $\frac{\delta_L}{\epsilon_{limit}}$ เมื่อเพิ่มขึ้นจากศูนย์ เกิด Diagonal strain (ส่วนที่เป็นเส้นโค้ง) ขึ้นก่อน แล้วจึงเปลี่ยนแปลงเป็น Bending strain (ส่วนที่เป็นเส้นตรง) นอกจากนี้ พิจารณาค่า $\frac{\delta_L}{\epsilon_{limit}}$ และ L/H ค่าๆหนึ่ง เมื่อ %Opening ของอาคารเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า Deflection Ratio เพิ่มมากขึ้น สำหรับพฤติกรรมการรับแรงเฉือน ขณะเดียวกัน ค่า Deflection Ratio จะลดน้อยลงสำหรับพฤติกรรมการรับโมเมนต์แรงดัด

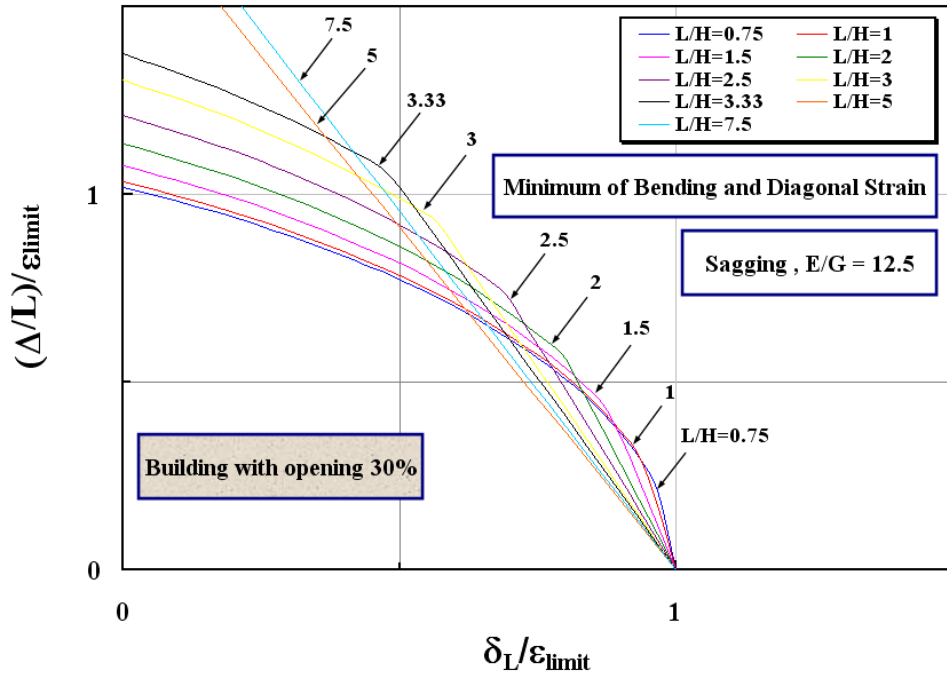


(ก) โซนแอ่นทรุดตัว (Sagging Zone)

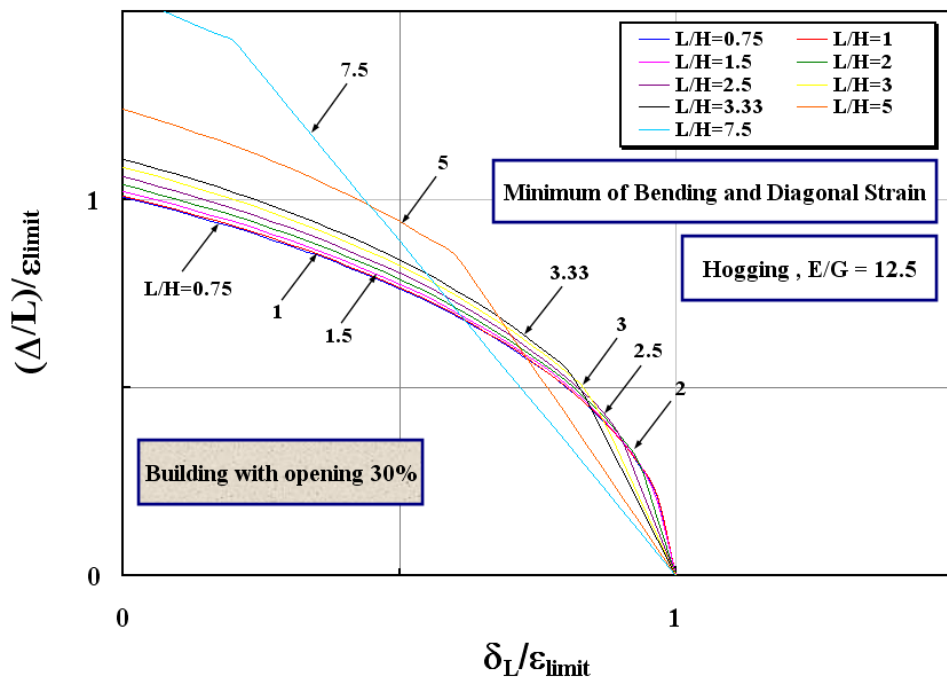


(ข) โซนด้นบวมตัว (Hogging Zone)

รูปที่ 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\Delta/L}{\epsilon_{limit}}$ และ $\frac{\delta_L}{\epsilon_{limit}}$ ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (กรณีอาคารไม่มีช่องเปิด)



(ก) โซนแอ่นทรุดตัว (Sagging Zone)

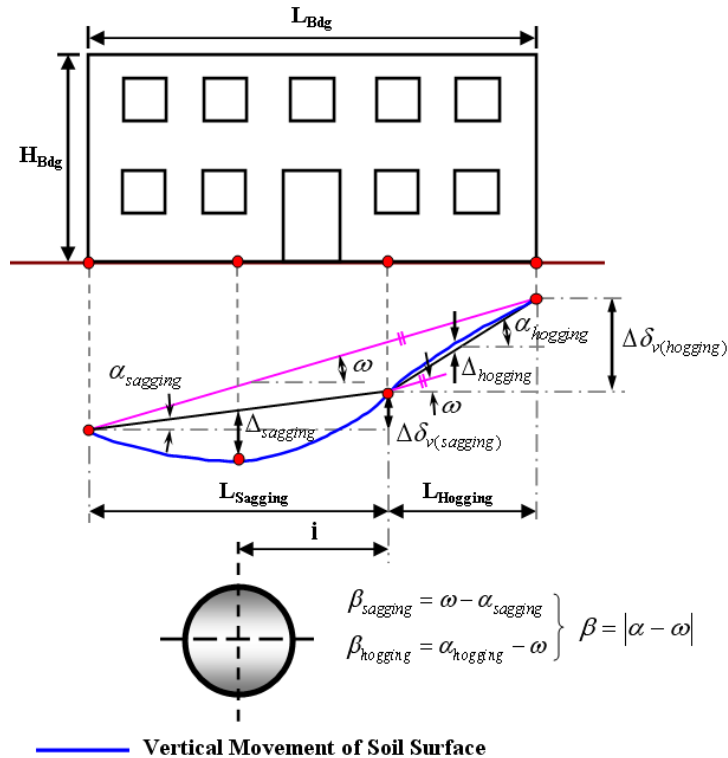


(ข) โซนด้นบวมตัว (Hogging Zone)

รูปที่ 20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{\Delta/L}{\epsilon_{limit}}$ และ $\frac{\delta_L}{\epsilon_{limit}}$ ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (กรณีอาคารมีช่องเปิด 30%)

3.3) การวิเคราะห์ค่าความชันเอียงตัวของอาคาร (Angular Distortion)

เป็นวิธีที่ง่าย สำหรับการจำแนกความเสียหายของอาคารจากค่าความชันเอียงตัวของฐานอาคาร เทียบกับแนวเส้นทรุดตัวของดินใต้ฐานอาคาร (Angular Distortion, β) โดยพิจารณาผลต่างค่าความชันระหว่าง ความชันของเส้นตรงที่เชื่อมระหว่าง 2 จุด ของฐานอาคารภายในพื้นที่ทรุดตัว Sagging Zone หรือ Hogging Zone เทียบกับเส้นแนวราบ (Slope, α) กับความชันของเส้นตรงระหว่างมุมของฐานอาคารที่เอียงตัวจากแนวราบ (Tilt, ω) ดังรูปที่ 21



รูปที่ 21 พฤติกรรมการทรุดตัวและเอียงตัวของอาคาร

การพิจารณาค่าความชันเอียงตัวของฐานอาคารเทียบกับแนวเส้นทรุดตัวของดินใต้ฐานอาคาร หรือเรียกว่า Angular Distortion, β ขึ้นกับอัตราส่วนขนาดอาคาร และอาคารดังกล่าวอยู่ในพื้นที่ทรุดตัว Sagging Zone หรือ Hogging Zone ดังรูปที่ 22 ซึ่งพิจารณารายละเอียดแยกได้ 2 ลักษณะ ดังนี้

(1) Sagging Zone

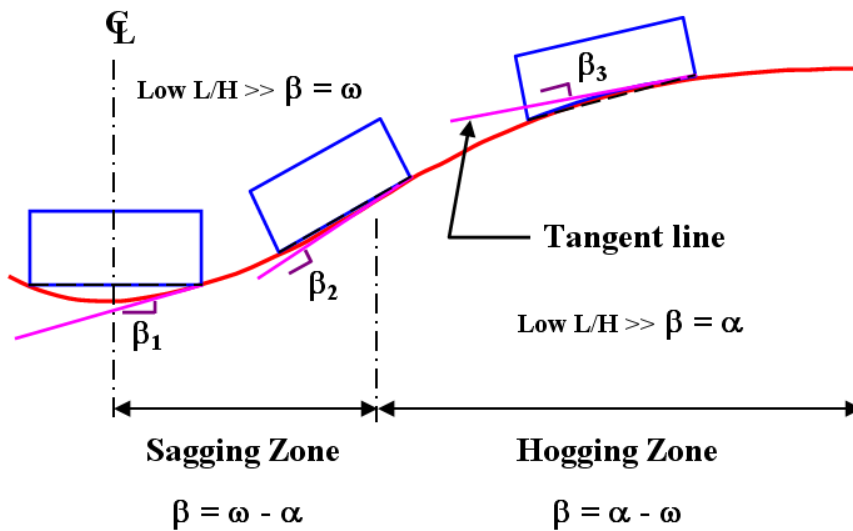
- กรณีอาคารขนาดเล็ก ($L/H < 1$) ค่าความชันเอียงตัวของฐานอาคารเทียบกับแนวเส้นทรุดตัวของดินใต้ฐานอาคาร (Angular Distortion, β) จะเข้าใกล้ค่าความชันของการหมุนเอียงตัวของอาคารจากแนวราบ (Tilt, ω) ซึ่งค่าความชันของแนวเส้นการทรุดตัวของดิน (Slope, α) จากแนวราบเข้าใกล้ศูนย์

- กรณีอาคารขนาด $L/H > 1$ ค่าความชันเอียงตัวของฐานอาคารเทียบกับแนวเส้นทรุดตัวของดินใต้ฐานอาคาร (Angular Distortion, β) จะเท่ากับผลต่างของค่าความชันของการหมุนเอียงตัวของอาคารจากแนวราบ (Tilt, ω) กับค่าความชันของแนวเส้นการทรุดตัวของดินจากแนวราบ (Slope, α)

(2) Hogging Zone

- กรณีอาคารขนาดเล็ก ($L/H < 1$) ค่าความชันเอียงตัวของฐานอาคารเทียบกับแนวเส้นทangentตัวของดินใต้ฐานอาคาร (Angular Distortion, β) จะเข้าใกล้ค่าความชันของแนวเส้นการทรุดตัวของดิน (Slope, α) จากแนวราบซึ่งค่าความชันของการหมุนเอียงตัวของอาคารจากแนวราบ (Tilt, ω) เข้าใกล้ศูนย์

- กรณีอาคารขนาด $L/H > 1$ ค่าความชันเอียงตัวของฐานอาคารเทียบกับแนวเส้นทangentตัวของดินใต้ฐานอาคาร (Angular Distortion, β) จะเท่ากับผลต่างของค่าความชันของแนวเส้นการทรุดตัวของดินจากแนวราบ (Slope, α) กับค่าความชันของการหมุนเอียงตัวของอาคารจากแนวราบ (Tilt, ω)

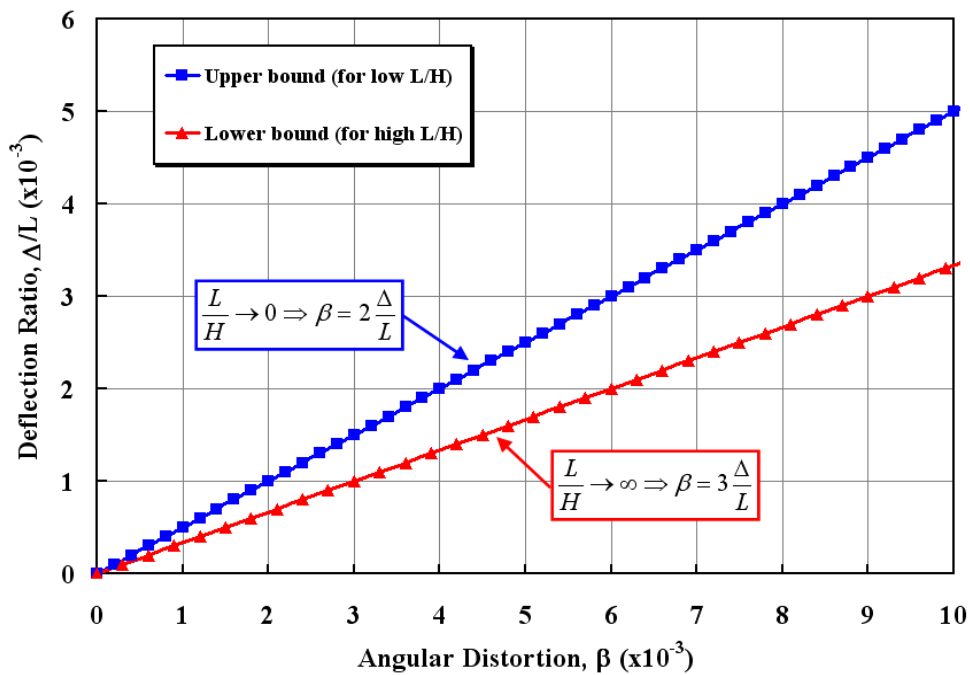


รูปที่ 22 ลักษณะการเอียงตัวของอาคารเทียบกับแนวเส้นทangentตัวของดิน

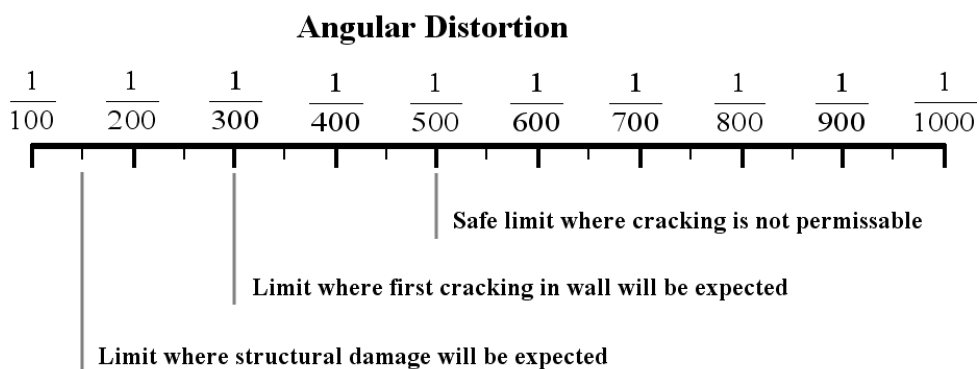
เมื่อพิจารณาค่าความชันเอียงตัวของฐานอาคาร (Angular Distortion, β) เปรียบเทียบกับพฤติกรรม การแอ่นตัวของคานเหล็ก จะพบว่า ค่าความชันของค่าทรุดตัวของคาน ตามสมการที่ (7) ที่ระยะเริ่มต้นหรือมุม อาคาร เทียบกับค่า Deflection Ratio จากสมการที่ (8) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง Angular Distortion, β และค่า Deflection Ratio ดังสมการที่ (30) โดยใช้หลักการคำนวณหาค่า NSR เพื่อประเมินหาค่า I^* และ A^* ของอาคารเช่นเดียวกัน ทั้งนี้ขอบเขตของค่า Angular Distortion, β เท่ากับ 2-3 เท่า ของค่า Deflection Ratio เมื่อค่า L/H เข้าใกล้ศูนย์ และอนันต์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 23

$$\frac{\beta}{\Delta/L} = 3 \left[\frac{1 + 12 \left(\frac{E}{G} \right) \cdot \left(\frac{I^*}{L^2 A^*} \right)}{1 + 18 \left(\frac{E}{G} \right) \cdot \left(\frac{I^*}{L^2 A^*} \right)} \right] \quad (30)$$

- โดย β คือ Angular Distortion
 $\frac{\Delta}{L}$ คือ Deflection Ratio
 $\frac{E}{G}$ คือ Stiffness Ratio
 L คือ ความยาวของอาคารในพื้นที่ที่ทรุดตัว
 A^* คือ พื้นที่หน้าตัดของอาคารที่มีช่องเปิด (ปรับแก้)
 I^* คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของอาคารที่มีช่องเปิด (ปรับแก้)



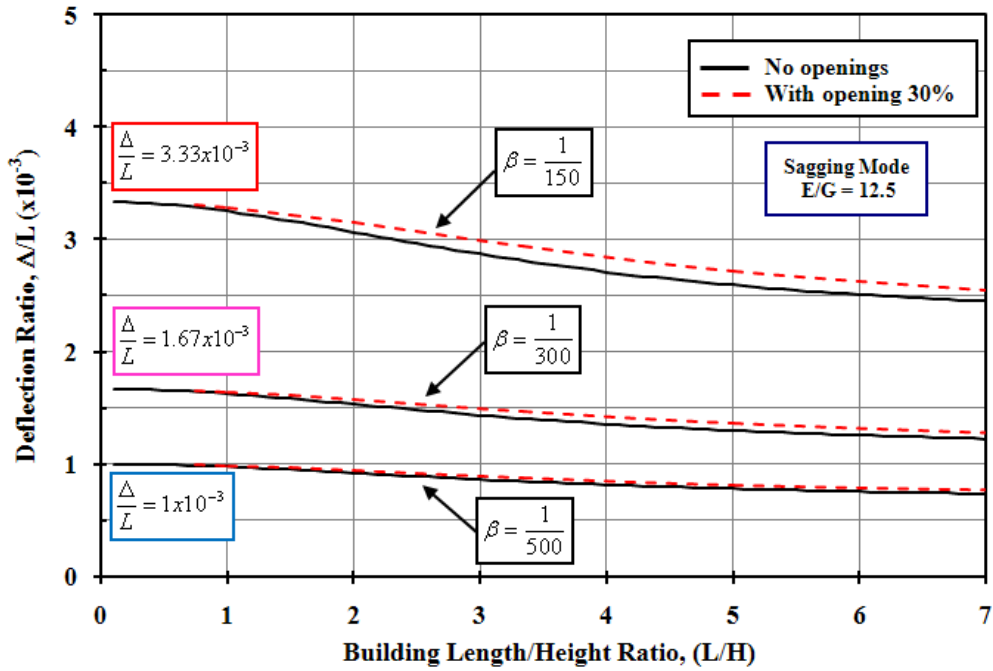
รูปที่ 23 ขอบเขตของ Deflection Ratio กับความชันเอียงตัวที่ฐานอาคาร อัตราส่วนขนาดต่างๆ



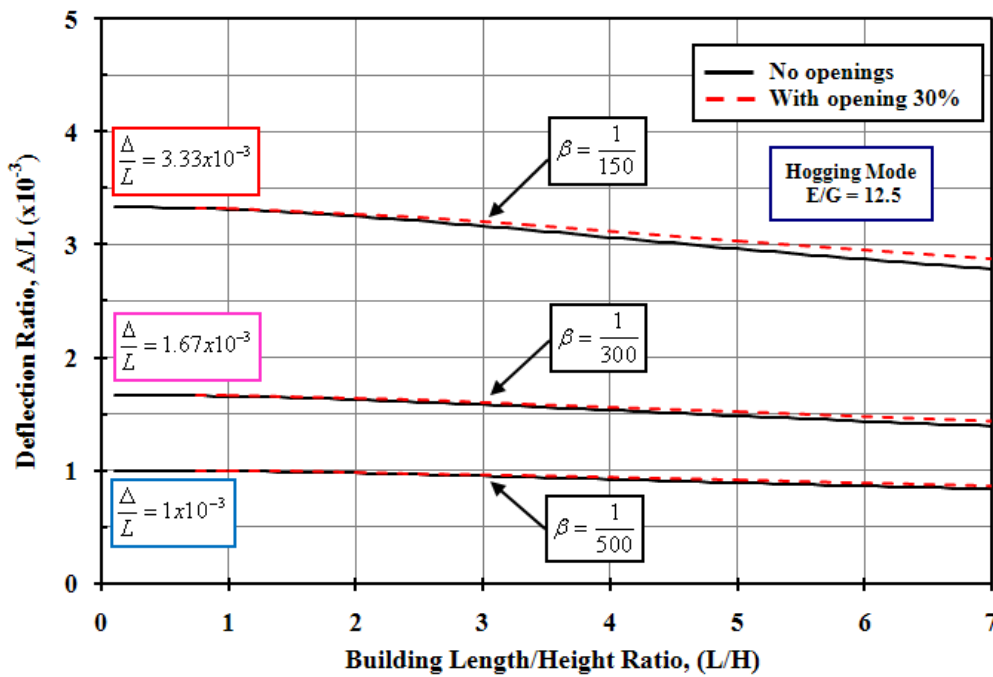
รูปที่ 24 เกณฑ์กำหนดค่า Angular Distortion ประเมินระดับความเสียหายของอาคาร

[13]Rankin,1988 เสนอแนะว่า ค่า Angular Distortion ของอาคาร น้อยกว่า 1/500 นั่นคือ อาคารอยู่ในสภาพความปลอดภัย และไม่มีความเสี่ยงต่อการเกิดรอยแตกร้าวที่ผนังและความเสียหายต่อโครงสร้างของอาคาร ดังรูปที่ 24

จากกรณีอาคารที่ไม่มีช่องเปิดและมีช่องเปิด 30% สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deflection Ratio และอัตราส่วนขนาดอาคาร ที่ค่า Angular Distortion อ้างอิงจากเกณฑ์ประเมินความเสียหาย จากรูปที่ 24 ซึ่งพบว่า เมื่อพิจารณาค่า Angular Distortion เดียวกันนั้น อาคารที่มีช่องเปิด จะเกิดค่า Deflection Ratio เพิ่มขึ้น เนื่องจาก Bending Stiffness และ Shear Stiffness ของอาคารลดลง ทั้งกรณีอาคารที่อยู่ในพื้นที่ทรุดตัว Sagging Zone และ Hogging Zone ดังรูปที่ 25 แต่ระดับความเสียหายจากการพิจารณาค่า Deflection Ratio ที่ค่า Angular Distortion เดียวกันนั้น ทั้งกรณีอาคารที่ไม่มีช่องเปิด และอาคารที่มีช่องเปิด แตกต่างกันน้อยมาก



(ก) กรณีอาคารหมุนเอียงตัวในพื้นที่ Sagging Zone



(ข) กรณีอาคารหมุนเอียงตัวในพื้นที่ Hogging Zone

รูปที่ 25 กราฟแสดงค่า Deflection Ratio กับความชันเอียงตัวที่ฐานอาคารในอัตราส่วนขนาดอาคารต่างๆ

4) ตัวอย่างการวิเคราะห์และประเมินระดับความเสียหายของอาคาร

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ชั้น ยาว 12 ม. สูง 16 ม. และมีช่องเปิด จำนวน 10 ช่อง แต่ละช่องมีขนาดกว้างและสูง 1.80 ม. และ 3.20 ม. ตามลำดับ ค่าโมดูลัสคอนกรีต เท่ากับ 10,000 MPa ตั้งอยู่ใกล้พื้นที่ก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 6.30 ม. ความลึกจากผิวดินถึงกึ่งกลางอุโมงค์ 22.0 ม. อยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง มีระยะห่างจากแนวกึ่งกลางอุโมงค์ถึงขอบมุมของอาคารด้านใกล้สุดเป็นระยะ 15 ม. โดยสมมติเปอร์เซ็นต์การสูญเสียของมวลดิน เท่ากับ 1% การประเมินระดับความเสียหาย มีลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ ดังนี้

(1) พิจารณาค่า L/H, E/G, ν และช่องเปิด ของอาคาร

$$L/H = 12/16 = 0.75$$

$$E/G = 12.5 \text{ สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (E=10,000 MPa, G=800 MPa)}$$

$$\nu = 0.30 \text{ สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก}$$

(2) คำนวณแนวเส้นทรุดตัวที่ผิวดินใต้ฐานอาคาร พิจารณาแยก Sagging และ Hogging Zone

จากหลักการคำนวณค่าทรุดตัว (Vertical Settlement, S_v) และค่าเคลื่อนตัวในแนวนอน (Horizontal Displacement, S_h)

$$i = k.z = 0.50 \times 22.0 = 11 \text{ ม.}$$

$$S_{\max} = \frac{\left(\frac{V_s}{100} \cdot \frac{\pi}{4} D^2 \right)}{\sqrt{2\pi \cdot i}} = \frac{\left(\frac{1}{100} \times \frac{\pi}{4} (2 \times 3.15)^2 \right)}{\sqrt{2\pi \times (11.0)}} \times 1000 = 11.31 \text{ มม.}$$

$$S_{v1} = S_{\max} \exp\left(-\frac{y_1^2}{2i^2}\right) = 11.31 \times \exp\left(-\frac{15^2}{2(11)^2}\right) = 4.46 \text{ มม.}$$

$$S_{v2} = S_{\max} \exp\left(-\frac{y_2^2}{2i^2}\right) = 11.31 \times \exp\left(-\frac{(15+12)^2}{2(11)^2}\right) = 0.56 \text{ มม.}$$

$$S_{h1} = \frac{y_1}{z} S_{v1} = \frac{15}{22} \times 4.46 = 3.04 \text{ มม.}$$

$$S_{h2} = \frac{y_2}{z} S_{v2} = \frac{(15+12)}{22} \times 0.56 = 0.68 \text{ มม.}$$

$$\Delta S_v = |S_{v1} - S_{v2}| = |4.46 - 0.56| = 3.90 \text{ มม.}$$

$$\Delta S_h = |S_{h1} - S_{h2}| = |3.04 - 0.68| = 2.36 \text{ มม.}$$

พบว่า อาคารทั้งหลังอยู่ในพื้นที่ทรุดตัว Hogging Zone (ตำแหน่งมุมอาคารด้านใกล้สุด > ระยะ i)

(3) พิจารณาค่า L/H เปรียบเทียบกับ $(L/H)_{\text{critical}}$

$$L/H = 0.75 < (L/H)_{\text{critical}} = 3.125$$

จากรูปที่ 18 ค่า NSR น้อยกว่า 1

(4) คำนวณค่า NSR, A^* , I^* , C_b , C_s

$$(4.1) \text{ แบ่งความยาวเป็น 11 ส่วนย่อย แต่ละส่วนย่อยยาว, } L_i = 1.091 \text{ ม. และ } (A_o)_i = 5.28 \text{ ม}^2$$

(4.2) แบ่งความสูงเป็น 5 ส่วนย่อย แต่ละส่วนย่อย, $h_j = 3.2$ ม. และ $(A_o)_j = 5.76$ ม²
 λ_j มีค่าตั้งแต่ 1.6, 4.8, 8, 11.2, 14.4 ม. จากระดับฐานอาคาร ถึงกึ่งกลางแต่ละส่วนย่อย

$$A^* = \frac{L}{\sum_{i=1}^{11} \left(\frac{L_i}{t.H - (A_o)_i} \right)} = \frac{12}{\sum_{i=1}^{11} \left(\frac{(L)_i}{1x16 - (A_o)_i} \right)} = 8.50 \text{ ม}^2$$

$$\text{ปรับแก้ } A^* = \frac{0.75}{3.125} \times 8.50 = 2.04 \text{ ม}^2$$

$$I^* = \sum_{j=1}^5 \left[\frac{1}{12} t. \left\{ \frac{(Lh_j - (A_o)_j)}{L} \right\}^3 + t. \frac{(Lh_j - (A_o)_j)}{L} \cdot \lambda_j^2 \right]$$

$$= \sum_{j=1}^5 \left[\frac{1}{12} \times 1x \left\{ \frac{(12x3.2 - (A_o)_j)}{12} \right\}^3 + 1x \frac{(12x3.2 - (A_o)_j)}{12} \cdot \lambda_j^2 \right] = 1003.605 \text{ ม}^4$$

$$\text{ปรับแก้ } I^* = \frac{0.75}{3.125} \times 1003.605 = 240.865 \text{ ม}^4$$

$$K_{\text{plain beam}} = \frac{1}{\frac{L^3}{48EI} + \frac{3L}{8GA}} = \frac{1}{\frac{12^3}{48x10000x\left(\frac{1}{3}x16^3\right)} + \frac{3x12}{8x800x(16)}} = 2823.27$$

$$K_{\text{equivalent}} = \frac{1}{\frac{L^3}{48EI^*} + \frac{3L}{8GA^*}} = \frac{1}{\frac{12^3}{48x10000x(240.865)} + \frac{3x12}{8x800x(2.04)}} = 360.71$$

$$NSR = \frac{K_{\text{equivalent}}}{K_{\text{plain beam}}} = \frac{360.71}{2823.27} = 0.128 < 1$$

$$C_b = \frac{L}{12\lambda} + \frac{3I^*}{2\lambda LA^*} \left(\frac{E}{G} \right) = \frac{12}{12x16} + \frac{3x240.865}{2x16x12x2.04} \times (12.5) = 11.593$$

$$C_s = 1 + \frac{L^2 A^*}{18I^*} \left(\frac{G}{E} \right) = 1 + \frac{12^2 x 2.04}{18x240.865} \times \left(\frac{1}{12.5} \right) = 1.005$$

$$\varepsilon_{b,\max} = \frac{\left(\frac{\Delta}{L} \right)}{C_b} = \frac{\left(\frac{3.90}{1000} \right)}{11.593} \times 100 = 0.0336 \%$$

$$\varepsilon_{d,\max} = \frac{\left(\frac{\Delta}{L} \right)}{C_s} = \frac{\left(\frac{3.90}{1000} \right)}{1.005} \times 100 = 0.00388 \%$$

(5) คำนวณค่า δ_L และ $\frac{\Delta}{L}$ เทียบกับ $\varepsilon_{\text{limit}}$

$$\delta_L = \frac{\Delta \delta_L}{L} = \frac{\left(\frac{2.36}{1000} \right)}{12} \times 100 = 0.0197 \%$$

$$\varepsilon_{br} = \varepsilon_{b,\max} + \delta_L = 0.0336 + 0.0197 = 0.0533 \%$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{dr} &= \delta_L \left(\frac{1-\nu}{2} \right) + \sqrt{\delta_L^2 \left(\frac{1+\nu}{2} \right)^2 + \varepsilon_{d,\max}^2} \\ &= 0.0197x \left(\frac{1-0.30}{2} \right) + \sqrt{(0.0197)^2 x \left(\frac{1+0.30}{2} \right)^2 + (0.00388)^2} = 0.0202 \% \end{aligned}$$

(6) เลือกค่า Strain มากสุด ระหว่าง ε_{br} และ ε_{dr} นั่นคือ $\varepsilon_{br} = 0.0533 \%$ เทียบกับเกณฑ์กำหนดระดับความเสียหายของอาคาร แสดงในตารางที่ 3 พบว่าอยู่ในช่วง 0.050 - 0.075 % หรือ ระดับความเสียหายเล็กน้อยมาก (Very Slight)

นอกจากนี้ พิจารณา ค่า Angular Distortion ของอาคาร ในพื้นที่ทรุดตัว Hogging Zone จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \beta &= 3 \left[\frac{1+12 \left(\frac{E}{G} \right) \cdot \left(\frac{I^*}{L^2 A^*} \right)}{1+18 \left(\frac{E}{G} \right) \cdot \left(\frac{I^*}{L^2 A^*} \right)} \right] x \frac{\Delta}{L} = 3 \left[\frac{1+12x(12.5)x \left(\frac{240.865}{12^2 x 8.50} \right)}{1+18x(12.5)x \left(\frac{240.865}{12^2 x 8.50} \right)} \right] x \frac{(3.90/1000)}{12} \\ &= 0.657x10^{-3} = \frac{1}{1521} \text{ ซึ่งอยู่ในช่วง 2-3 เท่าของ } \frac{\Delta}{L} \end{aligned}$$

ความชันเอียงตัวที่ฐานอาคารที่มีช่องเปิด 30% เท่ากับ $\frac{1}{1521}$ ซึ่งน้อยกว่าเกณฑ์กำหนดความเสียหายที่เกิดรอยแตกร้าวที่ผนังอาคาร $\frac{1}{500}$ นั่นคือ อาคารมีความปลอดภัย

5) บทสรุป

ผลกระทบของงานขุดเจาะอุโมงค์ ที่มีต่อการเคลื่อนตัวของอาคารข้างเคียง สามารถจำแนกระดับความเสียหายของอาคาร ทำการวิเคราะห์ค่าความเครียดแรงดึงเนื่องจากโมเมนต์แรงดัด (ε_{br}) และแรงเฉือน (ε_{dr}) ซึ่งพิจารณาค่าทรุดตัวและค่าเคลื่อนตัวในแนวราบจากแนวเส้นการทรุดตัวที่ผิวดิน (Gaussian Curve) ที่ตำแหน่งใต้ฐานอาคาร ทั้งนี้ คุณสมบัติของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็น Isotropic Elastic เท่ากันตลอดโครงสร้าง และมีลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าความเครียดแรงดึงของอาคารที่มีช่องเปิด แบ่งเป็น 6 ขั้นตอน คือ

- (1) พิจารณาค่า L/H, E/G, ν และช่องเปิดของอาคาร
- (2) คำนวณแนวเส้นทรุดตัวที่ผิวดินใต้ฐานอาคาร พิจารณาแยก Sagging และ Hogging Zone
- (3) พิจารณาค่า L/H เปรียบเทียบกับ $(L/H)_{critical}$
- (4) คำนวณค่า A^* , I^* , C_b , C_s , NSR
- (5) คำนวณค่า ε_{br} และ ε_{dr} เทียบกับ ε_{limit}
- (6) ประเมินระดับความเสียหายของอาคาร

จากการเสนอการคำนวณค่า NSR เพื่อปรับแก้ค่า A^* และ I^* ที่ $(L/H)_{critical}$ เนื่องจากพฤติกรรมการรับแรงอาคารจากแรงเฉือน เป็นโมเมนต์คัต และค่า NSR จะลดลง เมื่อเปอร์เซ็นต์ช่องเปิดของอาคารเพิ่มขึ้น สำหรับทุกขนาดอาคาร ส่งผลให้ Δ/L เพิ่มขึ้น สำหรับพฤติกรรมรับแรงเฉือนของอาคาร และ Δ/L ลดลง สำหรับพฤติกรรมรับโมเมนต์แรงคัตของอาคาร

นอกจากนี้ การประเมินระดับความเสียหายของอาคารจากค่าความชันเอียงตัวที่ฐานอาคาร (Angular Distortion) เนื่องจากการทรุดตัวของผิวดินใต้ฐานอาคาร โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากวิธีการคำนวณค่าความเครียดแรงดึงของอาคารเช่นเดียวกัน ซึ่งระดับความเสียหายของอาคารกรณีที่ไม่มีช่องเปิดและมีช่องเปิด จากการเปรียบเทียบค่า Deflection Ratio ที่ค่า Angular Distortion ค่าหนึ่ง แตกต่างกันน้อยมาก แต่ก็เป็นการวิเคราะห์ระดับความเสียหายของอาคารที่ง่ายและรวดเร็ว

อย่างไรก็ตาม แม้จะมีการประเมินการณั้ระดับความเสียหายของอาคาร ก็ยังต้องมีการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดการเคลื่อนตัวของดิน การเคลื่อนตัวในแนวตั้งและแนวเอียงของอาคารข้างเคียงที่อยู่ในพื้นที่ทรุดตัว เพื่อหามาตรการป้องกันความเสียหายของอาคารที่อาจเกิดขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bjerrum, L., 1963. Discussion session IV., Proc. European Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Wiesbaden, Germany, pp. 135-137.
- [2] Boone, S. J., 1996. Ground-Movements-Related Building Damage, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE Vol. 122 (11), 886-896.
- [3] Boscardin M.D. and Cording E.J., 1989. Building response to excavation-induced settlement, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE Vol. No.115 (1), pp. 1-21.
- [4] Burland J.B., Broms, B.B. and de Mello, V.F.B., 1977. Behavior of Foundations and Structures, Proc., 9th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, II, State of the Art Report, Tokyo, pp. 495-546.
- [5] Burland J.B. and Wroth, C.P., 1974. Settlement behavior of buildings and associated damage, Proc., Conf. on Settlement of Structures, Pentech Press, London, pp. 611-654.
- [6] Finno R.J., Voss F.T., Rossow E. and Blackburn J.T., 2005. Evaluating Damage Potential Buildings Affected by Excavations, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE Vol. 131 (10), pp. 1199-1210.
- [7] Meyerhof, G. G., 1947. The Settlement Analysis of Building Frames, Struct. Eng., 25, pp. 369-409.
- [8] O'Reilly, M.P. and New, B.M., 1982. Settlement above Tunnels in the United Kingdom – their magnitude and prediction, Tunneling' 82, pp. 173-181.

- [9] Pickhaver, J. A., 2006. Numerical Modelling of Building Response to Tunnelling, Ph.D thesis, The University of Oxford.
- [10] Peck, R.B., 1969. Deep excavations and tunnelling in soft ground, Proc., 7th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., pp. 225-290.
- [11] Polshin, D. E. and Tokar, R. A., 1957. Maximum Allowable Non-Uniform Settlement of Structures, Proc., 4th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Vol. 1, Butterworths, London, pp. 402-405.
- [12] Potts, D.M., Addenbrooke, T.I., 1997. A Structure's Influence on Tunnelling Induced Ground Movements., Proc. Inst. Civ. Eng. Geotech. Eng. 125 (2), pp. 109-125.
- [13] Rankin, W.J., 1988. Ground Movements Resulting from Urban Tunnelling : Predictions and Effects. Engineering Geology of Underground Movements. F. G. Bell, M. G. Colshaw, J. C. Cripps, and M. A. Lovell, eds., Geological Society, London, pp. 79-92.
- [14] Schuster M., Kung, T.C., Juang, C.H. and Hashash, Y.M.A., 2009. Simplified Model for Evaluating Damage Potential of Buildings Adjacent to a Braced Excavation, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE Vol. No.135 (12), pp. 1823-1835.
- [15] Skempton, A. W. and MacDonald, D. H., 1956, The Allowable Settlement of Building, Proc. Inst. Civ. Eng., Struct. Build., 5, pp. 727-784.
- [16] Suwansawat, S. and Einstein, H.H., 2007. Describing Settlement Troughs over Twin Tunnels Using a Superposition Technique, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE Vol. No.133 (4), pp. 445-468.