

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในโครงการวิจัย

2.1.1 วิธีสถิติศาสตร์ หลักการ ที่สำคัญของวิธีนี้ก็คือ น้ำหนักที่กระทำบนเสาเข็มจะถูกรับไว้โดย 2 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 แรงต้านของดินที่อยู่ข้างใต้ปลายของเสาเข็ม

ส่วนที่ 2 แรงต้านจากแรงเสียดทานระหว่างดินที่อยู่รอบ ๆ เสาเข็ม กับผิวของเสาเข็ม

จากหลักการข้างต้นเมื่อเรากำหนดค่าแปรผันมาสามารถเขียนสูตรได้เป็น ตามสมการที่ 2.1

$$P_u = P_{pu} + P_{fu} \quad (2.1)$$

เมื่อ P_u = น้ำหนักบรรทุกทุกพิบัติของเสาเข็ม(Ultimate Pile Capacity)

P_{pu} = ค่าแรงแบกทานที่ปลายของเสาเข็ม(Pile Point Capacity)

P_{fu} = ค่าแรงเสียดทานข้างเสาเข็ม(Skin Friction Resistance)

ก. การหาค่าแรงแบกทานที่ปลายของเสาเข็ม , P_{pu}

Lambe (1979) ได้แสดงวิธีการประมาณค่าแรงแบกทานของเสาเข็มจากสมการหาค่าแรงแบกทานทั่วไป

$$P_{pu} = A_p \left(cN_c + qN_q + \frac{1}{2} qN_\gamma \right) \quad (2.2)$$

เมื่อ A_p = พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม

N_c, N_q, N_γ = ตัวประกอบความสามารถในการรับแรงแบกทาน(Bearing Capacity Factor) สำหรับฐานรากลึก

q = ความดันจากน้ำหนักดินข้างบน(Overburden Pressure)

c = ค่าการยึดเกาะ(Cohesion) ของดิน(หรือค่า Undrained Shear Strength, S_u)
 จากสมการที่ 2.2 สามารถที่จะเขียนแยกตามลักษณะชั้นดินที่ปลายเสาเข็มวางอยู่
 - การหาค่าแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มกรณีที่ปลายเสาเข็มอยู่ในดินทราย
 (Cohesionless Soil) $c = 0$, $\phi > 0$

$$P_{pu} = A_p (q N_q) \quad (2.3)$$

โดยตัดเทอม $\frac{1}{2} q N_\gamma$ ออก เนื่องจากมีค่าน้อยมาก ๆ เมื่อเทียบกับเทอม $q N_q$ ($B \leq D$)

- การหาค่าแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มกรณีที่ปลายเสาเข็มอยู่ในดินเหนียว
 (Cohesion Soil) ซึ่งโดยทั่วไปค่ากำลังรับน้ำหนัก (Bearing Capacity) จะวิกฤติ(Critical) ที่สภาวะ
 ไม่ระบายน้ำ(Undrained Condition) คือ $\phi = 0$ $N_q = 1$, $N_\gamma = 0$

$$P_{pu} = A_p (c N_c + q) \quad (2.4)$$

ข. การหาค่าแรงเสียดทานข้างเสาเข็ม, P_{fu}

ค่า P_{fu} สามารถที่จะหาจากความสัมพันธ์

$$P_{fu} = \sum A_s f_s \quad (2.5)$$

ซึ่งค่า

A_s = พื้นที่โดยรอบของเสาเข็มที่ทำให้เกิดแรงเสียดทาน = $P \times \Delta L$

P = ความยาวเส้นรอบรูปของเสาเข็ม

ΔL = ความหนาของชั้นดินที่ เสาเข็มสัมผัส

f_s = แรงเสียดทานผิวของเสาเข็ม(Skin Resistance)

$$= \alpha c + K \sigma'_v \tan \delta \quad (2.6)$$

เมื่อ α = สัมประสิทธิ์การยึดเกาะ(Adhesion Factor)

σ'_v = หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง(Effective Vertical Stress)บน ΔL

K = สัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้าง (Coefficient of Lateral Earth Pressure)

δ = มุมเสียดทาน (Friction Angle) ระหว่างดินกับเสาเข็ม

- การหาแรงเสียดทานข้างเสาเข็มกรณีที่ดินด้านข้างเสาเข็มสัมผัสกับทราย

จากลักษณะของทรายน้ำสามารถที่จะซึมผ่านได้อย่างรวดเร็ว การพังทลายของทรายจึงอยู่ในลักษณะเงื่อนไขการระบายน้ำ (Drained Condition) สามารถเขียนเป็นสมการได้

$$f_s = K\sigma'_v \tan \delta \quad (2.7)$$

- การหาแรงเสียดทานข้างเสาเข็มกรณีที่ดินด้านข้างเสาเข็มสัมผัสกับชั้นดินเหนียว

สำหรับดินเหนียวนั้นมีอัตราการซึมได้ค่อนข้างจะต่ำมาก ฉะนั้นในการพังทลายของชั้นดินเหนียวจะอยู่ในเงื่อนไขของการอัดตัวไม่ระบายน้ำ (Undrained Condition) และค่ามุมเสียดทานระหว่างเม็ดดินของดินเหนียวนั้น มีค่าน้อยมาก ซึ่งในการวิเคราะห์ในส่วนของการหาค่าแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มจะให้ค่า $\phi = 0$ ซึ่งจะทำให้ ค่าแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มในชั้นดินเหนียวขึ้นอยู่กับค่าการยึดเกาะกัน (Cohesion) ของดินเหนียว จากสมการที่ 2.6 จะได้

$$f_s = \alpha C \quad (2.8)$$

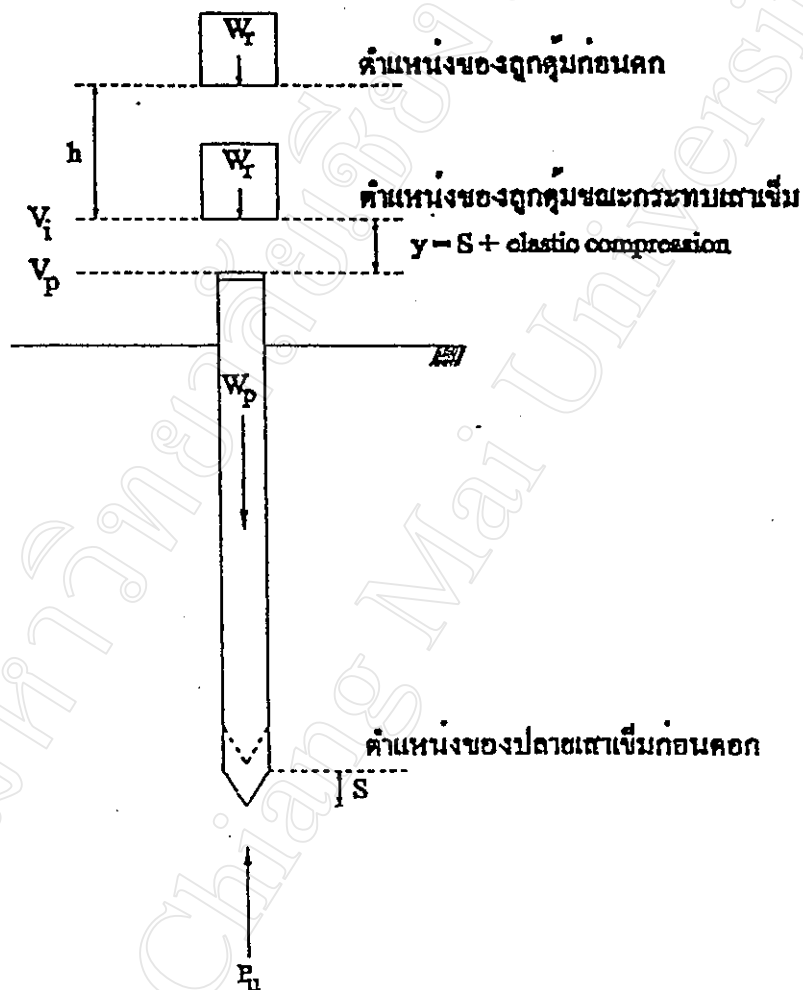
2.1.2 วิธีพลศาสตร์

วิธีพลศาสตร์ที่ใช้ในการหาค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มในปัจจุบันมีการใช้สมการของคลื่นมาใช้ในการคำนวณ แต่โดยส่วนใหญ่แล้วก็ยังคงใช้สูตรการตอกเสาเข็มซึ่งใช้หลักการเคลื่อนที่ของมวล (Dynamic Analysis) รวมถึงทฤษฎีของโมเมนตัมและพลังงาน มาประยุกต์ โดยพยายามรวมเอาส่วนประกอบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ในการทำงานจริง ๆ สำหรับการตอกเสาเข็ม เช่น กำลังงานของเครื่องตอกน้ำหนักค้อนตก ระยะการยกของค้อนตอกเสาเข็ม, ที่รองหัวเสาเข็ม, ชนิดและขนาดของเสาเข็มรวมถึงสภาพของดินเข้าด้วยกัน และจัดให้อยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่เชื่อถือได้จำนวนมากจึงทำการปรับปรุงสมการทางคณิตศาสตร์นั้น ให้สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด แต่ก็ยังมีสูตรการตอกเสาเข็มบางสูตรที่อาศัยการรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการตอกเสาเข็มและการทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มในสนามมาศึกษาและหาความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับน้ำหนักที่ได้กับสิ่งที่เกี่ยวข้องกับการ

ตอกเสาเข็มเช่น พลังงานในการตอกเสาเข็ม,ระยะการทรุดตัวของเสาเข็มจากการตอกครั้งสุดท้ายเป็นต้น จนได้สูตรการตอกเสาเข็มที่อาศัยการรวบรวมข้อมูลเป็นพื้นฐานสำคัญ

ก. ที่มาของสูตรการตอกเสาเข็ม(Derivation of Pile Driving Formula)

-ใช้หลักการของ Impulse-Momentum และพลังงาน



รูปที่ 2.1 แสดงการเคลื่อนที่ของเสาเข็มขณะที่ทำการตอกเสาเข็ม

กำหนดให้

g = ความเร่งของแรงโน้มถ่วงของโลก

h = ระยะยกของค้อนตอกเสาเข็ม

I = Impulse ที่ทำให้เกิด การยุบตัว(Compression)

m = มวลของวัตถุ = W/g

M_r = โมเมนตัมของลูกตุ้ม = $m_r \times V$

M_p = โมเมนตัมของเสาเข็ม = $m_p \times V$

n = สัมประสิทธิ์การคืนตัว (Coefficient of Restitution)

nI = Impulse ที่ทำให้เกิดการคืนตัว

P_u = น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็ม

s = ระยะจมของเสาเข็มเนื่องจากการตอกครั้งสุดท้าย

V_{ce} = ความเร็วของตุ้มตอกเสาเข็มและเสาเข็มในช่วงสุดท้ายของการเกิดการยุบตัว

V_i = ความเร็วของตุ้มตอกเสาเข็มขณะที่กระทบกับหัวเสาเข็ม

V_p = ความเร็วของเสาเข็มในช่วงสุดท้ายของการคืนตัว

V_r = ความเร็วของตุ้มตอกเสาเข็มในช่วงสุดท้ายของการคืนตัว

W_r = น้ำหนักของตุ้มตอกเสาเข็ม

W_p = น้ำหนักของเสาเข็มรวมทั้งน้ำหนักของที่รองหัวเสาเข็ม

ในขณะที่ตุ้มตอกเสาเข็มกระทบหัวเสาเข็ม โมเมนตัมของตุ้มตอกเสาเข็มคือ

$$M_r = m_r V_i = \frac{W_r V_i}{g} \quad (2.9)$$

ในช่วงสุดท้ายของการเกิดการยุบตัวที่หัวเสาเข็ม โมเมนตัมของตุ้มตอกเสาเข็มจะเปลี่ยนเป็น

$$M_r = \frac{W_r V_i}{g} - I = \frac{W_r V_{ce}}{g} \quad (2.10)$$

เพราะฉะนั้น

$$V_{ce} = \left(\frac{W_r V_i}{g} - I \right) \times \frac{g}{W_r} \quad (2.11)$$

โมเมนตัมของเสาเข็มในช่วงสุดท้ายของการเกิดการยุบตัวที่หัวเสาเข็มจะมีค่าเท่ากับ I ด้วย

เพราะฉะนั้น

$$M_p = I = V_{ce} \left(\frac{W_p}{g} \right) \quad (2.12)$$

$$V_{ce} = I \left(\frac{g}{W_r} \right) \quad (2.13)$$

สมมุติว่าเสาเข็มกับตุ้มที่ใช้ตอกเสาเข็มไม่มีการแยกกันหลังจากเกิดการยุบตัวที่หัวเสาเข็ม ซึ่งจะทำให้ความเร็วในขณะนั้นทั้งของเสาเข็มและตุ้มที่ใช้ตอกเสาเข็มมีค่าเท่ากัน

เพราะฉะนั้น จากสมการ 2.11 และ 2.13 จะได้ว่า

$$I = V_i \times \left(\frac{W_r W_p}{g(W_r + W_p)} \right) \quad (2.14)$$

ในช่วงสุดท้ายของการคืนตัว โมเมนต์ของเสาเข็มจะเท่ากับ

$$I + nI = \frac{W_p V_p}{g} \quad (2.15)$$

และของค้ำที่ใช้ในการตอกเสาเข็มจะเท่ากับ

$$\frac{W_r V_i}{g} - I - nI = \frac{W_r V_r}{g} \quad (2.16)$$

แทนค่า I ใน สมการ 2.14, 2.15 และ 2.16 จะได้

$$V_p = \left(\frac{W_r + nW_p}{W_r + W_p} \right) \times V_i \quad (2.17)$$

$$V_r = \left(\frac{W_r - nW_p}{W_r + W_p} \right) \times V_i \quad (2.18)$$

พลังงานของเสาเข็มและค้ำที่ใช้ตอกเสาเข็มในช่วงสุดท้ายของการคืนตัว สามารถเขียนได้
ดังนี้

$$\begin{aligned} \left(\frac{W_r}{2g} \right) V_r^2 + \left(\frac{W_p}{2g} \right) V_p^2 &= \frac{W_r}{2g} \frac{(W_r - nW_p)^2}{(W_r + W_p)^2} V_i^2 + \frac{W_p}{2g} \frac{(W_r + nW_p)^2}{(W_r + W_p)^2} V_i^2 \\ &= \frac{W_r V_i^2 (W_r + n^2 W_p)}{2g (W_r + W_p)} \\ &= W_r h \frac{(W_r + n^2 W_p)}{(W_r + W_p)} \end{aligned} \quad (2.19)$$

จากหลักของพลังงาน ถ้าไม่มีการสูญเสียพลังงาน จะได้

$$P_u s = W_r h$$

แต่เนื่องจาก ต้องมีการสูญเสียพลังงานจากประสิทธิภาพของเครื่องตอกเสาเข็ม

ถ้าให้ E_h = ประสิทธิภาพของเครื่องตอกเสาเข็ม

$$P_u s = E_h W_r h$$

แทนค่า $W_r h$ ด้วยค่า Equivalent จากสมการที่ 2.19 เราจะได้ว่า

$$P_u = \frac{E_h W_r h (W_r + n^2 W_p)}{s (W_r + W_p)} \quad (2.20)$$

ในขณะที่ดอกเสาเข็ม ระยะเคลื่อนที่ของปลายเสาเข็ม และหัวเสาเข็มจะไม่เท่ากัน เนื่องจากการยุบตัวยืดหยุ่น(Elastic Compression) เมื่อปลายเสาเข็มเคลื่อนที่ไปได้ระยะ s หัวเสาเข็มจะเคลื่อนที่ไปเป็นระยะ $s+k_1+k_2+k_3$

เมื่อ k_1 =ค่าการยุบตัวยืดหยุ่นของที่รองหัวเสาเข็ม

k_2 = ค่าการยุบตัวยืดหยุ่นของเสาเข็ม

k_3 = ค่าการยุบตัวยืดหยุ่นของดิน

ค่าการยุบตัวยืดหยุ่นเหล่านี้ จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปโดยขึ้นอยู่กับน้ำหนักที่กระทำกับหัวเสาเข็ม ดังนั้น งานที่เกิดขึ้นหาได้จากพลังงานจลน์(Kinetic Energy) ของการตอกเสาเข็ม จะเท่ากับ

$$P_u \left[s + \left(\frac{k_1 + k_2 + k_3}{2} \right) \right] = P_u \left(s + \frac{k}{2} \right) \quad (2.21)$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 2.20 ได้

$$P_u = \frac{E_h W_r h}{\left(s + \frac{k}{2} \right)} \times \frac{(W_r + n^2 W_p)}{(W_r + W_p)} \quad (2.22)$$

ซึ่งจากสมการที่ 2.21 สูตรการตอกเสาเข็มที่มีผู้แนะนำส่วนใหญ่จะมาจากสมการนี้ เพียงแต่มีการเปลี่ยนแปลงค่าบางตัวให้มีความเหมาะสมขึ้นตามแต่ละสูตร คือ

Hiley Equation มาจากสมการที่ 2.21 คือ

$$P_u = \frac{E_h W_r h}{\left(s + \frac{k}{2} \right)} \times \frac{(W_r + n^2 W_p)}{(W_r + W_p)}$$

Danish Formula จากสมการที่ 2.21 ให้สัมประสิทธิ์การคืนตัว, n มีค่าเท่ากับ 1 และมีค่าการยุบตัวยืดหยุ่นเป็น $\sqrt{\frac{e_h E_h}{2AE}}$ จะได้

$$P_u = \frac{e_h E_h}{s + C_1} \quad \text{เมื่อ } C_1 = \sqrt{\frac{e_h E_h}{2AE}}$$

Eytelwein Formula จากสมการที่ 2.21 ให้ในการกระทบของตุ้มที่ใช้ตอกเสาเข็มกับเสาเข็ม ไม่มีการยุบตัวยืดหยุ่นคือค่าสัมประสิทธิ์การคืนตัว, n มีค่าเท่ากับ 0 และมีค่าการยุบตัวยืดหยุ่นของที่รองหัวเสาเข็ม, เสาเข็มและดินข้างใต้กับรอบๆเสาเข็ม มีค่าเท่ากับ $0.1 \frac{W_p}{W_r}$ นิ้ว จะได้ว่า

$$P_u = \frac{e_h E_h}{s + 0.00254 \left(\frac{W_p}{W_r} \right)} \quad \text{เมื่อ } s \text{ มีหน่วยเป็นเมตร}$$

Modified Engineering News Formula จากสมการที่ 2.21 จะเพิ่มสัมประสิทธิ์เท่ากับ 1.25 และให้ค่าการขุดตัวยึดหุ่นของที่รองหัวเสาเข็ม, เสาเข็มและดินข้างใต้กับรอบๆเสาเข็มมีค่าเท่ากับ 0.1 นิ้วหรือ 0.00254 เมตร จะได้ว่า

$$P_u = \frac{1.25e_h E_h}{s + 0.00254} \times \left(\frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p} \right)$$

Navy-McKay Formula เช่นเดียวกับสมการของ Eytelwein Formula ที่ค่าสัมประสิทธิ์การคืนตัว, n เท่ากับ 0 และค่าการขุดตัวยึดหุ่นของที่รองหัวเสาเข็ม, เสาเข็มและดินจะไม่คิดแต่มีค่าสัมประสิทธิ์ 0.3คูณกับค่า $\frac{W_r}{W_p}$ เท่านั้น จะได้ว่า

$$P_u = \frac{e_h E_h}{s(1.0 + 0.3C_1)} \quad \text{โดยที่ } C_1 = \frac{W_p}{W_r}$$

ส่วนสูตรของ Janbu Formula และ Canadian Nation Building Code ก็ใช้หลักการเดียวกับสมการที่ 2.21 เพียงแต่มีการปรับเปลี่ยนในส่วนของค่าการขุดตัวยึดหุ่นให้อยู่ในรูปของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการตอกเสาเข็มและเสาเข็มมากขึ้น เช่นพิจารณาในเรื่องของ พื้นที่หน้าตัดและความยาวของเสาเข็ม จะได้

$$\text{Janbu Formula จะได้ว่า } P_u = \frac{e_h E_h}{K_u s}$$

$$\text{โดยที่ } C_d = 0.75 + 0.15 \frac{W_p}{W_r}$$

$$K_u = C_d \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\lambda}{C_d}} \right)$$

$$\lambda = \frac{e_h E_h}{A E s^2}$$

$$\text{Canadian Nation Building Code จะได้เป็น } P_u = \frac{e_h E_h C_1}{s + C_2 C_3}$$

$$\text{โดยที่ } C_1 = \frac{W_r + n^2 (0.5 W_p)}{W_r + W_p}$$

$$C_2 = \frac{3P_u}{2A}$$

$$C_3 = \frac{L}{E} + (3.61 \times 10^{-9})$$

- การหาสูตรการตอกเสาเข็มโดยการรวบรวมข้อมูล

สูตรการตอกเสาเข็มที่ได้จากการรวบรวมข้อมูล ตามรายงานของ Marvin Gate, J.M ได้เก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากผลการทดสอบเสาเข็มในสนาม(Pile Load Test) มากกว่า 100 ดัน แล้วนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบเสาเข็มกับสูตรการตอกเสาเข็ม พบว่า ถ้าตั้งรับน้ำหนักของเสาเข็มมีความสัมพันธ์กับรากที่สองของพลังงานที่ใช้ตอกเสาเข็ม นั่นคือ

$$P_u \sim \sqrt{E_h}$$

จากนั้นได้ทำการเขียนกราฟ ระหว่างน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มที่ได้จากการคำนวณในแกนสเกลธรรมดา กับระยะจมของเสาเข็มจากการตอกครั้งสุดท้ายในสเกลล็อก(Log Scale) ได้ลักษณะความสัมพันธ์ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงว่าน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ได้จากการคำนวณมีความแปรผันโดยตรงกับล็อกของระยะจมของเสาเข็มจากการตอกครั้งสุดท้าย จะได้ว่า

$$P_u \sim \log s$$

จากทั้งสองสมการจะได้ว่า

$$P_u \sim \sqrt{E_h} \log s$$

หรือ

$$P_u = a \sqrt{E_h} \log s \quad \text{เมื่อ } a \text{ เป็นค่าคงที่}$$

แต่เนื่องจากค่าของ $\log s$ อาจจะมีค่าเป็นลบในกรณีที่ s มีค่าน้อยกว่า 1 จะทำให้ P_u มีค่าเป็นลบด้วย จำต้องใช้ค่าคงที่อีกตัวหนึ่งเพิ่มเข้าไปในสมการด้วย ในที่นี้ ให้ค่าคงที่ดังกล่าวมีค่าเท่ากับ b ดังนั้นจะได้ว่า

$$P_u = a\sqrt{E_h} \log s + b$$

จากสมการดังกล่าวทำให้พัฒนาได้สูตรของ Gate Formula คือ

$$P_u = 104.5\sqrt{e_h E_h} (2.4 - \log s)$$

เมื่อ P_u มีหน่วยเป็นกิโลนิวตัน และ s มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

ข. ตัวประกอบ(Factor)ต่างๆที่มีอิทธิพลต่อค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่คำนวณได้จากสูตร

เนื่องจากระยะการทรุดตัวของเสาเข็มจากการตอกเสาเข็มครั้งสุดท้าย มีผลต่อน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่คำนวณได้จากสูตรการตอกเสาเข็ม การที่ระยะการทรุดตัวของเสาเข็มดังกล่าวมีค่าที่แตกต่างกันอาจจะมีได้เป็นผลมาจากการที่เสาเข็มมีกำลังการรับน้ำหนักที่แตกต่างกัน แต่อาจจะมีสาเหตุเนื่องจากเหตุผลหลายๆประการคือ

- น้ำหนักของตุ้มที่ใช้ในการตอกเสาเข็มและน้ำหนักของเสาเข็ม ในการตอกเสาเข็ม โดยใช้ตุ้มตอกเสาเข็มแบบปล່อย(Drop Hammer) มักจะมีปัญหาเกี่ยวกับน้ำหนักของตุ้มที่ใช้ในการตอกเสาเข็ม เพราะถ้าใช้ตุ้มที่มีน้ำหนักไม่เหมาะสม จะเป็นสาเหตุให้ระยะการทรุดตัวของเสาเข็มจากการตอกครั้งสุดท้ายมีค่าที่แตกต่างกันมาก และอาจจะทำให้เกิดความเสียหายต่อตัวเสาเข็มเองได้ คือถ้าน้ำหนักของตุ้มตอกมีค่ามากเกินไปเมื่อเทียบกับน้ำหนักของเสาเข็ม อาจจะทำให้เสาเข็มที่ทำการตอกเกิดความเสียหายในช่วงกลางเสาและปลายล่างของเสาเข็มได้ และค่าระยะการทรุดตัวจากการตอกครั้งสุดท้ายจากกรณีดังกล่าวจะทำให้ค่าที่มากเกินไปจริง ซึ่งจะทำให้ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง แต่ในทางตรงข้ามถ้าใช้ตุ้มตอกเสาเข็มที่มีน้ำหนักน้อยเกินไปเมื่อเทียบกับน้ำหนักของเสาเข็ม ค่าระยะการทรุดตัวของเสาเข็มจากการตอกครั้งสุดท้ายจะได้ค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ทำให้ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่คำนวณได้มีค่าที่มากกว่าความเป็นจริง และจากกรณีดังกล่าวจะทำให้การตอกเสาเข็มลงไปถึงชั้นดินที่ต้องการเป็นเรื่องที่ยากทำให้ต้องมีการยกตุ้มตอกให้สูงเพื่อเพิ่มพลังงานในการตอกเสาเข็มขึ้นซึ่งจะทำให้หัวเสาเข็มเกิดความเสียหายจากการกระแทกดังกล่าวได้ ดังนั้นจากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นการเลือกน้ำหนักของตุ้มที่ใช้ในการตอกเสาเข็ม จึงมีความสำคัญต่อค่าน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่คำนวณได้เป็นอย่างมาก ซึ่งในการหาน้ำหนักของตุ้มที่ใช้ในการตอกเสาเข็ม Milligan และ Humes ได้แนะนำไว้ดังนี้

$$W_r(\text{max}) = \frac{0.0764A\sqrt{B}}{h}$$

เมื่อ

$W_r(\text{max})$ คือน้ำหนักสูงสุดของตุ้มที่ใช้ในการตอกเสาเข็ม(ตัน)

A คือพื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม(ตารางเซนติเมตร)

B คือความกว้างของหน้าตัดเสาเข็ม(เซนติเมตร)

h คือระยะยกของตุ้มที่ใช้ตอกเสาเข็ม(เซนติเมตร)

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าน้ำหนักค่าสุดของดัมที่ใช้ในการตอกเสาเข็มกับค่าความยาวที่เหมาะสม
ที่มา:วสท.(2521)

ความยาวของเสาเข็ม(เมตร)	น้ำหนักค่าสุดของดัมที่ใช้ตอกเสาเข็ม(ตัน)
น้อยกว่า 15	น้ำหนักของเสาเข็ม
15-18	3/4 เท่าของ น้ำหนักของเสาเข็ม
มากกว่า 18	2/3 เท่าของน้ำหนักเสาเข็ม

- อัตราเร็วของดัมที่ใช้ในการตอกเสาเข็ม พลังงานของดัมที่ใช้ในการตอกเสาเข็มขึ้นอยู่กับอัตราเร็วในการตอกเสาเข็ม ซึ่งถ้าอัตราเร็วในการตอกมากจะทำให้พลังถูกถ่ายทอดสู่เสาเข็มมาก และจะทำให้ระยะทรุดตัวของเสาเข็มมีค่ามากตามไปด้วย ซึ่งอาจจะทำให้ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าปกติได้

- การรบกวนขณะทำการตอกเสาเข็ม สำหรับเสาเข็มที่ทำการตอกในชั้นดินที่เป็นดินประเภทที่มีการยึดเหนี่ยว(Cohesive Soil) ถ้ามีการรบกวนในระหว่างการตอกเสาเข็มทำให้การตอกไม่ต่อเนื่องมีการหยุดพัก เช่น เครื่องมือในการตอกเสาเข็มเกิดขัดข้อง การหยุดพักนี้จะทำให้ค่าแรงเสียดทานระหว่างเสาเข็มกับดินรอบๆเสาเข็มมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อเริ่มทำการตอกเสาเข็มต้นเดิมนี้ใหม่จะทำให้ระยะทรุดตัวของเสาเข็มเนื่องจากการตอกลดลงไปอย่างมาก ในกรณีนี้ต้องทำการตอกเสาเข็มให้ลงไปดินระยะหนึ่งก่อนเพื่อให้สภาพของแรงเสียดทานรอบเสาเข็มกลับคืนสู่สภาพเดิมก่อนการหยุดตอก จึงจะทำการเริ่มจกระยะการทรุดตัวของเสาเข็มได้ ซึ่งในกรณีนี้โดยทั่วไปแล้วจะทำการตอกลงไปเป็นระยะประมาณ 1.50 เมตร

- ที่รองหัวเสาเข็ม ในระหว่างที่ทำการตอกเสาเข็ม จะเกิดการสูญเสียพลังงานจากการตอกเสาเข็มในการกระทบกันของดัมตอกและเสาเข็ม ดังนั้นต้องมีการรองหัวเสาเข็มและที่รองหัวเสาเข็มต้องอยู่ในสภาพที่ดี และการจคค่าระยะการทรุดตัวของเสาเข็มไม่ควรทำทันทีที่มีการเปลี่ยนที่รองหัวเสาเข็มใหม่ต้องรอให้วัสดุที่รองหัวเสาเข็มอยู่ในสภาพเหมือนก่อนที่จะเปลี่ยนที่รองหัวเสาเข็มก่อน

- เสาส่งหัวเสาเข็ม เสาส่งนี้เป็นอุปกรณ์ใช้เป็นเสาสำหรับสวมหัวเสาเข็มแล้วทำการตอกลงไปดิน ในกรณีที่ต้องการให้หัวเสาเข็มอยู่ลึกลงไปใต้ผิวดิน ซึ่งเสาส่งนี้จะมีผลต่อระยะการทรุดตัวของเสาเข็มก็คือ ทำให้น้ำหนักของเสาเข็มเพิ่มขึ้น ทำให้เสาเข็มตอกลงยากกว่าเดิมทำให้ระยะทรุดตัวของเสาเข็มลดลง และถ้าเสาส่งมีขนาดที่ไม่พอดีกับหัวเสาเข็มจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานจากการตอกเสาเข็มทำให้ระยะการทรุดตัวของเสาเข็มน้อยลง ดังนั้นเสาส่งหัวเสาเข็มนี้ควร

เป็นเสาท่อนเดียว และมีความแข็งแรงเพียงพอ รวมถึงการสวมเสาเข้ากับหัวเสาเข็มต้องพอดีและแน่นหนาเพื่อไม่ให้สูญเสียพลังงานในขณะที่ทำการตอกเสาเข็ม

2.1.3 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มในสนาม(Pile Load Test)

เมื่อจะทำการทดสอบเสาเข็มดินที่ทำการทดสอบควรจะต้องติดตั้งเสร็จสิ้นอย่างน้อย 3-30 วัน (ASTM D 3689-83) ทั้งนี้เพื่อให้ดินโดยรอบเสาเข็มที่คืนสภาพความแข็งแรงเสียก่อน

ก.วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM. D-1143

- Standard loading Procedure หรือ Slow Maintained Load Test โดยทำการเพิ่มน้ำหนักในการทดสอบเป็นขั้น ๆ ซึ่งจะเพิ่มขึ้นละ 25% และเพิ่มไปจนถึง 200% ของน้ำหนักที่ออกแบบไว้ โดยจะใช้เวลาในการทดสอบทั้งสิ้น 48-72 ชม. หรืออาจจะมากกว่านั้น

- Cyclic Load Test ทำการทดสอบตามวิธีเดียวกับข้อที่ 1 แต่จะมีข้อแตกต่างกันที่เมื่อเพิ่มน้ำหนักไปจนถึง 50, 100, 150% ให้ทำการถอนน้ำหนักส่วนที่เพิ่มออกแล้วทำการเพิ่มน้ำหนักเข้าไปใหม่ กระทำกลับไปกลับมาจนถึง 200% ของน้ำหนักที่ออกแบบไว้

- Loading in Excess of Standard Test Load ภายหลังการทดสอบตามวิธีที่ 1 เสร็จเรียบร้อยแล้ว เสาเข็มที่ทำการทดสอบจะถูกเพิ่มน้ำหนักจนเสาเข็มพิบัติ

- Constant time Interval Loading วิธีการทดสอบจะเป็นเช่นเดียวกับวิธีที่ 1 แต่ในแต่ละขั้นของการเพิ่มน้ำหนักนั้นจะต้องทิ้งช่วงระยะเวลาในการเพิ่มน้ำหนักแต่ละขั้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เท่ากันตลอด รวมทั้งในขณะถอนน้ำหนักด้วย

- Constant Rate of Penetration Method (CRP) เป็นการทดสอบหาน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม โดยวัดเป็นอัตราจมลงของเสาเข็มในช่วง 0.25 ถึง 0.5 มม./นาที ซึ่งการทดสอบเสาเข็มโดยวิธีนี้ จะใช้เวลาในการทดสอบ ประมาณ 2-3 ชั่วโมง

- Quick Load Test เป็นวิธีการทดสอบที่ใช้ระยะเวลาสั้น ในแต่ละช่วงของการเพิ่มน้ำหนักและจะทำการเพิ่มน้ำหนักให้เสาเข็มจนถึงพิบัติ โดยจะใช้ระยะเวลาในการทำการทดสอบ ประมาณ 3-6 ชั่วโมง

- Constant Settlement Increment Loading method เป็นวิธีการทดสอบเสาเข็มโดยการเพิ่มน้ำหนัก ทดสอบเป็นช่วง ๆ เพื่อให้เกิดการทรุดตัวที่เท่ากัน โดยกำหนดช่วงการทรุดตัวที่ประมาณ 1% ของเส้นผ่าน ศก. เสาเข็มในการเพิ่มแต่ละน้ำหนักบรรทุกทดสอบ

จากวิธีการทดสอบเสาเข็มวิธีต่าง ๆ ที่เสนอไว้มีอยู่หลายวิธี ซึ่งวิธีการที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการทดสอบและสภาพของเครื่องมือในการทดสอบที่มีอยู่ โดยจะพบมากในจังหวัดเชียงใหม่ นั้น วิธีการทดสอบที่นิยมใช้คือ Standard Loading Procedure หรือ Slow Maintained Load test

เมื่อทำการทดสอบในสนามแล้ว สิ่งที่สำคัญที่สุดคือการแปลผลหาค่าน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจากข้อมูลที่ทำทดสอบ ซึ่งจากผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม สิ่งที่จะได้คือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกบนเสาเข็มกับการทรุดตัวของเสาเข็มที่เกิดขึ้น โดยที่กราฟความสัมพันธ์อันนี้สามารถจะบ่งบอกพฤติกรรมในการรับน้ำหนักของเสาเข็มได้ แต่ที่สำคัญ คือ การประเมินเพื่อที่จะหาค่า กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ที่จุดพิบัติ และเราจะให้ความสำคัญในส่วนนี้ วิธีการแปลผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม เพื่อให้ได้ค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุด ได้มีผู้รวบรวมไว้หลายรูปแบบ ดังนี้

ข. วิธีการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากการทดสอบกำลังแบกทานของเสาเข็ม

วิธีการของChin(1970) ได้ทำการศึกษาพบว่า การทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักพิบัติของเสาเข็ม จากการทดสอบเสาเข็มในสนามนั้นเป็นเรื่องยากลำบากเพราะอาจมีข้อจำกัดของเครื่องมือในการทำทดสอบจึงได้ทำการเสนอว่ากำลังรับน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มนั้นสามารถประมาณได้จากข้อมูลการทดสอบที่ยังไม่ถึงจุดพิบัติ ซึ่งวิธีการนี้เป็นผลมาจากการทดลองศึกษาลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการทรุดตัวของเสาเข็ม ทั้งที่เป็นแบบจำลองและในสภาพจริง พบว่าลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการทรุดตัวเป็นความสัมพันธ์แบบไฮเพอร์โบลิค(Hyperbolic) ซึ่งค่าน้ำหนักบรรทุกพิบัติของเสาเข็มสามารถหาได้จากสมการที่ 2.23

$$\frac{\Delta}{P} = m\Delta + c \quad (2.23)$$

โดยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าการทรุดตัวของเสาเข็มกับน้ำหนักที่กระทำกับหัวเสาเข็ม $\left(\frac{\Delta}{P}\right)$ กับค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม (Δ) จะได้ลักษณะที่เป็นเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ m ซึ่งส่วนกลับของค่าความชันดังกล่าวก็คือค่ากำลังรับน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มนั่นเอง ซึ่งได้ทำการตรวจสอบและแสดงผลในตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดง การวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มตามวิธีการของ Chin

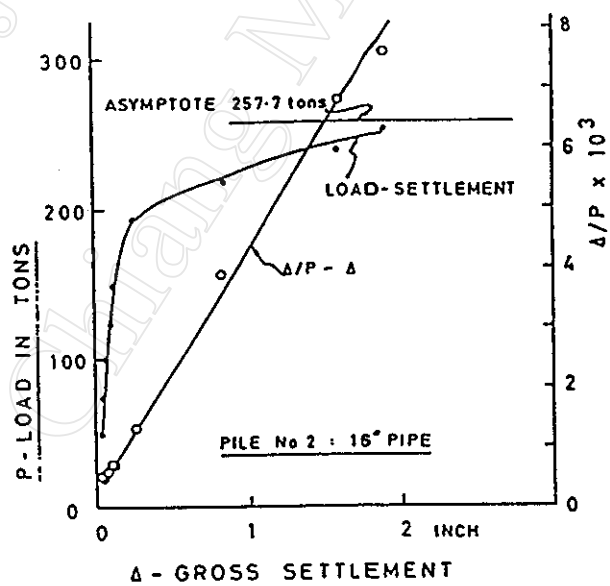
ที่มา: Chin(1970)

ANALYSIS OF LOAD-SETTLEMENT RESULTS ON TEST PILE NO. 2^a

P^b load, in tons (1)	Δ^a gross settlement, in inches (2)	Δ/P (3)	Correlation coefficient r (4)	m (5)	$1/m$ (6)
49	0.025	0.00051			
73	0.035	0.00048			
98	0.065	0.00066			
122	0.090	0.00074			
148	0.110	0.00074			
193	0.250	0.00130			
218	0.855	0.00392	.999031	.004153	240.7
238	1.610	0.00677	.999566	.004011	249.3
251	1.900	0.00757	.999136	.003880	257.7

^a 16 in. pipe was used for this analyses.

^b Figures provided by Charles I. Mansur and Alfred H. Hunter in Proc. Paper 7509.



รูปที่ 2.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ตามวิธีการหาค่ากำลังรับน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มตามวิธีการ

ของChin

ที่มา: Chin(1970)

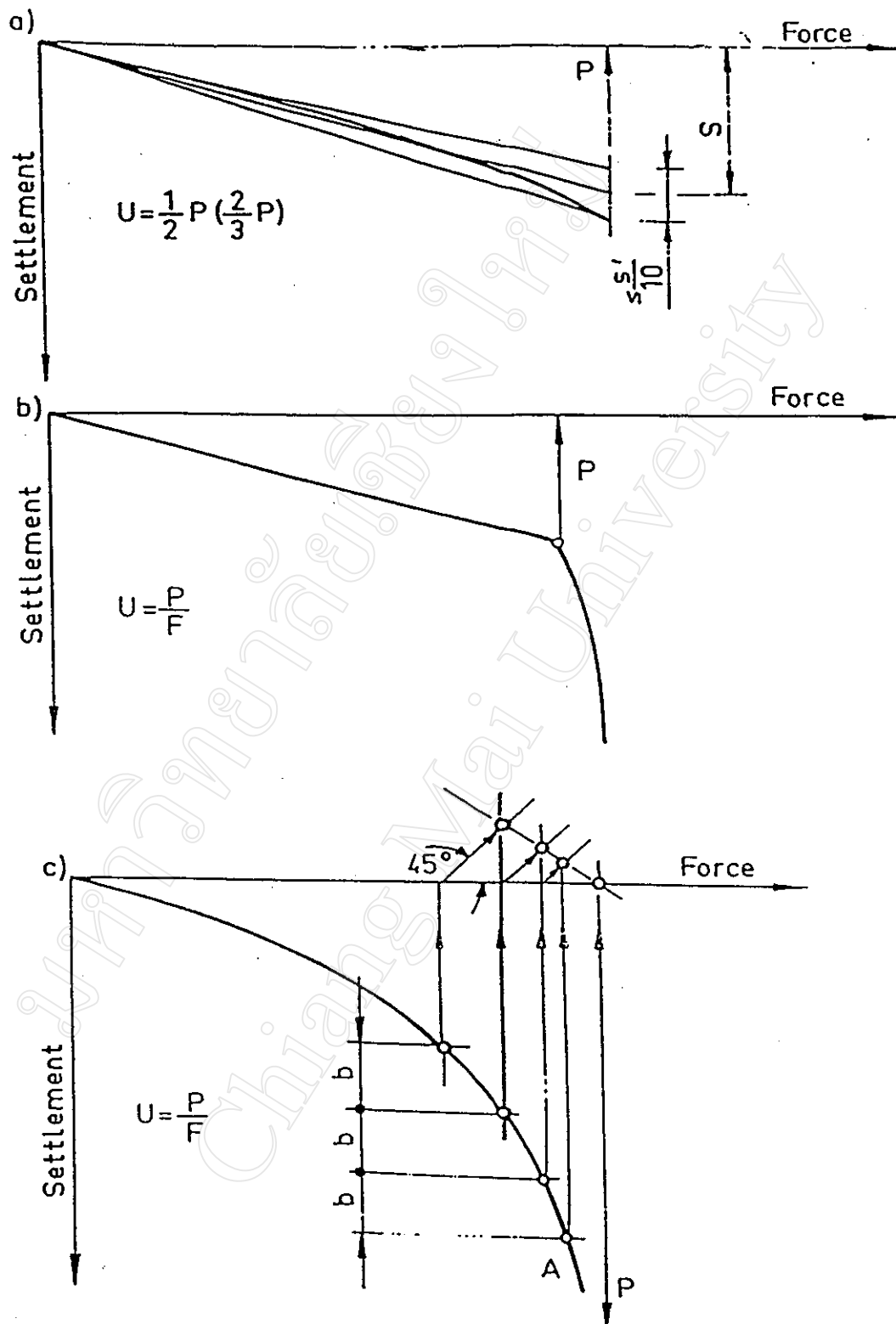
วิธีการของ Marzurkiewicz (1972) ได้เสนอวิธีการประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม จากกราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับหัวเสาเข็มกับค่าการทรุดตัวที่มีลักษณะที่แตกต่างกันไปซึ่งพอจะจำแนกกราฟความสัมพันธ์ได้ออกเป็น 3 กรณีดังแสดงในรูปที่ 2.3 จากรูปดังกล่าวพอจะสรุปวิธีการหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกพิบัติได้เป็นกรณีไปดังนี้

รูปที่ 2.3a ถ้ากราฟทดสอบให้น้ำหนักเป็น 2 เท่าของน้ำหนักที่ใช้ในการออกแบบ แสดงกราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนักและการทรุดตัวที่มีลักษณะค่อนข้างจะเป็นเส้นตรง ให้น้ำหนักที่ยอมให้ (Allowable Load) เป็นครึ่งหนึ่งของน้ำหนักสูงสุดที่กระทำกับหัวเสาเข็ม หรือให้ค่าน้ำหนักที่ยอมให้ดังกล่าวมีค่าเป็นสองในสามของน้ำหนักสูงสุดที่กระทำกับหัวเสาเข็ม เมื่อสัดส่วนกราฟความสัมพันธ์มีลักษณะที่เป็นความโค้ง (10% จากเส้นตรง)

รูปที่ 2.3b ถ้ากราฟความสัมพันธ์มีลักษณะที่แสดงการเปลี่ยนแปลงความชันอย่างชัดเจน ใช้น้ำหนัก ณ จุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความชันอย่างชัดเจนนั้น สมมติให้เป็นค่ากำลังรับน้ำหนักพิบัติของเสาเข็ม

รูปที่ 2.3c ถ้ากราฟความสัมพันธ์มีลักษณะที่เป็นเส้นโค้งไม่ได้แสดงการเปลี่ยนแปลงความชันอย่างชัดเจน การหาค่ากำลังรับน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มสามารถที่จะกระทำได้ โดยแบ่งช่วงแกนที่เป็นค่าการทรุดตัวให้เท่าๆ กันแล้วลากเส้นมาตัดกับเส้นโค้งความสัมพันธ์แล้วลากไปตัดแกนของน้ำหนัก ณ ที่แกนของน้ำหนักนี้สร้างเส้นตรงที่ทำมุม 45 องศา กับแกนน้ำหนักไปตัดกับเส้นที่ลากมาจากโค้งความสัมพันธ์จะได้จุดแนวโน้มที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง ไปตัดกับแกนน้ำหนัก จุดที่มีการตัดแกนน้ำหนักนี้คือค่าน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มในกรณีนี้

ซึ่งสำหรับการประเมินหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยวิธีการของ Marzurkiewicz นี้ โดยส่วนมากจะใช้วิธีการตามรูปที่ 2.3c ในการหาค่าโดยส่วนใหญ่ เพราะวิธีการที่เป็นที่เป็นที่เข้าใจ และใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการหาค่าโดยวิธีการของ Marzurkiewicz และจากลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนักและการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มนั้นลักษณะโดยส่วนใหญ่จะไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงความชันอย่างชัดเจน จึงเป็นที่เข้าใจกันว่าสำหรับวิธีการของ Marzurkiewicz นั้นจะมีขั้นตอนในการหาค่าน้ำหนักพิบัติตามรูปที่ 2.3c



รูปที่ 2.3 แสดงการประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่มีเส้นกราฟความสัมพันธ์
ระหว่างน้ำหนักกับการทรุดตัวของเสาเข็มที่แตกต่างกัน
ที่มา: Marzurkiewicz(1972)

วิธีการของ C. van der Veen(1953) ได้ทำการศึกษาถึงลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและค่าการทรุดตัวของเสาเข็มพบว่าลักษณะโดยทั่วไปจะเป็นไปตามรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นผลการทดสอบของ Plantema(1948) โดยจะมีลักษณะคล้ายกับกราฟความสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตกับเวลา ดังนั้นความสัมพันธ์ตามรูปที่ 2.4 สามารถที่จะเขียนเป็นสมการได้

$$P = P_{\max} (1 - e^{-\alpha Z}) \quad (2.24)$$

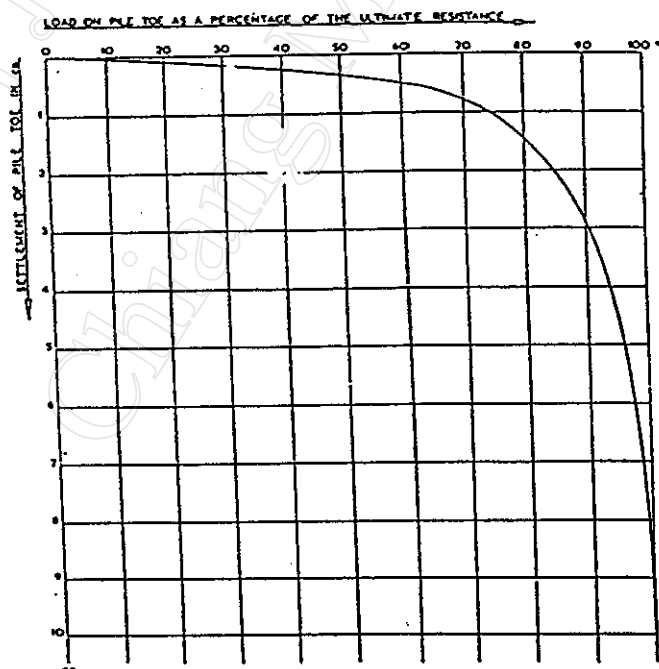
เมื่อ P = น้ำหนักที่กระทำกับหัวเสาเข็ม

Z = การทรุดตัวของหัวเสาเข็มเนื่องจากน้ำหนัก P

$P_{\max}$ = น้ำหนักพิบัติของเสาเข็ม

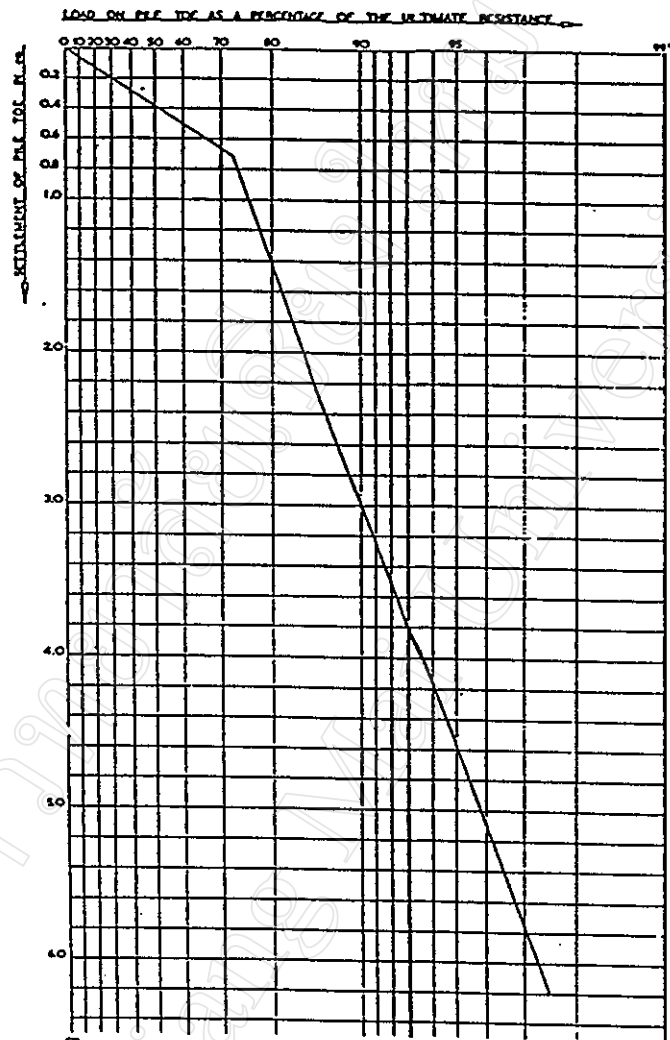
α = ค่าสัมประสิทธิ์ของลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและการทรุดตัว

จากลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงเมื่อใช้ค่าการทรุดตัว Z กับค่า $\ln\left(1 - \frac{P}{P_{\max}}\right)$ มาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 2.5 จากวิธีการดังกล่าวสามารถที่จะหาค่าน้ำหนักบรรทุกพิบัติของเสาเข็มได้โดยการทดลองค่า $P_{\max}$ จนกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.6 พบว่าน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มในรูปดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับ 140 ตัน



รูปที่ 2.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนักและการทรุดตัวของ Plantema Sounding Pile

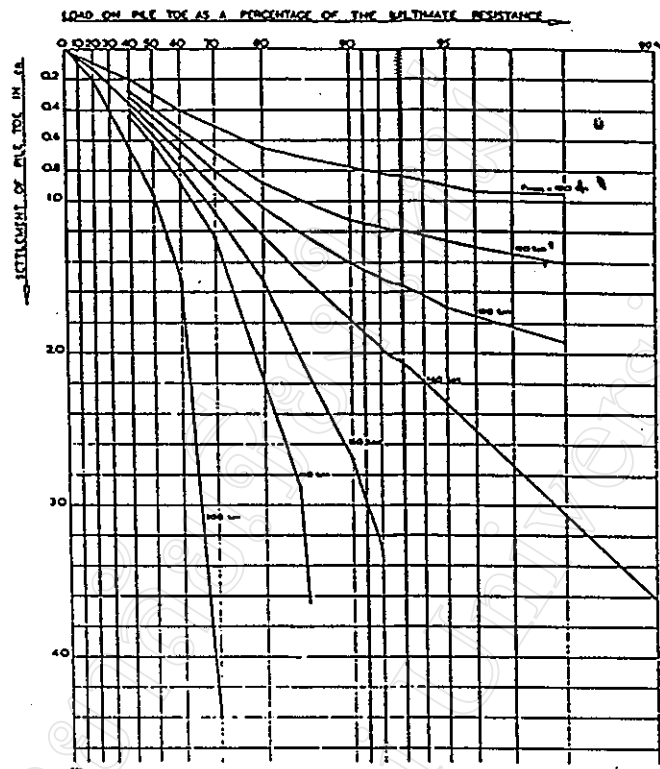
ที่มา: C. van der Veen(1953)



รูปที่ 2.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนักและการทรุดตัวของ Plantema Sounding

Pile ในแกนของสเกลล๊อค

ที่มา: C. van der Veen(1953)

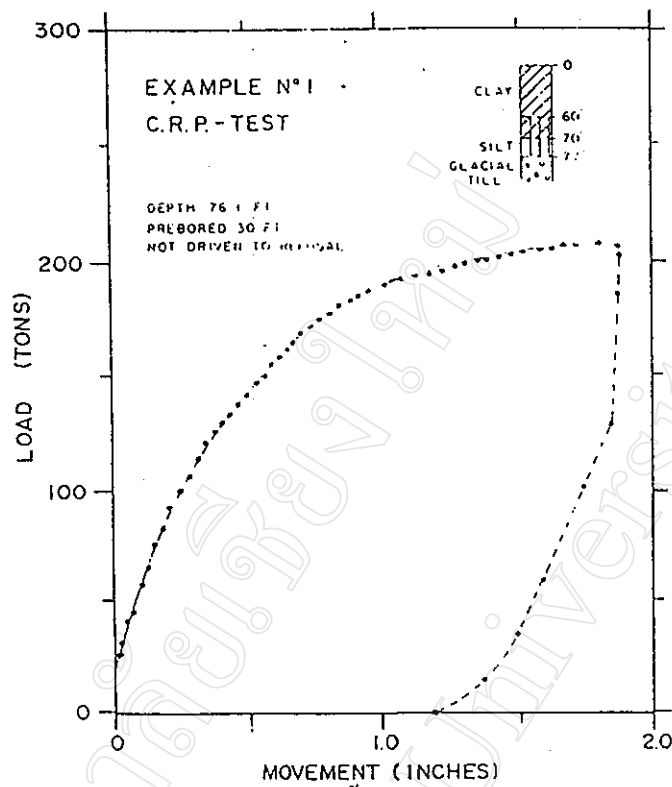


รูปที่ 2.6 แสดงกราฟการหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกพิบัติของเสาเข็มตามวิธีการของ C. van der Veen

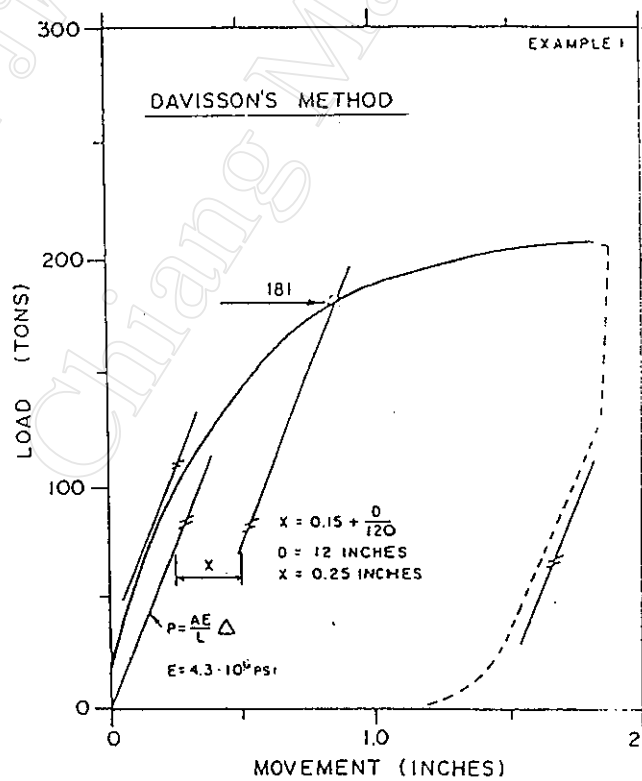
ที่มา: C. van der Veen(1953)

จากวิธีการหาค่ากำลังรับน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มจากการทดสอบเสาเข็มในสนามทั้ง 3 วิธีดังกล่าวข้างต้นไปแล้วยังมีวิธีการหาค่าน้ำหนักพิบัติวิธีการอื่นๆที่นอกเหนือจาก 3 วิธีดังกล่าวอีก ซึ่ง Fellinius(1980) ได้แสดงตัวอย่างวิธีการหาค่ากำลังรับน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มจากการทดสอบการให้น้ำหนักเสาเข็มในสนาม จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและการทรุดตัวของ การทดสอบเสาเข็ม ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งวิธีการประเมินหาค่ากำลังรับน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มที่แตกต่างจาก 3 วิธีการที่กล่าวไปแล้วในข้างต้นมีดังต่อไปนี้

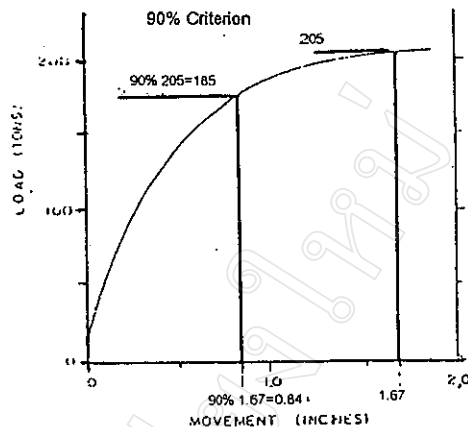
วิธีของ Davisson ค่ากำลังรับน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มที่กำหนดโดยวิธีการของ Davisson นี้คือค่าน้ำหนักบนกราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนักและการทรุดตัวที่มีค่าเกินค่าการยุบตัวยืดหยุ่น(Elastic Compression)ของเสาเข็มเท่ากับ 0.15 นิ้วบวกกับค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มหารด้วย 120 ดังแสดงการหาค่าของเสาเข็มตัวอย่างตามวิธีการนี้ในรูปที่ 2.8 โดยในรูปค่าน้ำหนักพิบัติมีค่าเท่ากับ 180 ตัน



รูปที่ 2.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนักและการทรุดตัวของเสาเข็มตัวอย่าง
ที่มา: Fellinius(1980)



รูปที่ 2.8 แสดงการหาค่ากำลังรับน้ำหนักพืดของเสาเข็มตามวิธีการของ Davisson
ที่มา: Fellinius(1980)



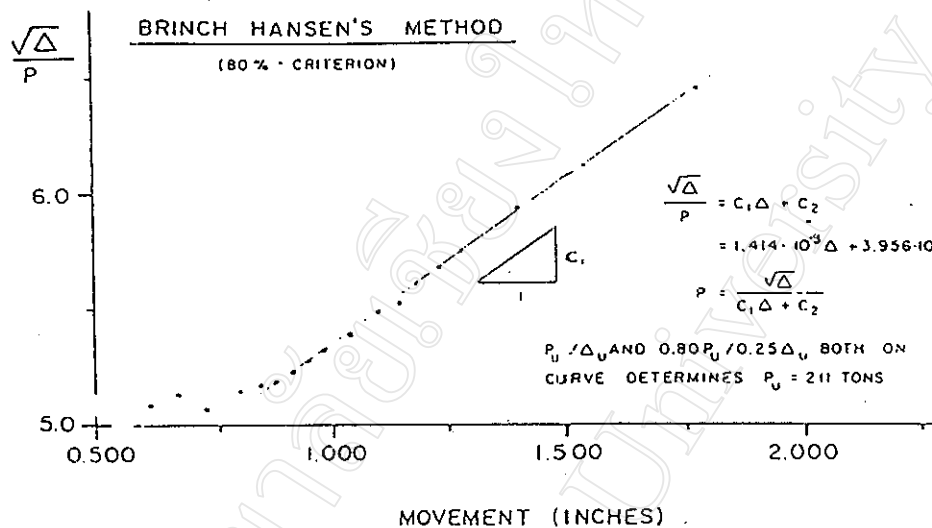
รูปที่ 2.10 แสดงการหาค่ากำลังรับน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มตามวิธีการของ Brinch Hansen 90 percent criterion
ที่มา: Fellinius (1980)

วิธีของ Brinch Hansen 80 percent criterion การแปลงวิธีนี้พัฒนามาจากวิธี Brinch Hansen 90% ที่มีขั้นตอนยุ่งยากในการหาค่าน้ำหนักบรรทุก จึงได้พัฒนาให้วิธี Brinch Hansen 80% ใช้วิธีการแก้สมการเส้นตรง โดยกำหนดว่าค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ คือ จุดที่ค่าการทรุดตัวมีค่าเป็น 25% ของค่าการทรุดตัวที่ 80% ของน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ แสดงไว้ในภาพที่ 2.11 โดยขั้นตอนการหาค่าในวิธีการนี้จะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของ $\frac{\sqrt{\Delta}}{P}$ กับ Δ ซึ่ง Δ คือ การทรุดตัวและ P คือน้ำหนักบรรทุก ซึ่งจะได้สมการเส้นตรงคือ

$$\frac{\sqrt{\Delta}}{P} = C_1 \Delta + C_2 \quad (2.25)$$

ค่าของน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ P_u จะเป็นตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกมีค่าเป็น 80% ของน้ำหนักบรรทุกที่จุดใด ๆ ณ ตำแหน่งที่การทรุดตัวมีค่าหนึ่งในสี่ของการทรุดตัวที่จุดนั้นสามารถหาได้ตามสมการที่ 2.26

$$P_u = \frac{1}{2\sqrt{(C_1 C_2)}} \quad (2.26)$$



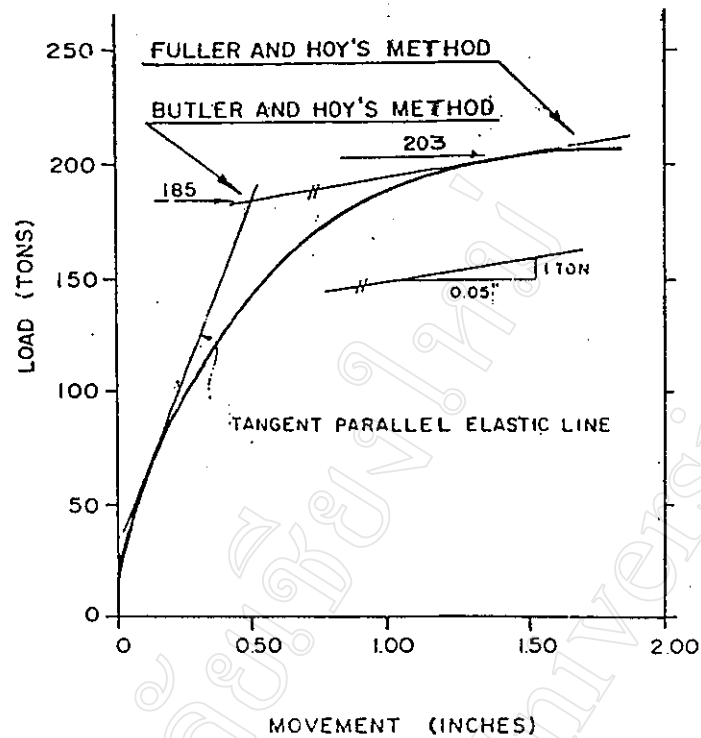
รูปที่ 2.11 แสดงการหาค่ากำลังรับน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มตามวิธีการของ Brinch Hansen 80

percent criterion

ที่มา: Fellinius (1980)

วิธีของ Fuller และ Hoy เป็นวิธีที่กำหนดค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ จะเป็นจุดที่ความลาดชันของเส้นความสัมพันธ์มีค่าเท่ากับ 0.05 นิ้ว/ตัน ดังแสดงในรูปที่ 2.12

วิธีของ Butler และ Hoy กำหนดว่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดพิบัติ คือจุดที่เส้นสัมผัสโค้งความสัมพันธ์ที่มีความลาดชัน 0.05 นิ้ว/ตัน ตัดกับเส้นอัตราส่วนของความสัมพันธ์ แสดงไว้ในรูปที่ 2.12

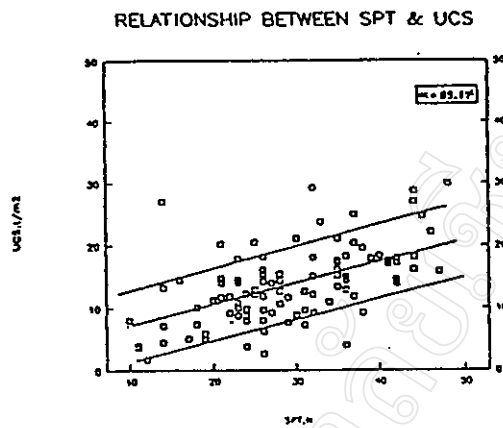


รูปที่ 2.12 แสดงการหาค่ากำลังรับน้ำหนักปกติของเสาเข็มตามวิธีการของ Fuller Butler และ Hoy
ที่มา: Fellinius(1980)

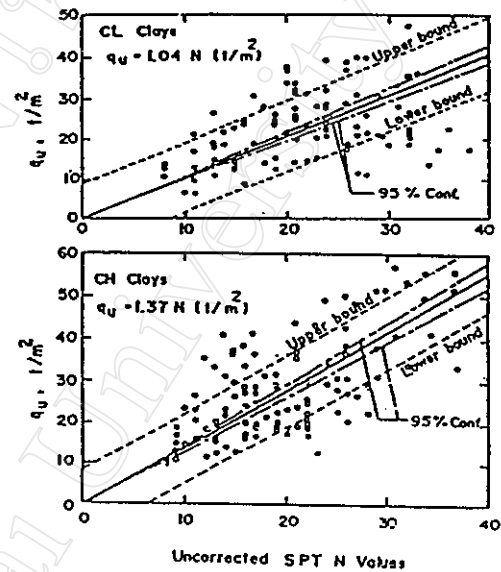
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยวิธีสถิติศาสตร์

จิตชัย(2542) ได้เสนอพฤติกรรมของดินเหนียวแข็ง และการเลือกใช้พารามิเตอร์ในการออกแบบฐานรากในชั้นดินเหนียวแข็งโดยเน้นดินเหนียวแข็งในเชิงใหม่เป็นหลัก ได้พบว่าในการเจาะสำรวจดินโดยทั่วไปมักจะไม่มีเก็บตัวอย่างดินแบบ Undisturbed ในชั้นดินเหนียวแข็ง แต่มักจะทำการทดสอบ Standard Penetration Test, SPT และเก็บตัวอย่างดินในกระบอกผ่าแทน ตัวอย่างดินจากกระบอกผ่าเป็นตัวอย่างดินที่มีการรบกวนสูงมากจึงไม่เหมาะที่จะนำมาทำการทดสอบคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและการทรุดตัว ดังนั้นการออกแบบฐานรากในชั้นดินเหนียวแข็งโดยทั่วไป จึงมักจะใช้ผลการทดสอบ SPT มาประมาณค่าพารามิเตอร์ด้านความแข็งแรงโดยใช้ตาราง รูปกราฟ หรือสูตร Empirical ที่มีอยู่และทำการเสนอแนะไว้ก่อน เช่นการประมาณค่า Undrain Shear Strength ของดินเหนียวจากการทดสอบ SPT ที่แสดงในรูปที่ 2.13 จะเป็นกราฟความสัมพันธ์ที่ใช้ในการประมาณค่าดังกล่าวของในบริเวณเชิงใหม่ที่เสนอโดยจิตชัยและสุวิทย์(2537) และสำหรับของกรุงเทพฯจะเป็นกราฟความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Sambhanharaksa, S. และ Pitypakorn, P.(1985)



ก. ดินเหนียวแข็ง, เชียงใหม่



ข. ดินเหนียวแข็งกรุงเทพ

รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบ SPT และค่า Unconfined Compressive Strength

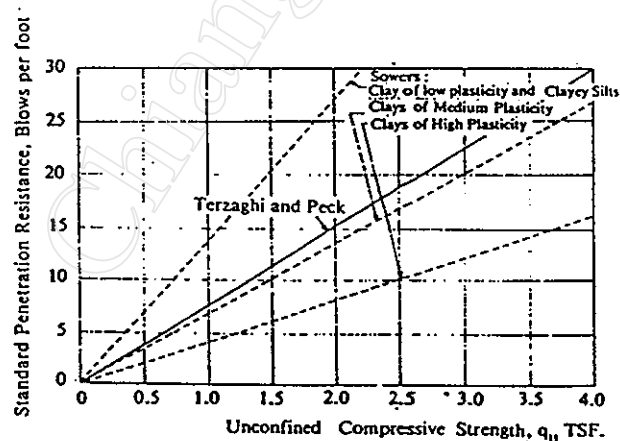
ที่มา: ชิตชัย (2542)

Terzaghi และ Peck (1976) ได้ทำการรวบรวมและแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า N ที่ได้จากการทดสอบ SPT และค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength) ของดิน, q_u ที่ได้จากการทดสอบ Unconfined Compression Test โดยค่าความสัมพันธ์ของค่าทั้งสองเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบจากดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated Soil) ดังแสดงในตารางที่ 2.3 โดยค่า N ที่แสดงเป็นค่า N ที่มีการปรับค่าเนื่องจากผลกระทบของความดันเนื่องจากน้ำหนักของดินด้านบน

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า N ที่ได้จากการทดสอบ SPT กับค่ากำลังรับแรงเฉือน
ของดินแบบไม่ระบายน้ำ
ที่มา: Terzaghi และ Peck (1976)

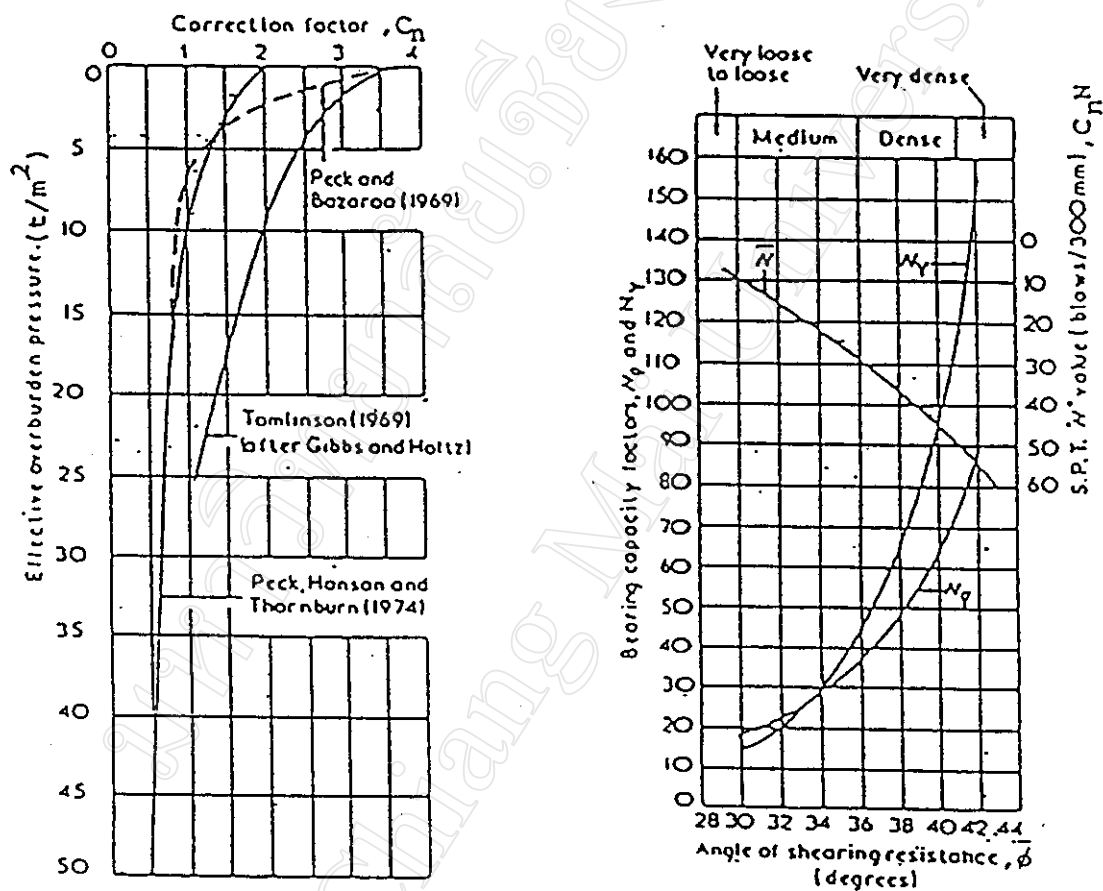
Consistency	N	q_u (kPa)
Very Soft	< 2	< 25
Soft	2-4	25-50
Medium	4-8	50-100
Stiff	8-15	100-200
Very Stiff	15-30	200-400
Hard	> 30	> 400

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย(2521) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N ที่ได้จากการทดสอบ SPT และค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว โดยจะแสดงความสัมพันธ์ตามปริมาณน้ำที่อยู่ในดินซึ่งจะแสดงในรูปของ Plasticity ของดิน ที่เสนอโดย Terzaghi และ Peck และ Sower ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งจะแนะนำให้ใช้ในกรณีที่ต้องการหาค่า c แต่ไม่มีการทดสอบในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 2.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า N ที่ได้จากการทดสอบ SPT กับค่ากำลังรับแรงเฉือน
ของดินแบบไม่ระบายน้ำ
ที่มา: วสท.(2521)

Peck Hansen และ Thornburn(1974) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N ที่ได้จากการทดสอบ SPT กับค่ามุมเสียดทานของดิน, ϕ โดยทั้งนี้ได้แสดงกราฟสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการปรับแก้ค่า N เนื่องจากอิทธิพลของความกดดันประสิทธิผลจากน้ำหนักดินด้านบน แล้วนำค่า N ที่ได้จากการปรับแก้แล้วไปหาค่า มุมเสียดทานของดินที่ไม่มีความเชื่อมั่น และยังสามารที่จะหาค่าตัวประกอบความสามารถในการรับแรงแบกทานที่อยู่ในรูปของ N_q จากมุมเสียดทานดังกล่าวได้อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.15



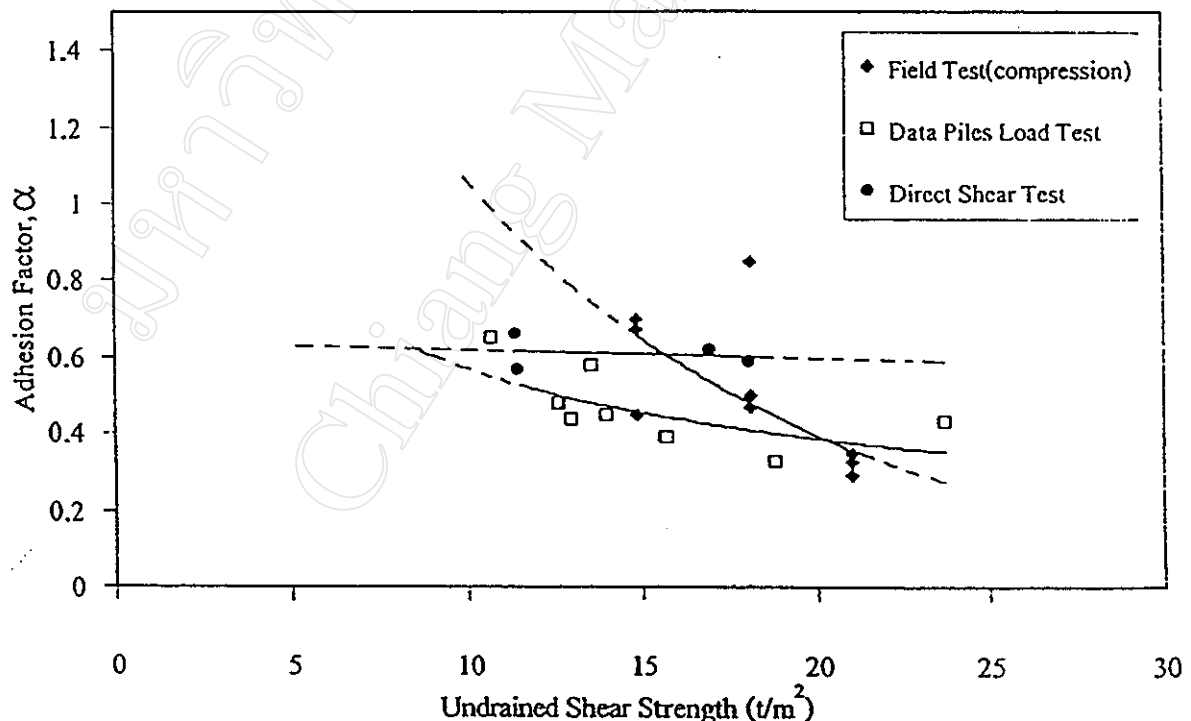
Correction Factor, C_N , เนื่องจากอิทธิพลของ Effective Overburden Pressure ที่มีผลต่อ SPT N -value ที่ทดสอบได้ในสนาม

ความสัมพันธ์ระหว่าง Corrected SPT N -value, $\bar{N}$, และ ϕ

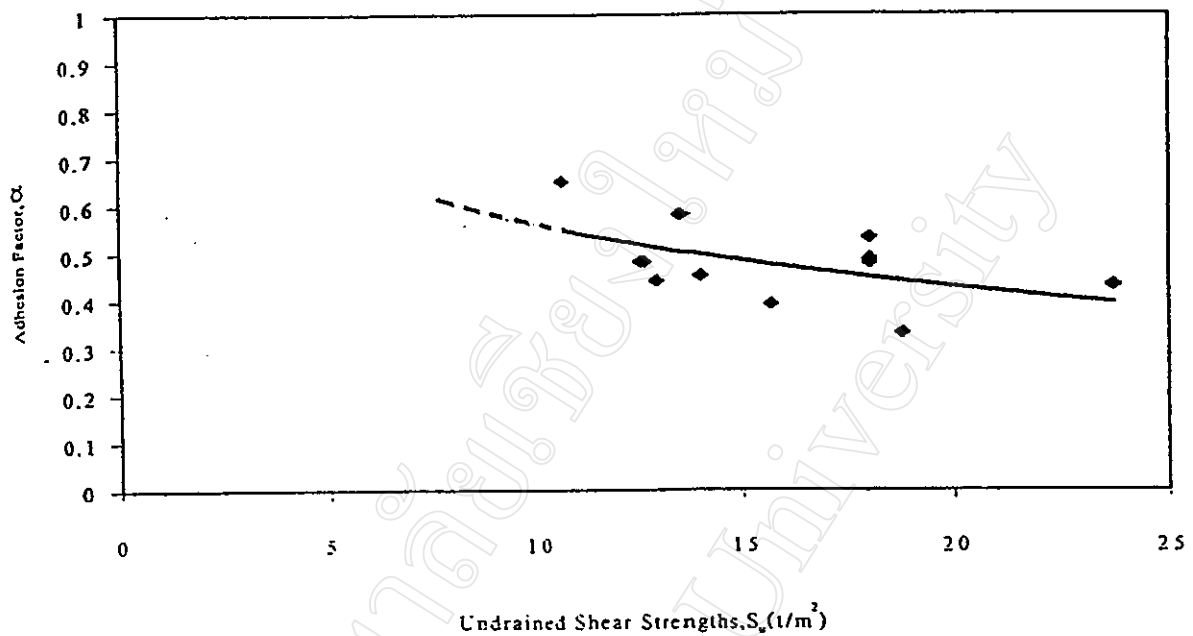
รูปที่ 2.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า N กับ ϕ และ N_q

ที่มา: Peck Hansen และ Thornburn(1974)

ชานนท์(2543) ได้ทำการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ, α ของดินเหนียวแข็ง เชียงใหม่ โดยได้ทำการทดสอบเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ใช้วิธีคำนวณกำลังแรงเสียดทานผิวจากข้อมูลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มในดินเหนียวแข็งตลอดจำนวน 9 ดัน ส่วนที่ 2 ใช้การทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาตัวแปรที่ใช้ในการประเมินหาหน่วยแรงเสียดทานผิวโดยการทดสอบการเฉือนตรงระหว่างดินกับคอนกรีตผิวเรียบ ส่วนที่ 3 ทำการทดสอบเสาเข็มรับแรงดึงและเสาเข็มรับแรงกดในสนาม โดยเสาเข็มที่ทดสอบเป็นเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงมีขนาดหน้าตัด 0.15×0.15 เมตร ความยาว 6 เมตร จำนวน 3 ดันทดสอบที่ระดับ 2.40 เมตร ถึง 3.60 เมตรจากผิวดิน จากผลการศึกษาทั้ง 3 ส่วนจะได้กราฟดังรูปที่ 2.16 และทำการปรับแก้กราฟรูปที่ 2.16 แล้วจะได้เป็นกราฟรูปที่ 2.17 แล้วจะสามารถสรุปได้ว่าวิธีหน่วยแรงรวมโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะกับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ, S_u เป็นไปดังสมการ $\alpha = -0.1942 \ln(S_u) + 1.0076$ โดยค่า S_u มีค่าอยู่ในช่วง 10 ถึง 23 ดันต่อตารางเมตร เป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับประมาณค่าแรงเสียดทานผิวเสาเข็มตอกในดินเหนียวแข็งเชียงใหม่ และได้แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า α และ S_u สำหรับดินเหนียวแข็งเชียงใหม่โดยได้เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆที่มีผู้เสนอไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2.18

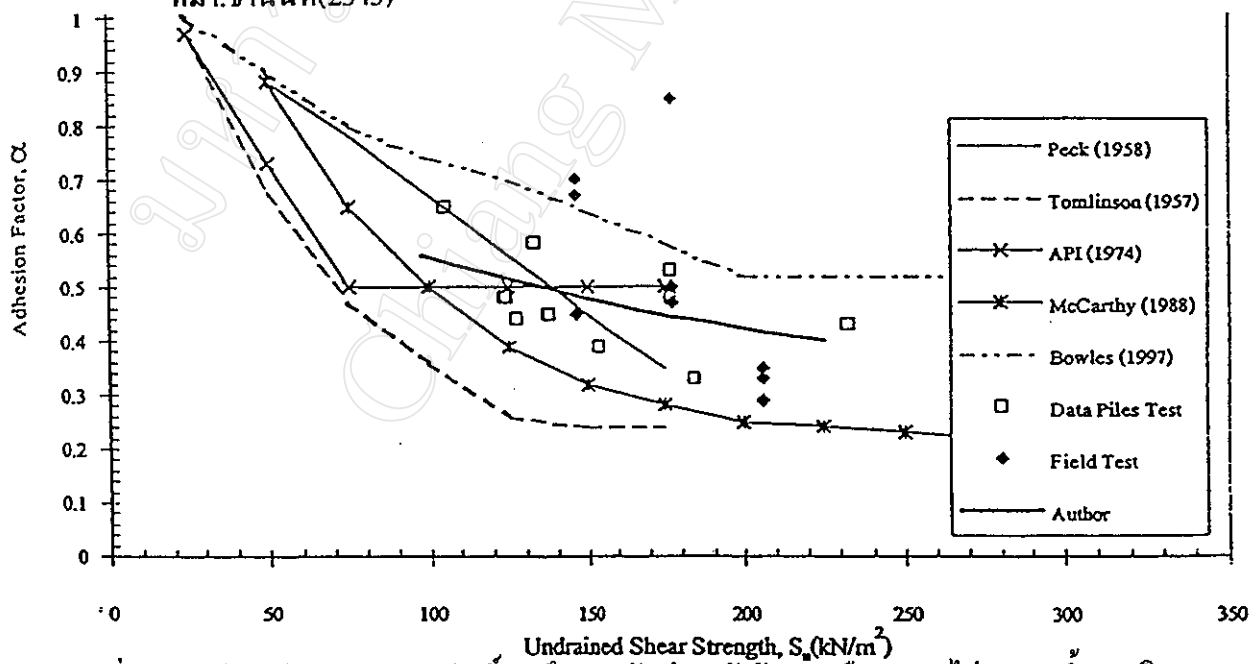


รูปที่ 2.16 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะกับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำสำหรับดินเหนียวแข็งเชียงใหม่
ที่มา:ชานนท์(2543)



รูปที่ 2.17 แสดงกราฟแก้ไขสัมประสิทธิ์การยึดเกาะกับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

ที่มา: ชานนท์ (2543)



รูปที่ 2.18 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะกับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดิน

เหนียวแข็งเชิงใหม่กับงานวิจัยอื่นๆ

ที่มา: ชานนท์ (2543)

McCarthy(1982) ได้เสนอการใช้พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกโดยวิธีสถิติศาสตร์ ไว้ดังต่อไปนี้

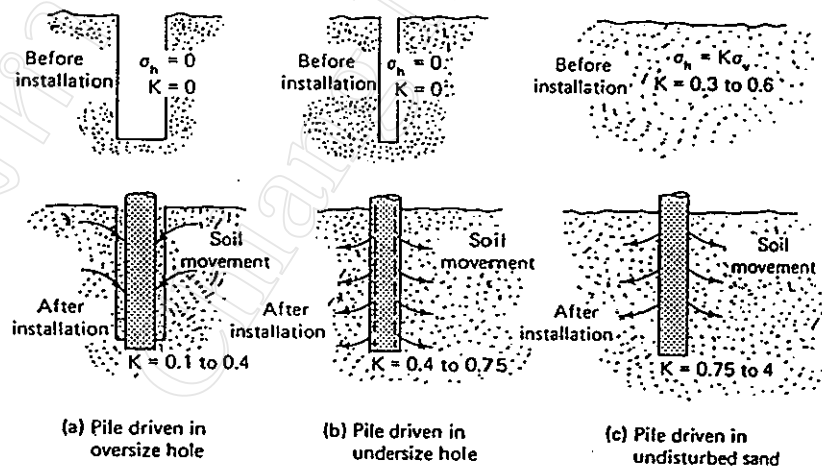
- ค่า $\tan\delta$ ของวัสดุที่ใช้ทำเสาเข็มแสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงค่า $\tan\delta$ ตามวัสดุที่ใช้ทำเสาเข็ม

ที่มา: McCarthy (1982)

วัสดุ	$\tan\delta$
คอนกรีต	0.45
ไม้	0.4
เหล็ก (เรียบ)	0.2
เหล็ก (หยาบ)	0.4
เหล็ก (Corrugated)	ใช้ค่า $\tan\phi$ ของทราย

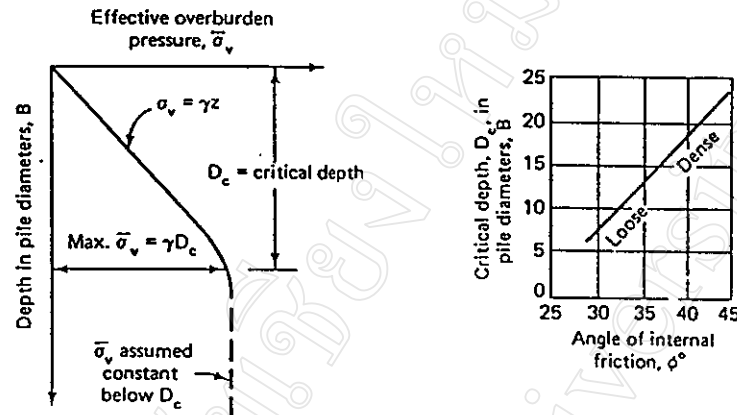
-ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง, K จะเป็นไปตามเงื่อนไขของสภาพดินก่อนการตอกเสาเข็มและหลังจากการตอกเสาเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างตามเงื่อนไขต่างๆของดินก่อนการตอกและหลังการตอกเสาเข็ม

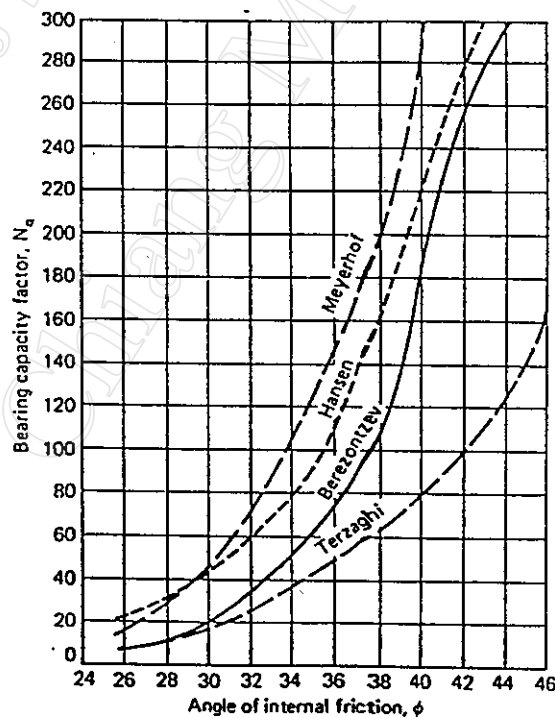
ที่มา: McCarthy (1982)

-ค่าความดันประสิทธิผลเนื่องจากแรงดันดินด้านบน, σ'_v จะพิจารณาให้มีค่าคงที่ ณ ความลึกวิกฤติ และจะให้หามีค่าคงที่ต่อไปถ้าเสาเข็มมีความลึกมากกว่าค่าความลึกวิกฤตินี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงค่าความลึกวิกฤติในการหาค่าความดันประสิทธิผลเนื่องจากแรงดันดินด้านบน
ที่มา: McCarthy (1982)

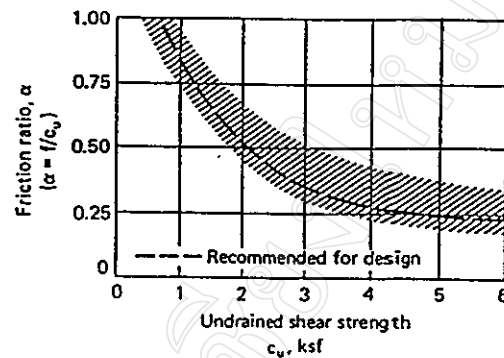
-ค่าตัวประกอบความสามารถในการรับแรงแบกทานที่อยู่ในรูปของ N_q ได้แนะนำให้ใช้ค่า N_q ที่เสนอโดย Berezontzev ดังแสดงในรูปที่ 2.21 โดยได้เปรียบเทียบกับค่า N_q ที่มีผู้วิจัยไว้



รูปที่ 2.21 แสดงค่า N_q ต่างๆที่มีผู้เสนอไว้

ที่มา: McCarthy (1982)

-ค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ, α แนะนำให้ใช้ความสัมพันธ์ที่เป็นไปตามรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Undrained Shear Strength กับ Adhesion Factor

ที่มา: McCarthy (1982)

Poulos(1980) ได้เสนอการใช้พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณเพื่อหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตามวิธีการสถิตยศาสตร์ไว้ดังนี้

-ค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ, α สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะที่มีความสมบูรณ์สำหรับเสาเข็มตอกในดินเหนียวแข็ง เป็นค่าที่ทำการเสนอโดย Tomlinson(1970) ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะนี้จะแปรไปตามอิทธิพลของชั้นดินที่วางตัวอยู่ตามความลึกของเสาเข็มนั้นแสดงในตารางที่ 2.5 และรูปที่ 2.23 กับ 2.24

ตารางที่ 2.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะสำหรับเสาเข็มตอกในดินเหนียวแข็ง

ที่มา: Poulos(1980)

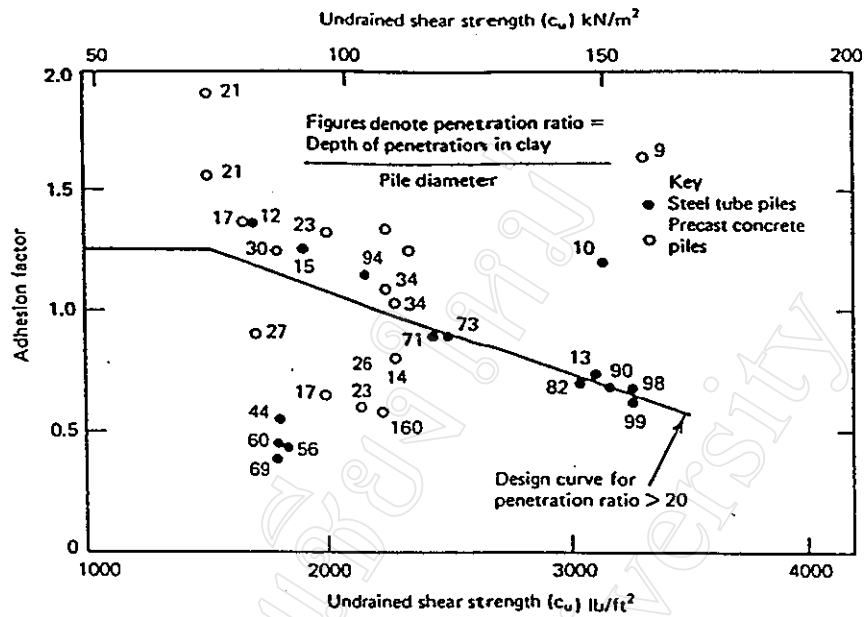
Case	Soil Conditions	Penetration Ratio ^b	c_a/c_u
I	Sands or sandy soils overlying stiff cohesive soils	<20	1.25
		>20	See Fig 2.23
II	Soft clays or silts overlying stiff cohesive soils	<20 (>8)	0.40
		>20	0.70
III	Stiff cohesive soils without overlying strata	<20 (>8)	0.40
		>20	See Fig 2.24

^a After Tomlinson (1970).

^b Penetration ratio = $\frac{\text{Depth of penetration in stiff clay}}{\text{Pile diameter}}$

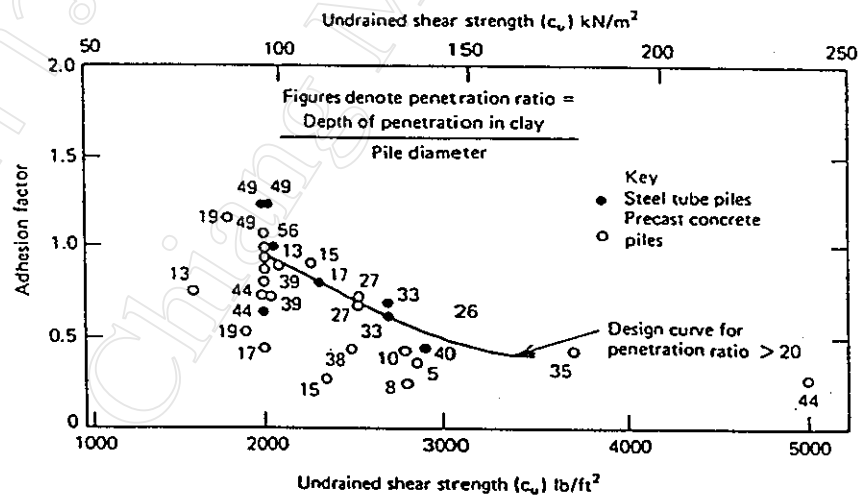
NOTE 1: Adhesion factors not applicable to H-section piles.

NOTE 2: Shaft adhesion in overburden soil for cases I and II must be calculated separately.



Adhesion factors for case I (sands and gravels overlying stiff to very stiff cohesive soils) (Tomlinson, 1970).

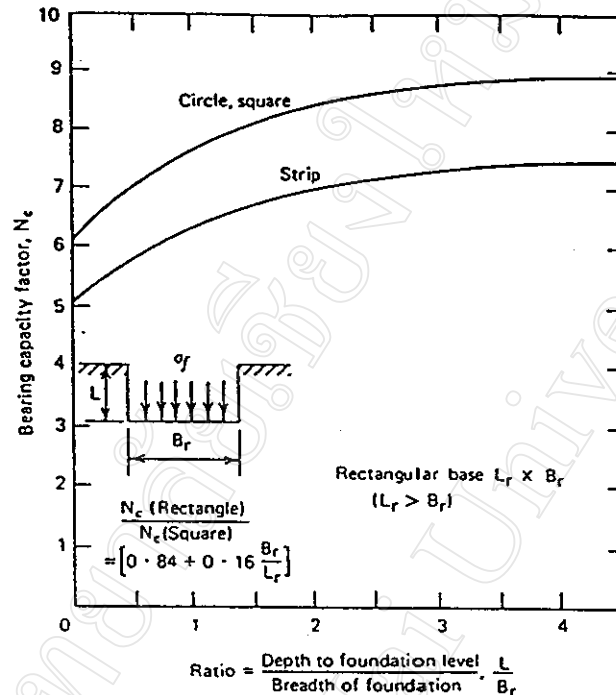
รูปที่ 2.23 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะสำหรับกรณีที่ 1 ตามตารางที่ 2.4
ที่มา: Poulos(1980)



Adhesion factors for case III (stiff to very stiff clays without overlying strata) (Tomlinson, 1970).

รูปที่ 2.24 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะสำหรับกรณีที่ 3 ตามตารางที่ 2.4
ที่มา: Poulos(1980)

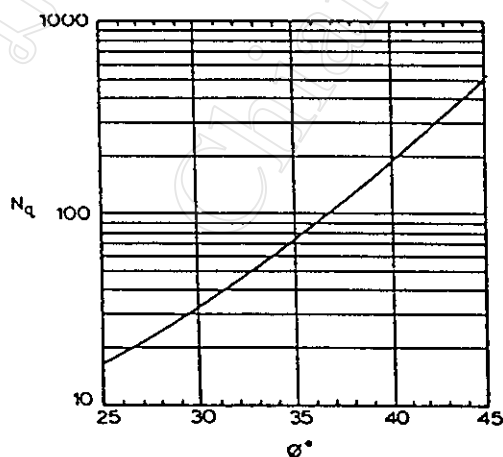
-ค่าตัวประกอบความสามารถในการรับแรงแบกทานที่อยู่ในรูปของ N_c ได้แนะนำให้ใช้ค่า N_c ตามคำแนะนำของ Skempton(1951)โดยเมื่ออัตราส่วนระหว่างความลึกของเสาเข็มกับเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของเสาเข็มมีค่าเกิน 4 ค่า N_c นี้จะมีค่าเท่ากับ 9 ดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แสดงค่า N_c ของฐานรากที่อยู่ในดินเหนียว($\phi=0$)

ที่มา: Poulos(1980)

-ค่าตัวประกอบความสามารถในการรับแรงแบกทานที่อยู่ในรูปของ N_q ได้แนะนำให้ใช้กราฟความสัมพันธ์ตามคำแนะนำของ Berezenzhev ดังแสดงในรูปที่ 2.26



For driven piles, $\phi = \frac{\phi'_1 + 40}{2}$

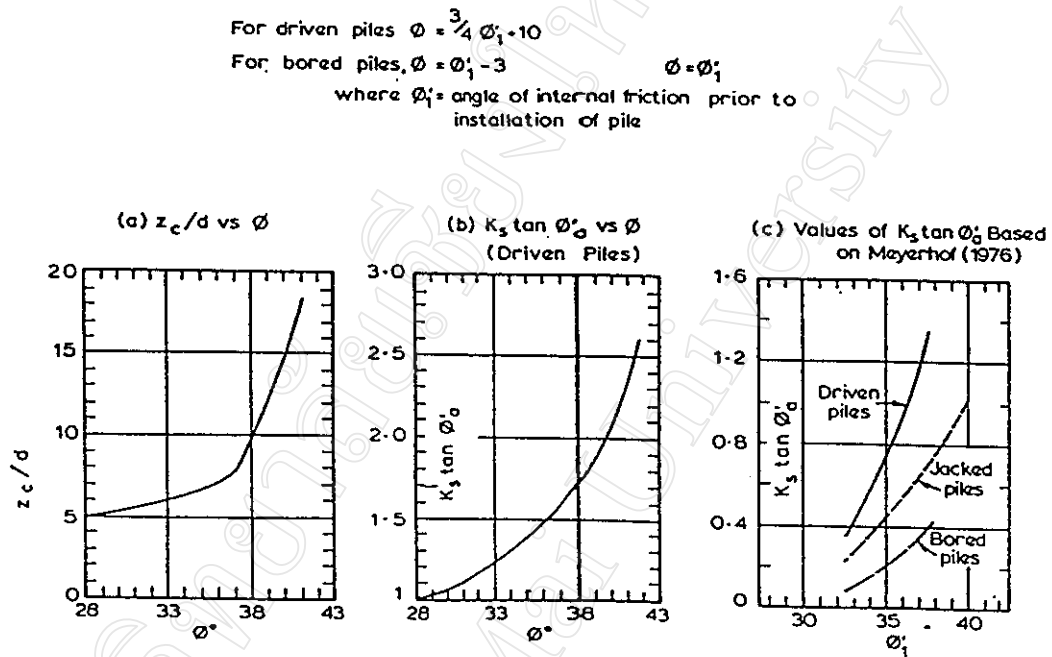
For bored piles, $\phi = \phi'_1 - 3$

where ϕ'_1 = angle of internal friction prior to installation of pile

รูปที่ 2.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่า N_q

ที่มา: Poulos(1980)

-สำหรับค่าความลึกวิกฤติ และค่าพารามิเตอร์สำหรับการหาค่าแรงเสียดทานด้านข้างของ
เสาเข็ม จะแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ในการหาค่า ความลึกวิกฤติและพารามิเตอร์สำหรับการหาค่า
แรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มในดินทราย

ที่มา: Poulos(1980)

Tomlinson(1986) ได้เสนอการใช้พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักของ
เสาเข็มตามวิธีการสถิติกส์ ไว้ดังนี้

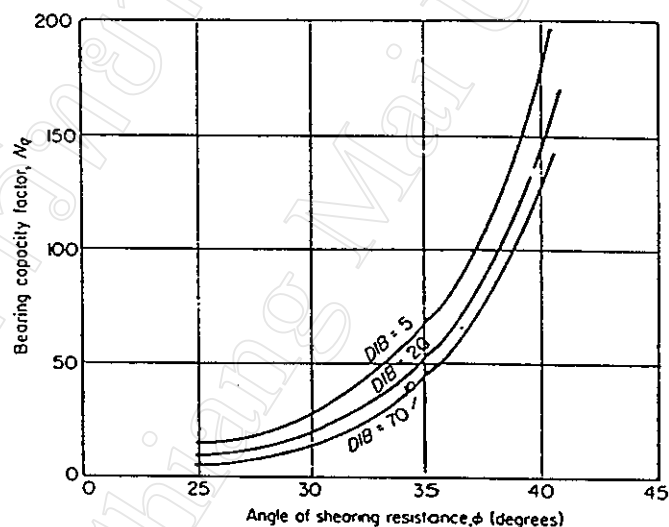
-ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง, K และค่ามุมเสียดทานระหว่างเสาเข็มกับดินรอบเสา
เข็ม, δ ได้แนะนำให้ใช้ความสัมพันธ์ของ Broms(1961) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงค่าของ K และ δ

ที่มา: Tomlinson(1986)

Pile Material	δ	Value of K	
		Low Relative Density	High Relative Density
Steel	20°	0.5	1.0
Concrete	ϕ	1.0	2.0
Wood	ϕ	1.5	4.0

-ค่าตัวประกอบความสามารถในการรับแรงแบกทานที่อยู่ในรูปของ N_q โดย Tomlinson (1986) ได้ทำการปรับปรุงพัฒนาค่า N_q ที่เสนอไว้โดย Berezantzev ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.28

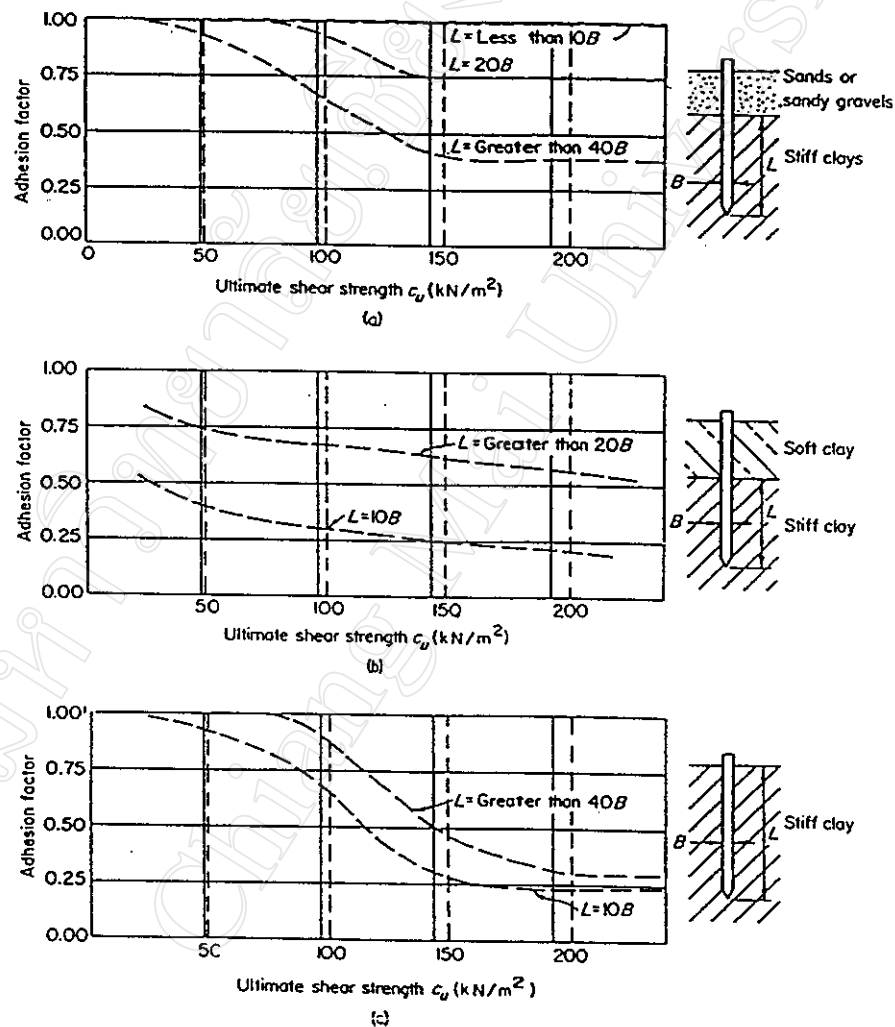


รูปที่ 2.28 แสดงค่า N_q ของ Berezantzev ที่ปรับปรุงโดย Tomlinson

ที่มา: Tomlinson(1986)

-ค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ, α Tomlinson ได้เสนอแนวทางในการหาค่าไว้สองแนวทางคือ กรณีที่ 1 ได้ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะของเสาเข็มคอกในดินเหนียวแข็งจากผลการทดสอบเสาเข็มจำนวน 93 ต้น ในการหาค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็มคือค่าน้ำหนักที่กระทำกับเสาเข็มเมื่อเสาเข็มมีการทรุดตัวเป็นระยะเท่ากับ 1 ใน 10 ของเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม แรงต้านทานปลายเสาเข็มใช้ค่า N_q มีค่าเท่ากับ 9 พบว่าชั้นดินที่วางตัวอยู่บนชั้นดินเหนียวแข็ง

และค่าอัตราส่วนระหว่างระยะฝังของเสาเข็มในชั้นดินเหนียวแข็งกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม จะมีผลต่อค่าหน่วยแรงเสียดทานด้านข้างของผิวเสาเข็มตอก ดังนั้นจึงได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะกับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำออกเป็น 3 กรณีได้แก่ (a)กรณีชั้นดินทรายวางตัวอยู่บนชั้นดินเหนียวแข็ง (b)กรณีชั้นดินเหนียวอ่อนวางตัวอยู่บนชั้นดินเหนียวแข็ง (c)กรณีเป็นชั้นดินเหนียวแข็งตลอด ซึ่งทั้ง 3 กรณีจะแสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะกับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวแข็ง

ที่มา: Tomlinson (1986)

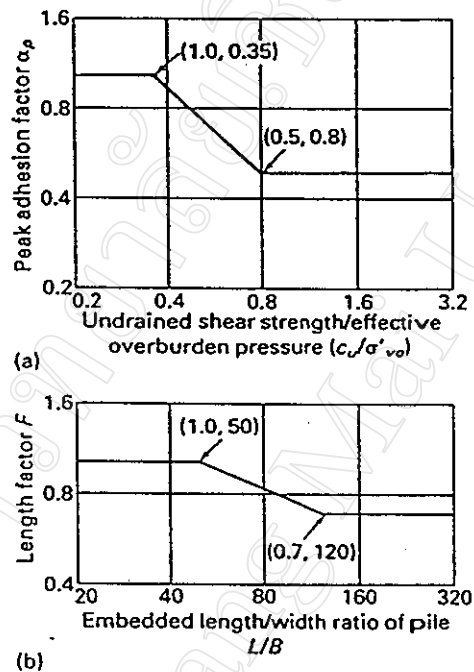
กรณีที่ 2 ถ้าเสาเข็มที่ต้องการออกแบบให้รับน้ำหนักสูงมากและมีความยาวมากได้ให้ค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะเป็นไปตามสมการที่ 2.25

$$\alpha = F \times \alpha_p \quad (2.25)$$

โดยที่ α_p = ค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะสูงสุด(Peak Adhesion Factor)

F = ค่าสัมประสิทธิ์ความยาว(Length Factor)

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะสูงสุดกับค่าสัมประสิทธิ์ความยาวสามารถที่จะหาค่าได้จากรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะของเสาเข็มตอกที่รับน้ำหนักมากและมีความยาวมาก
ที่มา: Tomlinson(1986)

-ค่าตัวประกอบความสามารถในการรับแรงแบกทานที่อยู่ในรูปของ N_c ได้แนะนำให้ใช้
ค่า N_c มีค่าเท่ากับ 9

US Army Corps of Engineers No.1(1993) ได้แสดงการใช้ค่าพารามิเตอร์สำหรับการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มไว้ในหนังสือ Design of Pile Foundation ไว้ดังต่อไปนี้

-ค่าความลึกวิกฤติ, D_c ได้สมมติค่าความลึกวิกฤติไว้สำหรับคำนวณค่าความดันประสิทธิผลเนื่องจากน้ำหนักดินด้านบนให้มีค่าคงที่เท่ากับ γ ที่ความลึกวิกฤติตลอดความลึกของเสาเข็มที่มีค่ามากกว่าความลึกวิกฤติ โดยจะสมมติให้

$$D_c = 10B \text{ for Loose Sand}$$

$$D_c = 15B \text{ for Medium Dense Sand}$$

$$D_c = 20B \text{ for Dense Sand}$$

-ค่ามุมเสียดทานระหว่างเสาเข็มกับดินด้านข้าง, δ แสดงไว้ในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 แสดงค่ามุมเสียดทานระหว่างเสาเข็มกับดินด้านข้าง, δ

ที่มา: US Army Corps of Engineers No.1(1993)

Pile Material	δ
Steel	0.67 ϕ -0.83 ϕ
Concrete	0.90 ϕ -1.00 ϕ
Timber	0.80 ϕ -1.00 ϕ

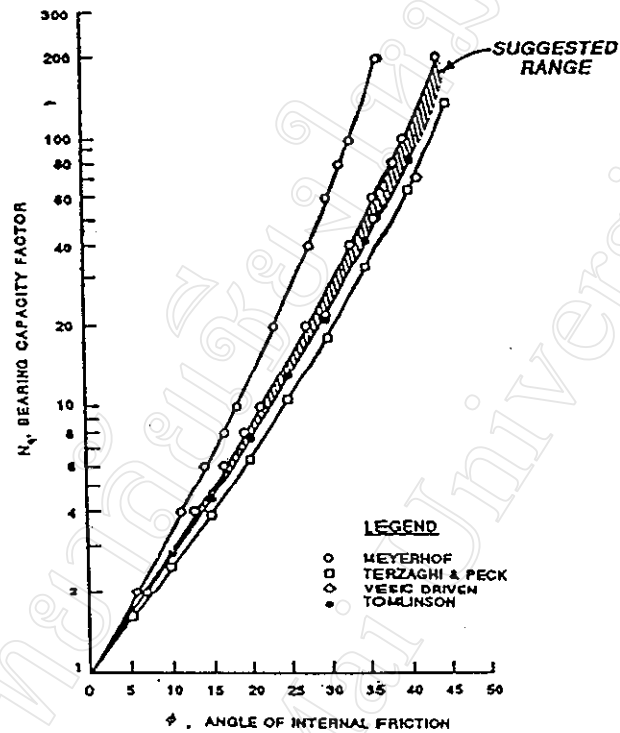
-ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง, K แสดงไว้ในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 แสดงค่า K

ที่มา: US Army Corps of Engineers No.1(1993)

Soil Type	K
Sand	1.00-2.00
Silt	1.00
Clay	1.00

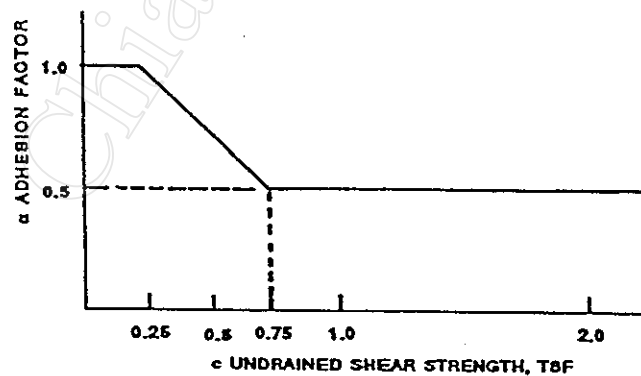
-ค่าตัวประกอบความสามารถในการรับแรงแบกทานที่อยู่ในรูปของ N_q แสดงไว้ในรูปที่ 2.31 แสดงค่า N_q



รูปที่ 2.31 แสดงค่า N_q ที่แนะนำให้ใช้ในการออกแบบ

ที่มา: US Army Corps of Engineers No.1(1993)

-ค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ, α แสดงไว้ในรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะที่แนะนำในการออกแบบ

ที่มา: US Army Corps of Engineers No.1(1993)

-ค่าตัวประกอบความสามารถในการรับแรงแบกทานที่อยู่ในรูปของ N_c ได้แนะนำให้ใช้ค่า N_c มีค่าเท่ากับ 9

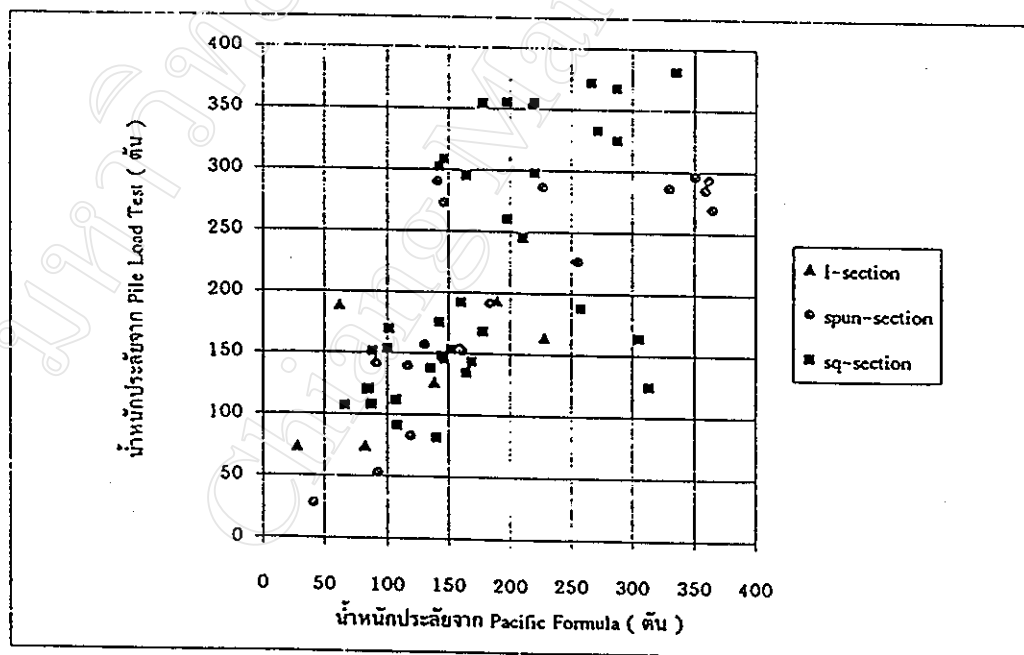
2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย(2521) ได้แนะนำการใช้สูตรการตอกเสาเข็มไว้ในหนังสือน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม โดยได้ทำการวิจัยเชิงสถิติเปรียบเทียบผลที่คำนวณได้จากสูตรการตอกเสาเข็มต่างกับผล Blow Count และ การทดสอบค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มในสนาม ของเสาเข็มที่ใช้อยู่ทั่วไปในบริเวณกรุงเทพฯ ประมาณ 43 แห่ง เสาเข็มส่วนใหญ่เป็นประเภทคอนกรีตเสริมเหล็กรูปต่าง ๆ กัน มีทั้งเสาเข็มต่อและเสาเข็มยาวตลอด ความยาวของเสาเข็มอยู่ระหว่าง 18 ถึง 23 เมตร ตอกโดยวิธีใช้ลูกตุ้มแบบปล่อย โดยค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากการทดสอบในสนามส่วนจะยังไม่ถึงค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็มที่ทำการทดสอบ โดยสูตรการตอกเสาเข็มที่แนะนำให้ใช้สำหรับงานวิจัยนี้จะมียู่ 4 สูตรดังต่อไปนี้คือ Engineering New Formula, Hiley's Formula, Janbu's Formula และ Load Bearing Capacity โดยค่าตัวประกอบความปลอดภัยที่แนะนำให้ใช้ในแต่ละสูตรคือ 4, 4, 4 และ 5 ตามลำดับ

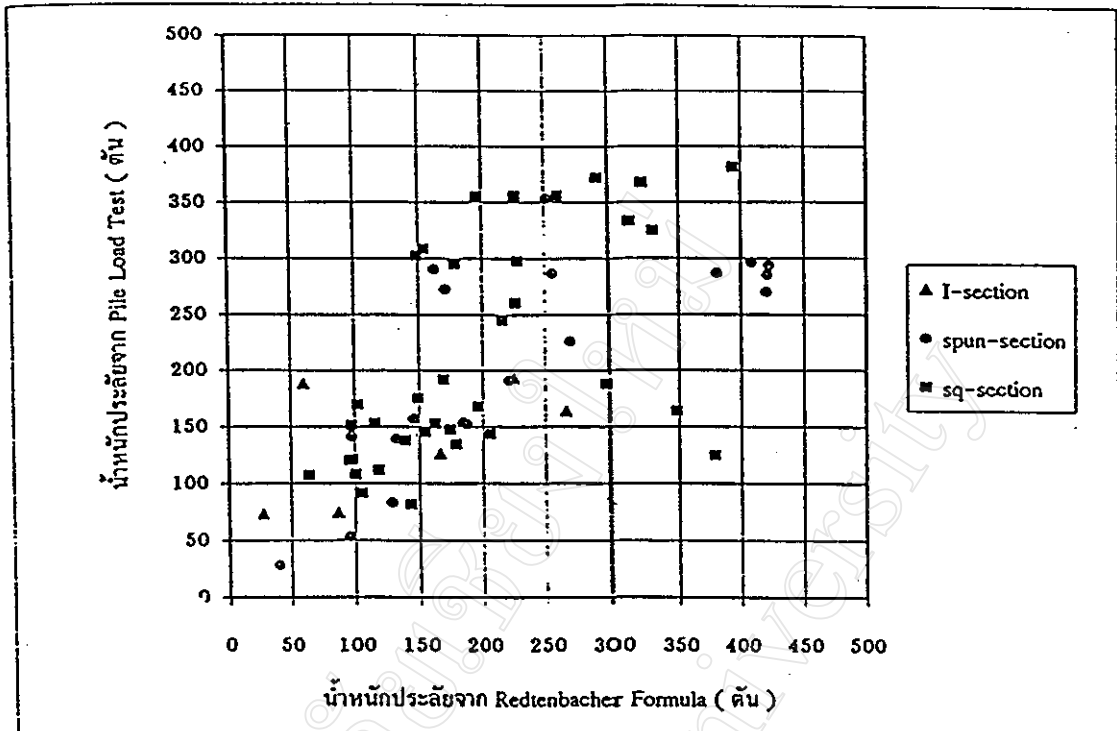
สนิท(2523) ได้ทำการวิเคราะห์หาสูตรการตอกเสาเข็มที่เหมาะสมและสามารถใช้ได้กับเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงที่ตอกภายในบริเวณกรุงเทพฯ ในการวิเคราะห์หาสูตรการตอกเสาเข็มนี้ ได้รวบรวมข้อมูลผลการทดสอบเสาเข็มที่ทำการทดสอบจนน้ำหนักพิบัติจำนวน 53 คัด ประกอบด้วยเสาเข็มที่มีรูปร่างกันไปคือเสาเข็มหน้าตัดรูป DH(Double Half Moon), หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และหน้าตัดรูปตัวไอ ซึ่งมีขนาดและความยาวที่ต่างกันไป และปลายเสาเข็มส่วนใหญ่อยู่ในดินเหนียวแข็ง ก่อนการวิเคราะห์หาสูตรการตอกเสาเข็มได้ทดลองแทนค่าต่างๆลงในสูตรการตอกเสาเข็มที่ใช้กันอยู่ทั่วไป 12 สูตร แล้วเปรียบเทียบผลที่ได้ โดยวิธีเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มที่ได้จากสูตรทั้ง 12 สูตร กับน้ำหนักพิบัติที่ได้จากการทดสอบในสนาม และจากการใช้วิธีการทางสถิติโดยใช้หลักการของเส้นถดถอยธรรมดา เพื่อหาสูตรการตอกเสาเข็มที่ให้ค่าใกล้เคียงที่สุดปรากฏว่า สำหรับเสาเข็มหน้าตัดรูป DH และสี่เหลี่ยมจัตุรัส สูตรที่ให้ค่าใกล้เคียงได้แก่สูตรของ Gate และ Janbu ตามลำดับ และจากนั้นได้นำสูตรการตอกเสาเข็มที่ให้ค่าที่ใกล้เคียงที่สุด 4 สูตรมาวิเคราะห์ต่อเพื่อหาสมการที่เหมาะสมที่สุดออกมา ปรากฏว่าสำหรับเสาเข็มหน้าตัดรูป DH และหน้าตัดรูปตัวไอ สูตรที่เหมาะสมคือสูตรที่ปรับปรุงมาจากสูตรของ Gate และสำหรับเสาเข็มหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสสูตรที่เหมาะสมคือสูตรที่ปรับปรุงมาจากสูตรของ Janbu เมื่อทดลอง

แทนค่าต่างๆลงในสูตรทั้งสองที่ปรับปรุงใหม่นี้ ปรากฏว่าความผิดพลาดส่วนใหญ่อยู่ในช่วงน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักพิบัติที่ได้จากการทดสอบในสนาม

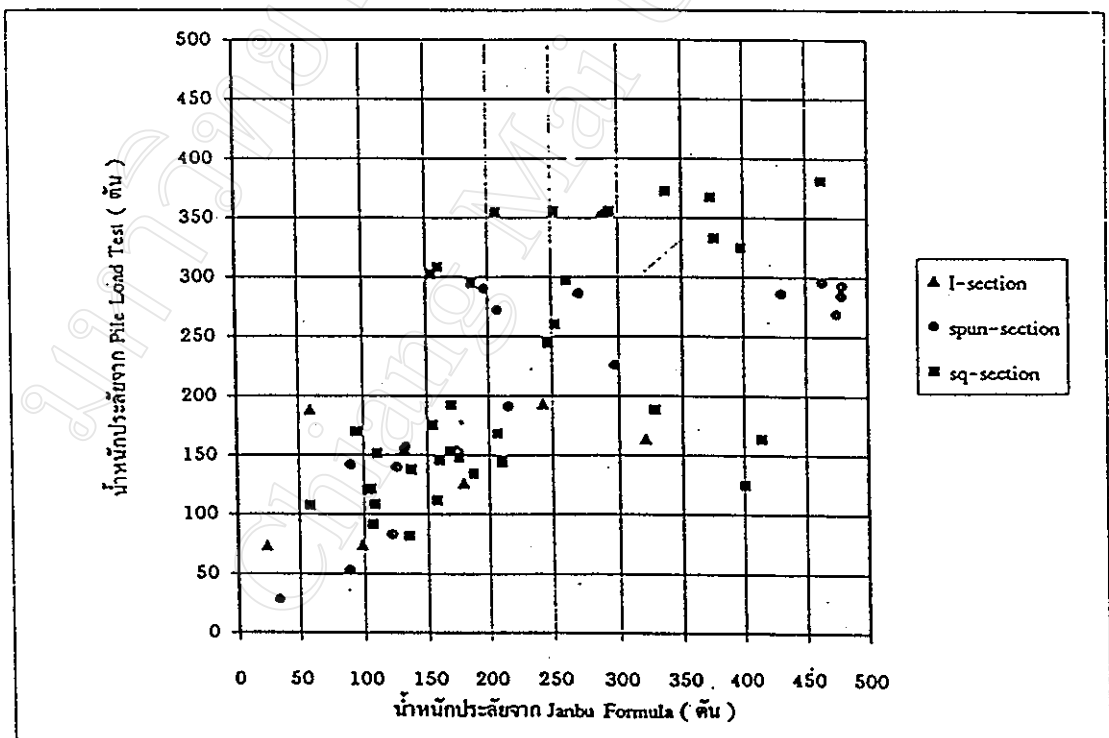
สมเกียรติและสงกรานต์(2542) ได้ศึกษาการประมาณกำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็ม โดยสูตรพลศาสตร์ในการศึกษานี้ได้เก็บรวบรวมข้อมูลเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงคอกในดินกรุงเทพฯ และบริเวณใกล้เคียง ข้อมูลประกอบด้วยผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจนถึงน้ำหนักวิบัติของมวลดินโดยวิธีพลศาสตร์ ข้อมูลการคอกเสาเข็มและอุปกรณ์ที่ใช้ขณะคอกเสาเข็มนั้น จำนวนทั้งสิ้น 61 ต้นที่มีรูปร่างและขนาดหน้าตัดต่างกันไป สำหรับสูตรพลศาสตร์ที่นำมาทำการวิเคราะห์ประกอบด้วยสูตรที่นิยมใช้กันอยู่ประกอบด้วยHiley, Pacific, Redtenbacher, Eytelwein, Rankine, Canadian, Modified Engineering News, Gate, Janbu และ Danish Formula จากผลการวิเคราะห์พอสรุปได้ว่า Pacific, Redtenbacher, Janbu Formula ให้ค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ในเกณฑ์ที่น่าเชื่อถือที่สุด ดังผลการวิเคราะห์จะแสดงในรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33a แสดงการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักพิบัติจาก Pile Load Test และ Pacific Formula



รูปที่ 2.33b แสดงการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักพินิจจาก Pile Load Test และ Redtenbacher Formula



รูปที่ 2.33c แสดงการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักพินิจจาก Pile Load Test และ Janbu Formula

รูปที่ 2.33 แสดงการเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาเข็มที่ได้จาก Pile Load Test สูตรการคอกเข็มที่น่าเชื่อถือ

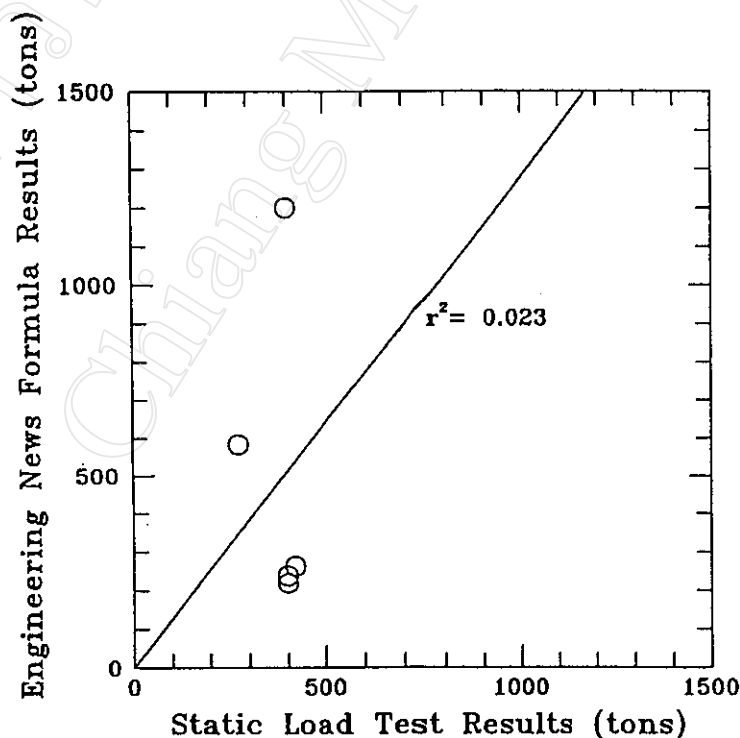
ที่มา: สมเกียรติและสงกรานต์(2542)

อรรณพ (2537) ได้ทำการศึกษาสูตรสำเร็จการดองเสาเข็มที่ใช้ในการประมาณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มสำหรับชั้นดินในเชียงใหม่ โดยได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลจากการทดสอบหาค่ากำลังแบกทานของเสาเข็มตามสถานที่ต่าง ๆ ในจังหวัดเชียงใหม่ 5 แห่ง จากการทดสอบ 7 ตัวอย่างซึ่งได้แก่

- บริเวณก่อสร้างโรงพยาบาลเชียงใหม่ราม จำนวน 1 ตัวอย่าง
- บริเวณก่อสร้างโรงแรมศรีโคตเกษ จำนวน 1 ตัวอย่าง
- บริเวณก่อสร้างหอพักสูง 10 ชั้น ถ. ห้วยแก้ว จำนวน 1 ตัวอย่าง
- บริเวณก่อสร้างโครงการ SR. LAND จำนวน 2 ตัวอย่าง
- บริเวณก่อสร้างสะพานแม่ปิง ถ. คอยสะเก็ดเก่า จำนวน 2 ตัวอย่าง

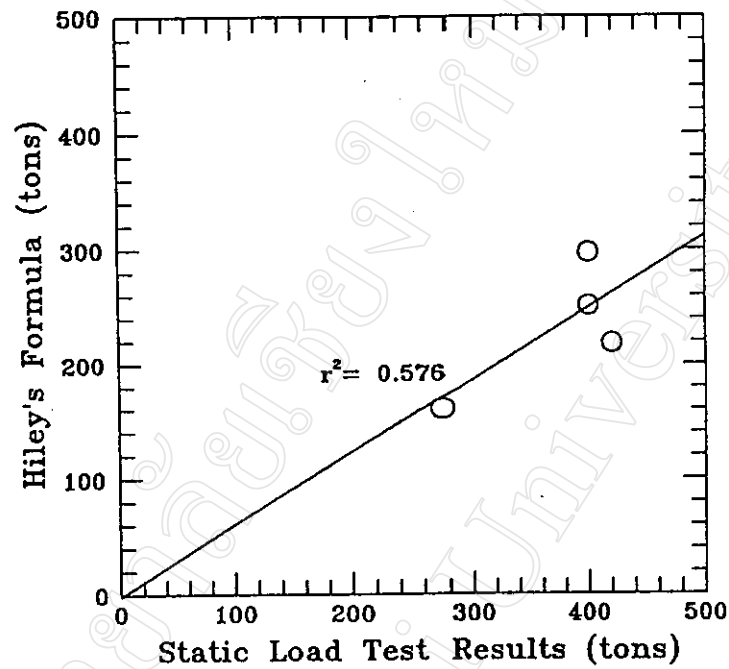
แล้วได้ทำการหาค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มจากการทดสอบในสนาม จากการประเมินโดยใช้วิธีการของ Van der Veen ซึ่งเป็นวิธีการที่เหมาะสมในการประมาณค่าน้ำหนักบรรทุกพิบัติ (Failure Load) สำหรับดินเชียงใหม่ (พิทวัส ชูโค, 2534) จากนั้นนำค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ได้ไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม โดยใช้สูตรสำเร็จการดองเสาเข็ม ซึ่งสูตรสำเร็จที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วย 9 สูตรจากการวิเคราะห์ผลการศึกษาถึงความเหมาะสม ความน่าเชื่อถือ ตลอดจนข้อดีและข้อเสียต่าง ๆ แล้ว พอสรุปความเหมาะสมและน่าเชื่อถือของสูตรสำเร็จที่ใช้ในการประมาณค่าความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มสำหรับดินเชียงใหม่ได้คือ ในการประมาณค่าความสามารถในการรับน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มนั้น สูตร Danish Formula และ Janbu, Mansur and Hunter Formula มีความน่าเชื่อถืออยู่ในเกณฑ์ที่ใช้ได้ดี มีความสะดวกและง่ายต่อการคำนวณพอสมควร สูตรต่าง ๆ ที่เหลือต่างก็มีข้อด้อยต่างกันไป เช่น Eytelwein Formula, Modified ENR Formula และ Navy – McKay Formula มีความไวต่อการเสื่อมกำลัง (Sensitivity) ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของหน้าตัดสูง ทั้งยังมีความน่าเชื่อถือต่ำ ความคลาดเคลื่อนมีโอกาสเกิดขึ้นได้มาก สูตร PCUBC, CNBC และ Gate Formula มีแนวโน้มการประมาณการที่ไม่ดี คือ ต่ำกว่าความเป็นจริงอยู่มาก สำหรับสูตร Hiley Equation มีความไม่น่าเชื่อถือและความเหมาะสมต่ำ ความคลาดเคลื่อนมีโอกาสเกิดขึ้นได้สูง

ไกร(2537) ได้ทำการทดสอบเสาเข็มสำหรับโครงการทางด่วนรามอินทรา-อาจณรงค์ โดยใช้วิธีการทดสอบ Dynamic Load Testing การทดสอบ Static Load Testing และการทดสอบ Cone Penetration Tests (CPT) เพื่อจะวิเคราะห์หาความสามารถในการดักเสาเข็มกลมแรงเหวี่ยง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 เมตร สำหรับปั้นจั่นต่างๆที่ใช้ ขนาดความยาวเสาเข็มที่เหมาะสมที่จะใช้ในโครงการจะสามารถหาจากผลที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มนำร่อง นอกจากนี้กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ได้จากวิธีการต่างๆคือ Static Load Testing Dynamic Load Testing Dynamic Formulas และ Static Analysis จะได้นำมาเปรียบเทียบกัน จากสูตรการดักเสาเข็มที่นำมาพิจารณาประกอบด้วย Engineering News Formula Hiley's Formula Janbu's Formula The Ministry of Construction of Japan's Formula และ Danish's Formula ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่คำนวณได้จากสูตรการดักเสาเข็มทั้ง 5 สูตรนี้ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจาก Static Pile Load Test ที่ได้ทำการทดสอบกับเสาเข็มนำร่องจำนวน 5 คั่น จากเสาเข็มนำร่องจำนวน 8 คั่น พบว่า สูตรการดักเสาเข็มของ Janbu's Formula จะให้ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่คำนวณได้ใกล้เคียงและมีความสัมพันธ์ที่ดีกับค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ได้จาก Static Pile Load Test เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรการดักเสาเข็มที่นำมาพิจารณา ดังแสดงในรูปที่ 2.34a ถึง 2.34e ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าจากโครงการดังกล่าวค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ยอมให้สามารถคำนวณได้จากสูตรการดักเสาเข็มของ Janbu's Formula โดยใช้ค่าตัวประกอบความปลอดภัยที่มีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 3

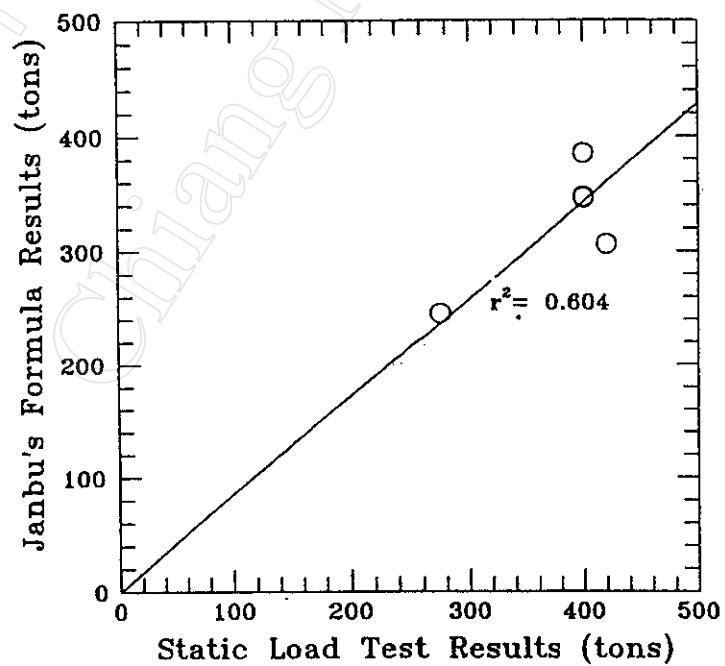


รูปที่ 2.34a แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Engineering News Formula และ Static Pile Load Test

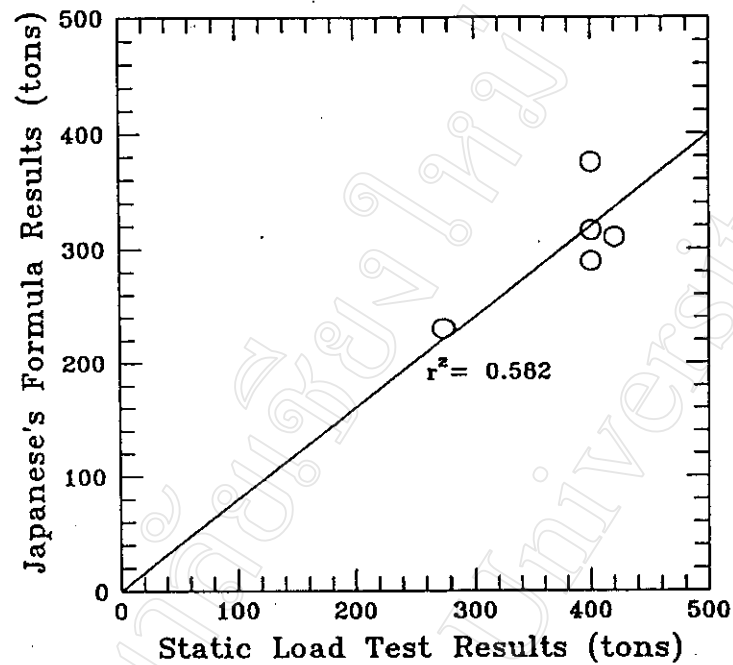
ที่มา: ไกร(2537)



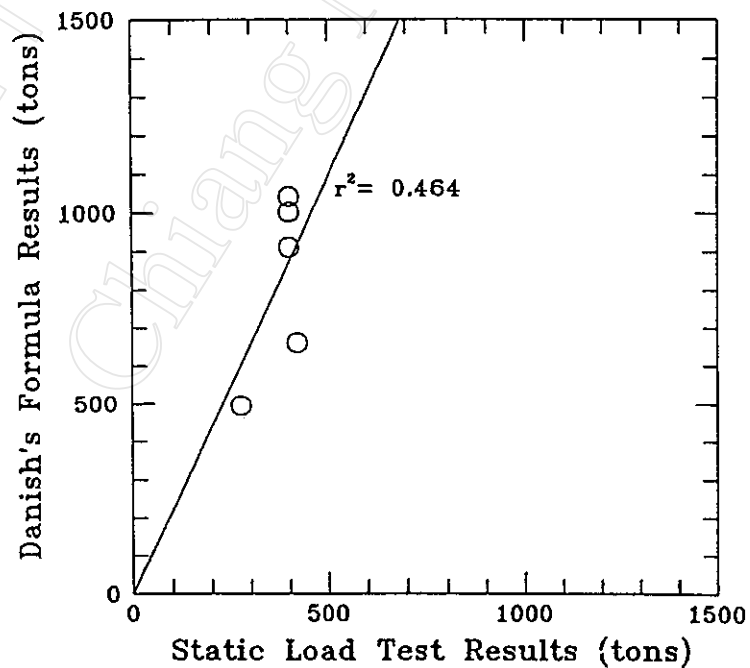
รูปที่ 2.34b แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Hiley's Formula และ Static Pile Load Test
ที่มา: ไกร(2537)



รูปที่ 2.34c แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Janbu's Formula และ Static Pile Load Test
ที่มา: ไกร(2537)



รูปที่ 2.34d แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง The Ministry of Construction of Japan's Formula และ Static Pile Load Test
ที่มา: ไกร(2537)



รูปที่ 2.34e แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Danish's Formula และ Static Pile Load Test
ที่มา: ไกร(2537)

2.2.3งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากการทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มในสนาม

ธนาคล(2541) ได้ทำการรวบรวมข้อมูลการทดสอบหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม จากการทดสอบในสนามจำนวน 93 ตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างการทดสอบแยกตามชนิดของเสาเข็มที่ทำการทดสอบได้ดังตารางที่ 2.9.

ตารางที่ 2.9 แสดงชนิดของเสาเข็มที่ทำการทดสอบ

ที่มา: ธนาคล (2541)

ชนิดของเสาเข็ม	จำนวน (คัน)
เสาเข็มเจาะแบบเปียก	44
เสาเข็มตอก	41
เสาเข็มเจาะแบบแห้ง	8

จากข้อมูลที่ได้ทำการรวบรวมจากการทดสอบเสาเข็มกระจายตามจังหวัดต่าง ๆ ในประเทศไทยได้แสดงดังไว้ในตารางที่ 2.10

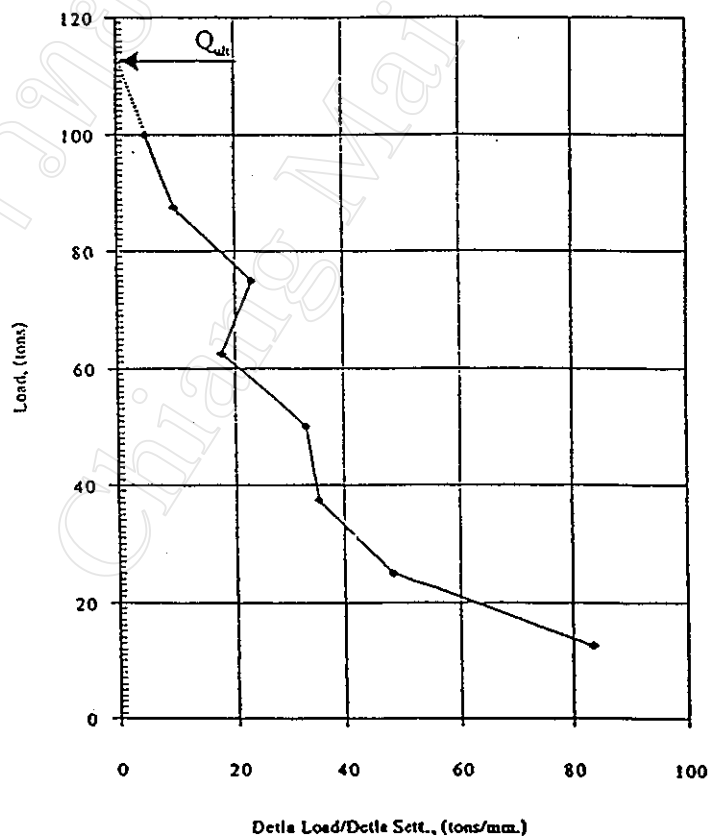
ตารางที่ 2.10 แสดงจำนวนเสาเข็มที่ทำการทดสอบในจังหวัดต่าง ๆ

ที่มา : ธนาคล (2541)

จังหวัด	จำนวน
กรุงเทพมหานคร	79
ลำปาง	6
ปทุมธานี	4
สมุทรสาคร	1
สงขลา	1
อุดรธานี	1

แล้วได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตามวิธีการของ Davisson, Chin, Brinch, Hansen, Marzurkiewicz, Vander Veen, Fuller and Hoy, Butler and Hoy และ De Beer โดยได้ทำการปรับปรุงวิธีการบางวิธีเหล่านี้ให้สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อจะจัดปัญหาในการแปรผลหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มแบบเดิมที่ต้องใช้วิธีการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวกับน้ำหนักที่กระทำกับหัวเสาเข็ม เพื่อให้สะดวกและรวดเร็วลดข้อผิดพลาดจากการเขียนกราฟความสัมพันธ์และการตัดสินใจในการแปลผล จากเหตุผลดังกล่าวได้เสนอวิธีการแปรผลในการหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มอีก 3 วิธีซึ่งจะปรับปรุงในส่วน

ของวิธีการหาค่าแต่หลักการยังคงเดิม วิธีดังกล่าวประกอบด้วย Modified Marzurkiewicz , Modified Brinch Hansen 90% และ Modified Brinch Hansen 80% จากการศึกษานี้ได้ตั้งหลักเกณฑ์ในการประเมินหาวิธีการที่เหมาะสม เปรียบเทียบข้อดีข้อเสีย พบว่าวิธีการของ Modified Marzurkiewicz มีความเหมาะสมในการนำไปหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มมากที่สุด เพราะเนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถที่จะใช้หาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มได้อย่างกว้างขวางและมีวิธีการแปรผลที่ไม่ยุ่งยากมากนัก การอ่านค่าน้ำหนักบรรทุกสามารถกระทำได้อย่างชัดเจน และยังสามารถใช้กับผลการทดสอบเสาเข็มที่ยังไม่มีการทดสอบถึงน้ำหนักประลัยได้ วิธี Modified Marzurkiewicz นี้มีวิธีการหาค่าน้ำหนักบรรทุกได้ดังนี้ โดยให้แกน x คือผลต่างของน้ำหนักบรรทุกทดสอบ ในช่วงที่ติดกันหารด้วยผลต่างค่าการทรุดตัวนั้น(Delta Load/Delta Settlement) และให้แกน y คือน้ำหนักบรรทุก ซึ่งทำให้การอ่านค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดคือค่าน้ำหนักบรรทุกบนแกน y เมื่อค่าในแกน x มีแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์สามารถทำได้สะดวก และรวดเร็วด้วยการใช้ คอมพิวเตอร์ช่วยในการเขียนกราฟ Modified Marzurkiewicz ขึ้นมาใหม่ ดังแสดงตัวอย่างการหาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยตามวิธีการนี้ในรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 แสดงรูปแบบกราฟวิธี Modified Marzurkiewicz

ที่มา: ชานนท์(2543)

Fellenius(1975) ได้ทำการศึกษาวิธีการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม 4 วิธี ได้แก่ วิธี Slow Maintained , Constant Rate of Penetration , Swedish Cyclic และ Quick Maintained Load Test พบว่าการทดสอบโดยวิธี Quick Maintained Load Test กราฟความสัมพันธ์ที่ได้ใกล้เคียงกับวิธี Constant Rate of Penetration กล่าวคือจะแสดงพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกได้ชัดเจนนอกจากนี้ การทดสอบแบบ Quick Maintained Load Test จะมีวิธีการทดสอบที่ง่ายกว่า และใช้เวลาไม่นานประหยัดค่าใช้จ่ายเหมาะกับเสาเข็มประเภทเสาเข็มรับแรงเสียดทาน(Friction Pile)

J.Brinch Hansen(1963) ได้เสนอสูตรความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด โดยได้ทำการปรับปรุงและพัฒนามาจากสมการของ Kondner ซึ่งสมการดังกล่าวคือ

$$\sigma = \frac{\epsilon}{a - b\epsilon} \quad (2.28)$$

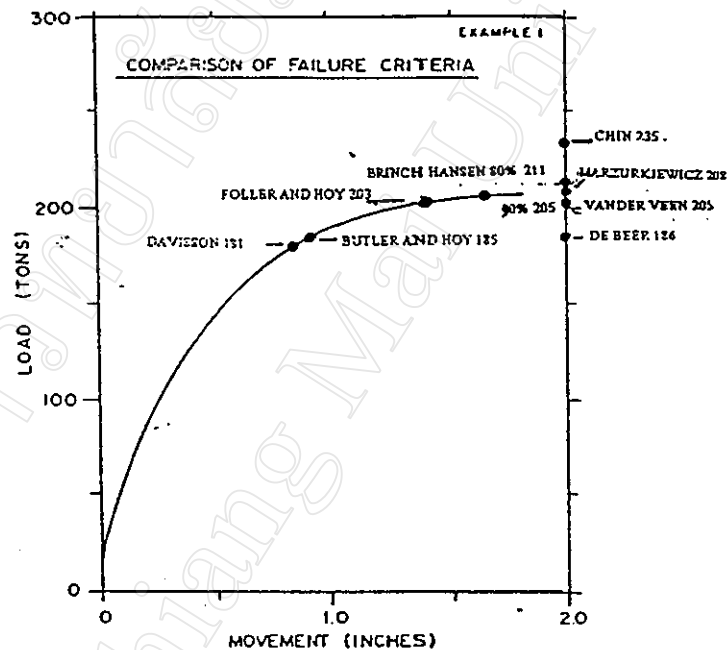
$$\sigma = \sqrt{\frac{\epsilon}{a - b\epsilon}} \quad (2.29)$$

$$\sigma = \frac{\sqrt{\epsilon}}{a - b\epsilon} \quad (2.30)$$

ซึ่งสมการที่ 2.28 คือสมการของ Kondner ส่วนสมการที่ 2.29 และสมการที่ 2.30 เป็นที่ปรับปรุงขึ้นสำหรับดินเหนียวซึ่งลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจะมีลักษณะเป็นพาราโบลาไม่มีจุดที่สามารถบอกได้ว่า ณ ที่เท่าใดดินเหนียวจะแสดงลักษณะพิบัติซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของดินเหนียวสมการที่ 2.29 สามารถที่จะแทนพฤติกรรมดังกล่าวได้ดีกว่าสมการที่ 2.28 ซึ่งจะมีข้อจำกัดในการแทนพฤติกรรมในกรณีที่มีความเค้นเกิดขึ้นน้อยเพราะในช่วงดังกล่าวกราฟความสัมพันธ์จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งสมการที่ 2.29 จะใช้ได้ดีกว่าในหลายกรณีสำหรับวิธีการที่เหมาะสมสำหรับกรณีที่เกิดความเครียดน้อยสมการที่ 2.29 จะใช้ได้ดีที่สุดเพราะที่ในสภาวะที่ความเครียดเกิดขึ้นน้อยนี้จะไม่ถึงจุดพิบัติ ซึ่งสมการที่ 2.30 สามารถที่จะหาค่าน้ำหนักที่จุดพิบัติได้โดยการ Extrapolate จากสมการที่ 2.30 นี่เป็นที่มาของวิธีการประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มตามวิธีการของ Brinch Hansen 80% นั่นเอง

Fellenius (1980) ได้ทำการทดสอบเสาเข็มตัวอย่าง ขนาด 305 มิลลิเมตร เป็นเสาเข็มคอนกรีตที่ถูกติดตั้งลงในดิน โดยมีความลึกที่ระดับปลายเข็มเท่ากับ 18.3 เมตร ซึ่งเป็นดิน Sensitive Clay หนา 3.0 เมตร และดิน Clayey Silt หนา 1.8 เมตร แทรกอยู่ในดิน Silt โดยการทดสอบจะกระทำหลังจากทำการติดตั้งเสาเข็มทดสอบไปแล้ว 6 สัปดาห์ และการทดสอบทำโดยวิธีการ CRP Method จากการทดสอบพบว่าเสาเข็มจะเริ่มพินาศเมื่อทำการให้น้ำหนักกับหัวเสาเข็มเท่ากับ 200 ตัน และน้ำหนักสูงสุดที่ทำการทดสอบมีค่าเท่ากับ 206 ตัน เมื่อทำการทดสอบเสร็จสิ้นได้กราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนักและการทรุดตัวก็ทำการประเมินหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากวิธีการของ Davisson, วิธีการของ Chin, วิธีการของ De Beer, วิธีการของ Brinch Hansen 90 percent criterion, วิธีการของ Brinch Hansen 80 percent criterion, วิธีการของ Fuller และ Hoy, วิธีการของ Butler และ Hoy, วิธีการของ Marzulkiewicz และวิธีการของ Van der Veen ซึ่งค่ากำลังรับน้ำหนักที่ประเมินได้จากวิธีการเหล่านี้ได้แสดงเปรียบเทียบไว้บนกราฟความสัมพันธ์ของน้ำหนักและการทรุดตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.36 จากค่ากำลังรับน้ำหนักที่ประเมินได้พบว่า ค่ากำลังรับน้ำหนักที่ประเมินได้จากวิธีการของ Davisson เท่ากับ 181 ตัน โดยให้ค่ากำลังรับน้ำหนักที่ประเมินได้ต่ำกว่าวิธีการอื่นๆ ส่วนวิธีการของ Chin ประเมินได้เท่ากับ 235 ตัน โดยจะเป็นค่าน้ำหนักที่ประเมินได้สูงกว่าวิธีการอื่นๆ สำหรับวิธีการอื่นๆจะสามารถประเมินได้ประมาณ 200 ตัน และสำหรับวิธีการประเมินหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มทั้ง 9 วิธีการนี้จะให้ค่าที่แตกต่างกันไป Fellenius (1980) ได้เลือกวิธีการที่คิดว่าเหมาะสมพร้อมทั้งให้เหตุผลดังนี้ วิธีการของ Davisson วิธีการนี้ถูกเลือกเพราะเป็นวิธีการที่สามารถหาค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มได้โดยไม่ต้องทำสอบให้ถึงจุดพินาศ เพราะสามารถที่จะหาค่าน้ำหนักพินาศได้จากความยาว, พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม ถึงแม้ว่าการทดสอบแบบพิสูจน์ค่าการทรุดตัวที่ได้โดยส่วนใหญ่จะน้อยกว่าค่า Elastic Compression ของเสาเข็มบวกกับค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มหารด้วย 120 แต่ก็สามารถที่จะต่อเส้นกราฟบนความสัมพันธ์ของค่าน้ำหนักและการทรุดตัวไปตัดกับเส้นตรงดังกล่าวได้โดยค่าตัวประกอบความปลอดภัยของวิธีการนี้เท่ากับ 1.5 ถึง 1.8 วิธีการของ Chin วิธีการนี้ถูกเลือกเพราะถ้ามีการทำการเขียนจุดความสัมพันธ์ของ Chin ในระหว่างการทดสอบเสาเข็มค่ากำลังรับน้ำหนักพินาศของเสาเข็มจะสามารถที่จะประเมินได้ขณะที่ทำการทดสอบ โดยเมื่อเส้นกราฟของ Chin มีการเปลี่ยนแปลงความชันหรือเริ่มเป็นเส้นตรงแสดงถึงเสาเข็มที่ทำการทดสอบเริ่มเปลี่ยนแปลงสภาพการรับน้ำหนัก และวิธีการของ Chin ไม่ขึ้นกับความไม่เที่ยงตรงของน้ำหนักและการทรุดตัวมากนัก วิธีการของ Brinch Hansen 80 percent criterion วิธีการนี้ถูกเลือกเพราะค่ากำลังรับน้ำหนักพินาศที่ประเมินได้

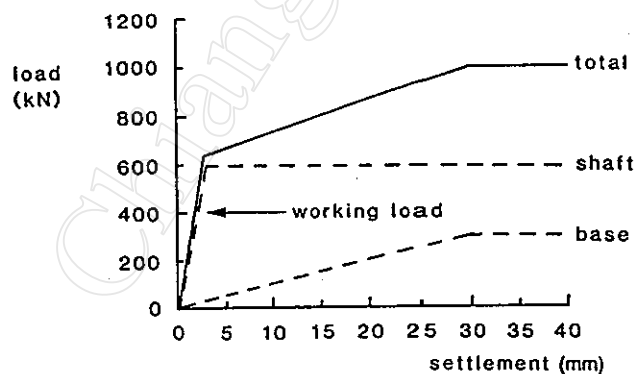
จากวิธีการนี้ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าน้ำหนักพิบัติที่เกิดขึ้นจริงของเสาเข็ม และค่าที่ประเมินได้จะเป็นค่าที่น้อยกว่าค่าที่ประเมินได้จากวิธีการของ Chin แต่จะขึ้นอยู่กับข้อมูลของการทดสอบมากกว่าวิธีการของ Chin วิธีการของ Butler และ Hoy วิธีการนี้ถูกเลือกเพราะอย่างแรกเป็นวิธีการที่คล้ายกับวิธีการของ Davisson แต่อย่างไรก็ตามวิธีการ Butler และ Hoy จะหาค่าได้ต้องทำการทดสอบเสาเข็มให้ใกล้กับจุดพิบัติมากที่สุดหรือให้เกิดค่าการทรุดตัวมาก ๆ เพื่อให้เส้นความชันเท่ากับ 0.05 นิ้ว ต่อต้นสามารถสัมผัสเส้นกราฟได้ในกรณีของวิธีการ Fuller และ Hoy จึงจะหาค่าจากวิธีการของ Butler และ Hoy ได้



รูปที่ 2.36 แสดงค่ากำลังรับน้ำหนักพิบัติของเสาเข็มที่ประเมินได้จากวิธีการประเมินค่าต่างๆ

ที่มา: Fellenius (1980)

W.G.K Fleming A.J. Weltman M.F Randolph และ W.K. Elson (1998) ได้แสดงข้อแตกต่างของกราฟความสัมพันธ์น้ำหนักและการทรุดตัวระหว่างแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มกับแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็ม ซึ่งข้อแตกต่างดังกล่าวมีความสำคัญในการหาค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นของเสาเข็มและการแบ่งน้ำหนักระหว่างแรงเสียดทานด้านข้างและแรงแบกทานของเสาเข็มภายใต้สภาวะใช้งาน (Working Condition) ซึ่งข้อแตกต่างดังกล่าวได้แสดงโดยการติดตั้งเครื่องมือวัดในเสาเข็มทดสอบเพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมจากการทดสอบการให้น้ำหนักกับเสาเข็มในสนามของเสาเข็มเจาะขนาด 0.6 เมตร ยาว 10 เมตร อยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง พบว่าแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มทดสอบมีค่า 600 กิโลนิวตัน ที่ค่าการทรุดตัว 3 มิลลิเมตร ขณะที่แรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มมีค่า 400 กิโลนิวตัน ที่ค่าการทรุดตัว 30 มิลลิเมตร โดยลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและการทรุดตัวของทั้งสองกรณีแสดงในรูปที่ 2.37 และค่าน้ำหนักพิกัดจากการทดสอบมีค่า 1000 กิโลนิวตัน โดย 60 เปอร์เซ็นต์เป็นค่าของแรงเสียดทาน จากรูปดังกล่าวที่น้ำหนักใช้งาน (Working Load) 400 กิโลนิวตัน จากการวัดพบว่า 94 เปอร์เซ็นต์ของค่าน้ำหนักดังกล่าวเป็นค่าแรงเสียดทาน โดยค่าแรงแบกทานจะมีค่าเพียง 6 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักใช้งานและขณะที่แรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มทดสอบมีค่าสูงสุดที่ 640 กิโลนิวตัน ค่าแรงแบกทานของเสาเข็มจะเริ่มมีการพัฒนาขึ้น โดยดูได้จากการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบ

ที่มา: W.G.K Fleming A.J. Weltman M.F Randolph และ W.K. Elson (1998)