การออกแบบฐานรากอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว

รองศาสตราจารย์ ดร. ฐิรวัตร บุญญะฐี

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โครงการพัฒนาหลักสูตรการเรียนรู้เรื่องการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) พ.ศ. 2568

หน้าที่ของฐานราก

(1) ส่งผ่านแรงกระทำ

เป็นจุดต่อที่ช่วยส่งผ่านแรงกระทำระหว่างอาคารกับชั้นดินได้โดยไม่เกิดการแตกหักเสียหาย

(2) รักษาเสถียรภาพ

กระจายแรงและรักษาเสถียรภาพของระบบให้รองรับน้ำหนักอาคารได้ ไม่เกิดการพลิกคว่ำหรือเลื่อนไถล

(3) จำกัดการทรุดตัว

จำกัดการทรุดตัวรวมและต่างระดับให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เพื่อความมั่นคงและสมรรถนะการใช้งาน

ผู้ออกแบบต้องเลือกใช้ระบบฐานรากที่ปลอดภัย เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ ก่อสร้างได้สะดวก และประหยัด

*ต้องคำนึงถึงปัจจัยความคงทนอื่นๆ เช่น ความชื้น ความร้อน และสารเคมี



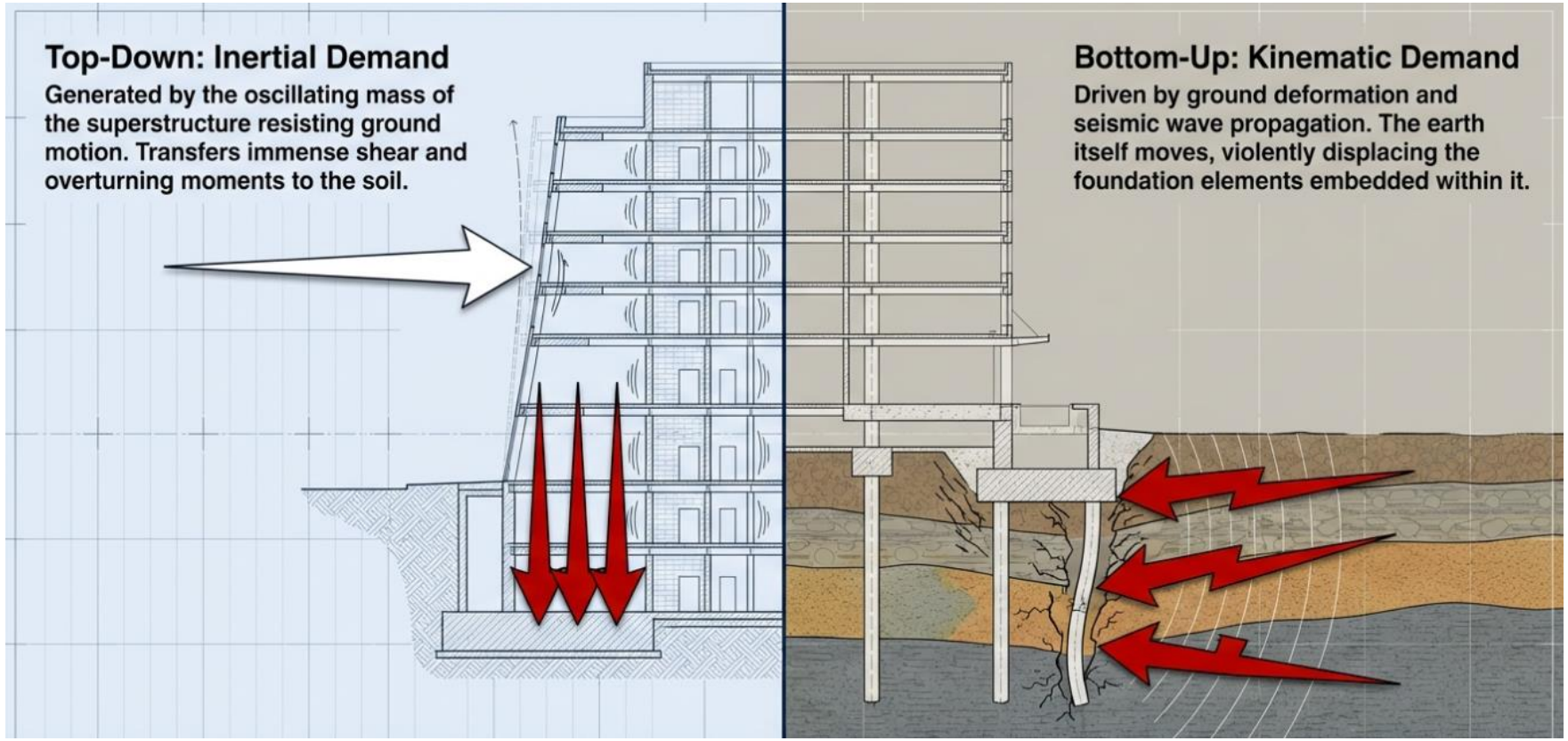
แรงกระทำต่อฐานรากเสาเข็ม

1. Kinetic Interaction (Inertial loads)

การเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างอาคารและฐานรากทำให้เกิดแรงกระทำต่อฐานราก

2. Kinematic Interaction

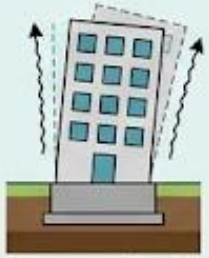
การเคลื่อนตัวของดินรอบเสาเข็มทำให้เกิดแรงภายในโครงสร้างเสาเข็ม



รูปแบบการวิบัติของฐานราก

แรงขับเคลื่อน (Driving Forces)

(1) ความเฉื่อย (Inertial Forces)



เกิดจากการเคลื่อนที่สัมพันธ์ของโครงสร้างส่วนบนและชั้นดิน

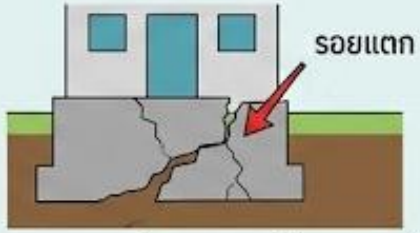
(2) Kinematic Interaction



เกิดจากการเสียรูปของชั้นดินระหว่างแผ่นดินไหว

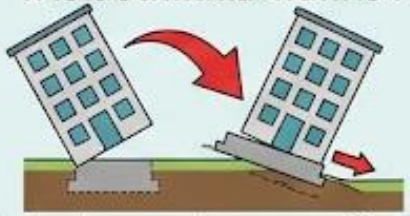
รูปแบบการวิบัติ (Failure Mechanisms)

การแตกหักเสียหายเชิงโครงสร้าง



ตัวฐานรากคอนกรีตเกิดการเฉือนขาด หรือ หัก เนื่องจากเหล็กเสริมไม่เพียงพอหรือจัดวางผิด

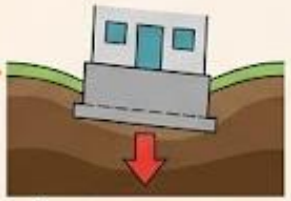
การสูญเสียเสถียรภาพต่อการเลื่อนไถลและพลิกคว่ำ



หน้าตัดหรือความกว้างฐานรากเล็กเกินไป ต้านโมเมนต์คว่ำและแรงด้านข้างไม่พอ

การสูญเสียเสถียรภาพของชั้นดินที่รองรับอาคาร

น้ำหนักบรรทุกรวม > ความสามารถดิน



น้ำหนักบรรทุกรวม > ความสามารถดิน

ปรากฏการณ์ดินเหลว (Liquefaction)



ฐานรากจม เอียง หรือไหลตามแนวลาดชันของตลิ่ง

การวิบัติเชิงการใช้งานอาคาร (Serviceability Failure)



แม้ไม่พังทลาย แต่ใช้งานไม่ได้หลังจากแผ่นดินไหว

ขั้นตอนการออกแบบฐานราก

➢ การออกแบบฐานรากต้องพิจารณาปัจจัยประกอบต่างๆ หลายด้าน โดยมีลำดับขั้นตอนหลักดังนี้

(1) รวบรวมข้อมูลที่จำเป็น

รวบรวมข้อมูลด้านวิศวกรรม, สถาปัตยกรรม และกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

(2) ประเมินสภาพชั้นดิน

วิเคราะห์กำลังของดิน, ระดับน้ำ และความเสี่ยงทางธรณีวิทยา

(3) เลือกระบบฐานราก

เลือกระหว่างฐานรากแผ่ หรือฐานรากเสาเข็มให้เหมาะสม

(4) สร้างแบบจำลองโครงสร้าง

สร้างแบบจำลองโครงสร้าง
ตามข้อมูลวัสดุ และ แรงกระทำที่ได้รวบรวมมา

(5) ออกแบบเชิงธรณีเทคนิค

พิจารณากำลังรับน้ำหนักและการเคลื่อนตัวของดิน

(6) ออกแบบเชิงโครงสร้าง

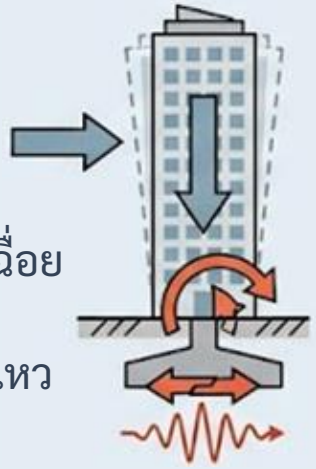
กำหนดเหล็กเสริม, แบบเสริมเหล็ก และข้อกำหนดทางวิศวกรรม

1. ข้อมูลที่จำเป็นต่อการออกแบบฐานรากต้านทานแผ่นดินไหว

ข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นต่อการออกแบบฐานรากต้านทานแผ่นดินไหวได้แก่

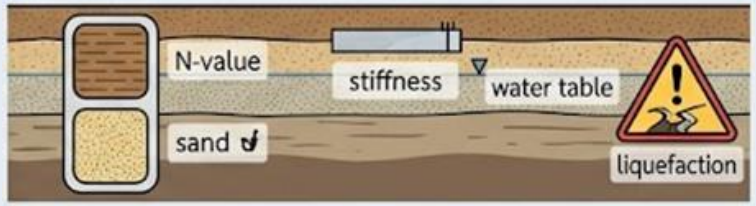
(1) แรงกระทำต่อฐานราก

- น้ำหนักอาคาร (Gravity load)
- แรงลม (Wind load)
- แรงดึง แรงอัด แรงเฉือน เนื่องจากความเฉื่อย (Kinetic responses)
- การเคลื่อนตัวของชั้นดินระหว่างแผ่นดินไหว (Kinematic responses)



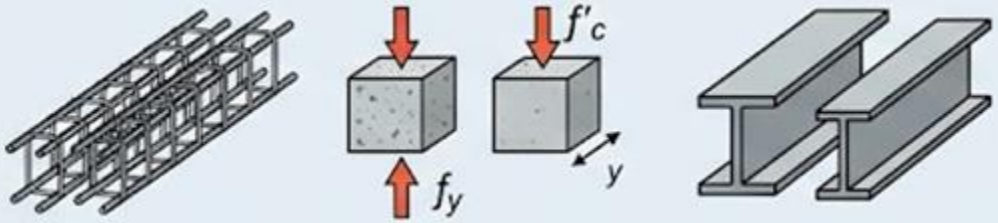
(2) ข้อมูลชั้นดินและคุณสมบัติดิน

- เพื่อใช้ในการออกแบบ
- ตรวจสอบความเสี่ยงทางธรณี (Liquefaction, Settlement)



(3) คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำฐานราก

- เพื่อใช้ในการออกแบบเชิงโครงสร้าง (Concrete, Steel strength)



(4) กฎหมาย ข้อกำหนด และมาตรฐาน

- กฎหมายการออกแบบในพื้นที่
- มาตรฐานทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง (DPT, EIT)



2. การประเมินสภาพชั้นดิน

การเริ่มออกแบบฐานรากจะต้องประเมินสภาพชั้นดินก่อน เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมต่อการสร้างอาคาร

(1) เมื่อเกิดแผ่นดินไหวจะต้องไม่เกิดปรากฏการณ์ดินเหลว (Liquefaction)

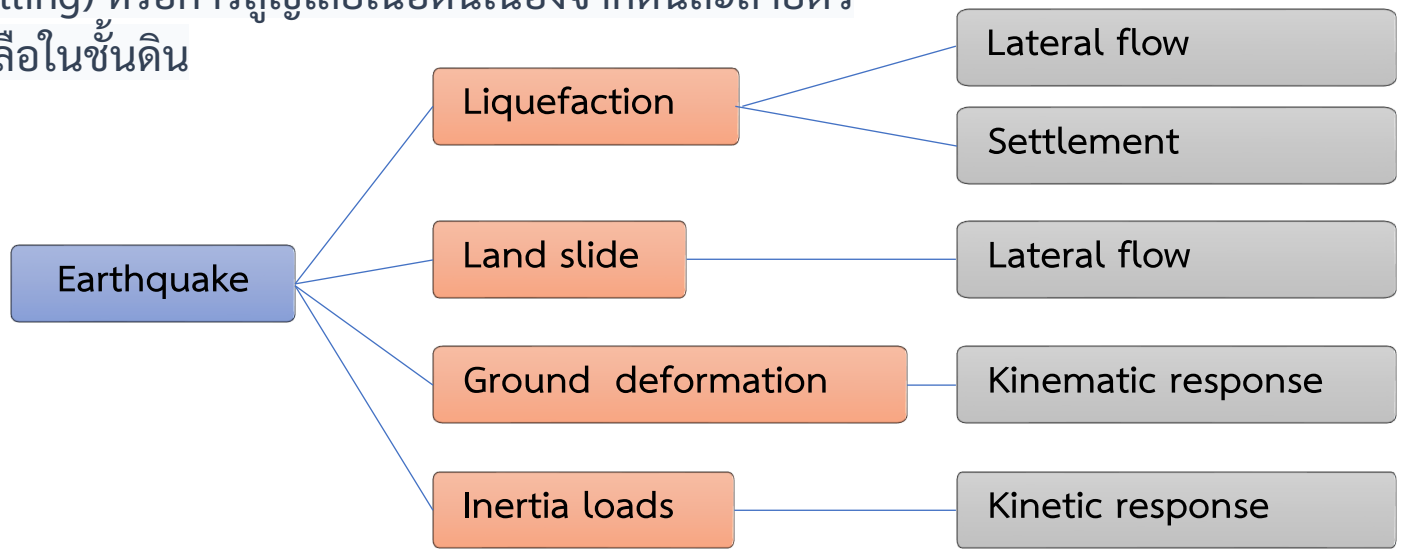
ตรวจสอบว่าชั้นดินมีโอกาสเกิดการสูญเสียกำลังและเกิดการทรุดตัวเป็นปริมาณมากหรือไม่

(2) เมื่อเกิดแผ่นดินไหวจะต้องไม่เกิดการเลื่อนไถลของชั้น (Lateral spreading, Land slide)

ตรวจสอบเสถียรภาพของชั้นดิน โดยเฉพาะบริเวณพื้นที่ลาดชันหรือใกล้ตลิ่ง

(3) การตรวจสอบความเสี่ยงทางธรณีอื่นๆ

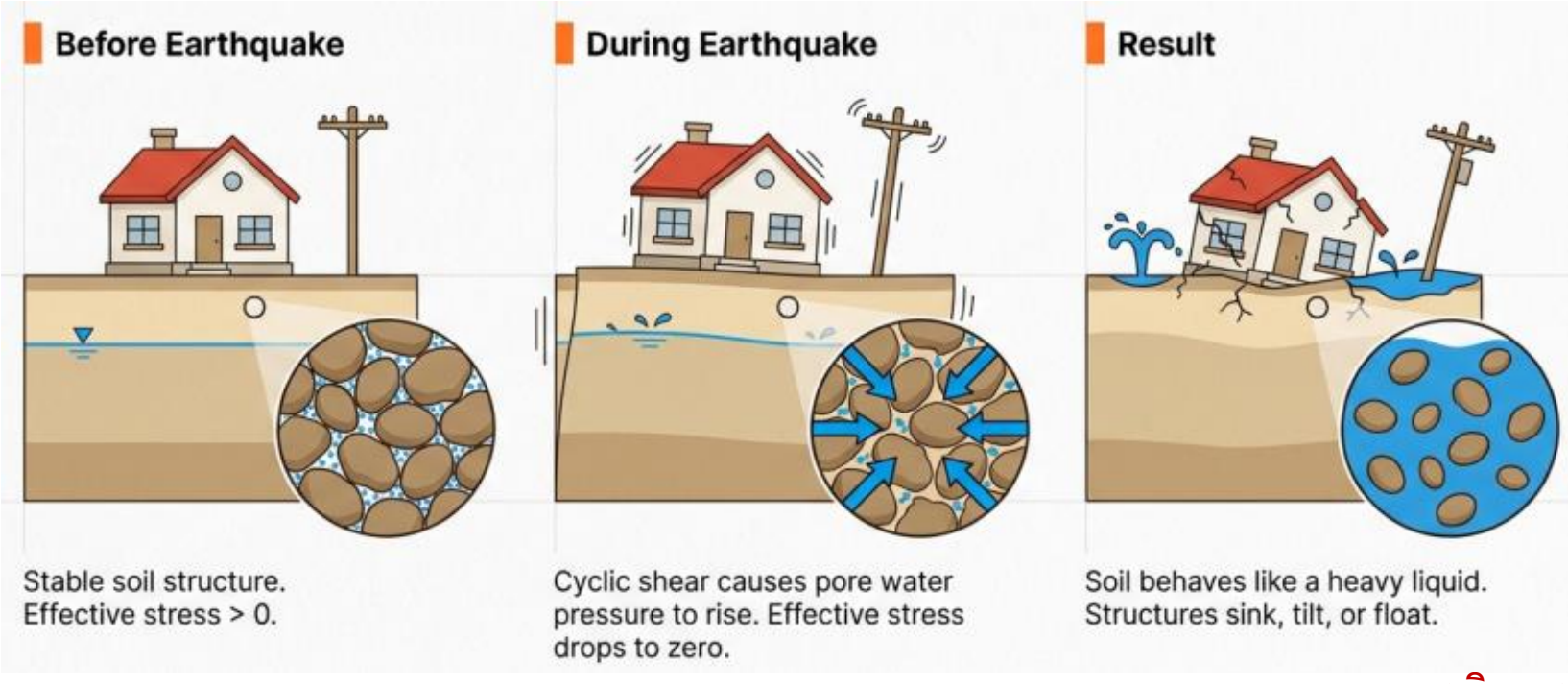
- การยกตัวเนื่องจากดินบวมตัว (Soil swelling) หรือการสูญเสียเนื้อดินเนื่องจากดินละลายตัว
- การกัดกร่อนทางเคมีจาก ซัลเฟตและเกลือในชั้นดิน



ปรากฏการณ์ดินเหลว (Liquefaction)

ปรากฏการณ์ดินเหลว คือ เหตุการณ์ที่แรงดันน้ำในดินมีค่าสูงขึ้นจนเท่ากับหน่วยแรงประสิทธิผล ทำให้แรงกดและกำลังรับแรงเฉือนระหว่างเม็ดดินมีค่าเป็นศูนย์

ก่อนเกิดแผ่นดินไหว ระหว่างเกิดแผ่นดินไหว เมื่อน้ำระบายออกจากชั้นทราย



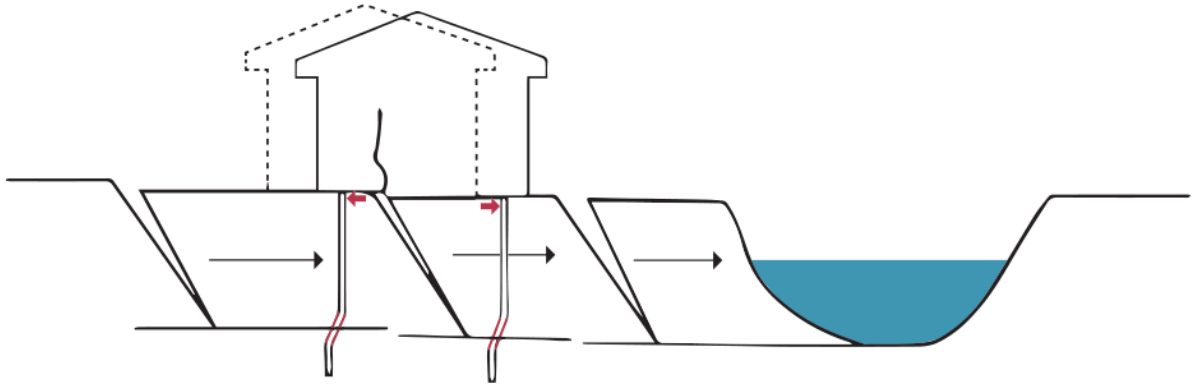


อาคารเกิดการเอียงหรือจมลง

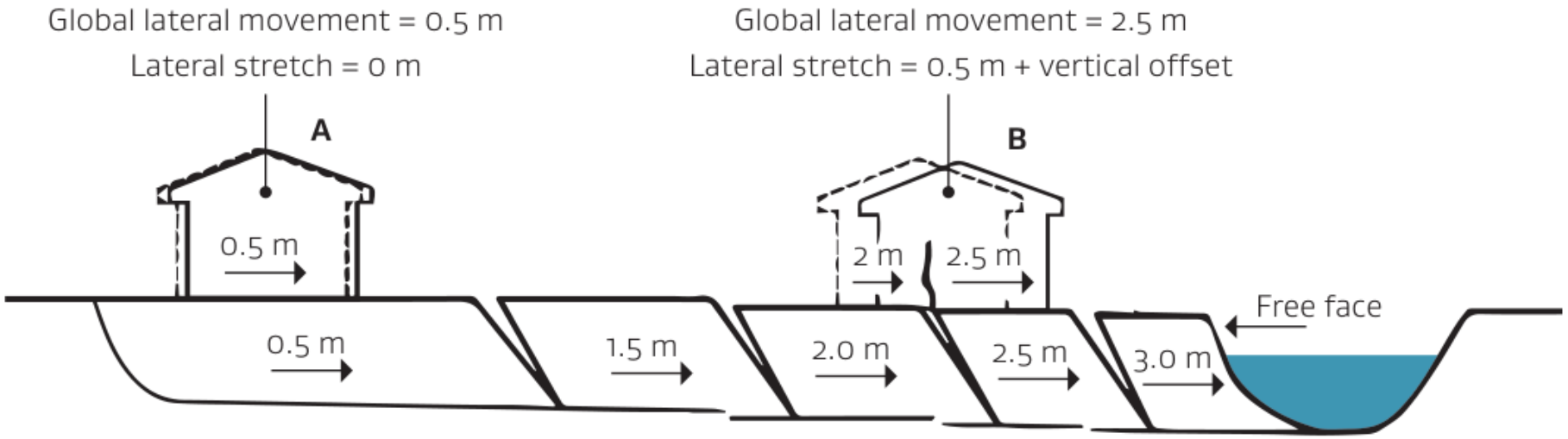
ดินสูญเสียกำลังรับน้ำหนัก ประพฤติตัวเสมือนของเหลวที่มีความหนาแน่นสูง

การไหลด้านข้าง (Lateral flow, Lateral spreading)

- เกิดขึ้นได้ง่ายในชั้นดินที่อยู่ใกล้ แหล่งน้ำ หรือ ตลิ่ง







2. การประเมินสภาพชั้นดิน

การเริ่มออกแบบฐานรากจะต้องประเมินสภาพชั้นดินก่อนเพื่อประเมินความเหมาะสมต่อการสร้างอาคาร

(1) เมื่อเกิดแผ่นดินไหวจะต้องไม่เกิดปรากฏการณ์ดินเหลว (Liquefaction) ซึ่งทำให้ชั้นดินที่รองรับอาคารสูญเสียกำลังและเกิดการทรุดตัวเป็นปริมาณมากหลังจากแผ่นดินไหวสิ้นสุดลง การตรวจสอบเบื้องต้นอาจจะดูได้จาก ค่า SPT, ชนิดของดิน ระดับน้ำใต้ดิน และระดับการสั่นสะเทือน ประกอบกัน (เจอน้ำใต้ดินภายใน 15 ม, $(N_1)_{60,cs} < 20$, seismic intensity > 0.10g)
ในกรณีที่จำเป็นจะต้องทำให้ดินแน่นด้วยวิธีการปรับปรุงดินต่างๆ เช่น Vibro-compaction, Dynamic compaction เป็นต้น

(2) เมื่อเกิดแผ่นดินไหวจะต้องไม่เกิดการเลื่อนไถลของชั้นดิน เช่น กรณีที่อาคารอยู่ใกล้ลาดชัน ตลิ่งแม่น้ำ ลาดผา หรือ เกาะดินถมที่เกิดการเลื่อนตัวได้ การตรวจสอบทำได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดชันแบบสถิตและวิธีของนิวมาร์ค หรือ การวิเคราะห์ FEM ในกรณีที่จำเป็นจะต้องเสริมเสถียรภาพของลาดชันให้มีความมั่นคงเสียก่อนจึงจะทำการก่อสร้างฐานรากอาคารบนพื้นที่นั้นได้

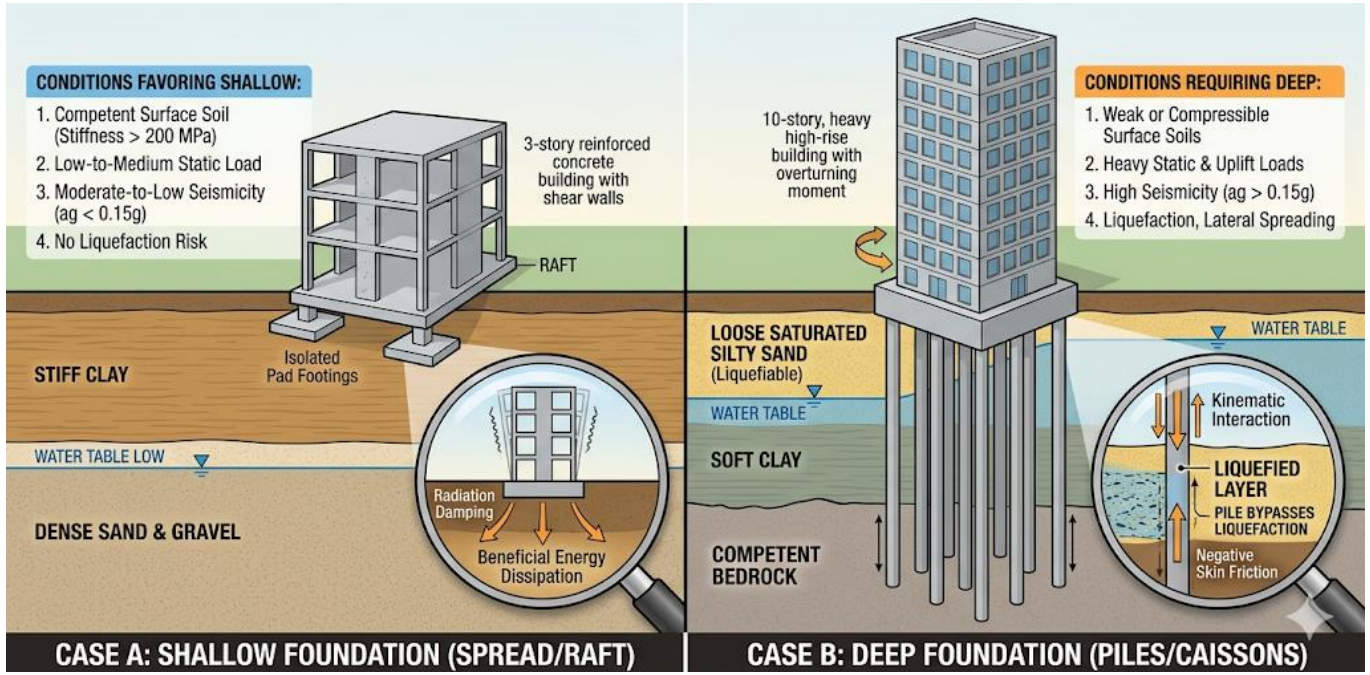
การเลือกรูปแบบฐานรากที่เหมาะสมจะพิจารณาปัจจัยต่างๆ ดังนี้

(1) สภาพชั้นดิน เจอชั้นดินแข็งอยู่ที่ระดับตื้น (ประมาณ 3 ม) หรือไม่

(2) ขนาดของแรงกระทำ น้ำหนักอาคารมากกว่ากำลังรับน้ำหนักของชั้นดินด้านบนหรือไม่ ต้องรับแรงดึงและแรงด้านข้างหรือไม่

(3) การทรุดตัวของฐานราก การทรุดตัวเกินค่าที่ยอมรับได้หรือไม่ (ถึงแม้จะไม่เกิดการวิบัติ)

(4) สภาพแวดล้อมในพื้นที่ก่อสร้าง แรงสั่นสะเทือนต่ออาคารข้างเคียง การจัดการน้ำใต้ดิน การขนส่งวัสดุ



ในแง่การออกแบบต้านแผ่นดินไหว

- ควรยึดโยงฐานราก (เช่นการใช้ tie beam) เพื่อให้อาคารเคลื่อนที่ไปด้วยกันทั้งอาคาร
- ฐานรากแผ่ (Shallow Foundation)

มีคาบธรรมชาติต่ำกว่า สลายพลังงานได้ดี แรงกระทำน้อยกว่าฐานรากเสาเข็ม

- ฐานรากเสาเข็ม (Deep Foundation)

ต้องออกแบบต้านทานแรงฉุด แรงเฉือนและดัดจากการเคลื่อนตัวของดิน และแรงดึงจากการโยกตัว

3. การเลือกระบบฐานราก

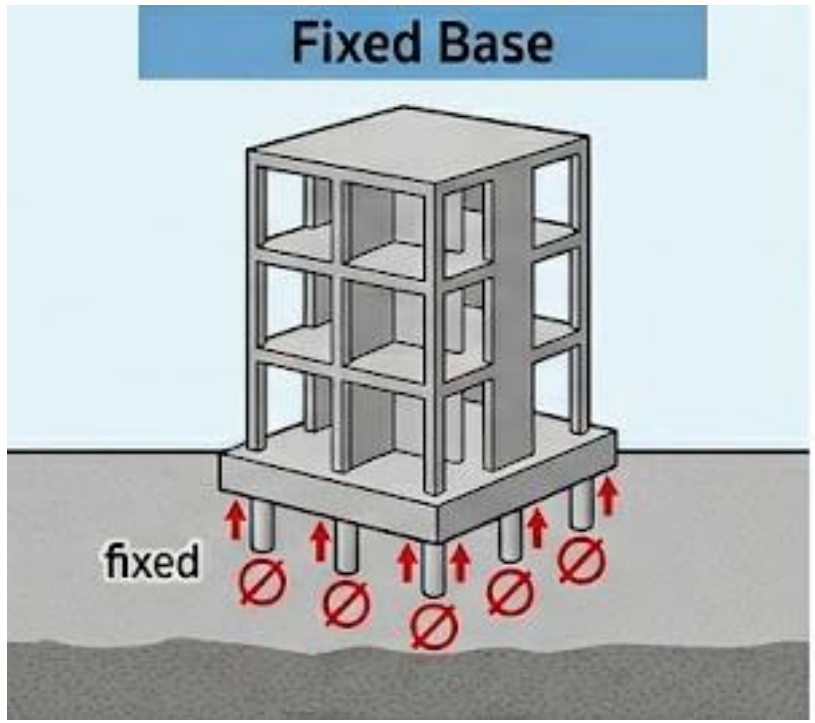
➢ **ควรเลือกใช้ฐานรากให้เหมาะกับสภาพธรณี มีความเสี่ยงระหว่างก่อสร้างต่ำ และ ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย**

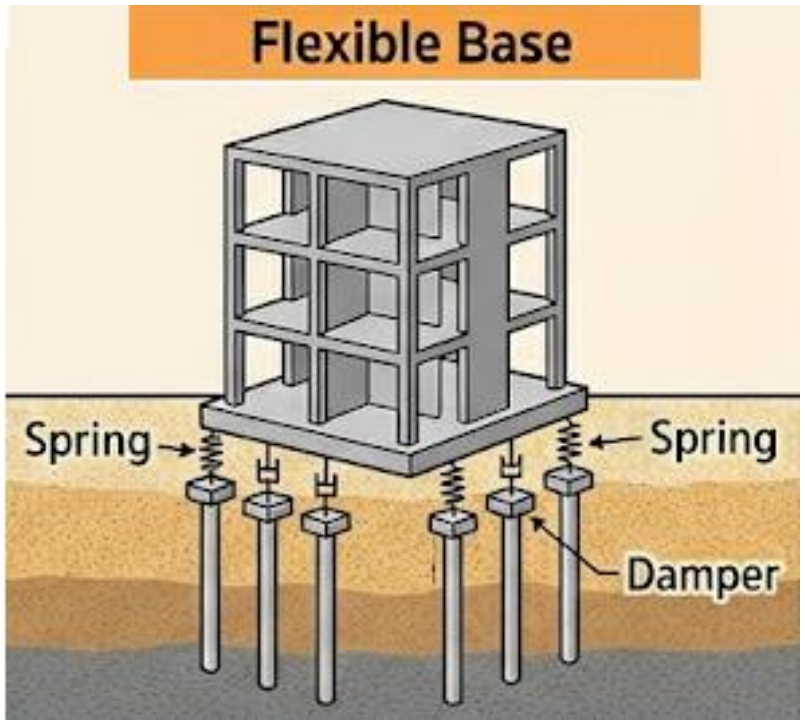
มิติเปรียบเทียบ	ฐานรากตื้น (Shallow foundations)	ฐานรากเสาเข็ม (Piles)
ความเหมาะสมของสภาพธรณี	เหมาะเมื่อมีชั้นดินแข็งในระดับตื้น และมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ลึก	เหมาะเมื่อชั้นผิวดินเป็นดินอ่อนหนามาก หรือมีสภาพเสี่ยงทางธรณีที่ชั้นดินระดับตื้น
น้ำหนักบรรทุก	เหมาะสำหรับอาคารเตี้ยที่มีน้ำหนักบรรทุกน้อย	เหมาะสำหรับอาคารสูงที่มีน้ำหนักบรรทุกสูง
การทรุดตัว	ทรุดตัวรวม/ต่างระดับอาจสูงกว่าฐานรากลึก	โดยทั่วไปคุมทรุดตัวได้ดีกว่า
ความเสี่ยงระหว่างก่อสร้าง	เกิดจากงานขุด ค้ำยัน การจัดการน้ำใต้ดิน เสี่ยงต่อการขยับของผนังขุด/อาคารข้างเคียง	เกิดจากการควบคุมคุณภาพการก่อสร้าง เสี่ยงต่อการได้เสาเข็มที่ด้อยคุณภาพ
ข้อจำกัดของสถานที่ก่อสร้าง	ต้องการพื้นที่ขุดและทางระบายน้ำ	ใช้ปั้นจั่น/แท่นตอกหรือเครื่องเจาะ
ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม/ชุมชน	ดินขุดทิ้งมาก, ฝุ่น; เสียงและการสั่นสะเทือนต่ำ	เสียงและการสั่นสะเทือนสูงแต่ดินทิ้งน้อย (ตอก) มีน้ำโคลนและตะกอนจากการก่อสร้าง (เจาะ)
การพิจารณาในแง่แผ่นดินไหว	อาจเกิดการโยกตัว แต่ต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมให้ ตรวจสอบเสถียรภาพต่อแรงกด, การไถล, พลิกตัว ตรวจสอบการเสถียรภาพของชั้นดิน	ตรวจสอบการรับแรงด้านข้างทั้งจากแรงเฉือยและการเคลื่อนตัวของชั้นดิน ตรวจสอบการเสถียรภาพของชั้นดิน

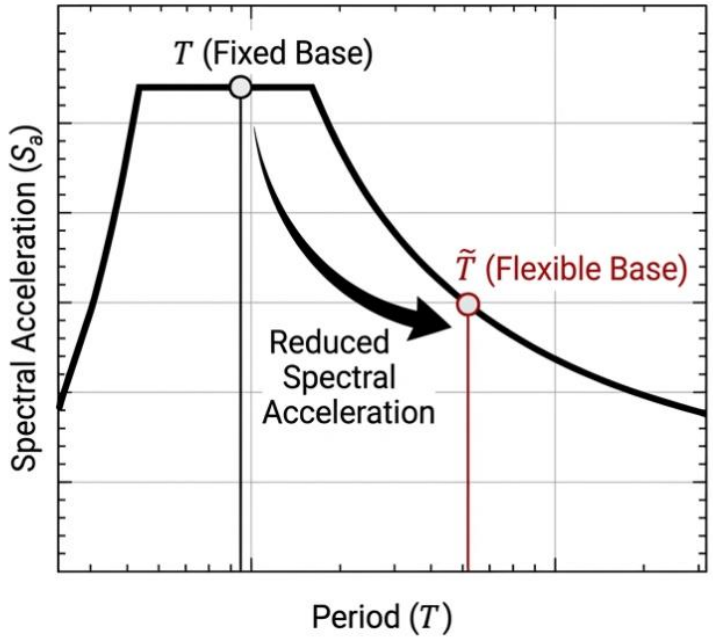
ระบบฐานรากที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองโครงสร้าง

(1) ฐานรากไม่เคลื่อนตัว (Fixed base assumption, no consideration of kinematic response)
ไม่คำนึงถึงพฤติกรรมของดิน ใช้ข้อมูลดินน้อยกว่า วิเคราะห์ได้ง่าย ปลอดภัยกว่า (Conservative design)

(2) ฐานรากแบบยืดหยุ่น (Flexible base assumption, SSI model)
จำลองพฤติกรรมได้ดีขึ้น ต้องทราบข้อมูลดิน ใช้กับการออกแบบอิงสมรรถนะ





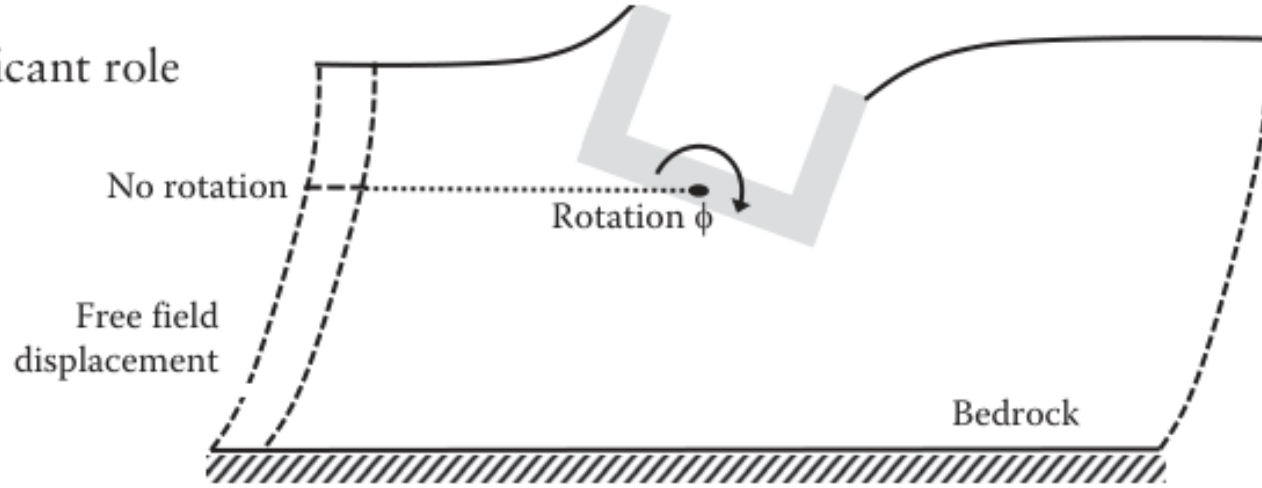


ระบบฐานรากที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองโครงสร้าง

(1) ฐานรากไม่เคลื่อนตัว (Fixed base assumption, no consideration of kinematic response)
ไม่คำนึงถึงพฤติกรรมของดิน ใช้ข้อมูลดินน้อยกว่า วิเคราะห์ได้ง่าย ปลอดภัยกว่า (Conservative design)

(2) ฐานรากแบบยืดหยุ่น (Flexible base assumption, SSI model)
จำลองพฤติกรรมได้ดีขึ้น ต้องทราบข้อมูลดิน ใช้กับการออกแบบอิงสมรรถนะ

- Structures where second order effects ($P-\Delta$) play a significant role
- Structures with massive or deep-seated foundations
- Slender, tall structures
- Structures supported on very soft soils, with an average shear wave velocity, $V_{S,30}$, less than 100 m/s
- Piled foundations



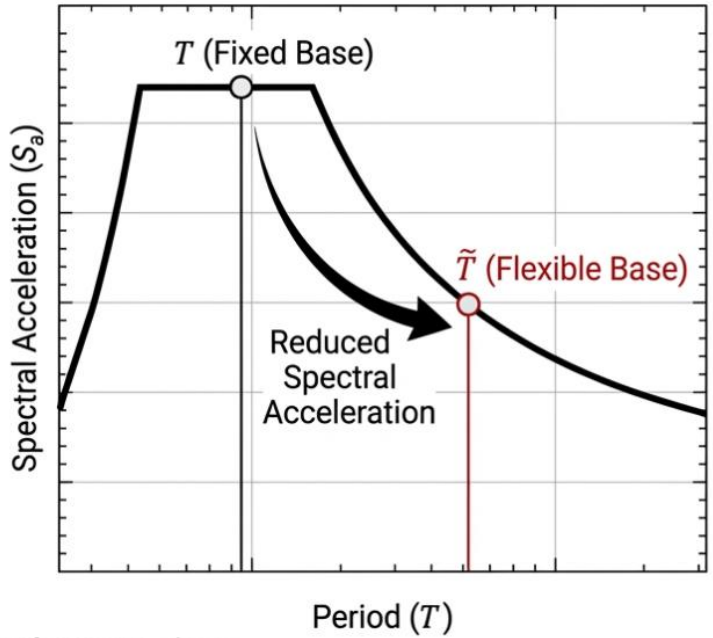
อิทธิพลของแบบจำลองฐานรากต่อผลตอบสนองของอาคาร

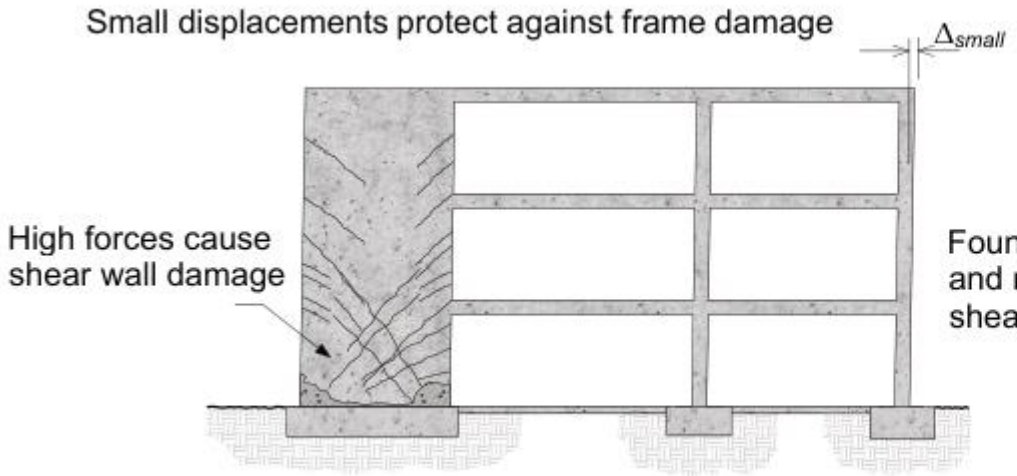
(1) ฐานรากไม่เคลื่อนตัว (Fixed base assumption)

มีผลให้แรงภายในส่วนใหญ่ถ่ายเข้าองค์อาคารที่แข็งกว่า, คาบการสั่นสั้นกว่า

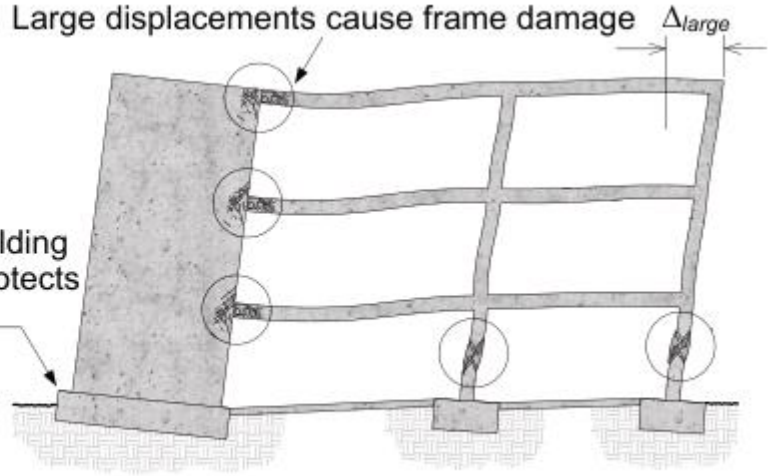
(2) ฐานรากแบบยืดหยุ่น (Flexible base assumption, SSI model)

ทำให้แรงภายในกระจายสู่องค์อาคารที่อ่อนกว่าได้มากขึ้น, คาบการสั่นยาวกว่า





Stiff/Strong Foundation

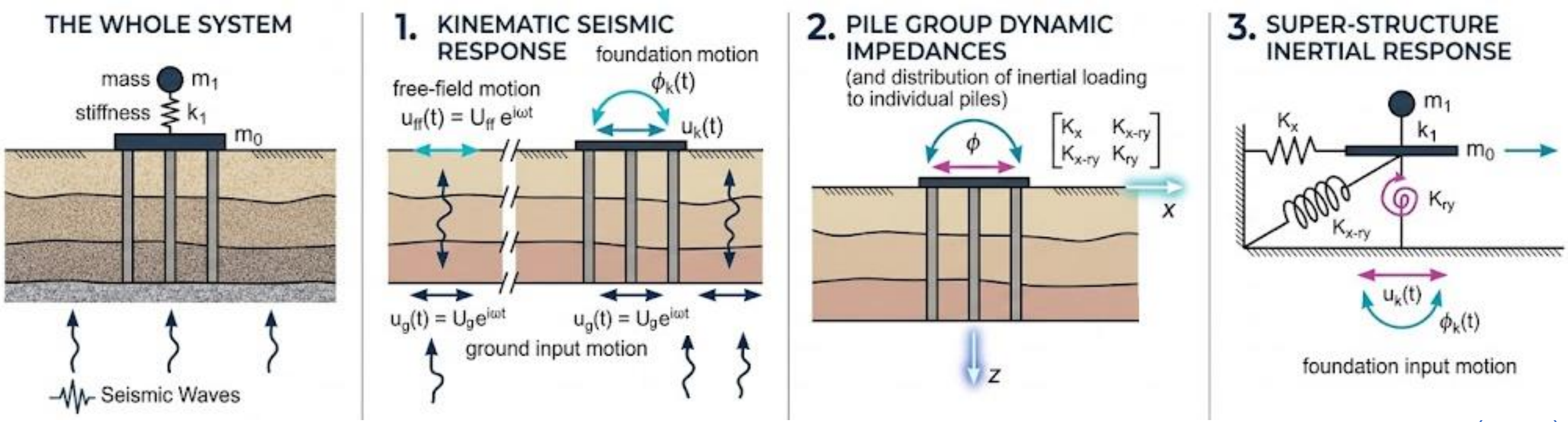


Flexible/Weak Foundation

แบบจำลองโครงสร้างและฐานราก

การจำลองพฤติกรรมของระบบโครงสร้างและฐานราก สามารถแยกเป็นสามส่วน ตามแนวคิด Substructure method

1. หาการสั่นสะเทือนที่จุดรองรับอาคาร (Foundation motion) ซึ่งจะมีค่าต่างจาก Free-field motion
2. หาสติฟเนสเชิงพลวัตของจุดรองรับอาคาร (Foundation Impedances)
3. ใช้สปริงที่มีค่าคงที่ตามข้อ 2 ที่ฐานของแบบจำลองอาคาร และใช้ค่าในข้อ 1 แทน Free-field motion



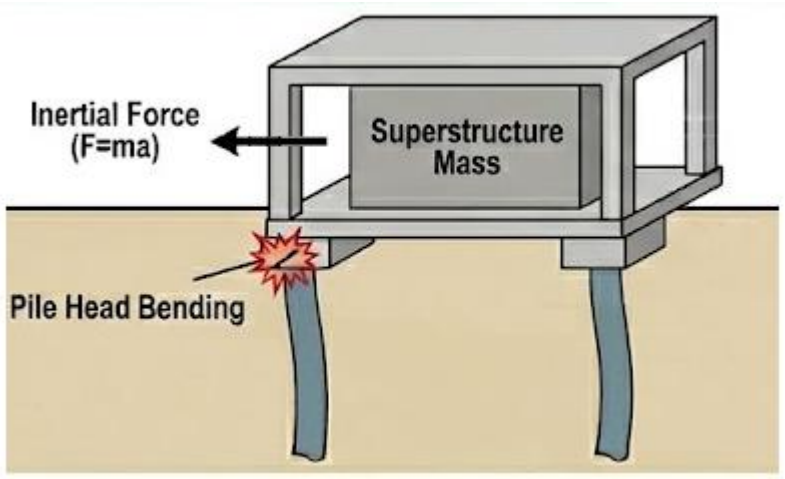
4.1 แนวคิดสำคัญในการจำลองพฤติกรรมฐานราก

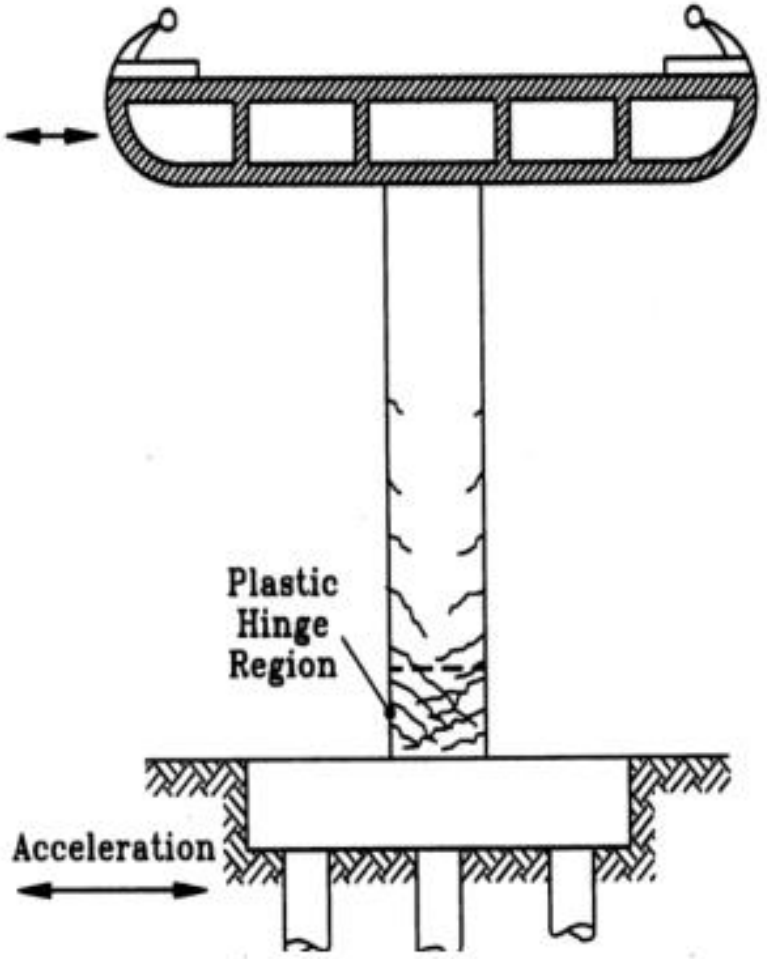
(1) การตรวจสอบและซ่อมแซมโครงสร้างใต้ดินทำได้ยาก จึงควร

(1) ออกแบบให้โครงสร้างส่วนบนเสียหายก่อนฐานราก (ใช้ Overstrength factor, Capacity-limited load effect หรือวิธีที่ดีกว่าเช่น Capacity design) **ฐานรากยังอยู่ในสภาพอิลาสติก**

(2) ออกแบบให้ไม่มีการเคลื่อนตัวคงค้างหลังแผ่นดินไหว ซึ่งทำโดยการกำหนดการเคลื่อนตัวที่ยอมให้ เช่น การเคลื่อนที่ในแนวราบไม่เกิน 1% ของความกว้างฐานรากแต่ต้องไม่เกิน 50 มม เป็นต้น

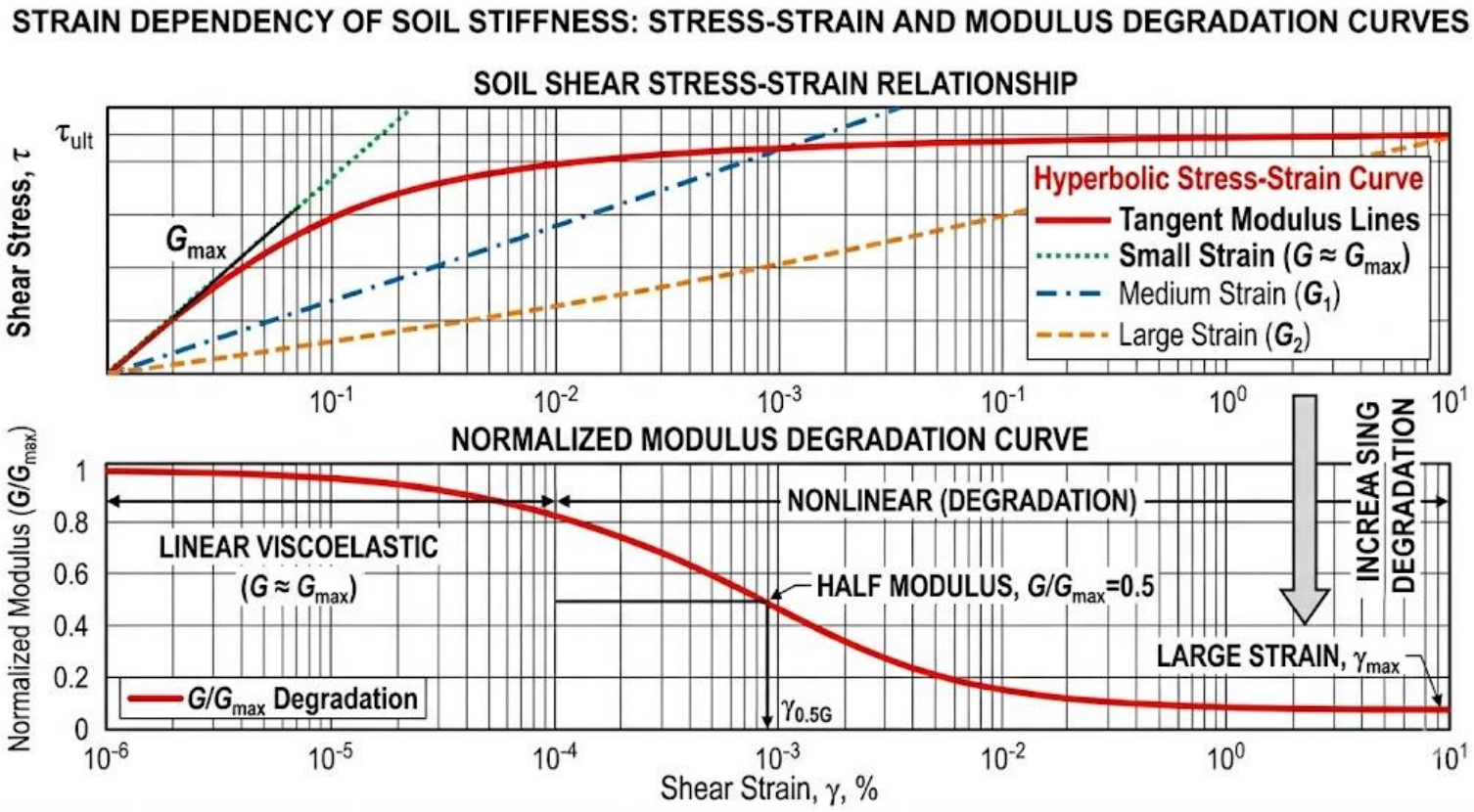
(3) ในกรณีที่จำเป็นหรือแผ่นดินไหวรุนแรง อาจยอมให้เกิดความเสียหายแบบเหนียวในฐานรากได้ (ใช้ Capacity design ออกแบบ)

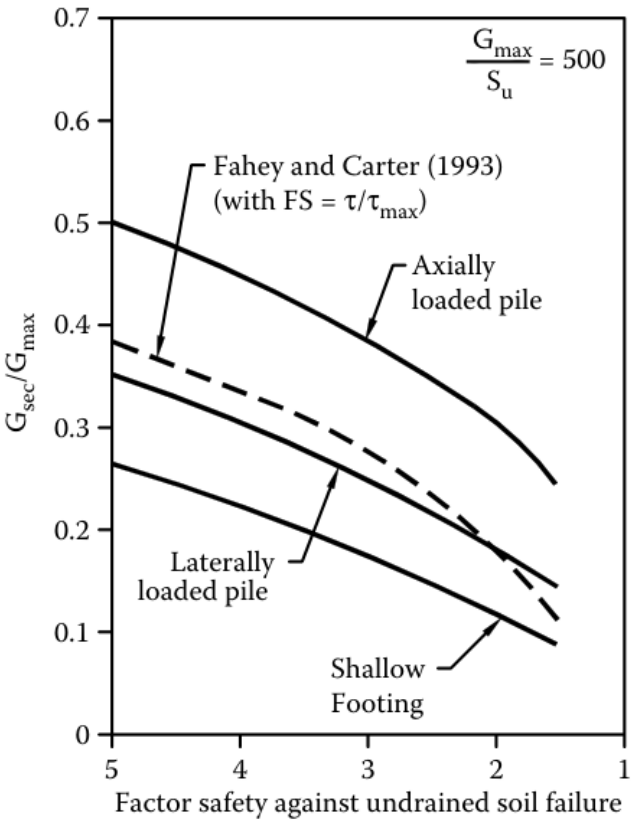




4.1 แนวคิดสำคัญในการจำลองพฤติกรรมฐานราก (กรณีใช้ SSI)

1. โมดูลัสของดิน (ซึ่งใช้คำนวณสติฟเนสของฐานราก) มีค่าลดลงตามระดับความเครียด
2. เพื่อความสะดวกในการพิจารณาระหว่างออกแบบ อาจใช้ Safety factor หรือ Demand / Capacity ratio, เป็นตัวแปรต้น แทน ความเครียด
   เช่น การออกแบบฐานรากโดยใช้ FS สูง ควรใช้ สติฟเนสสูง , ฐานรากที่มี DCR ต่ำ จะมีสติฟเนสสูง เป็นต้น
3. หากหลักการออกแบบคือการควบคุมให้อาคารสั่นไหวน้อย (ห่างจากสภาพวิบัติ)
   Dynamic stiffness ที่สะท้อนพฤติกรรมอาคารระหว่างสั่นไหว >> Static stiffness ที่ประเมิน ณ จุดครากใน Static load test





4.1 แนวคิดสำคัญในการจำลองพฤติกรรมฐานราก (กรณีใช้ SSI)

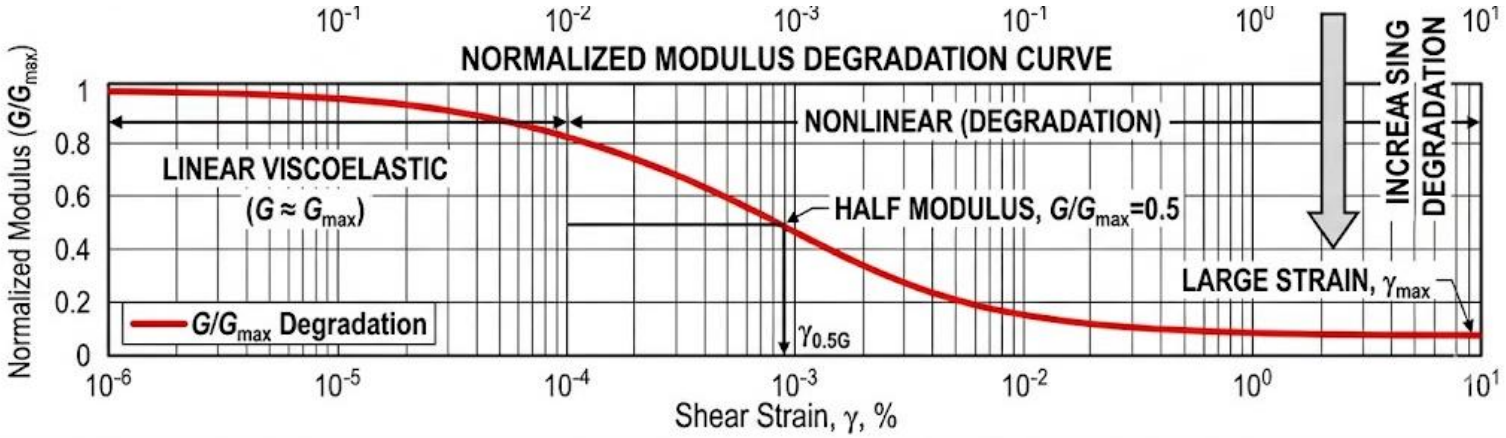
1. โมดูลัสของดิน (ซึ่งใช้คำนวณสติฟเนสของฐานราก) มีค่าลดลงตามระดับความเครียด
2. เพื่อความสะดวกในการพิจารณาระหว่างออกแบบ อาจใช้ Safety factor หรือ Demand / Capacity ratio, เป็นตัวแปรต้น แทน ความเครียด
   เช่น การออกแบบฐานรากโดยใช้ FS สูง ควรใช้ สติฟเนสสูง , ฐานรากที่มี DCR ต่ำ จะมีสติฟเนสสูง เป็นต้น
3. หากหลักการออกแบบคือการควบคุมให้อาคารสั่นไหวน้อย (ห่างจากสภาพวิบัติ)
   Dynamic stiffness ที่สะท้อนพฤติกรรมอาคารระหว่างสั่นไหว >> Static stiffness ที่ประเมิน ณ จุดครากใน Static load test

$$G = G_0 R_f \quad \text{(Fahey and Carter, 1993; Mayne, 2001)} \quad \Rightarrow \quad E_u = 3G_0 \cdot R_f$$

where R_f is the stress level factor $= \left(1 - f \cdot \tau_{rat}^{g}\right)$,

τ_{rat} the shear stress ratio $= \tau/\tau_u$, τ the shear stress, τ_u the ultimate shear stress

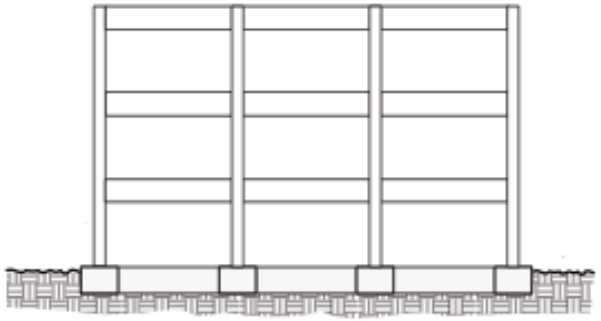
f, g are empirical parameters, for many soils $f = 1.0$ and $g = 0.3$.



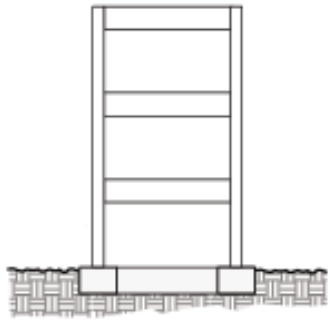
4.1 การจำลองพฤติกรรมของฐานรากแผ่ (Kinematic effect)

(1) ฐานรากขนาดใหญ่ช่วยลดความเร่งออกแบบในช่วงคาบต่ำได้ดี เนื่องจากการเฉลี่ยค่าภายในแผ่นฐาน

(2) ฐานรากที่มีชั้นใต้ดินช่วยลดความเร่งออกแบบในช่วงคาบต่ำได้ดี เนื่องจากความเร่งในดินมีค่าลดลงตามความลึก

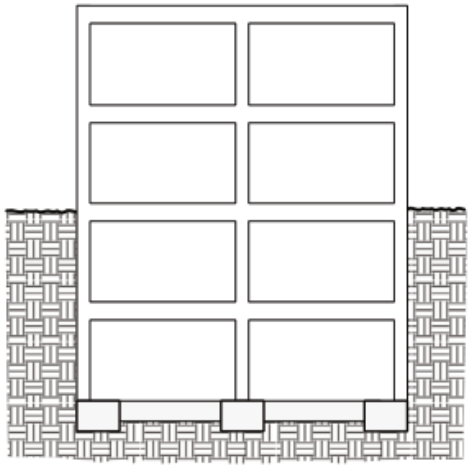


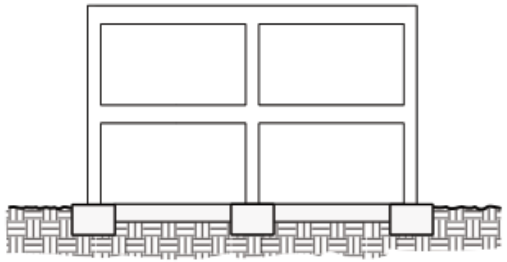
Elevation



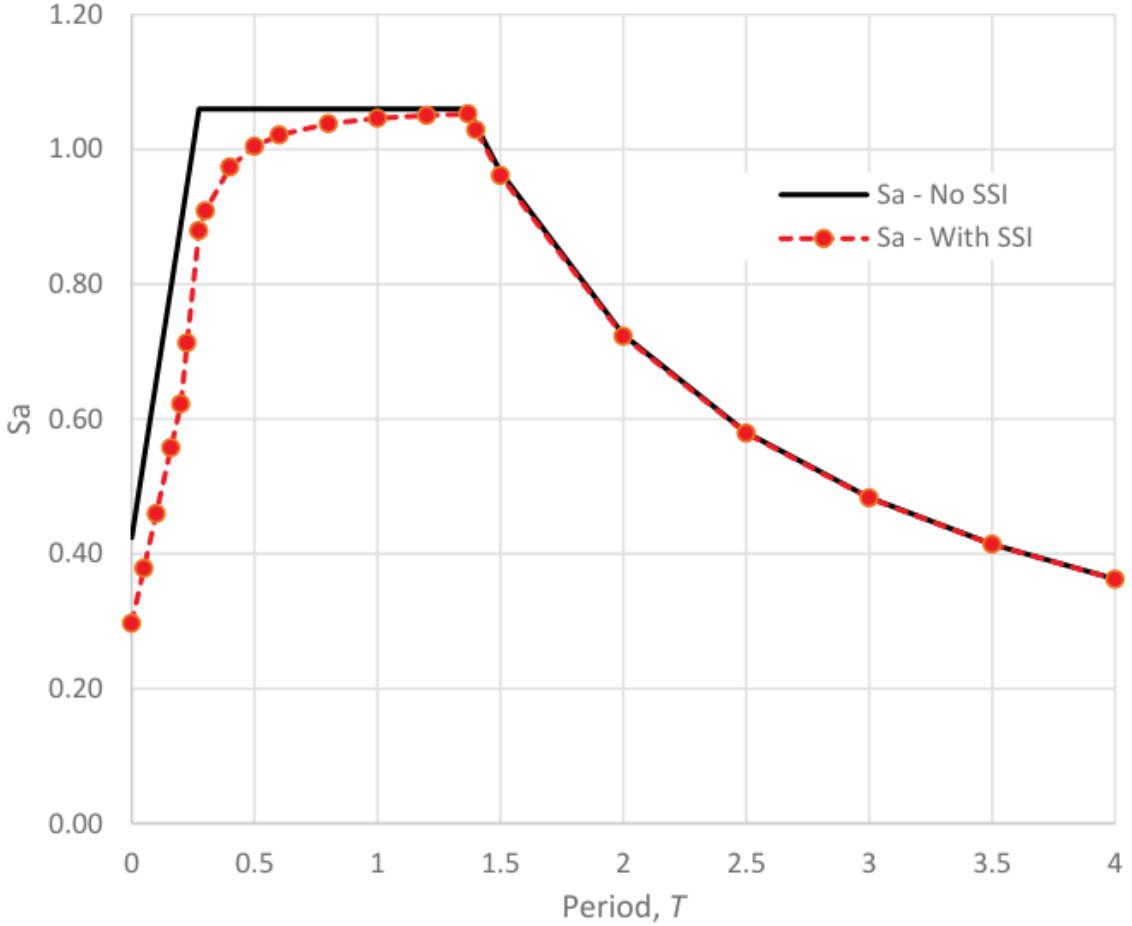
Elevation

The building on the left with the larger footprint size will have lower design forces than the building with the smaller footprint on the right.





The building on the left with a deeper foundation embedment will typically have a greater reduction in design forces than the building on the right.



4.1 การจำลองพฤติกรรมของฐานรากแผ่ (Kinematic effect)

การคำนวณแบบ SSI ของฐานรากแผ่ (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมจาก FEMA P-2091)

If $h'/(v_s T) > 0.1$, then inertial SSI effects are likely to be significant.

h' = effective structure height, measured from base of foundation to the center of mass of the fundamental mode. It can be approximated as 2/3 h_n, where h_n is the structure height plus the depth from grade to the bottom of the foundation.

v_s = the average effective shear wave velocity for site soil conditions, taken as the average value of velocity over the effective depth for foundation rotation determined using v_{so} and a velocity reduction factor from ASCE/SEI 7-16 Table 19.3-1.

T = fundamental mode of the structure assuming a fixed base at grade.

Table 19.3-1 Effective Shear Wave Velocity Ratio (v_s/v_{so})

	Effective Peak Acceleration, $S_{DS}/2.5$[a]			
Site Class	$S_{DS}/2.5 = 0$	$S_{DS}/2.5 = 0.1$	$S_{DS}/2.5 = 0.4$	$S_{DS}/2.5 \geq 0.8$
A	1.00	1.00	1.00	1.00
B	1.00	1.00	0.97	0.95
C	1.00	0.97	0.87	0.77
D	1.00	0.95	0.71	0.32
E	1.00	0.77	0.22	[b]
F	[b]	[b]	[b]	[b]

[a]Use straight-line interpolation for intermediate values of $S_{DS}/2.5$.
[b]Site-specific geotechnical investigation and dynamic site response analyses shall be performed.

การจำลองพฤติกรรมของดินด้วยสปริง

วิธีที่ 1

จำลองด้วยสปริงที่จุดศูนย์กลางฐานราก

- ไม่คำนึงถึงการแอ่นตัวของแผ่นฐานราก
- เหมาะกับฐานรากที่แข็งมาก
- *(ดูเพิ่มเติมจาก Pais and Kausel, 1988)*

วิธีที่ 2

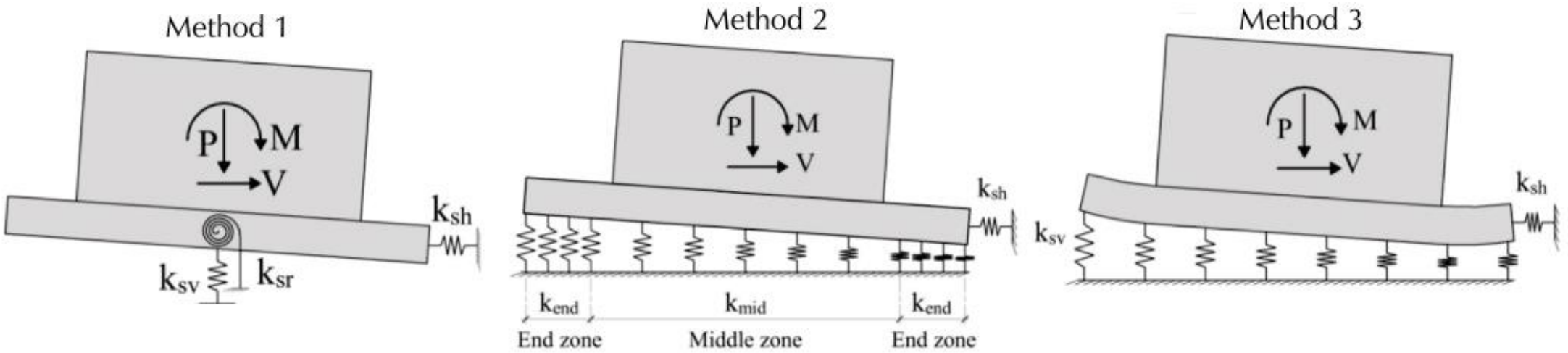
สปริงหลายตัวตาม สติฟเนสต่างกัน

- สติฟเนสแตกต่างกันตามระดับของแรง (Equivalent linear spring)
- คำนึงถึงแรงต้านตามความเข้มของแรง
- *(ดูเพิ่มเติมจาก FEMA P-2006)*

วิธีที่ 3

อิลาสติกสปริงหลายตัว สติฟเนสเท่ากัน

- ใช้สปริงแบบเดียวกันทั้งฐานราก



Three methods for foundation modeling approaches with vertical and rotational springs presented in ASCE/SEI 41

4.1 การจำลองพฤติกรรมของฐานรากแผ่ (กรณีใช้ SSI)

วิธีที่ 3 จำลองด้วยอิลาสติกสปริงประเภทเดียวกันทั้งหมด

$$k_{sv} = \frac{1.3G}{B_f(1-\nu)} \quad \text{(force per length cubed)}$$

Here, G is the effective shear modulus

B_f is the width of the foundation

ν is Poisson's ratio

0.3 for sandy soils

0.45 for clayey soils

$$k_{sh} = \frac{GB}{2-\nu}\left[6.8\left(\frac{L}{B}\right)^{0.65} + 2.4\right]$$

$$\eta_x = \left[1.0 + \left(0.33 + \frac{1.34}{1+L/B}\right)\left(\frac{D}{B}\right)^{0.8}\right]$$

B is the foundation half width

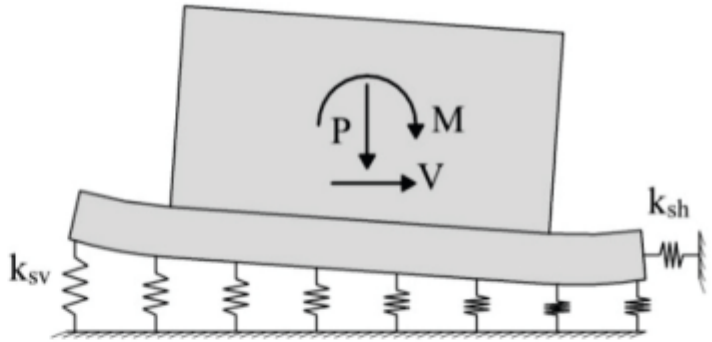


Table 19.3-2 Effective Shear Modulus Ratio (G/G_0)

	Effective Peak Acceleration, $S_{DS}/2.5$[a]			
Site Class	$S_{DS}/2.5 = 0$	$S_{DS}/2.5 = 0.1$	$S_{DS}/2.5 = 0.4$	$S_{DS}/2.5 \geq 0.8$
A	1.00	1.00	1.00	1.00
B	1.00	1.00	0.95	0.90
C	1.00	0.95	0.75	0.60
D	1.00	0.90	0.50	0.10
E	1.00	0.60	0.05	[b]
F	[b]	[b]	[b]	[b]

[a]Use straight-line interpolation for intermediate values of $S_{DS}/2.5$.
[b]Site-specific geotechnical investigation and dynamic site response analyses shall be performed.

4.1 การจำลองพฤติกรรมของฐานรากแผ่ (กรณีใช้ SSI)

กรณีที่ฐานรากเคลื่อนตัวมาก

สปริงในแนวราบอาจจะคำนวณได้อีกแบบจาก

กราฟระหว่าง แรงดันดินด้านข้าง กับ การเคลื่อนตัว

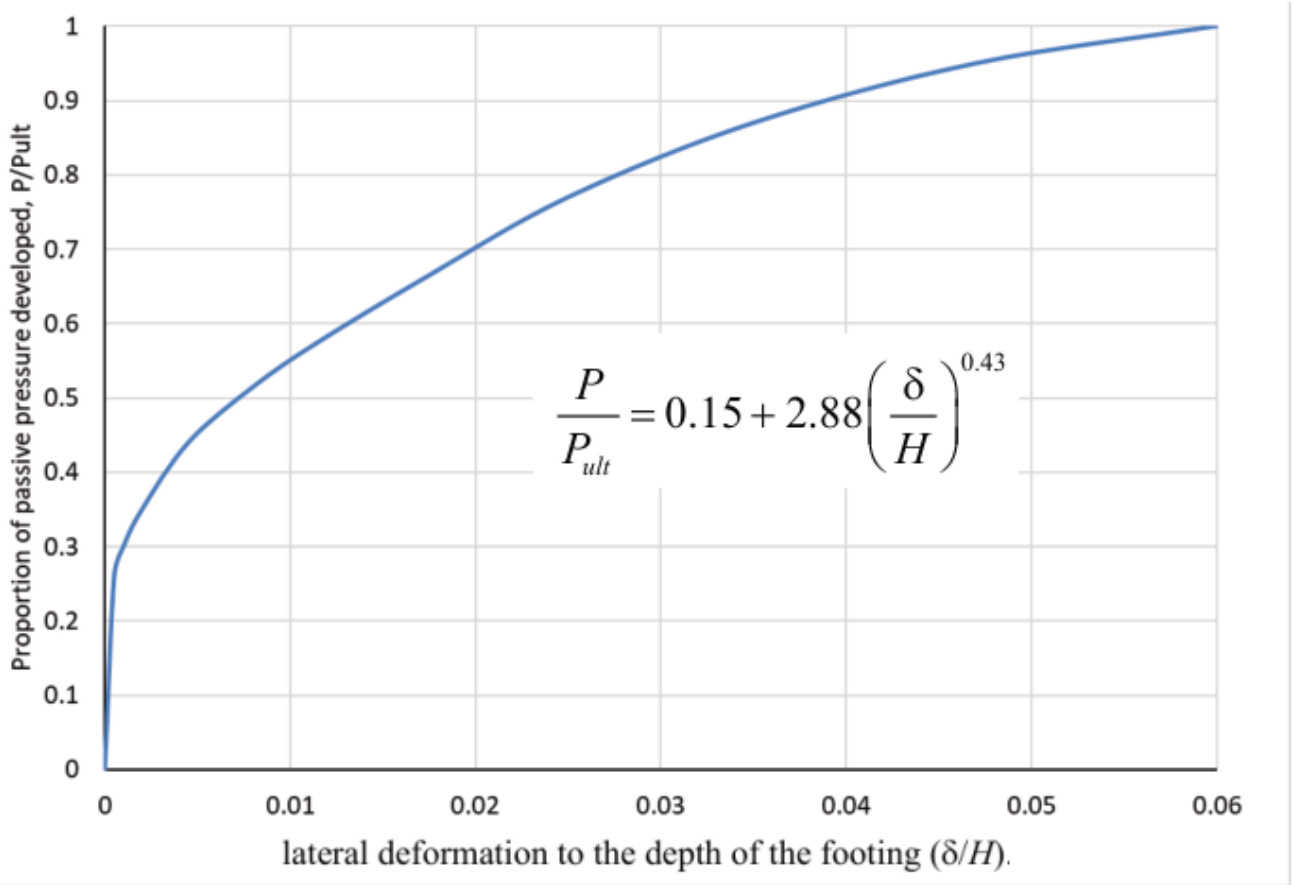
$$K_{sh} = F_{hor} / \delta$$

โดยที่

$$F_{hor} = P + P_{friction}$$

P = Mobilized passive pressure

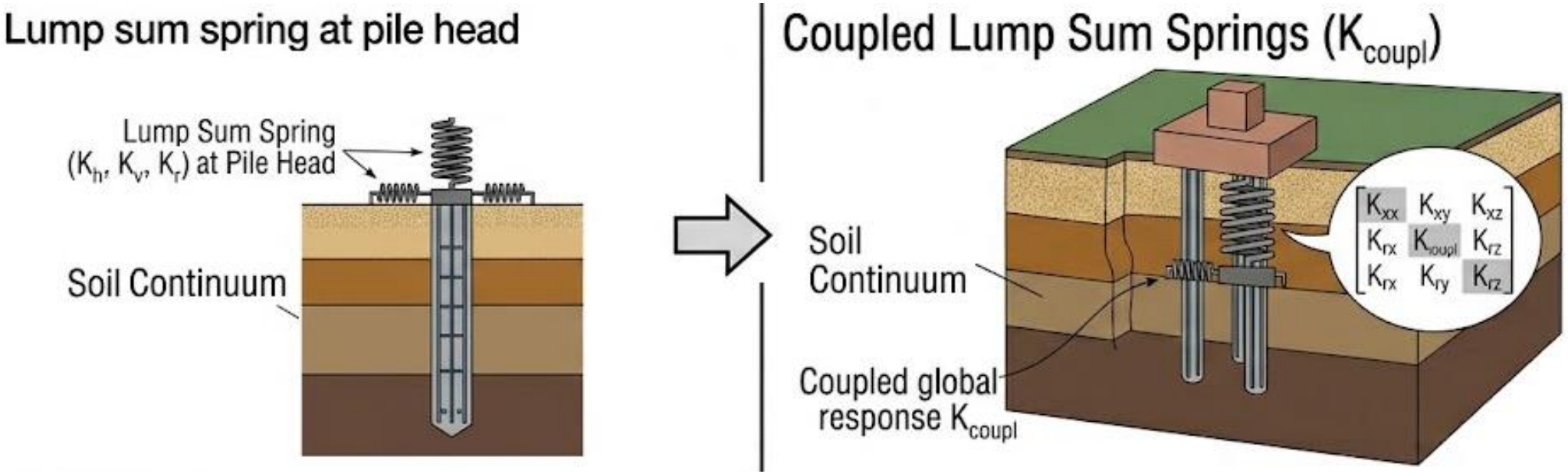
$P_{friction}$ = แรงเสียดทานใต้ฐานรากแผ่



** หากแรงในแนวราบน้อยกว่า $P_{friction}$ สมมติให้เป็นแบบฐานรากแบบยึดแน่นได้

4.2 การจำลองพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็ม (กรณีใช้ SSI)

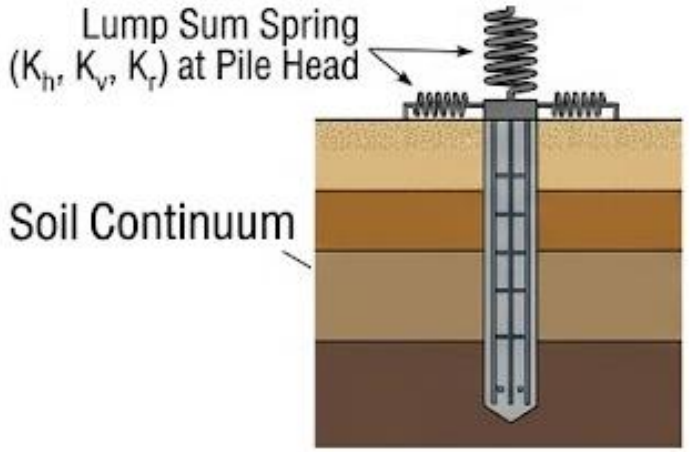
- การจำลองพฤติกรรมเสาเข็มมีระดับความยากง่ายหลายระดับ
- กรณีที่ความเร่งออกแบบมีค่าไม่มาก (as < 0.1g or y < 12 mm or DCR ต่ำๆ) สามารถใช้แบบจำลองแบบอิลาสติกได้
- แบบจำลองแบบอิลาสติกที่ง่ายที่สุดได้แก่การรวม Pile head stiffness ของเสาเข็มทุกต้นในกลุ่ม
  ด้วยวิธี Direct stiffness เพื่อเป็นตัวแทนพฤติกรรมของเสาเข็มกลุ่ม
- ไม่ต้องคิด Pile group effect เมื่อ c/c spacing > 2.5D (Gazetas, 1991)
- คิด Pile group effect เมื่อ c/c spacing < 3.0D (FEMA P-2082)



4.2 การจำลองพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็ม (กรณีใช้ SSI)

- การจำลองพฤติกรรมเสาเข็มมีระดับความยากง่ายหลายระดับ
- กรณีที่ความเร่งออกแบบมีค่าไม่มาก (as < 0.1g or y < 12 mm or DCR ต่ำๆ) สามารถใช้แบบจำลองแบบอิลาสติกได้
- แบบจำลองแบบอิลาสติกที่ง่ายที่สุดได้แก่การรวม Pile head stiffness ของเสาเข็มทุกต้นในกลุ่ม
  ด้วยวิธี Direct stiffness เพื่อเป็นตัวแทนพฤติกรรมของเสาเข็มกลุ่ม
- ไม่ต้องคิด Pile group effect เมื่อ c/c spacing > 2.5D (Gazetas, 1991)
- คิด Pile group effect เมื่อ c/c spacing < 3.0D (FEMA P-2082)

Lump sum spring at pile head



$$K_v = a\frac{A_p E_p}{L} \qquad ;(L/D > 10, kg, cm)$$

Driven pile

steel: $a = 0.014(L/D) + 0.78$

PC: $a = 0.013(L/D) + 0.61$

Cast-in-place: $a = 0.031(L/D) - 0.15$

4.2 การจำลองพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็ม

Elastic close form solution (Hayashi-Chang formula) ซึ่งสามารถให้ค่า โมเมนต์ แรงเฉือน และ การเคลื่อนตัว ณ ตำแหน่งต่างๆ ของเสาเข็มได้

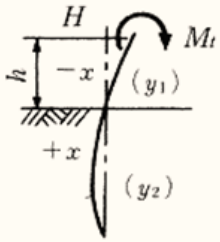
จากสมการคำนวณการเคลื่อนตัวที่หัวเสาเข็ม (δ) ซึ่งขึ้นกับแรงกระทำที่หัวเสาเข็ม (H) สามารถหาค่าคงที่ของสปริงได้จาก

$Kh = H / \delta$

สำหรับ Free head : $Kh = 2EI\beta^3$ โดยที่ $\delta < 15\%D$

สำหรับ Fix head : $Kh = 4EI\beta^3$ โดยที่ $\delta < 15\%D$

สมการคำนวณเหล่านี้ต้องการพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ Modulus of subgrade reaction (k_s)



Above surface : $EI\frac{d^4y_1}{dx^4} = 0$

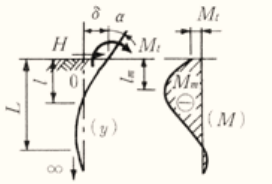
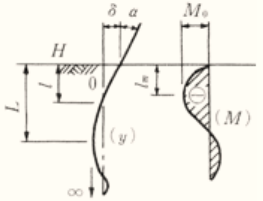
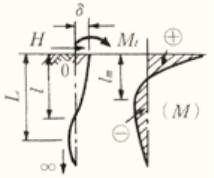
In soil : $EI\frac{d^4y_2}{dx^4} + p = 0$

$p = k_H D y_2$

H : Lateral force (kg)
M_t : Moment at pile head (kg-cm)
D : Diameter (cm)
E : Young's modulus of pile (kg/cm^2)
I : Moment of inertia of pile (cm^4)

k_H : Modulus of hor. subgrade reaction (kg/cm^3)
h : Height of load input (cm)
β : $\sqrt[4]{k_H D / 4EI}$ (cm^{-1})
h_0 : M_t / H (cm)

Case I : $h = 0$

	General form	Free head	Fix head
Deflection curve & Moment curve			
Deflection y (cm)	$y = \frac{H}{2EI\beta^3} e^{-\beta x} \cdot \{(1+\beta h_0)\cos\beta x - \beta h_0 \sin\beta x\}$	$y = \frac{H}{2EI\beta^3} e^{-\beta x} \cdot \cos\beta x$	$y = \frac{H}{4EI\beta^3} e^{-\beta x} \cdot \{\cos\beta x + \sin\beta x\}$
Pile head movement δ (cm)	$\delta = \frac{H}{2EI\beta^3} + \frac{M_t}{2EI\beta^2} = \frac{1+\beta h_0}{2EI\beta^3} H$	$\delta = \frac{H}{2EI\beta^3}$	$\delta = \frac{H}{4EI\beta^3} = \frac{\beta H}{k_H D}$
Ground surface movement f (cm)	$f = \delta$	$f = \delta$	$f = \delta$
Pile head inclination α (rad)	$\alpha = \frac{H}{2EI\beta^2} + \frac{M_t}{EI\beta} = \frac{1+2\beta h_0}{2EI\beta^2} H$	$\alpha = \frac{H}{2EI\beta^2}$	$\alpha = 0$

4.2 การจำลองพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็ม (กรณีใช้ SSI)

Modulus of subgrade reaction (k_s) แสดงหน่วยแรง ที่ใช้เพื่อทำให้ดินเคลื่อนที่ หนึ่งหน่วย

F = kx : k in Force / Disp. เช่น t/mm

$\sigma = E\varepsilon$: E in Stress / Strain เช่น N/mm^2

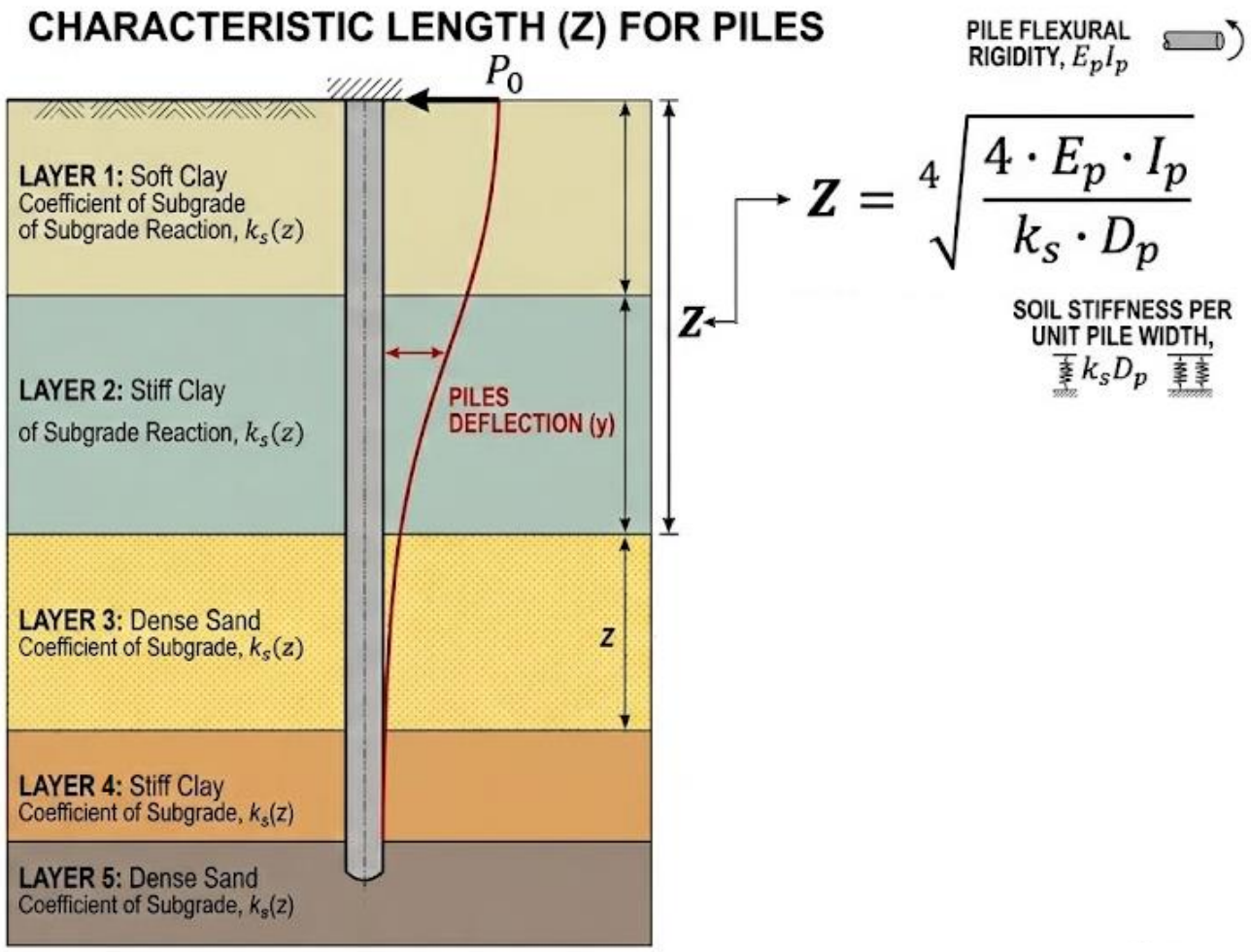
$\sigma = k_s x$: k_s in Stress / Disp. เช่น kg/cm^3 ✓

*เมื่อทราบค่า ks ของชั้นดินต่างๆ จะทำให้สามารถหาความยาวเฉพาะ (Characteristic length, Z) ได้ ($Z = 1/\beta$) ได้

First stationary depth (L0)

สำหรับ Free head : $L0 = 0.50\ \pi * Z$

สำหรับ Fix head : $L0 = 0.75\ \pi * Z$



4.2 การจำลองพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็ม (FS = 2.5)

ค่า ks หาได้อย่างไร?

$$k_s = 80E_0B^{-0.75} \quad \left[kN/m^3; kPa/m\right]$$

For sand:

E0 = 700 N_{67} [kPa] (for strain ≈ 10%)

B = Pile dia. [cm]

For clay:

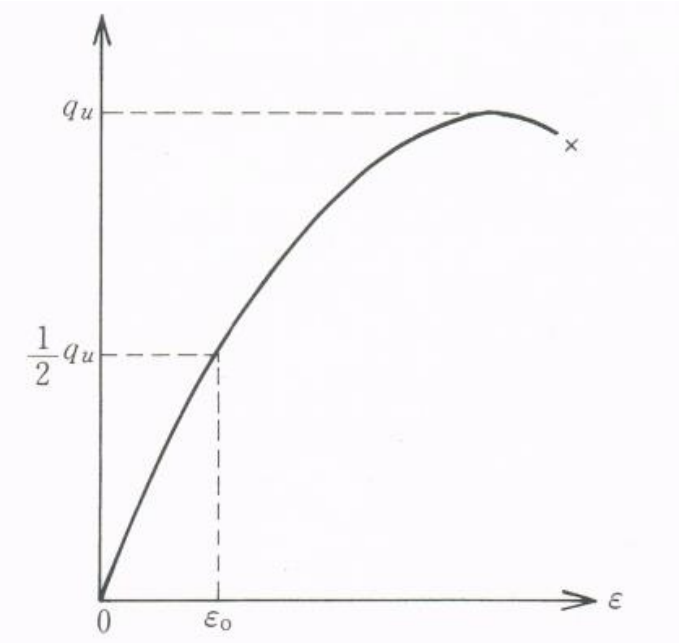
$E_0 = E_{50} = 0.5qu / \varepsilon_{50}$ [kPa]

Davisson, 1970:

ks = 67 Su / B (for Disp. ≈ 10% Dia.)

実務図表 8·5　砂質地盤の k_h 算定表 [kN/m³]

杭径 B [cm] \ $\overline{N}$	4	5	6	7	8	9	10
30	17475	21843	26212	30581	34949	39318	43686
35	15567	19458	23350	27242	31133	35025	38917
40	14083	17604	21125	24646	28167	31687	35208
45	12893	16116	19339	22562	25785	29008	32231
50	11913	14891	17869	20848	23826	26804	29782
60	10390	12988	15586	18183	20781	23379	25976
70	9256	11570	13884	16198	18512	20826	23140
80	8374	10467	12561	14654	16748	18841	20935
90	7666	9582	11499	13415	15332	17248	19165
100	7084	8854	10625	12396	14167	15938	17709



4.2 การจำลองพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็ม (กรณีใช้ SSI)

เริ่มต้น: รับข้อมูล

- ข้อมูลเสาเข็ม: E_p, I_p, D_p
- ข้อมูลดิน: โปรไฟล์ชั้นดิน ($k_s(z)$ และ z_i สำหรับแต่ละชั้น)

ขั้นตอนที่ 1: สมมติค่าเริ่มต้น

สมมติ $Z_{ลอง_1} = 5 * D_p$

เริ่มต้นกระบวนการลองผิดลองถูก (Trial & Error Loop)

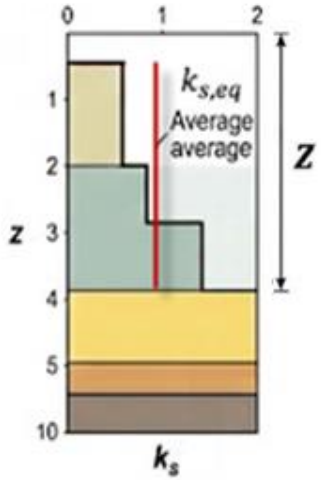
คำนวณค่า k_s เฉลี่ยเทียบเท่า (Average equivalent soil stiffness, $k_{s,eq}$)

$$k_{s,eq} = \frac{\sum(k_{s,i} * z_i)}{Z_{ลอง}}$$

(เฉพาะชั้นดิน $z_i \le Z_{ลอง}$)

คำนวณค่า Z ใหม่ ($Z_{ใหม่}$) จาก $k_{s,eq}$

$$Z_{ใหม่} = \sqrt[4]{\frac{4 * E_p * I_p}{k_{s,eq} * D_p}}$$



ตรวจสอบความคลาดเคลื่อน

$\frac{|Z_{ลอง} - Z_{ใหม่}|}{Z_{ใหม่}}$ < เกณฑ์ยอมรับ? (เช่น 0.01)

YES

Output

ได้ค่า Z ที่แท้จริง (Converged Z)

บันทึก Z_{final} และ k_{s,eq_final}

จบกระบวนการ

NO

ปรับปรุงค่า

$Z_{ลอง_ใหม่} = Z_{ใหม่}$

4.2 การจำลองพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็ม

Pile group stiffness สามารถหาได้จากการรวมสตีฟเนสจากเสาเข็มเดี่ยวเข้าด้วยกัน

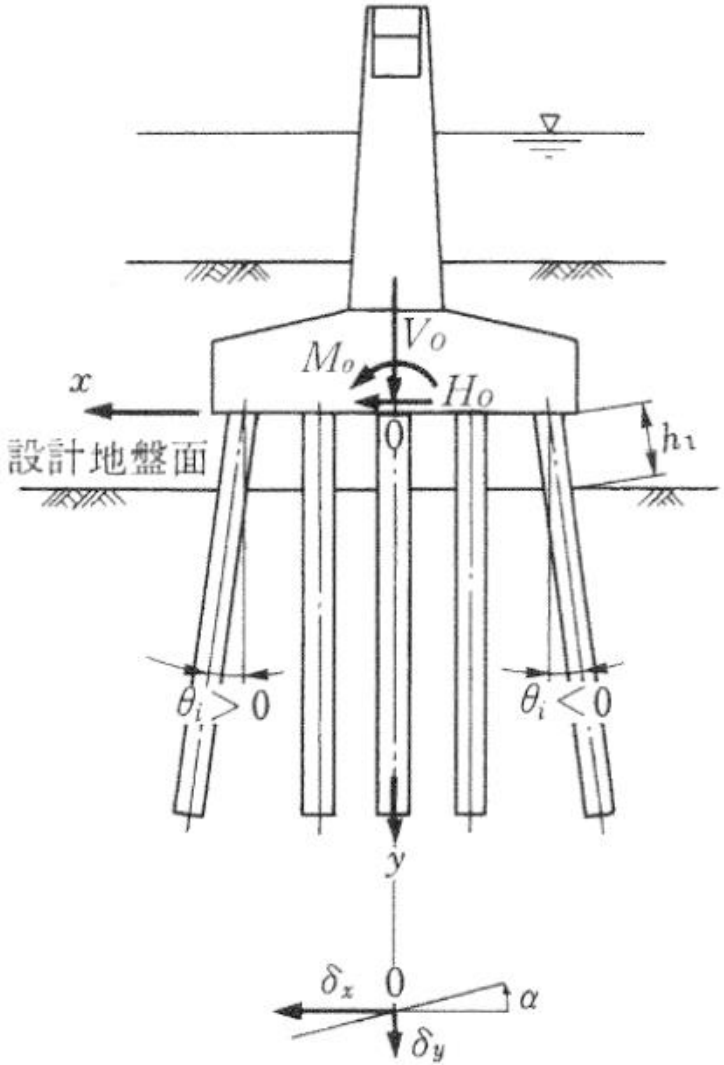
$$K_v = a\frac{A_p E_p}{L} \qquad ;(L/D > 10, kg, cm)$$

Driven pile steel: $a = 0.014(L/D) + 0.78$

PC: $a = 0.013(L/D) + 0.61$

Cast-in-place: $a = 0.031(L/D) - 0.15$

	Fix head		Free head	
	h > 0	h = 0	h > 0	h = 0
K_1	$\frac{12EI\beta^3}{(1+\beta h)^3+2}$	$4EI\beta^3$	$\frac{3EI\beta^3}{(1+\beta h)^3+0.5}$	$2EI\beta^3$
K_2, K_3	$0.5.K_1.\left(h+\frac{1}{\beta}\right)$	$2EI\beta^2$	0	0
K_4	$\frac{4EI\beta}{1+\beta h}.\frac{(1+\beta h)^3+0.5}{(1+\beta h)^3+2}$	$2EI\beta$	0	0



4.2 การจำลองพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็ม

Pile group stiffness สามารถหาได้จากการรวมสตีฟเนสจากเสาเข็มเดี่ยวเข้าด้วยกัน

$$\begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} & A_{x\alpha} \\ & A_{yy} & A_{y\alpha} \\ Sym & & A_{\alpha\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_0 \\ V_0 \\ M_0 \end{bmatrix}$$

$$A_{xx} = \Sigma\left(K_1 \cos^2\theta_i + K_V \sin^2\theta_i\right)$$

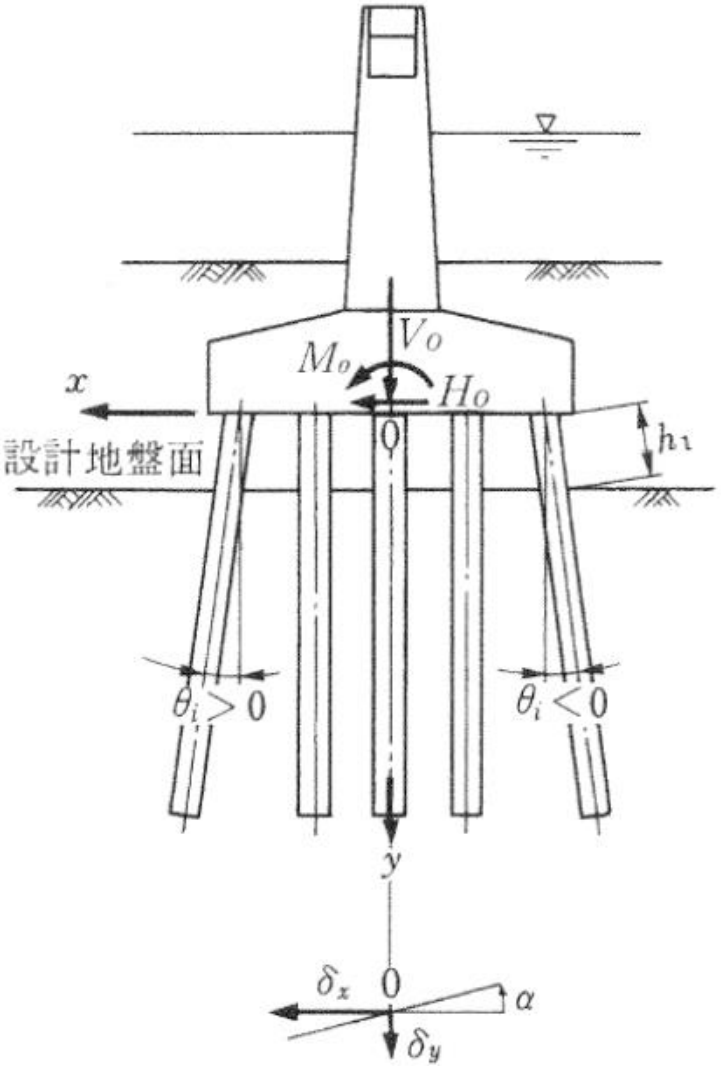
$$A_{xy} = \Sigma\left(K_V - K_1\right)\sin\theta_i \cos\theta_i$$

$$A_{x\alpha} = \Sigma\left\{\left(K_V - K_1\right)x_i \sin\theta_i \cos\theta_i - K_2 \cos\theta_i\right\}$$

$$A_{yy} = \Sigma\left(K_V \cos^2\theta_i + K_1 \sin^2\theta_i\right)$$

$$A_{y\alpha} = \Sigma\left\{\left(K_V \cos^2\theta_i + K_1 \sin^2\theta_i\right)x_i + K_2 \sin\theta_i\right\}$$

$$A_{\alpha\alpha} = \Sigma\left\{\left(K_V \cos^2\theta_i + K_1 \sin^2\theta_i\right)x_i^2 + \left(K_2 + K_3\right)x_i \sin\theta_i + K_4\right\}$$



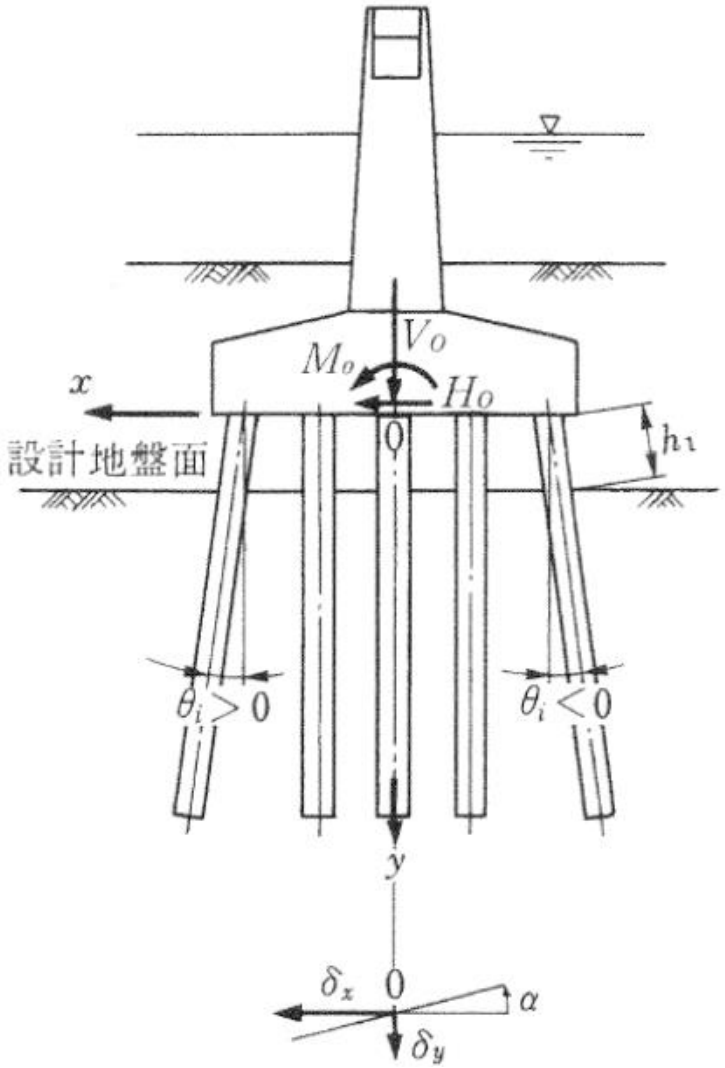
4.2 การจำลองพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็ม

การกระจายแรงจาก Pile cap ไปหาเสาเข็มเดี่ยว

$$\begin{bmatrix} \delta_{xi} \\ \delta_{yi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_x \\ (\delta_y + \alpha x_i) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} N_i \\ S_i \\ M_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & K_v & 0 \\ K_1 & 0 & -K_2 \\ -K_3 & 0 & K_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{xi} \\ \delta_{yi} \\ \alpha \end{bmatrix}$$

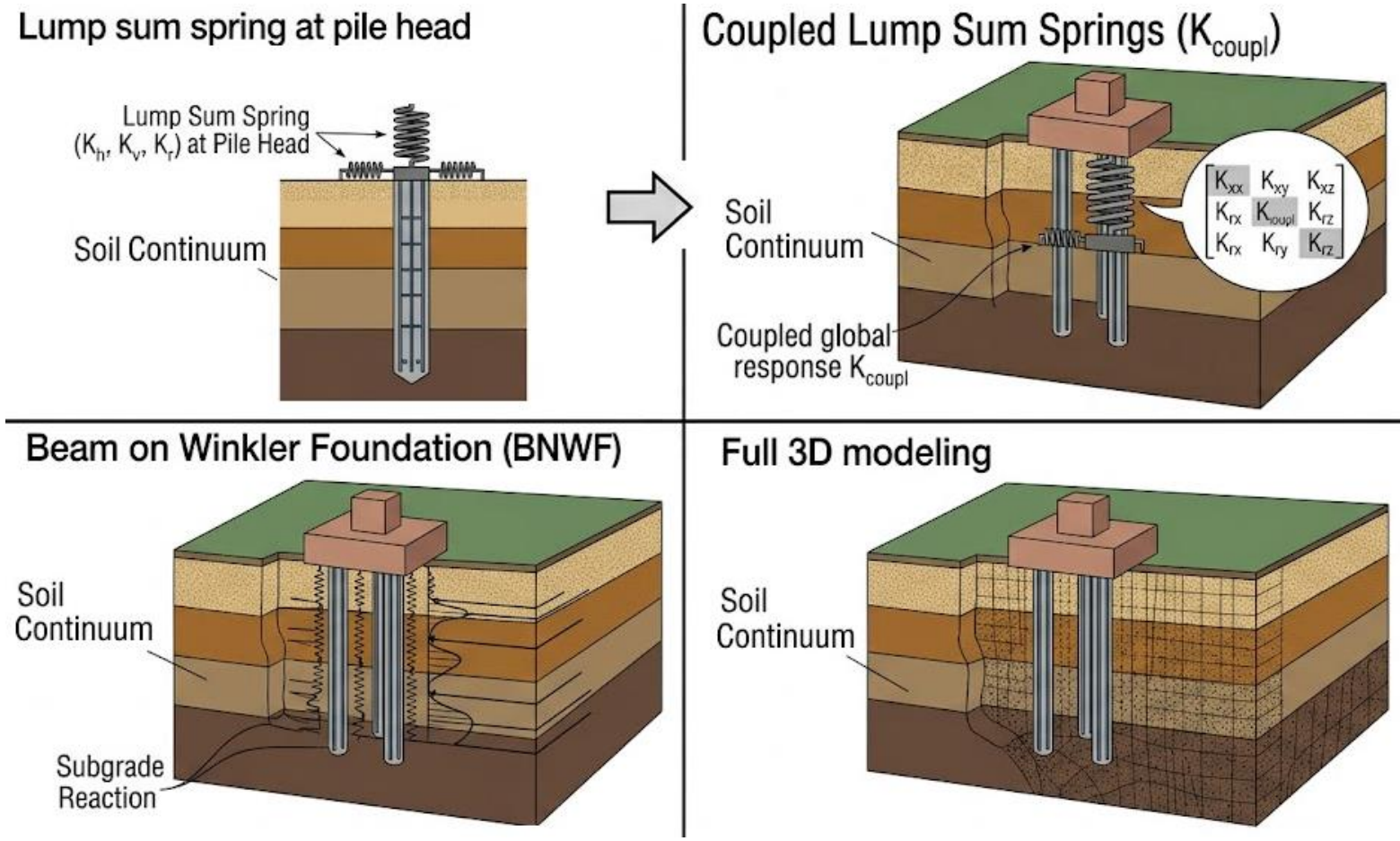
$$\begin{bmatrix} V_i \\ H_i \\ M_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_i \\ S_i \\ M_i \end{bmatrix}$$



4.2 การจำลองพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็ม (กรณีใช้ SSI)

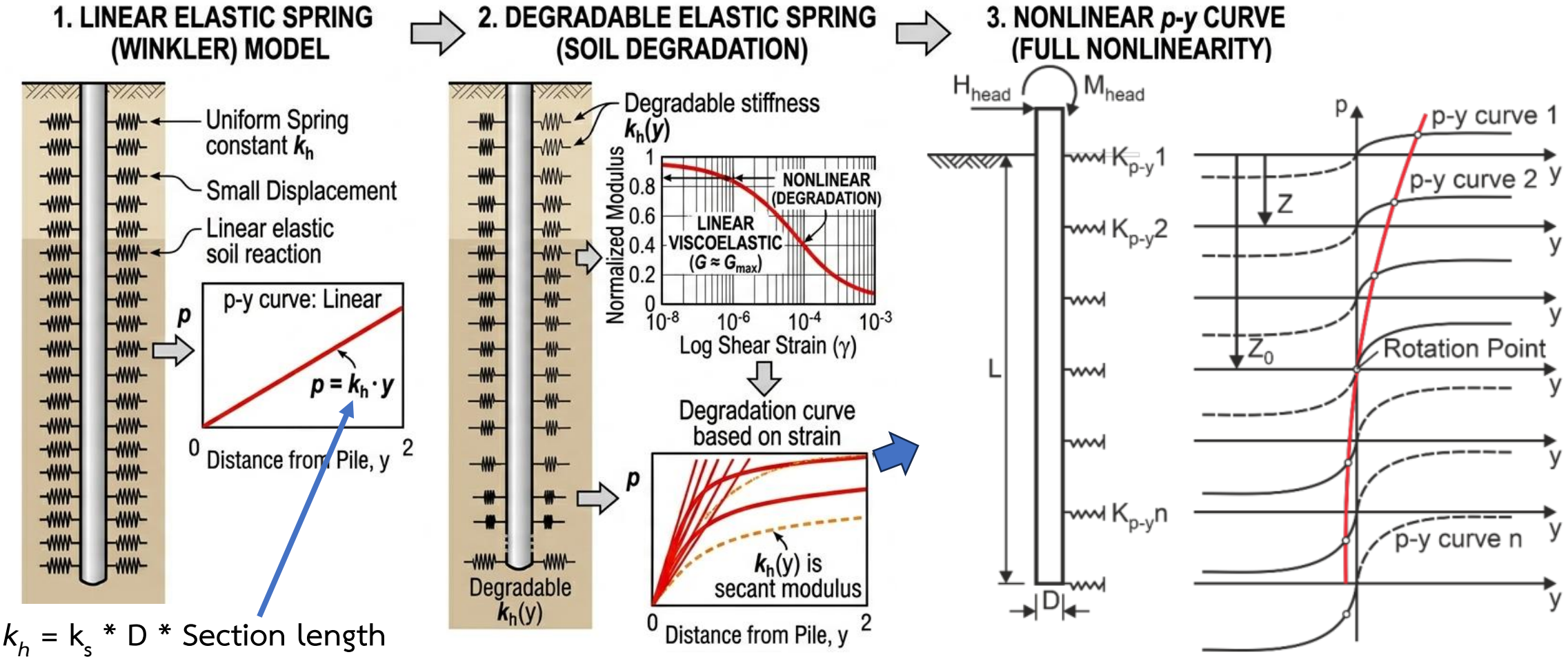
- การจำลองด้วยวิธี BNWF สามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างได้ง่าย

- การจำลองด้วยวิธี FEM ให้รายละเอียดมากที่สุด แต่ต้องใช้ความชำนาญและพารามิเตอร์จำนวนมาก



4.2 การจำลองพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็ม (กรณีใช้ SSI)

กรณีที่ความเร่งออกแบบมีค่าไม่มาก (as < 0.1 or y < 12 mm or DCR ต่ำๆ) สามารถใช้แบบจำลองแบบอิลาสติกได้
กรณีที่ความเร่งออกแบบหรือการเคลื่อนตัวมีค่าสูงขึ้น การใช้แบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นจะให้ผลที่แม่นยำขึ้น

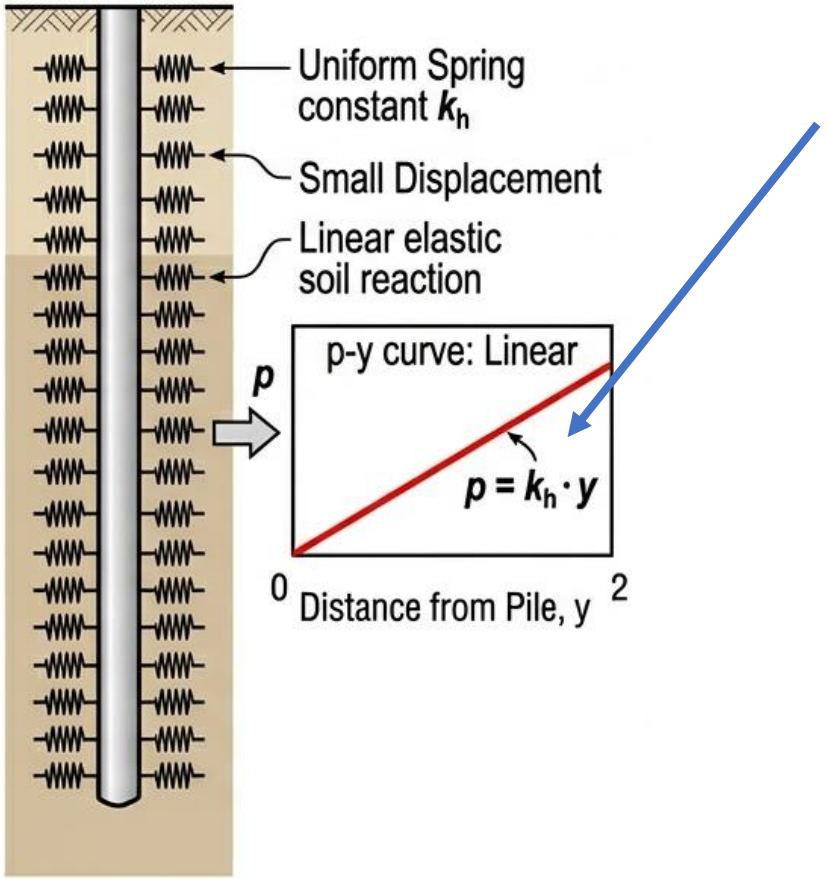


k_h = k_s * D * Section length

k_s ดูหน้า 39

4.2 การจำลองพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็ม (กรณีใช้ SSI)

กรณีที่ความเร่งออกแบบมีค่าไม่มาก (as < 0.1 or y < 12 mm or DCR ต่ำๆ) สามารถใช้แบบจำลองแบบอิลาสติกได้
กรณีที่ความเร่งออกแบบหรือการเคลื่อนตัวมีค่าสูงขึ้น การใช้แบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นจะให้ผลที่แม่นยำขึ้น



$k_h = k_s * BL$

k_s ดูหน้า 39 หรือ

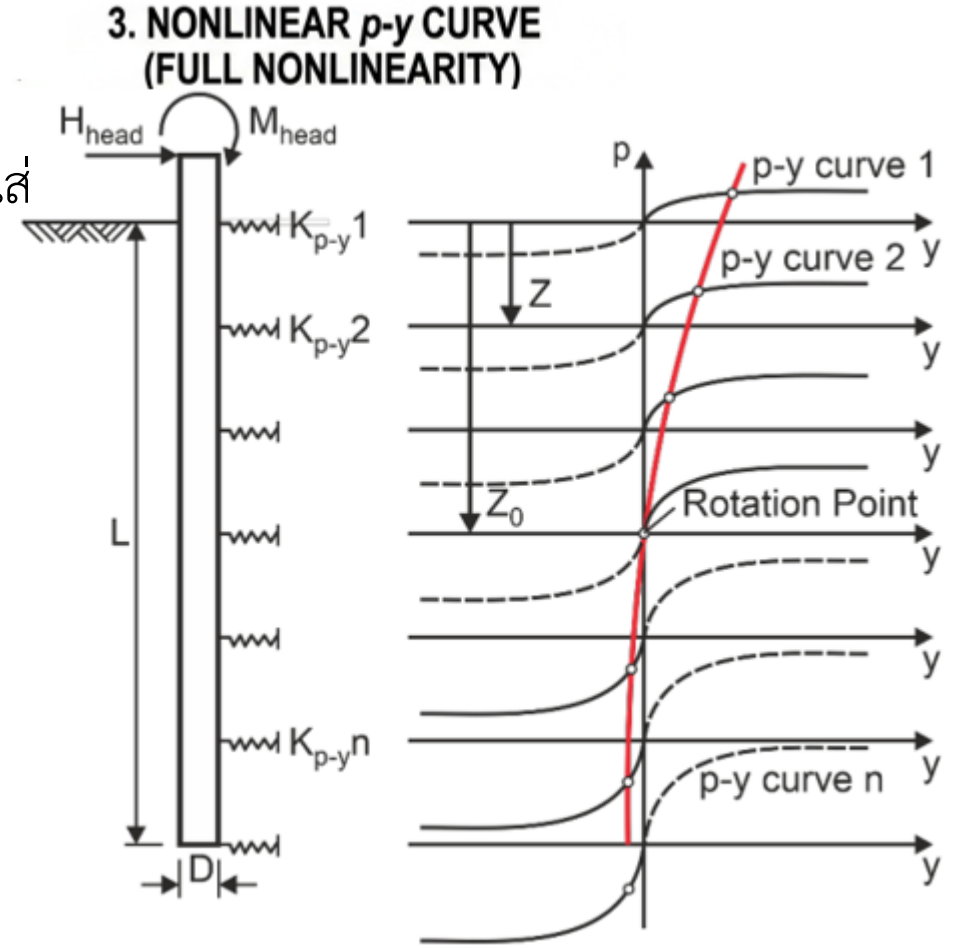
$$k_s = 67 S_u / B \qquad \text{(Davisson,1970)}$$

(for Disp. ≈ 10% Dia.)

4.2 การจำลองพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็ม (กรณีใช้ SSI)

กรณีที่ความเร่งออกแบบมีค่าไม่มาก (as < 0.1 or y < 12 mm or DCR ต่ำๆ) สามารถใช้แบบจำลองแบบอิลาสติกได้
กรณีที่ความเร่งออกแบบหรือการเคลื่อนตัวมีค่าสูงขึ้น การใช้แบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นจะให้ผลที่แม่นยำขึ้น

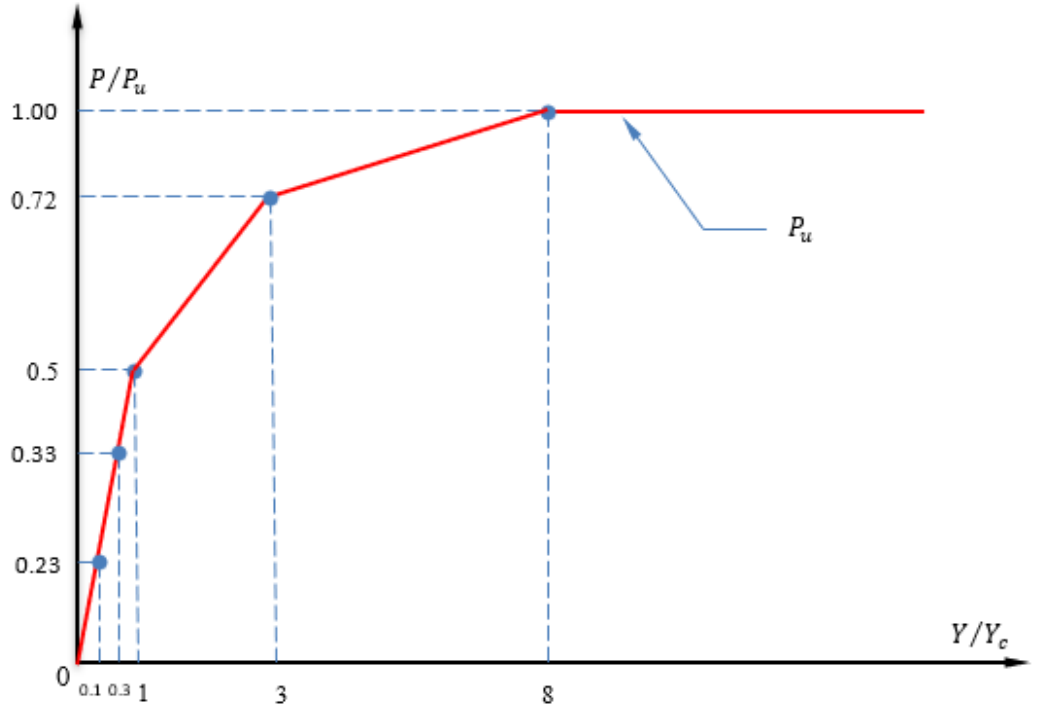
1) จำลองสปริงแต่ละตัวด้วยค่าจาก p-y curve เพื่อใส่ที่จุดรองรับด้านข้างของแบบจำลองเสาเข็มในโปรแกรมวิเคราะห์
2) จำลองด้วยสปริงแบบไม่เชิงเส้นที่ระดับหัวเสาเข็มเพียงตำแหน่งเดียว โดยอ้างอิงจากการวิเคราะห์ผลตอบสนองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป



4.2 การจำลองพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็ม (กรณีใช้ SSI)

การจำลองพฤติกรรมเสาเข็มด้วย p-y curve จะให้ผลที่แม่นยำกว่าเมื่อเสาเข็มมีการเคลื่อนตัวสูงจนมีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น แบบจำลอง p-y curve สามารถอ้างอิงจาก API RP 2GEO / ISO 19901-4

- Matlock (1970) : Static & Cyclic / Soft clay
- Reese et al. (1975) : Static & Cyclic / Sandy soils
- Matlock & Foo (1978) : Apply to seismic problem
- Kagawa (1980) : Dashpots + p-y elements
- Boulanger (1999) : ElastoPlastic + Gap.
- Naggar & Bentley (2000): Dynamic P-y, freq. dependent
- API (1993, 2011, 2014, 2020)'s p-y curves
  - Static, Cyclic, Dynamic / Clay, Sand
  - De facto standard for pile design against dynamic load



4.2 การจำลองพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็ม (กรณีใช้ SSI)

ตัวอย่าง p-y curve for soft clay under cyclic loading (API model)

$$P_u = c_u D\left(3 + \frac{\gamma'}{c_u}X + J\frac{X}{D}\right) \quad \text{เมื่อ} \quad X \le X_R$$

$$P_u = 9c_u D \quad \text{เมื่อ} \quad X > X_R$$

$$Y_C = 2.5\varepsilon_{50} D$$

P_u = แรงต้านทานสูงสุดของดินต่อความยาวของเสาเข็ม 1 เมตร

c_u = กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (undrained shear strength)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (pile diameter)

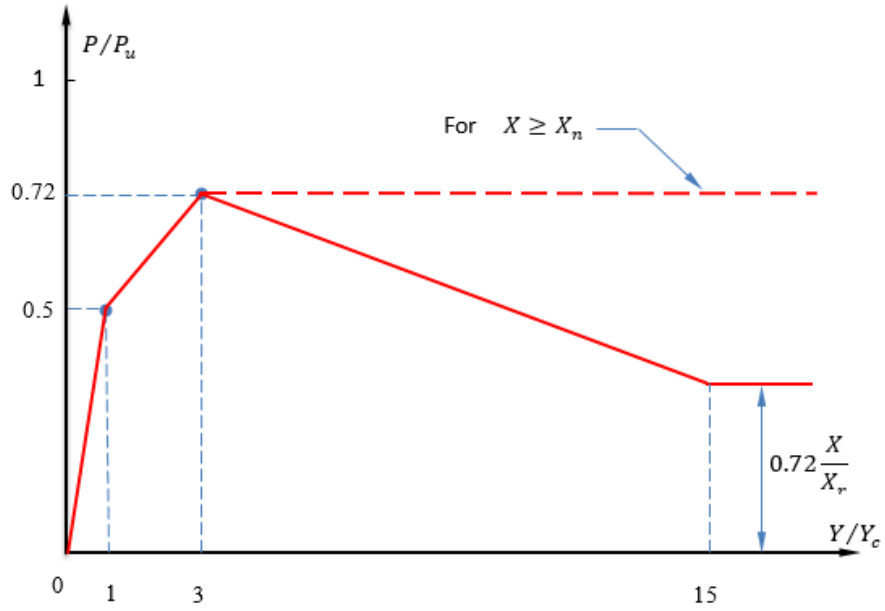
γ' = หน่วยน้ำหนักประสิทธิผลของดิน (effective unit weight)

J = พารามิเตอร์ไร้หน่วย ซึ่งมีค่าระหว่าง 0.25 ถึง 0.50

X = ความลึกจากผิวดิน (depth below the soil surface)

X_R = ความลึกจากผิวดินที่ค่า P_u จากสมการทั้งสองมีค่าเท่ากัน

ε_{50} = ความเครียดที่ครึ่งหนึ่งของความเค้นสูงสุด ที่ได้จากการทดสอบแรงอัดแบบไม่ระบายน้ำ

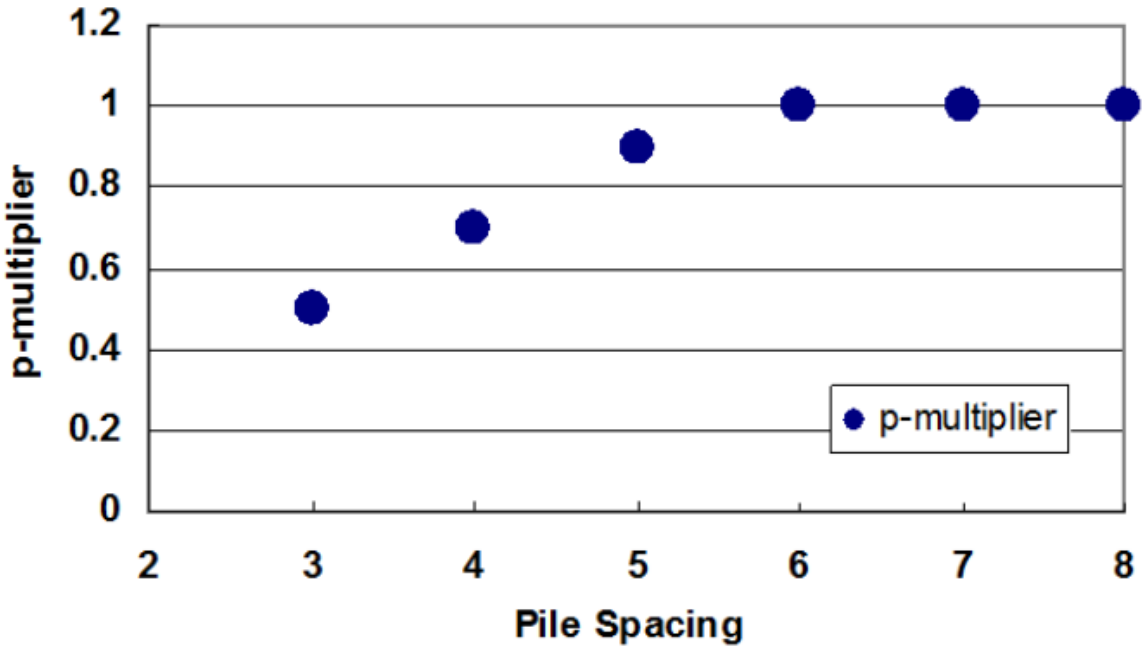


ค่าแนะนำสำหรับ ε_{50} กรณีที่ไม่มีผลการทดสอบแรงอัดแบบไม่ระบายน้ำ

Undrained Shear Strength (kPa)	Strain Factor, ε_{50}
≤ 24	0.02
24 ~ 48	0.01
48 ~ 96	0.007
96 ~ 200	0.005
≥ 200	0.004

การคิดอิทธิพลของเสาเข็มกลุ่ม (กรณีใช้วิธี p-y)

The single pile stiffness must be adjusted for group effects if the foundation is supported by a pile group. In general, if the center to center spacing of the piles in a group is less than five pile diameters, interactions between the piles (i.e. pile group effects) must be considered in evaluating pile stiffness. In the p-y approach, this interaction is defined using what is referred to as a p-multiplier, a factor by which the p ordinate of the p-y curve is multiplied to account for group effects.



P-Multipliers for Two-Way Seismic Loading

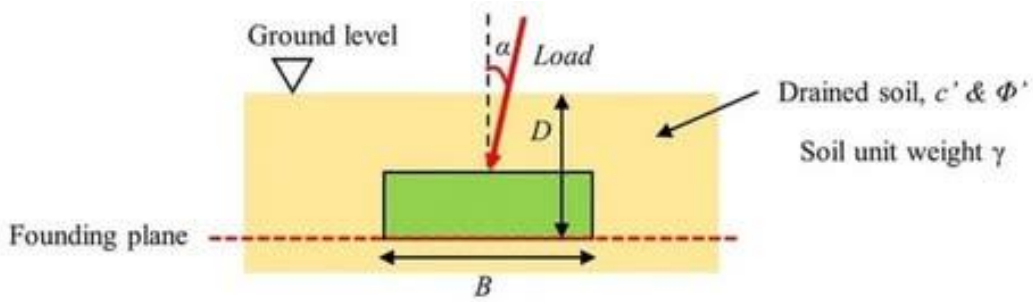
5. การออกแบบเชิงปฐพี

ข้อพิจารณาเกี่ยวกับกำลังของดินและฐานรากในสภาพพลวัต (Dynamic soil strength)

- Liquefied soils สูญเสียกำลังแทบทั้งหมด หรือ ออกแบบด้วยการใช้ Undrained shear strength ของ Liquified sand
- Non liquefied soils
  - Sands : กำลังโดยรวมลดลงเนื่องจากแรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้น และ
    การรบกวนดินบริเวณรอยต่อระหว่างดินกับโครงสร้างโดยเฉพาะระดับตื้นๆ
    ในการออกแบบใช้วิธีลดค่ากำลังแบบสถิตลง 10-20%
  - Clays: กำลังลดลงเนื่องจากการรบกวนดิน โดยเฉพาะดินเหนียวอ่อนที่มีความไวตัว (Sensitivity) สูง
    กำลังเพิ่มขึ้นเนื่องจากอัตราการเฉือนสูงกว่าสภาพสถิต
    สำหรับดินเหนียวแข็งปานกลางถึงแข็งมาก อิทธิพลทั้งสองหักล้างกันพอดี (โดยทั่วไป ลดลงประมาณ 0 - 20%)
    สำหรับดินเหนียวไวตัว ต้องลดค่ากำลังลงตามผลทดสอบ (โดยทั่วไป ลดลงประมาณ 30 - 50%)
- ค่าอัตราส่วนปลอดภัยในสภาพพลวัต มักยอมให้มีค่าที่ต่ำกว่าสภาพสถิต (เช่นลดค่า FS จาก 2.0 เป็น 1.33)

5.1การออกแบบเชิงปฐพีของฐานรากตื้น

1) คำนวณกำลังรับแรงดึง -> ควบคุมไม่ให้เกิดแรงดึง
2) คำนวณกำลังรับแรงอัด -> สูตรคำนวณต้องคำนึงถึงแรงด้านข้างและการเยื้องศูนย์
   Dynamic soil strength
3) คำนวณกำลังรับแรงด้านข้าง (การเลื่อนไถล)
   -> Friction, Passive pressure
4) ฐานรากต้องไม่วิบัติก่อนโครงสร้างส่วนบน
   (ถึงแม้ว่า FS จะได้ตามเกณฑ์ก็ตาม)



Meyerhof's Formula

$$q_f = s_c N_c d_c i_c c' + s_q N_q d_q i_q \gamma D + \frac{1}{2}\gamma B s_\gamma N_\gamma d_\gamma i_\gamma$$

q_f ultimate bearing capacity
s_c, s_q, $s\gamma$ shape factor
N_c, N_q, $N\gamma$ bearing capacity factor
d_c, d_q, $d\gamma$ depth factor
i_c, i_q, $i\gamma$ inclination factor
c' soil cohesion
Φ' soil friction angle
B footing width
D footing depth
L footing length

$$s_c = 1 + 0.2\frac{(1+\sin\phi')}{(1-\sin\phi')}\left(\frac{B}{L}\right)$$

$$s_q = 1 + 0.1\frac{(1+\sin\phi')}{(1-\sin\phi')}\left(\frac{B}{L}\right)$$

$$s_\gamma = 1 + 0.1\frac{(1+\sin\phi')}{(1-\sin\phi')}\left(\frac{B}{L}\right)$$

$$N_c = (N_q - 1)\cot\phi'$$

$$N_q = \frac{(1+\sin\phi')}{(1-\sin\phi')}e^{\pi\tan\phi'}$$

$$N_\gamma = (N_q - 1)\tan 1.4\phi'$$

$$d_c = 1 + 0.2\sqrt{\frac{(1+\sin\phi')}{(1-\sin\phi')}}\left(\frac{D}{B}\right)$$

$$d_q = 1 + 0.1\sqrt{\frac{(1+\sin\phi')}{(1-\sin\phi')}}\left(\frac{D}{B}\right)$$

$$d_\gamma = 1 + 0.1\sqrt{\frac{(1+\sin\phi')}{(1-\sin\phi')}}\left(\frac{D}{B}\right)$$

$$i_c = \left(1 - \frac{\alpha}{90^\circ}\right)^2$$

$$i_q = \left(1 - \frac{\alpha}{\phi'}\right)^2$$

$$i_\gamma = \left(1 - \frac{\alpha}{\phi'}\right)^2$$

5.2 การออกแบบเชิงปฐพีของฐานรากเสาเข็ม

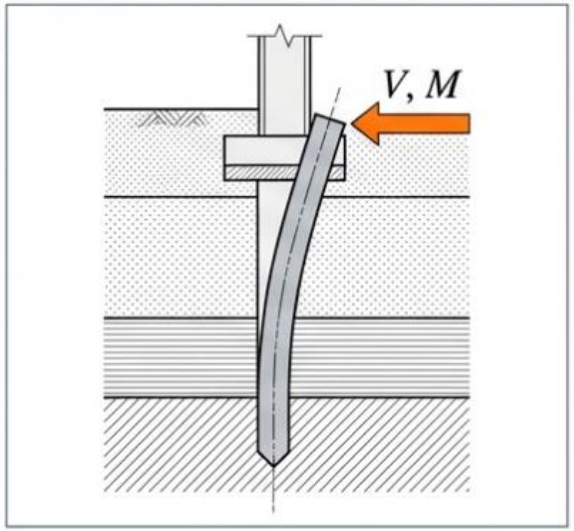
(1) ตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักตามแกน (พิจารณาจาก Dynamic soil strength)

(2) แรงดึงตามแกน (เนื่องจากการโยกตัวระหว่างแผ่นดินไหว)

(3) ตรวจสอบว่าความยาวเสาเข็มเพียงพอจะทำให้มีพฤติกรรมแบบเสาเข็มยาว
คำนวณหาแรงเฉือนและโมเมนต์ภายในเสาเข็มเพื่อนำไปออกแบบ

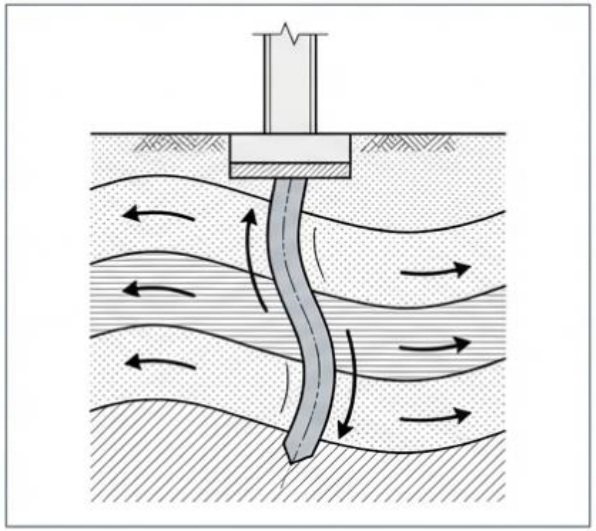
(4) ตรวจสอบการเคลื่อนตัวว่าไม่เกินสมมติฐานของแบบจำลองที่ใช้

(5) การตรวจสอบเพิ่มเติมเกี่ยวกับ Kinematic load



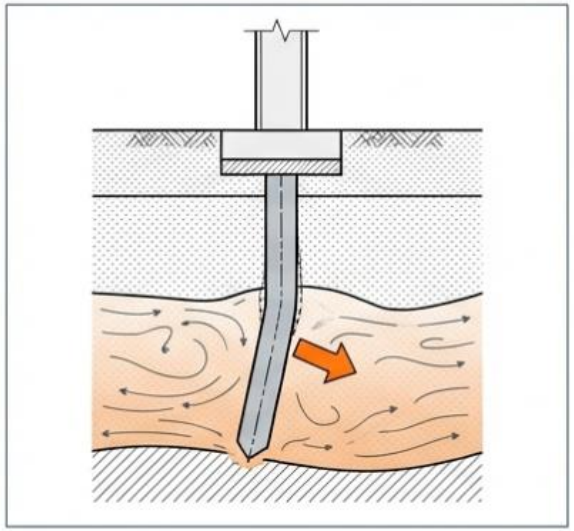
1. Inertial Interaction

Forces transmitted from the oscillating superstructure to the pile head.



2. Kinematic Interaction

The soil itself moves, forcing the pile to bend regardless of the building's weight.



3. Capacity Degradation

Loss of soil strength due to liquefaction or cyclic softening.

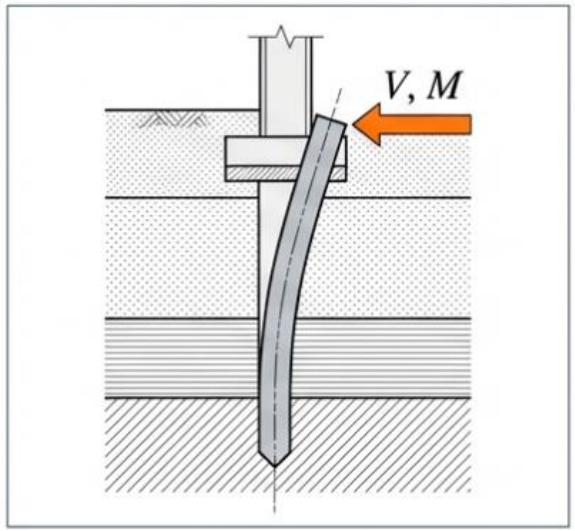
5.2 การออกแบบเชิงปฐพีของฐานรากเสาเข็ม

(1) ตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักตามแกน และแรงดึงตามแกน

(2) ตรวจสอบว่าความยาวเสาเข็มเพียงพอจะทำให้มีพฤติกรรมแบบเสาเข็มยาว
คำนวณหาแรงเฉือนและโมเมนต์ภายในเสาเข็มเพื่อนำไปออกแบบ

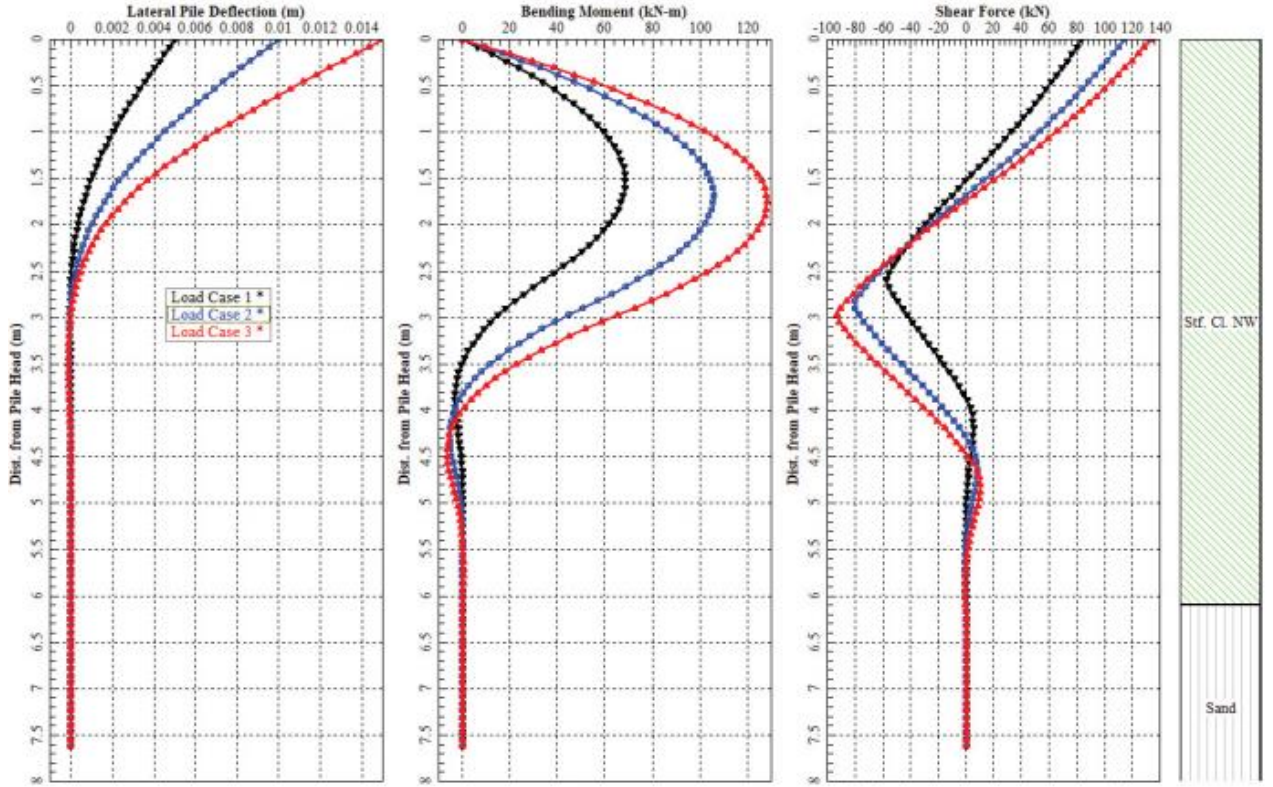
(3) ตรวจสอบการเคลื่อนตัวว่าไม่เกินสมมติฐานของแบบจำลองที่ใช้

(4) การตรวจสอบเพิ่มเติมเกี่ยวกับ Kinematic load



1. Inertial Interaction

Forces transmitted from the oscillating superstructure to the pile head.



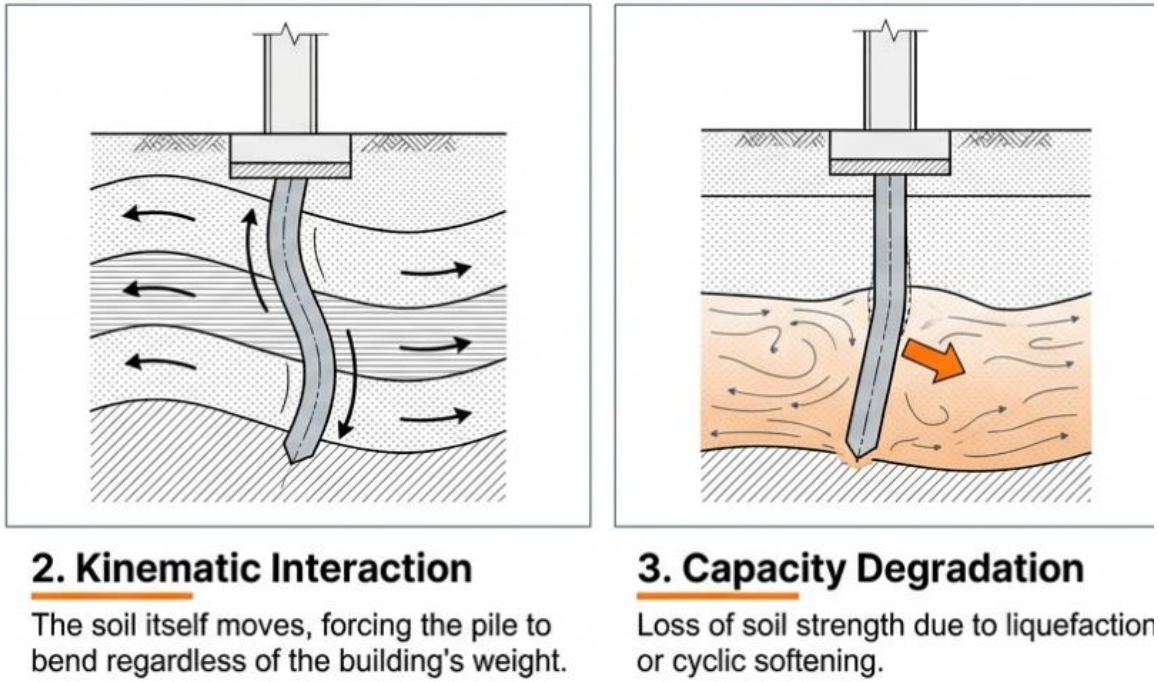
5.2 การออกแบบเชิงปฐพีของฐานรากเสาเข็ม

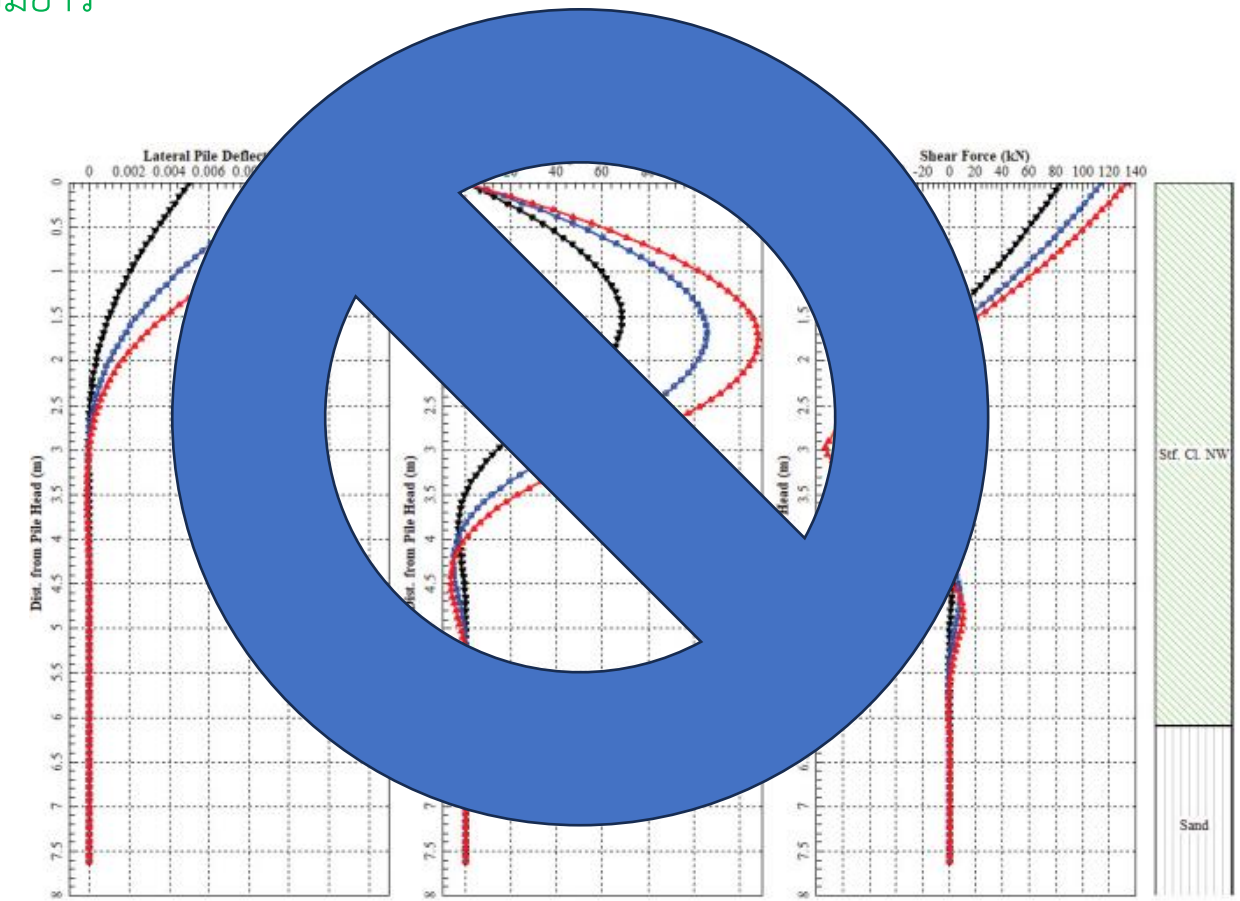
(1) ตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักตามแกน และแรงดึงตามแกน

(2) ตรวจสอบว่าความยาวเสาเข็มเพียงพอจะทำให้มีพฤติกรรมแบบเสาเข็มยาว คำนวณหาแรงเฉือนและโมเมนต์ภายในเสาเข็มเพื่อนำไปออกแบบ

(3) ตรวจสอบการเคลื่อนตัวว่าไม่เกินสมมติฐานของแบบจำลองที่ใช้

(4) การตรวจสอบเพิ่มเติมเกี่ยวกับ Kinematic load





5.2 การออกแบบเชิงปฐพีของฐานรากเสาเข็ม

(1) ตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักตามแกน และแรงดึงตามแกน

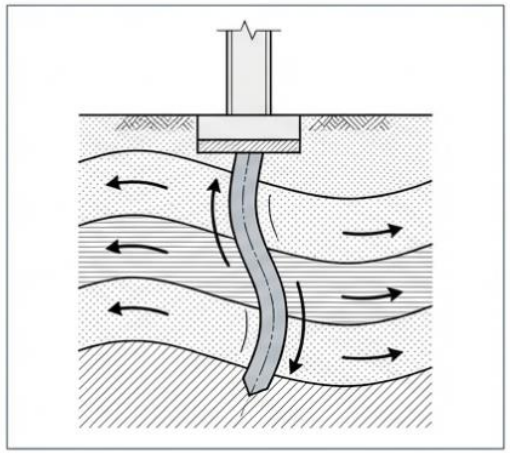
(2) ตรวจสอบว่าความยาวเสาเข็มเพียงพอจะทำให้มีพฤติกรรมแบบเสาเข็มยาว
คำนวณหาแรงเฉือนและโมเมนต์ภายในเสาเข็มเพื่อนำไปออกแบบ

(3) ตรวจสอบการเคลื่อนตัวว่าไม่เกินสมมติฐานของแบบจำลองที่ใช้

(4) การตรวจสอบเพิ่มเติมเกี่ยวกับ Kinematic load

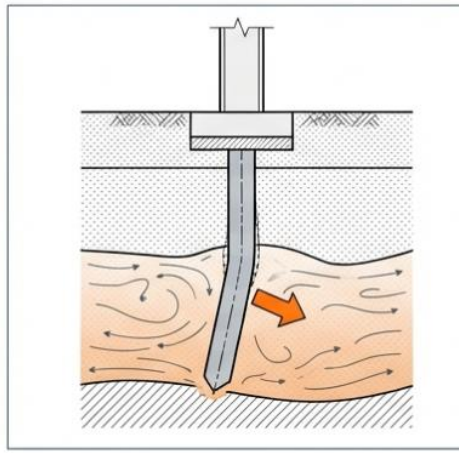
$$M \cong 0{\cdot}042\ \tau_c\ d^3 \left(\frac{L}{d}\right)^{0{\cdot}30} \left(\frac{E_p}{E_1}\right)^{0{\cdot}65} \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{0{\cdot}50}$$

$$\tau_c \approx a_s\ \rho_1\ h_1$$



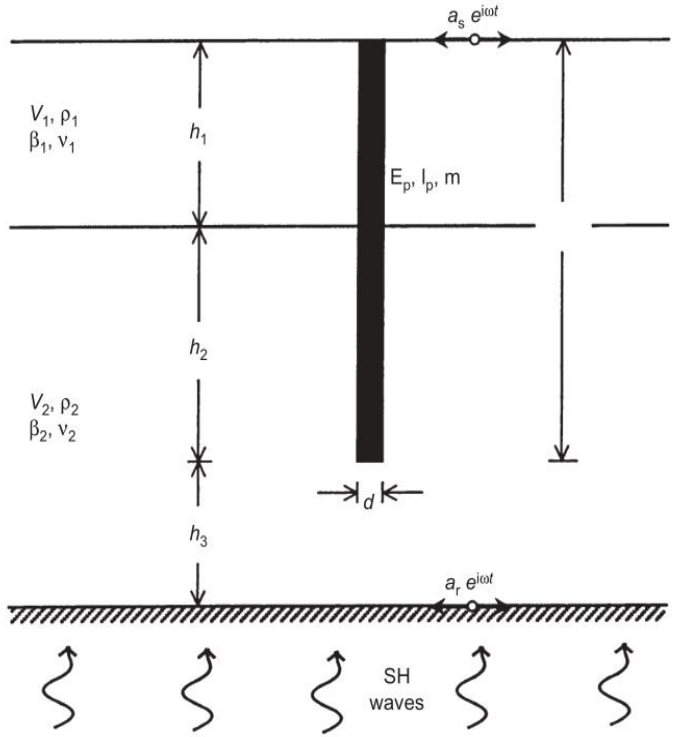
2. Kinematic Interaction

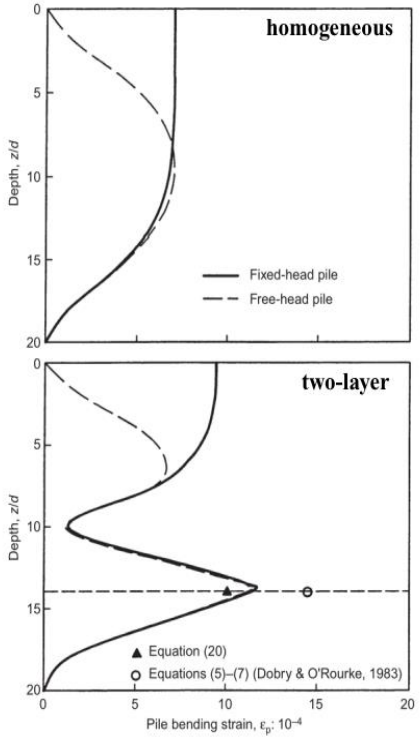
The soil itself moves, forcing the pile to bend regardless of the building's weight.



3. Capacity Degradation

Loss of soil strength due to liquefactio or cyclic softening.





แนวคิดในการออกแบบฐานราก

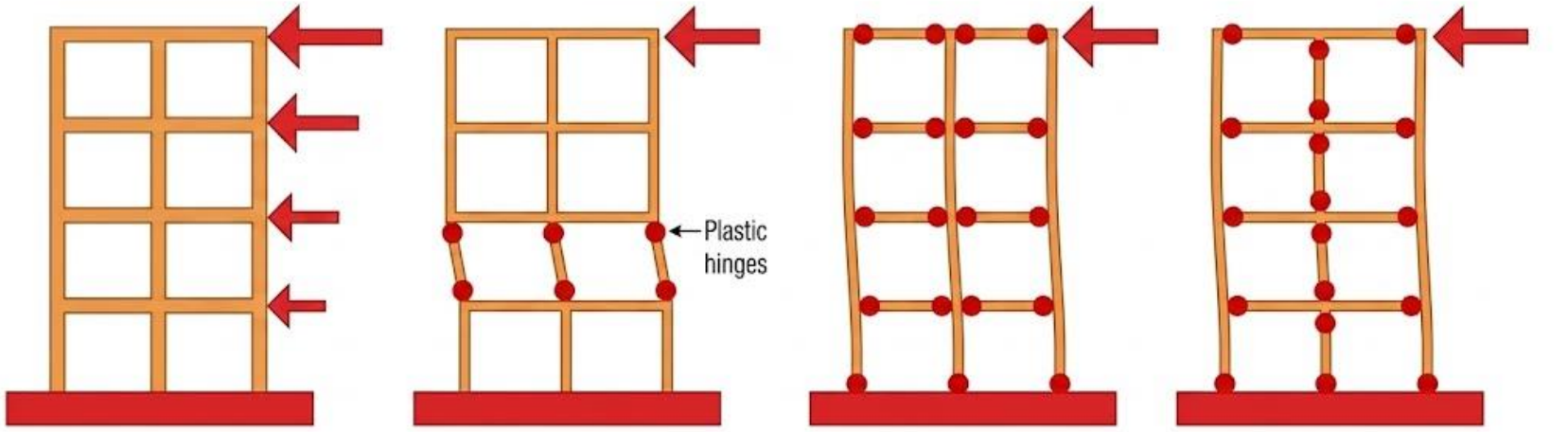
การออกแบบฐานรากต้านแผ่นดินไหว

(1) ออกแบบโดยกำหนดให้เกิดความเสียหายขึ้นที่โครงสร้างส่วนบน ที่สามารถตรวจสอบและซ่อมแซมได้ง่าย

(2) ตำแหน่งที่อาจยอมให้เกิดความเสียหาย (แบบเหนียว) ได้คือ ตำแหน่งโคนเสาที่วางบนฐานราก

(3) ฐานรากมีพฤติกรรมแบบอิลาสติกเมื่อเกิดแผ่นดินไหว (กำลังมากกว่า องค์อาคารที่ยอมให้เสียหายได้)

ใช้ค่า R และ Ω_0 ในการออกแบบ (ASCE 7), หรือใช้วิธี Capacity design (ACI 318)



6. การตรวจสอบเหล็กเสริม

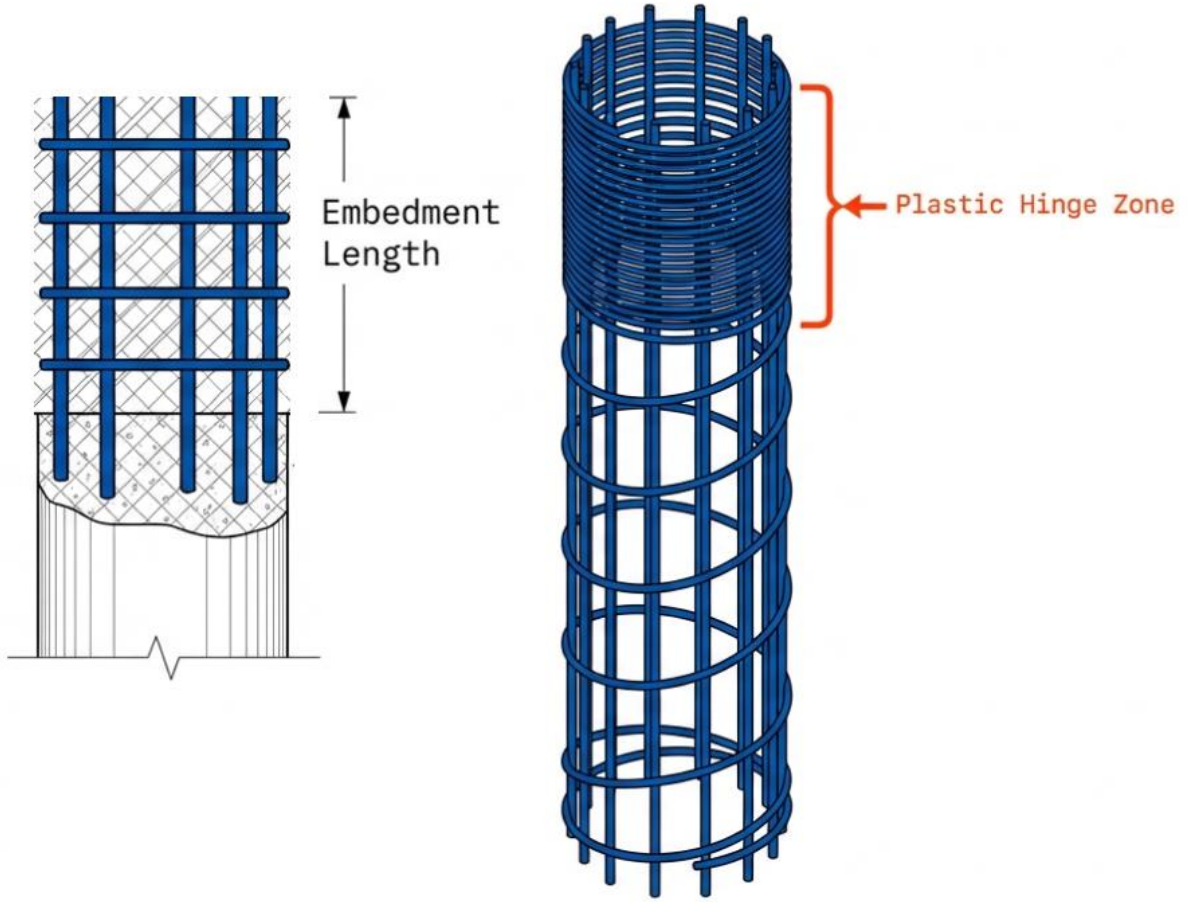
➢ เมื่อต้องออกแบบให้เสาเข็มเสียหายได้

ตำแหน่งที่มักเกิดความเสียหายได้แก่ หัวเสาเข็ม และ รอยต่อระหว่างชั้นดินอ่อนกับชั้นดินแข็ง

เมื่อต้องการให้เสาเข็มมีความเหนียว อาจเสริมเหล็กในเสาเข็มด้วยเหล็กปลอกเกลียว หรือ ใช้ท่อเหล็กหุ้ม (exterior steel liner)

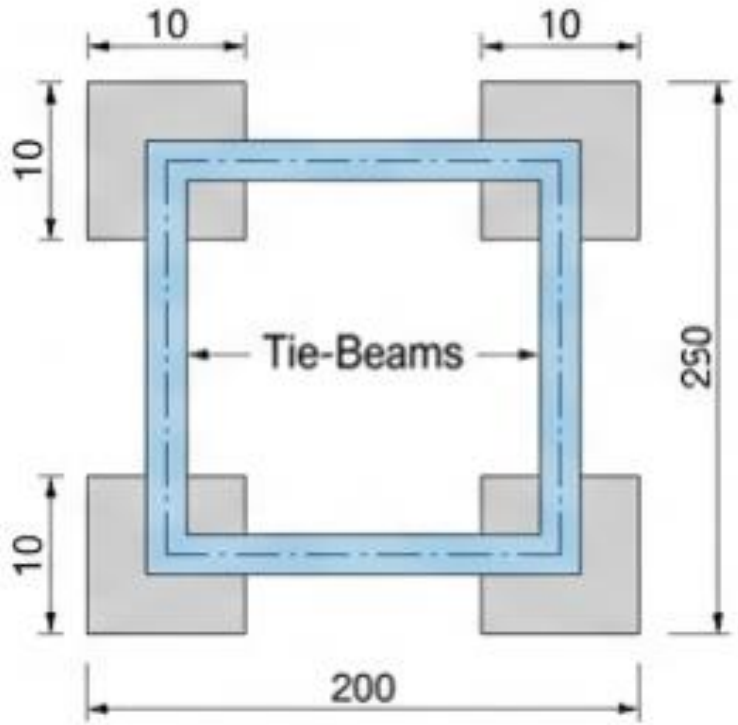
เหล็กเดือย และ การต่อทาบ ต้องสามารถรับแรงดึงได้อย่างปลอดภัย

- ➢ เหล็กเดือยที่หัวเสาเข็มต้องรับแรงดึงได้ไม่น้อยกว่า
- ➢ กำลังรับแรงดึงของหน้าตัดเสาเข็ม
- ➢ 1.3 x Geotech. Ult. pullout cap. ของเสาเข็ม
- ➢ แรงจากการวิเคราะห์โครงสร้าง (รวมผลของ W0)

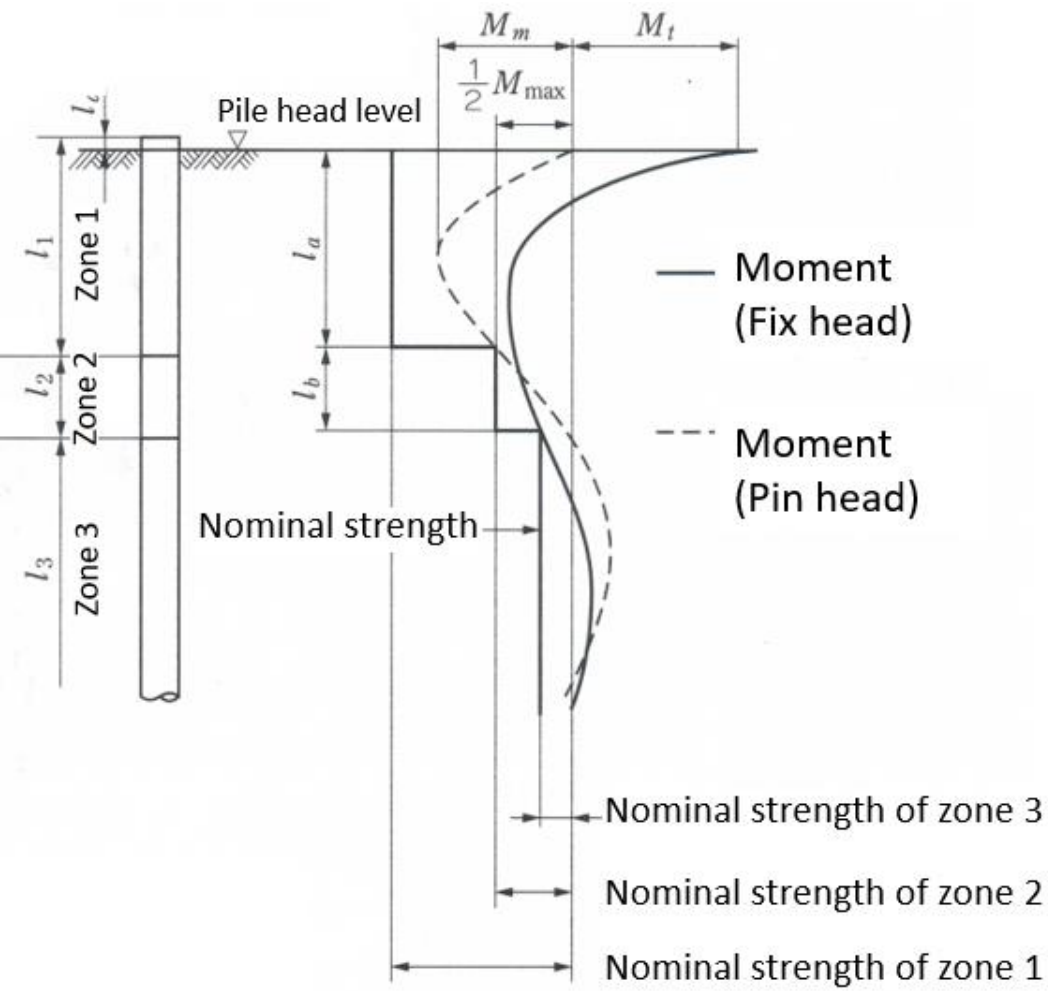


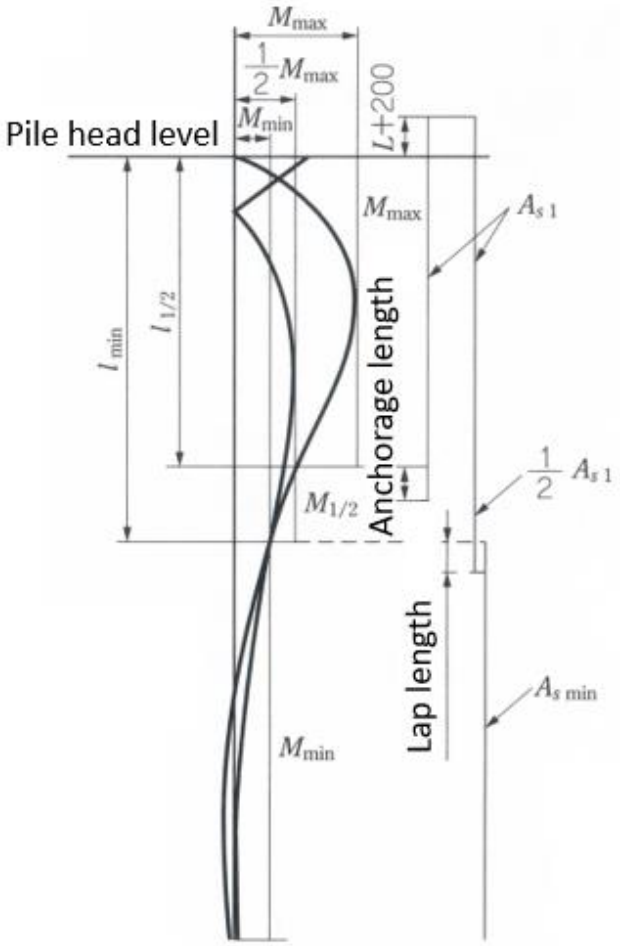
6. การออกแบบเหล็กเสริมในฐานราก (ASCE 7)

- ต้องมีการยึดโยงฐานรากเสาเข็ม
  - SDC C, D, E, F
- ต้องมีการยึดโยงฐานรากแผ่
  - SDC D, E, F + Site class E, F
- ตัวยึดต้องสามารถต้านทานแรงดึงหรืออัดอย่างน้อย 0.1 S_{DS} N เมื่อ N คือ Column load



6. การตรวจสอบเหล็กเสริมในเสาเข็ม





$A_{s\,min}$: Min. steel

A_{s1} : Reinf. for M_{max}

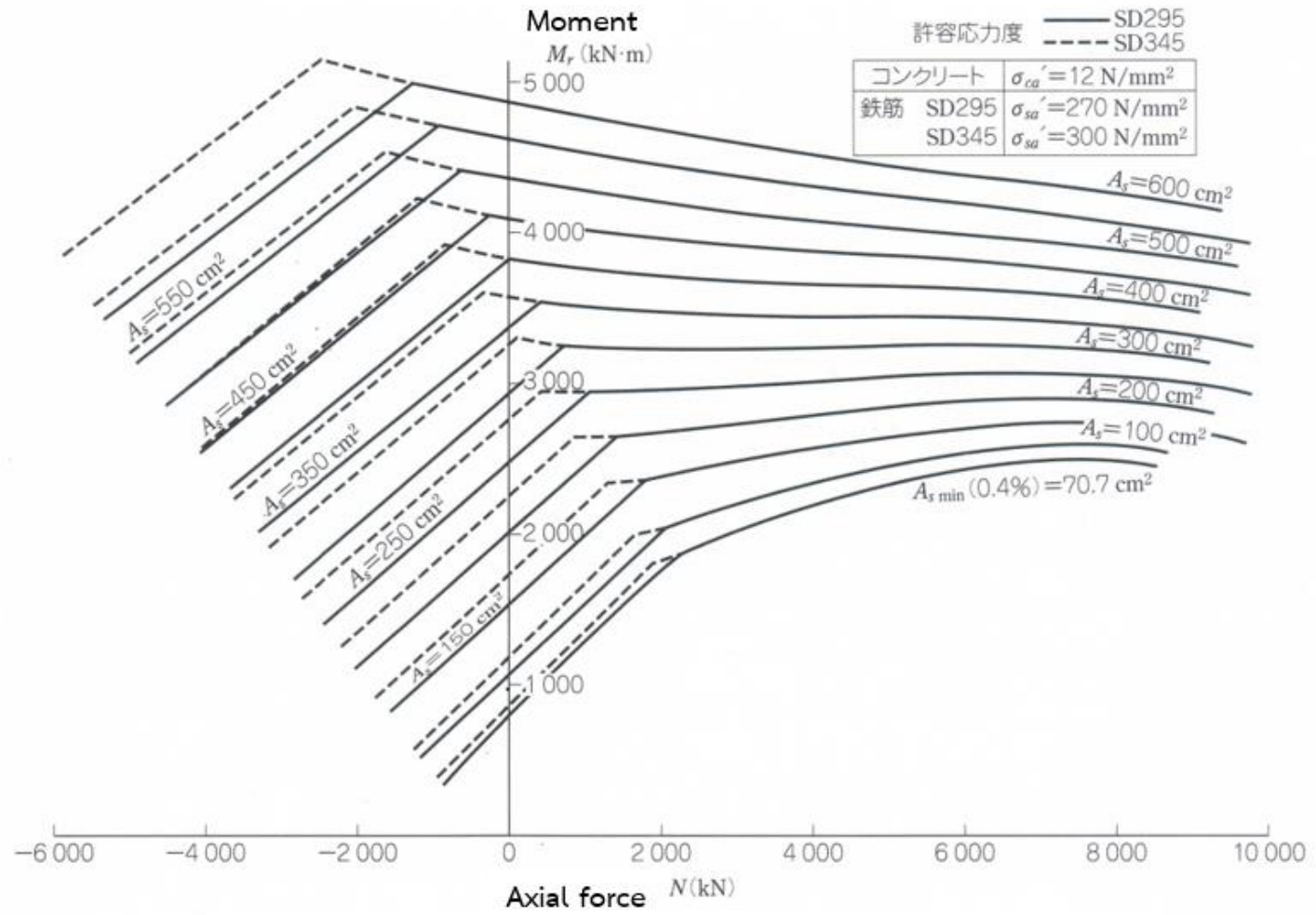
$A_{s1/2}$: $\frac{A_{s1}}{2}$

M_{max} : Max (M_{Pin}, M_{Fix})

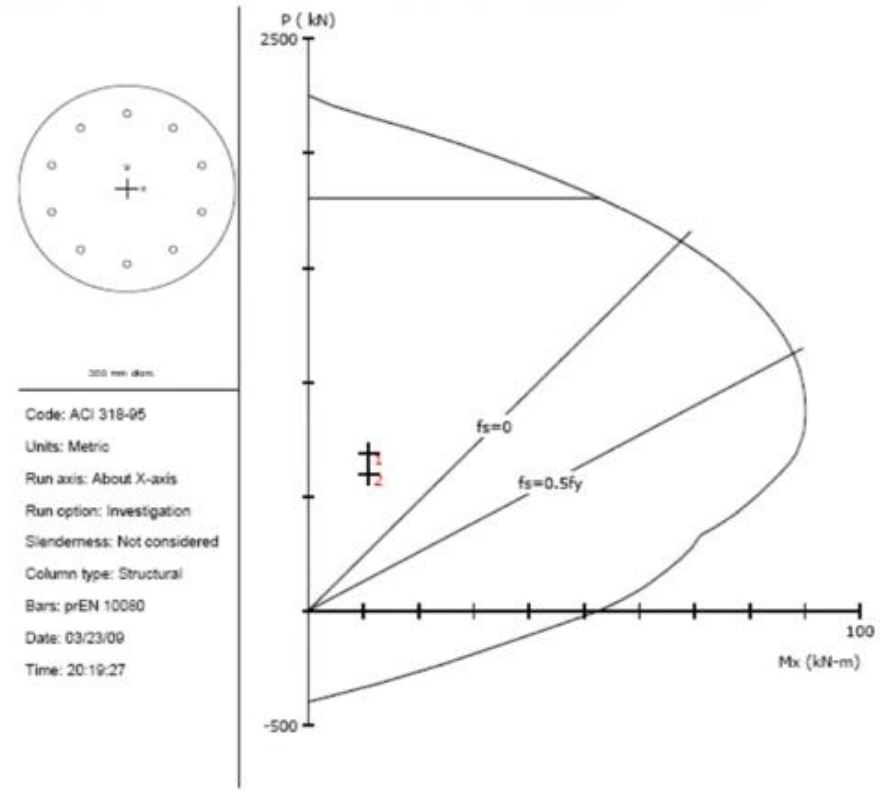
$M_{1/2}$: $\frac{M_{max}}{2}$

M_{min} : Nominal Moment by $A_{s\,min}$

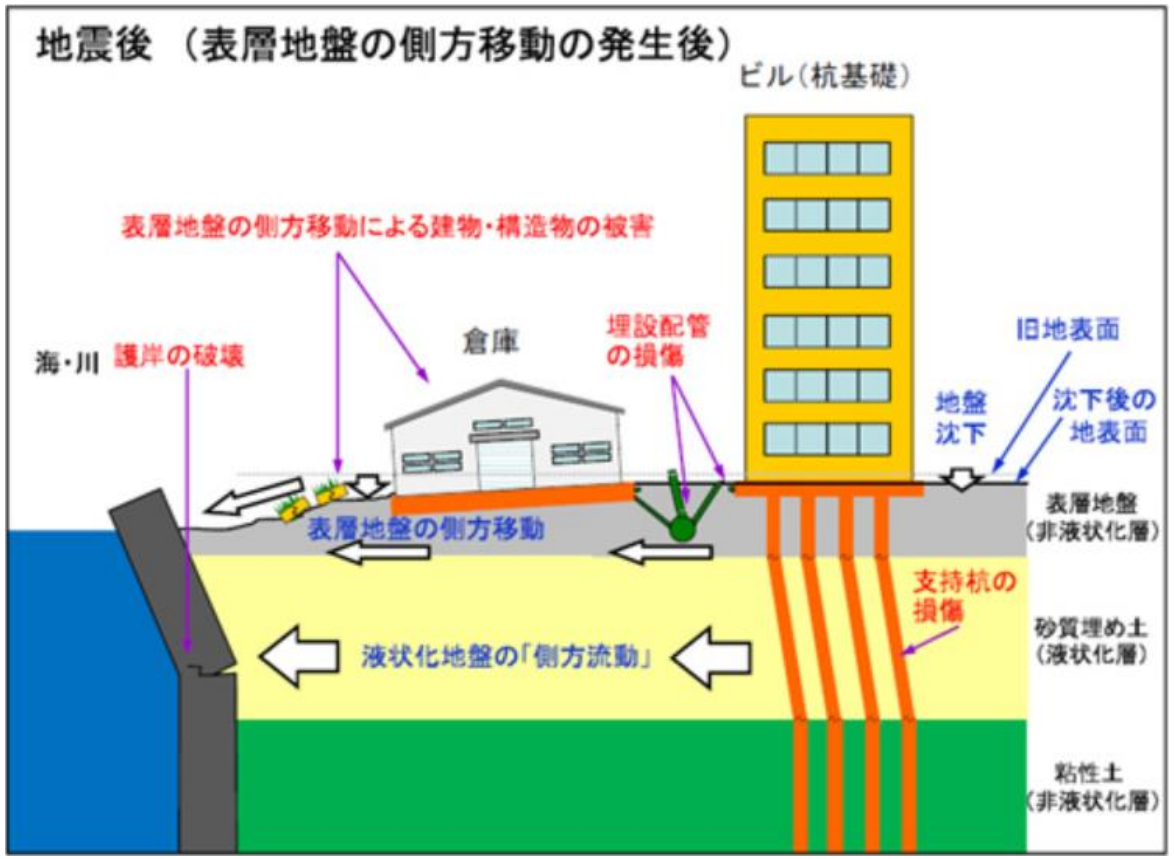
6. การตรวจสอบเหล็กเสริมในเสาเข็ม



Interaction graph for bored piles (Earthquake cond. , Dia = 1.5 m)



7. ตัวอย่างความเสียหายในเสาเข็ม





7. ตัวอย่างความเสียหายในเสาเข็ม



見明川中学校運動場の液状化



高洲地区警察官舎の陥没



明海小学校の液状化



市内私立学校玄関の陥没

7. ตัวอย่างความเสียหายในเสาเข็ม



a. Inelastic lateral deformation at pile-to-pile cap interface



b. Plastic hinges and buckling occurred within soil layers



c. Pile head released from pile cap



d. Damage at pile-to-pile cap connection



(a) Flexural/tensile failure near pile head



(b) Pile-to-cap connection failure

โครงการพัฒนาหลักสูตรการเรียนรู้
เรื่องการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรม
จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) พ.ศ. 2568