

ขั้นตอนวิธีการดำเนินงานและผลของการวิจัย

4.1 ขั้นตอนการวิจัย

การศึกษาและการวิจัย มีขั้นตอนและวิธีการดำเนินการดังต่อไปนี้

1. เก็บรวบรวมข้อมูลรายงานการเจาะสำรวจคุณสมบัติของดินทางด้านวิศวกรรม และผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกตามแนวแกนของ เสา เข็มตอกทำด้วยคอนกรีตอัดแรง ในกรุงเทพฯ
2. หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าทดสอบแรงทะลุมাত্রฐาน $N(SPT)$ กับกำลังจากการทดสอบการอัดโดยไม่ถูกจำกัด (Unconfined compressive strength, q_u) ของดินเหนียวแข็งชั้นแรกที่วัดได้ในห้องทดลอง โดยใช้หลักการทางสถิติและแบ่งแยกตาม plasticity และกลุ่มของข้อมูล
3. หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการยึดเกาะ (Adhesion factor) ของดินเหนียวแข็ง (Stiff to hard clay) กับค่าแรงเฉือนที่หาได้จากการทดสอบการอัดโดยไม่ถูกจำกัด (Unconfined shear strength) ที่วัดได้จากการทดลอง และ/หรือได้มาจากค่าที่ประมาณการจากค่าทดสอบแรงทะลุมাত্রฐาน N จากการทดสอบ SPT โดยใช้ผลที่ได้จากการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกของ เสา เข็ม เอามาคำนวณหาค่าตัวประกอบการยึดเกาะ (Adhesion factor) ของดินแข็ง (ถ้าเสาเข็มมิได้ถูกทดสอบจนพังทลาย ได้ใช้วิธีการของ Chin (1970) ในการหา Ultimate load)
4. หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทดสอบแรงทะลุมাত্রฐาน N จากการทดสอบ SPT กับหน่วยแรงเสียดทาน (Ultimate unit skin friction) และหน่วยแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม (Ultimate unit end bearing capacity) ในกรณีที่ปลาย เข็มอยู่ในดินแข็ง (stiff clay) และดินทรายปนดินเหนียว (Clayey sand) โดยอาศัยผลการทดสอบ เสา เข็ม ทำการวิจัยดังต่อไปนี้

ก. หาเฉพาะความสัมพันธ์แบบ empirical ระหว่าง N กับหน่วยแรงเสียดทานและหน่วยแรงต้านทานที่ปลาย เข็มในส่วนที่เป็นดินแข็ง (Stiff clay)

ข. หาความสัมพันธ์แบบ empirical ระหว่าง N กับหน่วยแรงเสียดทานและหน่วยแรงต้านทานที่ปลาย เข็มเฉพาะในดินทรายปนดินเหนียว โดยอาศัยการ Trial ค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$ ของดินทรายปนดินเหนียว เพื่อเอามาคำนวณหาค่าหน่วยแรงเสียดทานและหน่วยแรงต้านทานที่ปลาย เข็ม และวิธีการคำนวณใช้หลักการของ Meyerhof (1976)

ค. หาความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$ กับค่า N ของดินทรายปนดินเหนียว ซึ่งค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$ ได้มาจากผลการวิเคราะห์ในข้อ (ข)

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังจากการทดสอบการอัดโดยไม่ถูกจำกัด (q_u) กับค่าทดสอบแรงทะลุมาตรฐาน (N)

งานวิจัยส่วนที่ (1) คือการศึกษาเชิงสถิติหาค่าคงที่ที่เหมาะสมของความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u กับค่า N ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรกของชั้นดินกรุงเทพฯ โดยค่า q_u และค่า N รวบรวมจากรายงานการเจาะสำรวจชั้นดินทางด้านวิศวกรรมในเขตกรุงเทพฯ เพื่อจะได้สูตรในการคาดคะเนค่า q_u จากค่า N ที่วัดได้ในสนามและทำให้สามารถคำนวณค่าแรงเฉือนของดินเหนียวแข็ง (Undrained shear strength, $S_u = q_u/2$) ในที่สุด

ประโยชน์ของการวิจัยคือ เพื่อเอามาใช้ในการคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสา เข็มตอกที่ปลายเข็มจมอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งด้วยสูตร Static Pile Formula โดยไม่ต้องรอผลการทดสอบค่ากำลังอัดโดยไม่ถูกจำกัด (Unconfined compressive strength) และนำผลของการวิจัยไปใช้ในการศึกษาขั้นที่สอง (ดูหัวข้อ 4.3)

4.2.1 วิธีการดำเนินการวิจัยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u กับค่า N

หลักการในการตั้งสมการเพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่า q_u กับ N มีสองรูปแบบด้วยกันคือ

ก. พังกซ์ $q_u = f \cdot N^n$ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.2 ตามแบบของ Terzaghi และ Peck (1948) และ De Mello (1971) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u

กับ N ในรูปของสมการ $q_u = kN$ และ Sowers (1961) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของ q_u กับค่า N เช่นกันแต่แยกตามสภาพพลาสติก (Plasticity) ของดินเหนียว ในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของ q_u กับค่า N ของดินในกรุงเทพฯ ในเทอม $q_u = f^{\frac{n}{n}} N$ แยกเป็น 2 โมเดล (Model) คือ

โมเดลที่ 1 $q_u = a + bN$ เป็นสมการที่ไม่ได้มีจุดเริ่มต้นอยู่ที่ศูนย์

โมเดลที่ 2 $q_u = cN$ เป็นสมการที่มีจุดเริ่มต้นอยู่ที่ศูนย์ (พารามิเตอร์ a , b และ c เป็นค่าคงที่)

ข. ฟังก์ชัน $q_u = f^{\frac{n}{n}} N/Z$ ตั้งสมการในรูป $q_u = d N/Z$ (Z คือ ความลึกของจุดทดสอบ SPT และ d คือค่าคงที่) ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อการแก้ไขค่า N ที่วัดได้ในสนาม เนื่องจากอิทธิพลของความลึกที่จุดทดสอบ จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าไม่มีการ เสนอสูตรหรือกราฟในรูปแบบนี้สำหรับดินเหนียวมาก่อน

สำหรับฟังก์ชันทั้งสองประเภทนี้ ขั้นตอนของการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u กับ N ได้ทำดังต่อไปนี้

1. แยกกลุ่มของข้อมูลจากผลการสำรวจชั้นดินตามบริษัทที่ทำการสำรวจ (เนื่องจากค่า N จะขึ้นอยู่กับขั้นตอนการทำงานด้วยว่าถูกมาตรฐานขนาดไหน) ในที่นี้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากสองบริษัทจัด เป็นข้อมูลกลุ่มที่ 1 และที่ 2
2. จัดกลุ่มของค่า N , q_u และ Z โดยแยกตามสภาพการเป็นพลาสติก (Plasticity) ของดินเหนียวเป็นดินประเภท CH (Inorganic clay of high plasticity) และ CL (Inorganic clay of low to medium plasticity) ตามวิธีการจำแนกประเภทดินของ Unified soil classification (แยกประเภทจากค่า Liquid limit และ Plasticity index)



3. วิเคราะห์เชิงสถิติโดยดั่งสมการดั่งนี้

- ฟังก์ชัน $q_u = f^N$ วิเคราะห์โดยใช้เส้นถดถอยแบบ เส้นตรง (Linear Regression Analysis) มี 2 โมเดล คือ

$$\text{โมเดล I} \quad y = a + bx$$

$$\text{โมเดล II} \quad y = CX$$

เมื่อ a, b และ c เป็นพารามิเตอร์ที่ต้องหาค่า และแทนค่า $q_u = y$ และ $N = X$

- ฟังก์ชัน $q_u = f^N$ วิเคราะห์โดยใช้เส้นถดถอยแบบ เส้นตรงเช่นกัน แต่ใช้โมเดล $y = dx$ (โมเดล III) ในเมื่อ d เป็นพารามิเตอร์ที่ต้องหาค่า และแทนค่า $q_u = y$ และ $N/Z = X$

4. ทดสอบคุณภาพของเส้นถดถอยที่หามาได้ในข้อ 3 ด้วยการหาค่า Coefficient of Determination (R^2) และทดสอบนัยสำคัญ (Significance Test) ของ q_u ที่มีต่อค่า N และ N/Z ด้วย F Distribution

5. เลือกสูตรที่เหมาะสมสำหรับคำนวณค่า q_u จากค่า N ที่วิเคราะห์ได้ในข้อ 3 โดยเปรียบเทียบค่า q_u ที่วัดได้จากการทดลองโดยเก็บตัวอย่างระหว่างการทดสอบ SPT กับค่า q_u จากการคำนวณจากค่า N จากสมการต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ได้ สมการหรือสูตรที่ดีที่สุดคือ สมการเมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง q_u (คำนวณจากค่า N) เท่ากับ Kq_u (จากการทดลอง) แล้วให้ค่า $K \approx 1.0$ และค่า R^2 สูงกว่า 0.80 และใกล้เคียงกับค่า 1.0 (จากหลักสถิติของ Samuel 1970)

4.2.2 ผลของการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u กับ N

ข้อมูลการสำรวจชั้นดินในกรุงเทพฯ ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u กับ N ของดินเหนียวแข็งนี้รวบรวมจากหลุมเจาะจำนวน 144 หลุม ของงาน

75 โครงการ ซึ่งรายละเอียดการจัดแบ่งกลุ่มของข้อมูลมีดังต่อไปนี้

ข้อมูลกลุ่มที่ 1 จำนวนหลุมเจาะ 86 หลุมของงาน 32 โครงการ และหน่วยงานตั้งอยู่ในเขตท้องที่ลาดกระบัง สะพานควาย ดินแดง ลาดพร้าว เพลินจิต สุขุมวิท หัวลำโพง กล้วยน้ำไท ชองนนทบุรี ราษฎร์บูรณะและภาษีเจริญ

ข้อมูลกลุ่มที่ 2 จำนวนหลุมเจาะ 58 หลุมของงาน 43 โครงการ หน่วยงานตั้งอยู่ในเขตท้องที่ พระโขนง ยานนาวา หัวหมาก ลาดพร้าว บางซื่อ สามเสน บางนา ภูเก็ต ลุมพินีและสะพานพุทธฯ

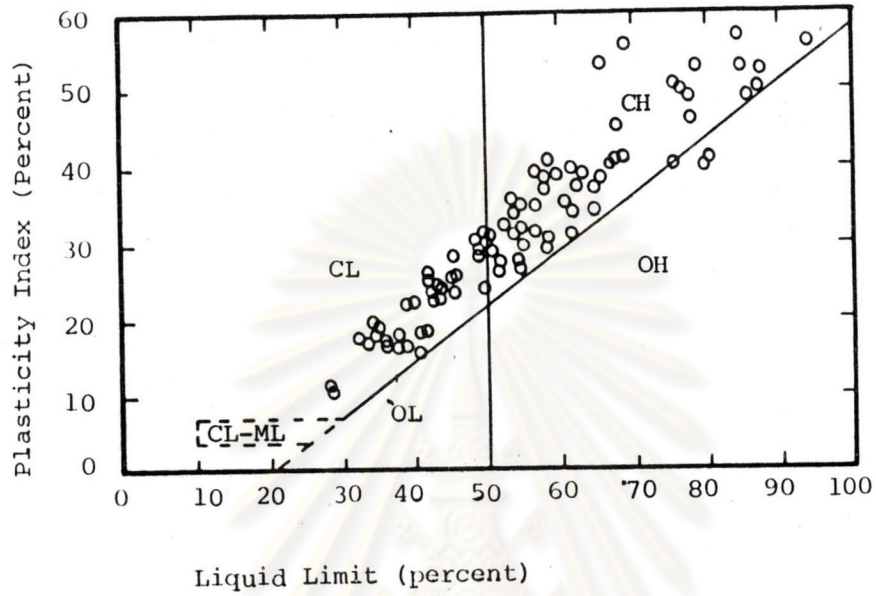
ผลการจำแนกประเภทของดินเหนียวแข็ง (ในหลุมเจาะทั้ง 144 หลุมนี้) ตามวิธีของ Unified Soil Classification ด้วยค่า Liquid Limit (W_L) และ Plasticity Index (PI) พบว่าชั้นดินเหนียวแข็งในชั้นดินกรุงเทพฯ (ระดับความลึกจากผิวดินประมาณ 14.00 ถึง 25.00 เมตร) จัดอยู่ในประเภท CH และ CL และการพล็อตค่า Liquid Limit กับ Plasticity Index ของข้อมูลทั้งสองกลุ่มลงใน Plasticity Chart ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นค่า W_L และ PI ของตัวอย่างดินที่วัดค่า N ในสนาม และวัดค่า q_u ในห้องทดลอง

ข้อมูลที่ได้พบว่าดินเหนียวแข็งมีค่าอัตราส่วนของน้ำหนักของน้ำในมวลดิน (Natural Water Content, W_n) อยู่ระหว่าง 20 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ ค่า PI อยู่ระหว่าง 10 เปอร์เซ็นต์ ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ค่า W_L อยู่ระหว่าง 20 เปอร์เซ็นต์ ถึง 85 เปอร์เซ็นต์

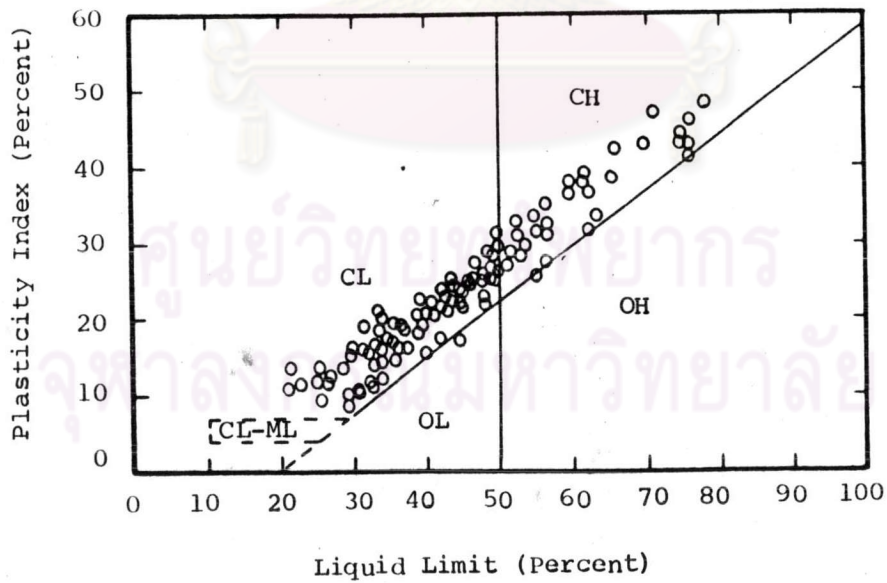
ส่วนรายละเอียดของค่า N, q_u และ Z ของทั้งสองกลุ่มได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ข. ซึ่งมีจำนวนจุดที่วัดค่า N กับ q_u และ Z ดังนี้คือ

ข้อมูลกลุ่มที่ 1 จำนวนตัวอย่างดินประเภท CH 129 จุดและประเภท CL 103 จุด

ข้อมูลกลุ่มที่ 2 จำนวนตัวอย่างดินประเภท CH 69 จุดและประเภท CL 125 จุด



ข้อมูลกลุ่มที่ 1 (ความลึก 14.0 ถึง 25.0 เมตร)



ข้อมูลกลุ่มที่ 2 (ความลึก 14.0 ถึง 25.0 เมตร)

รูปที่ 4.1 แสดงการพล็อตค่า Liquid Limit และ Plasticity Index ลงใน Plasticity Chart ข้อมูลกลุ่มที่ 1 และ 2

ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่า N กับ q_u จากข้อมูลกลุ่มที่ 1 และ 2 ด้วยหลักการทางสถิติได้ผลดังต่อไปนี้

1. โมเดล I ($y = a + bx$) จากข้อมูลทั้งหมด 232 จุดในกลุ่มที่ 1 และ 194 จุดในกลุ่มที่ 2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเส้นถดถอยโมเดล $y = a + bx$ แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

จากตารางที่ 4.1 พบว่าการทดสอบคุณสมบัติของเส้นถดถอย (Regression Line) ด้วย R^2 ได้ค่าน้อยกว่า 0.80 แสดงว่าสมการเส้นถดถอยที่ทำได้ อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง q_u กับค่า N ได้น้อยมาก สรุปได้ว่าเส้นถดถอยโมเดล $y = a + bx$ ไม่เหมาะสมที่จะใช้อธิบายความสัมพันธ์ของค่า N กับ q_u ในกลุ่มข้อมูลนี้

2. โมเดล II ($y = cx$) ผลการวิเคราะห์ด้วยโมเดล $y = cx$ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2 ก. และ ข.

จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่า Coefficient of Determination (R^2) มีค่ามากกว่า 0.80 แสดงว่าสมการหรือเส้นกราฟของเส้นถดถอยที่ทำได้ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ q_u ในกลุ่มของข้อมูลนี้ได้ และการทดสอบนัยสำคัญ (Significance Test) ได้แสดงในตารางที่ 4.3 ก. และ 4.3 ข. ซึ่งแสดงว่า q_u มีความสัมพันธ์กับค่า N จากข้อมูลของทั้งสองกลุ่ม

ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ q_u ด้วยฟังก์ชัน $q_u = f^{\frac{n}{N}}$ (โมเดล I และ II) อาจสรุปได้ดังนี้

- จากการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ q_u ด้วยสมการ $q_u = CN$ พบว่า จากข้อมูลทั้งสองกลุ่ม ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ q_u ของดินเหนียวประเภท CL อยู่ใกล้กับเส้นของ medium และ low plasticity ที่เสนอโดย Sowers (1961) ดังรูปที่ 4.3

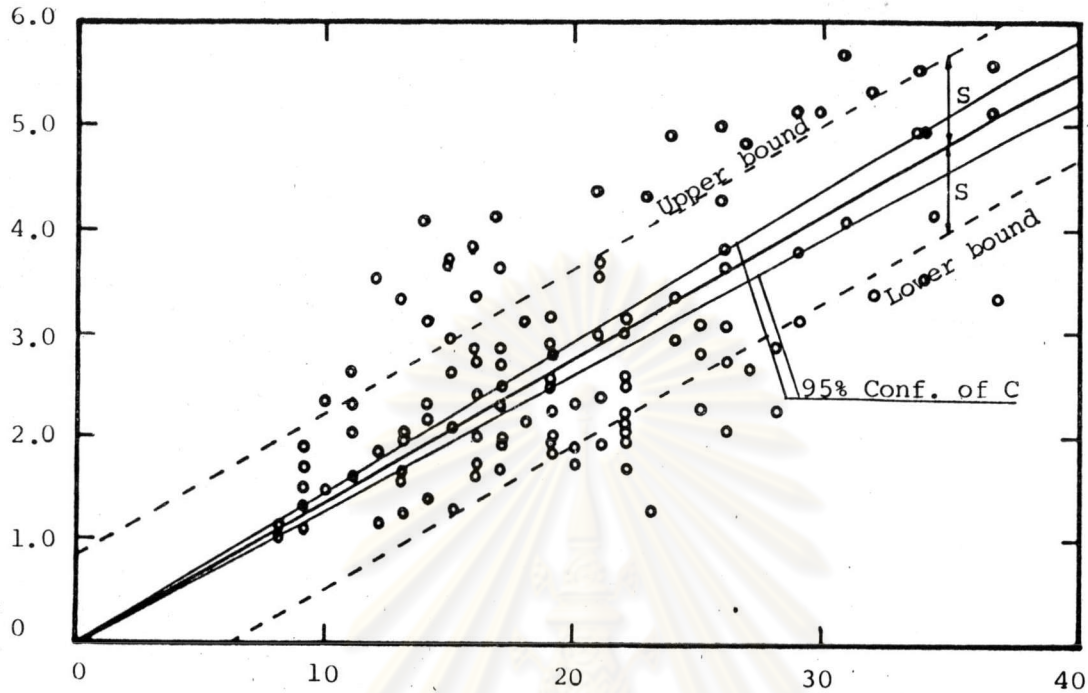
ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ q_u วิเคราะห์ด้วยโมเดล I ($y = a+bx$) ของดินเหนียวแข็งในกรุงเทพฯ

ดินประเภท	จำนวนตัวอย่าง (จุด)	สมการเส้นถดถอย (Regression)	R^2	ข้อมูลกลุ่มที่	หมายเหตุ
CH	129	$q_u = 0.5690 + 0.1117 N$	0.448	1	1. ความลึกของชั้นดินอยู่ระหว่าง 14.0 เมตร ถึง
CH	69	$q_u = 0.9105 + 0.0483 N$	0.276	2	25.0 เมตร จากผิวดิน
CL	103	$q_u = 0.9563 + 0.0646N$	0.251	1	2. q_u มีหน่วยเป็น กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร
CL	125	$q_u = 1.167 + 0.0364 N$	0.148	2	3. ค่า N เป็นค่าที่วัดได้ในสนาม มีหน่วยเป็น No. of blows per foot

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_u กับ q_u วิเคราะห์ด้วยโมเดล II ($y = cx$) ของดินเหนียวแข็งในชั้นดินกรุงเทพฯ

ดินประเภท	จำนวนตัวอย่าง (จุด)	สมการเส้นถดถอย (Regression)	R^2	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน S	ข้อมูลกลุ่มที่	หมายเหตุ
CH	129	$q_u = 0.1374 N$	0.924	0.826	1	1. ความลึกของชั้นดินอยู่ระหว่าง 14.0 เมตร
CH	69	$q_u = 0.0909 N$	0.899	0.617	2	ถึง 25.0 เมตร จากผิวดิน
CL	103	$q_u = 0.1035 N$	0.884	0.878	1	2. q_u มีหน่วย เป็นกิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร
CL	125	$q_u = 0.0879 N$	0.896	0.718	2	3. ค่า N เป็นค่ามีวัดได้ในสนาม มีหน่วย เป็น
						No. of blows per foot

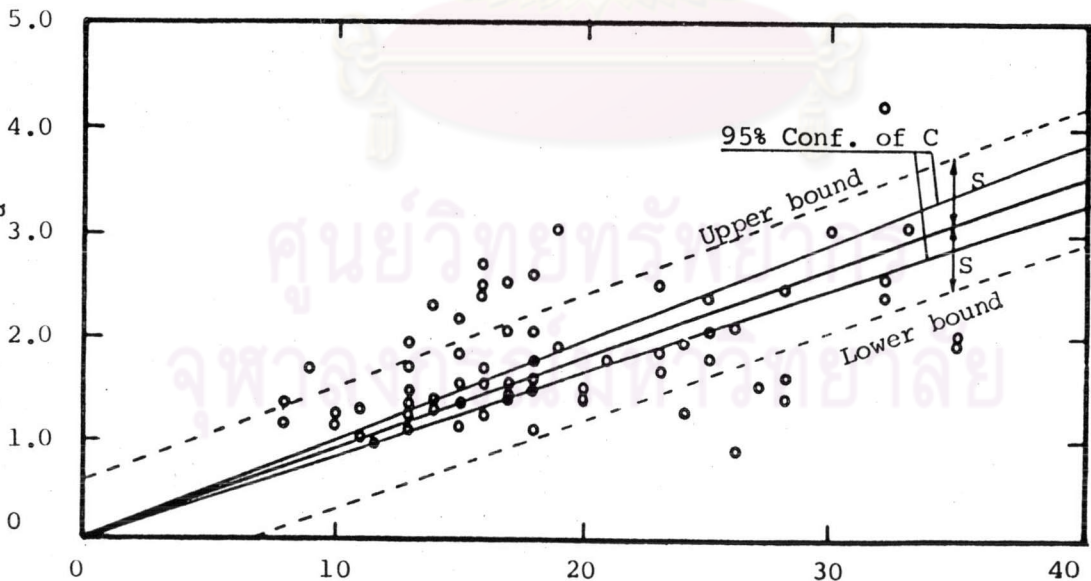
กำลังอัดโดยไม่ถูกจำกัด q_u (กิโลกรัมต่อตาราง เซนติ เมตร)



ค่าการทดสอบแรงทะลุมাত্রฐาน N (blows per foot)

ดินประเภท CH ข้อมูลกลุ่มที่ 1 จำนวนตัวอย่าง 129 จุด (ความลึก 14.0 ถึง 25.0 เมตร)

กำลังอัดโดยไม่ถูกจำกัด q_u (กิโลกรัมต่อตาราง เซนติ เมตร)

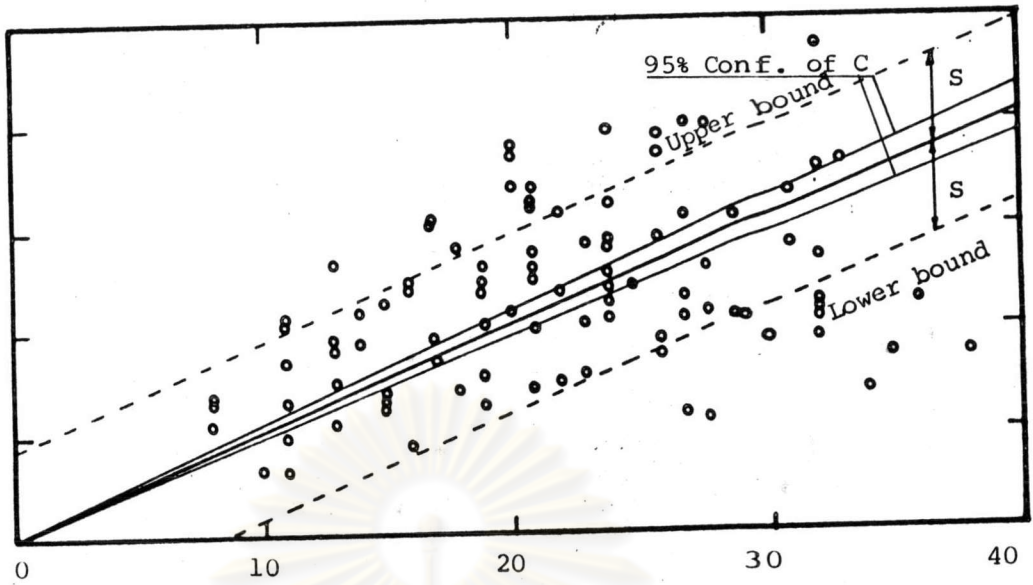


ค่าการทดสอบแรงทะลุมাত্রฐาน N (blows per foot)

ดินประเภท CH ข้อมูลกลุ่มที่ 2 จำนวนตัวอย่าง 69 จุด (ความลึก 14.0 ถึง 25.0 เมตร)

รูปที่ 4.2 ก ความสัมพันธ์ระหว่าง q_u กับ N ของดินประเภท CH วิเคราะห์ด้วยหลักสถิติ โมเดล $y = cx$

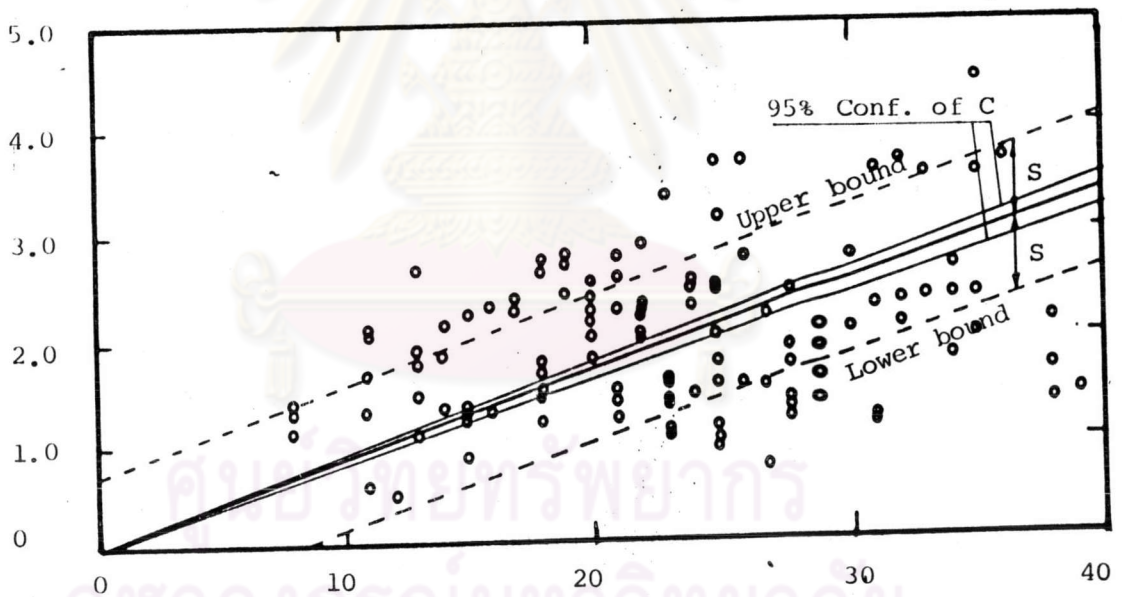
กำลังอัดโดยไม่ถูกจำกัด q_u (กิโลกรัมต่อตาราง เซนติ เมตร)



ค่าการทดสอบแรงทะลุมাত্রฐาน N (blows per foot)

ดินประเภท CL ข้อมูลกลุ่มที่ 1 จำนวนตัวอย่าง 103 จุด (ความลึก 14.0 ถึง 25.0 เมตร)

กำลังอัดโดยไม่ถูกจำกัด q_u (กิโลกรัมต่อตาราง เซนติ เมตร)



ค่าการทดสอบแรงทะลุมাত্রฐาน N (blows per foot)

ดินประเภท CL ข้อมูลกลุ่มที่ 2 จำนวนตัวอย่าง 125 จุด (ความลึก 14.0 ถึง 25.0 เมตร)

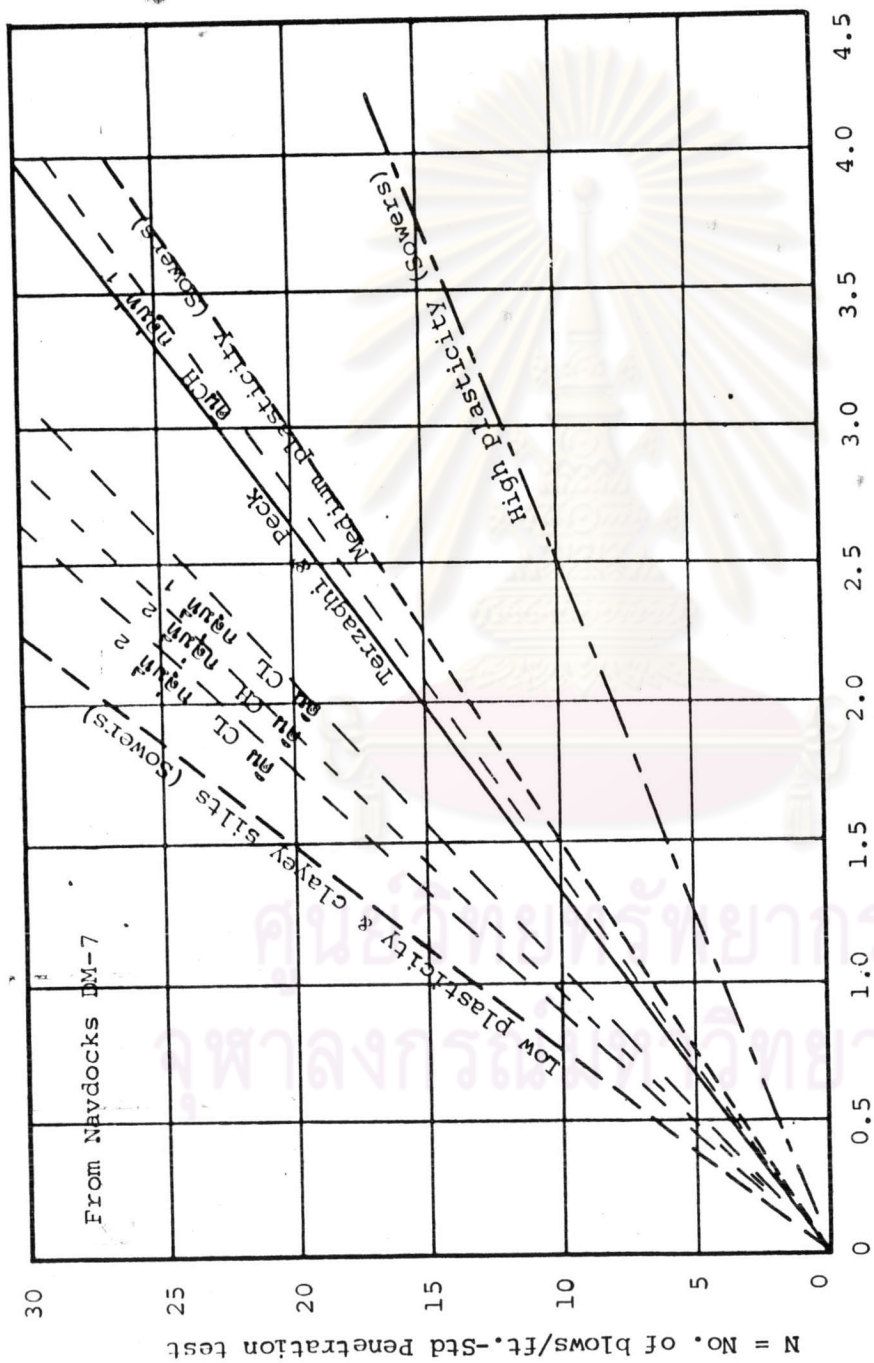
รูปที่ 4.2 ข ความสัมพันธ์ระหว่าง q_u กับ N ของดินประเภท CL วิเคราะห์ด้วยหลักสถิติ โยเดล $y = cx$

ตารางที่ 4.3 ก. แสดงการทดสอบนัยสำคัญ (Significance) ของค่า q_u ที่สอดคล้องกับ CH (โมเดล II $Y = cx$) ของคืนประเวท N

ข้อมูลกลุ่มที่	Source of Variation	Sum of Square	Degree of freedom	Variance	F Value
1	Due to Regression On the Regression Total	1,064.48 87.44 1,147.93	1 128 129	$S_y^2 = 1,060.48$ $S^2 = 0.683$	$S_y^2/S^2 = 1,552.68 > 3.84$ $S_y^2/S^2 > F_p$ for 90% Confidence $\therefore q_u$ is very significance dependent on N
2	Due to Regression On the Regression Total	229.92 25.84 255.79	1 63 69	$S_y^2 = 229.92$ $S^2 = 0.38$	$S_y^2/S^2 = 605.05 > 3.99$ $S_y^2/S^2 > F_p$ for 90 % Confidence $\therefore q_u$ is very Significance dependent on N

ตารางที่ 4.3 ข. แสดงการทดสอบนัยสำคัญ (Significance) ของค่า q_u ที่มีต่อค่า N ของคืนประเภท CL (โมเดล II $y = cx$)

ข้อมูลกลุ่มที่	Source of Variation	Sum of Square	Degree of freedom	Variance	F Value
1	Due to Regression	599.73	1	$S_Y^2 = 599.73$	$S_Y^2/S^2 = 777.79 > 3.94$ $S_Y^2/S^2 > F_p$ for 90% Confidence $\therefore q_u$ is very Significance dependent on N
	On the Regression	78.65	102	$S^2 = 0.77$	
	Total	678.38	103		
2	Due to Regression	554.27	1	$S_Y^2 = 554.27$	$S_Y^2/S^2 = 1,073.5 > 3.84$ $S_Y^2/S^2 > F_p$ for 90% Confidence $\therefore q_u$ is very Significance dependent on N
	On the Regression	64.03	124	$S^2 = 0.516$	
	Total	618.30	125		



Unconfined Compressive Strength, P/A, Tons/sq.ft.

รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_u กับ N ของดินกรุงเทพมหานคร เปรียบเทียบกับที่เสนอโดย Sowers (1961)

- ผลจากการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ q_u โดยแยกกลุ่มข้อมูลตามวิธีที่เจาะสำรวจและตามสภาพการเป็นพลาสติกของดิน (Plasticity) จะพบว่ากลุ่มดินประเภทเดียวกัน (ไม่ว่าจะเป็นดินประเภท CH หรือ CL) ที่ทำการทดสอบต่างบริษัทกัน จะให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ q_u ที่ต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากผลของการใช้วิธีการและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ SPT ไม่เหมือนกันทีเดียว รวมทั้งความแตกต่างของผลของสภาพถูกรบกวน (Disturbance) ของดินในการเก็บตัวอย่างดินมาทดสอบหาค่า q_u ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 4.2ก และ ข. แนวโน้มของค่า q_u ที่ได้จากการพล็อตระหว่าง q_u กับค่า N ของข้อมูลกลุ่มที่ 1 มีแนวโน้มที่จะให้ค่า q_u คำนวณจากค่า N มากกว่าของข้อมูลกลุ่มที่ 2

- จากสมการในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2 ก และ ข. พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง q_u กับค่า N ของดินเหนียวประเภท CH และ CL ในกลุ่มที่ 2 มีค่าเกือบจะเท่ากัน (จากการเสนอโดย Sowers (1961) ความสัมพันธ์ระหว่าง q_u กับค่า N จะต้องแปรตามสภาพการเป็นพลาสติกของดิน)

- ความสัมพันธ์ระหว่าง q_u กับค่า N ของดินเหนียวประเภท CL กลุ่มที่ 1 ให้ค่า q_u มากกว่าดินเหนียวประเภท CH ของกลุ่มที่ 2 เสียด้วยซ้ำไปเมื่อเปรียบเทียบที่ค่า N เท่ากัน สาเหตุอันหนึ่งอาจเนื่องมาจากปริมาณข้อมูลในกลุ่มที่ 2 มีน้อยมาก

ถ้าถือเอาข้อมูลมากเป็นเกณฑ์

- ข้อมูลกลุ่มที่ 1 ดินประเภท CH ค่า $q_u = 0.1374 N$ หน่วย q_u เป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งอยู่ใกล้เคียงกับเส้นของ Terzaghi และ Peck (1948) รูปที่ 4.3 (ค่า PI ของดินอยู่ระหว่าง 22 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์)

- ข้อมูลกลุ่มที่ 1 ดินประเภท CL ค่า $q_u = 0.1035 N$ หน่วย q_u เป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อยู่ใกล้เคียงกับเส้นของ Sowers (1961) รูปที่ 4.3 (ค่า PI ของดินอยู่ระหว่าง 10 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์)

- อาจสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u กับค่า N ของดินแข็งชั้นแรกของกรุงเทพฯ ควรเอามาจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลุ่มที่ 1

อนึ่งค่า N ที่ใช้ในการคำนวณค่า q_u ที่กล่าวข้างต้น เป็นค่าจากการทดสอบ SPT ที่วัดได้ในสนาม และค่า N มากกว่า 8 blows per foot ขึ้นไปเท่านั้น ส่วนค่า N น้อยกว่า 8 blows per foot อาจใช้สูตรนี้ไม่ได้ และไม่จำเป็นต้อง correct ค่า N สำหรับ effective overburden pressure

3. โมเดล III $y = dx$ ($x = N/Z$) ผลการวิเคราะห์โมเดล $y = dx$ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.4

จากตารางที่ 4.4 จะพบว่าค่า Coefficient of Determination (R^2) มีค่ามากกว่า 0.80 แสดงว่าสมการของเส้นถดถอยที่ได้ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u กับ N/Z เพียงในกลุ่มของข้อมูลหนึ่งได้ ส่วนการทดสอบนัยสำคัญ (Significance) ของค่า q_u ที่มีต่อค่า N/Z ดูตารางที่ 4.5 (ก. และ ข.)

สิ่งที่น่าสังเกตคือ ความสัมพันธ์ระหว่าง q_u กับ N/Z สำหรับดินกลุ่มที่ 2 ใช้การได้ไม่ดี เพราะมีค่าพารามิเตอร์ d เท่ากัน (ทั้งดิน CH และ CL) ซึ่งน่าจะแปรตามสภาพการเป็นพลาสติก (Plasticity) ของดินตามหลักการของ Sowers (1961) (โดย เปรียบเทียบกับข้อมูลกลุ่มที่ 1) แต่ถ้าพิจารณาจากการทดสอบนัยสำคัญแล้ว พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง $q_u = d N/Z$ นั้นมิได้สำหรับดินแข็งทั้งสองกลุ่ม (เปรียบเทียบข้อมูลจากตาราง 4.3 ก. และ ข) กับตาราง 4.5 ก. และ ข.)

ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u กับ N ด้วยฟังก์ชัน

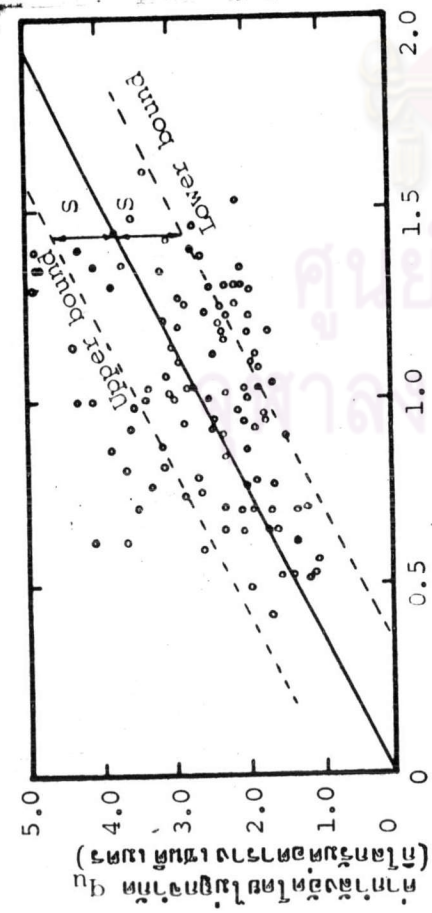
$$q_u = f^{\frac{n}{n}} N/Z \quad (\text{โมเดล III}) \quad \text{อาจสรุปได้ดังนี้}$$

- จากตารางที่ 4.4 พบว่าสมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u กับค่า N/Z ของข้อมูลกลุ่มที่ 1 ให้ค่า q_u ของดินเหนียวประเภท CH มากกว่าดินประเภท CL เมื่อค่า N/Z เท่ากัน ส่วนข้อมูลกลุ่มที่ 2 ให้ค่า q_u เท่ากันที่ N/Z เดียวกัน ไม่ว่าจะ เป็นดินประเภท CH หรือ CL ซึ่งแนวโน้มของการวิเคราะห์เหมือนกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยสมการ $q_u = CN$

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ σ_u บริเวณที่ตัวโมเมนต์ III ($y = dx$) ของดินเหนียวแข็งในชั้นดินกรุงเทพฯ

ดินประเภท	จำนวน ตัวอย่าง (จุด)	สมการเส้นถดถอย (Regression)	R^2	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน S	ข้อมูล กลุ่มที่	หมายเหตุ
CH	129	$\sigma_u = 2.60 N/Z$	0.905	0.922	1	1. ความลึกของชั้นดินอยู่ระหว่าง 14.0 เมตร
CH	69	$\sigma_u = 1.69 N/Z$	0.880	0.670	2	ถึง 25.0 เมตรจากผิวดิน
CL	103	$\sigma_u = 2.06 N/Z$	0.880	0.887	1	2. σ_u มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร
CL	125	$\sigma_u = 1.69 N/Z$	0.877	0.785	2	3. ค่า N เป็นค่าที่วัดได้ในสนาม มีหน่วยเป็น No. of blows per foot

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_u กับ N/Z ของดินเหนียวแข็งในชั้นดินกรุง เทพฯ

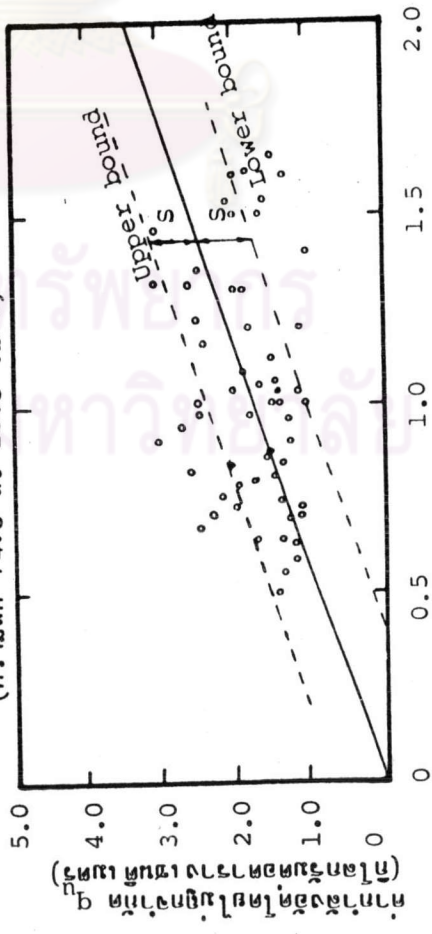


อัตราส่วนของการทดสอบแรงทะลุมาตรฐาน N ต่อความลึก

(N/Z) (blows per foot/เมตร)

ดินประเภท CH ข้อมูลกลุ่มที่ 1 จำนวนตัวอย่าง 129 จุด

(ความลึก 14.0 ถึง 25.0 เมตร)

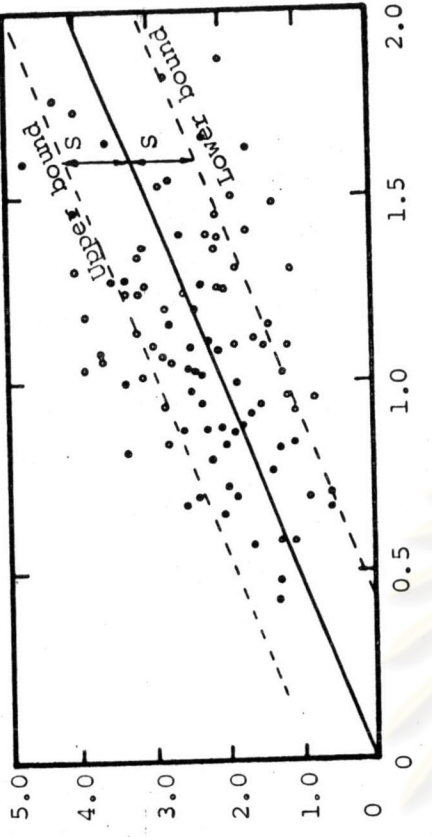


อัตราส่วนของการทดสอบแรงทะลุมาตรฐาน N ต่อความลึก

(N/Z) (blows per foot/เมตร)

ดินประเภท CH ข้อมูลกลุ่มที่ 2 จำนวนตัวอย่าง 69 จุด

(ความลึก 14.0 ถึง 25.0 เมตร)

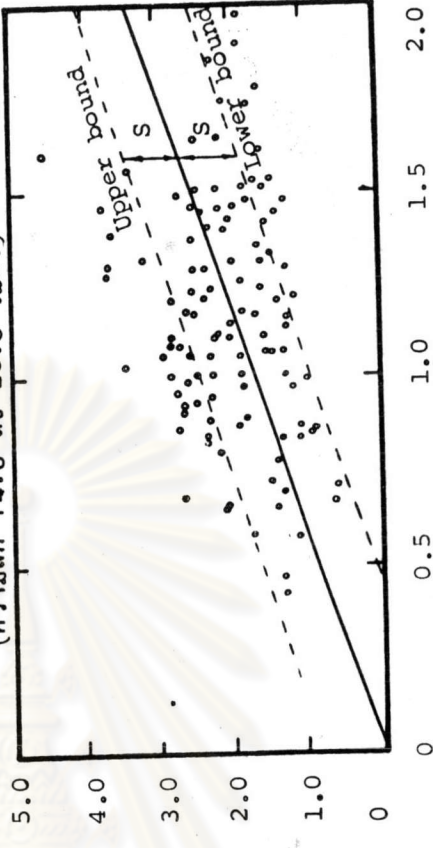


อัตราส่วนของการทดสอบแรงทะลุมาตรฐาน N ต่อความลึก

(N/Z) (blows per foot/เมตร)

ดินประเภท CL ข้อมูลกลุ่มที่ 1 จำนวนตัวอย่าง 103 จุด

(ความลึก 14.0 ถึง 25.0 เมตร)



อัตราส่วนของการทดสอบแรงทะลุมาตรฐาน N ต่อความลึก

(N/Z) (blows per foot/เมตร)

ดินประเภท CL ข้อมูลกลุ่มที่ 2 จำนวนตัวอย่าง 125 จุด

(ความลึก 14.0 ถึง 25.0 เมตร)

ตารางที่ 4.5 ก. แสดงการทดสอบนัยสำคัญ (Significance) ของค่า q_u ที่มีต่อค่า N/Z ของคืนประเภท CH (โมเดล III $Y = dx$)

ข้อมูลกลุ่มที่	Source of Variation	Sum of Square	Degree of freedom	Variance	F Value
1	Due to Regression	1,038.95	1	$S_Y^2 = 1,038.95$	$S_Y^2/S^2 = 1,220.23 > 3.84$ $S_Y^2/S^2 > F_p$ for 90% Confidence $\therefore q_u$ is very Significance dependent on N/Z
	On the Regression	108.98	128	$S^2 = 0.85$	
	Total	1,147.93	129		
2	Due to Regression	225.20	1	$S_Y^2 = 225.2$	$S_Y^2/S^2 = 500.7 > 3.99$ $S_Y^2/S^2 > F_p$ for 90% Confidence $\therefore q_u$ is very significance dependent on N/Z
	On the Regression	30.58	68	$S^2 = 0.449$	
	Total	225.78	69		

ตารางที่ 4.5 ข. แสดงการทดสอบนัยสำคัญ (Significance) ของค่า q_u ที่มีต่อค่า N/Z ของดินประเภท CL (โมเดล III $y = dx$)

ข้อมูลกลุ่มที่	Source of Variation	Sum of Square	Degree of freedom	Variance	F Value
1	Due to Regression	599.77	1	$S_y^2 = 599.77$	$S_y^2/S^2 = 778.14 > 3.94$ $S_y^2/S^2 > F_p$ for 90% Confidence $\therefore q_u$ is very Significance dependent on N/Z
	On the Regression	78.62	102	$S^2 = 0.77$	
	Total	678.38	103		
2	Due to Regression	514.97	1	$S_y^2 = 514.97$	$S_y^2/S^2 = 836.55 > 3.84$ $S_y^2/S^2 > F_p$ 90% Confidence $\therefore q_u$ is very Significance Dependent on N/Z
	On the Regression	76.33	124	$S^2 = 0.616$	
	Total	618.30	125		

- ด้วยเหตุผลเดียวกันกับการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ q_u ในโมเดล I และโมเดล II ผลของการวิจัยสามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u กับ N/Z ของดินเหนียวแข็งชั้นแรกของชั้นดินในกรุงเทพฯ จากข้อมูลกลุ่มที่ 1 ได้ดังนี้

ดินเหนียวประเภท CH ค่า $q_u = 2.60 N/Z$ มีหน่วย เป็นกิโลกรัมต่อ

ตาราง เซนติเมตร

ดินเหนียวประเภท CL ค่า $q_u = 2.06 N/Z$ มีหน่วย เป็นกิโลกรัมต่อ

ตาราง เซนติเมตร

เมื่อค่า N เป็นค่าจากการทดสอบ SPT ที่วัดได้ในสนาม หน่วยเป็น blows per foot และ Z คือค่าระดับความลึกของจุดทดสอบ SPT โดยวัดจากผิวดิน มีหน่วยเป็น เมตร

การเปรียบเทียบและหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_u กับ N ที่เหมาะสม

สำหรับชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรกของชั้นดินในกรุงเทพฯ จากโมเดลทั้งสามได้ผลดังต่อไปนี้

พิจารณาผลการวิเคราะห์จากสูตร $q_u = CN$ (โมเดล II) เปรียบเทียบกับสูตร $q_u = d N/Z$ (โมเดล III)

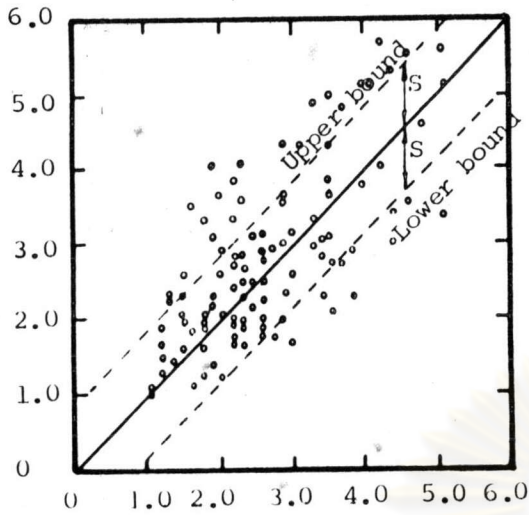
1. จากการทดสอบนัยสำคัญ (Significance Test) ของค่า q_u ด้วย F distribution (ดูตารางที่ 4.3 ก. และ ข. และตารางที่ 4.5 ก. และ ข.) จะพบว่าค่า q_u สัมพันธ์กับค่า N และ N/Z ได้ทั้งสองโมเดล (พิจารณาที่ F_p เท่ากับ 90 percent Confidence Limit)

2. การเปรียบเทียบระหว่างค่า q_u ที่วัดได้จากการทดลองกับค่า q_u ที่คำนวณจากค่า N และ N/Z (ตามสมการความสัมพันธ์ของ N Z และ q_u ในตารางที่ 4.2 และ 4.4) ด้วยวิธีเส้นถดถอยแบบเส้นตรงผ่านจุดศูนย์ (Linear Regression Analysis ผ่านจุด Origin) ดูในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.5 ก. และรูปที่ 4.5 ข. พบว่าค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (standard deviation, S) ของ q_u กับเส้นถดถอย (Regression Line) ที่คำนวณได้จากสมการ $q_u = CN$ (โมเดล II) มีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการ $q_u = d N/Z$ (โมเดล III) จึงสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ q_u แทนด้วยสมการ $q_u = CN$

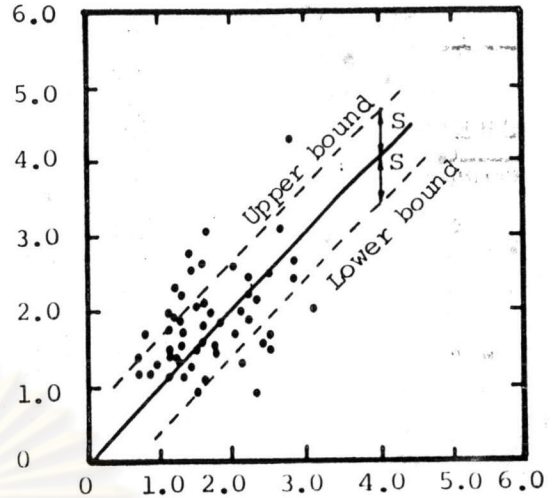
ตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่า q_u ที่วัดได้ในห้องทดลองกับค่า q_u ที่คำนวณจากค่า $N(SPT)$

ดินประเภท	จำนวน ตัวอย่าง (จุด)	$q_u = CN$ (โมเดล II)			$q_u = \alpha N/Z$ (โมเดล III)			ข้อมูล กลุ่มที่	หมายเหตุ
		สมการ เส้นถดถอย	R^2	S	สมการ เส้นถดถอย	R^2	S		
CH	129	$q_{uob} = 0.9959 q_{ucal}$	0.926	0.81	$q_{uob} = 0.9992 q_{ucal}$	0.90	0.93	1	q_{uob} คือค่าที่วัดได้จาก การทดสอบ
CH	69	$q_{uob} = 1.001 q_{ucal}$	0.899	0.61	$q_{uob} = 0.9999 q_{ucal}$	0.88	0.67	2	q_{ucal} คือค่าที่คำนวณ ได้จากสูตร
CL	103	$q_{uob} = 1.00 q_{ucal}$	0.884	0.88	$q_{uob} = 0.9999 q_{ucal}$	0.884	0.88	1	
CL	125	$q_{uob} = 0.993 q_{ucal}$	0.889	0.74	$q_{uob} = 0.9980 q_{ucal}$	0.875	0.79	2	

ค่า q_u วัดได้จากห้องทดลอง
(กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

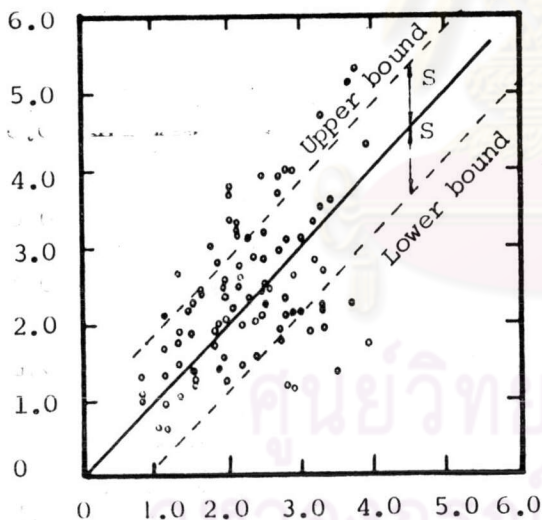


ค่า q_u คำนวณจากสูตร $q_u = 0.1374N$
(กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
ดินประเภท CH ข้อมูลกลุ่มที่ 1
จำนวนตัวอย่าง 129

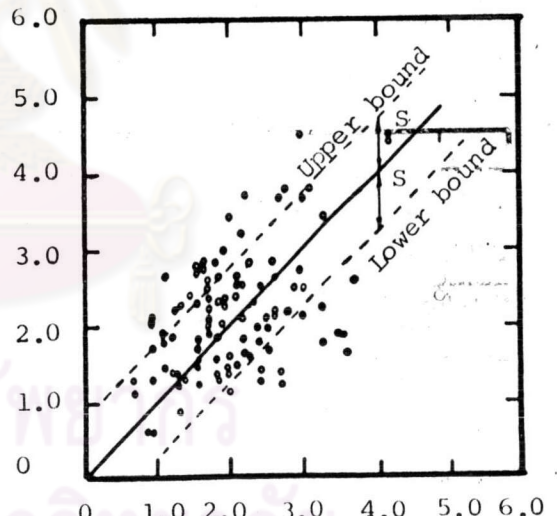


ค่า q_u คำนวณจากสูตร $q_u = 0.0909N$
(กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
ดินประเภท CH ข้อมูลกลุ่มที่ 2
จำนวนตัวอย่าง 69 จุด

ค่า q_u วัดได้จากห้องทดลอง
(กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)



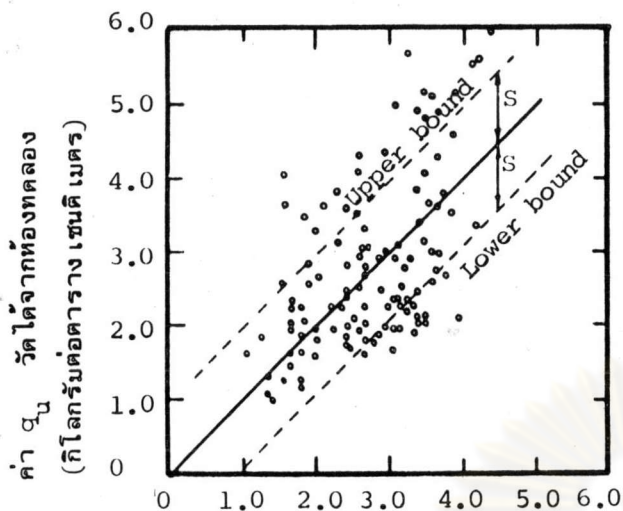
ค่า q_u คำนวณจากสูตร $q_u = 0.1035N$
(กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
ดินประเภท CL ข้อมูลกลุ่มที่ 1
จำนวนตัวอย่าง 103 จุด



ค่า q_u คำนวณจากสูตร $q_u = 0.0879N$
(กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
ดินประเภท CL ข้อมูลกลุ่มที่ 2
จำนวนตัวอย่าง 125 จุด

รูปที่ 4.5 ก แสดงการเปรียบเทียบค่า q_u ระหว่างค่าที่วัดได้จากห้องทดลองกับค่าที่คำนวณได้

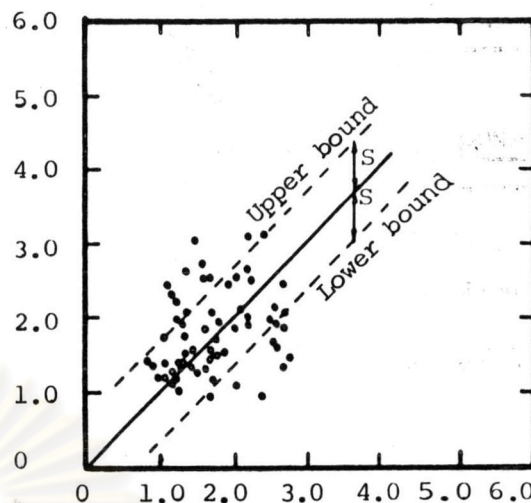
$$\text{จากสูตร } q_u = cN$$



ค่า q_u คำนวณจากสูตร $q_u = 2.60N/Z$
(กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

ดินประเภท CH ข้อมูลกลุ่มที่ 1

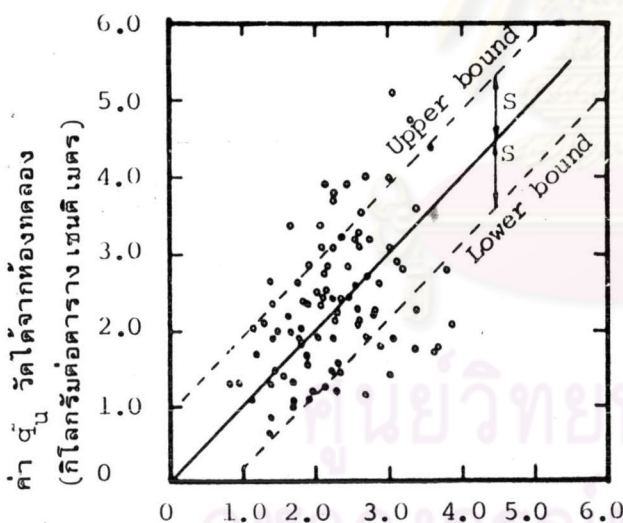
จำนวนตัวอย่าง 129 จุด



ค่า q_u คำนวณจากสูตร $q_u = 1.60N/Z$
(กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

ดินประเภท CH ข้อมูลกลุ่มที่ 2

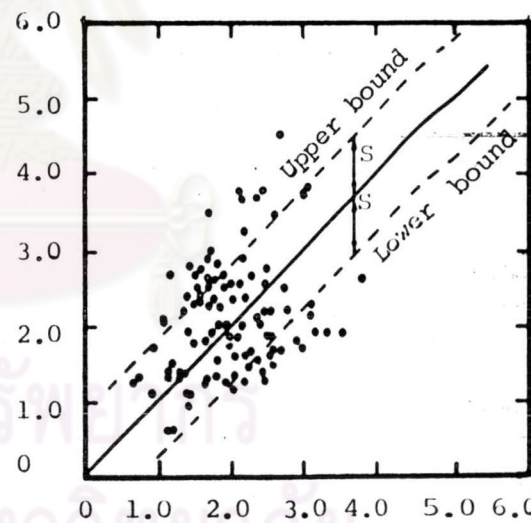
จำนวนตัวอย่าง 69 จุด



ค่า q_u คำนวณจากสูตร $q_u = 2.06N/Z$
(กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

ดินประเภท CL ข้อมูลกลุ่มที่ 1

จำนวนตัวอย่าง 103 จุด



ค่า q_u คำนวณจากสูตร $q_u = 1.60N/Z$
(กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

ดินประเภท CL ข้อมูลกลุ่มที่ 2

จำนวนตัวอย่าง 125 จุด

รูปที่ 4.5 ข. แสดงการเปรียบเทียบค่า q_u ระหว่างค่าที่วัดได้จากห้องทดลองกับค่าที่คำนวณ

ได้จากสูตร $q_u = d N/Z$

(โมเดล II) จะเหมาะสมกว่าสมการ $q_u = d N/Z$ (โมเดล III) ดังนั้น สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ q_u ที่แนะนำให้ใช้ คือ

ดินเหนียวประเภท CH ค่า $q_u = 0.1374 N$ หน่วย เป็นกิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร

ดินเหนียวประเภท CL ค่า $q_u = 0.1035 N$ หน่วย เป็นกิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร

อนึ่ง ค่า q_u ที่ได้นี้ควรใช้เฉพาะในการออกแบบเสาเข็มเพียงอย่างเดียว และใช้ได้สำหรับดินแข็งชั้นแรกในกรุงเทพฯ ซึ่งอยู่ที่ความลึกถึงประมาณ 14.0-30.0 เมตร (นั่นคือ ชั้นดินแข็งชั้นแรก)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 การหาค่าตัวประกอบการยึดเกาะของดินเหนียวแข็ง (Adhesion Factor, α)

ในการคำนวณน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจากคุณสมบัติของดิน (Static Pile Formula) ได้แยกการคำนวณแรงต้านของเสาเข็มเป็นแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็ม (Shaft resistance) และแรงต้านที่ปลายของเสาเข็ม (Point resistance) กรณีที่เสาเข็มตอกจมอยู่ในชั้นดินเหนียว หน่วยแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มมีค่าเท่ากับ αS_u (โดยใช้หลักการของ Total Stress Analysis, $\phi = 0$ Concept) ซึ่ง S_u คือค่าแรงเฉือนของดินรอบเสาเข็ม ส่วน α เป็นค่าตัวประกอบการยึดเกาะ (Adhesion factor) ซึ่งขึ้นอยู่กับหลายแฟกเตอร์ เช่นชนิดของวัสดุเสาเข็ม ลักษณะของดินและกรรมวิธีในการก่อสร้างเสาเข็ม เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะทำการคำนวณหาค่าตัวประกอบการยึดเกาะของดินเหนียวแข็งขั้นแรกจากผลการทดสอบ เสาเข็มประเภทเสาเข็มตอกทำด้วยคอนกรีตอัดแรงในเขตกรุงเทพฯ ซึ่งประกอบด้วยเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงจำนวน 32 ต้น และเสาเข็มเหล็ก 2 ต้น ปลายของเสาเข็มฝังอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งลึกจากผิวดินประมาณ 18.00 ถึง 29.00 เมตร ส่วนรายละเอียดของข้อมูลการสำรวจชั้นดินและผลการทดสอบเสาเข็มได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ค และ ง

4.3.1 วิธีดำเนินการวิจัยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการยึดเกาะ (α) กับแรงเฉือนของดิน (S_u)

ค่า α ในดินแข็งหาได้จากการที่เอาค่าแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มเฉพาะในส่วนที่เสาเข็มอยู่ในดินแข็งหารด้วยค่าเฉลี่ยแรงเฉือน ข้อมูลที่ใช้ในการหาค่า α คือ ผลทดสอบกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มและข้อมูลจากการเจาะดิน ซึ่งประกอบด้วยค่ากำลังอัดโดยไม่ถูกจำกัด (Unconfined compressive strength) ทั้งในดินอ่อนและดินแข็ง และค่า N จากการทดสอบ SPT

วิธีการคำนวณหาค่า α ของดินเหนียวแข็ง ดำเนินการตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. คำนวณค่าแรงเสียดทานของเสาเข็มในชั้นดินอ่อนและดินเหนียวแข็งปานกลางจากค่าแรงเฉือนของดินที่วัดได้ในห้องทดลองจากสูตร

$$Q_S = \alpha \cdot \text{Avg } S_{uS} A_S$$

เมื่อ Q_S = แรงเสียดทานของเสาเข็ม มีหน่วยเป็นตัน

α = ค่าตัวประกอบการยึดเกาะ (Adhesion factor)

A_S = พื้นที่ผิวประสิทธิผลของเสาเข็มที่ฝังในชั้นดิน คิดจากพื้นที่ผิวของ Soil Block Failure รอบเสาเข็ม มีหน่วยเป็นตาราง เมตร

$\text{Avg } S_u$ = ค่าเฉลี่ยแรงเฉือนของดิน หาได้จากการทดสอบกำลังอัดโดยไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength, q_u) ที่วัดได้จากการทดลอง มีหน่วยเป็นตันต่อตาราง เมตร

- ค่า α ของชั้นดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งปานกลางชั้นบน ใช้ค่าที่เสนอโดย Tomlinson (1957) รูปที่ 2.4 ซึ่งค่า α แปรตามค่าแรงเฉือน (S_u) ดังนี้

ดินเหนียวอ่อน (Soft clay) ค่า S_u อยู่ระหว่าง 1.0 ถึง 2.5 ตันต่อตาราง เมตร ค่า α มีค่าลดลงจาก 1.0 ถึง 0.92 (ประมาณจากการต่อเส้น Curve ในรูปที่ 2.4) ส่วนค่า S_u น้อยกว่า 1.0 ตันต่อตาราง เมตร ใช้ค่า α เท่ากับ 1.0 (เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่า ดินเหนียวอ่อนมากมีค่า $\alpha = 1.0$)

ดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium clay) ค่า S_u อยู่ระหว่าง 2.5 ถึง 5.0 ตันต่อตาราง เมตร α มีค่าลดลงจาก 0.92 ถึง 0.75

- ค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงเฉือนของดิน ($\text{Avg. } S_u$) คิดจากค่าแรงเฉือนของดินที่ได้จากการทดสอบกำลังอัดโดยไม่ถูกจำกัด (Unconfined shear strength, S_u) โดยแบ่งชั้นดินเป็น n ชั้นตามความหนาของชั้นดิน (l) ที่เก็บตัวอย่างมาทดสอบค่า q_u (ทั่วไปหนาประมาณ 1.50 เมตร) ค่า $\text{Avg. } S_u$ จึงมีค่าเท่ากับ $\frac{\sum_{n=1}^n S_{u \text{ min}} l}{\sum_{n=1}^n l}$

2. หาแรงต้านที่ปลายของเสาเข็ม (Point resistance) คำนวณจาก

สูตร

$$Q_p = (N_c S_u + \gamma_t L) A_p$$

- เมื่อ N_c = ตัวประกอบวิสัยสามารถรับแรงทาน (Bearing capacity factor) ใช้ค่า $N_c = 9$ (Skempton 1951 และ Tomlinson 1970)
- S_u = ค่าแรงเฉือนของดินที่ปลายเสาเข็ม มีหน่วยเป็นตันต่อตาราง เมตร
- A_p = พื้นที่หน้าตัดที่ปลายของเสาเข็ม มีหน่วยเป็นตาราง เมตร
- γ_t = หน่วยน้ำหนักของดิน มีหน่วยเป็นตันต่อลูกบาศก์ เมตร
- L = ความยาวของเสาเข็มที่จมอยู่ในดิน มีหน่วยเป็น เมตร

หมายเหตุ ในการคำนวณจะไม่คิดค่า $\gamma_t L$ เนื่องจากน้ำหนักของตัวเสาเข็มใกล้เคียงกับน้ำหนักของดินที่ถูกแทนที่ด้วยเสาเข็ม และ Load ที่มาจากการทดสอบเสาเข็มมิได้รวมถึงน้ำหนักของเสาเข็มอยู่แล้ว

3. ค่าแรงเสียดทานของเสาเข็มในส่วนที่อยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง หาได้จากค่าน้ำหนักบรรทุกประลัย (จากการทดสอบ) ลบด้วยค่าแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มในชั้นดินอ่อนและดินแข็งปานกลางรวมทั้งแรงต้านที่ปลายของเสาเข็ม (จากการคำนวณ $Q_p = 9S_u A_p$) ซึ่งการหาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัย (Ultimate load) จากการทดสอบ ใช้หลักเกณฑ์ของ Vesic (1963) (ค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยจากการทดสอบคือค่าน้ำหนักบรรทุกที่ให้ค่าอัตราส่วนระหว่างค่าการทรุดตัวของเสาเข็มที่เพิ่มขึ้นต่อค่าน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น มีค่าสูงสุดหรือเท่ากับ Infinity) ในกรณีที่ทดสอบเสาเข็มไม่ถึงจุดพิบัติ (ข้อมูลมี 3 ดันของทั้งหมด 34 ดัน) ค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยคำนวณจากเส้น Curve ที่พล็อตระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัวที่วัดได้ด้วยวิธี Hyperbolic Method ที่เสนอโดย Chin (1970) (วิธีการหาน้ำหนักบรรทุกประลัยด้วยวิธีของ Chin 1970 ดูในหัวข้อ 2.4 และรายการคำนวณอยู่ในภาคผนวก จ)

4. ค่ามุมค่าตัวประกอบการยึดเกาะ (α) ของเสาเข็มในชั้นดินเหนียวแข็งจากสูตร

$$\alpha = \frac{Q_s}{\text{Avg. } S_u \times A_s}$$

เมื่อ Q_S = แรงเสียดทานที่ผิวของ เสา เข็ม เจาะใน ส่วนที่จมอยู่ในชั้นดิน
เหนียวแข็ง มีหน่วย เป็นตัน

$Avg.S_u$ = ค่าเฉลี่ยแรงเฉือนของดินเหนียวแข็งตลอดความหนาของส่วน
ชั้นดินที่เสาเข็มจมอยู่ มีหน่วย เป็นตันต่อตารางเมตร

A_s = พื้นที่ผิวประสิทธิผลของ เสา เข็ม มีหน่วย เป็นตาราง เมตร
(พื้นที่ผิวของเสา เข็มที่มีหน้าตัดรูปตัว I และ DH คัดจาก
เส้นรอบรูปที่สั้นที่สุดรอบตัวเสาเข็ม ไม่ได้คิดจาก เส้นรอบรูป
จริงของตัว เสาเข็ม)

วิธีการเฉลี่ยค่าแรงเฉือนของดินแข็ง ใช้วิธีเดียวกันกับการคิดค่า $Avg.S_u$
ของดินอ่อน และค่า S_u ได้จากการวัดค่า q_u ในห้องทดลอง แต่เนื่องจากบางหลุมเจาะ
ในชั้นดินแข็งไม่มีค่า q_u แต่มีค่า $N(SPT)$ มีทุกหลุม จึงต้องประมาณค่า q_u จากค่า N โดย
ใช้สูตรที่วิเคราะห์ได้ในข้อ 4.2 (ดินเหนียวประเภท CH ค่า $q_u = 1.374 N$ ตันต่อตาราง
เมตรและดินประเภท CL ค่า $q_u = 1.035 N$ ตันต่อตาราง เมตร)

5. ทดสอบความสัมพันธ์ของค่า α กับ $Avg.S_u$ ที่คำนวณได้ในข้อ 4 ด้วย
วิธีการของ Curve Fitting (ใช้หลักการของ Regression Analysis) จะได้เส้น Curve
แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ $Avg.S_u$ ของเสาเข็มคอกในชั้นดินเหนียวแข็ง

6. ทดสอบค่า α ที่ทำได้จากเส้น Curve แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง α
กับ $Avg.S_u$ ว่าใช้ได้หรือไม่ โดยการคำนวณน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม เปรียบ เทียบกับค่า
น้ำหนักบรรทุกทุกของ เสา เข็มจากการทดสอบด้วย เส้นถดถอยแบบ เส้นตรงที่มีจุด เริ่มต้นอยู่ที่ศูนย์
(Linear Regression ผ่านจุด Origin)

4.3.2 ผลการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบการยึดเกาะ (Adhesion factor)

ของเสาเข็มคอกในชั้นดินเหนียวแข็ง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ $Avg.S_u$ ของดินแข็งที่ทำได้ด้วยวิธี
Polynomial Regression Analysis ของข้อมูลเสาเข็ม 34 คัด (ซึ่งการคำนวณค่า α
ของชั้นดินเหนียวแข็ง ดูในตารางที่ ฉ.1 ภาคผนวก ฉ.2) พบว่า เส้นถดถอยแบบ เส้นตรง

(Linear Regression Line) ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ Avg.S_u ของดินแข็งได้เหมาะสมกว่าสมการกำลังสองขึ้นไป โดยพิจารณาจากค่า Coefficient of Determination (R²) ซึ่งค่า R² ของ เส้นถดถอยแบบ เส้นตรงมีค่ามากกว่าสมการกำลังสองขึ้นไป สมการเส้นถดถอยที่คำนวณได้ คือ

$$\alpha = 1.075989 - 0.037256 \text{ Avg.S}_u \quad (4.1)$$

$$R^2 = 0.4096$$

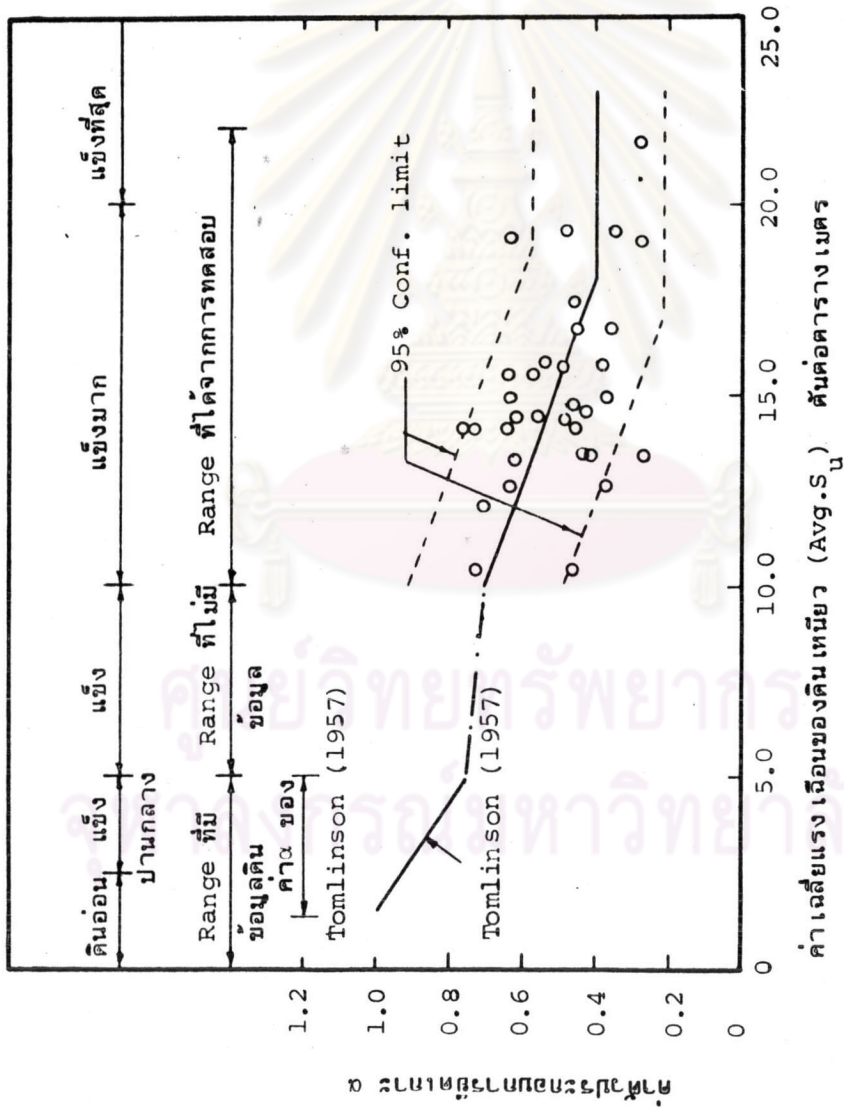
Standard error, S = ± 0.10713

และ 95 % Conf. Limit, S_{95%} = ± 0.2143

(สมการที่ 4.1 Range ของ Avg.S_u อยู่ระหว่าง 10.0 ดันต่อตารางเมตรถึง 20.0 ดันต่อตารางเมตร)

ในรูปที่ 4.6 แสดงจุดที่พล็อตระหว่างค่า α กับ Avg.S_u และเส้น Curve ที่ทำได้จะสังเกตเห็นได้ว่าค่า α แปรตามค่า Avg.S_u ซึ่งค่า Avg.S_u เพิ่มขึ้น ค่า α จะน้อยลง (เมื่อ Avg.S_u มีค่า 10.0 และ 18.0 ดันต่อตารางเมตร α มีค่า 0.7 และ 0.4 ตามลำดับ) และค่า Avg.S_u มากกว่า 18.0 ดันต่อตารางเมตร ค่า α ที่คำนวณได้จากสมการ 4.1 ได้ค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ยของ α ที่มี Range ของ S_u ระหว่าง 19.0 ถึง 20.0 ดันต่อตารางเมตร (จากข้อมูล 5 จุด ได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.40) จึงได้ปรับแก้เส้น Curve ในช่วงที่ค่า Avg.S_u มากกว่า 18.0 ดันต่อตารางเมตรขึ้นไป โดยให้ α เท่ากับ 0.40 (ตัวอย่างแสดงการคำนวณหาค่า α ในดินแข็งดูได้ในภาคผนวก ฉ.1)

อนึ่งค่า Coefficient of Determination (R²) ของเส้น Curve ที่หาได้มีค่า 0.4096 (จากสมการ 4.1) ซึ่ง R² อาจจะน้อยไป สาเหตุเนื่องมาจากข้อมูลที่ได้กระจัดกระจายมาก (Scatter) แต่อย่างไรก็ตาม เส้น Curve ที่หาได้นี้จะใช้คำนวณแรงเสียดทานของเสาเข็มในส่วนที่เป็นดินแข็งได้ถูกต้องเพียงใด จะทดสอบด้วยการใช้คำนวณค่าน้ำหนักบรรทุกของ เสา เข็ม เปรียบ เทียบกับค่าน้ำหนักบรรทุก เสา เข็มจากการทดสอบว่า ค่าที่



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการยึดเกาะกับค่าเฉลี่ยแรงเฉือนของดินเหนียว
 ในชั้นดินกรุงเทพฯ ที่ได้จากการทดสอบเสาเข็ม (ชั้นดินแข็งที่ใช้ในการวิจัยเกี่ยวกับที่ความลึก
 ระหว่าง 13.0 เมตร ถึง 30.0 เมตร)

คำนวณได้จะต่างจากการทดสอบใน Range ที่ยอมรับได้หรือไม่ (โดยทั่วไปผิดพลาดได้ไม่เกิน ± 20 เปอร์เซ็นต์)

การคำนวณน้ำหนักบรรทุกของ เส้า เข็มในชั้นดิน เหนียวแข็ง

ค่าแรงเสียดทานของ เส้า เข็มในส่วนที่ฝังในชั้นดินแข็ง คัดจากค่าเฉลี่ยของแรงเฉือนของดิน ($Avg. S_{u}$) ตลอดความหนาของชั้นดิน เหนียวแข็งถึงระดับปลาย เส้า เข็ม (ไม่ว่าความลึกของชั้นดิน เหนียวแข็งจะ เท่าใดก็ตาม) แล้วจึงหาค่า α จากรูปที่ 4.6 (ไม่ใช่แบ่งชั้นดินเป็นชั้นเล็ก ๆ แล้วหาค่า α ของแต่ละชั้น) ส่วนการคำนวณแรงเสียดทานของเส้าในชั้นดิน เหนียวอ่อน และดิน เหนียวแข็งปานกลางชั้นบน รวมทั้งแรงดันที่ปลายของ เส้า เข็มใช้วิธีการคำนวณ เช่น เดียวกันกับที่ได้กล่าวไว้ในข้อ 4.3.1 ผลการคำนวณน้ำหนักบรรทุกของ เส้า เข็มจำนวน 34 ต้น แสดงไว้ในตารางที่ ฉ.2 ภาคผนวก ฉ.3

อนึ่ง เมื่อคำนวณกำลังรับน้ำหนักของ เส้า เข็ม โดยแบ่งชั้นดินแข็งออกเป็นชั้นเล็ก ๆ ก็มิได้ให้ค่ากำลังรับน้ำหนักของ เส้า เข็มต่างไปจากวิธีที่กล่าวข้างต้นนี้มากนัก ดังตัวอย่างที่แสดงต่อไปนี้

ตัวอย่างการคำนวณน้ำหนักบรรทุกของ เส้า เข็มที่ฝังในชั้นดิน เหนียว

เส้า เข็ม เลขที่ 26 งานก่อสร้างทางด่วน

สถานที่ทดสอบ ใกล้ถนนพระราม 4 (บ่อนไก่) กทม.

ใกล้หลุมเจาะสำรวจดิน Boring No. RM2 Section DinDaeng-Port. CHAINAGE 5+635

ชนิดและขนาด เส้า เข็ม เข็ม ค.อ.ร. ϕ 0.60 เมตร

พื้นที่หน้าตัดปลาย เข็ม 0.157 ตาราง เมตร

ระดับปลาย เข็ม -25.00 เมตรจากผิวดิน

ค่าน้ำหนักบรรทุกประลัย ที่ทดสอบได้ 225 ตัน

- ก. คำนวณโดยการเฉลี่ยค่าแรงเฉือนของดินตามความแข็งของดิน แล้วหาค่า α โดยใช้ค่าเฉลี่ยแรงเฉือน (คุณสมบัติของดินอยู่ในภาคผนวก ค ประกอบ)

1. ดินเหนียวอ่อน (Soft clay) ความลึกของชั้นดินจากผิวดิน -13.00 เมตร

ระดับลึกจากผิวดิน (เมตร) 3.0 4.0 6.0 8.0 10.0 12.0 13.0

S_u (ตันต่อตารางเมตร) 1.50 2.00 2.60 1.50 1.80 1.90 2.0

l_n (เมตร) 3.5 1.5 2.0 2.0 2.0 1.5 0.5

$$\text{Avg. } S_u = \frac{\sum_{n=1}^n S_{un} l_n / \sum_{n=1}^n l_n}{n} = \frac{(1.5 \times 3.5 + 2.0 \times 1.5 + 2.6 \times 2.0 + 1.5 \times 2.0 + 1.8 \times 2.0 + 1.9 \times 1.5 + 2.0 \times 0.5)}{(3.5 + 1.5 + 2.0 + 2.0 + 2.0 + 1.5 + 0.5)} = 1.84 \text{ ตันต่อตารางเมตร}$$

2. ดินเหนียวปานกลาง (Medium clay) ความลึกของชั้นดินจาก -13.00 เมตรถึง -15.50 เมตร

ระดับลึกจากผิวดิน (เมตร) 13.0 14.0 15.0 15.50

S_u (ตันต่อตารางเมตร) 2.00 2.50 3.00 3.20

l_n (เมตร) 0.5 1.0 0.75 0.25

$$\text{Avg. } S_u = \frac{(2.0 \times 0.5 + 2.5 \times 1.0 + 3.0 \times 0.75 + 3.2 \times 0.25)}{(0.5 + 1.0 + 0.75 + 0.25)} = 2.62 \text{ ตันต่อตารางเมตร}$$

3. ชั้นดินแข็ง ความลึกของชั้นดินจาก -15.50 เมตร ถึงระดับปลายเข็ม -25.0 เมตร

ระดับลึกจากผิวดิน (เมตร) 15.5 17.2 18.6 20.3 21.6 23.3 25.0

N(SPT) blows per foot 15 28 18 17 30 35 35

l_n (เมตร) 0.85 1.55 1.55 1.50 1.50 1.70 0.85

ประเภทของดิน CH CH CH CH CL CH CH

S_u (ตันต่อตารางเมตร) 10.30 19.24 12.36 11.68 15.50 24.05 24.05

$$\text{Avg. } S_u = \frac{\sum_{n=1}^n S_{un} l_n / \sum_{n=1}^n l_n}{n} = \frac{159.83}{9.50} = 16.82 \text{ ตันต่อตารางเมตร}$$

คำนวณค่าการรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็ม

$$\begin{aligned} \text{แรงเสียดทานในชั้นดินอ่อน} \quad Q_{s1} &= \alpha \text{Avg. } S_u \ell_p = 0.96 \times 1.84 \times 13.00 \times 1.885 \\ &= 43.28 \text{ ตัน} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แรงเสียดทานในชั้นดินแข็งปานกลาง} \quad Q_{s2} &= 0.91 \times 2.62 \times 2.50 \times 1.885 \\ &= 11.23 \text{ ตัน} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แรงเสียดทานในดินแข็งถึงแข็งมาก} \quad Q_{s3} &= 0.45 \times 16.82 \times 9.50 \times 1.885 \\ &= 135.54 \text{ ตัน} \end{aligned}$$

$$\text{รวมแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม} = 190.05 \text{ ตัน}$$

$$\text{แรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม} = Q_p = 9 S_{u p} A = 9 \times 24.05 \times 0.157 = 33.98 \text{ ตัน}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{น้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม} &= \Sigma Q_s + Q_p = 190.05 + 33.98 \\ &= 224.03 \text{ ตัน} \end{aligned}$$

หมายเหตุ -ดินแข็งประเภท CH, $q_u = 1.374 \text{ N}$ ตันต่อตาราง เมตร

-ดินแข็งประเภท CL, $q_u = 1.035 \text{ N}$ ตันต่อตาราง เมตร

-ใช้ค่า α จากรูปที่ 4.6

ข. ตัวอย่างการคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม โดยใช้ α กับชั้นดินเล็ก ๆ

เสาเข็ม เลขที่ 26

แรงเสียดทานของ เสาเข็ม

1. ดินอ่อน

ระดับลึกจากผิวดิน (เมตร) 3.0 4.0 6.0 8.0 10.0 12.0 13.0

S_u (ตันต่อตาราง เมตร) 1.5 2.0 2.6 1.5 1.8 1.9 2.0

α (จากรูปที่ 4.6) 0.99 0.95 0.91 0.99 0.97 0.96 0.95

ℓ_n 1.0 2.0 2.0 2.0 2.0 1.0

αS_u (ตันต่อตาราง เมตร) 1.48 1.90 2.37 1.48 1.75 1.82 1.90

$$Q_{s1} = \int_0^l \alpha S_u pdl = [1.48 \times 3.0 + \frac{1}{2}(1.48+1.90) \times 1.0 + \frac{1}{2}(1.90+2.37) \times 2.0 + \frac{1}{2}(2.37+1.48) \times 2.0 + \frac{1}{2}(1.48+1.75) \times 2.0 + \frac{1}{2}(1.75+1.82) \times 2.0 + \frac{1}{2}(1.82+1.90) \times 1.0] \times 1.885$$

$$= 43.18 \text{ ตัน}$$

2. ดินแข็งปานกลาง

ระดับลึกจากผิวดิน (เมตร)	13.0	14.0	15.0	15.5
S_u (ตันต่อตาราง เมตร)	2.0	2.50	3.0	3.2
α (จากรูปที่ 4.6)	0.95	0.82	0.88	0.87
l_n (เมตร)	-	1.0	1.0	0.5 -
αS_u (ตันต่อตาราง เมตร)	1.90	2.05	2.64	2.78

$$Q_{s2} = \int_0^l \alpha S_u pdl = [\frac{1}{2}(1.90+2.05) \times 1.0 + \frac{1}{2}(2.05+2.64) \times 1.0 + \frac{1}{2}(2.64+2.78) \times 0.5] \times 1.885$$

$$= 10.70 \text{ ตัน}$$

3. ดินแข็งถึงแข็งมาก

ระดับลึกจากผิวดิน (เมตร)	15.5	17.2	18.6	20.3	21.6	23.3	25.0
N(SPT) blows per foot	15	28	18	17	30	35	35
l_n (เมตร)	1.70	1.40	1.70	1.30	1.70	1.70	
ประเภทของดิน	CH	CH	CH	CH	CL	CH	CH
S_u (ตันต่อตาราง เมตร)	10.30	19.24	12.36	11.68	15.50	24.05	24.05
α (จากรูปที่ 4.6)	0.69	0.40	0.62	0.64	0.50	0.40	0.40
αS_u (ตันต่อตาราง เมตร)	7.10	7.70	7.66	7.47	7.75	9.62	9.62

$$Q_{s3} = \int_0^l \alpha S_u pdl = 1.885 [\frac{1}{2}(2.78+7.70) \times 1.70 + \frac{1}{2}(7.70+7.66) \times 1.40 + \frac{1}{2}(7.66+7.47) \times 1.70 + \frac{1}{2}(7.47+7.75) \times 1.30 + \frac{1}{2}(7.75+9.62) \times 1.70 + \frac{1}{2}(9.62+9.62) \times 1.70]$$

$$= 138.60 \text{ ตัน}$$

แรงต้านทานที่ปลายเข็ม

$$\begin{aligned}
 \text{จากสูตร } Q_p &= 9s_u A_p \\
 &= 9 \times 24.05 \times 0.157 \\
 &= 33.98 \text{ ตัน}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{กำลังรับน้ำหนักของ เสา เข็มทั้งหมด} &= Q_{s1} + Q_{s2} + Q_{s3} + Q_p \\
 &= 43.18 + 10.70 + 138.60 + 38.98 \\
 &= 226.46 \text{ ตัน}
 \end{aligned}$$

หมายเหตุ จะสังเกตได้ว่า เมื่อคิดค่า adhesion (αs_u) ของดินด้วยการใช้ค่า α กับชั้นดินแบ่งเป็นชั้นเล็ก ๆ ในตัวอย่าง ข. ค่ารวมกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของ เสา เข็มได้ไม่ต่างไปจากวิธีการคำนวณโดยการเฉลี่ยค่าแรงเฉือนของดิน เป็นชั้นดินอ่อน แข็งปานกลางและแข็งมาก ในตัวอย่าง ก.

การเปรียบเทียบผลการคำนวณน้ำหนักบรรทุกทุกของ เสา เข็มกับผลการทดสอบในสนาม

ผลการ เปรียบ เทียบค่าน้ำหนักบรรทุกทุกของ เสา เข็มในดินแข็งที่คำนวณโดยใช้ค่า α ที่หาได้ (รูปที่ 4.6) กับผลการทดสอบเสาเข็มจำนวน 34 ต้น ด้วยเส้นถดถอยแบบเส้นตรง (Linear Regression Analysis) ได้สมการ เส้นถดถอยอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกจากการทดสอบกับค่าที่คำนวณได้ คือ

$$Q_{me} = 0.93728 Q_{cal} \quad (4.2)$$

$$\text{และ } R^2 = 0.9854$$

เมื่อ Q_{me} = ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกของ เสา เข็มจากการทดสอบ

Q_{cal} = ค่ากำลังรับน้ำหนักของ เสา เข็มที่คำนวณได้

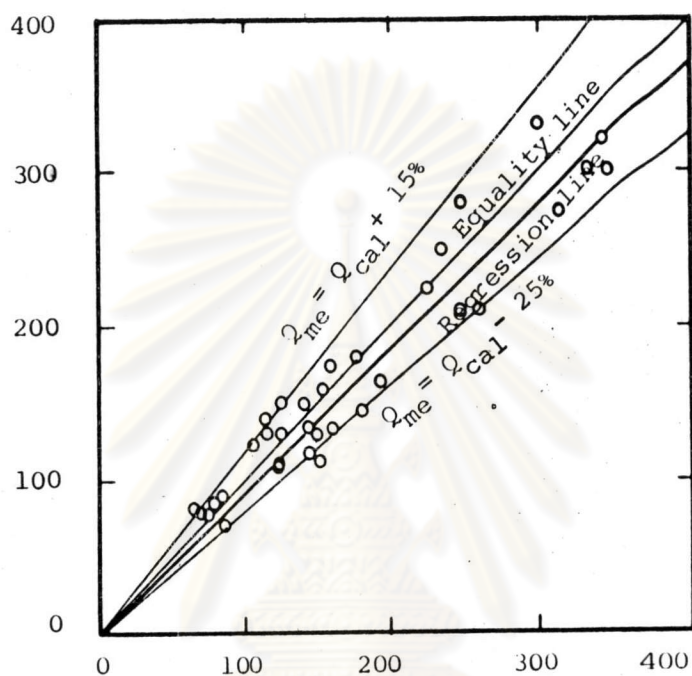
พิจารณาสมการที่ 4.2 จะพบว่าค่าการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่คำนวณได้ ทั้ง 34 ต้น ให้ค่าใกล้เคียงกับการทดสอบมาก ซึ่งสมการ เส้นถดถอยโมเดล $y = bx$ ค่าพารามิเตอร์ b ที่คำนวณได้ก็ใกล้เคียงกับ 1.0 และค่า Coefficient of Determination (R^2) มากกว่า 0.80

รูปที่ 4.7 แสดงการ เปรียบ เทียบระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกของ เสา เข็มที่คำนวณได้ กับค่าน้ำหนักบรรทุกจากการทดสอบ จะสังเกตได้ว่าค่าน้ำหนักบรรทุกที่คำนวณได้น้อยกว่าค่าน้ำหนักบรรทุกจากการทดสอบไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ (ส่วนมากจะมากกว่าตามสมการ 4.2) และมากกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ของค่าที่ทดสอบเพียง 2 ต้นเท่านั้น ซึ่งรายละเอียดของค่าน้ำหนักบรรทุกที่คำนวณผิดพลาดจากการทดสอบ สรุปไว้ในตารางข้างล่างนี้

ค่าผิดพลาดในช่วง	จำนวน เสาเข็ม ต้น	เสา เข็มทั้งหมด ต้น .	หมายเหตุ
± 10 เปอร์เซ็นต์	16	34	- เสา เข็ม เลขที่ 10 คำนวณ
$\pm (10-20)$ เปอร์เซ็นต์	14		ได้มากกว่าค่าทดสอบ 36.55
$\pm (20-25)$ เปอร์เซ็นต์	2		เปอร์เซ็นต์
$\pm (25-30)$ เปอร์เซ็นต์	1		- เสา เข็ม เลขที่ 31 คำนวณ
มากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์	1		ได้มากกว่าค่าทดสอบ 28.3
			เปอร์เซ็นต์

ผลการคำนวณน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มจำนวน 34 ต้น ให้ค่าต่างจากผลการทดลองไม่เกิน ± 20 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 30 ต้น คิดเป็นร้อยละ 88.23 สรุปได้ว่า ค่าตัวประกอบการยึดเกาะ (Adhesion Factor) ของดินเหนียวแข็งที่คำนวณหาได้จากการทดลอง เสา เข็มจำนวน 34 ต้น ใช้ประมาณค่าแรงยึด เกาะ ($\text{Adhesion} = \alpha S_u$) ระหว่างดินกับ เสา เข็มของดินเหนียวแข็งชั้นแรกในชั้นดินกรุงเทพฯ ได้ผลใกล้เคียงกับค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยที่ทดลองได้ในสนาม

กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสา เข็ม ได้จากการทดสอบ (ตัน)



กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสา เข็ม ได้จากการคำนวณ (ตัน)

รูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสา เข็ม ระหว่างการคำนวณกับผลการทดสอบ (ปลาย เข็มอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง จำนวน 34 ต้น)

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สรุปค่าตัวประกอบการยึดเกาะ (Adhesion Factor) ของดินเหนียวที่ใช้คำนวณแรงเสียดทานของเสาเข็มตอกในเขตกรุงเทพฯ ตามสภาพของดิน ดังต่อไปนี้

สภาพดิน	ค่าเฉลี่ยแรงเฉือนของดิน หน่วยเป็นตันต่อตารางเมตร (Avg. S_u)	ค่าตัวประกอบการยึดเกาะ (Adhesion Factor)
อ่อนมาก	<1.00	1.0
อ่อน	1.00-2.50	1.0-0.92
แข็งปานกลาง	2.50-5.00	0.92-0.75
แข็ง	5.00-10.00	0.75-0.70
แข็งมาก	10.00-18.00	0.70-0.40
	18.00-20.00	0.40
แข็งที่สุด	>20.00	0.40

หมายเหตุ รูปที่ 4.6 ประกอบ

4.3.3 การเปรียบเทียบค่าตัวประกอบการยึดเกาะ (Adhesion Factor α)

ที่ทำได้กับข้อมูลที่มีอยู่แล้ว

ค่า α ที่คำนวณหาได้จากการทดสอบเสาเข็มตอกจำนวน 34 ต้น ในบริเวณกรุงเทพฯ นี้ เปรียบเทียบกับค่า α ที่เสนอโดย Holmberg (1970) Tomlinson (1957 และ 1970) และ Peck (1958) ดังต่อไปนี้

4.3.3.1 เปรียบเทียบกับค่า α ที่เสนอโดย Holmberg (1970)

เส้น Curve ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ Avg. S_u เสนอโดย Holmberg (1970) (รูปที่ 4.8) และรูปที่ 4.9 แสดงเส้น Curve ทั้งของ Holmberg และที่คำนวณได้ จะพบว่าเส้น Curve ของ Holmberg ให้ค่า α น้อยกว่าเส้น Curve ที่หามาได้ ยกเว้นที่ค่า Avg. S_u มากกว่า 18.0 ตันต่อตารางเมตร เส้น Curve ทั้งสองมีค่า α เกือบจะเท่ากัน (ค่า α ประมาณ 0.40) ซึ่งรายละเอียดของเส้น Curve ของ

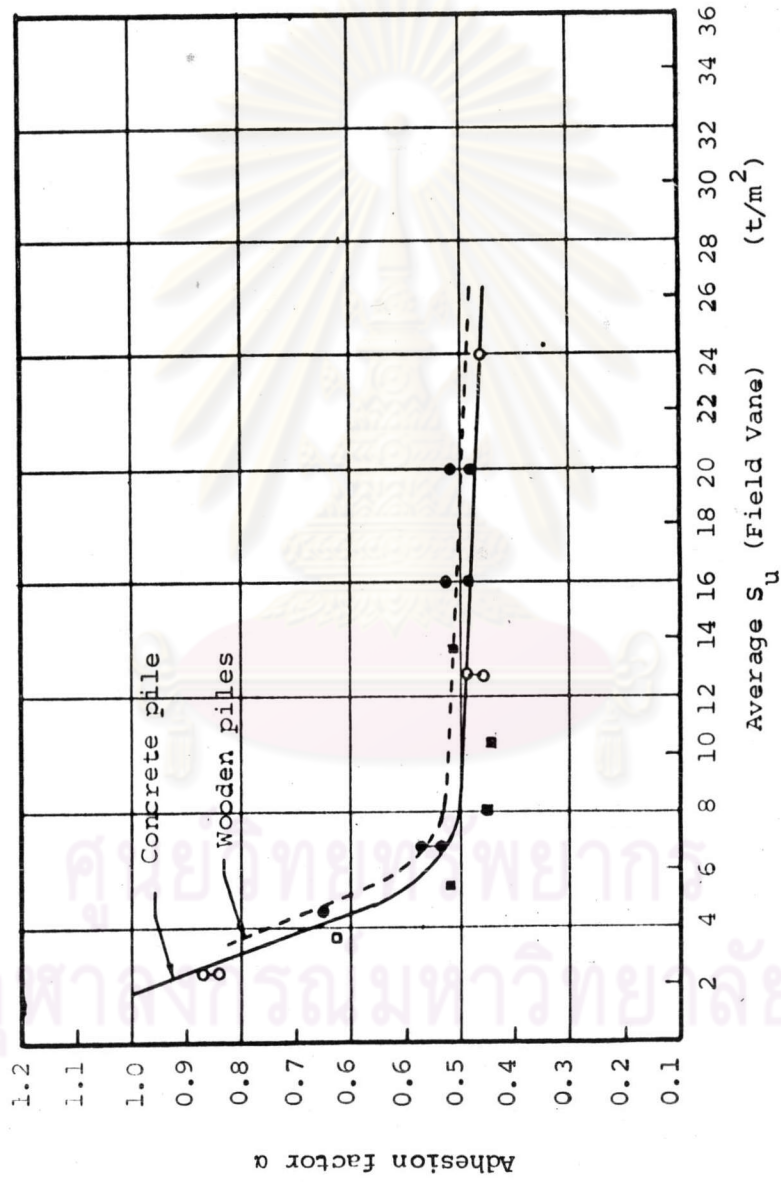
Holmberg กับที่คำนวณได้มีดังต่อไปนี้

1. ลักษณะของชั้นดิน Holmberg คำนวณหาค่า α จากการทดสอบเสาเข็มของงานสร้างสะพานสายบางปะอิน-อยุธยา หน่วยงานที่ทดสอบเสาเข็มอยู่ห่างจากกรุงเทพฯ ประมาณ 54 กิโลเมตร (ทางทิศเหนือ) จากเอกสารข้อมูลสภาพดินของ ว.ส.ท. (EIT. DATA 1001-20) ได้จัดดินในเขตจังหวัดอยุธยา เป็นดินตะกอนในลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา เช่นเดียวกับชั้นดินในเขตกรุงเทพฯ แต่ชั้นดินเหนียวแข็งในอยุธยาอยู่ตื้นกว่าชั้นดินเหนียวแข็งในกรุงเทพฯ (พบที่ระดับความลึกประมาณ -7.00 เมตร จากระดับน้ำทะเลกลาง ส่วนชั้นดินเหนียวแข็ง ใน เขตกรุงเทพฯ พบที่ระดับประมาณ -15.00 เมตร จากระดับน้ำทะเลกลาง)

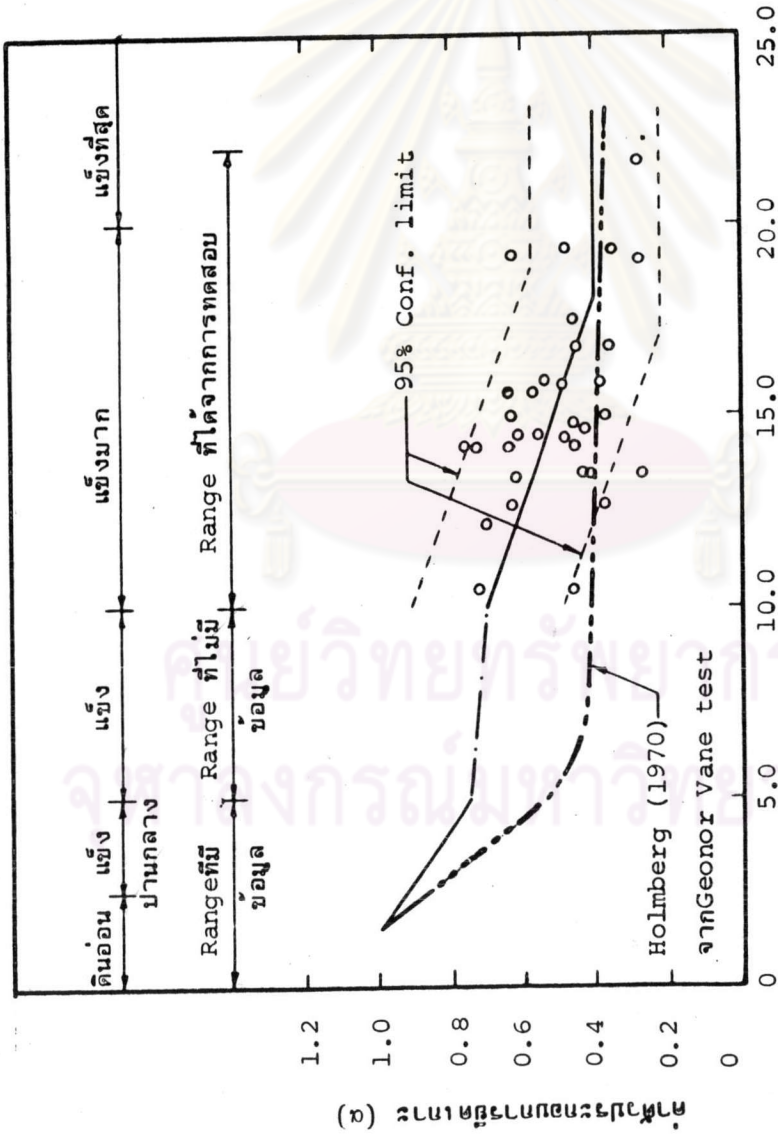
2. การคิดค่าแรงเฉือนของดินเหนียว Holmberg คิดค่าเฉลี่ยแรงเฉือนของดินตลอดความหนาตามสภาพของชั้นดิน (แบ่ง เป็นดินอ่อน ดินแข็งปานกลางและดินแข็ง) จนถึงระดับปลายเสาเข็ม และเสาเข็มที่ใช้ทดลองมีความยาวต่างกัน ทำให้ได้ค่า α ของแต่ละชั้นดินที่ถูกแบ่งด้วยระดับของปลาย เสาเข็มที่อยู่ในชั้นดินต่างกัน (จัดตำแหน่งของเสาเข็ม 3 ต้นแบบ Triangular Pattern แต่ละต้นห่างกัน 2.3 เมตร) ส่วนค่าแรงเฉือนที่ใช้ในการคำนวณหาค่า α ได้จากการวัดด้วย Geonor field vane (วัดโดยการหมุนใบมีมาตรฐานที่จมอยู่ในเนื้อดินบริเวณที่ต้องการหาค่า) ในงานวิจัยนี้คิดค่าเฉลี่ยแรงเฉือนของดินจากการวัดกำลังอัดของดินโดยไม่ถูกจำกัด (Unconfined shear strength) ตลอดความยาวของเสาเข็มที่ฝังอยู่ในแต่ละสภาพของชั้นดิน โดยแบ่งชั้นดินเหนียวเป็น ดินอ่อน ดินแข็งปานกลางและดินแข็งถึงแข็งมาก

3. การหาค่าวิสัยสามารถรับแรงต้านทานประลัยของเสาเข็ม (Ultimate Bearing Load) จากการทดลอง Holmberg ทำการทดลองเสาเข็มโดยแยกส่วนทดลองการรับแรงเสียดทานและแรงต้านทานที่ปลายเข็มเพียง 1 ต้น ได้ข้อสรุปว่าค่าแรงเสียดทานของเสาเข็มมากที่สุด เมื่อค่าทรุดตัวที่หัวเสาเข็มวัดได้ประมาณ 5 มิลลิเมตร และการทดลองวัดแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มเพียงอย่างเดียว เมื่อค่าทรุดตัววัดที่หัวเสาเข็มได้ 5 มิลลิเมตรนี้มีค่า เท่ากับ 35-40 เปอร์เซ็นต์ของแรงต้านทานประลัยที่ปลายเข็ม ($Q_p = 10 \frac{S_u A_p}{u_p}$) เสาเข็มที่ใช้ทดสอบตามที่กล่าวข้างต้น เป็นเสาเข็มคอนกรีตรูปแปดเหลี่ยมกลวง ด้านกว้างของเสาเข็มเท่ากับ 58 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกลวงเท่ากับ 38 เซนติเมตร จากผลการทดสอบที่วัดได้นี้

SOREN HOLMBERG



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง α กับ S_u เสนอโดย Holmberg (1970)



(ข) มาตรฐานดินก่อนระเบิด

ค่าเฉลี่ยแรงเฉือนของดิน (Avg. S_u) ต้นต่อตาราง เมตร

รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบเส้น Curve ความสัมพันธ์ระหว่าง α กับ Avg. S_u ที่หาได้กับที่เสนอโดย Holmberg (1970)

Holmberg จึงตั้งสมมติฐานว่า เสาค้ำจะรับแรงเสียดทานเต็มที่ (Full Mobilized) เมื่อค่าการทรุดตัววัดได้ที่หัวเสาค้ำประมาณ 5 มิลลิเมตร และแรงดันที่ปลายเสาค้ำมีค่าประมาณ $0.37 Q_p$ จึงใช้หลักการนี้ในการแยกค่าแรงเสียดทานและแรงดันที่ปลายเสาค้ำของเสาค้ำต้นอื่น ๆ ที่ทดสอบในสนาม ส่วนในงานวิจัยนี้คิดค่าแรงดันทานประลัย (Ultimate Bearing Load) ของเสาค้ำที่รับได้ จากน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้ค่าอัตราการทรุดตัวของเสาค้ำเพิ่มขึ้นจนไม่สามารถเพิ่มน้ำหนักบนหัวเสาค้ำได้อีก และสมมติให้แรงดันที่ปลายเสาค้ำ (Q_p) มีค่าเท่ากับ $9 S_{u p}$ เมื่อเอาไปลบออกจากน้ำหนักบรรทุกประลัยที่วัดได้ ก็จะได้ค่าแรงเสียดทานสูงสุดของเสาค้ำ

เนื่องจากการวิจัยนี้หาค่าแรงดันทานที่ปลายเสาค้ำมากกว่าที่ทำโดย Holmberg (1970) แต่กลับให้ค่า adhesion factor สูงกว่า แสดงว่าค่า α จะขึ้นอยู่กับวิธีการทดสอบหา S_u มาก ค่า α สำหรับ Geonor Vane Shear จะน้อยกว่าค่า α สำหรับการทดสอบแบบ Unconfined compression และถ้าคิดแรงดันทาน $Q_p = 9 S_{u p}$ โดยไม่เอา 0.37 คูณเข้าไปแล้ว ค่า α สำหรับ Geonor field vane จะต้องน้อยกว่านี้

อีกสาเหตุหนึ่งที่ค่า α ของ Holmberg (1970) ต่ำกว่าอาจเป็นเพราะดินที่อยู่รอบๆ จะมีค่า OCR สูงกว่าดินที่กรุงเทพฯ

4.3.3.2 เปรียบเทียบค่า α ที่หาได้กับค่า α ที่เสนอโดย Tomlinson (1957 และ 1970)

เส้น Curve ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ Avg. S_u ที่เสนอโดย Tomlinson (1957) แสดงในรูปที่ 4.10 จะสังเกตได้ว่าค่า α ที่หาได้ในชั้นดินแข็ง (Avg. S_u มากกว่า 10.0 ถึง 17.0 ดันต่อตารางเมตร) มีค่าสูงกว่าของ Tomlinson (1957) และค่า α จะเท่ากันเมื่อค่า Avg. S_u มากกว่า 17.0 ดันต่อตารางเมตร (ค่า α เท่ากับ 0.40) ซึ่งค่า S_u ที่ Tomlinson ใช้คือค่าแรงเฉือนจากการวัดกำลังอัดของดินโดยไม่ถูกจำกัด (Unconfined Shear Strength) เหมือนกับที่ใช้ในงานวิจัยนี้

Tomlinson (1970) เสนอค่า α จากการวิเคราะห์เสาค้ำตอกในชั้นดินเหนียวแข็ง ที่มีดินชั้นบนดินแข็งต่างกัน 3 กรณี คือ

กรณีที่ 1 ดินชั้นบน เป็นทราย และกรวด

กรณีที่ 2 ดินชั้นบน เป็นดินอ่อน (Soft clay or silt)

และ กรณีที่ 3 ไม่มีดินอ่อนหรือทรายบนชั้นดินแข็ง

ซึ่งสภาพของชั้นดินในเขตกรุงเทพฯ เหมือนกับกรณีที่ 2 ค่า α ในกรณีที่ 2 ของ Tomlinson (1970) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Penetration Ratio (PR) มากกว่า 20 ค่า α เท่ากับ 0.70

และ $8 < PR < 20$ ค่า α เท่ากับ 0.40

ค่าเฉลี่ยแรงเฉือนของดินแข็ง (Avg. S_u) มากกว่า 5.0 ดันต่อตารางเมตร และ S_u เป็นค่าแรงเฉือนจากการวัดกำลังอัดของดินโดยไม่ถูกจำกัด (Unconfined Shear Strength) PR คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวของเสาเข็มในส่วนที่จมในดินแข็งต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม (L/B)

Tomlinson (1970) คำนวณค่าแรงเสียดทานของ เสาเข็ม

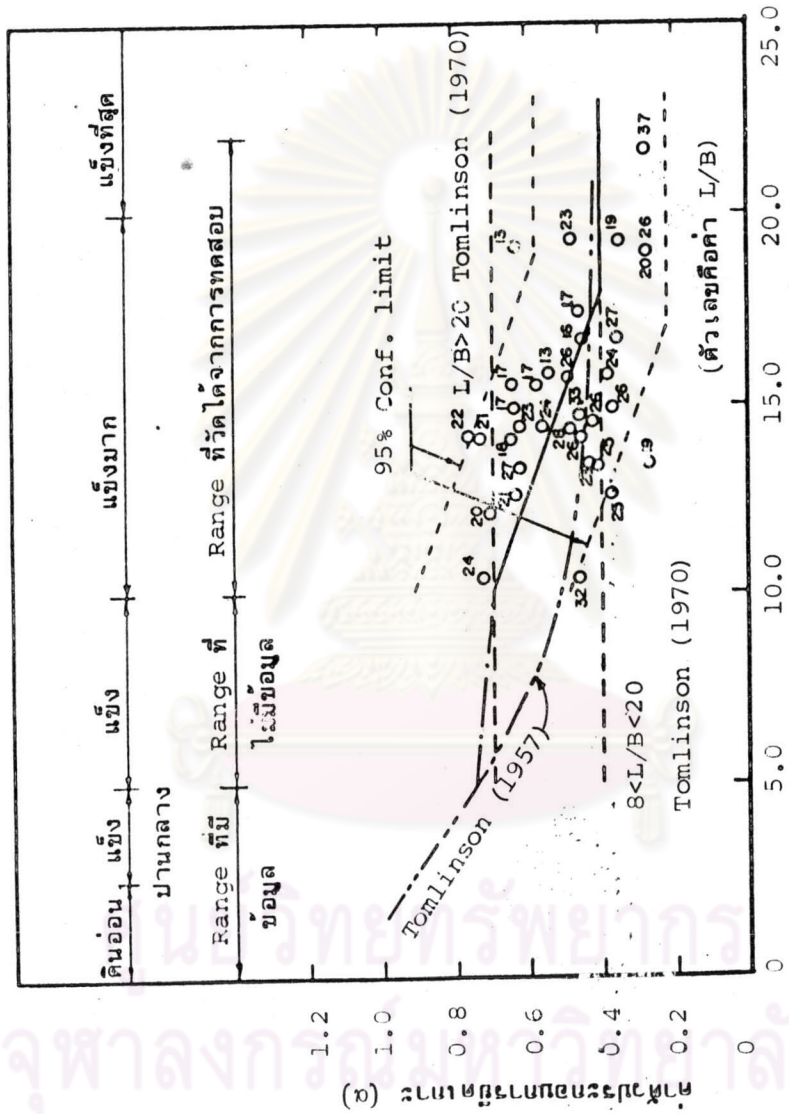
จากสูตร $Q_s = \alpha \text{Avg. } S_u A_s$ โดยใช้ค่า α ของดิน เท่ากับ 1.0 ($\text{Avg. } S_u < 2.5$ ดันต่อตารางเมตร)

พื้นที่ผิวของเสาเข็ม (A_s) คัดจากพื้นที่ของ Soil Block Failure รอบเสาเข็มและแรงต้าน

ทานที่ปลายเข็ม คำนวณจากสูตร $Q_p = 9 S_u A_p$ (ค่า S_u คือค่าแรงเฉือนของดินที่ปลายเข็ม)

ในบทความปี 1970 นี้ Tomlinson กล่าวถึงเส้น Curve ที่เสนอในปี 1957 เมื่อใช้คำนวณน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจะได้ค่ากว่าที่เป็นจริง (Conservative) เพราะข้อมูลเสาเข็มที่ใช้หาค่า α ในขณะนั้นมีจำนวนน้อย และ Range ของ Avg. S_u ต่างกันมาก แต่เส้น Curve ที่เสนอในปี 1970 นี้ จะคำนวณได้ค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มใกล้เคียงกับผลการทดสอบ (น้ำหนักบรรทุกประลัยจากการทดสอบ ใช้ค่าน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เสาเข็มทรุดตัวเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง)

ข้อมูลเสาเข็มจำนวน 34 ต้นในบริเวณกรุงเทพฯ นี้ มีค่า PR (L/B) อยู่ระหว่าง 13 ถึง 20 จำนวน 10 ต้น (PR น้อยที่สุดเท่ากับ 13) และ PR มากกว่า 20 จำนวน 24 ต้น (PR มากที่สุดเท่ากับ 37) ซึ่งค่า PR ของเสาเข็มแต่ละต้นดูในตารางที่ ฉ.1 ภาคผนวก ฉ.2 และรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงเส้น Curve ของความสัมพันธ์ระหว่างค่า σ กับ Avg. S_u ที่เสนอโดย Tomlinson (1957 และ 1970) และเส้น Curve ที่พามาได้จากกรณีวิเคราะห์ผลการทดสอบเสาเข็มตอกในดินกรุงเทพฯ (จำนวน 34 ต้น)

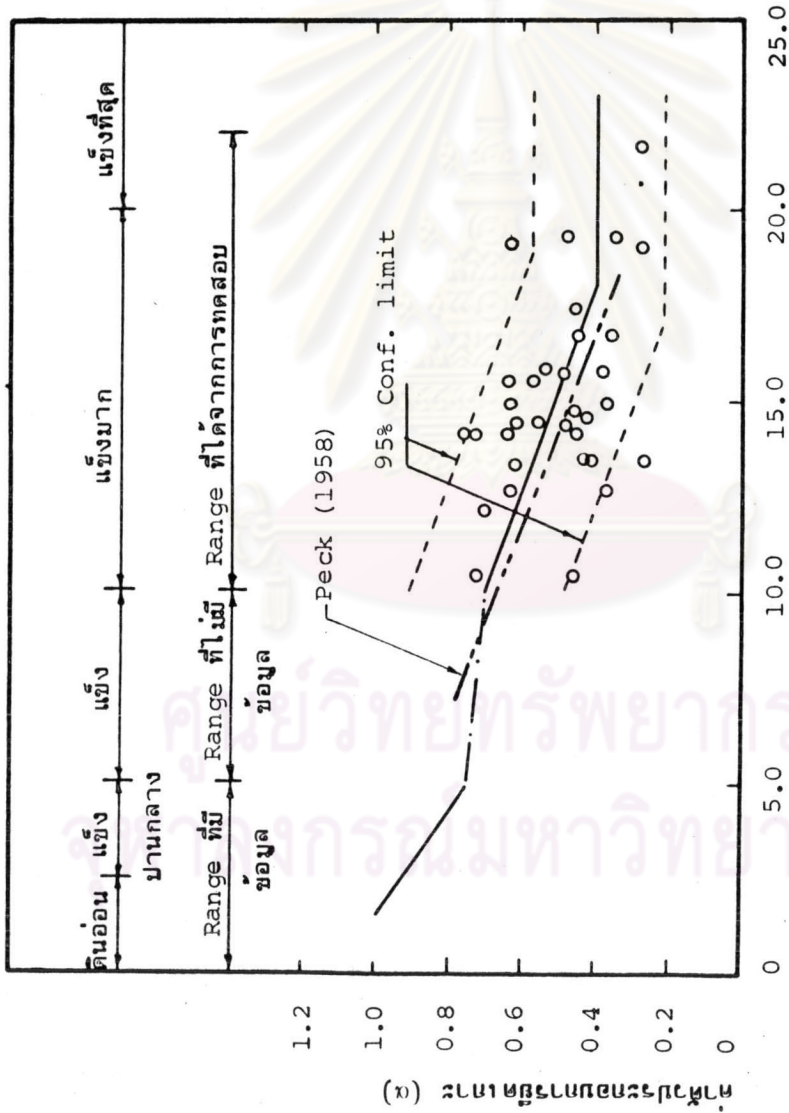
ผลการเปรียบเทียบค่า α ที่คำนวณหาได้กับของ Tomlinson (1970) สรุปไว้ใน ตารางข้างล่างนี้

รายการ	จำนวนเสาเข็ม (ต้น)		จำนวน เป็น เปอร์เซนต์	หมายเหตุ
	$8 < PR < 20$	$PR > 20$		
1. ค่า α เท่ากับของ Tomlinson 6 ต้น	3	3	17.6	จำนวนเสาเข็ม ทั้งหมด 34 ต้น
2. ค่า α น้อยกว่า Tomlinson 21 ต้น	1 ($\alpha=0.27$)	20 ($\alpha=0.28-0.63$)	61.8	
3. ค่า α มากกว่า Tomlinson 7 ต้น	6 ($\alpha=0.54-0.64$)	1 ($\alpha=0.77$)	20.6	

ข้อมูลในตารางจะสังเกตได้ว่า ค่า PR ระหว่าง 8 ถึง 20 ค่า α ที่ทำได้มีแนวโน้มสูงกว่าของ Tomlinson และ PR มากกว่า 20 ค่า α ที่ทำได้จะน้อยกว่า ซึ่งสรุปได้ว่า เมื่อพิจารณาค่า PR แล้ว ค่า α ที่ทำได้ไม่ตรงกับของ Tomlinson (1970) เลยทีเดียว แต่มีค่า α อยู่ระหว่าง 0.70 ถึง 0.40 และอาจสรุปสาเหตุที่ค่า α ไม่เท่ากัน อาจเนื่องจากคุณสมบัติพื้นฐานของดินและประวัติของดินต่างกัน (Tomlinson หาค่า α ของดินแข็งใน ยุโรป)

4.3.3.3 เปรียบเทียบค่า α ที่ทำได้กับค่า α ที่เสนอโดย Peck (1958)

รูปที่ 4.11 แสดงเส้น Curve ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ $Avg.S_u$ ที่ทำได้กับเส้น Curve ของ Peck (1958) ซึ่ง Range ของ $Avg.S_u$ ของเส้น Curve ของ Peck อยู่ระหว่าง 7.0 ดันต่อตารางเมตรถึง 17.0 ดันต่อตารางเมตร จะเห็นได้ว่า เส้น Curve ที่ทำได้ให้ค่า α ใกล้เคียงกับค่า α ที่เสนอโดย Peck ตัวอย่างเช่นค่า $Avg.S_u$ 10 ดันต่อตารางเมตร จากเส้น Curve ของ Peck ได้ค่า α เท่ากับ 0.68 และเส้น Curve ที่ทำได้มีค่า α เท่ากับ 0.70 เมื่อค่า $Avg.S_u$ 17.0 ดันต่อตารางเมตร ค่า α จากเส้น Curve ของ Peck เท่ากับ 0.40 จากเส้น Curve ที่ทำได้มีค่า α เท่ากับ 0.44



ค่าเฉลี่ยกำลัง เชื่อมของดิน เทียบ Avg.S_u (ค้นต่อตารางเมตร)

รูปที่ 4.11 แสดงเส้น Curve ของความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ Avg.S_u ที่เสนอโดย Peck (1958)

และเส้น Curve ที่ทำได้จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบเสาเข็มตอกในดินกรุงเทพฯ (จำนวน 34 ต้น)

และเส้น Curve ของ Peck อยู่ในรูปแบบของสมการเส้นตรง

สรุปการเปรียบเทียบค่า α ที่หาได้จากข้อมูลเสาเข็ม 34 ต้นในเขต กรุงเทพฯ กับค่า α ที่เสนอโดย Holmberg (1970) Tomlinson (1957 และ 1970) และ Peck (1958) พบว่าค่า Avg. S_u 10.0 ถึง 17.0 ตันต่อตารางเมตร ค่า α ที่หาได้ใกล้เคียงกับค่า α ที่เสนอโดย Peck (1958) และแนวโน้มของเส้น Curve ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ Avg. S_u ที่หาได้ให้ค่า α มากกว่าที่เสนอโดย Holmberg (1970) และ Tomlinson (1957) แต่ให้ค่า α น้อยกว่าของ Tomlinson (1970) เมื่อ PR มากกว่า 20 (ค่า α เท่ากับ 0.70) และค่า α มากกว่า เมื่อ PR อยู่ในช่วง 8 ถึง 20 ($8 < PR < 20$ ค่า α เท่ากับ 0.40) ซึ่งดินชั้นบนดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) เป็นดินอ่อน (Soft clay) ตรงกับลักษณะและสภาพของชั้นดินในกรุงเทพฯ อย่างไรก็ตามค่า α ที่หาได้ยังคงอยู่ใน Range ที่เสนอโดย Tomlinson (1970) แต่ค่า α แปรตามกำลังเฉือนของดิน เมื่อกำลังเฉือนของดินมากขึ้น ค่า α จะน้อยลง

4.3.4 เงื่อนไขและขอบเขตของการเอาค่าตัวประกอบการยึดเกาะ (Adhesion Factor) ที่หาได้ไปใช้คำนวณน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

ค่าตัวประกอบการยึดเกาะ (α) ที่คำนวณหาได้จากผลการทดสอบเสาเข็ม จำนวน 34 ต้นในกรุงเทพฯ (รูปที่ 4.6) การเอาไปใช้คำนวณแรงเสียดทานของเสาเข็มด้วยสูตร Static Pile Formula จะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. ใช้กับเสาเข็มคอนกรีตชนิด เข็มตอกทำด้วยคอนกรีตอัดแรงในกรุงเทพฯ
2. ค่าเฉลี่ยแรงเฉือนของดินเหนียว จะต้องใช้ค่าเฉลี่ยจากแรงเฉือนของดินที่วัดได้จากการทดสอบกำลังอัดโดยไม่ถูกจำกัด (Unconfined Shear Strength) ตลอดความหนาของแต่ละสภาพชั้นดิน โดยแบ่งเป็นดินอ่อน (Soft clay) ดินแข็งปานกลาง (Medium clay) และดินแข็งถึงแข็งมาก (Stiff and very stiff clay) ในชั้นดินแข็งใช้ค่าเฉลี่ยแรงเฉือนตลอดความหนาจนถึงระดับปลายเสาเข็ม ไม่ว่าความหนาของชั้นดินเหนียวแต่ละประเภท จะเท่าใดก็ตาม ไม่ใช่แบ่งชั้นดินเป็นชั้นเล็ก ๆ แล้วหาค่า α ของชั้นดินเล็ก ๆ นี้

หมายเหตุ ค่ากำลังอัดของดินโดยไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compressive Strength) ของดินเหนียวแข็ง ใช้ค่าที่วัดได้จากการทดสอบด้วยวงดินหรือคำนวณจากค่า $N(SPT)$ ที่วัดได้ในสนามตามสูตรที่สรุปไว้ในข้อ 4.2

วิธีการคำนวณน้ำหนักบรรทุกทุกเสา เข็มของเสาเข็มเดี่ยวชนิด เข็มตอกทำด้วยคอนกรีตอัดแรงในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรกในชั้นดินกรุงเทพฯ แยกการคำนวณแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม ($Q_s = \alpha \cdot \text{Avg.} S_u A_s$) และแรงดันที่ปลายเสาเข็ม ($Q_p = 9 \cdot S_u \cdot A_p$) ซึ่งค่า α ที่เอาไปใช้คำนวณแรงยึดเกาะ (Adhesion = $\alpha \cdot S_u$) ระหว่างดินกับเสาเข็มแยกตามสภาพดิน ดังนี้

สภาพดิน	ค่าแรงเฉือนของดิน (Avg. S_u) หน่วยเป็นตันต่อตารางเมตร	ค่าตัวประกอบการยึดเกาะ (Adhesion factor)
อ่อนมาก	<1.0	1.0
อ่อน	1.0-2.5	1.0-0.92
แข็งปานกลาง	2.5-5.0	0.92-0.75
แข็ง	5.0-10.0	0.75-0.70
แข็งมาก	10.0-18.0	0.70-0.40
	18.0-20.0	0.40
แข็งที่สุด	>20.0	0.40

(ดูรูปที่ 4.6 แสดงเส้น Curve ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ Avg. S_u ของดินเหนียวในกรุงเทพฯ) และ $Q_{ult} = Q_s + Q_p$ (Q_{ult} = load ที่เพิ่มเข้าไปในเสาเข็มจนเกิด failure)

ค่าน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่คำนวณได้ตามวิธีดังกล่าว เป็นค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม (Ultimate Bearing Load) เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลผลการทดสอบเสาเข็มจำนวน 34 ต้น จะพบว่าค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มที่คำนวณได้ผิดพลาดจากที่ทดลองได้ไม่เกิน ± 20 เปอร์เซ็นต์ และค่าน้ำหนักบรรทุกออกแบบใช้งาน (Design Load) แนะนำให้ใช้ค่าพิภคความปลอดภัย (Factor of Safety) เท่ากับ 2.5 ถึง 3.0 ในกรณีที่ไม่มีความเสียดทานผิวเป็นลบ (Negative Skin Friction) ในดินเหนียวอ่อนสำหรับ Long Term

4.4 การวิเคราะห์หาสูตร Empirical สำหรับคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ตอกเฉพาะในส่วนที่จมอยู่ในดินแข็ง เป็นฟังก์ชันของค่า N

ลักษณะของชั้นดิน เหนียวในชั้นดินกรุงเทพฯ ดินชั้นบน เป็นดินอ่อน ชั้นดินที่ใช้ออกแบบในการรับน้ำหนักของเสาเข็มจึงเป็นชั้นดินเหนียวแข็งที่อยู่ถัดจากชั้นดินอ่อนลงไป จากผลการวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ของค่า $N(SPT)$ กับ q_u ในชั้นดินเหนียวแข็ง (ข้อ 4.2) เพื่อหาค่าแรงเฉือนของดินที่เอาไปใช้ในการคำนวณแรงเสียดทาน และแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มของดินเหนียวแข็ง (ซึ่งได้แยกความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับ q_u ตามประเภทของดินเหนียวจาก Plasticity ของดินเป็นดิน CH และ CL) และจากผลการวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ของค่าตัวประกอบการยึดเกาะของดิน (Adhesion Factor, α) กับค่าแรงเฉือนของดินเหนียวแข็ง (S_u) จากการทดสอบกำลังอัดของดินโดยไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compression Test) ซึ่งทำให้ได้ค่าหน่วยแรงยึดเกาะ (Adhesion = αS_u) ระหว่างดินกับเสาเข็ม จากผลการทดสอบเสาเข็มในสนาม (ข้อ 4.3) จึงเป็นไปได้ที่จะมีความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยเป็นสูตร empirical เอาไปใช้คำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในเฉพาะส่วนของชั้นดินเหนียวแข็งจากค่า N เพียงอย่างเดียว ซึ่งสมการจะอยู่ในรูป $P_u(\text{stiff clay}) = f^N(N)$ และเมื่อ $P_u(\text{stiff clay})$ รวมกับค่าแรงเสียดทานของเสาเข็มในชั้นดินอ่อนและแข็งปานกลาง (จากการคำนวณ ใช้ค่า α ของดินอ่อนและแข็งปานกลางจากรูปที่ 4.6) ก็จะได้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มทั้งหมด (Total Ultimate Load)

ประโยชน์ที่จะได้รับคือ อาจจะช่วยให้ออกแบบเสาเข็มสามารถคาดคะเนกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอกในชั้นดินแข็งชั้นแรกในกรุงเทพฯ ได้รวดเร็วขึ้น (คำนวณจากค่า $N(SPT)$) เพื่อการหาขนาดและความยาวของเสาเข็มตอกและจำนวนเสาเข็ม เพื่อประกอบการตัดสินใจเลือกออกแบบประเภทฐานราก และประมาณราคาก่อสร้างฐานรากในขั้นต้น ในกรณีที่มีลักษณะและสภาพของชั้นดินอื่น ๆ หรือบริเวณใกล้เคียงกับกรุงเทพฯ แต่มีข้อมูลเจาะดินและทดสอบเสาเข็มจำนวนน้อย สูตร empirical อาจจะมีประโยชน์ในการกำหนดขนาดและความยาวของเสาเข็มตอกต้นที่ใช้เพื่อการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม เป็นต้น

4.4.1 วิธีการวิเคราะห์

จากสูตร empirical ที่เสนอโดย Meyerhof (1956) เพื่อใช้คำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของ เสา เข็มตอกในชั้นทราย (Saturated Sand) จากค่า N(SPT) ให้สมการดังนี้

$$P_u = 40N_p A_p + 0.20\bar{N}_s A_s$$

เมื่อ P_u = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของ เสา เข็ม (ไม่รวมน้ำหนักของเสา เข็ม) หน่วย เป็นตัน

N_p = ค่าการทดสอบแรงทะลุมাত্রฐาน N(SPT) ของดินที่ปลายเสา เข็ม หน่วย เป็น blows per foot

\bar{N}_s = ค่าเฉลี่ยของค่าการทดสอบแรงทะลุมাত্রฐานของชั้นดินตลอดความยาวเสา เข็ม หน่วย เป็น blows per foot

A_p = พื้นที่หน้าตัดที่ปลายของ เสา เข็ม หน่วย เป็นตาราง เมตร

A_s = พื้นที่ผิวของ เสา เข็ม หน่วย เป็นตาราง เมตร

Meyerhof วิเคราะห์ได้สูตร empirical จากผลการทดสอบเสา เข็มในสนาม และการ เปรียบ เทียบระหว่าง dynamic และ static penetration test

Bromham และ Styles (1971) สรุปว่า สูตร empirical ที่เสนอโดย Meyerhof (1956) นี้เอาไปใช้คำนวณน้ำหนักบรรทุกทุกของ เสา เข็มในชั้นดินเหนียวแข็งบางแห่ง ได้ผลดี

สำหรับการวิจัยนี้ ได้ใช้วิธีการแบบเดียวกับ Meyerhof (1956) ทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ a และ b สำหรับคำนวณแรงต้านที่ปลายและแรงเสียดทานของ เสา เข็ม จากค่า N ที่วัดได้ในสนาม (ไม่ต้องแก้ไขค่า N) ของชั้นดินเหนียวแข็งในชั้นดินกรุงเทพฯ โดยไม่คำนึงถึง Plasticity ของดินเหนียว โดยอาจตั้งสูตร empirical ดังนี้

$$P_u(\text{stiff clay}) = a N_p A_p + b \bar{N}_s A_s \quad (4.4)$$

เมื่อ a และ b เป็นค่าพารามิเตอร์ของแรงต้านที่ปลายและแรงเสียดทานของ เส้า เข้มตามลำดับ

วิธีการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ a และ b ทำโดยใช้ค่า q_u ที่วัดได้
 ในท้องทดลองหรือคำนวณได้จากค่า N (SPT) ที่วัดได้ในสนามโดยใช้ความสัมพันธ์ในข้อ 4.2 มาคำนวณหน่วยแรงต้านทานที่ปลายเส้า เข้ม (q_p) และหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวของ เส้า เข้ม (q_s)
 คำนวณจากค่าแรงเสียดทาน เฉพาะส่วนที่เป็นดินแข็งหารด้วยพื้นที่ผิวของ เส้า เข้มส่วนที่จมอยู่ในชั้นดินแข็ง (ค่าแรงเสียดทานเฉพาะส่วนที่เป็นดินแข็ง เท่ากับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของ เส้า เข้มจากการทดสอบ ลบด้วยค่าแรงเสียดทานที่ผิวของเส้า เข้มในชั้นดินอ่อน ดินแข็ง ปานกลาง และแรงต้านทานที่ปลาย เข้มจากการคำนวณค่าแรงต้านเหล่านี้ ดูในตารางที่ ฉ.1 ภาคผนวก ฉ.2)

วิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ a และ b ทำได้ดังนี้คือ

1. ค่าพารามิเตอร์ a คำนวณจากค่าเฉลี่ยของ q_p/N_p
 - ค่า q_p คือหน่วยแรงต้านทานที่ปลายเส้า เข้มที่จมอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง โดยคำนวณจากสูตร $q_p = 9 S_u$ (ไม่ต้องรวมค่า γ_L เพราะโดยประมาณจะหักล้างกับน้ำหนักของเส้า เข้ม และค่า P_u ไม่รวมน้ำหนักของเส้า เข้ม)
 - ค่า N_p เป็นค่า N (SPT) ของดิน วัดได้ในสนาม ใช้ค่าเฉลี่ย N ในความหนาของชั้นดิน $\pm B$ จากระดับปลาย เข้ม (B คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง เส้า เข้ม)
2. ค่าพารามิเตอร์ b คำนวณจากค่าเฉลี่ยของ q_s/\bar{N}_s
 - ค่า q_s คือหน่วยแรงเสียดทานหรือแรงยึดเกาะระหว่างดินกับเส้า เข้มของชั้นดินเหนียวแข็ง โดยค่า q_s เท่ากับ $Q_{s(\text{stiff})}$ หารด้วยพื้นที่ผิวของ เส้า เข้มในส่วนที่เป็นดินแข็ง (ค่า $Q_{s(\text{stiff})}$ ใช้ค่า Q_{s3} ในตารางที่ ฉ.1 ภาคผนวก ฉ.2)

- ค่า \bar{N}_s เป็นค่าเฉลี่ยของ $N(SPT)$ ของดินตลอดความหนาของชั้นดินเหนียวแข็งถึงระดับปลายเสาเข็ม ซึ่งในการวัดค่า N ในสนามตามวิธีมาตรฐาน (ASTM Designation: D 1586-64T) กำหนดให้วัดที่ความหนาของชั้นดิน (l) ทุก ๆ 5 ฟุต หรือ 1.50 เมตร ค่า \bar{N}_s จึงคำนวณได้จาก $\bar{N}_s = \frac{\sum_{n=1}^n N_n l_n}{\sum_{n=1}^n l_n}$ เมื่อ N_n เป็นค่า $N(SPT)$ ของชั้นดินชั้นที่ n และ l_n เป็นความหนาของชั้นดินชั้นที่ n เช่นเดียวกัน

การทดสอบสูตร empirical ที่วิเคราะห์ได้ ทำโดยคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มที่คำนวณได้จากสูตร empirical ในส่วนของชั้นดินแข็ง รวมทั้งแรงเสียดทานของเสาเข็มในชั้นดินอ่อนและแข็งปานกลาง (โดยใช้ค่า q_u จากการทดลองและค่าตัวประกอบการยึดเกาะของดิน (α) ในดินอ่อนและดินแข็งปานกลางจากรูปที่ 4.6) เมื่อเทียบกับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากการทดสอบเสาเข็มในสนาม ด้วยเส้นถดถอยแบบเส้นตรงผ่านจุดศูนย์ (Linear Regression Analysis ผ่านจุด Origin) เพื่อตรวจสอบว่า สูตร empirical ที่ทำได้นี้เหมาะสมหรือไม่

4.4.2 สรุปผลการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ a และ b

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ a และ b จากจำนวนเสาเข็ม 31 ต้น ของเสาเข็มที่มีข้อมูลทดสอบที่เก็บมาทั้งหมด 34 ต้น ดูในตารางที่ ฉ.3 ภาคผนวก ฉ.4 (เนื่องจากไม่มีค่า N ตลอดความหนาของชั้นดินเหนียวแข็งของเสาเข็มที่เหลือ 3 ต้น) สรุปค่า a และ b ที่คำนวณได้ ดังต่อไปนี้

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย MEAN	ค่าเบี่ยงเบน VARIANCE	ค่าสูงสุดและต่ำสุด RANGE	จำนวนตัวอย่าง
$a = q_p / N_p$	5.7356	0.9759	4.7597-6.7115	34
$b = q_s / \bar{N}_s$	0.3179	0.0882	0.2297-0.4061	31

นั่นคือสูตร empirical สำหรับคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม เฉพาะในส่วน of ชั้นดินแข็งที่ทำได้คือ

$$P_{ult}(\text{stiff clay}) = 5.75N_p A_p + 0.31\bar{N}_s A_s \quad (4.5)$$

- เมื่อ P_u = กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มสูงสุด (ไม่ต้องรวมน้ำหนักของเสาเข็ม) มีหน่วยเป็นตัน
- N_p = ค่าเฉลี่ย $N(SPT)$ ของดินหนา $\pm B$ ที่ระดับปลายเสาเข็ม หน่วยเป็น blows per foot
(ในกรณีที่ปลายเข็มอยู่ระหว่างค่าทดสอบ SPT และ N มีค่าต่างกันมาก ให้ใช้ค่าที่น้อยกว่า)
- \bar{N}_s = ค่าเฉลี่ยของ $N(SPT)$ ของชั้นดินแข็งตลอดความยาวเสาเข็ม หน่วยเป็น blows per foot
- A_p = พื้นที่หน้าตัดของปลายเสาเข็ม หน่วยเป็นตารางเมตร
- A_s = พื้นที่ผิวประสิทธิผลของเสาเข็ม (สำหรับเสาเข็มรูปตัว I หรือ DH คัดที่เส้นรอบรูปเสาเข็มที่สั้นที่สุด ไม่ได้คิดที่เส้นรอบรูปจริงของหน้าตัดเสาเข็ม) มีหน่วยเป็นตารางเมตร

4.4.3 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของ เสาเข็มระหว่างค่าที่คำนวณได้กับค่าที่ทดสอบได้ในสนาม

การคำนวณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็มในส่วนที่จมอยู่ในดินเหนียวแข็ง

จากสูตร $P_u(\text{stiff clay}) = 5.75N_p A_p + 0.31\bar{N}_s A_s$ รวมกับค่าแรงเสียดทานของเสาเข็มในชั้นดินอ่อนและดินแข็งปานกลาง แสดงในตารางที่ ๑.4 ภาคผนวก ๑.5 เมื่อเทียบกับค่ากำลังรับน้ำหนักสูงสุดของเสาเข็มที่ทดสอบได้ในสนามด้วยเส้นถดถอยแบบเส้นตรง ได้สมการความสัมพันธ์ ดังนี้

$$Q_{\text{measure}} = 0.9096 Q_{\text{calculated}} \quad (4.6)$$

$$R^2 = 0.9758$$

เมื่อ $Q_{\text{measure}} =$ ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของ เสาค้ำที่ทดลองได้
ในสนาม

$Q_{\text{calculated}} =$ ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของ เสาค้ำจากการคำนวณ

หมายเหตุ จำนวนของเสาค้ำที่ใช้วิจัย 31 ต้น

พิจารณาสมการที่ 4.6 จะพบว่า สมการเส้นถดถอยโมเดล $y = kx$

($y = Q_{\text{measured}}$ และ $x = Q_{\text{calculated}}$) พารามิเตอร์ k มีค่าเท่ากับ 0.9096 ซึ่ง
ยังคงน้อยกว่า 1.0 (ค่ากำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาค้ำที่คำนวณได้ จะใกล้เคียงกับค่าที่
ทดสอบมากที่สุด หรือเท่ากับค่าที่ทดสอบ ค่าพารามิเตอร์ k ของสมการเส้นถดถอยแบบเส้นตรง
ผ่านจุดศูนย์ จะต้องมามีค่าเท่ากับ 1.0) เพื่อให้ค่ากำลังรับน้ำหนักของเสาค้ำที่คำนวณได้ใกล้
เคียงกับค่าทดสอบได้ในสนามมากยิ่งขึ้น จึงต้องปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ a และ b จากสมการ
ที่ 4.5 ด้วยวิธีการ Trial and Error ดังต่อไปนี้

- พิจารณาค่าแรงต้านที่ปลายเสาค้ำ (Q_p) ที่คำนวณได้จาก $Q_p =$
 $5.75N_{p p}$ (ดูในตารางที่ ฉ.4) เมื่อเทียบกับค่าแรงต้านทานที่ปลายเสาค้ำ จากสูตร
 $Q_p = 9S_{u p}$ (ตารางที่ ฉ.1) จะพบว่ามีค่าต่างกันน้อยมาก และเมื่อคำนึงถึงอัตราส่วน
ระหว่างแรงต้านที่ปลายเสาค้ำกับแรงเสียดทานที่ผิวของเสาค้ำ จะเห็นได้ว่า แรงต้านที่ปลาย
เสาค้ำจะมีค่าประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ของแรงเสียดทานที่ผิวเสาค้ำทั้งหมดจึงยังคงค่าพารามิเตอร์
 $a = 5.75$

- พิจารณาค่าแรงเสียดทานของเสาค้ำ เฉพาะส่วนที่จมอยู่ในชั้นดินเหนียว
แข็งที่คำนวณจากสูตร $Q_{s3} = 0.31\bar{N}_{s s}$ เมื่อรวมกับแรงเสียดทานของเสาค้ำในชั้นดินอ่อนและ
แข็งปานกลาง และแรงต้านที่ปลายเสาค้ำ (ดูในตารางที่ ฉ.4) จะได้ค่ากำลังรับน้ำหนักของ
เสาค้ำต่างจากค่าที่ทดสอบได้มากถึง +34.0 เปอร์เซ็นต์ และน้อยกว่า -24.0 เปอร์เซ็นต์
(ดูรูปที่ 4.12 ก.) จึงควรปรับแก้ที่ค่าพารามิเตอร์ b ในสูตร empirical นี้ ซึ่งจากค่า
เฉลี่ยของ q_s/\bar{N}_s ที่วิเคราะห์ได้จากเสาค้ำจำนวน 31 ต้น มีค่าอยู่ระหว่าง 0.2297-
0.4061 และเมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้ของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาค้ำ
เสาค้ำ (สำหรับดินแข็งคำนวณจากสูตร $P_{u(\text{stiff})} = 5.75N_{p p} + 0.31\bar{N}_{s s}$) กับค่าที่ทดลองได้
ในสนาม ดูสมการที่ 4.6 ($Q_{\text{measure}} = 0.9096 Q_{\text{calculated}}$) แล้ว ค่าพารามิเตอร์ b
ที่ปรับแก้ควรจะเท่ากับ 0.2819 (ได้มาจาก 0.9096×0.31) จึงเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ b

เท่ากับ 0.28 ซึ่งยังเป็นค่าที่อยู่ในระหว่างส่วน เบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย q_s/\bar{N}_s ที่ทำได้ นั่นคือสูตร empirical ที่ได้จากการปรับแก้แล้วจะเป็นในรูปสมการ

$$P_{u(\text{stiff clay})} = 5.75N_{pP} + 0.28\bar{N}_s A_s \quad (4.7)$$

การทดสอบสูตร empirical ที่ปรับแก้แล้ว (สมการที่ 4.7) โดยการคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม (ดูในตารางที่ จ.4) ทั้งหมด (Total ultimate load) เมื่อเทียบกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากการทดสอบในสนามด้วยเส้นถดถอยแบบเส้นตรงผ่านจุดศูนย์ (โมเดล $y = kx$) สมการเส้นถดถอยที่ได้ คือ

$$Q_{\text{measure}} = 0.9699 Q_{\text{calculated}} \quad (4.8)$$

$$R^2 = 0.9767$$

รูปที่ 4.12(ข) แสดงการพล็อตค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มระหว่างค่าที่ทดลองได้กับค่าที่คำนวณได้ พบว่าค่าผิดพลาดอยู่ในช่วง $\pm 25\%$ และจากสมการที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์ k ใกล้เคียงกับ 1.0 มากยิ่งขึ้น

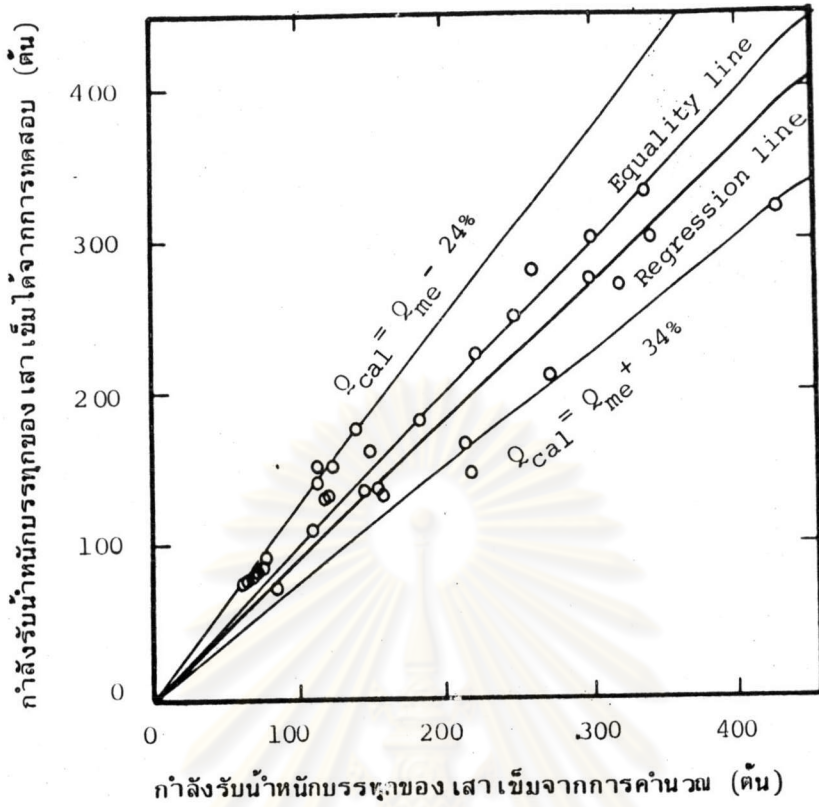
จึงสรุปได้ว่าสูตร empirical สำหรับคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มตอกจากค่า $N(\text{SPT})$ เฉพาะในส่วนที่เป็นชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรกของกรุงเทพฯ คือ

$$P_{u(\text{stiff clay})} = 5.75N_{pP} + 0.28\bar{N}_s A_s \quad \text{หน่วยเป็นตัน}$$

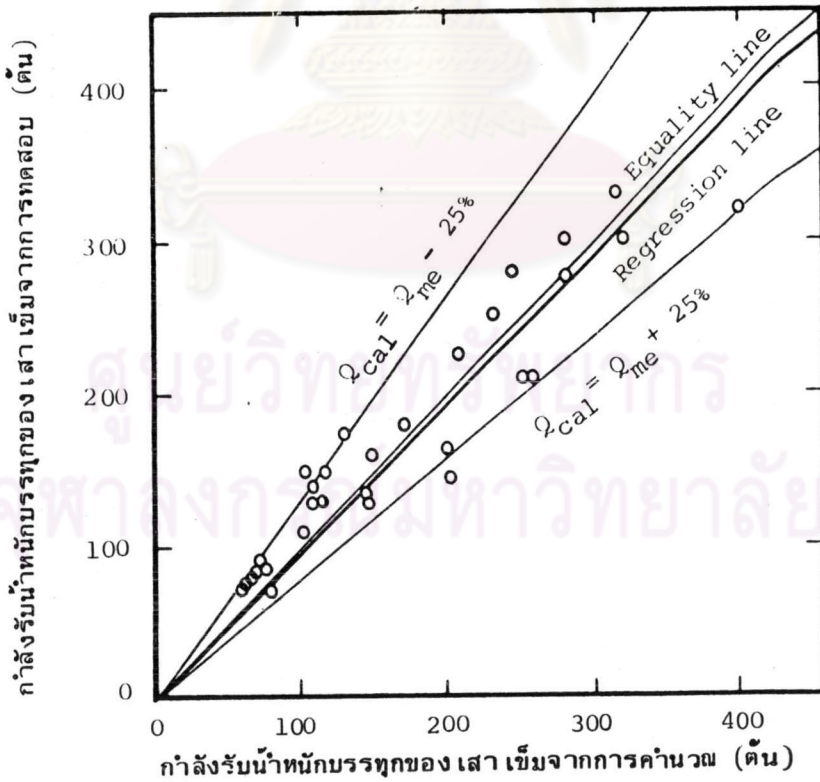
เงื่อนไขและขอบเขตของการคำนวณด้วยสูตร empirical ที่ทำได้ มีดังนี้

1. ชนิดของเสาเข็มเป็นเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง (เข็มเดี่ยว) ตอกในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรกในเขตกรุงเทพฯ

2. ค่า $N(\text{SPT})$ ที่ใช้ในการเฉลี่ย \bar{N}_s หรือค่า N_p เป็นค่าที่วัดได้ในสนาม โดยไม่ต้องปรับแก้ใด ๆ ทั้งสิ้น แต่อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์และวิธีการวัดค่า N จะต้องทำตามมาตรฐาน ASTM (D 1586-64T)



ก. คำนวณจากสูตร $P_{u(\text{stiff clay})} = 5.75 \frac{N_A}{P} + 0.31 \frac{N_s A_s}{s}$



ข. คำนวณจากสูตร $P_{u(\text{stiff clay})} = 5.75 \frac{N_A}{P} + 0.28 \frac{N_s A_s}{s}$

รูปที่ 4.12 ก และ ข แสดงการเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสา เข็ม ระหว่างการทดสอบกับค่าที่คำนวณได้ (เฉพาะส่วนที่เป็น ดินเหนียวแข็ง คำนวณด้วยสูตร Empirical)

3. สูตรที่วิเคราะห์หามาได้นี้ อาจจะใช้คำนวณน้ำหนักบรรทุกเสาเข็ม เฉพาะชั้นดินในกรุงเทพฯ เท่านั้น และความลึกของปลายเข็มไม่เกิน 29.0 เมตร

ตัวอย่างการใช้สูตร empirical (สมการที่ 4.7) ได้แสดงอยู่ข้างล่างนี้

ตัวอย่าง เพื่อแสดงการใช้สูตร empirical ในการหาค่าลึกรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในส่วนที่เป็นดินเหนียวแข็ง และหาค่าลึกรับน้ำหนักของเสาเข็มทั้งหมด มีดังต่อไปนี้ สำหรับเสาเข็มหมายเลขที่ 26

เสาเข็ม เลขที่ 26	งานก่อสร้างทางด่วน
สถานที่ทดสอบ	ใกล้ถนนพระราม 4 (บ่อนไก่) กทม.
ใกล้หลุมเจาะสำรวจดิน	Boring No. RM2 Section Din-Daeng-Port CHAINAGE 5+635
ชนิดและขนาดเสาเข็ม	เข็ม ค.อ.ร. Ø 0.60
	พื้นที่หน้าตัดปลายเข็ม 0.157 ตารางเมตร
	ระดับปลายเข็ม -25.00 เมตรจากผิวดิน

ค่าน้ำหนักบรรทุกประลัย ที่ทดสอบได้ 225 เมตริกตัน

คุณสมบัติของดิน (ดูในภาคผนวก ค ประกอบ)

ดินเหนียวอ่อน (Soft clay)	ความลึกของชั้นดินจากผิวดินถึง -13.00 เมตร						
ระดับลึกจากผิวดิน (เมตร)	3.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.00	13.0
S_u (ตันต่อตารางเมตร)	1.50	2.00	2.60	1.50	1.80	1.90	2.0
l_n (เมตร)	3.5	1.5	2.0	2.0	2.0	1.5	0.5

$$\text{Avg. } S_u = \frac{\sum_{n=1}^n S_{un} l_n}{\sum_{n=1}^n l_n} = \frac{(1.5 \times 3.5 + 2.0 \times 1.5 + 2.6 \times 2.0 + 1.5 \times 2.0 + 1.8 \times 2.0 + 1.9 \times 1.5 + 2.0 \times 0.5)}{(3.5 + 1.5 + 2.0 + 2.0 + 2.0 + 1.5 + 0.5)} + 1.90 \times 1.5 + 2.0 \times 0.5 = 1.84 \text{ ตันต่อตารางเมตร}$$

ดินเหนียวปานกลาง (Medium clay) ความลึกของชั้นดินจาก-13.00 เมตรถึง-15.50 เมตร

ระดับลึกจากผิวดิน (เมตร) 13.0 14.0 15.0 15.50

S_u (ต้นต่อตาราง เมตร) 2.00 2.50 3.00 3.20

l_n (เมตร) 0.50 1.00 0.75 0.25

$$\text{Avg. } S_u = \frac{(2.0 \times 0.5 + 2.5 \times 1.0 + 3.0 \times 0.75 + 3.2 \times 0.25)}{(0.5 + 1.0 + 0.75 + 0.25)} = 2.62 \text{ ต้นต่อตาราง เมตร}$$

ดินเหนียวแข็ง

ระดับลึกจากผิวดิน (เมตร) 15.5 17.2 18.6 20.3 21.6 23.3 25.0

N(SPT) No. of blows per foot 15 28 18 17 30 35 35

l_n (เมตร) 0.85 1.55 1.55 1.50 1.50 1.70 0.85

$$\bar{N}_s = \frac{\sum_{n=1}^n N_n l_n / \sum_{n=1}^n l_n}{\sum_{n=1}^n l_n} = \frac{(15 \times 0.85 + 28 \times 1.55 + 18 \times 1.55 + 17 \times 1.50 + 30 \times 1.50 + 35 \times 1.70 + 35 \times 0.85)}{(0.85 + 1.55 + 1.55 + 1.50 + 1.50 + 1.70 + 0.85)}$$

$$= \frac{243.8}{9.50} = 25.6 \text{ blows per foot}$$

คำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็ม

ในส่วนดินแข็ง จากสูตร $P_{u(\text{stiff clay})} = 5.75 N_p A_p + 0.28 \bar{N}_s A_s$ ตัน

แทนค่า $Q_p + Q_{s3}$ หรือ $P_{u(\text{stiff clay})} = 5.75 \times 35 \times 0.157 + 0.28 \times 25.6 \times 1.885 \times 9.50$

$$Q_p + Q_{s3} = 31.59 + 128.36 \text{ ตัน}$$

\therefore น้ำหนักบรรทุกทุก เฉพาะในชั้นดินแข็ง = 159.95

แรงเสียดทานในชั้นดินอ่อน (Q_{s1}) = $\alpha \text{Avg. } S_u l_p = 0.96 \times 1.84 \times 13.00 \times 1.885$

$$= 43.28 \text{ ตัน}$$

แรงเสียดทานในดินแข็งปานกลาง (Q_{s2}) = $0.91 \times 2.62 \times 2.50 \times 1.885$ ตัน

$$= 11.23 \text{ ตัน}$$

\therefore กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดของเสาเข็ม = $Q_{s1} + Q_{s2} + Q_{s3} + Q_p$ ตัน

$$= 43.28 + 11.23 + 128.36 + 31.59 \text{ ตัน}$$

$$= 214.46 \text{ ตัน}$$

หมายเหตุ ในดินอ่อนและดินแข็งปานกลาง ค่า α อยู่ในรูปที่ 4.6



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5 การคาดคะเนน้ำหนักบรรทุกของ เสา เข็มที่มีปลายเสา เข็มจมอยู่ในชั้นทรายปนดินเหนียว (Clayey sand)

จากการสำรวจลักษณะของชั้นดินในกรุงเทพฯ บางแห่งจะพบชั้นดินทรายปนดินเหนียว อยู่ระหว่างชั้นดินเหนียวแข็งกับชั้นทรายละเอียดสะอาด การคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของ เสาเข็มในส่วนที่จมอยู่ในชั้นทรายปนดินด้วยวิธี Static Method นั้น ค่าพารามิเตอร์ของดิน (Shear Strength Parameter) \bar{C} และ $\bar{\phi}$ ที่เอามาใช้คำนวณจะต้องใกล้เคียงกับความเป็นจริง แต่เนื่องมาจากขีดจำกัดของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างดินคงสภาพเดิม (Undisturbed sample) ของดินชนิดนี้ มาทดลองเพื่อหาค่า \bar{C} และ $\bar{\phi}$ ในภาคปฏิบัติทั่วไป มักจะใช้วิธีวัดค่า N(SPT) ในหลุมเจาะ ปัญหาจึงอยู่ที่การประมาณค่าพารามิเตอร์ \bar{C} และ $\bar{\phi}$ จากค่า N ที่วัดได้ ด้วยความจำเป็นที่เห็นนี้ งานวิจัยอันนี้จึงทำการวิเคราะห์หาค่าหน่วยแรงเฉื่อยทานและหน่วยแรงต้านที่ปลายของเสาเข็มในส่วนที่จมอยู่ในชั้นดินทรายปนดินนี้ จากค่า N(SPT) โดยใช้ข้อมูลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอกคอนกรีตอัดแรงที่หามาได้ 9 ต้น ปลายของเสาเข็มจมอยู่ในชั้นดินทรายปนดินเหนียวระดับของปลายเข็มประมาณ 21.0 ถึง 27.0 เมตร จากผิวดินในชั้นดินกรุงเทพฯ คุณสมบัติของชั้นดินทรายปนดินที่ใช้วิเคราะห์มี ค่าอัตราส่วนของน้ำต่อน้ำหนักของดิน (Natural water content) ประมาณ 15% ถึง 25% เปอร์เซ็นต์ ปริมาณของดิน (คิดจากน้ำหนัก) ที่มีขนาดเม็ดดินเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200 (มาตรฐาน Unified Soil Classification) มีไม่เกิน 40 เปอร์เซ็นต์ ค่า N(SPT) ที่วัดได้มีค่าตั้งแต่ 20 ถึง 43 blows per foot และพบดินทรายปนดินเหนียวนี้อยู่ระหว่างความลึก 20.0 เมตร ถึง 29.0 เมตร (ข้อมูลหลุมเจาะและผลการทดสอบเสาเข็ม 9 ต้น เป็นเสาเข็มหมายเลข 35 ถึง 43 รวบรวมอยู่ในภาคผนวก ค และ ง)

4.5.1 วิธีการวิเคราะห์หาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเฉพาะส่วนที่จมอยู่ในชั้นดินทรายปนดินจากค่า N(SPT)

ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม เฉพาะส่วนที่เป็นดินทรายปนดินเหนียว หาได้จากเอาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยจากการทดสอบลบด้วยแรงเฉื่อยทานของเสาเข็ม ในชั้นดินเหนียวแข็ง แข็งปานกลางและดินอ่อน (คำนวณตามวิธีที่เสนอในข้อ 4.3) ซึ่งเป็นดิน

ส่วนบนของดินทรายปนดินเหนียว เมื่อได้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของ เสาค้ำ เฉพาะส่วนที่เป็นดินทรายปนดินเหนียว ($Q_{ult(sc)}$) ซึ่งเป็นค่ารวมของแรงเสียดทานที่ผิวและแรงต้านที่ปลายเสาค้ำ (ไม่ได้รวมน้ำหนักเสาค้ำ) วิธีการแยกค่าแรงเสียดทานและแรงต้านที่ปลายเสาค้ำทำได้โดย Trial and Error จากค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$ ของดินทรายปนดินเหนียว เอาไปคำนวณแรงต้านทานของเสาค้ำโดยใช้หลักการและวิธีการของ Meyerhof (1976) ตามสูตรในสมการที่ 4.8 (เนื่องจากดินทรายปนดินเหนียวจะมีทั้ง \bar{C} และ $\bar{\phi}$ เมื่อใช้ค่า equivalent $\bar{\phi}$ จึงรวมถึง effect ของ \bar{C} ด้วย ซึ่งตามปกติแล้ว ค่า \bar{C} สำหรับทรายปนดินเหนียวมีค่าน้อยมาก)

$$P_{ult} = \bar{q}_v K_s \tan \bar{\phi} A_s + \bar{q}_{vb} N_q A_p \quad (4.8)$$

เมื่อ P_{ult} = แรงต้านของเสาค้ำ เฉพาะส่วนที่จมอยู่ในดินทรายปนดินเหนียว

\bar{q}_v = ความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งของดิน ใช้ค่าเฉลี่ยตลอดความยาวของเสาค้ำ

\bar{q}_{vb} = ความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งของดินที่ปลายเสาค้ำ

K_s = สัมประสิทธิ์ความดันข้างของดิน ใช้ค่า Coefficient of earth pressure at rest ($K_o = 1 - \sin \bar{\phi}$)

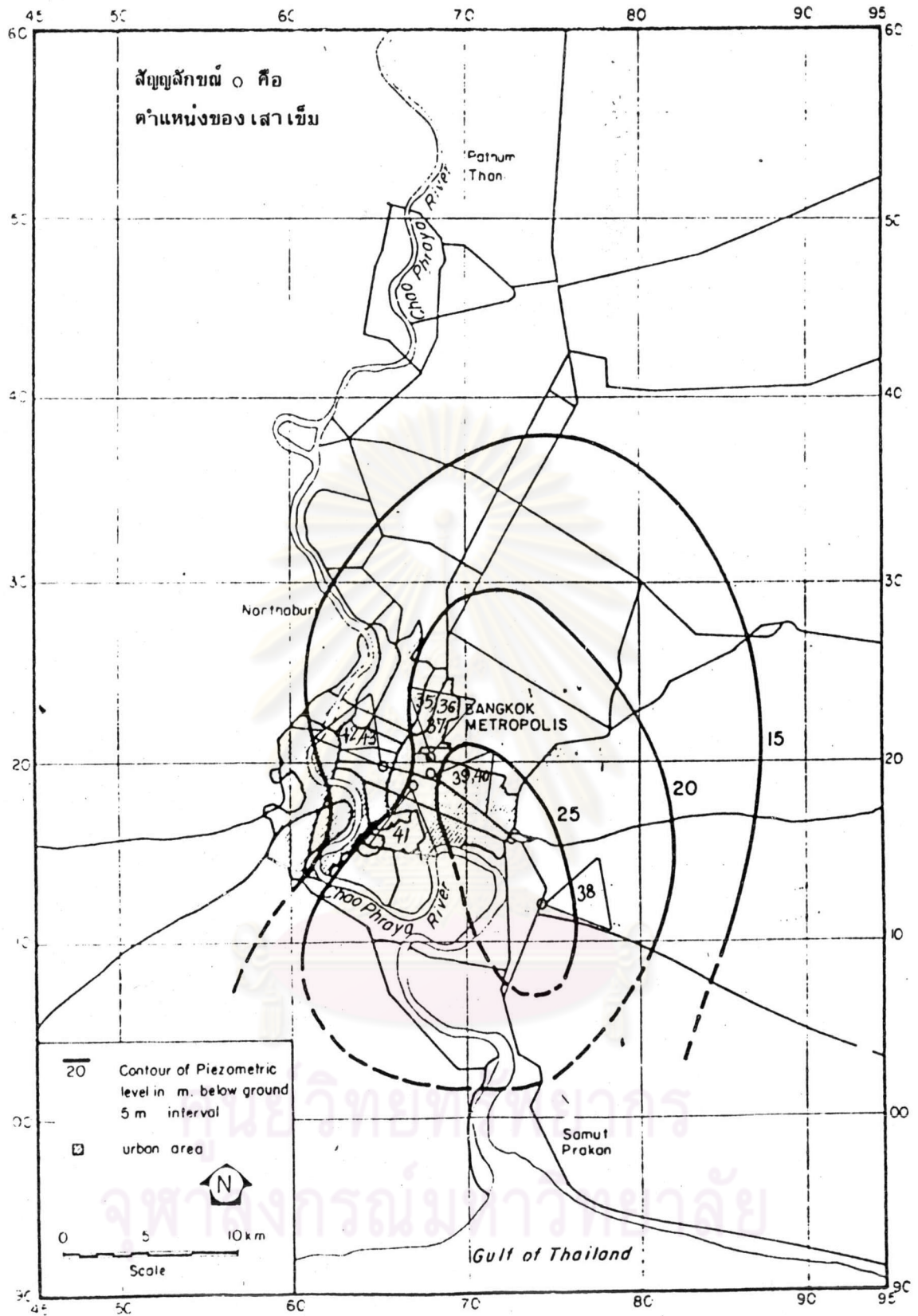
$\bar{\phi}$ = มุมเสียดทานประสิทธิผลของดิน (effective angle of internal friction)

N_q = ตัวประกอบวิสัยสามารถรับแรงทาน (end bearing factor)

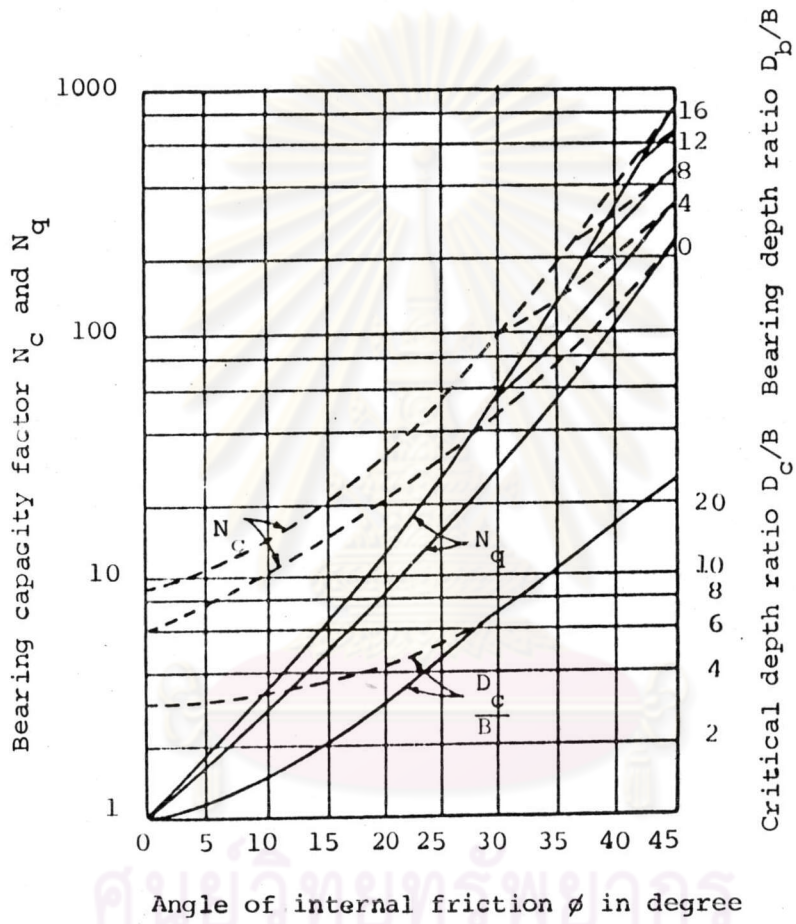
A_s = พื้นที่ผิวประสิทธิผลของเสาค้ำ

A_p = พื้นที่หน้าตัดที่ปลายเสาค้ำ

- ค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งของดิน คัดจากความเค้นเนื่องจากน้ำหนักของดินทั้งหมด (Total Overburden Pressure) ลบด้วยหน่วยแรงดันของน้ำในดิน (Pore water pressure) ซึ่งค่าหน่วยแรงดันของน้ำในดินชั้นทรายในเขตกรุงเทพฯ หาได้โดยประมาณจากเส้น Contour บอกค่าระดับแรงดันน้ำในชั้น Aquifer ที่เสนอโดย ดร. จิระศักดิ์ เปรมจิต (1979) ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (นั่นคือใช้สมมติฐานว่าไม่มี head loss



รูปที่ 4.13 แสดงเส้น Contour ของ Piezometric Level ของชั้น Aquifer ใน กรุงเทพฯ (ความลึก 20 ถึง 50 เมตร) เสนอโดย ดร. จิระศักดิ์ เปรมจิต (1979)



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_q มุม ϕ และ D_c/B สำหรับเสาเข็มคอก
เสนอโดย Meyerhof (1976)

ในทราย เนื่องจากการสูบน้ำบาดาล) ส่วนค่า \bar{q}_v และ \bar{q}_{vb} (สมการที่ 4.8) จะมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นสัดส่วนโดยตรง (Linearity) กับความลึกสำหรับดินที่อยู่เหนือความลึกวิกฤติ (Critical depth) และค่าความลึกวิกฤติหาได้โดยประมาณจากที่เสนอโดย Meyerhof (1976) ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ประมาณจากค่า $\frac{D}{B}$ ซึ่งสัมพันธ์กับมุม $\bar{\phi}$ เมื่อ D_c เป็นค่าความลึกวิกฤติ และ B เป็นความกว้างหรือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม) ส่วนความเค้นของดินที่อยู่ลึกลงไปจากความลึกวิกฤติจะมีค่าความเค้นประสิทธิผลคงที่เท่ากับค่าความเค้นประสิทธิผลที่ระดับความลึกวิกฤติ (D_c)

- ค่าตัวประกอบวิสัยสามารถรับแรงทาน (N_q) หาได้จากรูปที่ 4.14 ซึ่งสัมพันธ์กับมุม $\bar{\phi}$ และ D_b/B (D_b คือความลึกของเสาเข็มที่ฝังอยู่ในดิน และ B เป็นด้านกว้างหรือเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม)

เมื่อ trial มุม equivalent $\bar{\phi}$ แล้วคำนวณแรงต้านของเสาเข็มโดยใช้สมการที่ 4.8 ถ้าเป็นค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$ ที่ใช้ได้ แรงต้านของเสาเข็มที่คำนวณได้จะได้ค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มในส่วนที่จมอยู่ในชั้นดินทรายปนดินที่ไค้จากการประมาณจากผลการทดสอบในสนามดังที่ได้กล่าวข้างต้น

ค่าหน่วยแรงเสียดทาน ($q_s = K_s \bar{q}_v \tan \text{equivalent } \bar{\phi}$) และค่าหน่วยแรงต้านทานที่ปลายเข็ม ($q_p = \bar{q}_{vb} N_q$) ที่คำนวณได้จากค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$ จะหาความสัมพันธ์ระหว่าง q_s กับ $N(SPT)$ และ q_p กับ $N(SPT)$ ด้วยการตั้งสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{q_s}{\bar{q}_{vavg}} = m \bar{N}_s$$

$$\frac{q_p}{\bar{q}_{vavg}} = n N_p \quad (4.9)$$

เมื่อ \bar{q}_{vavg} = ค่าเฉลี่ยความเค้นประสิทธิผลของดินตลอดความหนาของชั้นดิน Clayey sand ถึงระดับปลายเสาเข็ม หน่วยเป็นตันต่อตารางเมตร

$$\begin{aligned}
 q_s &= \text{หน่วยแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม หน่วยเป็นตันต่อตาราง เมตร} \\
 q_p &= \text{หน่วยแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็ม หน่วยเป็นตันต่อตาราง เมตร} \\
 \bar{N}_s &= \text{ค่าเฉลี่ย } N(\text{SPT}) \text{ ตลอดความหนาของชั้นดิน Clayey sand} \\
 &\text{ถึงระดับปลายเสาเข็ม หน่วยเป็น blows per foot} \\
 N_p &= \text{ค่าเฉลี่ยของ } N(\text{SPT}) \text{ ที่ความหนา } \pm B \text{ จากปลายเสาเข็ม} \\
 &\text{(B คือขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม) หน่วยเป็น blows per} \\
 &\text{foot}
 \end{aligned}$$

m และ n = ค่าคงที่ จะหาได้จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง

$$\frac{q_s}{\bar{q}_{\text{avg}}} \text{ และ } \frac{q_p}{\bar{q}_{\text{avg}}} \text{ กับค่า } N \text{ ตามลำดับ ด้วยเส้นถดถอย}$$

(Regression analysis)

'เหตุผลที่ตั้งสมการความสัมพันธ์ระหว่าง' q_s กับ $N(\text{SPT})$ และ q_p กับ $N(\text{SPT})$ ในเทอมของ $\frac{q_s}{\bar{q}_{\text{avg}}} = f^n \bar{N}_s$ และ $\frac{q_p}{\bar{q}_{\text{avg}}} = f^n N_p$ (สมการที่ 4.9) ก็ เพราะว่าความเค้นประสิทธิผลของดินในแนวตั้ง ($\bar{\sigma}_{vo}$) มีส่วนสำคัญมากต่อค่าแรงต้านทานของเสาเข็ม เพราะค่า $\bar{\sigma}_{vo}$ จะมีค่าไม่เท่ากัน เมื่อความลึกของเสาเข็มเท่ากัน ($\bar{\sigma}_{vo}$ ขึ้นอยู่กับหน่วยน้ำหนักของดิน และหน่วยแรงดันของน้ำในดินมีค่าไม่เท่ากัน เมื่อความลึกของเสาเข็มเท่ากัน ดังรูปที่ 4.13)

ค่า \bar{N}_s และ N_p ในสมการที่ 4.9 ใช้ค่า N ที่วัดได้ในสนามโดยไม่ต้องแก้ไขค่า N สาเหตุที่ไม่แก้ไขค่า N ตามสูตรหรือโคอะแกรมที่เสนอโดย Peck Hanson และ Thornburn (1974) ($C_n = 0.77 \log_{10} \frac{20}{\bar{\sigma}_{vo}}$ เมื่อ $\bar{\sigma}_{vo}$ มีหน่วยเป็นตันต่อตารางฟุต หรือสูตรที่ 2.2 ก) เพราะว่าสูตร Corrected N นี้ใช้ได้เพียง Relatively clean Silty Sand จึงใช้ไม่ได้กับ Clayey sand ที่มี percent passing No. 200 สูงถึง 40 เปอร์เซ็นต์ และสูตรการแก้ไขค่า N อีกสูตรหนึ่งคือ $N = 15 + \frac{1}{2}(N' - 15)$ เมื่อ N เป็นค่าที่วัดได้ในสนาม ซึ่งจะใช้ได้กับ Silty fine sand ที่แน่นมาก (very dense) เพื่อ Correct เนื่องจากเกิด negative excess pore pressure ทำให้วัดค่า N ได้มากขึ้นกว่าที่เป็นจริง แต่ดิน clayey sand ในงานวิจัยนี้ยังไม่ dense เพียงพอ (ค่า N อยู่ระหว่าง 20 ถึง 45 blows per foot) และมีปริมาณดินเหนียวสูง ซึ่งจะเกิด positive excess pore pressure

อนึ่ง ความลึกของปลาย เข็มในงานวิจัยอยู่ระหว่าง 21.0 ถึง 27.0 เมตร ซึ่ง effect ที่เกิดกับค่า N จะ correct อยู่ในค่าพารามิเตอร์ m และ n และ effect ของความลึกจะขึ้นอยู่กับค่า $\bar{\sigma}_{vo}$ ในการเฉลี่ยค่าความเค้นประสิทธิผลตลอดชั้นดิน Clayey sand (\bar{q}_{vavg} ในสมการที่ 4.9)

4.5.2 ผลของการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง q_s และ q_p กับค่า $N(SPT)$

ผลการคำนวณหาค่า q_s และ q_p ของดินทรายปนดินเหนียวของ เสา เข็ม จำนวน 9 ต้น ดูในตารางที่ ฉ.5 ภาคผนวก ฉ.6 (ข้อมูลหลุมเจาะและผลการทดสอบ เสา เข็ม ของเสาเข็ม 9 ต้นได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ค และ ง) ตัวอย่างการคำนวณหาค่า q_s และ q_p ด้วยวิธีการ Trial and Error มุม equivalent $\bar{\phi}$ ดูในภาคผนวก ฉ.7 ซึ่งสรุปผลการคำนวณหาค่า q_s และ q_p ของดินทรายปนดินเหนียวจากผลการทดสอบเสาเข็มทั้ง 9 ต้น ได้ค่า q_s มีค่าอยู่ระหว่าง 7.50 ถึง 11.20 ตันต่อตาราง เมตร ค่า q_p อยู่ระหว่าง 350 ถึง 700 ตันต่อตาราง เมตร ค่า $\bar{\sigma}_{vo}$ อยู่ระหว่าง 30.0 ถึง 46.0 ตันต่อตาราง เมตร ค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$ อยู่ระหว่าง 18 ถึง 23 องศา (Trial ได้ค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$ เท่ากับ 18 องศา 1 ต้น เสาเข็มอีก 8 ต้นได้ค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$ อยู่ระหว่าง 20 ถึง 23 องศา) ซึ่งค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$ ที่ได้จะเป็นค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$ ที่ yield load ไม่ใช่ที่ max load เนื่องจาก end bearing (q_p) ยังไม่ถึงจุด full mobilized ปลายของเสาเข็มอยู่ระหว่าง ความลึก 20.0 เมตร ถึง 27.0 เมตร ซึ่งอาจสรุปแพคเตอร์ที่มีผลต่อค่า q_s และ q_p ดังต่อไปนี้

- ค่าอัตราส่วน $\frac{D_c}{B}$ (ซึ่งหาได้จากมุม $\bar{\phi}$ ในรูปที่ 4.14) มีผลต่อการคิดค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งของดินตลอดความยาวของ เข็มและที่ระดับปลายเข็ม

- ค่าอัตราส่วน $\frac{D_b}{B}$ ของเสาเข็มทั้ง 9 ต้นนี้มีค่ามากกว่า 4 และมุม $\bar{\phi}$ น้อยกว่า 30 องศา จึงไม่มีผลต่อค่า N_q จากรูปที่ 4.14 จะสังเกตได้ว่า เมื่อค่า $\frac{D_b}{B}$ มากกว่า 4 จะมีผลต่อค่า N_q ก็ต่อเมื่อมุม $\bar{\phi}$ มากกว่า 30 องศาขึ้นไป

- หน่วยแรงดันของน้ำในดิน (Pore water pressure) มีอิทธิพลต่อการคำนวณค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งของดิน กล่าวคือที่ระดับปลายเข็มเท่ากันแต่ไม่ได้อยู่ในสถานที่เดียวกัน เนื่องจากไม่จำเป็นว่าแรงดันน้ำในดินจะมีค่าเท่ากัน (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเส้น Contour

บอกค่าความดันของน้ำในดิน) ค่าความเค้นประสิทธิผลในดิน (Effective Stress) จึงไม่เท่ากัน และหน่วยแรงดันที่ปลายเสาเข็ม (End bearing capacity) ของเสาเข็มไม่จำเป็นต้องเท่ากัน

ผลการคำนวณหาค่า \bar{q}_{vavg} (ค่าเฉลี่ยความเค้นประสิทธิผลของดินตลอดความยาวเข็ม ดูในตารางที่ ฉ.6 ภาคผนวก ฉ.8) เมื่อเทียบกับค่า \bar{q}_v และ \bar{q}_{vb} ในตารางที่ ฉ.5 จะเห็นได้ว่าค่า \bar{q}_{vavg} จะน้อยกว่า \bar{q}_v ประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ และต่างกับค่า \bar{q}_{vb} ประมาณ ± 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อค่าอัตราระหว่าง q_s/\bar{q}_v กับ q_s/\bar{q}_{vavg} และ q_p/\bar{q}_{vb} กับ q_p/\bar{q}_{vavg} ที่เอาไปใช้หาความสัมพันธ์กับค่า N (สมการ 4.9) เพียงเล็กน้อย (ค่า q_s/\bar{q}_{vavg} และ q_p/\bar{q}_{vavg} ดูในตารางที่ ฉ.7 ภาคผนวก ฉ.9)

สมการความสัมพันธ์ระหว่าง q_s กับ N และ q_p กับ N ที่ทำได้ คือ

$$\frac{q_s}{\bar{q}_{vavg}} = 0.007 \bar{N}_s$$

$$R^2 = 0.9391$$

$$\text{Standard error } S = \pm 0.0622$$

$$q_s = 0.007 \bar{q}_{vavg} \bar{N}_s \quad \text{หน่วยเป็นตันต่อตาราง เมตร (4.10ก)}$$

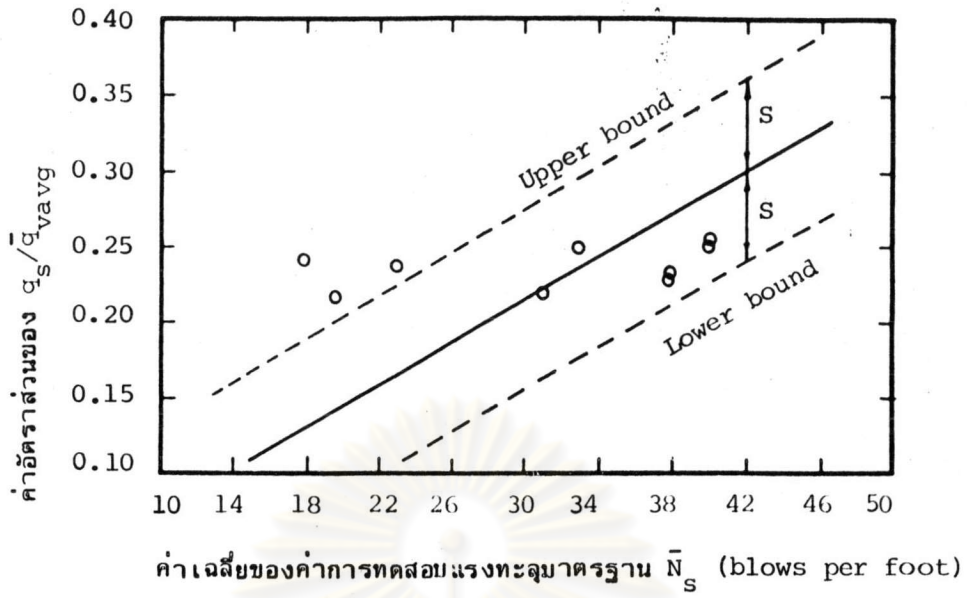
และหน่วยแรงดันที่ปลายเข็ม (q_p)

$$\frac{q_p}{\bar{q}_{vavg}} = 0.394 \bar{N}_p$$

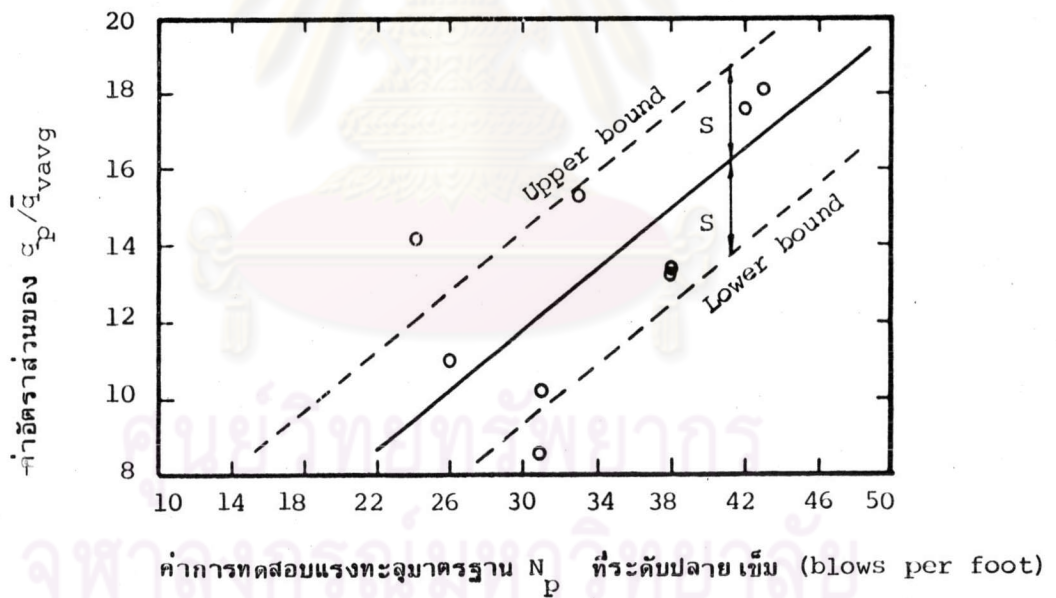
$$R^2 = 0.9703$$

$$\text{Standard error } S = \pm 2.5318$$

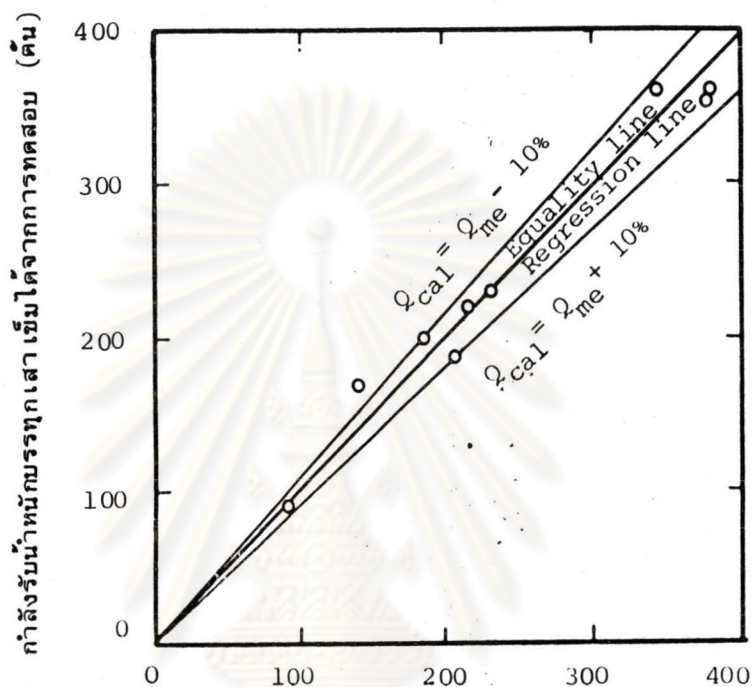
$$q_p = 0.394 \bar{q}_{vavg} \bar{N}_p \quad \text{หน่วยเป็นตันต่อตาราง เมตร (4.10ข)}$$



รูปที่ 4.15ก ความสัมพันธ์ระหว่าง \bar{N}_s กับ q_s/\bar{q}_{vavg} ของเสาเข็มตอก
ในชั้นดินทรายปนดินเหนียว



รูปที่ 4.15ข ความสัมพันธ์ระหว่าง N_p กับ q_p/\bar{q}_{vavg} ของเสาเข็มตอก
ในชั้นดินทรายปนดินเหนียว



กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของ เสา เข็ม ได้จากการคำนวณ (ตัน)

รูปที่ 4.16 แสดงการ เปรียบ เทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของ เสา เข็ม ระหว่างการคำนวณกับ ได้จากการทดสอบ เสา เข็ม ปลาย เข็ม อยู่ใน clayey sand (เฉพาะใน clayey sand คำนวณด้วย สูตร Empirical 4.10 ก และ ข)

(รูปที่ 4.15 ก และ ข) แสดงเส้นถดถอยที่หาได้ของความสัมพันธ์ระหว่าง q_s/\bar{q}_{vavg} กับ \bar{N}_s และ q_p/\bar{q}_{vavg} กับ N_p)

เมื่อเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักของ เสาค้ำ จากการทดสอบ (ปลายของเสาค้ำ อยู่ในชั้นดินทรายปนดินเหนียว) กับค่าที่คำนวณได้จากสมการ 4.10 ก และ ข เฉพาะส่วนของ เสาค้ำ เข็มที่จมอยู่ในดินทรายปนดินร่วมกับแรงเสียดทานที่ผิวในชั้นดินเหนียวอ่อน แข็งปานกลาง และแข็งมาก (ตามวิธีที่เสนอในข้อ 4.3) จะได้ผลดังนี้ คือ

$$Q_{\text{measure}} = 0.9926 Q_{\text{calculated}}$$

$$R^2 = 0.9960$$

เมื่อ $Q_{\text{measure}} =$ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจากการทดสอบ

$Q_{\text{calculated}} =$ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจากการคำนวณ

ผลการคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาค้ำจำนวน 9 ต้น ได้แสดงไว้ในตารางที่ ฉ.8 ภาคผนวก ฉ.10 และรูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยระหว่างจากการทดสอบกับจากการคำนวณ ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า ค่าที่คำนวณได้ผิดพลาดจากค่าทดสอบในสนามไม่เกิน ± 10 เปอร์เซ็นต์ (มีเพียง 1 ต้นที่น้อยกว่าค่าทดสอบ 17.5 เปอร์เซ็นต์)

ตัวอย่างการคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาค้ำเข็มคอก ที่มีปลาย เข็มจมอยู่ในชั้นดินทรายปนดิน (เฉพาะในชั้นดิน SC คำนวณค่า Q_s และ Q_p จากสูตร q_s และ $q_p = f^h N$ (สมการที่ 4.10 ก และ ข) แสดงอยู่ข้างล่างนี้

เสาค้ำเข็ม เลขที่ 35 งานก่อสร้างทางด่วน (ดินแดง)

สถานที่ทดสอบ Station CH 1 + 870

หลุมเจาะสำรวจดิน Station CH 1 + 800

ชนิดและขนาดเสาเข็ม เข็ม ค.อ.ร. กลมมีรูตรงกลาง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก
 0.60 เมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.40 เมตร
 พื้นที่หน้าตัดที่ปลายเข็มเท่ากับ 0.157 ตารางเมตร
 ระดับปลายเข็ม -27.55 เมตรจากผิวดิน
 คำนวณน้ำหนักบรรทุกประลัย ที่ทดสอบได้เท่ากับ 360 ตัน
 คุณสมบัติของดิน (ดูข้อมูลหลุมเจาะ ในภาคผนวก ค ประกอบ)

ดินเหนียวอ่อน (0-10.50 เมตร)

ความลึก (เมตร)	2.75	4.75	6.75	8.75	10.50
S_u (ตันต่อตารางเมตร)	2.30	2.40	1.0	1.60	1.70
l_n (ความหนาของชั้นดิน เมตร)	3.75	2.00	2.00	1.875	0.875

$$\text{Avg. } S_u = \frac{\sum_{n=1}^n S_{un} l_n / \sum_{n=1}^n l_n}{n} = \frac{(2.3 \times 3.75 + 2.4 \times 2.0 + 1.0 \times 2.0 + 1.6 \times 1.875 + 1.7 \times 0.875)}{(3.75 + 2.00 + 2.00 + 1.875 + 0.875)}$$

$$= 1.84 \text{ ตันต่อตาราง เมตร}$$

ดินแข็งปานกลาง (10.50-15.0 เมตร)

ความลึก (เมตร)	10.50	12.50	14.50	15.00
S_u (ตันต่อตาราง เมตร)	1.70	2.40	3.00	5.0
l_n (เมตร)	1.0	2.0	1.25	0.25

$$\text{Avg. } S_u = \frac{\sum_{n=1}^n S_{un} l_n / \sum_{n=1}^n l_n}{n} = \frac{(1.70 \times 1.0 + 2.40 \times 2.0 + 3.0 \times 1.25 + 5.0 \times 0.25)}{(1.0 + 2.0 + 1.25 + 0.25)}$$

$$= 2.56 \text{ ตันต่อตาราง เมตร}$$

ดินเหนียวแข็ง-แข็งมาก (15.00-25.00 เมตร)

ความลึก (เมตร)	16.25	19.25	22.25	24.25
S_u (ตันต่อตาราง เมตร)	12.60	14.50	18.40	18.60
l_n (เมตร)	2.75	3.00	2.50	1.75

$$\text{Avg. } S_u = \frac{\sum_{n=1}^n S_{un} l_n / \sum_{n=1}^n l_n = \frac{(12.60 \times 2.75 + 14.50 \times 3.00 + 18.40 \times 2.50 + 18.60 \times 1.75)}{(2.75 + 3.00 + 2.50 + 1.75)}$$

$$= 15.67 \text{ ตันต่อตาราง เมตร}$$

ดินทรายปนดินเหนียว (Clayey Sand) (25.00-31.50 เมตร)

ความลึก (เมตร)	26.50	28.00	30.0
N(SPT)	33	33	35
l_n	2.25	0.30	-

$$\bar{N}_s = \frac{\sum_{n=1}^n N_n l_n / \sum_{n=1}^n l_n = (33 \times 2.25 + 33 \times 0.30) / (2.25 + 0.30) = 33 \text{ blows/foot}$$

$$\text{Piezometric Level} = -24.00 \text{ เมตรจากผิวดิน (รูปที่ 4.13)}$$

คำนวณแรงเสียดทานของเสาเข็มในส่วนที่จมอยู่ในดินเหนียว

$$\text{ในชั้นดินอ่อน } Q_{s1} = \alpha S_u l_p = 0.96 \times 1.84 \times 10.50 \times 1.885 = 34.96 \text{ ตัน}$$

$$\text{ในชั้นดินแข็งปานกลาง } Q_{s2} = \alpha S_u l_p = 0.91 \times 2.56 \times 4.50 \times 1.885 = 19.76 \text{ ตัน}$$

$$\text{ในชั้นดินแข็ง-แข็งมาก } Q_{s3} = \alpha S_u l_p = 0.49 \times 15.67 \times 10.00 \times 1.885 = 144.73 \text{ ตัน}$$

การคำนวณค่าความเค้นประสิทธิผลของดิน SC (Piezometric Level = -24.00 เมตร

ความลึก (เมตร)	หน่วยน้ำหนักของดิน γ_t ดัน/ม ³	ความเค้นทั้งหมดของดิน $(\gamma_t \ell)$ ดัน/ม ²	ความเค้นประสิทธิผลของดิน SC $(\gamma_t \ell - u)$ ดัน/ม ²
----------------	--	--	--

0

4.0 Med. Cl	1.61	6.44	
10.5 Soft Clay	1.60	16.84	
15.0 Med. Clay	1.76	24.76	
20.0 Stiff Clay	1.93	34.41	
25.0 Very Stiff Clay	2.01	44.46	43.46
28.0 Clayey Sand	2.00	50.46	46.46

ปลายเสา เข็มอยู่ที่ระดับ -27.55 เมตร

$$\therefore \bar{q}_{vavg} = \frac{\bar{\sigma}_{vi} + \bar{\sigma}_{vb}}{2} = \frac{43.46 + 46.01}{2} = 44.73 \quad \text{ตันต่อตาราง เมตร}$$

คำนวณค่าแรงเสียดทานและแรงต้านที่ปลายเสา เข็มในชั้นดิน SC

$$\text{หน่วยแรงเสียดทาน } (q_s) = 0.007 \bar{q}_{vavg} \bar{N}_s = (0.007) (44.73) (33) = 10.33 \quad \text{ตัน/ม}^2$$

$$\text{หน่วยแรงต้านที่ปลาย } (q_p) = 0.394 \bar{q}'_{vavg} N_p = (0.394) (44.73) (33) = 581.58 \quad \text{ตัน/ม}^2$$

$$\therefore Q_s = q_s \ell p = 10.33 \times 2.55 \times 1.885 = 49.65 \quad \text{ตัน}$$

$$\therefore Q_p = q_p A_p = 581.58 \times 0.157 = 91.30 \quad \text{ตัน}$$

นั่นคือ กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสา เข็ม = $Q_{s1} + Q_{s2} + Q_{s3} + (Q_s + Q_p)_{SC}$

$$\text{ทั้งหมด } (Q_{ult}) = 34.96 + 19.76 + 144.73 + 49.65 + 91.30$$

$$= 340.4 \quad \text{ตัน}$$

4.5.3 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า N(SPT) กับค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$ ที่ทำได้
ของดินทรายปนดินเหนียว (SC)

ผลที่ได้จากการหาค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$ ของดิน SC จากการทดสอบ
 เสาเข็มในสนาม และความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_s กับ \bar{N}_s และ q_p กับ N_p (ในหัวข้อ
 4.5.1 และ 4.5.2) ซึ่งอาจจะสรุปความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$
 โดยใช้ค่า N ที่เฉลี่ยตลอดความลึกของดิน SC ถึงระดับความลึกจากปลาย เสาเข็มหนึ่ง เท่าของ
 เส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม ส่วนค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$ (ในข้อ 4.5.2) เป็นค่าเฉลี่ยตลอดความ
 ยาวของเสาถึงปลาย เข็ม

การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า N กับค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$ โดยใช้วิธีการ
 วิเคราะห์หาเส้นถดถอย (Regression Analysis) จะพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า N(SPT)
 กับค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$ จะอยู่ในรูปของสมการที่ 4.11

$$\text{Log}_{10} (\text{equivalent } \bar{\phi}) = 1.08068 + 0.16228 \text{ Log}_{10} N \quad (4.11)$$

$$R^2 = 0.4681$$

$$\text{Standard error } S = \pm \text{Log}_{10} 0.0255$$

(ตารางที่ ฉ.9 ภาคผนวก ฉ.11 แสดงข้อมูลค่า N กับค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$ ในชั้นดิน SC
 จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบเสาเข็ม 9 ต้น)

สมการที่ 4.12 อาจจะเขียนอยู่ในรูปของสมการที่ 4.12 คือ

$$\text{มุม equivalent } \bar{\phi} = 12.041 N^{0.162} \quad (4.12)$$

$$S = \pm 1.06$$

เมื่อมุม equivalent $\bar{\phi}$ = ค่ามุม เสียทานประสิทธิผลสมมูลย์ของดิน SC
 หน่วยเป็นองศา (เป็นค่า equivalent $\bar{\phi}$ ที่ได้
 จาก yield load)

$N =$ ค่า N(SPT) ที่วัดได้ในสนามโดยไม่ต้องปรับแก้ หน่วยเป็น
blows per foot

หมายเหตุ ความลึกของชั้นดิน SC อยู่ระหว่าง 19.0 เมตร ถึง 28.0 เมตร ในชั้นดิน
กรุงเทพฯ

ในรูปที่ 4.17 แสดงการพล็อตค่ามุม equivalent $\bar{\sigma}$ ค่า N(SPT)
และ เส้นถดถอยที่ทำได้ ซึ่งตรงจุดที่พล็อตได้ลงค่า \bar{q}_{avg} ด้วย (ค่า \bar{q}_{avg} เป็นค่า
เฉลี่ยความเค้นประสิทธิผลของดินได้มาจากตารางที่ ๘.6 ภาคผนวก ๘.๘)

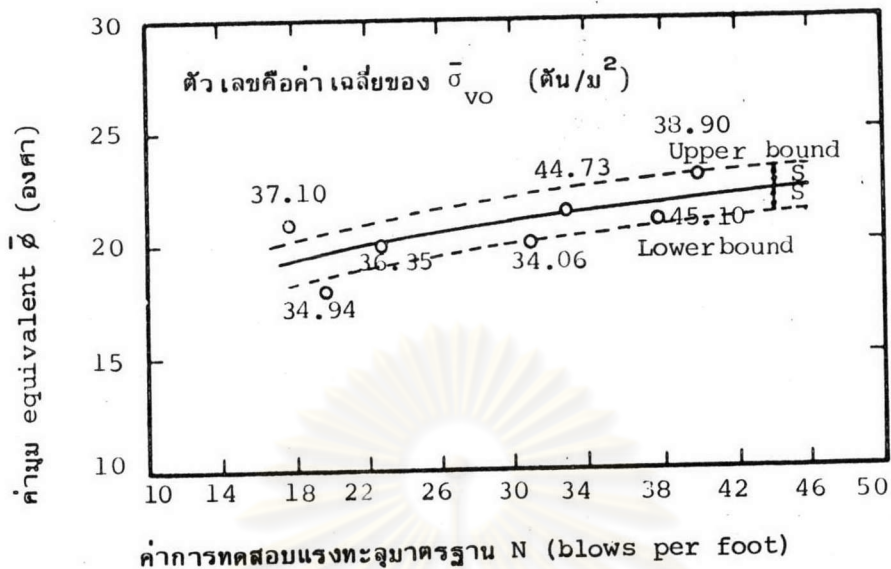
ค่ามุม equivalent $\bar{\sigma}$ ที่คำนวณได้จากค่า N (สมการที่ 4.12) นี้
ข้อมูลเสาเข็มเพียง 9 ต้น ซึ่งข้อมูลอาจจะน้อยไป แต่อย่างไรก็ตาม จะทดสอบว่าสูตร
ที่หาได้นี้ใช้คำนวณหาค่ามุม equivalent $\bar{\sigma}$ เพื่อเอาไปใช้คำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสา
เข็มในส่วนที่จมอยู่ในดินทรายปนดินเหนียว (SC) ได้ดีเพียงใด ด้วยการคำนวณกำลังรับน้ำ
หนักบรรทุกของเสาเข็มในส่วนที่จมอยู่ในดิน SC รวมกับค่าแรงเสียดทานในชั้นดินอ่อนแข็ง
ปานกลาง และแข็งแรง เปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มทั้งหมดที่คำนวณได้
กับค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบในสนามด้วย เส้นถดถอย ได้
สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณกับจากการทดสอบดังนี้

$$Q_{measure} = 0.9798 Q_{calculated}$$

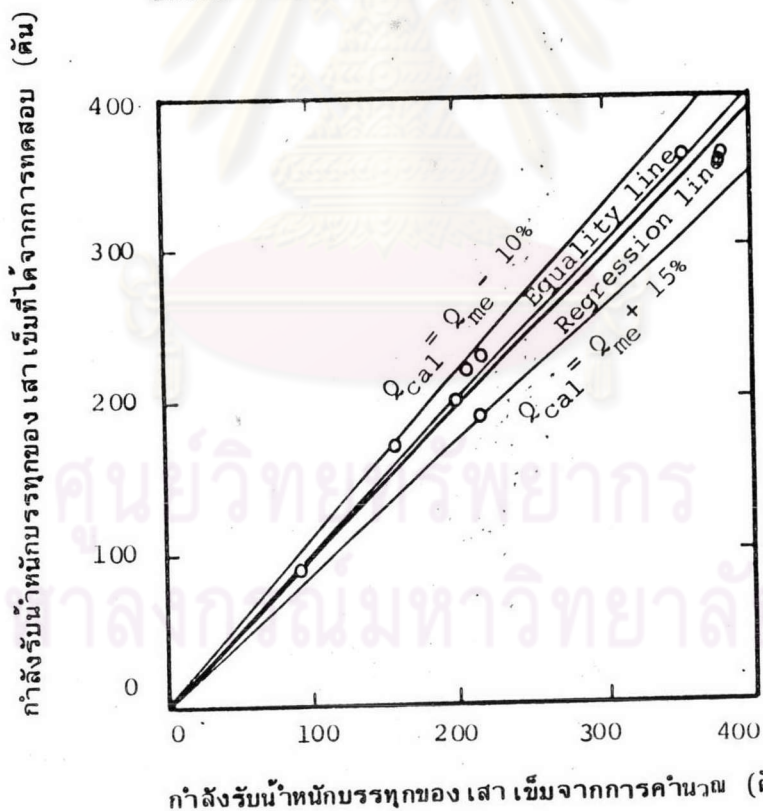
$$R^2 = 0.9967$$

เมื่อ $Q_{measure} = Q_{ult}$ ของเสาเข็มจากการทดสอบ และ $Q_{calculated} =$
 Q_{ult} ที่ได้จากการคำนวณ

รายละเอียดของการคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มทั้ง 9 ต้น
ได้รวบรวมอยู่ในตารางที่ ๘.10 ภาคผนวก ๘.12 และรูปที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบ
ระหว่าง $Q_{measure}$ กับ $Q_{calculated}$ ซึ่งจะสังเกตได้ว่า กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย
ของเสาเข็มจากการคำนวณ จะผิดพลาดจากการทดสอบอยู่ในช่วง -10 เปอร์เซ็นต์ ถึง +15
เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า N(SPT) กับมุม equivalent ฐ ของดินทรายปนดินเหนียวในกรุงเทพฯ



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสา เข็มระหว่างการทดลองกับการคำนวณ ปลาย เข็มอยู่ใน clayey sand (เฉพาะในชั้น clayey sand คำนวณจากมุม equivalent ฐ ที่ได้จากสมการ 4.12)

ตัวอย่างแสดงการคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสา เข็มที่จมอยู่ในชั้นดิน SC โดยคำนวณตาม equivalent $\bar{\sigma}$ จากค่า N(SPT) (สมการที่ 4.12) แสดงอยู่ข้างล่างนี้

เสา เข็ม เลขที่ 35 งานก่อสร้างทางด่วน (ดินแดง)

สถานที่ทดสอบ Station CH 1 + 870

หลุมเจาะสำรวจดิน Station CH 1 + 800

ชนิดและขนาดเสา เข็ม เข็ม ค.อ.ร. กลมมีรูตรงกลาง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 0.60

เมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.40 เมตร

พื้นที่หน้าตัดที่ปลาย เข็ม เท่ากับ 0.157 ตารางเมตร

ระดับปลาย เข็ม -27.55 เมตร จากผิวดิน

ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย ที่ทดสอบได้เท่ากับ 360 ตัน

คุณสมบัติของดิน (ดูข้อมูลหลุมเจาะในภาคผนวก ค. ประกอบ)

ดินเหนียวอ่อน (0-10.50 เมตร)

ความลึก (เมตร)	2.75	4.75	6.75	8.75	10.50
S_u (ตันต่อตาราง เมตร)	2.30	2.40	1.0	1.60	1.70
l_n (ความหนาของชั้นดิน เมตร)	3.75	2.00	2.00	1.875	0.875

$$\text{Avg. } S_u = \frac{\sum_{n=1}^n S_{un} l_n / \sum_{n=1}^n l_n}{n} = \frac{(2.3 \times 3.75 + 2.40 \times 2.0 + 1.0 \times 2.0 + 1.6 \times 1.875 + 1.7 \times 0.875)}{(3.75 + 2.00 + 2.00 + 1.875 + 0.875)}$$

$$= 1.84 \text{ ตันต่อตาราง เมตร}$$

ดินแข็งปานกลาง (10.50-15.0 เมตร)

ความลึก (เมตร)	10.50	12.50	14.50	15.00
S_u (ตันต่อตาราง เมตร)	1.70	2.40	3.00	5.0
l_n (เมตร)	1.0	2.0	1.25	0.25

$$\text{Avg. } S_u = \frac{\sum_{n=1}^n S_{un} l_n / \sum_{n=1}^n l_n}{n} = \frac{(1.70 \times 1.0 + 2.40 \times 2.0 + 3.0 \times 1.25 + 5.0 \times 0.25)}{(1.0 + 2.0 + 1.25 + 0.25)}$$

$$= 2.56 \text{ ตันต่อตาราง เมตร}$$

ดินเหนียวแข็ง-แข็งมาก (15.00-25.00 เมตร)

ความลึก (เมตร)	16.25	19.25	22.25	24.25
S_u (ตันต่อตาราง เมตร)	12.60	14.50	18.40	18.60
l_n (เมตร)	2.75	3.00	2.50	1.75

$$\text{Avg. } S_u = \frac{\sum_{n=1}^n S_{un} l_n / \sum_{n=1}^n l_n = \frac{(12.60 \times 2.75 + 14.50 \times 3.00 + 18.40 \times 2.50 + 18.60 \times 1.75)}{(2.75 + 3.00 + 2.50 + 1.75)} = 15.67 \text{ ตันต่อตาราง เมตร}$$

ดินทรายปนดินเหนียว (Clayey Sand) (25.00-31.50 เมตร)

ความลึก (เมตร)	26.50	28.00	30.0
N(SPT)	33	33	35
l_n	2.25	0.30	-

$$\bar{N}_s = \frac{\sum_{n=1}^n N_n l_n / \sum_{n=1}^n l_n = (33 \times 2.25 + 33 \times 0.30) / (2.25 + 0.30) = 33 \text{ blows per foot}$$

Piezometric Level = -24.00 เมตร จากผิวดิน (รูปที่ 4.13)

คำนวณแรงเสียดทานของเสา เข็มในส่วนที่จมอยู่ในดินเหนียว

ในชั้นดินอ่อน $Q_{s1} = \alpha S_u l_p = 0.96 \times 1.84 \times 10.50 \times 1.885 = 34.96 \text{ ตัน}$

ในชั้นดินแข็งปานกลาง $Q_{s2} = \alpha S_u l_p = 0.91 \times 2.56 \times 4.50 \times 1.885 = 19.76 \text{ ตัน}$

ในชั้นดินแข็ง-แข็งมาก $Q_{s3} = \alpha S_u l_p = 0.49 \times 15.67 \times 10.00 \times 1.885 = 144.73 \text{ ตัน} \times 1.75$

การคำนวณค่าความเค้นประสิทธิผลของดิน SC (Piezometric Level = -24.00 เมตร)

ความลึก (เมตร)	หน่วยน้ำหนักของดิน (γ_t) ตัน/ม ³	ความเค้นทั้งหมดของดิน ($\gamma_t l$) ตัน/ม ²	ความเค้นประสิทธิผล ของดิน SC ($\gamma_t l - u$) ตัน/ม ²
0			
4.0 Med. Clay	1.61	6.44	
10.5 Soft Clay	1.60	16.84	
15.0 Med. Clay	1.76	24.76	
20.0 Stiff Clay	1.93	34.41	
25.0 Very Stiff Clay	2.01	44.46	43.46
28.0 Clayey Sand	2.00	50.46	46.46

คำนวณค่าแรงเสียดทานและแรงดันที่ปลายเสาเข็มในชั้นดิน SC

หาค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$ จากค่า N โดยใช้สูตร equivalent $\bar{\phi} = 12.041N^{0.16228}$

(สมการ 4.12)

ค่า Avg.N ในชั้นดิน SC = 33 blows per foot

$$\therefore \text{equivalent } \bar{\phi} = 12.041(33)^{0.162} = 21.2 \text{ องศา}$$

จากรูปที่ 4.14 มุม $\bar{\phi} = 21.20$ องศา $\frac{D_c}{B} = 3.5$ นั่นคือ

$$D_c = 3.5 \times 0.60 = 2.10 \text{ เมตร}$$

คำนวณหาค่า \bar{q}_v และ \bar{q}_{vb}

ค่าความลึกวิกฤต $D_c = 2.10$ เมตร อยู่ลึกจากผิวดิน = 27.10 เมตร

25.00ม.

43.46 ตัน/ม²

2.10 ม.

27.10

27.55



45.56 ตัน/ม²

45.56 ตัน/ม²

$$\therefore \bar{q}_{vb} = 43.46 + (2.00 \times 2.10) - (1.0 \times 2.10) = 45.56 \text{ ตัน/ม}^2$$

$$\bar{q}_v = \frac{1}{2.55} \left[\frac{1}{2} (43.46 + 45.56) 2.10 + 45.56 \times 0.45 \right]$$

$$= 44.70 \text{ ตัน/ม}^2$$

Pressure Diagram

แรงเสียดทานของเสาเข็ม

$$Q_s = K_o \tan \bar{\phi} \bar{q}_v A_s = (1 - \sin 21.2^\circ) \tan 21.2^\circ (44.70) (1.885 \times 2.55)$$

$$= 53.20 \text{ ตัน}$$

แรงดันที่ปลายเข็ม

$$\frac{D_b}{B} = \frac{2.55}{0.60} = 4.25$$

จากรูปที่ 4.14 $\bar{\phi} = 21.2^\circ$, $\frac{D_b}{B} = 4.25$ $N_q = 14$

$$\therefore Q_p = N_q \bar{q}_{vb} A_p = 14 \times 45.56 \times 0.157 = 100.14 \text{ ตัน}$$

นั่นคือกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของ เสา เข็มทั้งหมด

$$\begin{aligned} (Q_{ult}) &= Q_{s1} + Q_{s2} + Q_{s3} + (Q_s + Q_p) SC \\ &= 34.96 + 19.76 + 144.73 + (53.20 + 100.14) \\ &= 352.79 \text{ ตัน} \end{aligned}$$

เมื่อเทียบค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของ เสา เข็มในชั้นดินทรายปนดินเหนียว (SC) ที่คำนวณได้จากสมการ $q_s = f^{\frac{n}{n}} N(SPT)$ และ $q_p = f^{\frac{n}{n}} N(SPT)$ (สมการที่ 4.10 ก และ ข) กับที่คำนวณได้จากการใช้ค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$ (ค่า equivalent $\bar{\phi}$ คำนวณได้จากค่า $N(SPT)$ ในสมการที่ 4.12) จะเห็นได้ว่า การคำนวณค่าแรงเสียดทานและแรงต้านทานที่ปลายเข็ม ($Q_s + Q_p$) ในดิน SC จากค่า N โดยตรง จะได้ค่า Q_{ult} (กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของ เสา เข็มทั้งหมด) ต่างจากผลการทดสอบเสา เข็มในสนามประมาณ ± 10 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ผลการคำนวณแรงต้านในดิน SC โดยใช้ค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$ จะได้ค่า Q_{ult} ผิดพลาดอยู่ในช่วง -10 เปอร์เซ็นต์ ถึง +15 เปอร์เซ็นต์ (เมื่อเทียบกับค่า Q_{ult} ที่ได้จากการทดสอบเสา เข็ม) จึงสรุปได้ว่า การคำนวณค่าแรงต้านของ เสา เข็ม เฉพาะในดิน SC ด้วยการใส่ค่า N ประมาณค่า q_s และ q_p โดยตรง จะได้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากกว่า ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากสูตร $q_s = f^{\frac{n}{n}} N$ และ $q_p = f^{\frac{n}{n}} N$ วิเคราะห์โดยตรงจากข้อมูลการทดสอบเสา เข็ม (การ Trial ทหาค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$ ในตอนแรก ก็เพื่อหาค่า Q_s และ Q_p ของดิน SC จากแรงต้านของ เสา เข็มที่ได้จากผลการทดสอบเท่านั้น) ส่วนการคำนวณแรงต้านของ เสา เข็มในดิน SC โดยใช้ค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$ (ประมาณจากค่า N) ซึ่งอาจจะมีค่าผิดพลาด (error) เกิดขึ้นในสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$ กับค่า N จะสังเกตได้จากในตารางที่ ฉ.9 ภาคผนวก ฉ.11 ค่า Avg. N อยู่ระหว่าง 19.7 ถึง 40 blows per foot และค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$ อยู่ระหว่าง 19.2 ถึง 21.9 องศา แต่จากการคำนวณหาค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$ จากผลการทดสอบเสา เข็ม (ดูในตารางที่ ฉ.8) จะได้ค่ามุม equivalent $\bar{\phi}$ อยู่ระหว่าง 18 ถึง 23 องศา

เงื่อนไขและขอบเขตของการคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของ เสา เข็มที่มีปลาย เข็มจมอยู่ในชั้นดินทรายปนดินเหนียว (Clayey Sand, SC) เฉพาะในส่วนที่เป็นดินทราย ปนดินเหนียว ค่าแรงเสียดทานและแรงต้านที่ปลายจากสูตร q_s และ $q_p = f_s^N N$ (สมการที่ 4.10 ก และ ข) ที่ทำได้ มีดังนี้

1. ใช้คำนวณหากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของ เสา เข็มตอก ชนิดของ เสา เข็ม เป็น เสา เข็มคอนกรีตอัดแรง ตอกในชั้นดินกรุงเทพฯ
2. ค่าแรงเสียดทานของ เสา เข็มในชั้นดินเหนียวอ่อน แข็งปานกลางและดินแข็ง ให้ใช้วิธีการคำนวณตามที่ได้เสนอในหัวข้อ 4.3
3. ค่าความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งของดินทรายปนดินเหนียวนี้ ค่าแรงจากความเค้น เนื่องจากน้ำหนักของดินชั้นบนทั้งหมด ลบด้วยหน่วยแรงดันของน้ำในดิน โดยประมาณ จากเส้น Contour บอกค่าระดับน้ำในดินทรายของชั้นดินกรุงเทพฯ ในรูปที่ 4.13
4. ค่า $N(SPT)$ ใช้ค่าที่วัดได้ในสนาม โดยไม่ต้องปรับแก้ค่า N สำหรับค่า Avg. N หาได้จากค่าเฉลี่ย N ตลอดความยาวของเสาเข็มในส่วนที่เป็นดิน SC เพื่อให้คำนวณหาค่าหน่วยแรงเสียดทานของ เสา เข็ม (ค่าเฉลี่ยของ N คือ $\bar{N}_s = \frac{\sum_{n=1}^n N_n l_n / \sum_{n=1}^n l_n$ เมื่อ N_n คือค่า N ที่วัดได้ในชั้นดินหนา l_n) ส่วนค่า N_p เป็นค่า N (ไม่ต้องแก้ไข) ที่ระดับปลายเสาเข็ม หรือใช้ค่า N เฉลี่ยของชั้นดินที่อยู่ในช่วง $\pm B$ จากระดับปลายเสาเข็ม (B คือ เส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม)
5. ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดของ เสา เข็ม ทำได้โดยคำนวณค่าแรงต้านทานของเสาเข็มในดินทรายปนดินเหนียวจากสูตร empirical ที่ทำได้นี้รวมกับค่าแรงเสียดทานในดินเหนียวชั้นบน (คำนวณตามวิธีการที่เสนอในข้อ 4.3) จะเป็นค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของ เสา เข็ม ซึ่งค่าน้ำหนักออกแบบใช้งาน ผู้เขียนแนะนำให้ใช้ค่าพิสัยความปลอดภัยเท่ากับ 2.5 ถึง 3