



บทที่ 4

ขั้นตอนวิธีการดำเนินการและผลการวิจัย

4.1 ขั้นตอนการวิจัย

การศึกษาและการวิจัยมีขั้นตอนและวิธีการดำเนินการมีดังต่อไปนี้

i) เก็บรวบรวมรายการผลการทดสอบน้ำหนักเสาเข็มพร้อมทั้งข้อมูลการเจาะสำรวจคุณสมบัติของดินทางวิศวกรรมสำหรับออกแบบเสาเข็มในพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑล

ii) หาค่า failure load ของเสาเข็มที่จมในชั้นทรายชั้นที่ 2 ตามวิธีการของ Mazurkiewicz (1972) โดยอาศัยผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ข้อมูลของเสาเข็มและดินแสดงอยู่ในภาคผนวก ก.

หาค่า $N(SPT)$ เฉลี่ยของดินที่ปลายเสาเข็มโดยอาศัยข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน

หาค่าแรงเสียดทานของดินรอบเสาเข็มตลอดความยาวตั้งแต่หัวเสาเข็มจนถึงปลายเสาเข็มโดยอาศัยข้อมูลของขนาดของเสาเข็ม และข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินซึ่งได้แก่ค่า S_u และ N แล้วจึงทำการวิเคราะห์ตามวิธีสถิติศาสตร์โดยวิธีการที่ใช้ได้ผลในอดีต (สุวรรณ, 2531; Pimpasugdi, 1989)

หาค่า N_q จากข้อมูลที่ได้จาก (i) และ (ii) แล้วจึงหาความสัมพันธ์แบบ empirical ระหว่างค่า N_q กับ $N(SPT)$ ของดินที่ปลายเสาเข็มเจาะในชั้นทราย ชั้นที่ 2 ของชั้นดินกรุงเทพฯ

iii) จากผลการบันทึกข้อมูลเสาเข็ม, วิธีการทดสอบเสาเข็มและผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกเสาเข็ม ทำการวิเคราะห์กลับ (Back analysis) เพื่อหาค่า Pile - Soil Modulus ของดินรอบเสาเข็มต่าง ๆ โดยอาศัยวิธีการของ Poulos & Davis (1980)

จากนั้นจึงหาความสัมพันธ์แบบ Empirical ระหว่างค่า E_s กับ ค่า pile working load โดยแยกประเภทความสัมพันธ์ออกเป็น 3 ประเภทคือ

- 1) เสาเข็มตอกในชั้นทรายชั้นแรก
- 2) เสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นแรก
- 3) เสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 2

iv) เอาความสัมพันธ์แบบ Empirical ระหว่างค่า N_q กับค่า $N(SPT)$ ของเสาเข็มเจาะที่มีปลาสอยู่ในชั้นทรายชั้นที่ 2 มาใช้ประโยชน์ในการคำนวณเพื่อคาดคะเนค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตามวิธีสถิติศาสตร์ แล้วนำค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ได้จากการคาดคะเนข้างต้นมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังรับน้ำหนักที่ได้จากการทดสอบ pile load test เพื่อการศึกษาวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของความสัมพันธ์แบบ Empirical ระหว่าง N_q และ $N(SPT)$ ของชั้นทรายชั้นที่ 2 ของชั้นดินกรุงเทพฯ

v) เอาความสัมพันธ์แบบ Empirical ระหว่างค่า E_s (Pile Soil Modulus) กับค่า pile working load มาใช้ประโยชน์ในการคำนวณเพื่อหาค่าการทรุดตัวของเสาเข็มต้นเดียว ตามวิธี Poulos & Davis (1980) โดยแยกประเภทของการวิเคราะห์เป็น 3 ประเภท ตามรายละเอียดดังที่กล่าวมาแล้ว แล้วนำค่าการทรุดตัวของเสาเข็มที่ได้จากการคาดคะเนมาศึกษาเปรียบเทียบ

เทียบกับค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของความสัมพันธ์แบบ empirical ระหว่างค่า pile-soil modulus (E_s) กับค่า Working Load

4.2 การวิเคราะห์หาสูตร Empirical สำหรับประเมินค่า Bearing Capacity Factor N_q ในรูปของค่า $N(SPT)$ สำหรับเสาเข็มเจาะที่จมในชั้นทรายชั้นที่ 2 ของชั้นดินในกรุงเทพ

4.2.1 วิธีการวิเคราะห์

ในการคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจากคุณสมบัติของดิน และเสาเข็มโดย static pile formula ได้แยกการคำนวณแรงต้านของเสาเข็มเป็นแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็ม (shaft resistance) และแรงต้านที่ปลายของเสาเข็ม (point resistance) โดยค่าแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มสามารถทราบได้จากผลการศึกษาในอดีตตามวิธีการของ NG(1983), สุวรรณ(2531) และ Pimpasugdi(1989) ในขณะที่ค่ากำลังรับน้ำหนักที่จุดวิบัติของเสาเข็มสามารถทราบได้จากผลการทดสอบเสาเข็มโดยอาศัยการประเมินตามวิธีซึ่งเสนอโดย Mazurkiewicz(1972) ข้อมูลดังกล่าวทำให้สามารถหาแรงต้านที่ปลายเสาเข็มเจาะและค่า N_q

ภายหลังจากที่ได้ค่า N_q ของเสาเข็มต้นต่าง ๆ จึงนำค่า N_q มาหาความสัมพันธ์กับค่า $N(SPT)$ ของดินที่ปลายเสาเข็ม ด้วยวิธี exponential regression analysis ตามหลักการที่แสดงอยู่ในภาคผนวก ข.

สำหรับเสาเข็มที่มีการก่อสร้างในกรุงเทพมหานครโดยมีระดับความลึกถึงชั้นทรายชั้นที่ 2 นั้นล้วนเป็นเสาเข็มเจาะทั้งสิ้น โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ $\phi 0.80$ ม. ถึง 1.50 ม. และมีความยาวตั้งแต่ 42.00 ม. ถึง 67.90 ม.

ส่วนรายละเอียดของข้อมูลการสำรวจชั้นดินและผลการทดสอบเสาเข็มได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ก. แล้ว การวิเคราะห์ในงานวิจัยทางด้านกำลังรับน้ำหนักจึงจะมุ่งเน้นเฉพาะเสาเข็มเจาะ คสล. ที่ปลายเสาเข็มวางตัวในชั้นทรายชั้นที่ 2

กำลังรับน้ำหนักที่จุดวิกฤติของเสาเข็มที่มีปลายอยู่ที่ชั้นทรายชั้นที่ 2 จะเป็นผลรวมของแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มที่ผ่านชั้นดินต่างๆ และแรงต้านที่ปลายเสาเข็มในชั้นทรายชั้นที่ 2 ตามที่แสดงในสมการ (4.1)

$$P_{ult} = P_s + P_b - W_p + U \dots\dots\dots (4.1)$$

เมื่อ P_{ult} คือ ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มที่หัวเสาเข็ม ณ จุดวิกฤติ

P_s คือ ผลรวมของแรงเสียดทานด้านข้างทั้งหมด

P_b คือ แรงต้านทานประสิทธิผลที่ปลายเสาเข็ม

W_p คือ น้ำหนักของเสาเข็ม

U คือ แรงดันน้ำที่ปลายเสาเข็ม

จากการศึกษาวิธีการคาดคะเนค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิกฤติของเสาเข็มมีอยู่หลายวิธี (ดูบทที่ 2) Pimpasugdi (1989) พบว่าวิธีซึ่งเสนอโดย Mazurkiewicz (1972) และ Butler and Hoy (1977) ซึ่งอาศัยผลการทดสอบในช่วงอัสติกเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการคาดคะเนค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิกฤติของเสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 1

ในการวิจัยนี้เสาเข็มทดสอบจะเป็นเสาเข็มใช้งานด้วย ดังนั้นน้ำหนักทดสอบสูงสุดจึงมีค่าเพียง 2 เท่า ของน้ำหนักบรรทุกใช้งาน โดยการทดสอบมี

จุดประสงค์เพียงเพื่อทดสอบค่าน้ำหนักบรรทุกใช้งานค่าน้ำหนักสูงสุดในการทดสอบ
จึงยังไม่ถึงจุดวิบัติ ภาคผนวก ค. รวบรวมการคาดคะเนค่าน้ำหนักบรรทุกวิบัติโดย
วิธีของ Mazurkiewicz (1972) อย่างไรก็ตามเพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของ
วิธีการคาดคะเนดังกล่าวจึงได้เปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกวิบัติ Pult ที่คาดว่าจะเกิด
ขึ้น (ตามวิธีการของ Mazurkiewicz (1972) กับ Butler & Hoy (1977)) ของ
ผลการทดสอบเสาเข็ม 3 ต้น ที่มีการทดสอบจนค่าน้ำหนักบรรทุกคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตาม
การทรุดตัว ผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ (ดูภาคผนวก ค.)

ในภาคผนวก ค. การวิเคราะห์ยังได้แสดงว่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติโดย
วิธี Mazurkiewicz (1972) และ Butler & Hoy (1977) ที่ใช้โดย
Pimpasugdi (1989) มีค่าใกล้เคียงกันโดยวิธี Mazurkiewicz ได้ค่าประมาณ
1.089 เท่าของ Butler & Hoy

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ค่า N_q

ตารางที่ 4.1 และ 4.2 แสดงผลสรุปการหาค่า N_q สำหรับ
ชั้นทรายชั้นที่ 2 ค่าหน่วยแรงเสียดทานของชั้นดินแต่ละชั้นจนถึงชั้นทรายชั้นแรกอยู่ใน
พิสัยที่ผู้วิจัยในอดีต (สุวรรณ (2531), Pimpasugdi (1989)) ได้เสนอไว้ ส่วน
หน่วยแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียวชั้นที่ 2 อยู่ระหว่าง 6 ดัน/ตร.ม. ถึง 10
ดัน/ตร.ม. ค่าหน่วยแรงดันที่ปลายเสาเข็มในชั้นทรายชั้นที่ 2 เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบ
เทียบกับค่าของชั้นทรายชั้นแรก ทั้งนี้เพราะค่า q_{uc} สูงขึ้นโดยค่า N_q ไม่
ได้แตกต่างกันมากนัก

ข้อมูลในตารางที่ 4.1 และ 4.2 จากเสาเข็มเจาะที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง
0.80 ถึง 1.50 เมตร และความยาว 42.0 ถึง 67.8 เมตร โดยจำนวน
เสาเข็มรวมทั้งสิ้น 14 ต้น

ตัวอย่างการคำนวณค่า N_q ดังรายละเอียดข้างต้นแสดงอยู่ในภาคผนวก ง (i)

ตารางที่ 4.1 แสดงการคำนวณแรงเสียดทานด้านข้างเสาเข็มสำหรับเสาเข็ม
เจาะซึ่งมีระดับปลายเสาเข็มที่ชั้นทรายชั้นที่ 2 วิเคราะห์ตามวิธี
Short term condition

| No. | โครงการ | ขนาดเสาเข็ม | Pult | Soft to medium clay | | | |
|-----|------------------|-------------------------|------|---------------------|----------|----------|-------|
| | | | | Su | α | f_{s1} | Ps1 |
| 1 | THAI MILITARY | $\phi 1.20 \times 49.0$ | 1540 | 2.10 | 0.790 | 1.66 | 84.4 |
| 2 | IMPERIAL TARA | $\phi 1.50 \times 56.0$ | 2180 | 1.79 | 0.830 | 1.49 | 132.8 |
| 3 | OCEAN TOWER 2 | $\phi 1.20 \times 53.0$ | 1520 | 2.84 | 0.716 | 2.03 | 141.4 |
| 4 | SAICHON MANSION | $\phi 1.20 \times 46.2$ | 1530 | 3.91 | 0.682 | 2.67 | 159.8 |
| 5 | SUKHUMVIT CENTER | $\phi 1.20 \times 56.0$ | 1820 | 1.60 | 0.856 | 1.37 | 63.5 |
| 6 | DS TOWER | $\phi 1.20 \times 53.0$ | 1630 | 1.66 | 0.848 | 1.41 | 66.9 |
| 7 | AYOTHAYA THANI | $\phi 1.20 \times 42.0$ | 1100 | 1.92 | 0.811 | 1.56 | 88.1 |
| 10 | OCEAN TOWER | $\phi 1.20 \times 55.0$ | 1620 | 2.84 | 0.716 | 2.03 | 113.5 |
| 12 | KIAN GWAN | $\phi 1.20 \times 48.6$ | 1480 | 2.39 | 0.761 | 1.82 | 92.6 |
| 15 | ASOKE TOWER | $\phi 0.80 \times 51.4$ | 880 | 3.14 | 0.690 | 2.17 | 95.1 |
| 17 | HABITAT PROJECT | $\phi 1.00 \times 53.0$ | 1190 | 1.80 | 0.828 | 1.49 | 49.1 |
| 30 | UM.OFFICE | $\phi 1.00 \times 53.4$ | 1380 | 2.54 | 0.746 | 1.89 | 113.1 |
| 40 | SATHORN UNIQUE | $\phi 1.20 \times 67.9$ | 1940 | 1.43 | 0.880 | 1.26 | 64.1 |
| 42 | PRESIDENT PARK | $\phi 1.20 \times 60.1$ | 1630 | 2.58 | 0.742 | 1.91 | 122.7 |

หมายเหตุ Pult ได้จากการคำนวณโดยอาศัยวิธีของ Mazurkiewicz
ค่าหน่วยแรงต่างๆมีหน่วยเป็น ตันต่อตารางเมตร
ค่าแรงต่างๆมีหน่วยเป็น ตัน

ตารางที่ 4.1(ต่อ) แสดงการคำนวณแรงเสียดทานด้านข้างเสาเข็มสำหรับ
เสาเข็มเจาะซึ่งมีระดับปลายเสาเข็มที่ชั้นทรายชั้นที่ 2
วิเคราะห์ตามวิธี Short term condition

| No. | First stiff clay | | | | First sand layer | | | | |
|-----|------------------|----------|----------|-------|------------------|------------------|-----------|----------|-------|
| | Su | α | f_{s2} | Ps2 | ϕ | $K_{\tan\phi_a}$ | $6'_{vs}$ | f_{s3} | Ps3 |
| 1 | 22.90 | 0.421 | 9.64 | 228.0 | 33.3 | 0.184 | 50.6 | 9.31 | 533.5 |
| 2 | 11.00 | 0.430 | 4.73 | 33.4 | 31.1 | 0.155 | 36.5 | 5.66 | 79.9 |
| 3 | 10.00 | 0.450 | 4.50 | 33.9 | 34.3 | 0.196 | 33.7 | 6.61 | 17.4 |
| 4 | 14.40 | 0.376 | 5.41 | 61.2 | 34.1 | 0.193 | 37.0 | 7.14 | 80.8 |
| 5 | 17.30 | 0.347 | 6.00 | 640.5 | 32.5 | 0.173 | 59.6 | 10.31 | 159.4 |
| 6 | 13.10 | 0.389 | 5.10 | 146.3 | 31.1 | 0.154 | 39.8 | 6.13 | 125.0 |
| 7 | 7.40 | 0.510 | 3.75 | 127.1 | 32.6 | 0.173 | 39.0 | 6.75 | 25.4 |
| 10 | 12.10 | 0.408 | 4.94 | 111.7 | 30.6 | 0.147 | 36.1 | 5.31 | 30.0 |
| 12 | 8.93 | 0.471 | 4.21 | 135.0 | 31.9 | 0.163 | 39.0 | 6.36 | 120.8 |
| 15 | 19.80 | 0.365 | 7.23 | 161.5 | 34.3 | 0.196 | 43.3 | 8.49 | 31.9 |
| 17 | 8.10 | 0.517 | 4.19 | 234.9 | 32.2 | 0.168 | 50.5 | 8.48 | 399.5 |
| 30 | 5.81 | 0.559 | 3.24 | 145.9 | 33.3 | 0.183 | 43.7 | 8.00 | 236.2 |
| 40 | 10.20 | 0.446 | 4.55 | 146.0 | 32.0 | 0.166 | 45.0 | 7.47 | 278.8 |
| 42 | 8.80 | 0.474 | 4.17 | 408.8 | 36.5 | 0.224 | 59.3 | 13.28 | 225.8 |

ตารางที่ 4.1(ต่อ) แสดงการคำนวณแรงเสียดทานด้านข้างเสาเข็มสำหรับ
เสาเข็มเจาะซึ่งมีระดับปลายเสาเข็มที่ชั้นทรายชั้นที่ 2
วิเคราะห์ตามวิธี Short term condition

| No. | Second stiff clay | | | | Second sand layer | | | | |
|-----|-------------------|----------|----------|-------|-------------------|------------------|-----------|----------|-------|
| | Su | α | f_{s4} | Ps4 | ϕ | $K_{stan\phi_a}$ | $6'_{vs}$ | f_{s5} | Ps5 |
| 1 | 17.90 | 0.341 | 6.10 | 34.5 | 35.2 | 0.194 | 60.9 | 11.81 | 169.3 |
| 2 | 15.75 | 0.363 | 5.72 | 813.6 | 35.3 | 0.208 | 65.8 | 13.69 | 45.0 |
| 3 | 20.10 | 0.319 | 6.41 | 670.7 | 38.1 | 0.248 | 64.6 | 16.02 | 211.7 |
| 4 | 29.50 | 0.290 | 8.56 | 41.9 | 37.3 | 0.234 | 50.3 | 11.77 | 627.4 |
| 5 | 23.60 | 0.304 | 7.17 | 170.8 | 35.5 | 0.212 | 68.0 | 14.42 | 108.6 |
| 6 | 19.00 | 0.330 | 6.27 | 314.8 | 24.7 | 0.202 | 60.9 | 12.30 | 493.3 |
| 7 | 16.50 | 0.355 | 5.86 | 33.2 | 33.3 | 0.184 | 48.8 | 8.98 | 524.3 |
| 10 | 17.30 | 0.347 | 6.00 | 507.9 | 35.0 | 0.205 | 63.5 | 13.02 | 490.7 |
| 12 | 19.60 | 0.324 | 6.35 | 419.1 | 36.5 | 0.225 | 60.4 | 13.59 | 210.6 |
| 15 | 26.50 | 0.300 | 7.95 | 388.8 | 39.6 | 0.265 | 64.6 | 17.12 | 41.4 |
| 17 | 23.40 | 0.306 | 7.16 | 169.0 | 37.5 | 0.238 | 65.2 | 15.12 | 97.5 |
| 30 | 18.10 | 0.339 | 6.14 | 136.6 | 32.6 | 0.173 | 59.1 | 10.22 | 461.4 |
| 40 | 25.00 | 0.307 | 7.68 | 467.4 | 34.4 | 0.197 | 76.4 | 15.05 | 200.3 |
| 42 | 34.80 | 0.280 | 9.74 | 255.6 | 37.1 | 0.232 | 69.0 | 16.01 | 288.2 |

ตารางที่ 4.2 แสดงการคำนวณค่าตัวประกอบหน่วยแรงต้านทานปลายเสาเข็ม
สำหรับเสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 2 วิเคราะห์ตามวิธี Short
term condition

| No. | Pult | Ps | Wp | U | Pb | Ap | $6'_{vb}$ | Nq | N _b | N' _b |
|-----|------|--------|-------|------|-----|------|-----------|-------|----------------|-----------------|
| 1 | 1540 | 1049.7 | 133.0 | 28.7 | 595 | 1.13 | 62.6 | 8.40 | 57.7 | 23.8 |
| 2 | 2180 | 1510.9 | 237.5 | 54.1 | 853 | 1.77 | 68.9 | 7.00 | 25.0 | 12.4 |
| 3 | 1520 | 1075.1 | 143.9 | 32.1 | 557 | 1.13 | 66.2 | 7.44 | 70.5 | 27.8 |
| 4 | 1530 | 971.1 | 125.4 | 26.4 | 658 | 1.13 | 60.1 | 9.68 | 104.6 | 44.6 |
| 5 | 1820 | 1142.8 | 152.0 | 34.6 | 795 | 1.13 | 68.9 | 10.21 | 109.9 | 41.9 |
| 6 | 1630 | 1146.3 | 143.9 | 32.1 | 596 | 1.13 | 66.2 | 7.95 | 80.8 | 41.3 |
| 7 | 1100 | 798.7 | 114.0 | 22.8 | 393 | 1.13 | 56.3 | 6.17 | 47.7 | 27.8 |
| 10 | 1620 | 1253.8 | 149.3 | 33.8 | 482 | 1.13 | 68.0 | 6.26 | 63.3 | 24.4 |
| 12 | 1480 | 978.1 | 131.9 | 28.4 | 605 | 1.13 | 62.2 | 8.61 | 62.8 | 26.1 |
| 15 | 880 | 718.7 | 62.0 | 13.7 | 210 | 0.50 | 64.8 | 6.47 | 69.1 | 27.7 |
| 17 | 1190 | 950.0 | 99.9 | 22.3 | 318 | 0.79 | 66.2 | 6.07 | 64.3 | 25.4 |
| 30 | 1380 | 1093.2 | 100.7 | 22.5 | 365 | 0.79 | 66.6 | 6.94 | 51.0 | 20.0 |
| 40 | 1940 | 1156.6 | 184.3 | 44.7 | 923 | 1.13 | 79.0 | 10.34 | 103.1 | 34.6 |
| 42 | 1630 | 1121.1 | 163.1 | 38.1 | 634 | 1.13 | 72.6 | 7.73 | 85.4 | 31.0 |

- หมายเหตุ - ค่าหน่วยแรงต่างๆ มีหน่วยเป็น ตันต่อตารางเมตร
 - ค่าแรงต่างๆ มีหน่วยเป็น ตัน
 - ค่า N(SPT) มีหน่วยเป็น ครั้งต่อฟุต
 - พื้นที่หน้าตัดเป็น ตารางเมตร
 - $Ps = Ps1+Ps2+Ps3+Ps4+Ps5$

4.2.3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_q กับ $N(SPT)$

การวิเคราะห์กลับให้ค่า N_q จากค่าหน่วยแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม สำหรับเสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 2 ของชั้นดินกรุงเทพมหานคร (ดังแสดงในตาราง 4.2) และค่า N ที่ปลายเสาเข็ม ทำให้สามารถนำเอาค่าทั้งสองมาพล็อตเพื่อหาความสัมพันธ์โดยอาศัยการ regression แบบ exponential regression

$$N_q = 5.14 \exp(0.00563 N_b) ; r^2 = 0.533 \dots \dots (4.2)$$

$$N_q = 5.25 \exp(0.013 N'_b) ; r^2 = 0.395 \dots \dots (4.3)$$

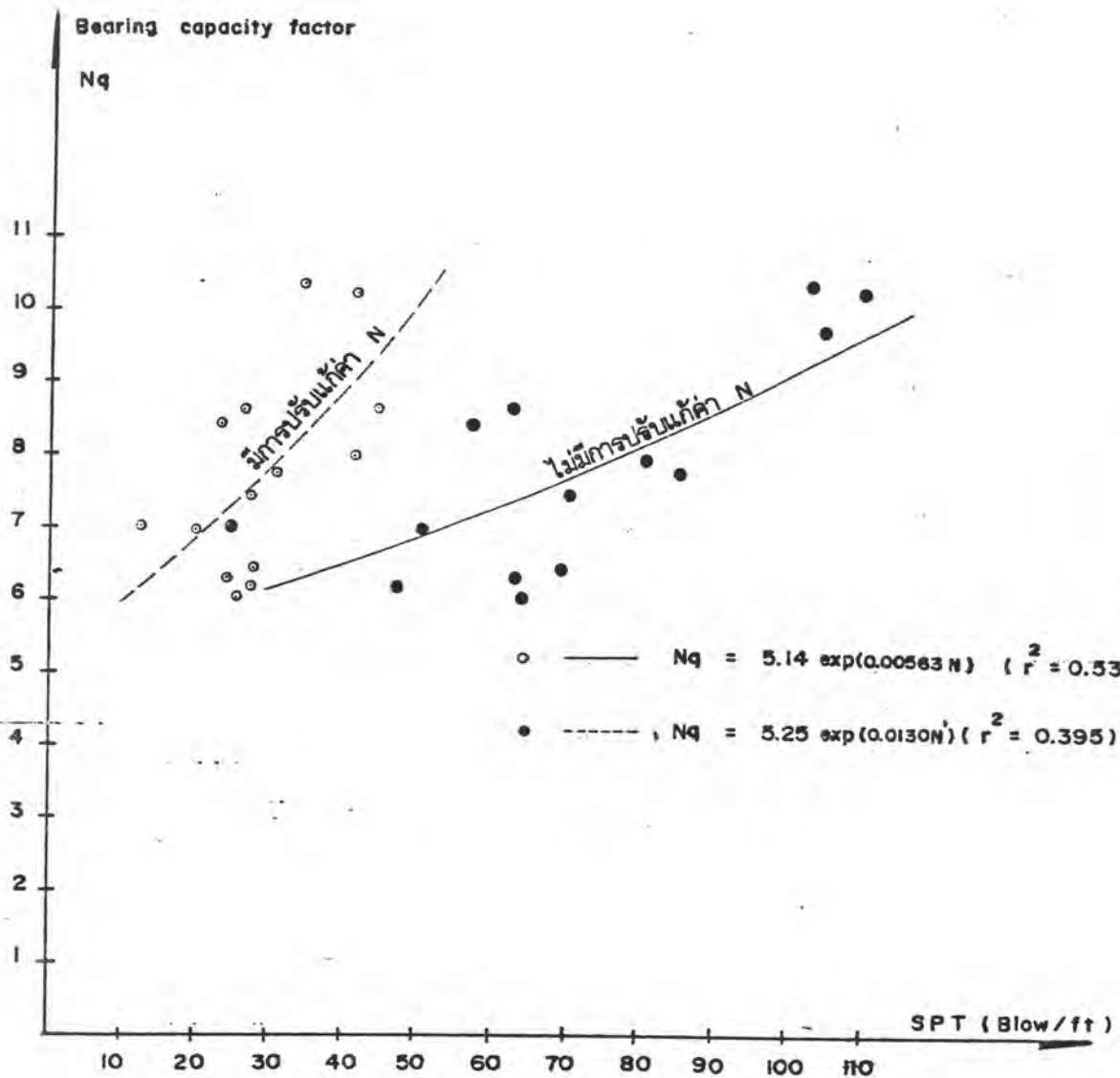
เมื่อ N_q คือ ค่าตัวประกอบการรับแรงต้านทานแบบประสิทธิผลที่ปลายเสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 2

N_b คือ ค่าการทดสอบการทะลุทะลวงที่ระดับปลายเสาเข็มที่ยังไม่ปรับแก้

N'_b คือ ค่าการทดสอบการทะลุทะลวงที่ระดับปลายเสาเข็มที่ปรับแก้โดยค่า C_n ตามรูป 2.10 (Peck, Hansen & Thornburn(1974)) แล้ว

เนื่องจากค่า coefficient of determination (r^2) มีค่าค่อนข้างต่ำ ทำให้เกิดความไม่แน่ใจว่า ความสัมพันธ์ตามสมการ 4.2 และ 4.3 จะมีความแม่นยำเพียงพอหรือไม่ อย่างไรก็ตามก็ทำการตรวจสอบดังรายละเอียดในหัวข้อ 4.4 อีกครั้ง

สำหรับชั้นทรายชั้นที่ 2 ซึ่งมีค่า $N(SPT)$ โดยประมาณ 30 ถึง 100



รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SPT กับค่า Nq ของเสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 2 ของชั้นดินกรุงเทพมหานคร เมื่อ N คือค่า SPT ที่ยังไม่ปรับแก้ และ N' คือค่าที่ปรับแก้โดยค่า Cn ซึ่งถูกเสนอโดย (Peck, Hansen & Thornburn (1974) ตามรูป 2.10

Blow/ft จะมีค่า N_q โดยประมาณ 6 ถึง 10 ดังแสดงในรูป 4.1

จากผลการวิเคราะห์ค่า Pult โดยอาศัยวิธีของ Mazurkiewicz (1972) พบว่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติ Pult มีค่าโดยประมาณ 2 ถึง 2.5 เท่า ของน้ำหนักบรรทุกใช้งาน ดังนั้นพิกัดความปลอดภัยจึงอยู่ระหว่าง 2 ถึง 2.5

4.2.4 การศึกษาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้กับผลการวิจัยในอดีต

ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม ปัจจัยหนึ่งคือค่าหน่วยแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็ม จากการรวบรวมความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของชั้นดินค่าความลึกกับค่าหน่วยแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มเจาะในชั้นดินเหนียวชั้นที่ 1, ชั้นที่ 2 และในชั้นทรายชั้นที่ 1 และ ชั้นที่ 2 ตาม Bandekar (1980), NG (1981), Pimpasugdi (1989) และผลวิจัยแสดงในตารางที่ 4.3, 4.4 และรูปที่ 4.2 และ 4.3 สามารถสรุปได้ดังนี้คือ

หน่วยแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียวไม่ขึ้นกับความลึกหรือชั้นดิน โดยมีหน่วยแรงเสียดทานโดยประมาณ 4 ถึง 9 ตันต่อตารางเมตร

หน่วยแรงเสียดทานในชั้นทรายจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความลึกมีค่ามากขึ้นโดยค่าหน่วยแรงเสียดทานในชั้นทรายชั้นที่ 1 มีค่าโดยประมาณ 5 ถึง 10 ตันต่อตารางเมตร และในชั้นทรายชั้นที่ 2 มีค่าโดยประมาณเท่ากับ 10 ถึง 15 ตันต่อตารางเมตร

จากการรวบรวมความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกกับค่าหน่วยแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ตาม Pimpasugdi (1989) และผลวิจัยแสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.4 พบว่าหน่วยแรงต้านทานปลายเสาเข็มเจาะขึ้นกับความลึกและชั้นดิน โดยมีค่าประมาณ 150 ถึง 350 ตันต่อตารางเมตร สำหรับทรายชั้นแรก และ 400 ถึง 500 ตันต่อตารางเมตร สำหรับชั้นทรายชั้นที่ 2

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มเจาะในชั้นดินเหนียวแข็ง
ของชั้นดินกรุงเทพมหานคร

| ผู้วิจัย | Pile No. | First stiff clay | | Second stiff clay | |
|----------------|-------------|------------------|-------------|-------------------|-------------|
| | | depth | αSu | depth | αSu |
| BANDEKAR(1980) | B5 | 13.00 | 4.20 | - | - |
| | | 18.20 | 4.00 | - | - |
| | | 23.40 | 4.10 | - | - |
| | B6 | 13.30 | 4.70 | - | - |
| | | 24.00 | 4.00 | - | - |
| | | - | - | - | - |
| NG(1981) | BP2 | 11.00 | 6.23 | - | - |
| | BP3 | 14.80 | 8.40 | - | - |
| | | 19.80 | 5.80 | - | - |
| | BP4 | - | - | 40.0 | 4.90 |
| | BP5 | 14.80 | 6.90 | 38.0 | 6.20 |
| | | 19.80 | 4.10 | - | - |
| | BP6 | - | - | 37.5 | 6.20 |
| | BP9 | 20.60 | 8.00 | 39.5 | 8.50 |

หมายเหตุ ความลึก (depth) มีหน่วยเป็น เมตร

หน่วยแรง αSu มีหน่วยเป็น ตันต่อตารางเมตร

ตารางที่ 4.3(ต่อ) แสดงค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มเจาะในชั้นดินเหนียวแข็งของชั้นดินกรุงเทพมหานคร

| ผู้วิจัย | Pile No. | First stiff clay | | Second stiff clay | |
|------------------|----------|------------------|-------------|-------------------|-------------|
| | | depth | α Su | depth | α Su |
| | BP10 | 20.6 | 3.62 | 39.5 | 4.00 |
| | BP11 | 22.5 | 5.80 | - | - |
| Pimpasugdi(1989) | BP1 | 18.3 | 6.54 | - | - |
| | BP2 | 18.5 | 4.72 | - | - |
| | BP3 | 19.5 | 7.04 | - | - |
| | BP4 | 17.0 | 7.84 | - | - |
| | BP5 | 20.5 | 3.72 | - | - |
| | BP6 | 20.5 | 3.54 | - | - |
| | BP7 | 23.9 | 7.36 | - | - |
| | BP8 | 17.0 | 5.98 | - | - |
| | BP9 | 16.8 | 6.00 | - | - |
| | BP10 | 16.6 | 6.31 | - | - |
| | BP11 | 22.5 | 8.44 | - | - |
| ผลวิจัย | 1 | 22.3 | 9.64 | 44.5 | 6.10 |
| | 2 | 19.8 | 4.73 | 36.3 | 5.72 |
| | 3 | 20.0 | 4.50 | 35.6 | 6.41 |

หมายเหตุ ความลึก (depth) มีหน่วยเป็น เมตร

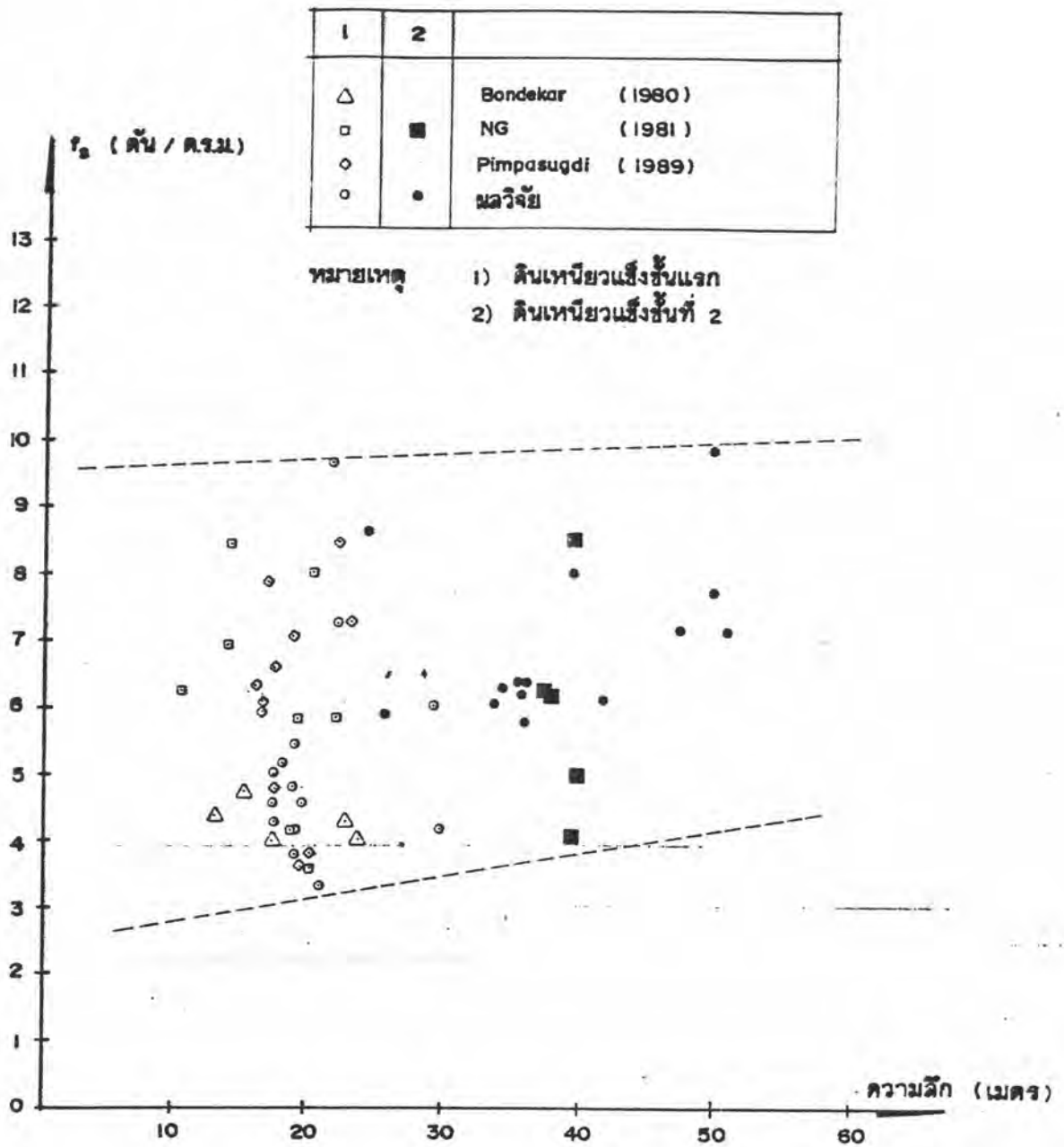
หน่วยแรง α Su มีหน่วยเป็น ตันต่อตารางเมตร

ตารางที่ 4.3(ต่อ) แสดงค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มเจาะในชั้นดินเหนียวแข็งของชั้นดินกรุงเทพมหานคร

| ผู้วิจัย | Pile No. | First stiff clay | | Second stiff clay | |
|----------|----------|------------------|-------------|-------------------|-------------|
| | | depth | α Su | depth | α Su |
| ผลวิจัย | 4 | 19.5 | 5.41 | 24.7 | 8.56 |
| | 5 | 29.5 | 6.00 | 50.9 | 7.17 |
| | 6 | 18.8 | 5.10 | 34.7 | 6.27 |
| | 7 | 19.5 | 3.75 | 25.8 | 5.86 |
| | 10 | 18.0 | 4.94 | 33.8 | 6.00 |
| | 12 | 17.0 | 4.21 | 35.8 | 6.35 |
| | 15 | 22.8 | 7.23 | 39.3 | 7.95 |
| | 17 | 19.5 | 4.19 | 47.3 | 7.16 |
| | 30 | 21.3 | 3.24 | 35.9 | 6.14 |
| | 40 | 17.3 | 4.55 | 49.9 | 7.68 |
| | 42 | 30.0 | 4.17 | 49.8 | 9.74 |

หมายเหตุ ความลึก (depth) มีหน่วยเป็น เมตร

หน่วยแรง α Su มีหน่วยเป็น ตันต่อตารางเมตร



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยแรงเฉือนที่ผิวของเสาเข็มเจาะ
 ในชั้นดินเหนียวแข็งของชั้นดินกรุงเทพมหานคร

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มเจาะในชั้นทราย
ของชั้นดินกรุงเทพมหานคร

| ผู้วิจัย | Pile No. | first sand | | second sand | |
|-------------------|-------------|------------|-------|-------------|-------|
| | | depth | f_s | depth | f_s |
| Pimpasugdi (1989) | BP12 | 26.1 | 7.00 | - | - |
| | BP13 | 26.1 | 7.00 | - | - |
| | - | - | - | - | - |
| | BP15 | 28.1 | 11.20 | - | - |
| | BP16 | - | - | 49.8 | 9.7 |
| | BP17 | 22.7 | 1.50 | - | - |
| | BP18 | 30.3 | 1.80 | - | - |
| | BP19 | 20.7 | 1.40 | - | - |
| | BP20 | 24.3 | 4.00 | - | - |
| | BP21 | - | - | 47.7 | 2.5 |
| | BP22 | 27.1 | 11.40 | - | - |
| ผลวิจัย | 1 | 36.1 | 9.31 | 47.1 | 11.8 |
| | 2 | 22.0 | 5.66 | 52.5 | 13.7 |
| | 3 | 21.4 | 6.61 | 51.2 | 16.0 |

หมายเหตุ ความลึก (depth) มีหน่วยเป็น เมตร

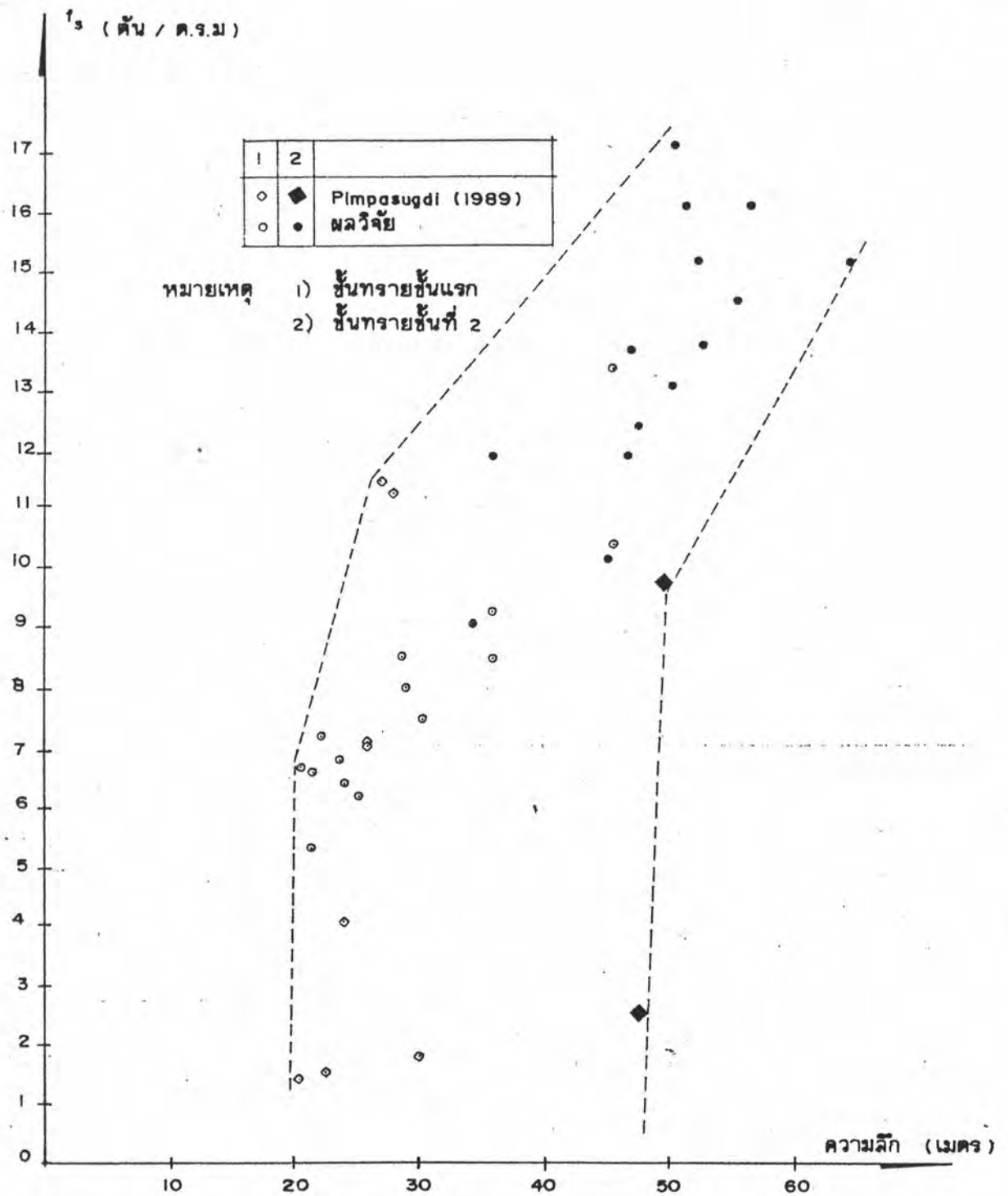
หน่วยแรง f_s มีหน่วยเป็น ตันต่อตารางเมตร

ตารางที่ 4.4(ต่อ) แสดงค่าหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มเจาะในชั้นทราย
ของชั้นดินกรุงเทพมหานคร

| ผู้วิจัย | Pile | first sand | | second sand | |
|----------|------|------------|-------|-------------|-------|
| | No. | depth | f_s | depth | f_s |
| ผลวิจัย | 4 | 22.5 | 7.14 | 35.8 | 11.8 |
| | 5 | 45.7 | 10.31 | 55.0 | 14.4 |
| | 6 | 25.3 | 6.13 | 47.2 | 12.3 |
| | 7 | 24.5 | 6.75 | 34.3 | 9.0 |
| | 10 | 21.8 | 5.31 | 50.0 | 13.0 |
| | 12 | 24.5 | 6.36 | 46.6 | 13.6 |
| | 15 | 28.8 | 8.49 | 50.2 | 17.1 |
| | 17 | 36.0 | 8.48 | 52.0 | 15.1 |
| | 30 | 29.2 | 8.00 | 45.1 | 10.2 |
| | 40 | 30.5 | 7.47 | 64.3 | 15.1 |
| | 42 | 45.3 | 13.28 | 56.1 | 16.0 |

หมายเหตุ ความลึก (depth) มีหน่วยเป็น เมตร

หน่วยแรง f_s มีหน่วยเป็น ตันต่อตารางเมตร



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มเจาะในชั้นทรายของชั้นดินกรุงเทพมหานคร

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าหน่วยแรงต้านทานปลายเสาเข็มเจาะในชั้นทรายของ
ชั้นดินกรุงเทพมหานคร

| ผู้วิจัย | Pile No. | First sand | | Second sand | |
|-------------------|-------------|------------|-------|-------------|-------|
| | | depth | q_b | depth | q_b |
| Pimpasugdi (1989) | BP12 | 26.50 | 268 | - | - |
| | BP13 | 26.50 | 378 | - | - |
| | BP14 | 34.00 | 524 | - | - |
| | BP15 | 32.60 | 439 | - | - |
| | BP16 | - | - | 51.40 | 137 |
| | BP17 | 23.50 | 159 | - | - |
| | BP18 | 35.00 | 325 | - | - |
| | BP19 | 21.00 | 67 | - | - |
| | BP20 | 26.00 | 41 | - | - |
| | BP21 | - | - | 48.70 | 472 |
| | BP22 | 30.50 | 226 | - | - |
| | งานวิจัย | 1 | - | - | 49.00 |
| 2 | | - | - | 56.00 | 482 |
| 3 | | - | - | 53.00 | 493 |
| 4 | | - | - | 46.20 | 582 |
| 5 | | - | - | 56.00 | 704 |
| 6 | | - | - | 53.00 | 527 |

หมายเหตุ ความลึก (depth) มีหน่วยเป็น เมตร

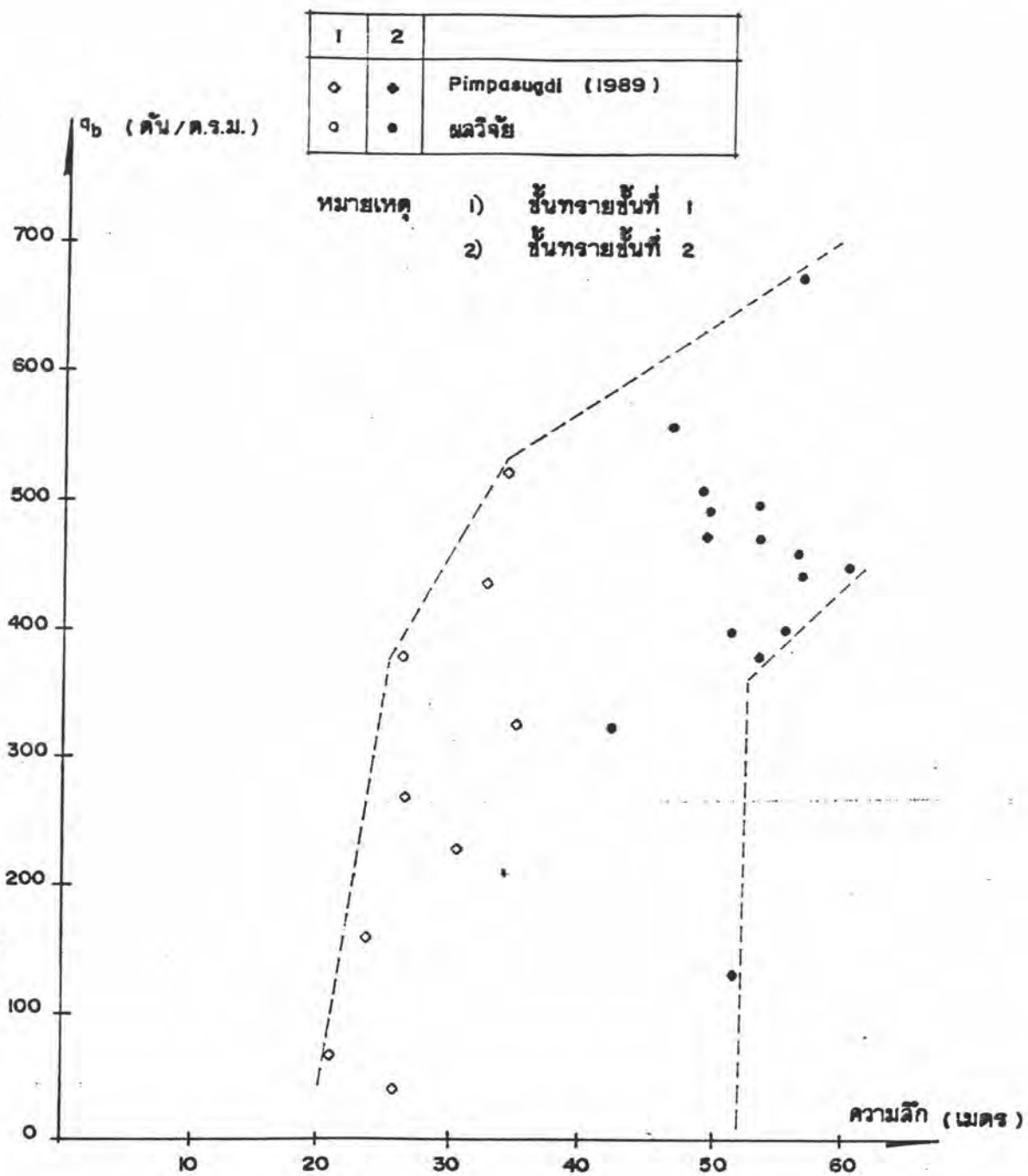
หน่วยแรง q_b มีหน่วยเป็น ตันต่อตารางเมตร

ตารางที่ 4.5(ต่อ) แสดงค่าหน่วยแรงต้านทานปลายเสาเข็มเจาะในชั้นทรายของ
ชั้นดินกรุงเทพมหานคร

| ผู้วิจัย | Pile No. | First sand | | Second sand | |
|----------|-------------|------------|-------|-------------|-------|
| | | depth | q_b | depth | q_b |
| | 7 | - | - | 42.0 | 347 |
| | 10 | - | - | 55.0 | 427 |
| | 12 | - | - | 48.6 | 535 |
| | 15 | - | - | 51.4 | 420 |
| | 17 | - | - | 53.0 | 403 |
| | 30 | - | - | 53.4 | 462 |
| | 40 | - | - | 67.9 | 844 |
| | 42 | - | - | 60.1 | 561 |

หมายเหตุ ความลึก (depth) มีหน่วยเป็น เมตร

หน่วยแรง q_b มีหน่วยเป็น ตันต่อตารางเมตร



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มเจาะในชั้นทรายของชั้นดินกรุงเทพมหานคร

จากการรวบรวมความสัมพันธ์ระหว่างค่า $N(SPT)$, ϕ และ N_q ของเสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ตาม NG(1981), Pimpasugdi(1989) และ ผลวิจัยดังแสดงในตารางที่ 4.6 , รูปที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าค่า N_q สำหรับเสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 1 จะมีค่าใกล้เคียงกับ N_q สำหรับเสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 2 โดยมีค่าประมาณ 5 ถึง 10 อย่างไรก็ตาม N_q สำหรับชั้นทรายชั้นที่ 1 ก็ยังมีค่าสูงกว่า สำหรับชั้นทรายชั้นที่ 2 บ้างเล็กน้อย จากรูป 4.6 ก็แสดงให้เห็นว่าค่า N_q ซึ่งถูกเสนอโดย สุวรรณ(2531), Pimpasugdi(1989) และผลวิจัยมีค่าใกล้เคียงกันในขณะที่เดียวกันค่า N_q ที่ถูกเสนอโดย NG(1981) จะมีค่าสูงกว่าพอสมควร

จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าน้ำหนักซึ่งถ่ายสู่ปลายเสาเข็มจะเกิดขึ้น 25% ถึง 45% รูปที่ 4.3 ในภาคผนวก ง. แสดงตัวอย่างไดอะแกรมของ load-transfer ที่จุดวิบัติของเสาเข็มในชั้นทรายชั้นที่ 2 ซึ่งสภาพดังกล่าวจะเกิดขึ้นเมื่อเสาเข็มวิบัติ ในขณะที่สภาพการใช้งานจริงค่าการทรุดตัวจะเกิดไม่ถึง 1% ของเส้นผ่านศูนย์กลาง จากกรณีดังกล่าวการ Mobilize ค่า End bearing จะเกิดน้อยกว่า skin friction อย่างมาก ดังนั้นในสภาพการใช้งานจริงแล้วน้ำหนักจากหัวเสาเข็มแทบทั้งหมดจะถ่ายสู่ผิวเสาเข็ม

4.2.5 เงื่อนไขและขอบเขตของการเอาค่าตัวประกอบรับแรงชาร N_q ไปใช้ในการคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม

เงื่อนไขและขอบเขตของการนำความสัมพันธ์ 4.2 และ 4.3 ไปใช้ประโยชน์ในการคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม คือ

- ความสัมพันธ์ $N_q = 5.14 \exp(0.00563 N)$ และ $N_q = 5.25 \exp(0.013 N')$ นำไปใช้เพื่อหาค่าหน่วยแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 2 โดยหาค่า N และ N' (ซึ่งเป็นค่าการทดสอบการทะลุทะลวงที่ไม่ได้ปรับแก้และปรับแก้แล้วตามลำดับ) เสียก่อนและค่า

ตารางที่ 4.8 แสดงค่า N_q ของปลายเสาเข็มเจาะในชั้นทรายของชั้นดิน
กรุงเทพมหานคร

| ผู้วิจัย | Pile No. | First sand | | | Second sand | | |
|----------------------|-------------|------------|--------|------|----------------|--------|-----|
| | | Nb | ϕ | Nq | N _b | ϕ | Nq |
| NG(1983) | B8 | - | 34.0 | 6.5 | - | - | - |
| | B9 | - | 31.0 | 5.9 | - | - | - |
| | B11 | - | 31.0 | 4.2 | - | - | - |
| | B12 | - | 33.0 | 7.9 | - | - | - |
| | B13 | - | 36.0 | 10.2 | - | - | - |
| | B14 | - | 38.0 | 6.5 | - | - | - |
| Pimpasugdi (1989) | BP12 | 35 | 33.0 | 7.4 | - | - | - |
| | BP13 | 35 | 33.0 | 10.1 | - | - | - |
| | BP14 | 34 | 33.0 | 11.2 | - | - | - |
| | BP15 | 40 | 33.4 | 10.2 | - | - | - |
| | BP16 | - | - | - | 44 | 31.9 | 3.1 |
| | BP17 | 33 | 21.2 | 5.1 | - | - | - |
| | BP18 | 21 | 19.7 | 7.5 | - | - | - |
| | BP19 | 25 | 20.3 | 2.8 | - | - | - |
| | BP20 | 32 | 32.5 | 2.0 | - | - | - |
| | BP21 | - | - | - | 72 | 36.0 | 8.4 |

หมายเหตุ ค่า N มีหน่วยเป็นครั้งต่อฟุต

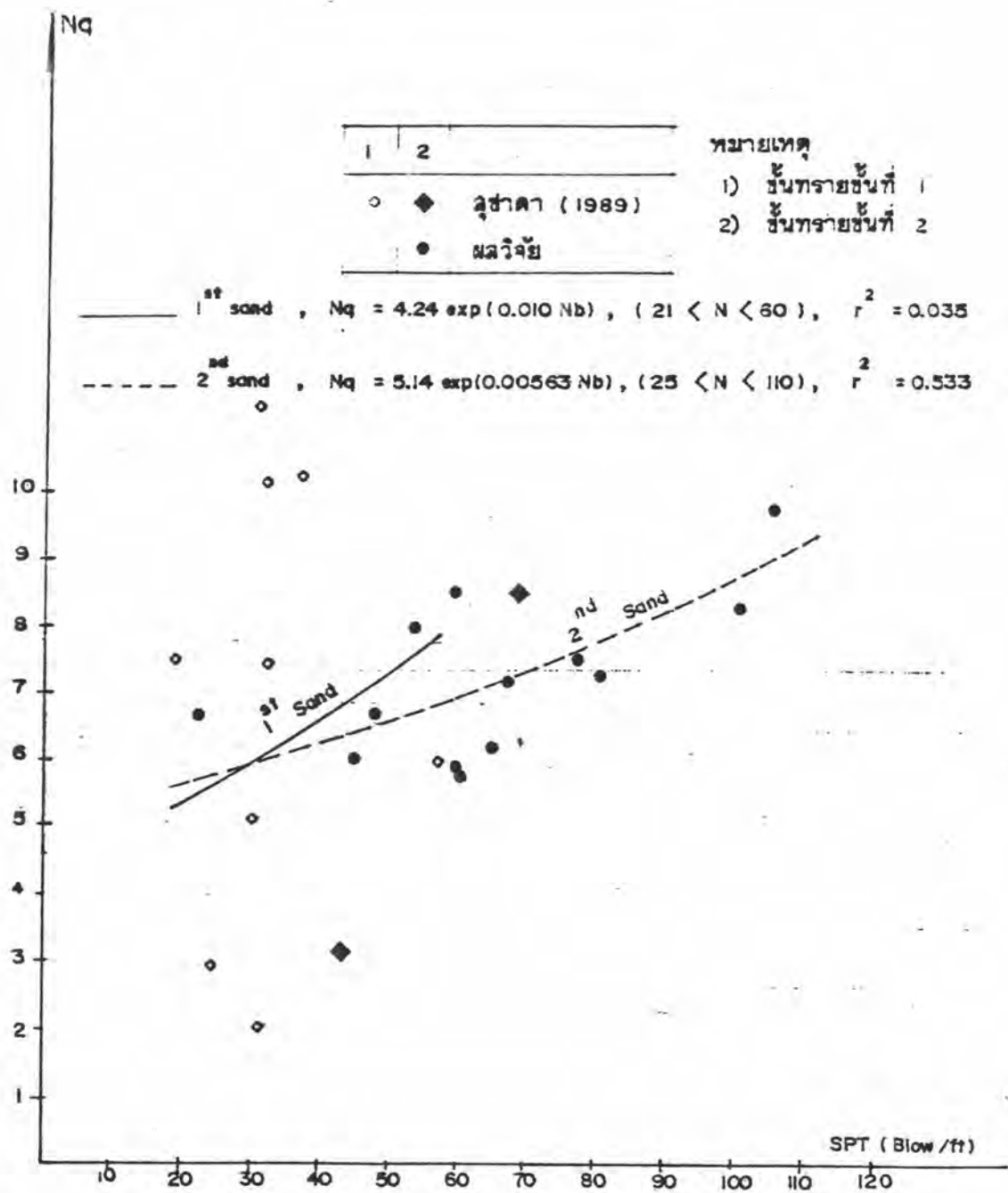
ค่า ϕ มีหน่วยเป็นองศา

ตารางที่ 4.6(ต่อ) แสดงค่า N_q ของปลายเสาเข็มเจาะในชั้นทรายของชั้นดิน
กรุงเทพมหานคร

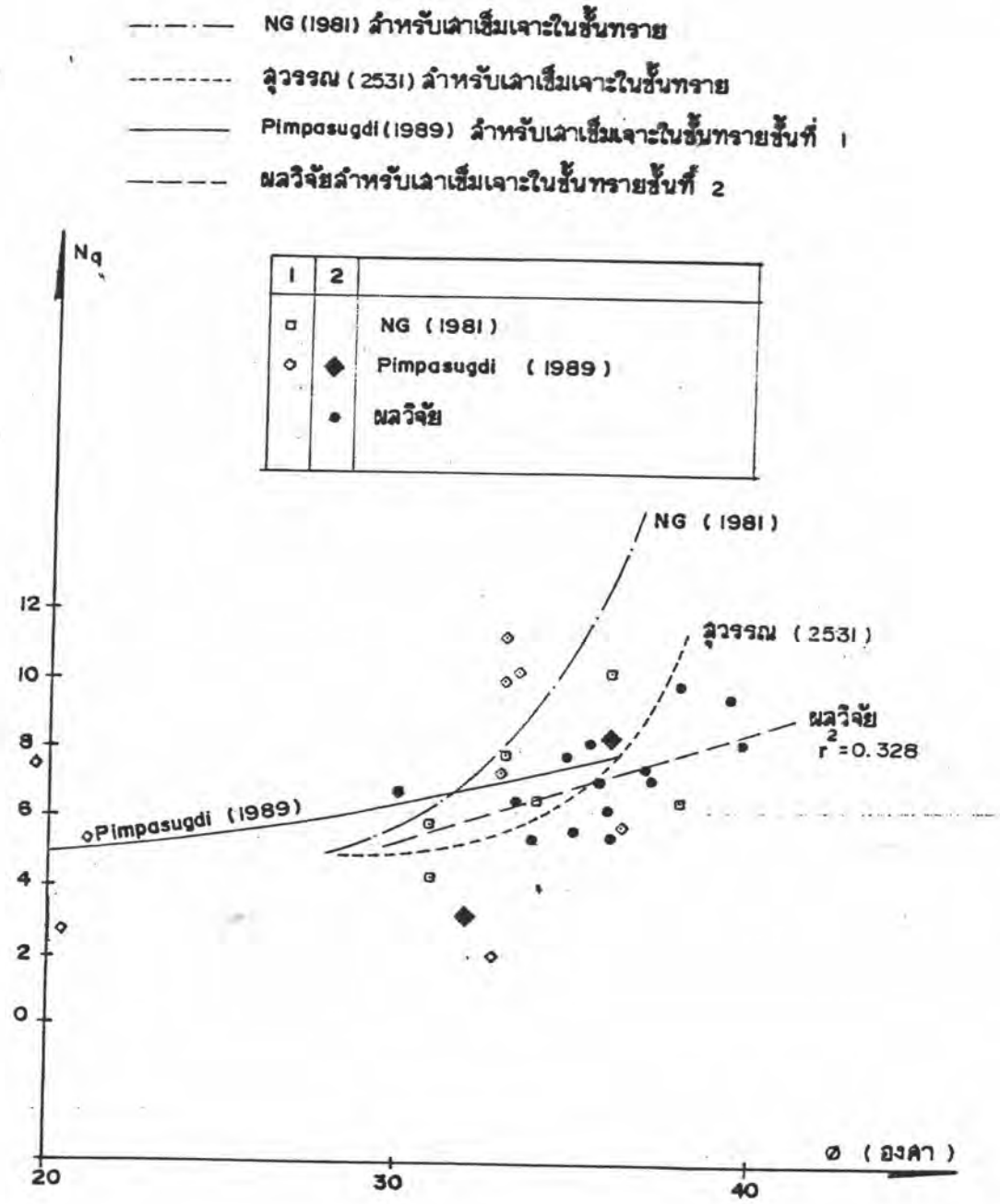
| ผู้วิจัย | Pile No. | First sand | | | Second sand | | |
|------------------|-------------|------------|--------|-------|-------------|--------|-------|
| | | Nb | ϕ | N_q | Nb | ϕ | N_q |
| Pimpasugdi(1989) | BP22 | 60 | 36.4 | 5.9 | - | - | - |
| ผลงานวิจัย | 1 | - | - | - | 57.7 | 34.8 | 7.92 |
| | 2 | - | - | - | 25.0 | 30.0 | 6.68 |
| | 3 | - | - | - | 70.5 | 35.8 | 7.13 |
| | 4 | - | - | - | 104.6 | 39.8 | 8.23 |
| | 5 | - | - | - | 109.9 | 39.5 | 9.75 |
| | 6 | - | - | - | 80.8 | 36.9 | 7.48 |
| | 7 | - | - | - | 47.7 | 33.8 | 5.71 |
| | 10 | - | - | - | 63.3 | 35.1 | 5.83 |
| | 12 | - | - | - | 62.8 | 35.4 | 8.14 |
| | 15 | - | - | - | 69.1 | 35.9 | 6.15 |
| | 17 | - | - | - | 64.3 | 36.2 | 5.73 |
| | 30 | - | - | - | 51.0 | 33.4 | 6.61 |
| | 40 | - | - | - | 103.1 | 37.9 | 9.87 |
| | 42 | - | - | - | 85.4 | 36.9 | 7.26 |

หมายเหตุ ค่า N มีหน่วยเป็นครั้งตอฟุต

ค่า ϕ มีหน่วยเป็นองศา



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N(SPT) กับค่า Nq ของเสาเข็มเจาะ
ในชั้นทรายของชั้นดินกรุงเทพมหานคร



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมเสียดทานภายในกับค่า N_q ของเสาเข็มในชั้นทรายของชั้นดินกรุงเทพมหานคร

$q_b = Nq \cdot 6'_{\infty}$ เมื่อ q_b คือค่าหน่วยแรงต้านทานในแนวตั้งของดินที่ระดับปลายเสาเข็ม

- ค่า q_b ที่ได้จะไม่ใช้ค่าที่วัดได้จาก load cell หรือ strain gauge เพราะค่าดังกล่าวรวมผลของน้ำหนักของเสาเข็มและ bouyancy force จากความดันน้ำ ค่าที่วัดได้จาก load cell คือ ค่า net q_b เท่ากับค่า $q_b - (Wp - UAp) / Ap$

- ค่าหน่วยแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มมีวิธีการคำนวณ ดังแสดงในหัวข้อ 4.2.1 โดยคำนวณในลักษณะ short term condition

- ค่า N ที่นำมาแทนค่าในความสัมพันธ์ 4.2 และ 4.3 ได้จากการเฉลี่ยค่า N ของดินที่ระดับเหนือและใต้ระดับปลายเสาเข็ม 1 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางและ 2 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มตามลำดับ ซึ่งตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง.

- ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิกฤติของเสาเข็มทำได้โดยคำนวณค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มไปรวมกับค่าแรงเสียดทานด้านข้างตลอดความยาวของเสาเข็มและลบ $(Wp - UAp)$ ซึ่งค่าน้ำหนักออกแบบใช้งาน ผู้เขียนแนะนำว่าให้ใช้ค่าพิสัยความปลอดภัยเท่ากับ 2.0 ถึง 2.5 เท่า

อย่างไรก็ตามสิ่งที่ต้องระลึกอยู่เสมอคือ ข้อมูลการทดสอบเสาเข็มได้จากการทดสอบเสาเข็มภายหลังการก่อสร้างไม่นานประกอบกับการทดสอบใช้เวลาค่อนข้างสั้นเพียง 2-3 วัน ดังนั้นการวิเคราะห์จึงจำเป็นต้องอาศัยขั้นตอนการคำนวณแบบ short term condition ซึ่งอาจจะไม่เหมาะสมสำหรับเสาเข็มเจาะในชั้นดินเหนียวและชั้นทรายปนดินเหนียว เนื่องจากเสาเข็มเหล่านี้อาจจะเกิดสภาวะวิกฤติเวลาดำเนินการนาน (long term condition)

4.3 การวิเคราะห์หาสูตร empirical สำหรับประเมินค่า pile - soil modulus (E_s) ในรูปของ working load

การคำนวณค่าการทรุดตัวแบบอัสติคของฐานรากเสาเข็มตามหลักการซึ่งเสนอโดย Poulos & Davis (1980) จะต้องทราบค่า parameter ที่สำคัญดังนี้ คือ ขนาดต่างๆของเสาเข็ม, จำนวนและการจัดเสาเข็มในกลุ่ม, ค่า Young Modulus E_s ของดินรอบและใต้เสาเข็ม, ค่า Young Modulus ของเสาเข็ม, พื้นที่หน้าตัดและรูปทรงของเสาเข็ม ค่า E_s เป็นค่าที่หาได้ยากถ้าไม่ใช้ข้อมูลจากการทดสอบ load - settlement ของเสาเข็ม

ในการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มนั้น ค่า load settlement ของเสาเข็มต้นเดียว สามารถทราบได้จากผลการทดสอบเสาเข็ม ส่วนค่า pile-soil modulus ได้จากวิเคราะห์กลับ (Back analysis) ดังรายละเอียดในหัวข้อ 4.3.1 โดยอาศัยวิธีของ Poulos and Davis (1980)

ภายหลังจากที่ได้ค่า pile - soil modulus (E_s) ของเสาเข็มต้นต่างๆแล้วจึงนำค่า E_s มาหาความสัมพันธ์กับค่า pile - soil parameter อื่นด้วยวิธี exponential regression analysis Pimpasugdi (1989) พบว่าค่า E_s มีความสัมพันธ์กับพ.บ.บรรทุกดีกว่าคุณสมบัติของดินชนิดต่างๆ

สำหรับเสาเข็มที่นำมาวิเคราะห์มีทั้งเสาเข็มตอกและเจาะที่มีปลายอยู่ในระดับทรายชั้นที่ 1 และเสาเข็มเจาะที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่ 2 โดยเสาเข็มตอกในชั้นทรายชั้นที่ 1 มีขนาดหน้าตัดตั้งแต่ 0.35 ถึง 0.525 ม. และมีความยาวตั้งแต่ 22.00 ถึง 28.3 ม. เสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 1 มีขนาดหน้าตัดตั้งแต่ ϕ 0.80 ถึง ϕ 1.20 ม. และมีความยาวตั้งแต่ 24.5 ถึง 34.5 ม. เสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 2 มีขนาดหน้าตัดตั้งแต่ ϕ 0.80 ถึง ϕ 1.50 และมีความยาวตั้งแต่ 42.00 ถึง 67.9 ม. ดังนั้นในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์นี้จึงจะแยกการพิจารณาเป็น 3 กรณี คือ 1) เสาเข็มตอกในชั้นทรายชั้นที่ 1, 2) เสา

เข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 2 และ 3) เสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 2 จำนวน เสาเข็มที่ทำวิเคราะห์ทั้งหมด 42 ต้น เป็นเสาเข็มตอก 12 ต้น เสาเข็มเจาะ ในทรายชั้นแรก 10 ต้น และเสาเข็มเจาะในชั้นทรายที่ 2 อีก 20 ต้น ข้อมูลที่ ได้จะนำไปรวมกับข้อมูลในอดีตของ NG(1981) ชานินทร์ (2528), สุวรรณ (2531) และ Pimpasugdi(1989) สำหรับการวิเคราะห์ในข้อ 4.3.3

4.3.1 วิธีดำเนินการหาค่า pile - soil modulus (E_s)

สมการพื้นฐานจากทฤษฎี Elasticity (Poulos & Davis, 1980) ในการประมาณค่าการทรุดตัวของเสาเข็มต้นเดี่ยวในลักษณะเสาเข็มทดสอบ เป็นดังนี้

$$P_m = P I_o R_k R_b (1-\alpha) / (E_s d) \dots \dots \dots (4.4)$$

โดยที่ P_m คือ ค่าการทรุดตัวของหัวเสาเข็มที่วัดได้

P คือ น้ำหนักกระทำบนหัวเสาเข็ม

I_o คือ สัมประสิทธิ์ตัวประกอบการทรุดตัวของเสาเข็ม ต้นเดี่ยวเนื่องจากน้ำหนัก

R_k, R_b คือ ค่าปรับแก้เนื่องมาจาก stiffness ของ เสาเข็มและการยุบตัวของดินใต้ปลายเสาเข็มตามลำดับ

α คือ สัมประสิทธิ์การลอยตัวอันเนื่องจากอิทธิพลของ เสาเข็มสมอ โดยตั้งสมมุติฐานว่าค่า α สำหรับเสาเข็มรับแรงดึงเท่ากับเสาเข็มรับ แรงกด

E_s คือ ค่า pile - soil modulus

d คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม

$$I_o = \int \underline{n} (L/d) \quad \text{ตามรูป 2.28}$$

$$R_k = \int \underline{n} (L/d, K = E_p R_{\Delta} / E_s) \quad \text{ตามรูป 2.30}$$

$$R_b = \int \underline{n} (L/d, E_b/E_s, K = E_p R_{\Delta} / E_s) \quad \text{ตามรูป 2.33}$$

$$\alpha = \int \underline{n} (L/d, E_b/E_s, K, S/d) \quad \text{ตามรูป 2.34 ถึง 2.41}$$

เมื่อ s คือ ระยะทางจากเสาเข็มสมอมายังเสาเข็มทดสอบ

จากรายละเอียดข้างต้นแสดงให้เห็นว่าค่าตัวแปรต่างๆที่แสดงข้างต้นต่างเป็นฟังก์ชันกับค่า pile - soil modulus E_s ดังนั้นในการคำนวณ E_s จึงจำเป็นต้องอาศัยการลองค่า (trial & error) ค่า E_s ไปเรื่อยๆเพื่อหาค่า ρ_m ต่างๆ และค่า E_s ที่ถูกต้อง คือค่าซึ่งให้ ρ_m เท่ากับค่าการทรุดตัวที่วัดได้จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกเสาเข็ม หลังจากทราบค่า E_b/E_s ที่อยู่ระหว่าง 4-6 สำหรับชั้นดินกรุงเทพฯ (ชานินทร์, 2528) และค่า E_b/E_s ในช่วงดังกล่าวไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ การวิจัยจึงใช้ค่า $E_b/E_s = 4.0$

ในการวิเคราะห์ค่า pile - soil modulus ในงานวิจัยนี้มีบรรทัดฐาน คือ น้ำหนักบรรทุกที่นำมาพิจารณาจะเป็นค่าน้ำหนักบรรทุกใช้งาน , ค่า pile modulus (E_p) ในที่นี้จะใช้ค่าเท่ากับ $3 \times 10^6 \text{ T/M}^2$ ซึ่งเป็นค่าที่มีการยอมรับอย่างแพร่หลาย, ในกรณีซึ่งปลายเสาเข็มวางตัวที่ชั้นทรายแล้วค่า E_b/E_s จะมีค่าโดยประมาณเท่ากับ 4.0 ตามค่าซึ่งเสนอโดย ชานินทร์ (2528), ในกรณีซึ่งเสาเข็มมีขนาดหน้าตัดไม่เป็นวงกลมแล้วค่าเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลจะมีค่าเท่ากับ $\sqrt{(4 A_p/\pi)}$, ในกรณีที่ใช้ตัวรองรับเป็นน้ำหนักบรรทุก (counter weight) แล้วค่าปรับแก้ (correction factor α) จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ในขณะที่เดียวกันกรณี

ตัวรองรับเป็นเสาเข็มสมอแรงในเสาเข็มดังกล่าวจะเป็นแรงดึง จึงจำเป็นจะต้องพิจารณาผลของหน่วยแรงเสียดทานที่ทำให้เสาเข็มทดสอบลอยตัวเนื่องจากผลของแรงดึงในเสาเข็มสมอด้วยโดยใช้ตัวประกอบ α ค่าปรับแก้สำหรับคานอ้างอิงในการวัดจะไม่นำมาพิจารณาเนื่องจากโดยปกติแล้วตัวรองรับคานอ้างอิงจะอยู่ห่างจากเสาเข็มทดสอบและเสาเข็มสมอมาก อย่างไรก็ตามถ้าตัวรองรับคานอ้างอิงอยู่ในพื้นที่ซึ่งอิทธิพลของเสาเข็มทดสอบและเสาเข็มสมอไปถึงแล้วจำเป็นต้อนำค่าปรับแก้มาพิจารณาด้วย

ตัวอย่างการคำนวณค่า E_s แสดงอยู่ในภาคผนวก ง. (ii)

4.3.2 ผลการวิเคราะห์ค่า E_s

ตารางที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 สรุปผลการวิเคราะห์ค่า E_s ของเสาเข็มตอกในชั้นทรายชั้นที่ 1 เสาเข็มเจาะในชั้นทรายที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ค่า E_s ดังกล่าวสูงกว่าค่า E ของดินเหนียวแข็งและทราย และมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของเสาเข็มใหญ่ขึ้น ค่า E_s จึงไม่ใช่สมบัติของดินเพียงอย่างเดียว รูปร่างของเสาเข็มและวัสดุที่ใช้ทำเสาเข็มตลอดจนความยาวของเสาเข็มก็มีผลต่อค่า E_s เช่นกัน

ในข้อ 4.3.3 ข้อมูลเหล่านี้จะนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่เคยทำมาแล้วโดย Pimpasugdi (1989)

4.3.3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_s กับค่าน้ำหนักบรรทุกใช้งาน P

เนื่องจาก pile - soil modulus เป็นค่า Young

ตารางที่ 4.7 แสดงรายละเอียดการคำนวณค่า E_s ของเสาเข็มตอกในชั้นทราย
ชั้นที่ 1 ของชั้นดินกรุงเทพมหานคร

| No. | โครงการ | ขนาดเสาเข็ม ม * ม | d ม | L/d | R_s |
|-----|----------------|----------------------|--------|-----|-------|
| 16 | KARUNEE TOWER | 0.525*28.3 | 0.592 | 48 | 0.74 |
| 26 | ก.การคลัง T2 | 10.350*24.0 | 0.395 | 61 | 0.84 |
| 27 | ก.การคลัง T5 | 10.350*24.0 | 0.395 | 61 | 0.84 |
| 31 | ท่าอากาศยาน T2 | 0.400*24.0 | 0.451 | 53 | 0.85 |
| 32 | ท่าอากาศยาน T3 | 0.400*24.0 | 0.451 | 53 | 0.85 |
| 33 | ท่าอากาศยาน T5 | 0.525*22.0 | 0.592 | 37 | 0.74 |
| 34 | ท่าอากาศยาน T7 | 0.400*22.0 | 0.451 | 49 | 0.85 |
| 35 | ท่าอากาศยาน T8 | 0.350*22.0 | 0.395 | 53 | 1.00 |
| 36 | ท่าอากาศยาน T9 | 0.525*24.0 | 0.592 | 41 | 0.74 |
| 37 | ทางด่วน BK1 | 0.525*27.0 | 0.592 | 46 | 0.74 |
| 38 | ทางด่วน BK5 | 0.525*27.0 | 0.592 | 46 | 0.74 |
| 39 | ทางด่วน TH1 | 0.525*27.0 | 0.592 | 46 | 0.74 |

ตารางที่ 4.7(ต่อ) แสดงรายละเอียดการคำนวณค่า Es ของเสาเข็มตอกใน
ชั้นทรายชั้นที่ 1 ของชั้นดินกรุงเทพมหานคร

| No. | p | anchore No. | Io | Es TSM | Rk | Rb | α |
|-----|-----|----------------|-------|-----------|------|-------|----------|
| 16 | 120 | 4 | 0.062 | 5810 | 1.71 | 0.929 | 0.059 |
| 26 | 50 | 4 | 0.035 | 2000 | 1.51 | 0.902 | 0.231 |
| 27 | 50 | 4 | 0.035 | 1830 | 1.47 | 0.898 | 0.248 |
| 31 | 60 | C.W. | 0.041 | 3500 | 1.52 | 0.907 | 0 |
| 32 | 60 | C.W. | 0.041 | 3420 | 1.51 | 0.906 | 0 |
| 33 | 80 | C.W. | 0.064 | 3000 | 1.43 | 0.866 | 0 |
| 34 | 60 | C.W. | 0.043 | 2750 | 1.37 | 0.894 | 0 |
| 35 | 50 | C.W. | 0.035 | 2750 | 1.39 | 0.897 | 0 |
| 36 | 80 | C.W. | 0.050 | 4130 | 1.45 | 0.905 | 0 |
| 37 | 100 | C.W. | 0.046 | 5530 | 1.63 | 0.924 | 0 |
| 38 | 100 | C.W. | 0.046 | 5010 | 1.59 | 0.922 | 0 |
| 39 | 100 | C.W. | 0.046 | 5700 | 1.65 | 0.924 | 0 |

หมายเหตุ : C.W. หมายถึง counter weight

ตารางที่ 4.7(ต่อ) แสดงรายละเอียดการคำนวณค่า E_s ของเสาเข็มตอกใน
ชั้นทรายชั้นที่ 1 ของชั้นดินกรุงเทพมหานคร

| No. | f_m mm | f_u mm | h m | หมายเหตุ |
|-----|-------------|-------------|--------|----------------------------------------|
| 16 | 0.375 | 0.399 | 19.50 | $f_m = \text{PIoRkRb}(1-\alpha)/E_s d$ |
| 26 | 0.231 | 0.300 | 24.00 | $f_u = \text{PIoRkRb}/E_s d$ |
| 27 | 0.246 | 0.327 | 23.00 | $E_b/E_s = 4.0$ |
| 31 | 0.217 | 0.217 | 20.50 | $E_p = 300,000 \text{ ksc}$ |
| 32 | 0.217 | 0.217 | 18.50 | Rk, Rb และ α เสนอโดย |
| 33 | 0.345 | 0.345 | 18.50 | Poulos & Davis(1980) |
| 34 | 0.256 | 0.256 | 18.50 | h คือความลึกของชั้นทราย |
| 35 | 0.211 | 0.211 | 18.50 | ชั้นแรก |
| 36 | 0.218 | 0.218 | 20.50 | f_m คือค่าการทรุดตัวที่วัดได้ |
| 37 | 0.221 | 0.221 | 21.00 | f_u คือค่าการทรุดตัวจริง |
| 38 | 0.234 | 0.234 | 23.00 | |
| 39 | 0.234 | 0.234 | 21.50 | |

ตารางที่ 4.8 แสดงรายละเอียดการคำนวณค่า E_s ของเสาเข็มเจาะในชั้นทรายเป็นที่ 1 ของชั้นดินกรุงเทพมหานคร

| No. | โครงการ | ขนาดเสาเข็ม m * m | d m | L/d | R_{\wedge} |
|-----|------------------|----------------------|--------|-----|--------------|
| 13 | PROMPONG MANSION | $\phi 0.80 * 32.0$ | 0.80 | 40 | 1.0 |
| 14 | CTI PLAZA | $\phi 1.20 * 32.0$ | 1.20 | 27 | 1.0 |
| 18 | SIAM INN | $\phi 0.80 * 35.0$ | 0.80 | 35 | 1.0 |
| 19 | PS TOWER T2 | $\phi 0.80 * 30.0$ | 0.80 | 38 | 1.0 |
| 20 | PS TOWER T1 | $\phi 0.80 * 30.0$ | 0.80 | 38 | 1.0 |
| 21 | RAJTHAVEE TOWER | $\phi 0.80 * 34.0$ | 0.80 | 43 | 1.0 |
| 22 | ท.กสิกรไทย DE | $\phi 1.20 * 24.5$ | 1.20 | 20 | 1.0 |
| 23 | ท.กสิกรไทย EF | $\phi 1.20 * 25.5$ | 1.20 | 21 | 1.0 |
| 24 | ROYAL ORCHID TP1 | $\phi 1.00 * 33.0$ | 1.00 | 33 | 1.0 |
| 25 | ROYAL ORCHID TP2 | $\phi 0.80 * 34.5$ | 0.80 | 43 | 1.0 |

ตารางที่ 4.8(ต่อ) แสดงรายละเอียดการคำนวณค่า E_s ของเสาเข็มเจาะใน
ชั้นทรายชั้นที่ 1 ของชั้นดินกรุงเทพมหานคร

| No. | p | anchore No. | I_o | E_s TSM | R_k | R_b | α |
|-----|-----|----------------|-------|--------------|-------|-------|----------|
| 13 | 250 | 4 | 0.051 | 6310 | 1.48 | 0.902 | 0.359 |
| 14 | 500 | 4 | 0.067 | 7590 | 1.31 | 0.878 | 0.336 |
| 18 | 200 | C.W. | 0.048 | 3600 | 1.36 | 0.879 | 0 |
| 19 | 250 | 4 | 0.053 | 5410 | 1.40 | 0.893 | 0.452 |
| 20 | 250 | 4 | 0.053 | 6100 | 1.43 | 0.901 | 0.467 |
| 21 | 285 | 4 | 0.049 | 3850 | 1.37 | 0.883 | 0.373 |
| 22 | 300 | 4 | 0.089 | 3930 | 1.09 | 0.824 | 0.356 |
| 23 | 300 | 4 | 0.086 | 7100 | 1.20 | 0.856 | 0.514 |
| 24 | 250 | 6 | 0.060 | 4820 | 1.30 | 0.866 | 0.357 |
| 25 | 150 | 6 | 0.049 | 3400 | 1.33 | 0.876 | 0.190 |

หมายเหตุ : C.W. หมายถึง counter weight

ตารางที่ 4.8(ต่อ) แสดงรายละเอียดการคำนวณค่า E_s ของเสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 1 ของชั้นดินกรุงเทพมหานคร

| No. | f_m mm | f_u mm | h m | หมายเหตุ |
|-----|-------------|-------------|--------|----------------------------------------|
| 13 | 0.218 | 0.340 | 23.60 | $f_m = \text{PIoRkRb}(1-\alpha)/E_s d$ |
| 14 | 0.296 | 0.446 | 21.00 | $f_u = \text{PIoRkRb}/E_s d$ |
| 18 | 0.402 | 0.402 | 25.80 | $E_b/E_s = 4.0$ |
| 19 | 0.214 | 0.391 | 19.00 | $E_p = 300,000 \text{ ksc}$ |
| 20 | 0.200 | 0.375 | 23.00 | Rk, Rb และ α เสนอโดย |
| 21 | 0.350 | 0.558 | 25.00 | Poulos & Davis(1980) |
| 22 | 0.335 | 0.520 | 23.50 | h คือความลึกของชั้นทราย |
| 23 | 0.160 | 0.329 | 28.50 | ชั้นแรก |
| 24 | 0.230 | 0.358 | 29.00 | f_m คือค่าการทรุดตัวที่วัดได้ |
| 25 | 0.224 | 0.276 | - | f_u คือค่าการทรุดตัวจริง |

ตารางที่ 4.9 แสดงรายละเอียดการคำนวณค่า E_s ของเสาเข็มเจาะในชั้นทรายเป็นที่ 2 ของชั้นดินกรุงเทพมหานคร

| No. | โครงการ | ขนาดเสาเข็ม (ม * ม) | d (ม) | L/d | R_{Δ} |
|-----|--------------------|------------------------|----------|-----|--------------|
| 1 | THAI MILITARY BANK | φ1.20*49.0 | 1.20 | 41 | 1.00 |
| 2 | IMPERIAL TARA | φ1.50*56.0 | 1.50 | 37 | 1.00 |
| 3 | OCEAN TOWER II | φ1.20*53.0 | 1.20 | 44 | 1.00 |
| 4 | SAICHON MANSION | φ1.20*46.2 | 1.20 | 39 | 1.00 |
| 5 | SUKHUMVIT CENTER | φ1.20*56.0 | 1.20 | 47 | 1.00 |
| 6 | D.S. TOWER | φ1.20*53.0 | 1.20 | 44 | 1.00 |
| 7 | AYOTHAYA THANI | φ1.20*42.0 | 1.20 | 35 | 1.00 |
| 8 | CTI. TOWER | φ1.00*53.0 | 1.20 | 53 | 1.00 |
| 9 | FOUR WING MANSION | φ1.00*49.0 | 1.00 | 49 | 1.00 |
| 10 | OCEAN TOWER | φ1.20*55.0 | 1.20 | 46 | 1.00 |
| 11 | MAKASAN TOWER | φ1.50*57.0 | 1.50 | 38 | 1.00 |
| 12 | KIAN GWAN OFFICE | φ1.20*48.6 | 1.20 | 41 | 1.00 |
| 15 | ASOKE TOWER | φ0.80*51.4 | 0.80 | 64 | 1.00 |
| 17 | HABITAT PROJECT | φ1.00*53.0 | 1.00 | 53 | 1.00 |
| 28 | WINDSOR HOTEL | φ1.20*55.0 | 1.20 | 46 | 1.00 |
| 29 | GYPSUM MAHANAKORN | φ1.20*52.0 | 1.20 | 43 | 1.00 |
| 30 | UM. OFFICE | φ1.00*53.4 | 1.00 | 53 | 1.00 |
| 40 | SATHORN UNIQUE | φ1.20*67.9 | 1.20 | 57 | 1.00 |
| 41 | 41 TOWER | φ1.00*52.0 | 1.00 | 52 | 1.00 |
| 42 | PRESIDENT PARK | φ1.20*60.0 | 1.20 | 50 | 1.00 |

ตารางที่ 4.9(ต่อ) แสดงรายละเอียดการคำนวณค่า Es ของเสาเข็มเจาะในชั้น
ทรายชั้นที่ 2 ของชั้นดินกรุงเทพมหานคร

| No. | p Ton | anchore No. | Io | Es | Rk | Rb | α |
|-----|----------|----------------|-------|------|------|-------|----------|
| 1 | 650 | 4 | 0.050 | 9010 | 1.79 | 0.137 | 0.578 |
| 2 | 1060 | 4 | 0.054 | 8700 | 1.53 | 0.904 | 0.115 |
| 3 | 700 | 4 | 0.048 | 8430 | 1.66 | 0.922 | 0.364 |
| 4 | 500 | 4 | 0.052 | 5370 | 1.56 | 0.906 | 0.354 |
| 5 | 560 | 4 | 0.045 | 7920 | 1.68 | 0.925 | 0.471 |
| 6 | 600 | 4 | 0.048 | 4450 | 1.43 | 0.892 | 0.370 |
| 7 | 450 | 4 | 0.058 | 7700 | 1.45 | 0.894 | 0.346 |
| 8 | 500 | 4 | 0.058 | 3850 | 1.49 | 0.913 | 0.380 |
| 9 | 450 | 4 | 0.043 | 7500 | 1.69 | 0.933 | 0.453 |
| 10 | 600 | 4 | 0.046 | 8100 | 1.67 | 0.925 | 0.365 |
| 11 | 900 | 4 | 0.053 | 9700 | 1.60 | 0.909 | 0.351 |
| 12 | 650 | 4 | 0.050 | 7190 | 1.53 | 0.913 | 0.357 |
| 15 | 300 | 4 | 0.035 | 2290 | 1.41 | 0.911 | 0.389 |
| 17 | 450 | 4 | 0.041 | 6100 | 1.66 | 0.930 | 0.370 |
| 28 | 600 | 4 | 0.046 | 5700 | 1.52 | 0.916 | 0.179 |
| 29 | 550 | 4 | 0.049 | 9000 | 1.67 | 0.918 | 0.437 |
| 30 | 500 | 4 | 0.041 | 3690 | 1.47 | 0.901 | 0.380 |
| 40 | 750 | 4 | 0.039 | 7250 | 1.82 | 0.940 | 0.140 |
| 41 | 700 | 4 | 0.041 | 6090 | 1.65 | 0.930 | 0.370 |
| 42 | 600 | 4 | 0.042 | 5500 | 1.80 | 0.937 | 0.009 |

ตารางที่ 4.9(ต่อ) แสดงรายละเอียดการคำนวณค่า E_s ของเสาเข็มเจาะในชั้น
ทรายชั้นที่ 2 ของชั้นดินกรุงเทพมหานคร

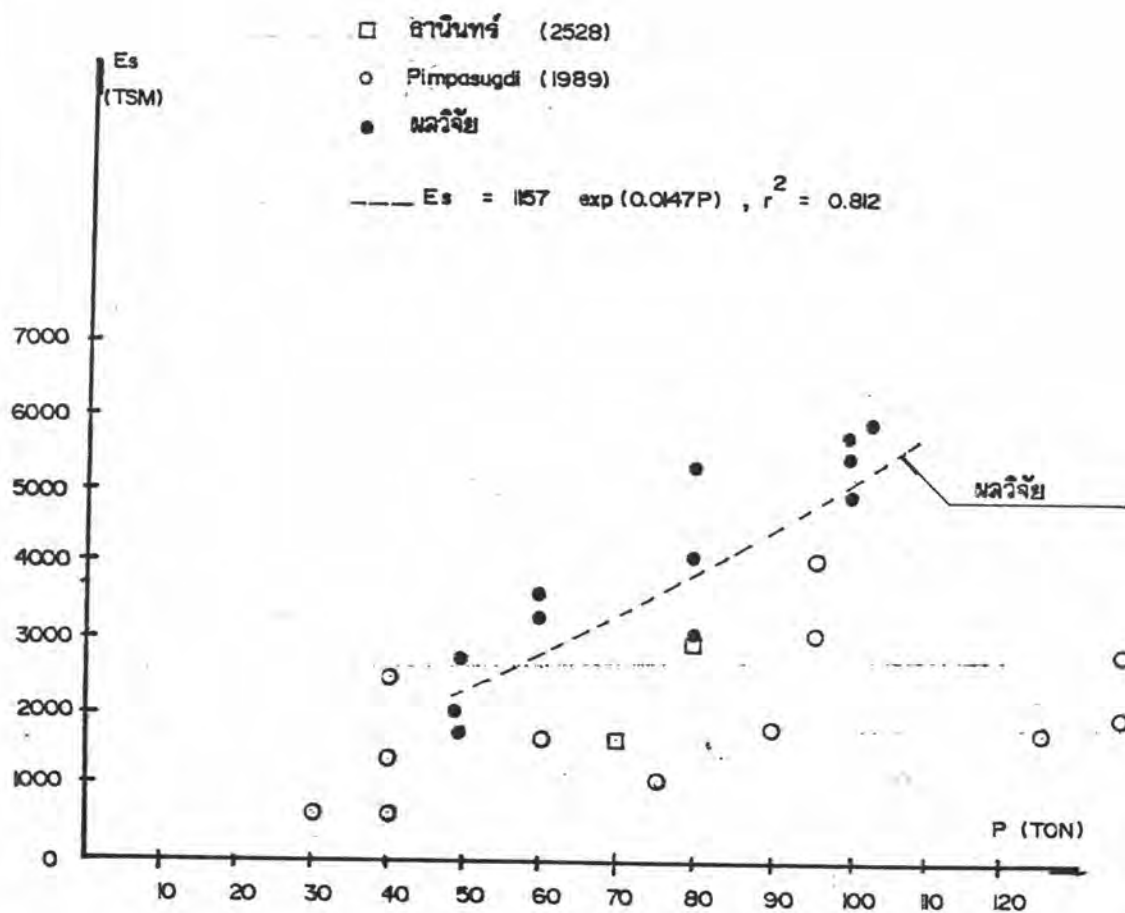
| No. | f_m mm | f_u mm | h m | หมายเหตุ |
|-----|-------------|-------------|--------|----------------------------------------|
| 1 | 0.266 | 0.630 | 45.2 | $f_m = \text{PIoRkRb}(1-\alpha)/E_s d$ |
| 2 | 0.579 | 0.629 | 49.0 | $f_u = \text{PIoRkRb}/E_s d$ |
| 3 | 0.337 | 0.530 | 49.5 | $E_b/E_s = 4.0$ |
| 4 | 0.330 | 0.511 | 45.3 | $E_p = 300,000 \text{ ksc}$ |
| 5 | 0.204 | 0.386 | 54.0 | Rk, Rb และ α เสนอโดย |
| 6 | 0.436 | 0.692 | 41.3 | Poulos & Davis (1980) |
| 7 | 0.252 | 0.385 | 36.5 | h คือ ความลึกของชั้นทราย |
| 8 | 0.252 | 0.406 | 51.0 | ชั้นที่ 2 |
| 9 | 0.233 | 0.426 | - | f_m คือ ค่าการทรุดตัวที่วัด |
| 10 | 0.291 | 0.458 | 45.0 | f_u คือ ค่าการทรุดตัวจริง |
| 11 | 0.313 | 0.482 | - | |
| 12 | 0.352 | 0.547 | 44.5 | |
| 15 | 0.487 | 0.797 | 49.0 | |
| 17 | 0.295 | 0.468 | 21.0 | |
| 28 | 0.467 | 0.569 | - | |
| 29 | 0.223 | 0.396 | - | |
| 30 | 0.466 | 0.752 | 36.8 | |
| 40 | 0.457 | 0.531 | 60.8 | |
| 41 | 0.511 | 0.811 | 49.5 | |
| 42 | 0.538 | 0.543 | 52.0 | |

Modulus รวมของเสาเข็มและดินรอบเสาเข็ม ดังนั้นค่า pile-soil modulus จึงขึ้นกับคุณสมบัติทั้งของเสาเข็มและดินรอบเสาเข็มและขนาดของเสาเข็ม จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า pile - soil modulus กับค่า working load ของเสาเข็มเนื่องจากค่า pile - soil modulus จะมีค่าสูงเมื่อเสาเข็มมีขนาดใหญ่และเมื่อดินเหนียวและดินทรายรอบเสาเข็มมีความแข็ง (stiff) และความหนาแน่นสูงตามลำดับ ในขณะที่ค่า working load ของเสาเข็มก็จะมีค่ามากเช่นกัน เมื่อเสาเข็มมีขนาดใหญ่และดินรอบเสาเข็มมีกำลัง (strength) สูง ดังนั้นค่า working load และ pile - soil modulus จึงมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงไปในทางเดียวกันและมีโอกาสที่มีความสัมพันธ์กันได้ เนื่องจากความยาวของเสาเข็มวิธีการก่อสร้างและขนาดของเสาเข็มต่างกันมาก การวิเคราะห์ความสัมพันธ์จึงแยกออกเป็น 3 กรณีคือ

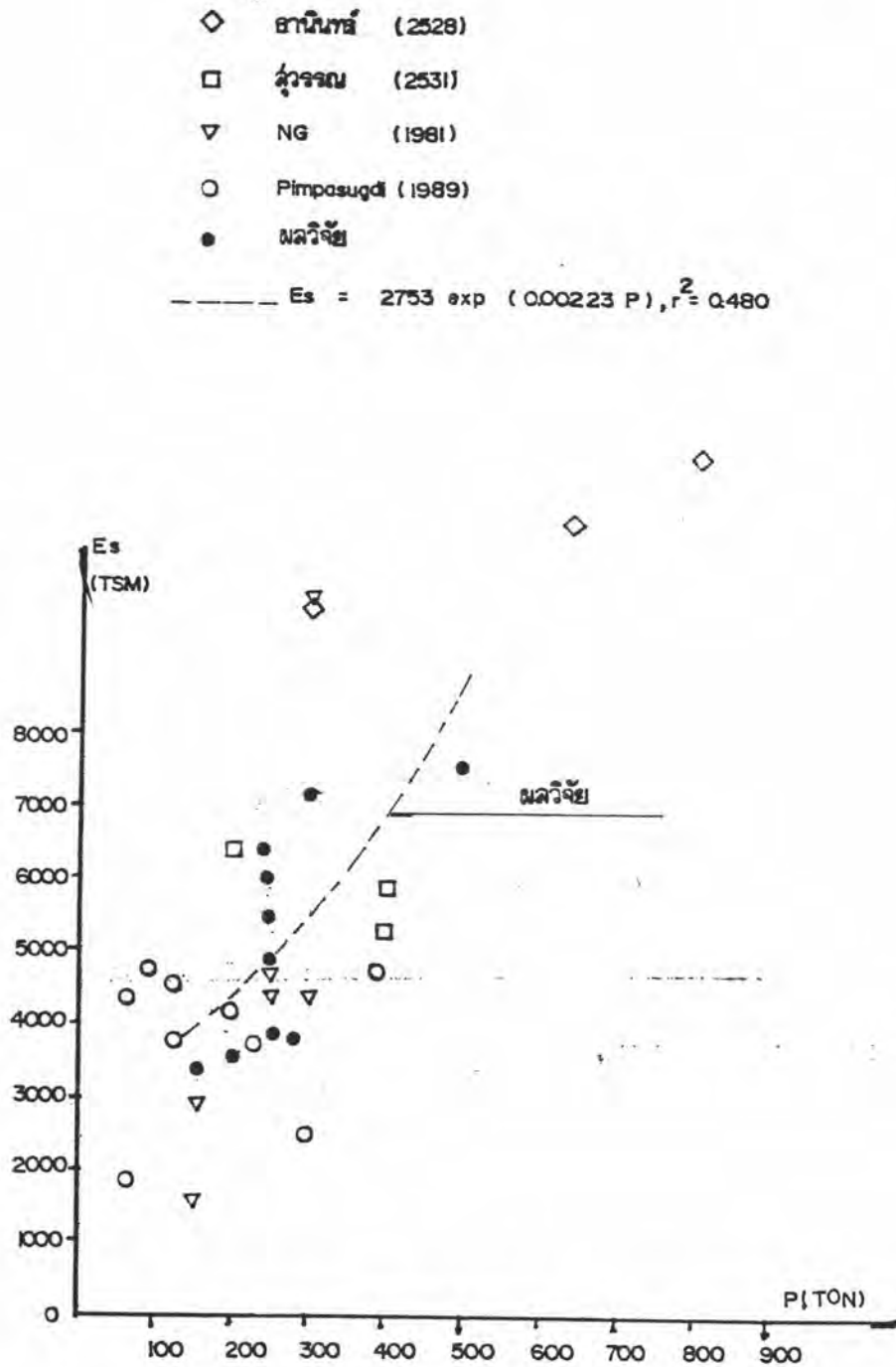
- | | |
|-------------------------------------|---------------|
| i) เสาเข็มตอกในชั้นทรายชั้นที่ 1 | แสดงในรูป 4.7 |
| ii) เสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 1 | แสดงในรูป 4.8 |
| iii) เสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 2 | แสดงในรูป 4.9 |

จากผลการวิเคราะห์โดยอาศัยทฤษฎี exponential regression กับข้อมูลที่ได้จากตาราง 4.7, 4.8 และ 4.9 ได้ดังนี้

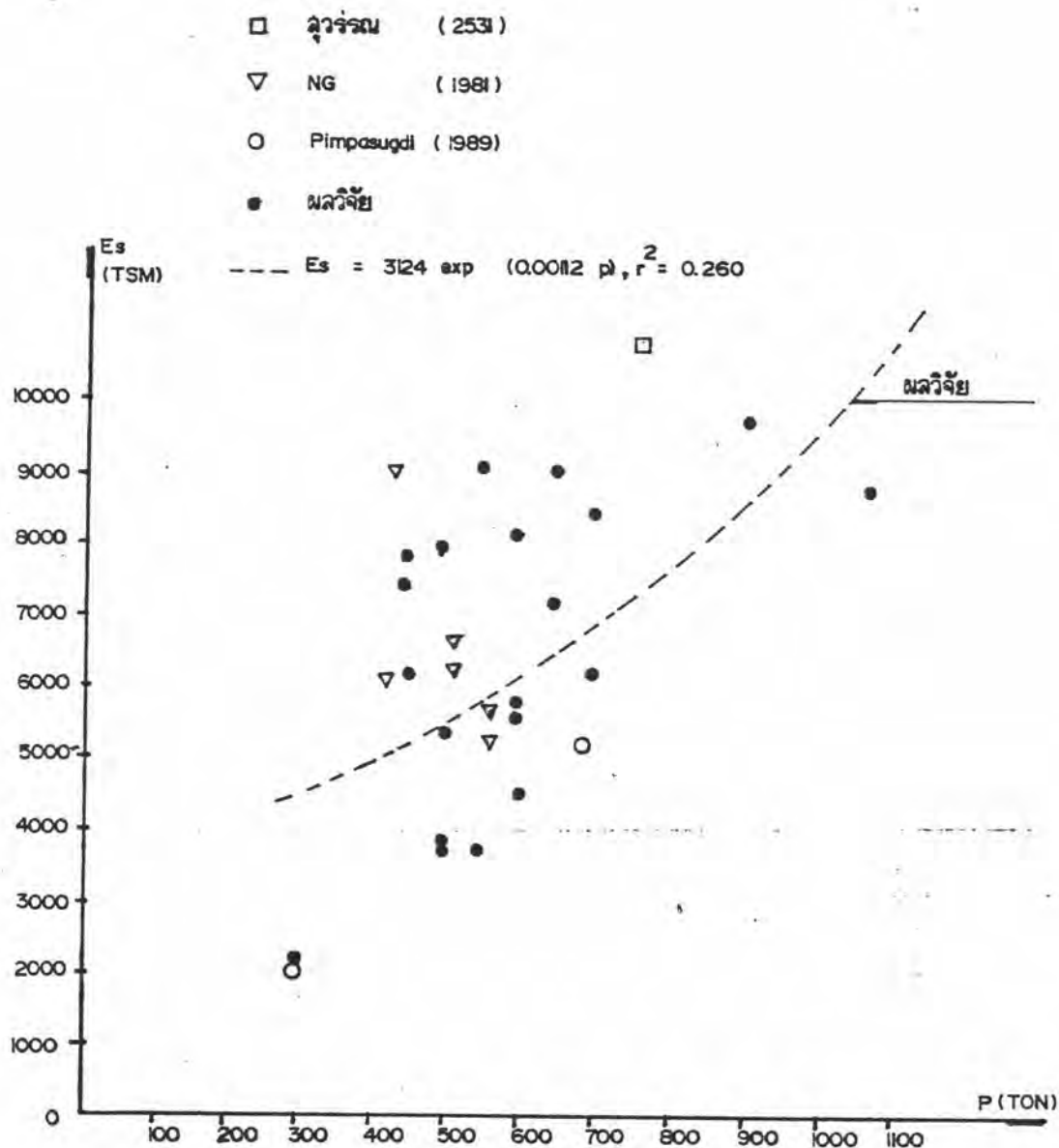
- | |
|-----------------------------------------------------------------------|
| i) $E_s = 1157 \exp(0.0147P)$ (เมื่อ $50 < P < 120$ ตัน)...(4.5) |
| ii) $E_s = 2753 \exp(0.00223P)$ (เมื่อ $150 < P < 500$ ตัน)...(4.6) |
| iii) $E_s = 3124 \exp(0.00112P)$ (เมื่อ $300 < P < 1060$ ตัน)...(4.7) |



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกที่ใช้กับค่า pile - soil modulus ของเสาเข็มตอกในชั้นทรายชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพมหานคร



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกใช้งานกับค่า pile - soil modulus ของเสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นแรก ของชั้นดินกรุงเทพมหานคร



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pile - soil modulus กับค่า working load ของเสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 2 ของชั้นดินกรุงเทพมหานคร

เมื่อ E_s คือ pile - soil modulus (TSM)

P คือ working load (ton)

เมื่อรวมข้อมูลของ NG(1981) ธานีินทร์ (2528) , สุวรรณ (2531) และ Pimpasugdi(1989) (รูปที่ 4.7 ถึง 4.9) จะเห็นว่าค่า E_s/p จะลดลงเล็กน้อยและข้อมูลยังคงกระจายอยู่ในพิสัยที่ควรจะเป็นซึ่งค่อนข้างมากเพราะค่า E_s ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการรวมทั้ง พิกัดความปลอดภัยที่ใช้ในการหาค่า P

จากผลการวิเคราะห์หาค่า E_s สำหรับเสาเข็มทั้ง 3 กรณีในอดีตที่ผ่านมา โดย NG(1981) และ Pimpasugdi(1989) ประกอบกับผลการวิจัยในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.7 ถึง 4.10 แสดงให้เห็นว่าสำหรับเสาเข็มตอกในทรายชั้นแรกซึ่งมีค่าน้ำหนักบรรทุกใช้งานตั้งแต่ 30 ถึง 120 ตัน จะมีค่า E_s ตั้งแต่ 550 ถึง 5810 ตันต่อตารางเมตร ส่วนเสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 1 ซึ่งมีค่าน้ำหนักบรรทุกใช้งาน 65 ถึง 385 ตัน จะมีค่า E_s ตั้งแต่ 1490 ถึง 11400 ตันต่อตารางเมตร และเสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 2 ซึ่งมีค่าน้ำหนักบรรทุกใช้งาน 300 ถึง 1060 ตัน จะมีค่า E_s ตั้งแต่ 2120 ถึง 10900 ตันต่อตารางเมตร โดย upper bound และ lower bound แสดงดังในรูป 4.10 รูป 4.10 แสดงให้เห็นว่าสำหรับเสาเข็มในชั้นทรายชั้นที่ 1 ค่า E_s/p ของเสาเข็มตอกจะมีค่าสูงกว่า E_s/p ของเสาเข็มเจาะซึ่งอาจมีสาเหตุเนื่องจากความหนาแน่นของดินรอบเสาเข็มตอกจะมีความหนาแน่นมากกว่าดินรอบเสาเข็มเจาะอันเนื่องจากผลของการก่อสร้างเสาเข็มโดยวิธีการตอก ในขณะที่เดียวกันค่า E_s/p ของเสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 1 จะมีค่าสูงกว่าค่า E_s/p ของเสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 2 ซึ่งมีสาเหตุจากการที่ค่า D/L (เส้นผ่าศูนย์กลางต่อความยาว) มีค่ามากกว่านั่นเอง

4.3.4 เงื่อนไขและขอบเขตของการเอาค่า E_s ไปใช้ในการคำนวณค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม

ตารางที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกใช้งาน P กับค่า pile - soil modulus Es ของเสาเข็มที่ก่อสร้างใน กรุงเทพมหานคร

| ผู้วิจัย | | ขนาดเสาเข็ม (ม * ม) | P ton | Es TSM |
|---------------------------------|------|------------------------|----------|-----------|
| เสาเข็มตอกใน ชั้นทรายชั้นแรก | | | | |
| พานินทร์ (2528) | | I 0.400*29.0 | 80 | 2900 |
| | | I 0.400*25.5 | 70 | 1600 |
| Pimpasugdi (1989) | DP12 | SS 0.450*21.5 | 95 | 2950 |
| | DP13 | SS 0.450*21.5 | 95 | 3950 |
| | DP14 | HC 0.500*30.0 | 125 | 1690 |
| | DP15 | HC 0.500*25.0 | 40 | 1310 |
| | DP16 | SS 0.400*23.5 | 90 | 1660 |
| | DP17 | SS 0.300*23.5 | 60 | 1620 |
| | DP18 | I 0.300*22.0 | 30 | 900 |
| | DP19 | SS 0.450*28.0 | 135 | 2735 |
| | DP20 | SS 0.450*28.0 | 135 | 1900 |
| | DP21 | SS 0.350*21.0 | 40 | 2315 |
| | DP22 | I 0.400*25.4 | 75 | 1080 |
| | DP23 | I 0.350*24.5 | 60 | 1110 |
| | DP24 | I 0.300*24.5 | 40 | 550 |
| | DP25 | I 0.260*24.5 | 30 | 550 |

ตารางที่ 4.10(ต่อ) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกใช้งาน P กับค่า pile - soil modulus E_s ของเสาเข็มที่ก่อสร้างใน กรุงเทพมหานคร

| ผู้วิจัย | | ขนาดเสาเข็ม (ม * ม) | P ton | E_s TSM |
|----------------------------------|--------|------------------------|----------|--------------|
| ผลวิจัย | No. 16 | 0.525*28.3 | 120 | 5810 |
| | No. 26 | I 0.350*24.0 | 50 | 2000 |
| | No. 27 | I 0.350*24.0 | 50 | 1830 |
| | No. 31 | 0.400*24.0 | 60 | 3500 |
| | No. 32 | 0.400*24.0 | 60 | 3420 |
| | No. 33 | 0.525*22.0 | 80 | 3000 |
| | No. 34 | 0.400*22.0 | 60 | 2750 |
| | No. 35 | 0.350*22.0 | 50 | 2750 |
| | No. 36 | 0.525*24.0 | 80 | 4130 |
| | No. 37 | 0.525*27.0 | 100 | 5530 |
| | No. 38 | 0.525*27.0 | 100 | 5010 |
| | No. 39 | 0.525*27.0 | 100 | 5700 |
| เสาเข็มเจาะใน ชั้นทรายชั้นแรก | | ขนาดเสาเข็ม (ม * ม) | P ton | E_s TSM |
| ชานินทร์ (2528) | | 0.8*2.2*30 | 635 | 10500 |
| | | φ 1.500*32.0 | 800 | 11400 |
| | | φ 1.000*32.0 | 300 | 9360 |

ตารางที่ 4.10(ต่อ) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกใช้งาน P กับค่า pile - soil modulus E_s ของเสาเข็มที่ก่อสร้างใน กรุงเทพมหานคร

| ผู้วิจัย | | ขนาดเสาเข็ม (ม * ม) | P ton | E_s TSM |
|----------------------|------|------------------------|----------|--------------|
| สุวรรณ | | ♦ 1.200*38.0 | 400 | 5100 |
| | | ♦ 1.100*38.0 | 400 | 5700 |
| | | ♦ 1.000*32.8 | 203 | 6300 |
| NG(1981) | B1 | ♦ 1.000*23.0 | 250 | 4200 |
| | B2 | ♦ 0.750*24.5 | 150 | 1490 |
| | B8 | ♦ 1.200*24.5 | 300 | 4240 |
| | B9 | ♦ 1.200*25.5 | 300 | 9470 |
| | B11 | ♦ 1.000*33.0 | 250 | 4520 |
| | B12 | ♦ 0.800*34.5 | 150 | 2770 |
| Pimpasugdi (1989) | B12 | ♦ 0.600*26.5 | 125 | 3065 |
| | B13 | ♦ 0.600*26.5 | 125 | 4350 |
| | B14 | ♦ 0.800.34.0 | 385 | 4520 |
| | B15 | ♦ 0.700*32.6 | 227 | 3620 |
| | BP17 | ♦ 0.500*23.5 | 65 | 1760 |
| | BP18 | ♦ 0.800*35.0 | 200 | 4170 |
| | BP19 | ♦ 0.600*21.0 | 65 | 4130 |
| | BP20 | ♦ 0.600*26.0 | 90 | 4550 |

ตารางที่ 4.10(ต่อ) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกใช้งาน P กับค่า pile - soil modulus E_s ของเสาเข็มที่ก่อสร้างใน กรุงเทพมหานคร

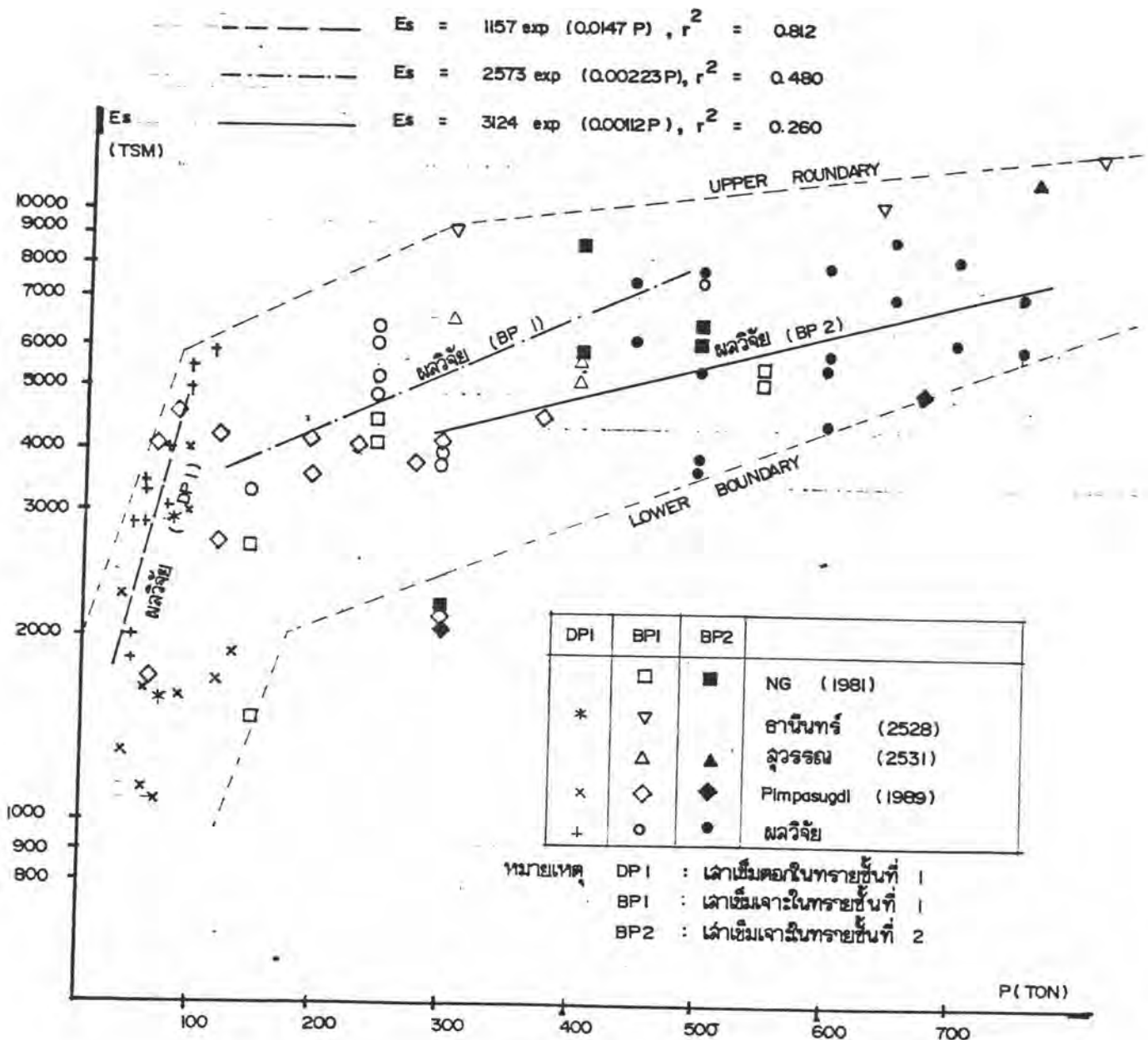
| ผู้วิจัย | | ขนาดเสาเข็ม (ม * ม) | P ton | E_s TSM |
|------------------------------------|--------|------------------------|------------|--------------|
| | BP22 | ♠ 1.000*30.5 | 300 | 2260 |
| ผลวิจัย | No. 13 | ♠ 0.800*32.0 | 250 | 6310 |
| | No. 14 | ♠ 1.200*32.0 | 500 | 7590 |
| | No. 18 | ♠ 0.800*35.0 | 200 | 3600 |
| | No. 19 | ♠ 0.800*30.0 | 250 | 5410 |
| | No. 20 | ♠ 0.800*30.0 | 250 | 6100 |
| | No. 21 | ♠ 0.800*34.0 | 285 | 3850 |
| | No. 22 | ♠ 1.200*24.5 | 300 | 3930 |
| | No. 23 | ♠ 1.200*25.5 | 300 | 7100 |
| | No. 24 | ♠ 1.000*33.0 | 250 | 4820 |
| | No. 25 | ♠ 0.800*34.5 | 150 | 3400 |
| เสาเข็มเจาะใน ชั้นทรายชั้นที่ 2 | | ขนาดเสาเข็ม (ม * ม) | P (ton) | E_s TSM |
| สุวรรณ(2531) | | ♠ 1.500*51.7 | 750 | 10900 |
| NG(1981) | BP1 | ♠ 1.500*45.0 | 410 | 8890 |

ตารางที่ 4.10(ต่อ) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกใช้งาน P กับค่า pile - soil modulus E_s ของเสาเข็มที่ก่อสร้างใน กรุงเทพมหานคร

| ผู้วิจัย | | ขนาดเสาเข็ม (ม * ม) | P ton | E_s TSM |
|--------------------|--------|------------------------|----------|--------------|
| | BP2 | ♠ 1.500*45.0 | 410 | 5910 |
| | BP 3 | ♠ 1.500*45.0 | 500 | 6520 |
| | BP 6 | ♠ 1.500*45.0 | 500 | 6080 |
| | BP 9 | ♠ 1.500*49.0 | 550 | 5490 |
| | BP11 | ♠ 1.500*49.0 | 550 | 5130 |
| Pimpasugdi(1989) | BP16 | ♠ 0.800*51.4 | 300 | 2120 |
| | BP21 | ♠ 1.200*48.7 | 675 | 5030 |
| ผลวิจัย | No. 1 | ♠ 1.200*49.0 | 650 | 9010 |
| | No. 2 | ♠ 1.500*56.0 | 1060 | 8700 |
| | No. 3 | ♠ 1.200*53.0 | 700 | 8430 |
| | No. 4 | ♠ 1.200*46.2 | 500 | 5370 |
| | No. 5 | ♠ 1.200*56.0 | 500 | 7920 |
| | No. 6 | ♠ 1.200*53.0 | 600 | 4450 |
| | No. 7 | ♠ 1.200*42.0 | 450 | 7700 |
| | No. 8 | ♠ 1.000*53.0 | 500 | 3850 |
| | No. 9 | ♠ 1.000*49.0 | 450 | 7500 |
| | No. 10 | ♠ 1.200*55.0 | 600 | 8100 |

ตารางที่ 4.10(ต่อ) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกใช้งาน P กับค่า pile - soil modulus E_s ของเสาเข็มที่ก่อสร้างใน กรุงเทพมหานคร

| ผู้วิจัย | | ขนาดเสาเข็ม (ม * ม) | P ton | E_s TSM |
|----------|--------|------------------------|----------|--------------|
| | No. 11 | φ 1.500*57.0 | 900 | 9700 |
| | No. 12 | φ 1.200*48.6 | 650 | 7190 |
| | No. 15 | φ 0.800*51.4 | 300 | 2290 |
| | No. 17 | φ 1.000*53.0 | 450 | 6100 |
| | No. 28 | φ 1.200*55.0 | 600 | 5700 |
| | No. 29 | φ 1.200*52.0 | 550 | 9000 |
| | No. 30 | φ 1.000*53.4 | 500 | 3690 |
| | No. 40 | φ 1.200*67.9 | 750 | 7250 |
| | No. 41 | φ 1.000*52.0 | 700 | 6090 |
| | No. 42 | φ 1.200*60.0 | 600 | 5500 |



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกใช้งานกับค่า pile - soil modulus ของเสาเข็มที่มีการก่อสร้างในกรุงเทพมหานคร

เงื่อนไขและขอบเขตของการคำนวณค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม โดยอาศัยความสัมพันธ์ 4.5, 4.6 และ 4.7 มีดังนี้

- ความสัมพันธ์ 4.5, 4.6 และ 4.7 ใช้หาค่า pile - soil modulus สำหรับเสาเข็มที่ระดับปลายเสาเข็มอยู่ที่ระดับชั้นทรายชั้นที่ 1 และ 2 ของชั้นดินในกรุงเทพมหานครโดยมีสมมุติฐานว่าค่า Young Modulus ของทรายที่ปลายเสาเข็มมีค่า 4 เท่าของค่า Young Modulus เฉลี่ยของดินชั้นบนตลอดความยาวของเสาเข็ม (E_s)

- ค่าการทรุดตัวที่กล่าวถึงนี้เป็นค่าการทรุดตัวแบบอีลาสติก ซึ่งวิธีการคำนวณถูกเสนอโดย Poulos & Davis (1980) โดยวิธีการคำนวณ แสดงตามหัวข้อ 4.3.1

- ค่าการทรุดตัวที่ได้จากการคำนวณนี้เป็นค่าการทรุดตัวของเสาเข็มเดี่ยว ดังนั้นในกรณีที่เสาเข็มมีมากกว่า 1 ต้นแล้ว ค่าการทรุดตัวจะมีมากขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของเสาเข็มข้างเคียง

- ค่าน้ำหนักบรรทุกที่ใช้งานในที่นี้จะมีค่าโดยประมาณ 0.4 ถึง 0.5 เท่า ของน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิกฤติของมวลดิน

4.4 การคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตามวิธีสถิตยศาสตร์โดยอาศัยความสัมพันธ์แบบ empirical ระหว่าง N_q กับ ค่า(SPT) สำหรับเสาเข็มเจาะที่จมในชั้นทรายชั้นที่ 2 ของชั้นดินกรุงเทพมหานคร

ในหัวข้อนี้การวิจัยจะเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มจากการทดสอบกับค่าที่ได้จากการคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยอาศัยความสัมพันธ์ตามหัวข้อ 4.2.2 (เพื่อหาค่า N_q จากค่าการทดสอบการทะลุทะลวง

มาตรฐาน N(SPT) ตามสมการ 4.2 และ 4.3) และจากข้อมูลดินพร้อมทั้งวิธีการในการหาแรงเสียดทานของชั้นดินอื่นๆของผู้วิจัยในอดีต (สุวรรณ, 2531)

ภาคผนวก ง. (iii) แสดงตัวอย่างรายการคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มโดยใช้ความสัมพันธ์ตามหัวข้อ 4.2.2 (สมการ 4.2 และ 4.3) โดยผลการคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มได้สรุปไว้ในตาราง 4.11ก และ 4.11ข

การเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบ P_{mea} กับค่าที่ได้จากการคาดคะเน P_{pred} ดังแสดงในรูป 4.11และ 4.12 ได้ผลดังนี้

$$i) P_{pred} = 0.992 P_{mea} \text{ สำหรับความสัมพันธ์ (4.2)}$$

$$ii) P_{pred} = 0.985 P_{mea} \text{ สำหรับความสัมพันธ์ (4.3)}$$

โดยในกรณี i) และ ii) มีความคลาดเคลื่อนโดยประมาณ $\pm 7\%$ และ $\pm 10\%$ ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าการคาดคะเนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

4.5 การคาดคะเนค่าการทรุดตัวแบบอัสติกโดยอาศัยความสัมพันธ์แบบ empirical ระหว่างค่า pile - soil modulus (E_s) กับค่าน้ำหนักบรรทุกใช้งาน P

หัวข้อนี้จะแสดงวิธีการคาดคะเนค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม ($P_{predicted}$) โดยอาศัยความสัมพันธ์ตามหัวข้อ 4.3.2 (สมการ 4.3 ถึง 4.7) เพื่อหาค่า E_s แล้วจึงนำค่า E_s ดังกล่าวไปคำนวณเพื่อหาค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม ดังแสดงในภาคผนวก ง. (iv)

ตารางที่ 4.11(ก) แสดงรายการคำนวณค่าน้ำหนักบรรทุก วิกฤติ ของเสาเข็มเจาะใน
ชั้นทรายชั้นที่ 2 ของชั้นดินกรุงเทพมหานคร โดยอาศัยความสัมพันธ์
 $N_u = 5.14 \exp(0.00563N_b)$

| pile No. | N _b (SPT) | N _q | 6/√b _b TSM | A _b (ม ²) | P _b (ton) | P _s (ton) | P _{pred} (ton) | P _{mea} (ton) |
|-------------|-------------------------|----------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 1 | 57.7 | 7.11 | 62.6 | 1.13 | 503 | 945 | 1448 | 1540 |
| 2 | 25.0 | 5.92 | 68.9 | 1.77 | 722 | 1328 | 2050 | 2180 |
| 3 | 70.5 | 7.64 | 66.2 | 1.13 | 573 | 963 | 1536 | 1520 |
| 4 | 104.6 | 9.26 | 60.1 | 1.13 | 629 | 872 | 1501 | 1530 |
| 5 | 109.9 | 9.54 | 68.9 | 1.13 | 743 | 1025 | 1768 | 1820 |
| 6 | 80.8 | 8.10 | 66.2 | 1.13 | 606 | 1035 | 1641 | 1630 |
| 7 | 47.7 | 6.72 | 56.3 | 1.13 | 428 | 708 | 1136 | 1100 |
| 10 | 63.3 | 7.34 | 68.0 | 1.13 | 564 | 1138 | 1702 | 1620 |
| 12 | 62.8 | 7.32 | 62.2 | 1.13 | 514 | 875 | 1389 | 1480 |
| 15 | 69.1 | 7.58 | 64.8 | 0.50 | 245 | 670 | 915 | 880 |
| 17 | 64.3 | 7.38 | 66.2 | 0.79 | 386 | 872 | 1258 | 1190 |
| 30 | 51.0 | 6.85 | 66.6 | 0.79 | 360 | 1015 | 1375 | 1380 |
| 40 | 103.1 | 9.18 | 79.0 | 1.13 | 819 | 1017 | 1836 | 1940 |
| 42 | 85.4 | 8.31 | 72.6 | 1.13 | 667 | 996 | 1663 | 1630 |

หมายเหตุ P = P_s - W_p + U

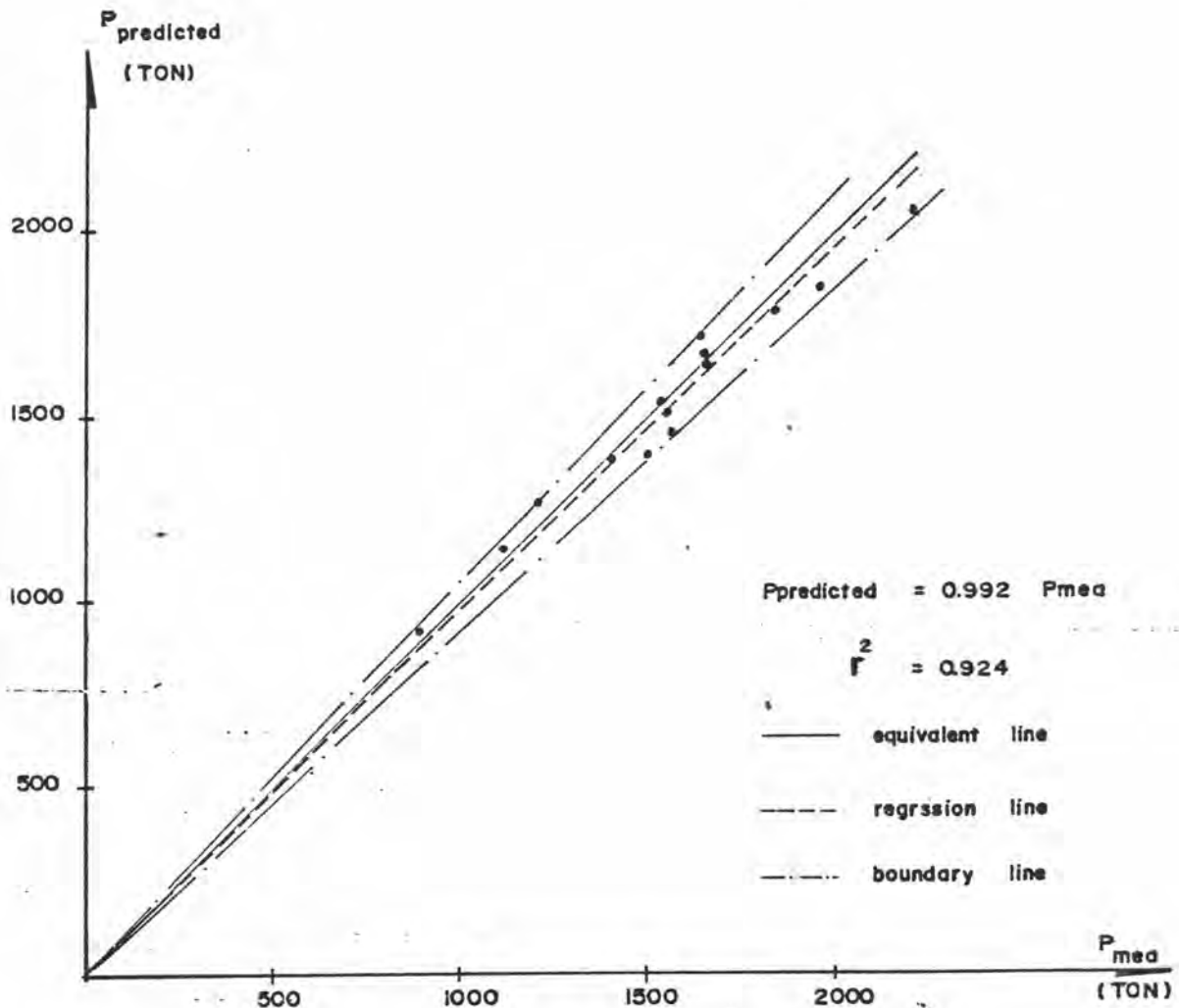
P_{pred} = P_b + P

ตารางที่ 4.11(ข) แสดงรายการคำนวณค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มเจาะใน
ชั้นทรายชั้นที่ 2 ของชั้นดินกรุงเทพมหานคร โดยอาศัยความสัมพันธ์
 $N_q = 5.25 \exp(0.0130N'_b)$ เมื่อ N'_b คือ ค่า SPT ที่ปรับ
แก้โดย C_n ตามที่เสนอโดย (Peck, Hansen & Thornburn,
(1974)) ดังแสดงในรูป 2.10

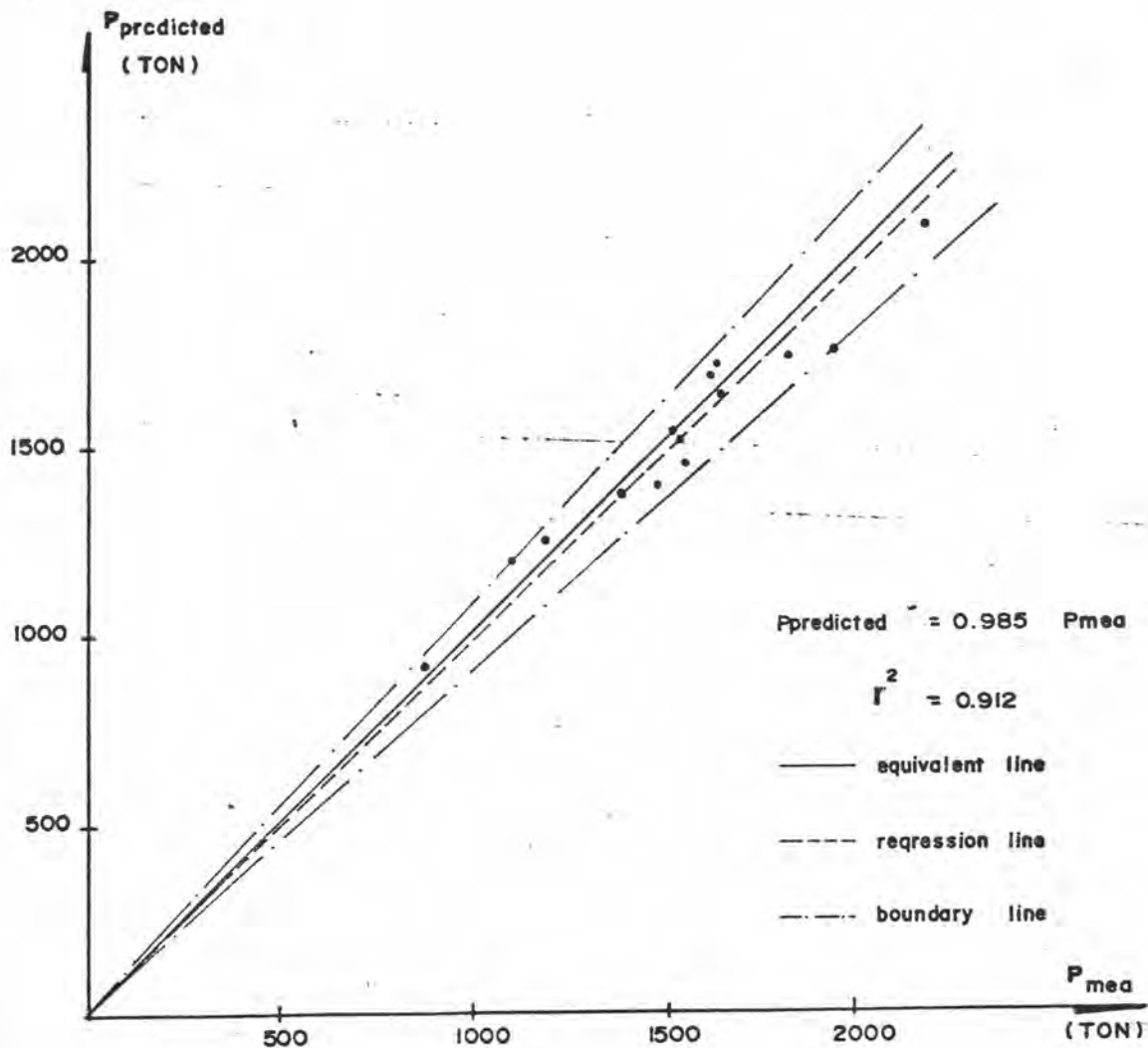
| pile No. | N'_b (SPT) | N_q | $6'_{vb}$ TSM | A_b (m^2) | P_b (ton) | P_s (ton) | P_{pred} (ton) | P_{mea} (ton) |
|-------------|-----------------|-------|------------------|--------------------|----------------|----------------|---------------------|--------------------|
| 1 | 28.3 | 7.15 | 62.6 | 1.13 | 506 | 945 | 1451 | 1540 |
| 2 | 12.4 | 6.17 | 68.9 | 1.77 | 752 | 1328 | 2080 | 2180 |
| 3 | 27.8 | 7.54 | 66.2 | 1.13 | 564 | 963 | 1527 | 1520 |
| 4 | 44.6 | 9.37 | 60.1 | 1.13 | 637 | 872 | 1509 | 1530 |
| 5 | 41.9 | 9.05 | 68.9 | 1.13 | 705 | 1025 | 1730 | 1820 |
| 6 | 41.3 | 8.98 | 66.2 | 1.13 | 672 | 1035 | 1707 | 1630 |
| 7 | 27.8 | 7.54 | 56.3 | 1.13 | 479 | 708 | 1187 | 1100 |
| 10 | 24.4 | 7.21 | 68.0 | 1.13 | 554 | 1138 | 1692 | 1620 |
| 12 | 26.1 | 7.37 | 62.2 | 1.13 | 518 | 875 | 1393 | 1480 |
| 15 | 27.7 | 7.53 | 64.8 | 0.50 | 244 | 670 | 914 | 880 |
| 17 | 25.4 | 7.30 | 66.2 | 0.79 | 382 | 872 | 1254 | 1190 |
| 30 | 20.0 | 6.81 | 66.6 | 0.79 | 358 | 1015 | 1373 | 1380 |
| 40 | 34.6 | 8.23 | 79.0 | 1.13 | 735 | 1017 | 1752 | 1940 |
| 42 | 31.0 | 7.86 | 72.6 | 1.13 | 644 | 996 | 1640 | 1630 |

หมายเหตุ $P = P_s - W_p + U$

$P_{pred} = P_b + P$



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติที่วัดได้จากการทดสอบ (P_{med}) กับค่าที่ได้จากการคำนวณ (P_{pre}) โดยอาศัยความสัมพันธ์ $N_q = 5.14 \exp(0.00563 N)$ เมื่อ N เป็นค่าการทดสอบทะลุทะลวงมาตรฐานที่ยังไม่ได้ปรับแก้ที่ระดับปลายเสาเข็มเจาะของชั้นทรายชั้นที่ 2 ของชั้นดินกรุงเทพมหานคร



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤติที่วัดได้จากการทดสอบ (P_{mea}) กับค่าที่ได้จากการทดสอบ (P_{mea}) โดยอาศัยความสัมพันธ์ $N_q = 5.25 \exp(0.013 N')$ เมื่อ N' เป็นค่าการทดสอบทะลุทะลวงมาตรฐานที่ปรับแก้โดยค่า C_n ตามรูป 2.10 ที่ระดับปลายเสาเข็มเจาะของชั้นทรายชั้นที่ 2 ของชั้นดินกรุงเทพมหานคร

การสรุปผลการวิเคราะห์หาคาดคะเนการทรุดตัวของเสาเข็มได้แสดงในตาราง 4.12, 4.13 และ 4.14 สำหรับเสาเข็มตอกในชั้นทรายชั้นที่ 1, เสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 1 และเสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.13, 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ

การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของเสาเข็มระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบ P_{mea} กับค่าที่ได้จากการคาดคะเน $P_{predicted}$ โดยอาศัยความสัมพันธ์ตามหัวข้อ 4.3.2 ได้ผลดังนี้

- | | | |
|-------|------------------------------------|----------------------------------------|
| (i) | $P_{predicted} = 0.98 P_{measure}$ | กรณีเสาเข็มตอก ในชั้นทรายชั้นที่ 1 |
| (ii) | $P_{predicted} = 0.97 P_{measure}$ | กรณีเสาเข็มเจาะ ในชั้นทรายชั้นที่ 1 |
| (iii) | $P_{predicted} = 1.02 P_{measure}$ | กรณีเสาเข็มเจาะ ในชั้นทรายชั้นที่ 2 |

โดยมีความแปรผันโดยประมาณ $\pm 17\%$, $\pm 21\%$ และ $\pm 25\%$ สำหรับกรณี (i), (ii) และ (iii) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าการทรุดตัวที่ได้จากการคาดคะเน f_{pred} โดยอาศัยความสัมพันธ์ 4.3 กับค่าการทรุดตัวที่วัดได้ สำหรับเสาเข็มตอกในชั้นทรายชั้นที่ 1

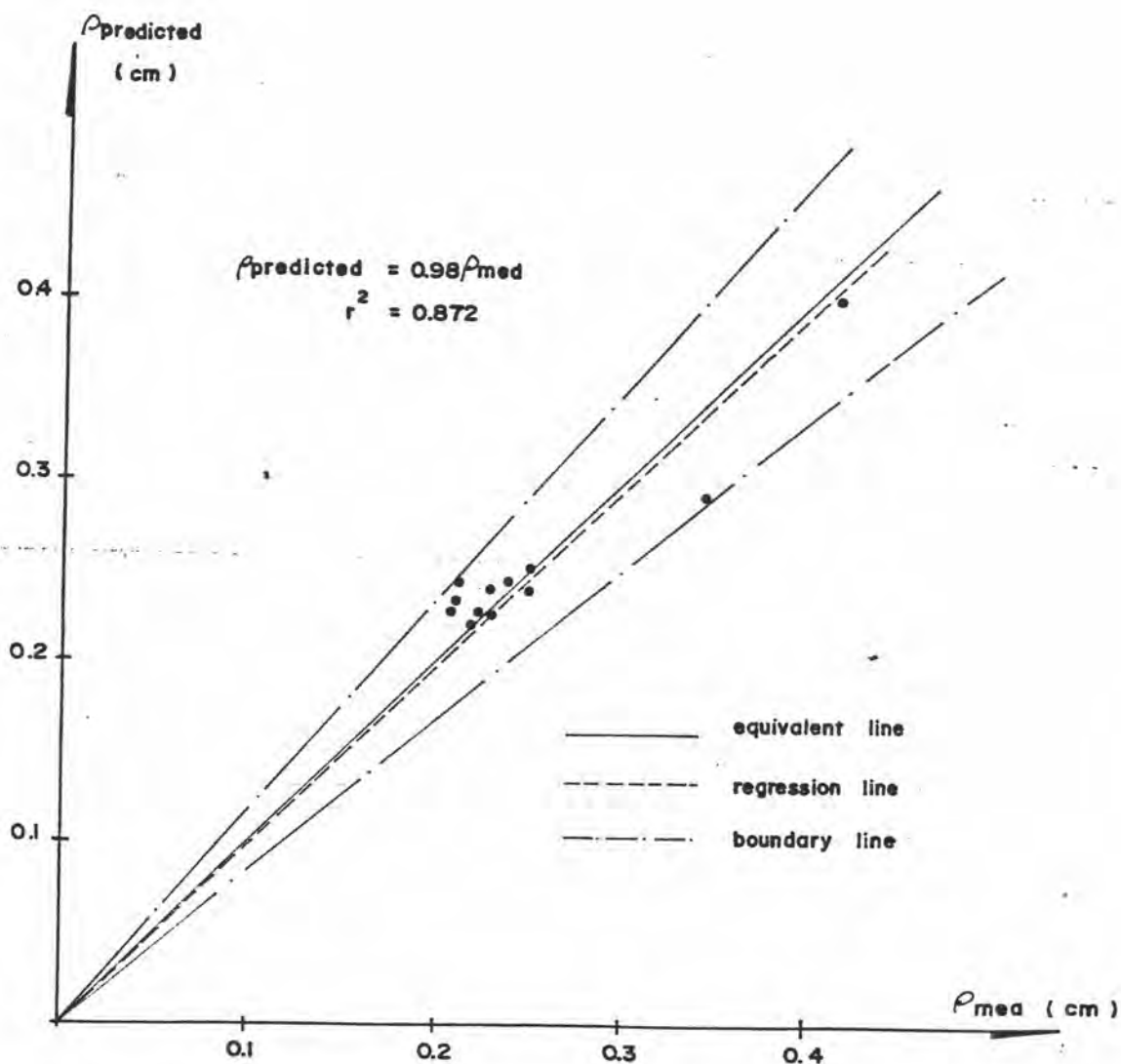
| pile No. | ขนาดของเสาเข็ม | P (ton) | Es (TSM) | f_{pred} (cm) | f_{mea} (cm) |
|----------|----------------|---------|----------|-----------------|----------------|
| 16 | 0.525*28.3 | 120 | 6752 | 0.401 | 0.419 |
| 26 | I 0.350*24.0 | 50 | 2413 | 0.220 | 0.231 |
| 27 | I 0.350*24.0 | 50 | 2413 | 0.220 | 0.246 |
| 31 | 0.400*24.0 | 60 | 2795 | 0.249 | 0.217 |
| 32 | 0.400*24.0 | 60 | 2795 | 0.249 | 0.221 |
| 33 | 0.525*22.0 | 80 | 3750 | 0.296 | 0.345 |
| 34 | 0.400*22.0 | 60 | 2795 | 0.256 | 0.256 |
| 35 | 0.350*22.0 | 50 | 2413 | 0.229 | 0.211 |
| 36 | 0.525*24.0 | 80 | 3750 | 0.230 | 0.218 |
| 37 | 0.525*27.0 | 100 | 5032 | 0.226 | 0.221 |
| 38 | 0.525*27.0 | 100 | 5032 | 0.226 | 0.234 |
| 39 | 0.525*27.0 | 100 | 5032 | 0.226 | 0.217 |

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าการทรุดตัวที่ได้จากการคาดคะเน f_{pred} โดยอาศัยความสัมพันธ์ 4.4 กับค่าการทรุดตัวที่วัดได้ สำหรับเสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 1

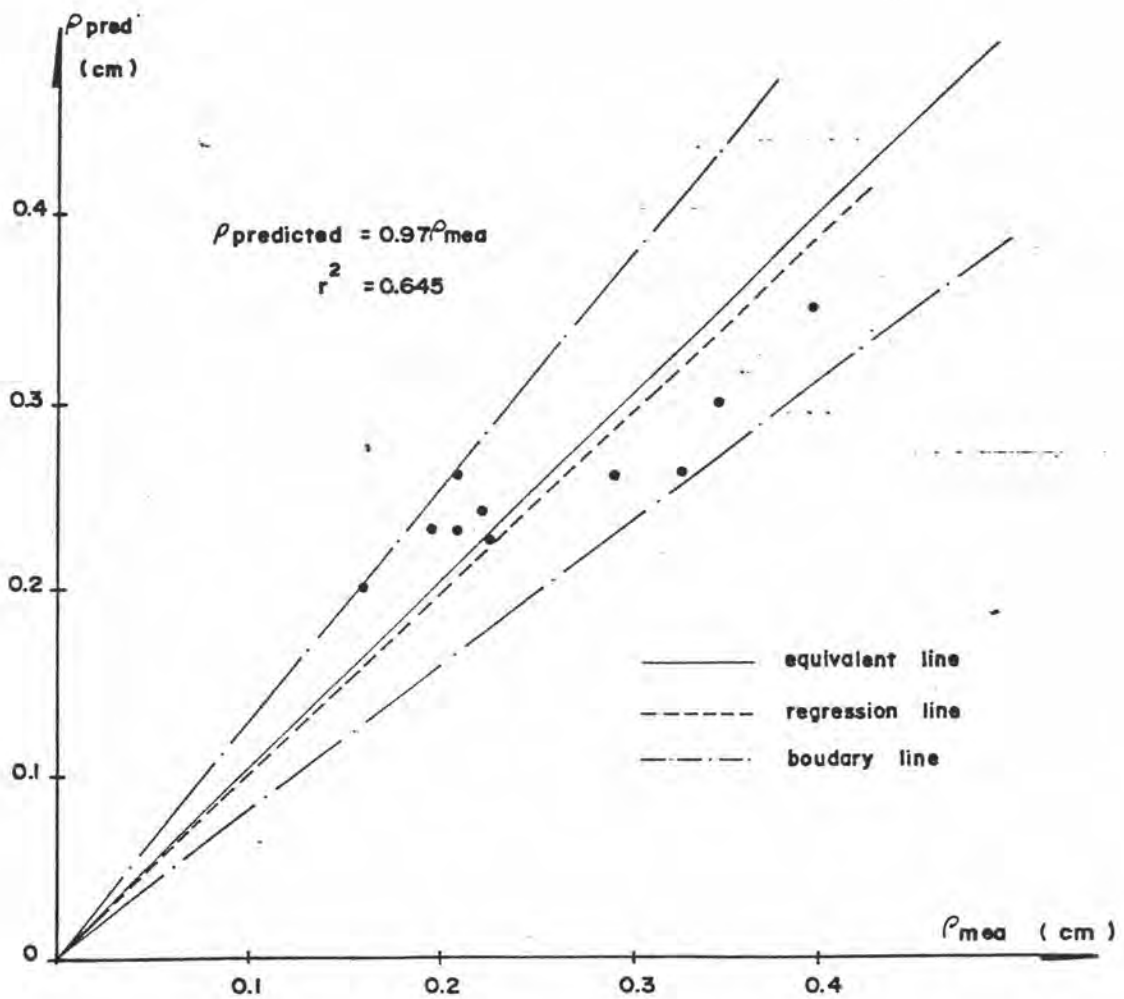
| pile No. | ขนาดของเสาเข็ม | P (ton) | Es (TSM) | f_{pred} (cm) | f_{mea} (cm) |
|----------|----------------|---------|----------|-----------------|----------------|
| 13 | φ 0.800*32.0 | 250 | 4810 | 0.260 | 0.218 |
| 14 | φ 1.200*32.0 | 500 | 8400 | 0.260 | 0.296 |
| 18 | φ 0.800*35.0 | 200 | 4300 | 0.354 | 0.402 |
| 19 | φ 0.800*30.0 | 250 | 4810 | 0.231 | 0.214 |
| 20 | φ 0.800*30.0 | 250 | 4810 | 0.231 | 0.200 |
| 21 | φ 0.800*34.0 | 285 | 5200 | 0.280 | 0.350 |
| 22 | φ 1.200*24.5 | 300 | 5370 | 0.263 | 0.335 |
| 23 | φ 1.200*25.5 | 300 | 5370 | 0.201 | 0.160 |
| 24 | φ 1.000*33.0 | 250 | 4810 | 0.224 | 0.230 |
| 25 | φ 0.800*34.5 | 150 | 3847 | 0.240 | 0.224 |

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าการทรุดตัวที่ได้จากการคาดคะเน p_{pred} โดยอาศัยความสัมพันธ์ 4.5 กับค่าการทรุดตัวที่วัดได้ สำหรับเสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 2

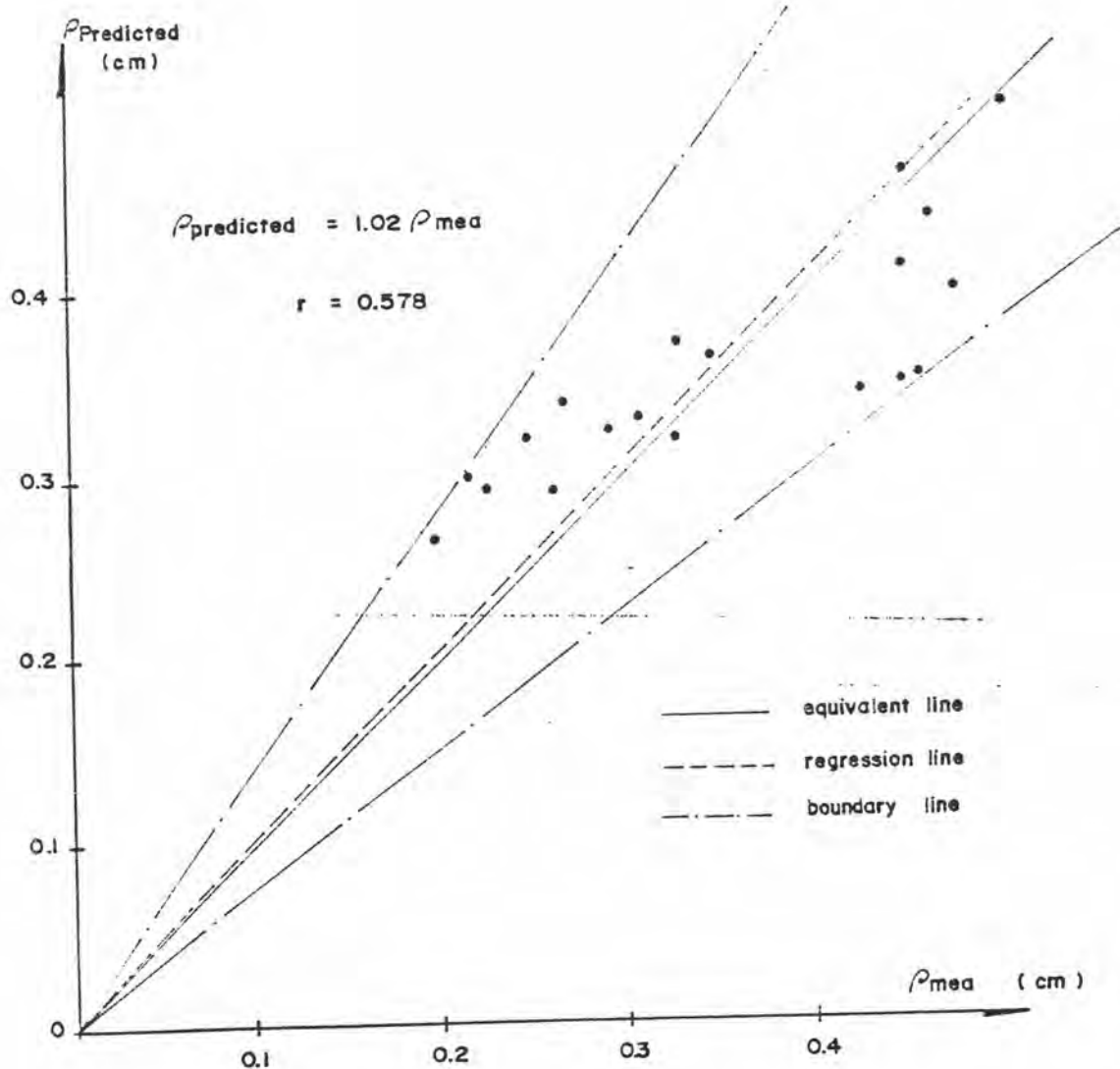
| pile No. | ขนาดของเสาเข็ม | P (ton) | Es (TSM) | p_{pred} (cm) | p_{meas} (cm) |
|----------|----------------|---------|----------|-----------------|-----------------|
| 1 | φ 1.20*49.0 | 650 | 6470 | 0.290 | 0.266 |
| 2 | φ 1.50*56.0 | 1060 | 10240 | 0.465 | 0.519 |
| 3 | φ 1.20*53.0 | 700 | 6842 | 0.371 | 0.337 |
| 4 | φ 1.20*46.2 | 500 | 5469 | 0.320 | 0.330 |
| 5 | φ 1.20*56.0 | 500 | 5469 | 0.263 | 0.204 |
| 6 | φ 1.20*53.0 | 600 | 6117 | 0.345 | 0.436 |
| 7 | φ 1.20*42.0 | 450 | 5171 | 0.322 | 0.252 |
| 8 | φ 1.00*53.0 | 500 | 5469 | 0.353 | 0.457 |
| 9 | φ 1.00*49.0 | 450 | 5171 | 0.285 | 0.233 |
| 10 | φ 1.20*55.0 | 600 | 6117 | 0.343 | 0.291 |
| 11 | φ 1.50*57.0 | 900 | 8560 | 0.337 | 0.313 |
| 12 | φ 1.20*48.6 | 650 | 6470 | 0.364 | 0.352 |
| 15 | φ 0.80*51.4 | 300 | 4372 | 0.401 | 0.487 |
| 17 | φ 1.00*53.0 | 450 | 5171 | 0.328 | 0.295 |
| 28 | φ 1.20*55.0 | 600 | 6117 | 0.446 | 0.467 |
| 29 | φ 1.20*52.0 | 550 | 5784 | 0.305 | 0.223 |
| 30 | φ 1.00*53.4 | 500 | 5469 | 0.352 | 0.466 |
| 40 | φ 1.20*67.9 | 750 | 7236 | 0.594 | 0.511 |
| 41 | φ 1.00*52.0 | 700 | 6842 | 0.419 | 0.457 |
| 42 | φ 1.20*60.0 | 600 | 6117 | 0.506 | 0.538 |



รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบ ρ_{med} กับค่าการทรุดที่ได้จากการคาดคะเน $\rho_{\text{predicted}}$ ในกรณีเสาเข็มตอกในชั้นทรายชั้นที่ 1 ของชั้นดินกรุงเทพมหานคร



รูปที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบ ρ_{mea} กับค่าการทรุดตัวที่ได้จากการคาดคะเน $\rho_{\text{predicted}}$ ในกรณีเสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 1 ของชั้นดินกรุงเทพมหานคร



รูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบ ρ_{mea} กับค่าการทรุดตัวที่ได้จากการคาดคะเน $\rho_{\text{predicted}}$ ในกรณีเสาเข็มเจาะในชั้นทรายชั้นที่ 2 ของชั้นดินกรุงเทพมหานคร