

บทที่ 2

ทฤษฎีและสรุปสาระสำคัญของเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่ใช้ในการคาดคะเนการทรุดตัวของเสาเข็มมีหลายวิธี ในแต่ละวิธีมีสมมุติฐานและวิธีการที่แตกต่างกันไป ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการคาดคะเนการทรุดตัววิธี Terzaghi (1967) วิธี Broms (1984) วิธี Poulos and Davis (1980) วิธี Asaoka (1978) และ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ นอกจากนี้จะกล่าวถึงเอกสารที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยในอดีตที่ได้ศึกษาการทรุดตัวของดินคันทางที่ปรับเสถียรภาพดินฐานรากด้วยเสาเข็มซีเมนต์

2.1 ทฤษฎีการคาดคะเนการทรุดตัว

2.1.1 การคาดคะเนการทรุดตัววิธี Terzaghi (1967)

วิธีการวิเคราะห์ของ Terzaghi จะใช้ผลจากการทดสอบอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) อาศัยหลักการพื้นฐานที่ว่าส่วนช่องว่าง (Void Ratio) ใดๆจะมีค่าหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress) ได้มากที่สุดเพียงค่าเดียวเท่านั้น ซึ่งเป็นหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากหน่วยแรงระหว่างเม็ดดิน หากมีแรงภายนอกมากกระทำต่อมวลดิน อันเป็นผลที่ทำให้ดินไม่สามารถรับได้ที่อัตราส่วนช่องว่าง ขณะนั้น แรงส่วนเกินกว่าดินจะรับได้ จะถูกน้ำที่อยู่ภายในช่องว่างระหว่างเม็ดดินรับไว้ แรงดันน้ำในช่องว่างนี้จะไหลออกไปจากช่องว่างระหว่างเม็ดดินด้วยผลของความแตกต่างระหว่าง Total Head ของน้ำในช่องว่างกับบริเวณที่อยู่รอบๆทำให้เกิดการทรุดตัวของชั้นดิน และจะสิ้นสุดลงเมื่อน้ำในโพรงเพิ่มลดลงจนหมด ซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณแสดงได้ดังต่อไปนี้คือ

$$S_c = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H \quad (2.1)$$

เมื่อ	S_c	= การทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำ (Primary Consolidation Settlement)
	e_0	= อัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้น (Initial Void Ratio)
	Δe	= อัตราส่วนช่องว่างที่เปลี่ยนแปลงไป (Change in void ratio)
	H	= ความหนาของชั้นดิน (Thickness of stratum)

Normally Consolidated Clay

$$S_c = CR H \log \left(\frac{\sigma'_{V_f}}{\sigma'_{V_0}} \right) \quad (2.2)$$

Overconsolidated Clays ($\sigma'_{V_f} < \sigma'_{V_m}$)

$$S_c = RR H \log \left(\frac{\sigma'_{V_f}}{\sigma'_{V_0}} \right) \quad (2.3)$$

Overconsolidated Clays ($\sigma'_{V_0} < \sigma'_{V_m} < \sigma'_{V_f}$)

$$S_c = H \left[RR \log \left(\frac{\sigma'_{V_m}}{\sigma'_{V_0}} \right) + CR \log \left(\frac{\sigma'_{V_f}}{\sigma'_{V_m}} \right) \right] \quad (2.4)$$

เมื่อ

RR = อัตราส่วนอัดแน่นซ้ำ (Recompression Ratio)

$$= C_r / (1 + e_0) \quad (2.4.1)$$

CR = อัตราส่วนอัดแน่น (Compression Ratio)

$$= C_c / (1 + e_0) \quad (2.4.2)$$

= หน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดในอดีต (Maximum Past Pressure)

σ'_{V_f} = หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งท้ายสุด (Final Vertical Effective Stress)

σ'_{V_0} = หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งตามธรรมชาติ (Insitu Vertical Effective Stress)

C_r = Recompression Index

C_c = Compression Index

การพิจารณาหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในดินเนื่องจากน้ำหนักโครงสร้างใช้วิธี 2 : 1 (แนวตั้ง: แนวนอน) ดังรูปที่ 2.1 โดยให้น้ำหนักบรรทุกเริ่มกระทำที่ระยะความลึก $L' = 2/3L$ จากส่วนบนของเสาเข็มแล้วกระจายลงสู่ดิน

Terzaghi and Peck (1967) เสนอทฤษฎีสำหรับความเครียดและน้ำไหลออกจากดินในลักษณะ 1 มิติ

โดย $T_v = \frac{c_v t}{H^2}$ (2.5)

เมื่อ $T_v = \text{Time Factor}$
 $= \frac{\pi}{4} U_v^2$ ($U_v < 60\%$) (2.5.1)

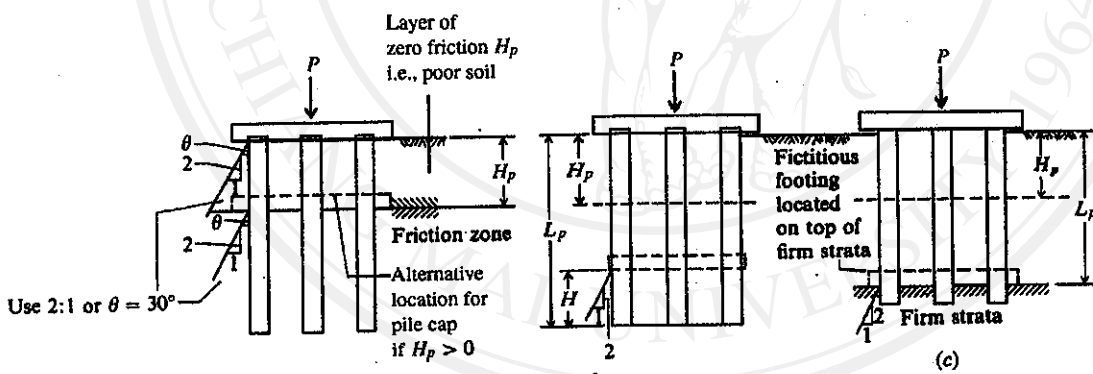
$= -0.933 \log(1-U_v) - 0.0851$ ($U_v \geq 60\%$) (2.5.2)

$U_v = \text{Degree of Consolidation}$

$c_v = \text{สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำในแนวตั้ง (Coefficient of Vertical Consolidation)}$

$H = \text{ความยาวของเส้นทางระบายน้ำ (Drained Path)}$

$t = \text{ระยะเวลาการทรุดตัว}$



$H = \frac{L_p}{3}$ for $H_p = 0$

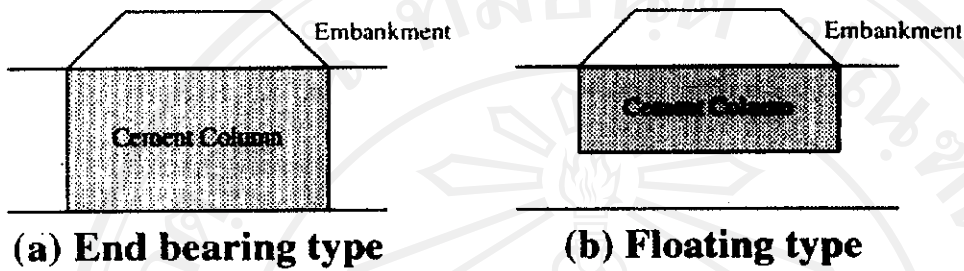
$H = \frac{L_p - H_p}{3}$ for $H_p \neq 0$

รูปที่ 2.1 แสดงการกระจายของหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในดินเนื่องจากน้ำหนักโครงสร้าง
 ที่มา : Bowles (1996)

2.1.2 การคาดคะเนการทรุดตัววิธี Broms (1984)

การทรุดตัวของโครงสร้างที่รับน้ำหนักฐานรากที่ปรับปรุงเสถียรภาพดินอ่อนด้วยเสาตึกรวมสามารถแบ่งตามลักษณะก่อสร้างเป็น 2 ประเภท คือแบบเสาหยั่ง (End Bearing Type) และแบบเสาลอย (Floating Type) แสดงดังรูปที่ 2.2

ลักษณะของการก่อสร้างเสาเข็มแบบเสาลอย (Floating Type) ปลายของเสาเข็มซีเมนต์จะวางอยู่ในชั้นดินอ่อน (ปรับปรุงไม่ตลอดความหนาของชั้นดิน) การทรุดตัวทั้งหมดประมาณได้จากผลรวมการทรุดตัวในชั้นที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มซีเมนต์ (Δh_1) กับชั้นดินที่อยู่ใต้การปรับปรุงด้วยเสาเข็มซีเมนต์ (Δh_2)



รูปที่ 2.2 ลักษณะการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยเสาเข็มซีเมนต์ของชั้นดินอ่อน
ที่มา : Misuo (1998)

การทรุดตัวในชั้นที่ปรับปรุงคุณภาพ (Δh_1) ขึ้นกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มเมื่อเกิดการล้า (Creep)

กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย สามารถคำนวณได้จากการพิจารณากรณีเกิดการวิบัติที่เสาเข็มซีเมนต์ (Column Failure) จากแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุในแท่งเสาเข็มซีเมนต์และแรงต้านทานเนื่องจากแรงดันดินด้านข้างที่กระทำต่อเสาเข็มซีเมนต์ ซึ่งไม่สามารถต้านทานน้ำหนักที่แบกรับได้ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยสามารถหาค่าได้จากสมการ Mohr-Coulomb ดังนี้

$$Q_{ult, col} = A_{col} (3.5 c_{col} + 3 \sigma_h) \quad (2.6)$$

เมื่อ $Q_{ult, col}$ = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของ Column

A_{col} = พื้นที่หน้าตัดของ Column

c_{col} = Cohesion of Column Materials

σ_h = แรงดันด้านข้างแบบ Passive, $K_p \gamma' H$ (2.6.1)

โดย K_p = $\tan^2(45 + \phi/2)$ (2.6.2)

γ' = Effective Unit Weight

H = ความลึกของเสาเข็ม

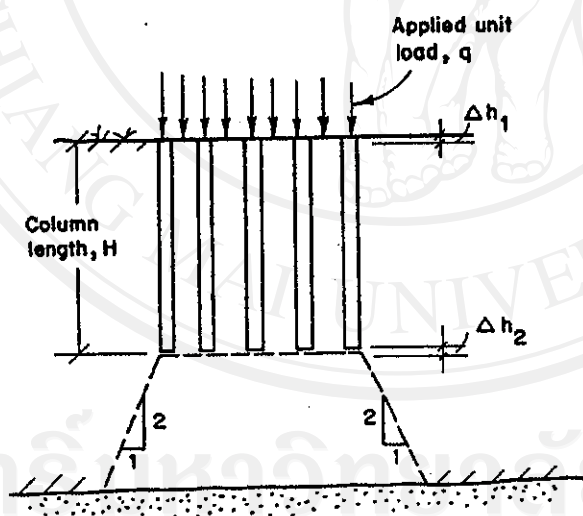
เมื่อเวลายาวนาน (Long Term) กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาหินซีเมนต์ (Ultimate Bearing Capacity, $Q_{ult,col}$) จะลดลงเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุในแท่งเสาหินซีเมนต์เกิดการล้า (Creep) และการขยับตัว ทำให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาหินซีเมนต์ มีค่าเป็น 0.65 - 0.80 ของ $Q_{ult,col}$ ดังสมการ

$$Q_{creep,col} = (0.65 \text{ to } 0.80) Q_{ult,col} \quad (2.7)$$

เมื่อ

$Q_{creep,col}$ = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาหินซีเมนต์เมื่อเกิดการ Creep

ในกรณีที่น้ำหนักกระทำต่อเสาหินซีเมนต์น้อยกว่าขนาด Creep Limit ของเสาหินซีเมนต์ สามารถคำนวณการทรุดตัวได้ตามลักษณะรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การทรุดตัวเมื่อ Column รับน้ำหนักน้อยกว่า Creep Strength

ที่มา : Broms (1984)

$$\Delta h_1 = \frac{q H}{a M_{col} + (1 - a) M_{soil}} \quad (2.8)$$

เมื่อ

Δh_1 = ค่าการทรุดตัวของชั้นดินที่ปรับปรุงดินซีเมนต์

q = หน่วยแรงที่กระทำจากโครงสร้าง

H = ความลึกของชั้นดินที่ปรับปรุงดินซีเมนต์

M_{soil} = ค่า Compression Modulus ของดินรอบข้างเสาดินซีเมนต์

M_{col} = ค่า Compression Modulus ของดินซีเมนต์

$$a = \frac{NA_{col}}{BL} \quad (2.8.1)$$

โดย

N = จำนวนเสาเข็มดินซีเมนต์

A_{col} = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มดินซีเมนต์

B = ความกว้างของกลุ่มเสาเข็มดินซีเมนต์

L = ความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์

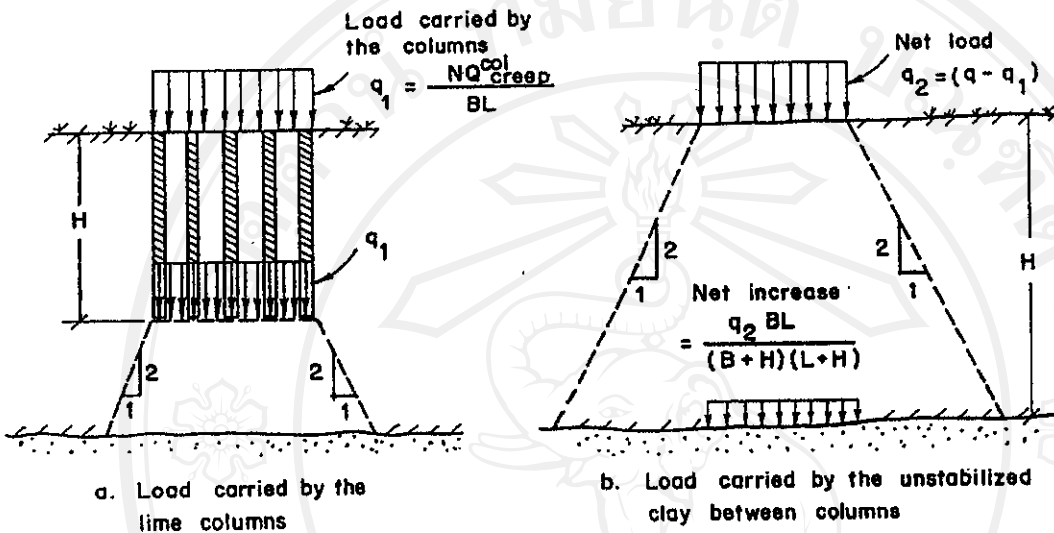
การทรุดตัวของชั้นดินที่อยู่ใต้ชั้นที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (Δh_2) เกิดจากการกระจายของหน่วยแรงส่งถ่ายลงมา สามารถคาดคะเนค่าการทรุดตัวได้ โดยวิธีการอัดตัวคายน้ำมิติเดียว ตามทฤษฎีของ Terzaghi (1967)

กรณีน้ำหนักกระทำสูงกว่าขนาด Creep Limit ของเสาดินซีเมนต์ สามารถคำนวณการทรุดตัวดังรูปที่ 2.4 โดยเสาดินซีเมนต์จะแบกรับ q_1 ขนาดเท่ากับ Creep Limit และ q_2 จะแบกรับไว้ด้วยมวลดินระหว่างเสาดินซีเมนต์แสดงดังรูปที่ 2.4

$$q_1 = \frac{NQ_{creep,col}}{BL} \quad (2.8.2)$$

$$q_2 = q - q_1 \quad (2.8.3)$$

การทรุดตัวของชั้นดินที่อยู่ใต้ชั้นที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (Δh_2) เกิดจากการกระจายของหน่วยแรงส่งถ่ายลงมา สามารถคาดคะเนค่าการทรุดตัวได้ โดยวิธีการอัดตัวคายน้ำมิติเดียว ตามทฤษฎีของ Terzaghi (1967)



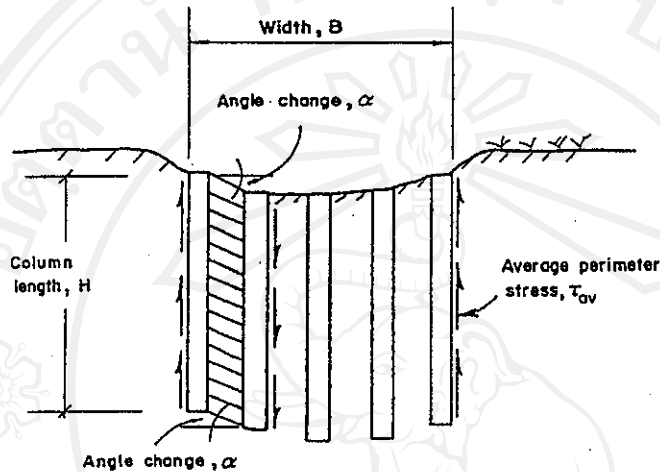
รูปที่ 2.4 การทรุดตัวเมื่อ Column รับน้ำหนักมากกว่า Creep Strength
ที่มา : Broms (1984)

การทรุดตัวต่างกัน (Differential Settlement) ระหว่างแถวของเสาหินซีเมนต์ที่อยู่ติดกันหาได้จากสัดส่วนของค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงเฉือนตามเส้นรอบรูปของกลุ่มเสาหินซีเมนต์ (τ_{per}) กับค่าโมดูลัสของแรงเฉือน (Shear Modulus) เฉลี่ยของดิน (G_{avg}) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ในรูปของมุมเปลี่ยนแปลงดังนี้

$$\alpha = \frac{\tau_{per}}{G_{avg}} \quad (2.9)$$

- เมื่อ
- α = มุมเปลี่ยนแปลงระหว่างการทรุดตัวของเสาหินซีเมนต์
 - τ_{per} = ค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงเฉือนตามเส้นรอบรูปของกลุ่มเสาหินซีเมนต์
 - G_{avg} = Shear Modulus เฉลี่ยของดิน, $\frac{B}{B - mD} G_{soil}$ (2.9.1)

- โดย
- B = ความกว้างของกลุ่มเสาหินซีเมนต์
 - m = จำนวนแถวของเสาหินซีเมนต์
 - D = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของเสาหินซีเมนต์
 - G_{soil} = โมดูลัสของแรงเฉือน (Shear Modulus) ของดินรอบเสาเข็มหินซีเมนต์



รูปที่ 2.5 การทรุดตัวที่ต่างกัน (Differential Settlement)
ที่มา : Broms (1984)

Broms (1984) ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์เสาหินซีเมนต์บริเวณรอบๆปลายเสาหินซีเมนต์พบว่า มีการรับน้ำหนัก 20 - 30 เปอร์เซ็นต์ ที่เหลือจะรับน้ำหนักโดยส่วนของแรงเสียด (Friction Term) 70 - 80 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักกระทำทั้งหมด ซึ่งจะถ่ายน้ำหนักไปยังมวลดินรอบ ๆ กลุ่มเสาหินซีเมนต์ตามแนวเส้นรอบรูปของกลุ่มเสาหินซีเมนต์ตั้งสมการ

$$\tau_{\text{per}} = \frac{0.8 Q}{2(B + L)H} \leq \frac{S_u}{\text{F.S.}} \quad (2.10)$$

- เมื่อ
- Q = น้ำหนัก Embankment และน้ำหนักจร
 - F.S. = Factor of Safety at Least 1.3 - 1.5
 - S_u = ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงเฉือนของดิน
 - B = ความกว้างของ Cement Column Block

L = ความยาวของ Cement Column Block

H = ความยาวของ Cement Column

อัตราการทรุดตัว (Time Rate Settlement) ของดินบริเวณช่วงของการปรับปรุงคุณภาพ
ด้วยเสาหินซีเมนต์สามารถประมาณได้ดังสมการที่ 2.11

$$U = 1 - \exp\left(\frac{-2c_{vh} t}{R^2 f(n)}\right) \quad (2.11)$$

เมื่อ

U = Degree of Consolidation

c_{vh} = Coefficient of Consolidation, $M_{c,av} k_h / \gamma_w$ (2.11.1)

k_h = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ในแนวราบของดินเหนียว

โดย

$M_{c,av}$ = $a M_{col} + (1-a) M_{soil}$ (2.11.2)

t = Time of Consolidation

R = Radius of Influence of the Column, กรณีติดตั้งในลักษณะรูป
สี่เหลี่ยมจัตุรัสเท่ากับ $0.56 S$ (Broms, 1999) (2.11.3)

S = Spacing

$$f(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \left(\ln(n) - 0.75 + \frac{1}{n^2} \left(1 - \frac{1}{4n^2} \right) \right) + \left(\frac{n^2 - 1}{n^2} \right) \left(\frac{k_{clay}}{k_{col}} \right) \left(\frac{L_{col}^2}{r^2} \right) \quad (2.12)$$

โดย

n = R/r (2.12.1)

r = รัศมีของเสาหินซีเมนต์

k_{clay} = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของดิน (k_h)

k_{col} = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมของดินซีเมนต์

L_{col} = ความยาวของเสาหินซีเมนต์ กรณีที่ระบายน้ำด้านเดียวเท่ากับ L_{col}
กรณีที่ระบายน้ำ 2 ด้านเท่ากับ $L_{col}/2$

2.1.3 การคาดคะเนการทรุดตัววิธี Poulos and Davis (1980)

ก. การทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยว (Settlement of Single Pile)

สมการสำหรับหาค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม โดยใช้ Numerical Method พิจารณาเสาเข็มเป็น Incompressible Pile ใน Half-Space และมีค่าปรับแก้สำหรับอิทธิพลอื่นๆที่มีผลการยุบอัดตัวของเสาเข็มที่มีค่า Young's Modulus ของดินคงที่และค่า Poisson's Ratio ; $\nu = 0.5$ ดังนี้

ข. เสาเข็มลอย (Floating Pile)

ความยาวเสาเข็มมีความยาวน้อยกว่าความหนาของชั้นดินอ่อนสามารถคำนวณค่าการทรุดตัวได้ดังนี้

$$\rho_f = \frac{PI}{E D_s} \quad (2.13)$$

เมื่อ

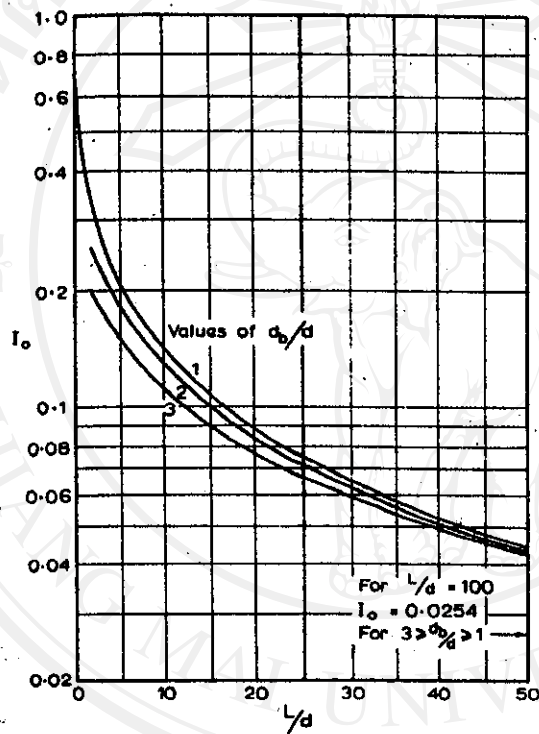
$$\begin{aligned} \rho_f &= \text{การทรุดตัวของเสาเข็มแบบลอย} \\ I &= I_o R_k R_h R_v \quad (2.13.1) \\ I_o &= \text{ค่าปรับแก้สำหรับ Incompressible Pile in Semifinite} \\ R_h &= \text{ค่าปรับแก้สำหรับ Finite Depth ของชั้น Rigid Base} \\ R_k &= \text{ค่าปรับแก้สำหรับ Pile Compressibility} \\ R_v &= \text{ค่าปรับแก้สำหรับ Poisson's Ratio} \\ \nu &= \text{Poisson's Ratio} \\ h &= \text{ความหนาของชั้นดิน} \\ E_s &= \text{Young's Modulus ของดิน} \\ D &= \text{เส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม} \end{aligned}$$

ค. การทรุดตัวของเสาเข็มกลุ่ม (Settlement of Pile Group)

ในการศึกษาการทรุดตัวของเสาเข็มกลุ่มวิธีของ Poulos ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบของระหว่างเสาเข็ม 2 ต้น โดยเข็มแต่ละต้นขนาดเท่ากัน และเป็นอิสระต่อกัน (Free Standing) โดยที่แท่นหัวเข็ม (Pile Cap) ทำหน้าที่ควบคุมการทรุดตัวที่แตกต่างของเสาเข็มแต่ละต้นในกลุ่มเท่านั้น

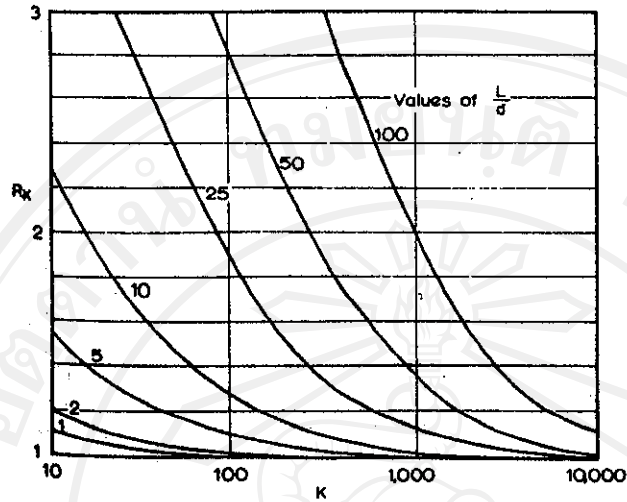
ผลที่ได้แสดงในรูปของ Interaction Factor (α) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของค่าการทรุดตัวของเสาเข็มที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเสาเข็มข้างเคียงได้รับน้ำหนักต่อการทรุดตัวที่เกิดจากน้ำหนักบนเสาเข็ม

ค่า Interaction Factor (α) สำหรับเสาเข็มลอย (Floating Pile) แสดงดังรูปที่ 2.1 - 2.13 ในกรณีที่ชั้นดินมีความลึกจำกัดสามารถปรับแก้ด้วย N_b (Correction Factor) ดังรูปที่ 2.14

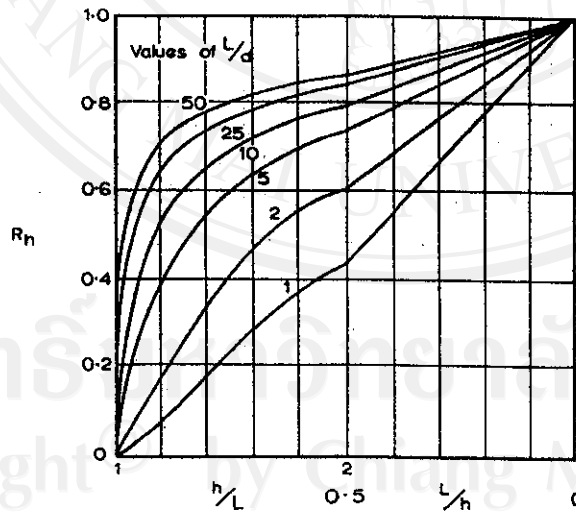


รูปที่ 2.6 แสดงค่า Settlement Influence Factor, I_s

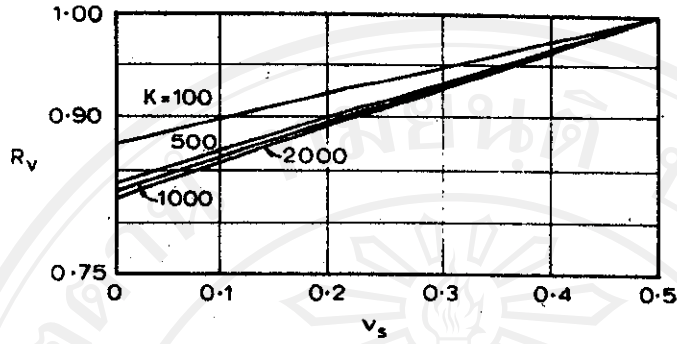
ที่มา : Poulos and Davis (1980)



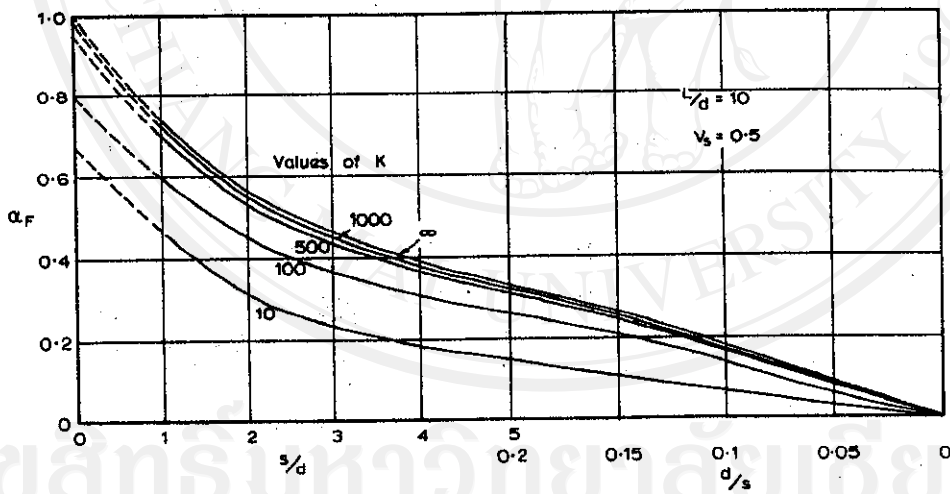
รูปที่ 2.7 แสดงค่า Compressibility Correction Facort For Settlement, R_k
ที่มา : Poulos and Davis (1980)



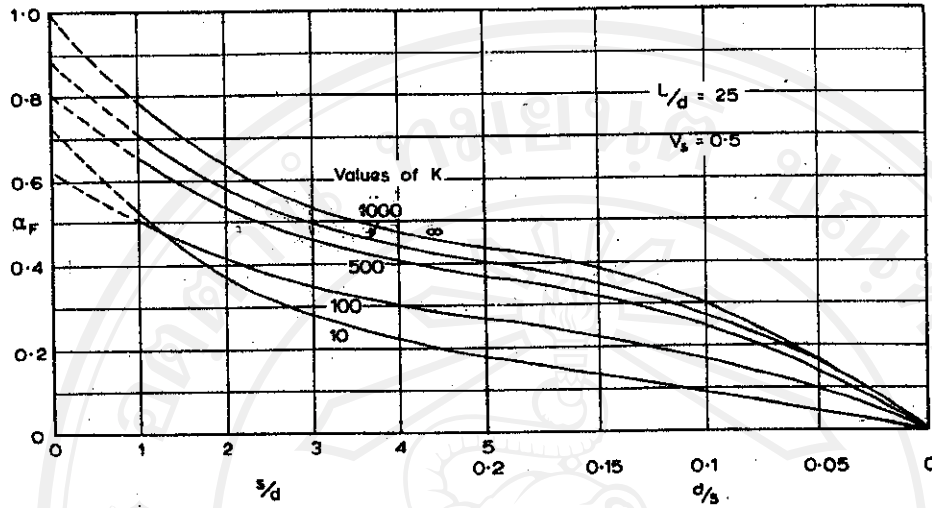
รูปที่ 2.8 แสดงค่า Depth Correction Factor for Settlement, R_h
ที่มา : Poulos and Davis (1980)



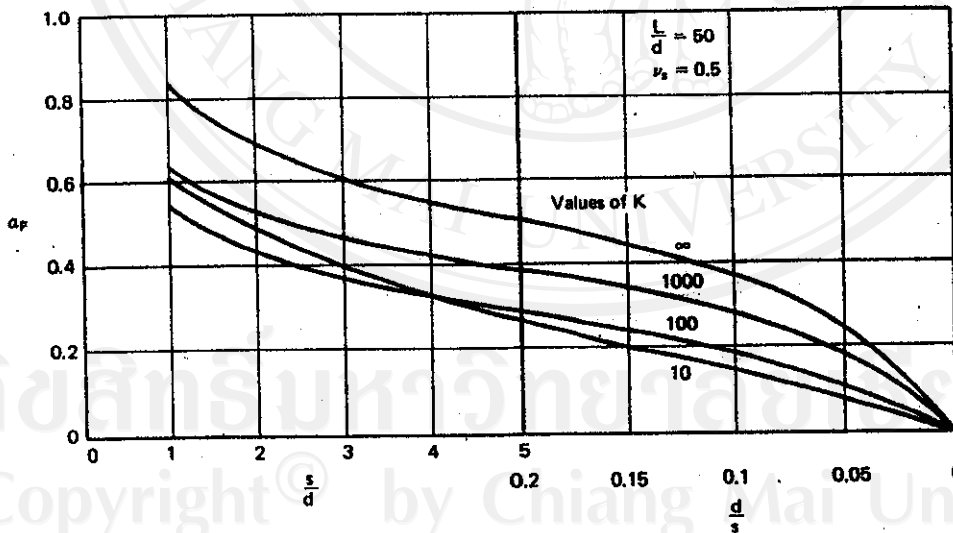
รูปที่ 2.9 แสดงค่า Poisson's Ratio Correction Factor for Settlement, R_v
ที่มา : Poulos and Davis (1980)



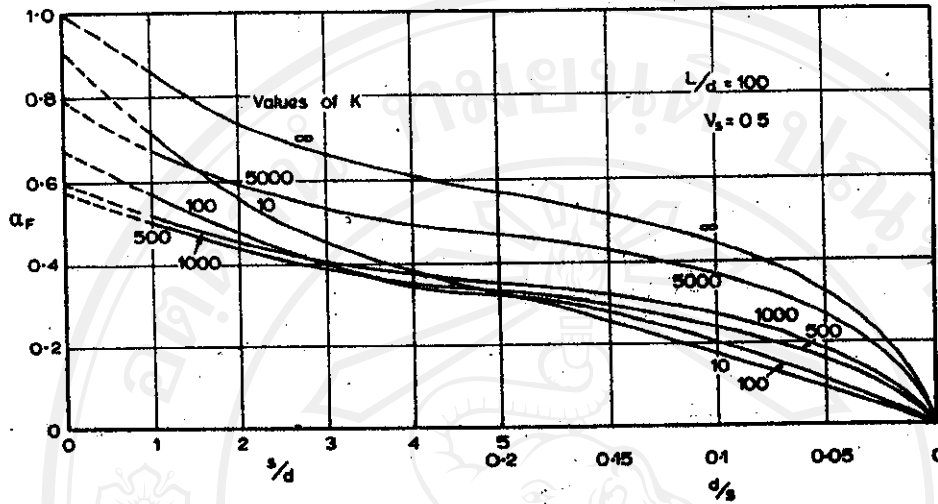
รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ของ $L/d = 10$ กับ α_F
ที่มา : Poulos and Davis (1980)



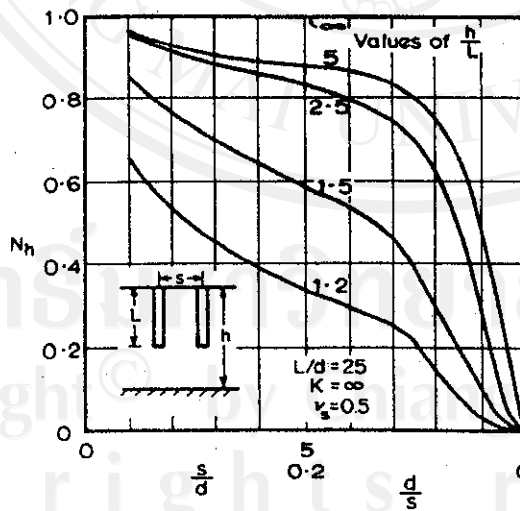
รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ของ $L/d = 25$ กับ α_F
 ที่มา : Poulos and Davis (1980)



รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ของ $L/d = 50$ กับ α_F
 ที่มา : Poulos and Davis (1980)



รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ของ $L/d = 100$ กับ α_F
 ที่มา : Poulos and Davis (1980)



รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ของ $L/d = 25$ กับ N_h
 ที่มา : Poulos and Davis (1980)

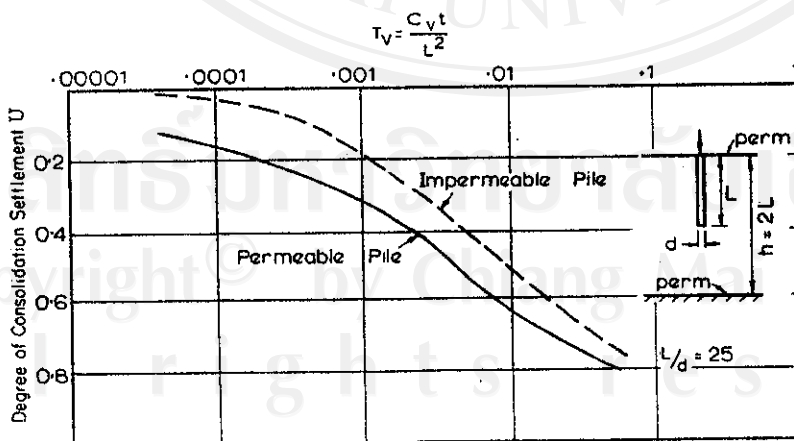
ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มใด ๆ (ρ_k) ในกลุ่มเสาเข็มจำนวน n ต้นสามารถหาได้จากการใช้วิธี Superposition จากผลกระทบของเสาเข็มข้างเคียง 2 ต้น ได้ดังนี้

$$\rho_k = \rho_1 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n (P_j \cdot \alpha_{kj}) + \alpha_{1k} P_k \quad (2.14)$$

เมื่อ

- ρ_k = การทรุดตัวของเสาเข็มใด ๆ
- ρ_1 = ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยวเนื่องจากน้ำหนักกระทำ 1 หน่วย
- P_j = น้ำหนักที่กระทำบนเสาเข็ม j
- α_{kj} = Interaction factor ระหว่างเสาเข็ม k กับ j
- P_k = น้ำหนักที่กระทำบนเสาเข็มต้น k

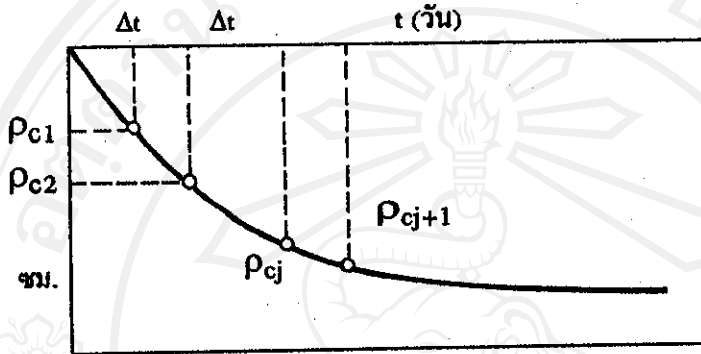
Poulos and Davis (1968) ได้ทำการวิเคราะห์ห้อัตรการทรุดตัวของเสาเข็มซึ่งสามารถประมาณได้จากรูปที่ 2.15 จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของ L/d ช่วง 25 – 200 มีผลต่ออัตราการทรุดตัวน้อย นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของ h/L ช่วง 5 – 1.5 มีผลต่ออัตราการทรุดตัวน้อยเช่นกัน ชั้นดินด้านล่างมีผลต่ออัตราการทรุดตัวน้อยมากทั้งชั้นดินที่เป็นชั้นที่บีบอัดได้ และชั้นดินที่น้ำสามารถซึมผ่านได้



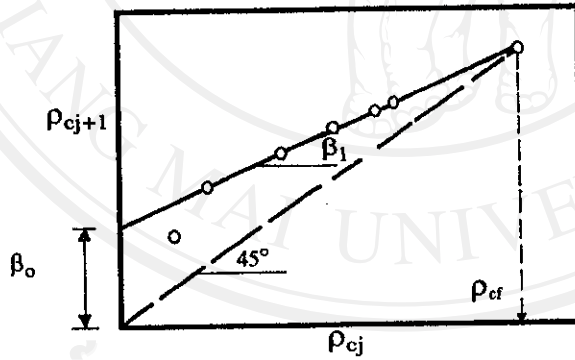
รูปที่ 2.15 แสดงการประมาณอัตราการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยว
ที่มา : Poulos (1980)

2.1.4 การคาดคะเนการทรุดตัววิธี Asaoka (1978)

Asaoka (1978) ได้เสนอวิธีการคาดคะเนการทรุดตัวสุดท้าย และอัตราการทรุดตัว โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าการทรุดตัว ในสนามที่ทำการทดสอบแล้วคำนวณย้อนกลับค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัวภายในแนวตั้ง (c_i) ในสนาม



รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ของค่าการทรุดตัวกับเวลาที่ได้จากสนาม
ที่มา : Asaoka (1978)



รูปที่ 2.17 กราฟการทรุดตัว

ที่มา : Asaoka (1978)

$$\rho + c_1\rho' + c_2\rho'' + \dots + c_n\rho^{(n)} = C \tag{2.15}$$

เมื่อ ρ = ค่าการทรุดตัว, c_1, c_2, \dots, c_n และ C เป็นตัวคงที่ที่ไม่ทราบค่า
จัดสมการให้อยู่ในรูปสมการกำลังหนึ่ง

$$\rho + c_1\rho' = C \tag{2.16}$$

แก้สมการ โดยให้ขอบเขตเริ่มต้นเป็น

$$\rho(t=0) = \rho_0 \quad (2.17)$$

$$\rho(t=\alpha) = \rho_f \quad (2.18)$$

$$\rho(t) = \rho_f - (\rho_f - \rho_0) \exp(-t/c_f) \quad (2.19)$$

จัดรูปสมการเป็น

$$\rho_i = \beta_0 + \beta_{i-1} \quad (2.20)$$

โดย ρ_i = ค่าการทรุดตัวที่เวลา t_i , เมื่อ i เป็นเลขจำนวนเต็มใดๆ

ρ_{i-1} = ค่าการทรุดตัวที่เวลา t_{i-1}

เมื่อ $t = \infty$, $\rho_i = \rho_{i-1} = \rho_f$ ได้ค่าการทรุดตัวสุดท้าย (Final Settlement), ρ_f

$$\rho_f = \left(\frac{\beta_0}{1 - \beta_1} \right) \quad (2.21)$$

β_0 และ β_1 เป็นค่าที่ได้จากการลากเส้นตรงผ่านจุดต่างที่เป็นข้อมูลค่าการทรุดตัว

ค่า ρ_f จะเป็นค่าการทรุดตัวรวม (Total Settlement) และเป็นค่าการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ (ρ_c) เมื่อไม่รวมค่าการทรุดตัวในทันที (ρ_i) การคาดคะเนการทรุดตัวโดยวิธีของ Asaoka นี้จะถูกต้องมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับช่วงกว้างของระยะเวลา Δt

วิธีการของ Asaoka (1978) นี้ นอกจากจะค่าการทรุดตัวแล้ว ยังสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำในแนวดิ่ง (c_v) จากสมการ

$$c_v = \frac{- \left[\frac{5}{12} H^2 \ln \beta_1 \right]}{\Delta t} \quad (2.22)$$

เมื่อ c_v = ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำในแนวดิ่ง

H = ความยาวของเส้นทางระบายน้ำ (Drained Path)

β_1 = ค่า Slope ตามรูปที่ 2.17

Δt = ช่วงเวลาที่แบ่ง (Time Interval)

2.1.5 การคาดคะเนการทรุดตัววิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เป็นวิธีวิเคราะห์ทางตัวเลข (Numerical method) ที่ใช้หลักการแบ่งโครงสร้างที่เป็นมวลต่อเนื่อง (Continuum) ออกเป็นหน่วยย่อย (Element) ที่มีรูปร่างและขอบเขตที่แน่นอน โดยแต่ละหน่วยย่อยจะมีจุดโหนด (Nodes) ข้างเคียง เรียกว่า โหนด (Nodes) ตัวแปรที่เกี่ยวกับพฤติกรรมของโครงสร้าง (Field Variable) เช่น การเคลื่อนตัว อุณหภูมิ แรงค้ำน้ำ หรือหน่วยแรงเค้น จะถูกสมมุติให้มี ลักษณะการกระจายตัวภายในหน่วยย่อย ในรูปของฟังก์ชันพหุนาม (Polynomial Functions)

สมการความสัมพันธ์ระหว่างการกระทำ (Actions) กับค่าตัวแปร (Field Variable) ที่โหนดของแต่ละหน่วยย่อย จะถูกสร้างขึ้น และแสดงไว้ในรูปเมตริกซ์ (Matrix) ซึ่งเมตริกซ์นี้จะมีค่าเฉพาะ ขึ้นกับรูปร่างของหน่วยย่อย และคุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้อง ในหน่วยย่อยนั้นๆ เมื่อนำเอาเมตริกซ์ของแต่ละหน่วยย่อยมาประกอบรวมกัน จะได้เมตริกซ์ที่โหนดของโครงสร้างทั้งระบบ ซึ่งจะสามารถนำไปวิเคราะห์หาค่าตัวแปร (Field Variable) ที่ตำแหน่งใดๆ ในโครงสร้าง เมื่อโครงสร้างนั้นถูกกระทำ

การวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรม ธรณีเทคนิคด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ นั้นส่วนใหญ่จะเป็นการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเคลื่อนตัว และวิเคราะห์หน่วยแรงที่เกิดขึ้น ในตำแหน่งต่างๆ ของมวลดิน ขั้นตอนที่สำคัญในการวิเคราะห์คือ การจำลองคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้น และความเครียด (Stress-Strain Properties) ของมวลดินด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ สำหรับนำไปใช้สร้างเป็นเมตริกซ์ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเคลื่อนตัวที่โหนดต่างๆ ประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ จะขึ้นกับการป้อนข้อมูล, ชนิดรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เลือกใช้, สภาพขอบเขตเงื่อนไข (Boundary Condition) ต่างๆ และชนิดของวัสดุที่เลือกใช้

ก. ส่วนประกอบของชุดโปรแกรม Plaxis

โปรแกรม PLAXIS เป็นชุดโปรแกรมที่ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ วิเคราะห์ปัญหา ด้านการเคลื่อนตัวของดิน และหิน ที่มีโปรแกรมย่อยแทรกอยู่ ภายในอีก 4 โปรแกรม ที่ประกอบด้วย ส่วนของ INPUT, CALCULATIONS, OUT PUT และ CURVE

หน่วยย่อย (Element) ที่ใช้ สามารถเลือกใช้ได้ 6 หรือ 15 โหนด เป็นแบบหน่วยย่อย รูปสามเหลี่ยม สำหรับวิเคราะห์ปัญหา 2 มิติ (Plane Strain or Axisymmetry) โดยใช้ อนุพันธ์ อันดับ

สองประมาณค่าการเคลื่อนตัว และผลรวมของหน่วยแรงทั้ง สาม จุด จะพิจารณา เป็นหน่วยย่อย สติฟเนส เมตริกซ์ (Element Stiffness Matrix)

รูปร่าง (Geometry) สภาพเงื่อนไขที่ใช้ในสนาม จะถูกสร้างจากส่วนของ Geometry Model ซึ่งประกอบด้วย จุดและเส้น การใส่ข้อมูลของจุดและเส้น จะต้องเป็นไปตามรูปแบบของ ไฟไนท์เอลิเมนต์ โมเดล

Interfaces จะสร้างหรือสมมุติฐาน ให้แรงกิริยาปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ระหว่างโครงสร้างกับดินมีความสัมพันธ์กันตามโมเดลที่ใช้ การสร้างจะเหมือนส่วนของ Geometry Lines และคุณสมบัติของ Interface จะสัมพันธ์กับกำลังรับแรงของโครงสร้าง และกำลังรับแรงของดินรอบข้าง

Mesh Generation รูปร่างของโมเดลที่ใช้ จะถูกแบ่งออกเป็นหน่วยย่อย เพื่อใช้คำนวณ โดยส่วนประกอบของ Finite Element Mesh จะใช้ที่ 6 โหนด แบบหน่วยย่อยรูป สามเหลี่ยม หรือ 15 โหนด ซึ่งโปรแกรม PLAXIS จะทำการแบ่งหน่วยย่อยโดย อัตโนมัติ

Staged of Construction ขั้นตอนการคำนวณ จะอาศัยข้อมูลจากสนามมาใช้เป็นหลัก โดยในขั้นตอนการก่อสร้างนี้สามารถเปลี่ยนคุณสมบัติของวัสดุได้ตลอดเวลา และสามารถเปลี่ยนสภาพของแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นได้

ข. แบบจำลองของวัสดุ (Material Model)

แบบจำลองของวัสดุที่ใช้ในโปรแกรม Plaxis จะอาศัยสมมุติฐานและพฤติกรรม ของดิน และโครงสร้างเป็นหลัก ประกอบด้วย

1. Linear Elastic Model อาศัยทฤษฎีของ Hook 's Law แบบ Isotropic Linear Elasticity ซึ่งจะเกี่ยวกับตัวแปร 2 ตัวแปร คือ Elastic Stiffness หรือ เรียกว่า Young' modulus (E) และค่าอัตราส่วนปัวซอง (ν) แบบจำลองนี้มีข้อจำกัดมากในการใช้ ทำนายพฤติกรรมของดิน

2. Mohr – Coulomb Model เป็นโมเดลที่นิยมใช้ทำนายพฤติกรรมของดิน มากที่สุดตัวแปรที่สำคัญในโมเดลนี้คือค่า Young' Modulus (E), ค่าอัตราส่วนปัวซอง (ν), แรงยึดเหนี่ยว(c), มุมเสียดทานภายใน (ϕ), และค่ามุม Dilatency (ψ)

3. Hardening Soil Model เป็นโมเดล ที่จำลอง พฤติกรรมของดินเป็นแบบ Elastoplastic ชนิด Hyperbolic ซึ่งจะใช้พิจารณาเกี่ยวกับแรงเสียดทานภายใน ของสภาพ Hardening Plasticity แบบจำลองชนิดนี้สามารถใช้ได้ดีกับ พฤติกรรมของทราย หรือ กรวด และ ดินเหนียวประเภท Over Consolidated Clays

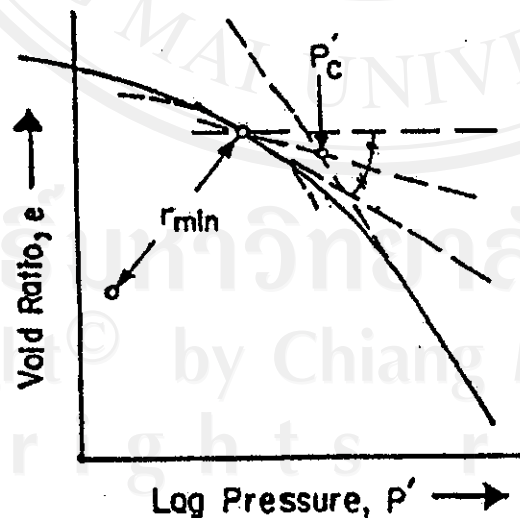
4. Soft Soil Model เป็นแบบจำลอง ของ Cam - Clays Model โดยจำลองพฤติกรรมของดินอ่อน ประเภท Normally Consolidated แบบจำลองนี้จะใช้ได้กับการหาค่า การอัดตัวครั้งแรก (Primary Compressing)

5. Soft Soil Creep Model เป็นแบบจำลองชนิด Visco Plasticity ซึ่งสามารถใช้หาพฤติกรรมเคลื่อนตัวของดิน ที่ขึ้นกับเวลา ในดินอ่อนได้ดี

2.1.6 การหาค่าหน่วยแรงกดทับสูงสุดในอดีตของดิน

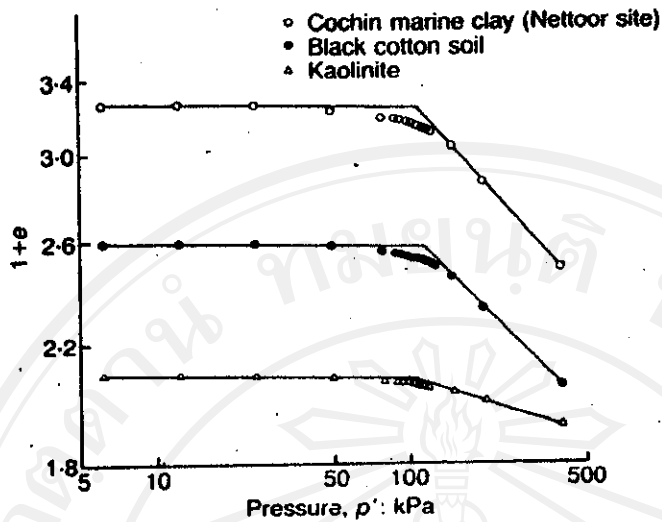
การหาค่าหน่วยแรงกดทับสูงสุดในอดีตของดิน (Preconsolidation Pressure, P_c') ทั่วไปนิยมใช้วิธีการของ Casagrande (1936) โดยใช้เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนช่องว่างในมวลดินกับ \log ของความดันซึ่งได้จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ หากลากเส้นตรงในแนวราบและเส้นสัมผัสที่จุดที่มีความโค้งมากที่สุด แล้วแบ่งครึ่งมุมของเส้นทั้งสองแล้วต่อส่วนที่เป็นเส้นตรงมาตัดกับเส้นแบ่งครึ่งมุมดังกล่าวจุดที่ได้คือ P_c' แสดงดังรูปที่ 2.18

Sridharan, A., Abraham, B. M. and Jose, B. T. (1991) เสนอวิธีการหาค่าหน่วยแรงกดทับสูงสุดในอดีตของดินโดยการพล็อตข้อมูลระหว่าง ปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume) กับแรงดัน (Pressure) ในมาตราส่วน Logarithm ทั้งสองแกน แล้วลากเส้นตรง 2 เส้นในช่วง Pre - yield และ Post - yield จุดตัดกันคือค่า P_c' แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.18 การหาค่า P_c' วิธี Casagrande

ที่มา : ชิดชัย (2528)



รูปที่ 2.19 แสดงการหาค่า P_c' วิธีของ Sridharan et al. (1991)
ที่มา : Sridharan et al. (1991)

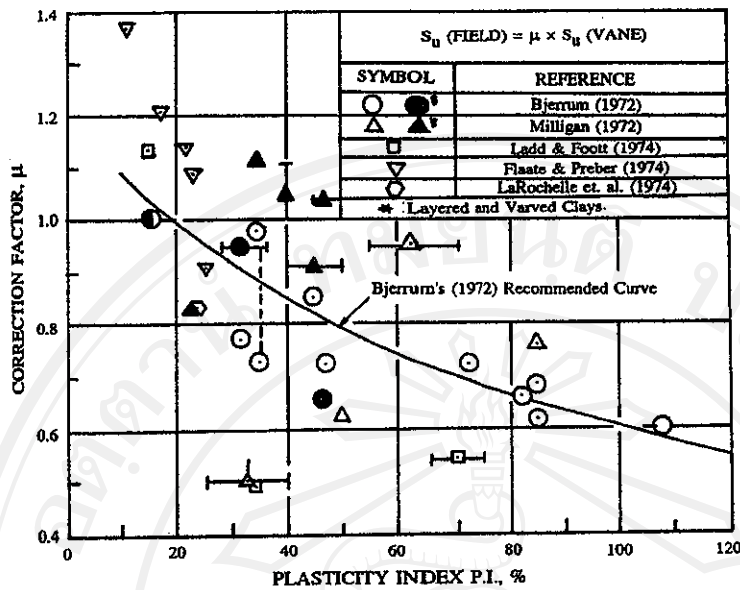
2.1.7 การแปรผลการทดสอบแรงเฉือนในที่ด้วยใบพัด

การทดสอบแรงเฉือนในที่ด้วยใบพัด (Field Vane Shear Test) ทำโดยการกดใบมีดแผ่นเหล็กบางๆรูปสี่เหลี่ยมซึ่งมี 4 แฉกเชื่อมติดกันลงไปบนชั้นดินที่ต้องการทดสอบแล้วทำการหมุนเพื่อวัดหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจนกระทั่งดินเหนียวเกิดการวิบัติจึงได้ค่า S_{uFV}

Bjerrum (1972) พบว่าดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งปานกลางที่มีค่า PI มากกว่า 20 % มีค่า S_{uFV} ที่สูงเกินไป จึงเสนอค่าปรับแก้ (μ) กับค่า S_{uFV} เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของดินเหนียวดังสมการที่ 2.23

$$S_u = \mu \cdot S_{uFV} \quad (2.23)$$

ค่าปรับแก้ (μ) ของดินเหนียวกรุงเทพฯอยู่ระหว่าง 0.70 – 0.85 Eide and Holmberg (1972) ใช้ในการออกแบบถนนสายบางนา – ตราด และ บัณฑิต (2529) ได้ใช้ในการวิเคราะห์การวิบัติของคันทางในกรุงเทพฯจำนวน 4 แห่ง พบว่าค่าปรับแก้ (μ) ของ Bjerrum (1972) ให้ผลที่ดี



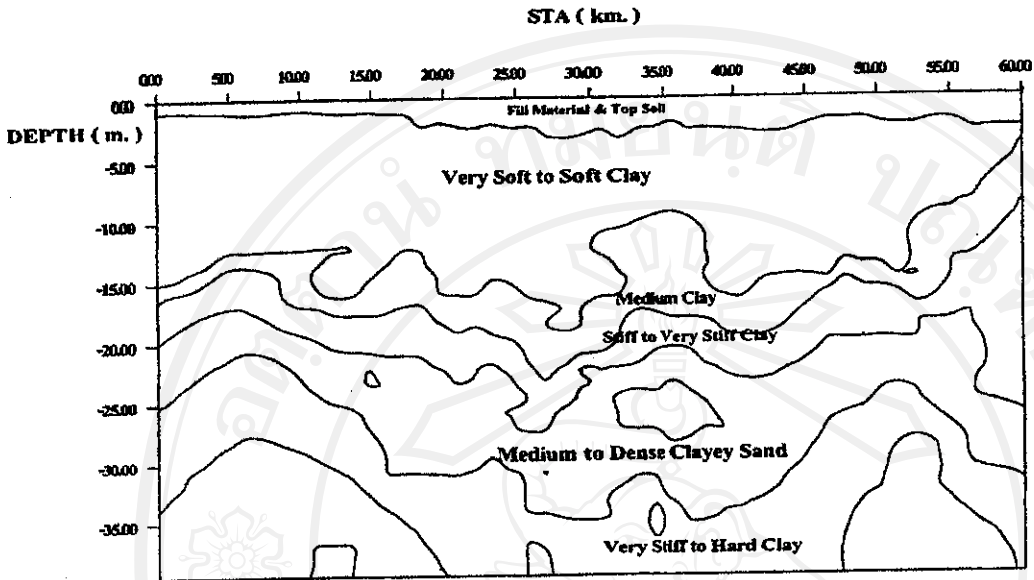
รูปที่ 2.20 ค่าปรับแก้ (μ) ของ Bjerrum (1972)
ที่มา : สุรฉัตร (2540)

2.2 ลักษณะสภาพชั้นดินและคุณสมบัติของดิน

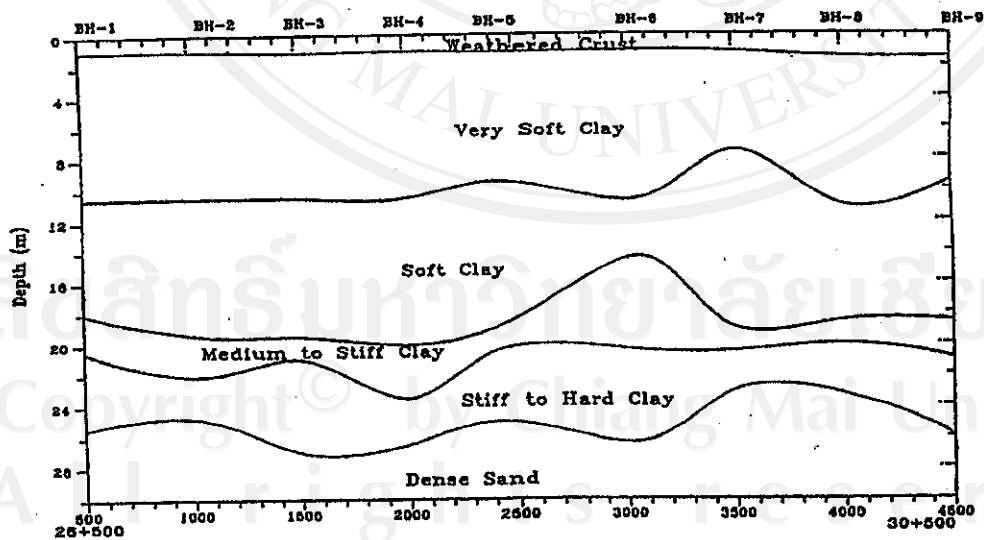
2.2.1 ลักษณะสภาพชั้นดินและคุณสมบัติของดินเหนียวกรุงเทพฯ

ก. ลักษณะสภาพชั้นดิน

การศึกษาลักษณะชั้นดินของถนนสายกรุงเทพฯ-ชลบุรี (สายใหม่) ตอน 1-A/1 และทางหลวงหมายเลข 34 สายกรุงเทพฯ - ชลบุรี โดยพลัง (2542) และจอม (2543) ตามลำดับ สามารถแบ่งชั้นดินได้ 4 ชั้นคือ ชั้น Weather Crust หนาประมาณ 1.5 - 3.0 เมตร ชั้น Very Soft to Soft Clay หนาประมาณ 8.5 - 13.0 เมตร ชั้น Medium to Stiff Clay หนาประมาณ 2.0 - 5.5 เมตร และชั้น Stiff to Very Stiff Clay หนาประมาณ 3.0 เมตร แสดงดังรูปที่ 2.21 และ 2.22



รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะสภาพชั้นดินของทางหลวงหมายเลข 34 สายกรุงเทพ-ชลบุรี
 ที่มา : จอม (2543)



รูปที่ 2.22 แสดงลักษณะสภาพชั้นดินของทางหลวงสายกรุงเทพ-ชลบุรี (สายใหม่) ตอน 1-A/1
 ที่มา : พลั่ง (2542)

ข. คุณสมบัติชั้นพื้นฐาน (Basic Soil Properties) ของดิน

คุณสมบัติชั้นพื้นฐาน (Basic Soil Properties) ของชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) ชั้นดินเหนียวปานกลาง (Medium Clay) และชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay) บริเวณดังกล่าวพบว่า หน่วยน้ำหนัก (γ) อยู่ระหว่าง 1.4 – 2.0 ตัน/ลบ.ม. ความชื้นในดิน (w_n) อยู่ระหว่าง 20.0 – 120.0 % ค่า Liquid Limit อยู่ระหว่าง 60 – 120 % Plastic Limit อยู่ระหว่าง 20 – 50 % คุณสมบัติชั้นพื้นฐานในสายทางข้างต้นสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 ลักษณะชั้นดินและคุณสมบัติชั้นพื้นฐานของถนนสายกรุงเทพฯ - ชลบุรี
(สายใหม่) ตอน 1-A/1

ชั้นดิน	ความลึก (m.)	γ_t (t/m. ³)	w_n (%)	LL. (%)	PL. (%)
1. Weather Crust	0-1.5	1.73	50	60	30
2. Very Soft to Soft Clay	1.5-10.0	1.53	80-100	100	30-40
3. Medium Stiff Clay	10.0-15.5	1.63	40-80	80-100	35-40
4. Stiff to Very Stiff Clay	15.5-18.5	1.83-1.94	30-40	60-70	25-30

ที่มา : พลัง (2542)

ตารางที่ 2.2 ลักษณะชั้นดินและคุณสมบัติชั้นพื้นฐานของทางหลวงหมายเลข 34
สายกรุงเทพฯ - ชลบุรี

ชั้นดิน	ความลึก (m.)	γ_t (t/m. ³)	w_n (%)	LL. (%)	PL. (%)
1. Weather Crust	0-3.0	1.6-1.7	20.0-85.7	-	-
2. Very Soft to Soft Clay	3.0-16.0	1.4-1.7	102-120	70-120	20-45
3. Medium Stiff Clay	16.0-18.0	1.5-1.8	65.8-85.7	70-90	30-50
4. Stiff to Very Stiff Clay	18.0-21.0	1.75-2.0	20.2-30.0	-	-

ที่มา : จอม (2543)

Ahmed (1975), Tonyagate (1978), Parentela (1983) และ Kristanto (1986) ได้ทดสอบและรวบรวมคุณสมบัติชั้นพื้นฐาน (Basic Soil Properties) ของดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay) กรุงเทพฯ พบว่าหน่วยน้ำหนัก (γ) อยู่ระหว่าง 1.9 – 2.15 ตัน/ลบ.ม. ความชื้นในดิน (w_n) อยู่ระหว่าง

20 - 30 % ค่า Liquid Limit อยู่ระหว่าง 30 - 57.8 % ค่า Plastic Limit อยู่ระหว่าง 30 - 30 % ค่า Plastic Index อยู่ระหว่าง 10 - 36.1 % ค่าอัตราส่วนช่องว่างในดิน (e_0) อยู่ระหว่าง 0.6 - 0.8 ค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 2.63 - 2.75 คุณสมบัติชั้นพื้นฐานของดินเหนียวแข็งกรุงเทพสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติชั้นพื้นฐานของดินเหนียวแข็งกรุงเทพ

ผู้ศึกษา	γ_s (t/m^3)	w_n (%)	LL. (%)	PL. (%)	PI (%)	e_0	G_s
1. Ahmed (1975)	-	20-24	44-48	17-21	17-21	-	2.74
2. Tonyagate (1978)	1.9-2.3	20-30	30-50	15-30	10-30	0.60-0.80	2.65-2.75
3. Parentela (1983)	1.98	23.5	57.8	21.7	36.1	-	2.63
4. Kristanto (1986)	1.91-2.15	21-26	43-47	18-22	17-21	0.60-0.73	2.70-2.74

ค. คุณสมบัติด้านกำลังของดินเหนียว

Ali (1981), เผ่าพงศ์ (2526), ประเสริฐ (2535), พลัง (2542) และจอม (2543) ได้ทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ พบว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) อยู่ระหว่าง 0.9 - 1.99 ตัน/ตร.ม. ค่าโมดูลัสแบบไม่ระบายน้ำ (E_u) อยู่ระหว่าง 111 - 450 ตัน/ตร.ม. ค่ามุมเสียดทาน (ϕ') และค่าความเชื่อมแน่น (c') อยู่ระหว่าง 17.25 - 27.40 องศา และ 0.6 - 2.14 ตัน/ตร.ม. ตามลำดับ คุณสมบัติด้านกำลังของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพจากงานวิจัยในอดีตสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.4 และ 2.5

ตารางที่ 2.4 ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบระบายน้ำ (S_u) และค่าโมดูลัสแบบระบายน้ำ (E_u) ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

ผู้ศึกษา	S_u (t/m^2)	E_u (t/m^2)
1. ประเสริฐ (2535)	0.9-1.7	111-350
2. พลัง (2542)	1.02-1.52	204-304
3. จอม (2543)	1.26-1.43	140-260

ตารางที่ 2.5 ค่ามุมเสียดทาน (ϕ') และค่าความเชื่อมแน่น (c') ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ

ผู้ศึกษา	c' (t/m. ²)	ϕ' (deg)
1. Ali (1981)	2.14	17.25
2. เผ่าพงศ์ (2526)	0.6	27.4
3. ประเสริฐ (2535)	0.12	24.0

Hengchaovanich (1970), Brand (1970), Ahmed (1970), Kristanto (1986) และ Kanjanapagka (1988) ได้ทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังของดินเหนียวแข็งกรุงเทพ พบว่าค่ามุมเสียดทาน (ϕ') และค่าความเชื่อมแน่น (c') อยู่ระหว่าง 20.1 – 24.5 องศา และ 2.16 – 3.80 ตัน/ตร.ม. ตามลำดับ คุณสมบัติด้านกำลังของดินเหนียวแข็งกรุงเทพจากงานวิจัยในอดีตสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ค่ามุมเสียดทาน (ϕ') และค่าความเชื่อมแน่น (c') ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพ

ผู้ศึกษา	c' (t/m. ²)	ϕ' (deg)
1. Hengchaovanich (1970)	3.31	22.2
2. Brand (1970)	2.28	21.6
3. Ahmed (1970)	3.80	24.0
4. Kristanto (1986)	2.30	24.5
5. Kanjanapagka (1988)	2.16	20.1

Balasubramaniam and Brenner (1981) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Undrained Modulus (E_u) กับค่าไม่ปรับแก้จากการทดสอบ Field Vane Shear Test (S_{uv}) พบว่าค่า E_u เท่ากับ 70 – 250 เท่าของ S_{uv}

รายงานของ Bergado (1990) พบว่าค่า E_u เท่ากับ 150 เท่า ของ S_{uv} ให้ผลที่ดีกับการคำนวณการทรุดตัวของถนนบางนา – บางปะกง และค่า Drained Modulus (E') เท่ากับ 15 S_{uv} สามารถให้ผลที่ดีในการวิเคราะห์การทรุดตัวเวลายาวนาน (Longterm) ของถนนสายบางนา – บางปะกง

Poulos (1980) ได้แนะนำความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของดิน (E_u) สภาพไม่ระบายน้ำกับค่าโมดูลัสของดิน (E_{soil}) สภาพระบายน้ำดังสมการที่ 2.25

$$E_u = \frac{3E'}{2(1 + \nu')} \quad (2.25)$$

เมื่อ E_u = โมดูลัสของดินในสภาพไม่ระบายน้ำ
 E' = โมดูลัสของดินในสภาพระบายน้ำ
 ν' = Poisson's Ratio ในสภาพระบายน้ำ

Poulos (1980) ได้แนะนำค่า Poisson's Ratio ในสภาพระบายน้ำของดินเหนียวอ่อนอยู่ระหว่าง 0.35 – 0.45 (0.4) และดินเหนียวปานกลางอยู่ระหว่าง 0.2 – 0.35 (0.3)

ง. คุณสมบัติด้านการอัดตัวของดินเหนียว

การศึกษาการทรุดตัวของคันทางบริเวณกรุงเทพฯของพลึง (2542), จอม (2543) และ Pongsakorn (2000) พบว่า ค่า C_c อยู่ระหว่าง 0.466 – 1.68 ค่า C_r อยู่ระหว่าง 0.032 – 0.30 ค่า c_v อยู่ระหว่าง 0.403 – 2.5 ตร.ม./ปี และ ค่า OCR อยู่ระหว่าง 1.03 – 2.40 สามารถสรุปคุณสมบัติการอัดตัวของดินเหนียวอ่อนของงานวิจัยในอดีตดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 แสดงคุณสมบัติการอัดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

ผู้ศึกษา	C_c	C_r	c_v (m. ² /yr.)	OCR.
1. พลึง (2542)	0.57-1.68	0.04-0.30	0.403-1.036	1.03-1.33
2. จอม (2543)	0.54-1.62	0.02-0.04*	2.0-2.5	1.20-2.40
3. Pongsakorn (2000)	0.466-0.780	0.032-0.079	2.0-2.5	1.31-1.57

* ค่า Recompression Ratio (RR)

จากการศึกษาคุณสมบัติการอัดตัวของดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay) กรุงเทพฯ โดย Tonyagate (1978), Rajivipat (1980) และ Parentela (1983) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.8

Cox (1968), Adikari (1977), Parentela (1983) และ สมศักดิ์ (2528) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของคุณสมบัติชั้นพื้นฐานของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯกับค่า C_c และ CR ซึ่งสมการความสัมพันธ์ต่างๆแสดงดังตารางที่ 2.9

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของค่า CR และค่า RR ของดินเหนียวทั่วไป (CR/RR) มีค่าประมาณ 5 – 10 (สุรสิทธิ์, 2540)

จอม (2543) ทำการทดสอบ Consolidation Test พบว่าค่าอัตราส่วนของ Compression Ratio (CR) ต่อ Recompression Ratio (RR) มีค่าเท่ากับ 10 และได้ใช้ในการคำนวณการทรุดตัวของดินได้ค้นทางบริเวณถนนสายบางนา – ชลบุรี และจากการศึกษาพบว่าค่า $c_{v,Field}$ ต่อกับ $c_{v,Lab}$ มีค่าเท่ากับ 16.04

ตารางที่ 2.8 แสดงคุณสมบัติการอัดตัวของดินเหนียวดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ

ผู้ศึกษา	C_c	RR	$c_v \times 10^{-4}$ (cm. ² /sec.)	OCR.
1. Tonyagate (1978)	0.080-0.110	-	1-10	-
2. Rajivipat (1980)	0.050-0.300	-	-	-
3. Parentela (1983)	0.125-0.543	0.014-0.030	-	1.26-5.35

ตารางที่ 2.9 แสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางด้านกายภาพกับค่า C_c และ CR ของดินเหนียวแข็งกรุงเทพฯ

ผู้ศึกษา	สมการความสัมพันธ์
1. Cox (1968)	$C_c = 0.54 (2.6 w_n - 0.35)$ $CR = 0.0043 w_n$
2. Adikari (1977)	$C_c = 0.08 + 0.01 w_n$ $C_c = -0.11 + 0.47 e_0$ $C_c = -0.014 + 0.1 w_n$ $C_c = -0.28 + 0.012 LL$
3. Parentela (1983)	$C_c = 0.8602 e_0 - 0.2874$ $C_c = 0.0200 w_n - 0.2346$
4. สมศักดิ์ (2528)	$CR = 0.012 (PL-13.71)$

จ. คุณสมบัติด้านการซึมน้ำของดินเหนียว

จากงานวิจัยที่ศึกษาการทรุดตัวของคันทางในอดีตของ ขงยุทธ (2540), Pongsakorn (2000), Lorenzo (2001) และ Chai (2002) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำในแนวดิ่ง (Permeability, k_v) ของดินเหนียวอ่อนอยู่ระหว่าง $0.15 \times 10^{-4} - 29.32 \times 10^{-4}$ เมตร/ปี และดินเหนียวแข็งอยู่ระหว่าง $0.045 \times 10^{-4} - 5.983 \times 10^{-4}$ เมตร/ปี นอกจากนี้ในการคำนวณการทรุดตัว ผู้วิจัยในอดีตนิยมใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำในดิน แนวยราบต่อแนวดิ่ง (k_h/k_v) เท่ากับ 2 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำในดินจากงานวิจัยในอดีตสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำในดินจากงานวิจัยในอดีต

ผู้วิจัย	สถานที่	$k_v \times 10^{-4}$ (m./day)		k_h/k_v
		Soft Clay	Stiff Clay	
1. ขงยุทธ (2540)	ธนบุรี - ปากท่อ	7.088-29.32	5.983	2
2. Pongsakorn (2000)	บางนา - บางปะกง	1.5	0.25	2
3. Lorenzo (2001)	บางนา - บางปะกง	0.15-0.5	0.045	2
4. Chai (2002)	จ. อุดรธานี	0.5-1.25	1.0	2

Nesarajah (1994) ศึกษาดินเหนียวกรุงเทพฯพบว่าความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำได้น้ำในแนวยราบต่อแนวดิ่ง (k_h/k_v) อยู่ระหว่าง 2 - 5

อรรถสิทธิ์ และคณะ (2545) ได้ศึกษาดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯบริเวณมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิตจากการทดสอบ Consolidation Test พบว่าค่า k_h/k_v อยู่ระหว่าง 1.1 - 2.5

ไตรภพ (2546) ได้ศึกษาดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯบริเวณดอนเมืองและบริเวณคลองเตยจากการทดสอบ Oedometer Test พบว่าค่า k_h/k_v อยู่ระหว่าง 1.0 - 1.5

จอม (2543) และ Pongsakorn (2000) ได้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำได้น้ำในแนวยราบต่อแนวดิ่ง (k_h/k_v) เท่ากับ 2 ในการคำนวณการทรุดตัวของชั้นดินของทางหลวงหมายเลข 34 สายบางนา - บางปะกง

ฉ. ค่า Compression Modulus ของดินเหนียว

ค่า Compression Modulus ของดิน ($M_{soil} = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon$) ที่เป็น Overconsolidated สามารถประมาณได้จากความสัมพันธ์ของค่า Undrained Shear Strength (S_u) ของดินรอบเสาเข็มได้จากการทดสอบ Field Vane Test มีค่าเท่ากับ $250 S_u$ ส่วนดินที่เป็น Normally Consolidated หรือ

Slightly Overconsolidated ควรหาจากการทดสอบ Consolidation Test จากการศึกษาดินเหนียวอ่อน
กรุงเทพ ค่าความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลอง M_{soil} เท่ากับ 150 เท่าของ S_u (Bergado, 1992)

ช. ค่า *Modified Swelling Index* (κ^*) และ *Modified Compression Index* (λ^*) ของดิน
เหนียว

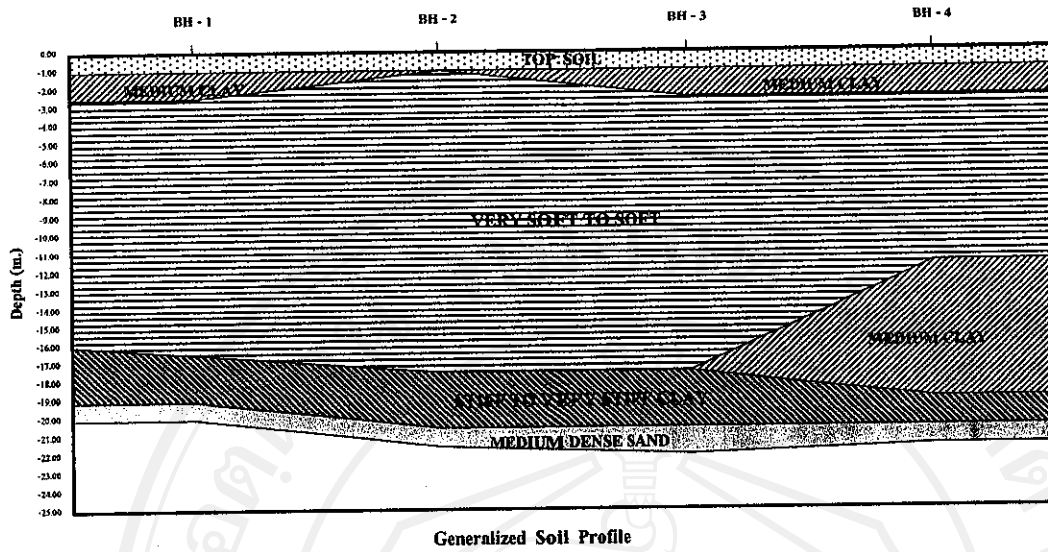
จากคู่มือการใช้โปรแกรม Plaxis ตัวแปรดิน λ^* และ κ^* สามารถหาได้จากการ
ทดสอบ One - Dimensional Compression Test ซึ่งได้จากความสัมพันธ์ของตัวแปรดิน
Compression Index (C_c) และ Recompression Index (C_r) นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับ
Dutch Parameter จาก One - Dimensional Compression (C_p' และ C_p) และจากความสัมพันธ์
ของตัวแปรดิน Cam - Clay (λ, κ) แสดงได้ดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดินต่างๆกับ λ^*, κ^*

ความสัมพันธ์ของตัวแปร	λ^*	κ^*
Cam - Clay parameter	$\frac{\lambda}{1+e}$	$\frac{\kappa}{1+e}$
Dutch parameter	$\frac{1}{C_p'}$	$\approx \frac{1-v_w}{1+v_w} \frac{3}{C_p}$
Internationally normalized parameters	$\frac{C_c}{2.3(1+e)}$	$\approx 1.3 \frac{1-v_w}{1+v_w} \frac{C_r}{1+e}$

2.3 ลักษณะสภาพชั้นดินและคุณสมบัติของดินเหนียวของโครงการที่ศึกษา

การสำรวจดิน (Thanapol Teerana Co., Ltd., 2001) ของถนนสายทางเข้า-ออกทางด้านใต้
“ACCESS D” ของท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ ช่วงความลึกประมาณ 20 เมตรสามารถจำแนกลักษณะ
ชั้นดินได้ 4 ชั้นคือ ชั้น Weather Crust หนาประมาณ 1.0 เมตร ชั้น Medium Clay หนาประมาณ 1.5
เมตร ชั้น Very Soft to Soft Clay หนาประมาณ 15.0 เมตรและชั้น Stiff to Very Stiff Clay หนา
ประมาณ 3.0 เมตร แสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แสดงลักษณะสภาพชั้นดินของถนนสายทางเข้า-ออกทางด้านใต้
 “ACCESS D” ของท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ
 ที่มา : Thanapol Teerana Co., Ltd. (2001)

คุณสมบัติชั้นพื้นฐาน (Basic Soil Properties) ของชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) ชั้นดินเหนียวปานกลาง (Medium Clay) และชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay) พบว่า หน่วยน้ำหนัก (γ) อยู่ระหว่าง 1.41 – 2.14 ตัน/ลบ.ม. ความชื้นในดิน (w_n) อยู่ระหว่าง 15.2 – 96.0 % ค่า Liquid Limit อยู่ระหว่าง 42.6 – 80.2 % Plastic Limit อยู่ระหว่าง 22.9 – 37.7 % คุณสมบัติชั้นพื้นฐานของถนนสายทางเข้า-ออกทางด้านใต้ “ACCESS D” ของท่าอากาศยานสุวรรณภูมิสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 คุณสมบัติทั่วไปของดินในสายทางเข้า – ออกทางด้านใต้
 ของท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ “ACCESS D”

ชั้นดิน	ความลึก (m.)	γ_t (t/m. ³)	w_n (%)	LL. (%)	PL. (%)
1. Weather Crust	0-1.0	-	17.4	-	-
2. Medium Clay	1.0-2.5	1.5-1.62	54.0-56.0	44.4-61.5	23.0-37.7
3. Very Soft to Soft Clay	2.5-17.5	1.41-1.65	54.0-96.0	57.5-80.2	23.0-37.7
4. Stiff to Very Stiff Clay	17.5-21.0	2.05-2.14	15.2-23.2	42.6-57.4	22.9-28.9

บริเวณ กม. 0+815 และ กม. 1+550 พบว่าความหนาของชั้นดินเหนียวแข็งหนา 3.0 เมตร คุณสมบัติของดินเหนียวแข็งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.13

คุณสมบัติด้านกำลังของดินเหนียวพบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) อยู่ระหว่าง 0.93 – 4.28 ตัน/ตร.ม. ค่าโมดูลัสแบบไม่ระบายน้ำ (E_u) อยู่ระหว่าง 233 - 1070 ตัน/ตร.ม. คุณสมบัติด้านกำลังของดินเหนียวสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.14

การทดสอบหาคุณสมบัติด้านการอัดตัวคายน้ำในสายทางเข้า – ออกทางด้านใต้ของท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ “ACCESS D” พบว่า ค่า C_c อยู่ระหว่าง 0.799 – 1.184 ค่า CR อยู่ระหว่าง 0.241 – 0.397 ค่า c_v อยู่ระหว่าง 0.848 – 1.696 ตร.ม./ปี และ ค่า OCR อยู่ระหว่าง 0.954 – 2.898 สามารถสรุปคุณสมบัติการอัดตัวคายดินเหนียวดังตารางที่ 2.15

ตารางที่ 2.13 คุณสมบัติของดินเหนียวแข็งจากการสำรวจเบื้องต้น กม. 0+815 และ 1+550

กม.	ความลึก (m.)	γ_t (t/m^3)	w_n (%)	LL. (%)	PL. (%)	PI. (%)	SPT.
0+815	16.50-16.95	2.05	16	48.4	24.1	24.3	16
0+815	18.00-18.45	2.09	17.5	42.6	22.9	19.7	25
1+550	18.00-18.45	-	17.3	56.2	28.3	27.9	13
1+550	19.50-19.95	-	15.2	48.4	28.1	20.3	21

ตารางที่ 2.14 คุณสมบัติทางด้านกำลังของดินในสายทางเข้า – ออกทางด้านใต้ของท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ “ACCESS D”

ชั้นดิน	ความลึก (m.)	S_u (t/m^2)	E_u (t/m^2)
1. Weather Crust	0-1.0	-	-
2. Medium Clay	1.0-2.5	1.74-2.83	233-708
3. Very Soft to Soft Clay	2.5-17.5	0.93-2.52	290-593
4. Stiff to Very Stiff Clay	17.5-21.0	2.65-4.28	663-1070

ตารางที่ 2.15 แสดงคุณสมบัติการอัดตัวของดินในสายทางเข้า – ออกทางด้านใต้
ของท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ “ACCESS D”

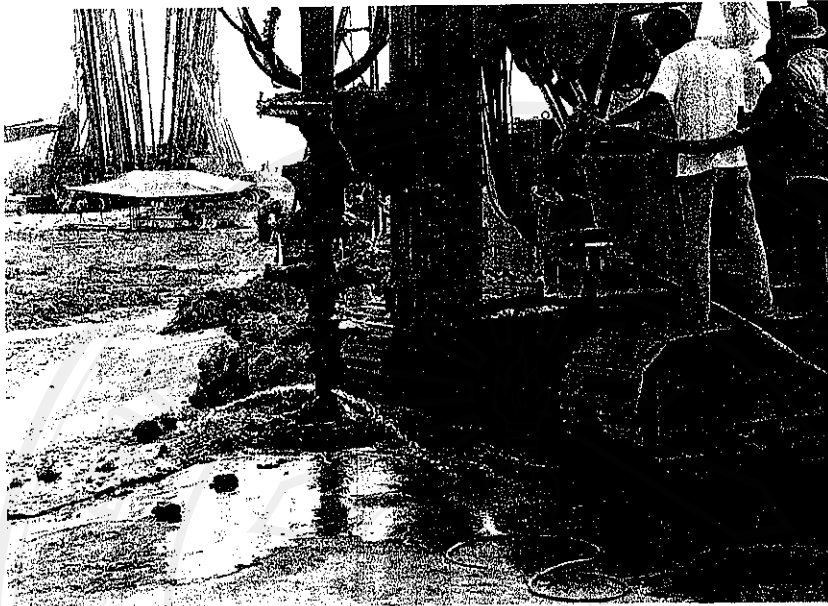
กม.	ความลึก (m.)	e_0	w_c (%)	c_v ตร.ม./ปี	c_c	CR	OCR
0+815	3.00	2.31	80.2	1.357	0.799	0.241	2.898
	9.00	2.03	68.2	1.357	0.811	0.268	1.186
1+550	4.50	2.65	94.4	0.848	0.956	0.262	1.625
	10.50	2.45	84.2	1.696	1.089	0.316	1.155
2+000	7.50	1.98	64.0	1.357	1.184	0.397	2.550
	13.50	2.16	75.6	1.018	0.949	0.300	1.115
2+670	6.00	2.27	77.5	1.357	0.997	0.305	2.053
	12.00	2.14	72.3	1.696	0.943	0.300	0.954

2.4 เสาดินซีเมนต์ วัสดุดินถมคันทาง และแบบจำลองของดิน

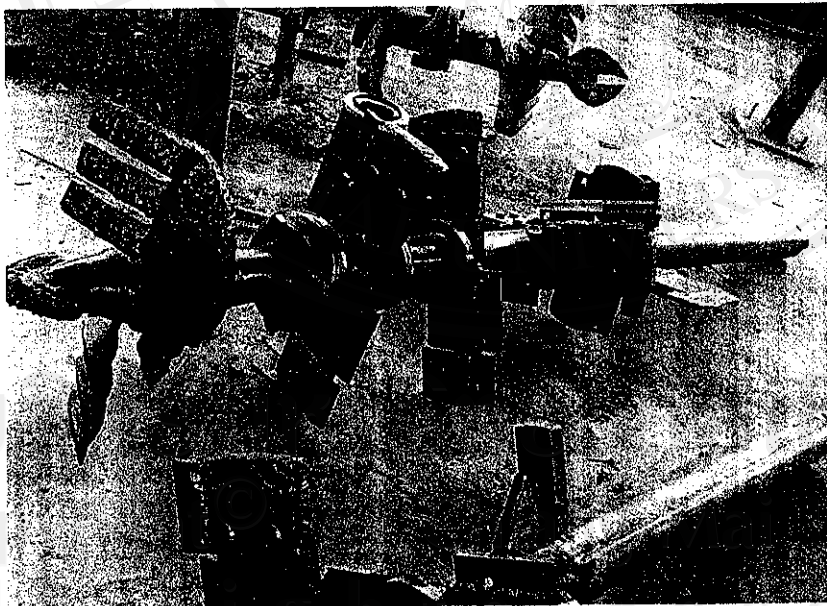
2.4.1 เสาดินซีเมนต์

ก. การก่อสร้างและควบคุมการก่อสร้างเสาดินซีเมนต์

การก่อสร้างเสาดินซีเมนต์ จะใช้เครื่องจักรปั่นหรือเจาะลงไปในพื้นที่ตามความลึกที่ต้องการ จากนั้นทำการถอนหัวเจาะพร้อมกับการผสมซีเมนต์ลงไปในพื้นที่ระหว่างการถอน การทำงานของเครื่องจักรที่ก่อสร้างเสาดินซีเมนต์และลักษณะของก้านเจาะที่ใช้ในการก่อสร้างแสดงดังรูปที่ 2.24 และ 2.25 ตามลำดับ



รูปที่ 2.24 การทำงานของเครื่องจักรที่ก่อสร้างเสาหินซีเมนต์



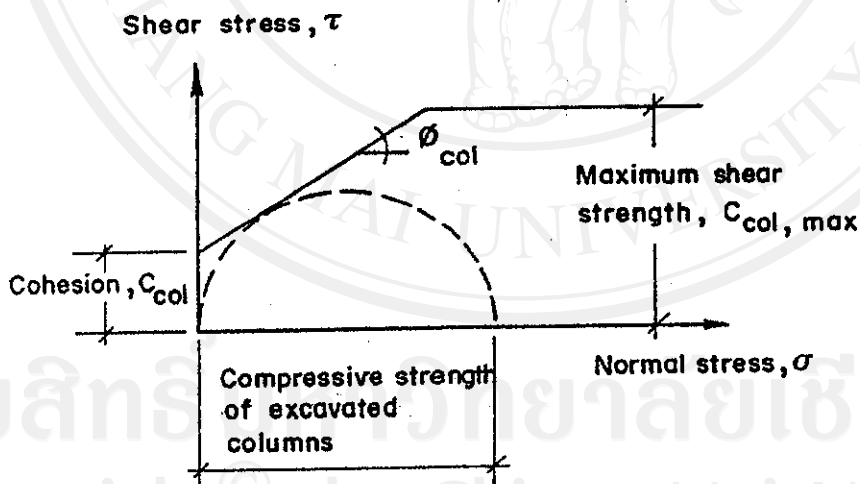
รูปที่ 2.25 ลักษณะของก้นเจาะที่ใช้ในการก่อสร้างเสาหินซีเมนต์

หลังจากการก่อสร้างเสร็จจะทดสอบค่า Undrained Shear Strength ของดินซีเมนต์ในสนาม โดยเก็บตัวอย่างต่อเนื่องไม่มากกว่า 1 เมตร ตลอดความลึกของเสาดินซีเมนต์ด้วย Piston Shelby Tube Sampler โดยค่า Undrained Shear Strength ที่อายุ 3 วัน หรือ 14 วัน หรือ 28 วัน จะต้องไม่น้อยกว่า 15 ตัน/ตร.ม. หรือ 20 ตัน/ตร.ม. หรือ 30 ตัน/ตร.ม. ตามลำดับ (กรณีใดกรณีหนึ่ง) ถือว่าใช้ได้

ข. ค่า Cohesion (c_{col}) และ Friction Angle (ϕ_{col}) ของเสาดินซีเมนต์

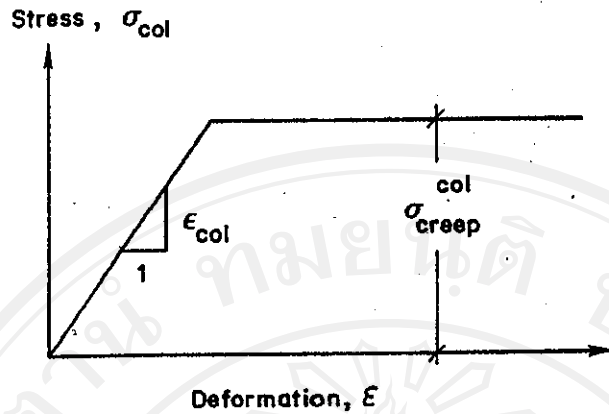
Broms (1992) กล่าวว่าลักษณะพฤติกรรมของดินปรับปรุงด้วยซีเมนต์ จะคล้ายกับ Stiff Fissured Clay ค่า Shear Strength สามารถหาได้จากการทดสอบ Unconfined Compression Test ซึ่งความสัมพันธ์ของ Failure Envelope ของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์แสดงได้ดังรูปที่ 2.26

การศึกษาของ Bergado et al. (1992) พบว่าโดยทั่วไปมุมเสียดทานของดินเหนียวอ่อนที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์มีค่าประมาณ $24^\circ - 40^\circ$ การออกแบบนิยมใช้ค่ามุมเสียดทานของดินเหนียวที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์เท่ากับ 30° (Broms, 1999)



รูปที่ 2.26 แสดงแผนภาพที่สมมุติการวิบัติของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์

ที่มา : Broms (1984)



รูปที่ 2.27 แสดงแผนภาพที่สมมุติความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของดินที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์
ที่มา : Broms (1984)

ค. ค่า Compression Modulus ของเสาหินซีเมนต์ (M_{col})

ค่า Compression Modulus ของเสาหินซีเมนต์ (M_{col}) หาได้โดยตรงจากการทดสอบ Consolidation Test ในกรณีที่ความสัมพันธ์ของ Stiffness ของเสาหินซีเมนต์กับดินรอบเสาหินซีเมนต์มีผลทำให้น้ำหนักกระทำที่ผ่านลงมากกระจายลงไปบริเวณปลายเสาเข็ม ค่า M_{col} จะมีค่าอยู่ระหว่าง 50 ถึง 100 เท่าของ c_{col} (ค่า Cohesion ของดินปรับปรุงด้วยซีเมนต์) โดยทั่วไปในการคำนวณการทรุดตัว M_{col} มีค่าประมาณ 15 - 25 MPa. (20 MPa.) (Bergado, 1992)

Broms (1999) แนะนำค่า Compression Modulus ของเสาหินซีเมนต์ (M_{col}) สามารถคำนวณได้จากโมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเข็ม (E_{col}) และอัตราส่วนปริมาตรของ (V_{col}) ของดินซีเมนต์ ดังสมการที่ 2.26

$$M_{col} = \frac{E_{col} (1 - V_{col})}{(1 + V_{col})(1 - 2 V_{col})} \quad (2.26)$$

Broms (1992) กล่าวว่าลักษณะของดินซีเมนต์มีลักษณะคล้ายกับ Stiff Fissured Clay

Budhu (2000) ได้แนะนำอัตราส่วนปริมาตรของ (V) ของดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay) ในสภาพระบายน้ำอยู่ระหว่าง 0.2 - 0.3 (0.25)

ง. ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์

โดยทั่วไปค่าความซึมน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์ (k_{col}) มีค่าสูงกว่าค่าความซึมน้ำของดินที่ไม่ได้ปรับเสถียรภาพบริเวณรอบข้าง ข้อมูลจากการศึกษาของ Broms (1992) พบว่าค่าความซึมน้ำของเสาเข็มปูนขาวมีค่าเพิ่มขึ้น 100 – 1000 เท่าของดินที่ไม่ได้มีการปรับเสถียรภาพ ดังนั้นเสาเข็มดินซีเมนต์จึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการระบายน้ำในดิน อย่างไรก็ตามดินเหนียวผสมซีเมนต์ส่วนใหญ่จะมีค่าความซึมน้ำได้น้อยกว่า 100 เท่า (Pongsakorn, 2000)

Lorenzo (2001) ได้ศึกษาดินเหนียวกรุงเทพฯผสมซีเมนต์พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของดินซีเมนต์มีค่าสูงกว่าดินที่ไม่ได้ปรับเสถียรภาพ และพบว่าปริมาณซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นค่าความซึมน้ำได้จะเพิ่มมากขึ้น

Lorenzo (2001) ได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ วิเคราะห์อัตราการทรุดตัวของคันทางปรับปรุงดินฐานรากด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ของถนนสาย บางนา - บางปะกง โดยใช้อัตราส่วนของค่าความซึมน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์ต่อค่าความซึมน้ำของดินในแนวตั้ง ($k_{col}/k_{soil,v}$) ช่วงระหว่าง 10 – 30 พบว่าให้ความสัมพันธ์ที่ดีกับข้อมูลสนามและแนะนำค่า $k_{col}/k_{soil,v}$ เท่ากับ 30 ในการคำนวณอัตราการทรุดตัวของคันทางที่ปรับเสถียรภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์

Chai (2002) และ สมโชค (2545) ใช้ค่า $k_{col}/k_{soil,v}$ เท่ากับ 30 ในการวิเคราะห์การทรุดตัวของดินคันทางเสริมแรงด้วย Hexagonal Wire Mesh พบว่าให้ความสัมพันธ์ที่ดีกับข้อมูลในสนาม

2.4.2 วัสดุดินถมคันทาง

Hausmann (1990) รวบรวมข้อมูลทรายแน่น γ_d ช่วง 1.8 – 2.0 ตัน/ลบ.ม. มี Density Index 60 – 85 % มีมุมเสียดทานภายในอยู่ระหว่าง 35 – 38°

Bersabe (1992) ทดสอบคุณสมบัติทรายอุรุษพบว่าค่า Relative Density (D_r) 70 – 90 % มีมุมเสียดทานภายในเท่ากับ 34.6 – 38.7 ° (CID) และทำการทดสอบ Compaction Test (Modified Proctor) ได้ค่า $\gamma_{d,max}$ เท่ากับ 1.776 ตัน/ลบ.ม. OMC เท่ากับ 12.58 % และค่า Permeability อยู่ระหว่าง 0.87×10^{-4} - 4.03×10^{-4} ซม./วินาที

Bowles (1996) รวบรวมคุณสมบัติของทรายและกรวดโดยแนะนำค่า Poisson's ratio (ν) อยู่ระหว่าง 0.3 - 0.4 ในทรายและกรวดแน่น ค่า Modulus (E_s) อยู่ระหว่าง 100 - 200 เมกะปาสกาล และในทรายแน่นค่า Modulus (E_s) อยู่ระหว่าง 50 - 81 เมกะปาสกาล

ขงยุทธ (2540) ใช้ Poisson's ratio (ν) ของทรายบดอัดและหินคลุกเท่ากับ 0.3 และใช้ค่า Modulus (E_s) ของหินคลุกและทรายบดอัดเท่ากับ 100,000 กิโลปาสกาล และ 5,000 กิโลปาสกาล ตามลำดับ ในการคำนวณการทรุดตัวของของถนนพระรามที่ 2 (ชนบุรี – ปากท่อ)

สุรฉัตร (2540) ได้รวบรวมคุณสมบัติดินบดอัดจาก NAVFAC D.M 7.1 สรุปได้ว่าในดินพวก GW ค่า CBR ช่วง 40-80 % ค่ามุมภายใน (ϕ) จะมากกว่า 38° Cohesion เท่ากับ 0 ตัน/ตร.ม. Coefficient of Permeability (k_v) เท่ากับ 21.6 เมตร/วัน ในดินพวก SW ค่า CBR ช่วง 20 – 40 % ค่ามุมภายใน (ϕ) เท่ากับ 38° Cohesion เท่ากับ 0 ตัน/ตร.ม. Coefficient of Permeability (k_v) มากกว่า 0.432 เมตร/วัน และแนะนำค่า Poisson's ratio (ν) ของทรายอัดแน่นมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2 - 0.4

Pongsakorn (2000) ใช้ Poisson's ratio (ν) ของทรายบดอัดและหินคลุกเท่ากับ 0.3 ในการคำนวณการทรุดตัวของของถนนบางนาบาง – ประกย

2.4.3 คุณสมบัติและแบบจำลองดิน

จากการศึกษาการทรุดตัวของดินคันทางปรับเสถียรภาพด้วยเสาดินซีเมนต์ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บริเวณกรุงเทพของ Pongsakorn (2000), Lorenzo (2001) และ Chai (2002) สามารถสรุปตัวแปรดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่ได้ดังตารางที่ 2.16 - 2.18

ตารางที่ 2.16 แสดงแบบจำลองและค่าสมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์การทรุดตัววิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ถนนสายบางนา - บางปะกง โครงการฯ 3

Depth (m.)	Description	Model	γ_{wet} kN/m. ³	γ_{dry} kN/m. ³	c' kN/m. ²	ϕ'	λ'	K'	E'_{ref} kN/m. ²	ν	k_x m./day	k_y m./day
0-2	Weathered Crust	SSM	17.5	14	1	20	0.065	0.007	-	-	9E-4	4.5E-4
2-19	Soft Clay	SSM	14	6.5	1	22	0.174	0.017	-	-	3E-4	1.5E-4
19-25	Medium Clay	SSM	16	11	1	22.5	0.087	0.009	-	-	1E-4	5E-5
25-27	Stiff Clay	SSM	18	15	1	23	0.043	0.004	-	-	5E-5	2.5E-5
2.5 (Thick)	Sand Layer	MCM	20	18	1	30	-	-	10000	0.3	1000	1000
12 (Long)	Cement Column	MCM	14	9.5	300	30	-	-	30000	0.25	9E-4	4.5E-4

ที่มา : Pongsakorn (2000)

ตารางที่ 2.17 แสดงแบบจำลองและตัวแปรดินที่ใช้ในการวิเคราะห์การทรุดตัววิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ถนนสายบางนา - บางปะกง

Depth (m.)	Description	Model	γ_{wet} kN/m. ³	OCR	c' kN/m. ²	ϕ'	λ''	K''	E''_{ref} kN/m. ²	V	k_y m./day
0-16.5	Soft Clay	SSM	14	1.2	1	22	0.15-0.2	0.03-0.04	250-350	-	0.000015- 0.00005
16.5-18.5	Medium Stiff Clay	HSM	16	2.0	1	22	-	-	2500-3000	0.25	0.00001
18.5-23.0	Medium Stiff Clay with Seam of Fine Sand	MCM	17.5	-	1	23	-	-	3500-4500	0.25	0.00035
23.0-25.5	Stiff Clay	HSM	17.5	4.5	1	23	-	-	7000-9000	0.25	0.0000045
2.5 (Thick)	Sand Layer	MCM	20	-	1	30	-	-	5600	0.33	10000
12 (Long)	Soil-Cement	MCM	14	-	300	28-30	-	-	20000- 30000	0.33	Variable

ที่มา : Lorenzo (2001)

ตารางที่ 2.18 แสดงแบบจำลองและตัวแปรดินที่ใช้ในการวิเคราะห์การทรุดตัววิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ของถนนทางทดลอง

Depth (m.)	Description	Model	γ_{wet} kN/m. ³	OCR	c' kN/m. ²	ϕ'	λ'	K'	E' _{ref} kN/m. ²	v	k _x m./day	k _y m./day
0-1.5	Weathered Crust	SSM	17	1.0	10	23	0.13	0.026	-	0.33	2.5E-4	1.25E-4
1.5-2.5	Medium Clay	MC	16	2.91	30	28	-	-	5000	0.25	1.5E-4	0.75E-4
2.4-4	Soft Clay	SSM	14.8	1.40	10	23	0.13	0.026	-	0.33	1E-4	0.5E-4
4-6	Soft Clay	SSM	14.8	1.33	10	23	0.13	0.026	-	0.33	1E-4	0.5E-4
6-9	Stiff Clay	SSM	15.2	1.40	10	23	0.13	0.026	-	0.33	1E-4	0.5E-4
9-12	Sand	Elastic	15.2	-	15	23	-	-	8000	0.3	2E-4	1.0E-4
12-16	Sand	Elastic	16	-	-	-	-	-	10000	0.25	2E-4	1.0E-4
16-20	Sand	Elastic	16	-	-	-	-	-	10000	0.25	2E-4	1.0E-4
2.5 (Thick)	Sand Layer	MCM	17.1	-	1	30	-	-	6000	0.33	100E-4	100E-4
12 (Long)	Cement Column	MCM	18	-	300	30	-	-	30000	0.25	15E-4	15E-4

ที่มา : Chai (2002)