

บทที่ 2  
ทฤษฎีและผลงานในอดีต



2.1 ลักษณะการทรุดตัวของฐานรากแบบเสาเข็มในชั้นดินอ่อน

การทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มในชั้นดินอ่อน (Friction pile foundation) จะประกอบไปด้วย 2 องค์ประกอบหลักที่สำคัญดังนี้

2.1.1 การยุบอัดตัวของเสาเข็ม (Compression of pile)

การยุบอัดตัวของเสาเข็มขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับเสาเข็มตลอดความยาวของเสาเข็ม ความยาวเสาเข็ม พื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม และ Modulus of elasticity ของเสาเข็ม

Vesic (1967) ได้เสนอสมการในการคำนวณค่าการยุบอัดตัวของเสาเข็ม

$$p_p = (Q_p + \alpha Q_s) L / A E_p \dots\dots\dots (2.1)$$

โดย  $p_p$  = ค่าการยุบอัดตัวของเสาเข็ม

$L$  = ความยาวของเสาเข็มที่ฝังอยู่ในดิน

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม

$E_p$  = Modulus of elasticity ของวัสดุที่ใช้ทำเสาเข็ม

$\alpha$  = ค่าตัวประกอบที่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำตลอดความยาวเสาเข็ม (สำหรับทราย  $\alpha = 0.6$ )

$Q_p$  = น้ำหนักบรรทุกที่ปลายเสาเข็ม

$Q_s$  = น้ำหนักบรรทุกที่พื้นผิวรอบเสาเข็ม

อย่างไรก็ตามค่า  $E_p$  สำหรับเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กจะลดลงประมาณ 10 % หลังจากการคอก ทั้งนี้ เนื่องจากผลของ creep ประมาณ 1/3 ของค่าที่ลดลง (Broms 1973)

## 2.1.2 การยุบอัดตัวของดิน (Compression of soil)

การยุบอัดตัวของดินสามารถแบ่งออกเป็น 4 องค์ประกอบ ดังนี้

2.1.2.1 การทรุดตัวแบบทันทีทันใด (Immediate settlement) เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทำให้เกิด shear deformation ภายในมวลดิน

สำหรับฐานรากเสาเข็มลอย (Friction pile foundation) น้ำหนักบรรทุกจะส่งผ่านมายังมวลดินในรูปของแรงดันเฉือนรอบเสาเข็ม ดังนั้นค่าการทรุดตัวแบบทันทีทันใด สำหรับเสาเข็มยาว (Long floating pile) หรือกลุ่มเสาเข็มที่มีระยะห่างมากจะเป็นค่าการทรุดตัวที่เป็นส่วนสำคัญในการทรุดตัวทั้งหมดสำหรับกรณีเสาเข็มสั้น (Short floating pile) หรือกลุ่มเสาเข็มที่มีระยะห่างใกล้ชิดกัน จะมีค่าการทรุดตัวแบบ Consolidation เป็นส่วนสำคัญในการทรุดตัวทั้งหมด

### 2.1.2.2 การทรุดตัวแบบ Creep ภายใต้แรงดันคงที่

การทรุดตัวแบบ Creep เป็นผลมาจากค่าแรงดันเฉือนภายในมวลดิน ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในมวลดิน หรือเกิด plastic flow ขณะที่ปริมาตรคงที่

Plastic flow จะเกิดขึ้นเมื่อค่าแรงดันเฉือนมีค่าเกินกำลังรับแรงเฉือนของดิน

Ladd (1971) พบว่าค่าการทรุดตัวแบบ Creep มีค่าน้อยมากเมื่อได้รับแรงดันค่า ๆ

### 2.1.2.3 การทรุดตัวแบบ Primary Consolidation

Terzaghi (1943) เป็นการทรุดตัวที่เกิดจากการแพร่กระจายของน้ำออกจากโพรงดิน เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกบนฐานราก การทรุดตัวจะเกิดขึ้นจนกระทั่งค่า excess pore pressure ( $\Delta u$ ) เท่ากับศูนย์

#### 2.1.2.4 การทรุดตัวแบบ Secondary Consolidation

เมื่อการแพร่กระจายของน้ำออกจากโพรงดิน จนเข้าสู่ภาวะสมดุล มวลดินเหนียวจะยังคงมีการทรุดตัวภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงที่ การทรุดตัวในลักษณะนี้เรียกว่า "Secondary Consolidation"

Whitaker and Cooke (1966) การเพิ่มน้ำหนักบรรทุกที่ต่ำกว่าค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ค่าการทรุดตัวแบบ Consolidation (primary and secondary consolidation) ของเสาเข็มเดี่ยวจะมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่าการทรุดตัวแบบทันทีทันใด (Immediate settlement) ถ้าน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นจนมีค่าเข้าใกล้ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด จะเกิดการทรุดตัวที่แปรผันตามเวลาเกิดขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นผลเนื่องจาก Shear flow & creep มากกว่าการแพร่กระจายน้ำออกจากโพรงดิน และการทรุดตัวแบบ Consolidation จะมีความสำคัญมากขึ้นถ้าขนาดและจำนวนเข็มในกลุ่มเพิ่มขึ้น

Eide Hutchinson and Landra (1961) ภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มจนถึง 40 % ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุด การทรุดตัวที่เกิดจะมีพฤติกรรมเป็นแบบ Elastic แต่ถ้าน้ำหนักบรรทุกมากกว่า 40% ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุด มวลดินจะมีพฤติกรรมทรุดตัวแบบ Plastic

## 2.2 วิธีประมาณการค่าการทรุดตัวของฐานรากแบบเสาเข็ม

### 2.2.1 การประมาณค่าการทรุดตัวของฐานรากแบบเสาเข็มด้วยวิธี Modified Theory of elasticity

วิธีการวิเคราะห์การทรุดตัวของฐานรากแบบเสาเข็มโดยใช้ทฤษฎี elasticity ซึ่งได้มีผู้ทำการศึกษาดังนี้ D'Appolonia (1965), Poulos and Davis (1968), Mattes and Poulos (1969), Poulos and Mattes (1969 a), Butterfield and Banarjee (1971), Banarjee and Davis (1977) และ Randolph and Wroth (1978) โดยวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม ซึ่งจะพิจารณาแรงที่มากกระทำต่อเสาเข็มออกเป็นส่วน ๆ ที่มีแรงกระทำสม่ำเสมอ และใช้ความสัมพันธ์แบบ Compatibility ระหว่างการเคลื่อนที่ของเสาเข็มกับมวลดินข้างเสาเข็ม

การทรุดตัวของฐานรากแบบเสาเข็ม จะพิจารณาการยุบอัดตัวของเสาเข็มเมื่อรับแรงตามแนวแกน และการทรุดตัวของดินเนื่องจากน้ำหนักกระทำภายในมวลดิน โดยใช้สมการของ Mindlin (1936)

การวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวของฐานรากแบบเสาเข็ม โดยวิธี Modified theory of elasticity ของ Poulos and Davis (1980) แยกพิจารณาการทรุดตัวของเสาเข็มดังนี้

### 2.2.1.1 การทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยว (Settlement of single pile)

Poulos and Davis (1968), Poulos and Mattes (1969), Poulos (1972) เสนอสมการสำหรับหาค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม โดยใช้ Numerical method พิจารณาเสาเข็มเป็น Incompressible pile ใน Half-space ซึ่งมีตัวปรับแก้สำหรับอิทธิพลอื่น ๆ ที่มีผลต่อการยุบตัวของเสาเข็ม ที่มีค่า Young's modulus ของดินคงที่ และค่า Poisson's ratio เท่ากับ 0.5 ดังนี้

#### 1. เสาเข็มลอย (Floating pile)

$$\rho = PI/E_s d \dots\dots\dots (2.2)$$

โดย  $I = I_0 R_k R_h R_v$

$\rho$  = การทรุดตัวของเสาเข็ม

$P$  = น้ำหนักบรรทุกทุกแนวแกนเสาเข็ม

$I_0$  = ตัวปรับแก้สำหรับ Incompressible pile in semiinfinite mass สำหรับ  $\nu_s = 0.5$

$R_k$  = ตัวปรับแก้สำหรับ pile compressibility

$R_h$  = ตัวปรับแก้สำหรับ finite depth ของชั้น rigid base

$R_v$  = ตัวปรับแก้สำหรับ poisson's ratio

$h$  = ความหนาของชั้นดิน

$E_s$  = Young's modulus ของดิน

$d$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม

## 2. เสาเข็มหยั่ง (End-bearing pile)

$$\rho = PI/E_{sd} \dots\dots\dots (2.3)$$

โดย  $I = I_0 R_k R_b R_v$

$R_b =$  ตัวปรับแก้สำหรับ Stiffness of bearing stratum

ค่า  $I_0, R_k, R_h, R_v$  และ  $R_b$  แสดงในรูปที่ 2.1 ถึง รูปที่ 2.5

จากรูปที่ 2.1 ถึงรูปที่ 2.5 สามารถแสดงสาระสำคัญดังนี้

- 1) เสาเข็มที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ ถ้าความยาวเสาเข็มเพิ่มจะทำให้การทรุดตัวน้อยลง
- 2) Enlarge base ของเสาเข็ม ทำให้การทรุดตัวน้อยลง
- 3) ความหนาชั้นดินที่มีเสาเข็มอยู่ ถ้ามีความหนาน้อยลงจะทำให้การทรุดตัวน้อยลง
- 4) Young's modulus ของดินคงที่ ถ้าค่า poisson's ratio ของดินลดลง จะทำให้ค่าการทรุดตัวลดลง
- 5) สำหรับ Slender pile (อัตราส่วนความยาวเสาเข็มต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มมากกว่าหรือเท่ากับ 100) ค่า  $R_b \cong 1$  สำหรับทุกค่า  $K$

## 2.2.1.1.1 Movement ratios

ในการคำนวณค่าการทรุดตัว ในบางครั้งอาจใช้ค่า Movement ratios โดย

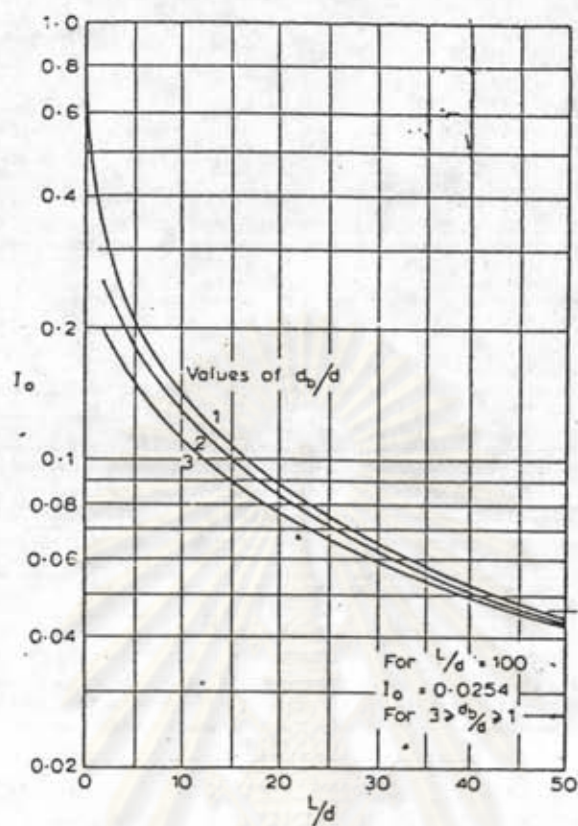
$$M_r = \frac{\text{Settlement of pile}}{\text{Elastic shortening of pile}}$$

$$\rho = M_r \cdot PL/E_p A_p \dots\dots\dots (2.4)$$

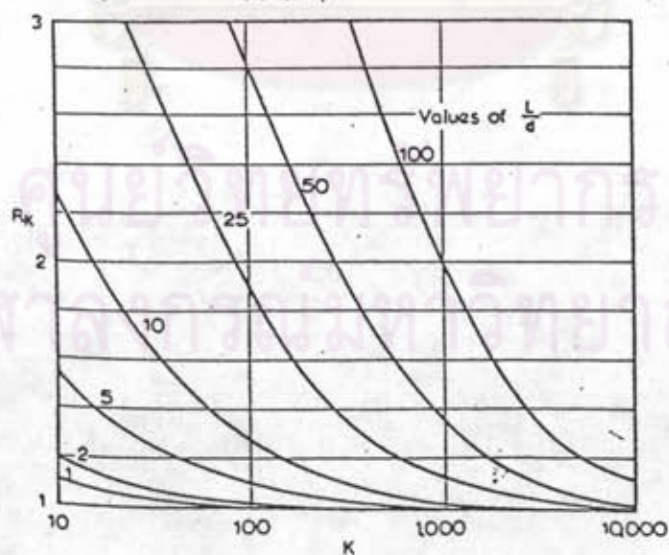
ค่า  $M_r$  แสดงในรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7

Focht (1967) พบว่า ค่า  $M_r$  อยู่ในช่วง 0.5 ถึง 2 สำหรับเสาเข็มที่ใช้กันอยู่ ซึ่งสอดคล้องกับค่า  $M_r$  ในรูปที่ 2.6 และ 2.7

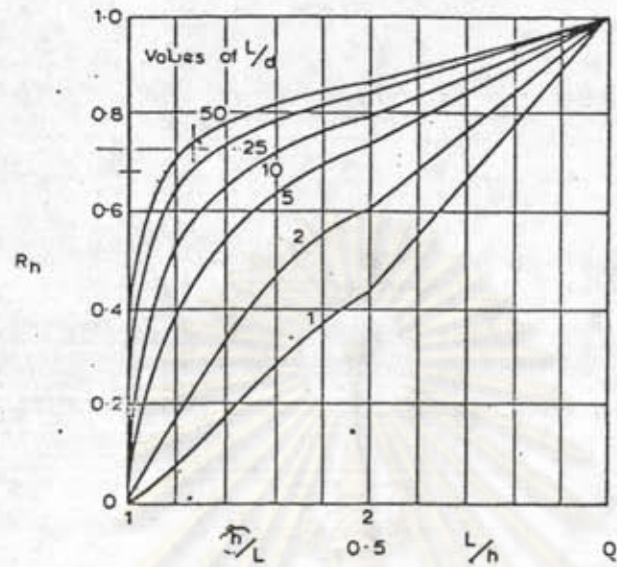
สำหรับค่า Movement ratio ของปลายเสาเข็ม แสดงในรูปที่ 2.8



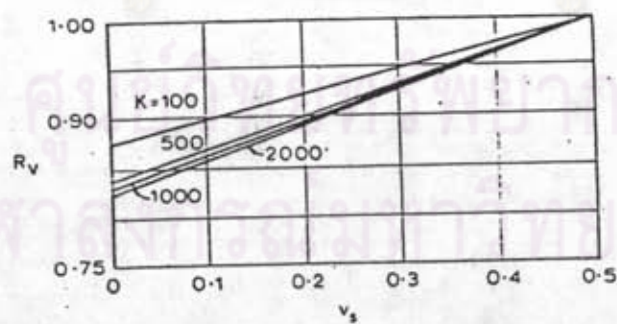
รูปที่ 2.1 แสดงค่า Settlement-influence factor,  $I_0$



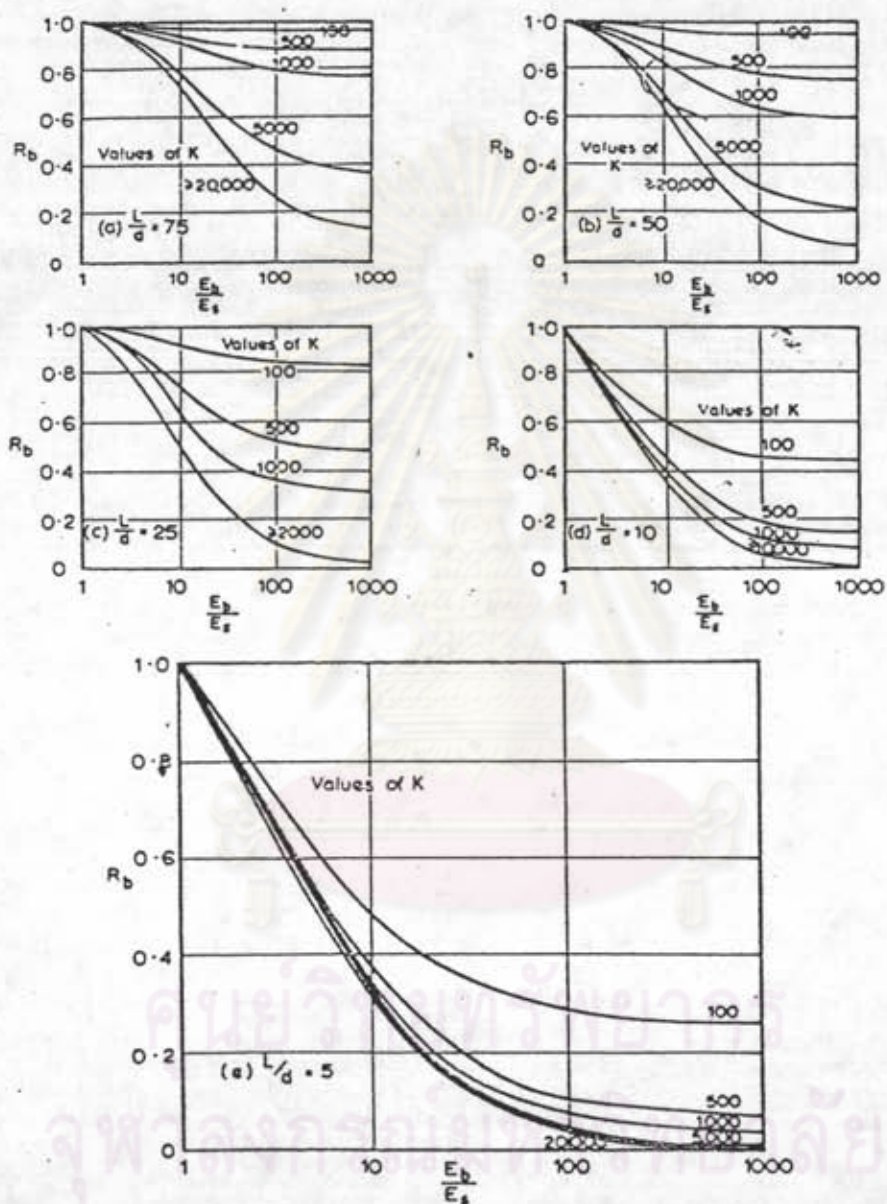
รูปที่ 2.2 แสดงค่า Compressibility correction factor for settlement,  $R_k$



รูปที่ 2.3 แสดงค่า Depth correction factor for settlement,  $R_h$



รูปที่ 2.4 แสดงค่า Poisson's ratio correction factor for settlement,  $R_v$



รูปที่ 2.5 แสดงค่า Base modulus correction factor for settlement,  $R_b$



### 2.2.1.1.2 ผลกระทบของ pile soil slip

ผลกระทบของการสั่นไถลระหว่างเสาเข็มกับดิน จะเกิดในเสาเข็มลอย (Floating pile) ซึ่งอยู่ในชั้นดินเหนียว ที่มีค่าการยึดเกาะคงที่ตลอดความยาวเสาเข็มอิทธิพลการสั่นไถลที่มีต่อการทรุดตัว แสดงในรูปที่ 2.9 และ 2.10 โดย

$$M_s = \frac{\text{Elastic settlement of pile}}{\text{Actual settlement of pile}} \dots\dots\dots (2.5)$$

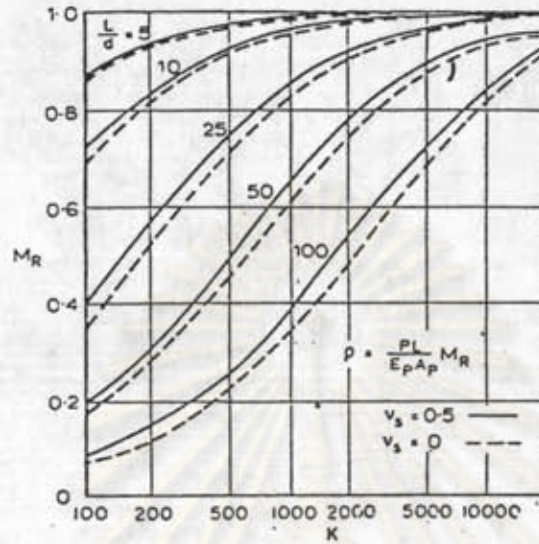
จากรูปที่ 2.9 และ 2.10 สามารถสรุปใจความสำคัญได้ดังนี้

1. ผลกระทบเนื่องจาก  $L/d$  มีผลน้อยมาก
2. ถ้าค่า  $C_a/C_u$  มีค่าลดลง จะทำให้ผลกระทบของการสั่นไถลมีความสำคัญมาก
3. ถ้าค่า pile-stiffness factor ( $K$ ) มีค่าต่ำมาก ทำให้ค่า  $M_s$  มีค่าลดลง
4. ผลกระทบของการสั่นไถลมีผลน้อยมากต่อการทรุดตัว ยกเว้นในกรณีค่า Pile-stiffness ( $K$ ) ต่ำ

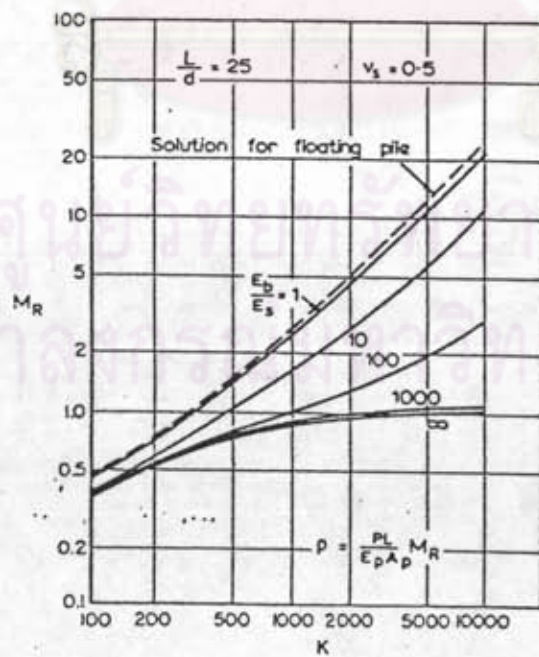
2.2.1.1.3 ผลกระทบเนื่องจากชั้นดินเป็นชั้น ๆ และไม่เป็นเอกพันธ์ (Layering and Nonhomogeneous of soil)

จากการวิเคราะห์หาค่าการทรุดตัวของเสาเข็มที่มีชั้นดินจำนวนสองชั้น โดยชั้นบนมีความหนา  $h_1$  ( $h_1 < L$ ) และชั้นล่างจะมีค่าความหนาถึงอนันต์ ผลของการประมาณค่าการทรุดตัวของเสาเข็มด้วยคอมพิวเตอร์ แสดงในรูปที่ 2.11 สำหรับ  $L/d = 25$  และมีการประมาณค่าการทรุดตัวโดยใช้ค่า Displacement influence factor สำหรับดินที่มีเนื้อเดียว โดยค่า Modulus เฉลี่ยมีค่า

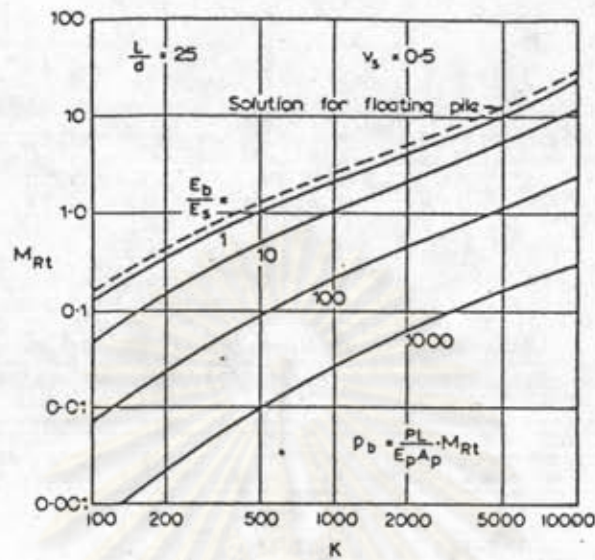
$$E_{av} = (E_1 h_1 + E_2 (L - h_1)) / L \dots\dots\dots (2.6)$$



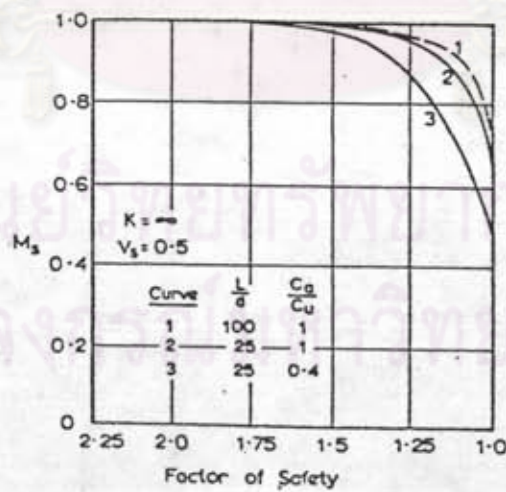
รูปที่ 2.6 แสดงค่า Movement ratio for end-bearing pile on rigid base



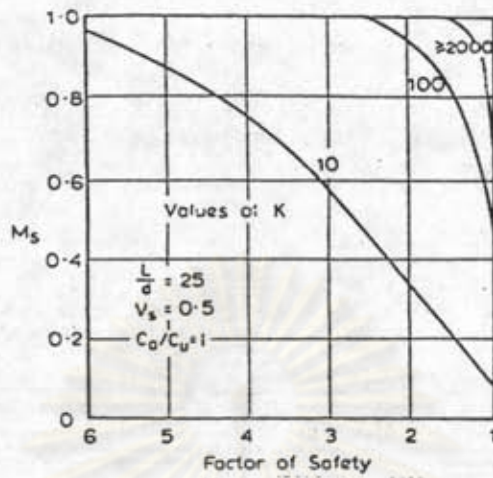
รูปที่ 2.7 แสดงค่า Movement ratio for end-bearing pile on stiffer stratum



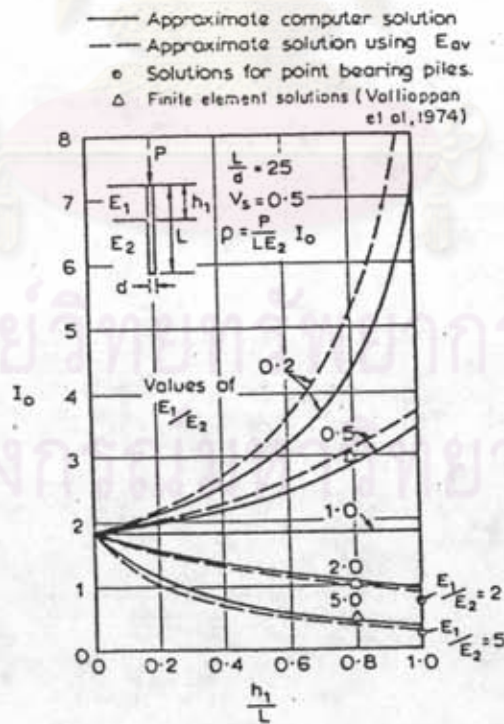
รูปที่ 2.8 แสดงค่า End-bearing pile on stiffer stratum Pile-tip movement ratio



รูปที่ 2.9 แสดงค่า Settlement modification factor,  $M_s$  for slip Effect of  $L/d$  and adhesion factor



รูปที่ 2.10 แสดงค่า Settlement modification factor  $M_s$  for slip.  
Effect of  $K$ .



รูปที่ 2.11 แสดงค่า Settlement of pile in layered soil

จากข้อมูลข้างต้นค่า soil modulus ที่มีค่าแปรผันตามความยาวเสาเข็มนั้น การทรุดตัวจะคำนวณโดยใช้ค่า Average soil modulus ก็ให้ค่าความถูกต้องได้อย่างเพียงพอ

$$E_{av} = (1/L) \sum_{j=1}^n E_j h_j \dots\dots\dots (2.7)$$

- โดย  $E_j$  = Modulus ของดินชั้น  $j$   
 $h_j$  = ความหนาของดินชั้น  $j$   
 $n$  = จำนวนชั้นดินตามความยาวเสาเข็มไปยังจุดที่พิจารณา

#### 2.2.1.2 การทรุดตัวของดินที่อยู่ใต้เสาเข็ม

Poulos and Mattes (1971 a) และ Poulos and Davis (1974) ได้เสนอผลการคำนวณค่าการทรุดตัวของชั้นดินใต้เสาเข็ม โดยแปรค่า  $L/d$  และ  $K$  ดังรูปที่ 2.12 และมีค่าการทรุดตัวที่จุดใด ๆ ในมวลดิน ดังนี้

$$\rho = I_p / LE_s \dots\dots\dots (2.8)$$

- โดย  $I_p$  = Displacement influence factor สำหรับ  
 $\nu_s = 0.5$  ณ ค่า  $K$  และ  $L/d$  ต่าง ๆ กัน ดังแสดงในรูป 2.12  
 $H$  = ระยะจากหัวเสาเข็มถึงความลึกที่พิจารณา  
 $r$  = ระยะห่างของแกนกลางเสาเข็มไปยังจุดที่พิจารณา

#### 2.2.1.3 ค่าการทรุดตัวทันทีทันใดและค่าการทรุดตัวสุดท้าย

สำหรับเสาเข็มที่อยู่ในชั้นทราย ค่าการทรุดตัวสุดท้ายจะเกิดแบบทันทีทันใดขณะให้น้ำหนักบรรทุก ดังนั้น ค่า Young's Modulus ( $E_s$ ) และ  $\nu_s$  ที่ใช้ในการคำนวณการทรุดตัวของเสาเข็มจะเป็นค่า  $E_s$  และ  $\nu_s$

สำหรับเสาเข็มในดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ค่าการทรุดตัวแบบทันทีทันใด ( $\rho_i$ ) จะเกิดในสภาพไม่มีการระบายน้ำ หลังจากนั้นจะเกิดการทรุดตัวที่ขึ้นกับเวลาจนค่าความดันน้ำในโพรงดินลดลงอย่างสมบูรณ์ ( $\rho_{cf}$ ) ดังนั้นค่าการทรุดตัวรวมทั้งหมดของเสาเข็ม ( $\rho_{tf}$ ) มีค่า

$$\rho_{tf} = \rho_i + \rho_{cf}$$

โดย  $\rho_{tf}$  = การทรุดตัวทั้งหมด

$\rho_i$  = การทรุดตัวแบบทันทีทันใด

$\rho_{cf}$  = การทรุดตัวแบบ Consolidation

ถ้าดินถูกสมมติว่าเป็น Ideal two-phase elastic homogeneous Isotropic material ค่า Undrain และ drain modulus จะแสดงได้ดังนี้

$$E'_s = (1 + v'_s) (1 - 2 v'_s) / m_v (1 - v'_s) \dots (2.9)$$

$$E_u = 3 E'_s / 2 (1 + v'_s) \dots (2.10)$$

และสามารถคำนวณ  $\rho_i / \rho_{tf}$  ได้ดังนี้

$$\rho_i / \rho_{tf} = 2 (1 + v'_s) \cdot I_{0.5} / 3 I'_v \dots (2.11)$$

โดย  $I_{0.5}$  = Displacement - influence factor for  $v_s = 0.5$

$I'_v$  = Displacement - influence factor for  $v = v'_s$

Poulos and Davis (1968) ได้คำนวณค่า  $\rho_i / \rho_{tf}$  สำหรับ Incompressible pile ที่ค่า  $L/d$  และ  $v'_s$  ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.13

จากรูปที่ 2.13 ในช่วงค่า  $L/d$  ที่ใช้กันอยู่ในทางปฏิบัติ ค่าการทรุดตัวแบบทันทีทันใด จะมีค่ามากกว่าค่าการทรุดตัวที่เกิดจากกระบวนการ Consolidation

Mattes and Poulos (1969) ได้เสนอการคำนวณ  $\rho_i / \rho_{tf}$  สำหรับ Compressible floating pile ดังแสดงในรูปที่ 2.14

#### 2.2.1.4 การทรุดตัวของเสาเข็มกลุ่ม (Settlement of pile group)

Poulos (1968 b) และ Poulos and Mattes (1971 b) ได้เสนอการวิเคราะห์การทรุดตัวของกลุ่มเสาเข็มลอย และกลุ่มเสาเข็มห้อย (floating and bearing pile groups) โดยสมมติให้เสาเข็มแต่ละต้นเป็นอิสระต่อกัน และมี pile cap ช่วยไม่ให้เกิดการทรุดตัวที่ต่างกันของเสาเข็มแต่ละต้นในกลุ่มเสาเข็ม จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์

ผลกระทบของเสาเข็มข้างเคียงต่อการทรุดตัวของเสาเข็มต้นที่พิจารณา ซึ่งผลกระทบนี้แสดงในรูปของ interaction factor,  $\alpha$

$$\alpha = \frac{\text{การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากเสาเข็มต้นข้างเคียง}}{\text{การทรุดตัวของเสาเข็มภายใต้น้ำหนักบรรทุกบนเสาเข็ม}} \dots (2.12)$$

โดยที่  $\alpha$  = Interaction factor มีความสัมพันธ์กับค่า  $K$  และ  $L/d$  โดยค่า Interaction factor สำหรับเสาเข็มลอย ( $\alpha_f$ ) และเสาเข็มหยั่ง ( $\alpha_e$ ) แสดงไว้ในรูปที่ 2.15 และ 2.16

สำหรับ Interaction factor สำหรับฐานรากแบบเสาเข็มหยั่ง  
ในชั้นดินที่ยึดตัวได้ จะมีค่า

$$\alpha = \alpha_f - F_E (\alpha_f - \alpha_e) \dots (2.13)$$

โดยที่  $F_E$  = ตัวประกอบที่ขึ้นอยู่กับค่า  $K$ ,  $L/d$  และ  $E_b/E_s$  ดังรูปที่ 2.17

ถ้าการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากเสาเข็มข้างเคียง ในกรณีเสาเข็มทั้งสองมีขนาดไม่เท่ากัน :

$$\Delta p_{ij} = \rho_j \alpha_{ij} \dots (2.14)$$

โดยที่  $\Delta p_{ij}$  = ค่าการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของเสาเข็ม  $i$  เนื่องจากเสาเข็ม  $j$

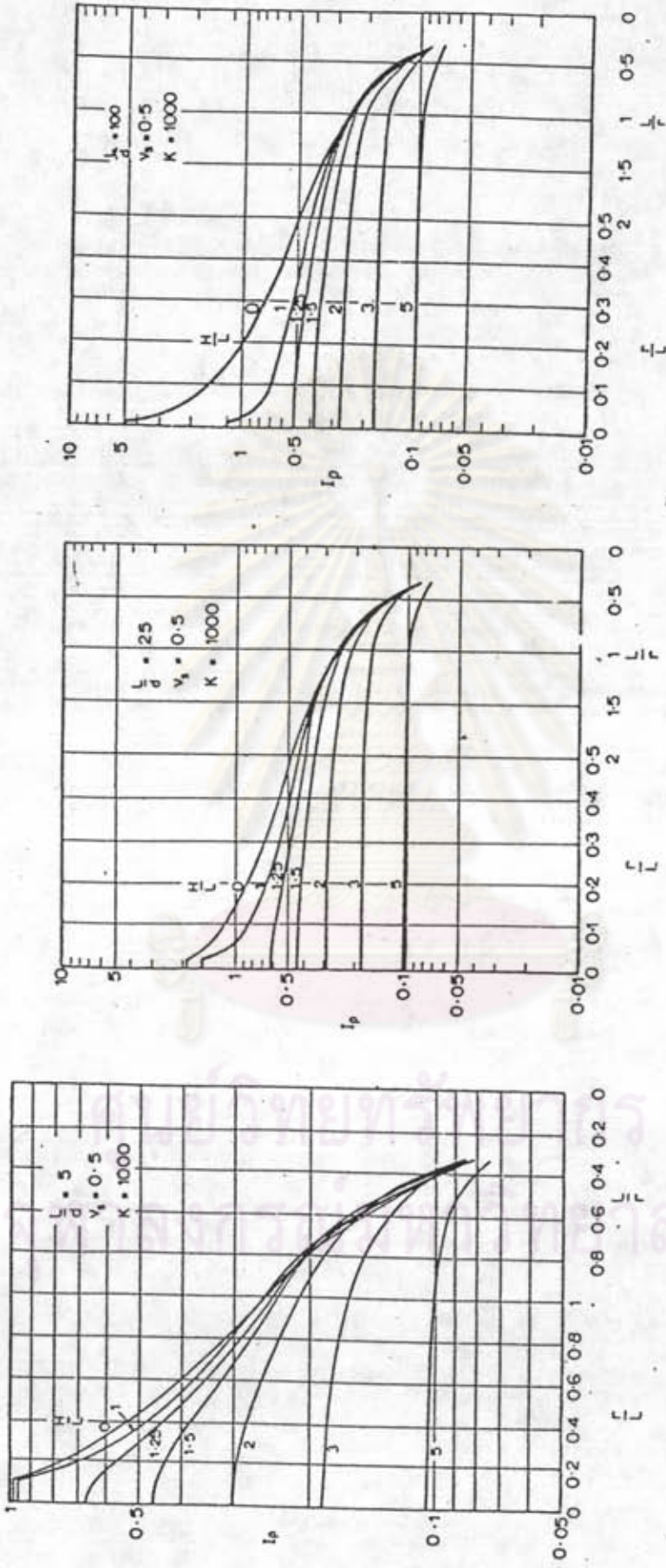
$\rho_j$  = ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มข้างเคียงเสาเข็ม  $i$

$\alpha_{ij}$  = Interaction factor ที่สอดคล้องกับระยะห่างระหว่างเสาเข็ม  $i$  และ  $j$  โดยใช้ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม  $j$

จากสมการที่ 2.14 เป็นการหาค่าการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเสาเข็มต้นข้างเคียง 1 ต้น ด้วยวิธี superimpose ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มใด ๆ ( $k$ ),  $\rho_k$  ในกลุ่มเสาเข็มที่เหมือนกันจำนวน  $n$  ต้น ดังนี้

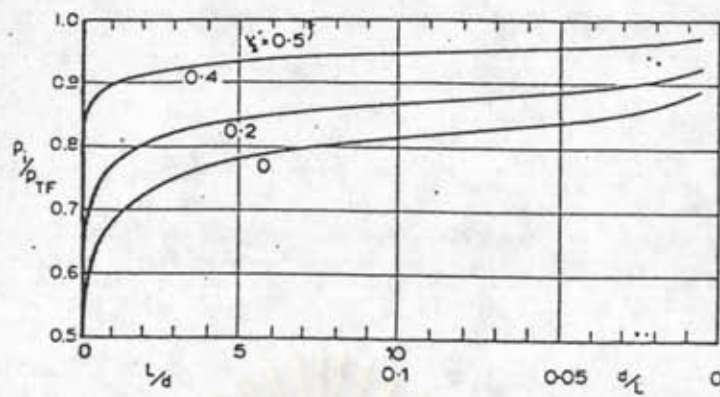
$$\rho_k = \rho_1 \sum (P_j \cdot \alpha_{kj}) \dots (2.15)$$

โดยที่  $\rho_1$  = ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยว เนื่องจากน้ำหนักกระทำ 1 หน่วย

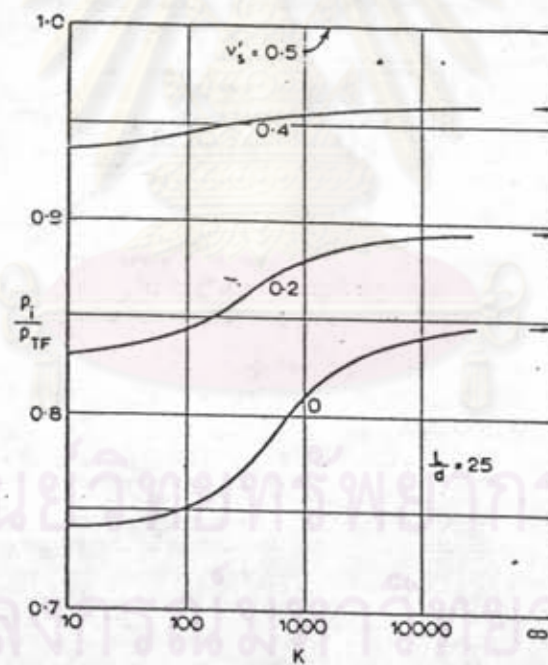


รูปที่ 2.12 แสดงค่า Displacement influence factors

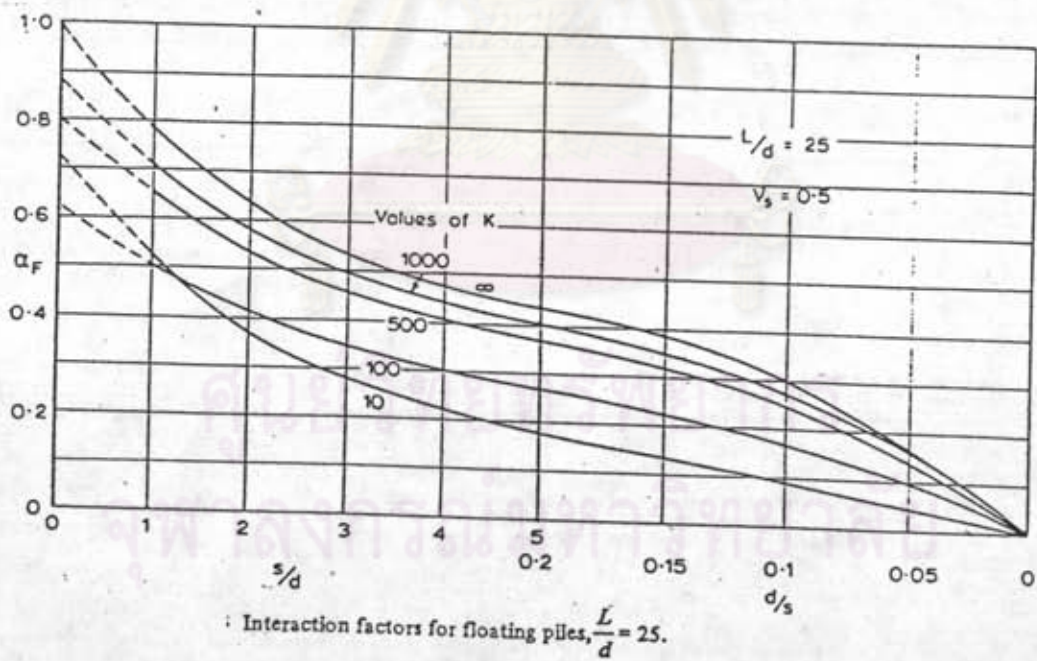
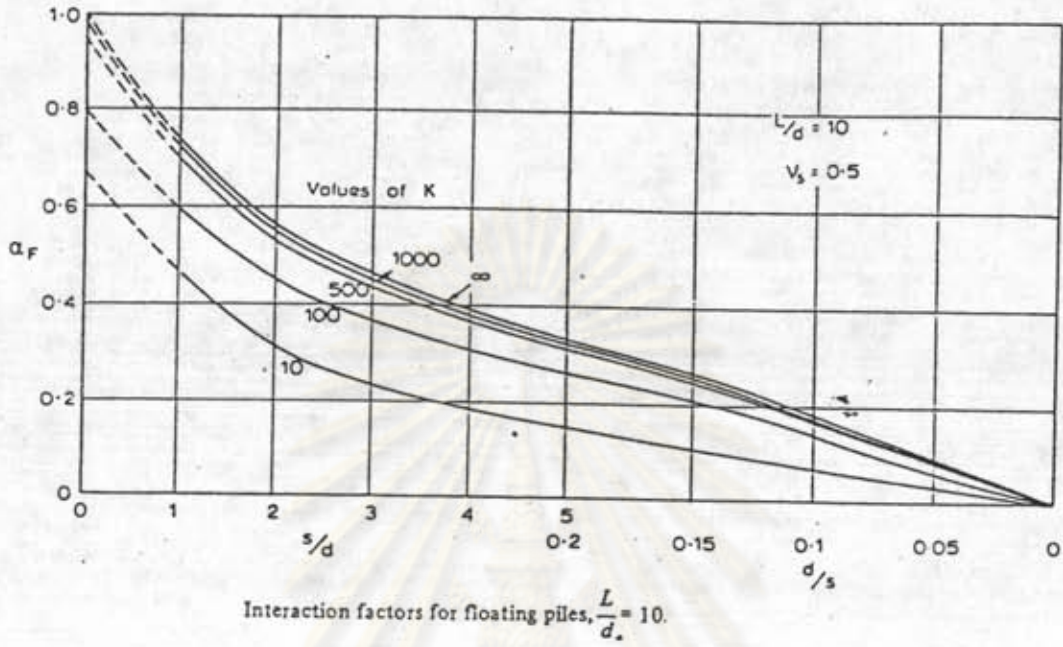




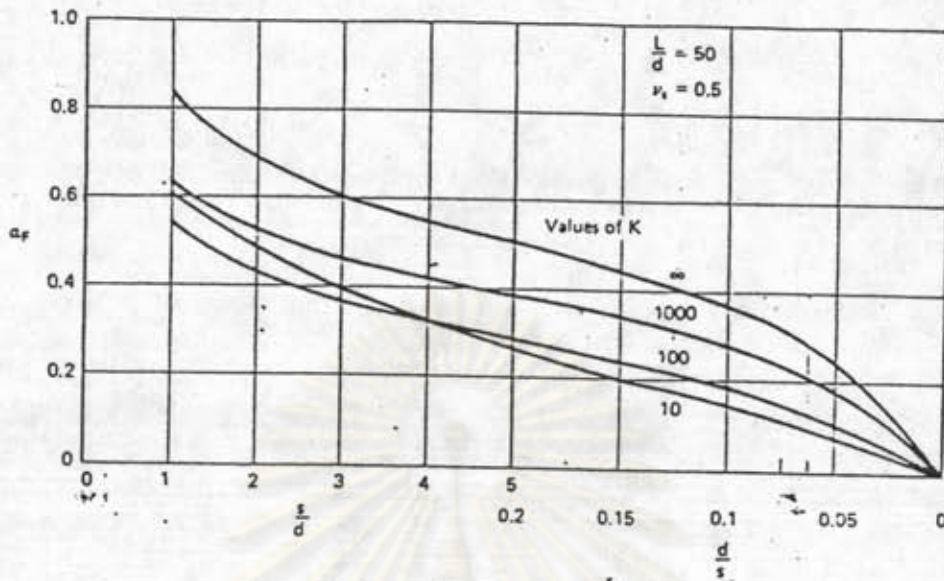
รูปที่ 2.13 แสดงค่าอัตราส่วนการทรุดตัวทันทีที่ทันใดต่อการทรุดตัวทั้งหมดของ  
Incompressible pile in semi-infinite mass



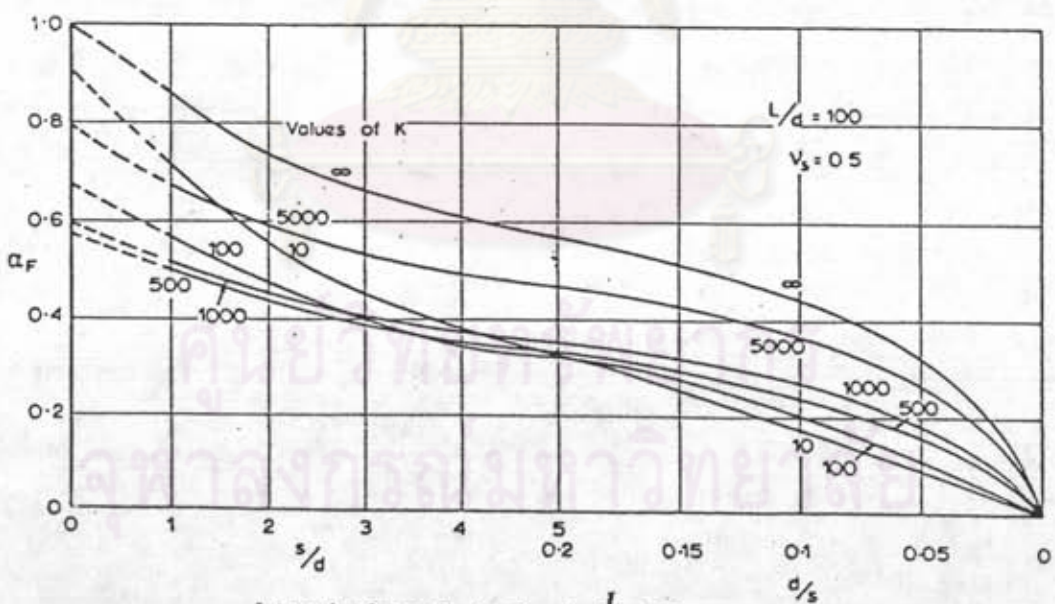
รูปที่ 2.14 แสดงค่าอัตราส่วนการทรุดตัวทันทีที่ทันใดต่อการทรุดตัวทั้งหมดของ  
Compressible floating pile



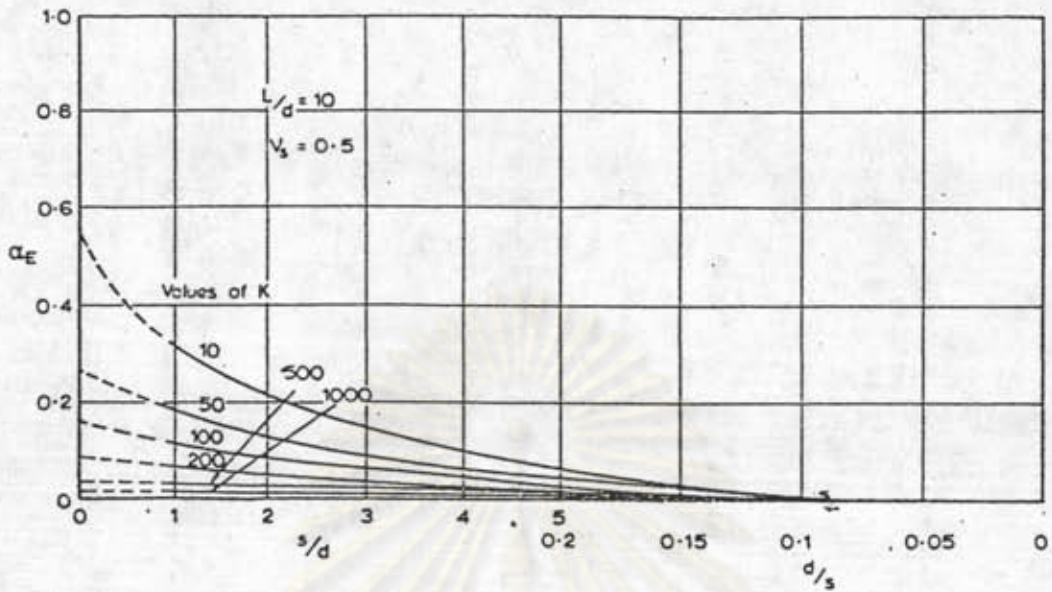
รูปที่ 2.15 แสดงค่า Interaction factor สำหรับเสาเข็มลอย



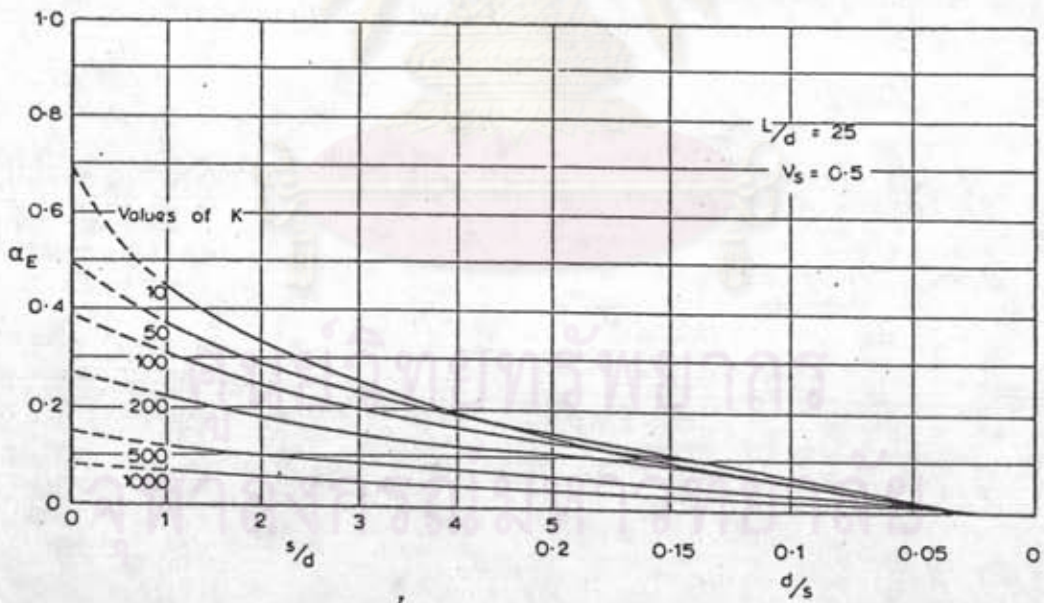
Interaction factors for floating piles,  $\frac{L}{d} = 50$ .



Interaction factors for floating piles,  $\frac{L}{d} = 100$ .

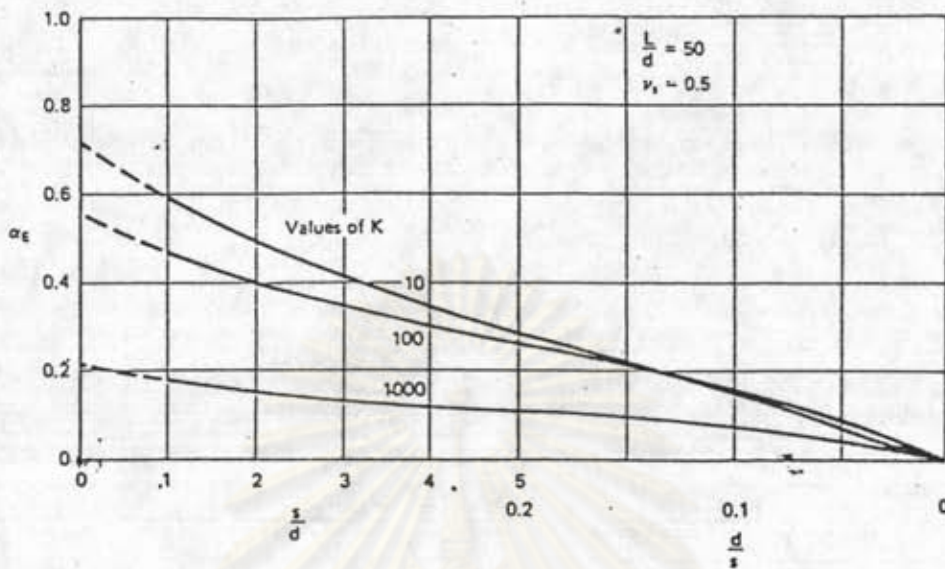


Interaction factors for end-bearing piles,  $\frac{L}{d} = 10$ .

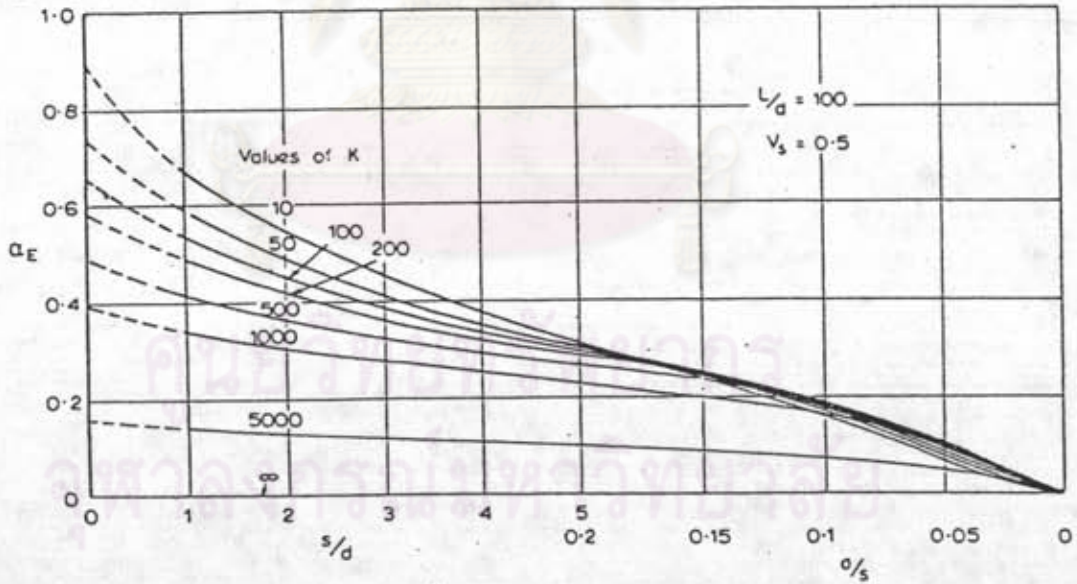


Interaction factors for end-bearing piles,  $\frac{L}{d} = 25$ .

รูปที่ 2.16 แสดงค่า Interaction factor สำหรับเสาเข็มหยั่ง



Interaction factors for end-bearing piles,  $\frac{L}{d} = 50$ .



Interaction factors for end-bearing piles,  $\frac{L}{d} = 100$ .

$P_j$  = น้ำหนักที่กระทำบนเสาเข็ม  $j$

$\alpha_{kj}$  = Interactor factor ระหว่างเสาเข็ม  $k$  กับ  $j$   
( $\alpha_{kj} = 1$  เมื่อ  $k = j$ )

ในกรณีที่เสาเข็มกลุ่มมีขนาดไม่เท่ากัน  $n$  ต้น ค่า  $\rho_k$  จะเป็น

$$\rho_k = \sum (\rho_{ij} P_j \alpha_{kj}) \dots\dots\dots (2.16)$$

โดยที่  $\rho_{ij}$  = ค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม  $j$  ภายใต้น้ำหนักกระทำ  
1 หน่วย

$\alpha_{kj}$  = Interaction factor ระหว่างเสาเข็ม  $k$  กับ  $j$   
โดยใช้ขนาดของเสาเข็ม  $j$

สำหรับการทรุดตัวของดินข้างใต้ เนื่องจากผลของเสาเข็มกลุ่มในสภาพชั้นดินเป็นชั้น ๆ สามารถใช้สมการที่ 2.8 ซึ่งค่าการทรุดตัวของดินใต้เสาเข็มในเสาเข็มกลุ่มจะมีความสำคัญมากกว่าในเสาเข็มเดี่ยว (Poulos, 1975)

Stein brenner (1934) ได้สมมติให้การกระจายหน่วยแรงเค้นในสภาพชั้นดินเป็นชั้น ๆ เหมือนกับชั้นดินที่สม่ำเสมอ ดังนั้นการทรุดตัวของดินใต้เสาเข็มในสภาพดินเป็นชั้น ๆ จำนวน  $m$  ชั้น หาได้จากสมการ

$$\rho = P/L \left\{ I_m/E_{sm} + \sum_{j=2}^{m-1} \{(I_j - I_{j+1})/E_{sj}\} \right\} \dots\dots\dots (2.17)$$

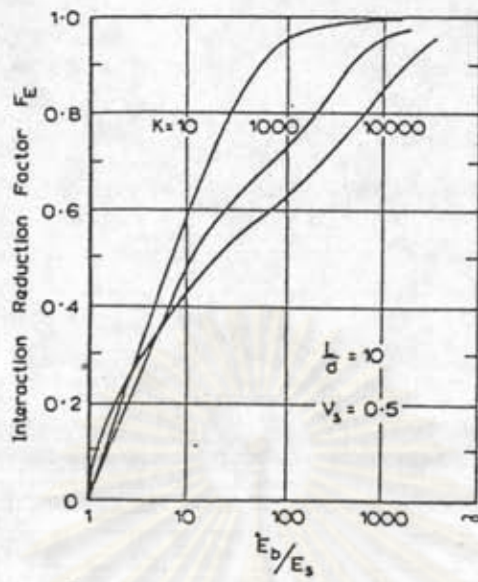
โดยที่  $\rho$  = ค่าการทรุดตัวของดินใต้กลุ่มเสาเข็ม

$I_j$  = Displacement influence factor บนแกน  
ของเสาเข็มที่ระดับบนสุดของชั้นดิน  $j$

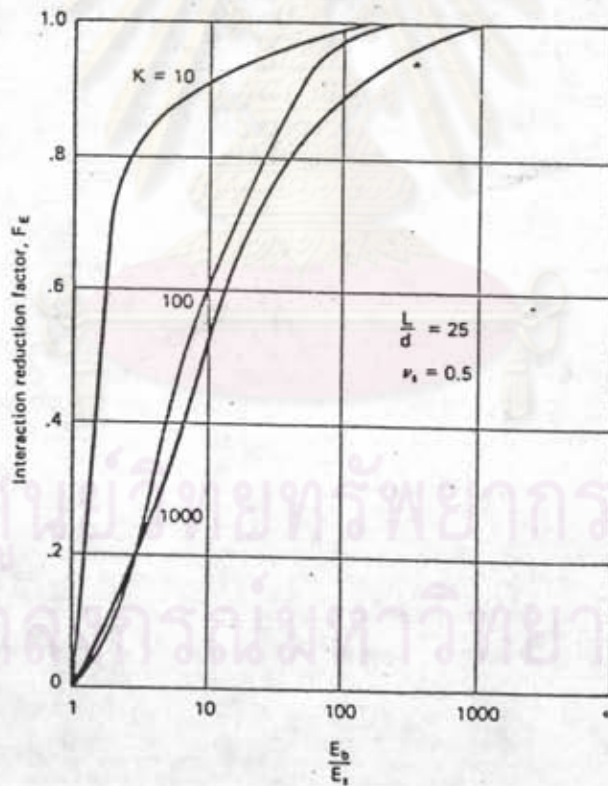
$E_{sj}$  = Young's modulus ของดินชั้น  $j$

2.2.1.4.1 การพิจารณาเสาเข็มกลุ่มให้เป็นเสาเข็มเดี่ยวสมมูลย์  
(Equivalent single pile)

Poulos and Mattes (1980) เสนอแนะว่าให้พิจารณาเสาเข็มกลุ่มแต่ละกลุ่มให้เป็นเสาเข็มเดี่ยวสมมูลย์ ที่มีการทรุดตัวเท่า ๆ กัน โดยแบ่งพิจารณาเป็น 2 กรณีคือ

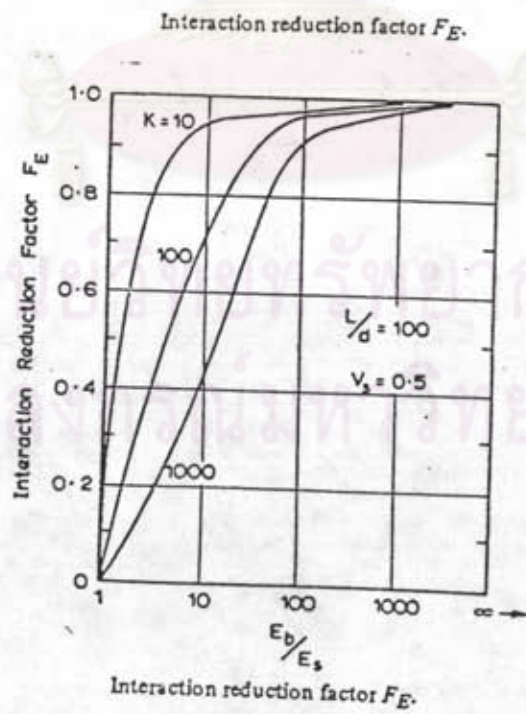
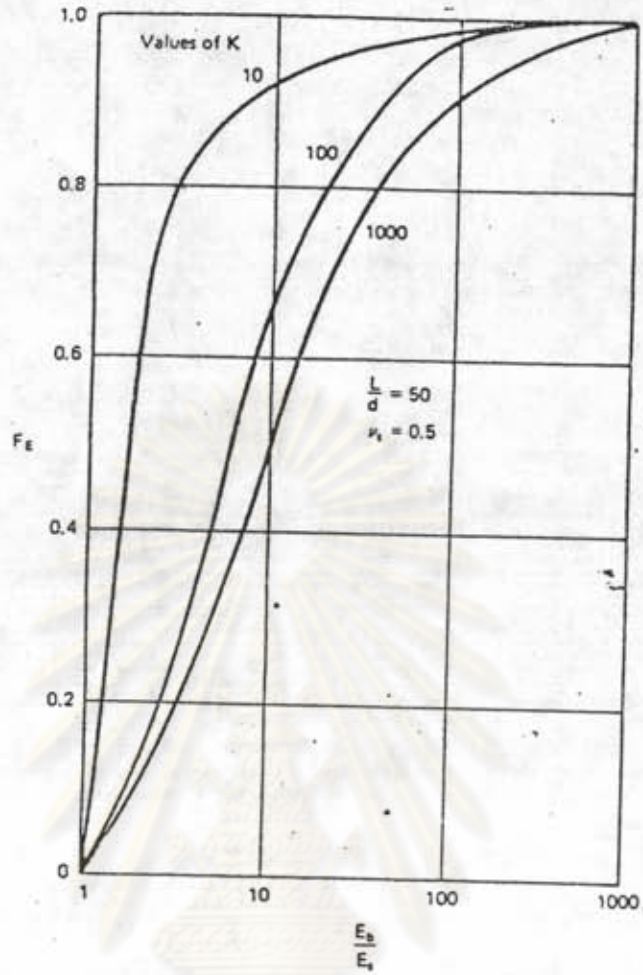


Interaction reduction factor  $F_E$ .



Interaction reduction factor  $F_E$ .

รูปที่ 2.17 ค่าปรับแก้ Interaction factor สำหรับความแข็งของ Bearing Stratum,  $F_E$





1. พิจารณาเป็นเสาเข็มเดี่ยวสมมุติที่มีพื้นที่หน้า คัดเท่ากับ พื้นที่หน้าตัดของกลุ่มเสาเข็ม ความยาวเสาเข็มเป็นความยาวสมมุติ,  $L_e$  ดังแสดงในรูปที่ 2.18
2. พิจารณาเป็นเสาเข็มเดี่ยวสมมุติที่มีความยาวเท่าเดิม แต่ เส้นผ่านศูนย์กลางเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางสมมุติ,  $d_e$  ดังแสดงในรูปที่ 2.19

#### 2.2.1.4.2 ผลกระทบของ Pile cap ต่อการทรุดตัวของเสาเข็ม

Poulos and Davis (1972) วิเคราะห์เสาเข็มในระบบ ฐานแพ (pile raft system) โดยแบ่งเป็นกลุ่ม ๆ ซึ่งการทรุดตัวของแต่ละกลุ่มจะสัมพันธ์ กับตัวแปลดอร์ ( $F_R$ ) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็มและเส้นผ่าน ศูนย์กลางสมมุติของแท่นหัวเสาเข็ม,  $d_e$  ดังแสดงในรูปที่ 2.20

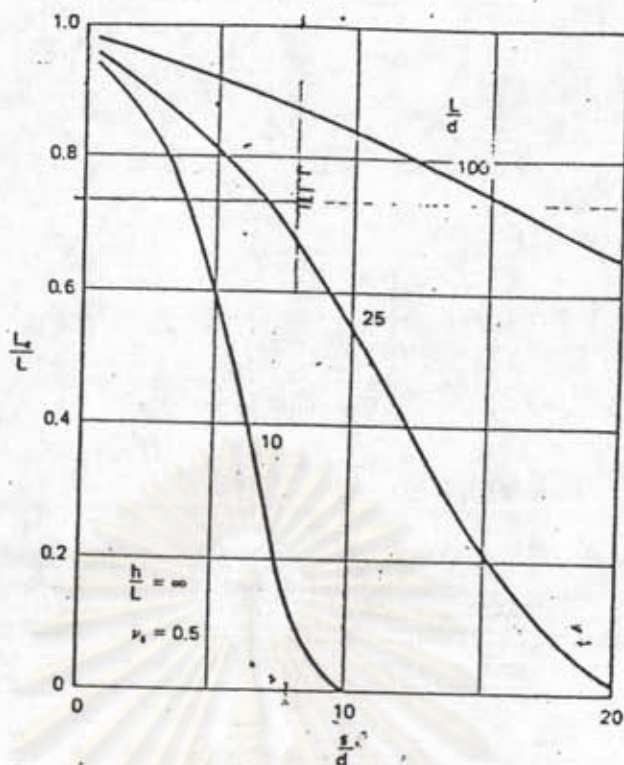
Butterfield and Banarjee (1971) ทำการวิเคราะห์ผล ของแท่นหัวเข็ม โดยวิธี Numerical สรุปได้ว่า แท่นหัวเข็มจะเพิ่มค่า Stiffness ของ ระบบฐานราก ทำให้ลดค่าการทรุดตัวของฐานรากได้ 5 ถึง 15 % ขึ้นอยู่กับขนาดกลุ่มเข็ม

ลักษณะของแท่นหัวเสาเข็มมี 2 ลักษณะ คือ

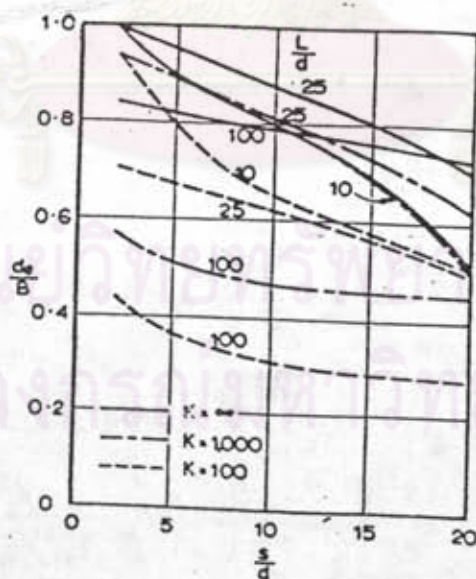
1. Flexible pile cap คือ เสาเข็มแต่ละต้นทรุดตัวได้อิสระ โดยมีการกระจายน้ำหนักเท่ากันทุกต้น
2. Rigid pile cap คือ เสาเข็มทุกต้นทรุดตัวเท่ากัน โดยมีการกระจายน้ำหนักไม่เท่ากันทุกต้น

Poulos (1972) และ Poulos and Davis (1980) ในทาง ปฏิบัติเสาเข็มทุกต้นรับน้ำหนักเท่ากัน ค่าการทรุดตัวจะไม่แตกต่างจากค่าการทรุดตัวเฉลี่ยของ เสาเข็มกลุ่มไม่ว่าจะเป็น Flexible cap หรือ Rigid cap และค่าการทรุดตัวของเสาเข็มกลุ่ม เท่ากับ 90 % ของค่าการทรุดตัวของเสาเข็มต้นกลางในกลุ่มให้ความถูกต้องเพียงพอ

2.2.1.5 คุณสมบัติของดิน (Soil parameters) ที่ใช้ประมาณค่าการ ทรุดตัวของฐานรากแบบเสาเข็ม โดยวิธี Modified Theory of Elasticity



รูปที่ 2.18 หาคความยาวสมมูลย์ของเสาเข็มเดี่ยวสมมูลย์สำหรับเสาเข็มกลุ่มแบบ Floating (After Davis and Mattes, 1971)



รูปที่ 2.19 หาเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลย์สำหรับเสาเข็มกลุ่มแบบ Floating (After Poulos and Mattes, 1971)

Poulos (1977) และ Poulos and Davis (1980) แนะนำให้ใช้ค่า Young's modulus ของดิน,  $E_s$  จากการทดสอบ Pile load test และคำนวณกลับจากการทดสอบเสาเข็ม

Poulos and Mattes (1974) ได้เสนอค่าสำหรับปรับแก้ผลการวิเคราะห์ค่า interaction ระหว่างเสาเข็มสองคัน  $F_c$  โดย

$$F_c = 1 / (1 - \alpha) \dots\dots\dots (2.18)$$

โดยที่  $F_c$  = อัตราส่วนของค่าการทรุดตัวจริงต่อค่าการทรุดตัวที่วัดได้ของเสาเข็มที่ทดสอบ ดังรูปที่ 2.21

$\alpha$  = Interaction factor ของเสาเข็ม โดยใช้ระยะห่างระหว่างเสาเข็มทดสอบกับเสาสมือ

Poulos (1977) และ Davis (1977) แนะนำให้ใช้ค่าโมดูลัสบิคหยุ่นของดินในสนามประมาณ 4-10 เท่าของค่าโมดูลัสบิคหยุ่นที่ได้จากการทดลอง

Brom Ian and Styles (1971) และ Mattes (1972) แนะนำให้ใช้ค่าโมดูลัสบิคหยุ่นของดินในสนามประมาณ 3-8 เท่าของค่าโมดูลัสบิคหยุ่นของดินที่ได้จากการทดลอง

Poulos (1972) และ Poulos and Davis (1980) ค่าโมดูลัสบิคหยุ่นของดินที่ใช้ประมาณค่าการทรุดตัวของดินข้างใต้เสาเข็ม ให้ใช้ค่าการยุบอัดตัวของดิน ดังสมการ

$$E_u = 3 E'_s / 2 (1 + \nu'_s) \dots\dots\dots (2.19)$$

$$E_s = (1 + \nu'_s) (1 + 2\nu'_s) / m_\nu (1 + \nu'_s) \dots\dots (2.20)$$

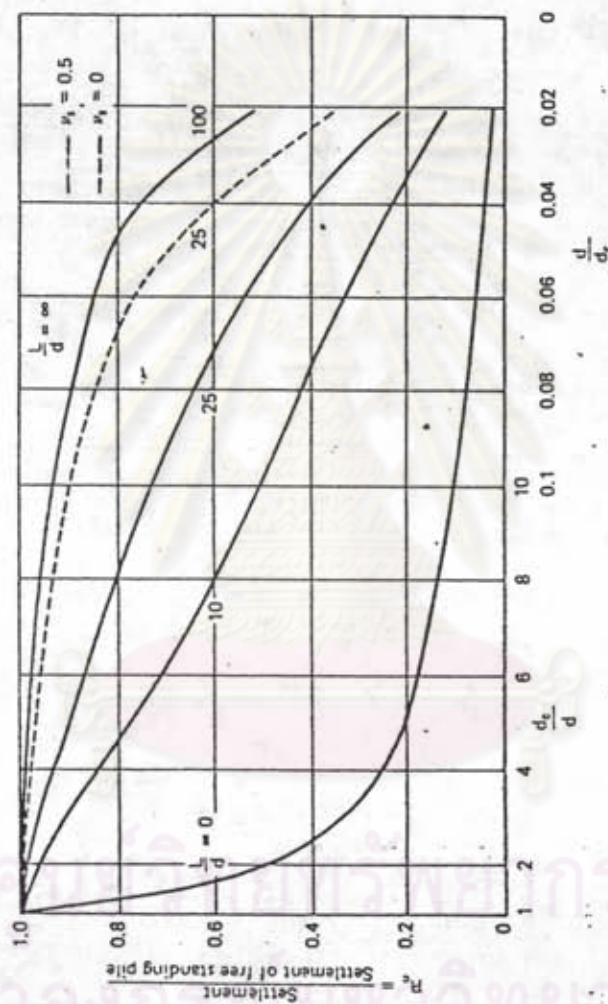
โดย  $E'_s$  = โมดูลัสบิคหยุ่นของดินในสภาวะระบายน้ำ

$\nu'_s$  = อัตราส่วนปัวซองในสภาวะระบายน้ำของดิน

สำหรับอัตราส่วนปัวซองให้ใช้ค่าอัตราส่วนปัวซองแบบระบายน้ำสำหรับดินเหนียวชนิดต่าง ๆ ค่าอัตราส่วนปัวซองแสดงในตารางที่ 2.1 และ Pile stiffness factor (K) สำหรับเสาเข็ม และดินชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.2

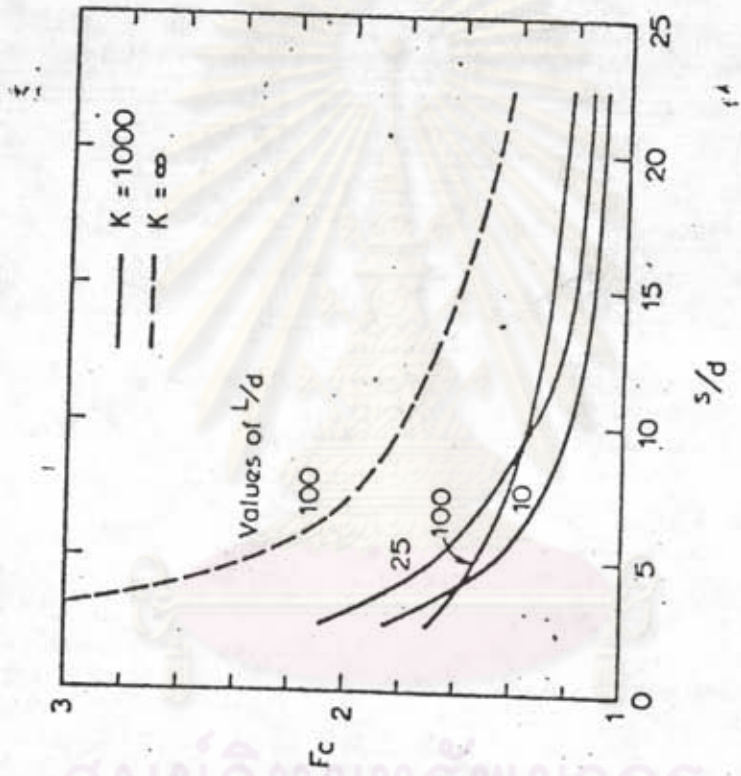
### 2.2.2 อัตราการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยว

Poulos and Davis (1968) เสนอการประมาณค่าอัตราการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยว ดังในรูปที่ 2.22 และ 2.23



รูปที่ 2.20 ค่าปรับแก้เนื่องจากอิทธิพลของแท่นหัวเข็ม (Pile cap), Fr (Davis and

Poulos, 1972)



รูปที่ 2.21 ค่าปรับแก้สำหรับการทดสอบเสาเข็มลอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 2.22 แสดงการหาค่าอัตราทรุดตัวของ Permeable pile และ Impermeable pile ที่  $L/d = 25$  และ  $h/L = 2$  ชั้นดินวางอยู่บน permeable base และมีค่าอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.5 ซึ่งจะพบว่าอัตราทรุดตัวของ permeable pile มีค่ามากกว่า Impermeable pile

$$\text{เมื่อ time factor, } T_v = C_{st}/L^2 \dots\dots\dots(2.21)$$

โดย  $T_v =$  time factor

$C_s =$  สัมประสิทธิ์การอัดตัวคาน้ำ 3 มิติ

$$= kE' / 3 \gamma_w (1-2 \nu')$$

$t =$  เวลา

$L =$  ความยาวเสาเข็ม

จะพบว่า อัตราการทรุดตัวจะมีค่าแปรผันตาม  $L/d$  ซึ่งอัตราส่วน  $L/d$  จะมีผลกระทบต่ออัตราการทรุดตัวน้อยมาก เมื่อมีค่าอยู่ระหว่าง 25 ถึง 200 และอัตราการทรุดตัวจะมีค่าแปรผกผันกับ  $h/L$  แต่ผลกระทบของ  $h/L$  จะมีผลกระทบน้อยมากเมื่อ  $h/L$  มีค่าอยู่ระหว่าง 5 และ 1.5

จากรูปที่ 2.23 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างอัตราการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยวที่ค่า  $L/d$  เท่ากับ 0, 10 และ 25 สำหรับค่าอัตราส่วนปัวซอง,  $\nu'_s = 0.5$  จะพบว่าอัตราการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยวที่  $L/d = 10$  และ 25 จะมีค่าช้ากว่าที่  $L/d = 0$  และเมื่อค่า  $L/d$  มีค่าลดลงแล้ว อัตราการทรุดตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้น

## 2.3 การประมาณค่าการทรุดตัวของฐานรากคาน้ำ

เมื่อมีน้ำหนักมากกระทำต่อฐานราก จะทำให้เกิดการทรุดตัวขึ้น เนื่องมาจากการทรุดตัวทันทีทันใด (Immediate Settlement) และการทรุดตัวแบบอัดตัวคาน้ำ (Consolidation Settlement) ดังมีรายละเอียดดังนี้

### 2.3.1 การทรุดตัวแบบทันทีทันใดหรือแบบอันเดรน (Immediate or Undrained Settlement, $p_i$ )

เมื่อชั้นดินอ่อนได้รับแรงกระทำจากภายนอก จะทำให้เกิดการทรุดตัวของมวลดินในแนวตั้งและแนวข้าง ๆ พร้อมกัน โดยปริมาตรของมวลดินไม่เปลี่ยนแปลง เพราะค่า

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าประมาณของอัตราส่วนปัวซองของดินแบบระบายน้ำ,  
(Poulos, 1975)

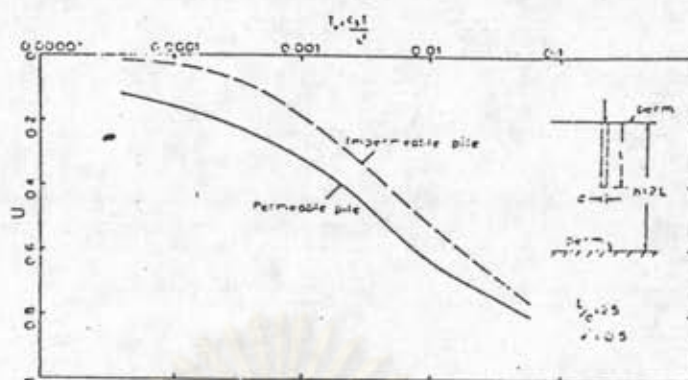
ชนิดของดินเหนียว	ค่า $\nu_s$
Stiff over Consolidated clay	0.1 - 0.2 (0.15)
Medium clay	0.2 - 0.35 (0.3)
Soft normally Consolidated clay	0.35 - 0.45 (0.4)

หมายเหตุ ค่าในวงเล็บเป็นค่าโดยเฉลี่ยที่แนะนำให้ใช้

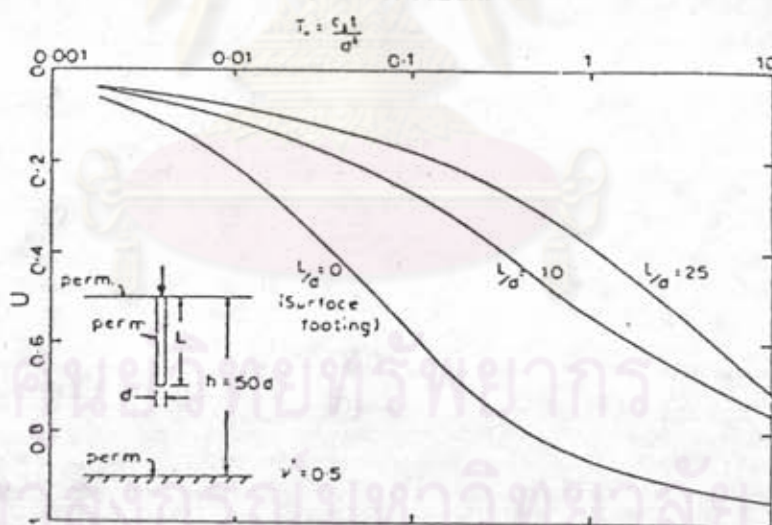
ตารางที่ 2.2 แสดงค่าเฉลี่ยของ Pile Stiffness Factor, K

ชนิดของดิน	Pile Material		
	Steel	Concrete	Timber
Soft Clay	60,000	6,000	3,000
Medium Clay	20,000	2,000	1,000
Stiff Clay	3,000	300	150
Loose Sand	15,000	1,500	750
Dense Sand	5,000	500	250

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.22 การประมาณอัตราการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยว



รูปที่ 2.23 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างอัตราการทรุดตัวของเสาเข็มที่ L/d ต่าง ๆ



ความซึมของน้ำต่ำ จึงเรียกเป็นการทรุดตัวแบบอั้นเดรน (Undrained Settlement,  $\rho_i$ ) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีอีลาสติก (Theory of Elasticity) ดังนี้

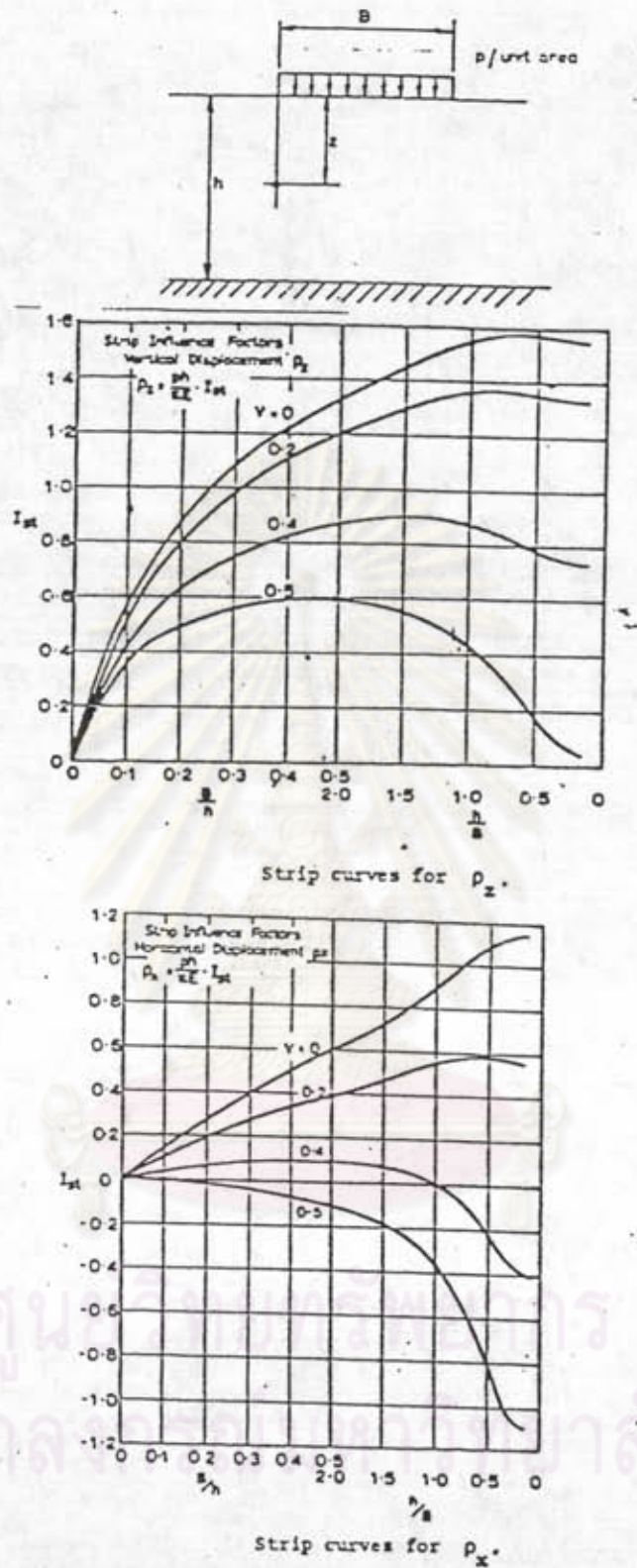
$$\rho_i = \frac{ph}{\pi E_u} I_{st} \dots\dots\dots (2.22)$$

- โดย  $p$  = ขนาดของหน่วยแรงภายนอกที่กระทำระดับผิวดิน  
 $B$  = ความกว้างน้อยที่สุดของหน่วยแรงกระทำ  
 $\nu$  = อัตราส่วนปัวซอง  
 $E_u$  = โมดูลัสของดินในสภาพอั้นเดรน  
 $I_{st}$  = Influence factor หารจากรูปที่ 2.24  
 $h$  = ความหนาของชั้นดิน

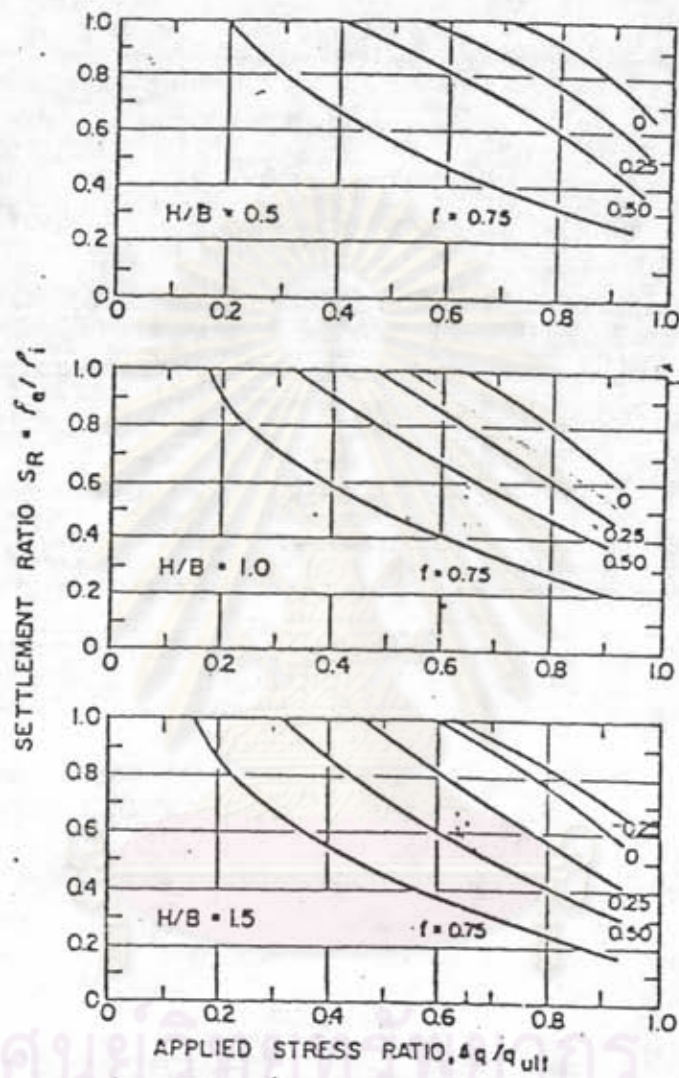
D'Appolonia, Poulos และ Ladd (1971) ได้เสนอวิธีการประมาณค่าการทรุดตัวแบบอั้นเดรน (Undrained Settlement) โดยใช้ทฤษฎีอีลาสติก และปรับแก้ผลของ Local Yielding ดังนี้

$$\rho_i = \frac{\rho_e}{SR} \dots\dots\dots (2.23)$$

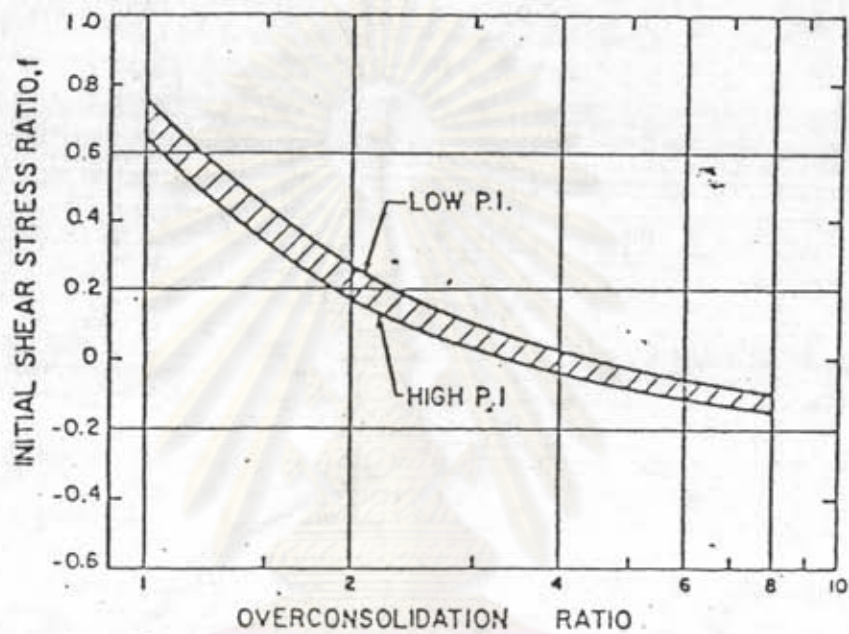
- โดย  $\rho_e$  = การทรุดตัวจากทฤษฎีอีลาสติก สมการที่ 2.22  
 $SR$  = Settlement Ratio จากรูปที่ 2.25  
 $q_u$  = Ultimate bearing capacity =  $4.5 S_u$  (FV)  
 (Eide, 1969)  
 $f$  = ค่า Initial shear stress ratio จากรูปที่ 2.26  
 หรือ  $f = \frac{(1 - K_o)}{2S_u / \sigma_{vo}}$



รูปที่ 2.24 แสดงการหาค่า Influence Factor สำหรับการคาดคะเนการทรุดตัวและการเคลื่อนตัวด้านข้างของ Load Area (Poulos, 1967 b)



รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง Settlement Ratio กับ Applied Stress Ratio สำหรับ Strip Load กระทำบน Isotropic Homogeneous Foundation (จาก D'Appolonia et al, 1971)



รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง Initial Shear Stress กับ Overconsolidation Ratio (จาก D'Appolonia et al., 1971)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 2.3.2 การทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำครั้งแรก (Primary Consolidation, $\rho_c$ )

โดยหลักการพื้นฐานที่ว่าในมวลดินจะมีค่าแรงเค้นประสิทธิผลค่าหนึ่ง (Effective Stress) ที่ค่าอัตราส่วนโพรงค่าหนึ่ง (Void Ratio) ซึ่งเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำจนเกินค่าแรงเค้นประสิทธิผล (Effective Stress) ในขณะนั้น น้ำที่อยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินจะรับแรงกระทำภายนอกส่วนที่เกินนี้ไว้ ซึ่งจะทำให้เกิดความดันน้ำโพรงเพิ่มขึ้นในมวลดิน (Excess Pore Pressure,  $\Delta u$ ) เป็นผลให้เกิดการไหลของน้ำออกจากมวลดิน ทำให้เกิดการทรุดตัวและการทรุดตัวสิ้นสุด เมื่อความดันน้ำโพรงเพิ่มมีค่าเท่ากับศูนย์

ในการคำนวณการทรุดตัว จะต้องอาศัยข้อมูลจากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ (Consolidation test) และประมาณค่าการทรุดตัวโดยวิธีปฏิรูปกลศาสตร์พื้นฐานของ Terzaghi (1925) โดยสมมติการทรุดตัวทั้งหมดเกิดขึ้นในทิศทางเดียว และใช้พารามิเตอร์ ในการคำนวณจากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ 1 มิติ ซึ่งการคำนวณสามารถหาได้โดยใช้พารามิเตอร์ CR และ RR ดังนี้

ก. กรณี  $\bar{\sigma}_{vm} \leq \bar{\sigma}_{vo} < \bar{\sigma}_{vf}$

$$\rho_c = \Sigma \left\{ CR \cdot \Delta H \cdot \log \frac{\bar{\sigma}_{vf}}{\bar{\sigma}_{vo}} \right\} \dots\dots\dots (2.24)$$

โดยที่ CR = อัตราส่วนการอัดแน่น (Compression Ratio)

$\bar{\sigma}_{vo}$  = หน่วยแรงเค้นประสิทธิผลทางตั้งตามธรรมชาติ

$\bar{\sigma}_{vf}$  = หน่วยแรงเค้นประสิทธิผลทางตั้งสุดท้ายหลังจากรับน้ำหนัก

ข. กรณี  $\bar{\sigma}_{vo} \leq \bar{\sigma}_{vf} < \bar{\sigma}_{vm}$

$$\rho_c = \Sigma \left\{ RR \cdot \Delta H \cdot \log \frac{\bar{\sigma}_{vf}}{\bar{\sigma}_{vo}} \right\} \dots\dots\dots (2.25)$$

โดยที่ RR = อัตราส่วนการอัดแน่นซ้ำ (Recompression Ratio)

$\bar{\sigma}_{vm}$  = หน่วยแรงเต็มประสิทธิภาพสูงสุดที่เคยได้รับมาในอดีต

ก. กรณี  $\bar{\sigma}_{vo} \leq \bar{\sigma}_{vm} < \bar{\sigma}_{vf}$

$$\rho_c = \Sigma \left\{ RR \cdot \Delta H \cdot \log \frac{\bar{\sigma}_{vm}}{\bar{\sigma}_{vo}} + CR \cdot \Delta H \cdot \log \frac{\bar{\sigma}_{vf}}{\bar{\sigma}_{vm}} \right\} \dots (2.26)$$

จากการทดสอบสมการอัดตัวกาน้ำ 1 มิติ ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่แสดงคุณสมบัติการยุบอัดตัวของดิน มีดังนี้

ก) สัมประสิทธิ์ความอัดได้เชิงปริมาตร (Coefficient of Volume Compressibility,  $m_v$ ) เป็นอัตราส่วนระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดในแนวดิ่งต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงเต็มประสิทธิภาพในแนวดิ่ง หาได้จาก

$$m_v = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta \sigma_v} = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma_v (1 + e_0)} = \frac{1}{E_{oed}} \dots (2.27)$$

$\Delta \epsilon$  = อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดในแนวดิ่ง

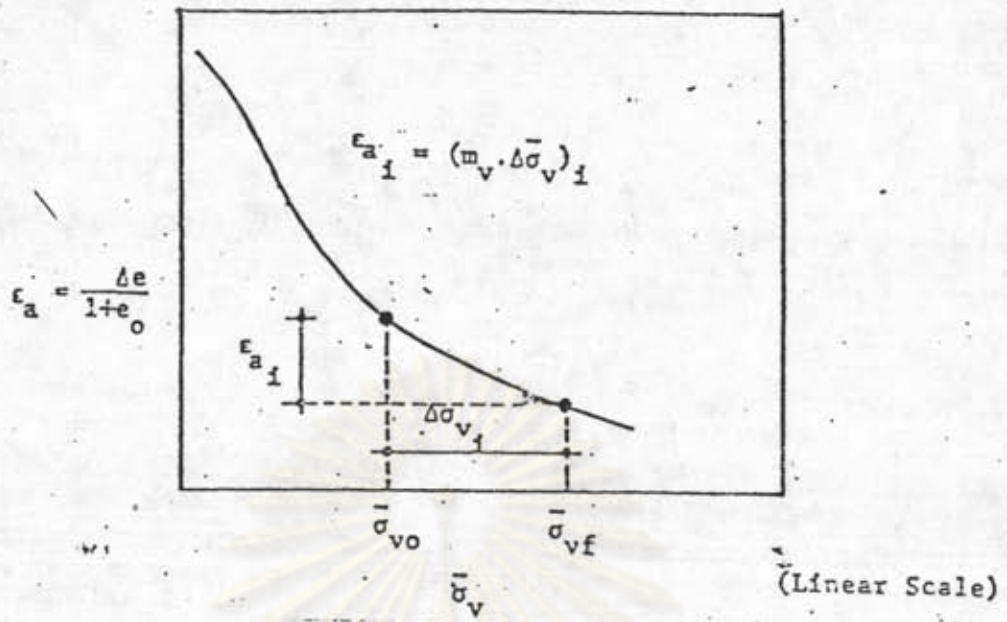
$\Delta e$  = อัตราการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนโพรง

$e_0$  = อัตราส่วนโพรงเริ่มต้น

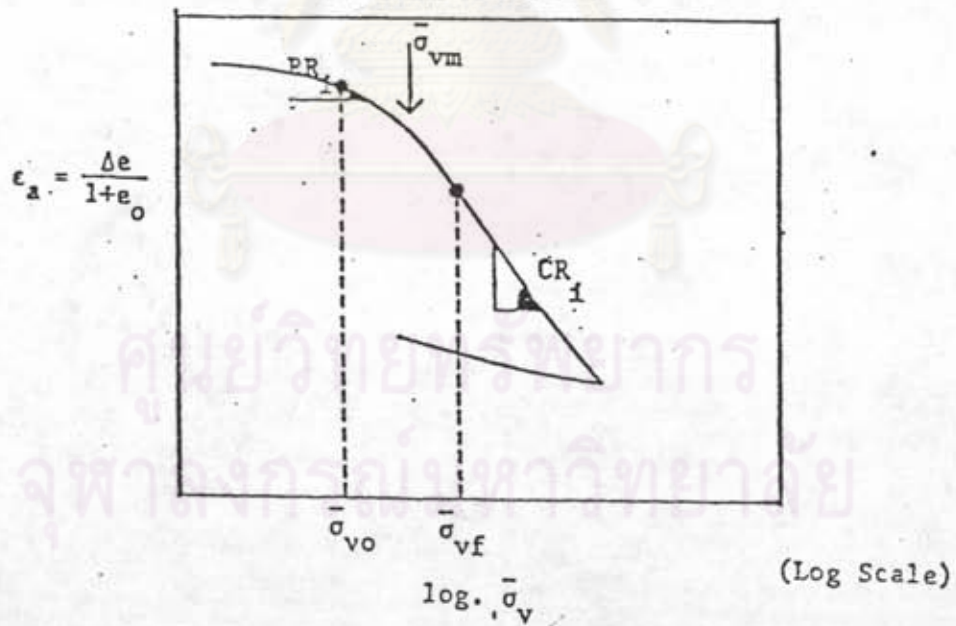
$\Delta \sigma_v$  = อัตราการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงประสิทธิภาพในแนวดิ่ง

ค่า  $m_v$  สามารถหาได้จากการทดสอบอัดตัวกาน้ำ 1 มิติ ดังรูปที่ 2.27

ข) อัตราส่วนการอัดแน่น (Compression Ratio, CR) คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดในแนวดิ่ง ต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงประสิทธิภาพในแนวดิ่งในส่วนของ Virgin line ใน Log Scale ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



รูปที่ 2.27 แสดงหลักการคำนวณสัมประสิทธิ์อัดตัวเชิงปริมาตร,  $m_v$  (Coefficient of Volume Compressibility)



รูปที่ 2.28 วิธีการหาอัตราส่วนการอัดแน่น (Compression Ratio, CR) และอัตราส่วนการอัดแน่นซ้ำ (Recompression Ratio, RR)

$$CR = \frac{\Delta \varepsilon}{\log \Delta \sigma_v} \dots\dots\dots (2.28)$$

ค่า CR สามารถหาได้ดังรูปที่ 2.28

ค) อัตราส่วนการอัดแน่นซ้ำ (Recompression Ratio, RR) เป็นอัตราส่วนระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดในแนวดิ่ง ต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง ในช่วงก่อน Virgin line ใน Log Scale ดังแสดงในรูปที่ 2.28

### 2.3.3 การประมาณค่าอัตราการทรุดตัว

ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation,  $C_v$ ) สามารถหาค่าได้หลายวิธี ดังต่อไปนี้

#### 2.3.3.1 จากผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ

1. วิธีกรณฑ์ที่สองของเวลา (The square root of time fitting method) Taylor (1948) พบว่า 0-60 % ของการอัดตัวคายน้ำของกราฟ  $\bar{U}_z$  และ  $T_v$  เป็นเส้นตรง และระยะในแนวราบที่ต่อออกไป 1.15 เท่าของระยะในแนวราบถึงแนวเส้นตรงที่ต่อออกไป คือ 90 % ของการอัดตัวคายน้ำ ดังรูปที่ 2.29

$$C_v = \frac{0.848 H^2}{t_{90}} ; T_v = 0.848 \dots\dots\dots(2.29)$$

โดยที่ H = ระยะทางระบายน้ำ

$t_{90}$  = เวลาที่ 90% การอัดตัวคายน้ำ

2. วิธีลอการิทึมของเวลา (The logarithm of time fitting method)



Casagrande (1936) พบว่าจุดตัดของเส้นสัมผัสกับ Asymptote ของกราฟที่ได้จากทฤษฎี ดังในรูปที่ 2.30 เป็น 100 % ของการอัดตัวคายน้ำ

$$C_v = \frac{0.197 H^2}{t_{50}} ; T_v = 0.197 \quad \dots\dots\dots (2.30)$$

โดยที่  $t_{50}$  = เวลาที่ 50 % ของการอัดตัวคายน้ำ

2.3.3.2 จากข้อมูลแรงดันน้ำในสนาม (The pore pressure observation)

$$\bar{U}_z = 1 - \Delta u_e / \Delta u_o \quad \dots\dots\dots (2.31)$$

โดยที่  $\bar{U}_z$  = เปอร์เซนต์การอัดตัวคายน้ำ

$\Delta u_e$  = ความดันน้ำโพรงเพิ่มที่เวลา  $t$  ใด ๆ

$\Delta u_o$  = ความดันน้ำโพรงเพิ่มที่เวลา  $t = 0$

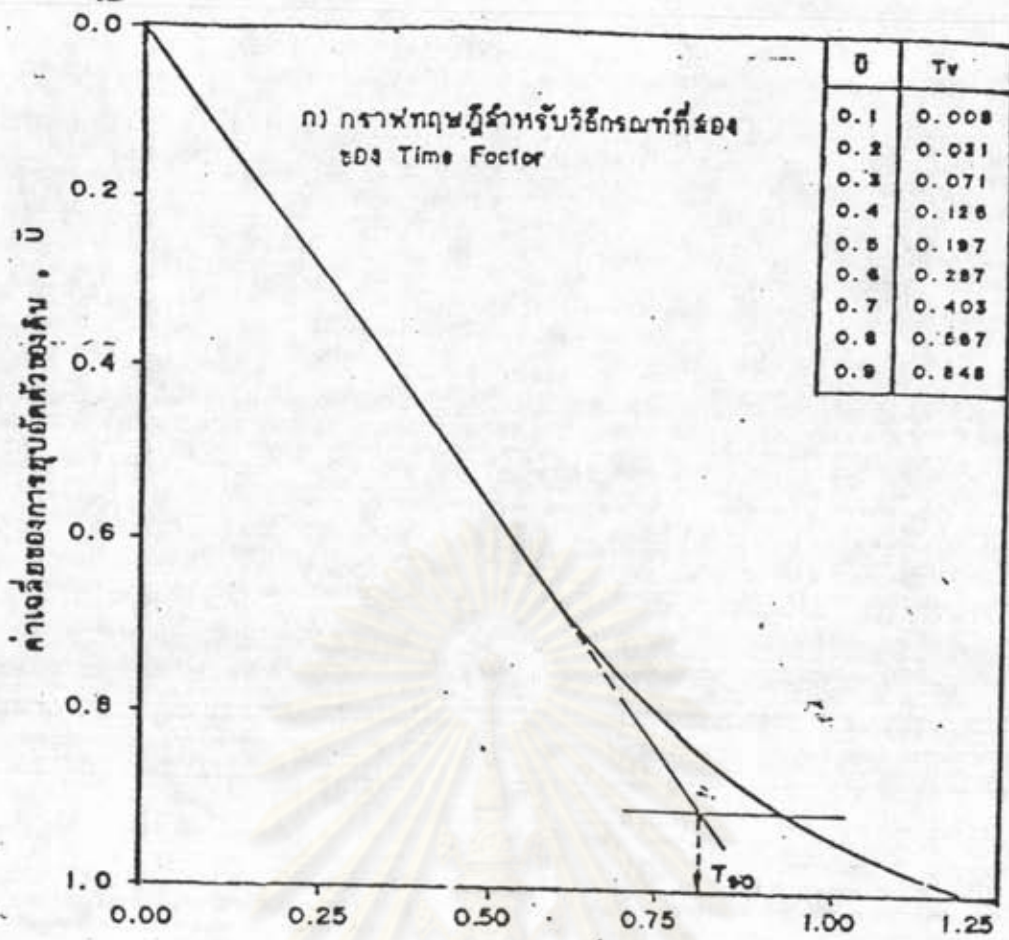
จากทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำของ Terzaghi 1 มิติ

$$C_v = \frac{\Delta T_v H^2}{\Delta t} \quad \dots\dots\dots (2.32)$$

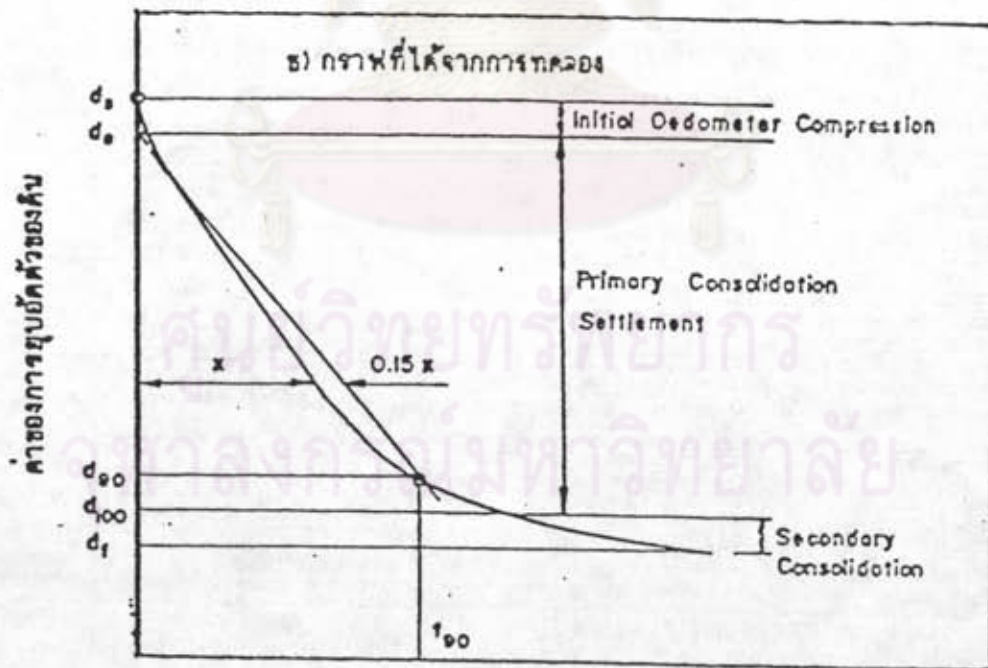
$T_v$  = Time factor ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับ และ  $Z/H$  ดังรูปที่ 2.31

### 2.3.3.3 วิธีของ Asaoka

ดร.สุรจักร (2527) แนะนำว่า คุณสมบัติของดินที่จะควบคุม อัตราการทรุดตัว คือ ค่า  $C_v$  ซึ่งผลที่วัดได้ในห้องปฏิบัติการจะมีค่าต่ำเกินไป โดยเฉพาะใน บริเวณที่สูบน้ำบาดาลจะยิ่งเร่งให้อัตราการทรุดตัวเร็วขึ้น

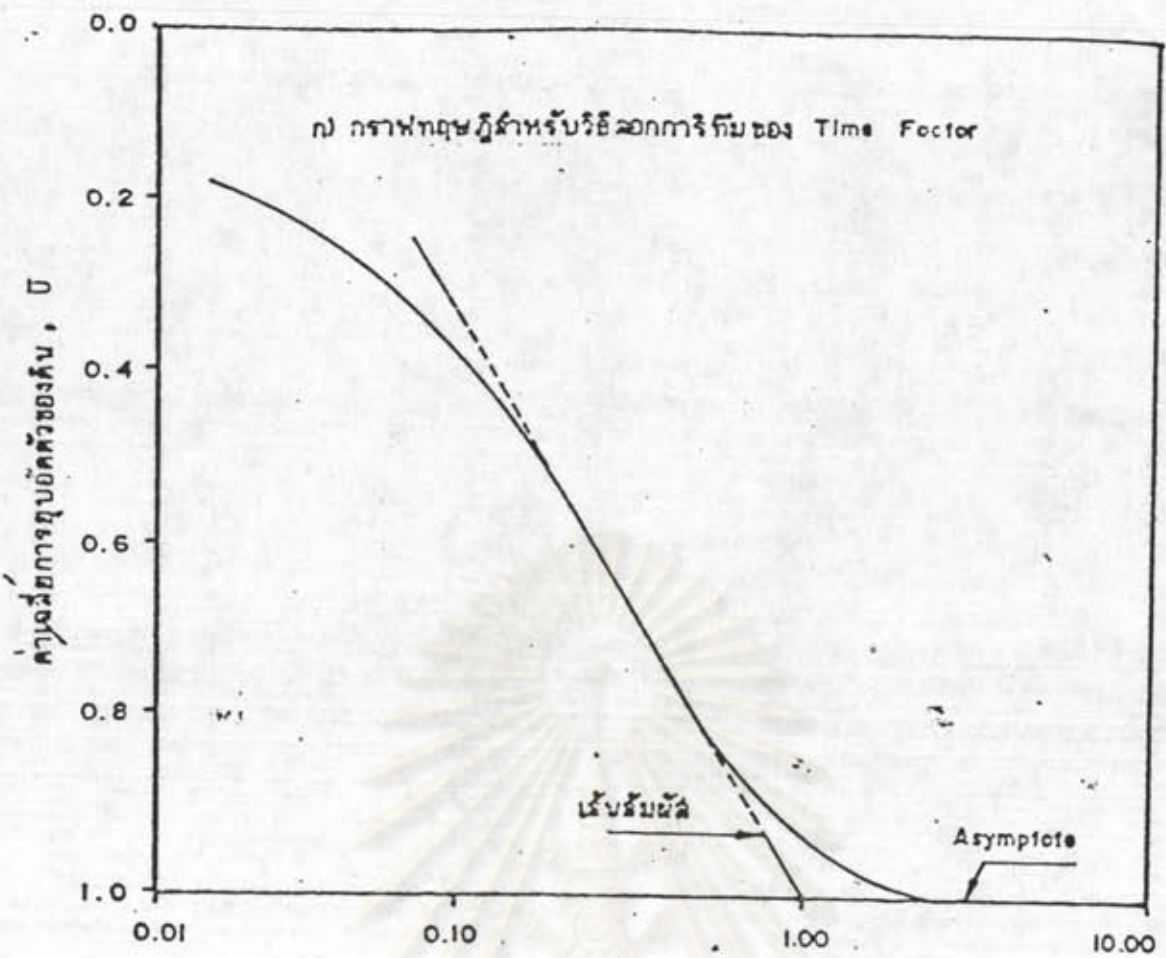


กราฟที่ ๒๑๑ ๒๑๑ Time Factor,  $\sqrt{T_v}$  (After Taylor, 1948)

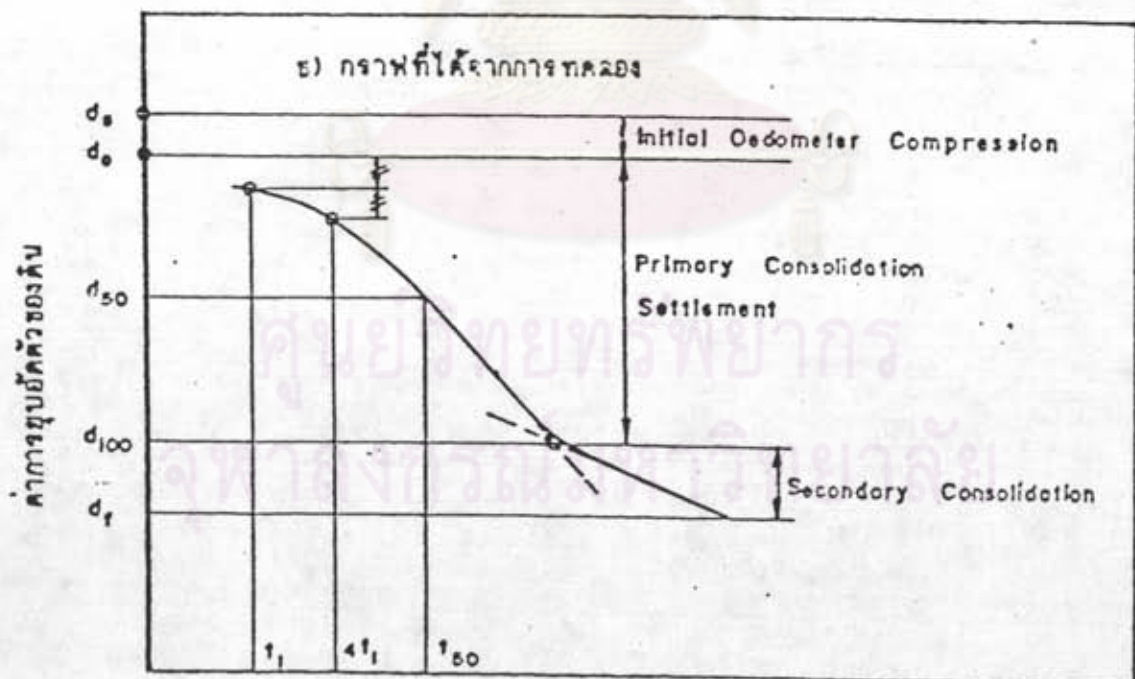


กราฟที่ ๒๑๑ ของเวลา

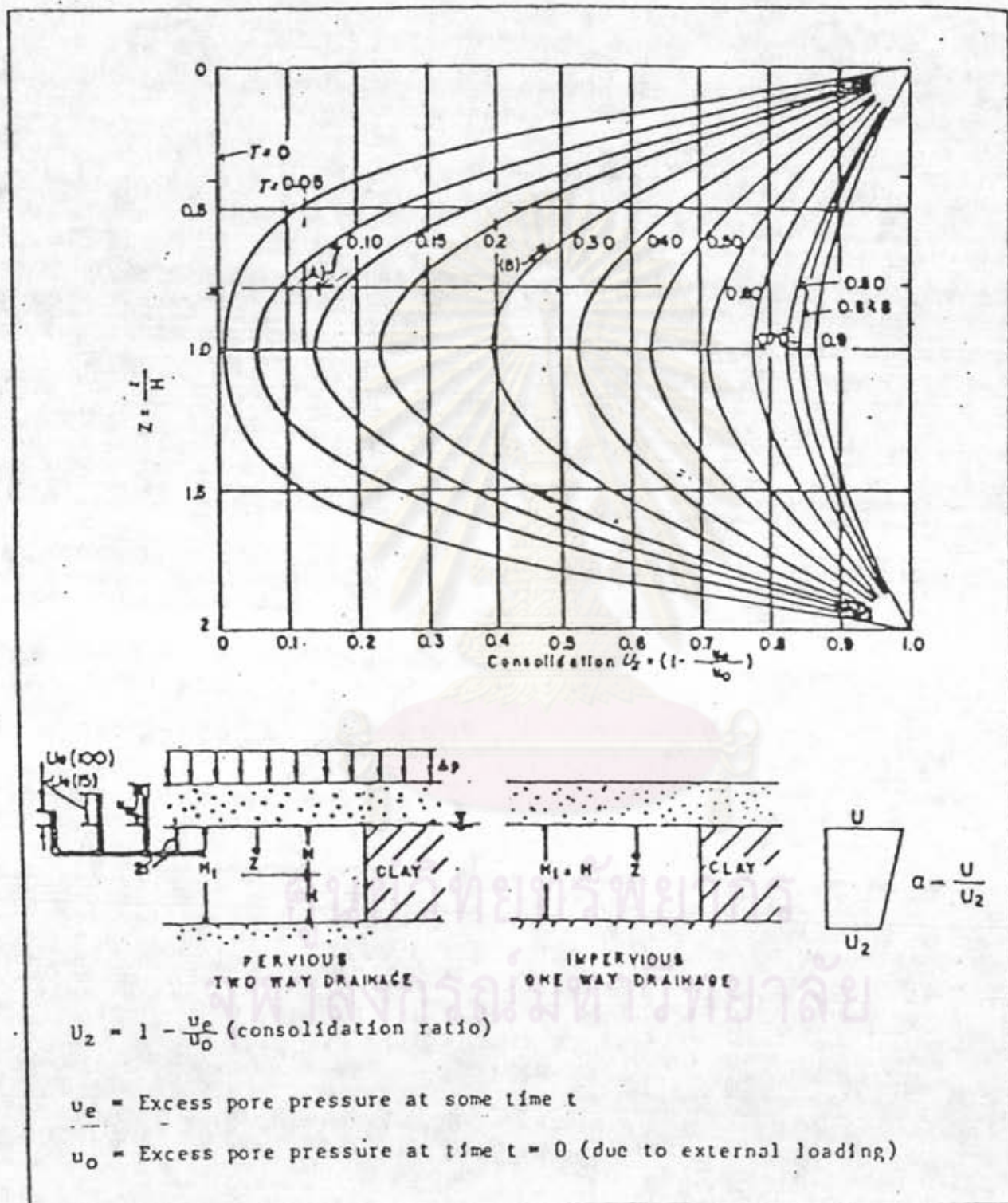
รูปที่ 2.29 แสดงการหาค่า  $t_{90}$  โดยวิธีกราฟที่ ๒๑๑ ของเวลา



ลอกการิทึมของ Time Factor ,  $T_v$  (log scale) (After Casagrande, 1936)



ลอกการิทึมของ เวลา  
รูปที่ 2.30 แสดงการหาค่า 150 โดยวิธีลอกการิทึมของเวลา



รูปที่ 2.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\bar{U}$ ,  $Z/H$  และ  $T$  (DM-7)

วิธีที่ดีที่สุด คือ การเก็บข้อมูลการทรุดตัวกับเวลาในสนาม แล้ว  
จึงทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Asaoka (1978) ดังนี้

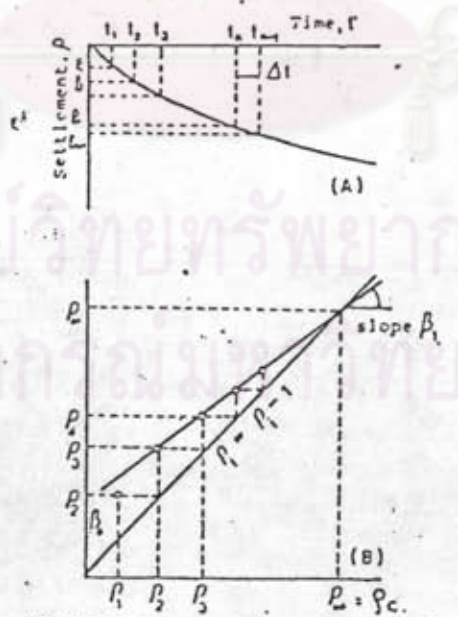
วิธีการหาค่า  $C_v$  ด้วยวิธี Asaoka

นำข้อมูลการทรุดตัวกับเวลาในสนาม นำมาเขียนเส้นความสัมพันธ์ภายในช่วงเวลาที่เหมาะสม,  $\Delta t$  ( $\Delta t \cong 30 - 100$  วัน) อ่านค่าการทรุดตัว  $\rho_1, \rho_2, \rho_3 \dots\dots\dots$  ณ เวลา  $t_1, t_2, t_3 \dots\dots\dots$  ดังแสดงในรูปที่ 2.32 (a) จากนั้นทำการ plot จุด  $(\rho_{i-1} \cdot \rho_1)$  ลงใน coordinate  $\rho_{i-1}$  กับ  $\rho_1$  ดังแสดงในรูปที่ 2.32 b ลากเส้นตรงผ่านจุดที่ plot ไว้ แล้วหาความชันของเส้นตรง ( $\beta_1$ )

ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคาน้ำ ( $C_v$ ) หาได้จากสมการ

$$C_v = -5/12 \frac{H_d \ln \beta_1}{\Delta t} \dots\dots\dots (2.33)$$

โดยที่  $H_d =$  ความยาวเส้นทางระบายน้ำ (drainage path)



รูปที่ 2.32 แสดงการหาค่าการทรุดตัว ( $\rho_c$ ) โดยวิธีของ Asaoka

Magnan and Deroy (1980) แนะนำว่าค่า  $C_v$  จะเชื่อถือได้เมื่อมีข้อมูลการทรุดตัวในช่วงเวลาที่นานพออย่างน้อยเท่ากับ 60 % ของระดับการอัดตัวคายน้ำ

ให้ลากเส้นตรงทำมุม  $45^\circ$  ตัดกับเส้นตรงที่ plot ไว้ จุดตัดที่ได้จะเป็นค่าการทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำสุดท้าย (final consolidation settlement,  $\rho_c$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.32 b

สำหรับค่าการทรุดตัวที่เวลาใด ๆ หาได้จาก

$$\rho_t = \bar{U}\rho_c \quad \dots\dots\dots (2.34)$$

โดยที่  $\bar{U}$  = ระดับการอัดตัวคายน้ำ (Degree of consolidation) เป็นฟังก์ชันกับ Time factor (T) ดังแสดงในรูปที่ 2.31

$$T = C_v t / H_d^2 \quad \dots\dots\dots (2.35)$$

Poulos and Davis (1968) เปรียบเทียบระหว่างฐานรากเสาเข็มเดี่ยวแบบลอยกับฐานรากระดับผิวดิน พบว่า ในกรณีความยาวเสาเข็มสั้น จะมีค่าการทรุดตัวแตกต่างกันไม่มาก และอัตราการทรุดตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวเสาเข็มเพิ่มขึ้น

$$\text{เมื่อ } T = C_v t / d^2 \quad \dots\dots\dots (2.36)$$

โดยที่  $d$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มเดี่ยว

$T$  = Time factor

$C_v$  = สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของชั้นดินที่มีเสาเข็มฝังอยู่