

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี

2.1 หลักการและทฤษฎี

ในการดำเนินโครงการเรื่องการสำรวจข้อมูลชั้นดินและลักษณะฐานรากบริเวณโดยรอบมหาวิทยาลัยนเรศวรนั้น จำเป็นต้องศึกษาข้อมูลชั้นดินจากหน่วยงานต่างๆที่ได้ทำการสำรวจมาแล้ว โดยนำค่าที่ได้มาประยุกต์ใช้รวมกันในบริเวณที่ต้องทำการศึกษา โดยเริ่มทำการรวบรวมข้อมูล จากบริเวณสำนักงานเทศบาลเมืองพิษณุโลก(แห่งใหม่) ถึงนิคมอุตสาหกรรม จ.พิจิตร โดยตัดมาทางหลวงหมายเลข 117 หนึ่งสาย และ จากสำนักงานเทศบาลเมืองพิษณุโลก(แห่งใหม่) ถึง บ้านวังแดง อำเภอสามง่าม จังหวัดพิจิตรอีกหนึ่งสาย ในกรณีของโครงการวิศวกรรมในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาเพื่อประโยชน์ด้านการสำรวจไปใช้ออกแบบฐานรากและ การเลือกเสาเข็มให้เหมาะสมกับการก่อสร้างต่างๆตามความสามารถในการรับน้ำหนักของดินและความมั่นคงของฐานราก

2.2 ฐานรากตื้น ($D_f \leq 3-4 B$)

ฐานรากคือ สิ่งที่รองรับน้ำหนักจากโครงสร้างอาคาร แล้วถ่ายทอดไปยังชั้นดินที่อยู่ข้างล่าง ดังนั้นถ้าชั้นดินสามารถรองรับน้ำหนักจากฐานรากได้ ฐานรากนั้นก็เลยไม่เกิดการพังทลาย แต่สาเหตุหนึ่งที่ทำให้ฐานรากเกิดการพังทลายมากที่สุดก็คือ การทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน หรือการทรุดตัวที่มากเกินไป

ดังนั้น จะเห็นว่าความมั่นคงของฐานรากขึ้นอยู่กับ

- 1.ความสามารถในการรับน้ำหนักของดินใต้ฐานราก
- 2.การทรุดตัวของดินใต้ฐานราก

การคำนวณหาความสามารถในการรับน้ำหนักของดินใต้ฐานรากจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป ส่วนการทรุดตัวของดินใต้ฐานรากมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การทรุดตัว

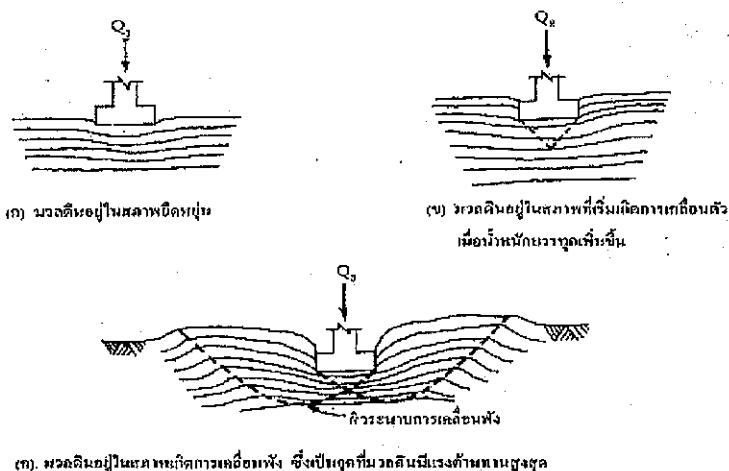
การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวของดิน โดยเฉพาะดินเหนียว จะมีความสำคัญ และเป็นปัญหามากที่สุดในการทรุดตัวของฐานรากอาคาร

สำหรับดินทรายหรือชั้นดินที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ง่าย อาจพิจารณาได้ว่าการทรุดตัวจะเกิดในช่วงระหว่างเวลาการก่อสร้าง ดังนั้นจึงไม่เป็นปัญหามากนัก

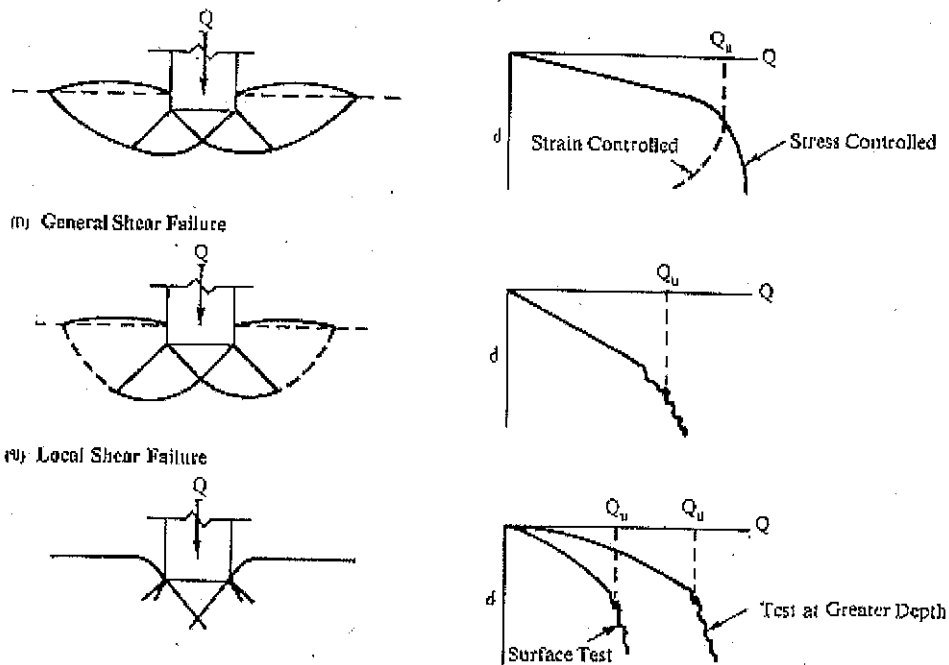
ส่วนดินเหนียวและดินตะกอน น้ำไหลซึมผ่านได้ยาก การยุบอัดตัวของดินประเภทนี้จึงเกิดต่อเนื่องกันเป็นปีๆ และการยุบอัดตัวของดินประเภทนี้ก็ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากการกระจายแรงดันไม่เท่ากันและการเปลี่ยนแปลงในดินทั้งทางกว้างและทางลึก ดังนั้นจึงเป็นปัญหาอย่างมาก ซึ่งไม่เกี่ยวกับการดำเนินโครงการจึงไม่กล่าวภาคการคำนวณมา ณ ที่นี้

การขยับตัวและการเคลื่อนพัง

เมื่อน้ำหนักของโครงสร้างลงสู่ชั้นดินที่รองรับฐานรากโดยตรง ทำให้มวลดินในชั้นดินเกิดการขยับตัวและเกิดการเคลื่อนพัง (Bearing Failure) ในกรณีที่มวลดินไม่สามารถต้านทานน้ำหนักที่บรรทุก ฐานรากจะเกิดการทรุดตัวจนไม่สามารถที่จะใช้งานได้ต่อไปการเคลื่อนพังของดินชั้นฐานรากเนื่องจากแรงเฉือนสามารถจำแนกได้ดังรูปที่ 2.1 พฤติกรรมของดินชั้นฐานรากที่มีต่อน้ำหนักบรรทุกสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงแบกทานกับการทรุดตัวของชั้นดินฐานรากด้วยเส้นกราฟ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 สภาพการเคลื่อนพังของมวลดิน



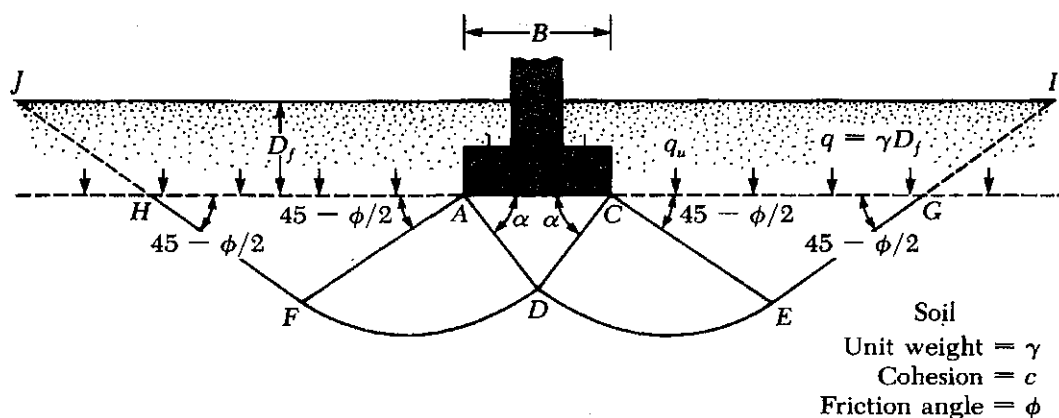
รูปที่ 2.2 ลักษณะการเคลื่อนพังของฐานราก

General Shear Failure จะเกิดกับดินฐานรากจำพวกทรายอัดแน่นหรือดินแข็ง ภายใต้สภาพความยุบตัวน้อยมาก ซึ่งผิวการเคลื่อนพัง (Failure Plane) ปรากฏชัดเจน - Local Shear Failure จะเกิดกับดินฐานรากจำพวกทรายหลวมปานกลางหรือดินค่อนข้างแข็ง ผิวการเคลื่อนพังของมวลดินจะปรากฏเฉพาะบางส่วน Punching Shear Failure จะเกิดกับดินฐานรากจำพวกดินอ่อนหรือทรายสภาพหลวม ซึ่งผิวการเคลื่อนพังจะไม่ปรากฏมีเฉพาะการยุบตัวเท่านั้น ซึ่งฐานรากจำพวกดินอ่อนหรือทรายสภาพหลวมไม่เหมาะต่อการออกแบบฐานรากแผ่

2.2.1 การคำนวณหาความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุดของดิน (Ultimate Bearing Capacity)

ดินสามารถรับน้ำหนักได้ต่างกัน นอกจากจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินเอง เช่น แรงเชื่อมแน่น ความหนาแน่น แรงเสียดทาน แล้วยังขึ้นอยู่กับ ขนาด รูปร่าง และตำแหน่งของฐานรากอีกด้วย ความสามารถ

ในการรับน้ำหนักสูงสุด (q_u) ของดินสามารถคำนวณหาได้จากสมการของเทอร์ซากิ (Terzaghi) (ดูรูปที่ 2.3)



รูปที่ 2.3 Bearing capacity failure in soil under a rough rigid continuous foundation

กรณีที่มีการเคลื่อนที่ปัดเป็น General Shear Failure

สำหรับฐานรากต่อเนื่อง (Strip Foundation)

$$q_u = c N_c + q N_q + 0.5 \gamma B N_\gamma$$

สำหรับฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square Foundation)

$$q_u = 1.3 c N_c + q N_q + 0.4 \gamma B N_\gamma$$

สำหรับฐานรากกลม (Circular Foundation)

$$q_u = 1.3 c N_c + q N_q + 0.3 \gamma B N_\gamma$$

ในเมื่อ q_u = ความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุดของดิน

c = แรงเชื่อมแน่นของดิน

$$q = \gamma D_f$$

γ = หน่วยน้ำหนักของดิน

D_f = ระยะจากผิวดินถึงใต้ระดับฐานราก

B = ความกว้างของฐานราก

N_c, N_q, N_γ = Bearing Capacity Factor ในสภาพ General Shear Failure สามารถหาได้ จากตารางที่ 2.1

ในกรณีที่การเคลื่อนพิบัติของดินฐานรากเป็น Local shear failure ความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุด (q_u) ของดินสามารถคำนวณหาได้จากสมการของเทอร์ซาคี (Terzaghi) ดังต่อไปนี้

สำหรับฐานรากต่อเนื่อง (Strip Foundation)

$$q_u = \frac{2}{3}cN'_c + qN'_q + 0.5\gamma BN'_\gamma$$

q_u สำหรับฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square Foundation)

$$q_u = 0.867cN'_c + qN'_q + 0.4\gamma BN'_\gamma$$

สำหรับฐานรากกลม (Circular Foundation)

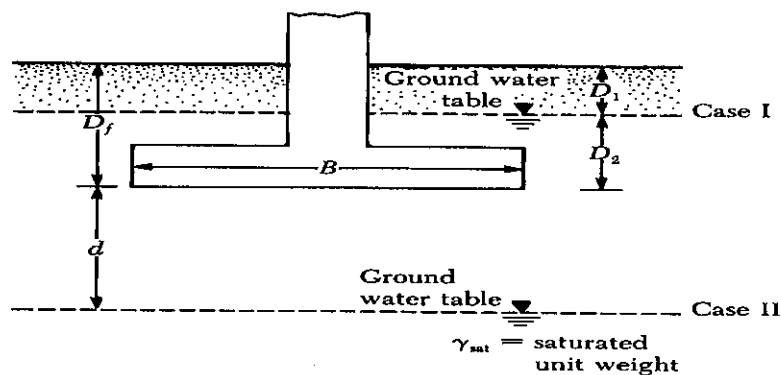
$$q_u = 0.867cN'_c + qN'_q + 0.3\gamma BN'_\gamma$$

ในเมื่อ

N'_c, N'_q, N'_γ = Modified Bearing Capacity Factor ในสภาพ

Local shear failure สามารถหาได้จากตารางที่ 2.2

จากสมการข้างต้นได้พัฒนาเพื่อหาค่า ultimate bearing capacity ภายใต้สมมุติฐานว่าระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าฐานรากมาก อย่างไรก็ตามในกรณีที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ใกล้ฐานรากจำเป็นต้องคำนึงถึงสภาพของระดับน้ำใต้ดินด้วย ดูรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 Modification of bearing capacity equation for water table

กรณีที่ 1 ถ้าระดับน้ำอยู่ระหว่าง $0 \leq D_1 \leq D_f$ ค่า factor q จากสมการสามารถหาได้จาก

$$q = \text{effective surcharge} = D_1\gamma + D_2(\gamma_{sat} - \gamma_w)$$

ในเมื่อ γ_{sat} = หน่วยน้ำหนักของดินอิ่มตัว

$$\gamma_w = \text{หน่วยน้ำหนักของน้ำ}$$

ดังนั้นค่า γ ใน term สุดท้ายในสมการสามารถแทนค่า ด้วย $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$

กรณีที่ 2 ถ้าระดับน้ำอยู่ระหว่าง $0 \leq d \leq B$ ค่า factor q จากสมการสามารถหาได้จาก $q = \gamma D_f$

ดังนั้นค่า γ ใน term สุดท้ายในสมการสามารถแทนค่า ด้วย $\bar{\gamma} = \gamma' + \frac{d}{B}(\gamma - \gamma')$

กรณีที่ 3 เมื่อระดับน้ำมีค่า $d \geq B$ ระดับน้ำจะไม่มีผลกับค่า ultimate bearing capacity

สมการทั่วไป (GENERAL BEARING CAPACITY EQUATION)

จากสมการข้างต้นจะกล่าวเฉพาะฐานรากต่อเนื่อง, ฐานรากสี่เหลี่ยมจัตุรัสและฐานรากกลมเท่านั้น ไม่ได้กล่าวถึงฐานรากสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Foundation $0 < B/L < 1$) ดังนั้น จึงไม่สามารถคำนวณแรงต้านทานแรงเฉือนตลอดผิวที่พังของดินในดินได้ ฐานราก ขอบบ่งชี้จึงไม่อาจเพิกเฉยได้ ต่อมา Meyerhof (1963) จึงได้คิดสมการในรูปทั่วไปขึ้น

$$q_u = cN_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + qN_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i}$$

ในเมื่อ N_c, N_q, N_γ = Bearing Capacity Factor หาได้จากตารางที่ 2.3

$$F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s} = \text{ปัจจัยทางด้านรูปร่าง หาได้จากตารางที่ 2.4}$$

$$F_{cd}, F_{qd}, F_{\gamma d} = \text{ปัจจัยทางด้านความลึก หาได้จากตารางที่ 2.4}$$

$$F_{ci}, F_{qi}, F_{\gamma i} = \text{ปัจจัยทางด้านความลาด หาได้จากตารางที่ 2.4}$$

2.3 ฐานรากเข็ม

ในกรณีที่ต้องการถ่ายทอดน้ำหนักของโครงสร้างอาคารลงไปยังชั้นดินที่แข็งกว่าซึ่งอยู่ลึก สามารถทำได้โดยใช้ฐานรากเข็ม เสาเข็มอาจจะเป็นพวกที่หล่อสำเร็จรูปก่อน

แล้วทำการตกลงไปในดินหรือเป็นชนิดเสาเข็มเจาะ คือ เจาะเป็นหลุมเท่ากับขนาดเสาเข็มที่ต้องการ นำดินออก แล้วเทคอนกรีตลงไป เสาเข็มตอกจะเกิดการแทนที่ขึ้นในดินรอบข้างเท่ากับปริมาตรของเสาเข็มที่ตกลงไป ดังนั้นถ้าจะตอกเข็มเป็นจำนวนมาก จะต้องคำนึงถึงการแทนที่นี้ด้วย เพราะอาจจะทำให้เกิดการเสียหายแก่สิ่งก่อสร้างรอบข้างได้ ส่วนเสาเข็มเจาะนั้นจะไม่เกิดการแทนที่ดังกล่าว ในบางกรณีที่รูเจาะน้อยกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มจึงเกิดการแทนที่บางส่วน

2.4 ฐานรากเข็มในชั้นดินเหนียว

ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็ม ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ 2 ประการ

1. ความสามารถในการรับน้ำหนักของดินที่ปลายเสาเข็ม (End bearing)
2. แรงติดแน่น (Adhesion) หรือความฝืดของดินรอบผิวของเสาเข็มตลอดความยาว
(Skin friction)

2.4.1 End bearing

ความสามารถในการรับน้ำหนักของดินที่ปลายเสาเข็ม (Q_p) สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$Q_p = cN_c^* A_p$$

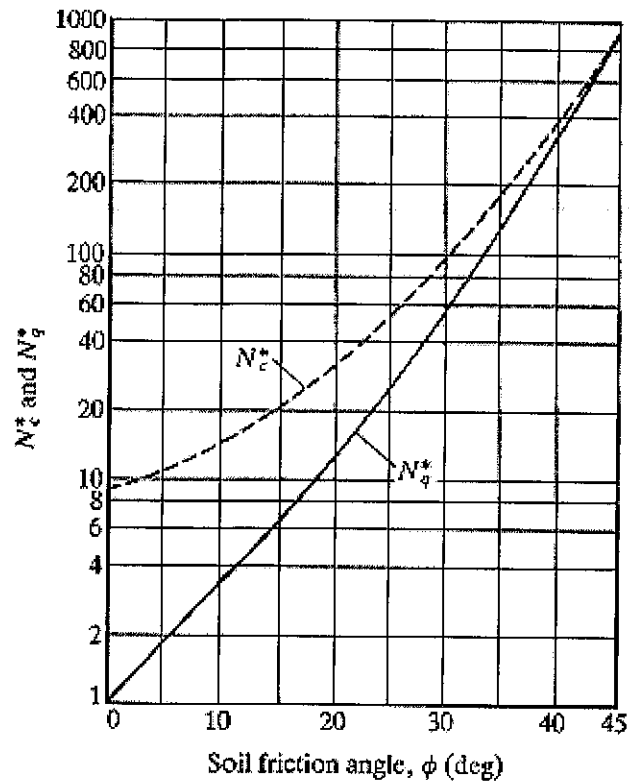
ในเมื่อ Q_p = ความสามารถในการรับน้ำหนักของดินที่ปลายเสาเข็ม

N_c^* = ค่าสัมประสิทธิ์ความสามารถในการรับน้ำหนักของดิน

สำหรับฐานรากลึกสามารถหาได้จากรูปที่ 2.5

$$A_p = \text{พื้นที่หน้าตัดของปลายเสาเข็ม}$$

สำหรับเสาเข็มเจาะอาจจะขยายฐานที่ปลายเสาเข็มออกให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าต้นเสาเข็มทั้งนี้เพื่อที่จะให้สามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้น



รูปที่ 2.5 Variation of the maximum values of N_c^* and N_q^* with soil friction angle ϕ (after Meyerhof, 1976)

2.4.2 Skin friction

จากวิธี α method จะสามารถหาค่า unit skin resistance ในดินเหนียว จากสมการต่อไปนี้

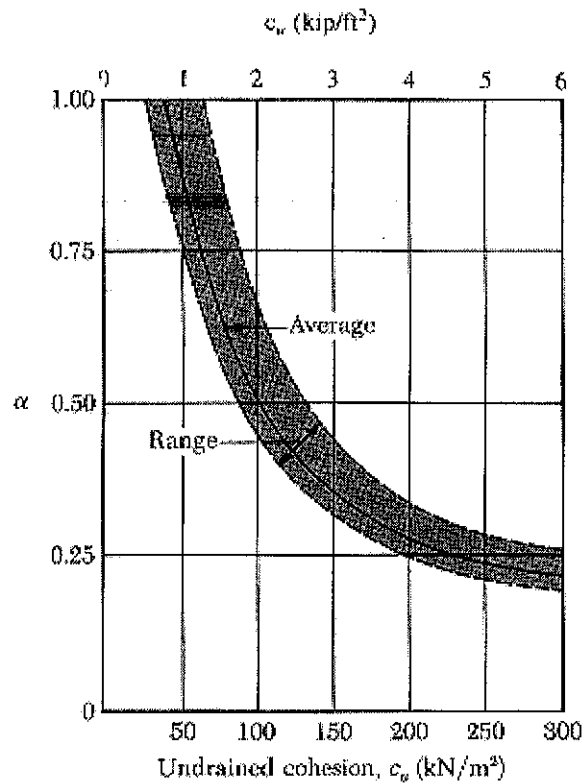
วิธี α Method

$$f = \alpha c_u$$

เมื่อ α = empirical adhesion factor

การแปรเปลี่ยนของค่า α สามารถดูได้จากรูปที่ 2.6 และ สำหรับดินเหนียวที่มีลักษณะเป็น consolidated clays ปกติแล้ว ค่า $c_u \leq$ about 1 kip/ft² (50 kN/m²), $\alpha = 1$ ดังนั้น

$$Q_s = \sum fp\Delta L = \sum \alpha c_u \Delta L$$



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่า α เมื่อเทียบกับ undrained cohesion of clay

2.4.3 Negative skin friction

โดยทั่วไป ความฝืดระหว่างเสาเข็มและดินรอบๆ จะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็ม แต่ในบางสภาพเมื่อตอกเสาเข็มเสร็จ ดินรอบเสาเข็ม จะเกิดการยุบอัดตัวขึ้น และดึงเสาเข็มลงไปด้วย ทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มลดลง เรียกว่า Negative skin friction

2.5 ฐานรากเข็มในชั้นทราย

ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็ม จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ของทรายเป็นส่วนใหญ่ ถ้าเสาเข็มถูกตอกลงไปชั้นทราย ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของทรายที่อยู่รอบรอบข้างเสาเข็มจะเพิ่มขึ้นเหมือนถูกบดอัด (ยกเว้นในชั้นทรายแน่น ซึ่งอาจจะทำให้หลวมขึ้น)

ความสามารถในการรับน้ำหนักของทราย แบ่งเป็น 2 อย่างเช่นกัน คือ

1. ความสามารถในการรับน้ำหนักของทรายที่ปลายเสาเข็ม (End bearing)
2. ความฝืดของทรายรอบผิวของเสาเข็มตลอดความยาวที่จมลงในชั้นทราย (Skin friction)

2.5.1 End bearing

ความสามารถในการรับน้ำหนักของทรายที่ปลายเสาเข็ม (Q_p) สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$Q_p = q' N_q^* A_p$$

2.5.2 Skin friction

ค่าเฉลี่ยของความฝืดรอบผิวของเสาเข็มตลอดความยาวที่จมลงในชั้นทราย (f_s) สามารถหาได้จาก สมการดังนี้

$$f = K \sigma'_v \tan \delta$$

เมื่อ K = earth pressure coefficient

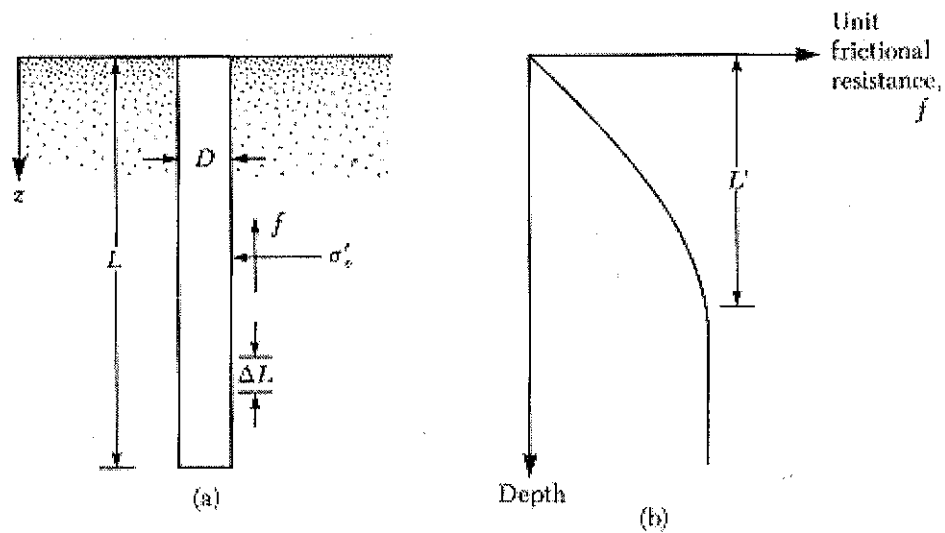
σ'_v = effective vertical stress at the depth under consideration

δ = soil-pile friction angle

Pile type	K
Bored or jetted	$\approx K_0 = 1 - \sin \phi$
Low – displacement driven	$\approx K_0 = 1 - \sin \phi$ to $1.4K = 1.4(1 - \sin \phi)$
High – displacement driven	$\approx K_0 = 1 - \sin \phi$ to $1.8K = 1.8(1 - \sin \phi)$

ความเค้นในแนวตั้งประสิทธิผล (Effective vertical stress) , σ'_v , ในสมการข้างต้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับความลึกของเสาเข็มจนถึงขีดจำกัดสูงสุดที่ความลึก 15 – 20 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม และหลังจากนั้นก็คงที่ดังรูปที่ 2.7 ความลึกวิกฤต,

L' , เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับค่า Factor หลายตัว เช่น Soil friction angle , Compressibility และ Relative density จึงได้มีการประมาณค่าและสมมติให้มีค่าเท่ากับ $L' = 15D$



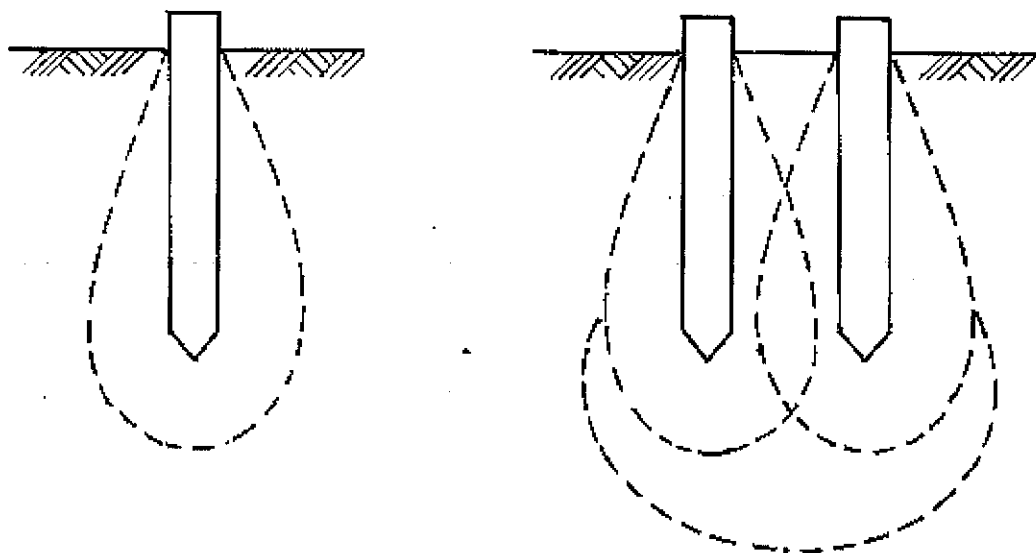
รูปที่ 2.7 Unit frictional resistance for piles in sand

สำหรับค่า δ จากการค้นคว้าหลายๆครั้ง ปรากฏว่าจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.5ϕ ถึง 0.8ϕ และ

$$Q_s = pL f_{av}$$

2.6 เสาเข็มกลุ่ม

ในกรณีที่ตอกเสาเข็มเป็นกลุ่ม และเสาเข็มแต่ละต้นอยู่ใกล้กัน กะเปาะแรงดันของเสาเข็มแต่ละต้นอาจจะซ้อนกัน ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงการกระจายแรงดันของเสาเข็มแต่ละต้น

ดังนั้นความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มกลุ่มจะไม่เท่ากับผลบวก
ของความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มแต่ละต้นรวมกัน

ในดินทราย ถ้าเสาเข็มแต่ละต้นอยู่ห่างกันน้อยกว่า 6 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง
(หรือความกว้าง) ของเสาเข็มแล้ว ทรายจะมีแนวโน้มอัดตัวกันแน่นและความสามารถในการ
รับน้ำหนักของเสาเข็มกลุ่มจะมากกว่าผลบวกของความสามารถในการรับน้ำหนัก
ของเสาเข็มแต่ละต้นรวมกัน

ส่วนในดินเหนียว การตอกเสาเข็มใกล้กันจะทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินลด
ลง ดังนั้นความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มกลุ่มจะน้อยกว่าผลบวกของความ
สามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มแต่ละต้นรวมกัน ซึ่งจะหาได้ดังนี้

$$Q_g = \eta \times \sum Q_u$$

ในเมื่อ ε สามารถหาได้จากสมการของ Converse – Labarre ดังนี้

$$\eta = 1 - \frac{\theta}{90} \left[\frac{(n_1 - 1)n_2 + (n_2 - 1)n_1}{n_1 n_2} \right]$$

ในเมื่อ

Q_g = ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มกลุ่ม

η = ประสิทธิภาพของเสาเข็มกลุ่ม

Q_u = ความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มเดี่ยว

หรือสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.9 และจากรูปที่ 2.9 หากเราพิจารณาการจำกัดเสาเข็มแต่ละต้นตามรูปที่ 2.10 จะได้ค่า $\eta \approx 0.8$

2.7 การประเมินสภาพการรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยใช้ dynamic formula

ดังเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปแล้วว่าเสาเข็มตอกนั้นจะให้ผลกระทบบกระเทือนต่อดินมากกว่าเสาเข็มชนิดอื่น จะมาหรือน้อยขึ้นอยู่กับเครื่องมือที่ใช้และวิธีการตอก บางครั้งสภาพของดินก็ก่อให้เกิดปัญหาในการตอกเช่นดินที่มีกรวดขนาดใหญ่ปนอยู่มาก การเลือกใช้ประเภทของเสาเข็มและเทคนิคในการตอกนั้นนับว่าสำคัญมาก ข้อมูลที่ได้จากการตอกเสาเข็มสามารถนำมาใช้ประเมินหาสภาพการรับน้ำหนักของเสาเข็มได้ แต่ต้องใช้ด้วยความระมัดระวังเพราะมีความผันแปรอยู่มาก

2.7.1 ผลของการตอกเสาเข็ม

เสาเข็มที่ตอกลงในดินนั้นปริมาตรของเสาเข็มจะเข้าแทนที่ในดิน ทำให้ดินถูกเบียดซึ่งมีทั้งในแนวตั้งและในแนวราบในขณะที่เสาเข็มจมลงดิน หลังจากเสร็จสิ้นการตอกแล้วจะพิจารณาให้แรงดันในแนวราบของดินเพิ่มขึ้น ส่วนแรงในแนวตั้งซึ่งเป็นน้ำหนักของดินนั้นถือว่าคงที่ ปริมาตรของดินส่วนที่ถูกแทนที่นี้จะดันดินอย่างต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ อันอาจทำให้เกิดการพองตัวของผิวดิน (soil heave) หรืออาจจะทำให้ต้นเสาเข็มต้นที่อยู่ข้างเคียงลอยตัวขึ้น (pile heave) หรือเคลื่อนจากตำแหน่งเดิมไป ผลกระดังก่อว่าจะร้ายแรงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับเครื่องมือที่ใช้ เทคนิคในการตอกและชนิดของดิน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่สุด

2.7.2 ผลการตอกเสาเข็มในดินเหนียว

ลักษณะที่เด่นชัดของดินเหนียวนั้นคือ มีอัตราการซึมของน้ำนั้นต่ำมากและความแข็งแรงแปรผันตามความชื้น ดินเหนียวเมื่อถูกรบกวนจะทำให้ความแข็งแรงลดลงแต่จะค่อยกลับคืนมากขึ้นตามกาลเวลา ได้มีผู้พยายามศึกษาผลกระทบของการตอกเสาเข็มในดินเหนียวสรุปได้ดังนี้

2.7.2.1 ความดันของน้ำในดินจะเพิ่มขึ้น (excess pore water pressure) ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากมีการเพิ่มแรงกระทำต่อดิน แต่ความดันของน้ำนี้จะลดลงอย่างรวดเร็ว และจะเกิดขึ้นรอบเสาเข็มในระยะทางประมาณ 16 เท่าของขนาดเสาเข็ม อัตราส่วนความดันของน้ำที่เพิ่มขึ้นกับน้ำหนักประสิทธิผลของดินนั้นอาจมากกว่าหนึ่งได้ โดยเปรียบเทียบเป็นความสัมพันธ์กับระยะทางจากเสาเข็มและรัศมีของเสาเข็ม (r/a) ส่วนการกระจายหายไปของความดันน้ำที่เพิ่มขึ้นนี้มีอยู่ 3 ทิศทาง SODERBERG (1962) ได้ประเมินโดยพิจารณา 2 ทิศทางคือเฉพาะในแนวราบหรือแนวรัศมี และไม่พิจารณาในแนวตั้งเพราะถือว่าน้อยมาก ทั้งนี้ได้สมมุติให้ระนาบพังทลายมีขอบเขตจาก 3 ถึง 5 เท่าของรัศมีเสาเข็ม ($R/a = 3.5$)

2.7.2.2 ปริมาตรของดินซึ่งถูกแทนที่โดยเสาเข็มจะทำให้เกิดการไหลตัวของดินเหนียวอาจจะก่อให้เกิด soil heave ซึ่งทำให้เสาเข็มลอยขึ้นและตามด้วยการทรุดตัวต่อมา ปริมาณดินส่วนที่พองขึ้นมานี้ได้มีการค้นคว้าและสำรวจโดยการศึกษาจากที่เกิดขึ้นจริง แต่ได้ผลที่แตกต่างกันออกไปตามสภาพความแข็งแรงของดินเหนียวและชนิดของเสาเข็ม

จากการวัดการเคลื่อนที่ของดินสำหรับเสาเข็มในดินเหนียว HARGERTY and PECK (1971) สรุปไว้ว่าการเคลื่อนที่ของ sensitive clay มีน้อยกว่า insensitive clay การพองตัวของผิวดินที่มีชั้นสลับกันของดินเหนียวและทรายจะเกิดขึ้นน้อยกว่าของ insensitive clay LAMBE and HORN (1965) พบว่ามีการพองตัวของดินในขณะตอกเสาเข็มแต่มีการทรุดตัวหลังจากการสิ้นสุดการก่อสร้างและได้เสนอวิธีการคำนวณเพื่อหาปริมาณดังกล่าวโดยใช้ stress path method

2.7.2.3 ความแข็งแรงของดินจะลดลงหลังการตอกเสาเข็มแต่จะค่อยๆเพิ่มมากขึ้นตามเวลา ทั้งนี้เพราะขณะตอกเสาเข็มนั้น undrain shear strength ของดินจะลดเกือบหมดและ โครงสร้างของดินรอบเสาเข็ม (จากผิวเสาเข็มถึงระยะ 2 เท่า ของขนาดเสาเข็มวัดจากผิว) จะถูก remoulded ด้วยความชื้นคงที่ หลังจากนั้นความแข็งแรงจะเพิ่มมากขึ้นเพราะผลจากการกระจายของความดันของน้ำที่ไหลออกไปและ thixotropic

regain ที่ได้จากความแข็งแรงของดินเหนียว พฤติกรรมของดินเหนียวนี้เป็นที่ทราบกันดีในหมู่วิศวกรดินและสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.11 สำหรับการกระจายของน้ำซึ่งหมายถึงการทรุดตัว (rate of consolidation) ของดินนั้นได้มีผู้พยายามประเมินหาทฤษฎีมาอธิบายดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.12 ซึ่งจะทรุดตัวมากใน 2-3 อาทิตย์แรกสำหรับความแข็งแรงของ sensitive clay นั้นพบว่ากลับคืนสู่ค่าสูงสุดประมาณ 9 เดือนหลังการตอกเสาเข็มเมื่อมีระยะห่างเป็น 4 เท่าของขนาดเสาเข็ม (ORRJE and BROMS 1967) ส่วน TENG (1962) กล่าวว่าความแข็งแรงจะคืนกลับได้ 90% ใน 30 ถึง 50 วัน เวลาดังกล่าวจะไม่แน่นอนโดยขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่นๆอีกมาก SODERBERG (1962) ได้แสดงให้เห็นถึงการรับน้ำหนักของเสาเข็มที่เพิ่มมากขึ้นตามเวลาในรูปที่ 2.13

2.7.3 ผลของการตอกเสาเข็มในทราย

การตอกเสาเข็มลงในทรายนั้นจะทำให้ทรายแน่นขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปริมาตรของทราย ซึ่งถูกเบียดหรือแทนที่โดยเสาเข็มพร้อมกับการสั่นสะเทือน มีผู้พยายามศึกษาการเคลื่อนที่ของทรายโดยการทำแบบจำลองแล้วพบว่า (ROBINSKY and MORRISON, 1964) สำหรับทรายหลวมที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ประมาณ 17% ทรายส่วนที่เคลื่อนที่จะเป็นส่วนอยู่ในช่วงจากผิวเสาเข็มถึง 3 ถึง 4 เท่าของขนาดเสาเข็มและส่วนที่อยู่ได้ปลายเสาเข็มถึงระยะ 2.5 ถึง 3.5 เท่าของขนาดเสาเข็ม สำหรับทรายที่มีความหนาแน่นปานกลาง (ความหนาแน่นสัมพัทธ์ประมาณ 35%) นั้นปริมาณทรายจะเคลื่อนที่มากขึ้นคือด้านข้างจะถึง 4.5 หรือ 5.5 เท่าของขนาดเสาเข็ม ทรายส่วนปลายเสาเข็มจะแน่นขึ้นมากกว่าส่วนที่อยู่รอบผิวด้านข้างเสาเข็ม KISHIDA (1967) ได้แนะนำการประเมินการหาความหนาแน่นของทรายโดยสมมุติให้มุมเสียดทานภายในของดินแปรผันเป็นเส้นตรงลดลงถึงระยะ 3.5 เท่าของเสาเข็มจากศูนย์กลางเสาเข็มโดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 40° ดังนั้นมุมเสียดทานภายในหลังการปรับแก้ไขจึงเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ $(\phi + 40^\circ)0.5$ มุมดังกล่าวจะสูงขึ้นมากเมื่อเป็นเสาเข็มกลุ่ม โดยเฉพาะที่จุดกลางของเสาเข็มกลุ่มนั้นค่าอาจขึ้นมากเป็นสองเท่า

มาตรการที่ใช้ป้องกันหรือลดผลกระทบจากการตอกเสาเข็มนั้นมียุทธวิธีขึ้นอยู่กับเทคนิคการก่อสร้างและเครื่องมือที่ใช้เช่นอาจตอกเสาเข็มส่วนกลางของเสาเข็มกลุ่มก่อนแล้วกระจายออกโดยรอบ การขุดคูหรือคลองก็อาจช่วยลดการไหลของดินส่วนบนและลดการกระจายของคลื่นเสียงที่ผิวดินบางครั้งก็ใช้วิธีเจาะดินให้เป็นรูก่อนแล้วค่อยตอกเสาเข็มแทนที่ในดิน (preaugering) หรืออาจเลือกใช้เสาเข็มกลวงเพื่อลดปริมาณการแทนที่ เมื่อไม่สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้แล้วจำเป็นต้องใช้เสาเข็มเจาะซึ่งจะทำให้งานล่าช้าลงบ้างหรือค่าใช้จ่ายอาจสูงขึ้นเล็กน้อย

2.8 เครื่องมือที่ใช้ในการตอกเสาเข็ม

การเลือกใช้เครื่องมือแต่ละชนิดนั้นขึ้นอยู่กับสภาพของดินและขนาดหรือชนิดของเสาเข็มที่ใช้ โดยหลักการนั้นจะใช้หมอนหรือลูกตุ้มตกกระทบบนเสาเข็มที่มี anvil หรือ pile cap รองรับเสาเข็มจะจมได้ง่ายหรือยากนั้นขึ้นอยู่กับน้ำหนักของลูกตุ้มหรือพลังงานที่ให้แก่เสาเข็ม เครื่องตอกนี้จะยึดติดอยู่กับปั้นจั่นซึ่งเป็นโครงเหล็ก ประเภทของเครื่องตอกที่ใช้กันอยู่มีดังนี้

2.8.1 drop hammer เป็นการยกลูกตุ้มเหล็กให้สูงขึ้นด้วยลวดสลิงซึ่งได้กำลังจากเครื่องจุด แล้วปล่อยให้ตกโดยอิสระเพื่อกระทบเสาเข็มโดยมี pile cap รองรับอยู่ เพราะว่าลูกตุ้มนี้จะมีน้ำหนักมากเช่น 3 ถึง 5 หรือ 7 ตัน จึงทำให้การตอกแต่ละครั้งเป็นไปได้ช้า (นิยมใช้ 3.5 และ 4.5 ตันเป็นส่วนใหญ่) อย่างไรก็ตามยังคงเป็นที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันนี้เพราะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อยและบำรุงรักษาได้ง่าย เหมาะสำหรับงานตอกเสาเข็มที่มีปริมาณไม่มาก โดยมีระยะเวลาในการดำเนินงานที่นานพอสมควร ข้อเสียอีกส่วนหนึ่งคือควบคุมการตกของลูกตุ้มได้ยากและปั้นจั่นต้องสูงพอที่จะยกลูกตุ้ม

2.8.2 Single-acting steam hammer เป็นการใช้ความของไอน้ำหรืออากาศยกลูกตุ้มให้สูงขึ้น แล้วปล่อยให้ตกโดยอิสระ น้ำหนักของลูกตุ้มที่ใช้ประมาณ 2.5 ถึง 20 ตัน และยกขึ้นสูงกว่าของ drop hammer แต่ไม่เกิน 1.20 เมตร โดยทั่วไป ปกติจะเลือกใช้อัตราส่วนน้ำหนักของลูกตุ้มต่อเสาเข็มประมาณ 0.5 ถึง 1.0 ความเร็วในการตอก

ประมาณ 60 ครั้งต่อนาทีซึ่งเร็วกว่า drop hammer พลังงานที่เสาะเข็มได้รับนั้นเป็นความเร็วกระแทกโดยน้ำหนักของลูกตุ้ม เหมาะสำหรับการตอกท่อเหล็กขนาดใหญ่ในปัจจุบัน แผนภาพดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 2.14

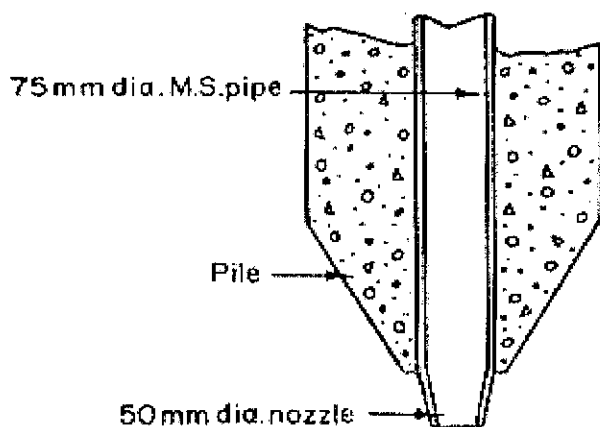
2.8.3 double-acting steam hammer เป็นการใช้ความดันของไอน้ำหรืออากาศทั้งในการยกลูกตุ้มขึ้นและเร่งให้เร็วขึ้น ทำให้ความเร็วในการตอกกระแทกของลูกตุ้มสูงกว่าสองชนิดที่กล่าวมาก่อนนี้ (ประมาณ 100 ถึง 300 ครั้งต่อนาที) น้ำหนักของลูกตุ้มอยู่ระหว่าง 90 ถึง 2300 กิโลกรัมและที่พบว่ามีสูงที่สุดคือ 18140 กิโลกรัม อัตราส่วนโดยน้ำหนักของลูกตุ้มต่อน้ำหนักควรวอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 1.0 ส่วนใหญ่ใช้ในการตอก sheet pile และลูกตุ้มที่ใช้ทั่วไปมีความยาวประมาณ 2 ถึง 4.5 เมตรแผนภาพโดยสังเขปของลูกตุ้มได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.15

2.8.4 Diesel hammer เป็นการใช้อัดและระเบิดของเชื้อเพลิงดีเซลยกลูกตุ้มให้สูงขึ้นขณะเดียวกันก็จะบีบให้เสาะเข็มจมลงในดินพร้อมกับการกระแทกของลูกตุ้ม โดยขั้นแรกนั้นจะต้อง ยกลูกตุ้มให้สูงขึ้นแล้วปล่อยให้ตกลงมาเพื่อเป็นการจุดระเบิดสตาร์ทเครื่องยนต์ให้ทำงาน น้ำหนักของลูกตุ้มนั้นขึ้นอยู่กับผู้ผลิตซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ระหว่าง 2 ถึง 5 ตัน เหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากกับดินเหนียวที่แข็งหรือทรายที่แน่นซึ่งระยะการจมของเสาะเข็มมีน้อย หากใช้กับดินที่อ่อนหรือเสาะเข็มจมลงในดินมากในการตอกแต่ละครั้งแล้ว เครื่องยนต์จะดับเพราะระยะยกของลูกตุ้มไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการระเบิดของเชื้อเพลิงในครั้งต่อไป จำเป็นต้องมีการสตาร์ทเครื่องยนต์ใหม่และทำให้การทำงานไม่ค่อยได้ผลเมื่อเปรียบเทียบกับชนิดอื่น ความยาวของลูกตุ้มชนิดนี้ประมาณ 4.5 ถึง 6 เมตร โดยเฉลี่ยสามารถเคลื่อนย้ายได้คล่องตัวเพราะไม่มีท่ออัดอากาศหรือท่อระบายน้ำเช่นเดียวกับชนิดที่ 2 และ 3 แผนภาพชนิดนี้ได้แสดงไว้ในรูป 2.16

2.8.5 Vibratory hammer อาศัยการสั่นสะเทือนจากการเหวี่ยงของน้ำหนักสองอันซึ่งกระทำในสภาพที่ไม่เกิดการสมดุลดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.17 ลักษณะของการเหวี่ยง

นี้ทำให้เกิดการ ยกน้ำหนักขึ้นและตกกระทบบนเสาเข็ม เหมาะสมที่จะใช้ตอกเสาเข็มในทรายโดยเสาเข็มอาจจมลงในอัตราที่เร็วมากข้อดีของการใช้เครื่องมือตอกแบบนี้คือลดการสั่นสะเทือนในบริเวณข้างเคียงหรือเสียงที่เกิดการกระทบบนลูกตุ้มเพราะใช้น้ำหนักที่น้อยกว่ามาก

การตอกเสาเข็มดังกล่าวจะทำให้เกิดเสียงรบกวนและการสั่นสะเทือนในบริเวณใกล้เคียงหรือบางครั้งอาจพบอุปสรรคในการตอกเสาเข็มผ่านชั้นดินที่แข็งหรือมีกรวดและทรายปน การใช้น้ำเป่าผ่านท่อที่ปลายเข็ม (jetting) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.18 หรือทำการเจาะดินเป็นรูไว้ก่อนทำการตอก (preaugering) ดังได้กล่าวมาแล้ว จะช่วยลดปัญหาดังกล่าวข้างต้นลงได้มาก นอกจากนี้ยังพบว่ามีการพัฒนาใช้ hydraulic hammer ในการตอกเสาเข็มในปัจจุบัน



รูปที่ 2.18 การทำ jetting ของเสาเข็มตอก (central jet pipe)

2.9 สูตรสำเร็จในการหาสภาพการรับน้ำหนักจากการตอกเสาเข็ม

ในการตอกเสาเข็มนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการเก็บข้อมูลเพื่อใช้ประโยชน์ในการประเมินสภาพการรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยตรงสำหรับงานขนาดเล็ก(ไม่มีการวิเคราะห์จากวิธีอื่นๆ) หรือใช้ตรวจสอบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีอื่นๆ (static formula, pile load test) หรือใช้เป็นเกณฑ์ในการกำหนดในการให้หยุดตอกเสาเข็ม เมื่อจำนวนครั้งที่ตอก (ความต้านทานของการตอก) สูงมากพอแล้วควรให้หยุดตอก เพื่อมิให้เกิด

ความเสียหายต่อเสาเข็ม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการตอก(วิศวกรบางท่านใช้สูงสุดเท่ากับ 4.1 ตัน-เมตรหรือ (driving stress) ไม่เกิน $0.6 f'_c$) และที่ใช้เป็นตัวกำหนดให้หยุดตอกเสาเข็มโดยประมาณดังนี้

เสาเข็มไม้ 48-60 ครั้ง/30 ซม หรือ 5.0-6.2 ซม/10 ครั้ง

เสาเข็มคอนกรีต 72-96 ครั้ง/30 ซม หรือ 3.1-4.2 ซม/10 ครั้ง

เสาเข็มเหล็ก 144-180 ครั้ง/30 ซม หรือ 1.7-2.1 ซม/10 ครั้ง

การประเมินสภาพการรับน้ำหนักของเสาเข็มจากข้อมูลที่ได้จากการตอกนี้อาศัยหลักการของโมเมนต์และพลังงานที่ไม่สูญหาย โดยได้มีการแนะนำให้ใช้สูตรสำเร็จกันเป็นจำนวนมากดังเช่นที่จะกล่าวเพียงบางส่วนดังต่อไปนี้

$$\text{HILEY(1930)} \quad P_u = \frac{e_h \cdot E_h}{s + \frac{1}{2}(k_1 + k_2 + k_3)} \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p}$$

$$\text{Modified ENR} \quad P_u = \frac{1.25 e_h \cdot E_h}{s + c} \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p}$$

(engineering News-Record)

$$\text{GATES(1957)} \quad P_u = a(b - \log S) \sqrt{e_h \cdot E_h}$$

$$\text{Danish formula} \quad P_u = \frac{e_h \cdot E_h}{s + c_1}$$

$$\text{Janbu} \quad P_u = \frac{e_h \cdot E_h}{k_u s}$$

การใช้สูตรสำเร็จดังที่กล่าวข้างต้นควรระมัดระวังในการใช้หน่วยให้ถูกต้องและควรเลือกใช้สัดส่วนหรือส่วนลดสำหรับความปลอดภัยที่เหมาะสม(ประมาณ 3 ถึง 6) รายละเอียดของการวิเคราะห์ที่มาของสูตรนั้นหาได้จากหนังสือเสาเข็มทั่วไปในที่นี้จะไม่ขอ



กล่าวถึง แต่รายละเอียด blow count ของกรมทางหลวงสามารถดูได้จากภาคผนวกที่ ๒๑ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในงานจริงได้

2.10 การทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม (pile load test)

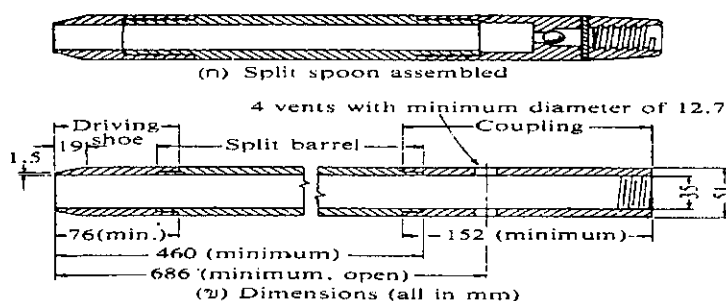
เป็นการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตามสภาพที่ใช้งานหรือตามความประสงค์อื่น เช่น หาความแข็งแรงของดิน เสาเข็มที่ทดสอบส่วนมากจะใช้ขนาดและวิธีการตอกเดียวกันกับที่ใช้งานจริง โดยจะทำการวัดการทรุดตัวของเสาเข็มตามน้ำหนักบรรทุกที่ประเมินไว้และบางครั้งอาจทำการทดสอบด้วยน้ำหนักบรรทุกถึงการพังทลายของดิน แต่ส่วนใหญ่จะทดสอบถึงน้ำหนักบรรทุกประลัยที่ใช้ในการออกแบบแล้ววัดการทรุดตัวของเสาเข็ม ซึ่งหากไม่เกินขีดจำกัดที่กำหนดไว้แสดงว่าเสาเข็มนั้นรับน้ำหนักดังกล่าวได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเครื่องมือที่มีอยู่และเสาเข็มที่ทดสอบนั้นจะนำไปใช้งานต่อหรือทิ้งไป (working test pile, test pile) วิธีการทดสอบนั้นมีอยู่หลายวิธีเป็นไปตามการพัฒนาการของเทคโนโลยีในการก่อสร้างเสาเข็ม หากทดสอบในดินเหนียวแล้วจะให้การทรุดตัวที่มีใช้เกิดขึ้นจริงเพราะต้องทิ้งไว้เป็นเวลานานสำหรับ consolidation settlement ให้เกิดให้หมด อย่างไรก็ตามวัตถุประสงค์ของการทดสอบจะต้องอยู่ในข้อใดข้อหนึ่งหรือทั้งหมดของหัวข้อต่อไปนี้

2.10.1 เพื่อหาน้ำหนักบรรทุกประลัยที่เสาเข็มสามารถรับได้ หรือ ultimate pile (load) capacity

2.10.2 เพื่อหาความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัว (load-settlement relationship)

2.10.3 เพื่อแยกหาแรงต้านทานส่วนปลายและแรงเสียดทานรอบผิวของเสาเข็ม

2.11 การตอกทดลอง (Standard Penetration Test)



รูปที่ 2.19 แสดงอุปกรณ์การทดสอบการตอกทดลอง

พ
TA
775
ม 2590
2541
CI

5 ก.ค. 2542 1

4240152



การทดสอบโดยวิธีนี้ใช้เครื่องมือมาตรฐาน ประกอบด้วยกระบอกเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 800 มม. เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 51 มม. เส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 35 มม. ซึ่งเป็นกระบอกผ่าปลายล่างคม เพื่อใช้เป็น Cutting edge ปลายบนสามารถยึดติดกับก้านเจาะเพื่อใช้ใส่ลงไปหลุมเจาะได้ ดังรูปที่ 2.19

ทำได้โดยการตอกกระบอกเหล็กทดสอบลงไปในชั้นดินก้นหลุมเจาะเป็นระยะลึก 150 มม. ก่อน ทั้งนี้เพื่อให้แน่ใจว่าการตอกทดลองนี้กระทำในชั้นดินที่คงสภาพ ต่อไป ตอกกระบอกเหล็กทดสอบด้วยลูกตุ้มน้ำหนัก 64 กก. โดยให้มีระยะตอกสูง 750 มม. แล้วนับจำนวนครั้ง (Blows) ที่ใช้ในการตอกทุกๆ ความลึก 150 มม. ให้กระบอกเหล็กจมลงไปในชั้นดินที่ทดสอบเป็นระยะลึก 300 มม. จำนวนครั้งนี้เรียกว่า Standard penetration resistance (N) โดยที่ค่า N ที่ได้ถือว่าเป็นแอมไพริคอล ได้มีผู้หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับค่าต่างๆไว้ดังนี้

ตารางที่ 2.5 Relative Density of Sand in Term of the Standard Penetration Test (SPT)

SPT Blow / ft N	Density	Angle of Internal Friction (Terzaghi) ϕ
0 - 4	Very Loose	Less than 28.5
4 - 10	Loose	28.5 - 30.0
10 - 30	Med.Dense	30.0 - 36.0
30 - 50	Dense	36.0 - 41.0
Over 50	Very Dense	Over 41

ตารางที่ 2.6 Consistency of Clays and Approximate Correlation to the Standard Penetration Number, N

Standard penetration number, N	Consistency	Unconfined compression strength, q_u (kN/m^2)
0 – 2	Very soft	0 – 25
2 – 5	Soft	25 – 50
5 – 10	Medium stiff	50 – 100
10 – 20	Stiff	100 – 200
20 – 30	Very stiff	200 – 400
>30	Hard	>400

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับค่าอื่นๆสามารถดูได้จากรูปที่ 2.20 และ 2.21 ส่วนความสัมพันธ์ระหว่าง SPT N – VALUE และ Unconfined Shear Strength ของดินเหนียวนั้น ค่า q_u ที่ได้จาก Unconfined Shear Strength จะมีความน่าเชื่อถือมากกว่าเพราะเป็นการทดสอบโดยตรง

2.12 การทดสอบโดยแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UNCONFINED COMPRESSION TEST)

ความแข็งแรงหรือกำลังของดินเหนียว (Cohesion soil) จะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ Cohesion ซึ่งเกิดจากแรงดึงดูดทาง ไฟฟ้า – เคมี (Electro chemical bond) ระหว่างเม็ดดิน, และ

Friction ซึ่งเกิดขึ้นจากการขัดตัวของเม็ดดิน (Particle interlocking) และ ความฝืดระหว่างผิวของเม็ดดิน (Surface friction)

ในดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวปานกลาง (Soft และ Medium Clay) กำลังของดินส่วนใหญ่มักเกิดจาก Cohesion จากการทดลอง Unconfined compression เป็นวิธีการหาค่าประมาณของ Cohesion ของดิน โดยวิธีง่ายๆซึ่งทำได้รวดเร็วซึ่งในการ

ทดลองจะกล่าวคร่าวๆดังนี้คือ นำตัวอย่างดินที่ต้องการทดสอบมาตัดแต่งให้เป็นรูปทรงกระบอกโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดมาตรฐานดังนี้

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง, นิ้ว	ความสูงของตัวอย่าง, นิ้ว
1.4	2.8 - 3.0
2.8	5.6 - 6.0

โดยที่ความสูงของตัวอย่างจะต้องมากกว่า 2 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางตัดแต่งผิวด้านบนและด้านล่างให้เรียบได้ระดับทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งตอนบนตอนกลาง และ ตอนล่างรวมทั้งวัดความสูงควรทำการวัดอย่างน้อย 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยจัดวางตัวอย่างลงบนเครื่องทดสอบ จัดให้ได้ศูนย์กลางของแฉกโดยปกติจะมีแผ่นพลาสติกกลมประกบไว้ทั้งด้านบนและด้านล่างเพื่อลดความผิดพลาดที่ไม่ต้องการแล้วจัด dial gate สำหรับการหดตัวให้เข้าที่โดยอาจเริ่มต้นที่เลขศูนย์เพื่อสะดวกในการอ่านก็ได้

การทดสอบ

- ก่อนเริ่มทดสอบจะต้องตรวจสอบการติดตั้งตัวอย่างและเครื่องมือ ดังนี้
 - แป้นกดของเครื่องต้องสัมผัสตัวอย่างพอดี
 - Dial gate สำหรับการหดตัวและวัดแรง (ใน Proving ring) ให้ตั้งอยู่ที่ศูนย์
 - ในกรณีที่เครื่องทดสอบเป็นแบบมือหมุน ผู้ทดสอบจะต้องซ้อมหมุนให้ได้อัตรากดตามต้องการ (ในขณะที่ยังไม่มีตัวอย่างดิน)
- เริ่มการกดตัวอย่างโดย อัตราการกด(การเคลื่อนที่ทางแนวตั้งของเครื่องให้อยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.1 นิ้วต่อนาที(ปกติใช้ 0.05 นิ้วต่อนาที)ตามความเหมาะสมในช่วงอ่านต่างๆกัน
- บันทึกข้อมูลจากวงแหวนวัดแรงทุกๆการหดตัว 0.005 นิ้วของตัวอย่าง (อาจ ใช้ 0.002 นิ้วในกรณีที่ตัวอย่างเป็นดินเปราะ)

4. เมื่อแรงในวงแหวนรัดแรง เพิ่มขึ้นไปสูงสุดแล้วจะเริ่มลดลง ซึ่งแสดงว่าถึงจุดสูงสุดของกำลังของดิน ให้ยังคงอ่านผลต่อไปจนเห็นแนวเฉือน (Failure Plane) บนตัวอย่างได้ชัดเจน ในบางกรณีที่ไม่มียอยเฉือนปรากฏขึ้นชัดเจน เช่น ตัวอย่างดินเปลี่ยนสภาพ ให้ทดสอบจนการหดตัวถึงประมาณ 20% ของความสูงของตัวอย่าง
5. เขียนรูปตัวอย่างลักษณะการเกิดรอยเฉือน และวัดมุมที่รอยเฉือนทำกับแนวราบ
6. ตัวอย่างดินที่ทำการทดสอบเสร็จแล้วต้องนำไปชั่งและเอาเข้าเตาอบเพื่อหาปริมาณความชื้น (Moisture Content)

การคำนวณ

1. คำนวณพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างดิน

$$A_0 = \frac{A_t + 2A_m + A_b}{4}$$

$$A_0 = \text{พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ย}$$

$$A_t = \text{พื้นที่หน้าตัดตอนบนของตัวอย่าง}$$

$$A_m = \text{พื้นที่ตรงกลางตรงกลางของตัวอย่าง}$$

$$A_b = \text{พื้นที่หน้าตัดด้านล่างของตัวอย่าง}$$

2. คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนไปในระหว่างการทดสอบ

$$A_c = \frac{A_0}{(1 - \varepsilon)}$$

$$\varepsilon = \Delta V / L_0$$

$$A_c = \text{พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างขณะที่มีความหดตัวเท่ากับ}$$

$$L_0 = \text{ความยาวเดิมหรือความยาวเริ่มแรก}$$

3. คำนวณหาแรงกดบนตัวอย่าง

$$\sigma_v = \frac{(P.R.)K}{A_c}$$

$$\sigma_v = \text{แรงกดบนตัวอย่างในแนวตั้ง, ปอนด์/ต.ร.นิ้ว (PSI)}$$

P.R. = Proving ring reading

K = Proving ring Constant (lb/DIVISION)

การคำนวณหาค่า Cohesion

อ่านค่าสูงสุดของกำลังกด ($\sigma_{v(max)}$) หรือบางครั้งเรียกว่า U.C.S.

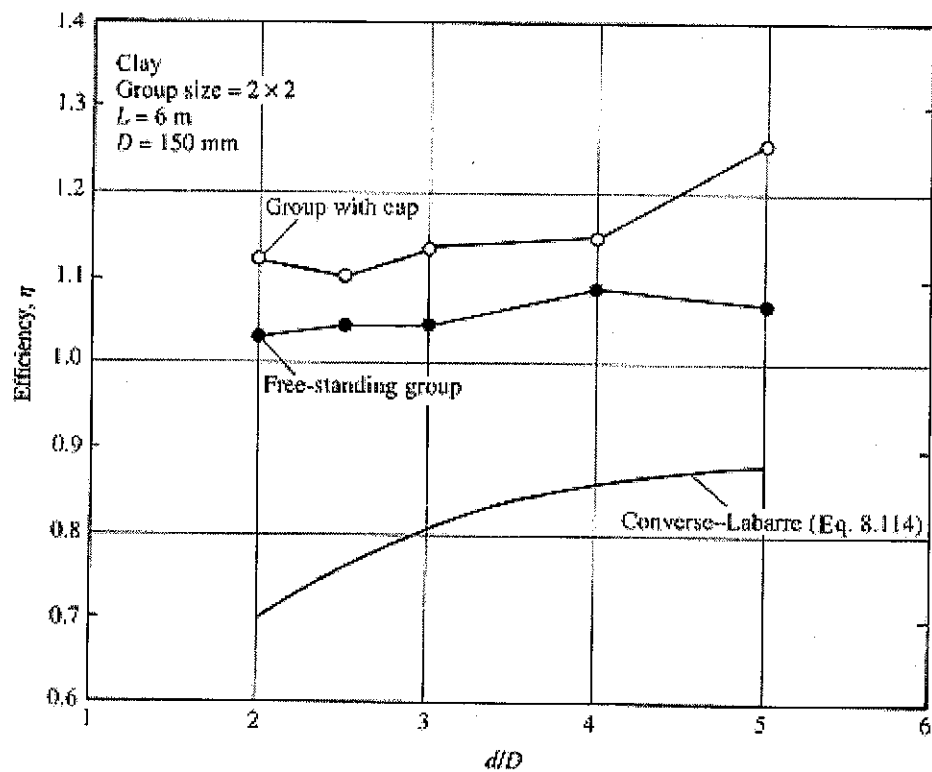
(Unconfined Compressive Strength)

Cohesion จะมีค่าดังนี้

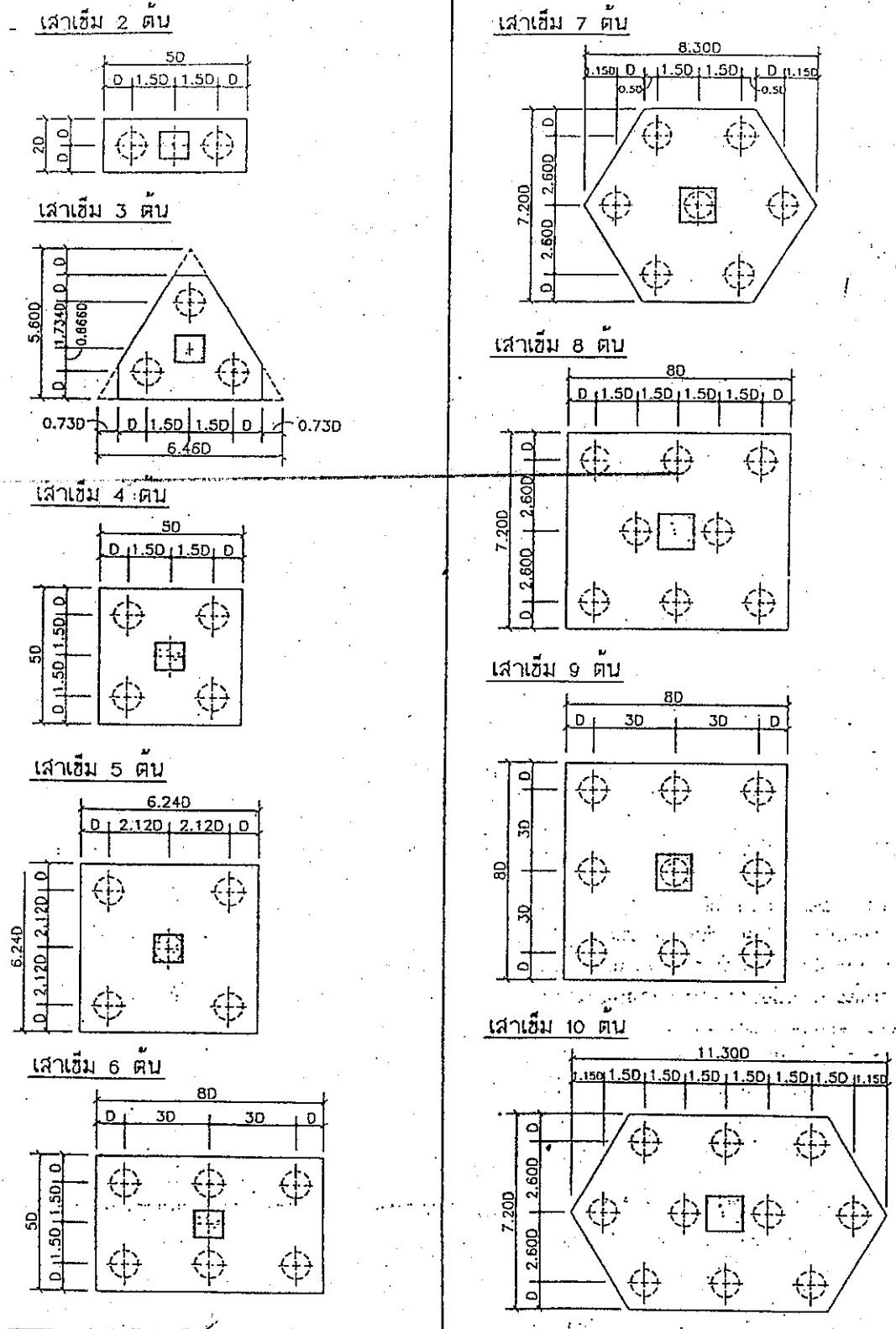
$$C = \frac{U.C.S.}{2} = \frac{q_u}{2}$$

q_u = กำลังของดินที่ได้จากการกดตัวอย่างดินในการทดสอบ

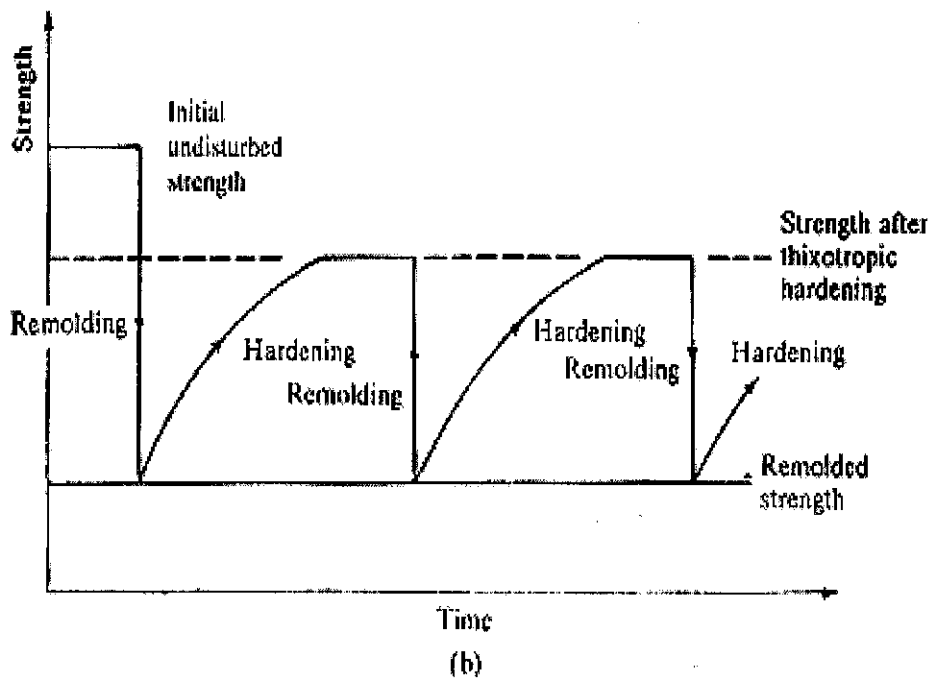
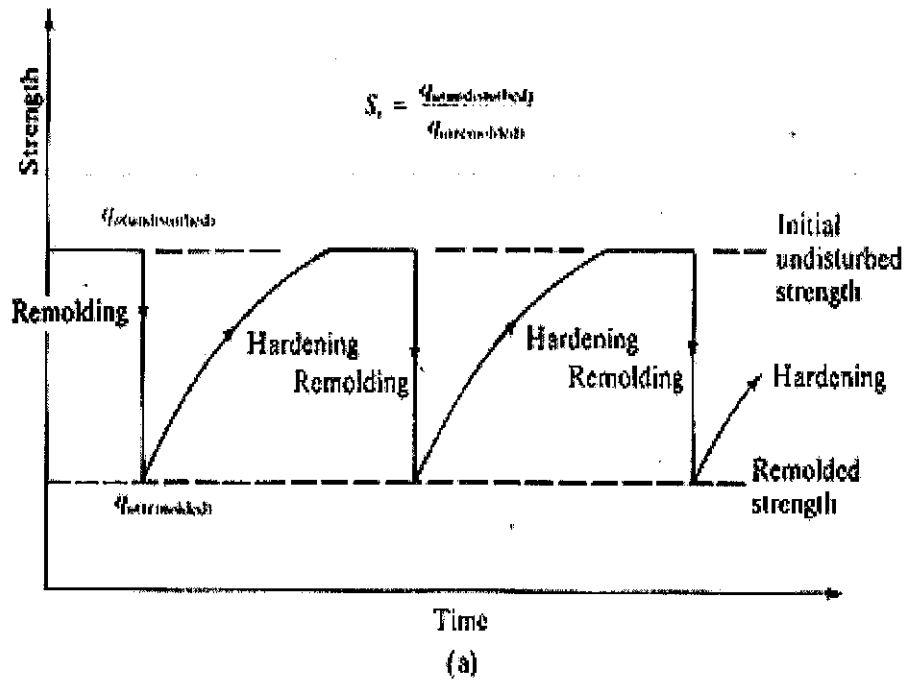
Unconfined Compressive Strength



รูปที่ 2.9 แสดงการหาค่า EFFICIENCY ของเสาเข็มกลุ่ม

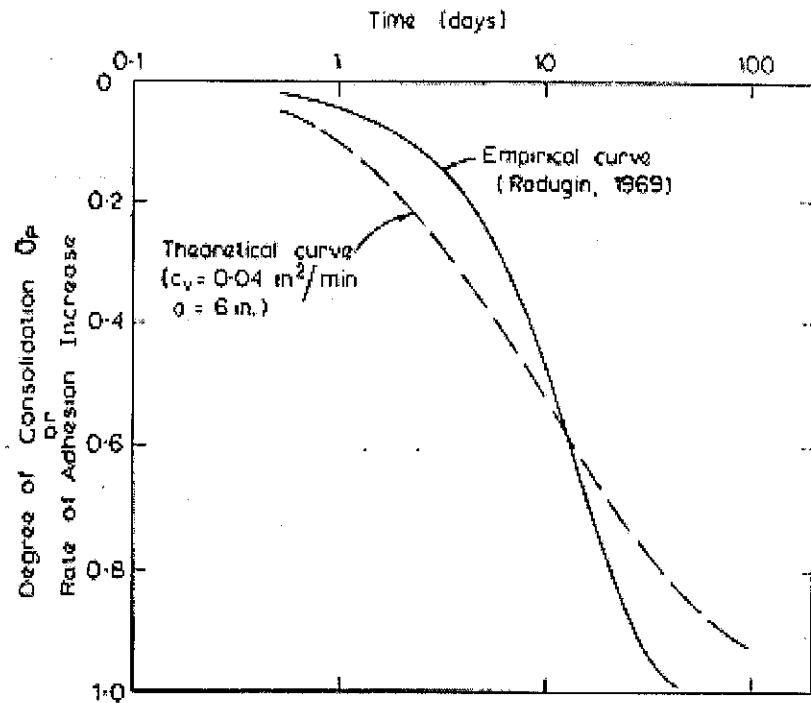


รูปที่ 2.10 แสดงการจัดตำแหน่งเสาเข็มที่โยธาสูรแนะนำ

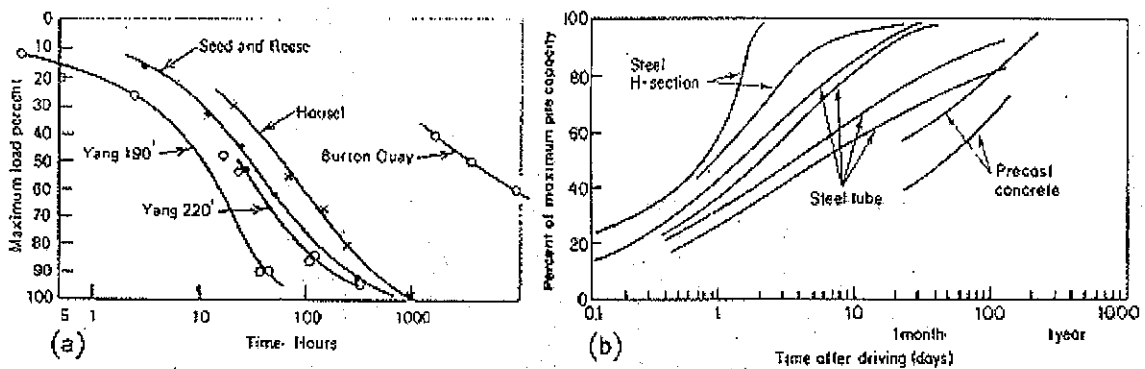


รูปที่ 2.11 พฤติกรรมของดินเหนียว

(a) Thixotropic clay (b) Partially thixotropic clay

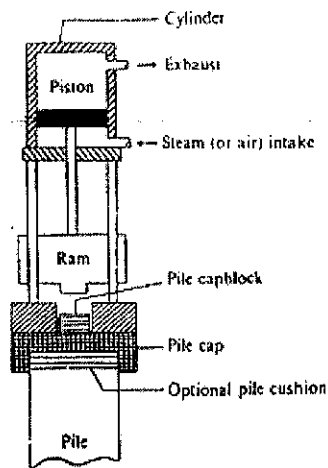


รูปที่ 2.12 การประเมินหาอัตราการทรุดตัวของดินหรือแรงเสียดทานที่เพิ่มมากขึ้น

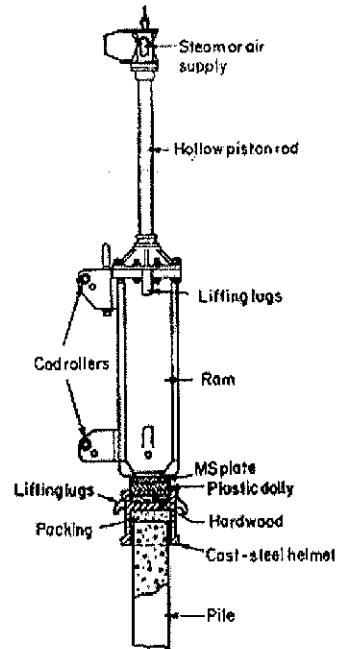


รูปที่ 2.13 สภาพการรับน้ำหนักของเสาเข็มที่เพิ่มมากขึ้นตามกาลเวลา

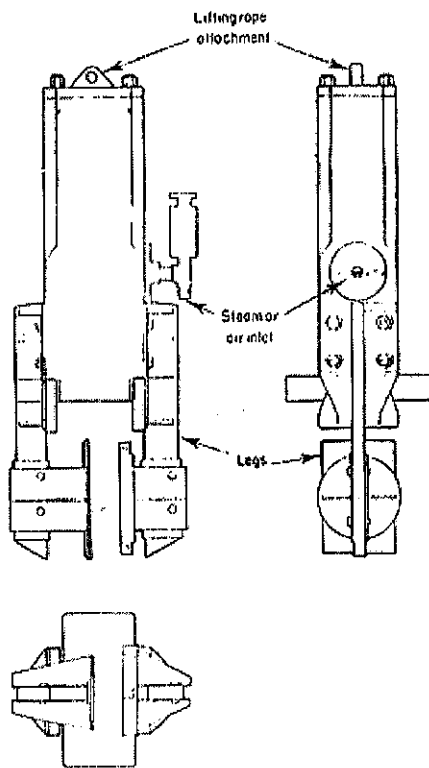
(a) POULOS & DAVIS (1980) , (b) TOMLINSON(1986) ใน soft ถึง stiff clay



(a)

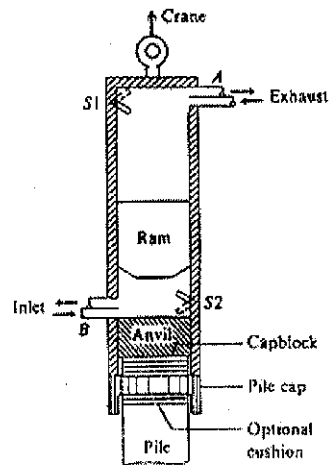


B.S.P. single-acting hammer driving pile with cast steel helmet and plastic dolly.

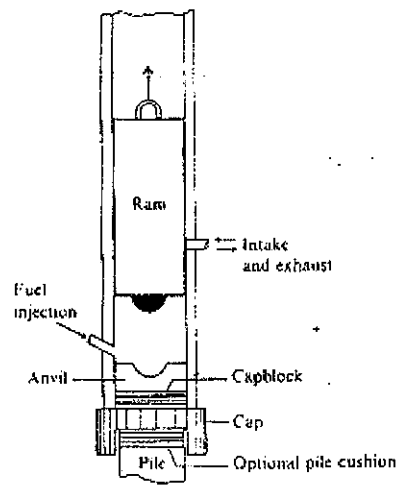


B.S.P. double-acting hammer.

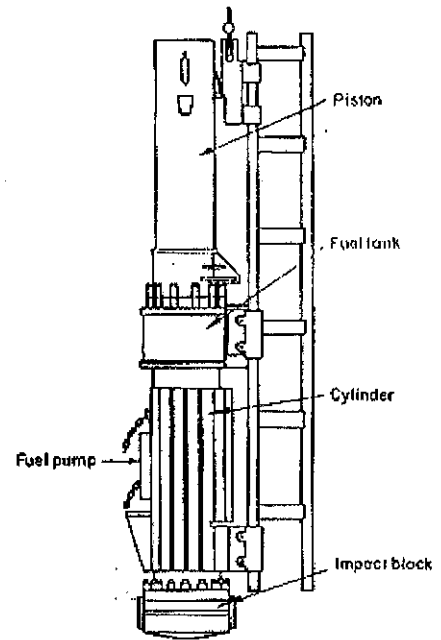
(b)



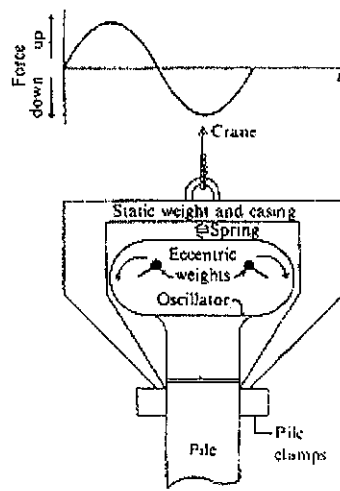
2.14(a) single-acting steam hammer, 2.15(b) Double-acting steam hammer



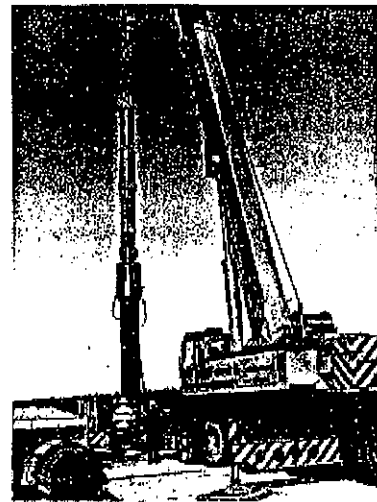
(c)



Delmag diesel pile hammer.



(d)



รูปที่ 2.16(c) Diesel hammer, รูปที่ 2.17(d) Vibration hammer

ตารางที่ 2.1 Terzaghi's Bearing Capacity Factor –Eqs.

ϕ	N_c	N_q	N_γ	ϕ	N_c	N_q	N_γ
0	5.70	1.00	0.00	26	27.09	14.21	9.84
1	6.00	1.10	0.01	27	29.24	15.90	11.60
2	6.30	1.22	0.04	28	31.61	17.81	13.70
3	6.62	1.35	0.06	29	34.24	19.98	16.18
4	6.97	1.49	0.10	30	37.16	22.46	19.13
5	7.34	1.64	0.14	31	40.41	25.28	22.65
6	7.73	1.81	0.20	32	44.04	28.52	26.87
7	8.15	2.00	0.27	33	48.09	32.23	31.94
8	8.60	2.21	0.35	34	52.64	36.50	38.04
9	9.09	2.44	0.44	35	57.75	41.44	45.41
10	9.61	2.69	0.56	36	63.53	47.16	54.36
11	10.16	2.98	0.69	37	70.01	53.80	65.27
12	10.76	3.29	0.85	38	77.50	61.55	78.61
13	11.41	3.63	1.04	39	85.97	70.61	95.03
14	12.11	4.02	1.26	40	95.66	81.27	115.31
15	12.86	4.45	1.52	41	106.81	93.85	140.51
16	13.68	4.92	1.82	42	119.67	108.75	171.99
17	14.60	5.45	2.18	43	134.58	126.50	211.56
18	15.12	6.04	2.59	44	151.95	147.74	261.60
19	16.56	6.70	3.07	45	172.28	173.28	325.34
20	17.69	7.44	3.64	46	196.22	204.19	407.11
21	18.92	8.26	4.31	47	224.55	241.80	512.84
22	20.27	9.19	5.09	48	258.28	287.85	650.67
23	21.75	10.23	6.00	49	298.71	344.63	831.99
24	23.36	11.40	7.08	50	347.50	415.14	1072.80
25	25.13	12.72	8.34				

^aFrom Kumbhojkar (1993)

ตารางที่ 2.2 Terzaghi's Modified Bearing Capacity

Factors, N_c' , N_q' , and N_γ'

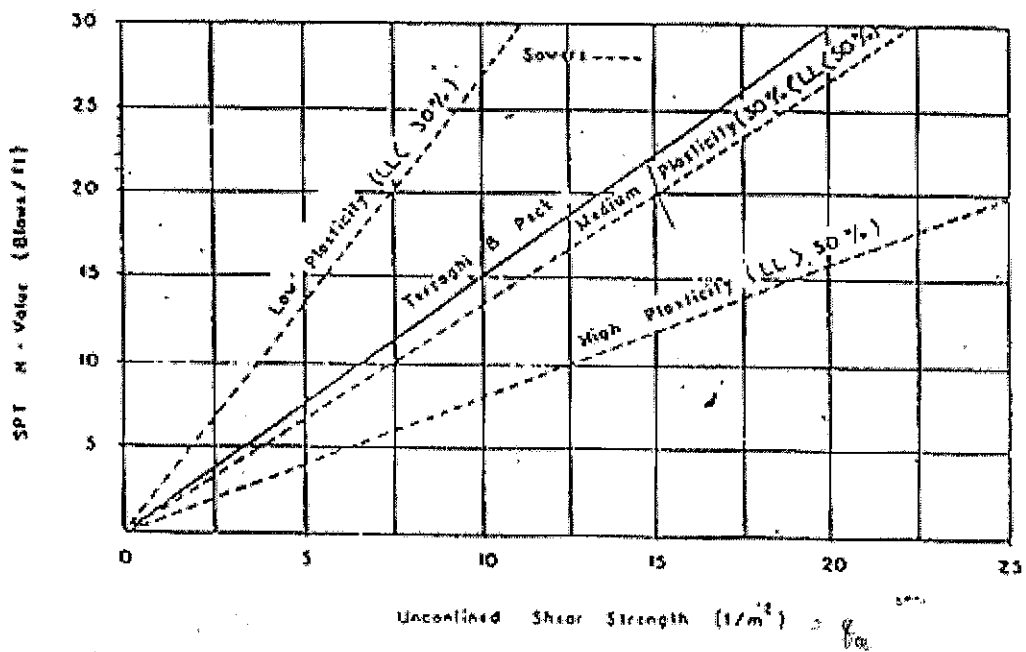
ϕ	N_c'	N_q'	N_γ'	ϕ	N_c'	N_q'	N_γ'
0	5.70	1.00	0.00	26	15.53	6.05	2.59
1	5.90	1.07	0.005	27	16.30	6.54	2.88
2	6.10	1.14	0.02	28	17.13	7.07	3.29
3	6.30	1.22	0.04	29	18.03	7.66	3.76
4	6.51	1.30	0.055	30	18.99	8.31	4.39
5	6.74	1.39	0.074	31	20.03	9.03	4.83
6	6.97	1.49	0.10	32	21.16	9.82	5.51
7	7.22	1.59	0.128	33	22.39	10.69	6.32
8	7.47	1.70	0.16	34	23.72	11.67	7.22
9	7.74	1.82	0.20	35	25.18	12.75	8.35
10	8.02	1.94	0.24	36	26.77	13.97	9.41
11	8.32	2.08	0.30	37	28.51	15.32	10.90
12	8.63	2.22	0.35	38	30.43	16.85	12.75
13	8.96	2.38	0.42	39	32.53	18.56	14.71
14	9.31	2.55	0.48	40	34.87	20.50	17.22
15	9.67	2.73	0.57	41	37.45	22.70	19.75
16	10.06	2.92	0.67	42	40.33	25.21	22.50
17	10.47	3.13	0.76	43	43.54	28.06	26.25
18	10.90	3.36	0.88	44	47.13	31.34	30.40
19	11.36	3.61	1.03	45	51.17	35.11	36.00
20	11.85	3.88	1.12	46	55.73	39.48	41.70
21	12.37	4.17	1.35	47	60.91	44.54	49.30
22	12.92	4.48	1.55	48	66.80	50.46	59.25
23	13.51	4.82	1.74	49	73.55	57.41	71.45
24	14.14	5.20	1.97	50	81.31	65.60	85.75
25	14.80	5.60	2.25				

ตารางที่ 2.3 Bearing capacity Factors*

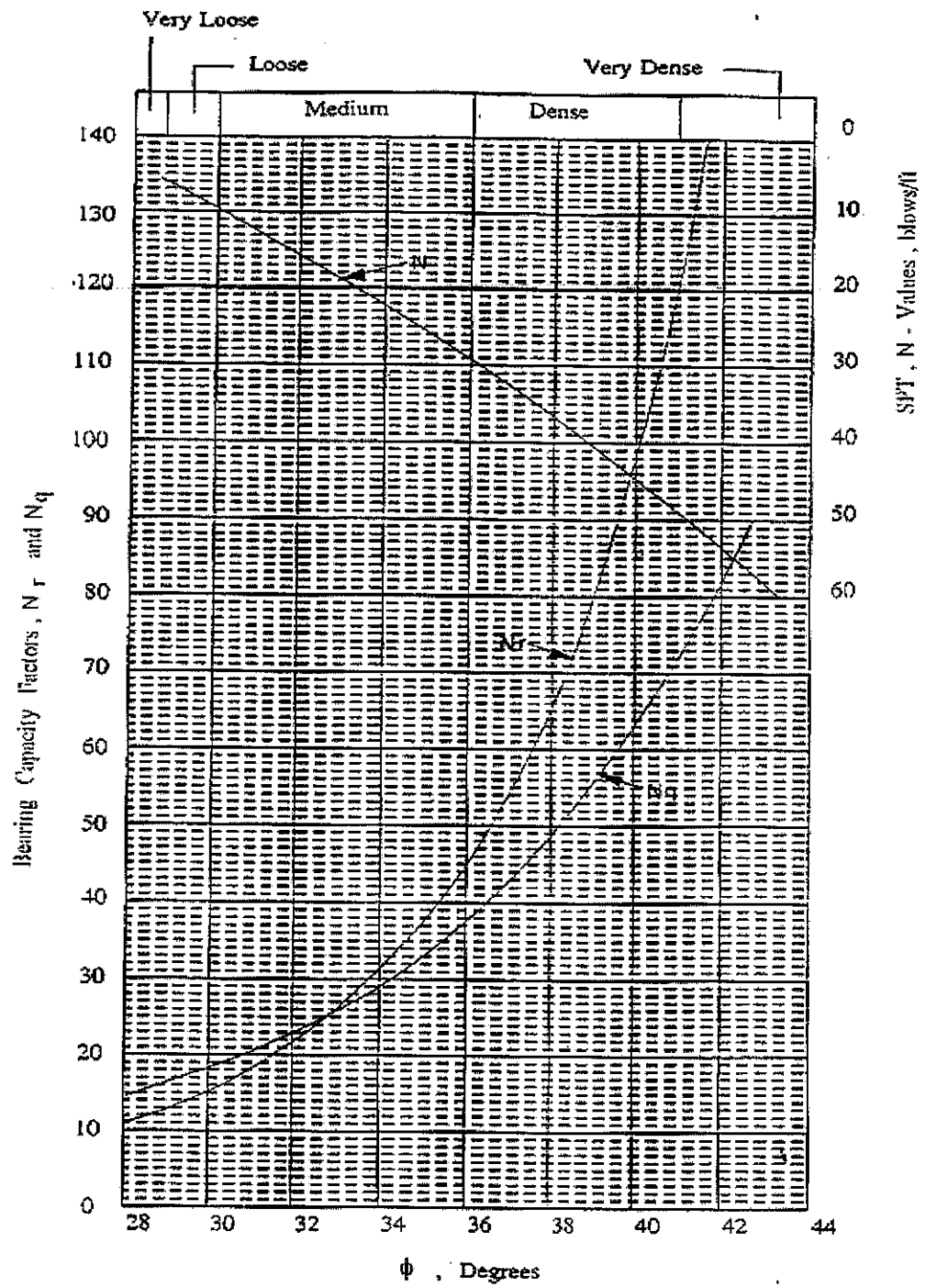
ϕ	N_c	N_q	N_γ	ϕ	N_c	N_q	N_γ
0	5.14	1.00	0.00	26	22.25	11.85	12.54
1	5.38	1.09	0.07	27	23.94	13.20	14.47
2	5.63	1.20	0.15	28	25.80	14.72	16.72
3	5.90	1.31	0.24	29	27.86	16.44	19.34
4	6.19	1.43	0.34	30	30.14	18.40	22.40
5	6.49	1.57	0.45	31	32.67	20.63	25.99
6	6.81	1.72	0.57	32	35.49	23.18	30.22
7	7.16	1.88	0.71	33	38.64	26.09	35.19
8	7.53	2.06	0.86	34	42.16	29.44	41.06
9	7.92	2.25	1.03	35	46.12	33.30	48.03
10	8.35	2.47	1.22	36	50.59	37.75	56.31
11	8.80	2.71	1.44	37	55.63	42.92	66.19
12	9.28	2.97	1.69	38	61.35	48.93	78.03
13	9.81	3.26	1.97	39	67.87	55.96	92.25
14	10.37	3.59	2.29	40	75.31	64.20	109.41
15	10.98	3.94	2.65	41	83.86	73.90	130.22
16	11.63	4.34	3.06	42	93.71	85.38	155.55
17	12.34	4.77	3.53	43	105.11	99.02	186.54
18	13.10	5.26	4.07	44	118.37	115.31	224.64
19	13.39	5.80	4.68	45	133.88	134.88	271.76
20	14.83	6.40	5.39	46	152.10	158.51	330.35
21	15.82	7.07	6.20	47	173.64	187.21	403.67
22	16.88	7.82	7.13	48	199.26	222.31	496.01
23	18.05	8.66	8.20	49	229.93	265.51	613.16
24	19.32	9.60	9.44	50	266.89	319.07	762.89
25	20.72	10.66	10.88				
* After Vesic (1973)							

ตารางที่ 2.4 Shape, Depth, and Inclination Factors Recommended

Factor	Relationship	Source
<i>Shape^a</i>	$F_{cs} = 1 + \frac{B N_q}{L N_c}$ $F_{qs} = 1 + \frac{B}{L} \tan \phi$ $F_{\gamma s} = 1 - 0.4 \frac{B}{L}$ <p>where L = length of the foundation (L > B)</p>	De Beer (1970)
<i>Depth^b</i>	<p>Condition (a): $D_f / B \leq 1$</p> $F_{cd} = 1 + 0.4 \frac{D_f}{B}$ $F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \frac{D_f}{B}$ $F_{\gamma d} = 1$ <p>Condition (b): $D_f / B > 1$</p> $F_{cd} = 1 + 0.4 \tan^{-1} \frac{D_f}{B}$ $F_{qd} = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \tan^{-1} \frac{D_f}{B}$ $F_{\gamma d} = 1$	Hansen(1970)
Inclination	$F_{ci} = F_{qi} = \left(1 - \frac{\beta^0}{90^0}\right)^2$ $F_{\gamma i} = \left(1 - \frac{\beta}{\phi}\right)^2$ <p>where β = inclination of the load on the foundation with respect to the vertical</p>	Meyerhof (1963) ; Hanna and Mayerhof (1981)
<p>These shape factors are empirical relation based on extensive laboratory test. The factor $\tan^{-1} (D_f / B)$ is in radians.</p>		



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง SPT N-VALUES และ Unconfined Shear Strength ของดินเหนียว



รูปที่ 2.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bearing Capacity Factors, Angle of Internal Friction, and Standard Penetration Test (From PECT, HANSEN, AND THORNBURN, 1973)