



บทที่ 2

## ทฤษฎี และสมมุติฐาน

เมื่อมวลดินได้รับความเค้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงกระทำภายนอกที่ฐานรากแบบเสาเข็ม ถายน้ำหนักบรรทุกจากโครงสร้างลงสู่มวลดินโดยรอบ มวลดินบริเวณรอบ ๆ เสาเข็มจะเกิดการเคลื่อนตัว ถ้การเคลื่อนตัวนี้เกิดขึ้นมากเกินไปก็จะเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งก่อสร้าง หรือทำให้สิ่งก่อสร้างไม่สามารถใช้งานได้ตามที่ออกแบบไว้ ดังนั้นการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของมวลดินและสิ่งก่อสร้างจึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยเฉพาะการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งเมื่อสิ่งก่อสร้างมีปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียว

ใ้ค้มีผู้ทำการศึกษา และพยายามวิเคราะห์การทรุดตัวของฐานรากแบบเสาเข็ม โดยอาศัยทฤษฎีและสมมุติฐานที่แตกต่างกันไป เพื่อให้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด ใ้ค้แก่ Terzaghi และ Peck (1948) , Tomlinson (1979) และ Poulos และ Davis (1980) ซึ่งแต่ละวิธีมีรากฐานและสมมุติฐานของการวิเคราะห์ไม่เหมือนกัน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีและสมมุติฐานต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์การทรุดตัวของฐานรากแบบเสาเข็มในชั้นดินเหนียว และให้ข้อมูลที่แสดงถึงความแม่นยำของทฤษฎีและสมมุติฐานต่าง ๆ

### 2.1 การยุบตัวของดินเหนียว (Compression of Cohesive Soil)

โดยทั่วไปเมื่อดินเหนียวอัดตัวด้วยน้ำ ใ้ค้รับน้ำหนักกระทำจากฐานราก โดยไม่เกิดการพังทลาย การทรุดตัวของชั้นดินเหนียวจะประกอบด้วย

#### 2.1.1 การทรุดตัวทันที (Immediate Settlement, $p_i$ )

ในกรณีที่ดินเหนียวอัดตัวด้วยน้ำ การทรุดตัวทันทีที่จะเกิดขึ้นใ้ค้คือเมื่อลักษณะของความเค้น ทำให้มวลดินเกิดความเครียดใ้ค้ในลักษณะ 2 มิติ และ 3 มิติเท่านั้น โดยการทรุดตัวนี้จะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กับการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง โดยปริมาตรไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดินเหนียวที่อัดตัวด้วยน้ำไม่สามารถเปลี่ยนแปลงปริมาตรใ้ค้ทันที เนื่องจากดินเหนียวมีความสามารถใ้ค้รับน้ำซึมผ่านใ้ค้ต่ำ ดังนั้นการทรุดตัวทันทีของดินเหนียวที่อัดตัวด้วยน้ำจึงอยู่ในสภาพไม่ทันระบายน้ำ (Undrained Condition) ความเค้นที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดความดันน้ำในโพรงดินเพิ่มขึ้น (Excess Pore Water Pressure) ซึ่งจะใ้ค้ทำให้เกิดการไหลของน้ำออกจากมวลดิน หลังจากใ้ค้รับความเค้นเพิ่ม

ขึ้น ภัยผลของขบวนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Process) และการทรุดตัวที่จะเกิดขึ้นตามมาเป็นฟังก์ชันกับเวลา

2.1.2 การยุบอัดตัวครั้งแรก (Primary Consolidation ,  $p_c$ )

การทรุดตัวลักษณะนี้เกิดขึ้นเนื่องจาก หน่วยแรงภายนอกมากกระทำต่อมวลดิน ทำให้เกิดความดันน้ำในโพรงดินเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ต่อมาเกิดการไหลของน้ำจากมวลดินที่ถูกแรงภายนอกมากกระทำ ตลอดจนเกิดการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงประสิทธิผล โดยน้ำจะไหลสู่มวลดินโดยรอบ ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของช่องว่างในมวลดิน ทำให้เกิดการทรุดตัวในลักษณะที่ความเครียดเกิดขึ้นได้ 1 ,2 และ 3 มิติ การทรุดตัวเนื่องจากขบวนการอัดตัวคายน้ำนี้จะสิ้นสุด เมื่อความดันน้ำในโพรงดินที่เพิ่มขึ้นลดลงเท่ากับ ความดันน้ำในโพรงดินในสภาพปกติ

2.1.3 การยุบอัดตัวครั้งที่สอง (Secondary Consolidation ,  $p_s$ )

การทรุดตัวชนิดนี้เกิดขึ้นหลังจาก ความดันน้ำในโพรงเพิ่มได้ ลดลงหมดแล้ว การทรุดตัวจะเกิดจากการที่น้ำในช่องว่างของมวลดินไหลออกมา ซึ่งเป็นผลของการจัดเรียงตัวของเมล็ดดินใหม่ในขณะที่หน่วยแรงประสิทธิผลในมวลดินมีค่าคงที่ ในปัจจุบันยังไม่สามารถแยกได้ว่าการยุบอัดตัวครั้งที่สอง เกิดขึ้นพร้อมกันหรือหลังการยุบอัดตัวครั้งแรก

ในการออกแบบฐานรากแบบเสาเข็มในชั้นดินเหนียว จึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ปริมาณการทรุดตัวในลักษณะต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เพื่อสามารถออกแบบสิ่งก่อสร้างให้มีปริมาณการทรุดตัว หรือปรับการทรุดตัวที่แตกต่างกันให้อยู่ในพิสัยที่สิ่งก่อสร้างสามารถทำงานได้จากลักษณะการทรุดดังกล่าว เราสามารถคำนวณการทรุดตัวที่เกิดขึ้นทั้งหมด ( $p_T$ ) ของมวลดิน ได้ตามลักษณะการเกิดความเครียดดังนี้

สำหรับชั้นดินเหนียวที่อัดตัวคายน้ำ

ก. ลักษณะความเครียดเกิดขึ้นเป็นชนิด 1 มิติ

$$p_T = p_c + p_s \dots\dots\dots(2.1)$$

ข. ลักษณะความเครียดเกิดขึ้นเป็น 2 มิติ หรือ 3 มิติ

$$p_T = p_i + p_c + p_s \dots\dots\dots(2.2)$$

ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ในการออกแบบฐานรากแบบเสาเข็ม พิกัดความปลอดภัยในเรื่องเสถียรภาพของมวลดินจะไม่ต่ำกว่า 2.5 ภัยเหตุนี้การยุบอัดตัวครั้งที่สองมักจะมีค่าน้อย เมื่อ

เปรียบเทียบกับกรวยอค์ตัวครึ่งแรก ยกเว้นในกรณีที่มีมวลดินมีสารอินทรีย์และ Inorganic Silt ผสมอยู่

สำหรับฐานรากเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นดินที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดี การกรวยอค์ตัวครึ่งที่สองจะมีค่าน้อยมาก (Broms, 1972)

2.2 การประมาณค่าการทรุดตัวของฐานรากแบบเสาเข็ม โดยวิธีปฏิรูปกลศาสตร์พื้นฐาน (Conventional Method)

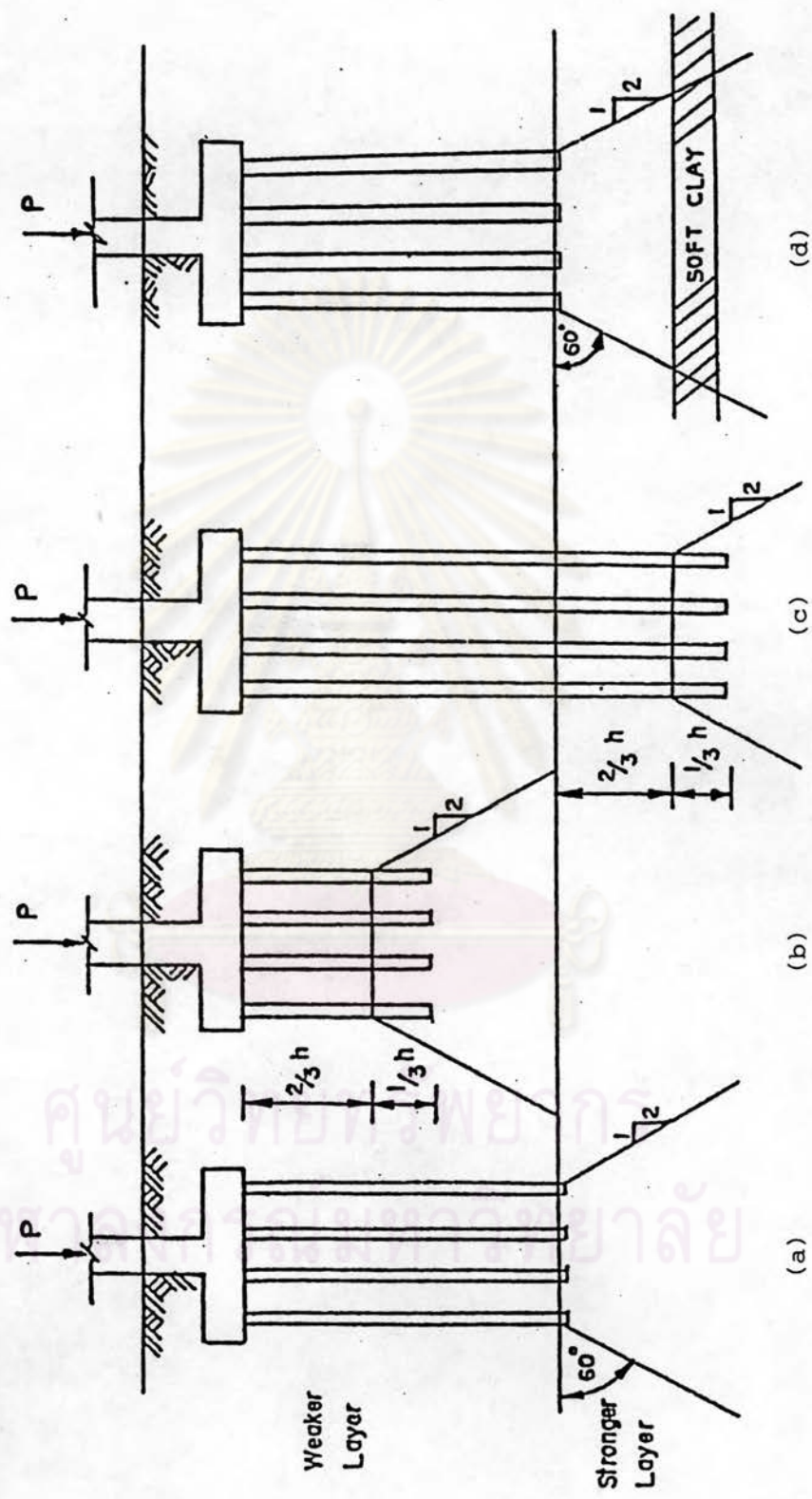
2.2.1 การกระจายหน่วยแรงในมวลดินของฐานรากแบบเสาเข็ม โดยวิธีปฏิรูปกลศาสตร์พื้นฐาน

การพิจารณาการกระจายของหน่วยแรงเค้น (Stress Distribution) สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณการทรุดตัวของฐานรากแบบเสาเข็ม โดยวิธีปฏิรูปกลศาสตร์พื้นฐาน โดยทั่วไปนิยมสมมุติให้เท่ากับบรรทุกจากโครงสร้างถ่ายลงสู่ฐานรากสมมูลย์ (Equivalent Mat) ที่ระดับไคร่ค้ำหนึ่งของความยาวเข็ม แล้วจึงกระจายหน่วยแรงจากฐานรากสมมูลย์สู่ชั้นดินข้างล่าง โดยอาศัยสมการของ Boussinesq หรือกระจายในลักษณะที่การขยายของพื้นที่ในการรับแรงเป็นไปตามสัดส่วนที่กำหนดให้ เช่น 2:1 เป็นต้น

โดยมีผู้เสนอการพิจารณาการกระจายของหน่วยแรงเค้น ของฐานรากแบบเสาเข็มหลายแบบ ซึ่งแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับสภาพและชนิดของดิน ดังนี้

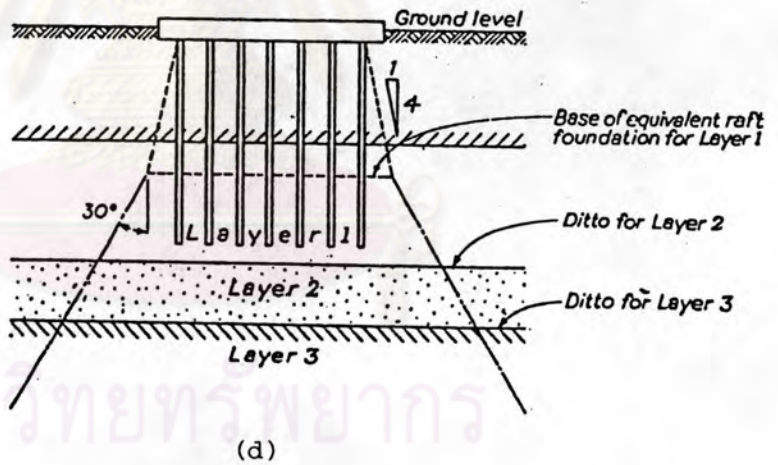
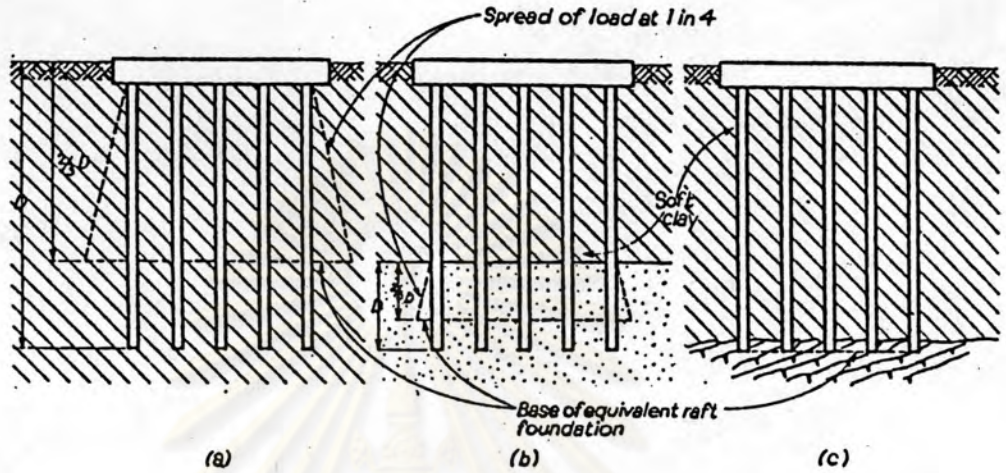
Terzaghi และ Peck (1948) เสนอว่าสำหรับฐานรากแบบเสาเข็มที่อยู่ในชั้นดินเหนียวหนาให้พิจารณาฐานรากสมมูลย์ที่มีขนาดเท่ากับ เส้นรอบรูปของกลุ่เสาเข็มให้อยู่ที่ระดับความลึก 2 ใน 3 ของความยาวเสาเข็ม และการกระจายหน่วยแรงทำได้โดยการขยายพื้นที่ด้วยอัตราส่วนทางค้ำคองราบเท่ากับ 2 : 1 สำหรับเสาเข็มกลุ่มที่มีปลายเสาเข็มตั้งอยู่ในชั้นดินที่แข็งกว่าให้กระจายหน่วยแรงจากฐานรากสมมูลย์ ซึ่งวางไว้ที่ปลายเสาเข็ม ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.1(b) และ 2.1 (a) ตามลำดับ

TENG (1962) แนะนำให้กระจายฐานรากสมมูลย์ ของฐานรากแบบเสาเข็มที่มีปลายตั้งอยู่ในชั้นดินแข็ง ซึ่งมีระยะฝังตัวของเสาเข็มในดินแข็งลึก h ฐานรากสมมูลย์ที่มีขนาดเท่าเส้นรอบรูปของกลุ่เสาเข็ม จะเริ่มกระจายหน่วยแรงที่ระดับ  $\frac{1}{3}h$  จากปลายเสาเข็มขึ้นมาด้วยอัตราส่วน 2 : 1 (ทางค้ำ : ทางราบ) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (c)



(a) (b) (c) (d)

รูปที่ 2.1 แสดงการถ่ายน้ำหนักจากเสาเข็มกลุ่ม (Terzaghi และ Peck, 1948) , (Teng, 1962) , (NAVFAC, 1982)



รูปที่ 2.2 แสดงการถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มกลุ่ม (Tomlinson ,1979)

NAVFAC (1982) แนะนำการกระจายหน่วยแรงของฐานรากแบบเสาเข็มที่ตอกผ่านชั้นดินอ่อน และมีปลายเสาเข็มฝังอยู่ในชั้นดินแข็ง ซึ่งมีชั้นดินเหนียวอ่อนแทรกอยู่ โดยกำหนดให้ฐานรากสมมูลอยู่ที่ระดับปลายเสาเข็ม และกระจายหน่วยแรงออกด้วยอัตราส่วน 2:1 (ทางค้ำ : ทางราบ) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (a)

Tomlinson (1979) เสนอให้นำหนักกระทำบนฐานรากสมมูลที่มีสภาพยืดหยุ่น (Flexible Equivalent Mat) ที่มีขนาดใหญ่มากกว่าฐานรากเดิม โดยกระจายออกทางราบ 1 ส่วน ต่อ ทางค้ำ 4 ส่วนก่อน สำหรับเสาเข็มกลุ่มในชั้นดินเหนียวอ่อนหนา ใช้ฐานรากสมมูลยืดหยุ่นกระทำอยู่ที่ระดับความลึก 2 ใน 3 ของความยาวเสาเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (a) สำหรับเสาเข็มกลุ่มที่ตอกผ่านชั้นดินเหนียวอ่อน และฝังตัวอยู่ชั้นทรายที่แน่น ฐานรากสมมูลยืดหยุ่นจะอยู่ที่ระดับ 2 ใน 3 ของระยะฝังตัวในชั้นทรายแน่น ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (b) ส่วนเสาเข็มกลุ่มที่มีปลายตั้งอยู่บนหินแข็ง ให้ฐานรากสมมูลที่มีขนาดเท่าฐานรากกระทำที่ระดับของชั้นดินแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (c)

### 2.2.2 คุณสมบัติของดินเหนียวที่ใช้ในการประมาณค่าการทรุดตัวโดยวิธีปฏิรูปกลศาสตร์พื้นฐาน

เนื่องจากการประมาณค่าการทรุดตัวโดยวิธีปฏิรูปกลศาสตร์พื้นฐาน ยึดหลักทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ ของ Terzaghi (1925) โดยสมมุติว่าการทรุดตัวทั้งหมดเกิดขึ้นในทิศทางเดียว คือทางค้ำไม่มีการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง ซึ่งคุณสมบัติการยุบตัวของดินเหนียวที่อัดตัวคายน้ำ สามารถหาได้จาก การทดลอง การอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ (Consolidation test) ด้วยเครื่อง Oedometer ซึ่งจะให้คุณสมบัติที่แสดงการยุบตัวของดินหลายรูปแบบ คือ

ก. สัมประสิทธิ์ความอัดได้เชิงปริมาตร (Coefficient of Volume Compressibility,  $m_v$ ) คืออัตราส่วนระหว่างความเปลี่ยนแปลงความเครียดทางค้ำ ต่อความเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงแกนทางค้ำ สามารถหาได้จากสมการ

$$m_v = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta \bar{\sigma}_v} = \frac{\Delta e}{\Delta \bar{\sigma}_v (1 + e_0)} = \frac{1}{E_{oed}} \dots (2.3)$$

เมื่อ  $\Delta \epsilon$  = ค่าเปลี่ยนแปลงความเครียดในแนวค้ำ

$\Delta e$  = ค่าเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนโพรง

$e_0$  = อัตราส่วนโพรงเริ่มแรก

$$\Delta \bar{\sigma}_v = \text{ขนาดของการเปลี่ยนแปลงหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง}$$

ค่า  $m_v$  ได้มาจากการทดลองการอัดตัวของดินแบบ 1 มิติ ดังแสดงในรูปที่

2.3

ข. อัตราส่วนการอัดแน่น (Compression Ratio, CR) คือ ค่าเปลี่ยนแปลงความเครียดในแนวตั้ง ต่อค่าเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งใน Virgin line ใน log scale ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$CR = \frac{\Delta e}{\log \Delta \bar{\sigma}_v} \dots \dots \dots (2.4)$$

วิธีการหาค่า CR ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.4

ค. อัตราส่วนการอัดแน่นซ้ำ (Recompression Ratio, RR) ซึ่งมีค่าเท่ากับ ค่าเปลี่ยนแปลงของความเครียดในแนวตั้ง ต่อค่าเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง ในช่วงก่อนถึง Virgin Line ใน log scale ดังแสดงวิธีการหาในรูปที่ 2.4

ง. สมประสิทธิ์การอัดแน่นครั้งที่สอง ( $C_{\alpha}$ ) สามารถหาได้จากอัตราส่วนเปลี่ยนแปลงความเครียดในแนวตั้ง ต่อการเปลี่ยนแปลงของเวลาใน log scale ดังแสดงวิธีการหาค่าในรูปที่ 2.5

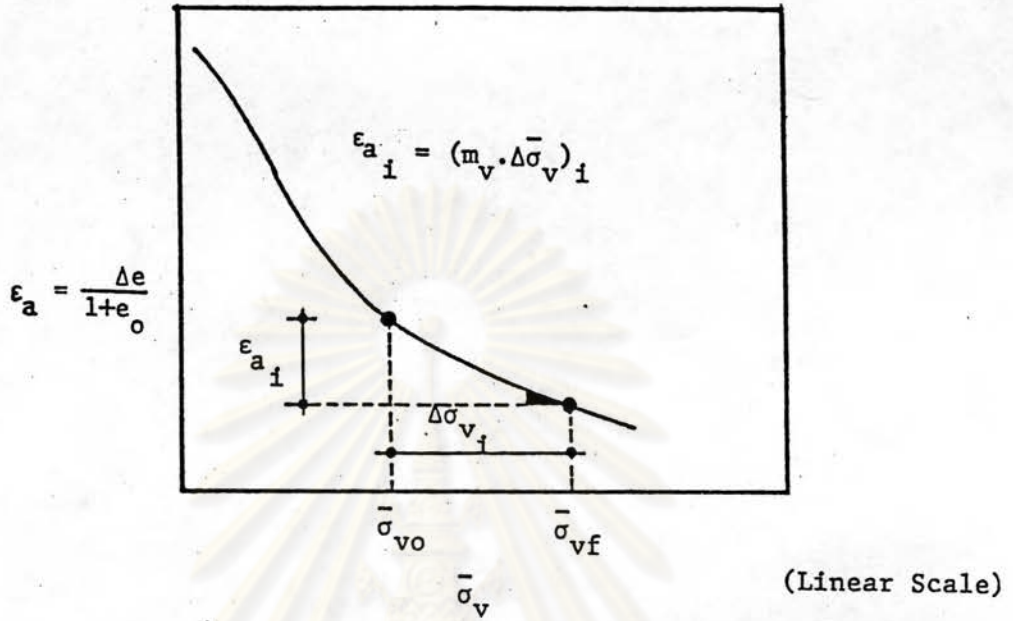
จ. โมดูลัสยืดหยุ่นของดินในสภาพไม่ระบายน้ำ (Undrained Young's Modulus,  $E_u$ ) สามารถหาได้จากอัตราส่วน ระหว่างค่าเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงเค้นในแนวตั้ง กับค่าเปลี่ยนแปลงความเครียดทางตั้ง ในสภาพที่ดินไม่มีการระบายน้ำแบบ 3 มิติ ซึ่งสามารถหาได้จากหลายวิธี เช่น Triaxial Compression test, Plate bearing test นอกจากนี้ค่า  $E_u$  สามารถคำนวณจากการยุบตัวของดินแบบ 1 มิติ โดยสมมุติให้ดินเป็นวัสดุแบบ Ideal elastic (Davis และ Poulos, 1963) ดังนี้

$$E_u = 3E_s / 2 \cdot (1 + v'_s) \dots \dots \dots (2.5)$$

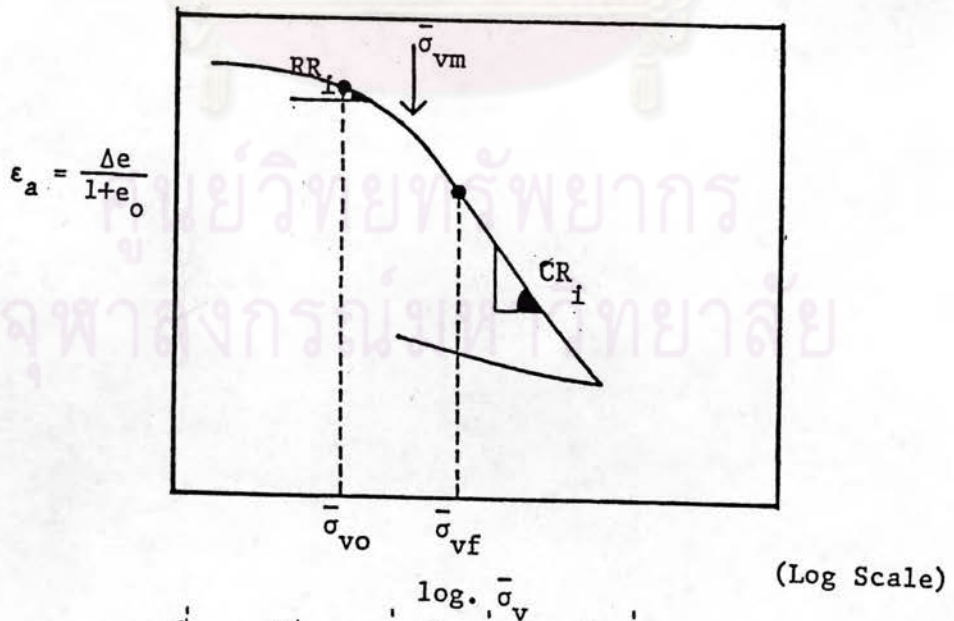
และ  $E'_s = (1 + v'_s) \cdot (1 - 2v'_s) / m_v \cdot (1 - v'_s) \dots (2.6)$

เมื่อ  $E'_s$  = คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของดินในสภาพระบายน้ำ

$v'_s$  = คือ อัตราส่วนปัวซองในสภาพระบายน้ำของดิน

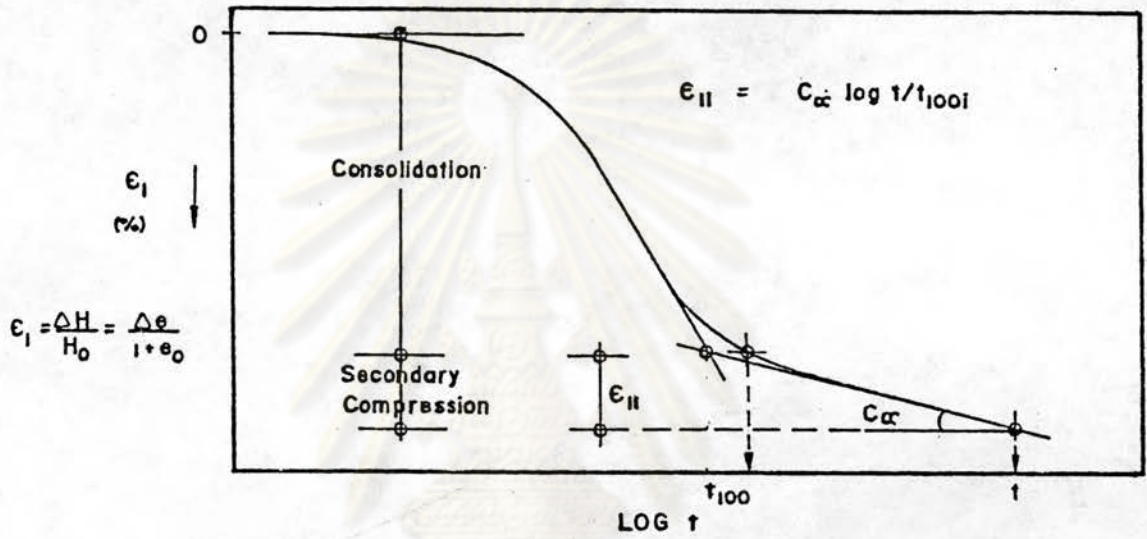


รูปที่ 2.3 แสดงหลักการคำนวณสัมประสิทธิ์ค้ำตัวเชิงปริมาตร,  $m_v$   
(Coefficient of Volume Compressibility)



รูปที่ 2.4 วิธีการหาค่าอัตราส่วนการอัดแน่น (Compression Ratio, CR)  
และอัตราส่วนการอัดแน่นซ้ำ (Recompression Ratio, RR)





หมายเหตุ : ข้อมูลการทดลอง Consolidation ระหว่างความเค้น  $\bar{\sigma}_{V0} \rightarrow \bar{\sigma}_{Vf}$  ที่ Mid. Layer ของ Layer ย่อย

$t_{100} =$  Estimated Time For Completed Consolidation

รูปที่ 2.5 วิธีการคำนวณการทรุดตัวครั้งที่สอง (Secondary Compression)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.3 วิธีการประมาณค่าการทรุดตัวโดยอาศัยทฤษฎีการอัดตัวของน้ำแบบ 1 มิติ

ของ Terzaghi (1925)

การประมาณการทรุดตัวในชั้นดินเหนียว ของ Terzaghi พิจารณาการทรุดตัวของฐานรากแบบเสาเข็ม ใช้หลักการเกี่ยวกับการคาดคะเนการทรุดตัวของฐานรากต้น โดยยึดหลักทฤษฎีการอัดตัวของน้ำ ซึ่งมีสมมุติฐานว่าลักษณะความเครียดที่เกิดขึ้นเป็นแบบ 1 มิติ จึงถือว่าไม่มีการทรุดตัวทันที ค่าความดันน้ำในโพรงดินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีแรงภายนอกกระทำจะมีค่าเท่ากับหน่วยแรงแกนทางด้านข้างที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการคำนวณการทรุดตัว สามารถทำได้จากสมการ

$$\rho_c = \rho_{oed} = \sum m_v \cdot \Delta \bar{\sigma}_v \cdot \Delta H \dots\dots(2.7)$$

- เมื่อ  $m_v$  = Coefficient of Compressibility ของดินแต่ละชั้น
- $\Delta \bar{\sigma}_v$  = หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งที่เพิ่มขึ้น คิที่กึ่งกลางของชั้นดินที่พิจารณา คำนวณโดยวิธีของ Terzaghi
- $\Delta H$  = ความหนาของชั้นดินที่พิจารณา

หรือ สามารถหาปริมาณการทรุดตัวโดยอาศัยค่า CR และRR ได้ดังนี้

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

$$\rho_c = \Sigma \left\{ CR \cdot \Delta H \cdot \log \frac{\bar{\sigma}_{vf}}{\bar{\sigma}_{vo}} \right\} \dots\dots\dots(2.8)$$

- โดยที่ CR = อัตราส่วนการอัดแน่น (Compression Ratio)
- $\bar{\sigma}_{vo}$  = หน่วยแรงแกนประสิทธิผลทางด้านข้างตามธรรมชาติ
- $\bar{\sigma}_{vf}$  = หน่วยแรงแกนประสิทธิผลทางด้านข้างสุดท้ายหลังจากรับน้ำหนัก

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

$$\rho_c = \Sigma \left\{ RR \cdot \Delta H \cdot \log \frac{\bar{\sigma}_{vf}}{\bar{\sigma}_{vo}} \right\} \dots\dots\dots(2.9)$$

- โดยที่ RR = อัตราส่วนการอัดแน่นซ้ำ (Recompression Ratio)
- $\bar{\sigma}_{vm}$  = หน่วยแรงแกนประสิทธิผลสูงสุดที่เคยได้รับมาในอดีต

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

$$p_c = \Sigma \{RR. \Delta H. \log \frac{\bar{\sigma}_{vm}}{\bar{\sigma}_{vo}} + CR. \Delta H. \log \frac{\bar{\sigma}_{vf}}{\bar{\sigma}_{vm}}\} \dots (2.10)$$

2.2.4 การประมาณค่าการทรุดตัวของฐานรากแบบเสาเข็ม ด้วยวิธีการของ Tomlinson (1979)

การประมาณค่าการทรุดตัวของ Tomlinson ในสมมติฐานที่ว่า การทรุดตัวของมวลดิน สามารถเคลื่อนตัวได้ในลักษณะ 2 หรือ 3 มิติ การทรุดตัวทั้งหมดของฐานรากเสาเข็มกลุ่มในชั้นดินเหนียว สามารถหาได้จากผลรวมของการทรุดตัวทันที กับ การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ

สมการที่ใช้คำนวณหา ปริมาณ การทรุดตัวทันที สามารถหาได้ โดยอาศัยทฤษฎี Elasticity โดยทั่วไปสามารถหาได้ในรูปของค่าการทรุดตัวทันที โดยเฉลี่ย เสนอโดย Janbu et al. (1956) สำหรับฐานรากแบบยึดคาน

$$p_i = \frac{\mu_1 \cdot \mu_o \cdot q \cdot B}{E_u} \dots \dots \dots (2.11)$$

โดยที่  $\mu_1$  และ  $\mu_o$  เป็นตัวแปรซึ่งขึ้นอยู่กับ รูปแบบของฐานราก ความหนาของชั้นดินที่พิจารณา อัตราส่วนความลึก และความกว้างของฐานรากสมมูลย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6

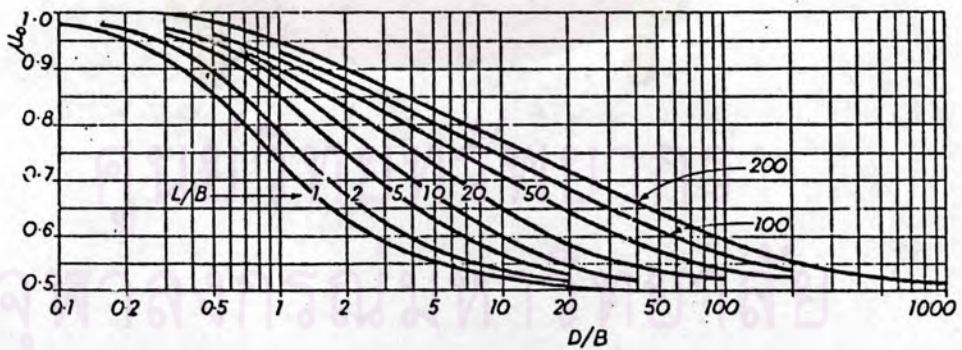
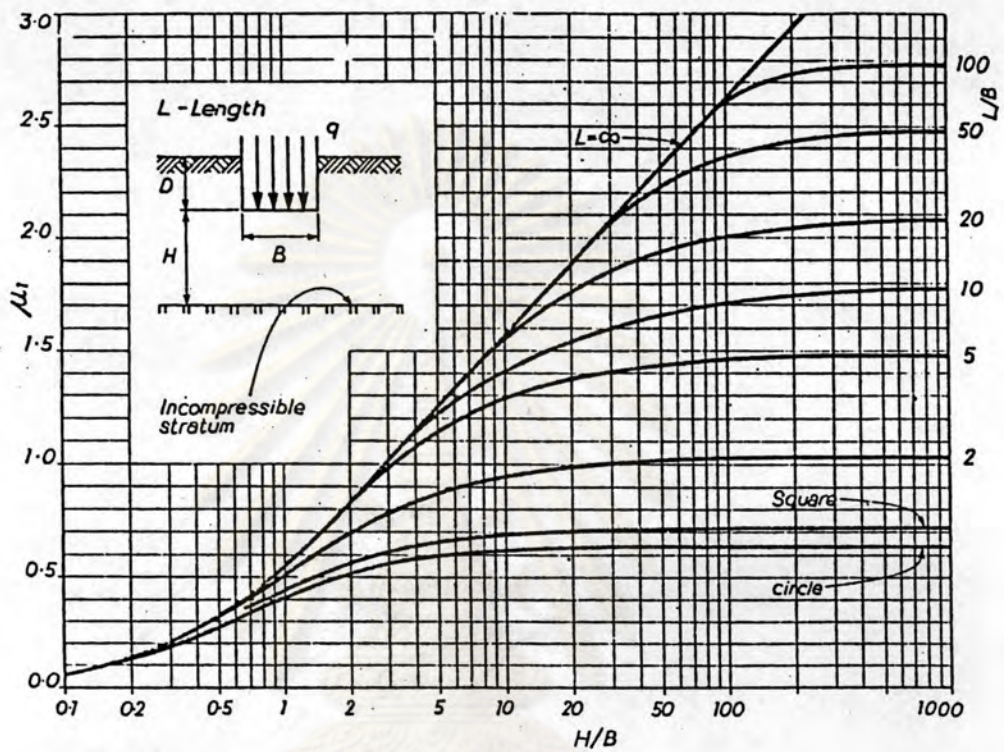
โดยที่  $q$  = ความดันสุทธิตั้งบนฐานราก  
 $E_u$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของดินในสภาพไม่ระบายน้ำ

สำหรับการทรุดตัวเนื่องจากการเกิดการอัดตัวคายน้ำ อาศัยทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ ของ Terzaghi และใช้ตัวปรับแก้ (Correction Factor) เพื่อปรับทฤษฎีให้ใช้ได้กับสภาพการ ที่ถ่ายหน่วยแรงแก่นในมวลดิน และเพื่อปรับแก้การทรุดตัวเนื่องจากความดันน้ำในโพรงดินที่เพิ่มขึ้น เกิดขึ้นในลักษณะ 1 มิติ ให้เป็นการทรุดตัวลักษณะ 3 มิติ ดังแสดงในสมการ

$$p_c = \Sigma \mu_g \cdot \mu_d \cdot m_v \cdot \Delta \bar{\sigma}_v \Delta H \dots \dots \dots (2.12)$$

โดยที่  $\mu_g$  คือ Geological Factor เสนอแนะโดย Tomlinson เพื่อ

012280



รูปที่ 2.6 แฟกเตอร์  $\mu_0$  และ  $\mu_1$  (Junbu et al., 1956)

เป็นตัวปรับแก้ความค้ำน้ำตามลักษณะการทรุดตัวแบบ 1 มิติ ให้เป็นตามลักษณะการทรุดตัวแบบ 3 มิติ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

$\mu_d$  คือ Fox's correction Factor เป็นตัวปรับแก้ การกระจายของหน่วยแรงสู่มวลดิน โดยที่หน่วยแรงที่มากกระทำตั้งอยู่บนผิวดิน ดังแสดงค่าในรูปที่ 2.7

$\Delta\sigma_v$  คือ หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งที่เพิ่มขึ้น คัดกึ่งกลางชั้นดินที่พิจารณาทำการวิเคราะห์โดยวิธี Elastic ดังแสดงในรูปที่ 2.8

2.3 การประมาณค่าการทรุดตัวของฐานรากแบบเสาเข็มโดยวิธี Modified Theory of Elasticity

Poulos และ Davis (1968) , Poulos (1972) เสนอวิธีการวิเคราะห์การทรุดตัวของเสาเข็มโดยทฤษฎี Elasticity โดยแบ่งพิจารณาแรงที่มากกระทำต่อเสาเข็ม ออกเป็นส่วน ๆ อย่างสม่ำเสมอ (Uniformly loaded elements) และใช้ความสัมพันธ์แบบ Compatibility ระหว่างการเคลื่อนที่ของเสาเข็มกับมวลดินข้างเสาเข็ม

การทรุดตัวของฐานรากแบบเสาเข็ม จะประกอบไปด้วยการยุบตัวของเสาเข็มเมื่อได้รับแรงกระทำตามแนวแกน และการเคลื่อนที่ของดินเนื่องจากน้ำหนักกระทำในมวลดิน โดยใช้สมการของ Mindlin (1936)

Poulos และ Mattes (1969) เสนอวิธีวิเคราะห์การกระจายหน่วยแรงในมวลดิน เป็นไปอย่างสม่ำเสมอรอบ ๆ เสาเข็ม โดยพื้นฐานการวิเคราะห์จากเสาเข็มเดี่ยวแบบลอย (Floating Pile)

2.3.1 การทรุดตัวในเสาเข็มเดี่ยว เมื่อได้รับแรงกระทำตามแนวแกน

Poulos และ Davis (1968) , Poulos และ Mattes (1969) Poulos (1972) เสนอสมการหาค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม โดยพิจารณาเสาเข็มเป็น Incompressible ใน Half - space และมีตัวปรับแก้เนื่องจากอิทธิพลของความสามารถยุบตัวของเสาเข็มในชั้นดินเนื้อเดียวกันที่มีค่า Young's Modulus ของดินคงที่ และอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.5 ดังนี้

$$\rho = \frac{P \cdot I_o}{E_s \cdot d} \dots\dots\dots(2.13)$$

ตารางที่ 2.1 แสดงค่า Geological Factor,  $\mu_g$  (Tomlinson, 1979)

ชนิดของดินเหนียว	ค่า $\mu_g$
Very sensitive clay	1.0 - 1.2
Normally Consolidated clay	0.7 - 1.0
Over Consolidated clay	0.5 - 0.7
Heavily over Consolidated clay	0.2 - 0.5

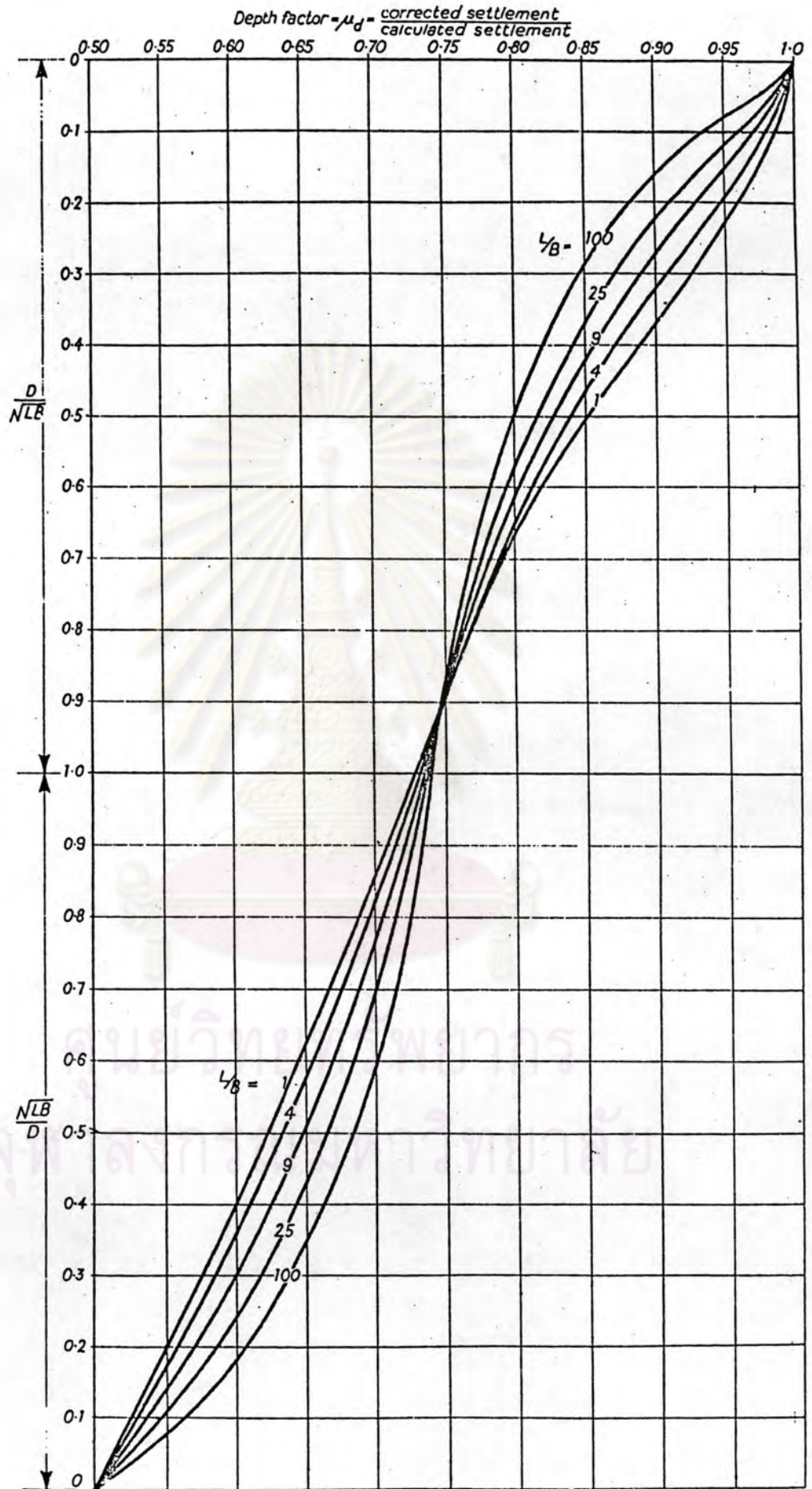
ตารางที่ 2.2 แสดงค่าประมาณของอัตราส่วนปัวซองของดินแบบระบายน้ำ,  $\nu_s$  (Poulos, 1976)

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)

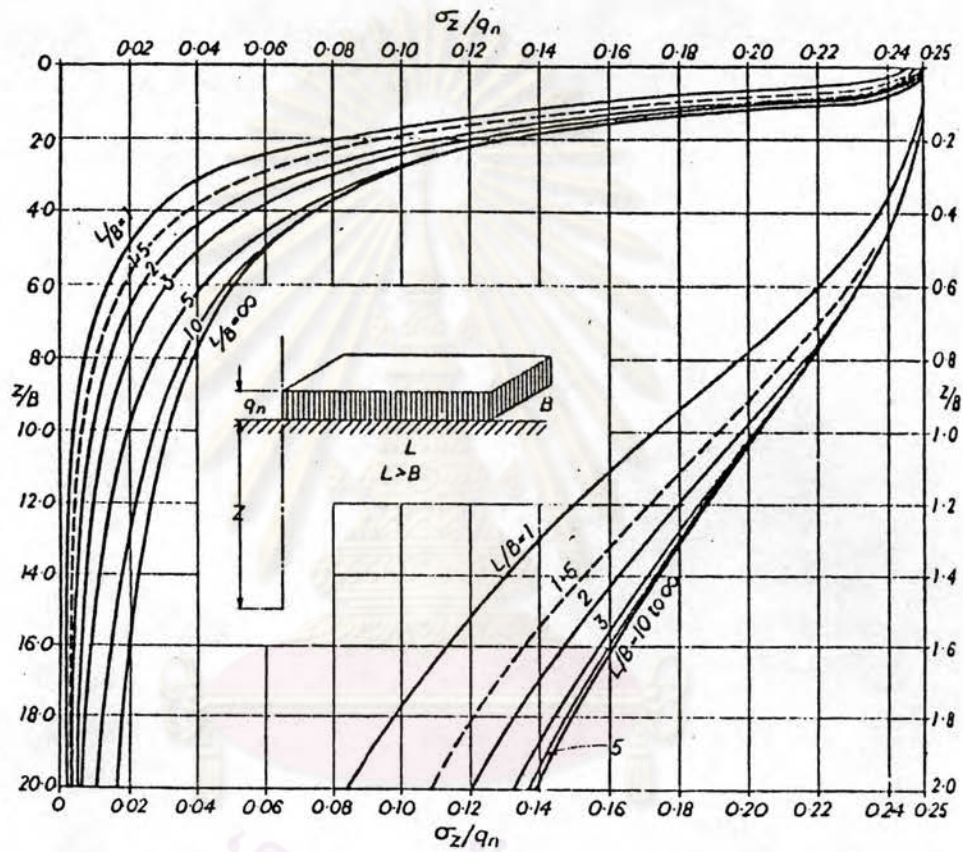
หมายเหตุ ค่าในวงเล็บเป็นค่าโดยเฉลี่ยที่แนะนำให้ใช้

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าเฉลี่ย ของ Pile Stiffness Factor,  $k$

ชนิดของดิน	Pile Material		
	Steel	Concrete	Timber
Soft Clay	60,000	6,000	3,000
Medium Caly	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



รูปที่ 2.7 ค่าปรับแก้ผลของความลึก ของพื้นที่รับน้ำหนัก (Fox, 1948)



รูปที่ 2.8 การกระจายหน่วยแรงเค้นทางดิ่งที่เพิ่มขึ้นของน้ำหนักแผ่นสม่ำเสมอ  
 เติมพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า กระทำที่ผิวหน้าของ Elastic Half-space  
 (Tomlinson, 1979)



- เมื่อ  $P$  = น้ำหนักกระทำต่อเสาเข็มทั้งหมดในแนวแกน  
 $E_s$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของดินและเสาเข็ม  
 $d$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม  
 $I_o$  = Influence Factor คังรูปที่ 2.9 ซึ่งจะต้องมีตัวปรับแก้ สำหรับในกรณีที่ลักษณะของเสาเข็มแตกต่างกันออกไป

สำหรับเสาเข็มแบบลอย (Floating Pile) หรือเสาเข็มที่รับน้ำหนักส่วนมากโดยแรงเสียดทาน (Friction Pile)

$$\rho = P \cdot I_o \cdot R_k \cdot R_h \cdot R_v / E_s \cdot d \dots\dots\dots(2.14)$$

สำหรับเสาเข็มคาล (End-bearing Pile)

$$\rho = P \cdot I_o \cdot R_k \cdot R_b \cdot R_v / E_s \cdot d \dots\dots\dots(2.15)$$

เมื่อ  $R_k$  = ตัวปรับแก้ สำหรับความขรุขระตัวของเสาเข็มคังรูปที่ 2.10

$R_h$  = ตัวปรับแก้ สำหรับความลึกของ Rigid base คังรูปที่ 2.11

$R_v$  = ตัวปรับแก้ สำหรับอัตราส่วนผิวของของดินคังรูปที่ 2.12

$R_b$  = ตัวปรับแก้สำหรับความแข็งของชั้นดินที่รับน้ำหนักที่ปลายเสาเข็ม คังรูปที่ 2.13

โดยที่  $K$  = Pile Stiffness Factor มีค่าเท่ากับ  $\frac{E_p \cdot R_A}{E_s}$

$E_p$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเข็ม

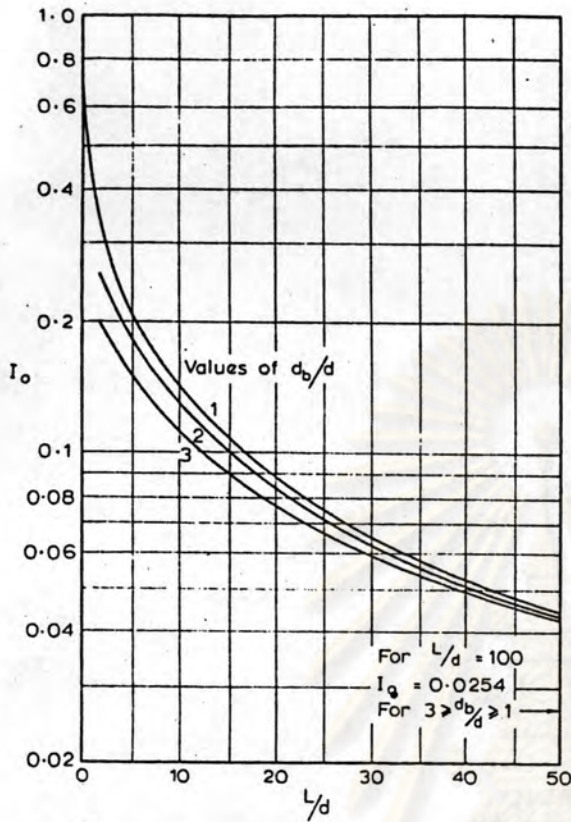
$R_A$  = อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดที่รอบนอกของเสาเข็มสำหรับเสาเข็มตัน มีค่าเท่ากับ 1.0

$E_b$  = โมดูลัสยืดหยุ่น ของชั้นดินที่รับน้ำหนักที่ปลายเสาเข็ม

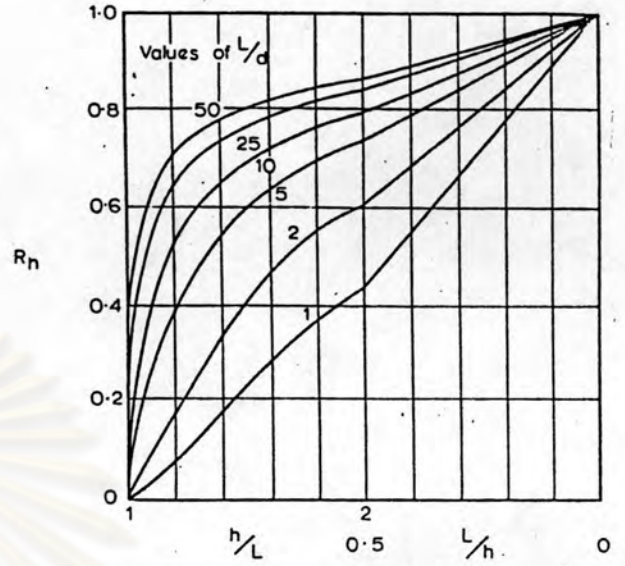
$L$  = ความยาวเสาเข็ม

$h$  = ระยะจากหัวเสาเข็มถึง Rigid base

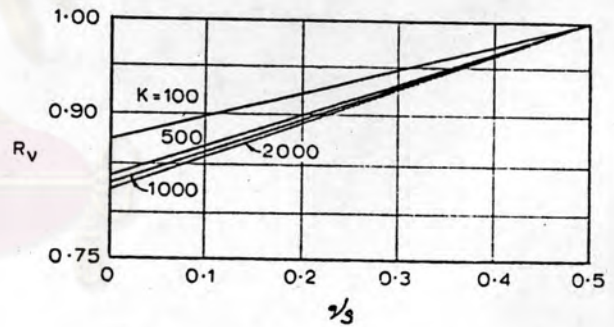
$d_b$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของปลายเสาเข็ม



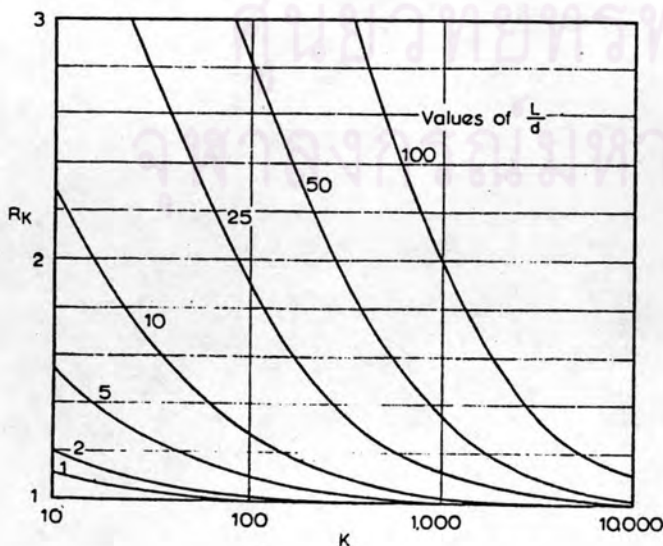
รูปที่ 2.9 Influence Factor,  $I_o$



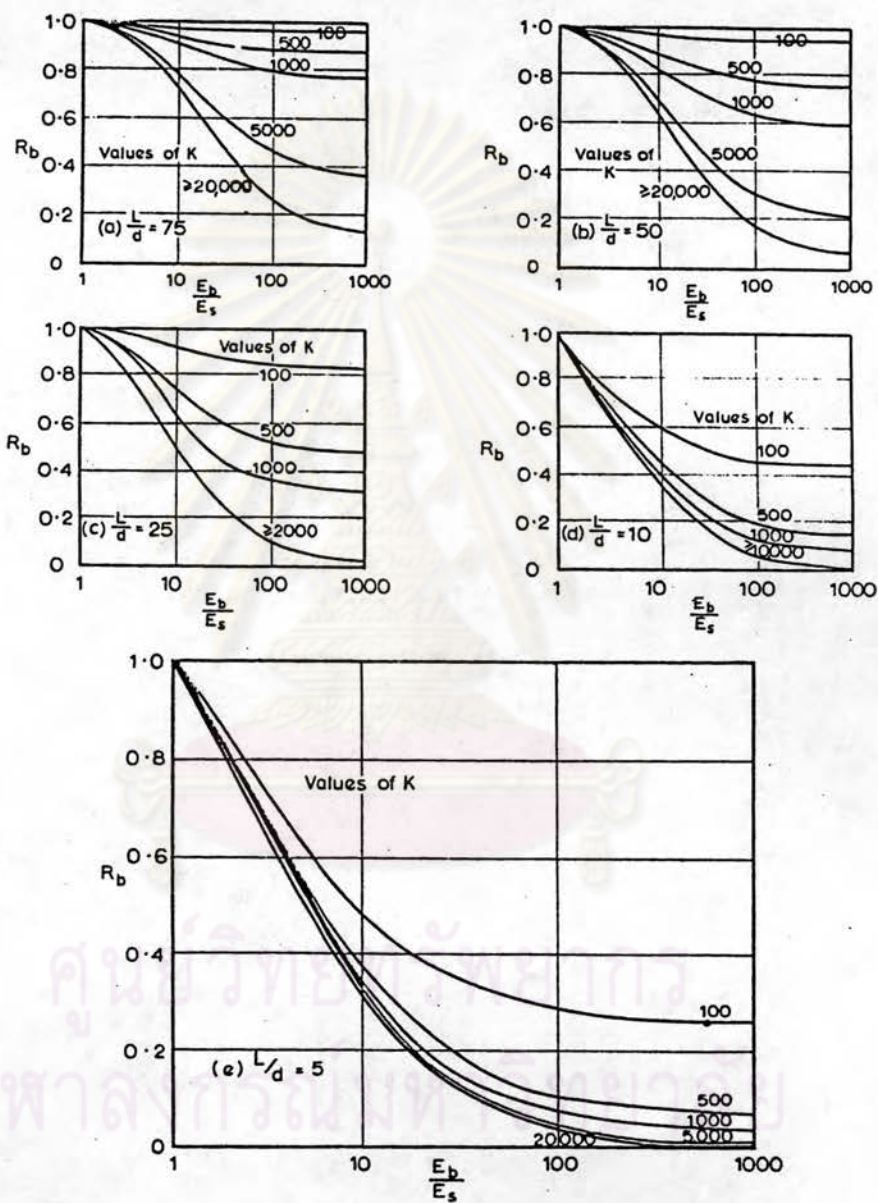
รูปที่ 2.11 ค่าปรับแก้สำหรับความลึกของชั้นดินแบกทาน,  $R_n$



รูปที่ 2.12 ค่าปรับแก้สำหรับอัตราส่วนปัวซองของดิน,  $R_v$



รูปที่ 2.10 ค่าปรับแก้สำหรับการยุบตัวของเสาเข็ม,  $R_k$



รูปที่ 2.13 แสดงค่าปรับแก้สำหรับความแข็งของชั้นดินแบกทาน  $R_b$   
 (Poulos และ Davis, 1980)

Poulos และ Davis (1980) คำนวณการทรุดตัวที่ได้จากสมการที่ (2.14) และ (2.15) เป็นเพียงการประมาณเท่านั้น เนื่องจากในความเป็นจริงผลของการทรุดตัวแต่ละอย่าง ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ อย่างไรก็ตามค่าที่คำนวณได้มีความถูกต้องเพียงพอในทางปฏิบัติ

2.3.2 การทรุดตัวของชั้นดินใต้เสาเข็มเนื่องจากเสาเข็มรับน้ำหนัก

Poulos และ Mattes (1971), Poulos และ Davis (1974) ได้เสนอสมการหาคำนวณการทรุดตัวของดิน ณ จุดใด ๆ ในมวลดิน โดยอาศัยการ Integrate สมการของ Mindlin ดังนี้

$$\rho = P \cdot I_p / E_s \cdot L \dots\dots\dots(2.16)$$

เมื่อ  $I_p$  = Displacement Influence Factor สำหรับอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.5 และที่ค่า k และ L/d ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.14

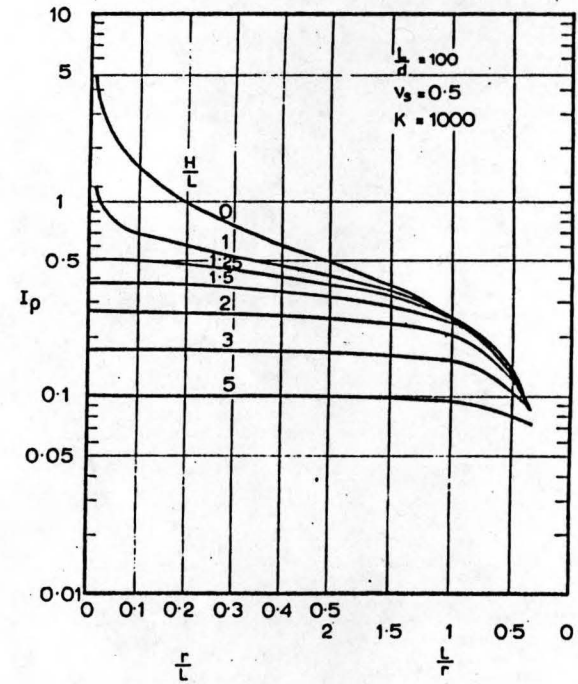
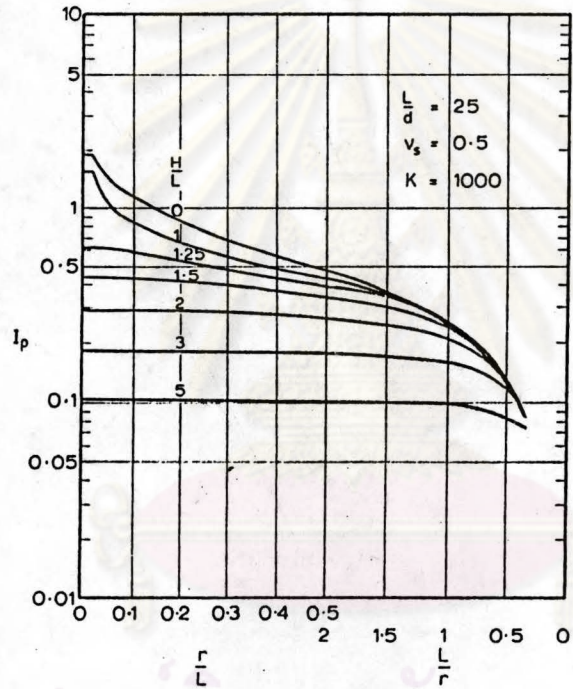
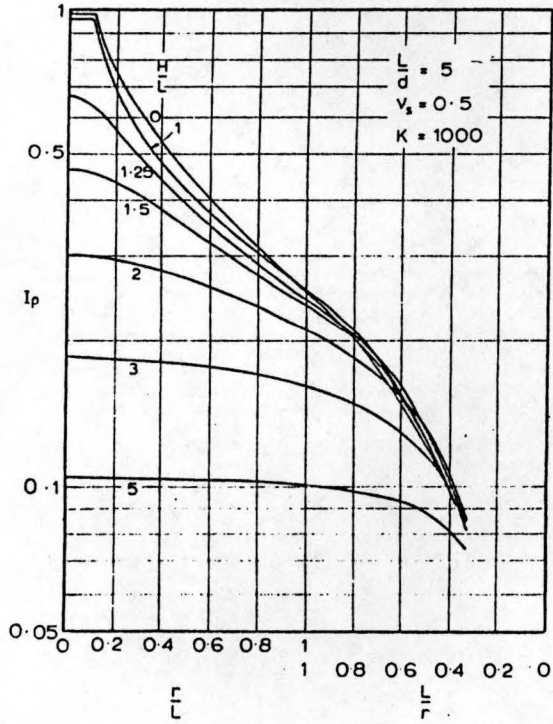
โดยที่ H = ระยะจากหัวเสาเข็มถึงความลึกที่พิจารณา  
 r = ระยะทางจากแกนกลางเสาเข็มไปยังจุดที่พิจารณา

2.3.3 การทรุดตัวสุดท้าย (Final Settlement)

การทรุดตัวสุดท้าย สำหรับฐานรากเสาเข็มในดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำ หมายถึง ผลรวมของการทรุดตัวทันทีเมื่อได้รับแรงกระทำซึ่งอยู่ในสภาพไม่ระบายน้ำ (Undrained Condition) กับ การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ ซึ่งอยู่ในสภาพระบายน้ำ (Drained Condition) การทรุดตัวทั้งสองชนิดนี้ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.16) โดยใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินที่อัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.5 สำหรับสภาพไม่ระบายน้ำ และอัตราส่วนปัวซองเป็นแบบระบายน้ำสำหรับการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ

Davis และ Poulos (1963) ได้สมมุติให้มวลดินเป็น Ideal elastic Material ซึ่งให้ความสัมพันธ์ระหว่าง โมดูลัสยืดหยุ่นของดินแบบระบายน้ำ และไม่ระบายน้ำ ดังแสดงในสมการที่ (2.5)

จากสมการที่ (2.5) และ (2.16) จะสามารถหาอัตราส่วนระหว่างค่าการ



รูปที่ 2.14 ค่า Displacement Influence Factor,  $I_p$  (Poulos และ Davis, 1974)

ทรุคตัวทันที ต่อ ค่าการทรุคตัวรวม ( $\frac{\rho_i}{\rho_{TF}}$ ) ได้ดังสมการที่ (2.17)

$$\frac{\rho_i}{\rho_{TF}} = \frac{2(1 + \nu'_s)}{3} \cdot \frac{I_{0.5}}{I'_{vs}} \dots\dots\dots(2.17)$$

เมื่อ  $I_{0.5}$  = Displacement Influence Factor สำหรับอัตราส่วนปัวของเทากับ 0.5 (สภาพไม่ระบายน้ำ)

$I'_{vs}$  = Displacement Influence Factor สำหรับอัตราส่วนปัวของแบบระบายน้ำ

Poulos และ Davis (1968) และ Mattes และ Poulos(1969) ได้คำนวณอัตราส่วน  $\rho_i/\rho_{TF}$  สำหรับเสาเข็มแบบ Incompressible และเสาเข็มแบบ Compressible Floating Pile ที่  $L/d$  และอัตราส่วนปัวของต่าง ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (a) และ 2.15 (b) ตามลำดับ

2.3.4 การทรุคตัวของเสาเข็มกลุ่ม (Settlement of Pile Group)

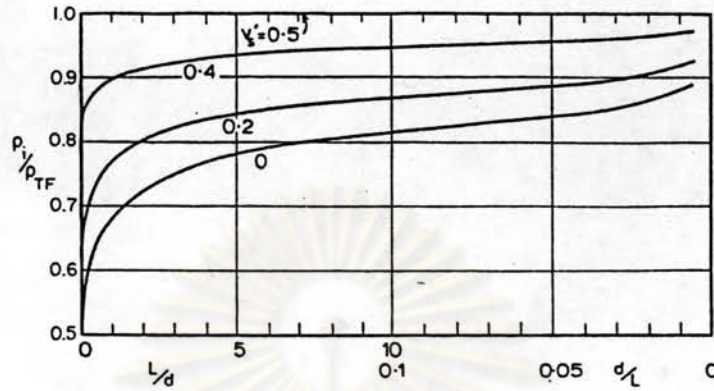
Poulos (1968) , Poulos และ Mattes (1971) ได้พิจารณาถึงผลกระทบระหว่างเสาเข็มแบบลอย 2 ต้น ซึ่งเป็นอิสระต่อกัน โดยอาศัยทฤษฎี Elasticity จากการวิเคราะห์ของเสาเข็มเดี่ยว โดยแสดงในรูปของอัตราส่วนของการทรุคตัวที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเสาเข็มข้างเคียงรับน้ำหนัก ดังนี้

$$\alpha = \frac{\text{ค่าการทรุคตัวที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากเสาเข็มข้างเคียงรับน้ำหนัก}}{\text{ค่าการทรุคตัวเนื่องจากน้ำหนักกระทำบนเสาเข็มที่พิจารณา}} \dots\dots(2.18)$$

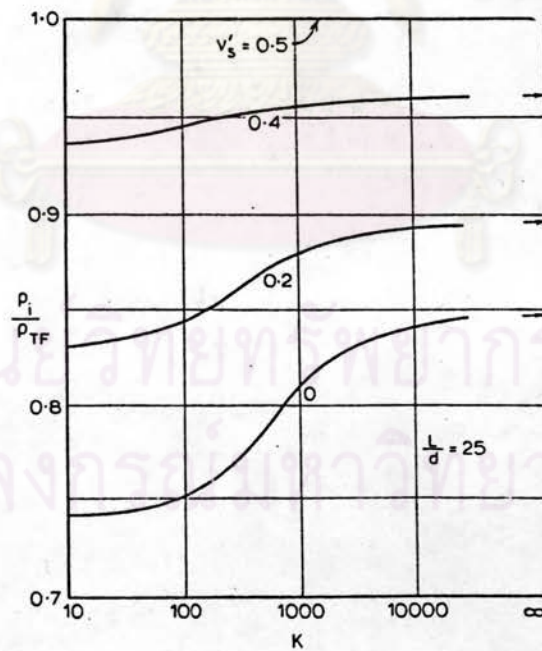
โดยที่  $\alpha$  = Interaction Factor ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่า  $k$  และ  $L/d$  อย่างมาก ความสัมพันธ์สำหรับเสาเข็มแบบลอย ( $\alpha_F$ ) และเสาเข็มคาล ( $\alpha_E$ ) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.16 และ 2.17 ตามลำดับ

สำหรับฐานรากแบบเสาเข็มที่มีปลายหยั่งอยู่ในชั้นดินที่สามารถยุบตัวได้ ค่า  $\alpha$  จะอยู่ระหว่าง  $\alpha_F$  และ  $\alpha_E$  ดังสมการ

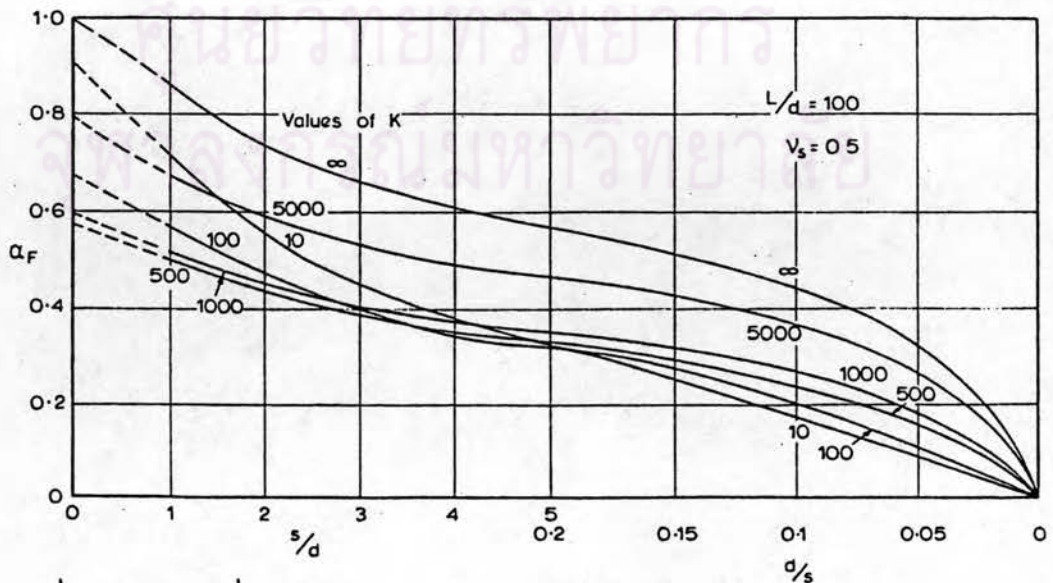
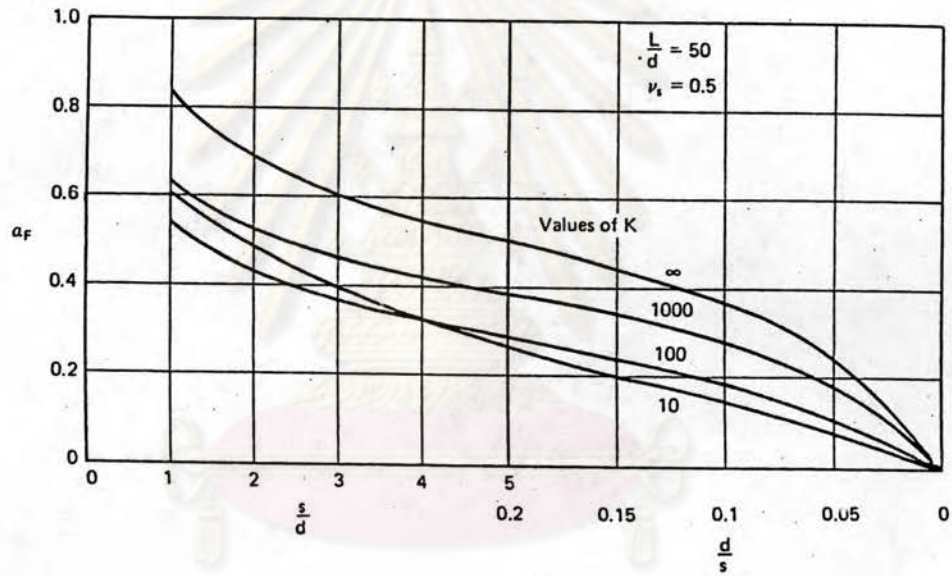
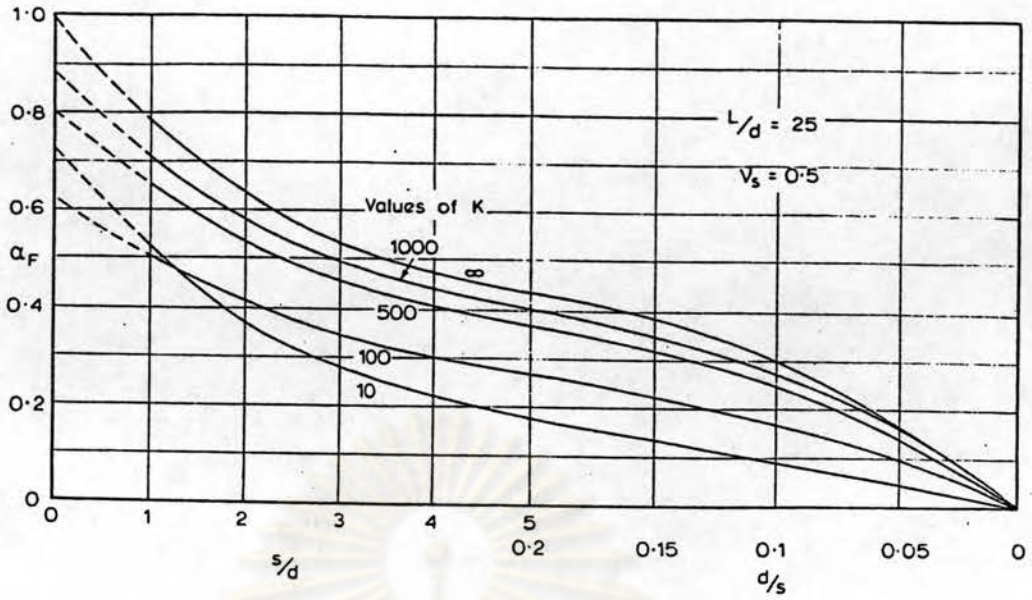
$$\alpha = \alpha_F - F_E (\alpha_F - \alpha_E) \dots\dots\dots(2.19)$$



รูปที่ 2.15 (a) แสดงค่าอัตราส่วนค่าการทรุดตัวทันทีต่อค่าการทรุดตัว  
 สุกท้าย ( $p_i/p_{TF}$ ) สำหรับเสาเข็มแบบ Incompressible  
 ใน Semi-infinite mass (Poulos และ Davis, 1968)

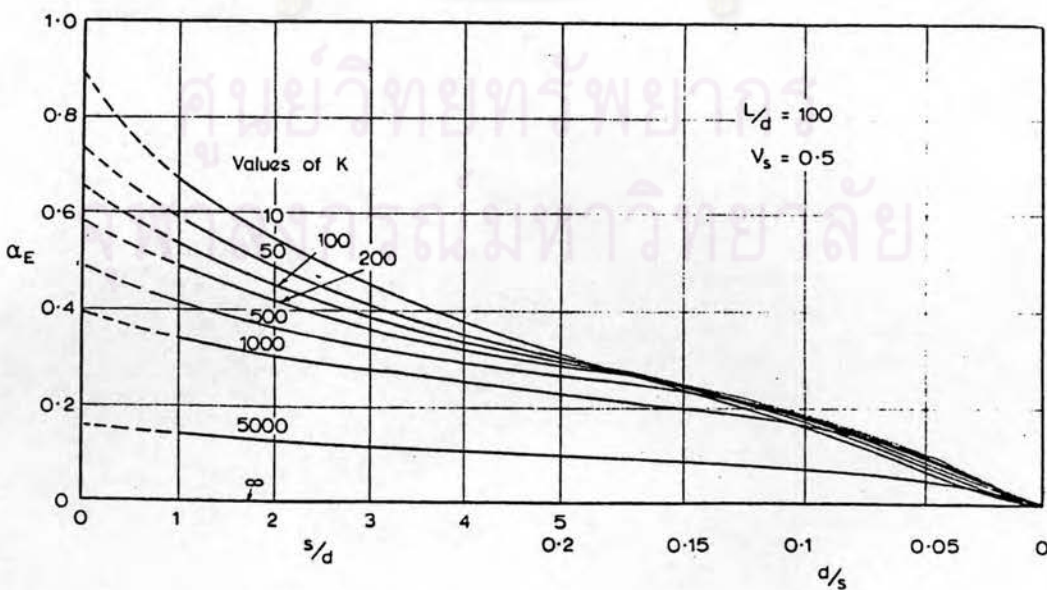
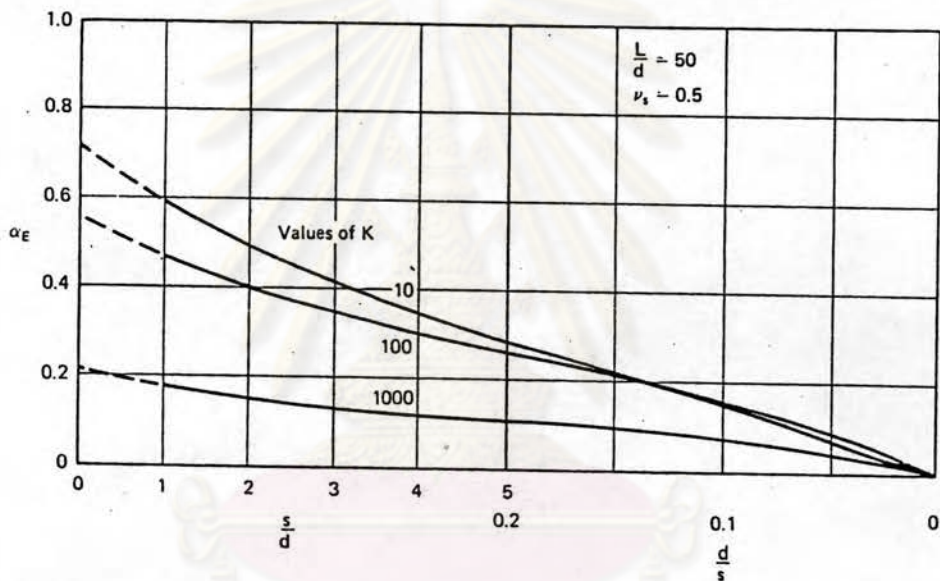
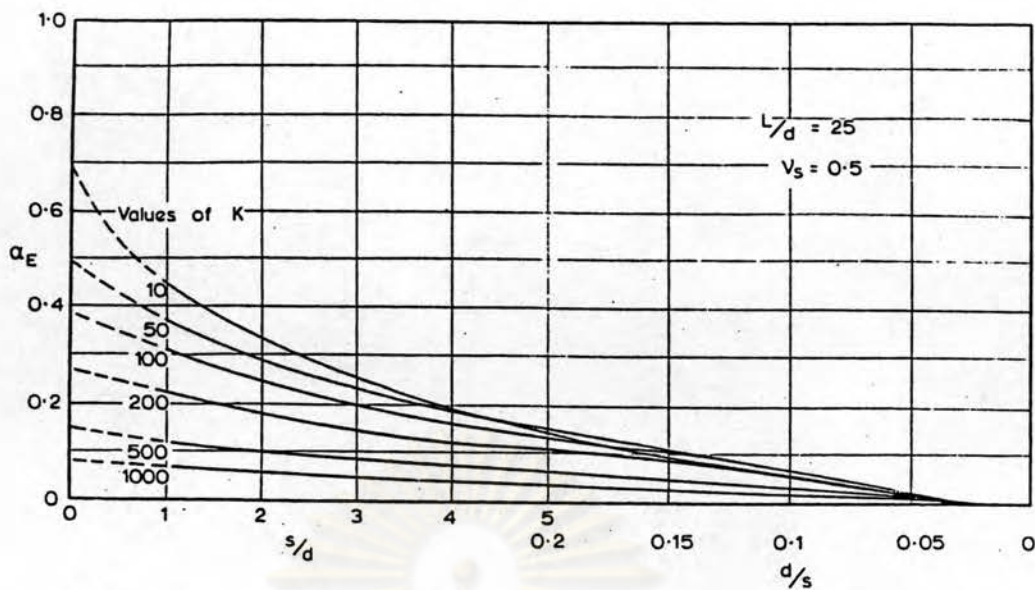


รูปที่ 2.15 (b) แสดงค่าอัตราส่วนค่าการทรุดตัวทันทีต่อค่าการทรุดตัว  
 สุกท้าย ( $p_i/p_{TF}$ ) สำหรับเสาเข็มแบบ Compressible  
 floating (Mattes และ Poulos, 1969)



รูปที่ 2.16 แสดงค่า Interaction Factor สำหรับเสาเข็มแบบลอย  $\alpha_F$   
(Poulos และ Davis, 1974)





รูปที่ 2.17 แสดงค่า Interaction Factor สำหรับเสาเข็มคาล,  $\alpha_E$   
 (Poulos และ Davis, 1974)

เมื่อ  $F_E =$  แฟคเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับค่า  $K, L/d$  และ  $E_b/E_s$  ดังรูปที่ 2.18

ดังนั้น ค่าการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากเสาเข็มข้างเคียง ในกรณีเสาเข็มทั้งสองมีขนาดไม่เท่ากัน สามารถหาได้ดังนี้

$$\Delta\rho_{ab} = \rho_b \cdot \alpha_{ab} \dots\dots\dots(2.20)$$

- เมื่อ  $\Delta\rho_{ab}$  = ค่าการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นของเสาเข็ม a เนื่องจากเสาเข็ม b  
 $\rho_b$  = ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มข้างเคียงเสาเข็ม a  
 $\alpha_{ab}$  = ค่า Interaction Factor เนื่องจากระยะทางจากแนวแกนของเสาเข็ม a ถึงเสาเข็ม b โดยใช้ความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม b

โดยใช้วิธี Superimpose สามารถหาค่าการทรุดตัวของเสาเข็มใด ๆ ( $k$ ),  $\rho_k$  ในกลุ่มของเสาเข็มที่เหมือนกันจำนวน  $n$  ต้น ดังสมการ

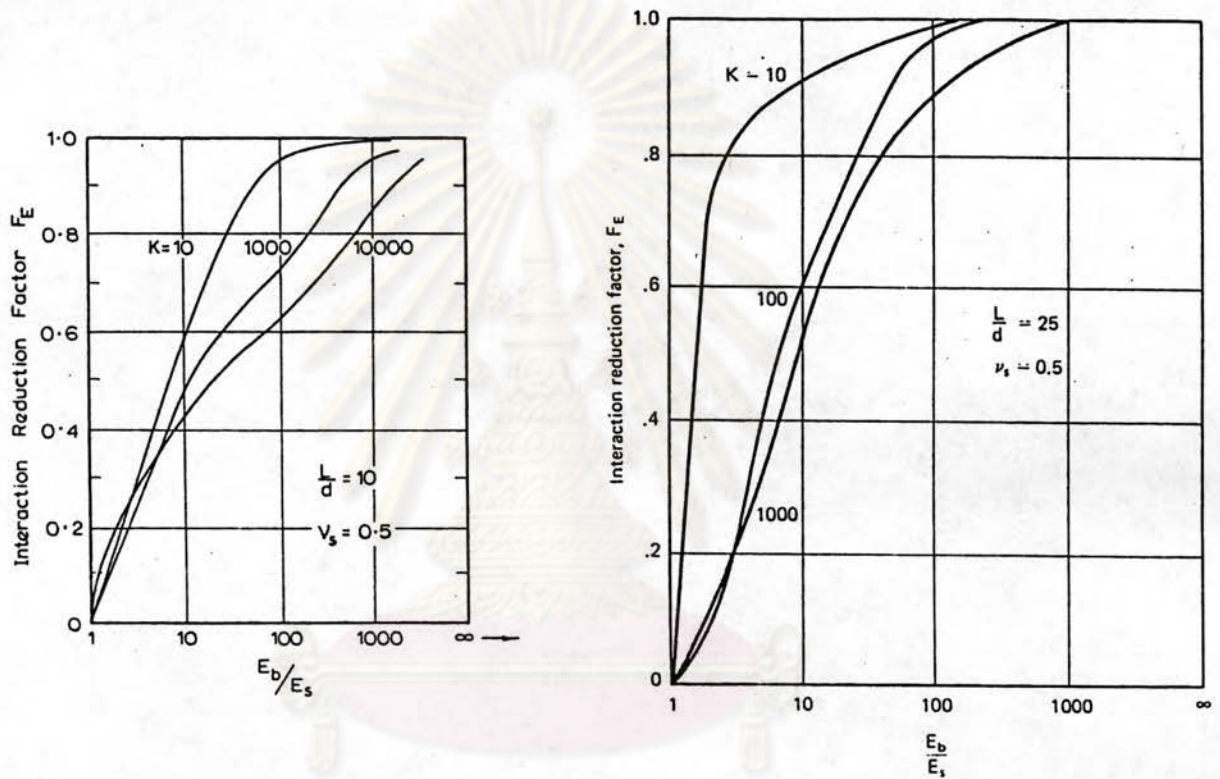
$$\rho_k = \rho_1 \sum_{j=1}^n (P_j \cdot \alpha_{kj}) \dots\dots\dots(2.21)$$

- เมื่อ  $\rho_1$  = ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยวต่อน้ำหนักกระทำ 1 หน่วย  
 $P_j$  = น้ำหนักกระทำบนเสาเข็ม  $j$   
 $\alpha_{kj}$  = Interaction Factor ระหว่างเสาเข็ม  $k$  และ  $j$   
 ( $\alpha_{kj} = 1$  เมื่อ  $k = j$ )

สำหรับเสาเข็มกลุ่มที่ประกอบด้วยเสาเข็มที่มีขนาดไม่เท่ากัน สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\rho_k = \sum_{j=1}^n (\rho_{1j} \cdot P_j \cdot \alpha_{kj}) \dots\dots\dots(2.22)$$

- เมื่อ  $\rho_{1j}$  = ค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม  $j$  ต่อน้ำหนักกระทำ 1 หน่วย  
 สำหรับการกำหนดหาค่าการทรุดตัวของดินใต้ฐานรากเสาเข็ม เนื่องจากผลของ



รูปที่ 2.18 แสดงค่าปรับแก้ Interaction Factor สำหรับความแข็งของดินชั้น  
 แยกทาน,  $F_E$  (Poulos และ Davis, 1980)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เสาเข็มกลุ่ม ในสภาพดินเป็นชั้น ๆ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.16) ซึ่งค่าการทรุดตัวนี้ จะมีความสำคัญมากกว่าในเสาเข็มเดี่ยว (Poulos ,1975) และจากการประมาณของ Steinbrinner (1934) การทรุดตัวของดินใต้เสาเข็มในสภาพดินเป็นชั้น ๆ จำนวน  $m$  ชั้น สามารถหาได้จากสมการ

$$\rho = \frac{P}{L} \left\{ \frac{I_m}{E_{sm}} + \sum_{j=2}^{m-1} \left\{ (I_j \cdot I_{j+1}) / E_{sj} \right\} \right\} \dots \dots (2.23)$$

เมื่อ  $I_j$  = Displacement influence factor บนแนวแกนของ  
เสาเข็มที่ระดับนสุดของชั้น  $j$   
 $E_{sj}$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของดินชั้น  $j$

### 2.3.5 การพิจารณาเสาเข็มกลุ่ม เป็นเสาเข็มเดี่ยวสมมูลย์

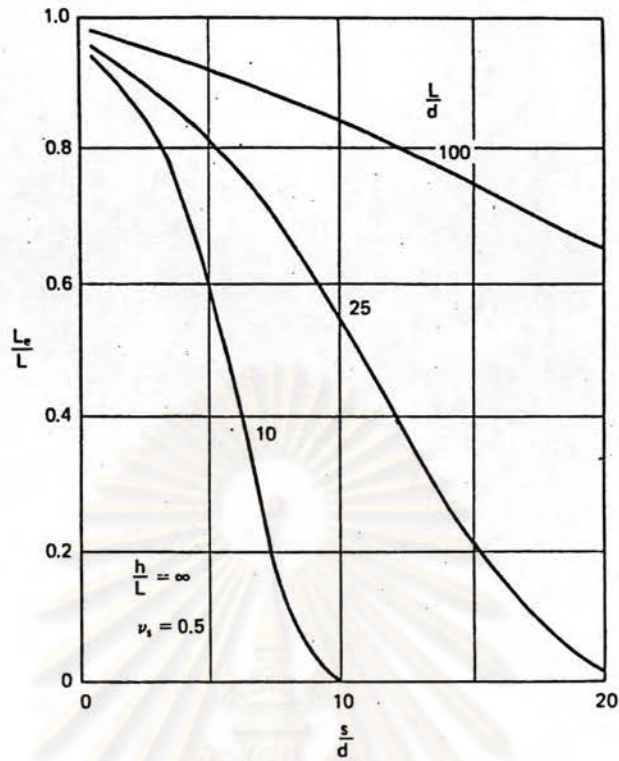
สำหรับฐานรากของสิ่งก่อสร้างที่ประกอบด้วยเสาเข็มกลุ่มจำนวนมาก Poulos และ Mattes (1980) เสนอแนะว่าเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ ให้แทนเสาเข็มแต่ละกลุ่มเป็นเสาเข็มเดี่ยวสมมูลย์ (Equivalent Single Pier) ที่มีค่าการทรุดตัวเท่า ๆ กัน โดยสามารถพิจารณาได้ 2 แบบ คือ

1. พิจารณาเป็นเสาเข็มเดี่ยวสมมูลย์ ที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของกลุ่มเสาเข็ม แต่ความยาวเสาเข็มเป็นความยาวสมมูลย์ ,  $L_e$  ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.19
2. พิจารณาเป็นเสาเข็มเดี่ยวสมมูลย์ ที่มีความยาวของเสาเข็มเท่ากับ ความยาวของเสาเข็มกลุ่ม แต่พิจารณาเส้นผาคูศูนย์กลางเป็นเส้นผาคูศูนย์กลางสมมูลย์ ,  $a_e$  ซึ่งจะเหมาะสมกับสภาพดินที่เป็นชั้น ๆ โดยค่าอัตราส่วน  $a_e/B$  สำหรับเสาเข็มลอย แสดงไว้ในรูปที่ 2.20 เมื่อ  $B$  คือความกว้างเฉลี่ยของกลุ่มเสาเข็ม

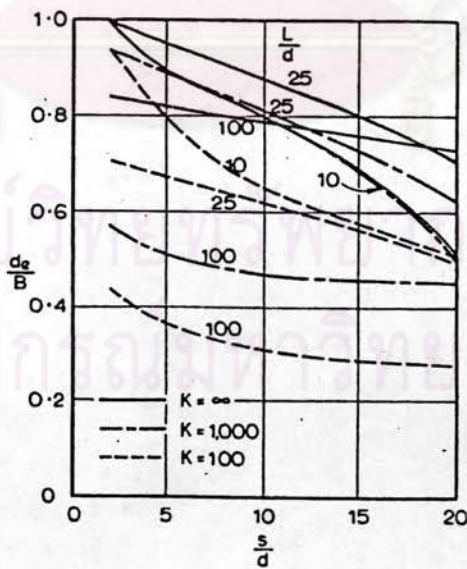
### 2.3.6 ผลของแทนหัวเสาเข็ม (Pile Cap) ต่อการทรุดตัวของเสาเข็ม

Butterfield และ Banerjee (1971) ทำการวิเคราะห์ผลของแทนหัวเสาเข็มที่ติดบนหัวเสาเข็ม โดยวิธี Numerical สรุปได้ว่าแทนหัวเสาเข็มจะช่วยลดค่าการทรุดตัวลงได้ประมาณ 5% ถึง 15% ขึ้นอยู่กับขนาดของเสาเข็มกลุ่ม

Poulos และ Davis (1972) ได้ทำการวิเคราะห์เสาเข็มในระบบฐานแพ (Raft System) โดยแบ่งเป็นกลุ่มอิสระย่อย ๆ และหาความสัมพันธ์เป็นตัวคูณ  $F_R$  กับ



รูปที่ 2.19 ความยาวสมมูลย์ ของเสาเข็มสมมูลย์ (Equivalent Pier) สำหรับเสาเข็มแบบลอย (Poulos และ Mattes, 1971)



รูปที่ 2.20 เส้นผาคูนย์กลางสมมูลย์ ของเสาเข็มสมมูลย์ สำหรับเสาเข็มแบบลอย (Poulos และ Mattes, 1971)

ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยว ดังรูปที่ 2.21 เมื่อ  $d_c$  คือเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลของแท่นหัวเสาเข็มและค่า Interaction ระหว่างกลุ่มเสาเข็มย่อยอิสระจะใช้เป็น  $\alpha_r$  ดังรูปที่ 2.22

ลักษณะของแท่นหัวเสาเข็ม สามารถแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ

1. Flexible Cap โดยเสาเข็มแต่ละต้นในกลุ่มทรุดตัวอิสระ และมีการกระจายของน้ำหนักเท่ากันทุกต้น

2. Rigid Cap โดยเสาเข็มทุกต้นในกลุ่มเสาเข็ม มีการทรุดตัวเท่ากัน และมีการกระจายของน้ำหนักเท่ากันทุกต้น

Poulos (1972) และ Poulos และ Davis (1980) พบว่าในทางปฏิบัติ เมื่อเสาเข็มทุกต้นรับน้ำหนักเท่ากัน ค่าการทรุดตัวจะไม่แตกต่างจากการทรุดตัวเฉลี่ยของเสาเข็มกลุ่มไม่ว่าลักษณะของแท่นหัวเสาเข็มจะเป็น Flexible Cap หรือ Rigid Cap และการกำหนดค่าการทรุดตัวของเสาเข็มกลุ่มเท่ากับ 90% ของค่าการทรุดตัวของเสาเข็มต้นกลางในกลุ่มให้ความถูกต้องเพียงพอ

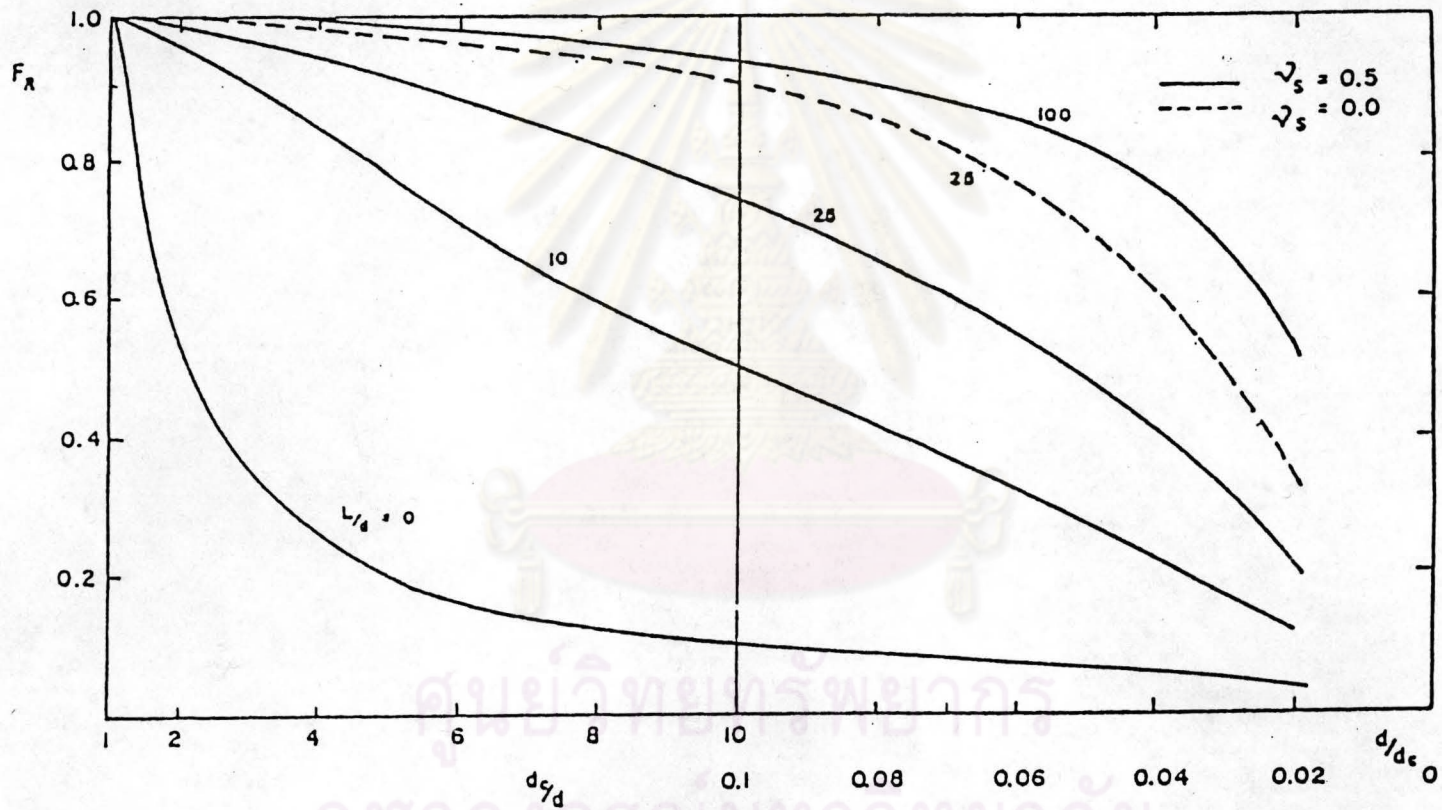
2.3.7 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการประมาณค่าการทรุดตัว โดยวิธี Modified Theory of Elasticity

จากการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มโดยใช้ทฤษฎี Elasticity จะเห็นว่า คุณสมบัติของดินทางด้านการสามารถยุบตัวที่ใช้ในการคำนวณมีความสำคัญมากต่อผลการวิเคราะห์ที่ได้ เนื่องจากความไม่แน่นอนของข้อมูลหลายอย่างในการหาค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม เช่นผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ ผลของการติดตั้งเสาเข็มและลักษณะชั้นดิน เป็นต้น ดังนั้นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดิน ( $E_s$ ) ที่น่าเชื่อถือที่สุดควรได้มาจากการคำนวณกลับของการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มในสนาม ซึ่งรวมผลของข้อมูลที่ไม่แน่นอนเข้าด้วยกัน

ในกรณีที่มีการทดสอบเสาเข็ม ใช้เสาเข็มสมอ (Anchor Piles) ค่าการทรุดตัวที่วัดได้ จะต้องปรับแก้เนื่องจากผลของ Interaction จากเสาเข็มสมอ Poulos และ Mattes (1974) ได้เสนอค่าปรับแก้  $F_c$  ดังสมการ

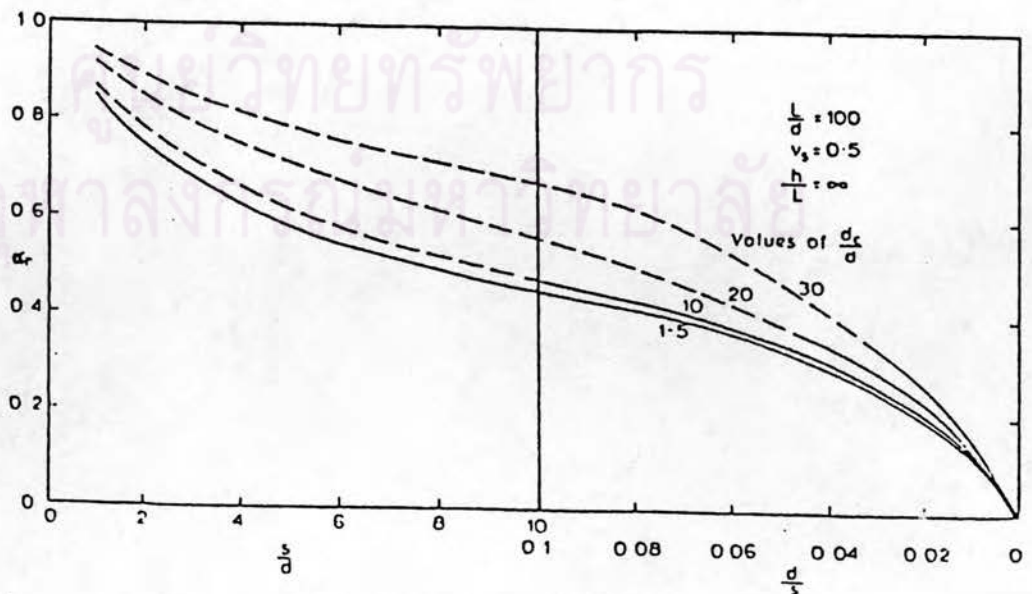
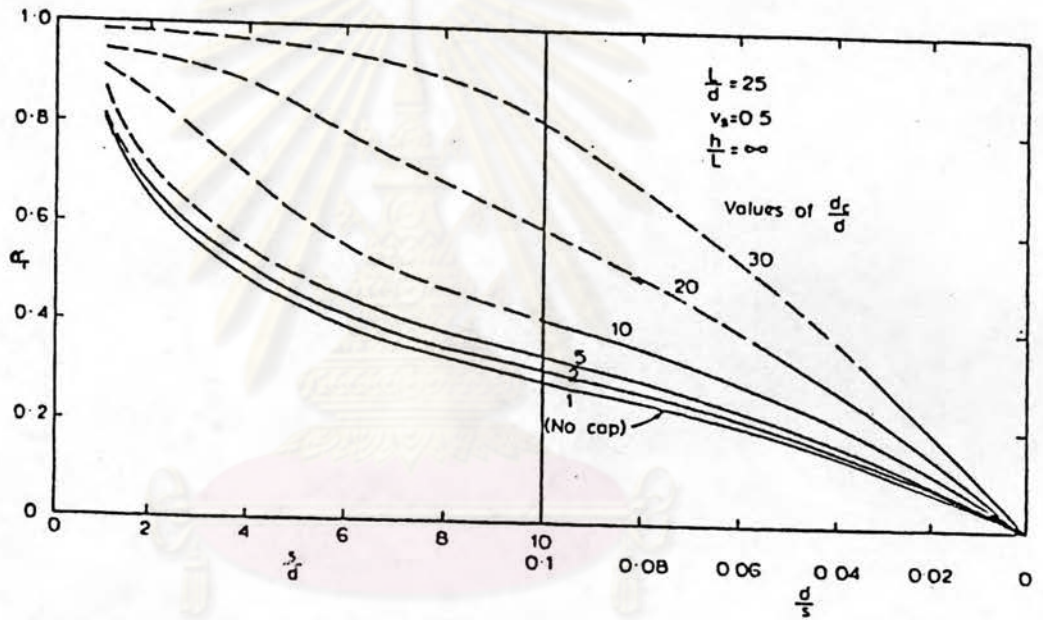
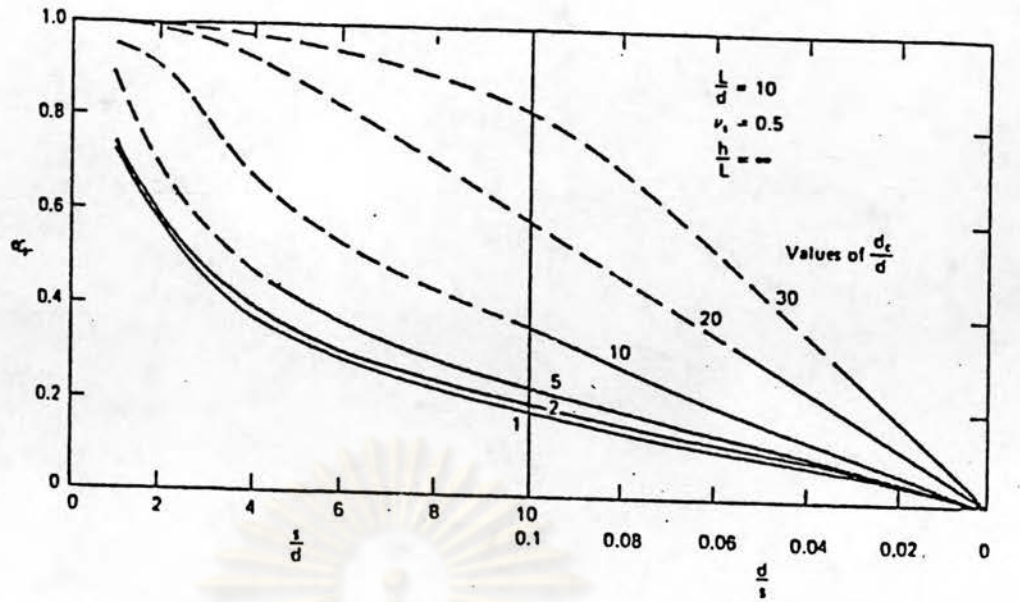
$$F_c = 1 / (1 - \alpha) \dots\dots\dots(2.24)$$

เมื่อ  $F_c$  คือ อัตราส่วนระหว่างค่าการทรุดตัวจริงต่อค่าการทรุดตัวที่วัดได้ของเสาเข็มที่ทดสอบ



รูปที่ 2.21 ค่าปรับแก้เนื่องจากอิทธิพลของ Pile cap,  $F_R$  (Davis และ Poulos, 1972)

I16018032



รูปที่ 2.22 Interaction Factor สำหรับเสาเข็มในระบบ pile raft,  $\alpha_r$   
 (Poulos และ Davis, 1972)



$\alpha$  คือ Interaction Factor ที่ระยะระหว่างเสาเข็มที่ทดสอบ  
กับเสาเข็มเสมอ

กรณีที่ไม่ม่ข้อมูลของการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มในสนาม Poulos (1977) และ Desai (1977) แนะนำให้ใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินในการวิเคราะห์ ประมาณ 4 ถึง 10 เท่าของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดลอง Triaxial Test ในขณะที่ Bromhan และ Styles (1971) และ Mattes (1972) แนะนำให้ใช้ 3 เท่า และ 8 เท่าตามลำดับ

สำหรับค่าโมดูลัสของดินที่ใช้ในการคำนวณค่าการทรุดตัวของดินข้างใต้เสาเข็ม Poulos (1972) แนะนำให้ใช้จากค่าคุณสมบัติในการยุบตัวของดินโดยใช้สมการที่ (2.5) และ (2.6) ส่วนค่าอัตราส่วนปัวซองของ Poulos และ Davis (1980) แนะนำให้ใช้ค่าอัตราส่วนปัวซองแบบระบายน้ำ สำหรับดินเหนียวชนิดต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2 และค่า Pile-Stiffness Factor (K) สำหรับเสาเข็มและดินชนิดต่าง ๆ ได้แนะนำให้ใช้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.3

#### 2.4 อัตราการทรุดตัว (Rate of Consolidation)

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์อัตราการทรุดตัว คือ สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of Consolidation,  $c_v$ ) การวิเคราะห์อัตราการทรุดตัว อาจทำได้โดยใช้วิธีการพื้นฐาน อาศัยทฤษฎีการอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ ของ Terzaghi ในกรณีที่เสาเข็มมีความยาวสั้นมาก และมีพฤติกรรมไม่ต่างกับฐานรากตัน ซึ่งความสามารถของการคายตะเน อัตราการทรุดตัวขึ้นอยู่กับสาเหตุ 2 ประการ คือ

1. ค่า  $c_v$  ไม่ได้เป็นคุณสมบัติโดยเนื้อแท้ของดิน (Intrinsic Soil Parameter) แต่เป็นพารามิเตอร์ที่รวมผลของ ความสามารถซึมผ่านได้ และความสามารถยุบอัดตัวของดิน

2. การเลือกขอบเขตของการระบายน้ำ (Drainage Boundary Condition) เป็นสาเหตุสำคัญที่จะทำให้การคายตะเนอัตราการทรุดตัวมีผลลาคไป

โดยทั่วไปแล้วค่า  $c_v$  ที่ได้จากทดลองด้วยเครื่อง Oedometer จะให้ค่าที่ต่ำกว่าความเป็นจริงในสนามมาก โดยเฉพาะในบริเวณที่มีการสูบน้ำบาดาล ซึ่งจะเร่งให้อัตราการทรุดตัวเร็วขึ้น คร.สุรจัตร์ (2527) ได้แนะนำเทคนิคในการวิเคราะห์ อัตราการทรุดตัวของดินเหนียวไว้ดังนี้

ก. หาค่า  $c_v$  โดยวิธีของ Asaoka โดยอาศัยข้อมูลการทรุดตัวที่วัดได้ในสนาม ภายในช่วงเวลาที่เหมาะสม ทำการเขียนเส้นความสัมพันธ์ระหว่าง การทรุดตัวกับเวลา แล้วแบ่ง ออกเป็นช่วงเวลาที่เท่า ๆ กัน  $\Delta t$  (ปกติ  $\Delta t$  เท่ากับ 30 วัน ถึง 100 วัน) อ่านค่าการทรุดตัว  $p_1, p_2, p_3, \dots$  ซึ่งสอดคล้องกับเวลา  $t_1, t_2, t_3, \dots$  ดังแสดงในรูปที่ 2.23 (a) นำ ค่าการทรุดตัวที่ได้มาลงจุด  $(p_1, p_2), (p_2, p_3), \dots$  ในแกนของ  $p_{i-1}$  และ  $p_i$  จาก เส้นตรงผ่านจุดเหล่านี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.23 (b) หากความชันของเส้นตรง ( $\beta_1$ )

ค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายน้ำ  $c_v$  สามารถหาได้จากสมการ

$$c_v = \frac{-5}{12} \cdot Hd^2 \cdot \frac{\ln \beta_1}{\Delta t} \dots \dots \dots (2.25)$$

เมื่อ  $Hd$  = ความยาวของเส้นทางระบายน้ำ (Drainage Path)

ค่า  $c_v$  ที่ได้จะถูกต้อง และเชื่อถือได้เมื่อมีข้อมูลการทรุดตัวในช่วงเวลาที่นานพอ อย่างน้อยเท่ากับ 60 % ของระดัการอัดตัวคายน้ำ (Magnan และ Deroy, 1980)

ข. จากผลการทดสอบ Consolidation ในห้องปฏิบัติการทำการเปรียบเทียบหาสัดส่วนของค่า  $c_v$  ที่ระดัความเกิน ของสิ่งก่อสร้างในข้อ ก. กับค่าที่ระดัความเกินของปัญหาที่กำลังศึกษา

ค. นำค่า  $c_v$  ที่ได้ในข้อ ก. มาปรับแก้โดยใช้สัดส่วนในข้อ ข. ค่า  $c_v$  ที่ได้ นี้จะเป็นค่าที่ถูกต้องที่สุดสำหรับปัญหาที่กำลังศึกษา

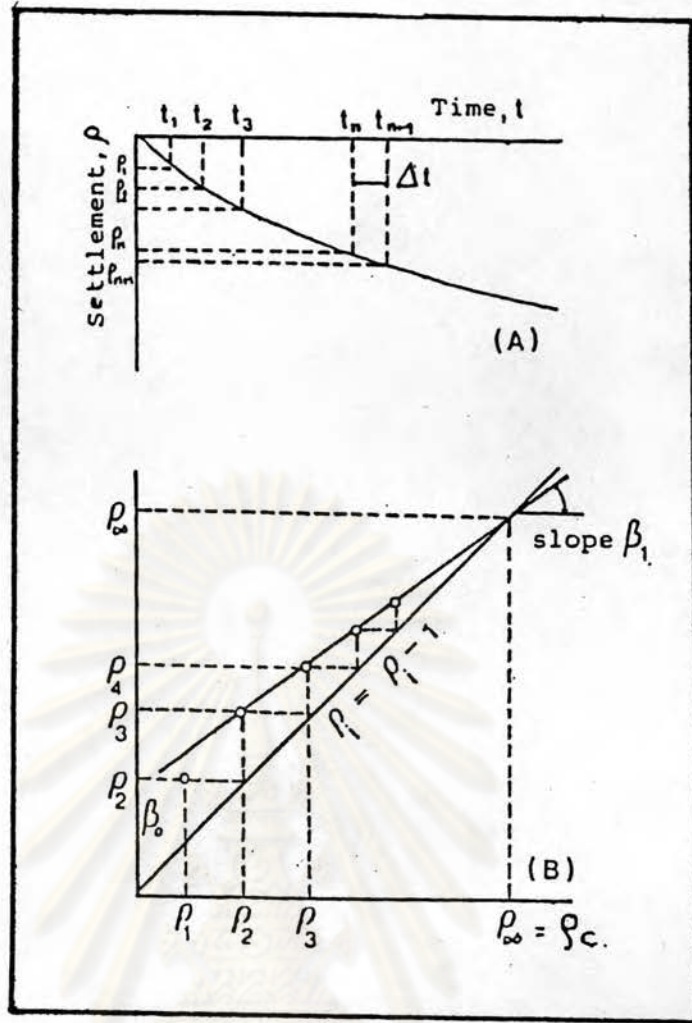
สำหรับค่าการทรุดตัวที่เวลาใด เวลาหนึ่งนั้นสามารถหาได้จาก

$$p_t = u \cdot p_c \dots \dots \dots (2.26)$$

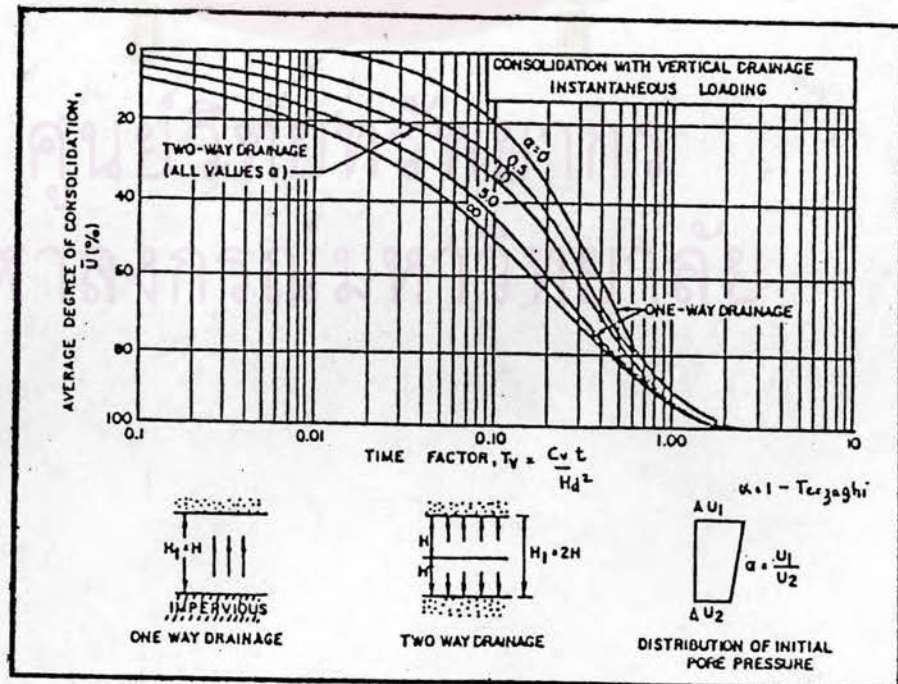
เมื่อ  $u$  = ระดัการอัดตัวคายน้ำ (Degree of Consolidation) เป็นฟังก์ชันกับ  $T$  (Time factor) จากทฤษฎีของ Terzaghi ดังแสดงในรูปที่ 2.24

$$\text{โดยที่ } T = \frac{c_v \cdot t}{Hd^2} \dots \dots \dots (2.27)$$

Poulos และ Davis (1968) ได้ทำการเปรียบเทียบผลของระดัการอัดตัวคายน้ำ ระหว่างฐานรากเสาเข็มเดี่ยวแบบลอยกับฐานรากระดัผิวดิน (Surface Footing)



รูปที่ 2.23 แสดงการหาค่าอัตราการทรุดตัว โดยวิธีของ Asoka



รูปที่ 2.24 อัตราการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) สำหรับการระบายน้ำในแนวดิ่ง (DM-7)

โดยอาศัยทฤษฎีการอัดตัวคายนํ้าแบบ 1 มิติ พบว่าให้ค่าแตกต่างกันไม่มากนัก เมื่อความยาวเสาเข็มไม่มากนัก และอัตราการทรุดตัวจะเพิ่มขึ้น เมื่อความยาวเสาเข็มเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.25

เมื่อ  $T_v$  = Time factor มีค่าเท่ากับ  $\frac{C_v \cdot t}{d^2}$

โดยที่  $C_v$  = สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายนํ้าของชั้นดินที่เสาเข็มฝังตัวอยู่

$d$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มเดี่ยว

2.5 การประมาณค่าการทรุดตัว เนื่องจากการเกิดแรงดูดของเสาเข็ม เนื่องจากดินถม (Negative skin friction load due to fill Surcharge) สำหรับฐานรากเสาเข็มในชั้นดินเหนียว

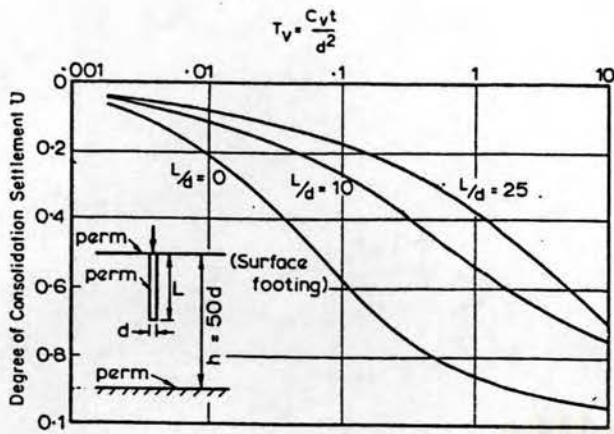
เมื่อฐานรากแบบเสาเข็ม มีเสาเข็มฝังอยู่ในชั้นดินที่มีการอัดตัวคายนํ้าได้ (Consolidating Soil Mass) แรงดูดของเสาเข็มจะเกิดขึ้นบริเวณผิวรอบนอกของเสาเข็ม อันเป็นผลเนื่องมาจากการเคลื่อนตัวของดินบริเวณรอบ ๆ เสาเข็มมากกว่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ซึ่งแรงดูดนี้ เกิดจากแรงเสียดทานในทางลบ (Negative skin friction) แรงเสียดทานดังกล่าวเกิดขึ้นในลักษณะที่ตรงกันข้ามกับแรงต้าน เนื่องจากผลของการเสียดทานระหว่างดินกับเสาเข็ม ซึ่งในกรณีนี้เสาเข็มจะเคลื่อนตัวมากกว่าดินที่อยู่บริเวณรอบ ๆ

แรงดูดของเสาเข็มที่เกิดขึ้นอาจมากเพียงพอที่จะทำให้ เกิดการเสียหายหรือเกิดการทรุดตัวเกินพิสัยการใช้งานของสิ่งก่อสร้างได้ ถ้าผู้ออกแบบมิได้คำนึงถึงการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้น จากการเกิดแรงดูดของเสาเข็ม

2.5.1 สาเหตุการเกิดแรงเสียดทานในทางลบ

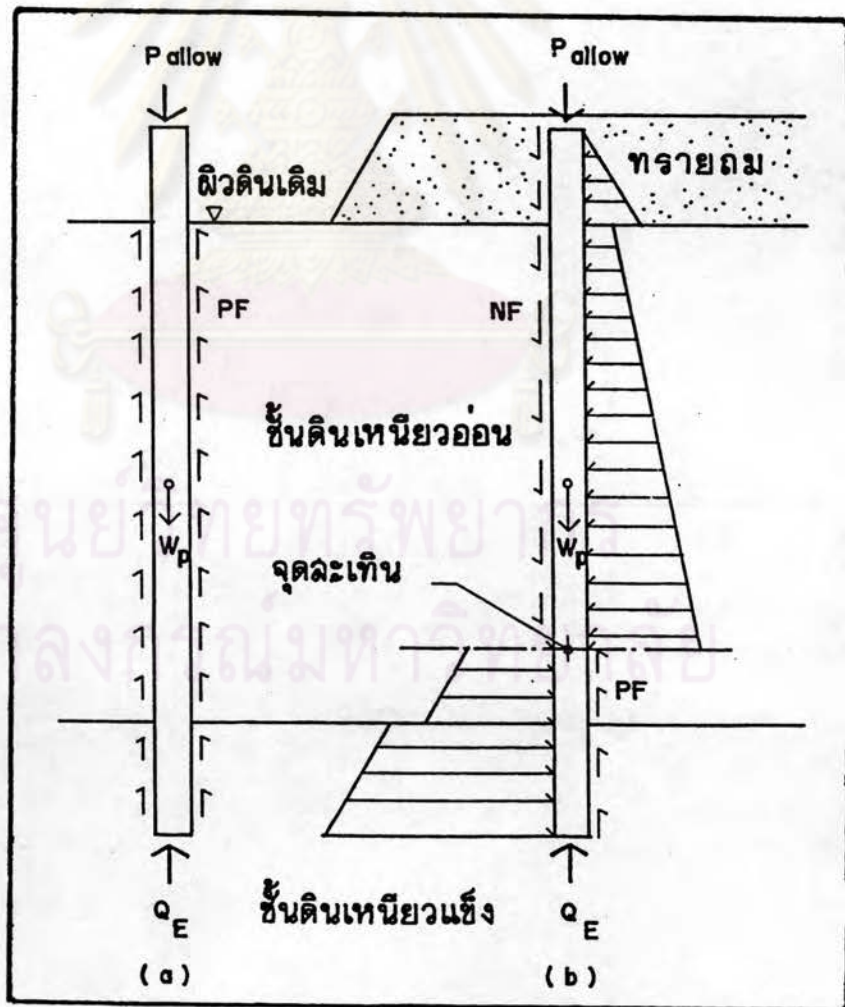
สำหรับฐานรากเสาเข็มในชั้นดินเหนียว สาเหตุที่ทำให้ดินบริเวณโคจรอบเสาเข็มเกิดแรงเสียดทานในทางลบ อาจเนื่องจากหลายประการ ดังนี้

1. การอัดตัวคายนํ้า ของชั้นดินอ่อนที่ตั้งอยู่บนชั้นดินแข็ง อันเนื่องมาจากดินถมและปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินแข็ง
2. การอัดตัวคายนํ้า เนื่องจากน้ำหนักของชั้นดินชั้นบนในขณะที่ดินชั้นล่างไม่เคลื่อนตัว และปลายเสาเข็มอยู่ในดินชั้นล่าง
3. การลดลงของระดับน้ำใต้ดิน หรือผลของการสูบน้ำบาดาล



รูปที่ 2.25 เปรียบเทียบอัตราการทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มกับ Surface footing (Poulos และ Davis, 1968)

ชนิดของดิน	ค่า $\beta$
Rock fill	0.4
Sand and gravel	0.35
Silt and normally consolidated clay with low plasticity ( $PI < 50\%$ )	0.30
Normally consolidated clay with high liquid limit ( $PI > 50\%$ )	0.20



รูปที่ 2.26 แสดงการเกิดแรงเสียดทานในทางลบ เนื่องจากการถมดิน

4. การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ ที่เป็นผลของความค้ำน้ำในโพรง  
เพิ่มขึ้นจากการตอกเสาเข็มในดินเหนียว ในกรณีที่ดินที่ปลายเสาเข็มมีการเคลื่อนตัวน้อยกว่า

แรงเสียดทานในทางลบ อันเป็นผลเนื่องมาจากการอัดตัวคายน้ำของชั้นดินเหนียว  
เนื่องจากหน่วยแรงที่มากกระทำที่ผิวดิน เช่น การถมดิน มักจะเกิดในกรณีที่ดินชั้นบนบริเวณรอบ  
เสาเข็ม มีการยุบอัดตัวไค้มากกว่า ชั้นดินที่อยู่ปลายเสาเข็ม พิจารณารูปที่ 2.26 (a) แสดงถึง  
ลักษณะการเกิดแรงในเสาเข็มสภาพใช้งานปกติ น้ำหนักของโครงสร้างและน้ำหนักของเสาเข็ม  
เอง จะถูกต้านทานด้วยแรงต้านเนื่องจากการเสียดทาน (Positive skin friction, PF)  
และแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (End bearing Capacity,  $Q_E$ )

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress)  
ในมวลดิน เนื่องจากการถมดิน ถ้าดินชั้นบนซึ่งได้รับหน่วยแรงเกินสูง และมีการทรุดตัวมากกว่า  
ดินชั้นล่างที่อยู่ปลายเสาเข็ม และทำให้ดินบริเวณรอบ ๆ เสาเข็มในบริเวณของดินชั้นบนเกิดการ  
เคลื่อนตัวมากกว่า การเคลื่อนตัวของเสาเข็มในบริเวณนั้น แรงเสียดทานในทางลบ (Negative  
skin friction, NF) ก็จะมีขึ้นในบริเวณดินชั้นบน ขณะที่ดินชั้นล่างได้รับหน่วยแรงเกินต่ำ  
และมีการทรุดตัวน้อย การเคลื่อนตัวของดินชั้นล่างจะน้อยกว่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ทำให้ยัง  
คงเกิดแรงต้านเนื่องจากการเสียดทานอยู่จุดที่การเคลื่อนตัวของมวลดินรอบ ๆ เสาเข็ม เท่ากับ  
การเคลื่อนตัวของเสาเข็ม หรือจุดที่เปลี่ยนจาก แรงเสียดทานในทางลบ เป็นแรงต้านเนื่องจาก  
การเสียดทานเรียกว่า จุดสะเทิน (Neutral point) ดังแสดงลักษณะการเกิดแรงเสียดทาน  
ในทางลบ เนื่องจากการถมดินในรูปที่ 2.26 (b)

จากสภาพสมดุลของแรงจะได้ว่า

$$P_{allow} = \frac{Q_s + Q_E - W_p - NF}{F.S} \dots\dots\dots(2.28)$$

เมื่อ  $P_{allow}$  = น้ำหนักบรรทุกที่เสาเข็มจะรับได้

$Q_s$  = แรงต้านสูงสุดเนื่องจากการเสียดทาน (Ultimate Positive skin friction load) กิจเฉพาะส่วนของเสาเข็มที่ต่ำกว่าจุดสะเทิน

$Q_E$  = แรงต้านสูงสุดที่ปลายเสาเข็ม (Ultimate End bearing Capacity)

- Wp = น้ำหนักของเส้าเข็ม
- NF = แรงจุดลงสูงสุดที่เกิดขึ้นในเส้าเข็ม
- F.S. = พิกัดความปลอดภัยมีค่าประมาณ 1.8 - 2.0

Broms (1978) แนะนำให้วางจุดสะเทิน ณ จุดที่ การเคลื่อนของชั้นดิน และเส้าเข็มมีค่าเท่ากัน การวางจุดสะเทินที่เส้นขอบเขต ระหว่างชั้นดินเหนียวอ่อน และดินเหนียวแข็ง หรือ ระหว่างชั้นดินที่อ่อนกว่าไปยังชั้นดินที่แข็งแรงกว่าจะเป็นวิธีที่ง่ายในทางปฏิบัติ และให้ความถูกต้องเพียงพอ

2.5.2 การประมาณค่าแรงจุดลงของเส้าเข็ม

ขนาดของแรงเสียดทานลบ จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น คุณสมบัติของเส้าเข็ม คุณสมบัติของชั้นดิน และ วิธีการและระยะเวลาในการติดตั้งเส้าเข็ม เป็นต้น ใค้ผู้พยายามหาขนาดของแรงเสียดทานในทางลบหลายท่าน เช่น Broms (1978) เสนอสมการหาค่าหน่วยแรงเสียดทานในทางลบ ที่ทำให้เกิดแรงจุดลงของเส้าเข็มสูงสุด ซึ่งแรงจุดลงสูงสุดนี้จะมีเกิดขึ้นเมื่อ การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ (Relative displacement) ระหว่างดินโศยรอบเส้าเข็มกับเส้าเข็มเกิดขึ้นเพียง 2-5 มิลลิเมตรเท่านั้น ในกรณีเส้าเข็มกลุ่มมีระยะห่างเส้าเข็มประมาณ 3-4 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้าเข็ม สามารถหาแรงจุดลงในเส้าเข็มต่อต้นในเส้าเข็มกลุ่ม (NF) ได้ดังนี้

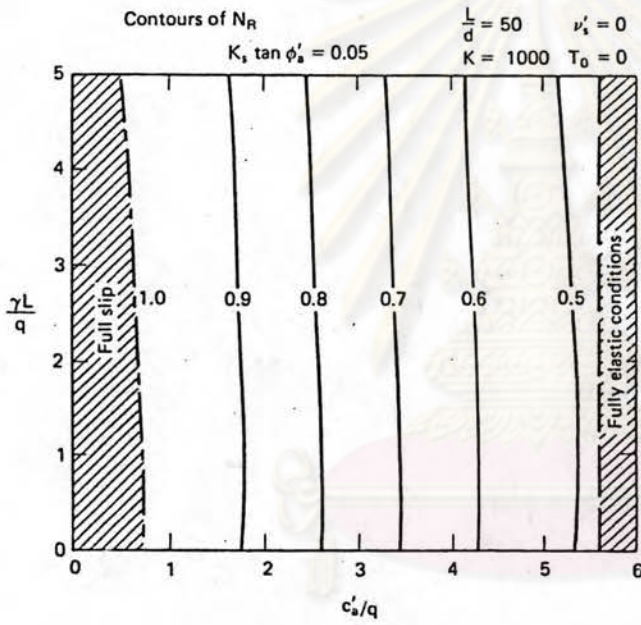
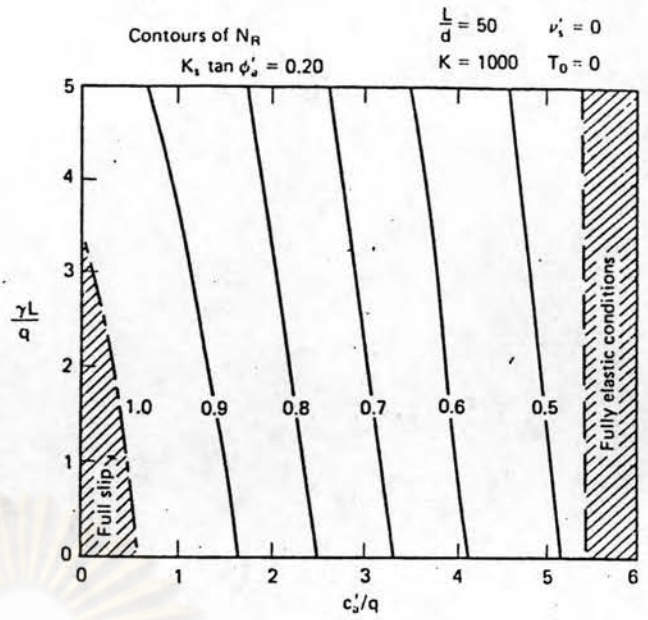
$$NF = f_{s_{neg}} \cdot A_s \dots\dots\dots(2.29)$$

- เมื่อ  $f_{s_{neg}}$  = หน่วยแรงเสียดทานในทางลบสูงสุด
- $A_s$  = พื้นที่ผิวของเส้าเข็ม ที่หน่วยแรงเสียดทานในทางลบกระทำคือ บริเวณส่วนที่อยู่เหนือจุดสะเทิน

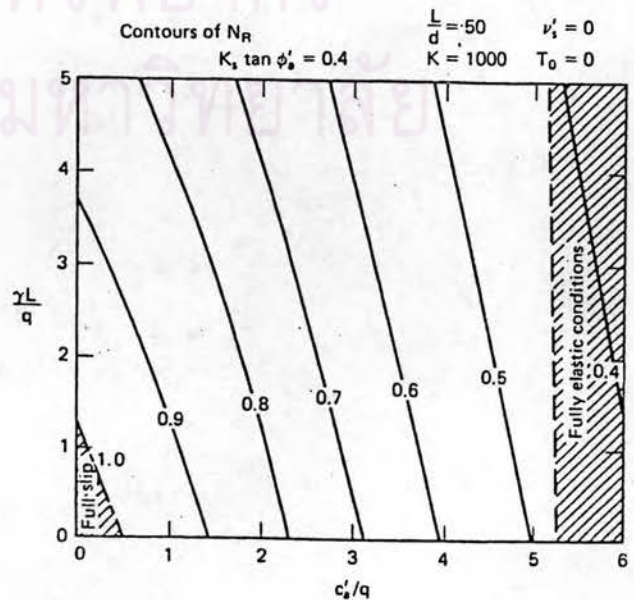
$$\text{โศยที่} \quad f_{s_{neg}} = \beta \cdot \bar{\sigma}_v \dots\dots\dots(2.30)$$

- เมื่อ  $\beta$  = สัมประสิทธิ์ได้จากตารางที่ 2.4 เสนอแนะโดย Broms (1978)

$$\bar{\sigma}_v = \text{หน่วยแรงประสิทธิผลในมวลดินในแนวตั้ง เมื่อคำนึงถึง การเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงที่ทำให้เกิดแรงจุดลงในเส้าเข็ม}$$



รูปที่ 2.27 แสดงค่าปรับแก้ ในกรณีที่เกิดการลื่นไถลระหว่างดินกับเสาเข็มไม้เต็มทึ่,  $N_R$



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Terzaghi และ Peck (1967) ได้ประมาณค่าแรงจุดลงของเสาเข็ม ที่สามารถส่งถ่ายไปยังเสาเข็มได้มากที่สุด จะเท่ากับผลรวมของค่าซีค้ำกัของหน่วยแรงเฉือนระหว่างมวลดินกับเสาเข็ม ( $\tau_a$ ) ดังสมการ

$$NF = \int_0^z \tau_a \cdot C \cdot dz \dots\dots\dots (2.31)$$

เมื่อ  $C$  = เส้นรอบรูปของเสาเข็ม

แรงจุดลงของเสาเข็มจะมีค่ามากที่สุดที่จุดสะเทิน หรือที่ปลายเสาเข็ม ในกรณีที่ชั้นดินที่ปลายเสาเข็ม เป็นชั้นดินแบกทานที่แข็งแกร่ง (Rigid Base) เมื่อการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งในมวลดิน เนื่องจากการถมดินขึ้นกับเวลา (เกิดการอัตรัดคายน้ำ) ก็จะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของแรงจุดลงในเสาเข็มขึ้นกับเวลาเช่นกัน

แรงจุดลงของเสาเข็มจะมีค่าสูงสุดเมื่อ การอัตรัดคายน้ำของชั้นดินใกล้สิ้นสุดลง ดังนั้นค่าซีค้ำกัของหน่วยแรงเฉือนระหว่างมวลดินกับเสาเข็มควรจะใช้ในสภาวะระบายน้ำ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการของ Coulomb ดังนี้

$$\tau_a = C'_a + K_s \cdot \sigma_v \cdot \tan \phi'_a \dots\dots\dots (2.32)$$

เมื่อ  $C'_a$  = ค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างดินกับเสาเข็มในสภาวะระบายน้ำ (drained soil-pile adhesion)

$K_s$  = สัมประสิทธิ์ความดันด้านข้างของดิน  
(Coefficient of Lateral Earth pressure)

$\phi'_a$  = ค่ามุมเสียดทานระหว่างดินกับเสาเข็มในสภาวะระบายน้ำ

ดังนั้นในกรณีที่ดินมีเนื้อสม่ำเสมอโดยตลอด จะได้ว่า

$$NF = CL \{ C'_a + K_s \cdot \tan \phi'_a \left( \frac{\gamma L}{2} + q \right) \} \dots\dots (2.33)$$

เมื่อ  $L$  = ระยะที่เกิดแรงเสียดทานในทางลบ (ตั้งแต่หัวเสาเข็มมายังจุดสะเทิน)

$q$  = หน่วยแรงประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากดินถม

$\gamma$  = ความหนาแน่นประสิทธิผลของดิน (Effective weight)

Poulos และ Davis (1975) , Poulos และ Mattes (1969) ได้เสนอ

สมการ สำหรับการประมาณค่า แรงกระทำต่อเสาเข็มสูงสุด เมื่อรวมผลของการเกิดแรงดูดของเสาเข็ม เนื่องจากการถมดิน โดยมีตัวปรับแก้ที่ผลต่าง ๆ ดังนี้

$$P_n = P_{NFS} \cdot N_R \cdot N_T + P_a \dots\dots\dots(2.34)$$

เมื่อ  $P_{NFS}$  = แรงดูดของเสาเข็มสูงสุด เมื่อเกิดการลื่นไถลเต็มที่ระหว่างดินกับเสาเข็ม (full pile-soil slip) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.33)

$N_R$  = ตัวปรับแก้ในกรณีที่เกิดการลื่นไถลระหว่างดินกับเสาเข็มไม่เต็มที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.27 (a-c)

$N_T$  = ตัวปรับแก้เนื่องจากผลของการติดตั้งเสาเข็มภายหลังการถมดินสำหรับชั้นดินที่มีการระบายน้ำทางเดียว และ 2 ทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.28 (a-b)

โดยที่  $T_o$  = Time Factor มีค่าเท่ากับ  $\frac{C_v t_o}{L^2}$

เมื่อ  $C_v$  = สัมประสิทธิ์การอัดตัวคาน้ำของชั้นดินที่เกิดแรงดูดในเสาเข็ม (ชั้นดินที่เกิดการอัดตัวคาน้ำ เนื่องจากดินถม)

$t_o$  = ระยะเวลาภายหลังการถมดิน

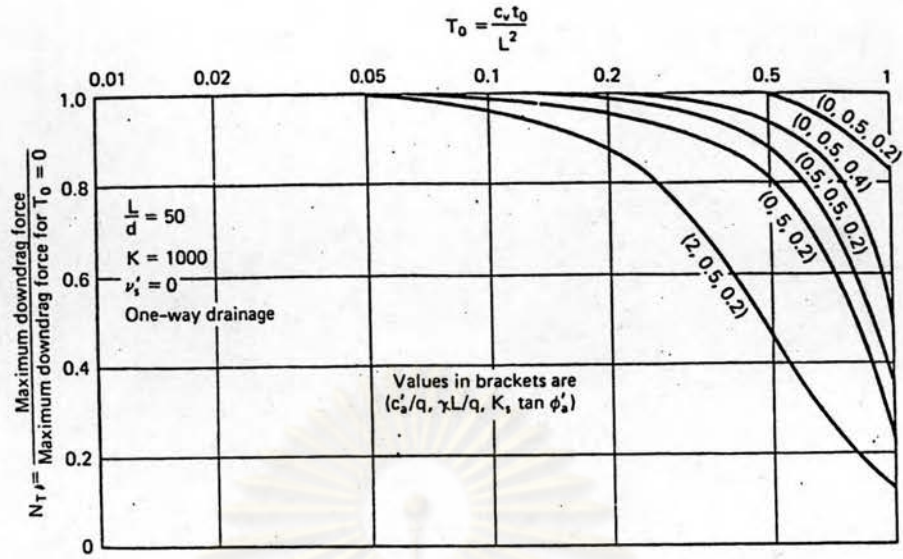
$P_a$  = แรงกระทำต่อเสาเข็มเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกปกติ และน้ำหนักของเสาเข็ม

### 2.5.3 อัตราการเกิดแรงดูดของเสาเข็ม (Rate of Development of Downdrag Force)

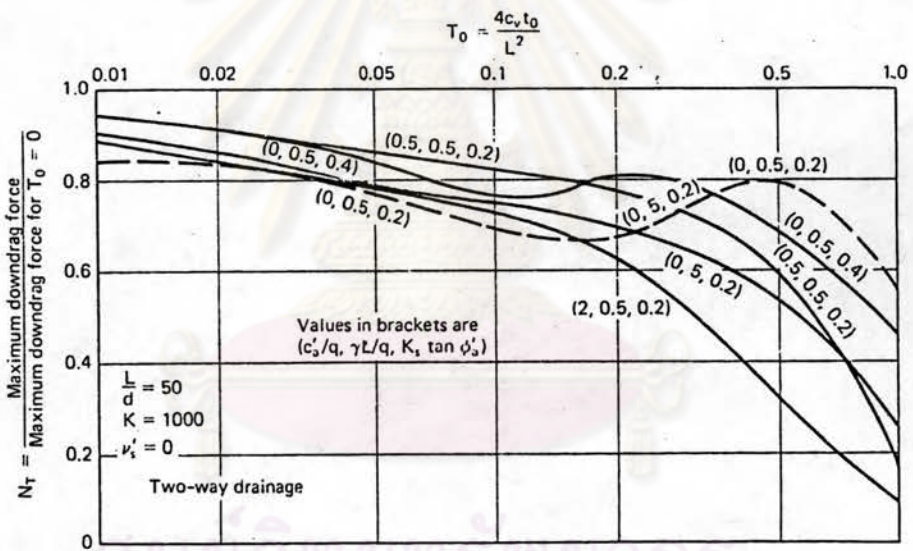
Poulos และ Davis (1972) ได้แสดงสมการ ของแรงที่กระทำต่อเสาเข็มเดี่ยวเมื่อเวลาใด ๆ ( $P_t$ ) ซึ่งรวมผลของการเกิดแรงเสียดทานในทางลบด้วย ดังนี้

$$P_t = U_n \cdot P_{NFS} + P_a \dots\dots\dots(2.33)$$

เมื่อ  $U_n$  = ระดับการเกิดแรงดูดของเสาเข็ม (Degree of Development of Downdrag Force) โดยพิจารณาให้ชั้นดินที่ปลายเสาเข็มไม่มีการเคลื่อนตัว



(a)

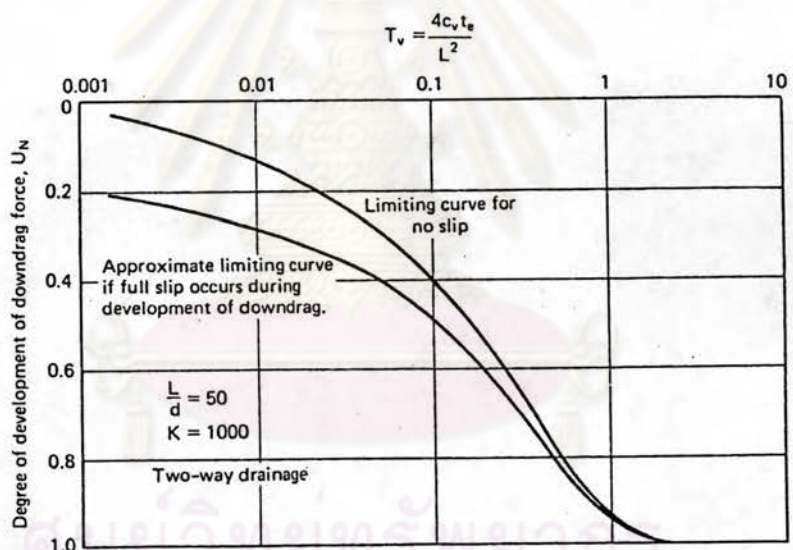
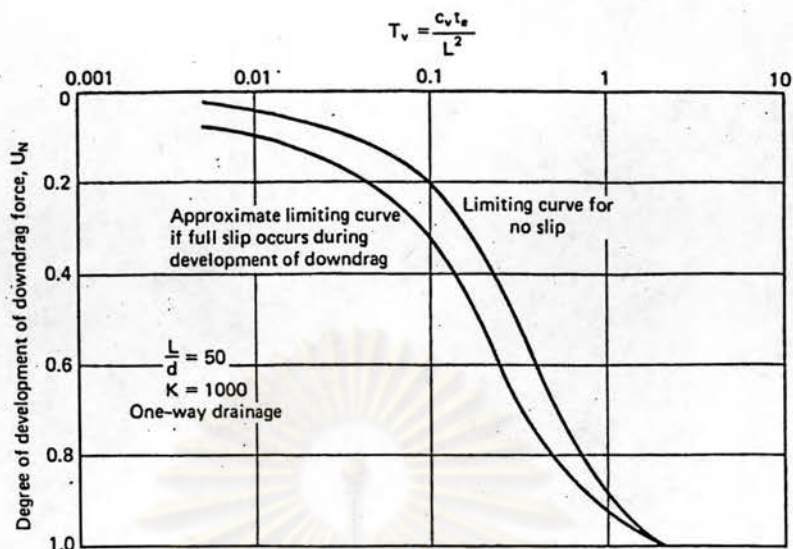


(b)

รูปที่ 2.28 แสดงการปรับแก้เนื่องผลของการตีคั้งเสาเข็มภายหลัง

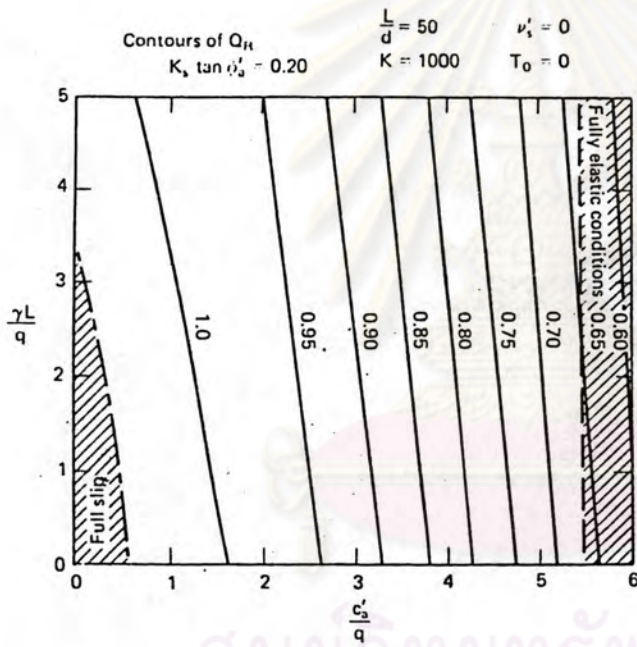
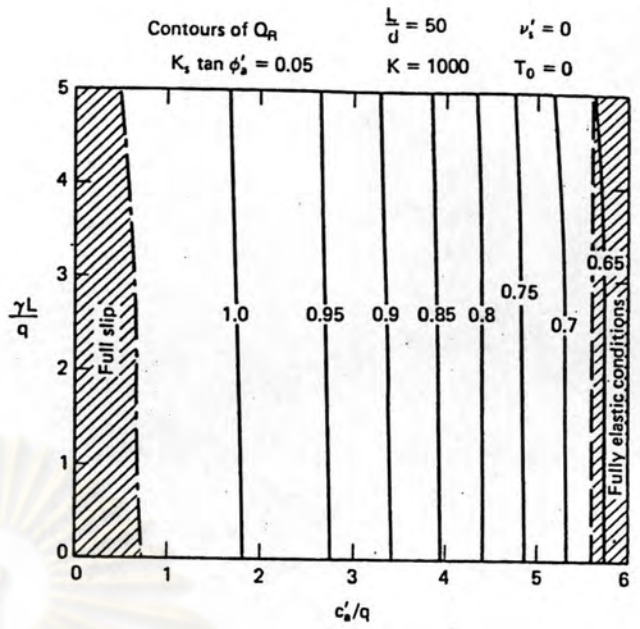
การถมดิน,  $N_T$

- a) ในกรณีชั้นดินระบายน้ำทางเดียว
- b) ในกรณีชั้นดินระบายน้ำได้สองทาง

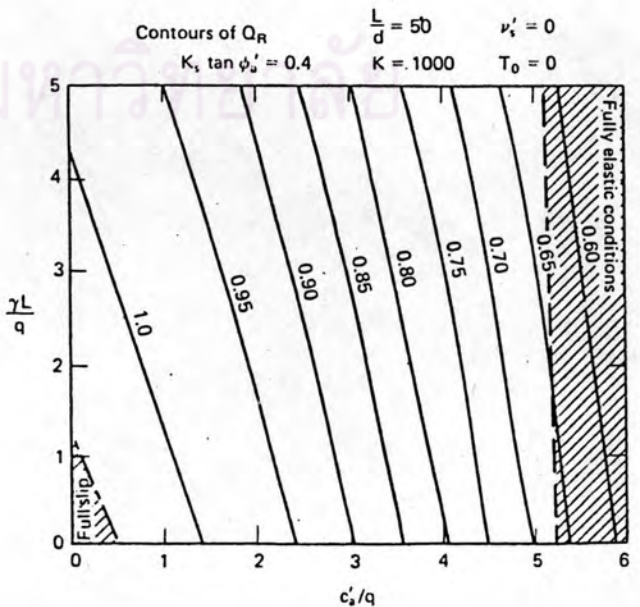


รูปที่ 2.29 แสดงอัตราการเกิดแรงจูงลงในเสาเข็มเนื่องจากการเกิดแรงเสียดทานในทางลบ

- a) ในกรณีชั้นดินระบายน้ำทางเดียว
- b) ในกรณีชั้นดินระบายน้ำสองทาง



รูปที่ 2.30 ค่าปรับแก้ การทรุดตัวในกรณี  
 ที่เกิดการลื่นไถลระหว่างดินกับ  
 เส้าเข็มไม้เค็มที่  $Q_R$



$$\text{โดยที่ } T_v = \text{Time Factor มีค่าเท่ากับ } \frac{C_v \cdot t_e}{L^2}$$

เมื่อ  $C_v$  = สัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำของชั้นดินที่เกิดการอัดตัวคายน้ำเนื่องจากดินถม

$t_e$  = เวลาใด ๆ หลังการติดตั้งเสาเข็ม โดยสมมติให้แรง Pa กระทำต่อเสาเข็มที่เวลา  $t_e = 0$

ระกัมการเกิดแรงดูลของเสาเข็มสามารถแยกพิจารณาได้ 2 กรณี คือ ในกรณีที่ไม่เกิดการลื่นไถล และกรณีที่เกิดการลื่นไถลเต็มที่ในระหว่างที่แรงดูลของเสาเข็มเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.29 (a-b) จากรูปสำหรับเสาเข็มเดี่ยวพบว่า การเกิดการลื่นไถลจะเพิ่มอัตราการเกิดแรงดูลของเสาเข็ม เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการลื่นไถล ซึ่งแตกต่างกันไม่มากนัก และจะเห็นได้ว่า อัตราการเพิ่มแรงดูลของเสาเข็มเดี่ยว จะขึ้นอยู่กับอัตราการทรุดตัวของชั้นดินที่เกิดการอัดตัวคายน้ำเนื่องจากดินถม และแรงดูลนี้จะมีค่าสูงสุด เมื่อชั้นดินไถลจะหยุดการทรุดตัว ถ้าดินที่ปลายเสาเข็มมีการเคลื่อนตัวได้ สมการที่ (2.33) จะให้ค่าแรงที่กระทำต่อเสาเข็มเดี่ยวที่เวลาใด ๆ หลังการติดตั้งเสาเข็ม ( $P_t$ ) ที่สูงเกินไป

#### 2.5.4 การทรุดตัวเนื่องจากการเกิดแรงดูลของเสาเข็ม

จากการวิเคราะห์แรง หรือหน่วยแรงที่กระทำต่อเสาเข็ม ทำให้ได้โดยพิจารณาแรงที่ถ่ายลงมาจากโครงสร้าง ซึ่งอยู่ในรูปของน้ำหนักบรรทุก และน้ำหนักจรวมกับ แรงดูลในฐานรากเสาเข็มกลุ่ม แรงทั้งสองชนิดนี้จะเป็นแรงที่เกิดขึ้นในเสาเข็ม และถ่ายลงสู่มวลดินทำให้เกิดการทรุดตัว การทรุดตัวของฐานรากเสาเข็มเนื่องจากแรงที่ถ่ายลงมาจากโครงสร้างจะเกิดขึ้นเร็ว ถ้าเสาเข็มมีปลายหยั่งอยู่ในชั้นดินเหนียว แข็ง ส่วนแรงดูลจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นกับเวลา และอัตราการเพิ่มแรงดูลจะขึ้นอยู่กับ อัตราการทรุดตัวของดินเหนียวอ่อน แรงดูลจะมีค่าสูงสุดเมื่อ ดินอ่อนไถลจะหยุดการทรุดตัว

การวิเคราะห์การทรุดตัวของฐานรากเสาเข็ม ในกรณีที่คิดแรงดูลเกิดขึ้นในเสาเข็มด้วยนั้น กระทำได้โดยวิธีการวิเคราะห์เช่นเดียวกับที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.2 และ 2.3 และพิจารณาแรงที่ถ่ายลงฐานรากเสาเข็ม เป็นผลรวมระหว่าง แรงที่ถ่ายลงมาจากโครงสร้าง และแรงดูลในเสาเข็มเนื่องจากการเกิดแรงเสียดทานในทางลบ

Poulos และ Davis (1975) ยังได้พิจารณาการทรุดตัวของเสาเข็ม เนื่อง

จากการทศว์ของเนื้อเสาเข็ม เมื่อไ้รับแรงจุดลง ( $\rho_{FST}$ ) นอกเหนือจากการทศว์ของเสาเข็ม เมื่อไ้รับแรงกระทำตามแนวแกน (Founding layers) และการทศว์ของชั้นดินใต้เสาเข็ม (Underlying layers) โ้ยแสดงในรูปสมการ ดังนี้

$$\rho_{FST} = \rho_{FS} \cdot Q_R \cdot Q_T + \frac{Pa \cdot L}{E_p \cdot A_p} \dots \dots \dots (2.34)$$

เมื่อ  $\rho_{FST}$  = การทศว์ของเสาเข็มทั้งหมด เนื่องจากแรงจุดลงในเสาเข็มพิจารณาดินที่ปลายเสาเข็มไม่มีการเคลื่อนตัว

$Q_R$  = ตัวปรับแก้ในกรณีที่เกิดการลื่นไถลไม่เต็มที้ แสดงไว้ในรูปที่ 2.30

$Q_T$  = ตัวปรับแก้การทศว์ เนื่องจากผลของการตักตั้งเสาเข็ม ภายหลังการถมดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.31

$E_p$  = โมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเข็ม

$A_p$  = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม

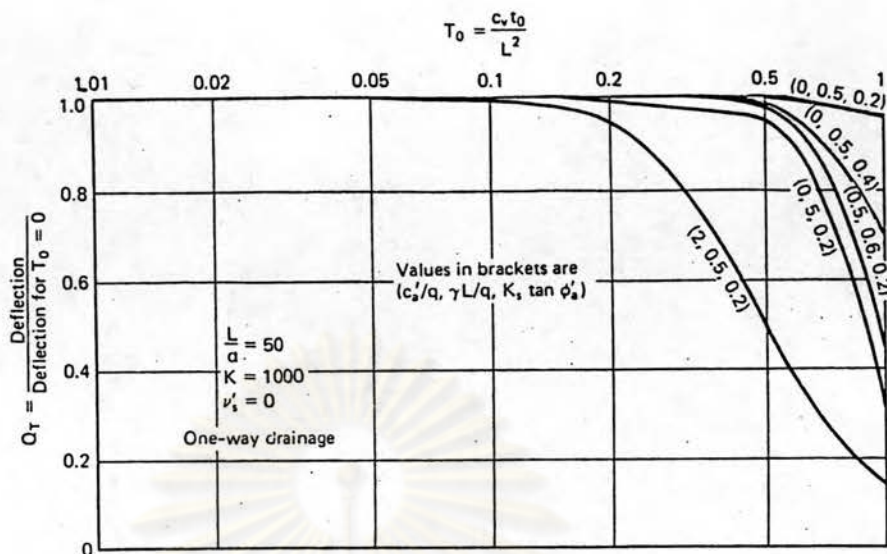
โดยที่  $\rho_{FS} = \frac{2q \cdot L^2 \cdot R_A}{E_p \cdot d} \left\{ \frac{Ca}{q} + K_s \tan \phi'_a \left( \frac{\gamma L}{3q} + 1 \right) \right\} \dots \dots (2.35)$

เมื่อ  $R_A$  = อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัด ต่อพื้นที่รอบนอกของเสาเข็ม

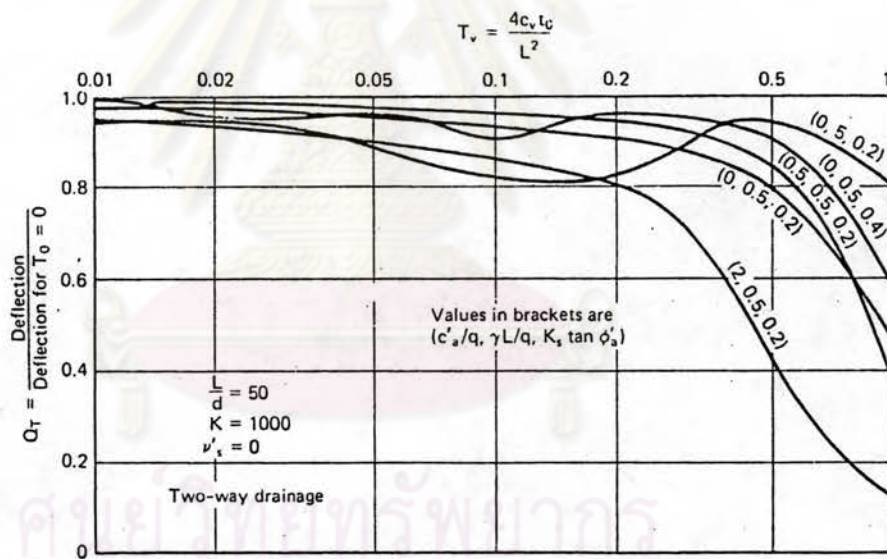
2.5.5 อัตราการทศว์ของเสาเข็มที่เกิดแรงจุดลงของเสาเข็ม

สำหรับฐานรากเสาเข็มที่มีปลายหยั่งอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง การวิเคราะห์อัตราการทศว์ ของฐานรากเสาเข็มที่เกิดแรงจุดลงของเสาเข็มมีความยุ่งยาก และซับซ้อน เนื่องจากแรงจุดลงในเสาเข็มจะมีค่าไม่คงที่ โ้ยจะขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดการอศว์ตัวคายน้ำ เนื่องจากดินถม จึงตั้งสมมุติฐานว่าการทศว์ของฐานรากเสาเข็ม เนื่องจากแรงที่ถ่ายลงมาจากโครงสร้างจะเกิดขึ้นในทันที และเกิดการทศว์ก่อนที้จะเกิดการทศว์อันเป็นผลของแรงจุดลงในเสาเข็มที้ค่อย ๆ เพิ่มขึ้น

ส่วนอัตราการทศว์ของฐานรากเสาเข็มเนื่องจากแรงจุดลงในเสาเข็ม ขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดแรงจุดลงในเสาเข็ม โ้ยการทศว์จะเกิดขึ้นทันที ที้แรงจุดลงในเสาเข็มเพิ่มขึ้น



(a)



(b)

รูปที่ 2.31 แสดงค่าปรับแก้ การทรุดตัว เนื่องจากผลการติดตั้งเสาเข็ม

ภายหลังการถมดิน,  $Q_T$

- a) สำหรับชั้นดินระบายน้ำทางเดียว
- b) สำหรับชั้นดินระบายน้ำสองทาง