

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบ,การวิเคราะห์ผลและอภิปรายผลการวิจัย

#### 4.1 ผลการศึกษาสมบัติของดินบริเวณสถานที่ก่อสร้างที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติของดินแบ่งเป็น 2 พวกใหญ่ ๆ คือ 1) สมบัติขั้นพื้นฐาน (Basic Soil Properties) ประกอบด้วย ปริมาณความชื้นของดิน (Water Content) ค่าพิกัด Atterberg (Atterberg Limits) และค่าความหนาแน่นรวมของดิน (Total Unit Weight, $\gamma_t$ ) 2) สมบัติทางด้านวิศวกรรมประกอบด้วย ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, $S_u$ ) ในชั้นดินเหนียว ค่ามุมด้านทานแรงเฉือน ( $\phi$ ) สำหรับชั้นทราย และค่า N จากการทดสอบ SPT สำหรับชั้นเหนียวแข็ง และชั้นทราย

ข้อมูลการเจาะสำรวจดินบริเวณสถานที่ก่อสร้างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ทั้งหมด 4 หลุม คือ BH-1, B-6, BH-12 และ BN-5 ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ถึง 4.4 โดยเสาเข็มแต่ละต้นจะใช้ข้อมูลดินจาก หลุมเจาะที่มีตำแหน่งใกล้กับตำแหน่งก่อสร้างเสาเข็มมากที่สุดในการออกแบบ รายละเอียดแต่ละ หลุมเจาะมีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการเจาะสำรวจดินของหลุมเจาะ BH-1 ที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็ม TP-13/1 และ TP-15

| Soil Type                | Depth (m)   | W (%) | LL (%) | PL (%) | $\gamma_t$ (t/m <sup>3</sup> ) | $S_u$ (t/m <sup>2</sup> ) | SPT N-Value Blows/ft |
|--------------------------|-------------|-------|--------|--------|--------------------------------|---------------------------|----------------------|
| Soft Clay,CH             | 00.00-15.00 | 90    | 75     | 28     | 1.5                            | 1.2                       | -                    |
| Stiff Clay,CH            | 15.00-19.50 | 40    | 88     | 30     | 1.7                            | 9.0                       | 13                   |
| Stiff Clay,CL            | 19.50-21.50 | 25    | -      | -      | 2.0                            | 8.0                       | 15                   |
| Medium Dense Sand        | 21.50-23.50 | -     | -      | -      | 2.0                            | -                         | 27                   |
| Dense to Very Dense Sand | 23.50-29.50 | -     | -      | -      | 2.0                            | -                         | 50                   |
| Stiff Clay,CL            | 29.50-31.00 | 20    | -      | -      | 2.0                            | -                         | 40                   |
| Medium Dense Sand        | 31.00-37.50 | -     | -      | -      | 2.0                            | -                         | 25                   |
| Dense to Very Dense Sand | 37.50-47.00 | -     | -      | -      | 2.0                            | -                         | 50                   |

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการเจาะสำรวจดินของหลุมเจาะ B-6 ที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็ม TP-19

| Soil Type                   | Depth<br>(m) | W<br>% | LL<br>% | PL<br>% | $\gamma_t$<br>t/m <sup>3</sup> | $S_u$<br>t/m <sup>2</sup> | SPT N-Value<br>Blows/ft |
|-----------------------------|--------------|--------|---------|---------|--------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Soft Clay,CH                | 00.00-13.50  | 100    | -       | -       | 1.4                            | 1.25                      | -                       |
| Medium Stiff Clay,CH        | 13.50-15.00  | 55     | -       | -       | 1.6                            | 2.5                       | -                       |
| Stiff to Very Stiff Clay,CH | 15.00-20.50  | 35     | 62      | 29      | 1.8                            | 12.0                      | 18                      |
| Stiff to Very Stiff Clay,CL | 20.50-25.80  | 23     | 45      | 22      | 1.9                            | 12.5                      | 24                      |
| Medium Dense Sand           | 25.80-28.50  | -      | -       | -       | 2.0                            | -                         | 25                      |
| Very Dense Sand             | 28.50-30.00  | -      | -       | -       | 2.0                            | -                         | 50                      |
| Medium Dense Sand           | 30.00-40.50  | -      | -       | -       | 2.0                            | -                         | 42                      |
| Very Dense Sand             | 40.50-49.00  | -      | -       | -       | 2.0                            | -                         | 50                      |

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการเจาะสำรวจดินของหลุมเจาะ BH-12 ที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็ม TP-14

| Soil Type                   | Depth<br>(m) | W<br>% | LL<br>% | PL<br>% | $\gamma_t$<br>t/m <sup>3</sup> | $S_u$<br>t/m <sup>2</sup> | SPT N-Value<br>Blows/ft |
|-----------------------------|--------------|--------|---------|---------|--------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Soft to Medium Clay,CH      | 00.00-15.80  | 110    | 108     | 41      | 1.4                            | 0.7                       | -                       |
| Stiff to Very Stiff Clay,CH | 15.80-24.30  | 25     | 62      | 26      | 1.9                            | 17                        | 25                      |
| Medium Dense Sand           | 24.30-25.50  | -      | -       | -       | 2.0                            | -                         | 29                      |
| Dense to Very Dense Sand    | 25.50-32.00  | -      | -       | -       | 2.0                            | -                         | 47                      |

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการเจาะสำรวจดินของหลุมเจาะ BN-5 ที่ใช้ในการก่อสร้างเสาเข็ม TP-16, TP-17 และ TP-18

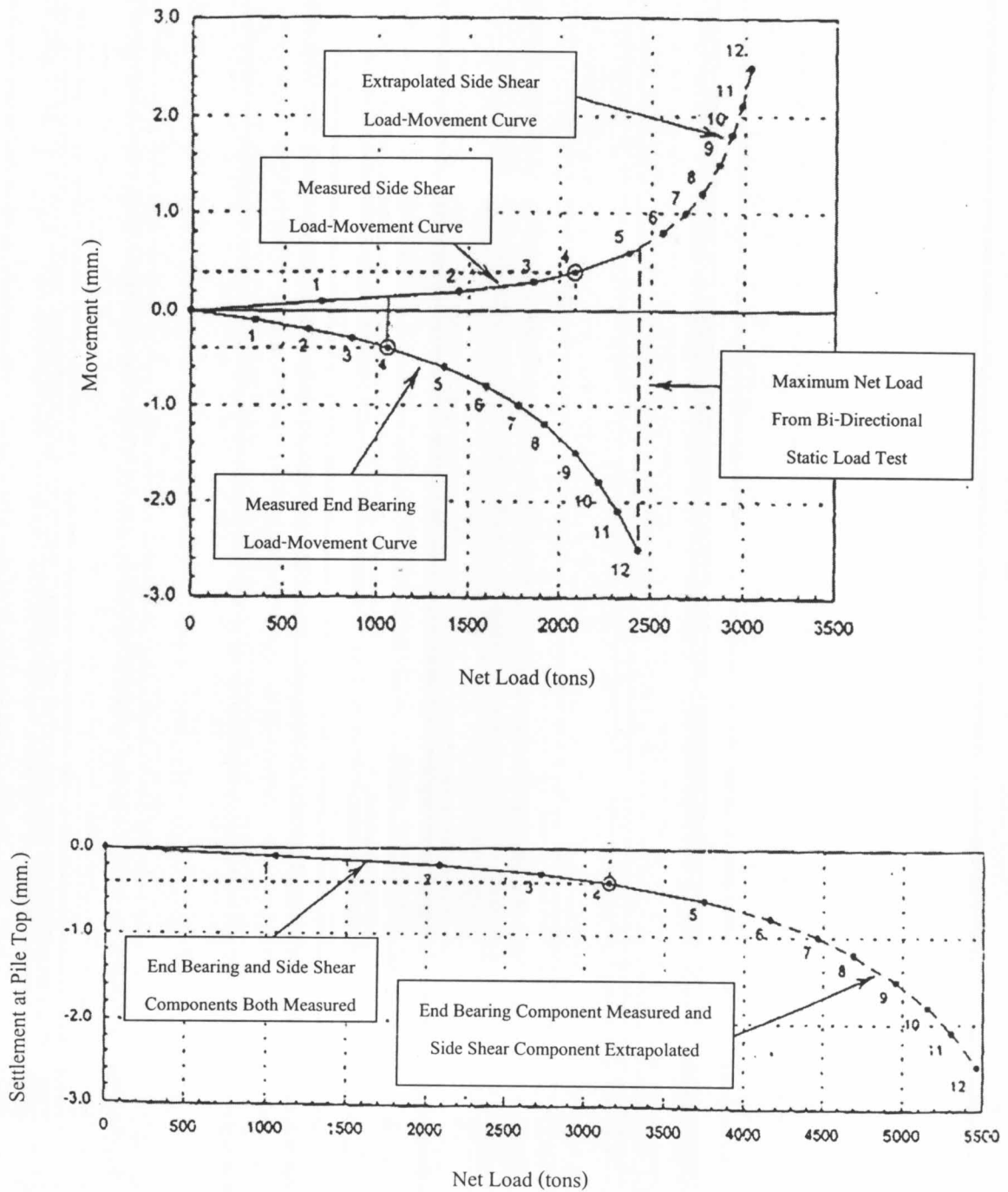
| Soil Type                   | Depth<br>(m) | $\omega$<br>% | LL<br>% | PL<br>% | $\gamma_t$<br>t/m <sup>3</sup> | $S_u$<br>t/m <sup>2</sup> | SPT N-Value<br>Blows/ft |
|-----------------------------|--------------|---------------|---------|---------|--------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Soft Clay,CH                | 00.00-15.00  | 100           | -       | -       | 1.4                            | 1.0                       | -                       |
| Stiff to Very Stiff Clay,CH | 15.00-21.00  | 33            | 82      | 36      | 1.8                            | 13.7                      | 20                      |
| Very Stiff Clay,CL          | 21.00-27.00  | 24            | 39      | 19      | 1.9                            | 13                        | 25                      |
| Stiff Clay,CH               | 27.00-29.50  | 30            | -       | -       | 1.8                            | 6.1                       | 9                       |
| Very Dense Sand             | 29.50-36.00  | -             | -       | -       | 2.0                            | -                         | 50                      |
| Dense to Very Dense Sand    | 36.00-43.50  | -             | -       | -       | 2.0                            | -                         | 40                      |

## 4.2 การแปลผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

### 4.2.1 เสาเข็มที่ทำการทดสอบโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test

สำหรับเสาเข็มที่ทำการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกโดยวิธีนี้ ยังไม่สามารถ plot กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่มากกระทำกับค่าการทรุดตัว (Load – Settlement Curve) ของเข็มทั้งต้นได้ เนื่องจากขั้นตอนการทดสอบแตกต่างจากวิธี Conventional Static Load Test ตรงที่การ apply load แก่เสาเข็มจะกระทำเป็น Stage เริ่มจาก Stage 1 ถึง Stage 3 โดย apply load จาก Hydraulic Jack ที่ติดตั้งในตัวเข็ม จาก Stage 1 จะได้ค่าความต้านทานที่ปลายเข็มกับการทรุดตัวของปลายเข็มโดยตรง ส่วนผลการทดสอบจาก Stage 2 กับ Stage 3 จะวิเคราะห์ได้ค่าแรงเสียดทานด้านข้างกับการเคลื่อนตัวของเข็ม ดังนั้นในการหาค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิกฤติของเข็มทั้งต้นจำเป็นต้องสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่ถ่ายให้แก่เข็มกับการเคลื่อนตัวของเข็มทั้งต้นเสียก่อนโดยการรวมกราฟระหว่าง apply load กับ movement ของเข็มในแต่ละ Stage เข้าด้วยกัน ที่ค่า movement เดียวกันนำ apply load มารวมกันก็จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง apply load กับ movement ของเข็มทั้งต้น ซึ่งเป็นกราฟที่อยู่ในรูปของ Equivalent Top - Loaded Load - Settlement Curve ซึ่งสามารถเปรียบเทียบพฤติกรรมของเข็มกับกราฟ Load – Settlement ที่ได้จากทดสอบเสาเข็มโดยวิธี Conventional Static Load Test ได้อย่างชัดเจน

ตัวอย่างการสร้าง Equivalent Top – Loaded Load – Settlement Curve แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างการสร้าง Equivalent Top – Loaded Load – Settlement Curve สำหรับเสาเข็มที่ทำการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test

สำหรับ Equivalent Top – Loaded Load – Settlement Curve ที่ได้จะนำไปประมาณค่าการรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติโดยใช้ทฤษฎีของ Mazurkiewicz (1972) ซึ่งจากผลการวิจัยของ Pimpasugdi (1989), Wachiraprakarnpong (1993) และ Soontornsiri (1995) พบว่าทฤษฎีดังกล่าวมีความเป็นไปได้มากที่สุดในการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม

ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่แสดงในรูปของ Equivalent Top – Loaded Load – Settlement Curve แสดงไว้ในภาคผนวก แบ่งเป็น Lowerbound Curve และ Upperbound Curve โดย Lowerbound Curve ได้จากผลการทดสอบจริงทั้ง 3 Stage และ Upperbound Curve ได้จากการทดสอบจริงทั้ง 3 Stage เช่นเดียวกัน แต่ใน Stage 3 จะประมาณค่าแรงเสียดทานด้านข้างที่จุดวิบัติ ณ ค่าการเคลื่อนตัวของเข็มเท่ากับ 0.5% ของเส้นผ่าศูนย์กลางเข็ม (Whitaker and Cooke, 1966) ทั้งนี้เนื่องจากผลการวิเคราะห์ใน Stage 3 พบว่า แรงเสียดทานด้านข้างที่เกิดขึ้นในชั้นดินยังพัฒนาตัวไม่ถึงจุดวิบัติ

#### 4.2.2 เสาเข็มที่ทำการทดสอบโดยวิธี Conventional Static Load Test

สำหรับเสาเข็มที่ทำการทดสอบโดยวิธีนี้สามารถ plot กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อเข็ม ณ ตำแหน่งหัวเข็มกับค่าการทรุดตัว (Load – Settlement Curve) ได้โดยตรง และในการหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติของเสาเข็มก็ใช้ทฤษฎีของ Mazurkiewicz (1972) เช่นเดียวกับเสาเข็มที่ทดสอบโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test ซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก

ผลการวิเคราะห์การรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ที่ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัยนี้โดยใช้ทฤษฎีของ Mazurkiewicz (1972)

| Type of Pile                           | Type of Pile Load Test          | Pile Diameter (m) | Design Pile Length (m) | Maximum Test Load (tons) | Ultimate Pile Capacity Estimated from Mazurkiewicz Method (tons)                                | Type of a Slurry for Constructing Bored Pile |
|--|---------------------------------|-------------------|------------------------|--------------------------|---|--|
| Instrumented Bored Pile (TP-15,BH-1)   | Bi-Directional Static Load Test | 1000              | 41.00                  | 1400                     | upperbound = 1450 , lowerbound = 1180   | Polymer                                      |
| Instrumented Bored Pile (TP-19,B-6)    | Bi-Directional Static Load Test | 1200              | 41.50                  | 2284                     | Case 1 : upperbound = 2450 , lowerbound = 2250<br>Case 2: upperbound = 1900 , lowerbound = 1580 | Polymer                                      |
| Instrumented Bored Pile (TP-13/1,BH-1) | Conventional Static Load Test   | 600               | 30.31                  | 300                      | 530   | Polymer                                      |
| Instrumented Bored Pile (TP-14,BH-12)  | Conventional Static Load Test   | 600               | 30.28                  | 375                      | 405   | Polymer                                      |
| Instrumented Bored Pile (TP-16,BN-5)   | Conventional Static Load Test   | 600               | 35.10                  | 400                      | 440   | Bentonite                                    |
| Instrumented Bored Pile (TP-17,BN-5)   | Conventional Static Load Test   | 600               | 35.66                  | 500                      | 565   | Polymer                                      |
| Instrumented Bored Pile (TP-18,BN-5)   | Conventional Static Load Test   | 1000              | 41.10                  | 1350                     | 1387  | Bentonite                                    |

#### 4.3 การศึกษาเรื่องการส่งถ่ายน้ำหนัก (Load Transfer) จากเสาเข็มไปสู่ดินรอบ ๆ เสาเข็ม

##### 4.3.1 การคำนวณหาแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นในตัวเสาเข็มที่ระดับความลึกต่าง ๆ

ในการวิเคราะห์หาแรงที่เสาเข็มไปยังดินบริเวณรอบ ๆ เสาเข็มขณะที่มีแรงมากระทำกับตัวเสาเข็มนั้น จำเป็นต้องทราบแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อเข็มที่ระดับความลึกต่าง ๆ ซึ่งวัดได้จากเครื่องมือวัดที่ทำการติดตั้งภายในตัวเข็ม ได้แก่ Strain Gauge และ Telltale rod โดยคำนวณแรงตามแนวแกนได้จาก Strain ที่เกิดขึ้นในเสาเข็มที่จุดที่ติดตั้ง Strain Gauge และการเคลื่อนตัวของ Telltale rod ตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.4 ในการวิเคราะห์จะแบ่งเสาเข็มเป็น 2 ประเภทตามวิธีการทดสอบเสาเข็ม ดังต่อไปนี้

##### 4.3.1.1 เสาเข็มที่ทำการทดสอบโดยวิธี Bi- Directional Static Load Test

ในการคำนวณหาแรงตามแนวแกนเสาเข็มที่เกิดขึ้นขณะที่มีการถ่ายน้ำหนักจาก Hydraulic Jack ไปยังเสาเข็ม จำเป็นต้องทราบค่าสตีฟเนสสมมูลย์ของเสาเข็ม (Equivalent Axial Pile Stiffness,  $AE_p$ ) ซึ่งคำนวณได้จากการวิเคราะห์กลับจากสมการ

$$P_{ij} = AE_p \times \epsilon_{ij}$$

โดยที่

|                 |   |   |
|-----------------|---|---|
| $P_{ij}$        | = | แรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นบริเวณ Top of top jack (โดยทำการ Apply load จาก Top jack ในการทดสอบ Stage 3) |
| $AE_p$          | = | Equivalent Axial Pile Stiffness   |
| $\epsilon_{ij}$ | = | Strain at Top of top jack   |

จากรูป Typical Soil Profile สำหรับเสาเข็ม TP-15 และ TP-19 ที่แสดงไว้ในภาคผนวก พบว่า Straingauges ที่ติดตั้งใกล้กับ Top jack สำหรับ Stage ที่ 3 อยู่ที่ Level 3 และ Level 4 จากนั้นคำนวณค่า  $\epsilon_{ij}$  ได้จากสมการ

$$\frac{\epsilon_{ij} - \epsilon_4}{L_{ij} - L_4} = \frac{\epsilon_4 - \epsilon_3}{L_4 - L_3}$$

โดยที่

|              |   |                                       |
|--------------|---|---------------------------------------|
| $\epsilon_3$ | = | ค่า Strain เฉลี่ยที่วัดได้ที่ Level 3 |
| $\epsilon_4$ | = | ค่า Strain เฉลี่ยที่วัดได้ที่ Level 4 |
| $L_3$        | = | ระยะจาก Level 3 ไปยังหัวเข็ม          |
| $L_4$        | = | ระยะจาก Level 4 ไปยังหัวเข็ม          |
| $L_{ij}$     | = | ระยะจาก Top of top jack ไปยังหัวเข็ม  |

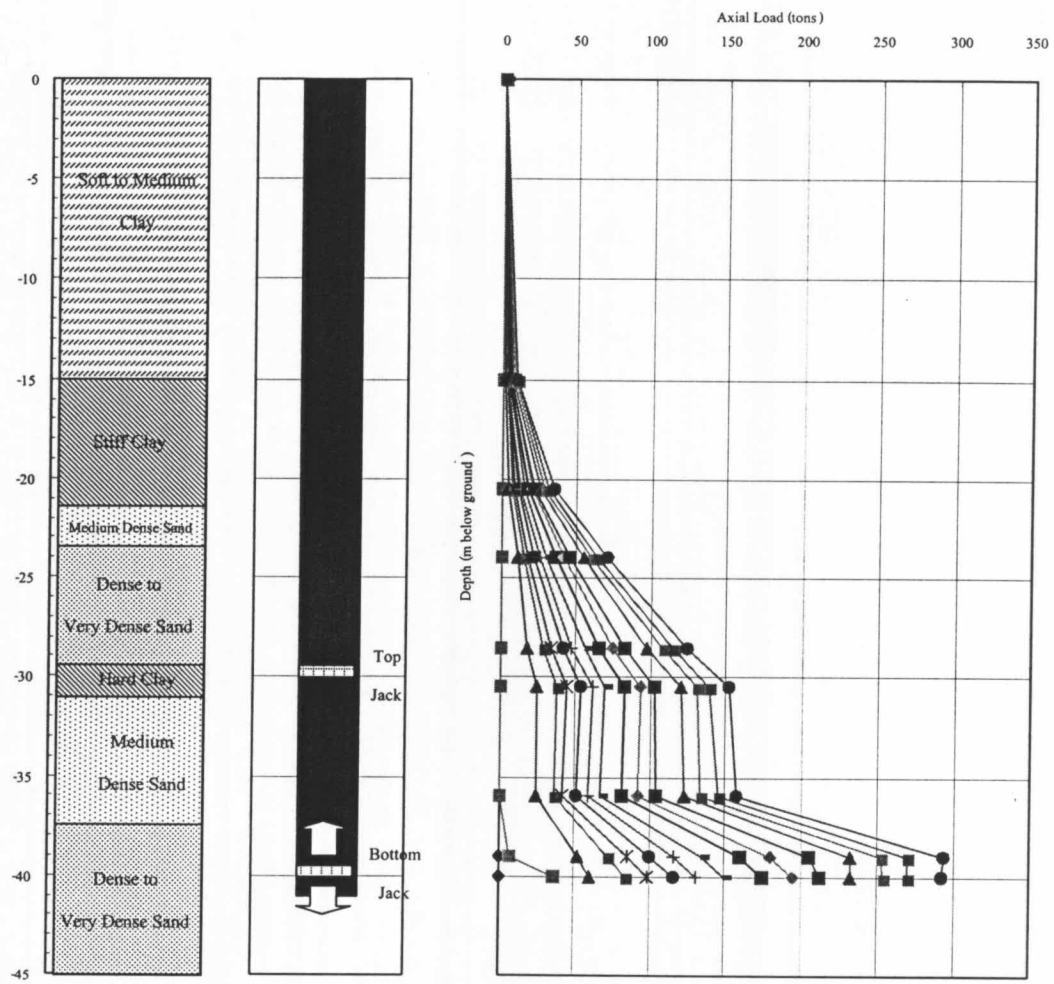
จากนั้นก็คำนวณค่าสติเฟเนสสมมูลย์ของเสาเข็มได้จาก

$$AE_p = \frac{P_{ij}}{\epsilon_{ij}}$$

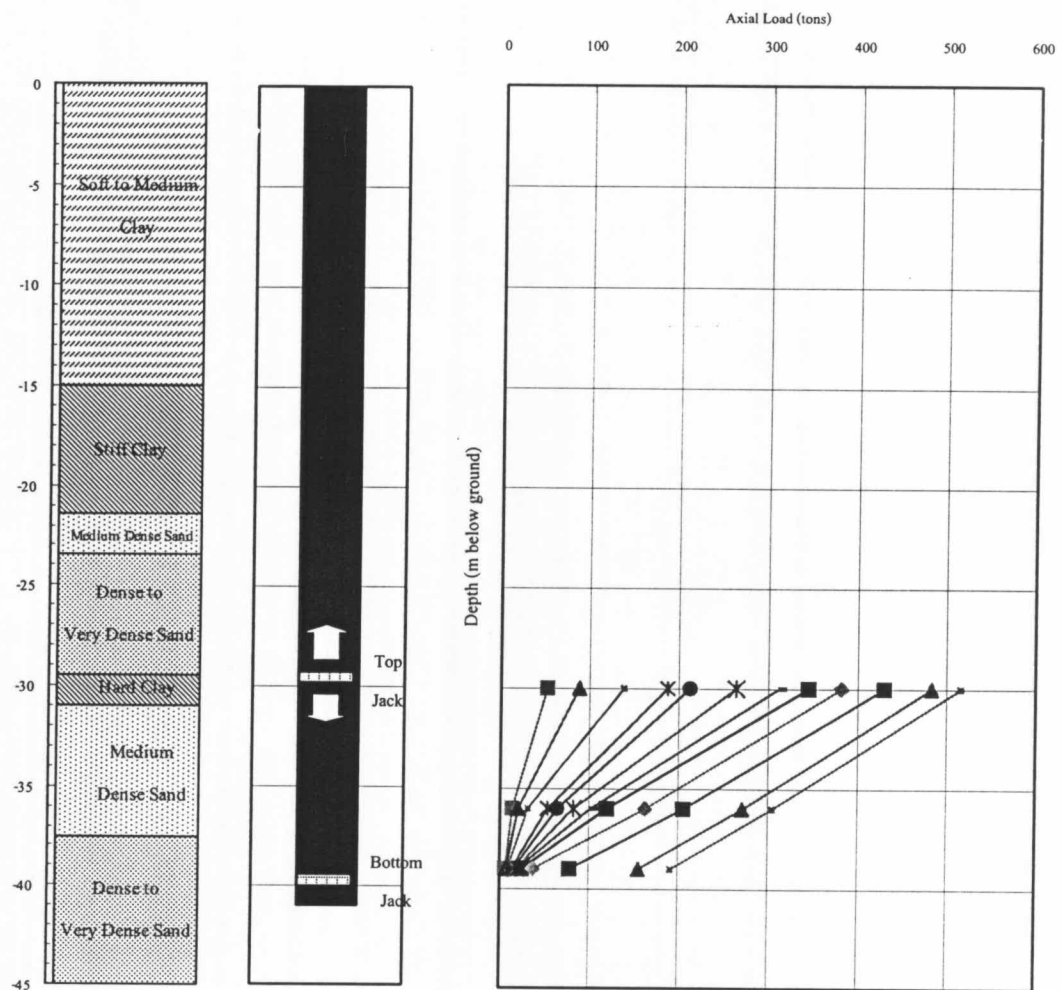
ผลการคำนวณค่าสติเฟเนสสมมูลย์ของเสาเข็มของเสาเข็ม TP-15 และ TP-19 มีค่าเท่ากับ  $1.96 \times 10^6$  tons และ  $5.25 \times 10^6$  tons ตามลำดับ รายละเอียดการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก

จากนั้นเมื่อทราบค่าสติเฟเนสสมมูลย์ของเสาเข็มก็สามารถคำนวณหาแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นในตัวเข็มที่ระดับความลึกต่าง ๆ ได้เมื่อทราบค่า Strain ที่จุดนั้น ผลการวิเคราะห์แรงตามแนวแกนแสดงดังรูปที่ 4.2 ถึง 4.3

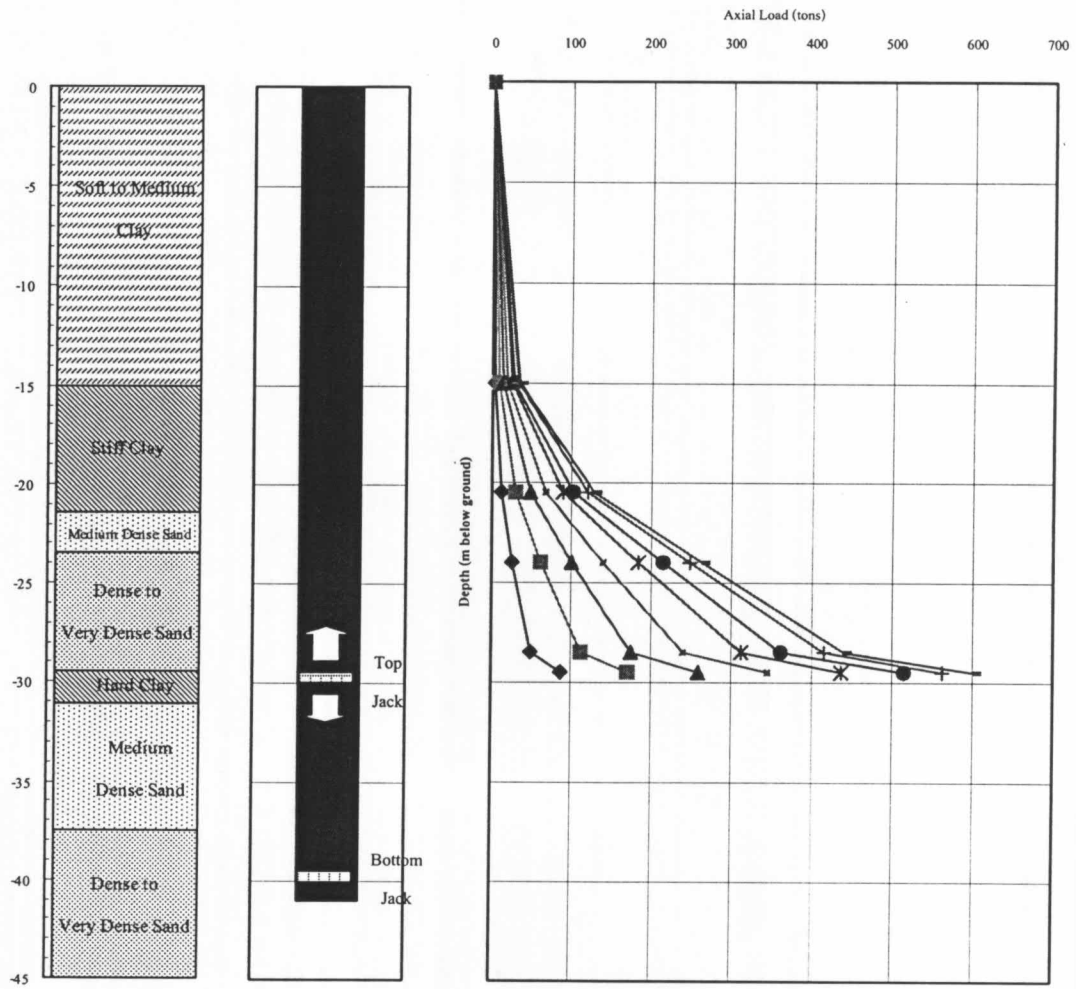




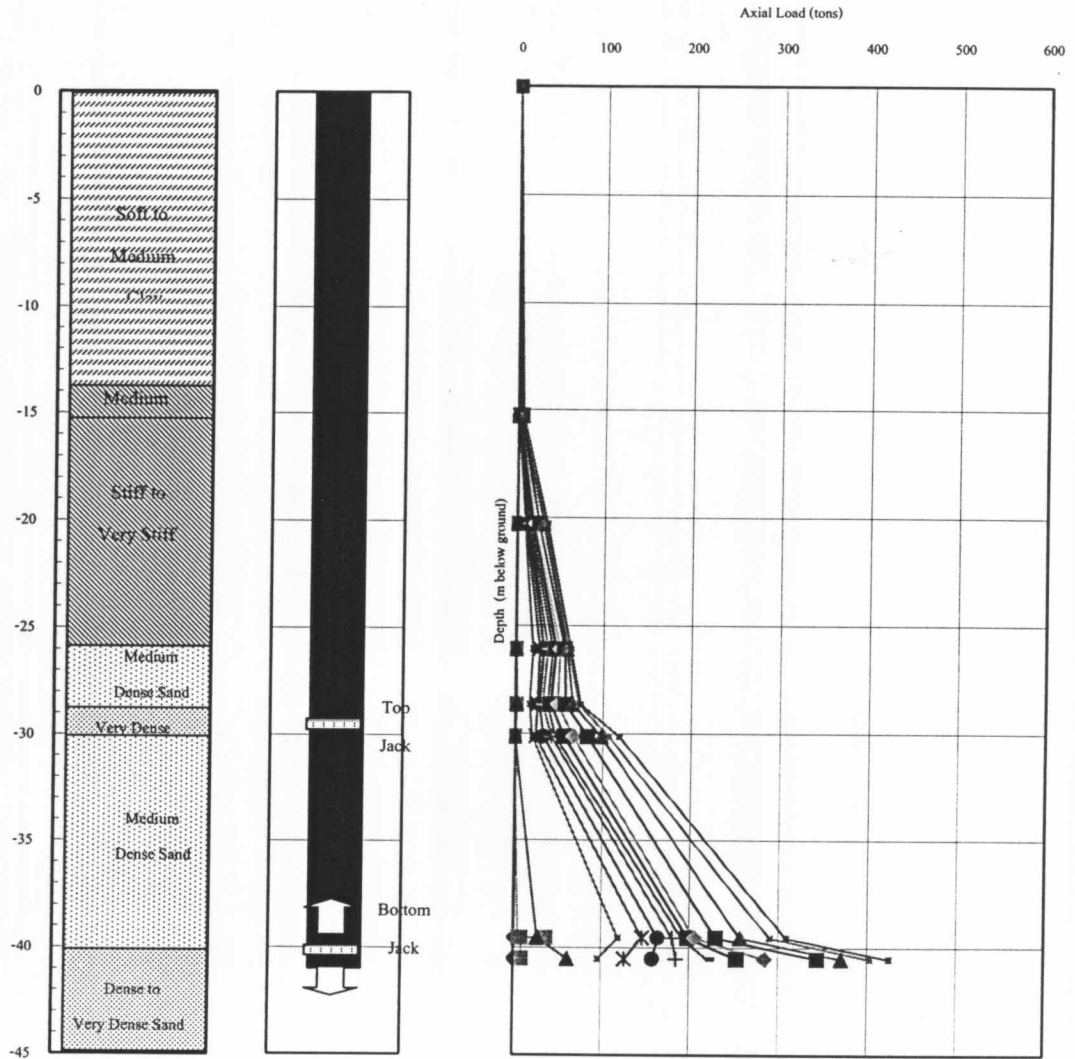
รูปที่ 4.2ก แรงตามแนวแกนที่ความลึกต่างๆ ของเข็ม TP-15 (Stage 1)



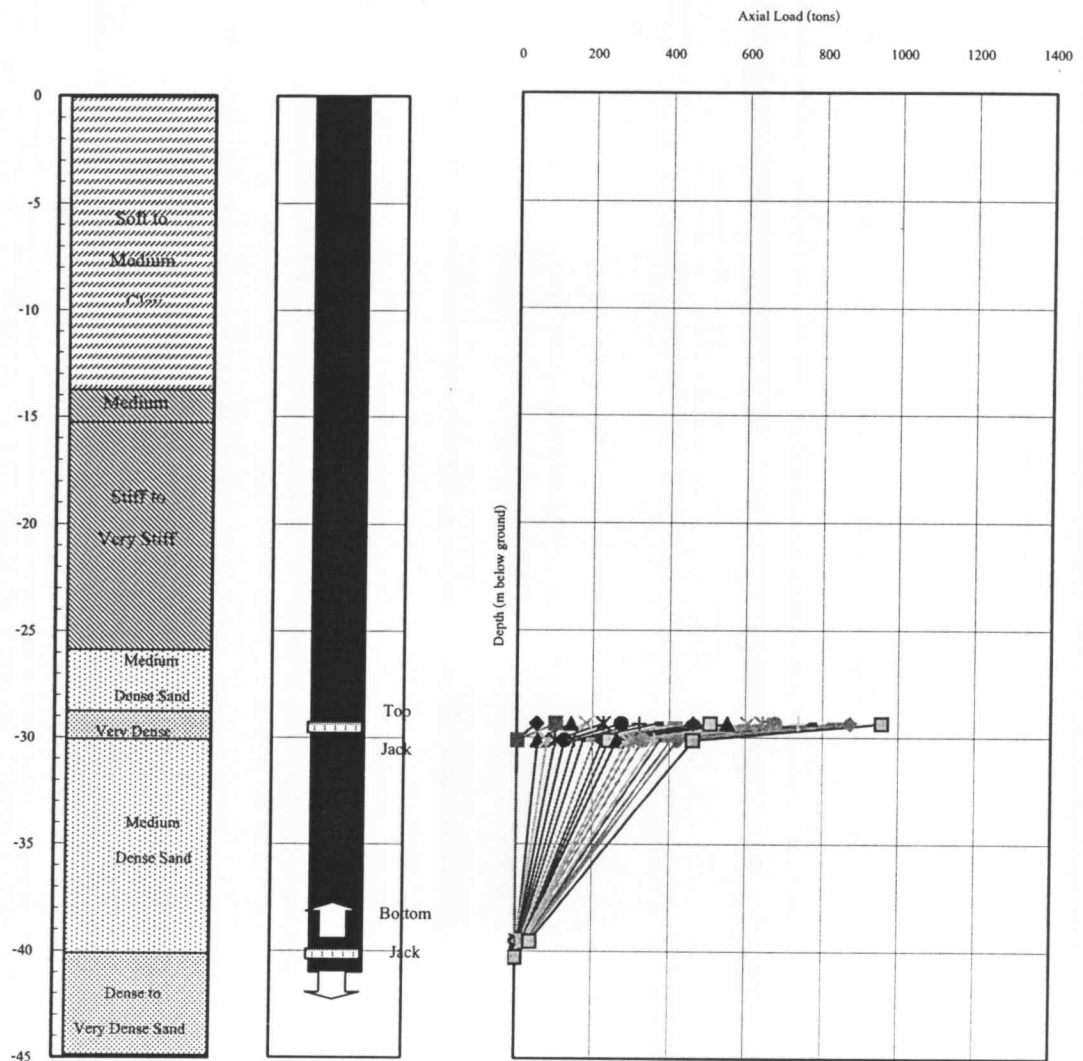
รูปที่ 4.2ข แรงตามแนวแกนที่ความลึกที่พิจารณาของเข็ม TP-15 (Stage 2)



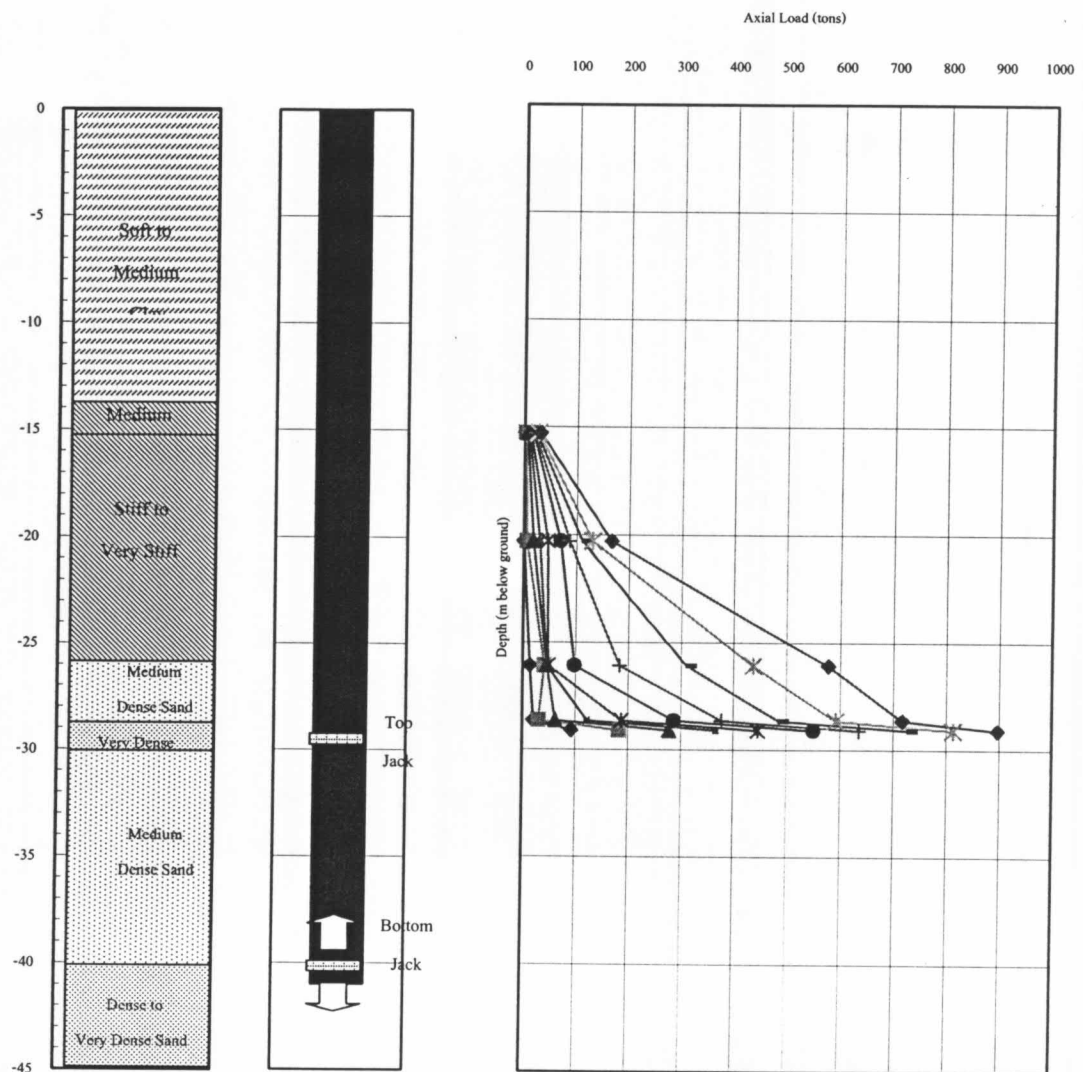
รูปที่ 4.2ค แรงตามแนวแกนที่ความลึกที่พิจารณาของเข็ม TP-15 (Stage 3)



รูปที่ 4.3ก แรงตามแนวแกนที่ความลึกต่างๆ ของเข็ม TP-19 (Stage 1)



รูปที่ 4.3x แรงตามแนวแกนที่ความลึกที่พิจารณาของเข็ม TP-19 (Stage 2)



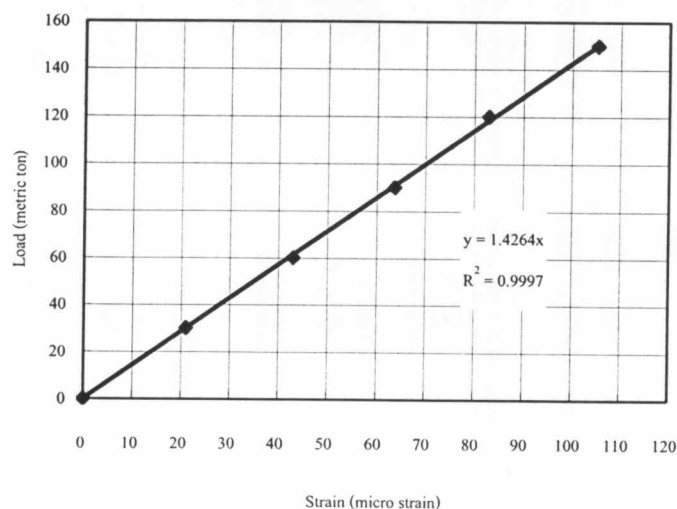
รูปที่ 4.3ค แรงตามแนวแกนที่ความลึกที่พิจารณาของเข็ม TP-19 (Stage 3)

สำหรับค่าการเคลื่อนตัวที่วัดได้จาก Telltale rod ที่ติดตั้งกับ Hydraulic Jack จะเป็นค่าการเคลื่อนตัวโดยตรงของเสาเข็มเมื่อมีแรงจาก Hydraulic Jack มากระทำในแต่ละ Stage ของการทดสอบ ซึ่งไม่นำมาคำนวณหาแรงตามแนวแกนเนื่องจากการติดตั้งเพียง 4 ระดับเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ค่าแรงตามแนวแกนที่คำนวณโดยใช้ข้อมูลจาก Telltale rod จึงเป็นค่าที่ค่อนข้างหยاب อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้ก็สามารถใช้เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จาก Straingauges เพื่อยืนยันความถูกต้องว่าค่าที่อ่านได้จาก Straingauges มีความผิดพลาดหรือไม่

#### 4.3.1.2 เสาเข็มที่ทำการทดสอบโดยวิธี Conventional Static Load Test

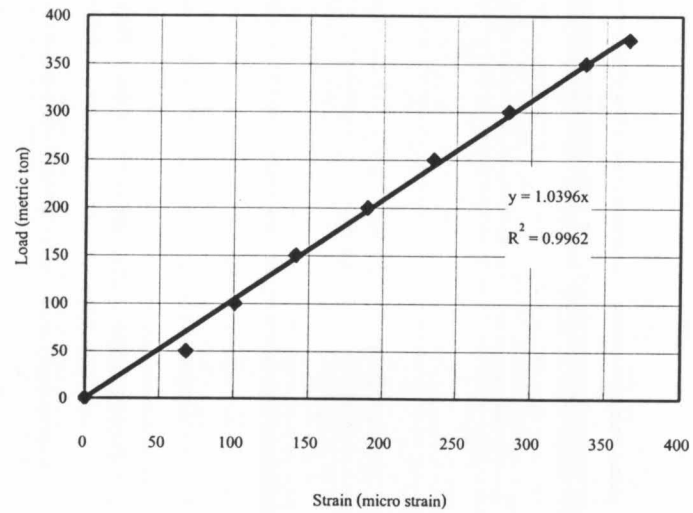
สำหรับการทดสอบเข็มวิธีนี้หาแรงตามแนวแกนโดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่อ่านได้จาก Straingauges ที่ติดตั้งที่ระดับบนสุดใกล้กับหัวเข็มกับค่า Load ที่ apply จากตำแหน่งหัวเข็ม ทั้งนี้ พิจารณาว่าดินและเข็มบริเวณใกล้หัวเข็มไม่สัมผัสกัน จึงไม่มีการถ่ายน้ำหนักจากเข็มไปสู่ดินรอบๆ ค่า Strain ที่วัดได้จาก Straingauges Level 1 จึงเป็นค่าที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกที่หัวเข็มโดยตรงเนื่องจากในขั้นตอนการทดสอบเสาเข็มจะให้น้ำหนักบรรทุกแก่เข็มเป็น Cycle แรงตามแนวแกนที่นำมาใช้วิเคราะห์แรงที่เข็มถ่ายไปสู่ดินจะใช้ค่าจากการทดสอบใน Cycle สุดท้าย ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Load ของเสาเข็มแต่ละคันแสดงดังรูปที่ 4.4 ถึง 4.8

Calibration Chart for finding The New Pile Stiffness of TP-13/1



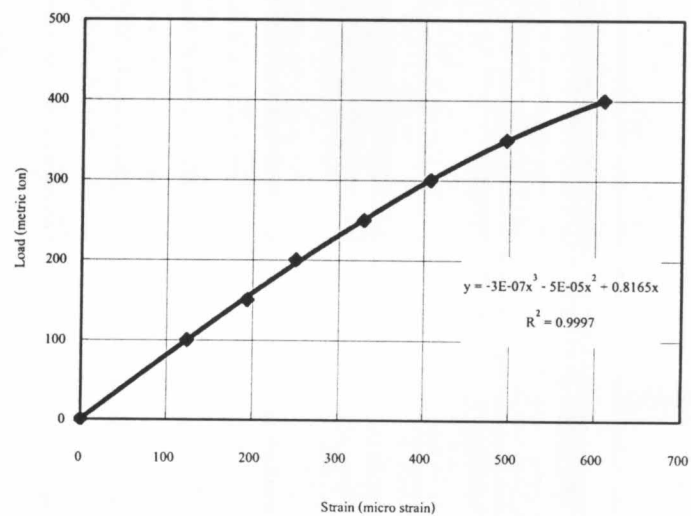
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Strain ของเข็ม TP-13/1

Calibration Chart for finding The New Pile Stiffness of TP-14



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Strain ของเข็ม TP-14

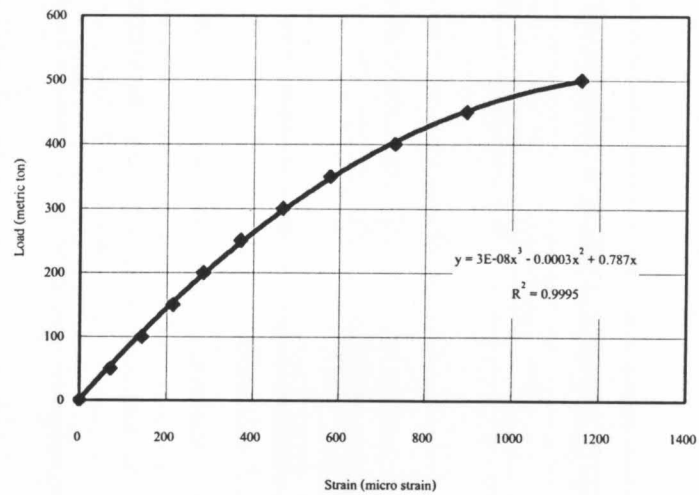
Calibration Chart for finding The New Pile Stiffness of TP-16



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Strain ของเข็ม TP-16

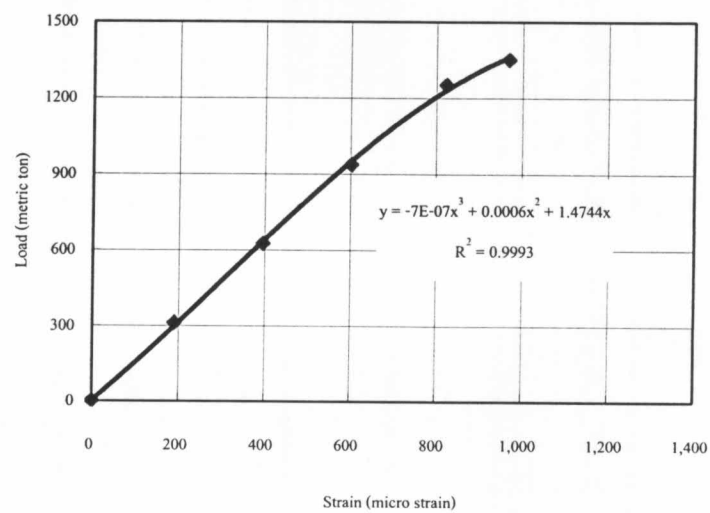


Calibration Chart for finding The New Pile Stiffness of TP-17



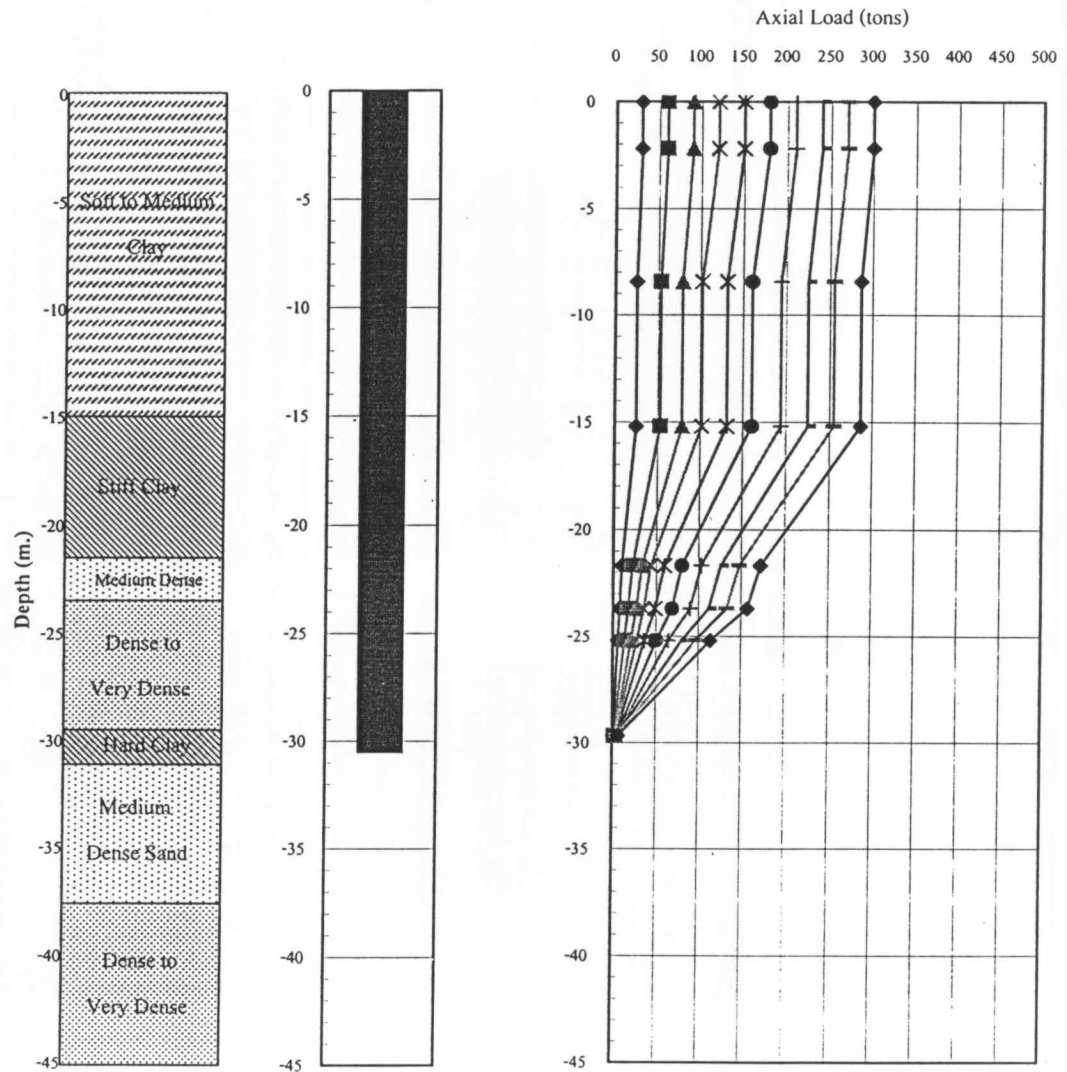
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Strain ของเข็ม TP-17

Calibration Chart for finding The New Pile Stiffness of TP-18

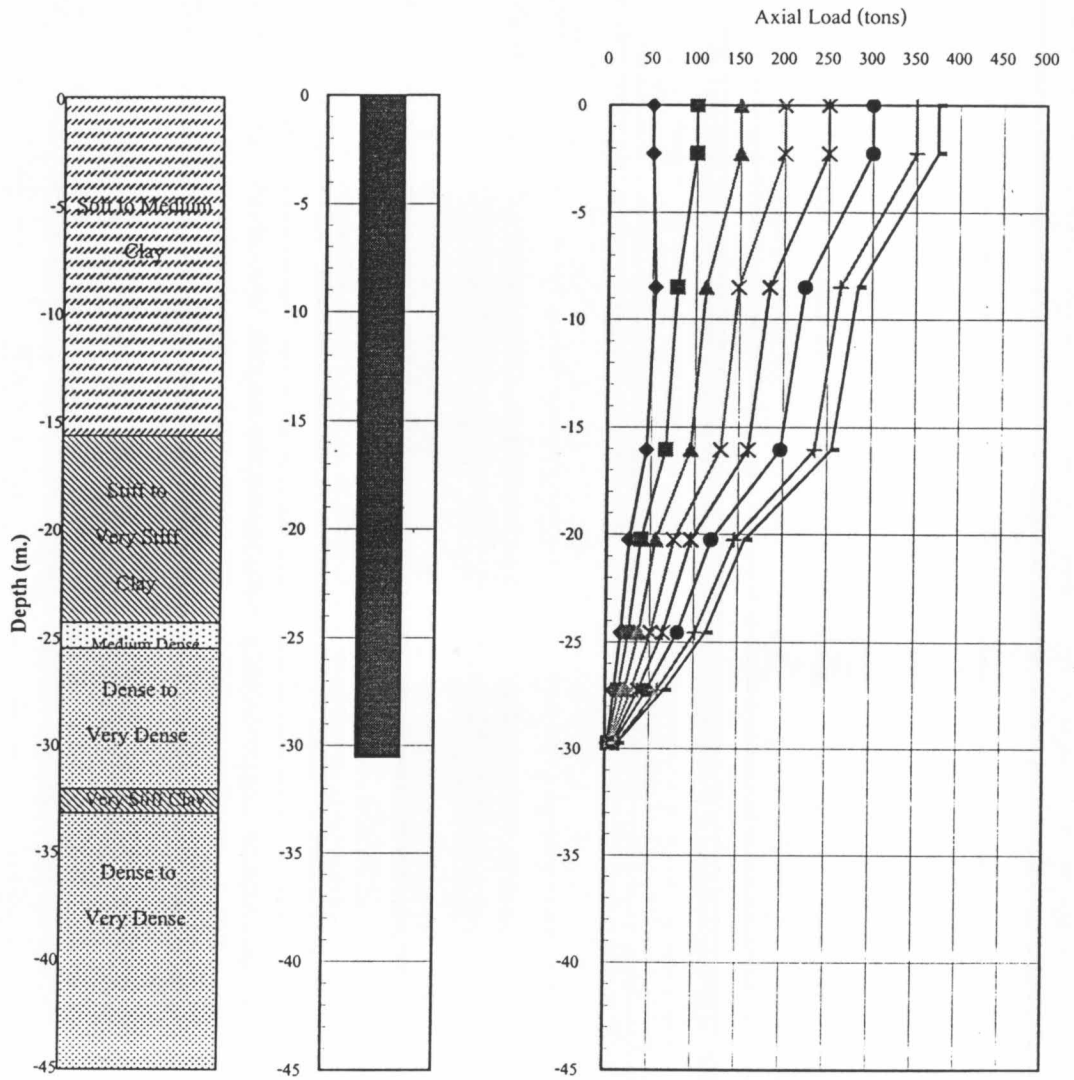


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Strain ของเข็ม TP-18

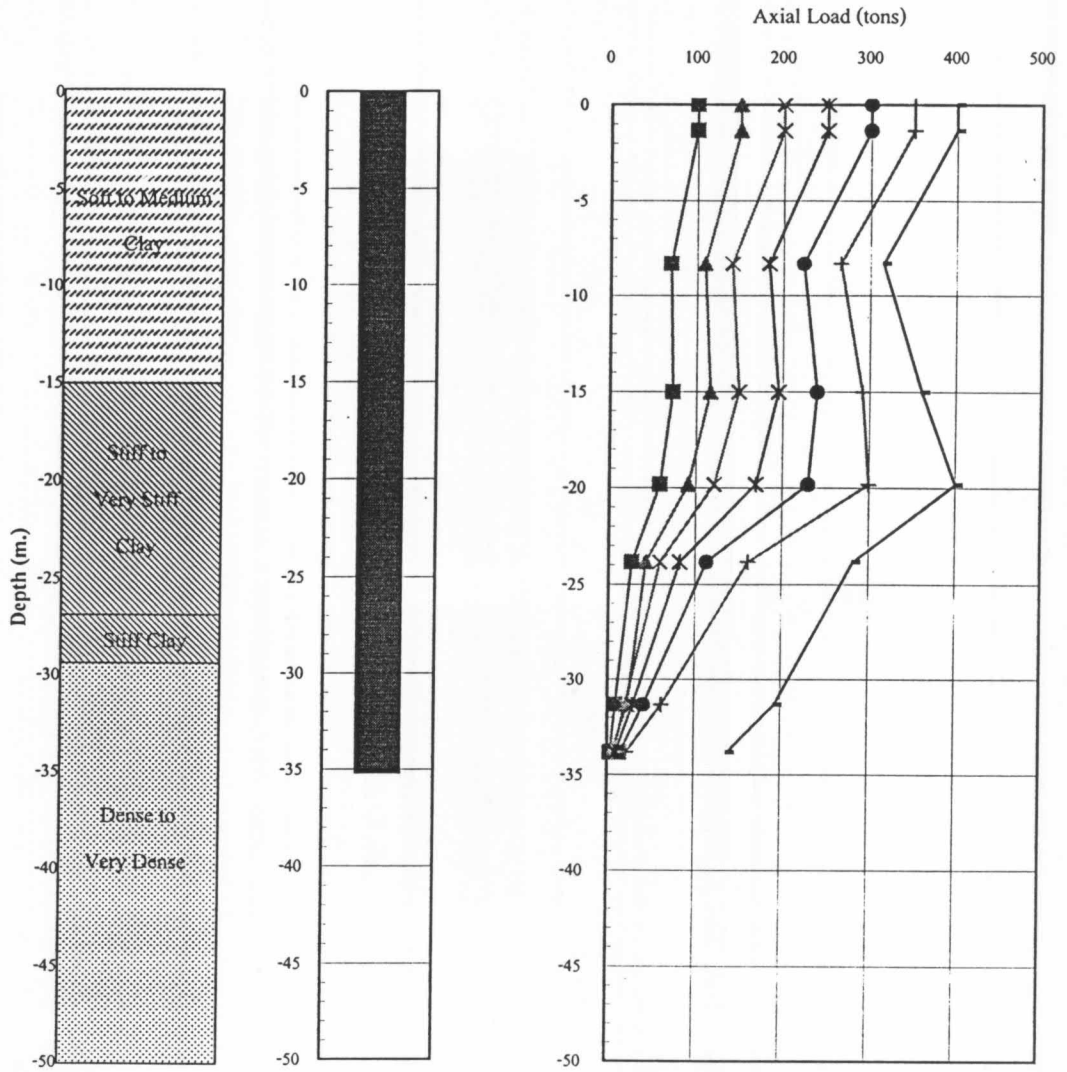
เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Strain ของเข็มแต่ละต้นได้แล้ว ก็สามารถหาแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นในเสาเข็มที่ระดับความลึกต่างๆ ได้ โดยคำนวณจากค่า Strain ที่อ่านได้จาก Strain gauges ที่ติดตั้งอยู่ในตัวเข็มที่ระดับความลึกที่มีการเปลี่ยนแปลงชั้นดินได้ ผลการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.9 ถึง 4.13 ดังนี้



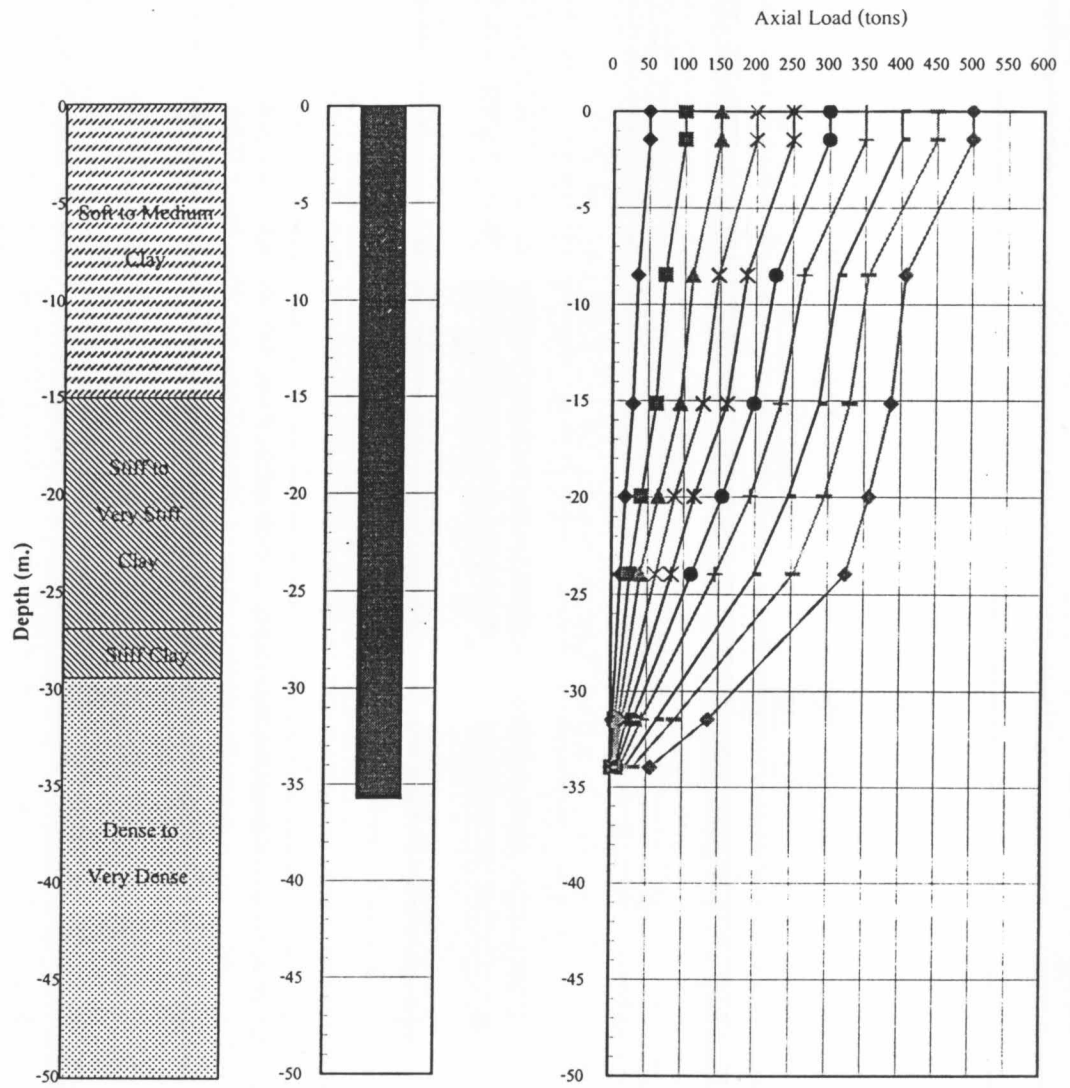
รูปที่ 4.9 แรงตามแนวแกนที่ความลึกต่างๆ ของเข็ม TP-13/1



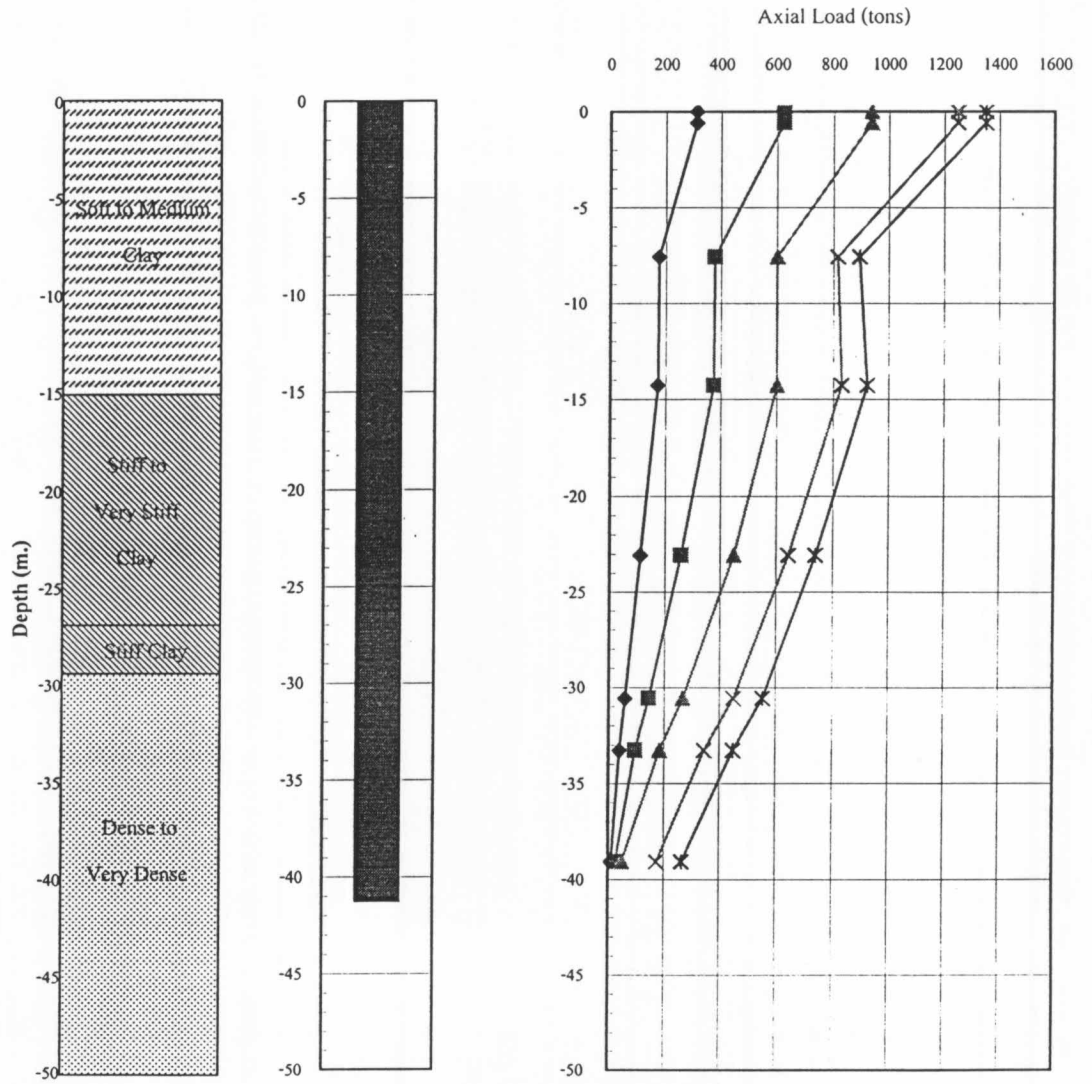
รูปที่ 4.10 แรงตามแนวแกนที่ความลึกต่างๆ ของเข็ม TP-14



รูปที่ 4.11 แรงตามแนวแกนที่ความลึกต่างๆ ของเข็ม TP-16



รูปที่ 4.12 แรงตามแนวแกนที่ความลึกต่างๆ ของเข็ม TP-17



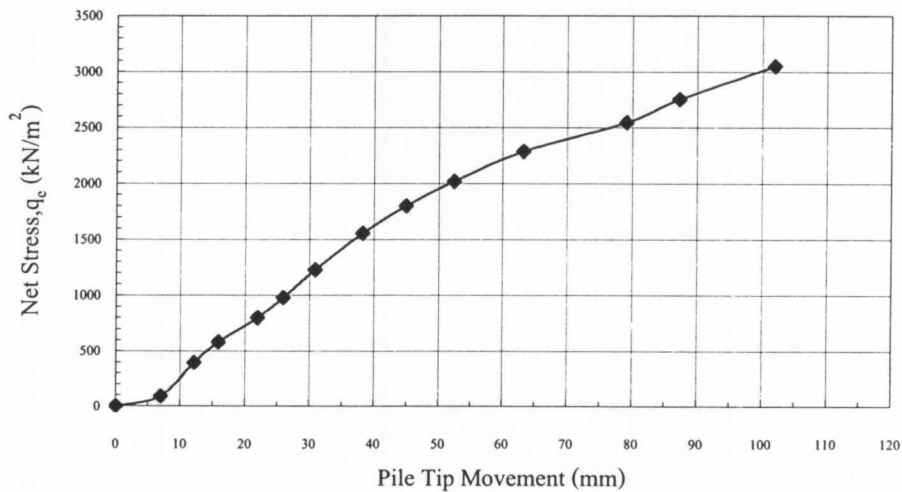
รูปที่ 4.13 แรงตามแนวแกนที่ความลึกต่างๆ ของเข็ม TP-18

สำหรับค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มวัดได้จาก Dial Gauge ที่ตำแหน่งหัวเข็ม ระหว่างการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกและการติดตั้ง Telltale rod ก็เพื่อยืนยันผลจาก Straingauges เช่นเดียวกับเสาเข็มที่ทดสอบโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test

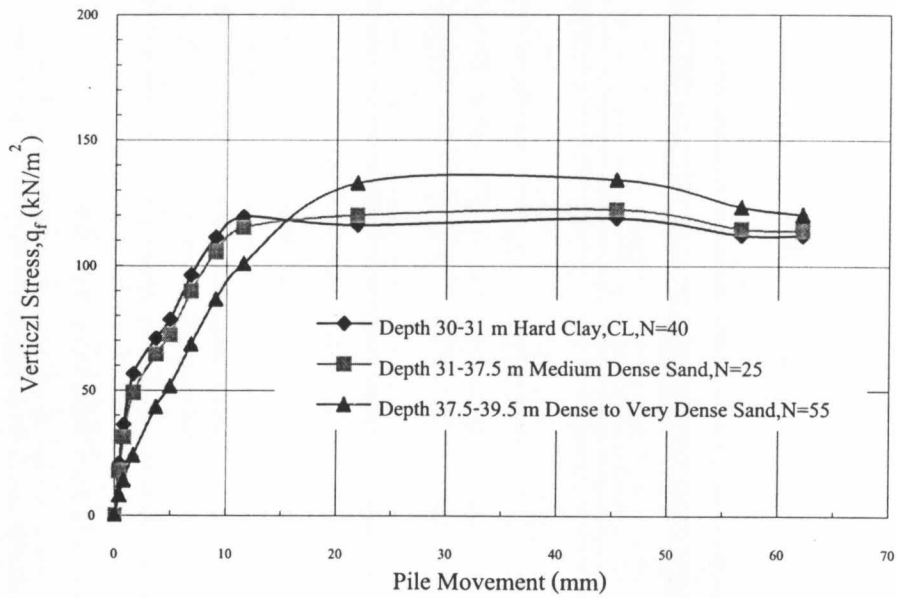
#### 4.3.2 ผลการวิเคราะห์การส่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากเข็มไปสู่ดินรอบ ๆ

การศึกษาการส่งถ่ายน้ำหนักจากเสาเข็มไปสู่ชั้นดินต่าง ๆ ของเข็ม TP-15, TP-19, TP-13/1, TP-14, TP-16, TP-17 และ TP-18 โดยวิธี Distribution Function Approach เมื่อทราบค่าแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อตัวเข็มดังรูปที่ 4.2, 4.3 และรูปที่ 4.9 ถึง 4.13 ก็สามารหาค่าน้ำหนักที่ส่งถ่ายจากเข็มไปสู่ชั้นดินต่าง ๆ ของเข็มดังกล่าวได้แสดงในตารางภาคผนวก เพื่อนำไปทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์สำหรับชั้นดินเหล่านั้นซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไปได้ โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ส่งถ่ายจากเข็มไปสู่ชั้นดินต่าง ๆ กับการเคลื่อนตัวของเข็มแสดงดังรูปที่ 4.14 ถึง 4.20 ซึ่งแบ่งตามวิธีการทดสอบได้ดังต่อไปนี้

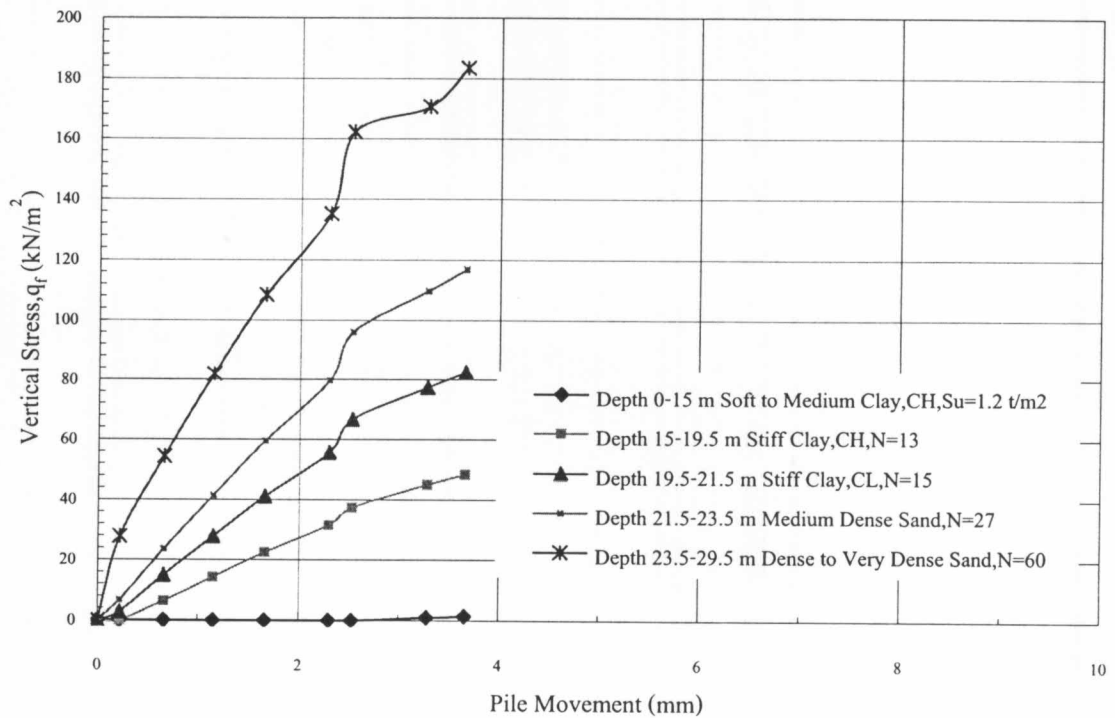
##### 4.3.2.1 เสาเข็มที่ทำการทดสอบโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test



รูปที่ 4.14ก ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ส่งถ่ายที่ปลายเสาเข็มกับการเคลื่อนตัวของปลายเสาเข็มของเสาเข็ม TP-15 (Stage 1)

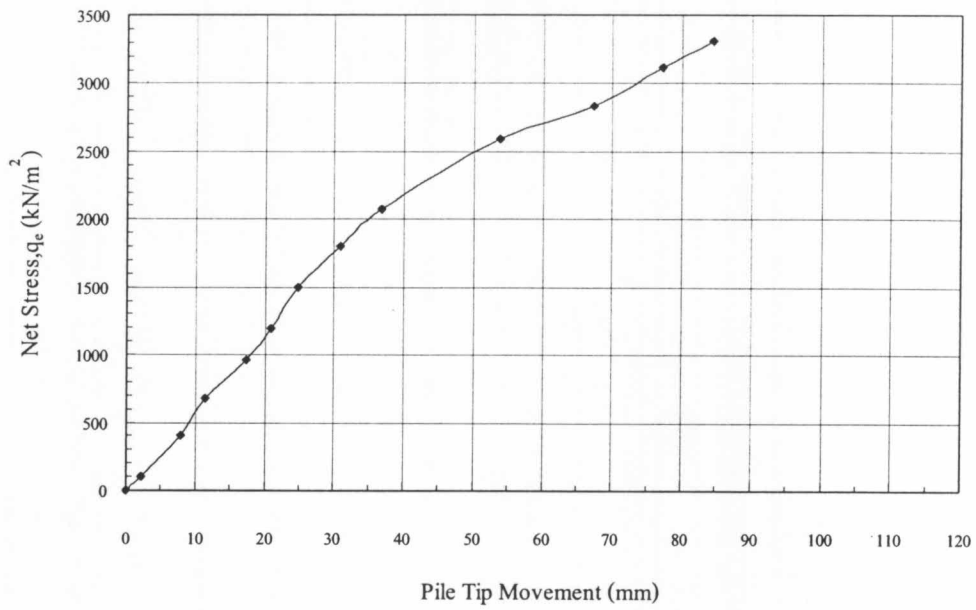


รูปที่ 4.14x ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเสียดทานด้านข้างกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม  
สำหรับเข็ม TP-15 (Stage 2)

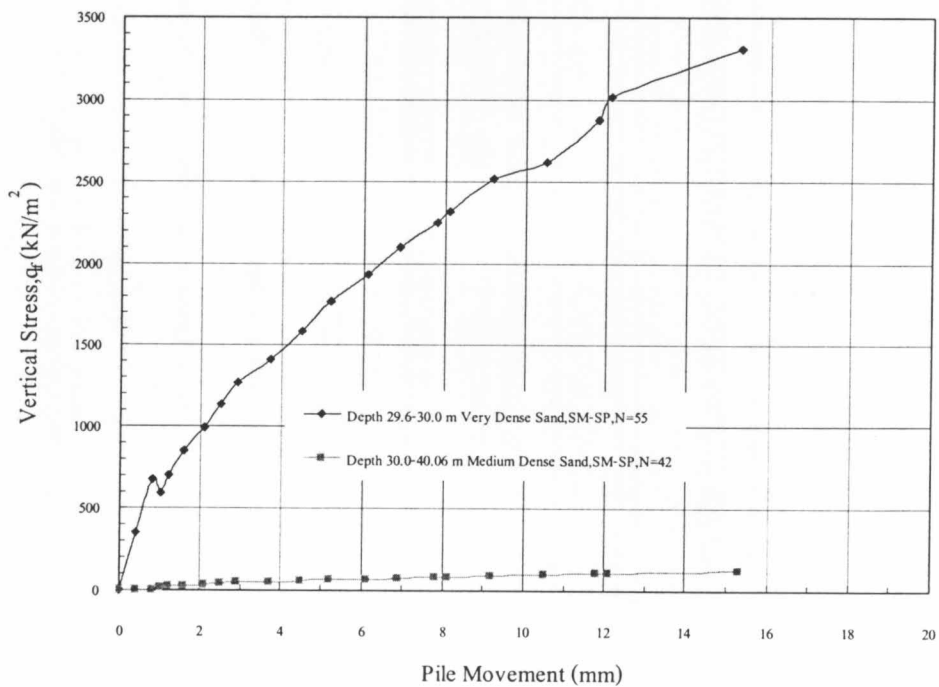


รูปที่ 4.14ค ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเสียดทานด้านข้างกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม  
สำหรับเข็ม TP-15 (Stage 3)

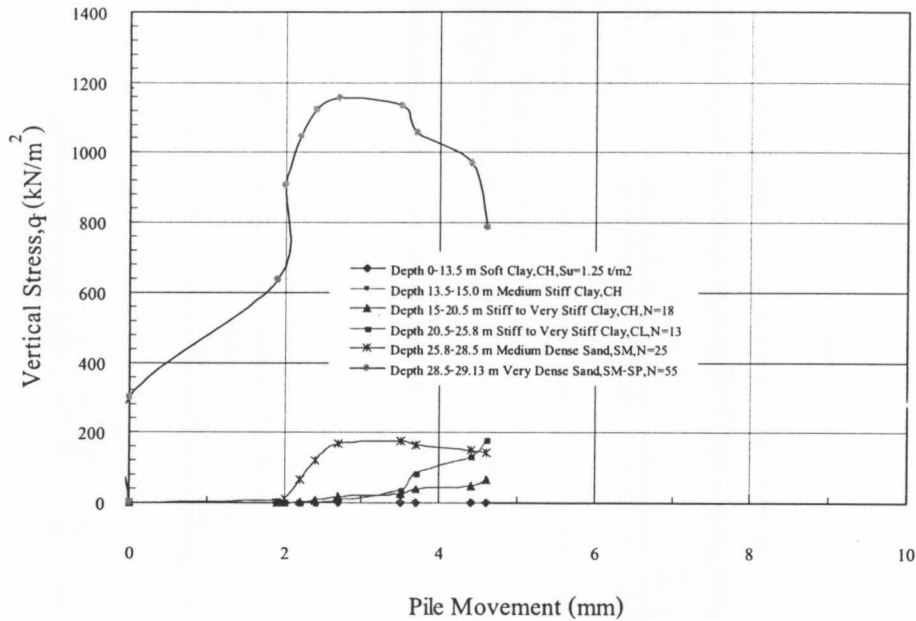




รูปที่ 4.15ก ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ส่งถ่ายที่ปลายเสาเข็มกับการเคลื่อนตัวของปลายเสาเข็มของเสาเข็ม TP-19 (Stage 1)



รูปที่ 4.15ข ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเสียดทานด้านข้างกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็มสำหรับเข็ม TP-19 (Stage 2)

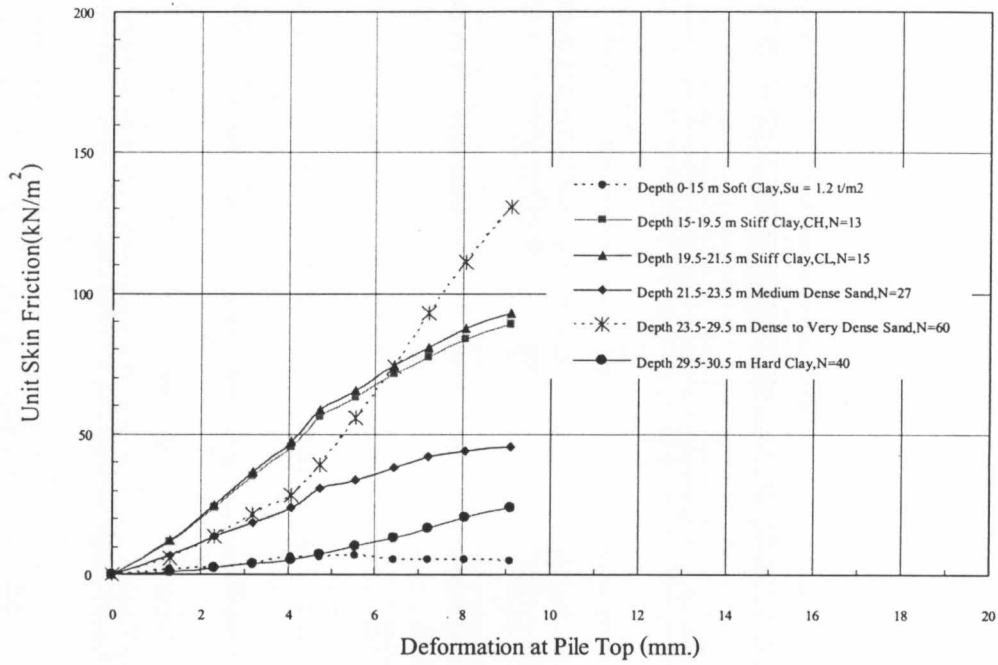


รูปที่ 4.15ค ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเสียดทานด้านข้างกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม  
สำหรับเข็ม TP-19 (Stage 3)

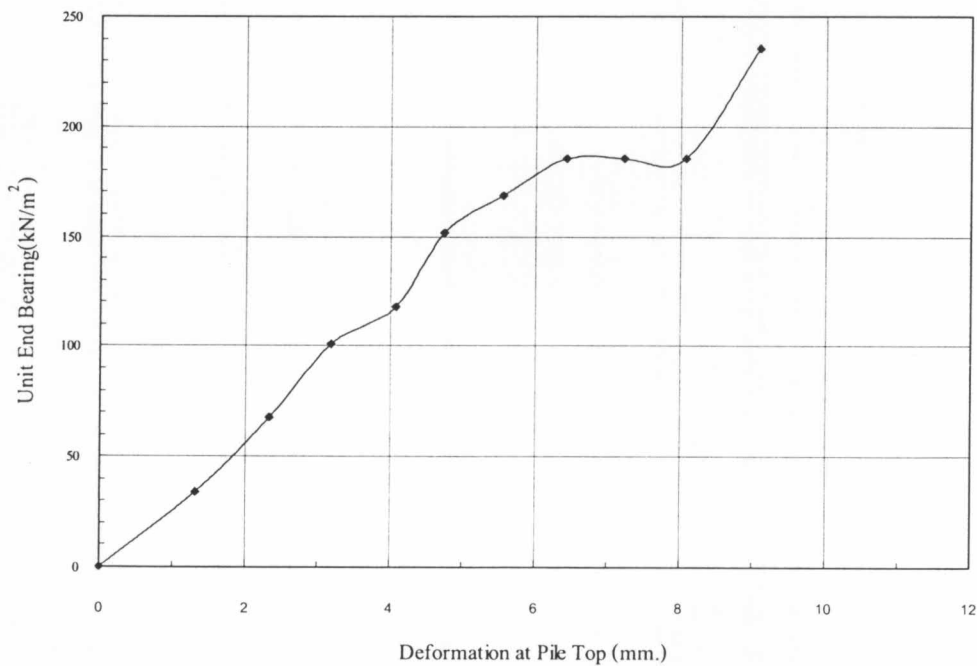
สำหรับเสาเข็ม TP-19 จากรูปที่ 4.15ข และ 4.15ค พบว่า พฤติกรรมการถ่ายแรงจากเข็มไปสู่ชั้น Very Dense Sand ในช่วงความลึก 28.50 – 30.00 เมตร มีลักษณะผิดปกติ กล่าวคือ ค่า  $f_s$  ที่เกิดขึ้นใน Stage ที่ 2 (รูปที่ 4.15ข) และ Stage ที่ 3 (รูปที่ 4.15ค) ซึ่งเป็นทรายชั้นเดียวกันมีค่าสูงมากประมาณ 330 และ 115  $t/m^2$  ตามลำดับ โดยทั่วไปค่า  $f_s$  สำหรับชั้นทรายอัดแน่นมีค่าไม่เกิน 20  $t/m^2$  สาเหตุที่วิเคราะห์ได้ค่า  $f_s$  สูงเช่นนี้อาจมีผลมาจากค่าที่อ่านได้ VWSG มีความคลาดเคลื่อน สังเกตได้จากรูปที่ 4.3ข และ 4.3ค พบว่าค่าแรงตามแนวแกนซึ่งคำนวณได้จากค่า Strain ของ VWSG level 4 และ VWSG level 5 มีค่าลดลงผิดปกติจึงทำให้ผลการคำนวณค่า  $f_s$  ได้ตามที่กล่าวไว้ข้างต้น

ดังนั้นในการวิเคราะห์เสาเข็ม TP-19 ได้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณี โดยกรณีที่ 1 วิเคราะห์ตามผลการทดลองที่ได้ ส่วนกรณีที่ 2 กำหนดให้ใช้ค่า  $f_s$  ที่วิเคราะห์ได้จากชั้น Medium Dense Sand ที่ระดับความลึก 30.00 – 40.50 เมตร ซึ่งคำนวณได้จาก Stage ที่ 2 มาพิจารณาแทนชั้น Very Dense Sand ที่ระดับความลึก 28.50 – 30.00 เมตรใน Stage ที่ 3 ทั้งนี้เนื่องจากดินทั้ง 2 ชั้นอยู่ติดกันและเป็นทรายที่มีความแน่นใกล้เคียงกัน พฤติกรรมการถ่ายแรงจึงไม่ต่างกันมากนัก อีกทั้งค่า  $f_s$  ที่นำมาใช้ก็ถือเป็นค่าที่ Conservative กว่า รายละเอียดผลการวิเคราะห์แต่ละชั้นดินแสดงไว้ในภาคผนวก และค่า  $Q_{ult}$  ที่ได้จากวิธีของ Mazurkiewicz (1972) แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

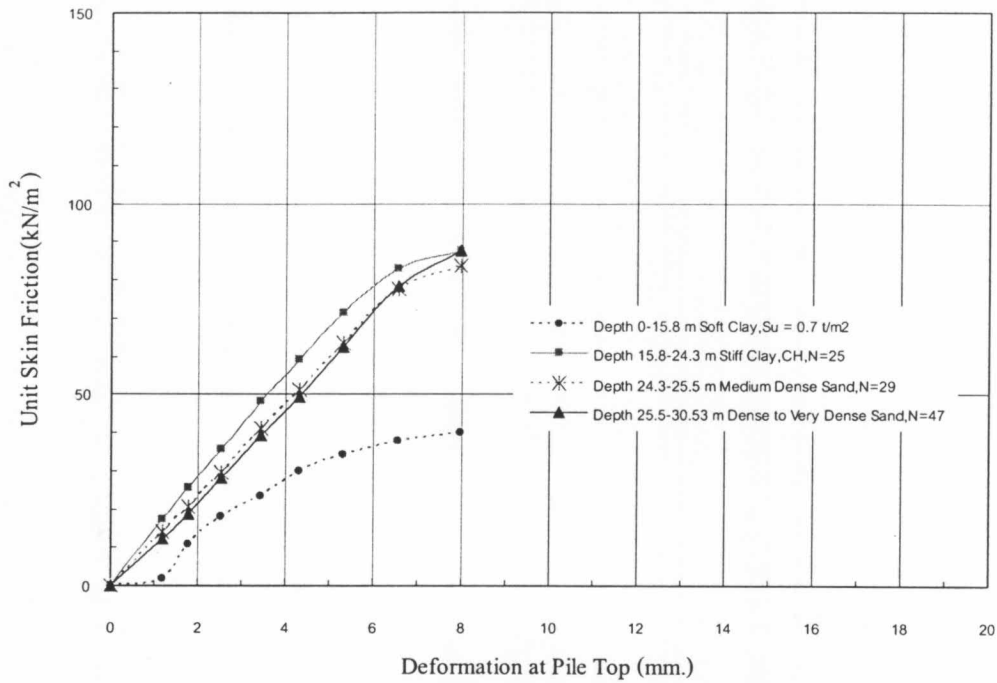
4.3.2.2 เสาเข็มที่ทำการทดสอบโดยวิธี Conventional Static Load Test



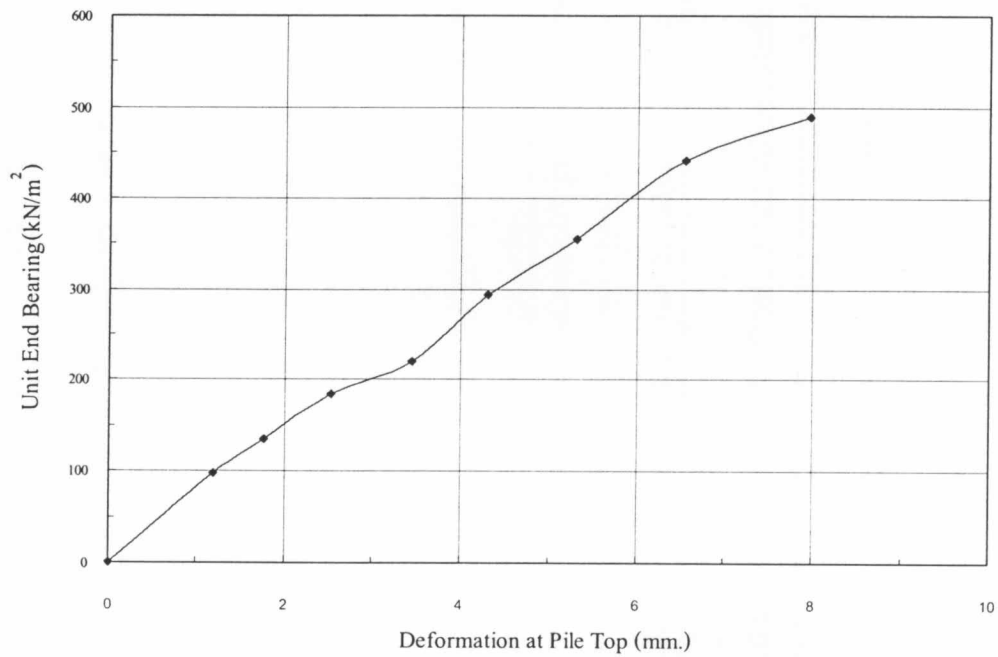
รูปที่ 4.16ก ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเสียดทานด้านข้างกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม สำหรับเข็ม TP-13/1



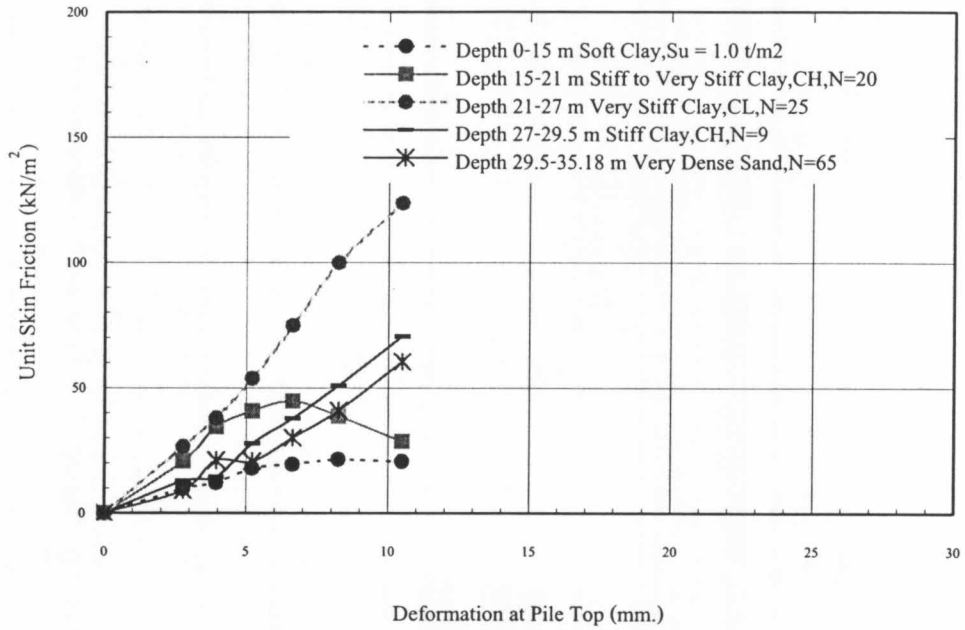
รูปที่ 4.16ข ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ส่งถ่ายที่ปลายเสาเข็มกับการเคลื่อนตัวของปลายเสาเข็ม ของเสาเข็ม TP-13/1



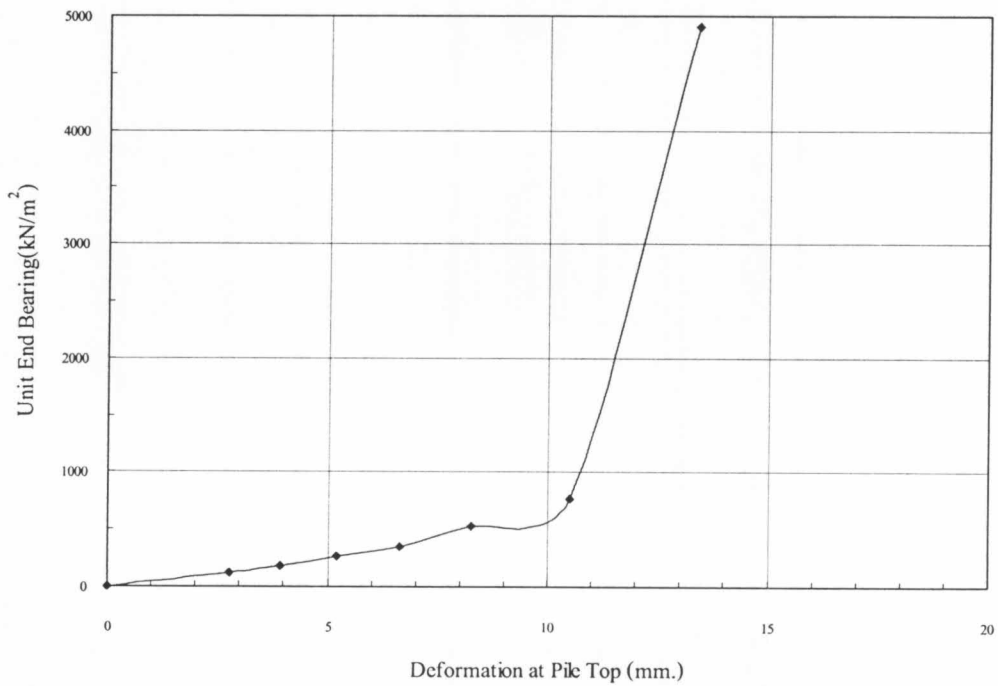
รูปที่ 4.17ก ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเสียดทานด้านข้างกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม  
สำหรับเข็ม TP-14



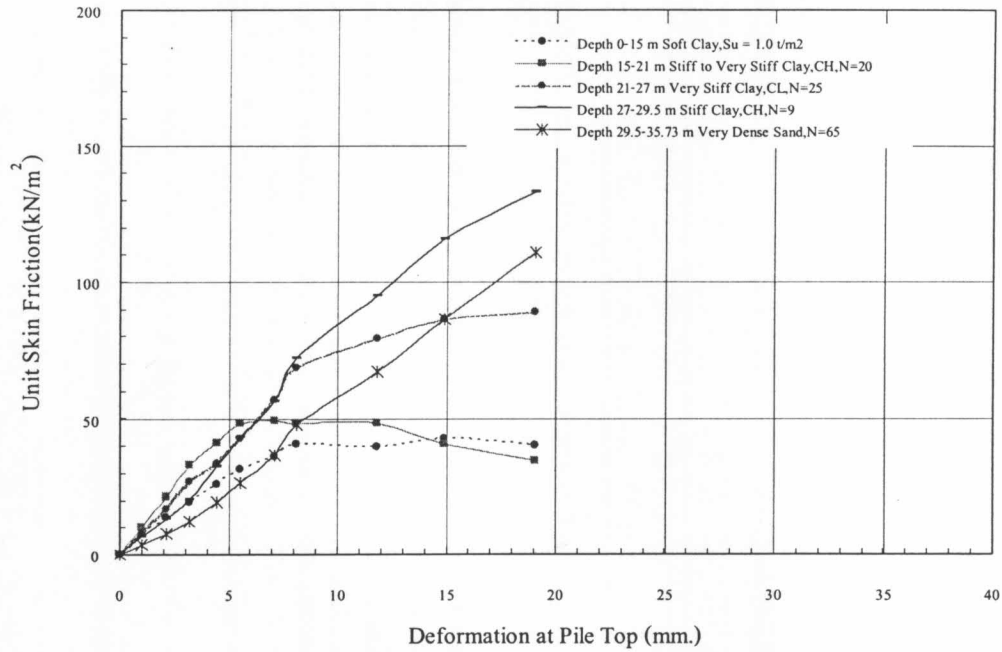
รูปที่ 4.17ข ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ส่งถ่ายที่ปลายเสาเข็มกับการเคลื่อนตัวของปลายเสาเข็ม  
ของเสาเข็ม TP-14



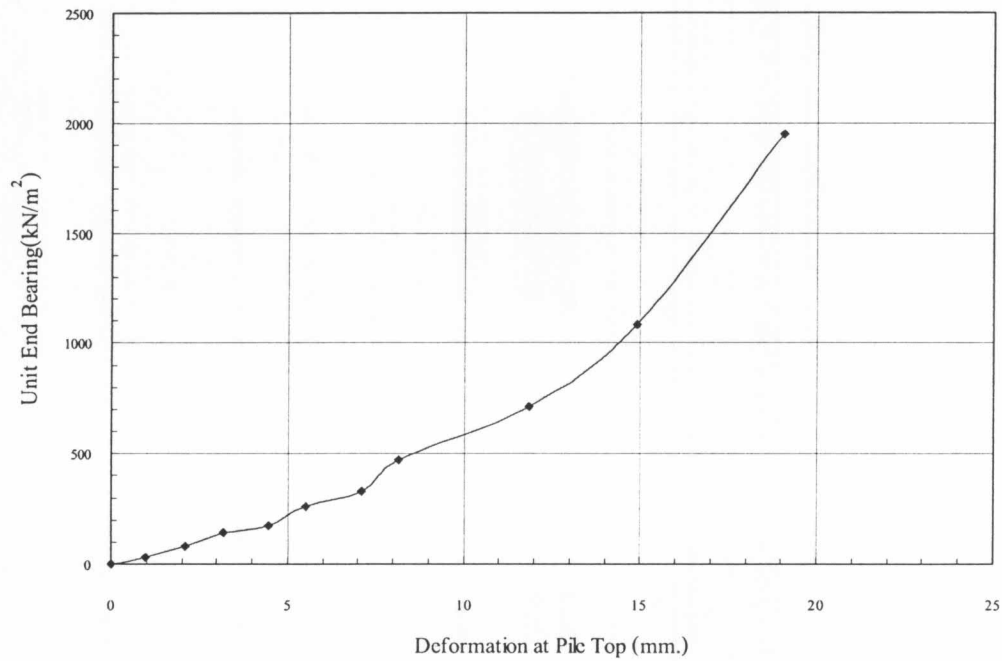
รูปที่ 4.18ก ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเสียดทานด้านข้างกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม สำหรับเข็ม TP-16



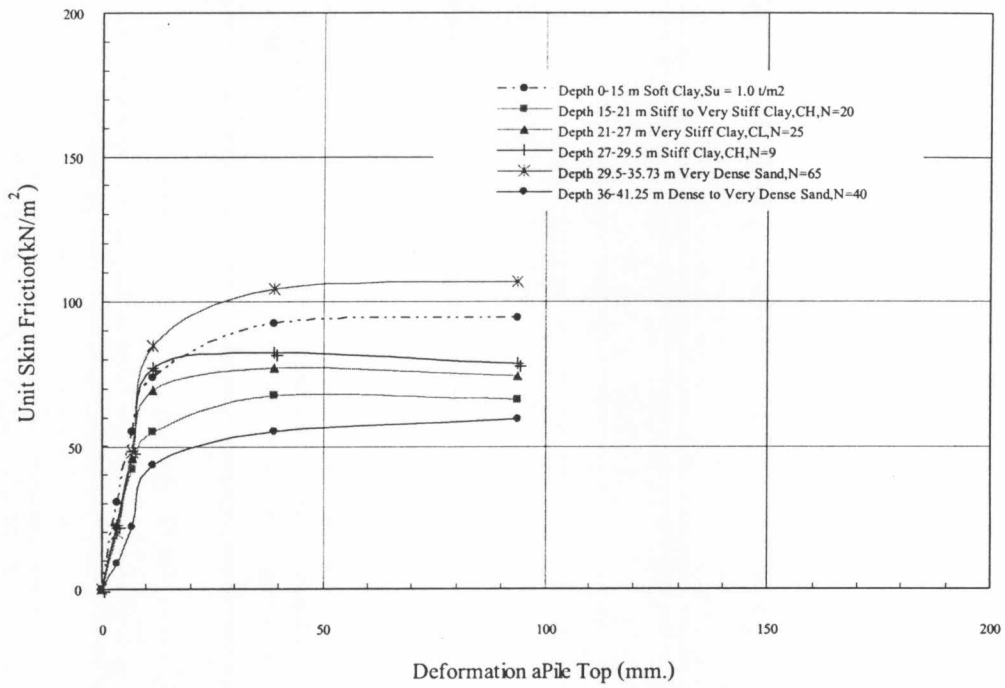
รูปที่ 4.18ข ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ส่งถ่ายที่ปลายเสาเข็มกับการเคลื่อนตัวของปลายเสาเข็ม ของเสาเข็ม TP-16



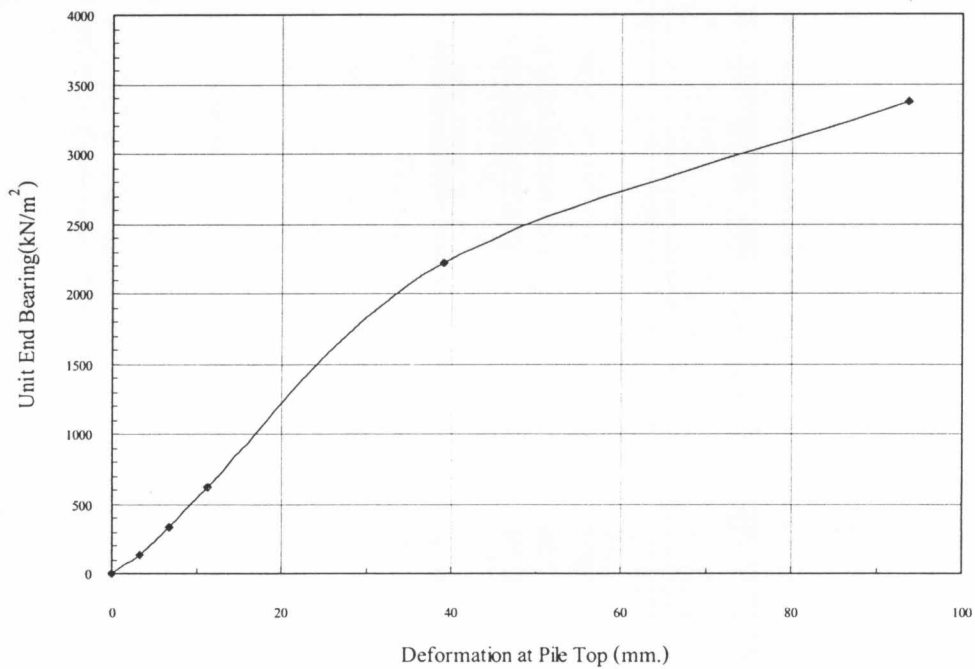
รูปที่ 4.19ก ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเสียดทานด้านข้างกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม  
สำหรับเข็ม TP-17



รูปที่ 4.19ข ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ส่งถ่ายที่ปลายเสาเข็มกับการเคลื่อนตัวของปลายเสาเข็ม  
ของเสาเข็ม TP-17



รูปที่ 4.20ก ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเสียดทานด้านข้างกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม สำหรับเข็ม TP-18



รูปที่ 4.20ข ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ส่งถ่ายที่ปลายเสาเข็มกับการเคลื่อนตัวของปลายเสาเข็ม ของเสาเข็ม TP-18

#### 4.4 การประมาณค่าพารามิเตอร์ในชั้นดินต่าง ๆ

จากผลการศึกษาที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 4.3 สามารถนำผลการวิเคราะห์ดังกล่าวไปประมาณค่าพารามิเตอร์สำหรับชั้นดินต่าง ๆ ได้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 4.4.1 การประมาณค่าแรงเสียดทานด้านข้าง

เสนอในรูปของค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องได้แก่ ค่า Adhesion Factor ( $\alpha$ ) สำหรับชั้นดินเหนียว และค่า Friction Factor ( $\beta = k_s \tan \delta$ ) สำหรับชั้นทราย ตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 คือการคำนวณค่าพารามิเตอร์  $\alpha$  และ  $\beta$  จะต้องทำการวิเคราะห์กลับ (Back Analysis) จากค่าแรงเสียดทาน ( $f_s$ ) ที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นดินที่ได้จากการวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.3 ทั้งนี้ เสาเข็มทั้ง 7 ต้นที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเข็ม และมีเพียงเสาเข็ม TP-13/1 ที่มีสภาวะปลายเข็มยังอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่ 2 ส่วนอีก 6 ต้น มีปลายเข็มยังอยู่ในชั้นทรายอัดแน่น โดยมีรายละเอียดผลการวิเคราะห์ดังนี้

##### 4.4.1.1 ชั้นดินเหนียว

ค่า  $\alpha$  สำหรับการประมาณค่าแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียวที่ได้ในงานวิจัยนี้ มาจากการแปลผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะที่ทำการทดสอบโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test จำนวน 2 ต้น และเสาเข็มเจาะที่ทำการทดสอบโดยวิธี Conventional Static Load Test จำนวน 5 ต้น โดยเสาเข็มเจาะทุกต้นทำการก่อสร้างอยู่ในโครงการเดียวกัน ผลการวิเคราะห์แยกตามประเภทของวิธีการทดสอบเสาเข็มได้ดังนี้

##### ก. เสาเข็มที่ทำการทดสอบ โดยวิธี Bi-Directional Static Load Test

มีจำนวน 2 ต้น คือ TP-15 และ TP-19 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 1000 และ 1200 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยตารางผลการวิเคราะห์ในแต่ละชั้นดินแสดงไว้ในภาคผนวก ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\alpha$  กับค่า  $S_u$  แสดงดังรูปที่ 4.21



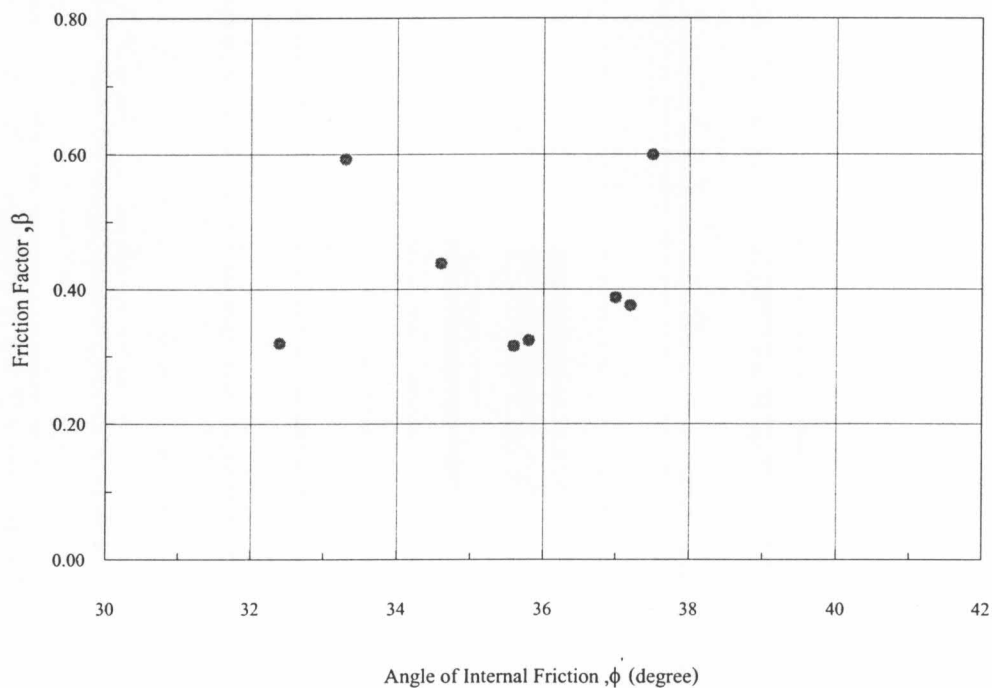


#### 4.4.1.2 ชั้นทราย

ค่า  $\beta$  สำหรับการประมาณค่าแรงเสียดทานในชั้นทรายที่ได้ในงานวิจัยนี้หาได้จากการวิเคราะห์กลับจากค่าแรงเสียดทานในชั้นทราย และเสนอผลการวิเคราะห์ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\beta$  กับค่ามุม  $\phi'$  โดยที่ค่า Effective Overburden Pressure,  $\sigma'_{vi}$  ณ จุดกึ่งกลางชั้นทรายที่พิจารณาเป็นค่าที่พิจารณาถึงผลกระทบจากการลดลง (Drawdown) ของระดับน้ำใต้ดิน (Piezometric Level) เนื่องจากการสูบน้ำบาดาลในบริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑล ผลการวิเคราะห์แยกตามประเภทของวิธีการทดสอบเสาเข็มได้ดังนี้

##### ก. เสาเข็มที่ทำการทดสอบโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test

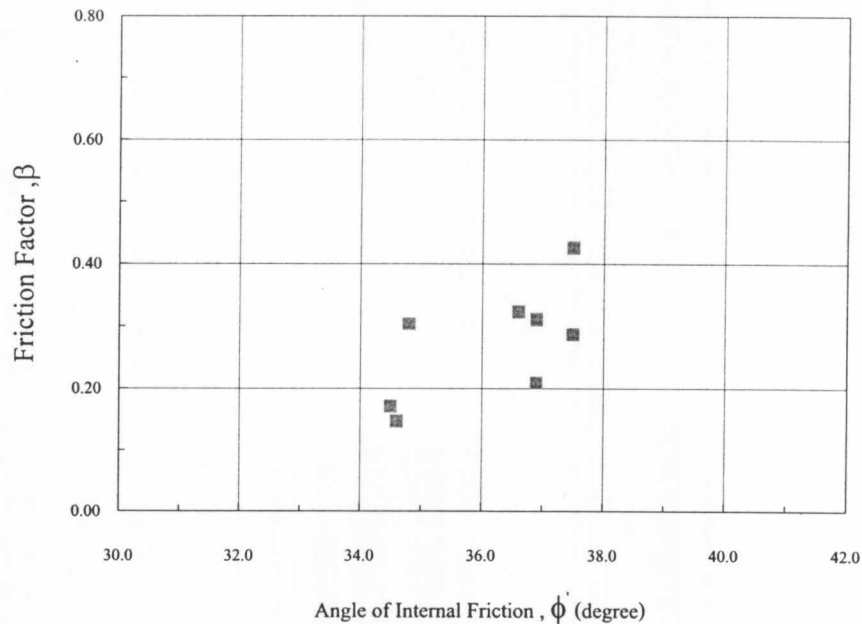
ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\beta$  กับค่ามุม  $\phi'$  แสดงดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\beta$  กับค่ามุม  $\phi'$  ที่คำนวณได้จากเสาเข็ม TP-15 และ TP-19

##### ข. เสาเข็มที่ทำการทดสอบโดยวิธี Conventional Static Load Test

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\beta$  กับค่ามุม  $\phi'$  แสดงดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\beta$  กับค่ามุม  $\phi$  ที่คำนวณได้จากเสาเข็ม TP-13/1, TP-14, TP-16, TP-17 และ TP-18

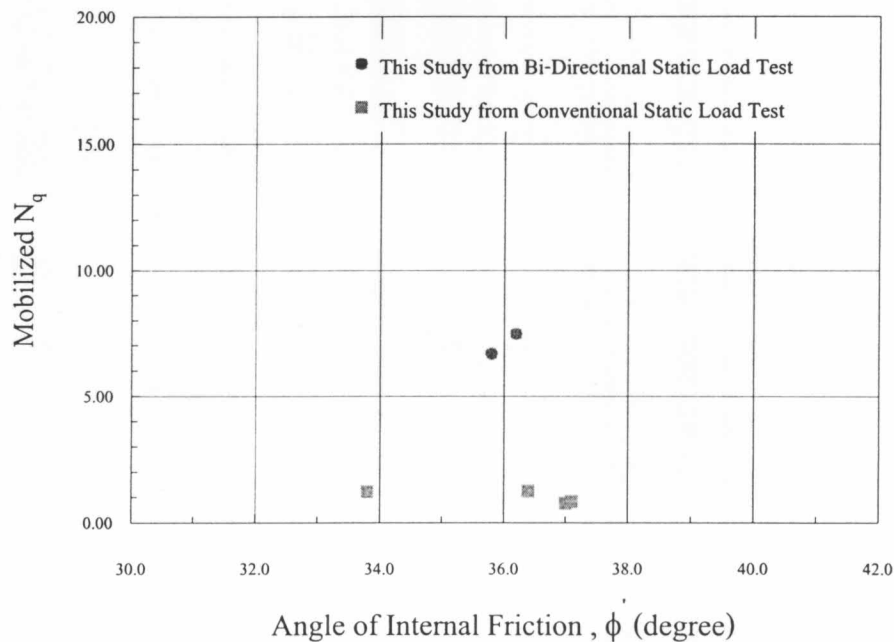
#### 4.4.2 การประมาณค่าแรงต้านทานที่ปลายเข็ม

การประมาณค่าแรงต้านทานที่ปลายเข็มจะเสนอในรูปแบบของค่าพารามิเตอร์ Bearing Capacity,  $N_c$  และ  $N_q$  สำหรับเสาเข็มที่มีปลายหยั่งอยู่ในชั้นดินเหนียวและชั้นทรายตามลำดับ โดยค่า Effective Overburden Pressure ( $\sigma'_v$ ) ที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นค่าที่พิจารณาถึงผลกระทบจากการลดลง (Drawdown) ของระดับน้ำใต้ดิน (Piezometric Level) เนื่องจากการสูบน้ำบาดาลในบริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑล

จากการศึกษาพฤติกรรมการส่งถ่ายแรงจากตัวเสาเข็มไปสู่ดินพบว่า ค่าแรงเสียดทานด้านข้างเสาเข็มจะพัฒนาตัวจนถึงค่าสูงสุดก่อนที่แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มจะพัฒนาตัวเองจนถึงจุดวิกฤติ และอีกกรณีคือ ในขั้นตอนการทดสอบเสาเข็มที่ทำการถ่ายน้ำหนักบรรทุกให้แก่เข็มจนถึงค่า 2.5 เท่าของน้ำหนักบรรทุกที่ใช้แล้วหยุดทำการทดสอบ พบว่า ค่าแรงต้านทานที่ปลายเข็มก็ยังไม่พัฒนาตัวจนถึงจุดวิกฤติเช่นกัน ดังนั้น ค่า  $N_q$  ที่ใช้สำหรับการประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยวิธีสถิติศาสตร์จะใช้ในรูปแบบของค่า Mobilized  $N_q$  ซึ่งอาจเป็นค่าที่ไม่ถึงจุดวิกฤติ เพื่อไม่ให้เกิดค่าการทรุดตัวที่มากเกินไปในการออกแบบ โดยในงานวิจัยครั้งนี้ทำการวิเคราะห์หาค่า Mobilized  $N_q$  จากค่าความต้านทานสูงสุดที่ปลายเข็ม (Maximum  $q_E$ ) ทั้งนี้เสาเข็มที่ทำการ

ทดสอบโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test พบว่าการทรุดตัวที่ปลายเข็ม ณ น้ำหนักทดสอบสูงสุดในเสาเข็ม TP-15 เส้นผ่าศูนย์กลางกลาง 1000 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 101.92 มิลลิเมตร จึงใช้ค่า  $q_E$  ที่ค่าการทรุดตัว 100 มิลลิเมตร (10% ของเส้นผ่าศูนย์กลางเข็ม) ซึ่งเป็นค่าการทรุดตัวที่ความต้านทานของดินที่ปลายเข็มเกิดขึ้นเต็มที่ (Cooke and Whitaker, 1961) มาคำนวณหาค่า Mobilized  $N_q$  ได้เท่ากับ 4.84 สำหรับเสาเข็ม TP-19 มีเส้นผ่าศูนย์กลางกลาง 1200 มิลลิเมตร การทรุดตัวที่ปลายเข็ม ณ น้ำหนักทดสอบสูงสุดเท่ากับ 84.6 มิลลิเมตร (มีค่าประมาณ 7% ของเส้นผ่าศูนย์กลางเข็ม) คำนวณค่า Mobilized  $N_q$  ได้เท่ากับ 5.58 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเสาเข็ม TP-15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mobilized  $N_q$  กับค่ามุม  $\phi'$  ของดินบริเวณปลายเข็มจนถึงระดับความลึก 3 เมตรจากปลายเข็มแสดงดังรูปที่ 4.25 สำหรับเสาเข็มที่ทำการทดสอบโดยวิธี Conventional Static Load Test และมีปลายเข็มยังอยู่ในชั้นทรายคือเสาเข็ม TP-14, TP-16, TP-17 และ TP-18 พบว่ามีการทรุดตัว ณ น้ำหนักทดสอบสูงสุดประมาณ 1% ของเส้นผ่าศูนย์กลางเข็ม คำนวณค่า Mobilized  $N_q$  ได้ใกล้เคียงกันคือ 0.932, 0.661, 0.592 และ 1.013 ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mobilized  $N_q$  กับค่ามุม  $\phi'$  ของดินบริเวณปลายเข็มจนถึงระดับความลึก 3 เมตรจากปลายเข็มแสดงดังรูปที่ 4.25 ส่วนตารางแสดงค่า Mobilized  $N_q$  ที่การทรุดตัวต่าง ๆ โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของเส้นผ่าศูนย์กลางเข็มของเข็มทุกต้นแสดงไว้ในภาคผนวก สำหรับรายละเอียดผลการวิเคราะห์หาค่า Bearing Capacity  $N_q$  และ  $N_c$  โดยสภาวะปลายเข็มไม่มีการอัดดินน้ำปูนทั้ง 7 ต้น มีดังนี้

#### 4.4.2.1 เสาเข็มที่มีปลายยังอยู่ในชั้นทราย



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mobilized  $N_q$  กับค่ามุม  $\phi'$

#### 4.4.2.2 เสาเข็มที่มีปลายหยั่งในชั้นดินเหนียว

มีจำนวน 1 ต้น คือ TP-13/1 โดยปลายเข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่ 2 (Hard Clay) มีค่า Undrained Shear Strength,  $S_u$  เท่ากับ  $20 \text{ t/m}^2$  ส่วนค่าความต้านทานที่ปลายเข็ม น้ำหนักทดสอบสูงสุดเท่ากับ  $23.58 \text{ t/m}^2$  เมื่อทำการวิเคราะห์ห้กลับได้ค่า Bearing Capacity Factor,  $N_c$  เท่ากับ 1.179

#### 4.5 การเปรียบเทียบและอภิปรายค่าพารามิเตอร์ของเสาเข็มแต่ละประเภท

ค่าพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ได้ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ได้แก่ค่า Adhesion Factor ( $\alpha$ ) สำหรับชั้นดินเหนียว ค่า Friction Factor,  $\beta$  ( $K_s \tan \delta$ ) และค่า Mobilized  $N_q$  สำหรับชั้นทราย โดยเปรียบเทียบตามวิธีการทดสอบเสาเข็ม มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

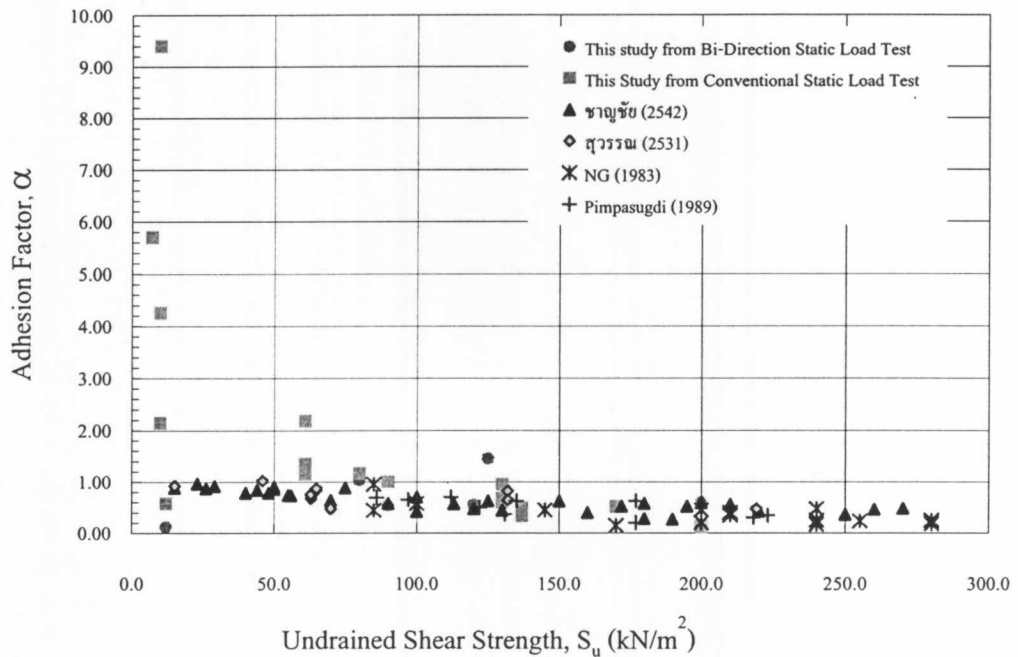
##### 4.5.1 ค่า Adhesion Factor, $\alpha$

จากรูปที่ 4.21 และ 4.22 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาก่อนหน้าของชาญชัย (2542) สุวรรณ (2531) NG (1983) และ Pimpasugdi (1989) สำหรับเสาเข็มที่ไม่มีกรดฉีดน้ำปูน ดังรูปที่ 4.26 พบว่า ค่า  $\alpha$  ส่วนใหญ่มีแนวโน้มใกล้เคียงกันเฉพาะในชั้นดินเหนียวแข็งเท่านั้นเมื่อค่า  $S_u$  มากกว่า  $80 \text{ kN/m}^2$  ในขณะที่ผลการทดสอบของโครงการวิจัยนี้สำหรับเสาเข็มที่ทดสอบวิธี Conventional Static Load Test ได้ค่า  $\alpha$  สูงกว่าผลการวิจัยของ Teparaksa (2001) และชาญชัย (2542) โดยบางค่าของ  $\alpha$  จะมากกว่า 1 และสำหรับ  $\alpha$  จากการทดสอบวิธี Bi-Directional Static Load Test บางค่ามีค่าต่ำมาก ซึ่งมีสาเหตุดังต่อไปนี้

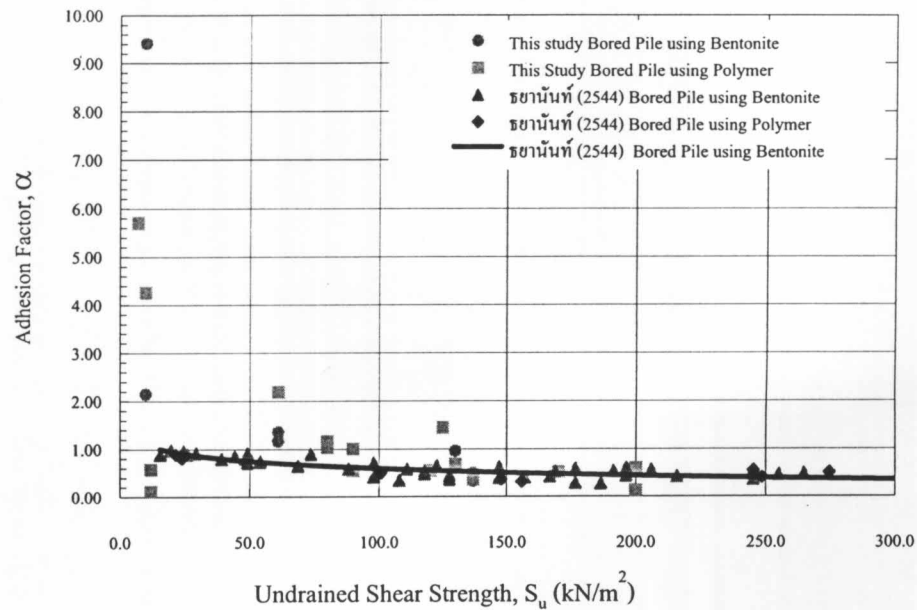
- ค่า strain ที่วัดได้จาก Straingauges ซึ่งติดตั้งในชั้น Soft Clay สำหรับเสาเข็มที่ทดสอบวิธี Conventional Static Load Test มีค่าผิดปกติ กล่าวคือ เมื่อนำค่า strain มาคำนวณหาแรงตามแนวแกน พบว่า มีการถ่ายแรงจากเข็มไปยังชั้น Soft Clay สูงเกินจริงคือมีค่าตั้งแต่  $2.14 - 9.40 \text{ t/m}^2$  (ดูรูป 4.17ก, 4.19ก และ 4.20 ก) เมื่อทำการวิเคราะห์ห้กลับจึงได้ค่า  $\alpha$  ที่มากกว่า 1
- สำหรับเสาเข็มที่ทดสอบวิธี Bi-Directional Static Load Test ได้ค่า  $\alpha$  ต่ำในชั้น Soft Clay ตามที่แสดงในรูปที่ 4.21 เพราะค่า friction ที่นำมาคำนวณหา  $\alpha$  ไม่ใช่ค่าแรงเสียดทานที่จุดวิกฤติ (ดูรูปที่ 4.14ค และ 4.15ค) เนื่องจาก apply

load จากด้านล่างที่ระดับความลึก 30 เมตร (รูปที่ 4.2ค) จึงมีการถ่ายแรงจาก  
 เข็มไปยังชั้น Soft Clay น้อยมาก ค่า  $\alpha$  ที่ได้จึงมีค่าต่ำมาก

และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของชยานันท์ (2544) ซึ่งแบ่งตามชนิดของสารที่ใช้รักษาเสถียรภาพหลุมเจาะ ดังรูปที่ 4.27 พบว่า ค่า  $\alpha$  สอดคล้องกับผลการศึกษาของชยานันท์ (2544) เฉพาะในชั้นดินเหนียวแข็ง แต่ในชั้นดินเหนียวอ่อนได้ค่า  $\alpha$  ไม่ใกล้เคียงกันกล่าวคือ ค่า  $\alpha$  ที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มที่ใช้สารละลายโพลิเมอร์จะอยู่ในช่วงเดียวกับเสาเข็มที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์ เนื่องจากสารละลายเบนโทไนท์จะไม่เกิดเยื่อหุ้มทึบน้ำ (Filter Cake) ขึ้นในชั้นดินเหนียว เพราะสารละลายเบนโทไนท์ไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปในชั้นดินเหนียว ทำให้ไม่เกิดการสะสมตัวของอนุภาคดินเหนียว (Clay Particle) จากสารละลายเบนโทไนท์ และสำหรับสารละลายโพลิเมอร์ จะไม่มีพฤติกรรมการก่อตัวของเยื่อหุ้มทึบน้ำเกิดขึ้น ทำให้แรงเสียดทานของเสาเข็ม 2 ประเภทไม่ต่างกันมากนัก



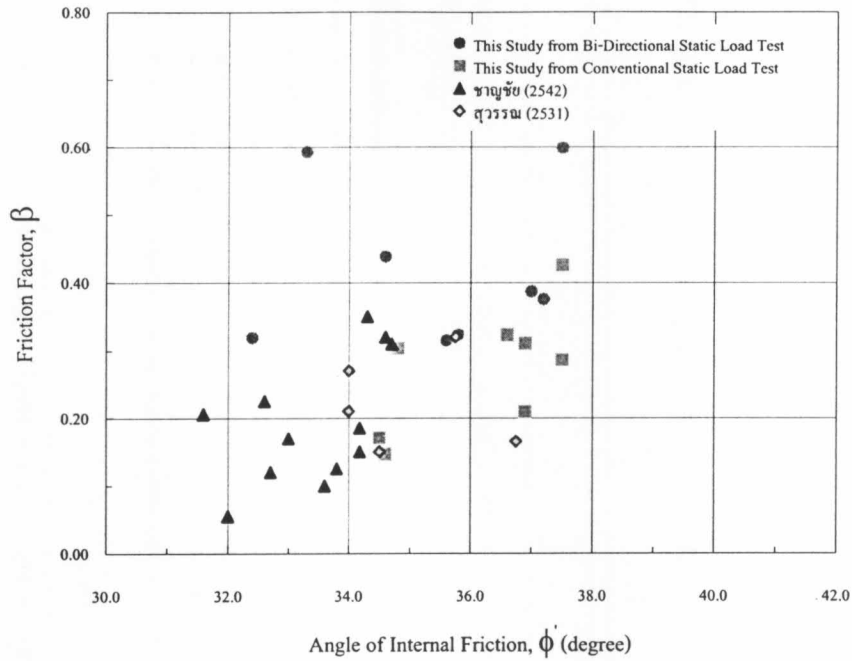
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\alpha$  กับค่า  $S_u$  ในชั้นดินเหนียวเทียบกับผลการศึกษาก่อนหน้านี้ สำหรับเสาเข็มเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ



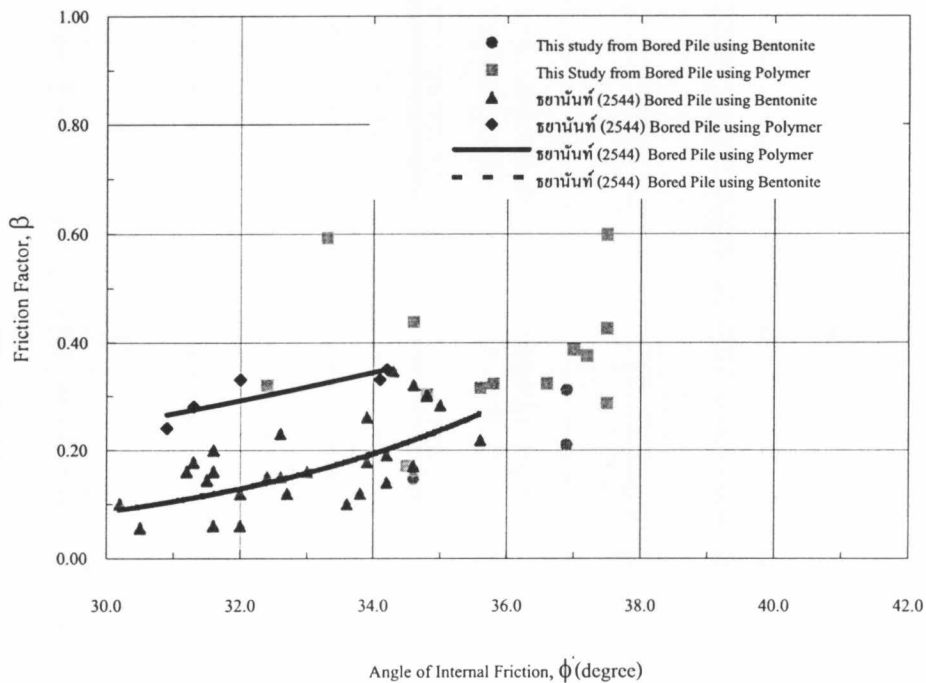
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\alpha$  กับค่า  $S_u$  ในชั้นดินเหนียวเทียบกับผลการศึกษาของชยานันท์ (2544) สำหรับเสาเข็มเจาะที่ไม่มีการอัดคิคน้ำปูนที่ปลายเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ

#### 4.5.2 ค่า Friction Factor, $\beta$ ( $K_f \tan \delta$ )

ผลการวิเคราะห์จากรูปที่ 4.23 และ 4.24 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของชาญชัย (2542) และสุวรรณ (2531) ดังรูปที่ 4.28 พบว่า ค่า  $\beta$  มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยค่า  $\beta$  จากการทดสอบเข็มโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test มีค่าสูงกว่าเล็กน้อย ทั้งนี้มีผลมาจากวิธีการทดสอบที่ต่างกัน กล่าวคือ การทดสอบเข็มโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test ทำการถ่ายน้ำหนักบรรทุกทุกให้แก่เข็มโดยใช้ Hydraulic Jack ที่ติดอยู่ในตัวเข็มซึ่งมีตำแหน่งใกล้กับชั้นทราย ดังนั้นขณะทำการทดสอบ แรงเสียดทานในชั้นทรายสามารถพัฒนาได้จนถึงค่าสูงสุดหรือใกล้เคียงค่าสูงสุด ทำให้ค่า  $\beta$  ที่วิเคราะห์ได้มีค่าสูง สำหรับการทดสอบเข็มโดยวิธี Conventional Static Load Test ซึ่งทำการทดสอบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 2.5 เท่าของน้ำหนักบรรทุกใช้งาน และทำการทดสอบที่ตำแหน่งหัวเข็ม (Pile Top) นั้น จะมีพฤติกรรมการถ่ายแรงไปสู่ดินจากดินชั้นบนก่อนที่จะถ่ายไปยังดินชั้นล่าง ทำให้แรงเสียดทานในชั้นทรายซึ่งอยู่ด้านล่างไม่สามารถพัฒนาตัวจนถึงค่า สูงสุดได้ ค่า  $\beta$  ที่วิเคราะห์ได้จึงมีค่าต่ำกว่าค่า  $\beta$  ที่ได้จากรีวิธี Bi-Directional Static Load Test นอกจากนี้ การที่เสาเข็มที่ทดสอบวิธี Bi-Directional Static Load Test ใช้ Slurry ชนิด Polymer ก็มีผลทำให้ได้ค่า  $\beta$  ที่สูงกว่าเสาเข็มที่ทดสอบวิธี Conventional Static Load Test ซึ่งมี Slurry เป็นทั้ง Polymer และ Bentonite เช่นกัน



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\beta$  กับค่ามุม  $\phi'$  เทียบกับผลการศึกษาของชาญชัย (2542) และสุวรรณ (2531) สำหรับเสาเข็มเจาะที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\beta$  กับค่ามุม  $\phi'$  เทียบกับผลการศึกษาของชยานันท์ (2544) โดยแยกตามชนิดของสารที่ใช้รักษาเสถียรภาพหลุมเจาะสำหรับเสาเข็มเจาะที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ

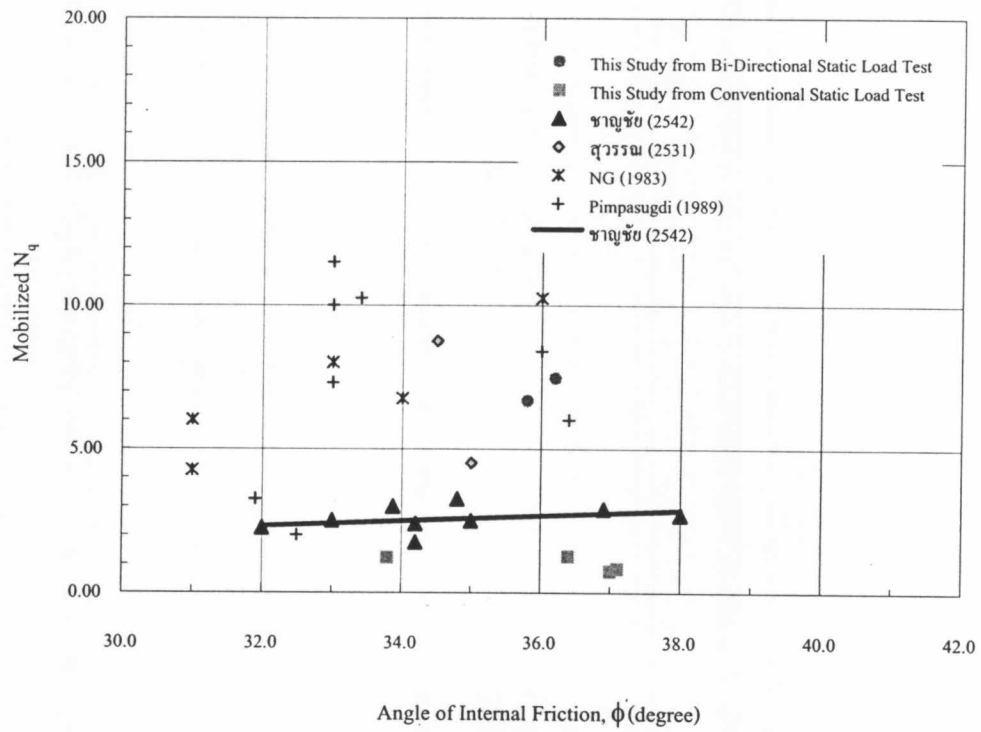


จากรูปที่ 4.29 เป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้กับผลการศึกษาของ ธานันท์ (2544) พบว่า ค่า  $\beta$  ของเสาเข็มที่ใช้สารละลายโพลีเมอร์ในการรักษาเสถียรภาพหลุมจะ จากการวิจัยนี้มีแนวโน้มสูงกว่าค่า  $\beta$  ของเสาเข็มที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์ซึ่งสอดคล้องกับผล การศึกษาของธานันท์ (2544) ทั้งนี้ เนื่องจากการใช้สารละลายโพลีเมอร์ไม่ทำให้เกิดเยื่อบูทบน้ำ (Filter Cake) ที่มีความหนามากในชั้นทราย ต่างจากการใช้สารละลายเบนโทไนท์ล้วนซึ่งเยื่อบูทบน้ำ ที่มีความหนามากจะลดแรงเสียดทานระหว่างเสาเข็มกับเม็ดทราย

#### 4.5.3 ค่า Mobilized $N_q$

จากรูปที่ 4.25 พบว่า ค่า Mobilized  $N_q$  ของเสาเข็มที่ทดสอบโดยวิธี Bi-Directional Static Load Test มีค่าประมาณอยู่ในช่วง 6.5-7.5 สำหรับเสาเข็มที่ทดสอบโดยวิธี Conventional Static Load Test มีค่า Mobilized  $N_q$  ประมาณ 0.75-1.25 การที่ค่า Mobilized  $N_q$  จากวิธี Bi-Directional Static Load Test มีค่าสูงกว่าวิธี Conventional Static Load Test เนื่องจากมีลักษณะการ ถ่ายแรงไปยังบริเวณปลายเข็มต่างกัน กล่าวคือ วิธี Bi-Directional Static Load Test ทำการ apply load โดย Bottom Jack ตรงบริเวณปลายเข็มในการทดสอบ Stage ที่ 1 ซึ่งทำให้ได้ค่าความ ต้านทานของดินที่ปลายเข็มโดยตรง แต่สำหรับวิธี Conventional Static Load Test ทำการ apply load จาก Pile Top ดังนั้นลักษณะการถ่ายแรงจากเข็มไปสู่ดินจะเกิดขึ้นจากดินชั้นบนลงไปสู่ดินชั้น ล่าง การถ่ายน้ำหนักไปยังปลายเข็มจึงมีค่าน้อย รวมถึงผลของเส้นผ่านศูนย์กลางเข็มที่มีค่าน้อยคือ 600 มิลลิเมตร มีผลให้ End Bearing เกิดขึ้นน้อย ทำให้ค่า Mobilized  $N_q$  ที่ได้มีค่าต่ำ

เมื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของผู้วิจัยรายอื่นดังแสดงในรูปที่ 4.30 พบว่า ค่า Mobilized  $N_q$  มีลักษณะกระจาย (Scatter) พอสมควรอยู่ในช่วง 0.75-11.5 และค่ามุม  $\phi$  อยู่ในช่วง 31-38 องศา โดยค่า Mobilized  $N_q$  จากเสาเข็มที่ทดสอบโดยวิธี Conventional Static Load Test ในงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากงานวิจัยที่ผ่านมาเนื่องจากไม่ได้ทำการทดสอบจนถึงจุด วิกฤติและน้ำหนักทดสอบสูงสุดไม่ถึงกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย ทำให้ค่า Mobilized  $N_q$  ที่ได้มี ค่าน้อย



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mobilized  $N_q$  กับค่ามุม  $\phi'$  เทียบกับผลการศึกษาที่ผ่านมา