บทที่ 4
การทดสอบเสาเข็ม

4.1 บทนำ

การทดสอบเสาเข็มในสนามก็เพื่อหาลักษณะการรับน้ำหนักบรรทุกและการจมตัวของเสาเข็มเมื่อใช้งาน และรวมถึงความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก ณ.สภาพชั้นดินในสนาม โดยทั่วไปเสาเข็มจะถูกทดสอบด้วยน้ำหนักบรรทุกขนาด $1(^1/_2)$ ถึง 2 เท่าของน้ำหนักบรรทุกใช้งาน หรือถูกทดสอบจนถึงกำลังประลัยของเสาเข็ม

4.2 กรรมวิธีการทดสอบเสาเข็ม

4.2.1 การวัดค่าน้ำหนักบรรทุกและค่าการจมตัว

การวัดค่าน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาเข็ม ทำโดยวงแหวนวัดแรง(proving ring) หรือเซลล์โหลด (load cell) การวัดการจมตัวของเสาเข็มมักใช้หลักวิธีการสำรวจที่มีความแม่นยำในการจับระดับหัวเสาเข็มกับจุดอ้างอิง ซึ่งห่างจากตำแหน่งทดสอบอย่างน้อย 10 เมตร ด้วยค่าความถูกต้อง $\pm$1 มม. ในทางปฏิบัติจะใช้เข็มวัดการเคลื่อนตัว (dial gauge) ซึ่งให้ค่าความถูกต้องละเอียดกว่า โดยติดตั้งกับคานอ้างอิงที่มีฐานรองรับห่างจากตัวเสาเข็มทดสอบอย่างน้อย 5 เมตร ปลายเข็มวัดวางบนเศษกระจกเรียบบนหัวเสาเข็มเพื่อวัดการจมตัว เนื่องด้วยการทดสอบอาจมีผลกระทบจากการเคลื่อนตัวของดินบริเวณรอบฐานรองรับคานอ้างอิง ซึ่งส่งผลต่อตัวเข็มวัด จึงควรใช้วิธีการสำรวจและเข็มวัดการเคลื่อนตัวควบคู่ไปด้วยขณะทำการทดสอบ

4.2.2 วัตถุประสงค์

อย่างไรก็ตามวัตถุประสงค์หลักของการทดสอบเสาเข็มมี 3 ส่วนด้วยกันคือ

- **เพื่อหาน้ำหนักบรรทุกประลัยที่เสาเข็มรับได้** (ultimate load capacity)
- **เพื่อหาความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกและการทรุดตัว** (load - settlement relationship)
- **เพื่อพิสูจน์และยอมรับค่าน้ำหนักบรรทุกได้ของเสาเข็ม** (proof acceptance)

4.2.3 ประเภทการทดสอบเสาเข็ม

ประเภทของการทดสอบเสาเข็มในสนามที่นิยมใช้ 2 แบบ โดยอ้างอิงถึง

ก) วิธีคงสภาพน้ำหนักบรรทุก

(maintained load , ML)

กรรมวิธีการทดสอบเสาเข็มในสนามตามมาตรฐาน ASTM D-1143 เป็นแบบการรักษาน้ำหนักบรรทุก โดยเพิ่ม 8 ช่วง ให้น้ำหนักบรรทุกเป็น 200% ของน้ำหนักบรรทุกใช้งาน สำหรับเสาเข็มเดี่ยว และ 150% ของน้ำหนักบรรทุกใช้งาน สำหรับเสาเข็มกลุ่ม เมื่ออัตราการทรุดตัวไม่มากกว่า 0.25 มม./ ชม. โดยน้ำหนักบรรทุกสุดท้ายรักษาไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง วิธีคงสภาพน้ำหนักบรรทุกมักใช้เวลาทดสอบราวๆ 30 - 70 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลานานมากไป และอัตราการทรุดตัวต่ำกว่าที่กำหนดไว้ ยังไม่แสดงการหยุดการจมตัวของเสาเข็ม

การทดสอบเสาเข็มโดยวิธีคงสภาพน้ำหนักบรรทุก จะเพิ่มน้ำหนักครั้งละ 25% ของน้ำหนักออกแบบและให้คงสภาพน้ำหนัก (maintained load) ไว้จนกระทั่งการทรุดตัวไม่มากกว่า 0.25 มม./ ชม. หรือ 2 ชั่วโมง จึงเพิ่มน้ำหนักใหม่ได้ เมื่อทดสอบจนถึง 200% หรือ 150% ของน้ำหนักบรรทุกใช้งานแล้ว ในทางปฏิบัติจะรักษาน้ำหนักบรรทุกทดสอบสูงสุดไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นลดน้ำหนักบรรทุกลงครั้งละ 25% ของน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด ทุกๆ 1 ชั่วโมง และรักษาสภาพน้ำหนักทดสอบจนกระทั่งการคืนตัวคงที่ แต่ไม่เกิน 12 ชั่วโมง ผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มนี้ ประเมินค่ากำลังประลัยของเสาเข็มสูงสุดได้โดยนิยาม คือน้ำหนักบรรทุกทดสอบ ณ. การจมตัวของเสาเข็มเป็นระยะเกินกว่า 10% ของเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม หรือ น้ำหนักบรรทุกทดสอบ ณ. สภาพที่เสาเข็มทดสอบมีอัตราการทรุดตัวต่อเนื่องที่น้ำหนักบรรทุกคงที่

ข) วิธีการกดอัตราคงที่

(constant rate of penetration , CRP)

กรรมวิธีการทดสอบด้วยวิธีการกดอย่างเร็วคงที่ (Quick ML test) เป็นอีกวิธีหนึ่ง โดยการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกครั้งละ 10 - 15% ของน้ำหนักบรรทุกใช้งาน ให้มีช่วงเวลาของการเพิ่มน้ำหนักแต่ละครั้งคงที่อาจเป็น 5 , 10 หรือ 15 นาที และทำการเพิ่มน้ำหนักต่อไปอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่การทดสอบกำหนด การทดสอบแบบนี้มักจะสิ้นสุดในเวลา 2 ถึง 3 ชั่วโมงเท่านั้น

วิธีการกดอัตราคงที่(CRP)นิยมแพร่หลายในยุโรปและเป็นส่วนหนึ่งของมาตรฐานในปี 1970 โดยการกดให้เสาเข็มทดสอบจมในดินด้วยอัตราคงที่ ประมาณ 0.5 มม./ นาที บันทึกค่าน้ำหนักกดกระทำกับระยะจมตัวของหัวเสาเข็ม ระบบส่งแรงกดกระทำ (hydraulic jack) ในการทดสอบด้วยวิธีนี้ควรมีช่วงการจมอย่างน้อย 20% ของเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม บวกด้วยระยะ 75 มม. สำหรับการเคลื่อนตัวของระบบ คลีทลีด (kentledge) หรือ 25 มม. สำหรับการเคลื่อนตัวของระบบเสาเข็มรับแรงดึง ในทางปฏิบัติ อัตราการกดคงที่ 0.75 มม./ นาที สำหรับ เสาเข็มเสียดทานในดินเหนียว และอัตราการกดคงที่ 1.50 มม./ นาที สำหรับ เสาเข็มแบกทานในดินแข็งและวิศวกรจะไม่ใช้กราฟน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัวจากวิธีCRPนี้ไปทำนายการทรุดตัวจริงของฐานรากในสนาม

ตารางที่ 4.1 การเพิ่มน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มทดสอบ วิธีคงสภาพน้ำหนัก

The ML test is best suited for contract work , particularly for proof loading tests on working piles. For an ML test up to 1.5 times the working load the increments are as follows.

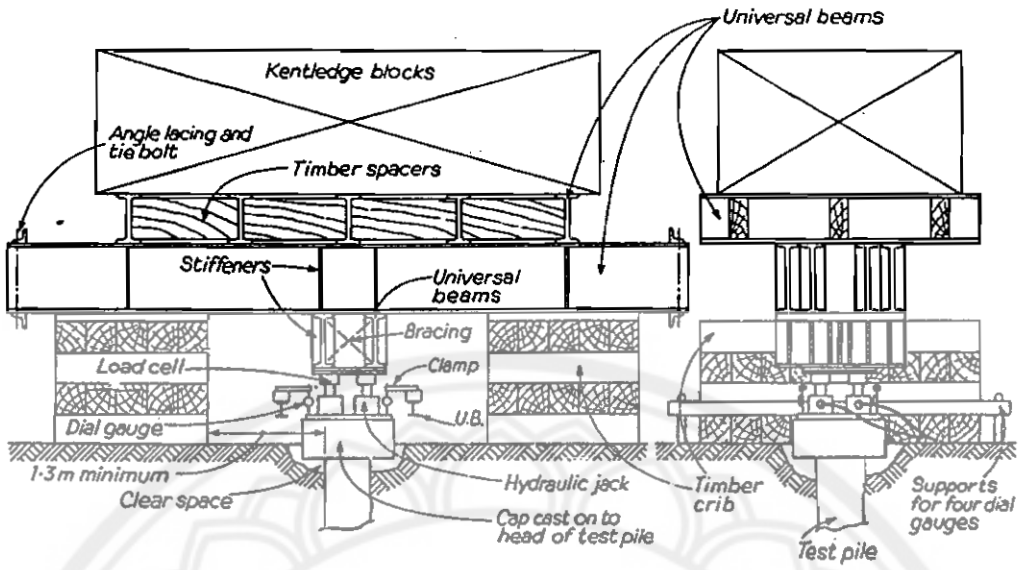
Load as percentage Of working load	Minimum time of holding load
25	1 hour
50	1 hour
75	1 hour
100	1 hour
75	10 minutes
50	10 minutes
25	10 minutes
0	1 hour
100	6 hour
125	1 hour
150	6 hour
125	10 minutes
100	10 minutes
75	10 minutes
50	10 minutes
25	10 minutes
0	1 hour

4.2.4 ระบบแรงปฏิกริยาการทดสอบเสาเข็ม

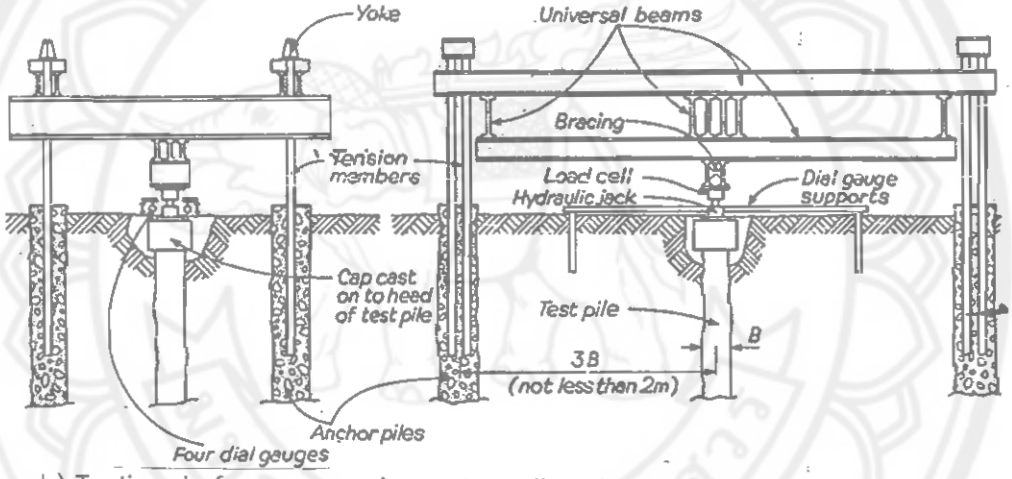
ก) ระบบคลีทลีด (kentledge)

ข) ระบบเสาเข็มรับแรงดึง (tension piles)

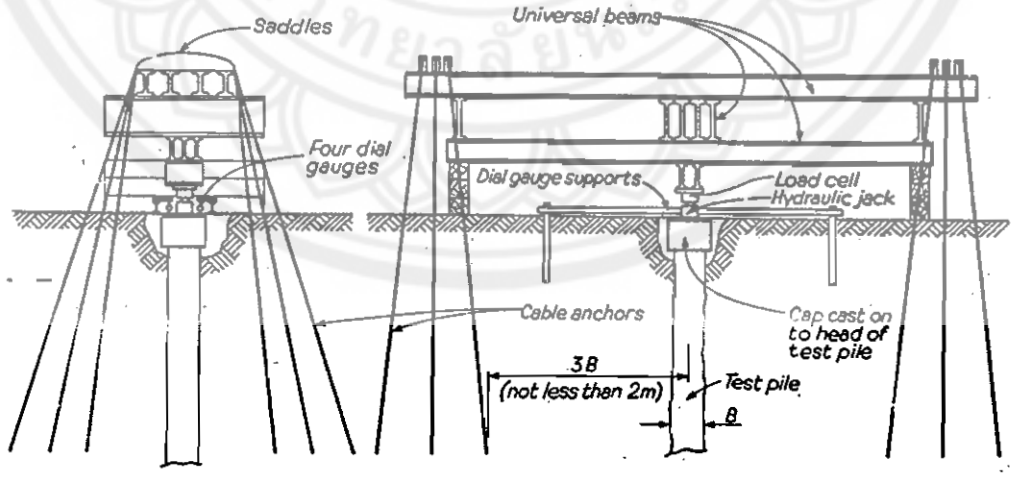
ค) ระบบสมอดินรั้ง (ground anchor system)



a) Testing rig for compressive test on pile using kentledge for reaction



b) Testing rig for compressive test on pile using tension piles for reaction



c) Testing rig for compressive test on pile using earth anchors for reaction

รูปที่ 4.1 ระบบแรงปฏิกิริยาการทดสอบเสาเข็ม

4.3 การนำเสนอผลการทดสอบเสาเข็มในสนาม

การนำเสนอผลการทดสอบเสาเข็มในสนาม ควรเป็นรายงานที่สอดคล้องกับมาตรฐาน ASTM D-1143 การแสดงผลการทดสอบจะประกอบด้วยกราฟของน้ำหนักบรรทุกทดสอบกับการทรุดตัวของเสาเข็ม และกราฟของเวลาที่ทดสอบกับการทรุดตัวของเสาเข็ม

4.3.1 กราฟน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัวของเสาเข็ม

จากค่าบันทึกของน้ำหนักบรรทุกแต่ละค่ากับการทรุดตัวของหัวเสาเข็มทดสอบ โดยใช้สเกลแกนนอนเป็นค่าการจมตัวของเสาเข็ม เมื่อลากเส้นการเปลี่ยนแปลงยืดหยุ่นของเสาเข็มแล้วทำมุมประมาณ 20 องศา ค่าการเปลี่ยนแปลงยืดหยุ่นของเสาเข็ม คำนวณจาก

$$\delta = QL/AE \qquad (4.1)$$

โดยที่ δ = ค่าการเปลี่ยนแปลงยืดหยุ่น

Q = น้ำหนักบรรทุก

L = ความยาวเสาเข็ม

A = พื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม

E = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเข็ม

4.3.2 กราฟเวลากับการทรุดตัวของเสาเข็ม

จากการบันทึกค่าเวลาการทดสอบและการจมตัวรวมทั้งการคืนตัวของเสาเข็ม จะแสดงเวลาด้วยเส้นแกนอน

4.4 การหาน้ำหนักบรรทุกประลัยจากข้อมูลการทดสอบเสาเข็ม

การแบ่งข้อบัญญัติด้านกำลังประลัยของเสาเข็ม จากผลการทดสอบในสนามได้เป็น 2 แบบ :

ก) หลักเกณฑ์กำหนดแบบแผนการทดสอบ : โดยทั่วไปหลักเกณฑ์ในข้อบัญญัติมักระบุเกณฑ์ที่ยอมรับ ที่ไม่ต้องถึงจุดประลัยของเสาเข็ม ตัวอย่างเช่นการสังเกตการทรุดตัวของหัวเสาเข็มทดสอบไม่ควรเกินระยะจำกัดค่าหนึ่ง สำหรับเสาเข็มทุกๆชนิด วิธีการนี้มีข้อเสียตรงที่การประมาณค่าน้ำหนักประลัยเกินจริงสำหรับเสาเข็มสั้นและการประมาณค่าน้ำหนักประลัยต่ำไปสำหรับเสาเข็มยาว

ข) หลักเกณฑ์กำหนดค่ากำลังประลัย : ซึ่งทำให้สามารถหาค่ากำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็มทดสอบเมื่อใช้งานได้ วิธีการนี้ควรนำมาใช้ในทางปฏิบัติเพราะกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มประเมินจากพฤติกรรมจริง

หลักเกณฑ์การหาค่ากำลังประลัยของเสาเข็มจากข้อมูลการทดสอบในสนาม สรุปบรรยายและวิเคราะห์โดยFellenius(1980) น้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มประเมินจากวิธีและหลักเกณฑ์ที่แตกต่างกันทั้ง 9 วิธี (หาจากภาคผนวก ก.)จะเห็นว่าให้ค่ากำลังประลัยของเสาเข็มทดสอบในช่วง 30% จากค่าต่ำสุดจนถึงค่าสูงสุด วิศวกรผู้รับผิดชอบต่อการคำนวณตามข้อบัญญัติ ควรใช้หลักเกณฑ์ที่ตนเองมีประสบการณ์และมีความเชี่ยวชาญ

ตารางที่ 4.2 แสดงหลักเกณฑ์ที่กำหนดใช้ในอเมริกา

1. Limiting total butt settlement
   a. 1.0 in (Holland)
   b. 10% of tip diameter (United Kingdom)
   c. Elastic settlement +D/30 (Canada)
2. Limiting plastic settlement
   a. 0.25 in (AASHTO, N.Y. State, Louisiana)
   b. 0.5 in (Boston) [complete relaxation of pile assumed]
3. Limiting ratio : plastic/elastic settlement 1.5 (Denmark)
4. Limiting ratio : settlement/unit load
   a. Total 0.01 in/ton (California, Chicago)
   b. Incremental 0.03 in/ton (Ohio)
      0.05 in/ton (Raymond International)
5. Limiting ratio : plastic settlement/unit load
   a. Total 0.01 in/ton (N.Y.City)
   b. Incremental 0.003 in/ton (Raymond International)
6. Load settlement curve interpretation
   a. Maximum curvature : Plot log total settlement versus log load ; choose point of maximum curvature.
   b. Tangents : Plot tangents to general slopes of upper and lower portion of curve; observe point of intersection
   c. Break point : Observe point at which plastic settlement curve breaks sharply ; observe point at which gross settlement curve breaks sharply (Los Angeles)
7. Plunge Find loading at which pile " plunges " (i.e ., the load increment could not be maintained after pile penetration was greater than 0.2B)
8. Texas quick load Construct tangent to initial slope of load versus gross settlement curve ; construct tangent to lower portion of the load versus gross settlement curve at 0.25 in/ton slope. The intersection of the two tangent line is the ultimate bearing capacity.

Source : ASCE, 1993

4.4.1 น้ำหนักประลัยออฟเซ็ท (The offset limit load)

น้ำหนักประลัยออฟเซ็ท Q_u (Davisson , 1973) ของเสาเข็ม คือน้ำหนักบรรทุกทดสอบ ณ. จุดที่หัวเสาเข็มมีการเคลื่อนตัวเป็นระยะเท่ากับค่า $\Delta = \delta+(4+8d)x10^{-3}$ โดยที่ δ = ค่าการเปลี่ยนแปลงยืดหยุ่น และ d = ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางปลายเสาเข็ม

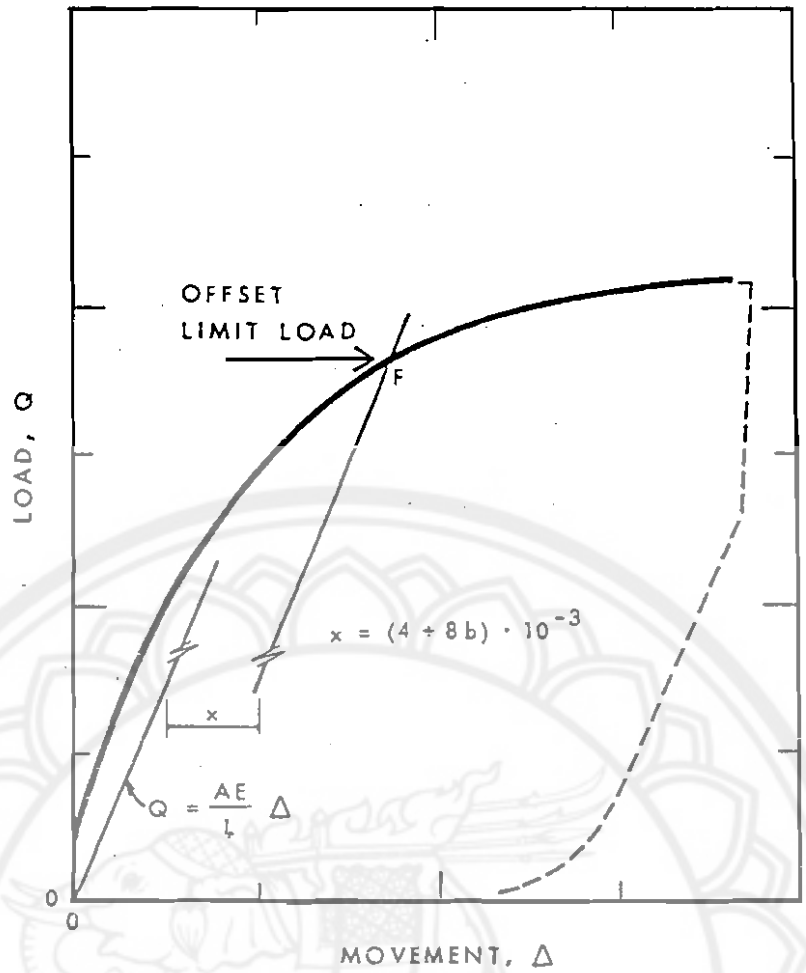
หลักเกณฑ์การประเมินโดยวิธีนี้เหมาะสำหรับเสาเข็มตอก เมื่อนำไปใช้กับการทดสอบ เสาเข็มเจาะจะให้ค่าน้อยเกินไป วิธีกราฟฟิกแสดงในรูปที่ 4.2 จุดตัด F เป็นค่าน้ำหนักประลัยของเสาเข็มทดสอบ ซึ่งมักให้ค่าที่ค่อนข้างปลอดภัยมาก ข้อดีของวิธีการนี้ คือ สามารถลากเส้นหาจุดจำกัดได้ก่อนการทดสอบจริงและใช้เป็นเกณฑ์เพื่อยอมรับการทดสอบเสาเข็มในสนามด้วยเลย **ตัวอย่างเช่น** ข้อกำหนดในสัญญาอ้างถึง "การจมตัวของหัวเสาเข็มที่ 180% ของน้ำหนักบรรทุกใช้งาน ต้องไม่เกินการหดตัวยืดหยุ่นของวัสดุเสาเข็ม บวกกับ ค่า $(4+8d)x10^{-3}$ เมื่อ d เป็นค่าเส้นผ่าศูนย์กลางปลายเสาเข็ม" สำหรับข้อเสีย ความถูกต้องของการประมาณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเข็มคอนกรีต และเสาเข็มห่อหุ้มคอนกรีตทำได้ยาก เพราะหลักเกณฑ์มีความไวต่อการประมาณค่าที่คลาดเคลื่อนนี้

จะเห็นว่าในทางปฏิบัติค่าน้ำหนักประลัยที่ได้เป็นค่าต่ำปลอดภัยมาก และเป็นค่าระหว่างพฤติกรรมกึ่งอิลาสติกกับกึ่งพลาสติกของเสาเข็มจมตัว ซึ่งบางครั้งอาจให้ค่าต่ำเกินไปจนคลาดเคลื่อนกับกำลังรับน้ำหนักประลัยแท้ของเสาเข็มในพฤติกรรมจริง น้ำหนักประลัยออฟเซ็ทที่ได้กำเนิดมาจากผลการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีการกดอย่างเร็วคงที่ แต่นำไปประยุกต์ใช้กับการกดอย่างช้าได้ แต่ไม่เหมาะกับการทดสอบแบบไซเคิล (cyclic loading)

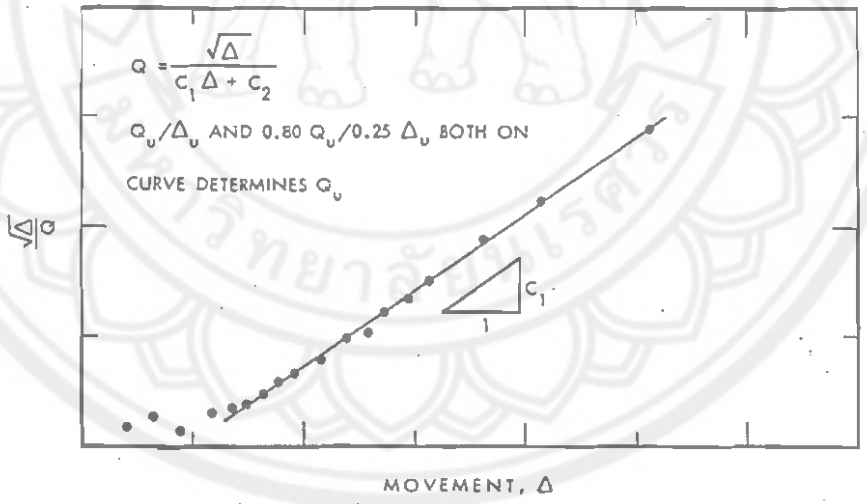
4.4.2 วิธีของ Brinch – Hansen

วิธีของ Brinch – Hansen (80% criterion) สมมติฐานว่าลักษณะกราฟน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัว เป็นลักษณะพาราโบลิค เมื่อพล็อตค่า $\sqrt{\Delta}/Q$ กับค่าการทรุดตัว (Δ) จะได้เส้นตรงที่มีความชัน c_1 และจุดตัดแกน y ที่ c_2 (ดังรูปที่ 4.3) ค่าน้ำหนักบรรทุกทดสอบของเสาเข็ม Q_u ที่การเคลื่อนตัว Δ_u เป็นน้ำหนักบรรทุกประลัย ถ้าค่าน้ำหนักบรรทุก 0.80 Q_u มีการทรุดตัวเป็น 0.25 Δ_u ด้วย

$$Q_u = \frac{1}{2\sqrt{c_1 c_2}} \quad \text{และ} \quad \Delta_u = c_2 / c_1 \qquad (4.2)$$



รูปที่ 4.2 วิธีน้ำหนักประลัยออฟเซ็ท (Davisson , 1973)



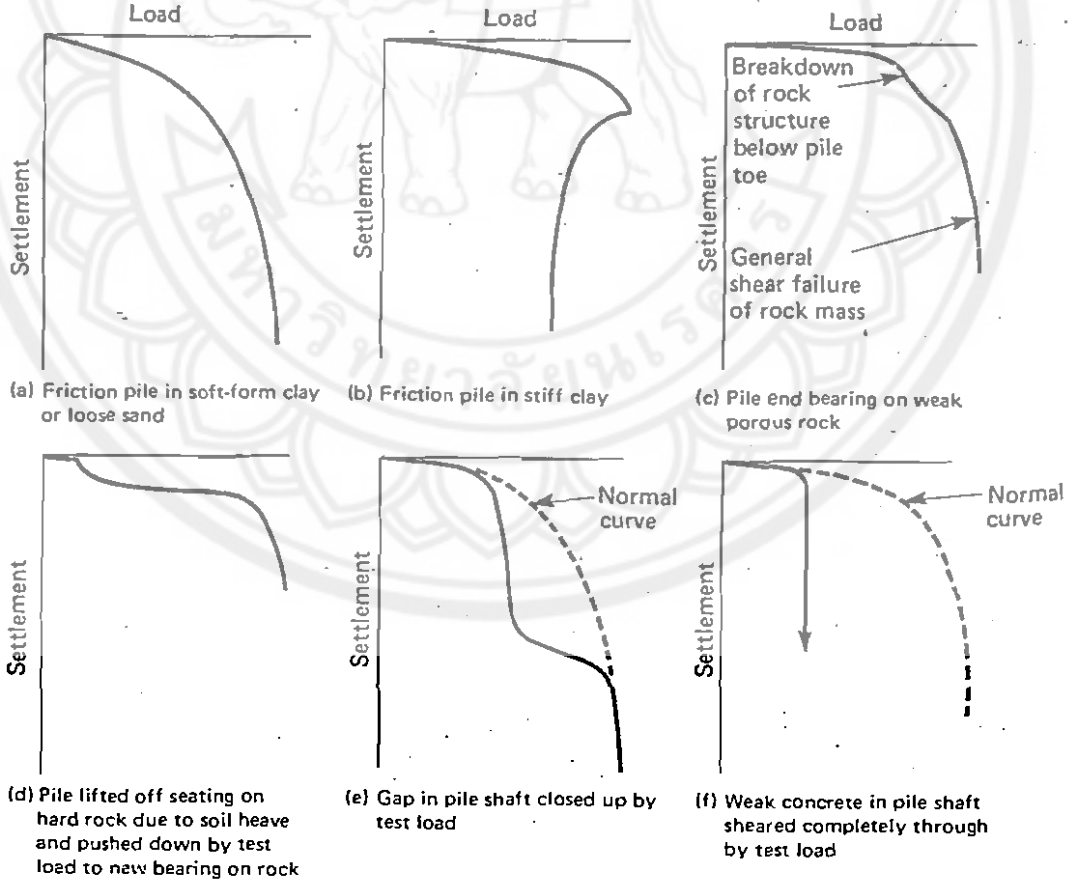
รูปที่ 4.3 วิธีของ Brinch – Hansen (80% criterion)

การใช้หลักเกณฑ์ของ Brinch – Hansen มีข้อได้เปรียบ เพราะค่าน้ำหนักประลัยที่ได้มักสอดคล้องกับค่าน้ำหนักบรรทุกที่เกิดจากการจมลึกของเสาเข็ม ทั้งยังใช้ได้กับการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีกดอย่างเร็วคงที่และวิธีกดอย่างช้า แต่ไม่เหมาะกับแบบไซเคิล

ข้อเสียในการใช้วิธี Brinch – Hansen (80% criterion) คือไม่สามารถกำหนดจุดพิบัติก่อนการทดสอบเสาเข็มจริง เหมือนอย่างวิธีหาน้ำหนักบรรทุกออฟเซ็ท ในวิธี Brinch – Hansen ค่าที่ได้จะเป็นน้ำหนักบรรทุกประลัย เมื่อจุด 0.80 Q_u / 0.25 Δ_u อยู่ในเส้นกราฟด้วย ถ้าไม่มีลักษณะการพิบัติจะไม่มีการจมลึกของเสาเข็มระหว่างทดสอบจริง ในกรณีเช่นนี้ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม จะเป็นน้ำหนักบรรทุกทดสอบที่วัดได้ ไม่ใช่ค่าที่คาดคำนวณได้

4.4.3 วิธีของ Chin

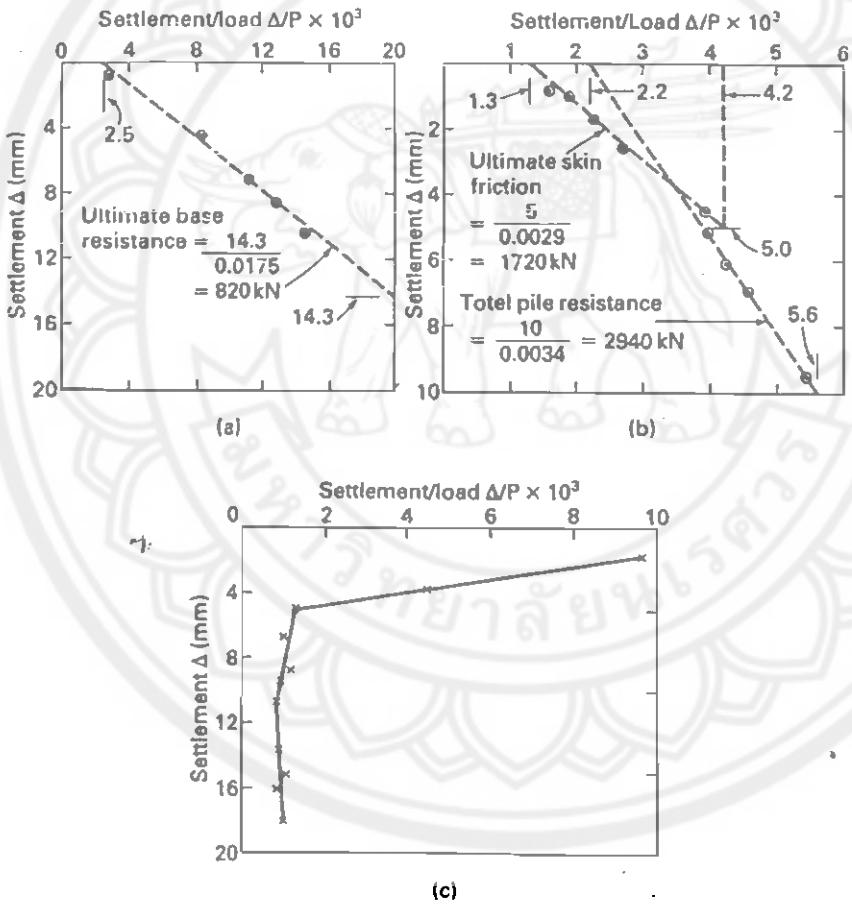
หลักเกณฑ์การหากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของ Chin (1970) ใช้การพล็อตจุดทำนองเดียวกับวิธีของ Brinch – Hansen จากลักษณะไฮเปอร์โบลิก การพล็อต Δ / Q กับการทรุดตัว (Δ) จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยเท่ากับส่วนกลับของความชันเส้นตรงที่ได้ ค่าที่คำนวณได้โดยวิธีนี้มักมีค่ามากกว่าน้ำหนักบรรทุกประลัยจริงเสมอ ข้อกำหนดทางวิศวกรรมมักใช้วิธีของ Chin ในการตรวจสอบลักษณะความเสียหายของเสาเข็มเมื่อรับน้ำหนักใช้งาน ซึ่งจะมีลักษณะเส้นเปลี่ยนแปลงทันทีในรูปแบบโค้งหรืองอ เมื่อถูกพล็อตเป็นเส้นตรง



รูปที่ 4.4 ลักษณะน้ำหนักบรรทุก – การทรุดตัวของเสาเข็มทดสอบ (Tomlinson)

4.5 การวิเคราะห์สภาพเสาเข็ม

การประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มสูงสุดด้วยวิธีคงสภาพน้ำหนักบรรทุก และวิธีกดอัตราคงที่ทำได้แม้การทดลองไม่ถึงจุดประลัย วิธีของ Chin ยังบอกพฤติกรรมของเสาเข็มและสภาพเสาเข็มอีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.5(a) เป็นเส้นตรงของการพล็อต ของเสาเข็มแบกทาน และ รูปที่ 4.5(b) แสดงลักษณะเสาเข็มเสียดทานและแบกทาน ซึ่งสามารถแยกกำลังรับน้ำหนักบรรทุก จากแรงเสียดทาน และแรงแบกทานของเสาเข็มจากกันได้ ซึ่งค่าส่วนกลับของความชันในกราฟจะเป็นค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็ม วิธีของ Chin ยังอธิบายถึงลักษณะของเสาเข็มคอด หรือ หัก ดังแสดงในรูปที่ 4.5(c)



รูปที่ 4.5 การวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยวิธีของ Chin.

a) เสาเข็มแบกทาน b) เสาเข็มเสียดทาน c) เสาเข็มหัก