บทที่ 2

ทฤษฎีการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

1. การรับน้ำหนักของเข็มเดี่ยวในดินเหนียว

การรับน้ำหนักของเข็มเดี่ยวในดินเหนียวนั้น ขึ้นอยู่กับแรงต้านของดิน 2 อย่างคือ แรงต้านดินผิวข้างของเข็ม (Skin friction) และแรงต้านที่ปลายเข็ม (End resistance)

1.1 แรงต้านดินที่ปลายเข็มในดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำ สามารถหาได้จากสูตร

$$Q_p = A_p N_c C_p \qquad \text{.............} (1)$$

โดยที่ A_p = พื้นที่ของปลายเข็ม

C_p = ค่าแรงเฉือนของดินที่ระดับปลายเข็ม

N_c = สัมประสิทธิ์แรงต้านดินที่ปลายเข็มต่อการกด สำหรับดินเหนียวอ่อนที่อิ่มตัวด้วยน้ำ มีค่าประมาณ 9 (SKEMPTON, 1951) (รูปที่ 1)

ตัวอย่างแรงต้านดินที่ปลายของเข็มไม้รวก ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของพื้นที่ปลายของเข็มประมาณ 6.2 ตารางเซนติเมตร แรงเฉือนของดิน ที่ระดับ 4.0 เมตรที่ปลายเข็มไม่เกิน 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เพราะฉะนั้นแรงต้านดินที่ปลายเข็มมีค่าเท่ากับ $9 \times 6.2 \times 0.15 = 8.37$ กิโลกรัม

จากตัวอย่างข้างบนจะเห็นว่า แรงต้านดินที่ปลายเข็มในดินเหนียวอ่อนมีค่าน้อยมาก ฉะนั้นน้ำหนักบรรทุกของเข็มในดินเหนียวอ่อน จึงขึ้นอยู่กับ แรงต้านดินผิวข้างของเข็มเป็นสำคัญ

1.2 แรงต้านดินผิวข้างของเข็มในดินเหนียว สามารถคำนวณได้จากสูตร

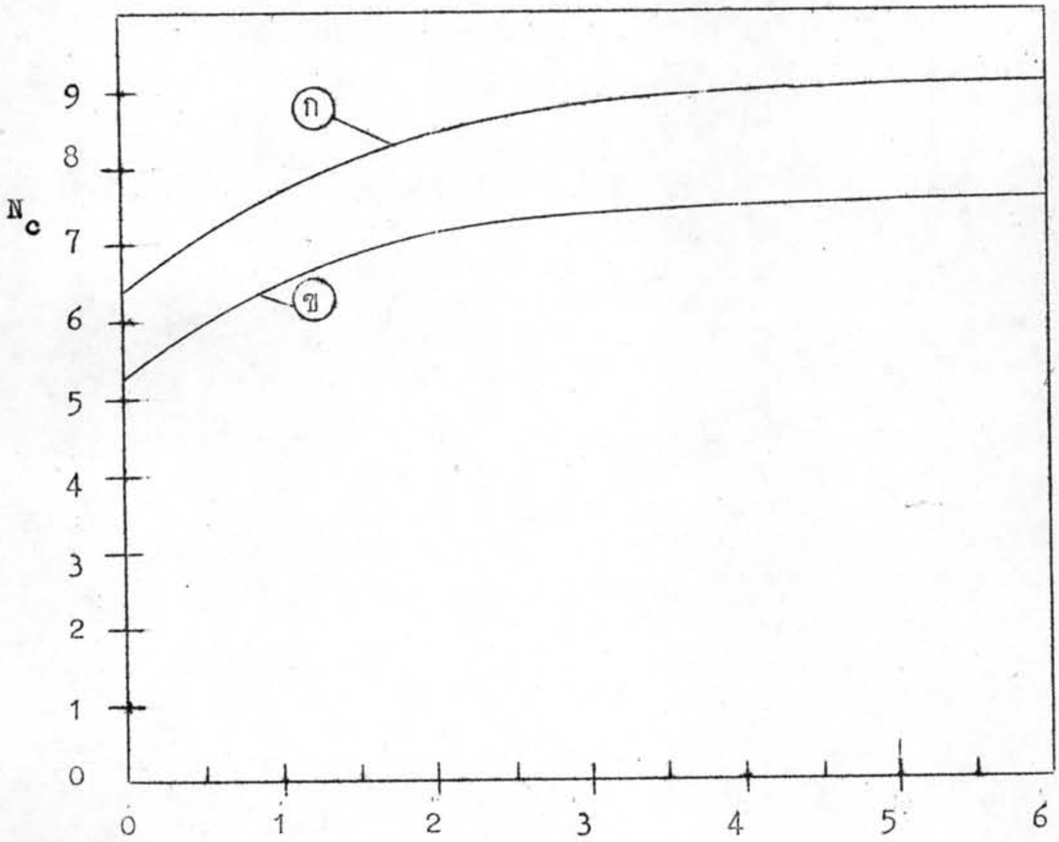
$$Q_s = A_s C_a \qquad \text{.............} (2)$$

โดยที่ A_s = พื้นที่ผิวข้างของเข็มส่วนที่จมในดิน

C_a = ค่าเฉลี่ยแรงเกาะตัวระหว่างดินกับผิวของเข็ม

1.3 การเกาะตัวระหว่างเข็มกับดินเหนียว

1.3.1 SKEMPTON (1959) กำหนด $\bar{C}$ เป็นค่าเฉลี่ยของแรงเฉือนของดินเหนียวที่ไม่สูญเสียลักษณะโครงสร้างเดิม เพราะฉะนั้น แรงเกาะตัวระหว่างดินกับผิวของเข็มจึงหาได้จากสูตร



อัตราส่วนระหว่างความลึกต่อความกว้างของฐานราก

หมายเหตุ 1. ค่า N_c ของดินเหนียวเมื่อ $\phi = 0$ เท่านั้น
2. กราฟ ก สำหรับฐานรากแบบจัตุรัสหรือวงกลม
กราฟ ข สำหรับฐานรากแบบยาว (**Long strip**)

รูปที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านดินต่อการกด

(จาก **SKEMPTON, 1951**)

$$c_a = \alpha \bar{c}$$

โดยที่ α = สัมประสิทธิ์การเกาะตัวระหว่างดินกับผิวของเข็ม

1.3.2 TOMLINSON (1957) กำหนดค่า α ตามค่า Cohesion ของดินเหนียว ดังรูปที่ 2 และพบว่า

ก. เปอร์เซ็นต์การเกาะตัวจะลดลงเมื่อดินเหนียวมี Stiffness มากขึ้น ดังรูปที่ 2

ข. เข็มเหล็กมีเปอร์เซ็นต์การเกาะตัวต่ำกว่าเข็มคอนกรีตในดินเหนียวประเภท Firm ถึง Stiff แต่เปอร์เซ็นต์การเกาะตัวจะแตกต่างกันเล็กน้อย เมื่อเข็มเหล็ก เข็มคอนกรีต และเข็มไม้ในดินเหนียวประเภท Soft ถึง Firm

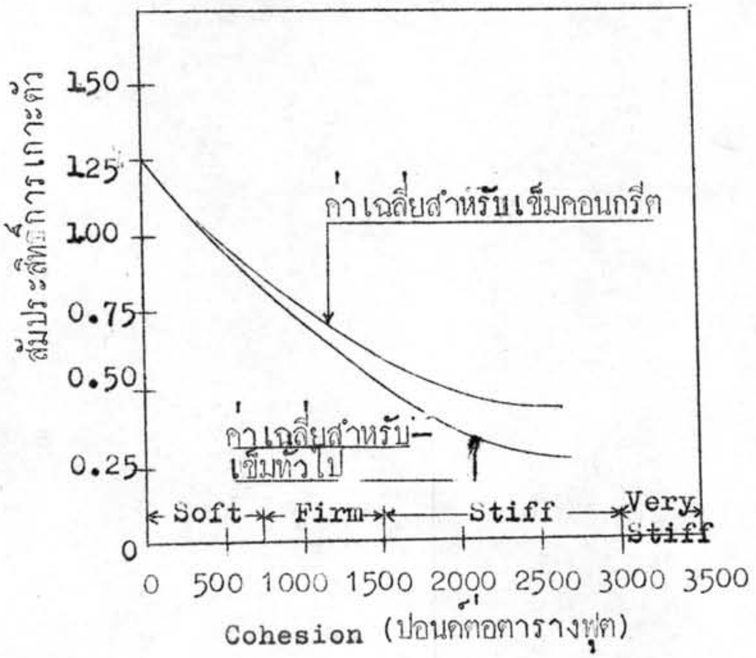
ค. ในดินเหนียว Stiff ช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างดินกับผิวของเข็มหลังจากตอกเข็มแล้วจะมาก แต่ดินเหนียวชนิด Soft ช่องว่างที่เกิดขึ้นจะถูกปิดโดยการเคลื่อนตัวของดินเหนียวที่อยู่รอบ ๆ เข็ม ช่องว่างที่เกิดขึ้นจะลดการเกาะตัว ทำให้แรงต้านดินผิวข้างของเข็มลดลง

ง. จากรูปที่ 3 การเกาะตัวจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของเข็มเพิ่มขึ้น และอัตราการเพิ่มจะสูงในดินเหนียวอ่อน

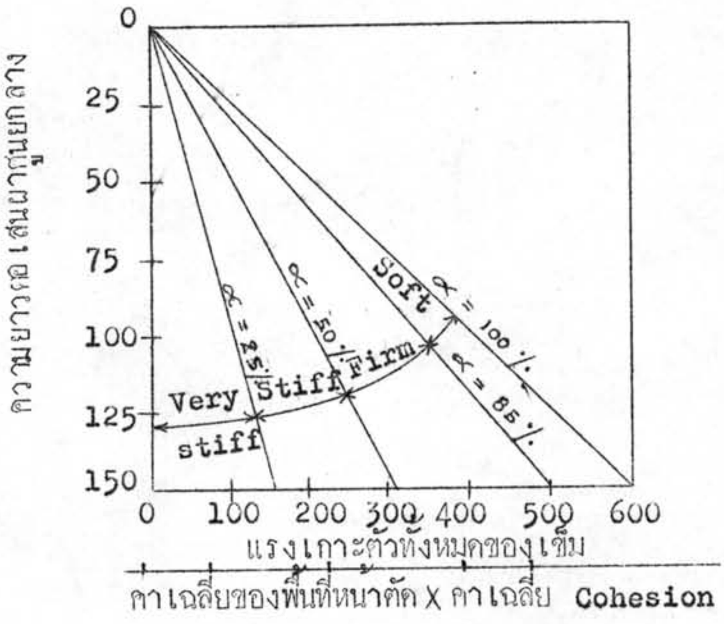
จ. รูปร่างของเข็มที่เรียวลงไปหาปลายเข็ม (Tapered piles) จะเพิ่มการเกาะตัวสูงขึ้นในดินเหนียวอ่อน แต่ก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นในดินเหนียวประเภทอื่น ๆ

2. การรับน้ำหนักของเข็มกลุ่มในดินเหนียว

2.1 ลักษณะการรับน้ำหนักของเข็มกลุ่มในดินเหนียว เมื่อมีน้ำหนักกดลงที่หัวเข็ม ตัวเข็มจะถ่ายแรงกดไปสู่ดินรอบ ๆ ดินที่อยู่ใกล้เข็มมากที่สุดจะได้รับแรงกดบีบมากที่สุด และเมื่อห่างออกไปจะลดลงเรื่อย ๆ จนหมด ลักษณะบริเวณที่ถูกแรงกดบีบในดินรอบ ๆ เข็ม (Stressed zone) จะมีรูปร่างและขนาดแตกต่างกันตามชนิดของเข็ม ชนิดดิน และขนาดของแรงกดที่หัวเข็ม เมื่อมีการตอกเข็มเป็นกลุ่มโดยระยะห่างแต่ละต้นใกล้ ๆ กัน ดินบริเวณที่ถูกแรงกดบีบนี้จะกระจายแรงดังกล่าวมาทับกัน (Stressed zone overlap) นั่นก็คือ เป็นการเพิ่มแรงกดบีบในดินมากขึ้นกว่าเมื่อมีเข็มเพียงต้นเดียว และน้ำหนักที่เข็มแต่ละต้นขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของดิน ฉะนั้น เมื่อตอกเข็มรวมเป็นกลุ่ม น้ำหนักที่เข็มแต่ละต้นในกลุ่มรับจึงมีค่าน้อยกว่าที่เข็มแต่ละต้นรับ



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การเกาะตัวกับค่า Cohesion ของดิน



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การเกาะตัวกับความยาวเข็ม

(จาก TOMLINSON, 1957)

ในเมื่อตอกเข็มเดี่ยว ๆ ส่วนที่ลดลงของน้ำหนักที่เข็มในกลุ่มรับได้ขึ้นอยู่กับขนาด และรูปร่างของกลุ่มเข็ม ระยะห่างระหว่างเข็มแต่ละต้นในกลุ่ม และความยาวของเข็มในกลุ่ม

2.2 TERZAGHI and PECK (1948) ได้หาน้ำหนักบรรทุกของเข็มกลุ่มในดินเหนียวที่มีการวิบัติแบบบล็อก โดยหาจากผลบวกของแรงต้านดินผิวข้างของเข็มกลุ่ม (Perimeter shearing resistance) และแรงต้านดินที่ปลายของเข็มกลุ่ม ที่มีพื้นที่ปลายเท่ากับบล็อก หรือหาจากสมการ

$$P_u = 1.3\ c\ N_c B\ W + 2L\ (B + W)\ C_1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \ (4.1)$$

หรือ $$P_u = 1.3\ c\ N_c B\ W + R\ L\ C_1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \ (4.2)$$

โดยที่ P_u = น้ำหนักบรรทุกประลัยของเข็มกลุ่ม

N_c = สัมประสิทธิ์แรงต้านดินที่ปลายเข็มต่อการกด

B = ด้านยาวของเข็มกลุ่ม

W = ด้านกว้างของเข็มกลุ่ม

R = เส้นรอบรูปของเข็มกลุ่ม

C = Cohesion ของดินเหนียวที่ปลายเข็มกลุ่ม

C_1 = Cohesion ของดินเหนียวรอบ ๆ เข็มกลุ่ม

L = ความยาวของเข็มส่วนที่จมในดิน

2.3 WHITAKER (1960) ได้กำหนดสูตรการหาน้ำหนักบรรทุกเข็มกลุ่มที่มีการวิบัติแบบบล็อก คือ

$$P_u = C_u \left[\left\{ 4\ (m - 1)\ s + \pi d \right\} L + N_c \left\{ (m - 1)s + d \right\}^2 \right] \ldots (5)$$

โดยที่ P_u = น้ำหนักบรรทุกประลัยของเข็มกลุ่ม

C_u = Undrained shear strength ของดิน

m = จำนวนแถวของเข็มกลุ่มแบบจัตุรัส

s = ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเข็ม

N_c = สัมประสิทธิ์แรงต้านดินที่ปลายเข็มต่อการกด ขึ้นอยู่กับอัตรา

ส่วนของความลึก และความกว้าง (รูปที่ 1, SKEMPTON, 1951)

L = ความยาวของเข็มส่วนที่จมในดิน

2.4 GAMAL ELDIN (1963) ได้กำหนดสูตรสำหรับการหาการพิบัติของเข็มกลุ่มในดินเหนียว ดังนี้

2.4.1 เข็มกลุ่มที่มีระยะห่างระหว่างเข็มมากจนการพิบัติเป็นแบบแต่ละต้น (Individually failure)

$$Pu = NQu \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(6)$$

โดยที่ Qu = น้ำหนักบรรทุกประลัยของเข็มเดี่ยว

N = จำนวนเข็มทั้งหมดในกลุ่ม

2.4.2 เข็มกลุ่มที่มีการพิบัติแบบบล็อก

$$Pu = RLCu + Aq_{ult.}$$

โดยที่ R = เส้นรอบรูปของเข็มกลุ่ม

A = พื้นที่ปลายของเข็มกลุ่ม วัดตามรอยพิบัติตามรูปที่ 4

L = ความยาวเข็มส่วนที่จมในดิน

Cu = Undrained shear strength ของดิน

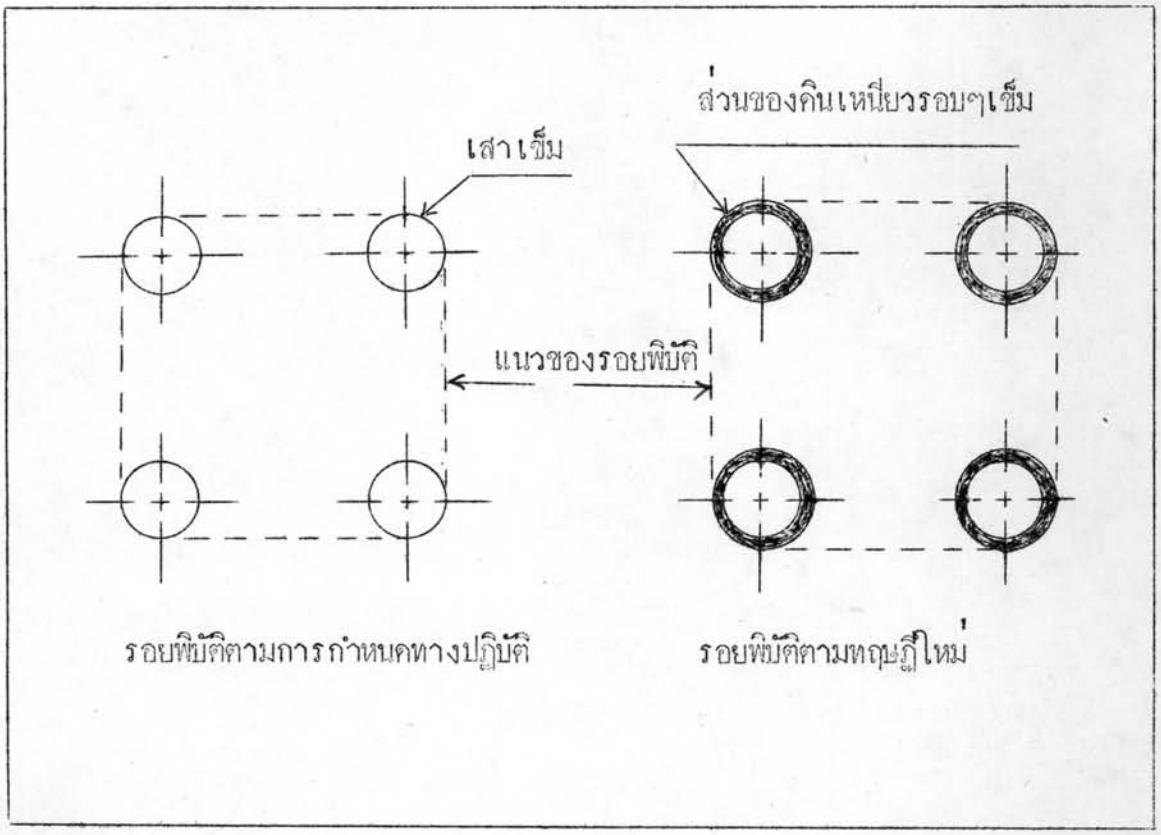
$q_{ult.}$ = แรงต้านที่ปลายเข็มเดี่ยวที่จุดพิบัติต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ปลายเข็ม

3. ประสิทธิภาพของเข็มกลุ่ม (Efficiency of pile group)

3.1 ประสิทธิภาพของเข็มกลุ่ม คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่เข็มต้นเดียวในเข็มกลุ่มต่อเข็มเดี่ยว เมื่อน้ำหนักบรรทุกถึงจุดพิบัติ

3.2 การหาประสิทธิภาพของเข็มกลุ่ม สูตรที่ใช้ส่วนมากเป็นสูตรทั่วไป (Empirical formulae) และไม่มีความสัมพันธ์เกี่ยวกับลักษณะของดินและความยาวของเข็ม สูตรที่นิยมใช้ คือ

3.2.1 วิธีการของ FELD (1943) ได้ใช้หลักการลดน้ำหนักบรรทุกของเข็มแต่ละต้นในกลุ่ม ตามจำนวนลูกศรที่โยงเข้าหาเข็มต้นใกล้เคียงในกลุ่ม เส้นโยงหนึ่งเส้นจะเป็นส่วนลดเศษหนึ่งส่วนสิบหก ของน้ำหนักบรรทุกของเข็ม (รูปที่ 5)



รูปที่ 4 แสดงรอยพิบัติของเข็มกลุ่ม

หอสมุดกลาง

3.2.2 สมการของ **Converse-Labarre** ได้ถูกใช้ใน **Uniform Building Code** และ **AASHO** specifcations (CHELLIS, 1961)

$$E = 1 - \theta \left[\frac{(n-1)\,m + (m-1)n}{90\,mn} \right] \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots(8)$$

โดยที่ E = ประสิทธิภาพของเข็มกลุ่ม

θ = **arc** tan d/s (องศา)

m = จำนวนแถวของเข็มกลุ่มแบบจัตุรัส

n = จำนวนเข็มในแถว

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของเข็ม, ฟุต

s = ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเข็มแต่ละต้น, ฟุต

BOLIN (1949) ได้นับเอาผลของเข็มในแนวทะแยง (Diagonal piles) (Moor - House and SHEEHAN, 1968 ดังสมการ

$$E = 1 - \frac{\theta}{2} \left[\frac{(n-1)m + (m-1)\,n}{90\,mn} \right] - \frac{\theta}{2\sqrt{2}} \left[\frac{(n-1)(m-1)}{45\,mn} \right] \ldots\ldots\ldots(9)$$

4.2.3 สมการของ LOS ANGELES GROUP ACTION กรณีที่ θ เป็นมุมเล็ก จึงเท่ากับมุมเรเดียน สูตรจะกลายเป็น

$$E = 1 - \frac{d}{\pi\,smn} \left[(n-1)\,m + (m-1)n + \sqrt{2}\,(m-1)(n-1) \right] \ldots\ldots\ldots\ldots(10)$$

4.2.4 สมการของ Seiler - Keeney (1944)

$$E = \left[1 - \frac{11s}{7(s^2-1)} \; \frac{(m+n-2)}{(m+n-1)} \right] + \frac{0.3}{m+n} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(11)$$

4. อัตราส่วนการทรุดตัว (settement ratio)

หมายถึงอัตราส่วนการทรุดตัวของเข็มในเข็มกลุ่มกับเข็มเดี่ยว ณ จุดพิบัติ หรือช่วงก่อนพิบัติที่เท่ากันของเข็มเดี่ยวและเข็มกลุ่ม

5. จุดพิบัติของเข็ม

จากการทำ Pile load tests บางครั้ง ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดกับการทรุดตัว จะแสดงจุดพิบัติของกราฟอย่างชัดเจน เช่นรูปที่ 6 แต่บางครั้งความสัมพันธ์นี้จะไม่แสดงจุดพิบัติอย่างเด่นชัด เช่นรูปที่ 7 เพราะฉะนั้น การที่จะถือว่า จุดพิบัติของการทดสอบเข็มนั้นอย่างไร จึงมี มาตรฐานที่ใช้ต่าง ๆ กัน ดังนี้

5.1 การกำหนดน้ำหนักพิบัติของเข็ม จากรายงานของ JOHNSON and KAVANAGH (1968) ได้รวบรวมการกำหนดน้ำหนักพิบัติของเข็มไว้ ดังนี้

5.1.1 AASHO กำหนดจุดพิบัติของเข็มเมื่อน้ำหนักกดที่ไม่ทำให้การทรุดตัวสุทธิ (Net settlement = Gross settlement less rebound) เกิน 6.35 มิลลิเมตร (1/4 นิ้ว)

5.1.2 International Conference of building officials U.S.A. กำหนดจุดที่น้ำหนักกดที่ทำให้การทรุดตัวทั้งหมดของเข็ม (Total settlement building elastic deformation of pile) ไม่เกิน 0.254 มิลลิเมตร ต่อน้ำหนักกดหนึ่งตัน โดยการทรุดตัวจะไม่เกิดขึ้นภายใน 24 ชั่วโมง

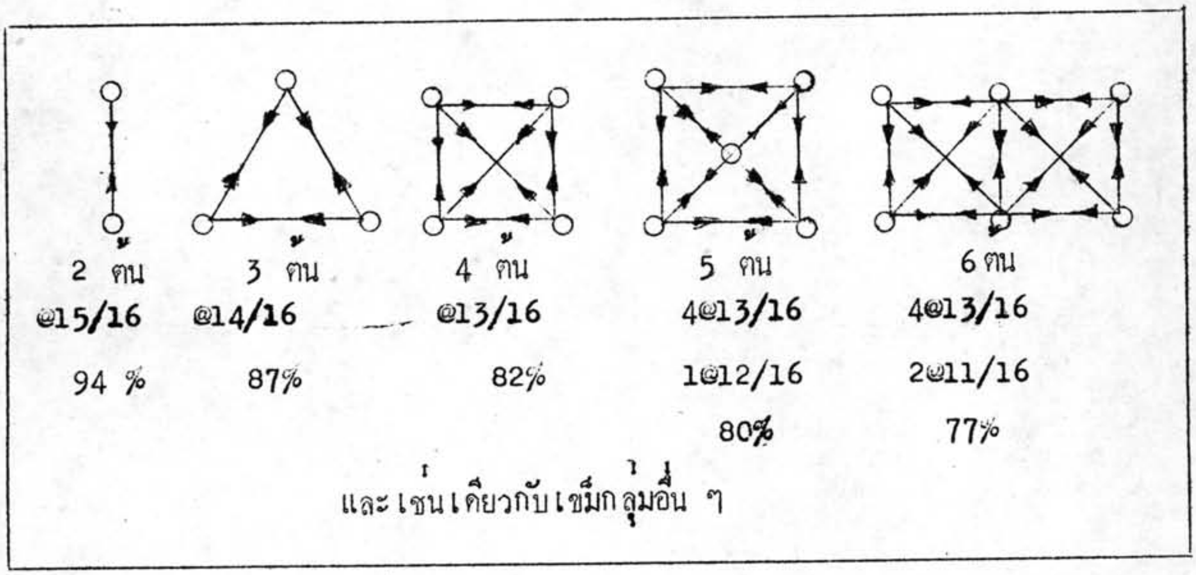
5.1.3 New York City building code and uniform building code กำหนดน้ำหนักกดที่ทำให้การทรุดตัวสุทธิไม่เกิน 0.254 มิลลิเมตร ต่อน้ำหนักกดหนึ่งตัน

5.1.4 กำหนดจากน้ำหนักกดที่จุดที่เส้นสัมผัสของกราฟส่วนบนและส่วนล่างตัดกัน (จากรายงานของ JOHNSON and KAVANAGH, 1968)

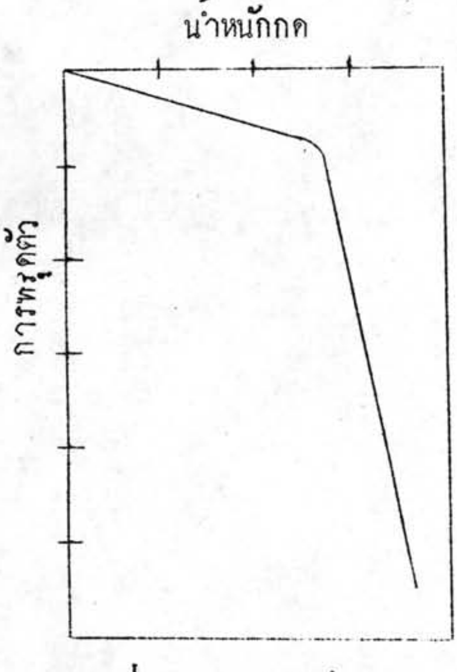
5.1.5 Texas highway department กำหนดจุดที่มีความชันของ Gross Settlement เป็น 4 เท่าของความชันของ Elastic deformation ของเข็ม ถือว่าเป็นน้ำหนักกดที่พิบัติ

5.1.6 W.H. Rabe'Bureau of bridges'state of Ohio กำหนดน้ำหนักกดที่จุดที่มีการทรุดตัวทั้งหมดเกิน 0.762 มิลลิเมตร ต่อตันของน้ำหนักกดที่เพิ่มขึ้น (Addition -al load)

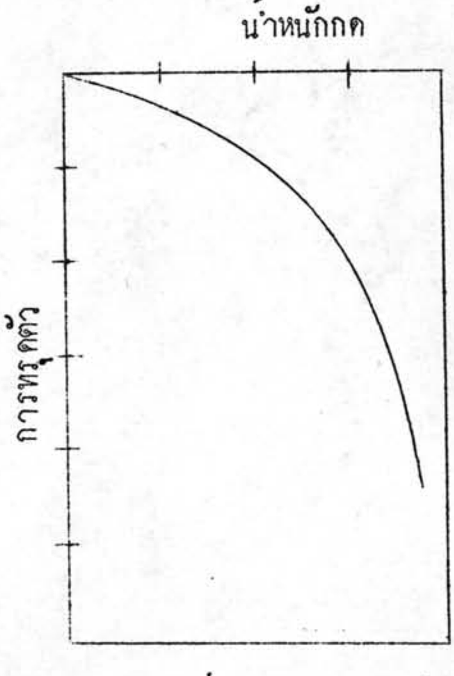
5.1.7 D.R.L. Nordlung, Reymond Concrete pile company กำหนด



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพของเข็มกลุ่มโดยวิธีการของ Fold



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์แบบ Idealized



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์แบบ Normal

(จาก JOHNSON and KAVANAGH, 1968)

จุดที่มี Gross settlement เกิน 1.27 มิลลิเมตรต่อตันของน้ำหนักที่กด หรือหาจาก Plastic settlement จากการกดแล้วปล่อย(Cyclical loading) เกิน 0.762 มิลลิเมตรต่อตันของน้ำหนักกดที่เพิ่ม

5.1.8 Federal construction council (1962) กำหนดจุดที่มีความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกด กับการทรุดตัว ที่มีการทรุดตัวอย่างมากในเวลาอันสั้น โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่กด (where penetration no longer is proportional to load)

5.1.9 Unlform building code U.S.A. กำหนดจากจุดที่อัตราการเพิ่มของการทรุดตัวกับการเพิ่มของน้ำหนักกด มากกว่าอัตราตอนแรกมาก ๆ

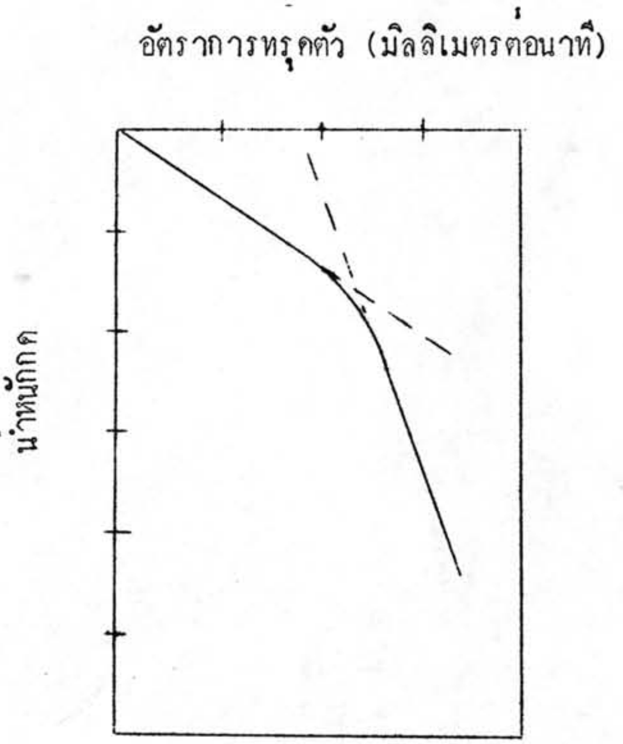
5.1.10 TERZAGHI (1948) กำหนดจุดพิบัติเมื่อน้ำหนักกดทำให้การทรุดตัวเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ของเส้นผ่าศูนย์กลางของเข็ม

5.1.11 HOUSEL'S METHOD กำหนดจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเพิ่มการทรุดตัวของการเพิ่มน้ำหนักกดภายใน 30 นาที กับน้ำหนักกดทั้งหมด โดยถือจุดที่ตัดกันระหว่างเส้นสัมผัสของกราฟเป็นจุดพิบัติ (ดูรูปที่ 8)

5.2 การกำหนดการทรุดตัวพิบัติของเข็ม จากรายงานของ JOHNSON and KAVANAGH(1968) ได้รวบรวมการกำหนดการทรุดตัวพิบัติของเข็มไว้ ดังนี้

5.2.1 New York City Planning Code กำหนดน้ำหนักพิบัติจากการทรุดตัวสุทธิ (Net settlement) ของเข็ม 19.05 มิลลิเมตร

5.2.2 Federal Construction Council (1962) กำหนดจุดที่การทรุดตัวทั้งหมด (Gross-settlement) เกิน 25.4 มิลลิเมตร หรือกำหนดจากจุดที่มีการทรุดตัวเกินจากที่กำหนด ภายในเวลาที่กำหนดไว้



รูปที่ 8 วิธีการของ HOUSEL

(จาก JOHNSON and KAVANAGH,1968)