

# การศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ ในชั้นดินกรุงเทพฯ

## Study of Large Diameter Bored Pile Capacity Behavior in Bangkok Subsoil

### คำนำ

การก่อสร้างเสาเข็มซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างอาคาร ที่ทำหน้าที่ส่งถ่ายน้ำหนักขององค์อาคารลงมาสู่ระบบฐานรากเสาเข็มที่มีลักษณะของชั้นดินที่รองรับอยู่ การกำหนดค่าน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการออกแบบฐานราก คุณสมบัติที่สำคัญของเสาเข็มต้องการออกแบบก็คือ ค่าน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มสูงสุด เพื่อใช้เป็นตัวกำหนดค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Factor of Safety, F.S.) และให้เสาเข็มที่ต้องการก่อสร้างนั้นมีความปลอดภัยและประหยัดค่าก่อสร้าง ในงานออกแบบการประเมินค่าน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มสูงสุดจะมีแนวทางที่ได้จากการประยุกต์ใช้หลักการทางวิศวกรรมปฐพี และข้อมูลจากผลการทดสอบบรรทุกน้ำหนักเสาเข็มที่การติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมในสนาม จนถึงจุดค่าน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มสูงสุดและลักษณะการถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มที่ระดับความลึกต่างๆ

การศึกษาครั้งนี้เพื่อรวบรวมข้อมูล ผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ นำมาแปลผลและวิเคราะห์ถึง พฤติกรรมการพัฒนาแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มที่ระดับความลึกต่างๆ เปรียบเทียบการถ่ายแรงของเสาเข็มลงสู่ชั้นดินตามความลึกต่างๆ และค่าอัตราส่วนปลอดภัย จากผลของลักษณะการถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มในชั้นดินที่ระดับความลึกต่างๆ ในชั้นดินที่มีลักษณะแตกต่างกัน ตลอดจนการวิเคราะห์กลับจากข้อมูลผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในสนามเพื่อหาค่า พารามิเตอร์ต่างๆ ตามทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบเสาเข็ม และศึกษาถึงพฤติกรรมการรับแรงหรือน้ำหนักที่มากระทำต่อเสาเข็มที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรม เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาพัฒนาองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับงานเสาเข็ม และงานทางด้านวิชาการที่เกี่ยวข้องต่อไป

### วัตถุประสงค์

1. ศึกษาและวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่มีการแยกการทดสอบระหว่างแรงด้านที่ปลาย(End Bearing) และแรงเสียดทานที่ผิว (Skin Friction)
2. ศึกษาลักษณะการถ่ายน้ำหนัก (Load Transfer) ของเสาเข็มเจาะที่ระดับความลึกต่างๆ ในชั้นดินกรุงเทพฯ
3. ศึกษาพฤติกรรมภายใต้การรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรม
4. เพื่อพิจารณาในการเลือกใช้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยและวิธีการทดสอบเสาเข็มที่เหมาะสม

### ขอบเขตของงานวิจัย

1. ข้อมูลในการศึกษาเป็นผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะ ที่ได้รับจากบริษัทวิศวกรที่ปรึกษาและบริษัทก่อสร้างทดสอบเสาเข็ม และข้อมูลจากผลการวิจัยอื่นๆ
2. การศึกษาใช้เฉพาะข้อมูลจากการทดสอบเสาเข็มเจาะที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมไว้ และเป็นการทดสอบเสาเข็มที่สามารถแยกผล การทดสอบระหว่างแรงด้านที่ปลาย และแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม
3. การศึกษาดำเนินการในสภาพชั้นดินกรุงเทพฯ ซึ่งมีผลการเจาะสำรวจดินในบริเวณที่ทำการทดสอบเสาเข็มไว้

## การตรวจเอกสาร

### การรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม

เสาเข็มภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกจะเกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ของเสาเข็ม ส่วนหนึ่งเกิดจากแรงเสียดทานของมวลดินบริเวณผิวเข็มโดยรอบ (Skin Friction Resistance) อีกส่วนหนึ่งเกิดจากแรงต้านของดินที่ปลายเข็ม (End Bearing Resistance) แรงเสียดทานของดินที่ผิวเข็มและแรงต้านของดินที่ปลายเข็มจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสภาพของชั้นดิน

### การประมาณการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็ม

การรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (Ultimate Load) ของเสาเข็ม โดยสมการที่ซึ่งจะรวมน้ำหนักที่ต้านทานที่ปลายเสาเข็มกับแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มทั้งหมด ที่ได้จากความสัมพันธ์กันระหว่างดินและเสาเข็ม ลบด้วยน้ำหนักเสาเข็มดังสมการที่ 1

$$Q_{ult} = Q_s + Q_b - W_p \quad (1)$$

โดยที่

$$Q_{ult} = \text{กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็ม}$$

$$Q_s = \text{แรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็ม}$$

$$Q_b = \text{แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม}$$

$$W_p = \text{น้ำหนักของเสาเข็ม}$$

#### 1. การคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยที่ผิวเสาเข็ม

##### ก. หน่วยแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มในชั้นดินทราย

วิธีคำนวณแรงเสียดทานของเสาเข็มในดินที่เมื่อเกิดหน่วยแรงเฉือนในสภาพระบายน้ำที่เหมาะสมกับดินทรายที่มีสภาพระบายน้ำได้ดี สมมุติฐานของแรงเสียดทานเช่นเดียวกับกรณีวางวัตถุบนผิวที่มีความฝืดโดยมีค่าแรงเสียดทาน ในกรณีของเสาเข็มแรงกระทำตั้งฉากบนผิวจนเกิดแรงเสียดทาน คือ แรงดันดินรอบเสาเข็ม ดังนั้นค่าหน่วยแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นสมการที่ 2

$$fs = \sigma'_h \tan \delta \quad (2)$$

โดยที่ค่า  $\sigma'_h$  เท่ากับ  $(K\sigma'_v)$  ดังสมการที่ 3

$$fs = K\sigma'_v \tan \delta \quad (3)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} fs &= \text{ค่าหน่วยแรงเสียดทาน} \\ K &= \text{สัมประสิทธิ์แรงดันดินรอบเสาเข็ม } (\sigma'_h/\sigma'_v) \\ \sigma'_h &= \text{หน่วยแรงในแนวนอนของชั้นดินรอบเสาเข็ม} \\ \sigma'_v &= \text{หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้งของชั้นดินรอบเสาเข็ม} \\ \tan \delta &= \text{สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างดินกับผิวเสาเข็ม} \end{aligned}$$

ค่า  $K$  และ  $\tan \delta$  ที่ใช้คำนวณได้มาจากการวิเคราะห์หักกลับจากผลการทดสอบเสาเข็มในสนามในขณะที่เสาเข็มกระทำต่อชั้นดินทั้งในสภาวะที่เป็น Static( $K_s$ ), สภาวะ Active( $K_a$ ) และสภาวะ Passive( $K_p$ ) ซึ่งพบว่ามีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของดิน ความแตกต่างของผิวเสาเข็ม ผลกระทบเนื่องจากเทคนิคการก่อสร้างเสาเข็มที่มีผลต่อความแน่นของดินรอบเสาเข็ม โดยที่พจน์ของค่า  $K \tan \delta$  ไม่สามารถหาค่าได้โดยตรง จึงได้รวมพารามิเตอร์ทั้งสองไว้ด้วยกัน คือ  $(\beta = K \tan \delta)$  ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์หย้อนกลับจากผลการทดสอบเสาเข็มได้ง่ายกว่า สำหรับค่า  $\delta$  ซึ่งจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุของตัวเสาเข็มที่ทำการก่อสร้าง

#### ข. หน่วยแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มในชั้นดินเหนียว

การวิเคราะห์โดยระบบหน่วยแรงประสิทธิผลจะอธิบายค่าของหน่วยแรงเสียดทานรอบเสาเข็มได้ถูกต้องตามทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติข้อมูลพารามิเตอร์ของดินแบบประสิทธิผลจะหาค่าได้ง่ายในเฉพาะดินทราย แต่ในชั้นดินที่มีความเชื่อมแน่นหรือดินเหนียว การทดสอบในสภาพไม่ระบายน้ำจะทำให้สะดวกกว่า เช่น การทดสอบในสนามด้วยวิธีการทดสอบ Standard Penetration Test และทำการแปลงให้เป็นหน่วยแรงรับแรงเฉือนได้ ดังนั้นค่าหน่วยแรงเสียดทานโดยประมาณของดินที่มีความเชื่อมแน่นคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$f_s = \alpha S_u \quad (4)$$

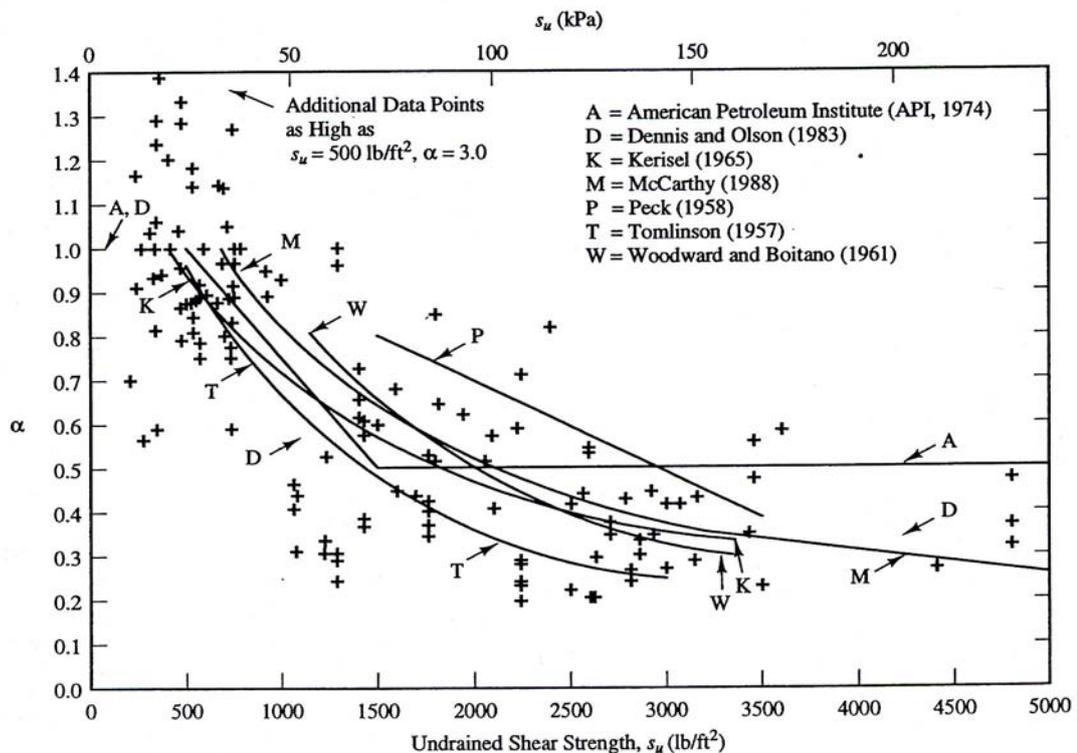
เมื่อ

$f_s$  = ค่าหน่วยแรงเสียดทาน

$\alpha$  = ค่าตัวประกอบความยึดแน่น (Adhesion Factor)

$S_u$  = กำลังรับแรงเฉือนของดินรอบเสาเข็มแบบไม่ระบายน้ำ

โดยค่า Adhesion Factor( $\alpha$ ) ที่นำมาใช้ในการคำนวณมาจากการวิเคราะห์ห้กลับจากผลการทดสอบเสาเข็มในสนาม มีค่าแตกต่างกันขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ระยะเวลาหลังก่อสร้างเสาเข็ม ชนิดของดิน ลักษณะของผิวของเสาเข็ม ผลกระทบเนื่องจากเทคนิคการก่อสร้างเสาเข็มที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพกำลังของดินรอบเสาเข็ม รวมทั้งตำแหน่งของเสาเข็มในชั้นดินที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน ซึ่งค่า  $\alpha$  ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์หน่วยแรงรับแรงเฉือนสูงสุดของชั้นดินได้จาก ผลการวิจัยที่ผ่านมาได้จากการวิเคราะห์ห้กลับผลการทดสอบเสาเข็มและจากการทดสอบหน่วยแรงเฉือนของดิน ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Undrained Shear Strength กับค่า Adhesion Factor,  $\alpha$

ที่มา : Coduto (1994)

## 2. การคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยที่ปลายเสาเข็ม

ความสามารถของแรงต้านประลัยจากปลายเสาเข็ม ซึ่งจะขึ้นอยู่กับผลกระทบของการก่อสร้างเปลี่ยนแปลงสภาพหน่วยแรง ความแน่นตัวของชั้นดินใต้ปลายเสาเข็ม รวมทั้งรูปแบบการวิบัติของดินที่มีระยะฝังปลายลึกกว่ากรณีฐานรากแผ่ดิน ทำให้ค่าแรงต้านปลายเสาเข็มต่างจากค่าของฐานรากแผ่ จึงปรับค่าสัมประสิทธิ์หลากหลายด้วยกัน

### ก. แรงต้านที่ปลายเสาเข็มในชั้นดินทราย

โดยที่ช่วงปลายของเสาเข็มอยู่ในชั้นดินทรายที่มีค่าแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion) เท่ากับศูนย์ดังสมการที่ 5

$$Q_b = A_b \sigma'_v N_q \quad (5)$$

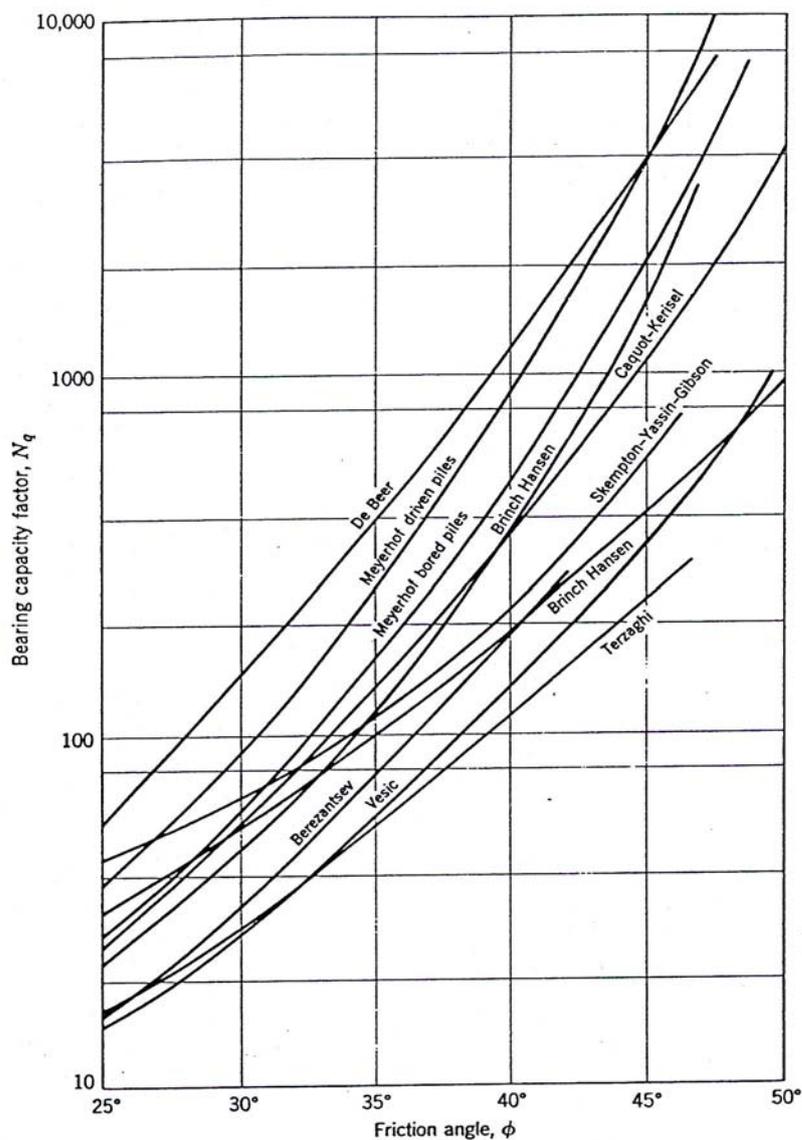
เมื่อ

$$A_b = \text{พื้นที่รับแรงต้านบริเวณปลายเสาเข็ม}$$

$$\sigma'_v = \text{หน่วยแรงประลัยผลในแนวตั้งของชั้นดินรอบเสาเข็ม}$$

$$N_q = \text{Bearing Capacity Factor}$$

ในการวิเคราะห์ค่า Bearing Capacity Factor ( $N_q$ ) เพื่อหาค่าแรงต้านที่ปลายเสาเข็มของงานวิจัยอื่นๆ ที่ได้ทำการศึกษาผ่านมา ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ย้อนกลับจากผลการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีการต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเสียดทานภายใน กับค่า Bearing Capacity Factor ( $N_q$ )  
ที่มา : Lambe (1979)

ข. แรงดันที่ปลายเสาเข็มในชั้นดินเหนียว

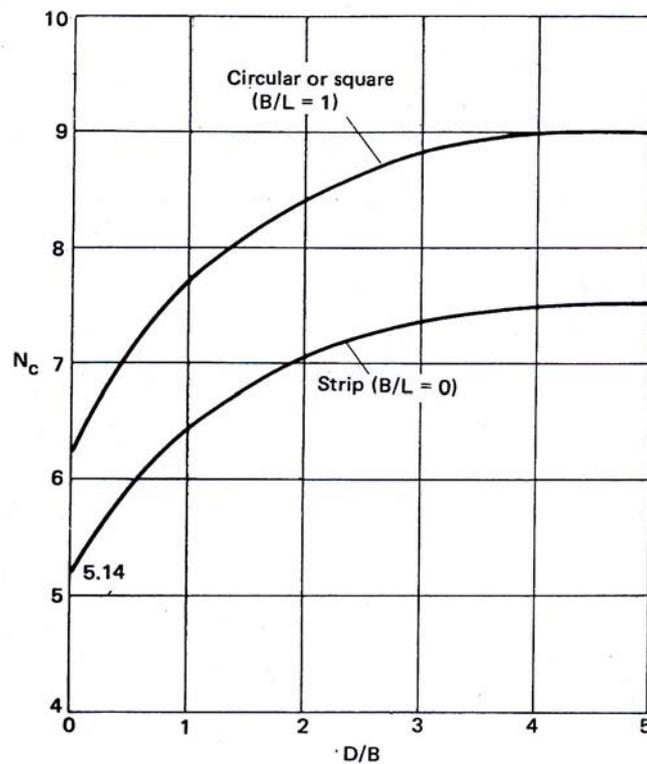
โดยที่ช่วงปลายของเสาเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวในขณะที่มีมุมเสียดทานภายใน ( $\phi$ ) เท่ากับศูนย์ดังสมการที่ 6

$$Q_b = A_b S_u N_c \quad (6)$$

เมื่อ

$A_b$	=	พื้นที่รับแรงต้านบริเวณปลายเสาเข็ม
$S_u$	=	กำลังรับแรงเฉือนของดินรอบเสาเข็มแบบไม่ระบายน้ำ
$N_c$	=	Bearing Capacity Factor

โดยค่า Bearing Capacity Factor ( $N_c$ ) ตามทฤษฎีของ Skempton, 1951 ค่า  $N_c$  จะเท่ากับ 9 เมื่อมุมเสียดทานภายใน ( $\phi$ ) เท่ากับศูนย์ในกรณีที่ดินมีลักษณะเป็น Cohesive Soil ดังแสดงในภาพที่ 3



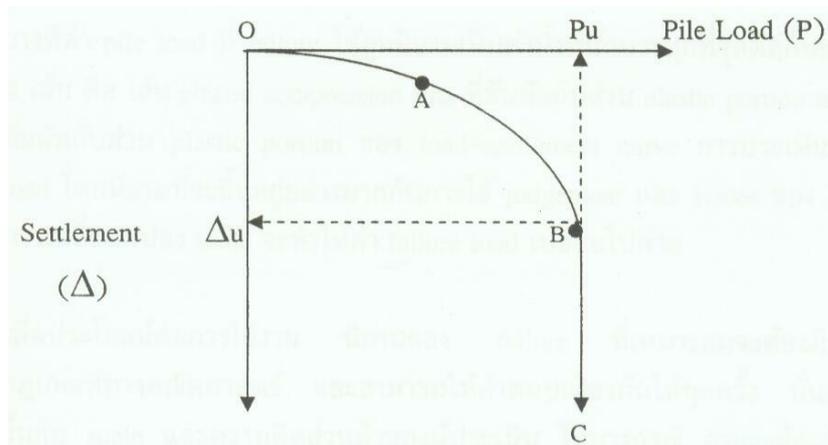
ภาพที่ 3 ค่า Bearing Capacity Factor ( $N_c$ ) ตามทฤษฎีของ Skempton

ที่มา : Lambe (1979)

### พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็ม

พฤติกรรมของเสาเข็มภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่กระทำ โดยลักษณะเกิดการทรุดตัวที่เกิดขึ้นตามทฤษฎีอีลาสติก (Elastic Theory) เฉพาะในช่วงแรกในขณะที่น้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัว

แบบเส้นตรงเรียกว่า การทรุดตัวต่ำ (Elastic Range) ช่วงที่ 2 น้ำหนักบรรทุกยังคงเป็นการทรุดตัว เช่นกันแต่ไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear) หรือที่เรียกว่า Elasto-Plastic Range โดยชั้นดินรอบข้างและ ปลายจะมีส่วนรับแรงมากขึ้นจนถึงจุดน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ที่ทำให้เสาเข็มเคลื่อนตัวลงตามแรง ดึงคูดของโลก ต่อจากช่วงนี้ก็จะเคลื่อนที่เข้าสู่ช่วงสุดท้ายที่เรียกว่าช่วงพลาสติก (Plastic Range) ในช่วงนี้น้ำหนักบรรทุกสูงสุดจะยังคงตัวไม่เปลี่ยนแปลง แต่เสาเข็มจะเคลื่อนที่ลงด้วยอัตราคงที่ ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม  
ที่มา : มนูญ (2545)

Fellenius (1980) ได้สรุปการประเมินค่าน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มดังนี้

1. สำหรับเสาเข็มที่มีความแข็งแรงกว่าชั้นดินค่าน้ำหนักสูงสุด จะเกิดขึ้นเมื่อเสาเข็มเคลื่อนตัวทรุดลงอย่างรวดเร็วภายใต้น้ำหนักคงที่ หรือมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยซึ่งเรียกว่า เสาเข็มทรุดตัวลงไป (Pile Plunge) การทรุดตัวลงทันทีดังกล่าวนี้จะไม่ขึ้นอยู่กับความสามารถในการรับน้ำหนักของชั้นดินและระบบของวิธีที่ใช้ในการทดสอบ

2. น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มที่เกิดขึ้นมากกว่า 10% ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มนั้นยังไม่รวมถึงค่าการเสียรูปแบบอีลาสติก (Elastic Deformation) ที่มีค่ามากในกรณีของเสาเข็มยาว

3. กราฟแสดงน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัว (Load-Settlement Curve) ขึ้นอยู่กับสเกลของกราฟที่ใช้ในการวิเคราะห์ ทำให้ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดมีค่าเปลี่ยนแปลง

4. นิยามของจุดพิบัติที่เหมาะสมจะต้องมีพื้นฐานที่สามารถอธิบายได้ ในเกณฑ์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับสเกลและผลจากการวิเคราะห์ของผู้ประเมินค่าจากการทดสอบ

### การถ่ายน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

การถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากเสาเข็มลงสู่ดินนั้น จะพิจารณาจากเสาเข็มความยาว  $L$  ดังแสดงในภาพที่ 5 (ก) ให้น้ำหนักที่กระทำบนเสาเข็มที่ระดับผิวดินเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จาก 0 ถึง  $Q_{(z=0)}$  ในส่วนของน้ำหนักที่กระทำนี้จะถูกต้านโดยแรงเสียดทานด้านข้างที่เกิดตามรูปร่าง (Shaft) กำหนดเป็น  $Q_1$  และในส่วนของดินบริเวณปลายของเสาเข็ม (Pile Tip) กำหนดเป็น  $Q_2$  และถ้าทำการวัดน้ำหนักที่กระทำตามรูปร่างของเสาเข็ม  $Q_{(z)}$  ที่ระดับความลึก  $Z$  ใดๆ จะได้ดั่งเส้นโค้งที่ 1 ของภาพที่ 5 (ข) ค่าแรงเสียดทานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่  $f_{(z)}$  ที่ระดับความลึก  $Z$  สามารถหาได้จากสมการที่ 7

$$f_{(z)} = \frac{\Delta Q(z)}{(p)(\Delta z)} \quad (7)$$

เมื่อ

$P$  = เส้นรอบรูปของเสาเข็ม

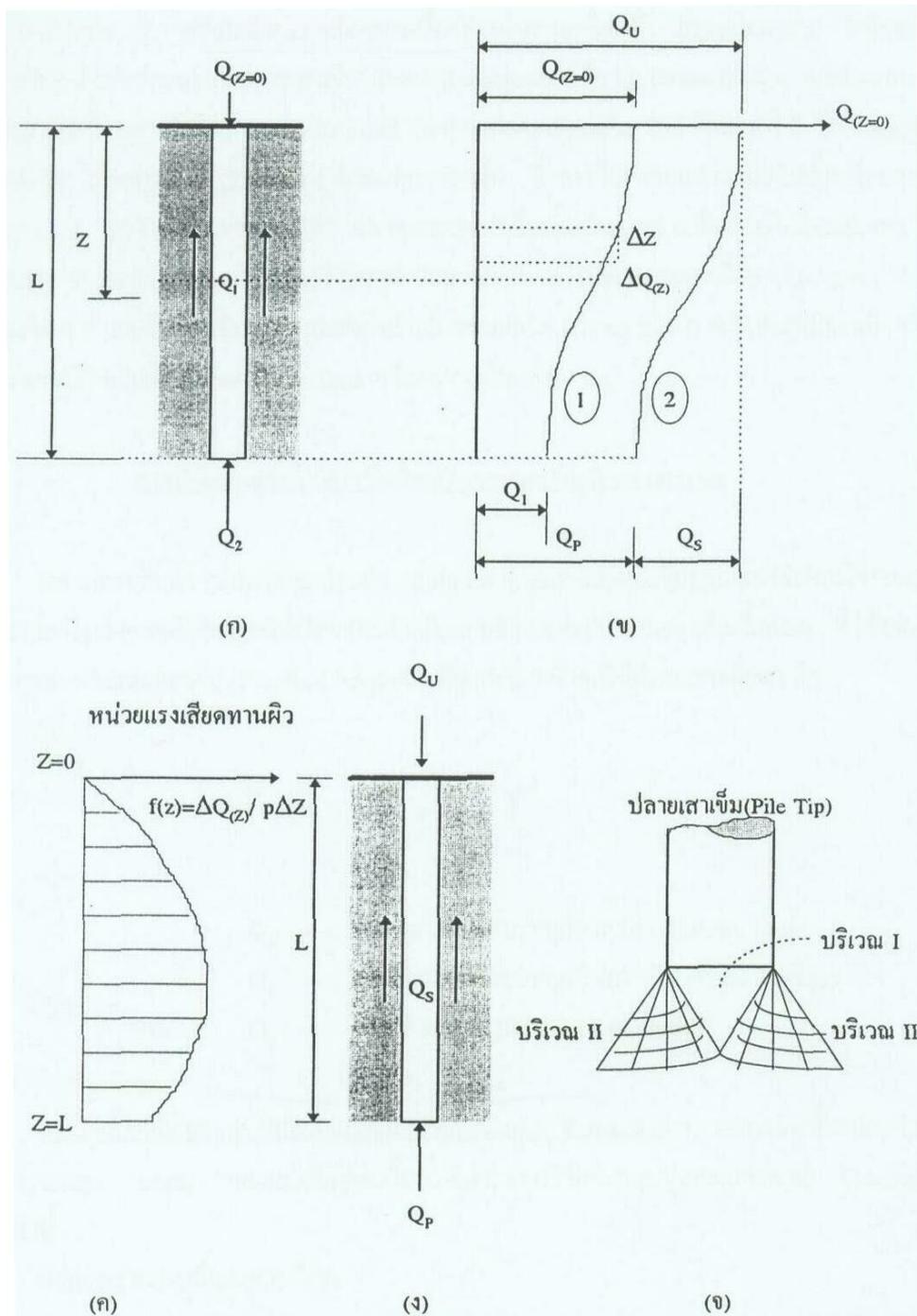
ค่าของ  $f_{(z)}$  กับระดับความลึกแสดงไว้ในภาพที่ 5 (ค) ถ้าน้ำหนักที่กระทำ  $Q$  ที่ผิวดินเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ค่าแรงจะเกิดขึ้นอย่างเต็มที่ (Full Mobilize) เมื่อการเคลื่อนตัวของดินและเสาเข็มเกิดขึ้นประมาณ 5-10 มม. โดยไม่คำนึงถึงขนาดและความยาวของเสาเข็ม  $L$  แต่อย่างไรก็ตามค่าแรงต้านสูงสุดที่ปลายเสาเข็มจะไม่ได้รับอย่างเต็มที่จนกว่าปลายเสาเข็มจะจมลงประมาณ 10 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์ และ 25 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักบรรทุกทุกระยะ (Ultimate Load) ตามลำดับ ดังภาพที่ 5 (ก) ซึ่ง  $Q_{(z=0)} = Q_u$

$$Q_1 = Q_s \quad (8)$$

$$Q_2 = Q_p \quad (9)$$

สำหรับ  $Q_s$  หรือหน่วยแรงเสียดทานนี้มาจากการเคลื่อนตัว (Displacement) ที่น้อยที่สุดเปรียบเทียบกับค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (Point Resistance) หรือ  $Q_p$  การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในสนาม ผลที่ได้จากเสาเข็มกลวงเป็นการพิบัติบริเวณปลายเสาเข็ม ซึ่ง

การบีบอัดจากสภาพการรับน้ำหนักบรรทุกทุกจากสาเหตุของ  $Q_p$  แสดงไว้ในภาพที่ 5 (ง) ส่วนฐานเสาเข็ม นั้นเป็นฐานรากลึกและดินก็เกิดการบีบอัดแบบเฉือนทะลุ (Punching Mode) แสดงไว้ในภาพที่ 5 (จ) ซึ่งหมายถึงบริเวณสามเหลี่ยมหรือบริเวณ โซน I แต่ถ้าเกิดบริเวณปลายเสาเข็มในชั้นทรายแน่น (Dense Sand) หรือดินเหนียวแข็ง (Stiff Clayey Soil) จะเกิดบริเวณ โซน II

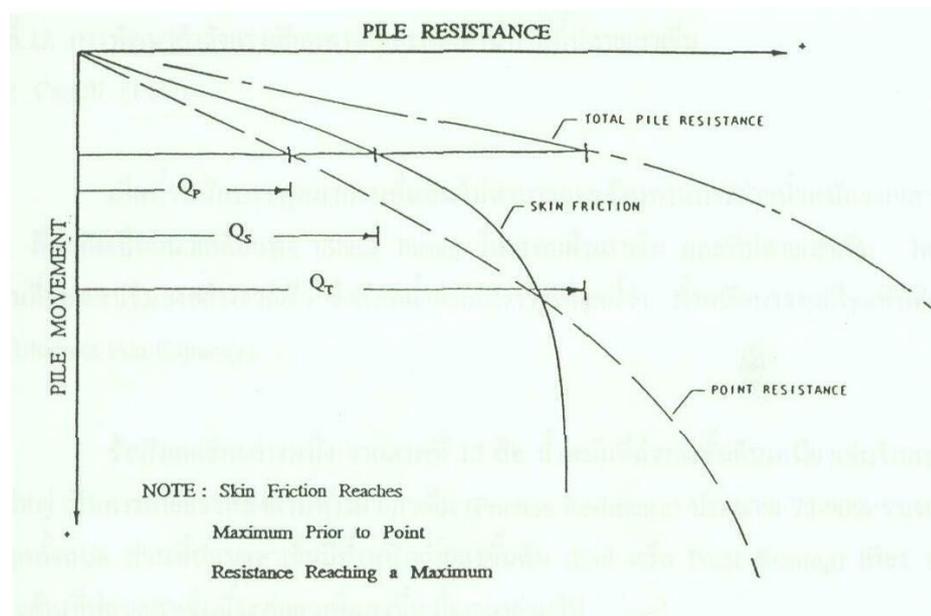


ภาพที่ 5 ลักษณะการถ่ายน้ำหนักบรรทุกทุกตามหลักกลศาสตร์ของเสาเข็มลงสู่ชั้นดิน

ที่มา : Das (1990)

Tomlinson (1969) อธิบายว่าพฤติกรรมของเสาเข็มที่ส่งถ่ายแรงตามผิว (Skin Friction) ให้กับชั้นดิน โดยเสาเข็มจะรับแรงอัดจากค่าสูงสุดที่หัวเสาเข็มและค่อยๆต่ำลงจนถึงค่าแรงอัดที่น้อยที่สุดที่ปลายเสาเข็ม ในขณะที่ค่าแรงเสียดทานสะสมที่ระดับปลายเสาเข็มจะเพิ่มเข้าสู่จุดสูงสุด ฉะนั้นจะทำให้ค่าแรงเสียดทานสะสมแปรผันตามด้วย โดยที่ค่าแรงเสียดทานที่ปลายจะเป็นค่า Yield Load ที่ปลายเสาเข็มด้วย ซึ่งสัดส่วนของค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม ( $P_{E_{Tip}}$ ) จะเกิดเพียง 1/3 End Bearing ของค่าแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม ในขณะที่ค่าแรงเสียดทานได้พัฒนาเต็มที่แล้ว

Corroll (1987) ได้สรุปว่าลักษณะการพัฒนากำลังของแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มเป็นสาเหตุจากคุณสมบัติทางด้านอีลาสติก ส่วนแรงต้านที่ปลายจะถูกพิจารณาเมื่อเกิดการเคลื่อนที่ลงมากกว่า 10% ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มตอก และอาจถึง 30% ของเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มเจาะ แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มจะถูกพัฒนาจนถึงค่าสูงสุดก่อนการพัฒนาจนถึงจุดสูงสุดของแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม ดังแสดงในภาพที่ 6 โดยที่กำลังต้านทานที่ผิวเสาเข็มเมื่อพัฒนาถึงค่าสูงสุดแล้วจะมีค่อนข้างคงที่ถึงแม้ว่าจะยังมีการเคลื่อนที่ลงของเสาเข็มอยู่ และเมื่อค่ากำลังต้านทานที่ผิวลดลงหลังจากที่เสาเข็มเคลื่อนที่ลงเพื่อพัฒนากำลังไปจนถึงจุดสูงสุดแล้ว

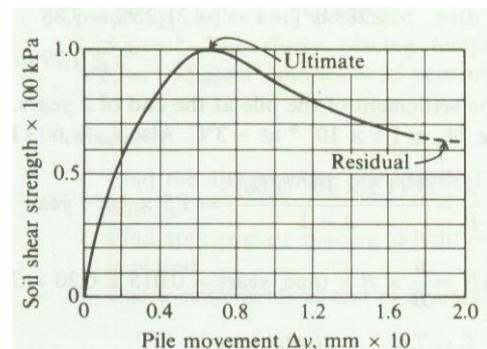
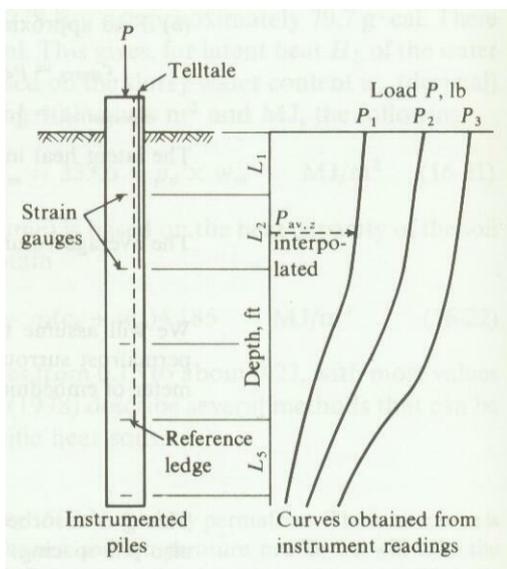


ภาพที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของเสาเข็มกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจนถึงจุดสูงสุด

ที่มา : Carroll (1987)

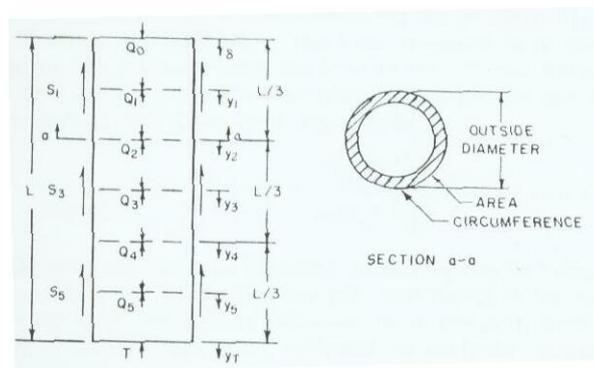
1. ลักษณะการถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มและการเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่ระดับความลึกต่างๆ

วิธีการวิเคราะห์ลักษณะการถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มและการเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่ระดับความลึกต่างๆ นำเสนอโดย Seed&Reese (1957) และได้มีการพัฒนาต่อมาโดยทฤษฎีของ Coyle&Reese (1966) จากข้อมูลการวัดค่าข้อมูลของเสาเข็มที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมโดยการทดสอบ Pile Loading Test ดังแสดงในภาพที่ 7 (ก) ซึ่งพบว่าลักษณะการถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มที่ระดับความลึกต่างๆ ได้มีความสัมพันธ์กับค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่เกิดขึ้นภายใต้การเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ดังแสดงในภาพที่ 7 (ข)



(ก)

(ข)



(ค)

ภาพที่ 7 ลักษณะการถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มและการเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่ระดับความลึกต่างๆ  
ที่มา : Coyle (1966)

โดยการวิเคราะห์ได้แบ่งเสาเข็มเป็น 3 ส่วนดังแสดงในภาพที่ 7 (ค) ตามความยาว โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก, พื้นที่หน้าตัด และเส้นรอบรูปของเสาเข็มมีค่าคงที่ตลอดความยาวของเสาเข็ม การถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มส่วนที่ 1 คือ

$$S_1 = \frac{Q_0 - Q_2}{\pi(D_1)\left(\frac{L}{3}\right)} \quad (10)$$

การเคลื่อนตัวของเสาเข็ม คือ

$$y_1 = \delta - \frac{\left(\frac{Q_0 + Q_1}{2}\right)\left(\frac{L}{3}\right)\left(\frac{1}{2}\right)}{\left(\frac{AE_0 + AE_1}{2}\right)} \quad (11)$$

และสามารถคำนวณหาค่าการถ่ายน้ำหนัก  $S_2, S_3$  ได้โดยทฤษฎีดังกล่าว ส่วนการเคลื่อนตัวของเสาเข็มในส่วนที่ 2 คือ

$$y_3 = y_1 - \frac{\left(\frac{Q_1 + Q_3}{2}\right)\left(\frac{L}{3}\right)}{\left(\frac{AE_1 + AE_3}{2}\right)} \quad (12)$$

ดังนั้น สามารถคำนวณการเคลื่อนตัวของเสาเข็มในส่วน  $y_3$  ได้ตามทฤษฎีดังกล่าว

เมื่อ

$\delta$	=	การทรุดตัวที่หัวเสาเข็ม
$Q_0$	=	น้ำหนักที่กระทำด้านบนของชั้นส่วนที่พิจารณา
$Q_1$	=	น้ำหนักที่กระทำตรงกลางของชั้นส่วนที่พิจารณา
$Q_2$	=	น้ำหนักที่กระทำด้านล่างของชั้นส่วนที่พิจารณา
$D$	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นส่วน
$L$	=	ความยาวของชั้นส่วน
$A$	=	พื้นที่หน้าตัด
$E_{c0}$	=	$E_{c1}$ (ค่าโมดูลัสของชั้นส่วนนั้นๆ)

## 2. ค่าแรงเสียดทานที่ระดับชั้นดินต่างๆ

มีการเปรียบเทียบกับค่าแรงเสียดทาน โดยวิธีการคำนวณกับผลจากการรวบรวมข้อมูล ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของชั้นดินที่แตกต่างกันและวัสดุที่ใช้ โดยมีผู้วิจัยได้นำเสนอดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบค่าแรงเสียดทานของลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ

Soil layer	Soft clay (t/m <sup>2</sup> )	Stiff clay (t/m <sup>2</sup> )	Dense Sand (1 <sup>st</sup> sand) (t/m <sup>2</sup> )	Very Dense Sand (2 <sup>nd</sup> sand) (t/m <sup>2</sup> )
Bussert,2001	1.5 – 2.0	3.5 – 9.1	6.6 – 12.1	12.1 – 25.1
Thasnanipan,1998	6.0 – 13.9	7.5 – 18.8	11.2 – 19.9	15.6 – 25.1
Analas,1995	3.5 – 6.6	3.1 – 5.9	2.8 – 9.7	0.2 – 2.6
Chun,1992	-	9.1 – 24.2	15.1 – 27.4	15.2 – 18.1
Ng,1993	6.23	8.5 – 28.0	5.81	7.8 – 8.6

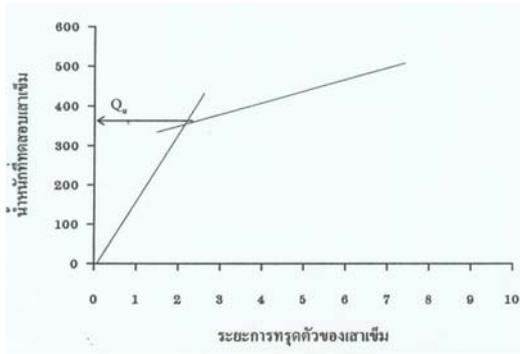
### การประเมินค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม

การหาน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มจะแสดงผลในรูปของ น้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัวของเสาเข็มมาใช้ในการวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มได้ แต่ปัจจุบันการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มนั้นมักจะกระทำกันจนถึงช่วง 2-3 เท่าของน้ำหนักบรรทุกใช้งานหรือน้ำหนักบรรทุกออกแบบ ทำให้ไม่สามารถที่จะหาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยได้ จึงมีผู้เสนอวิธีการที่สามารถหาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยไว้หลายแนวทาง

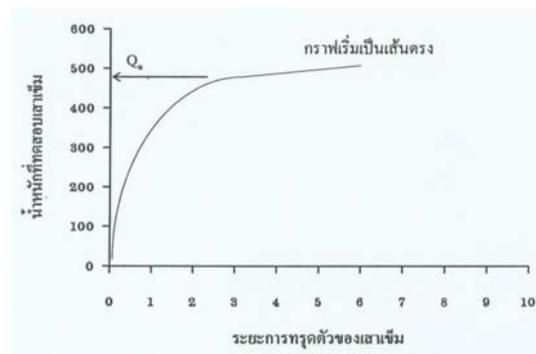
จากทฤษฎีต่างๆ ที่สรุปไว้ใน การประเมินการหาน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มที่แสดงผลในรูปของน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัวของเสาเข็มมาใช้ในการวิเคราะห์หาน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มได้สรุปดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การประเมินค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มในรูปของน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม

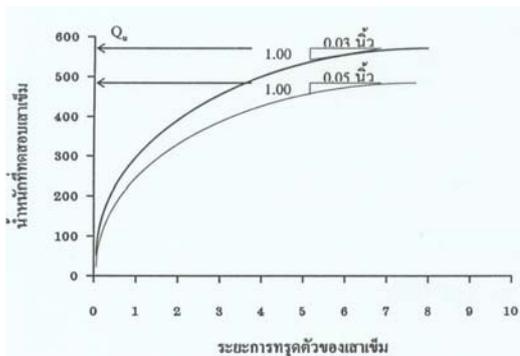
วิธีที่	ทฤษฎี	เกณฑ์	วิธีการทดสอบ
1	Terzaghi (1942)	ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มเป็น 10% ของเส้นผ่าศูนย์กลางหรือความกว้างของเสาเข็ม	-
2	Housel (1956)	จากกราฟค่าการทรุดตัวกับน้ำหนักบรรทุกที่เป็นเส้นตรง 2 เส้นสัมผัสกัน ดังภาพที่ 8	Slow Maintain Load Test
3	Chellis (1961)	น้ำหนักที่ทำให้เสาเข็มเกิดการทรุดตัวอย่างรวดเร็ว ดังภาพที่ 9	-
4	Fuller and Hoy (1970)	น้ำหนักที่ทำให้การทรุดตัวของเสาเข็มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยน้ำหนักกระทำที่หัวเสาเข็มไม่ได้เพิ่มขึ้นเลย ดังภาพที่ 10	Quick Load Test
5	Fellenius (1975)	จากกราฟค่าน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัวของเสาเข็มด้วยสเกลลอจิกที่มีจุดตัดของเส้นตรงทั้ง 2 เส้น ดังภาพที่ 11	Slow Maintain Load Test
6	Wintaker (1970)	จุดสูงสุดของกราฟในกรณีที่เป็นเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อมีค่าการทรุดตัวมากขึ้น ดังภาพที่ 12	Constant Rate of Penetration
7	Chin (1970)	จากส่วนกลับของความชันของเส้นกราฟแบบไฮเปอร์โบลิกจากค่าน้ำหนักบรรทุกที่ทดสอบกับค่าการทรุดตัว ดังภาพที่ 13	-
8	Mazurkiewicz (1972)	โดยตั้งสมมุติฐานให้กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่ทดสอบค่าการทรุดตัวเป็นรูปพาราโบลาเมื่อเสาเข็มรับน้ำหนักประลัย ดังภาพที่ 14	-
9	Davisson (1975)	โดยการลากเส้น Offset จากจุดเริ่มต้นไปตัดเส้นโค้งของกราฟน้ำหนักบรรทุกและค่าการทรุดตัวที่ทดสอบ ดังภาพที่ 15	-
10	Hansen 80% Criterion (1963)	กำหนดพิสัยระหว่างรากที่สองของการทรุดตัวหารด้วยน้ำหนักบรรทุกที่ 80% กับการทรุดตัวแล้วพบว่าจุดทั้งสองอยู่บนเส้นตรงเดียวกัน	-



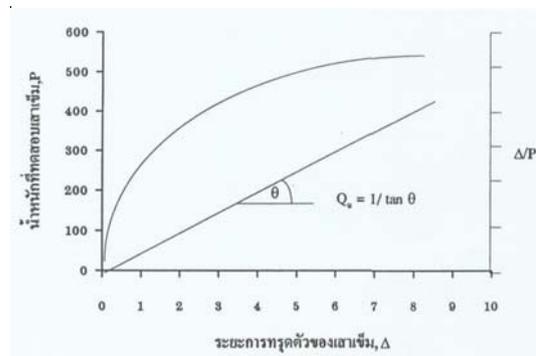
ภาพที่ 8 วิธีการของ Housel (1956)



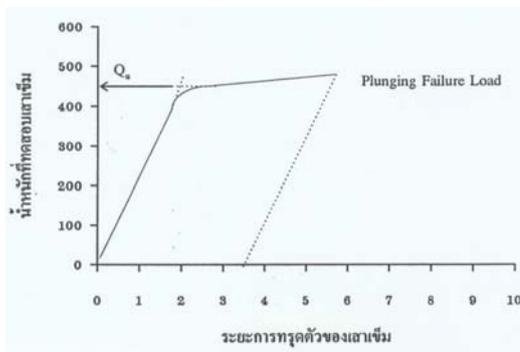
ภาพที่ 12 วิธีการของ Whitaker (1970)



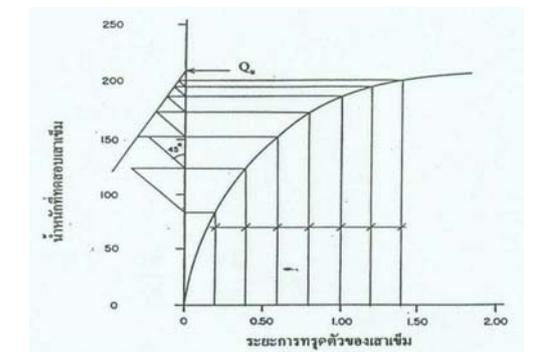
ภาพที่ 9 วิธีการของ Chellis (1961)



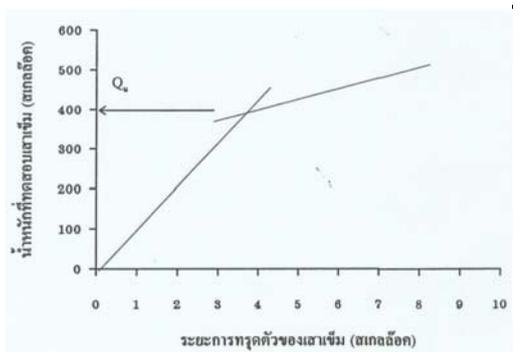
ภาพที่ 13 วิธีการของ Chin (1970)



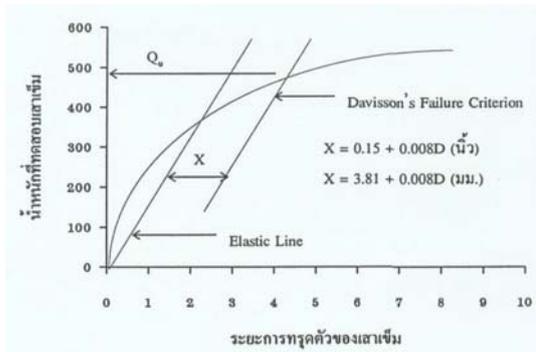
ภาพที่ 10 วิธีการของ Fuller & Hoy (1970)



ภาพที่ 14 วิธีการของ Mazurkiewicz (1972)



ภาพที่ 11 วิธีการของ Fellenius (1975)



ภาพที่ 15 วิธีการของ Davisson (1970)

### การใช้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของเสาเข็ม

ในการออกแบบการหาน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มทำได้โดย ได้จากการเลือกชนิดของเสาเข็มที่มาจากผลการคำนวณโดยใช้สูตรทางสถิติศาสตร์ และข้อพิจารณาจากหน่วยแรงที่ยอมให้ของวัสดุที่ใช้ทำเสาเข็มนั้นๆ ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่จะใช้เป็นสัดส่วนเพื่อใช้เป็นตัวลดความสามารถในการรับน้ำหนักของดินที่จะนำมาเลือกใช้ให้เหมาะสม สำหรับการออกแบบฐานรากเสาเข็ม โดยค่าอัตราส่วนปลอดภัยค่อนข้างไม่คงที่และแน่นอนจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ

1. การเปลี่ยนแปลงของสภาพชั้นดินและความแข็งแรงของดินในระดับเดียวกัน
2. ลักษณะของแรงต่างๆที่มากกระทำ, ความรุนแรงหากดินเกิดพังทลาย
3. ปริมาณและความละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการสำรวจ ตลอดจนชนิดหรือความเชื่อถือได้ของวิธีการสำรวจชั้นดิน
4. ความไม่แน่นอนในความละเอียดและความถูกต้องของวิธีการประมาณหาความสามารถในการรับน้ำหนักของชั้นดิน
5. การทรุดตัวซึ่งจะมีมากเกินขอบเขตหรือดินอาจพังทลายด้วยแรงเฉือน

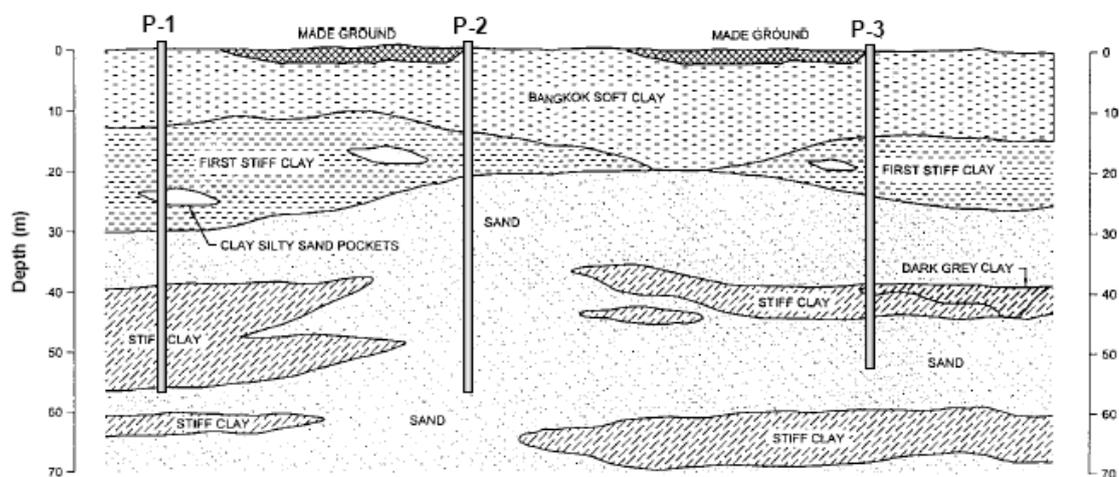
การใช้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่นำมาใช้ในการออกแบบที่กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม รวมจากแรงต้านของดินเพียงพอตามเกณฑ์ กำหนดค่าอัตราส่วนปลอดภัยต่างๆ ตั้งแต่ 2.0 - 3.0 โดยเกณฑ์การออกแบบที่ใช้ในปัจจุบันมีการพิจารณาว่าแรงต้านประลัยของดินที่ปลายเสาเข็มจะเกิดการทรุดตัวในปริมาณสูงกว่าการทรุดตัวของผิวเสาเข็ม ในการเกิดแรงเสียดทานผิวประลัยอย่างมาก ดังนั้นจึงมีการออกแบบโดยใช้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยที่ไม่เท่ากัน โดยจะใช้ค่าสูงกว่าสำหรับแรงต้านที่ปลายเข็ม ซึ่งเรียกว่าการออกแบบโดยใช้ Partial Factor of Safety

### พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ

1. ลักษณะทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพฯ

ชั้นดินของพื้นที่กรุงเทพมหานครซึ่งได้รับอิทธิพลของแม่น้ำเจ้าพระยาเป็นสำคัญ โดยลักษณะทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพมหานคร ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นดินต่างๆ กันคือชั้นดินบนสุดจะเป็นชั้นดินเปลือก (Weathered Crust) หนาประมาณ 2-3 เมตร จากนั้นจะเป็นชั้นดินเหนียวอ่อน

(Soft Marine Clay) หนาประมาณ 12-15 เมตร ที่มีความไวตัวสูง มีพฤติกรรมแบบ Anisotropic และ ค่อยๆ เปลี่ยนเป็นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Clay) ถึงระดับความลึกประมาณ 15-18 เมตร จากนั้นจะเป็นชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay) จนถึงระดับชั้นดินทรายแน่นชั้นแรก (1<sup>st</sup> Sand) ที่ ระดับความลึกประมาณ 25-30 เมตร ถัดจากชั้นทรายแน่นชั้นแรกจะเป็นชั้นดินเหนียวแข็ง (Hard Clay) สลับกับชั้นทรายจนถึงระดับชั้นทรายแน่นมากชั้นที่สอง (2<sup>nd</sup> Sand) ที่ระดับความลึกประมาณ 45-60 เมตร ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพฯ ดังภาพที่ 16 และสรุปได้ดังตารางที่ 3



ภาพที่ 16 ลักษณะทั่วไปของชั้นดินกรุงเทพมหานคร

ที่มา : Thasnanipan (1999)

ตารางที่ 3 ประเภทของชั้นดินกรุงเทพมหานคร

ที่	ระดับความลึก m.	ประเภทของชั้นดิน	SPT. N-value	Ave. $S_u$ t/m <sup>2</sup>	Ave. $\phi$ degree
1	2-15	Very Soft to Soft Clay	2-12	2.15	-
2	15-18	Medium Clay	6-18	5.74	-
3	18-25	Stiff to Very Stiff Clay	15-35	12.01	-
4	25-40	Dense Sand (1 <sup>st</sup> Sand)	18-65	-	35
5	40-45	Hard Clay	27-62	26.25	-
6	45-60	Very Dense Sand (2 <sup>nd</sup> Sand)	25-80	-	36

## 2. การรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ

เสาเข็มที่อยู่ในชั้นดินอ่อนการถ่ายน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มลงสู่ชั้นดินจะส่งถ่ายผ่านผิวเข็ม ซึ่งเสาเข็มชนิดนี้เรียกว่า Friction Pile การที่เสาเข็มจะสามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดขึ้นก็ต่อเมื่อขนาดและความยาวของเสาเข็มเพิ่มขึ้น โดยที่ปลายเข็มได้ทะลุทะลวงผ่านชั้นดินอ่อนเข้าสู่ชั้นดินที่แน่นหรือแข็งกว่า โดยการถ่ายน้ำหนักบรรทุกที่ผิวเข็มในชั้นดินที่แข็งกว่ามีปริมาณสูงขึ้นหรืออีกนัยหนึ่งมวลดินในชั้นดินที่แข็งกว่าโดยรอบผิวเข็มจะมีแรงเสียดทานที่ผิวเข็มสูงกว่าแรงเสียดทาน ในชั้นดินอ่อน ประกอบกับเกิดแรงต้านที่ปลายเข็ม (End Bearing Resistance) เสาเข็มที่ยังไม่ถึงชั้นดินแข็งหรือชั้นทราย การถ่ายน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มส่วนมากจะเกิดที่ปลายเข็ม ซึ่งเสาเข็มชนิดนี้เรียกว่า End Bearing Pile เป็นเสาเข็มที่มีการทรุดตัวน้อยเมื่อเทียบกับเข็มชนิด Friction Pile

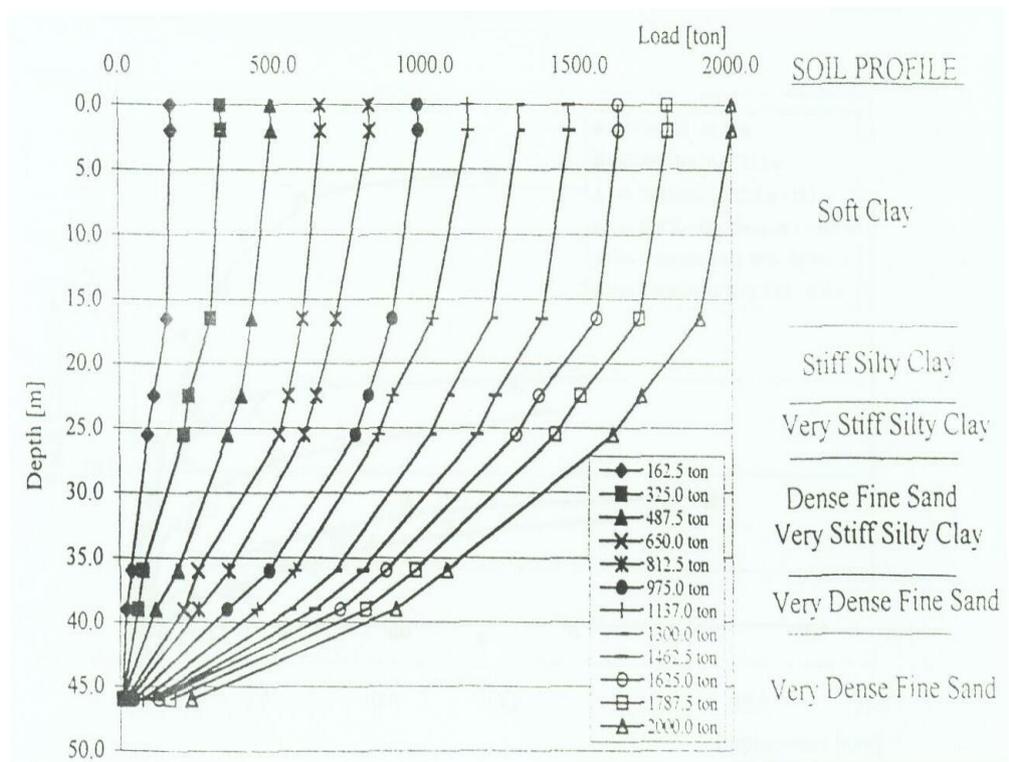
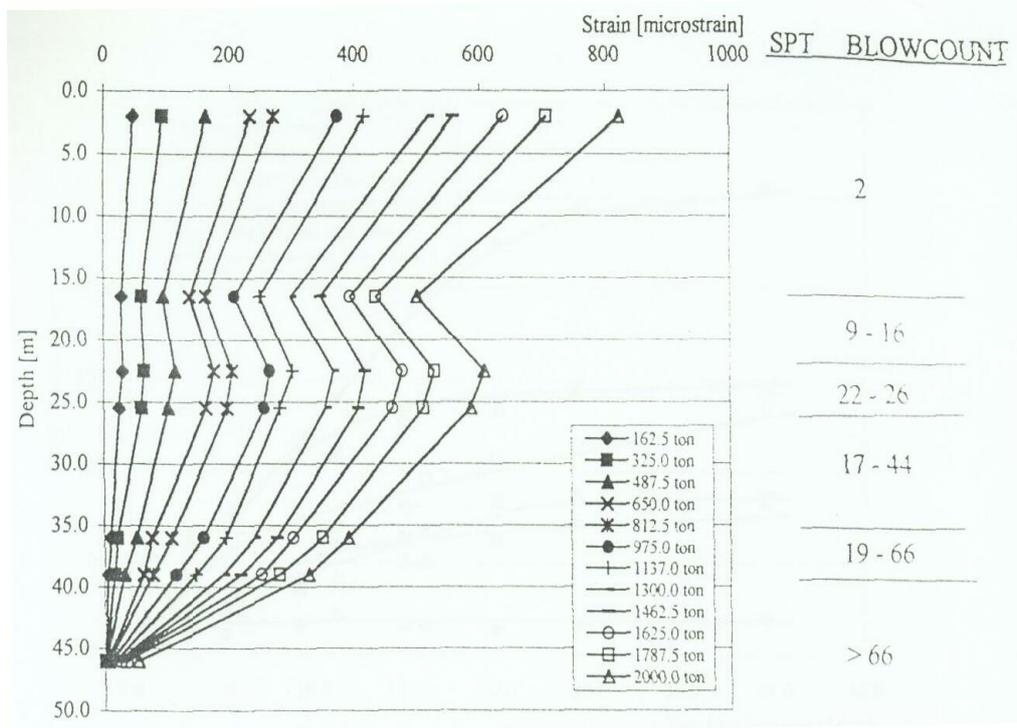
วันชัย และคณะ (2543) ได้รวบรวมผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบเรียดที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดใน โครงการ BECM Tower และ โครงการรถไฟฟ้าใต้ดิน (MRTA) ผลการวิจัยพบว่าค่าแรงเสียดทานที่ผิว Adhesion Factor ( $\alpha$ ) ในชั้นดินเหนียวและค่า Friction Factor ( $\beta$ ) ในชั้นทรายสำหรับเสาเข็มแบบเรียดอยู่ในแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าสำหรับเสาเข็มเจาะแต่ในส่วนค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม พบว่าค่า Bearing Capacity,  $N_u$  สำหรับเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทราย และค่า Bearing Capacity,  $N_c$  สำหรับเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นดินเหนียว จากการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงในตัวเสาเข็มอย่างต่อเนื่องพบว่าในการพิบัติของเสาเข็ม แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มจะถูกพัฒนาจนถึงค่าสูงสุดก่อนการพัฒนาถึงจุดสูงสุดของแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม

มัญญ (2546) ประเมินลักษณะของเสาเข็มว่าเป็น Friction Pile หรือเป็น End Bearing Pile ในทางทฤษฎีจะพิจารณาว่าปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นดินที่มีกำลังรับน้ำหนักสูง การทรุดตัวน้อยและไม่มีชั้นดินอ่อนอยู่เบื้องล่าง สำหรับ Friction Pile ก็จะพิจารณาจากตำแหน่งของปลายเสาเข็มที่อยู่ในชั้นดินที่มีกำลังรับน้ำหนักใกล้เคียงกับชั้นดินที่ให้ค่า Side Friction กรณีเช่นนี้เสาเข็มจะรับน้ำหนักได้โดยอาศัยแรงเสียดทานที่ผิวเป็นสำคัญ ส่วนที่เป็น End Bearing จะอยู่ในเกณฑ์น้อยมาก 5-10% สำหรับกรณีของลักษณะชั้นดินที่แตกต่างกัน เช่น Bangkok Subsoil ที่มีชั้นดินเหนียวแข็งและชั้นทรายเรียงตัวสลับกันลงตามความลึก เสาเข็มจะกระจายส่วนแบ่งน้ำหนักให้ทั้ง Side Friction และน้ำหนักแบกทานที่ปลาย โดยเฉพาะเสาเข็มเจาะที่ปลายฝังอยู่ในชั้นทรายค่า End Bearing จะขึ้นอยู่กับ Penetration Depth ในชั้นทราย

ธนาคล (2541) ได้ให้ข้อสังเกตจากการรวบรวมผลการทดสอบเสาเข็มจนถึงจุดพิบัติจาก น้ำหนักที่ถ่ายลงชั้นดินเหนียว เช่นในกรุงเทพฯ ส่วนใหญ่ เป็นการถ่ายแรงที่ส่งผ่านทางผิวเสาเข็ม (Friction Resistance) ประมาณ 75-90% ของน้ำหนักบรรทุกทุกทั้งหมด ส่วนปลายเสาเข็มมีน้ำหนักถ่ายลงชั้นดิน (End Bearing) เพียง 10-25% แต่แรงต้านที่ปลายเสาเข็มนี้จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป

Bandekar (1980) ได้เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลจากการทดสอบเสาเข็มที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมจำนวน 5 ต้น ในชั้นดินกรุงเทพฯ เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8-1.5 เมตร และมีความยาวตั้งแต่ 23-45 เมตร ผลการวิจัยลักษณะการถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายใต้การเคลื่อนตัวของเสาเข็มเล็กน้อย และจะพัฒนาสูงสุดในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงความลึกของชั้นดิน (Reese et al. 1969) ผลการวิจัยพบว่าลักษณะการถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มไปยังปลายเสาเข็มมีค่าน้อยกว่า 20% ของน้ำหนักที่กระทำทั้งหมด

Bussert (2001) ได้ศึกษาวิจัยจากผลการทดสอบเสาเข็มจากข้อมูล 7 ต้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0-1.2 เมตร ยาว 41.0-57.10 เมตร ในบริเวณหลายพื้นที่ในกรุงเทพฯ ซึ่งมีลักษณะชั้นดินที่แตกต่างกัน (Bangkok Subsoil Condition) ได้ทำการวิเคราะห์ผลจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางจริง และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ซึ่งได้แนะนำค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในชั้นดิน ดังตารางที่ 4 และลักษณะการถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มที่ระดับความลึกต่างๆ ไว้ ดังแสดงในภาพที่ 17 และพบว่าความสามารถในการรับแรงของเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ มีค่าค่อนข้างสูงอาจเนื่องมาจากการปรับปรุงกระบวนการในการติดตั้งเสาเข็ม



ภาพที่ 17 ลักษณะการถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มที่ระดับความลึกต่างๆ ในชั้นดินกรุงเทพฯ

ที่มา : Bussert (2001)

ตารางที่ 4 ค่าแรงเสียดทานของชั้นดินที่ระดับความลึกต่างๆ

Soil	Lower Bound		Upper Bound	
	Shaft Friction (t/m <sup>2</sup> )	Critical Displacement (mm)	Shaft Friction (t/m <sup>2</sup> )	Critical Displacement (mm)
Soft Clay	1.5	10	2.1	6
Medium Clay	5	4	6	7
Dense Sand (1 <sup>st</sup> Sand)	8	12	10	8
Stiff Clay	6	9	8	7
Very Dense Sand (2 <sup>nd</sup> Sand)	16	10	25	9

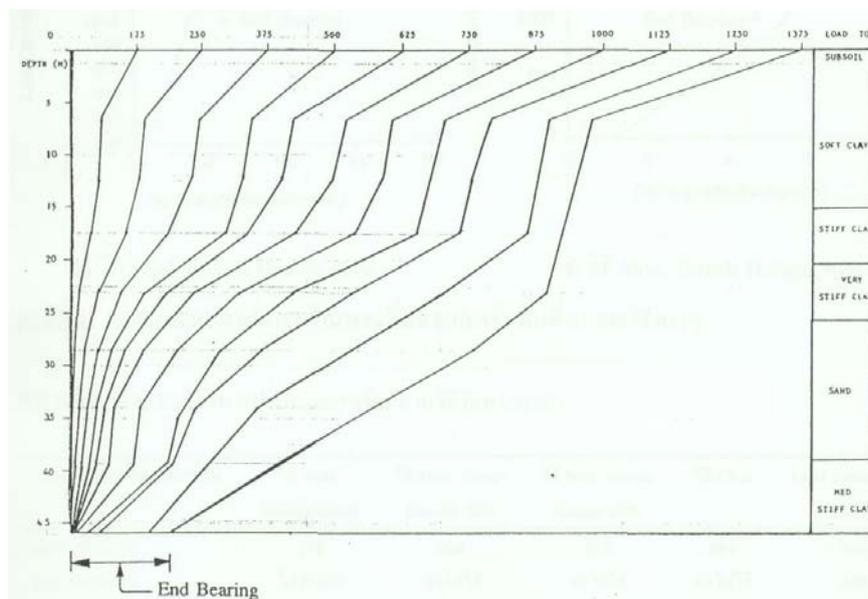
กมล (2544) และคณะ ได้วิเคราะห์ผลจากการทดสอบเสาเข็มเจาะกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.2 เมตร และ 1.5 เมตร จำนวน 560 ต้นและเสาเข็มเจาะแบบเหลี่ยม (Barrette) ขนาด 1.5x3.0 เมตรจำนวน 24 ต้นโดยปลายเสาเข็มทั้งหมดวางอยู่ที่ระดับ 57 เมตรจากพื้นดิน โดยปลายเสาเข็มฝังอยู่ในทรายชั้นที่สอง พบว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวของเสาเข็มเจาะและเสาเข็มแบบเรีตจะไม่มี ความแตกต่างกัน และผลการเปรียบเทียบหน่วยแรงเสียดทานและแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มในตารางที่ 5 และเป็นที่น่าสังเกตว่าแม้จะมีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มแต่หน่วยแรงที่ปลายเสาเข็มกลับมีไม่มากคือประมาณ 17% สำหรับเสาเข็มเจาะ และประมาณ 8% สำหรับเสาเข็มแบบเรีตนั้นเชื่อว่าเกิดจากเครื่องมือและวิธีที่ใช้ในการขุดเจาะที่ต่างกัน

ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบหน่วยแรงเสียดทานและแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม

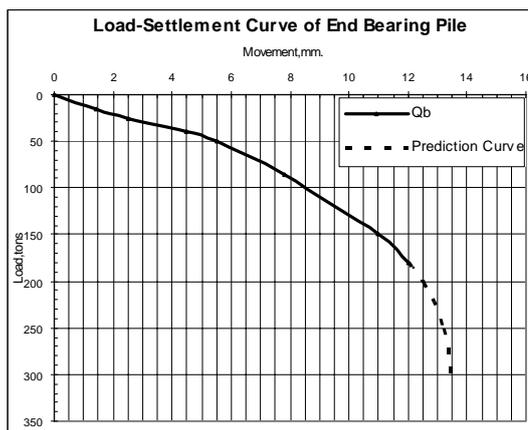
Depth	Soil Type	Mobilized skin friction (t/sq.m.)			
		Bored pile		Barrette	
		Design load	Max. mobilized	Design load	Max. mobilized
0.0 – 13.5	Soft clay	0.2	2.63	0.26	2.24
13.5 – 25.0	Stiff to very stiff clay	5.90	7.01	3.58	8.86
25.0 – 35.0	Medium dense silty sand	11.46	22.76	13.25	25.28
35.0 – 50.0	Hard silty clay	3.09	11.11	3.55	9.61
50.0 – 55.0	Hard clay+clayey sand	3.43	14.84	3.19	7.49
Max.mobilized end bearing (t/sq.m.)		270		101	

ที่มา : กมล (2544)

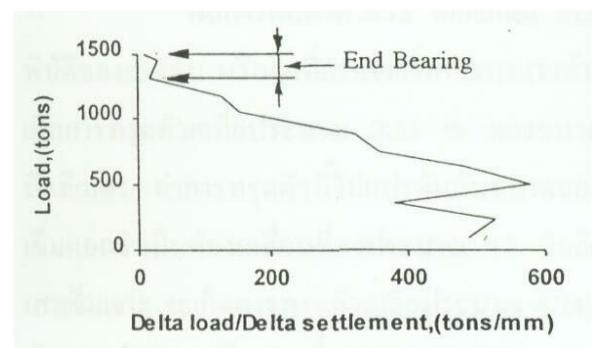
ขนาด (2541) ทำการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมของการถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นดินจากข้อมูล Load Distribution Curve จากผลการทดสอบของเสาเข็มจำนวน 3 ต้น กับเส้นกราฟของวิธีการหาค่า ที่สามารถแสดงพฤติกรรมการถ่ายน้ำหนักของเสาเข็ม พบว่าวิธี Modified Mazurkiewicz สามารถแปลผลหาค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากกราฟ Load Distribution Curve ดังในภาพที่ 18 (ก) และภาพที่ 18 (ข) ผลจากการศึกษาเป็นวิธีการที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าการพัฒนาของแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม ได้ภาพที่ 18 (ค)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 18 ค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มและพฤติกรรมการถ่ายน้ำหนักของเสาเข็ม โดยวิธี

Modified Mazurkiewicz

ที่มา : ขนาดล (2541)

### วิธีการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรม

การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยใช้น้ำหนักบรรทุกในสนามนั้นควรกระทำหลังจากเสร็จสิ้นการติดตั้งเสาเข็มแล้วไม่ต่ำกว่า 30- 90 วัน (บุญเทพ, 2539) หรืออย่างน้อย 3-30 วัน (ASTM D 3689-83) เพื่อให้ดินโดยรอบเสาเข็มคืนสภาพความแข็งแรงเสียก่อน วิธีการทดสอบเสาเข็มตามมาตรฐาน ASTM D-1143 รายละเอียดในภาคผนวก ก

### การวิเคราะห์ผลจากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

การทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากผลการทดสอบของเสาเข็มภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนหัวเสาเข็ม ซึ่งเป็นผลรวมของค่า Elastic Settlement กับค่า Plastic Settlement โดยที่ค่า Elastic Settlement ที่เกิดจากการรับน้ำหนักของเสาเข็มเนื่องจากแรงดันที่ปลายเสาเข็ม ดังสมการที่ 13

$$\Delta_p = \frac{PL}{AE} \quad (13)$$

และค่า Elastic Settlement เนื่องจากแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม ดังสมการที่ 14

$$\Delta F = \frac{F\alpha L}{AE} = \frac{1}{AE} \int_0^L xf(x)dx \quad (14)$$

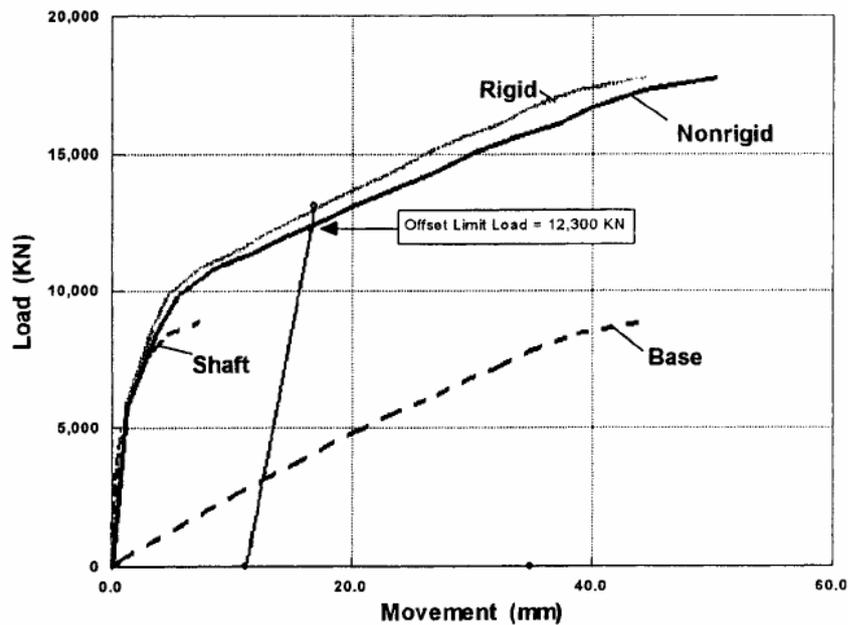
ดังนั้นค่า Total Elastic Compression Settlement เท่ากับ ดังสมการที่ 15

$$\frac{PL}{AE} + \frac{F\alpha L}{AE} \quad (15)$$

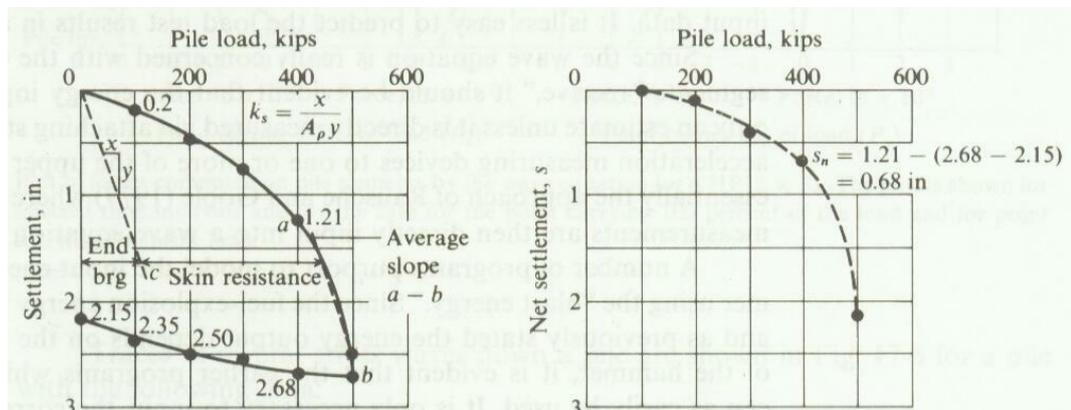
เมื่อ

P	=	น้ำหนักบรรทุกกระทำปลายเสาเข็ม
L	=	ความยาวของเสาเข็ม
A	=	พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม
E	=	ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเสาเข็ม
$\alpha L$	=	ความยาวประสิทธิผลของเสาเข็ม

Bullen (1958) ได้แนะนำค่า  $\alpha$  ประมาณ 0.5 เนื่องจากลักษณะการถ่วงน้ำหนักบรรทุกรอบผิวเสาเข็มมีลักษณะค่อนข้างกระจายตัวอยู่มาก โดยที่ค่า Plastic Settlement ซึ่งสามารถหาค่าได้โดยการวิเคราะห์จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัว ดังแสดงในภาพที่ 19 พบว่าจุดในขณะที่มีน้ำหนักบรรทุกน้อย การรับน้ำหนักของเสาเข็มประกอบด้วยแรงเสียดทานรอบเสาเข็มเป็นหลัก จนไปถึงจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการทรุดตัวมากคือจุด a (Sharp Break) จากภาพที่ 20 ซึ่งหลังจากนั้นกำลังรับน้ำหนักจะเกิดขึ้นที่แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม



ภาพที่ 19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัว  
ที่มา : Fellenius (1999)



ภาพที่ 20 แสดงจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการทรุดตัวมาก  
ที่มา : Bowles (1988)

การแยกระหว่างค่าแรงเสียดทานที่ผิวกับค่าแรงต้านทานของเสาเข็มจากผลการทดสอบ

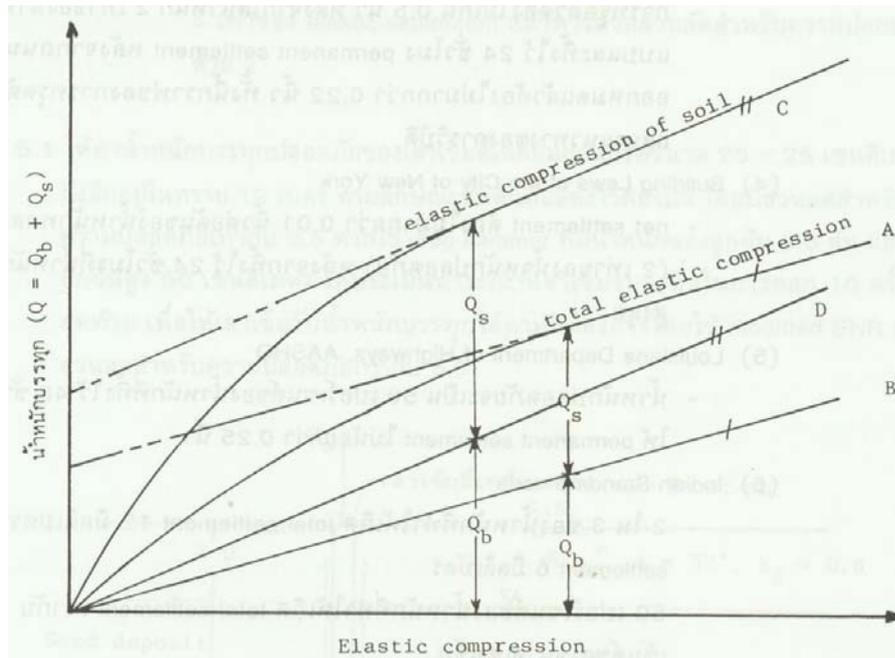
จากการวิเคราะห์ผลโดยวิธีการทดสอบเสาเข็มแบบ Cyclic Load Test นั้นค่า Elastic Settlement ที่นำค่า Elastic Compression ของเสาเข็มและดินรวมกัน (Van Weele, 1957) โดยค่า Elastic Compression ของเสาเข็มที่นำหน้าบรรทุก ดังสมการที่ 16

$$\Delta_L = \frac{\left(\frac{Q-Q_s}{2}\right)L}{AE} \quad (16)$$

เมื่อ

Q	=	น้ำหนักบรรทุกทั้งหมดของเสาเข็ม
Q <sub>s</sub>	=	น้ำหนักบรรทุกรอบผิวเสาเข็ม
L	=	ความยาวของเสาเข็ม
A	=	พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม
E	=	ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเสาเข็ม (ประมาณ 2.8x10 <sup>5</sup> kg./cm.)

ในกรณีที่ไม่ได้มีการทดสอบหาค่าโดยตรงสามารถประเมินหาค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (Q<sub>b</sub>) พัฒนาโดย (Jain and Kumar, 1961) ได้จากภาพที่ 21 โดยลากเส้นตรงผ่านจุดเริ่มต้น (เส้น B) ขนานกับส่วนที่เป็นเส้นตรงสัมผัสกับจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงของการทรุดตัวสูงสุดของกราฟ Total Settlement (เส้น A) จากนั้นให้คำนวณค่า Elastic Compression ของดินและพลี้อดลงไปกับน้ำหนักบรรทุก (เส้น C) โดยลากเส้น D ผ่านจุดเริ่มต้นขนานกับส่วนที่เป็นเส้นตรงของเส้น C ซึ่งจะได้ค่าแรงต้านที่ปลาย (Q<sub>b</sub>) ใหม่และละเอียดกว่าค่าเดิม และจะกระทำซ้ำกันต่อเนื่องกันประมาณ 3 ครั้งหรือจนกว่าจะได้ค่าแรงเสียดทานที่ผิว (Q<sub>s</sub>) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละน้ำหนัก



ภาพที่ 21 การประมาณแรงดันที่ปลายเสาเข็มจากการทดสอบ Cyclic Load Test  
ที่มา : Van Weele (1957)

## อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### อุปกรณ์

1. เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ประกอบเครื่องต่างๆ พร้อมทั้งระบบปฏิบัติการที่ใช้บนคอมพิวเตอร์
2. โปรแกรมระบบปฏิบัติการ และโปรแกรมต่างๆในการทำรายงาน
3. เครื่องพิมพ์ เครื่องสแกนเนอร์ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลทั้งหมด ได้แก่ แผ่นซีดี, Flash Drive

### วิธีการวิจัย

การดำเนินการวิจัยได้รวบรวมข้อมูลผลการทดสอบน้ำหนักรถบรรทุกของเสาเข็ม วิธีที่ใช้ในการทดสอบและวิธีการวิเคราะห์ผลการทดสอบน้ำหนักรถบรรทุกของเสาเข็ม ซึ่งขั้นตอนการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

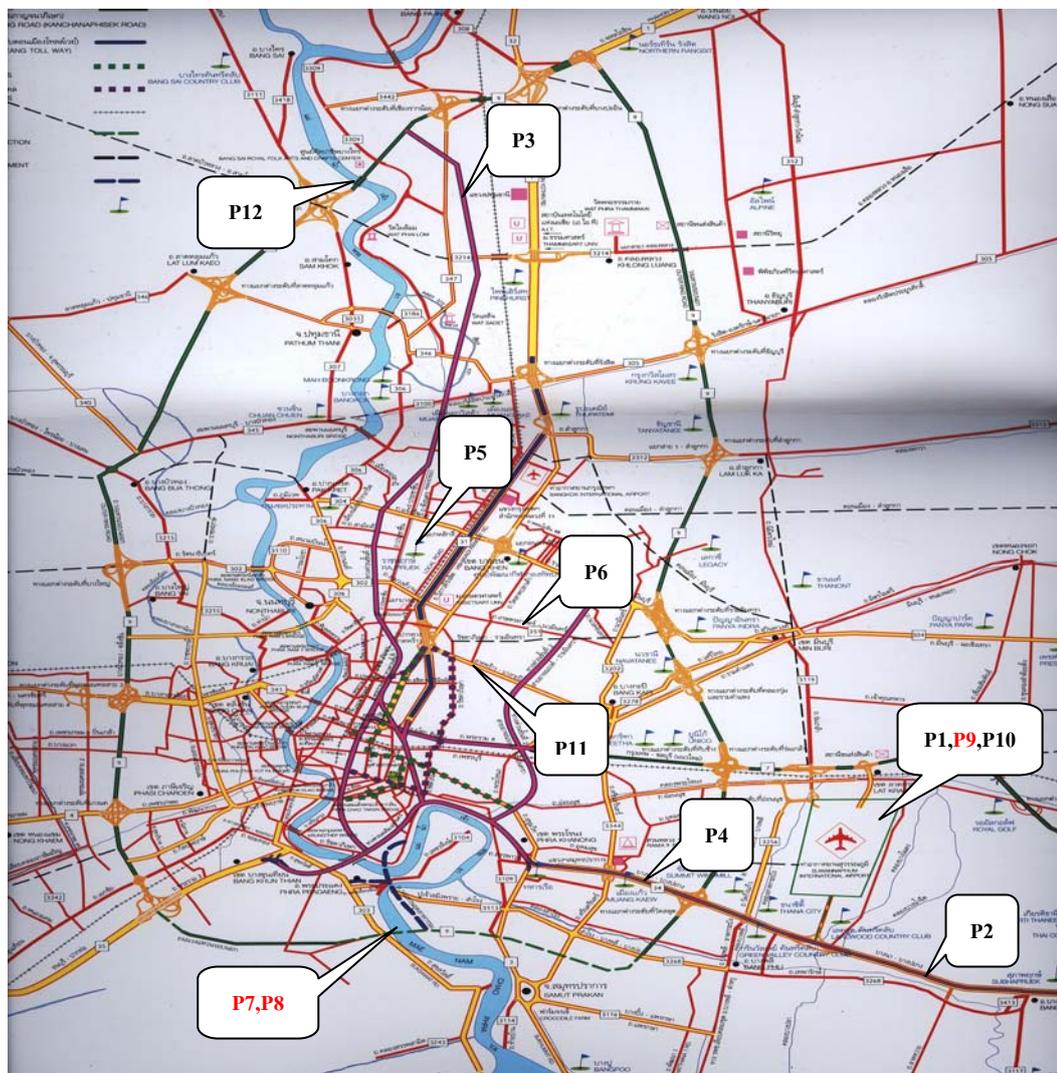
#### 1. การรวบรวมข้อมูลผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม

การรวบรวมข้อมูลผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม ซึ่งเป็นเอกสารรายงานตามที่บริษัทที่ทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม และบริษัทวิศวกรที่ปรึกษาฯ โดยได้รับความอนุเคราะห์ให้ใช้ในการวิจัยนี้มีข้อมูลผลการทดสอบทั้งหมด 12 ชุดข้อมูล

#### ตารางที่ 6 ฐานข้อมูลรายงานผลการทดสอบเสาเข็ม

ที่มา	จำนวน (ชุดข้อมูล)
บริษัท Seafco Public Company Limited	2
บริษัท STS Engineering Consultant Limited	10
รวมทั้งรวม	12

โดยข้อมูลผลการทดสอบเสาเข็มซึ่งเป็นเสาเข็มเจาะทั้งหมด และตำแหน่งที่ตั้งของโครงการทั้งหมดจะอยู่บริเวณพื้นที่ของกรุงเทพมหานคร และจังหวัดในพื้นที่ปริมณฑล ดังแสดงในภาพที่ 22 โดยข้อมูลรายละเอียดของเสาเข็มในการศึกษาเป็นข้อมูลรายงานแสดงรายละเอียดผลการทดสอบเสาเข็ม เช่น ชื่อโครงการ สถานที่ตั้ง วิธีการทดสอบ วันที่ทำการทดสอบ จำนวนรอบที่ทำการทดสอบ ประเภทของเสาเข็ม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ความยาว และรูปร่างของเสาเข็ม ชนิดของดินที่ระดับปลายเสาเข็ม ตลอดจนเครื่องมือที่มีการติดตั้งเพื่อตรวจวัดพฤติกรรมต่างๆ ในขณะที่ทำการทดสอบ และรายละเอียดข้อมูลที่แปลผลมาจากเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมเพื่อนำข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็ม เช่น นำหนักบรรทุกทุกกับค่าการทรุดตัว ลักษณะการถ่ายน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ระดับความลึกต่างๆ ต่อไป โดยข้อมูลเบื้องต้นที่ได้รวบรวมไว้ ดังตารางที่ 7



ภาพที่ 22 แผนที่ตั้งแต่ละโครงการ

ตารางที่ 7 รายละเอียดข้อมูลของเสาเข็ม

No.	Type of Test	Dia. (m.)	Length (m.)	Max. Load (tons)	Soil Pile Tip	Instrument	Pile Location
P1	Static Test	1.20	53.32	2,400	Hard Clay	30 Nos. VWSG at ten level 4 Nos. Telltale at two level	Suvarnabhumi Airport Project (Airside Tunnel)
P2	Static Test	1.20	57.10	2,000	Very Dense Sand	22 Nos. VWSG at nine level 1 Telltale at Pile tip	Expressway Project (Bang Na – Bang Pli)
P3	Static Test	1.20	43.50	1,000	Very Stiff Clay	14 Nos. VWSG at six level	Expressway Project (Bang Pa In – Pakkret)
P4	Static Test	1.20	62.03	2,500	Very Dense Sand	20 Nos. VWSG at nine level 3 Telltale at three level	Expressway Project (Bang Na – Bang Pli)
P5	Static Test	1.20	46.00	2,625	Very Dense Sand	18 Nos. VWSG at seven level	Energy Complex Project
P6	Static Test	1.00	43.87	1,300	Medium Dense Sand	16 Nos. VWSG at six level 1 Telltale at Pile tip	Expressway Project (Asoke Srinakarin )
P7	Bidirectional Test	2.00	61.00	4,000	Very Dense Sand	2x900 tons hydraulic jack 1x1400 tons hydraulic jack 18 Nos. VWSG at six level	Southern Outer Bangkok Ring Road Project (OT-1)
P8	Bidirectional Test	2.00	55.00	4,000	Hard Clay	3x600 tons hydraulic jack 1x1400 tons hydraulic jack 18 Nos. VWSG at six level	Southern Outer Bangkok Ring Road Project (OT-2)
P9	Bidirectional Test	1.00	41.90	2,200	Very Dense Sand	900 tons hydraulic jack 360 tons hydraulic jack 14 Nos. VWSG at seven level 8 Nos. of Telltale at two level	Suvarnabhumi Airport Project (Passenger Terminal)
P10	Static Test	1.00	41.097	1,350	Very Dense Sand	21 Nos. VWSG at seven level 2 Nos. Telltale at two level	Suvarnabhumi Airport Project
P11	Static Test	0.80	47.640	1,135	Very Dense Sand	10 Nos. VWSG at five level 3 Nos. Telltale at two level	Embassy of Japan
P12	Static Load Test	1.50	49.454	2,600	Very Dense Sand	10 Nos. VWSG at five level 5 Nos. Telltale at two level	Rama 5 Bridge

Note : VWSG = Vibrating Wire Strain Gauge

## 2. การวิเคราะห์ผลจากข้อมูลผลการทดสอบเสาเข็ม

การศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มในขณะที่ทำการทดสอบเสาเข็มที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัด โดยข้อมูลจากที่ตรวจวัดได้จาก Vibrating Wire Strain Gauge ที่ตำแหน่งที่ระดับความลึกต่างๆ ของชั้นดิน จะเก็บบันทึกไว้เพื่อนำมาแปลผลและวิเคราะห์ต่อไป

### 2.1 พฤติกรรมการพัฒนาแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มที่ระดับความลึกต่างๆ

#### 2.1.1 หน่วยแรงเสียดทานผิวของเสาเข็ม

การวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักบรรทุกจากตำแหน่งที่มีการติดตั้ง Strain Gauge ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 17

$$P_i = (AE)_p \epsilon_i \quad (17)$$

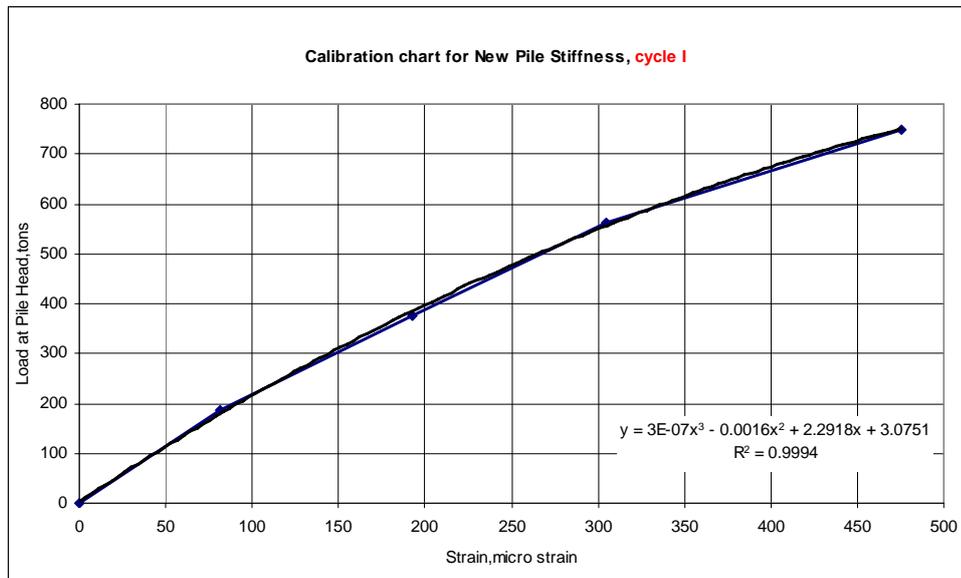
เมื่อ

$$P_i = \text{น้ำหนักบรรทุก ณ ตำแหน่ง Strain Gauge}$$

$$(AE)_p = \text{Equivalent Pile Stiffness}$$

$$\epsilon_i = \text{ความเครียดที่ตำแหน่ง Strain Gauge}$$

ในการหาค่า Equivalent Pile Stiffness,  $AE_p$  ซึ่งสามารถพล็อตกราฟหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทดสอบที่กระทำต่อหัวเสาเข็มต่อความเครียด จากการอ่านค่าที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม และสามารถหาน้ำหนักที่กระทำที่ตำแหน่งอื่นๆ ที่มีการติดตั้ง Strain Gauge ได้ จากกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าว โดย Pile Stiffness ของเสาเข็มตลอดทั้งความยาว จะมีค่าไม่คงที่จึงต้องทำการสอบเทียบ (Calibrate) เพื่อให้ทราบถึงค่า Pile Stiffness ที่ตำแหน่งติดตั้ง Strain Gauge ที่ระดับความลึกต่างๆ ดังภาพที่ 23 ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าลักษณะการถ่ายแรงของเสาเข็มตามความลึก (Load Distribution)



ภาพที่ 23 การสอบเทียบ (Calibrate) เพื่อหาค่า Pile Stiffness ของเสาเข็มตลอดทั้งความยาว

### 2.1.2 การเคลื่อนตัวของเสาเข็ม

โดยทั่วไปการติดตั้ง Strain Gauge จะทำการติดตั้งบริเวณเหล็กเสริมของเสาเข็ม และตำแหน่งที่ทำการติดตั้งอยู่ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของชั้นดินตลอดความยาวของเสาเข็ม การวิเคราะห์หาค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่ชั้นดินนั้นๆ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการพัฒนาแรงเสียดทานที่ระดับความลึกต่างๆ สามารถคำนวณหาได้ดังสมการ

การเคลื่อนตัวที่ปลายเสาเข็ม

$$\text{Toe Settlement} = [D1 - D2] \quad (18)$$

$$= [D1 - \text{Equivalent Telltale Measurement (j)}] \quad (19)$$

ค่า Equivalent Telltale Measurement (i) หรือ Pile Shortening from pile head to VWSG (i)

$$= \text{Total Pile Shortening} - \text{Pile Shortening from VWSG (i) to VWSG (j)} \quad (20)$$

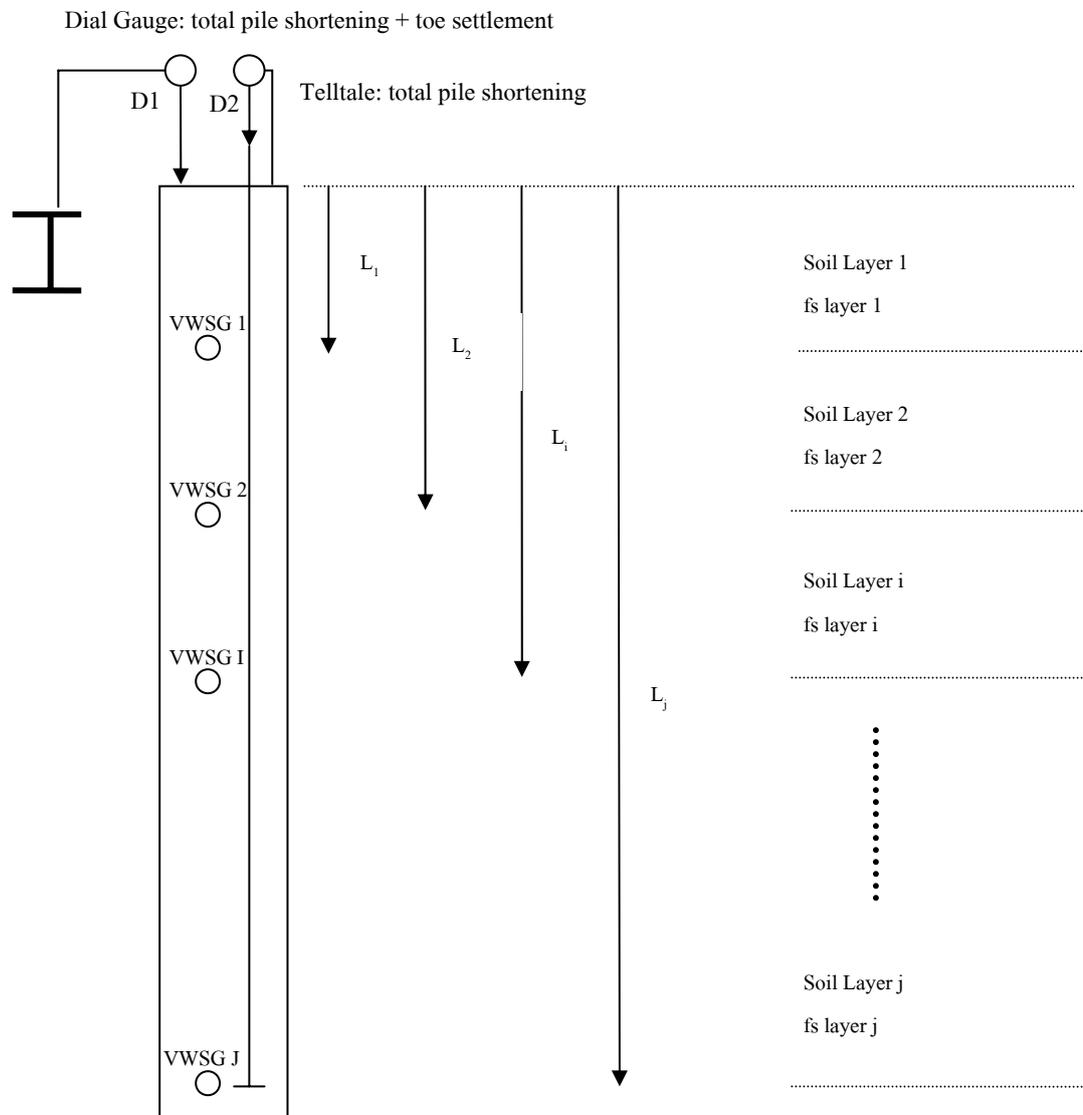
การเคลื่อนตัว ณ ตำแหน่ง Strain Gauge

$$\begin{aligned} \text{Displacement at VWSG (i)} &= \text{Toe Settlement} \\ &+ \sum_{i=i}^{j-1} \frac{(VWSG(i) + VWSG(i+1))}{2} (L_i - L_{i+1}) \end{aligned} \quad (21)$$

การเคลื่อนตัวของเสาเข็มในแต่ละชั้นดิน

$$= \left[ \frac{\text{Displacement at VWSG (i)} + \text{Displacement (i-1)}}{2} \right] \quad (22)$$

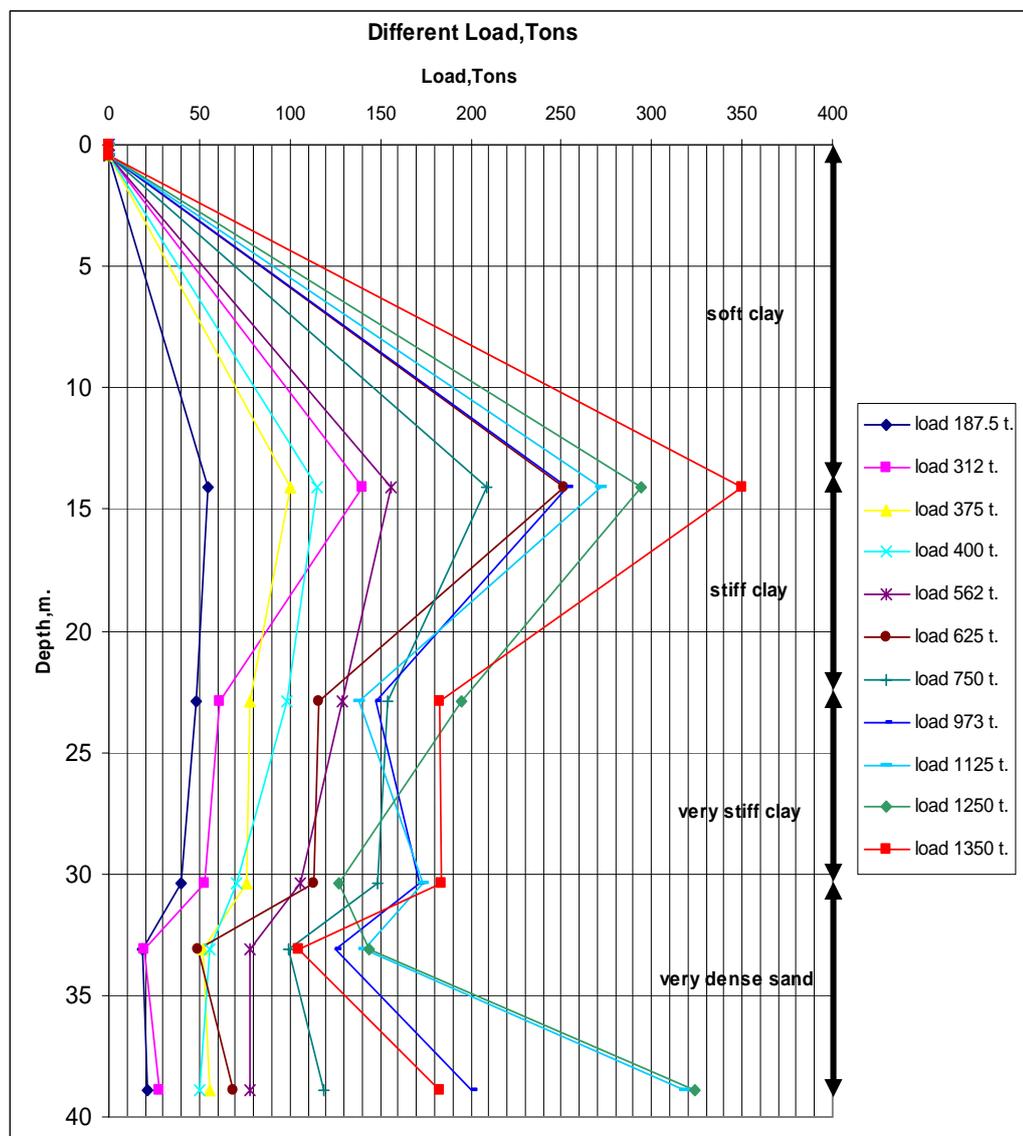
สามารถจำลองลักษณะของเสาเข็มที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมต่างๆ ได้ดังแสดงในภาพที่ 24 โดยทำการแบ่งชิ้นส่วนความยาวของเสาเข็มจากตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงของชั้นดินอย่างชัดเจน หรือตำแหน่งที่มีการติดตั้ง Strain Gauge ตามความลึกต่างๆ ตลอดทั้งความยาวของเสาเข็ม



ภาพที่ 24 การจำลองลักษณะของเสาเข็มที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดพฤติกรรมต่างๆ

## 2.2 เปร็เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาเข็มลงสู่ชั้นดินตามความลึกต่างๆ

การวิเคราะห์หาค่าเปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาเข็มลงสู่ชั้นดินที่มีประเภท และ ลักษณะที่แตกต่างกันนั้น สามารถหาได้จากกราฟลักษณะการถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มที่ระดับความ ลึกต่างๆ (Load Distribution) ดังกล่าวคือ ผลต่างน้ำหนักที่กระทำระหว่าง Strain Gauge แต่ละ ตำแหน่งที่มีการติดตั้งตลอดความยาวของเสาเข็ม ดังภาพที่ 25 เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่ทดสอบ เสาเข็มในแต่ละรอบของการทดสอบ



ภาพที่ 25 ผลต่างน้ำหนักที่กระทำระหว่าง Strain Gauge ตลอดความยาวเสาเข็ม

ในการหาเปอร์เซ็นต์การถ่ายแรงของเสาเข็มนั้นจะทำให้ทราบได้ว่า ในขณะที่เสาเข็มได้รับน้ำหนักบรรทุกกระทำไม่ว่าจะอยู่ในสภาวะการรับน้ำหนักสูงสุด (Ultimate Load) หรือสภาวะการใช้งาน (Working Load) นั้น ชั้นดินที่อยู่ลึกลงไปแต่ละชั้น จะมีความสามารถในการรับน้ำหนักที่แตกต่างกันไป ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิด ประเภท และคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของแต่ละชั้นดิน

### 2.3 อัตราส่วนปลอดภัย

การวิเคราะห์โดยพิจารณาคำนวณหาอัตราส่วนปลอดภัย (Factor of Safety) ที่ได้จากการหาค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Ultimate Load) จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม และความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของชั้นดินนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะการถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มที่ระดับความลึกต่างๆ (Load Transfer) ของเสาเข็ม ที่ค่าน้ำหนักบรรทุกทดสอบสูงสุด และที่จำกัดค่าน้ำหนักบรรทุกทดสอบไม่เกิน 2 เท่าของน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ออกแบบไว้ (Design Load)

#### 2.3.1 อัตราส่วนปลอดภัยของแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม (Skin Friction)

การวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนปลอดภัยของแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มโดยวิธีการคำนวณเปรียบเทียบสัดส่วนระหว่าง หน่วยแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดของชั้นดินจากข้อมูลหลุมเจาะในพื้นที่ทดสอบเสาเข็ม กับหน่วยแรงกระทำขณะทำการทดสอบเสาเข็ม โดยแปรผลจากค่าความเครียด ณ ตำแหน่งที่มีการติดตั้ง Strain Gauge ดังสมการที่ 23

$$FS_{\text{Skin Friction}} = \frac{fs_{(Ultimate)}}{fs_{(VWSG)}} \quad (23)$$

เมื่อ

$$fs_{(Ultimate)} = \text{หน่วยแรงเสียดทานของชั้นดินประลัยที่ผิวเสาเข็ม}$$

$$fs_{(VWSG)} = \text{หน่วยแรงเสียดทานจากการทดสอบที่ตำแหน่ง VWSG}$$

### 2.3.2 อัตราส่วนปลอดภัยของแรงดันที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing)

ค่าอัตราส่วนปลอดภัยของแรงดันที่ปลายเสาเข็มได้วิเคราะห์จากสัดส่วนระหว่าง น้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นสูงสุดจากข้อมูลชั้นดินจากหลุมเจาะดินที่ระดับตำแหน่งปลายเสาเข็มกับการพัฒนาของแรงดันที่ปลายเสาเข็มจากการทดสอบในสนามที่มีการใช้ข้อมูลค่าน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มกับค่าการทรุดตัว (Load-Settlement Curve) ด้วยวิธี Modified Mazurkiewicz ดังสมการที่ 24

$$FS_{\text{End Bearing}} = \frac{Qb_{(Theory)}}{Qb_{(Mobilized)}} \quad (24)$$

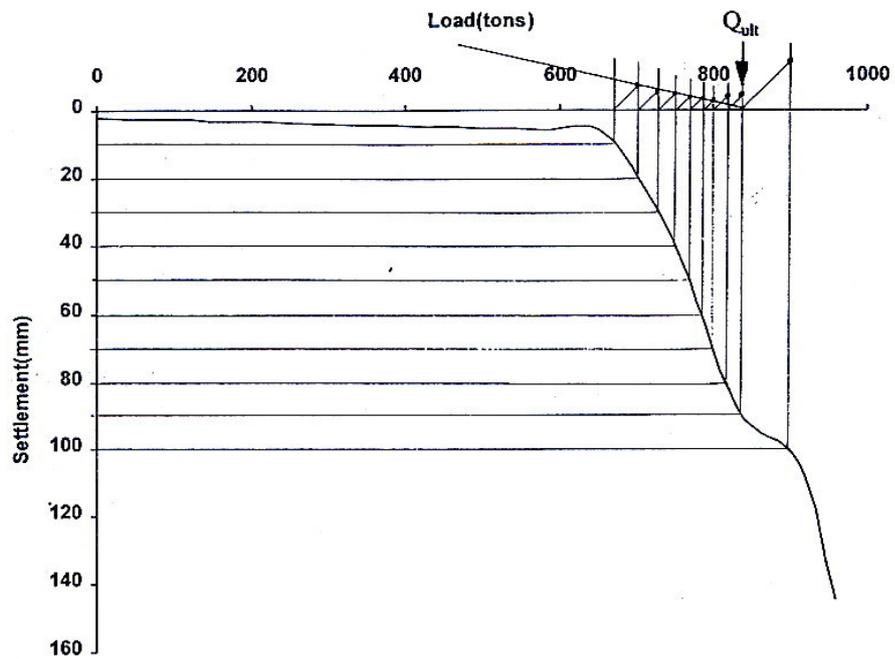
เมื่อ

$$Qb_{(Theory)} = \text{แรงต้านทานสูงสุดที่ปลายเสาเข็มประลัษที่ปลายเสาเข็ม}$$

$$Qb_{(Mobilized)} = \text{การพัฒนาของแรงดันที่ปลายเสาเข็มจากการทดสอบ}$$

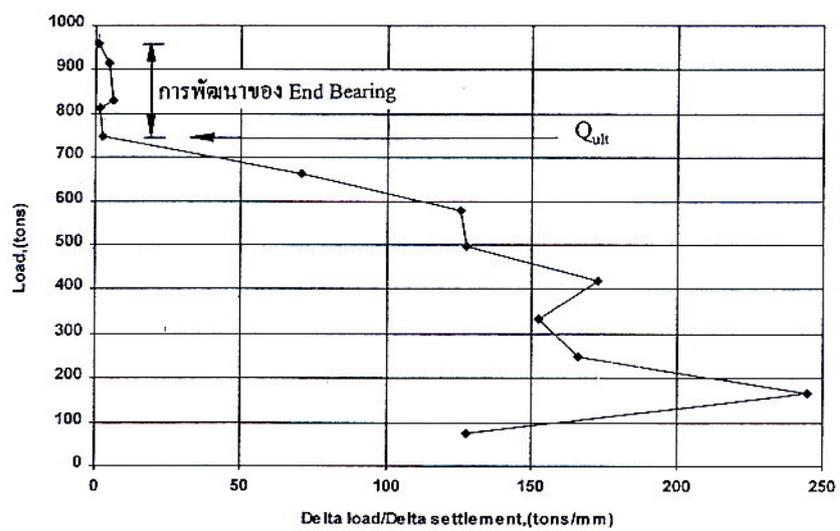
การพัฒนาของแรงดันที่ปลายเสาเข็มทดสอบจากผลของค่าน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม

ในการศึกษาเพื่อหาค่าการพัฒนาของแรงดันที่ปลายเสาเข็มที่เกิดขึ้นจากค่าน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัวของเสาเข็มซึ่งพบว่าไม่สามารถหาค่าได้โดยตรง จึงได้ใช้วิธีการในการหาค่าแรงดันที่ปลายเสาเข็มด้วยวิธี Mazurkiewicz ซึ่งให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มจากการติดตั้ง Strain Gauge โดยหลักการเดิมเป็นวิธีการกราฟไปบนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม ซึ่งพบว่ามีความยุ่งยากในการเขียนกราฟเพื่ออ่านค่าให้ได้ความถูกต้อง และกราฟที่ใช้อ่านค่ามีความไม่ชัดเจนนัก ดังแสดงในภาพที่ 26 จึงได้มีการปรับเปลี่ยนวิธีการคือ การหาค่าผลต่างกันของน้ำหนักบรรทุกทดสอบในช่วงติดกัน เปรียบเทียบกับผลต่างของค่าการทรุดตัวที่จุดนั้น (Delta load/Delta Settlement) เขียนกราฟในแกน x และให้แกน Y คือน้ำหนักบรรทุกทดสอบ ซึ่งทำให้การอ่านค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดคือน้ำหนักบนแกน Y เมื่อค่าในแกน X มีแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์ทำให้สะดวกและรวดเร็วขึ้น จึงเป็นวิธี Modified Mazurkiewicz ขึ้นมาใหม่โดย ธนาคล,2541 ดังแสดงในภาพที่ 27



ภาพที่ 26 วิธี Mazurkiewicz แบบเดิม

ที่มา : ขนาดล (2541)



ภาพที่ 27 วิธี Modified Mazurkiewicz

ที่มา : ขนาดล (2541)