

การออกแบบและการใช้งาน Steel Sheet Piles ในงานขุดในดินเหนียวอ่อน

รศ. ดร. วันชัย เทพรักษ์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

E-mail : wanchai_secc@yahoo.com, 081-8441322

EIT, 29 September 2009

หน่วยแรงดันดินทางด้านข้าง (Lateral Earth Pressure)

- 1) หน่วยแรงดันดินทางด้านข้างแบบสถิตย์ (Lateral Earth Pressure at Rest)
- 2) การวิเคราะห์หน่วยแรงดันดินทางด้านข้างโดยหลักการของ Rankine
- 3) การวิเคราะห์หน่วยแรงดันดินโดยใช้ไดอะแกรมขอบเขตของหน่วยแรงดันดินปรากฏ (Apparent Pressure Envelop or Pressure Diagram)

หน่วยแรงดันดินทางด้านข้าง (Lateral Earth Pressure)

1 การวิเคราะห์หน่วยแรงดันดินทางด้านข้างแบบสถิตย์ (Lateral Earth Pressure at Rest)

$$\sigma'_{ho} = K_o \sigma'_{vo}$$

$$\sigma_{ho} = \sigma'_{ho} + u$$

$$\sigma_{vo} = \sigma'_{vo} + u$$

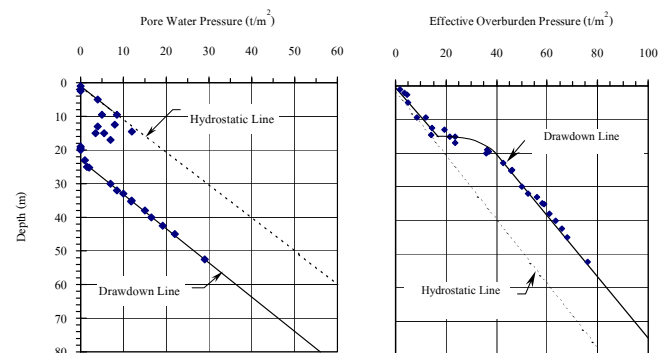
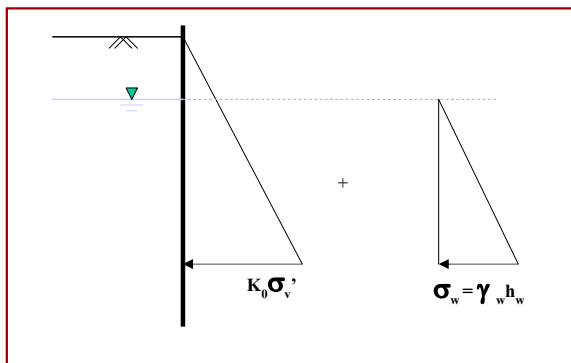
$$\sigma_{ho} = K_o \sigma'_{vo} + u$$

$K_o = 1 - \sin \phi'$ สำหรับดินเม็ดหยาบ (Cohesionless Soil)

$K_o = 0.65, 0.5$ สำหรับดินเหนียว (Cohesive Soil)

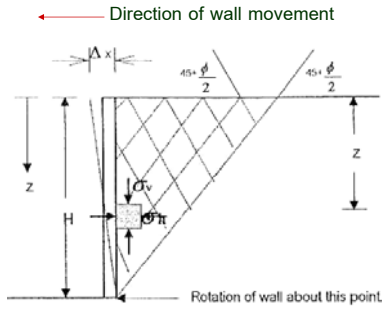
เมื่อ K_o = Coefficient of Earth Pressure at Rest หรือ สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างของดิน

Hydrostatic at rest



2. การวิเคราะห์หน่วยแรงดินทางด้านข้างโดยหลักการของ Rankine

2.1 Rankine's Active Earth Pressure



$$\sigma_{ha} = \sigma_v \tan^2(45 - \frac{\phi}{2}) - 2C \tan(45 - \frac{\phi}{2}) \dots\dots\dots (1)$$

เมื่อพิจารณา Cohesionless soil ที่มีค่า C = 0 จะได้

$$\sigma_{ha} = \sigma_v \tan^2(45 - \frac{\phi}{2}) \dots\dots\dots (2)$$

$$K_a = \frac{\sigma_{ha}}{\sigma_v} = \tan^2(45 - \frac{\phi}{2}) \dots\dots\dots (3)$$

โดยอัตราส่วน $\frac{\sigma_{ha}}{\sigma_v}$ เรียกว่า Coefficient of Rankine's Active

Earth Pressure, K_a

ตั้งนั้นจากสมการ 1

$$\sigma_{ha} = \sigma_v K_a - 2C\sqrt{K_a} \dots\dots\dots (4)$$

กรณี Cohesive soil จะเกิด Tension crack ขึ้นจนถึงระดับความลึก Z_c

ตั้งนั้น ที่ระดับผิวดิน $Z = 0$

$$\sigma_v = 0 \quad \sigma_{ha} = -2C\sqrt{K_a} \dots\dots\dots (5)$$

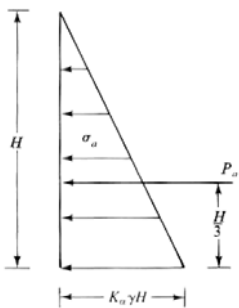
ที่ระดับความลึก $Z = H$

$$\sigma_v = \gamma H \quad \sigma_{ha} = \gamma H K_a - 2C\sqrt{K_a} \dots\dots\dots (6)$$

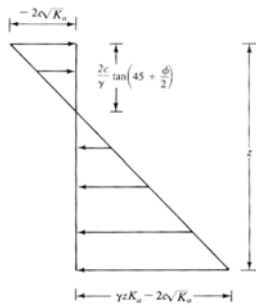
เมื่อเกิด Tension crack ($\sigma_v = 0$) จะหาระยะ Z_c ได้ดังนี้

$$0 = \gamma H K_a - 2C\sqrt{K_a}$$

$$Z_c = \frac{2C}{\gamma\sqrt{K_a}}$$

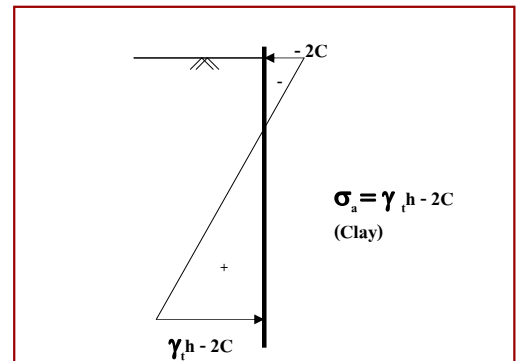


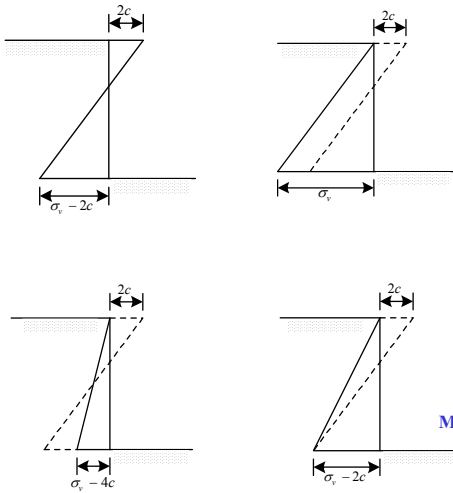
a) Cohesionless soils



b) Cohesive soils

Rankine Earth Pressure for Clay

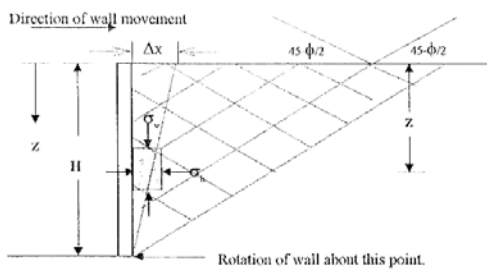




แนะนำ
Modify Rankine

2.2 Rankine's Passive Earth Pressure

$$\sigma_{hp} = \sigma_v \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) + 2C \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)$$



กรณีดินทรายหรือกรวด (Cohesionless soil) ที่มีค่า $C = 0$ จะได้

$$\sigma_{hp} = \sigma_v \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)$$

$$K_p = \frac{\sigma_{hp}}{\sigma_v} = \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)$$

K_p โดยอัตราส่วน $\frac{\sigma_{hp}}{\sigma_v}$ เรียกว่า

Coefficient of Rankine's Passive Earth Pressure

$$\sigma_{hp} = \sigma_v K_p + 2C\sqrt{K_p}$$

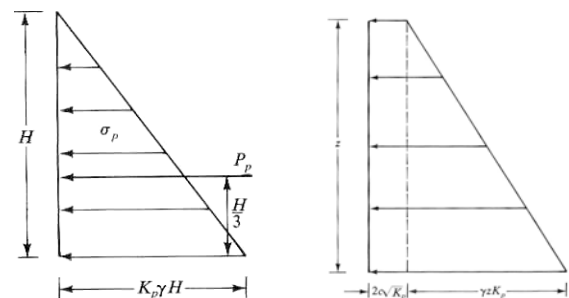
กรณีดินเหนียวหรือ Cohesive soils

ค่า σ_{hp} ที่ระดับผิวดิน $Z = 0$

$$\sigma_v = 0 ; \quad \sigma_{hp} = 2C\sqrt{K_p}$$

ที่ระดับความลึก $Z = H$

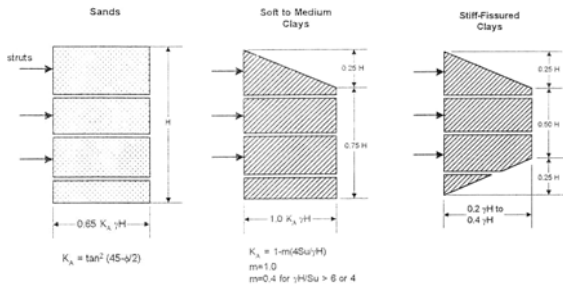
$$\sigma_v = \gamma H ; \quad \sigma_{hp} = \gamma H K_p + 2C\sqrt{K_p}$$



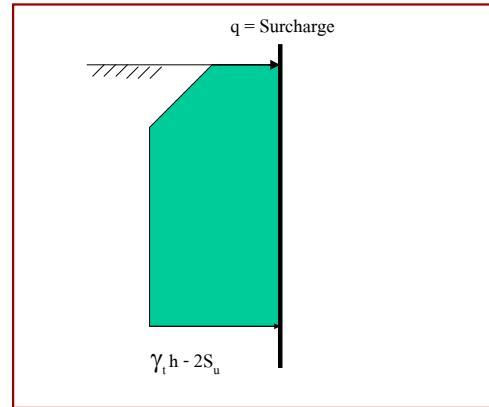
a) Cohesionless soils

b) Cohesive soils

3 การวิเคราะห์หน่วยแรงดันดินโดยใช้ไดอะแกรม
ขอบเขตของหน่วยแรงดันดินปรากฏ (Apparent
Pressure Envelop or Pressure Diagram)



Pressure Diagram for Clay



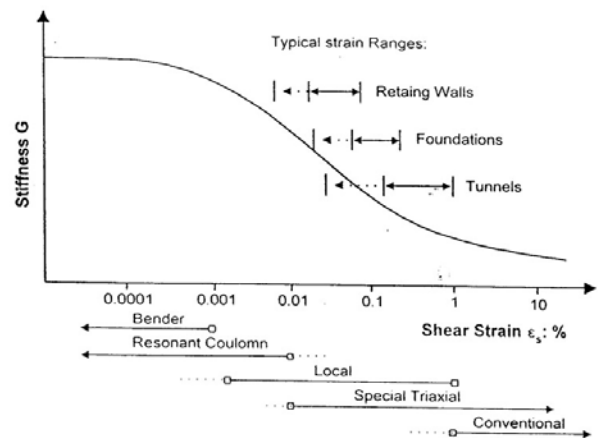
Lateral Earth Pressure	แรงรวม	ชนิดกำแพง
1. Pressure Diagram	มากที่สุด	Sheet Pile (Flexible)
2. Modify Rankine	มาก	Retaining Structure (Semi Rigid)
3. Hydrostatic	น้อย	Diaphragm Wall (Rigid)

FEM Analysis

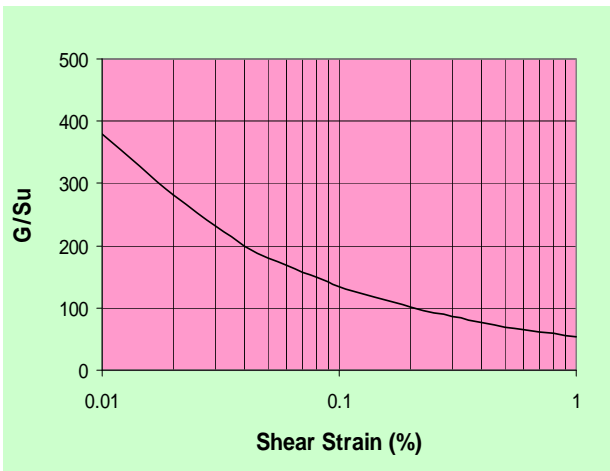
- Use At Rest Lateral Earth Pressure
- Vary Soil Stiffness According to Shear Strain of System (Soil Movement)

FEM Analysis

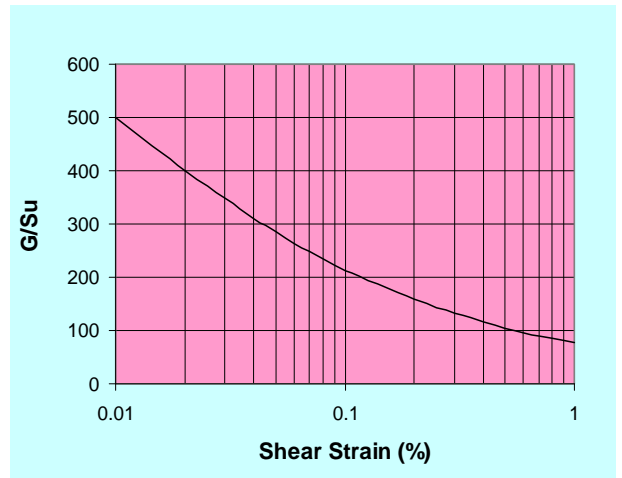
- Total Stress Analysis (Undrained Condition)
- Mohr-Coulomb Model
- Plane Strain (2-D)



Soil Stiffness depend on Strain Level



Pressuremeter Test for Bangkok Soft Clay



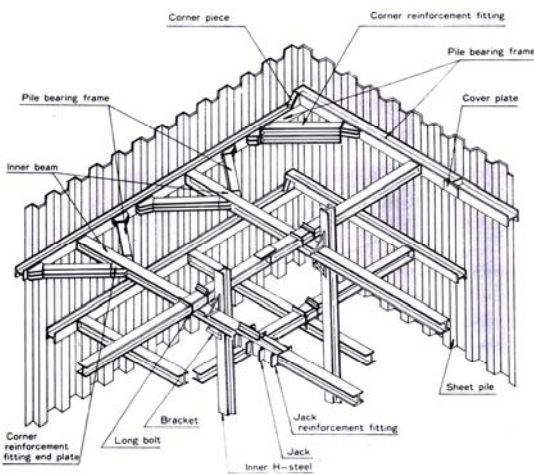
Pressuremeter Test for 1st Stiff Clay

System	Eu/Su		E'/N
	Soft Clay	Stiff Clay	Sand (kN/m ²)
Sheet Pile	150	500	-
Tunnel	240	480	2000N
Earth Retaining Structure	250	500	1000N
Diaphragm Wall	500	1000	2000N

การออกแบบระบบค้ำยันเข็มพืด (Design of Sheet Pile Bracing System)

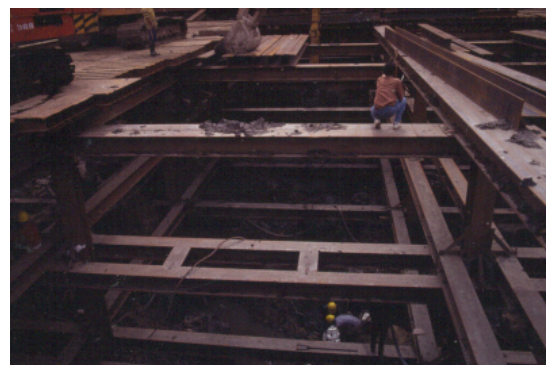
ระบบค้ำยันเข็มพืด(Sheet Pile Bracing System)
ประกอบไปด้วย

- 1)Sheet Pile
- 2)Wale
- 3)Strut
- 4)King Post
- 5)Platform



ระบบค้ำยันเข็มพืด(Sheet Pile Brace Cut System)

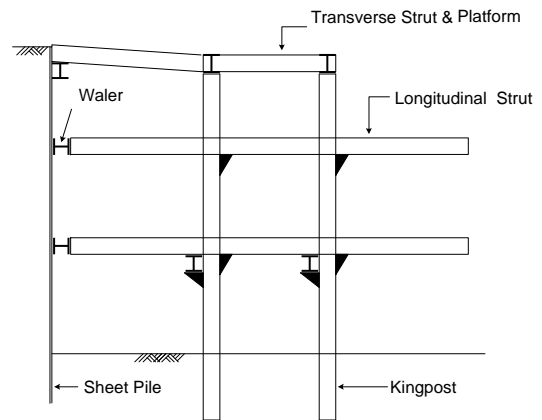
โดยระบบค้ำยันที่ใช้อยู่ทั่วไปในประเทศไทยมีอยู่ด้วยกัน 2 ระบบที่ใช้คือ ระบบการเชื่อม(Welding) ซึ่งจะทำให้การต่อ Strut และ Wale ด้วยวิธีการเชื่อม



อีกระบบหนึ่ง คือ ระบบเจาะรูขันน็อต (Bolt and Nut) ซึ่งการต่อของ Strut และ Waler จะใช้ Bolt and Nut และมีแผ่นหลักประกอบอยู่



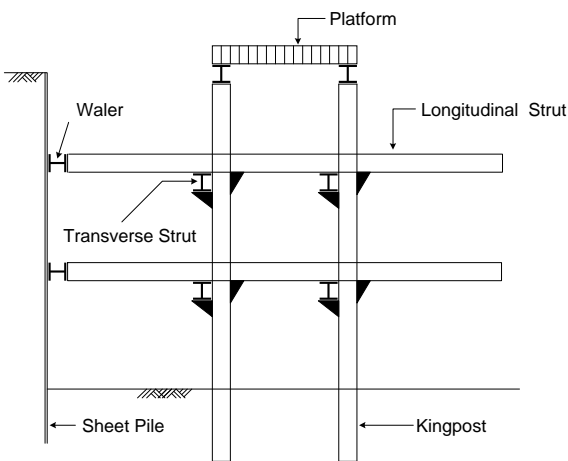
พฤติกรรมถ่าย-รับแรงของระบบค้ำยันเข็มพืด



ระบบรวม Platform กับค้ำยันชั้นที่ 1

การวิเคราะห์และออกแบบระบบ Sheet Pile

1. วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM)
2. ด้วยวิธี Limit State Analysis หรือวิธี Equilibrium



ระบบแยก Platform ออกจากค้ำยัน

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1. แรงดันดินด้านข้างคงที่
2. ความแข็งของโครงสร้าง (Wall stiffness) ในรูปแบบของ

Soil Stiffness หรือ โมดูลัส ของดิน (Young Modulus of Soils) ที่แตกต่างกัน

1. เมื่อวิเคราะห์ระบบค้ำยันเข็มพืด (Sheet Pile Wall) ในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Soft Bangkok clay) ซึ่งเป็นระบบที่ Flexible จะใช้ค่า โมดูลัสของดินเท่ากับ $E_u = 150 Su$

2. หากวิเคราะห์ระบบกำแพงกันดินไดอะแฟรมวอลล์ (Diaphragm Wall) ในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เช่นเดียวกัน แต่ต่างกันที่ไดอะแฟรมวอลล์ ซึ่งเป็นระบบที่แข็ง (Rigid) จะใช้ค่าโมดูลัสของดินเท่ากับ $E_u = 500 Su$

การวิเคราะห์งานขุดดินโดยระบบกำแพงกันดินเข็มพืด (Sheet Pile Wall) ด้วยวิธี Limit State Analysis หรือวิธี Equilibrium จะมีวิธีการวิเคราะห์การสมดุลย์ เช่นเดียวกันถึงแม้จะเป็นระบบกันดินเข็มพืด (Sheet Pile wall) ที่เป็นระบบ Flexible wall หรือเป็นระบบไดอะแฟรมวอลล์ที่เป็นระบบที่แข็งก็ตาม ดังนั้นจำเป็นจะต้องเลือกแรงดันดินให้เหมาะสม

ควรจะใช้ระบบแรงดัน ปรากฏ (Apparent Earth Pressure Diagram) เนื่องจากมีหน่วยแรงมากกว่า แรงดันดินด้านข้าง Rankine Active Earth Pressure

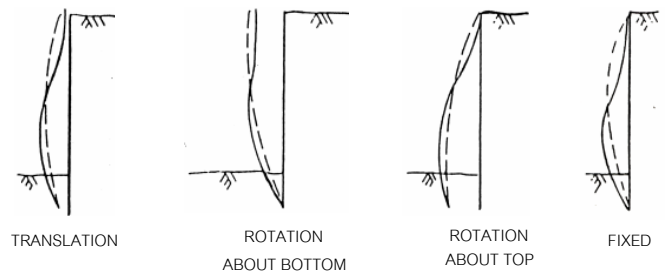
- แรงกระทำ : มาจากแรงดันดินด้านข้าง (ใช้ทฤษฎี Modify Rankine Model ที่ 3)
- เข็มพืดเหล็ก (Sheet Pile) : เกิดจากแรงกระทำของแรงดันดินสามารถนำมาออกแบบความยาวและขนาดของ Sheet Pile
- Wale : เป็นคานรัดขวางกับ Sheet Pile เพื่อถ่ายแรงจากเข็มพืดเหล็ก (Sheet Pile) เพื่อให้ถ่ายแรงจาก Uniform load มาเป็น Line load และถ่ายสู่ระบบค้ำยัน (Strut)
- ค้ำยัน (Strut) : รับแรงจาก Wale ที่เป็น Line load โดยถ่ายแรงจาก Strut ด้านหนึ่งไปสู่ Strut อีกด้านหนึ่ง โดย Strut จะมี Kingpost เป็นจุด Pin Point เพื่อเป็นโครงคอบ Strut ให้เลื่อนไปมา (Sliding) กับ Kingpost โดยไม่อนุญาตให้เชื่อม Strut ยึดกับ Kingpost เด็ดขาดเนื่องจากแรงดันดินอาจจะไม่สมดุลย์และจะดึงรั้งหรือดันให้ Kingpost พังลงมาทำให้ระบบพังทันที Strut หรือค้ำยันจะวางอยู่บน Kingpost เท่านั้น โดยใช้หูช้าง หรือ Support ที่เชื่อมกับ Kingpost รับน้ำหนักของ Strut เท่านั้น

การออกแบบความยาว Sheet Pile สามารถคำนวณได้จากหลักการ 2 หลักการคือ

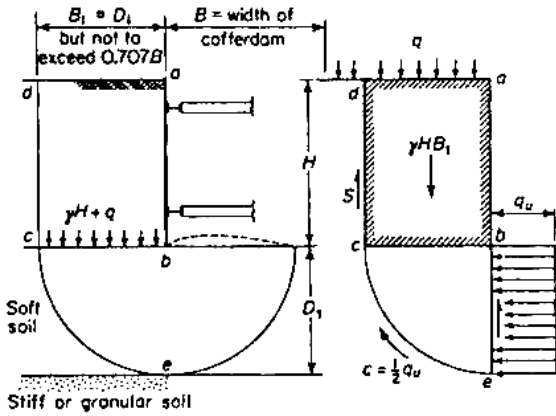
1. วิเคราะห์การสมดุลย์ของแรงทั้ง Active และ Passive Earth Pressure

โดยอาศัย Modify Rankine Active Earth Pressure (Model 3 รูปที่ 4.3) และกำหนดระดับค้ำยัน (Strut Level) จากนั้นทำการวิเคราะห์สมการโดยอาศัยทฤษฎีแรงดันดินสมดุลย์ด้านข้าง $\Sigma F_x = 0$ และโมเมนต์สมดุลย์ ΣM_o ก็จะสามารถหาความยาว Sheet Pile ที่เหมาะสมได้

2. วิเคราะห์หาความยาวโดยตรวจสอบการเกิด Heave ไหลลอดผ่านได้ Sheet Pile (Heaving Effect)



การหาเสถียรภาพของกันหลุม



$$F.S. = \frac{\text{Resisting Moment}}{\text{Acting Moment}}$$

$$F.S. = \frac{SB_1 + cB_1 \frac{\pi}{2} B_1 + q_{u2} B_1 \frac{B_1}{2}}{(\gamma H + q) B_1 \frac{B_1}{2}}$$

$$F.S. = \frac{2S + 0.5q_{u2} \pi B_1 + q_{u2} B_1}{(\gamma H + q) B_1}$$

$$F.S. = \frac{2S + s_{u2} \pi B_1 + 2s_{u2} B_1}{(\gamma H + q) B_1}$$

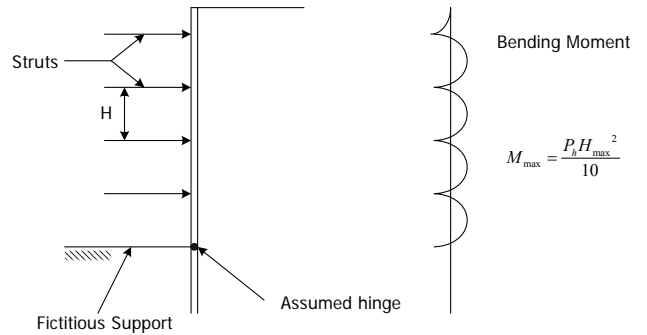
$$S = \frac{1}{2} q_{u1} \left(H - \frac{q_{u1}}{\gamma} \right)$$

$$q_{u1} = 2 S_{u1}$$

$$S = S_{u1} \left(H - \frac{q_{u1}}{\gamma} \right)$$

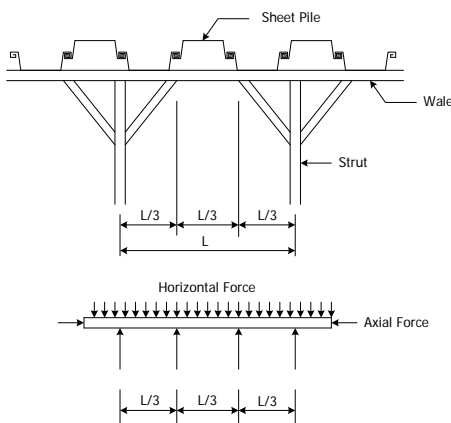
การออกแบบหาขนาดของ Sheet Pile

การออกแบบหาขนาดของ Sheet Pile กระทำได้โดยการหา moment ที่เกิดขึ้นกับ Sheet Pile อันเนื่องมาจากแรงกระทำของดินโดยทฤษฎี Modify Apparent Earth Pressure



Design of Continuous Sheet Pile

การออกแบบ Wale

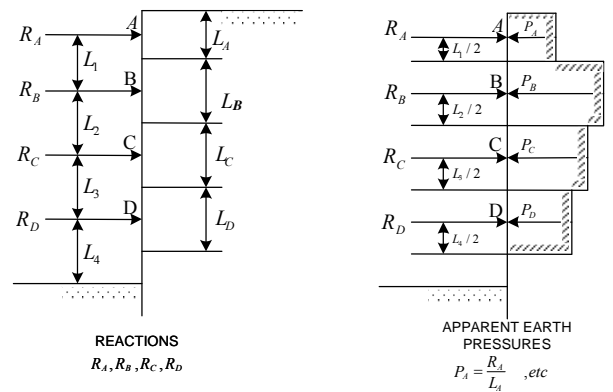


การพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ต่อแรงอัดใน Wale

$$\Delta \sigma = 0.000011 x E s x \Delta t$$

เมื่อ Δt คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในหน่วย $^{\circ}\text{C}$
 มีค่าในการออกแบบทั่วไป = 5°C
 E_s = โมดูลัสของเหล็ก (ksc)
 $\Delta\sigma = 0.000011 \times 2.1 \times 10^6 \times 5$
 จะได้ = 116 ksc

การออกแบบ Strut



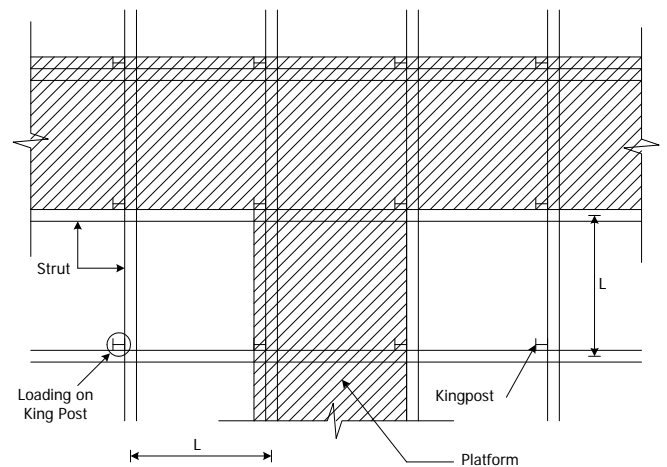
การคิด Over Stress ใน Strut

จะยอมให้ Over Stress 30% การคิด Over Stress ใน Strut นั้น จะให้คิด Over Stress เฉพาะในแรงอัด เท่านั้น ไม่รวมถึง Bending Stress และพิจารณาเฉพาะในแกน Y เท่านั้น

การออกแบบ King Post

1. ขนาด Section ที่กำหนด ต้องสามารถรับแรงที่เกิดจาก Platform
2. ที่ความลึกเท่าใด กำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยของ King Post ในส่วนจมใต้ดินขุด จึงจะรับน้ำหนักบรรทุกจาก Platform ได้

พบว่าน้ำหนักบรรทุกบน Platform (Surcharge = q) สำหรับงานขุดดินลึกในกรุงเทพฯ ด้วยระบบค้ำยัน Sheet Pile สามารถใช้เท่ากับ 2 ตัน/ตร.ม.



$$Q_u = Q_f + Q_b$$

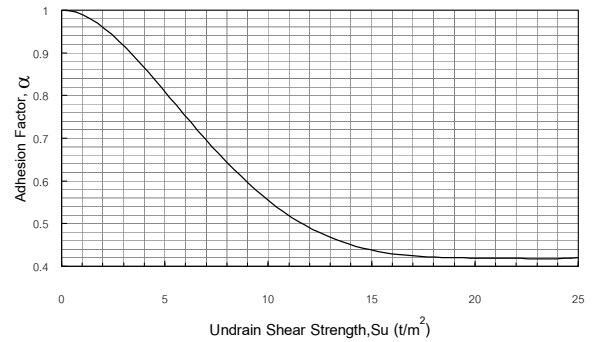
$$Q_f = P (\sum \alpha S_u \Delta L) \quad (\text{กรณีหาแรงเสียดทานผิวในชั้นดินเหนียว})$$

$$Q_f = P (\sum K S \sigma'_v \tan \delta) (\Delta L) \quad (\text{กรณีหาแรงเสียดทานผิวในชั้นทราย})$$

$$Q_b = 9 S_u A \quad (\text{กรณีปลาย Kingpost จมในชั้นดินเหนียว})$$

$$Q_b = N_q \sigma'_v A \quad (\text{กรณีปลาย Kingpost จมในชั้นทราย})$$

$$Q_{all} = Q_u / SF$$



ความสัมพันธ์ของ α กับ กำลังรับแรงเฉือนของดิน, S_u

การออกแบบ Lean Concrete

$$f_{c(\text{Lean Concrete})} = 0.1 f'_c$$

$f_{c(\text{Lean Concrete})}$ = Allowable compressive strength of Lean Concrete (K_{sc}) หรือกำลังรับแรงอัดปลอดภัยของ Lean Concrete



การอัดแรงในค้ำยัน (Preload on Strut)





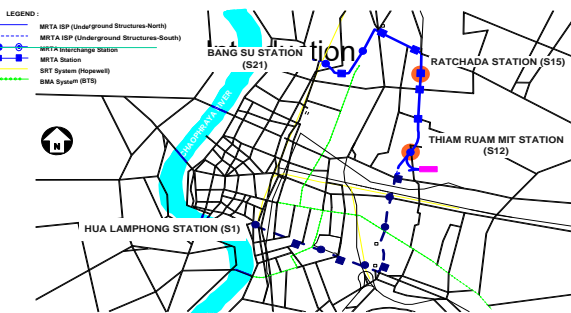
The Twenty-First KKCCN Symposium on Civil Engineering
October 27-28, 2008, Singapore



SHEET PILE MOVEMENT INDUCED BY DEEP BASEMENT EXCAVATION IN MRT PROTECTION ZONE, BANGKOK

Wanchai Teeparaksa

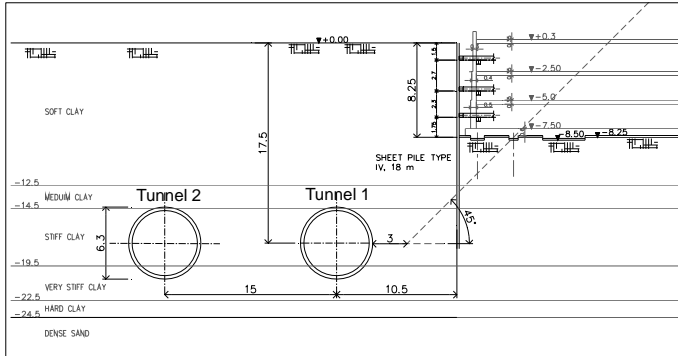
Department of Civil Engineering
Chulalongkorn University Bangkok, Thailand
wanchai.tef@chula.ac.th



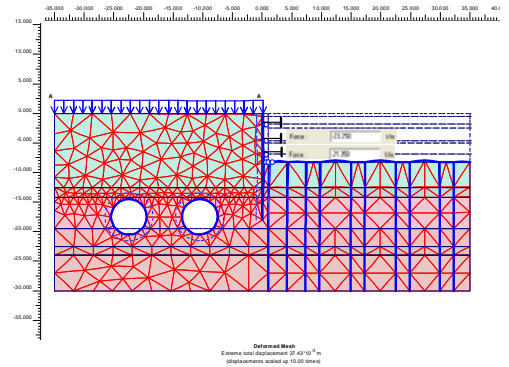
The MRT tunnel constructed by means of the segmental lining with OD of 6.35 m, and consists of 6 segments per ring and bored in the very stiff silty clay layer of about -17.75 m. depth below ground surface.



Project Description of Deep Excavation in The MRT Protection Zone



Deformed mesh of FEM analysis



Basement Construction Technique and Impact Assessment

– Damage Assessment by FEM

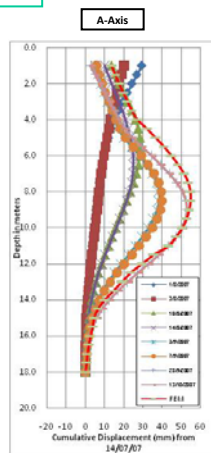
The results of FEM analysis can be summarized as follows:

- The maximum ground surface settlement = 48 mm.
- The maximum lateral sheet pile wall movement at front area with cement column wall = 51 mm.
- Maximum tunnel deformation = 5.8 mm.





Sheet Pile wall movement compared with FEM prediction



Conclusions

The basement construction of Zest Condominium for 10.0 m depth was constructed in the “Protection zone area of MRT” and may cause the damage to the existing Blue line MRT subway tunnel in front of the project. The damage assessment to MRT’s subway tunnel was carried out by means of FEM analysis. The monitoring results of inclinometer for lateral sheet pile wall movement was compared and agreed with the FEM prediction.



Thank You