

บทที่ 4

การวิเคราะห์และอภิปรายผลการวิจัย

4.1 การแปลผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม

ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบสถิตยศาสตร์แสดงในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่มากกระทำกับค่าการทรุดตัว (Load – Settlement curve) ซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก การแปลผลการทดสอบเพื่อให้ได้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้ทฤษฎีของ Butler & Hoy (1977) และ Mazurkiewicz (1972) ซึ่งจากผลการวิจัยของ Pimpasugdi (1989) Wachiraprakarnpong (1993) และ Soontornsiri (1995) พบว่าทฤษฎีทั้งสองมีความเป็นไปได้ (ใกล้เคียง) มากที่สุดในการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม

การหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติของเสาเข็มตามทฤษฎีของ Butler & Hoy (1977) ต้องอาศัยข้อมูลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มที่ทดสอบถึงจุดวิบัติเพื่อหาค่าส่วนลาดชัน 0.05 นิ้วต่อตัน แต่ในกรณีที่มีการทดสอบเสาเข็มได้ทำการทดสอบเพียงถึงค่าน้ำหนักบรรทุกเป็นสองเท่าของน้ำหนักบรรทุกที่ออกแบบจะไม่สามารถหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิบัติตามทฤษฎีของ Butler & Hoy ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ทฤษฎีของ Mazurkiewicz (1972) ในการหาค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มสำหรับเสาเข็มที่ทดสอบไม่ถึงจุดวิบัติ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มที่วิเคราะห์ได้จากสองทฤษฎีดังกล่าวข้างต้น มีรายละเอียดแยกตามประเภทเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัยได้ดังนี้

4.1.1 เสาเข็มเจาะ (Bored Pile)

ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะที่ติดเครื่องมือวัด VWSG ที่รวบรวมได้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ เสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สองจำนวน 17 ต้น เสาเข็มอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สองจำนวน 4 ต้น และเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สองจำนวน 5

ต้น ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งจากการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดวิกฤติของเสาเข็ม (Q_c) ตามทฤษฎีของ Butler & Hoy และค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม (Q_u) จากทฤษฎีของ Mazurkiewicz พบว่า

- สำหรับเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง

$$Q_c = 0.957 Q_u \quad (R^2 = 0.9500)$$

- สำหรับเสาเข็มอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง

$$Q_c = 0.902 Q_u \quad (R^2 = 0.9914)$$

- สำหรับเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง

$$Q_c = 0.792 Q_u \quad (R^2 = 0.9994)$$

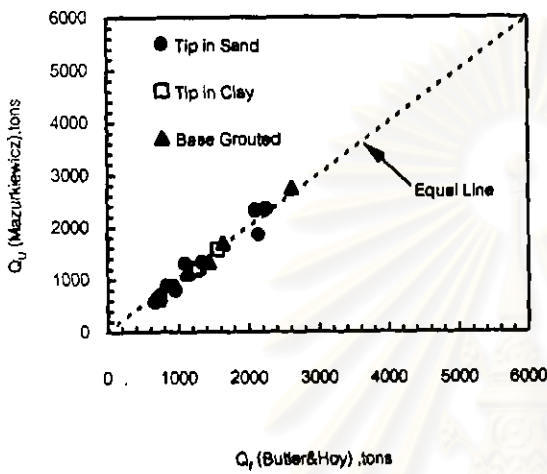
กราฟความสัมพันธ์ Q_c จาก Mazurkiewicz และ Q_c จาก Butler & Hoy สำหรับเสาเข็มเจาะแสดงในรูปที่ 4.1 และค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มเจาะที่วิเคราะห์ได้จากทฤษฎีทั้งสองแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่าสำหรับเสาเข็มเจาะที่ทดสอบไม่ถึงจุดวิกฤติสามารถใช้ทฤษฎีของ Mazurkiewicz ประมาณค่า Q_c ตามทฤษฎีของ Butler & Hoy ได้เหมาะสม โดย Q_u จาก Mazurkiewicz จะได้ค่าสูงกว่าเล็กน้อย ซึ่งได้ผลสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Pimpasugdi (1989) Wachiraprakarnpong (1993) และ Soontornsiri (1995)

4.1.2 เสาเข็มแบบเรียด (Barrette Pile)

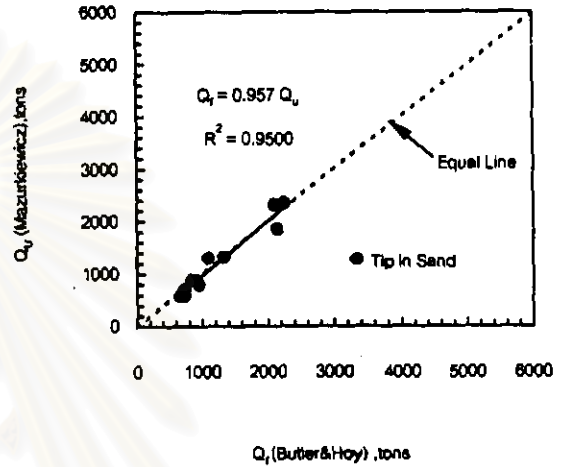
การแปลผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบเรียดทั้งที่มีและไม่มี การติดตั้งเครื่องมือวัดทางธรณีเทคนิคจำนวน 9 ต้น ซึ่งเป็นเสาเข็มที่ทดสอบถึงจุดวิกฤติจำนวน 4 ต้น โดยแยกประเภทเสาเข็มแบบเรียดตามสภาวะชั้นดินปลายเสาเข็มและสภาวะการ Treatment ปลายเข็มได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2

เนื่องจากเสาเข็มแบบเรียดเริ่มมีการนำมาประยุกต์ใช้ไม่นานนักทำให้จำนวนเสาเข็มแบบเรียดที่มีการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกมีน้อย จึงไม่สามารถหาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Q_u จาก Mazurkiewicz และ Q_c จาก Butler & Hoy แยกตามประเภทเสาเข็มคือเสาเข็มที่

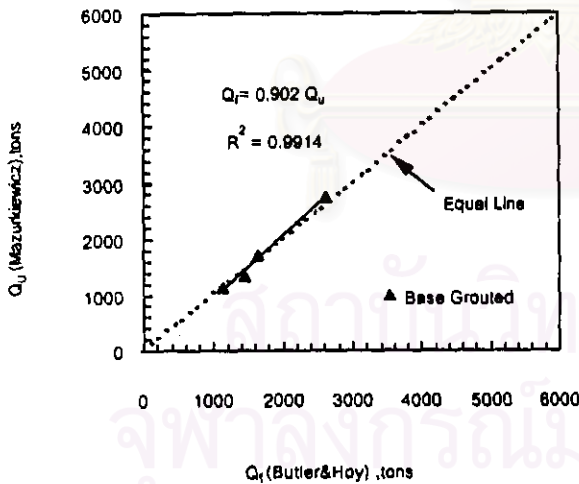
ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง เสาเข็มอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สองและเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สองได้ แต่สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์รวมกันดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งจากแนวโน้มความสัมพันธ์พบว่าค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มที่วิเคราะห์จากทฤษฎีทั้งสองมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย



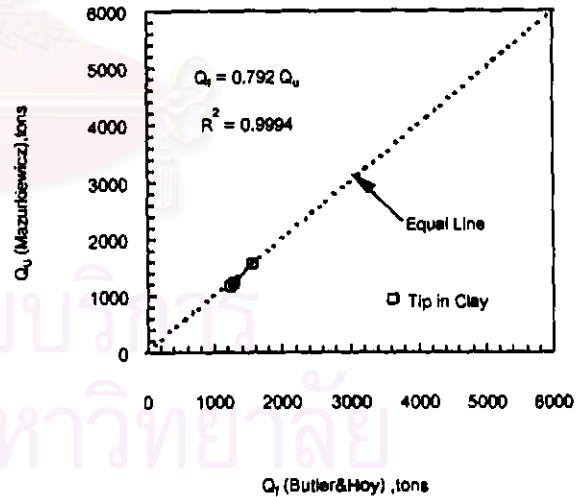
ก. ผลวิเคราะห์รวม



ข. เสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง



ค. เสาเข็มอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง



ง. เสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง

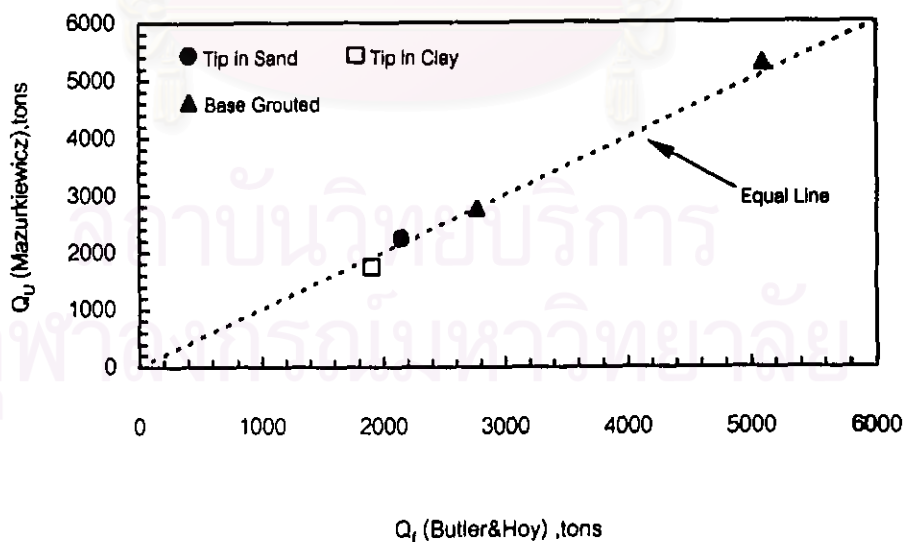
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Q_u จาก Mazurkiewicz และ Q_r จาก Butler & Hoy สำหรับเสาเข็มเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัยนี้โดยใช้
ทฤษฎีของ Butler & Hoy (1977) และ Mazurkiewicz (1972)

หมายเลข เสาเข็ม	โครงการ	ขนาด	กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย		หมายเหตุ
			Q _r (Butler&Hoy)	Q _u (Mazurkiewicz)	
เสาเข็มเจาะที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัด (Instrumented Bored Piles)					
TP-1	BBBE	φ 1.2 x 57.10	1100	1300	
TP-2	BBBE	φ 1.2 x 46.25	1818	1900	Q _r จากกรุปที่ 4.1 ข
TP-3	B-PE	φ 1.0 x 46.51	1340	1320	
TP-4	B-PE	φ 1.0 x 49.47	960	800	
TP-5	SES	φ 1.0 x 43.00	920	880	
TP-6	SES	φ 1.0 x 41.00	850	1000	Q _r จากกรุปที่ 4.1 ข
TP-7	SES	φ 1.2 x 43.60	1240	1180	
TP-8	B-PE	φ 1.2 x 43.50	840	880	
TP-9	B-PE	φ 1.0 x 43.50	710	660	
TP-10	Abac	φ 1.2 x 54.00	840*	1060	Q _r จากกรุปที่ 4.1 ง
TP-11	BECM	φ 1.5 x 57.50	2620	2750	
TP-12	BBBE	φ 1.2 x 44.64	1130	1140	
TP-13	BBBE	φ 1.2 x 53.79	1440	1340	
TP-14	BBBE	φ 1.2 x 46.00	1640	1700	
TP-15	BTS	φ 1.0 x 47.50	740	600	
TP-16	Asoke	φ 1.0 x 55.20	1378	1440	Q _r จากกรุปที่ 4.1 ข
TP-17	Worajack	φ 1.5 x 55.00	2667	3100	Q _r จากกรุปที่ 4.1 ข
TP-18	Hopewell	φ 1.5 x 55.70	2100	2320	
TP-19	Hopewell	φ 0.8 x 43.30	750	710	
TP-20	Hopewell	φ 1.5 x 41.81	2250	2350	
TP-21	Hopewell	φ 1.5 x 49.65	2150	1850	
TP-22	Hopewell	φ 0.8 x 39.80	660	580	
TP-23	Hopewell	φ 1.5 x 50.97	1280	1220	
TP-24	Yannawa	φ 1.5 x 60.00	1560	1580	
TP-25	Hopewell	φ 1.5 x 49.70	2536	2650	Q _r จากกรุปที่ 4.1 ข
TP-26	Rama-8	φ 0.8 x 49.00	957	1000	Q _r จากกรุปที่ 4.1 ข

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยใช้ทฤษฎีของ Butler & Hoy (1977) และ Mazurkiewicz (1972)

หมายเลข เสาเข็ม	โครงการ	ขนาด	กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย		หมายเหตุ
			Q_r (Butler&Hoy)	Q_u (Mazurkiewicz)	
เสาเข็มแบบเรียดที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัด (Instrumented Barrette Piles)					
BP-1	BECM	1.5 x 3.0 x 57.20	5100	5300	
BP-2	MRTA 12	0.8 x 2.7 x 47.10	1900	1750	
BP-3		0.8 x 2.5 x 46.50	2770	2770	
BP-4		0.8 x 2.5 x 46.30	2800	3300	Q_u จากรูปที่ 4.2
เสาเข็มแบบเรียดที่ไม่มีการติดตั้งเครื่องมือวัด (Non-Instrumented Barrette Piles)					
BP-5	Green To.	1.0 x 2.7 x 48.90	2150	2250	
BP-6	Jewelry	0.85 x 2.72 x 61.8	3618	3700	Q_u จากรูปที่ 4.2
BP-7	R.Rajdumri	0.8 x 2.7 x 55.70	3335	3410	Q_u จากรูปที่ 4.2
BP-8	Vipavadee	0.8 x 2.7 x 50.00	2885	2950	Q_u จากรูปที่ 4.2
BP-9	Langsuan	0.8 x 2.7 x 55.00	3247	3320	Q_u จากรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Q_u จาก Mazurkiewicz และ Q_r จาก Butler & Hoy สำหรับเสาเข็มแบบเรียดในชั้นดินกรุงเทพฯ

4.2 การประมาณค่าแรงเสียดทานด้านข้าง

การประมาณค่าแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มจะแสดงในรูปของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องดังรายละเอียดที่กล่าวไว้ในเรื่องการประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเดี่ยวโดยวิธีสถิตยศาสตร์ในบทที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้ได้แก่ค่า adhesion factor (α) และค่า friction factor β ($K_s \tan \delta$) สำหรับการประมาณค่าแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มในชั้นดินเหนียวและชั้นทรายตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้มีการวิเคราะห์ค่า Skin Friction Ratio (f_s / N สำหรับชั้นดินเหนียว และ f_s / N' สำหรับชั้นดินทราย) เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลของเสาเข็มในแต่ละประเภท

การหาค่า adhesion factor (α) และค่า friction factor β ($K_s \tan \delta$) ต้องทำการวิเคราะห์กลับ (Back Analysis) จากค่าแรงเสียดทาน (f_s) ที่ค่าการทรุดตัวของหัวเสาเข็ม (deformation at pile top) ให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย (Q_{ult}) ตามทฤษฎีของ Buttle&Hoy(1977) ซึ่งคำนวณได้โดยใช้ข้อมูลผลการวัดค่าการส่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกภายนอกที่มากกระทำ (Load transfer) จากหัวเสาเข็ม (Pile Top) ซึ่งข้อมูลที่รวบรวมได้ส่วนใหญ่ตำแหน่ง VWSG จะติดที่ระดับความลึกที่มีการเปลี่ยนแปลงชั้นดินในแต่ละชั้นดินจนถึงปลายเสาเข็ม (Pile Tip) รายละเอียดผลการวิเคราะห์มีดังนี้

4.2.1 ชั้นดินเหนียว

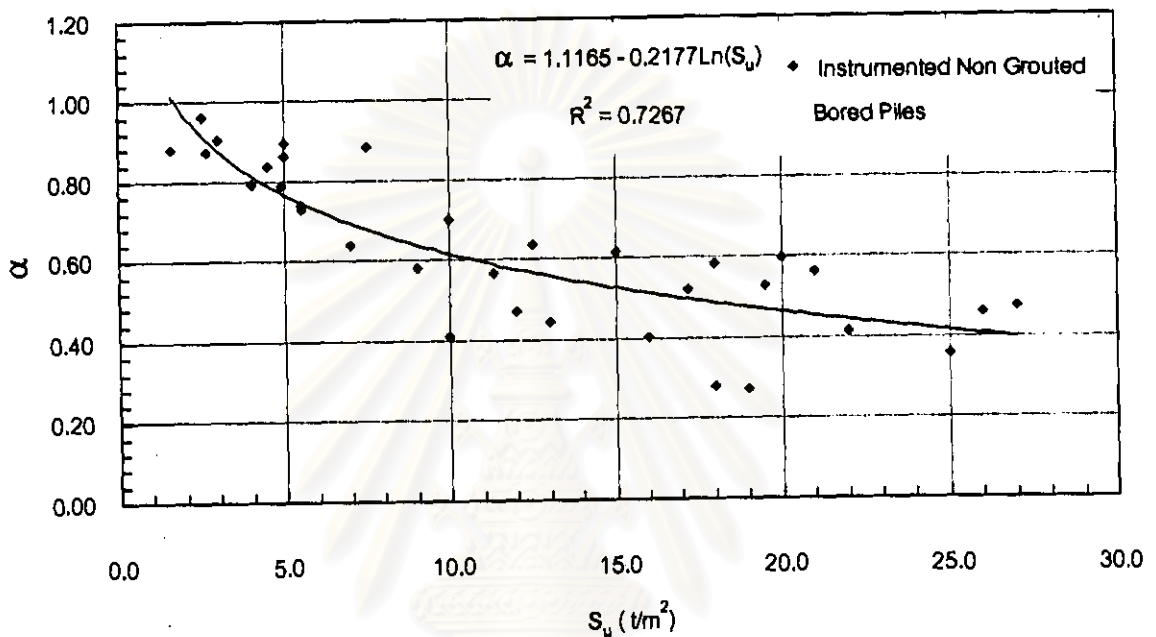
ค่า α สำหรับการประมาณค่าแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียวที่ได้ในงานวิจัยนี้มาจากการแปลผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเจาะและเสาเข็มแบบเรียดที่ติดตั้งเครื่องมือวัด VWSG ที่รวบรวมได้ในชั้นดินกรุงเทพฯ โดยหาความสัมพันธ์เทียบกับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) เฉลี่ยตลอดชั้นดินเหนียวที่พิจารณาที่ได้จากการทดสอบ Unconfined Compression สำหรับเสาเข็มในแต่ละประเภท คือ

4.2.1.1 เสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง

เสาเข็มในสถานะนี้ที่รวบรวมได้มีเพียงเสาเข็มเจาะที่ติดตั้งเครื่องมือวัดเท่านั้น ซึ่งมีจำนวนทั้งสิ้น 15 ต้น ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u แสดงในรูปที่ 4.3 โดยมีความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ดังนี้

$$\alpha = 1.1165 - 0.2177 \ln(S_u) \quad (R^2 = 0.7267)$$

ค่า S_u เป็นค่าเฉลี่ยตลอดชั้นดินเหนียวที่พิจารณา อยู่ในหน่วยตันต่อตารางเมตร โดยค่า α ที่วิเคราะห์ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 1.0 ถึง 0.4 เมื่อ S_u มีค่าตั้งแต่ 1.0 – 27.0 ตันต่อตารางเมตร

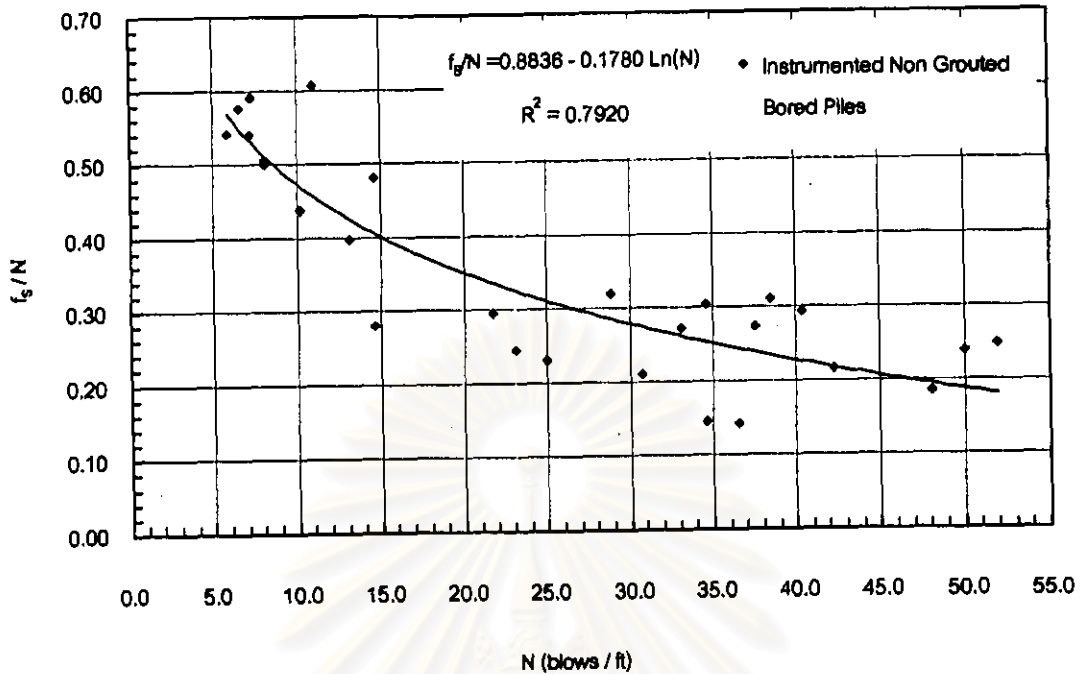


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u ในชั้นดินเหนียวสำหรับเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง

เมื่อพิจารณาในความสัมพันธ์ระหว่างค่า Skin Friction Ratio (f_s / N) กับค่า SPT N Value ตามรูปที่ 4.4 ได้ความสัมพันธ์คือ

$$f_s / N = 0.8836 - 0.1780 \ln(N) \quad (R^2 = 0.7920)$$

N คือค่า SPT – N Value ที่ไม่มีการปรับแก้ มีหน่วยเป็นครั้งต่อฟุตและเป็นค่าเฉลี่ยตลอดชั้นดินเหนียวที่พิจารณา ซึ่งเป็นค่าเฉพาะชั้นดินเหนียวแข็งเท่านั้น



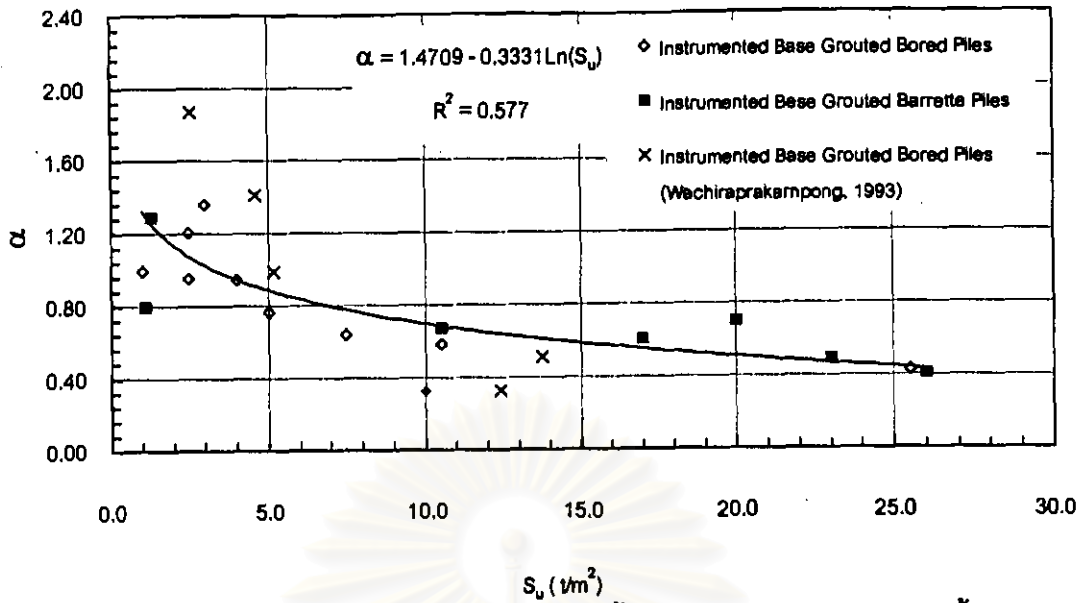
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า f_u/N กับ N ในชั้นดินเหนียวสำหรับเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง

4.2.1.2 เสาเข็มอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง

เสาเข็มอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สองที่ทำการรวบรวมได้ในงานวิจัยนี้เป็นเสาเข็มเจาะที่ติด VWSG จำนวน 4 ต้น และเป็นเสาเข็มแบบเรตที่ติด VWSG จำนวน 3 ต้น โดยมีการเพิ่มเติมข้อมูลผลการวิเคราะห์หาค่า α สำหรับเสาเข็มเจาะจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Wachiraprakarnpong, 1993) ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u แสดงในรูปที่ 4.5 โดยมีความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ดังนี้

$$\alpha = 1.4709 - 0.3331 \ln(S_u) \quad (R^2 = 0.5770)$$

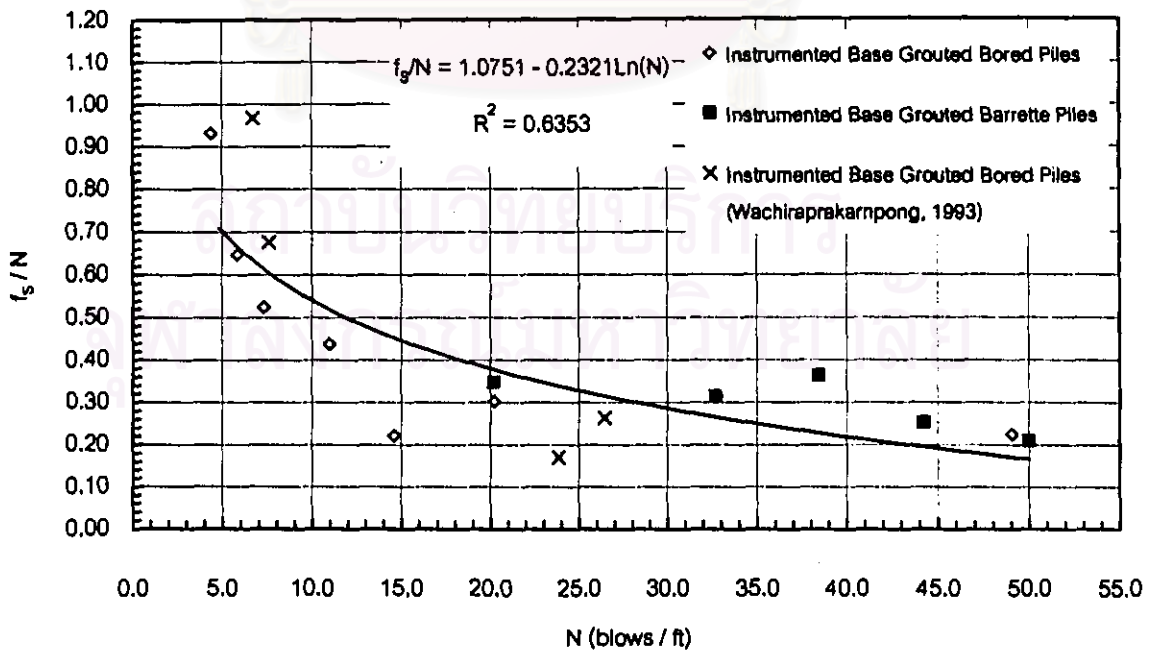
ค่า S_u เป็นค่าเฉลี่ยตลอดชั้นดินเหนียวที่พิจารณา อยู่ในหน่วยตันต่อตารางเมตร. โดยค่า α สำหรับเสาเข็มเจาะและเสาเข็มแบบเรตมีแนวโน้มอยู่ในความสัมพันธ์ลักษณะเดียวกัน



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u ในชั้นดินเหนียวสำหรับเสาเข็มอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Skin Friction Ratio (f_s / N) กับค่า SPT-N Value สำหรับเสาเข็มอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สองในชั้นดินกรุงเทพฯ ๗ ตามรูปที่ 4.6 ได้ความสัมพันธ์คือ

$$f_s / N = 1.0751 - 0.2321 \ln(N) \quad (R^2 = 0.6353)$$



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า f_s / N กับ N ในชั้นดินเหนียวสำหรับเสาเข็มอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง

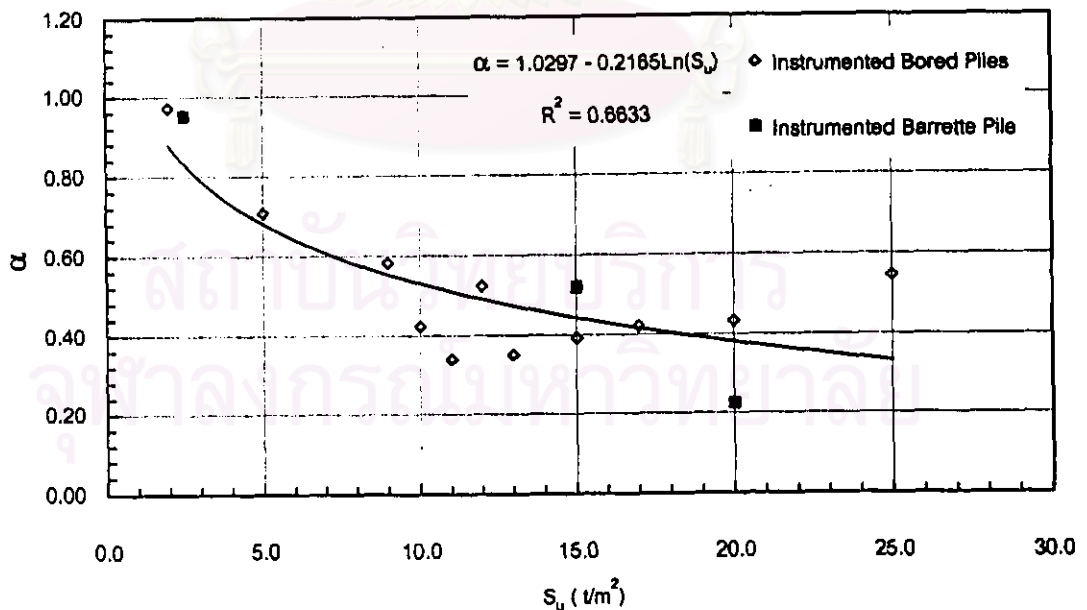
N คือค่า SPT – N Value ที่ไม่มีการปรับแก้ มีหน่วยเป็นครั้งต่อฟุตและเป็นค่าเฉลี่ยตลอดชั้นดินเหนียวที่พิจารณา ซึ่งเป็นค่าเฉพาะชั้นดินเหนียวแข็งเท่านั้น โดยพบว่าแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่า Skin Friction Ratio (f_s / N) กับค่า SPT N-Value ของเสาเข็มเจาะและเสาเข็มแบเรตเป็นไปในทางเดียวกัน

4.2.1.3 เสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง

เสาเข็มเจาะและเสาเข็มแบเรตที่มีปลายอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง (2nd Very Stiff to Hard Silty Clay) ที่รวบรวมได้ประกอบด้วยเสาเข็มแบเรตที่ติด VWSG จำนวน 1 ต้น และเสาเข็มเจาะที่ติด VWSG จำนวน 5 ต้น ผลการวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u แสดงอยู่ในรูปที่ 4.7 ซึ่งพบว่า

$$\alpha = 1.0297 - 0.2165 \ln(S_u) \quad (R^2 = 0.6633)$$

ค่า S_u เป็นค่าเฉลี่ยตลอดชั้นดินเหนียวที่พิจารณา อยู่ในหน่วยตันต่อตารางเมตร โดยค่า α มีค่าอยู่ระหว่าง 0.9 ถึง 0.35 เมื่อ S_u มีค่าตั้งแต่ 2.0 ถึง 25.0 ตันต่อตารางเมตร และจากรูปที่ 4.7 พบว่าค่า α ของเสาเข็มแบเรตมีแนวโน้มอยู่ในความสัมพันธ์ลักษณะเดียวกับเสาเข็มเจาะ

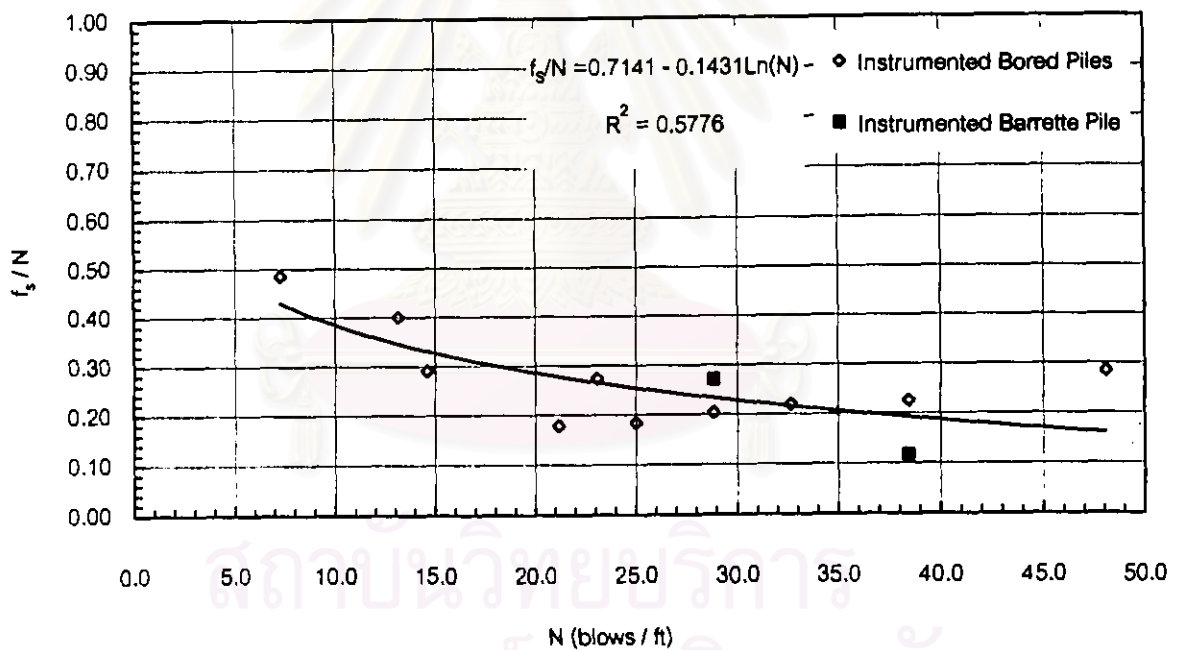


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับ S_u ในชั้นดินเหนียวสำหรับเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่า Skin Friction Ratio (f_s / N) กับค่า SPT N Value ของเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สองแสดงในรูปที่ 4.8 โดยมีความสัมพันธ์จากการวิเคราะห์การถดถอย คือ

$$f_s / N = 0.7141 - 0.1431 \ln(N) \quad (R^2 = 0.5776)$$

N คือค่า SPT - N Value ที่ไม่มีการปรับแก้ มีหน่วยเป็นครั้งต่อฟุตและเป็นค่าเฉลี่ยตลอดชั้นดินเหนียวที่พิจารณา ซึ่งเป็นค่าเฉพาะชั้นดินเหนียวแข็งเท่านั้น จากความสัมพันธ์พบว่าทั้งเสาเข็มเจาะและเสาเข็มแบเรตต์ ให้ค่า f_s / N น้อยกว่าหนึ่ง และมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า f_s / N กับ N ในชั้นดินเหนียวสำหรับเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง

4.2.2 ชั้นดินทราย

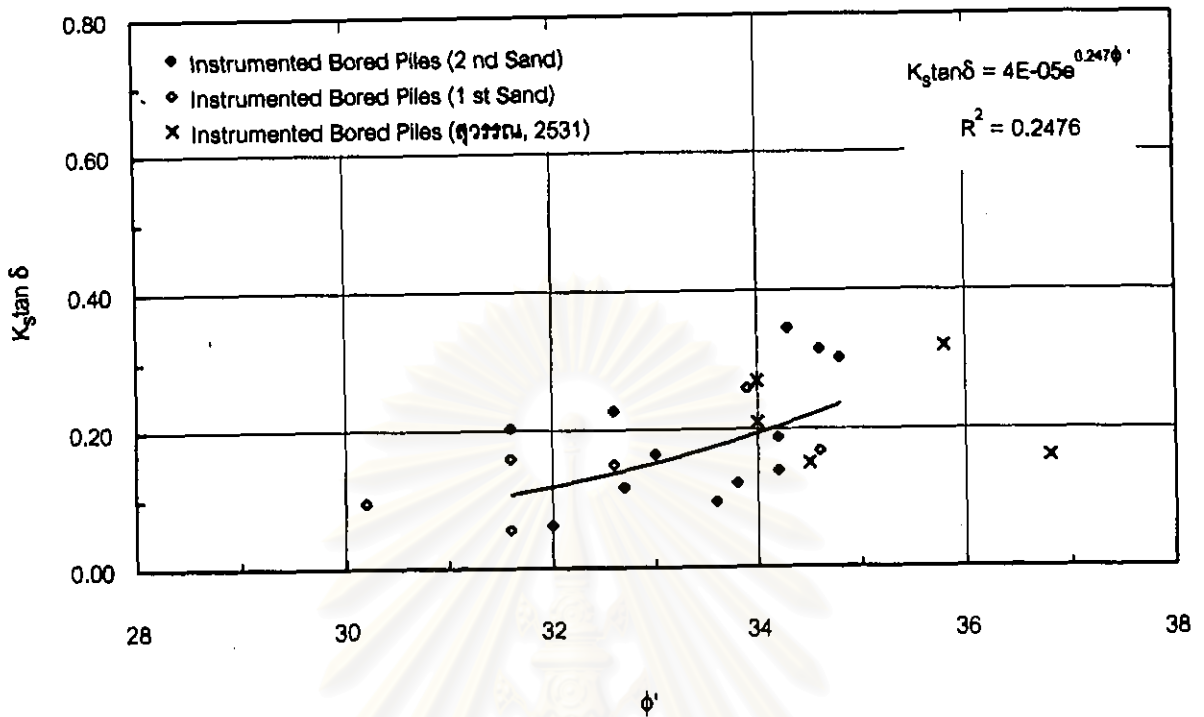
ค่าพารามิเตอร์ในการประมาณค่าแรงเสียดทานในชั้นทราย คือค่า β (Burland, 1973) ที่มีค่าเท่ากับ $K_u \tan \delta$ ซึ่งสามารถหาได้โดยวิธีการวิเคราะห์หาค่ากลับจากค่าแรงเสียดทาน (f_g) ในชั้นทราย ที่ค่าการทรุดตัวของหัวเสาเข็ม (deformation at pile top) ให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (Q_{ult}) ตามทฤษฎีของ Butler & Hoy (1977) และนำผลการวิเคราะห์แสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่าง $K_u \tan \delta$ กับค่ามุม ϕ' โดยค่า Effective Overburden Pressure (σ'_v) ณ จุดกึ่งกลางชั้นดินที่พิจารณาที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่ากลับเป็นค่าที่ได้พิจารณาผลของการ drawdown ของระดับน้ำใต้ดิน (Piezometric Level) ผลการวิเคราะห์แยกตามประเภทของเสาเข็มในงานวิจัยนี้ มีรายละเอียดดังนี้

4.2.2.1 เสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง

ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง $K_u \tan \delta$ กับค่ามุม ϕ' สำหรับเสาเข็มเจาะที่ตีด VWSG ที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง จำนวน 15 ต้น โดยทำการแยกพิจารณาออกเป็น ค่า $K_u \tan \delta$ สำหรับชั้นทรายชั้นที่หนึ่งและค่า $K_u \tan \delta$ สำหรับชั้นทรายชั้นที่สอง แสดงในรูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์พบว่าค่า $K_u \tan \delta$ สำหรับชั้นทรายชั้นที่หนึ่งและชั้นทรายชั้นที่สองอยู่ในความสัมพันธ์แนวเดียวกัน โดยผลการวิเคราะห์นี้ได้รวมผลจากงานวิจัยของสุวรรณ (2531) ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง $K_u \tan \delta$ กับค่ามุม ϕ' ที่ได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการศึกษาของสุวรรณ

เมื่อพิจารณาในรูปสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $K_u \tan \delta$ กับค่ามุม ϕ' จากรูปที่ 4.9 พบว่า

$$K_u \tan \delta = (0.00004)e^{0.247 \phi'} \quad (R^2 = 0.2476)$$

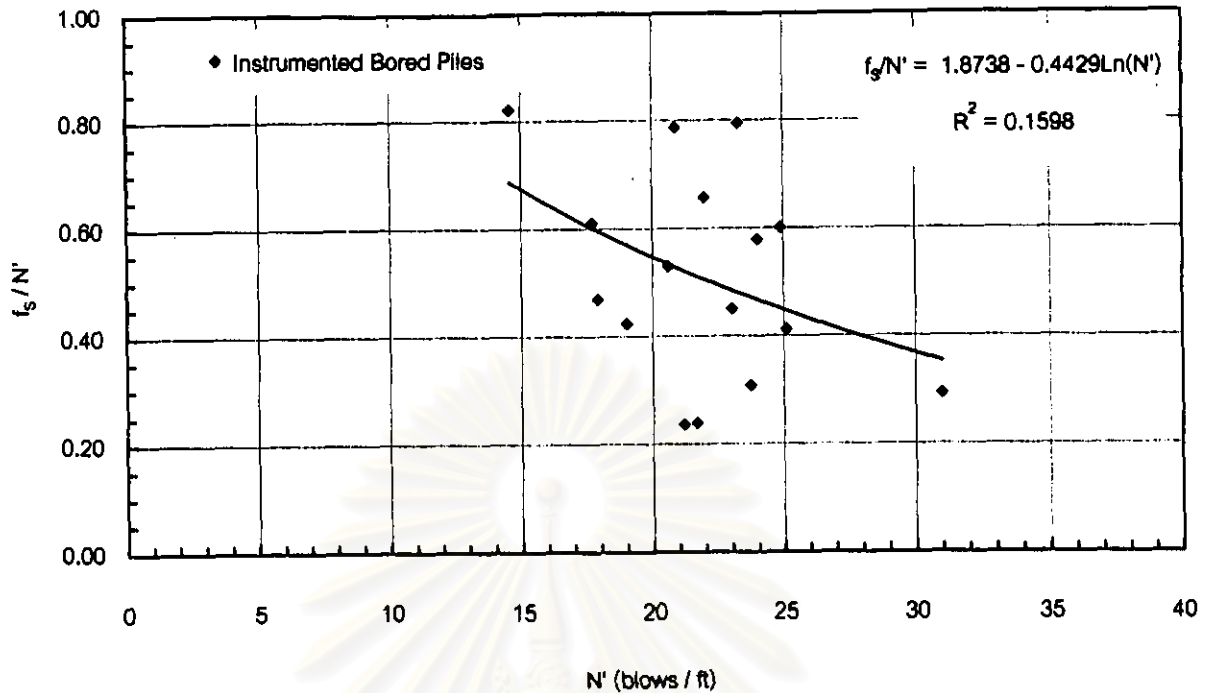


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K_s \tan \delta$ กับค่ามุม ϕ' ในชั้นทรายสำหรับเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง

เมื่อนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า f_s / N' กับ N' ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$f_s / N' = 1.8738 - 0.4429 \ln(N') \quad (R^2 = 0.1598)$$

ค่า N' คือ ค่า SPT - N Value ภายหลังจากปรับแก้เนื่องจากผลของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (σ'_{vo}) จากรูปที่ 4.10 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง f_s / N' กับ N' มีค่า R^2 เท่ากับ 0.1598 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าความสัมพันธ์มีลักษณะกระจัดกระจายมาก



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า f_s / N' กับค่า N' ในชั้นทรายสำหรับเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง

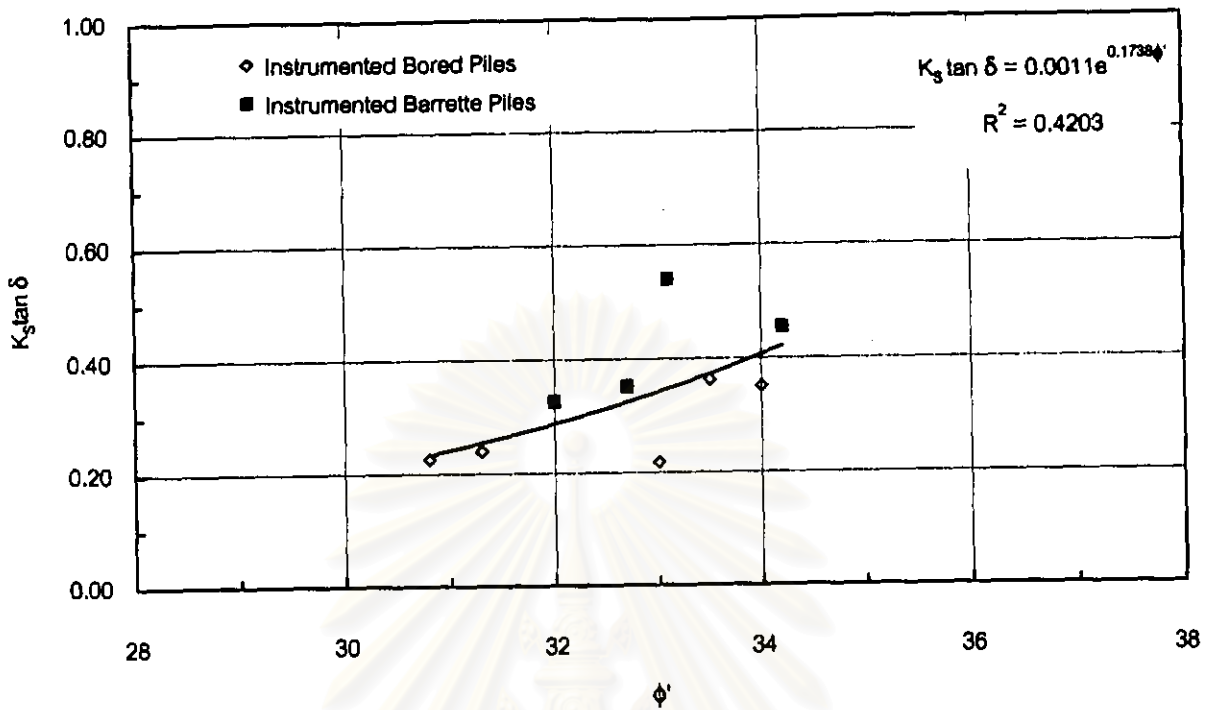
4.2.2.2 เสาเข็มอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง

ผลการวิเคราะห์หาค่า $K_s \tan \delta$ ของเสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง ซึ่งประกอบด้วยเสาเข็มแบบเรียดที่ติด VWSG จำนวน 3 ต้น และเป็นเสาเข็มเจาะที่ติด VWSG จำนวน 4 ต้น แสดงในรูปที่ 4.11 โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ

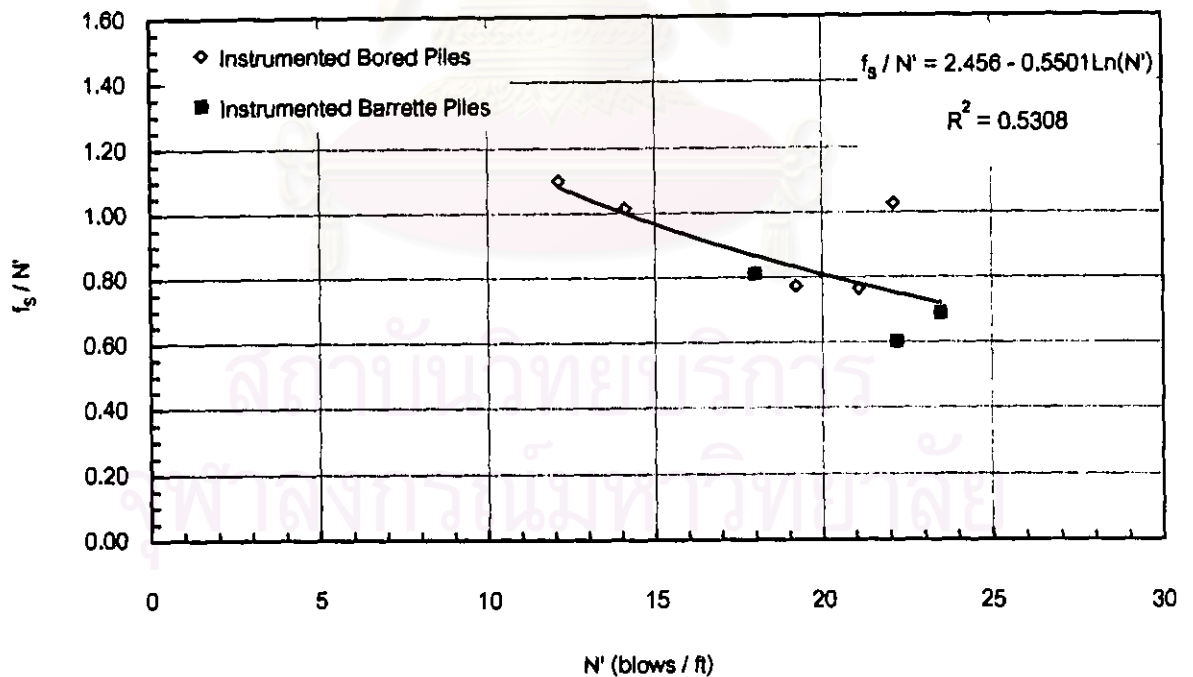
$$K_s \tan \delta = (0.0011) e^{0.1738 \phi'} \quad (R^2 = 0.4203)$$

จากการวิเคราะห์พบว่าค่า $K_s \tan \delta$ ที่ได้สำหรับเสาเข็มทั้งสองมีแนวโน้มไม่แตกต่างกันมาก และเมื่อพิจารณาในค่าความสัมพันธ์ของค่า Skin Friction Ratio (รูปที่ 4.12) ก็ได้ผลสรุปในลักษณะเดียวกัน โดยค่า f_s / N' หาได้จาก

$$f_s / N' = 2.456 - 0.5501 \ln(N') \quad (R^2 = 0.5308)$$



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K_s \tan \delta$ กับค่ามุม ϕ' ในชั้นทรายสำหรับเสาเข็มอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง



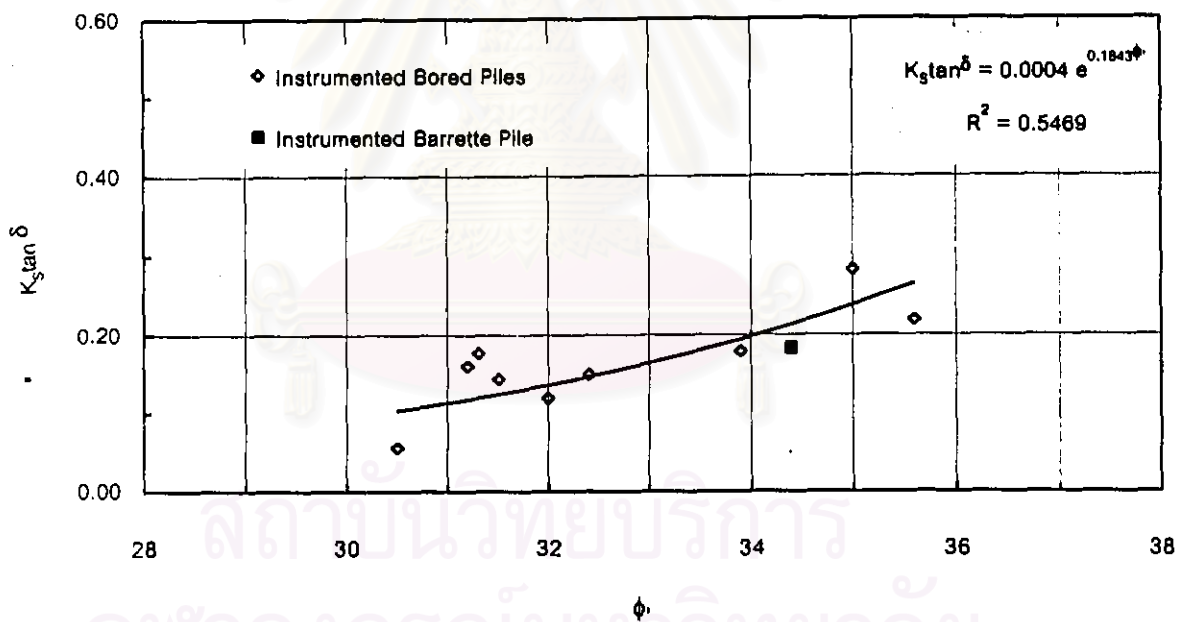
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า f_s / N' กับค่า N' ในชั้นทรายสำหรับเสาเข็มอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง

4.2.2.3 เสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง

ผลการวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K_s \tan \delta$ กับค่า ϕ' สำหรับเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง (Very Stiff to Hard Silty Clay) ซึ่งเป็นเสาเข็มแบบเรียดที่ติด VWSG จำนวน 1 ต้น และเสาเข็มเจาะที่ติด VWSG จำนวน 5 ต้น แสดงในรูปที่ 4.13 โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$K_s \tan \delta = (0.0004) e^{0.1843 \phi'} \quad (R^2 = 0.5469)$$

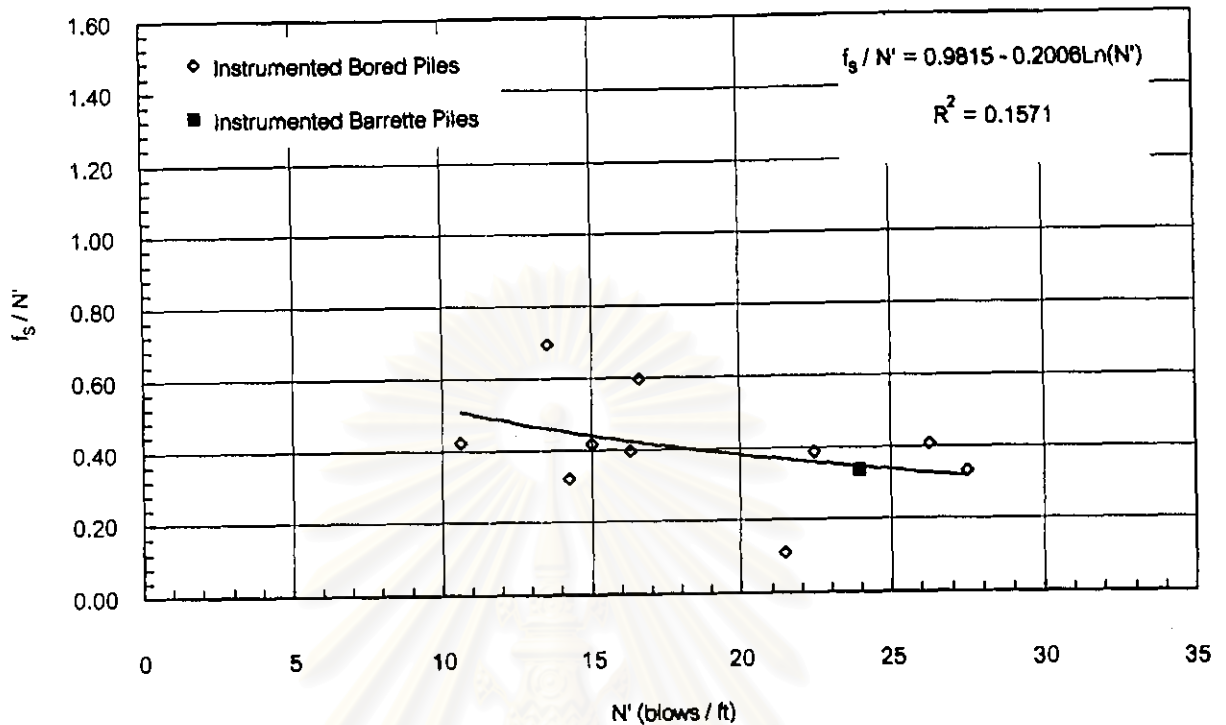
จากการวิเคราะห์พบว่าค่า $K_s \tan \delta$ สำหรับเสาเข็มแบบเรียดมีแนวโน้มไม่แตกต่างจากเสาเข็มเจาะมาก โดยมีความสัมพันธ์อยู่ในแนวโน้มเดียวกันซึ่งสามารถหาได้จากสมการข้างต้น



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K_s \tan \delta$ กับค่ามุม ϕ' ในชั้นทรายสำหรับเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง

เมื่อพิจารณาในค่าความสัมพันธ์ของค่า Skin Friction Ratio (รูปที่ 4.14) ก็ได้ผลสรุปในลักษณะเดียวกันคือค่า f_s / N' สำหรับเสาเข็มทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่า f_s / N' หาได้จาก

$$f_s / N' = 0.9815 - 0.2006 \ln(N') \quad (R^2 = 0.1571)$$



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า f_s / N' กับค่า N' ในชั้นทรายสำหรับเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง

4.3 การประมาณค่าแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม

การประมาณค่าแรงต้านที่ปลายเสาเข็มสำหรับผลวิเคราะห์ที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลการทดสอบเสาเข็มเจาะและเสาเข็มแบเรตต์ที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดในชั้นดินกรุงเทพ ฯ ซึ่งมีปลายเสาเข็มอยู่ในสถานะชั้นดินแตกต่างกัน 3 สถานะ คือเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง เสาเข็มอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง และเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง ผลการวิเคราะห์จะแสดงในรูปของค่าพารามิเตอร์ Bearing Capacity N_c สำหรับเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นดินเหนียว และค่า Bearing Capacity N_q สำหรับเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทราย โดยค่า Effective Overburden Pressure (σ'_{vo}) ที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นค่าที่ได้พิจารณาผลของการ drawdown ของระดับน้ำใต้ดิน (Piezometric Level)

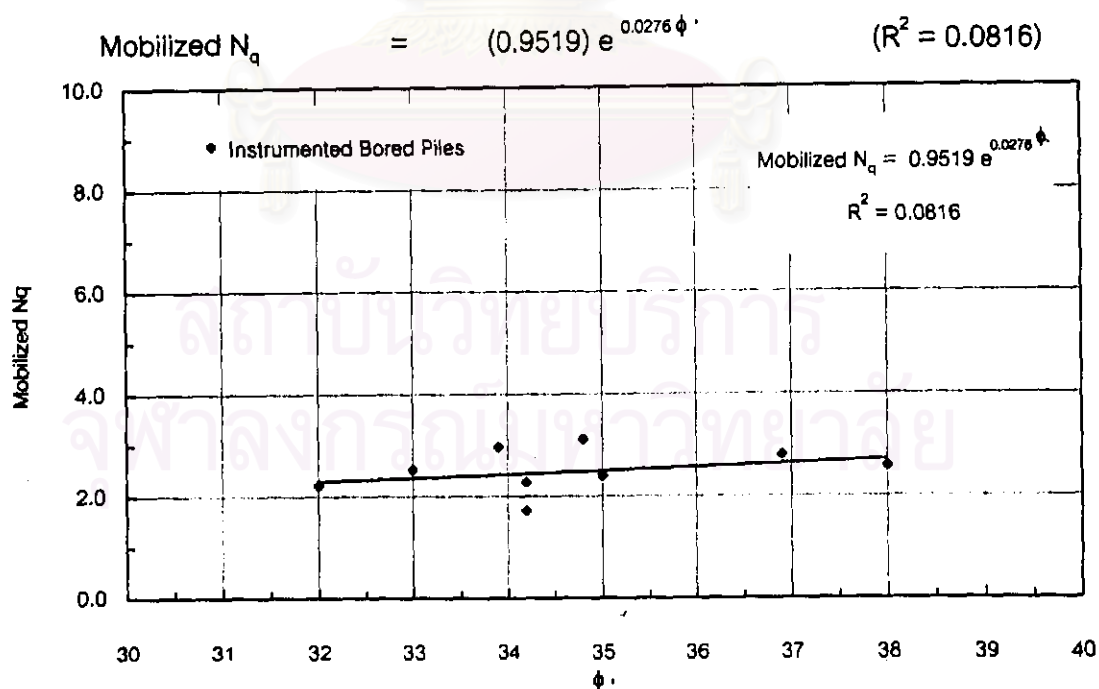
ค่า N_q จะอยู่ในความสัมพันธ์ที่ขึ้นกับค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ') โดยทั่วไปพบว่าค่า N_q จะมีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่ามุม ϕ' และจากการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงในตัวเสาเข็มอย่างต่อเนื่องพบว่าในการวิบัติของเสาเข็ม แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มจะถูกพัฒนาจนถึงค่าสูงสุด

ก่อนการพัฒนาจนถึงจุดสูงสุดของแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม ดังนั้นค่า N_q ที่ใช้สำหรับการประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยวิธีสถิตยศาสตร์ จะใช้ในรูปของค่า Mobilized N_q ซึ่งอาจจะเป็นค่าที่ไม่ถึงจุดสูงสุดเพื่อไม่ให้เกิดค่าการทรุดตัวที่มากเกินไปในการออกแบบ โดยในการวิเคราะห์หาค่า Mobilized N_q ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดสำหรับค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มที่หาโดยทฤษฎีของ Butler & Hoy (1977) ซึ่งให้ค่าใกล้จุดคลาก (Yield Condition) ที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกกับค่าการทรุดตัวที่กำลังรับน้ำหนักบรรทุกนั้น (Load – Settlement relationship)

รายละเอียดผลการวิเคราะห์หาค่า Bearing Capacity N_q และ N_c แยกตามสภาวะที่ปลายเสาเข็มมีดังต่อไปนี้

4.3.1 เสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มมีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mobilized N_q กับค่ามุม ϕ' สำหรับเสาเข็มเจาะที่ติด VWSG จำนวน 15 ต้น ที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mobilized N_q กับค่ามุม ϕ' สำหรับเสาเข็มเจาะที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง

4.3.2 เสาเข็มอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง

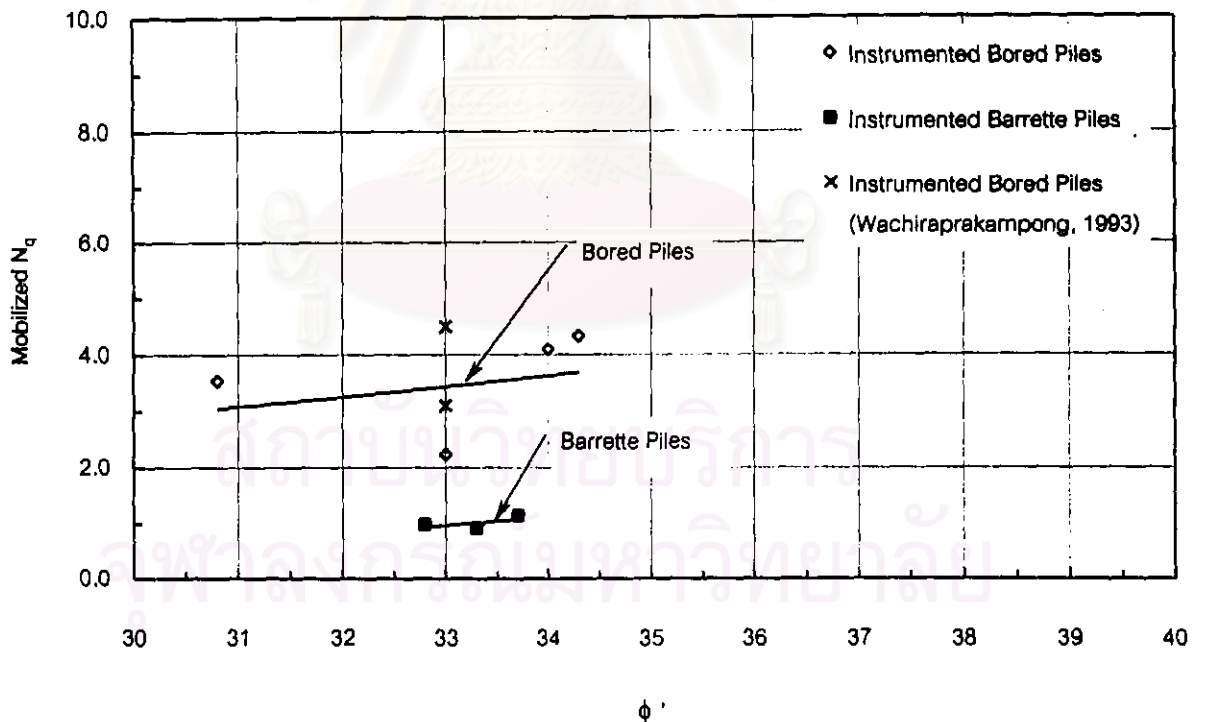
ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mobilized N_q กับค่ามุม ϕ' สำหรับเสาเข็มที่อัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง จากข้อมูลที่รวบรวมได้สำหรับเสาเข็มแบริตที่ติด VWSG จำนวน 3 ต้นและเสาเข็มเจาะที่ติด VWSG จำนวน 4 ต้น โดยมีการเพิ่มเติมข้อมูลสำหรับเสาเข็มเจาะจากงานวิจัยของ Wachiraprakampong (1993) แสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

- สำหรับเสาเข็มเจาะ

$$\text{Mobilized } N_q = (0.5674) e^{0.0546 \phi'} \quad (R^2 = 0.0821)$$

- สำหรับเสาเข็มแบริต

$$\text{Mobilized } N_q = (0.0068) e^{0.1503 \phi'} \quad (R^2 = 0.3586)$$



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mobilized N_q กับค่ามุม ϕ' สำหรับเสาเข็มอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง

จากรูปที่ 4.16 พบว่าค่า Mobilized N_c สำหรับเสาเข็มแบบเรียดมีแนวโน้มต่ำกว่าค่า สำหรับเสาเข็มเจาะ โดยค่า Mobilized N_c สำหรับเสาเข็มเจาะมีค่าประมาณเป็น 3 เท่าของค่า Mobilized N_c สำหรับเสาเข็มแบบเรียด เนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มแบบเรียดใช้หัวเจาะประเภท Mechanical Hang Grab (รูปที่ 2.7) ที่ใช้เจาะกำแพงกันดินแบบ Diaphragm Wall เป็นหัวเจาะ ซึ่งทำให้เกิดการรบกวนดินได้ปลายเสาเข็มและการเกิดตะกอนก้นหลุมมากกว่าการก่อสร้างเสาเข็ม เจาะที่ใช้หัวเจาะแบบถัง (Bucket) ถึงแม้ว่าจะมีการลดปัญหาดังกล่าวด้วยการอัดฉีดน้ำปูนที่ ปลายเสาเข็มก็ตาม

4.3.3 เสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง

ผลการวิเคราะห์เพื่อหาค่า Bearing Capacity Factor N_c สำหรับเสาเข็มที่มี ปลายอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สอง โดยเป็นเสาเข็มแบบเรียดที่ติด WWSG จำนวน 1 ต้น และเสา เข็มเจาะที่ติด WWSG จำนวน 5 ต้น แสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งพบว่าค่า N_c สำหรับเสาเข็มเจาะอยู่ ระหว่างค่า 3.1 - 7.5

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์หาค่า Bearing Capacity N_c

เสาเข็ม	S_u (t/m^2)	N_c	หมายเหตุ
เสาเข็มเจาะ			
TP-4	20	1.66	
TP-7	22	5.10	
TP-10	15	7.51	
TP-23	10	5.03	
TP-24	25	3.14	
เสาเข็มแบบเรียด			
BP-2	20	0.76	

จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่า N_c ที่วิเคราะห์ได้มีค่าต่ำกว่า 8 ซึ่งสอดคล้องกับผลการ วิจัยของ Muktabhand and Suwanakul (1971)

4.4 การประมาณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นระหว่างเสาเข็มและดินรอบนอก

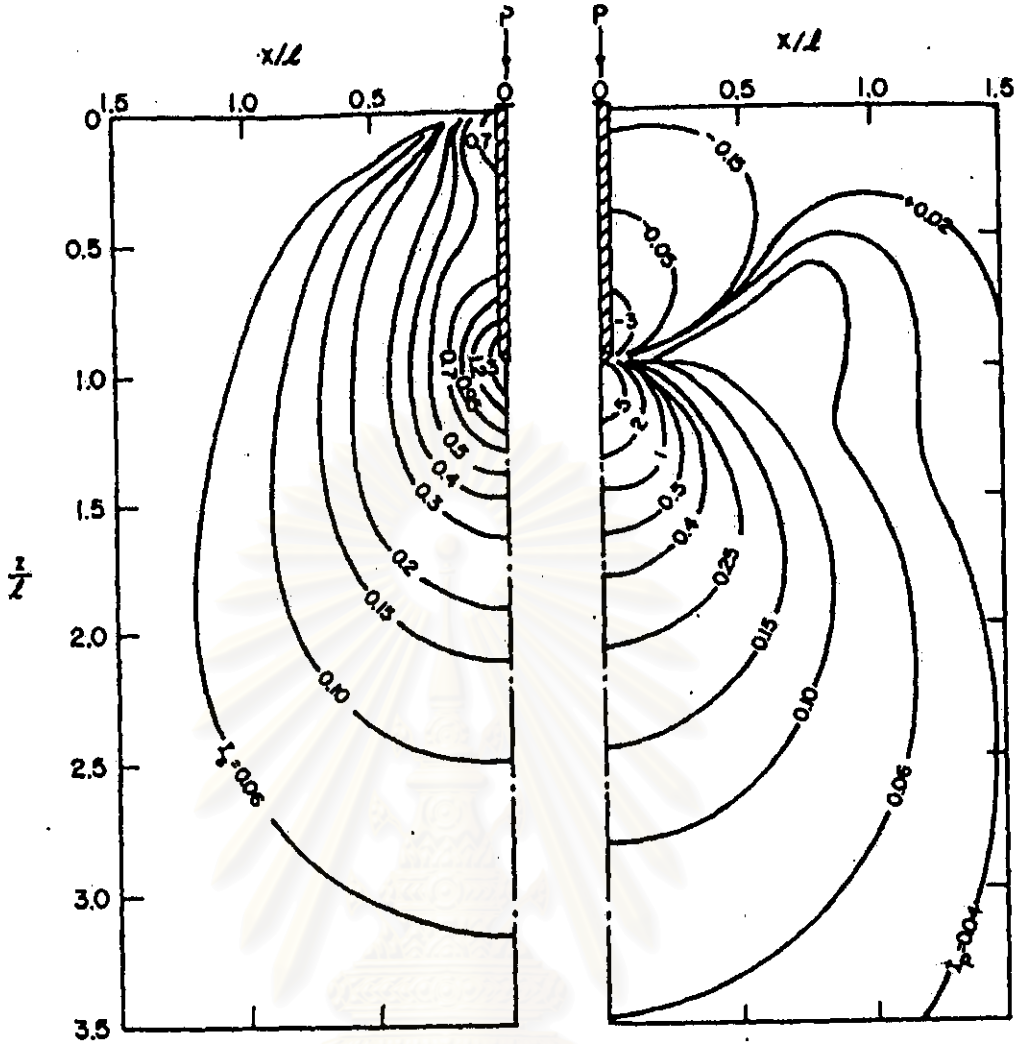
โดยทั่วไปค่าแรงเค้นจากน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เสาเข็มเกิดการทรุดตัว ส่วนใหญ่เกิดจากแรงเสียดทานรอบผิวเสาเข็ม เนื่องจากการพัฒนาของแรงเสียดทานด้านข้างของเสาเข็มจนถึงค่าสูงสุดจะเกิดที่การทรุดตัวน้อยกว่าการพัฒนาจนถึงค่าสูงสุดของแรงด้านที่ปลายเสาเข็ม ดังนั้นการวิเคราะห์การทรุดตัวของเสาเข็มจึงต้องใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นระหว่างเสาเข็มและดินรอบนอก (E_g) ซึ่งเป็นคุณสมบัติทั้งของเสาเข็มและดินรอบนอกเสาเข็ม โดยอาศัยทฤษฎีของ Poulos & Davis (1980) ในการวิเคราะห์

การประมาณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นระหว่างเสาเข็มและดินรอบนอกจากผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจะอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_g กับค่าน้ำหนักบรรทุกใช้งานที่ออกแบบ (Design load of pile at working condition) ซึ่งในที่นี้จะแยกประเภทเสาเข็มเพียงสองประเภทคือเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มและเสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม โดยพิจารณาทั้งเสาเข็มเจาะและเสาเข็มแบบเรียดที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายและดินเหนียวเป็นเสาเข็มเสียดทานด้านข้าง (Floating Pile) เนื่องจากการกระบวนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะและเสาเข็มแบบเรียดที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สองเกิดปัญหาการลดลงของแรงด้านที่ปลายเสาเข็มจากผลของตะกอนก้นหลุม โดยพิจารณาชั้นดินที่ไม่ทรุดตัวอยู่ที่ความลึกที่แรงเค้นภายนอกถ่ายเหลือประมาณ 5-10 % ของแรงเค้นทั้งหมด (รูปที่ 4.17)

เนื่องจากค่าการทรุดตัวที่น้ำหนักบรรทุกใช้งานที่วัดได้จากการทดสอบเสาเข็มได้รวมผลปัจจัยบางอย่างซึ่งส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการวัดค่าการทรุดตัว ปัจจัยเหล่านั้นได้แก่

- การใช้คานอ้างอิงในการวัดค่าการทรุดตัว
- การใช้เสาเข็มลมอเป็นตัวคานน้ำหนัก
- การใช้ Ground Anchors เป็นตัวคานน้ำหนัก

โดยทั่วไปการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มทดสอบจะใช้เสาเข็มลมอเป็นตัวคานน้ำหนัก ดังนั้นการวิเคราะห์ค่า E_g จึงพิจารณาปรับแก้ผลจากปัจจัยนี้ โดยไม่พิจารณาผลจากการใช้คานอ้างอิงในการวัดค่าการทรุดตัวเนื่องจากจุดรองรับ (Support) คานอ้างอิงมักจะวางอยู่ห่างจากตำแหน่งทดสอบในระยะที่มากพอที่ไม่ทำให้คานอ้างอิงเกิดการทรุดตัวไปด้วยในขณะทดสอบ รายละเอียดการปรับแก้ค่าการทรุดตัวได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.6.3 ในบทที่ 2



น. Uniform Shaft Resistance

ข. Point Resistance

$$\sigma_z = I_s \cdot \frac{P}{l^2}$$

$$\sigma_z = I_p \cdot \frac{P}{l^2}$$

l = Length of Pile

รูปที่ 4.17 การกระจายแรงภายนอกจากเสาเข็มสู่ดิน (DM 7.1)

ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_s กับค่าน้ำหนักบรรทุกใช้งานของเสาเข็มในแต่ละประเภทในชั้นดินกรุงเทพฯ มีรายละเอียดดังนี้

4.4.1 เสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม

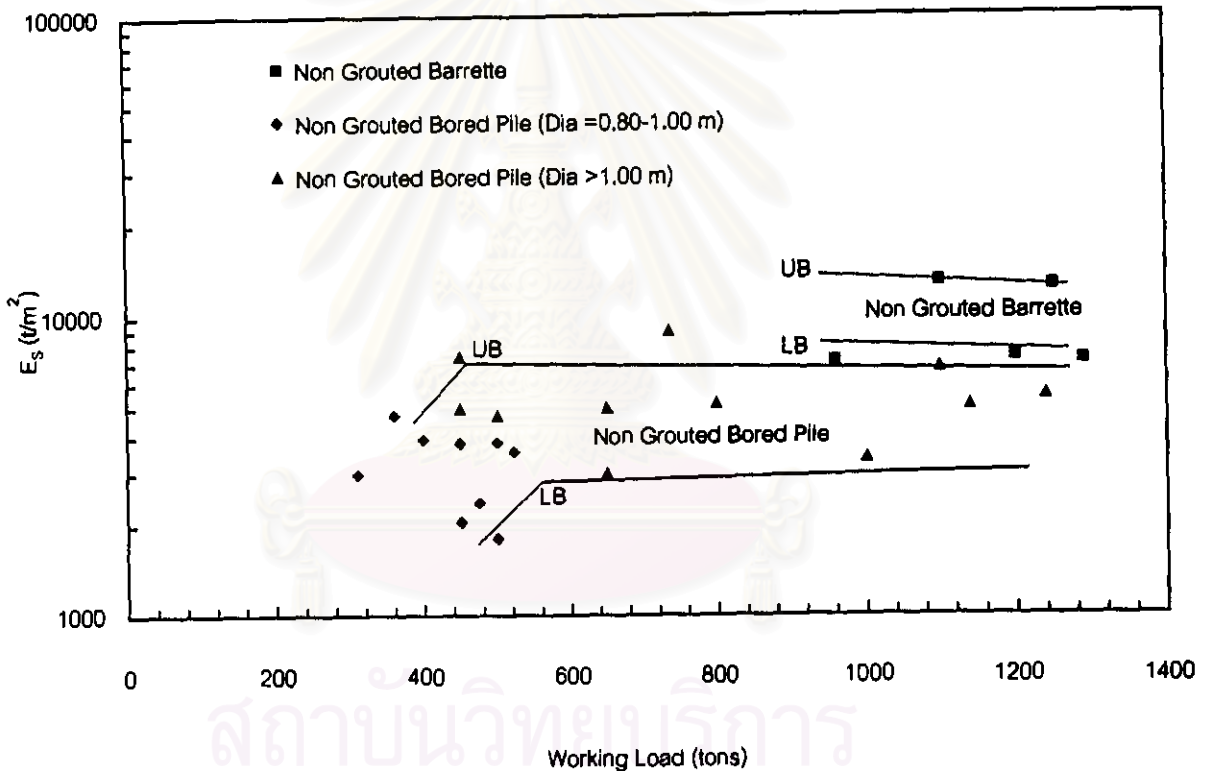
ผลการวิเคราะห์หาค่า E_s สำหรับเสาเข็มเจาะและเสาเข็มแบบเรียดที่ไม่มี การอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มแสดงในตารางที่ 4.3 และ 4.4 โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_s กับค่าน้ำหนักบรรทุกใช้งานของเสาเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 4.18

ตารางที่ 4.3 ค่า E_s สำหรับเสาเข็มเจาะที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม

Test Pile	Size		R_A	L/D	E_s/E_p	P (tons)	p_m (mm)	h/L	l_0	R_v	R_h	S	S/D	E_s Vm^2
	Dia (m)	L(m)												
TP-1	1.20	57.10	1.00	47.58	1.00	650.00	6.75	2.60	0.04	1.00	0.93	5.40	4.50	2994.30
TP-2	1.20	46.25	1.00	38.54	1.00	650.00	5.45	2.60	0.06	1.00	0.92	5.40	4.50	4965.70
TP-3	1.00	46.51	1.00	48.51	1.00	500.00	4.51	2.60	0.04	1.00	0.93	3.00	3.00	3804.84
TP-4	1.00	49.47	1.00	49.47	1.00	450.00	6.32	2.80	0.04	1.00	0.93	3.00	3.00	2059.05
TP-5	1.00	43.00	1.00	43.00	1.00	450.00	4.51	2.60	0.05	1.00	0.92	3.00	3.00	3798.28
TP-6	1.00	41.00	1.00	41.00	1.00	360.00	3.17	2.80	0.05	1.00	0.92	3.00	3.00	4896.74
TP-7	1.20	43.80	1.00	36.33	1.00	450.00	2.45	2.80	0.06	1.00	0.92	3.60	3.00	7370.40
TP-8	1.20	43.50	1.00	36.25	1.00	450.00	3.29	2.60	0.06	1.00	0.92	3.60	3.00	4960.00
TP-9	1.00	43.50	1.00	43.50	1.00	400.00	3.95	2.60	0.05	1.00	0.92	3.00	3.00	3897.83
TP-10	1.20	54.00	1.00	45.00	1.00	500.00	3.50	2.60	0.05	1.00	0.93	3.50	3.00	4695.46
TP-15	1.00	47.50	1.00	47.50	1.00	475.00	5.84	2.60	0.04	1.00	0.93	3.00	3.00	2382.03
TP-16	1.00	55.20	1.00	55.20	1.00	522.90	5.25	2.60	0.04	1.00	0.94	3.00	3.00	3541.78
TP-17	1.50	55.00	1.00	36.67	1.00	735.50	2.79	2.60	0.06	1.00	0.92	4.50	3.00	8926.84
TP-18	1.50	55.70	1.00	37.13	1.00	1240.00	6.83	2.80	0.06	1.00	0.92	4.50	3.00	5431.71
TP-19	0.80	43.30	1.00	54.13	1.00	500.00	9.65	2.60	0.04	1.00	0.93	2.40	3.00	1807.10
TP-20	1.50	41.81	1.00	27.87	1.00	1100.00	5.98	2.80	0.07	1.00	0.91	4.50	3.00	6713.24
TP-21	1.50	49.65	1.00	33.10	1.00	1140.00	8.88	2.60	0.06	1.00	0.91	4.50	3.00	5035.46
TP-22	0.80	39.80	1.00	49.75	1.00	310.00	4.22	2.60	0.04	1.00	0.93	2.40	3.00	2979.45
TP-23	1.50	50.97	1.00	33.98	1.00	600.00	4.66	2.60	0.06	1.00	0.91	4.50	3.00	5112.68
TP-24	1.50	60.00	1.00	40.00	1.00	1000.00	7.58	2.60	0.05	1.00	0.92	4.50	3.00	3354.66

ตารางที่ 4.4 ค่า E_s สำหรับเสาเข็มแบบเรตตีที่ไม่มีกรวดอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม

Test Pile	Size	D_s	R_A	L/D	E_s/E_b	P (tons)	ρ_m (mm)	h/L	l_o	R_v	R_h	S	E_s t/m^2
BP-2	0.80 x 2.7 x 47.1	1.86	1.00	28.37	1.00	960.00	4.59	2.60	0.07	1.00	0.91	4.91	7088.59
BP-5	1.00 x 2.7 x 48.9	1.85	1.00	26.43	1.00	1200.00	5.65	2.60	0.07	1.00	0.91	8.20	7308.96
BP-7	0.80 x 2.7 x 55.7	1.86	1.00	33.55	1.00	1250.00	3.84	2.60	0.08	1.00	0.91	7.50	12397.97
BP-8	0.80 x 2.7 x 50.0	1.66	1.00	30.12	1.00	1100.00	3.07	2.60	0.07	1.00	0.91	4.40	12823.31
BP-9	0.80 x 2.7 x 55.0	1.66	1.00	33.13	1.00	1290.00	4.46	2.60	0.06	1.00	0.91	2.83	7078.00



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_s กับค่าน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งานของเสาเข็มสำหรับเสาเข็มที่ไม่มีกรวดอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ

จากรูปที่ 4.18 พบว่า E_s สำหรับเสาเข็มแบบเรตมีค่าสูงสุดที่ 7,000 – 13,000 ตันต่อตารางเมตร ซึ่งมีแนวโน้มสูงกว่าค่า E_s สำหรับเสาเข็มเจาะที่มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 3,000 – 7,000 ตันต่อตารางเมตร ซึ่งมีสาเหตุเนื่องจากที่ความยาวเสาเข็มที่ใกล้เคียงกันสำหรับเสาเข็มทั้งสองประเภท ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า (D_u) ของเสาเข็มแบบเรตมีค่ามากกว่า ซึ่งทำให้มีค่า D/L (เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าต่อความยาวเสาเข็ม) มากกว่าเสาเข็มเจาะ

4.4.2 เสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม

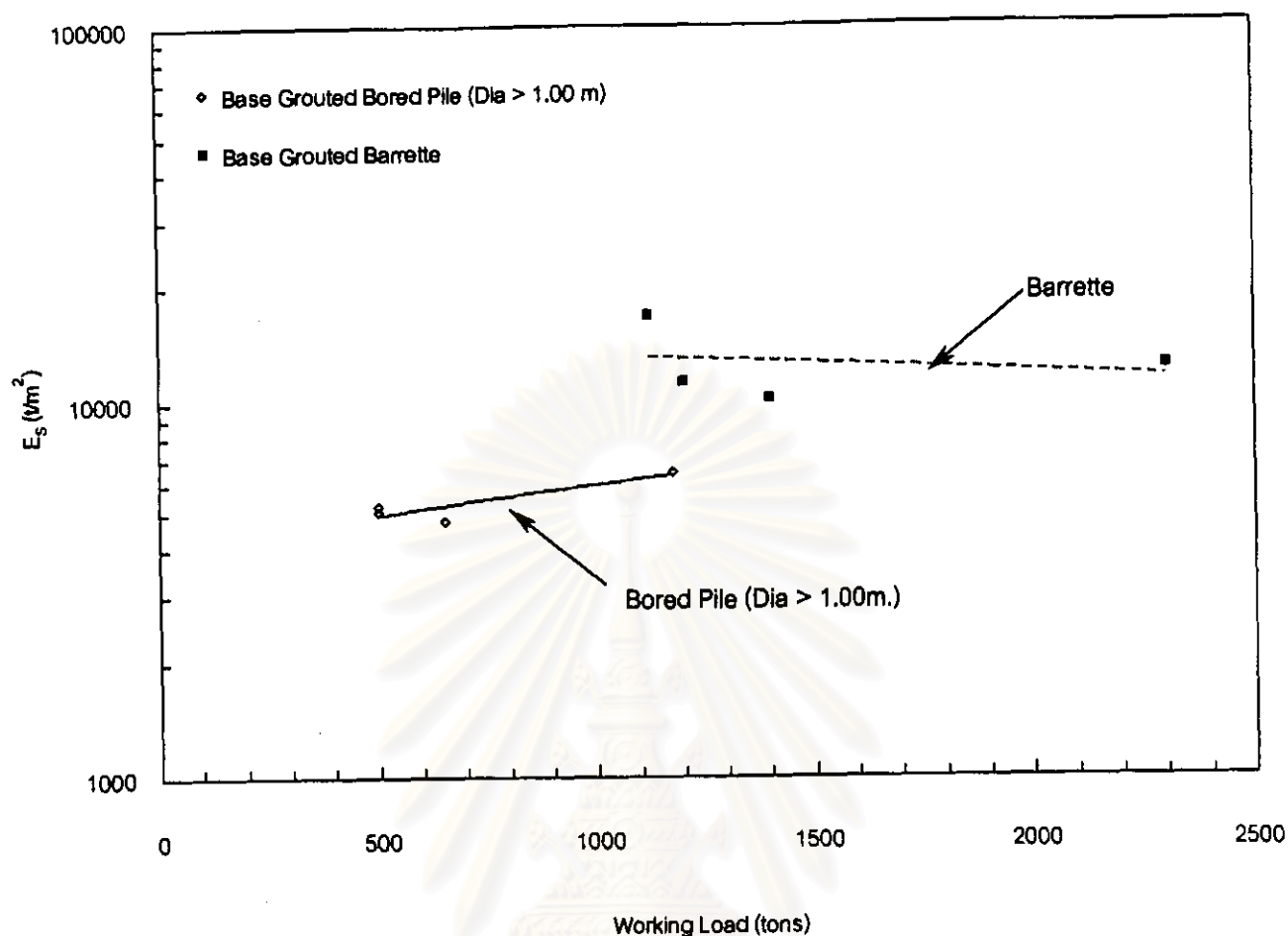
ผลการวิเคราะห์หาค่า E_s สำหรับเสาเข็มเจาะและเสาเข็มแบบเรตที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มแสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6 โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_s กับค่าน้ำหนักบรรทุกใช้งานของเสาเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 4.19

ตารางที่ 4.5 ค่า E_s สำหรับเสาเข็มเจาะที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม

Test Pile	Size		R_A	L/D	E_s/E_o	P (tons)	ρ_m (mm)	h/L	l_o	R_v	R_h	S	S/D	E_s t/m^2
	Dia (m)	L(m)												
TP-11	1.50	57.50	1.00	38.33	1.00	1175.00	6.12	2.60	0.06	1.00	0.92	4.00	2.87	6428.91
TP-12	1.20	44.64	1.00	37.20	1.00	500.00	4.20	2.60	0.06	1.00	0.92	5.40	4.50	5212.96
TP-13	1.20	53.79	1.00	44.83	1.00	650.00	5.31	2.60	0.05	1.00	0.93	5.40	4.50	4731.40
TP-14	1.20	46.00	1.00	38.33	1.00	500.00	4.21	2.60	0.06	1.00	0.92	5.40	4.50	5038.37

ตารางที่ 4.6 ค่า E_s สำหรับเสาเข็มแบบเรตที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม

Test Pile	Size	D_u	R_A	L/D	E_s/E_o	P (tons)	ρ_m (mm)	h/L	l_o	R_v	R_h	S	E_s t/m^2
BP-1	1.50 x 3.0 x 57.2	2.40	1.00	23.83	1.00	2300.0	4.74	2.60	0.08	1.00	0.904	5.00	12286.24
BP-3	0.80 x 2.5 x 46.5	1.60	1.00	29.06	1.00	1200.0	4.56	2.60	0.07	1.00	0.91	7.00	11266.75
BP-4	0.80 x 2.5 x 46.3	1.60	1.00	28.94	1.00	1120.0	3.12	2.60	0.07	1.00	0.91	7.00	16859.68
BP-6	0.85 x 2.72 x 61.8	1.71	1.00	36.14	1.00	1400.0	4.83	2.60	0.06	1.00	0.92	7.50	10106.69



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_s กับค่าน้ำหนักบรรทุกใช้งานของเสาเข็มสำหรับเสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ

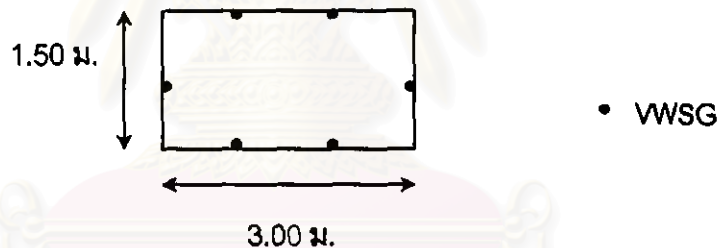
ในกรณีเสาเข็มมีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม ผลการวิเคราะห์ให้ผลสอดคล้องกับกรณีเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มกล่าวคือ E_s สำหรับเสาเข็มแบบเรตมีค่าสูงกว่าเสาเข็มเจาะ ซึ่งมีสาเหตุเกิดจากการที่เสาเข็มแบบเรตมีค่า D/L มากกว่าเสาเข็มเจาะนั่นเอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5 การวิเคราะห์ผลกระทบของมิติด้านสั้นและด้านยาวของเสาเข็มแบบเรียดที่มีต่อค่าแรงเสียดทาน

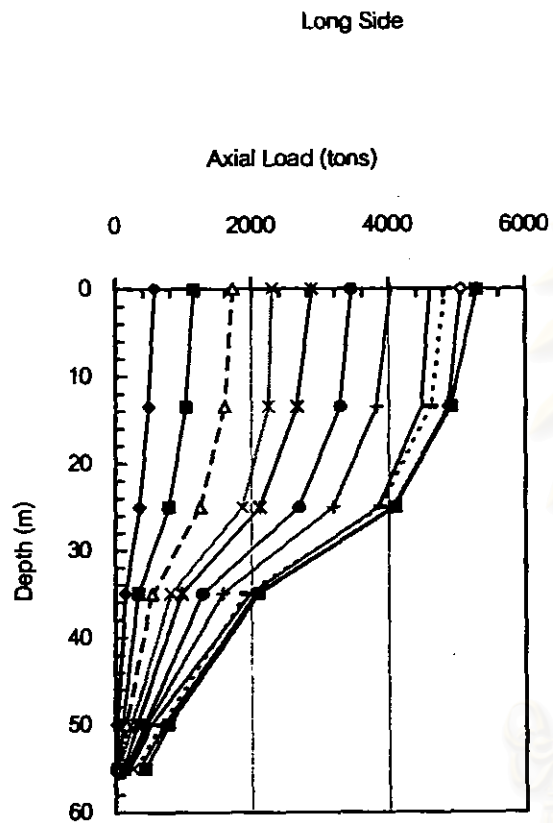
เสาเข็มแบบเรียดโดยทั่วไปสามารถเจาะให้มีขนาดความหนาตั้งแต่ 60, 80, 100, 120 และ 150 ซม. และความกว้างตั้งแต่ 2.50 ม. ถึง 6.00 ม. ขนาดที่นิยมใช้ในประเทศไทยคือขนาด 80 x 270, 100 x 270 และ 150 x 300 ซม.². ซึ่งมีสัดส่วนด้านสั้นต่อด้านยาวอยู่ระหว่าง 1 : 2 ถึง 1 : 3.5

เสาเข็มแบบเรียดสำหรับโครงการ BECM Tower (BP-1) ซึ่งอยู่บริเวณ ถ. พระราม 9 ใช้ขนาดหน้าตัด 1.50 x 3.00 เมตร ลึกประมาณ 57.20 เมตร โดยมีปลายเสาเข็มอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สองและมีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเข็ม (Base Grouting) เสาเข็มแบบเรียดทดสอบต้นนี้ได้มีการติดตั้ง Vibrating Wire Strain Gauges (VWSG) รวมทั้งหมด 6 ตัว ที่แต่ละด้านของเสาเข็มแบบเรียด ดังแสดงในรูปที่ 4.20

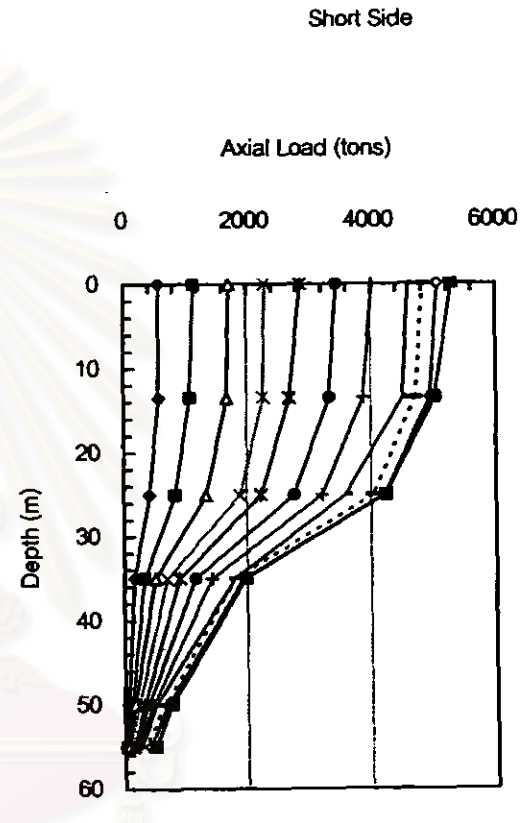


รูปที่ 4.20 ตำแหน่งการติดตั้ง Vibrating Wire Strain Gauges (VWSG) ในเสาเข็มแบบเรียดทดสอบขนาด 1.50 x 3.00 เมตร ในโครงการ BECM Tower

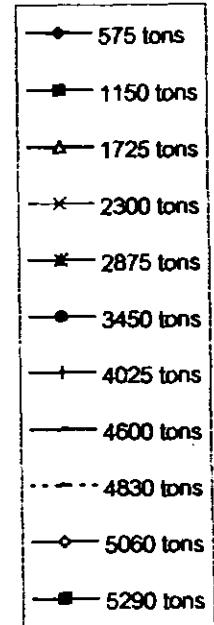
ผลการอ่านค่าน้ำหนักบรรทุกที่ได้จากการวิเคราะห์กลับจากค่าความเครียด (Strain) ที่อ่านได้จาก VWSG ภายหลังจากทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบเรียดทดสอบขนาด 1.50 x 3.00 เมตร ในโครงการ BECM Tower (BP-1) แสดงผลเฉลี่ยของน้ำหนักบรรทุกในแต่ละด้านของเสาเข็มแบบเรียดดังแสดงในรูปที่ 4.21 พบว่าค่าน้ำหนักบรรทุกในมิติด้านสั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าน้ำหนักบรรทุกในมิติด้านยาวหรือกล่าวได้ว่ามิติด้านยาวและด้านสั้นของเสาเข็มแบบเรียดที่มีอัตราส่วนด้านยาวต่อด้านสั้นไม่เกินสอง ($L/B \leq 2$) ไม่เกิดผลกระทบต่อค่าแรงเสียดทานระหว่างผิวเสาเข็มและดินรอบนอกเนื่องจากที่หน้าตัดดังกล่าวยังไม่เกิดสภาวะ Plane Strain



ก. ด้านยาว 3.00 เมตร



ข. ด้านสั้น 1.50 เมตร



รูปที่ 4.21 การส่งถ่ายค่าน้ำหนักบรรทุกภายนอก (Load transfer) ด้านสั้นและด้านยาวของเสาเข็มแบริด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6 การประมาณค่า Load-Deformation เบื้องต้นสำหรับเสาเข็มเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ

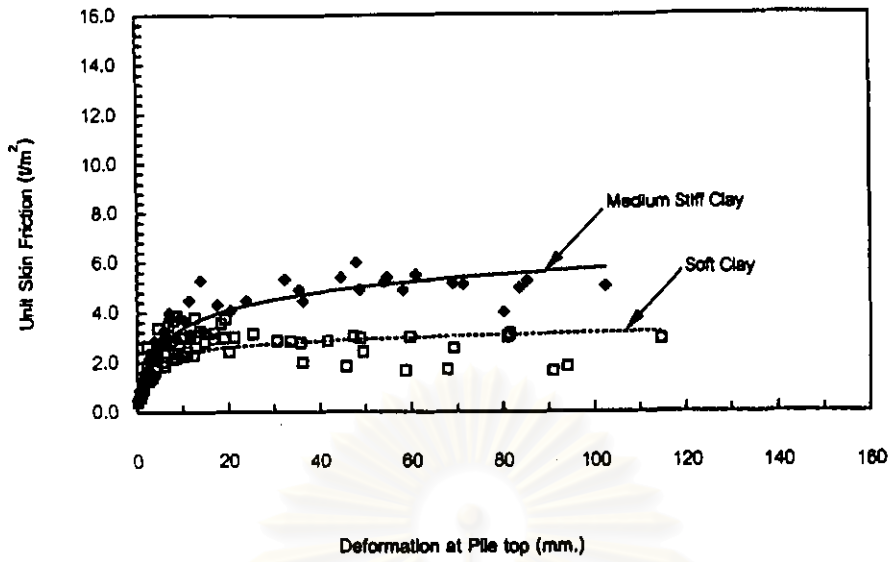
ข้อมูลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดในชั้นดิน กรุงเทพฯ ที่รวบรวมได้ในงานวิจัยนี้มีมากพอสมควรโดยเฉพาะเสาเข็มเจาะที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม (Normal Bored Pile) ซึ่งสามารถนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่แต่ละค่าการทดสอบตัวนั้นๆ

ผลการวิเคราะห์หาค่าแรง ณ ตำแหน่งที่มีการติดตั้ง Vibrating Wire Strain Gauges (VWSG) ซึ่งโดยทั่วไปจะติดตั้งในแต่ละช่วงของชั้นดินสามารถนำมาประมาณค่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทาน (Unit Skin Friction) ในแต่ละชั้นดินกับค่าทดสอบที่หัวเสาเข็ม และค่าหน่วยแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม (Unit End Bearing Resistance) กับค่าทดสอบที่หัวเสาเข็ม ซึ่งภายหลังจากการกำหนดข้อมูลสภาพชั้นดิน และขนาด-ความยาวของเสาเข็มเจาะที่ใช้ก็จะสามารถประมาณค่า Load-Deformation เบื้องต้นสำหรับเสาเข็มเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ เพื่อเป็นแนวทาง (guide line) ในการออกแบบเบื้องต้นเท่านั้น

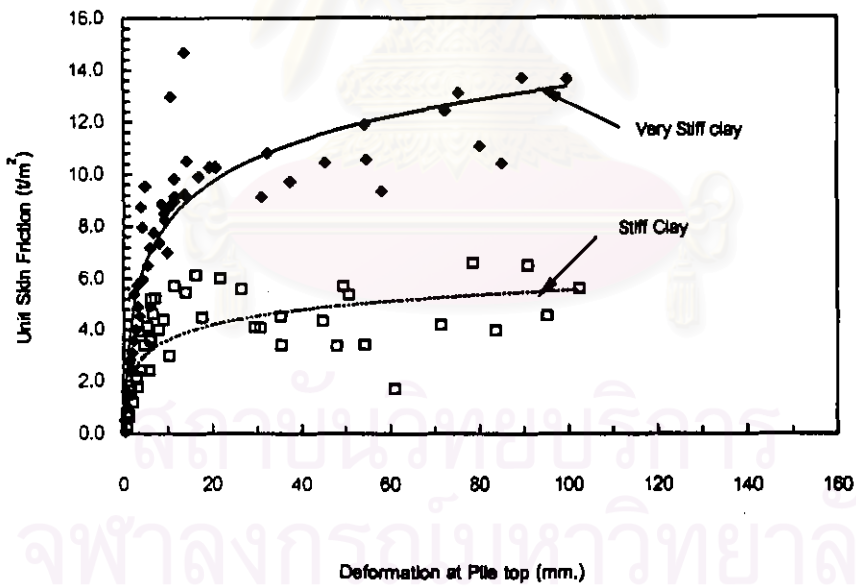
ลักษณะชั้นดินกรุงเทพฯ ๔ โดยรวมที่ประเมินได้จากผลการสำรวจและทดสอบคุณสมบัติของดินที่บริเวณตำแหน่งการก่อสร้างเสาเข็ม จะประกอบชั้นดิน 5 ชั้น คือ

- ก. Soft to Medium Stiff Silty Clay
- ข. Stiff to Very Stiff Silty Clay
- ค. Dense to Very Dense 1st Silty sand
- ง. Very Stiff to Hard Silty Clay
- จ. Dense to Very Dense 2nd Silty sand

ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานในแต่ละชั้นดินกับค่าทดสอบที่หัวเสาเข็ม แสดงในรูปที่ 4.22

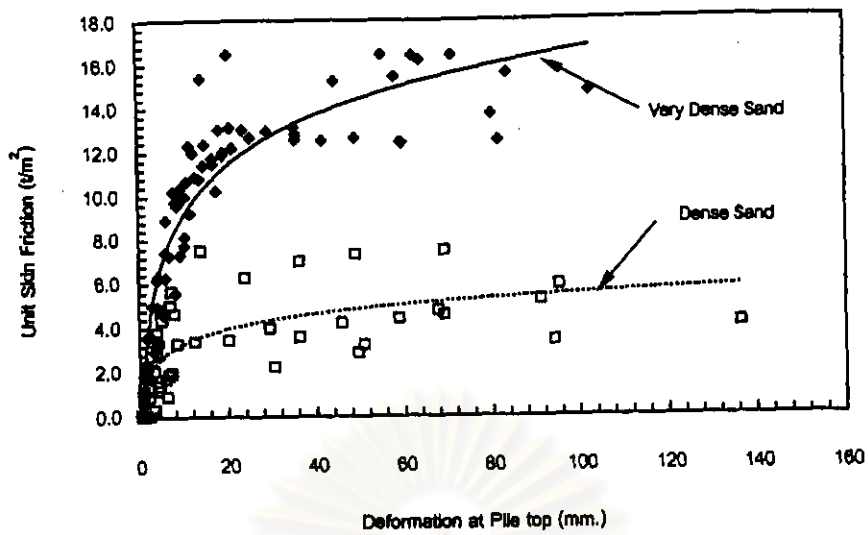


ก. ชั้นดิน Soft to Medium Stiff Silty Clay

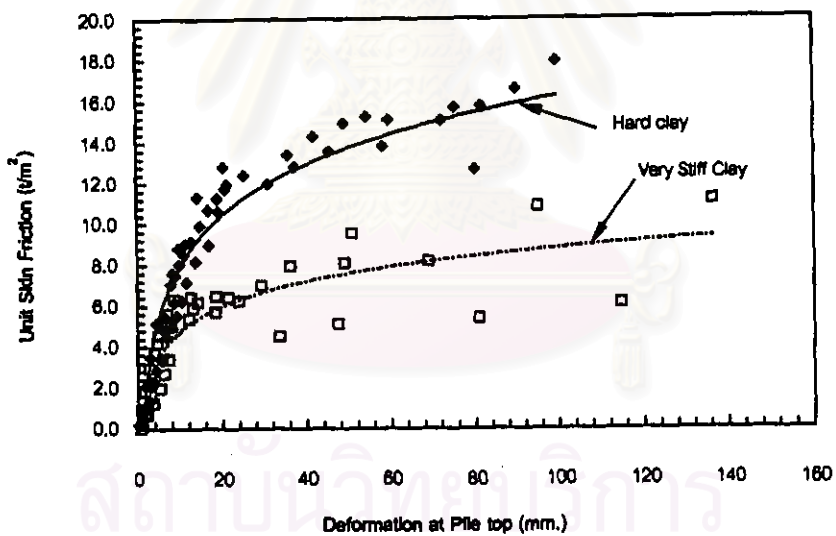


ข. ชั้นดิน Stiff to Very Stiff Silty Clay

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานในแต่ละชั้นดินกับค่า
ทรุดตัวที่หัวเสาเข็มสำหรับเสาเข็มเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ

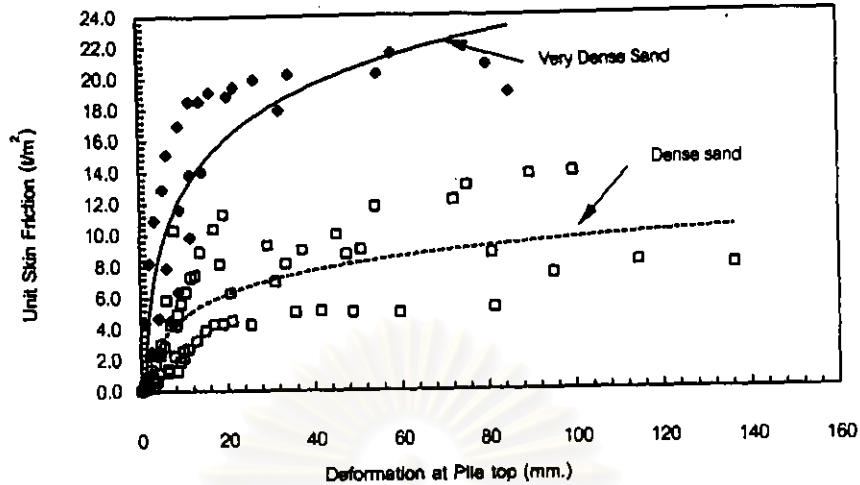


ค. ชั้นดิน Dense to Very Dense 1st Silty sand



ง. ชั้นดิน Very Stiff to Hard Silty Clay

รูปที่ 4.22 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานในแต่ละชั้นดินกับค่า
 ทดสอบที่หัวเสาเข็มสำหรับเสาเข็มเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ



จ. ชั้นดิน Dense to Very Dense 2nd Silty sand

รูปที่ 4.22 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานในแต่ละชั้นดินกับค่า
ทรุดตัวที่หัวเสาเข็มสำหรับเสาเข็มเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ

ผลการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ด้วยสมการลอการิทึม (Logarithm Equation) ของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานในแต่ละชั้นดินกับค่าทรุดตัวที่หัวเสาเข็ม มีดังนี้

ก. ชั้นดิน Soft to Medium Stiff Silty Clay

$$\text{Soft Clay: } f_s = 0.3353 \ln(\delta) + 1.6071 \quad (R^2 = 0.3048)$$

$$\text{Medium Stiff Clay: } f_s = 1.0261 \ln(\delta) + 1.0146 \quad (R^2 = 0.8856)$$

ข. ชั้นดิน Stiff to Very Stiff Silty Clay

$$\text{Stiff Clay: } f_s = 0.8367 \ln(\delta) + 1.6892 \quad (R^2 = 0.5284)$$

$$\text{Very Stiff Clay: } f_s = 2.2658 \ln(\delta) + 2.9221 \quad (R^2 = 0.8031)$$

ค. ชั้นดิน Dense to Very Dense 1st Silty sand

$$\text{Dense sand: } f_s = 0.9475 \ln(\delta) + 1.1458 \quad (R^2 = 0.4963)$$

$$\text{Very Dense sand: } f_s = 3.2969 \ln(\delta) + 1.5210 \quad (R^2 = 0.8498)$$

ง. ชั้นดิน Very Stiff to Hard Silty Clay

$$\text{Very Stiff Clay: } f_s = 1.7602 \ln(\delta) + 0.7001 \quad (R^2 = 0.7817)$$

$$\text{Hard Clay: } f_s = 3.6195 \ln(\delta) - 0.4164 \quad (R^2 = 0.9093)$$

จ. ชั้นดิน Dense to Very Dense 2nd Silty sand

$$\text{Dense sand: } f_s = 2.1356 \ln(\delta) - 0.1732 \quad (R^2 = 0.6183)$$

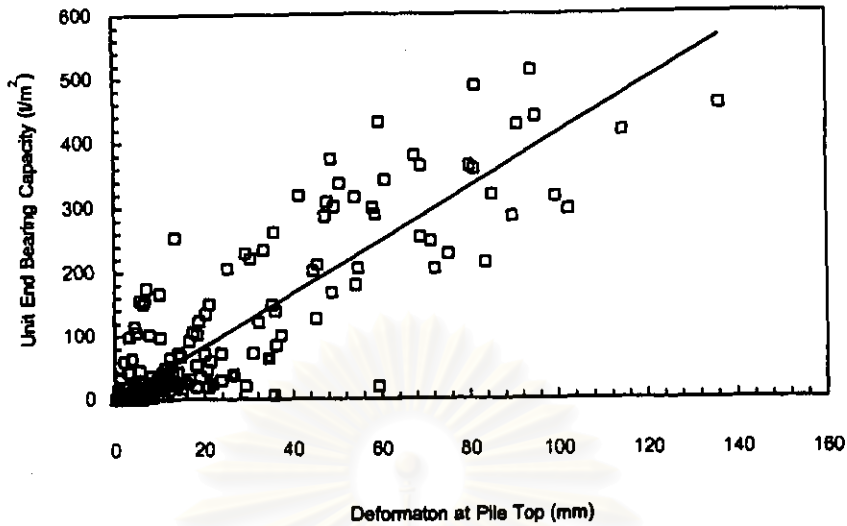
$$\text{Very Dense sand: } f_s = 4.9099 \ln(\delta) + 1.4083 \quad (R^2 = 0.7232)$$

f_s คือค่า หน่วยแรงเสียดทานระหว่างผิวเสาเข็มและดินรอบข้างอยู่ในหน่วยตันต่อตารางเมตร และ δ คือ ค่าการทรุดตัวที่หัวเสาเข็ม (Settlement at Pile Top) อยู่ในหน่วย มิลลิเมตร ซึ่งต้องมีค่ามากกว่าศูนย์ ($\delta > 0$) โดยพิจารณาว่าที่ค่า δ เท่ากับศูนย์ ไม่มีค่าหน่วยแรงเสียดทานในแต่ละชั้นดิน ($f_s = 0$)

สำหรับผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มกับค่าทรุดตัวที่หัวเสาเข็ม แสดงในรูปที่ 4.23 โดยมีความสัมพันธ์ด้วยสมการเส้นตรงดังนี้

$$q_E = 4.135 \delta \quad (R^2 = 0.7729)$$

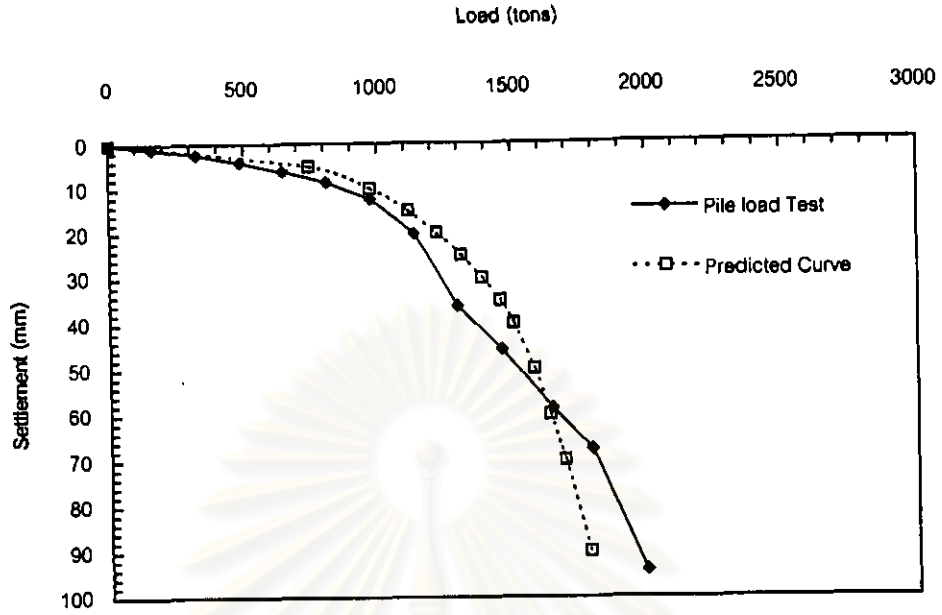
q_E คือค่า หน่วยแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มอยู่ในหน่วยตันต่อตารางเมตร δ คือ ค่าการทรุดตัวที่หัวเสาเข็ม อยู่ในหน่วย มิลลิเมตร



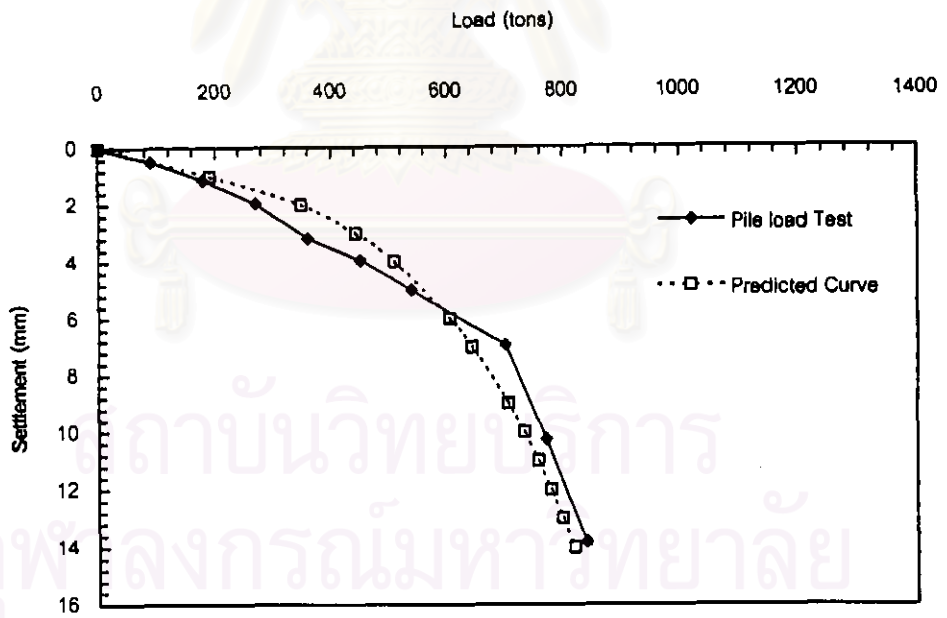
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงต้านทานที่ปลายเสาเข็มกับค่า
ทรุดตัวที่หัวเสาเข็มสำหรับเสาเข็มเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าข้อมูลที่จำเป็นในการประมาณค่า Load - Deformation เบื้องต้นของเสาเข็มเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ ได้แก่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง - ความยาวของเสาเข็ม และข้อมูลการแบ่งชั้นดิน (Soil Profile or Subsoil Condition) บริเวณตำแหน่งเสาเข็ม โดยทำการกำหนดค่าการทรุดตัวที่หัวเสาเข็ม (δ) ใดๆ ก็จะสามารถประมาณค่าน้ำหนักบรรทุกที่ค่าการทรุดตัวนั้น ๆ ได้ แต่อย่างไรก็ตามความถูกต้องของผลวิเคราะห์อาจจะคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหลากหลายของข้อมูลการทดสอบเสาเข็มและข้อมูลผลการเจาะสำรวจดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังนั้นผลการประมาณค่า Load - Deformation ที่ได้จึงเป็นเพียงแนวทางการออกแบบเบื้องต้นเท่านั้น

ผลการประมาณค่า Load - Deformation เบื้องต้นของเสาเข็มเจาะในชั้นดินกรุงเทพฯ ในที่นี้ได้ทำการเลือกเสาเข็มเจาะบางต้นที่ใช้ประกอบงานวิจัยครั้งนี้เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง ดังแสดงในรูปที่ 4.24 สำหรับเสาเข็มเจาะ TP-1, TP-6, TP - 10, TP-19, TP-21 และ TP - 23 เป็นตัวอย่าง ซึ่งพบว่าค่าที่ได้จากการประมาณด้วยสมการจากความสัมพันธ์ข้างต้นมีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ในการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในสนาม

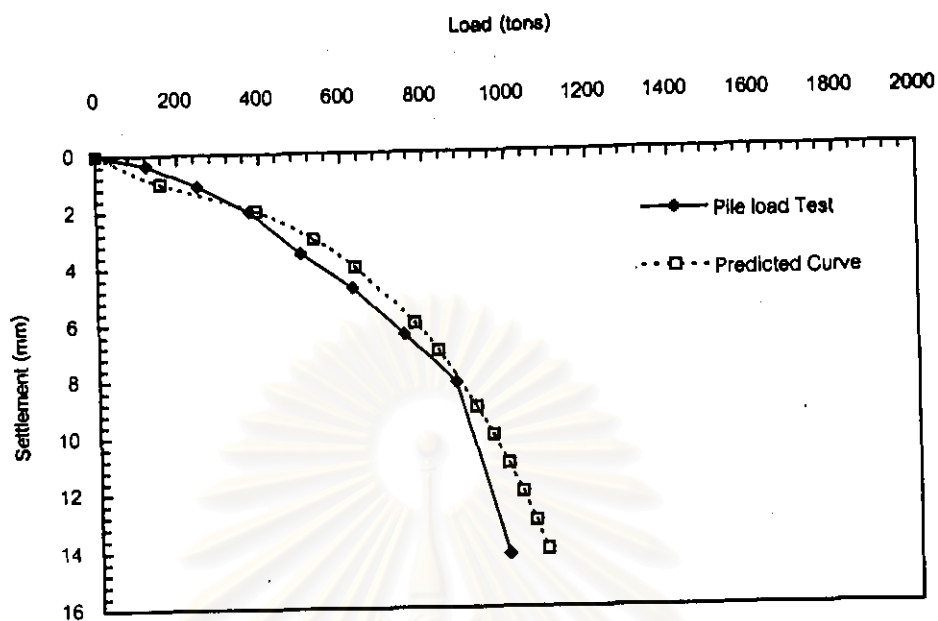


ก. เสาเข็มเจาะ TP-1

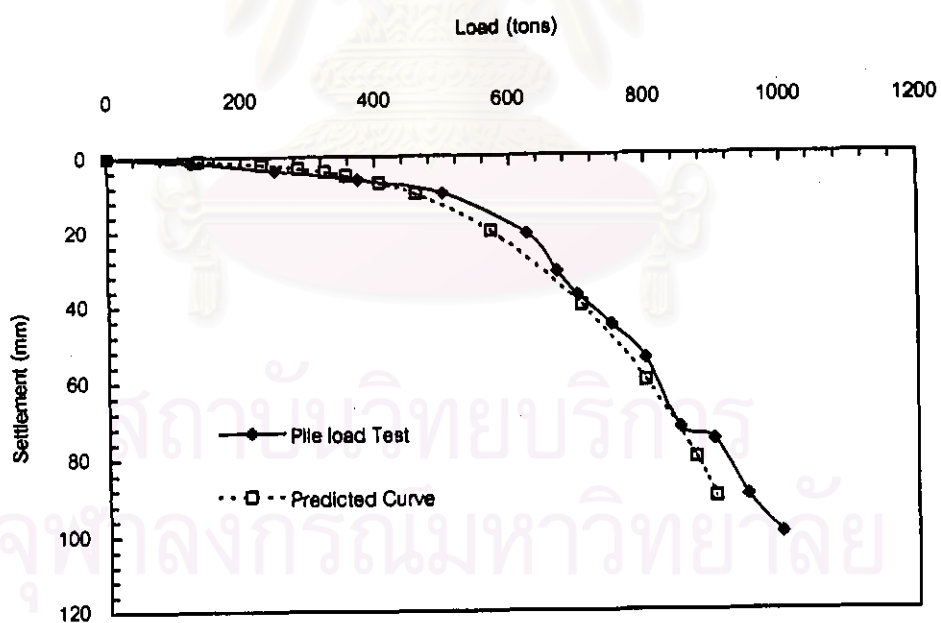


ข. เสาเข็มเจาะ TP-6

รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบระหว่างผลการประมาณค่า Load - Deformation กับค่าที่บันทึกได้

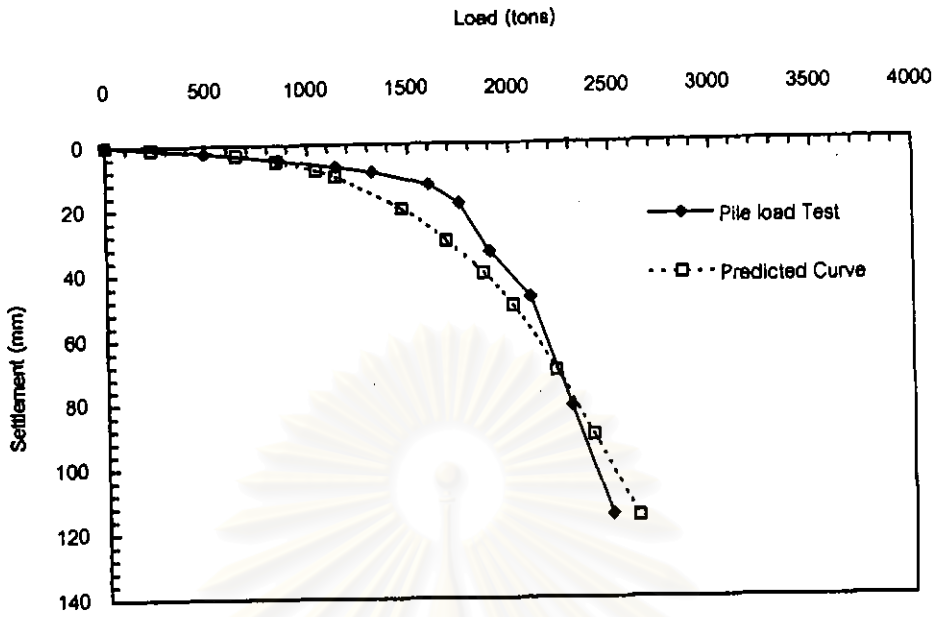


ค.เสาเข็มเจาะ TP-10

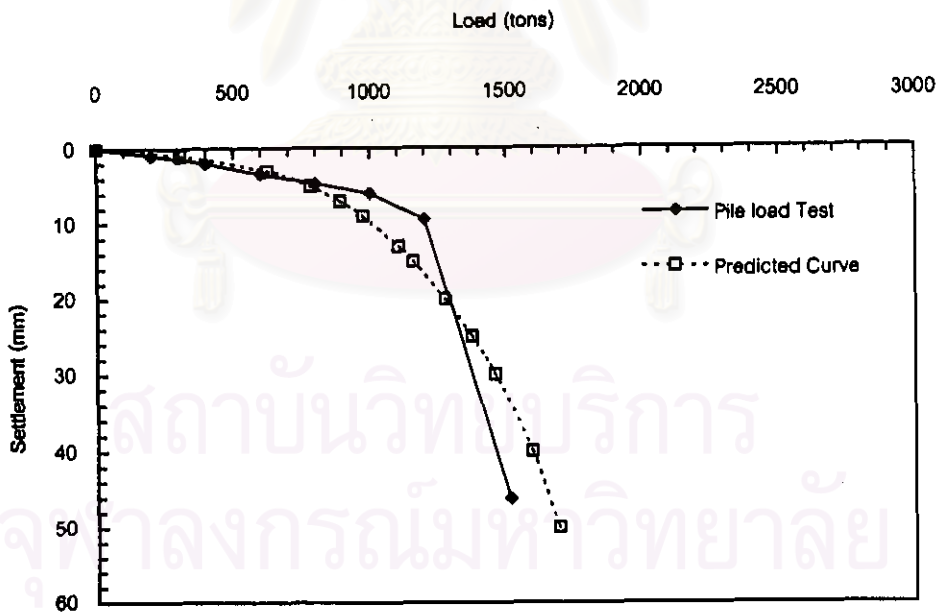


ง.เสาเข็มเจาะ TP-19

รูปที่ 4.24 (ต่อ) การเปรียบเทียบระหว่างผลการประมาณค่า Load - Deformation กับค่าที่บันทึกได้



จ. เสาค้ำเข็มเจาะ TP-21



ข. เสาค้ำเข็มเจาะ TP-23

รูปที่ 4.24 (ต่อ) การเปรียบเทียบระหว่างผลการประมาณค่า Load - Deformation กับค่าที่บันทึกได้

4.7 การเปรียบเทียบและอภิปรายค่าพารามิเตอร์ของเสาเข็มแต่ละประเภท

ค่าพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้ได้แก่ค่า adhesion factor (α) สำหรับชั้นดินเหนียว ค่า friction factor β ($K_s \tan \delta$) และค่า Mobilized N_q สำหรับชั้นทราย ตลอดจนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นระหว่างเสาเข็มและดิน (E_s) ซึ่งแต่ละค่าได้แสดงการเปรียบเทียบแยกตามประเภทเสาเข็มที่รวบรวมได้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.7.1 ค่า adhesion factor

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u ตามรูปที่ 4.3, 4.5 และ 4.7 พบว่าความสัมพันธ์ของค่า α ในชั้นดินเหนียวสำหรับเสาเข็มเจาะและเสาเข็มแบบเรียดในแต่ละประเภทเสาเข็มอยู่ในแนวโน้มใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่ามิติรูปร่างเสาเข็ม (Pile Shape) ในกรณีเสาเข็มเจาะและเสาเข็มแบบเรียดซึ่งจัดว่าเป็นระบบเสาเข็มในประเภทเดียวกันเนื่องจากมีวิธีการก่อสร้างคล้ายกันกล่าวคือใช้สารละลายเบนโทไนท์ในการ Stabilize หลุมเจาะไม่มีผลต่อค่า α ดังนั้นจึงสามารถใช้ความสัมพันธ์เดียวกันในการหาค่า α

รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u ซึ่งพบว่าค่า α สำหรับเสาเข็มในแต่ละประเภทอยู่ในลักษณะกระจัดกระจาย (Scatter) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 0.3 สำหรับชั้นดิน Soft Clay ถึง Hard Clay แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเส้นความสัมพันธ์จากการวิเคราะห์การถดถอยพบว่าเส้นความสัมพันธ์ของเสาเข็มทั้งที่มีและไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สองมีค่าสูงกว่าเส้นความสัมพันธ์ของเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่สองเล็กน้อย เนื่องจากค่าความแข็ง (Stiffness) ของชั้น Dense to Very Dense Sand มีค่าสูงกว่า ชั้น Very Stiff to Hard Clay ซึ่งโดยทั่วไปชั้นดินใต้ปลายเสาเข็มที่แข็ง จะส่งผลให้รับแรงเสียดทานได้ดีขึ้น

โดยทั่วไปกระบวนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สองจะเกิดปัญหาตะกอนก้นหลุม (Loose Base Problem) โดยอาจเกิดจากการกำจัดตะกอนพวก Silt และ Fine sand ด้วยวิธี Air lift ไม่เพียงพอในขั้นตอนการก่อสร้าง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการลดค่ากำลังปลายเสาเข็มและมีค่าการทรุดตัวมากกว่าปกติเมื่อรับน้ำหนัก ดังนั้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม (Base Grouted Bored Pile) เพื่อเพิ่มความแน่นของดินใต้ปลายเสาเข็ม (Teparaksa, 1994 และ 1999)

การอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มนอกจากจะเพิ่มค่ากำลังต้านทานปลายเสาเข็มแล้วยังช่วยให้ดินรอบๆเสาเข็มรับแรงเสียดทานได้ดีขึ้นเนื่องจากความดันที่ใช้การอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มซึ่งมักจะมีค่าสูงสุดประมาณ 40-60 bars (400-600 ตันต่อตารางเมตร) จะทำให้เสาเข็มเกิดการยกตัวขึ้นทำให้เกิดแรง Residual Negative Skin Friction ก่อนการรับน้ำหนักของเสาเข็ม

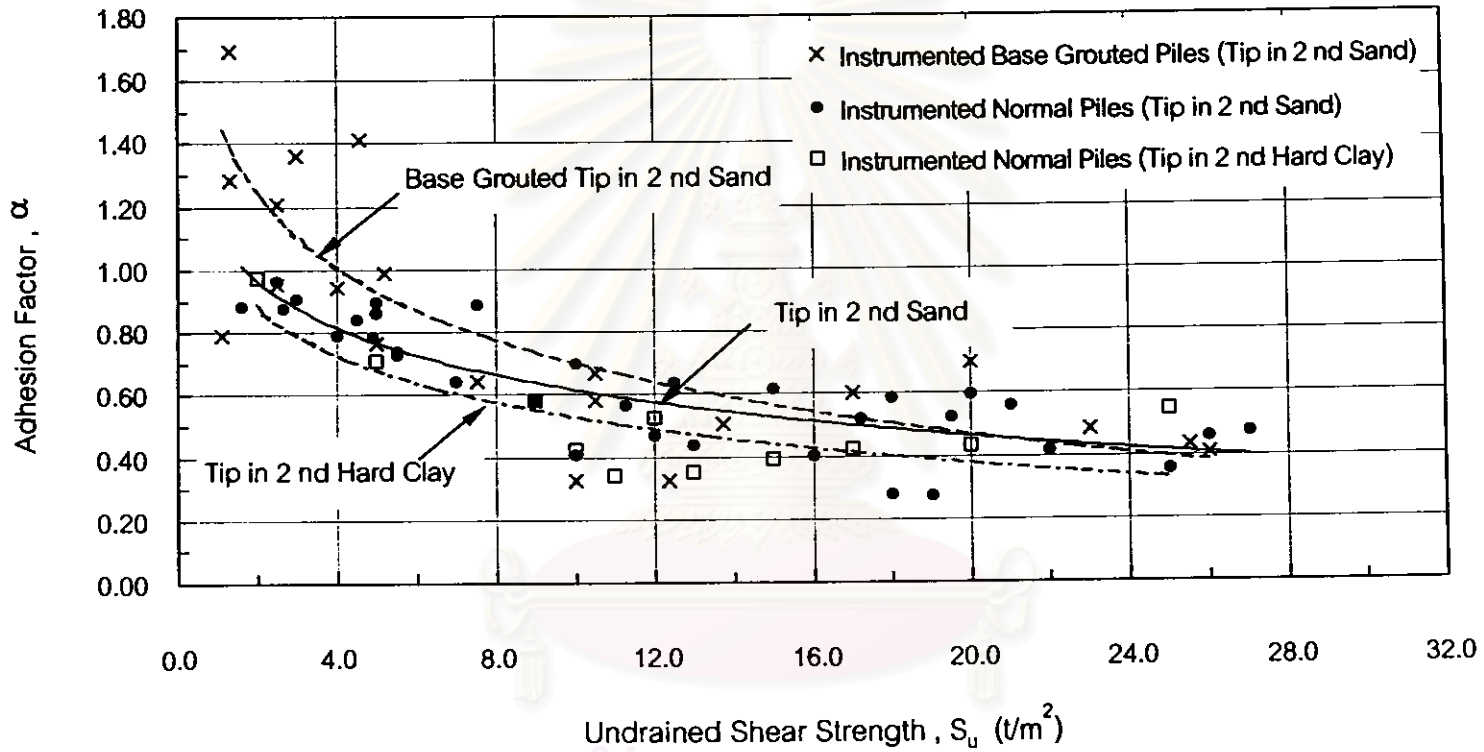
ค่า α สำหรับเสาเข็มอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง (รูปที่ 4.25) ที่ค่า S_u ตั้งแต่ 0.1 ถึง 3.0 ตันต่อตารางเมตร ซึ่งจัดเป็นดินชั้น Very Soft to Soft Clay มีแนวโน้มสูงกว่า หนึ่ง ซึ่งไม่สามารถสรุปนัยสำคัญได้ในงานวิจัยนี้ ถึงแม้ว่ากระบวนการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มจะทำให้ดินรับแรงเสียดทานได้ดีขึ้น เนื่องจากเหตุผลดังนี้

- ดินเหนียวยังอยู่ในสภาวะอิ่มตัว (Saturated Clay) ในระหว่างการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มกล่าวคืออยู่ในสภาวะ Undrained Condition ดังนั้นช่องว่าง (Void) ในดินเหนียวจะไม่ลดลงเมื่อพิจารณาว่าการอัดฉีดน้ำปูนด้วยความดันสูงอาจทำให้น้ำปูนย้อนขึ้นมาข้างตัวเสาเข็มซึ่งจะเป็นการ Compact ดินเหนียว

- เนื่องจากดินเหนียวมีค่าสัมประสิทธิ์ในการซึมผ่านต่ำ ($K \approx 10^{-6}$ ซม. ต่อวินาที) ดังนั้นจึงไม่สามารถพิจารณาว่าความดันในการอัดฉีดน้ำปูนทำให้น้ำปูนไหลเข้าไปทำปฏิกิริยากับแร่ดินเหนียวจนสามารถพัฒนาค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวให้สูงขึ้น นอกจากว่าความดันที่ใช้สูงพอที่จะมีผลทำให้เกิด Hydraulic Fracture ในชั้นดินเหนียว

- การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มโดยทั่วไปจะทดสอบหลังจากก่อสร้างเสาเข็มแล้วเสร็จประมาณ 30-45 วัน ดังนั้นถ้าพิจารณาว่าดินเหนียวเกิดการ Consolidated เนื่องจากการเกิดแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Pressure) ซึ่งเกิดจากการยกตัวของเสาเข็มจากการอัดฉีดน้ำปูน ในที่นี้ไม่สามารถสรุปได้โดยตรงว่าระยะเวลาดังกล่าวอัตราการทรุดตัวอยู่ที่ระดับใด

Piles in Bangkok Subsoils



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u ในชั้นดินเหนียวจากผลการวิจัยสำหรับเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น สำหรับในงานวิจัยนี้จึงไม่สามารถยืนยันผลสรุปได้โดยนัยว่าค่า α สำหรับชั้น Very Soft to Soft clay มีค่า α สูงกว่า 1 ซึ่งการที่ค่า α มีค่าสูงอาจเกิดจากปัญหาจากปัจจัยดังต่อไปนี้

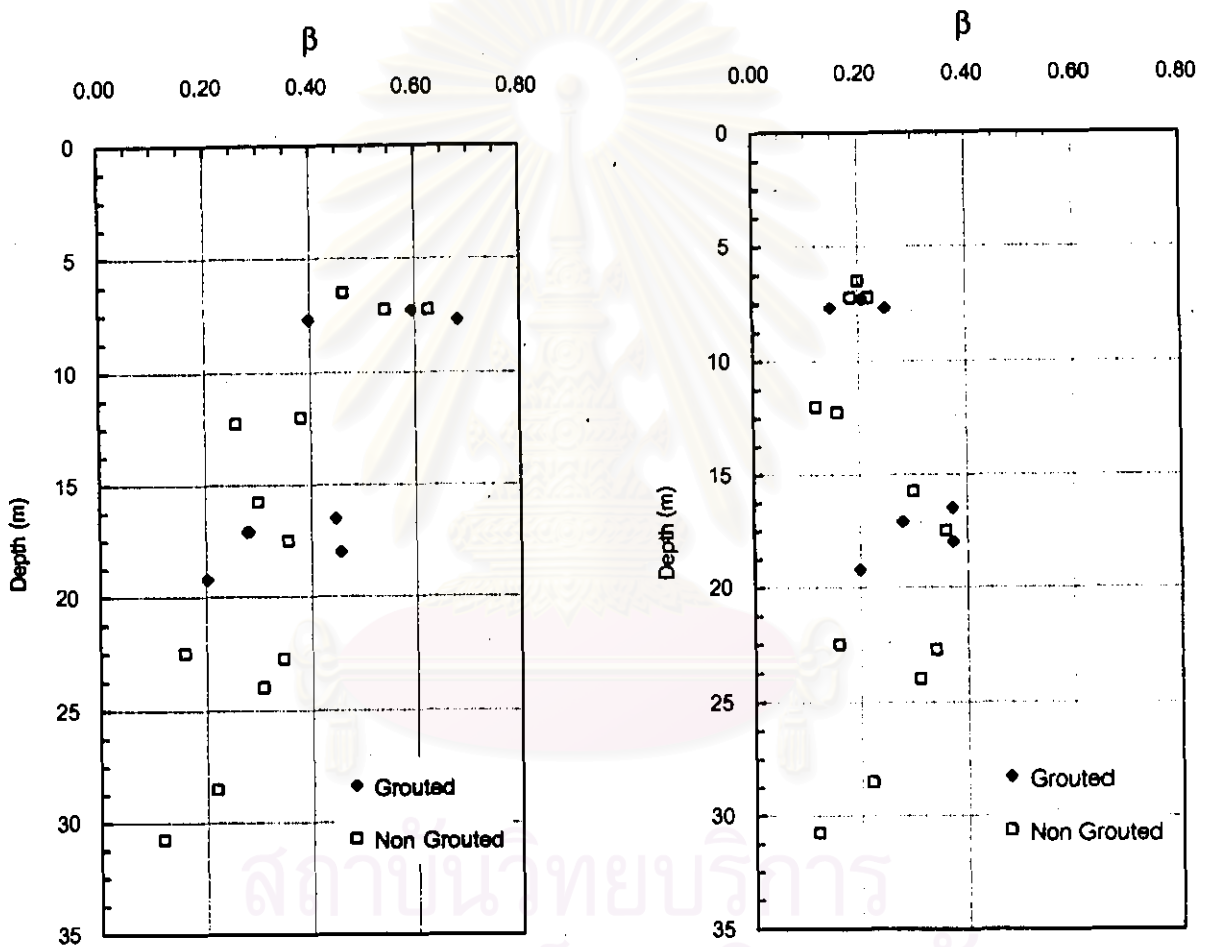
- จากข้อมูลที่แสดงในภาคผนวกพบว่า ตำแหน่งการติดตั้ง WSG ในเสาเข็มบางต้นคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งชั้นดินที่พิจารณาดังนั้นค่าหน่วยแรงเสียดทานที่วิเคราะห์ได้จึงรวมผลกระทบจากชั้นดินที่อยู่ติดกัน ทำให้ได้ค่าหน่วยแรงเสียดทานที่วิเคราะห์ได้สูงเกินความเป็นจริง เมื่อพิจารณาในรูปแบบแรงดันประสิทธิผล (Effective Stress Analysis in Long Term condition) สำหรับแรงเสียดทานในชั้นดินเหนียว ดังสมการ

$$f_s = \beta \cdot \sigma'_v$$

ค่า f_s ที่สูง ในชั้น Soft Clay เมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับความลึก โดยใช้ค่า σ'_v ที่จุดกึ่งกลางชั้น Soft Clay แสดงในรูปที่ 4.26 ก. พบว่าค่า β มีค่าประมาณ 0.4 - 0.7 ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่ไม่ใช่คุณสมบัติของดินเหนียว แต่เมื่อวิเคราะห์ค่า β ที่ ค่า f_s เดียวกัน โดยใช้ค่า σ'_v ที่ระดับที่ชั้นดินเริ่มเปลี่ยนเป็นชั้น Medium Stiff Clay ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ข. พบว่าค่า β ที่วิเคราะห์จากเสาเข็มทั้งที่มีและไม่มี การอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเข็มอยู่ระหว่าง 0.15 - 0.25 (Bjerrum et al. (1969) พบว่าค่า β สำหรับดินเหนียวมีค่าอยู่ระหว่าง 0.20 - 0.30) นั้นแสดงให้เห็นว่าค่า β ในชั้น Soft clay ที่สูง (รูปที่ 4.26 ก.) อาจเกิดจากผลการติดตั้ง WSG คลาดเคลื่อนกล่าวคืออาจติดตั้ง WSG เลยชั้น Soft Clay ไปยังชั้น Medium Stiff clay ซึ่งทำให้ได้ค่า f_s เฉลี่ยระหว่างตำแหน่งทั้งสองของ WSG ที่สูงกล่าวคือเป็นค่า f_s ของชั้น Medium Stiff Clay ส่งผลให้ได้ β มีค่าสูงซึ่งไม่ใช่ค่าสำหรับคุณสมบัติของชั้นดินเหนียว

- โดยทั่วไปการอ่านค่าเริ่มต้น (Initial Reading) ของ WSG จะอ่านค่าก่อนการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มทดสอบ ซึ่งกรณีเสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนค่าเริ่มต้นที่อ่านได้ก่อนการทดสอบจึงเป็นค่าที่รวมผลของ Residual Negative Skin Friction ที่เกิดจากการยกตัวของเสาเข็มจากการอัดฉีดน้ำปูน ดังนั้นค่าน้ำหนักที่วิเคราะห์จาก WSG จึงให้ค่าที่สูงเกินไป ส่งผลให้ค่า α ที่ได้จากการวิเคราะห์กลับสูงขึ้นด้วย

- ในการวิเคราะห์หาค่า α พื้นที่ผิวของเสาเข็มคำนวณจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่กำหนดซึ่งเป็นขนาดที่กำหนดจาก Casing ที่ใช้ แต่ในความเป็นจริงภายหลังจากขั้นตอนการเทคอนกรีตแล้วเสเข็มจะมีการถอน Casing ดังนั้นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มที่ใช้ในการวิเคราะห์อาจจะต่ำกว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่แท้จริง ซึ่งเป็นผลให้ได้ค่า α สูง



ก. ค่า σ'_v ที่จุดกึ่งกลางชั้น Soft Silty Clay

ข. ค่า σ'_v ที่ตำแหน่งของ WSG ที่ระดับชั้นดินเริ่มเปลี่ยนเป็นชั้น Medium Stiff Clay

รูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง β กับความลึก

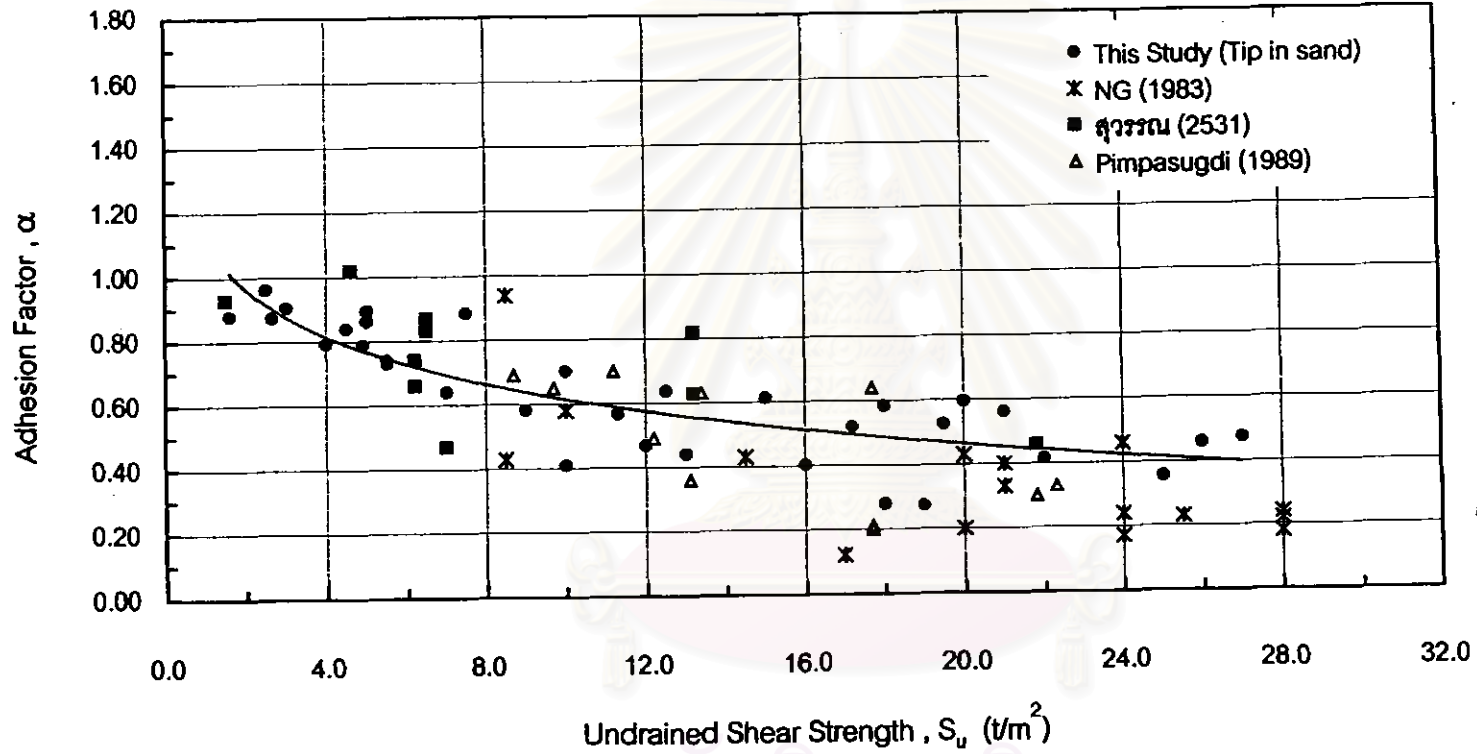
เมื่อนำผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u กรณีเสาเข็มที่ไม่ได้มีการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็มที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยของ NG (1983) และ สุวรรณ (2531) ซึ่งทำการวิเคราะห์จากเสาเข็มเจาะที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัด และงานวิจัยของ Pimpasugdi (1989) ดังแสดงในรูปที่ 4.27 พบว่าค่า α ที่ได้อยู่ในแนวโน้มเดียวกัน

เมื่อพิจารณาในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่า Skin Friction Ratio (รูปที่ 4.28) ก็ได้ผลสรุปว่าค่า f_s / N สำหรับเสาเข็มทั้ง 3 ประเภทอยู่ในแนวโน้มเดียวกัน คือมีค่าอยู่ระหว่าง 0.6 ถึง 0.2 ที่ค่า N ตั้งแต่ 6 ถึง 45 ครั้งต่อฟุต ซึ่งเป็นช่วงชั้นดินตั้งแต่ Stiff ถึง Hard Clay



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

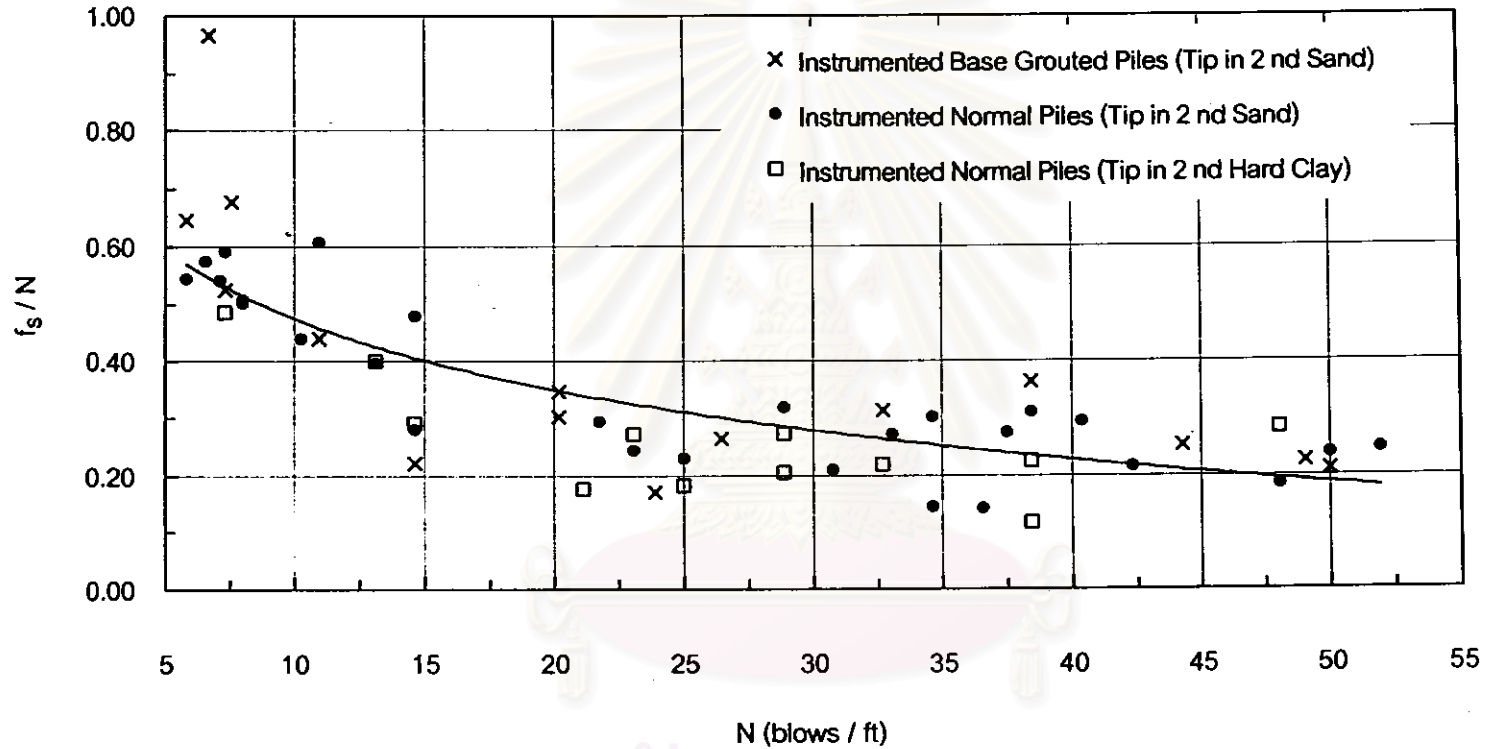
Piles in Bangkok Subsoils



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α กับค่า S_u ในชั้นดินเหนียวสำหรับเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Piles in Bangkok Subsoils



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า f_s / N กับค่า N ในชั้นดินเหนียวจากผลการวิจัยสำหรับเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

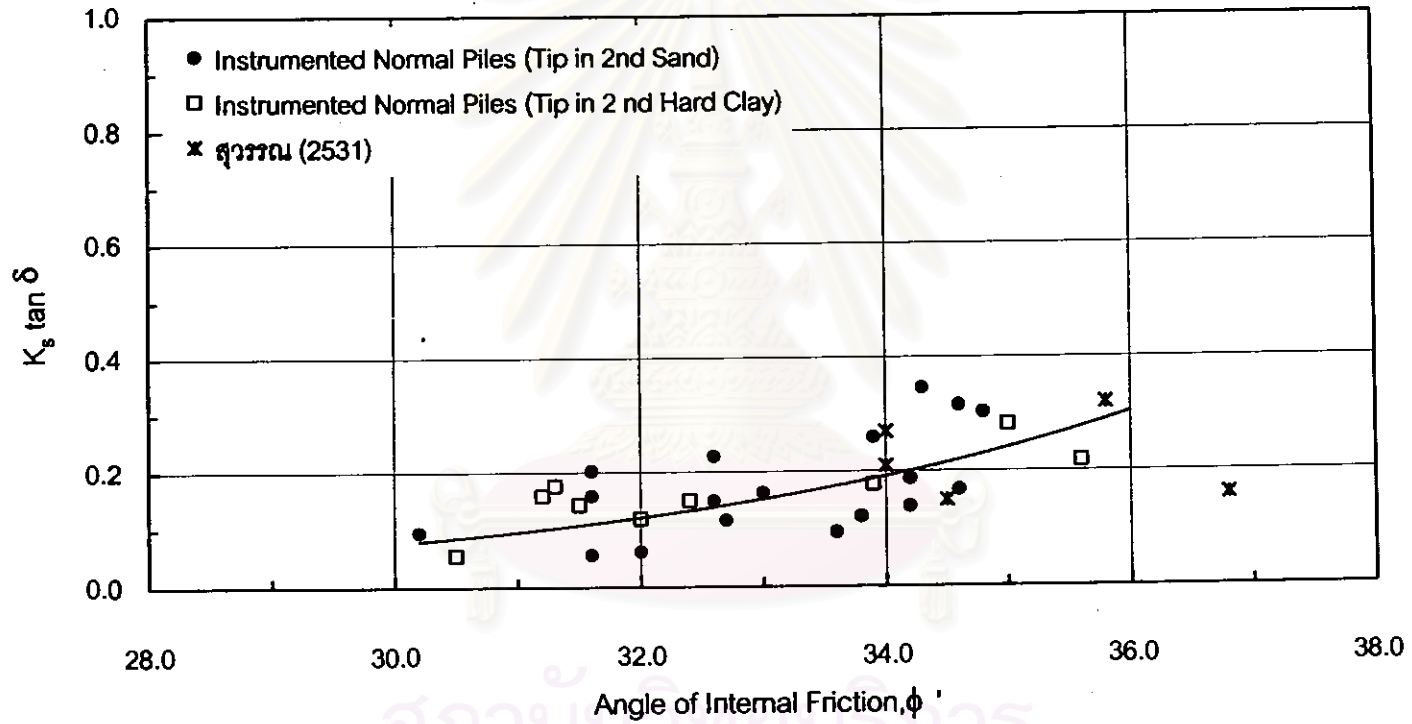
4.7.2 ค่า friction factor β ($K_s \tan \delta$)

ค่า friction factor β ($K_s \tan \delta$) สำหรับการประมาณค่าแรงเสียดทานของเสาเข็มในชั้นทรายที่วิเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้ เมื่อพิจารณาในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K_s \tan \delta$ กับค่า ϕ' ในรูปที่ 4.9, 4.11 และ 4.13 พบว่า ค่า $K_s \tan \delta$ ในชั้นทรายชั้นที่หนึ่งและชั้นทรายชั้นที่สองมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก นอกจากนี้ยังพบว่าค่า $K_s \tan \delta$ สำหรับเสาเข็มเจาะและเสาเข็มแบบเรีตมีแนวโน้มอยู่ในความสัมพันธ์เดียวกัน และมีค่าสอดคล้องกับผลการวิจัยของสุวรรณ (2531) ดังแสดงในรูปที่ 4.29 โดย $K_s \tan \delta$ มีค่าตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.3 เมื่อ ϕ' มีค่า 30° ถึง 36°

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K_s \tan \delta$ กับค่า ϕ' ในรูปที่ 4.30 แสดงการเปรียบเทียบกันระหว่างค่า $K_s \tan \delta$ สำหรับเสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มกับเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง พบว่า ค่า $K_s \tan \delta$ สำหรับเสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มมีค่าสูงกว่า โดยมีค่าประมาณสองเท่าของค่า $K_s \tan \delta$ สำหรับเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม เนื่องจากผลจากการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มอาจทำให้น้ำปูนย้อนขึ้นมาข้างตัวเสาเข็มมา Compact ทรายในชั้นทรายชั้นที่สองให้แน่นขึ้นทำให้ทรายมีกำลังรับแรงเฉือนสูงขึ้น หรือน้ำปูนอาจจะไหลเข้าไปทำปฏิกิริยาทำให้เพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดทรายรอบผิวเสาเข็มส่งผลให้สามารถรับแรงเสียดทานได้ดีขึ้น

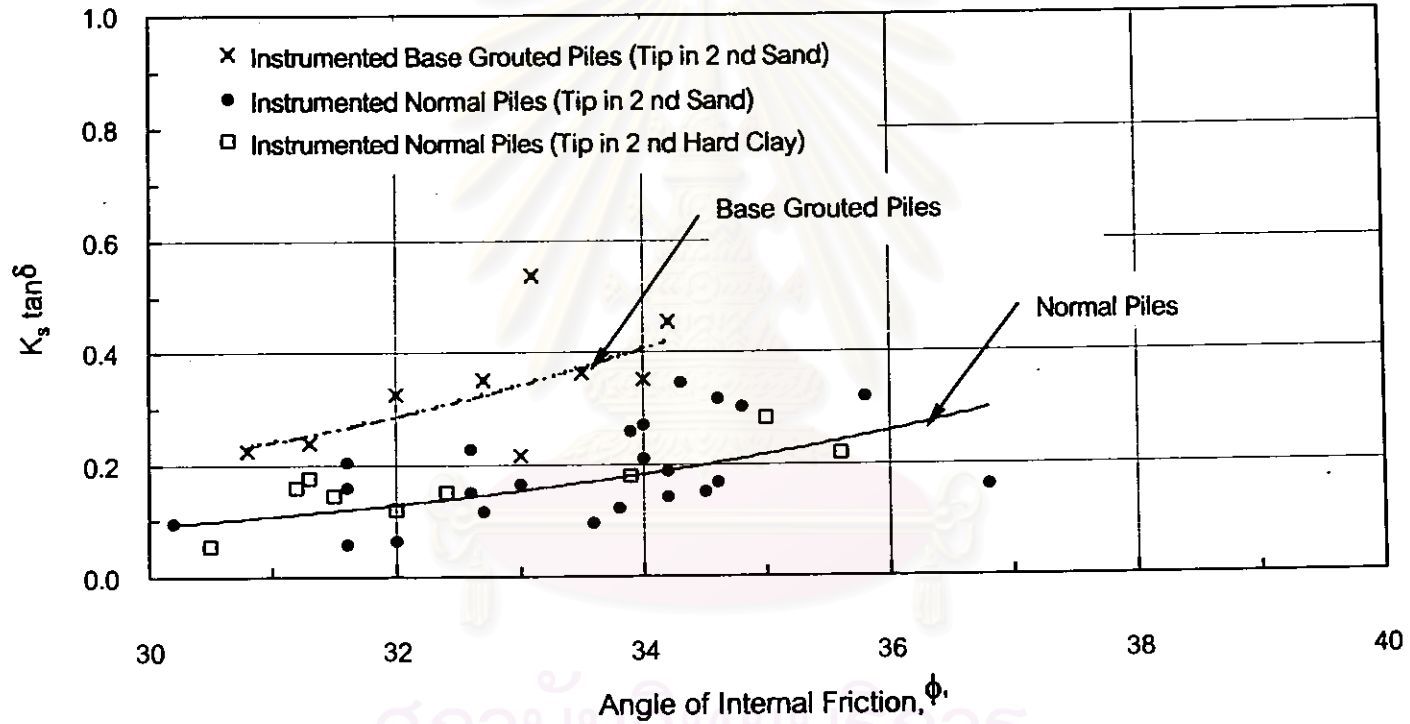
รูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Skin Friction Ratio (f_s / N') กับค่า SPT-N Value จากความสัมพันธ์พบว่าค่า f_s / N' มีค่าลดลงตั้งแต่ 1.1 ถึง 0.6 เมื่อค่า N' มีค่าตั้งแต่ 12 ถึง 24 ครั้งต่อฟุต สำหรับเสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม ในกรณีเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม f_s / N' มีค่าตั้งแต่ 0.7 ถึง 0.3 เมื่อ N' มีค่าตั้งแต่ 15 ถึง 31 ครั้งต่อฟุต โดยค่า f_s / N' สำหรับเสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มมีค่าสูงกว่า กล่าวคือมีค่าประมาณ 1.5 เท่าของค่า f_s / N' สำหรับเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม

Bored Piles in Bangkok Subsoils



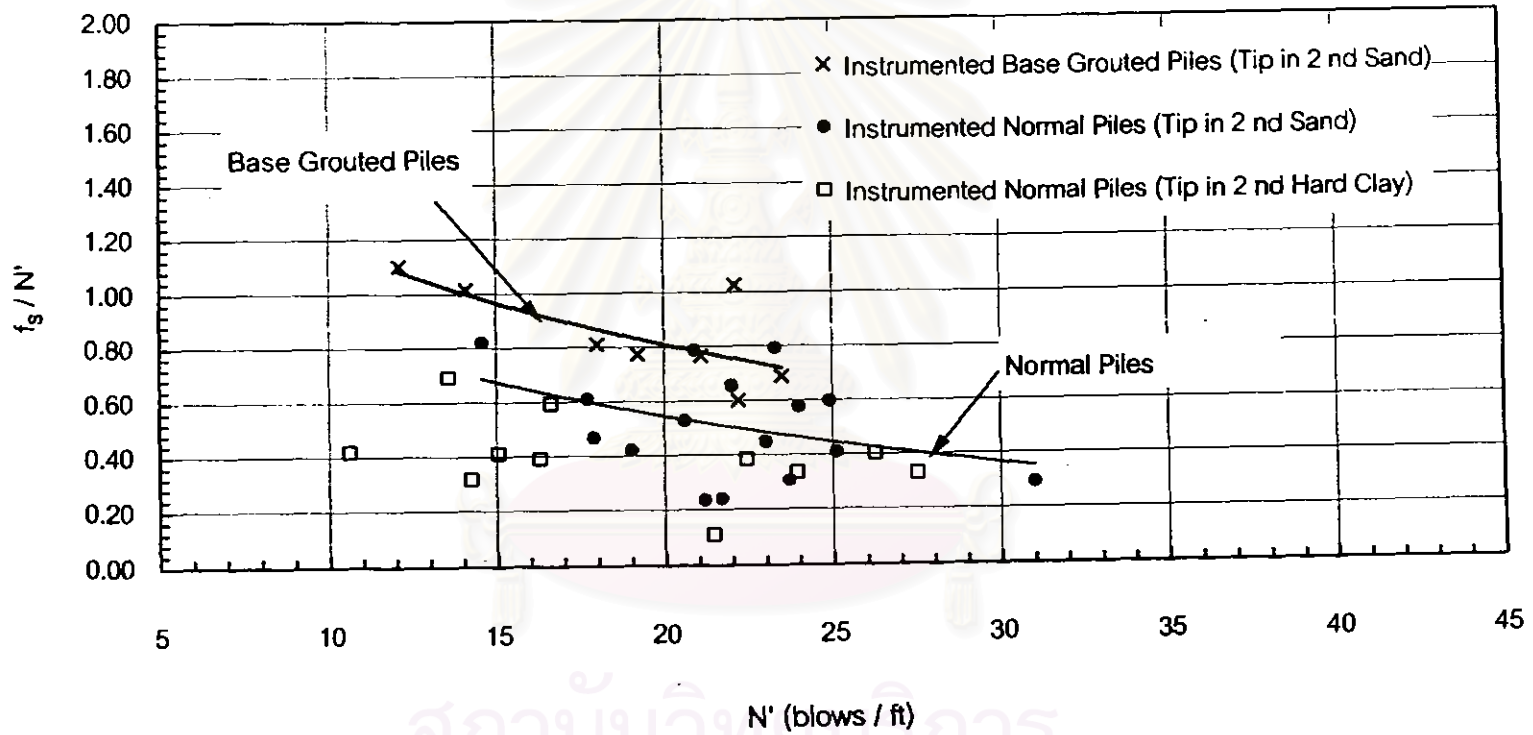
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K_s \tan \delta$ กับค่า ϕ' ในชั้นทรายสำหรับเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ

Piles in Bangkok Subsoils



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $K_s \tan \delta$ กับค่า ϕ' ในพื้นที่รอยจากผลการวิจัยสำหรับเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ

Piles in Bangkok Subsoils



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า f_s / N' กับค่า N' ในชั้นทรายจากผลการวิจัยสำหรับเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯ

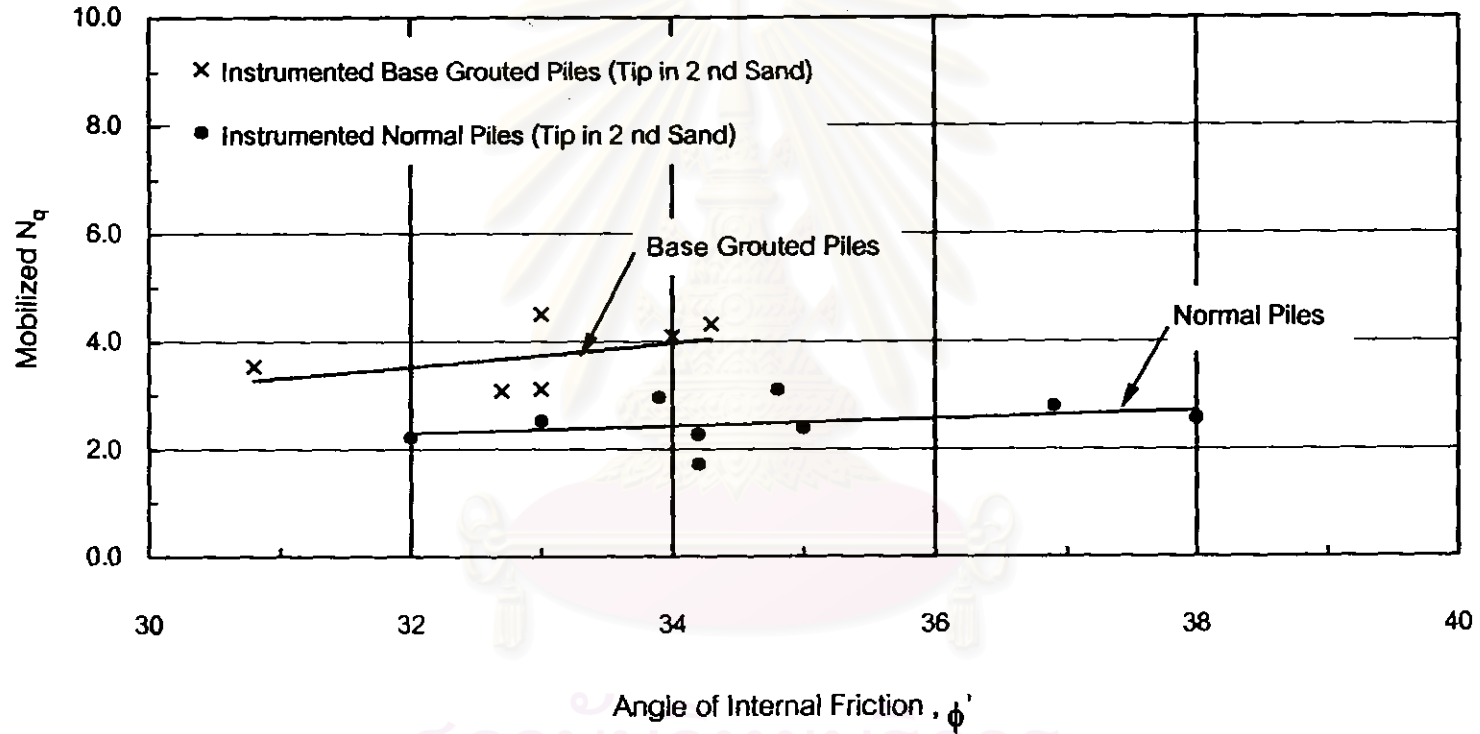
4.7.3 ค่า Mobilized N_q

จากรูปที่ 4.16 ซึ่งแสดงค่า Mobilized N_q สำหรับเสาเข็มอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง พบว่าค่า Mobilized N_q สำหรับเสาเข็มแบบเรติมีแนวโน้มต่ำกว่าเสาเข็มเจาะ เนื่องจากผลของวิธีการก่อสร้างเสาเข็ม โดยการก่อสร้างเสาเข็มแบบเรติใช้เครื่องมือประเภทเดียวกับงานก่อสร้างกำแพง Diaphragm Wall และมีขั้นตอนคล้ายการก่อสร้าง Diaphragm Wall หัวเจาะที่ใช้เป็นระบบ Mechanical Hang Grab ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ที่ปลาย Grab จะมีลักษณะเป็นแนวพื้นปลาซึ่งจะทำให้ปลายหลุมเจาะที่ชั้นทรายชั้นที่สองหลังจากขุดเจาะแล้วเสร็จอยู่ในสภาพหลวมพร้อมทั้งปัญหาตะกอนก้นหลุมที่อาจจะมามากกว่าระบบการก่อสร้างเสาเข็มเจาะ จึงทำให้ผลวิเคราะห์ให้ค่า Mobilized N_q สำหรับเสาเข็มแบบเรติมีค่าต่ำกว่าเสาเข็มเจาะ โดยค่า Mobilized N_q สำหรับเสาเข็มเจาะจะมีค่าประมาณสามเท่าของค่า Mobilized N_q สำหรับเสาเข็มแบบเรติ

เมื่อพิจารณาถึงผลการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มเจาะที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สองดังแสดงในรูปที่ 4.32 พบว่าเสาเข็มเจาะที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มให้ค่า Mobilized N_q สูงกว่ากรณีที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม โดยค่า Mobilized N_q สำหรับเสาเข็มเจาะที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มสูงกว่าเสาเข็มเจาะที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มประมาณ 60 - 70 % ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มที่ต้องการเพิ่มกำลังต้านทานที่ปลายเสาเข็มที่เกิดปัญหา Loose Base เนื่องจากตะกอนก้นหลุมและการควบคุมคุณภาพของเสาเข็มในระหว่างการก่อสร้างไม่ดีพอ

รูปที่ 4.33 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่า Mobilized N_q สำหรับเสาเข็มเจาะที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สองในชั้นดินกรุงเทพฯ ที่ได้ในงานวิจัยนี้กับผลการวิจัยก่อนหน้า (NG(1983), สุวรรณ (2531) และ Pimpasugdi (1989)) พบว่า ค่า Mobilized N_q สำหรับผลการวิจัยให้ค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 3 ที่ ϕ' ตั้งแต่ $32^\circ - 38^\circ$ ซึ่งต่ำกว่าผลการวิจัยก่อนหน้านี้ที่ให้ค่า Mobilized N_q อยู่ระหว่าง 5 ถึง 10 เนื่องจากเสาเข็มเจาะที่ใช้ในการวิจัยก่อนหน้าส่วนใหญ่เป็นเสาเข็มเจาะที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่หนึ่ง ที่มีความยาวประมาณ 25-35 เมตร ดังนั้นการควบคุมคุณภาพในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะ โดยเฉพาะการกำจัดตะกอนก้นหลุมในขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มก่อนการเทคอนกรีตย่อมดีกว่าเสาเข็มเจาะที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สองที่มีความยาวตั้งแต่ 45 เมตร ขึ้นไป ซึ่งเป็นเสาเข็มเจาะที่ใช้ในงานวิจัยนี้

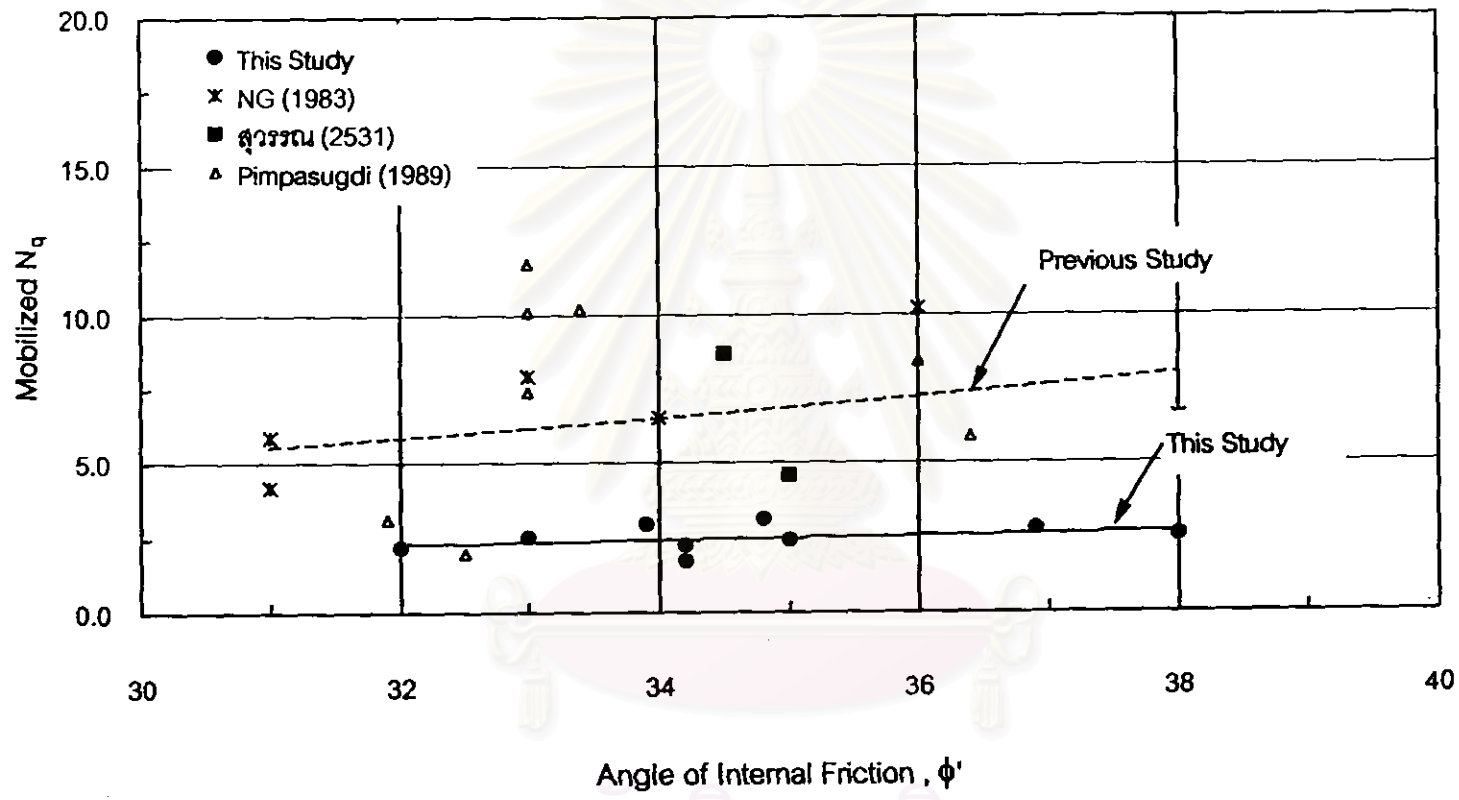
Bored Piles in Bangkok Subsoils



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mobilized N_q กับค่า ϕ' จากผลการวิจัยสำหรับเสาเข็มเจาะที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สองในชั้นดินกรุงเทพฯ

สำนักงานวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Bored Piles in Bangkok Subsoils



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mobilized N_q กับค่า ϕ' สำหรับเสาเข็มเจาะที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สองในชั้นดินกรุงเทพฯ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.7.4 ค่า E_s

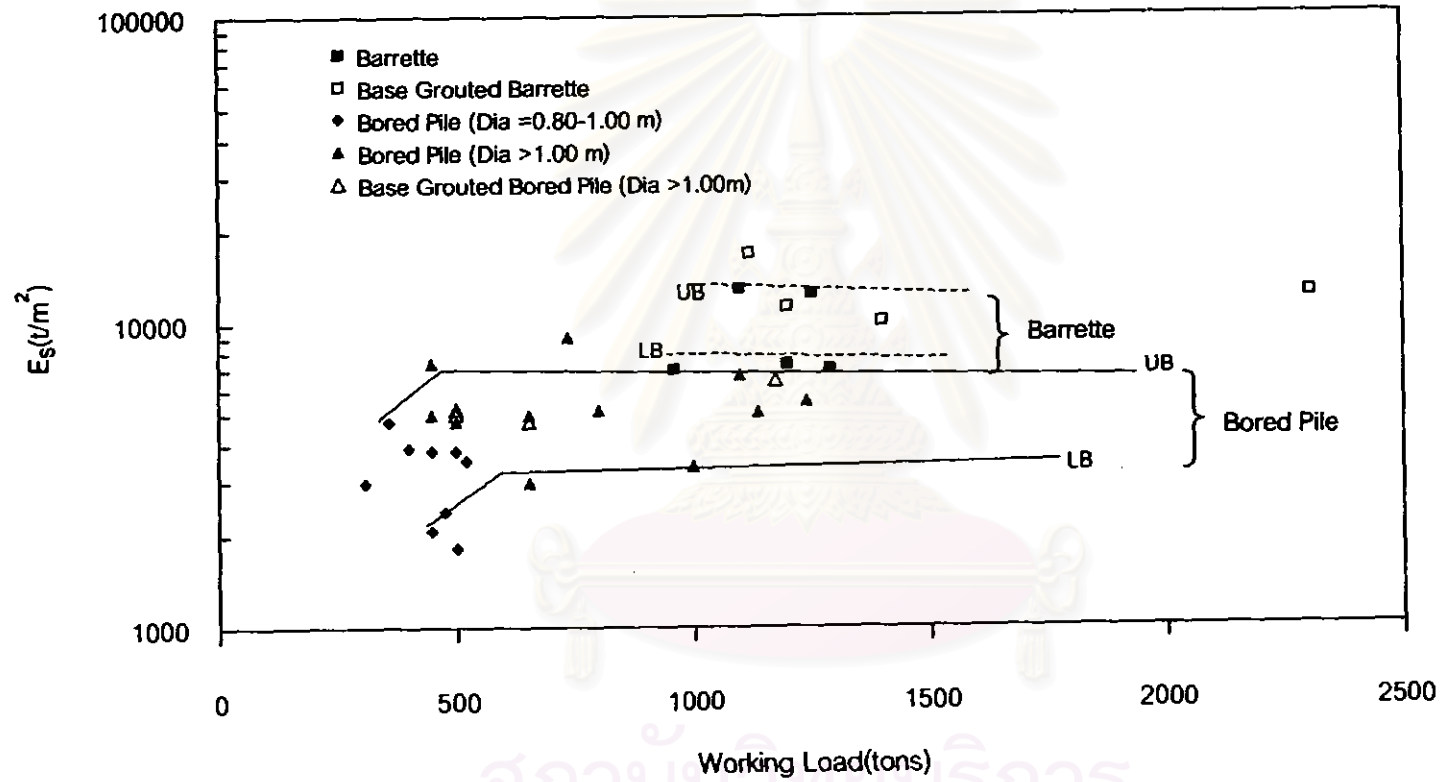
ค่า E_s ที่ใช้ในการวิเคราะห์การทรุดตัวของเสาเข็ม ในทฤษฎีของ Poulos & Davis (1980) เป็นค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นรวมของเสาเข็มและดินรอบเสาเข็ม ดังนั้นค่า E_s จึงเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทั้งของเสาเข็มและดินรอบผิวเสาเข็มตลอดจนขนาดหน้าตัดของเสาเข็ม ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้เสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สองเป็นเสาเข็มเสียดทานด้านข้าง (Floating Pile) ตามการแบ่งแยกในการวิเคราะห์การทรุดตัวของเสาเข็มโดยทฤษฎีของ Poulos & Davis กล่าวคือให้ค่า E_s / E_b เท่ากับหนึ่ง เนื่องจากปัญหาตะกอนก้นหลุม (Loose Base) ในการก่อสร้างระบบเสาเข็มเจาะที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_s กับค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานสำหรับเสาเข็มแบบเรียดและเสาเข็มเจาะ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และ 4.19 พบว่า ค่า E_s สำหรับเสาเข็มแบบเรียดสูงกว่าค่า E_s สำหรับเสาเข็มเจาะ เนื่องจากเสาเข็มแบบเรียด มีค่า D / L สูงกว่าเสาเข็มเจาะ

เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างค่า E_s สำหรับเสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มกับเสาเข็มที่ไม่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 4.34 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_s กับค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานสำหรับเสาเข็มแบบเรียดและเสาเข็มเจาะที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มมีแนวโน้มใกล้เคียงกับเสาเข็มที่ไม่ได้มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม ถึงแม้ว่าการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มจะช่วยให้ดินรอบข้างเสาเข็มสามารถรับแรงเสียดทานได้ดีขึ้น แต่ในการวิเคราะห์การทรุดตัวตามทฤษฎีอัสติคพิจารณาดินรอบเสาเข็มเป็นดินลักษณะเนื้อเดียวกัน (Homogenous Soil) ดังนั้นในกรณีเสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มซึ่งมีผลให้เฉพาะดินในชั้นทรายรับแรงเสียดทานได้ดีขึ้นจึงให้ผลเล็กน้อยเมื่อเทียบกับชั้นดินทั้งหมดทำให้ค่า E_s สำหรับเสาเข็มที่มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็มมีแนวโน้มใกล้เคียงกับเสาเข็มที่ไม่ได้มีการอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาเข็ม

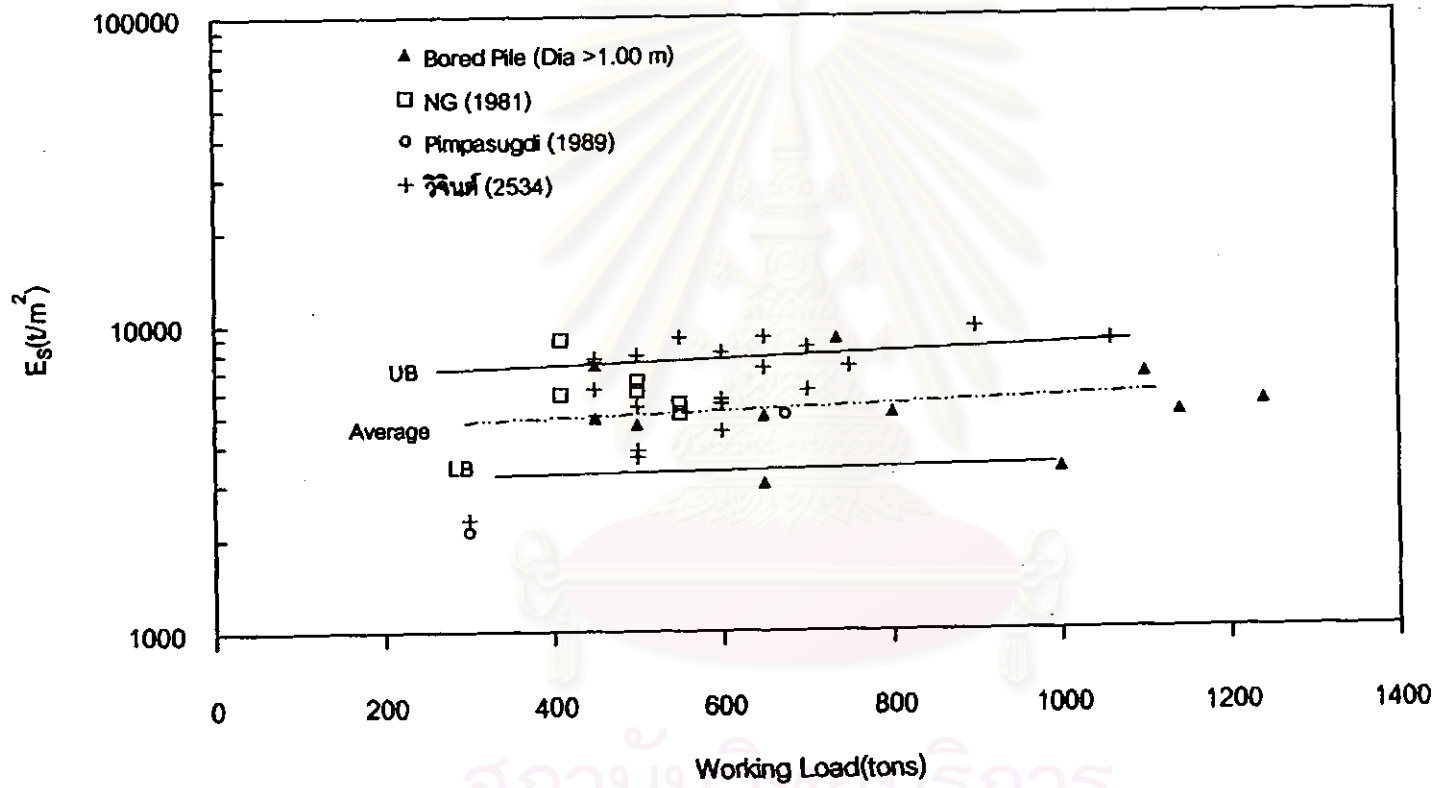
รูปที่ 4.35 แสดงการเปรียบเทียบค่า E_s ที่ได้จากการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้กับผลการศึกษาของ NG (1981), Pimpasugdi (1989) และ วิจิณต์ (2534) สำหรับเสาเข็มเจาะที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 1.00 เมตร ที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สอง พบว่าผลการวิเคราะห์มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

Piles in Bangkok Subsoils



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_s กับค่าน้ำหนักบรรทุกใช้งานของเสาเข็มจากผลการวิจัยสำหรับเสาเข็มที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สองในชั้นดินกรุงเทพฯ

Piles in Bangkok Subsoils



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_s กับค่าน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งานของเสาเข็มเจาะที่มีปลายอยู่ในชั้นทรายชั้นที่สองในชั้นดินกรุงเทพฯ