บทที่ 5
ผลการวิเคราะห์ ผลการทดสอบและการวิจารณ์

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลของการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มที่รวบรวมจากในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ จำนวน 9 ต้น โดยศึกษาตามวิธีต่างๆที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 บทที่ 3และบทที่ 4 ซึ่งในแต่ละวิธีที่ศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านๆมา โดยเปรียบเทียบกับการทดสอบเสาเข็มจริงในสนามที่ได้ทำการทดสอบ ทั้งการทดสอบเสาเข็มโดยการดึงและการทดสอบเสาเข็มโดยการกด โดยมีผลของการเจาะสำรวจดิน ที่แสดงคุณสมบัติของดินทางวิศวกรรม

5.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มตอกในดินเหนียวแข็งเชียงใหม่

สรุปน้ำหนักบรรทุกประลัยที่ประมาณโดยวิธี Modified Mazurkiewicz แสดงดังตารางที่ 5.1 ซึ่งเมื่อเทียบกับวิธีต่างๆจะได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกับวิธี Mazurkiewicz เดิมที่มีหลักการเดียวกัน และผลน้ำหนักบรรทุกประลัยวิธีอื่นๆ ได้จัดแสดงผลไว้ในตารางที่ ก.4 (ภาคผนวก ก) ซึ่งจะเห็นว่ามีบางวิธีที่ใช้ประมาณค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยไม่ครบทุกต้น ได้แก่ วิธีของ Butler and Hoy, Fuller and Hoy, Davission เป็นต้น สำหรับวิธีของ Chin นั้นให้ค่าการประมาณน้ำหนักบรรทุกประลัยสูงกว่าวิธีอื่นซึ่งอาจกล่าวได้ว่าความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัวไม่เป็นรูปแบบไฮเปอร์โบลิคจริงตามที่ Chin ได้ตั้งข้อกำหนดไว้ จึงทำให้ค่าน้ำหนักบรรทุกที่คำนวณได้จากวิธีนี้ให้ค่าที่สูงเกินไป (ธนาคล คงสมบรูณ์, 2541) นอกจากนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Fellenius (1980) ที่พบว่าวิธีของ Chin ให้ค่าการประมาณสูงกว่าวิธีอื่นๆ

สำหรับแรงต้านทานปลายเสาเข็มตอกในชั้นดินเหนียว ใช้ค่า N_c เท่ากับ 9 สามารถใช้ได้ดีสำหรับในดินเหนียวแข็ง (Tomlinson (1971), Sambhandharaksa (1988), Flaate and Selnes (1977)) และในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนิยมใช้ค่า N_c เท่ากับ 9 (บุญเทพ นาเนกรังสรรค์, 2539)

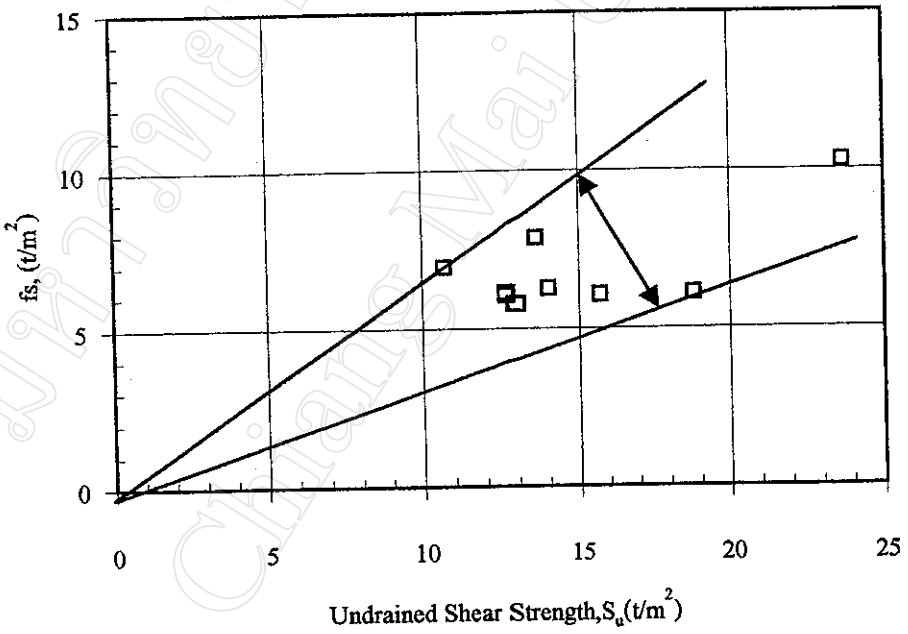
สรุปผลการวิเคราะห์หาค่าหน่วยแรงเสียดทานผิว กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเฉลี่ย (Average Undrained Shear Strength, $S_{u(avg.)}$) และหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งเฉลี่ย (Average Effective Vertical Stress, $\sigma_{v(avg.)}'$) แสดงในตารางที่ 5.1 จากการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะการกระจายของค่าหน่วยแรงเสียดทานผิว ระหว่างตัวแปรในวิธีหน่วยแรงรวม คือ กำลังรับ

ตารางที่ 5.1 แสดงสรุปผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มในดินเหนียวแข็งเชียงใหม่

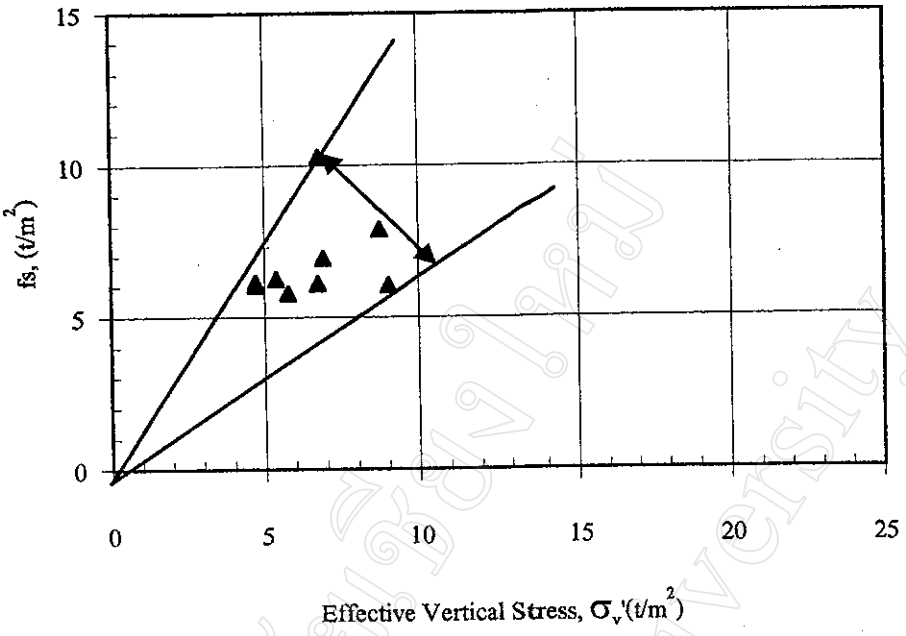
โครงการ	ขนาด (ม.xม.)	ระยะฝัง (ม.)	Q_{allow} (ตัน)	Q_{ult} (ตัน)	Q_{ult}* (ตัน)	ข้อมูลดินจากหลุมทดสอบ	$S_{u(avg.)}$ (ตัน/ตร.ม.)	$\sigma_{vo'avg.}$ (ตัน/ตร.ม.)	f_s (ตัน/ตร.ม.)
1. อาคารศูนย์การค้ากาดสวนแก้ว	0.40x0.40x10	8	60	100	108	BH 1,2	15.7	9.00	6.05
2. อาคารสำนักงานท่าอากาศยาน	0.40x0.40x13	11	50	136	130	BH 1	18.8	6.72	6.09
3. โครงการ SR.LAND-G4	0.35x0.35x11	11	50	114	116	BH 4,5	12.7	4.70	6.14
4. โครงการ SR.LAND-F5	0.35x0.35x11	11	50	112.5	107	BH 4,5	12.6	4.70	6.05
5. โรงแรมพรพิงค์	0.40x0.40x18	16	80	228	249	BH 1,2	13.6	8.72	7.88
6. สำนักงานใหญ่นิยมพาณิชย์	0.40x0.40x13.6	11.3	90	206	229	BH 2	23.7	6.75	10.27
7. อาคารเทคโนการประมง มหาวิทยาลัยแม่โจ้	0.26x0.26x10	9	35	72	66	BH 1,2	13.0	5.76	5.77
8. อาคารพลศึกษามหาวิทยาลัยแม่โจ้	0.40x0.40x10	8.7	80	130	116	BH 1	10.7	6.90	6.94
9. แฟลตข้าราชการมหาวิทยาลัยแม่โจ้	0.25x0.25x8	8	25	59	57	BH 1,2	14.0	5.37	6.25

หมายเหตุ Q_{ult}* น้ำหนักบรรทุกประลัยจากวิธี Mazurkiewicz

แรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเฉลี่ย กับ ตัวแปรในวิธีหน่วยแรงประสิทธิผล คือ หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งเฉลี่ย โดยการพล็อตกราฟดูความสัมพันธ์เพื่อดูลักษณะการกระจายข้อมูล ตามวิธีของ Flaate and Selnes (1977) ผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 ซึ่งพบว่าลักษณะของการกระจายของค่าหน่วยแรงเสียดทานผิว เมื่อเทียบกับตัวแปรทั้งสอง มีลักษณะไม่ต่างกันมากนัก แต่วิธีหน่วยแรงรวมมีการกระจายน้อยกว่าเล็กน้อย ดังนั้นในการประเมินหาค่าหน่วยแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มตอก นอกจากการใช้หน่วยแรงรวมซึ่งอาศัยกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ แล้ว การใช้วิธีหน่วยแรงประสิทธิผลซึ่งอาศัยหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง จัดว่าเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถใช้ในการคาดคะเนหน่วยแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มตอกในดินเหนียวแข็งเชียงใหม่ได้ ดังงานวิจัยข้างต้นที่ผ่านๆมา ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการประเมินค่าแรงเสียดทานผิวด้วย



รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง fs กับ $S_{u(avg)}$



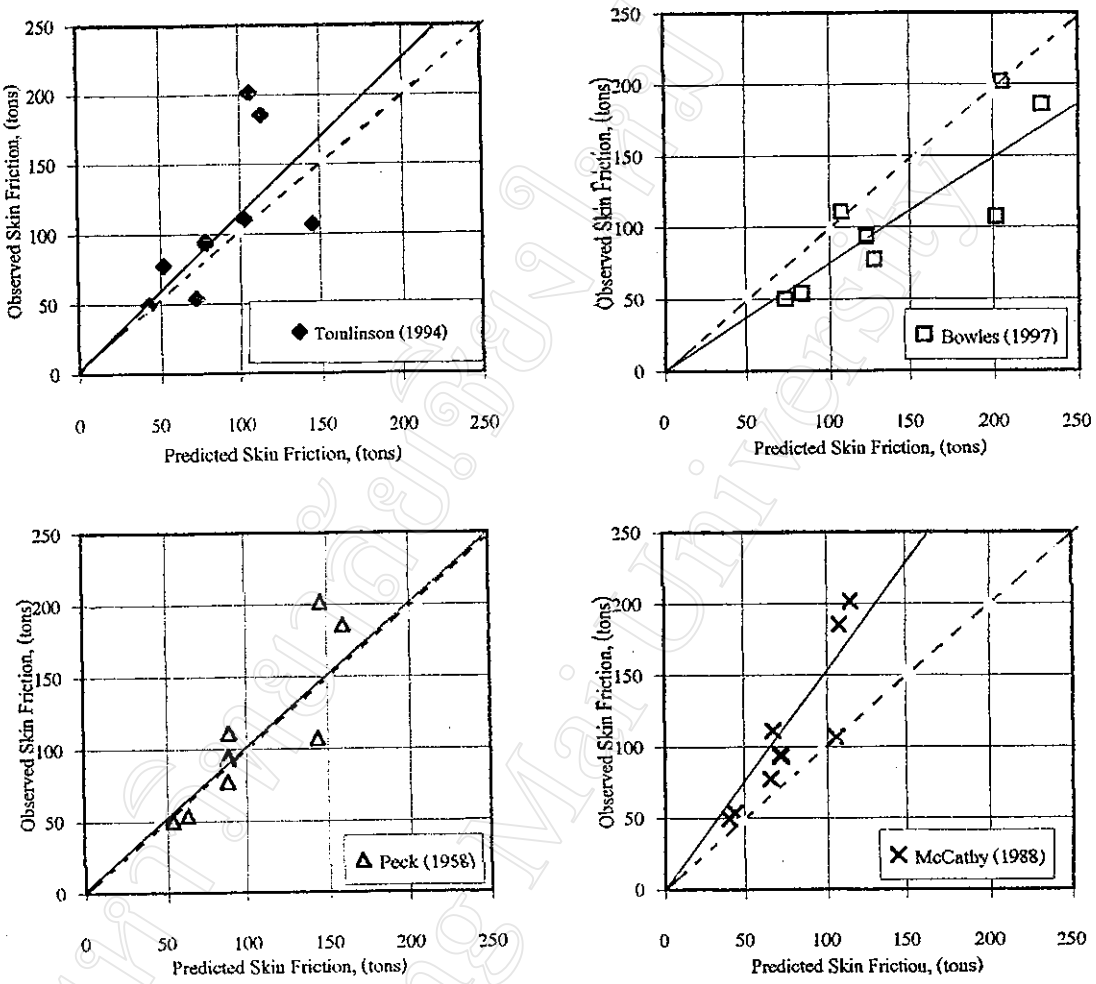
รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง fs กับ $\sigma_{v\,(avg)}'$

วิธีหน่วยแรงรวม วิธีหน่วยแรงประสิทธิผล และ วิธีการใช้หน่วยแรงรวมร่วม กับ หน่วยแรงประสิทธิผล จากงานวิจัยต่างๆ ได้แก่ Bowles (1997), Peck (1958), McCarthy (1977), Tomlinson (1994), Meyerhof (1976), Flaate and Selnes (1977), Vijakverjiya and Focht (1972) เป็นต้น เทียบกับแรงเสียดทานผิวที่ประเมินได้จากผลการทดสอบเสาเข็ม 9 ต้นที่มีอยู่นี้ โดยในการศึกษาเปรียบเทียบจัดแบ่งตามวิธีดังนี้

5.2.1 วิธีหน่วยแรงรวม

วิธีการใช้หน่วยแรงรวมได้นำงานวิจัยของนักวิจัยที่สำคัญมาศึกษาเปรียบเทียบ การประมาณค่าแรงเสียดทานผิวเทียบกับค่าที่วัดได้จากข้อมูลเสาเข็ม 9 ต้น ได้แก่ Peck (1958), Tomlinson (1994), McCarthy (1988) และ Bowles (1997) ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 5.3

จากการวิเคราะห์เชิงสถิติได้ใช้รูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์วิเคราะห์ 2 แบบ โดยสมการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Line) ได้แก่ สมการถดถอยเชิงเส้นที่ผ่านจุดกำเนิดจัดให้อยู่ในรูปของ $y = ax$ และสมการถดถอยเชิงเส้นที่มีระยะตัดแกนจัดให้อยู่ในรูปของ $y = ax + b$ โดยที่ x คือ ตัวแปรอิสระ (แรงเสียดทานผิวที่ได้จากการทำนายโดยนักวิจัยต่างๆ) y คือ ตัวแปรตาม (แรงเสียดทานผิวที่วัดได้) b คือ ระยะตัดแกน และสรุปผลการวิเคราะห์เชิงสถิติโดยวิธีหน่วยแรงรวมแสดงดังในตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างแรงเสียดทานผิวจากผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกเสาเข็ม กับ การทำนายโดยการใช้วิธีหน่วยแรงรวม โดยนักวิจัยต่างๆ

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการวิเคราะห์เชิงสถิติโดยวิธีหน่วยแรงรวม

วิธี	y = ax			y = ax + b			
	a	R^2	σ	a	b	R^2	σ
Tomlinson	1.21	0.38	41.81	1.04	17.25	0.39	44.24
Bowles	0.77	0.75	26.62	0.81	-6.91	0.75	28.32
Peck	1.08	0.77	25.43	1.23	-18.08	0.78	26.33
McCarthy	1.44	0.78	25.05	1.74	-25.40	0.80	25.17

จากผลการวิเคราะห์โดยสถิติสรุปได้ว่า

วิธีของ Tomlinson (1994) ค่า a มีค่าสูงกว่า 1 แสดงถึง แสดงว่าการประมาณค่าแรงเสียดทานผิวได้ค่าที่มีแนวโน้มต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริง มีค่า R^2 ค่อนข้างต่ำและค่าคาดเคลื่อนของแรงเสียดทานผิว 41-44 ตัน ค่อนข้างสูงมากจึงไม่เหมาะกับการนำมาประมาณค่าแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มตอกในเชียงใหม่ พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่ของ Tomlinson จะรวบรวมมาจากผลการทดสอบเสาเข็มเหล็กปลายปิด ที่ตอกในดินเหนียวแข็งซึ่งมีค่า กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่มีการระบายน้ำ จากผลการทดสอบการรับแรงอัดแบบไม่มีขอบเขตจำกัด อยู่ในช่วง 10 ถึง 14 ตัน/ตร.ม. ในขณะที่การวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลจากผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มคอนกรีตทั้งหมด

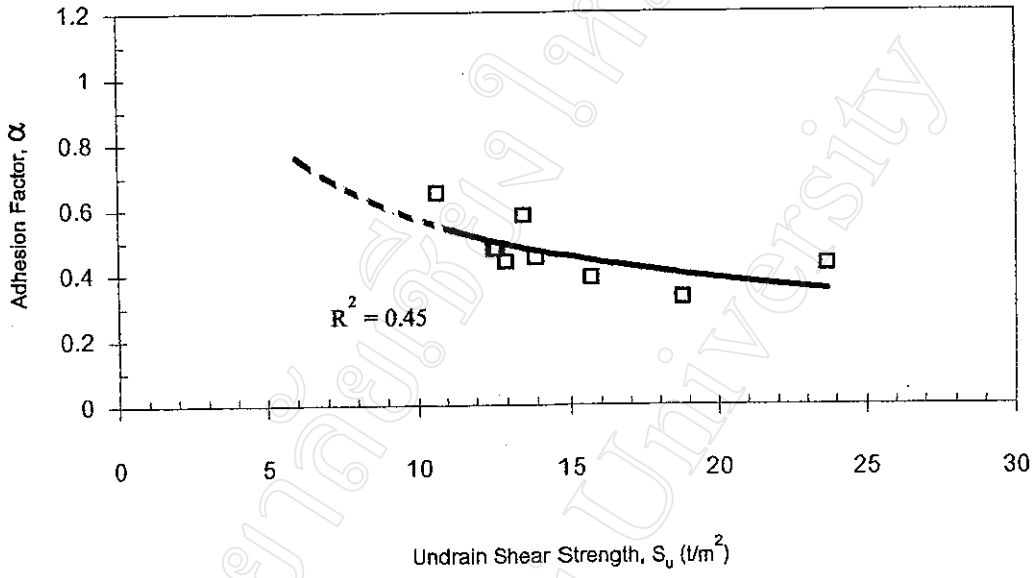
วิธีของ Bowles (1997) ค่า a ต่ำกว่า 1 มาก แสดงว่าให้ค่าการประมาณสูงกว่าค่าที่วัดได้จริงในสนาม ค่า R^2 เท่ากับ 0.75 อยู่ในเกณฑ์ดีในการประมาณ ซึ่งแสดงว่าการประมาณค่าได้ดีกว่าวิธีของ Tomlinson และมีค่าความคาดเคลื่อนประมาณ 26-28 ตัน

วิธีของ Peck (1958) พบว่า a มีค่าใกล้ 1 แสดงว่าในการประมาณค่าให้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ และมีค่า R^2 ค่อนข้างสูง มีค่าคาดเคลื่อนของแรงเสียดทานประมาณ 25-26 ตัน โดยรวมจัดว่าการประมาณอยู่ในระดับดี

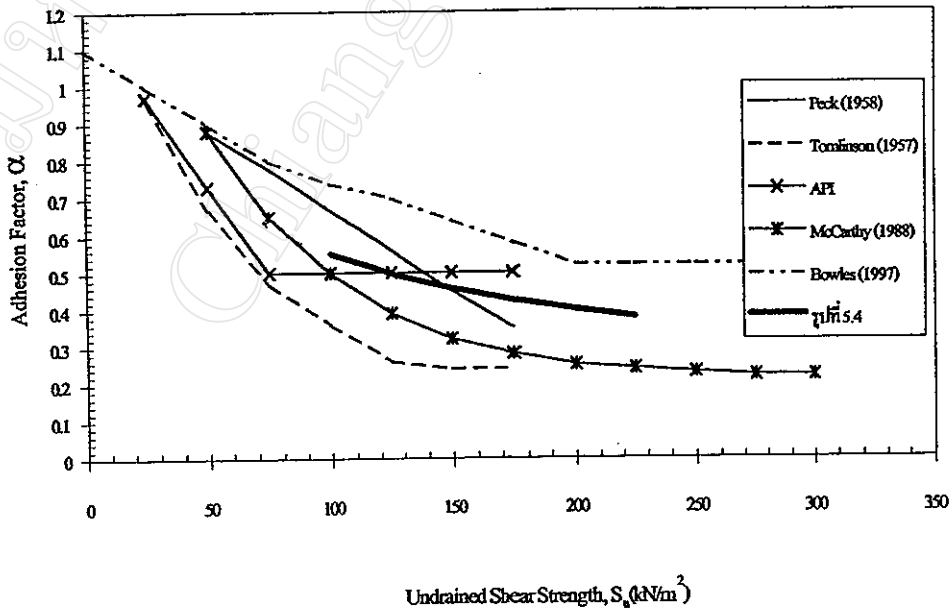
วิธีของ McCarthy (1988) ค่า a สูงกว่า 1 มาก แสดงว่าการประมาณค่ามีแนวโน้มได้ค่าที่ต่ำกว่าค่าที่วัดได้ในสนามค่อนข้างสูง ดังนั้นแรงเสียดทานผิวที่ประเมินหาได้ค่อนข้างจะปลอดภัย และค่า R^2 กับค่าความคาดเคลื่อนของแรงเสียดทานค่าใกล้เคียงกับวิธีของ Peck (1958) ซึ่งจัดว่าการประมาณอยู่ในระดับค่อนข้างดี

โดยสรุปแล้วงานวิจัยที่ใช้วิธีหน่วยแรงรวม โดย Peck (1958) ใช้ได้ค่อนข้างดี สำหรับดินเหนียวแข็งเชียงใหม่ ทั้งนี้จากการนำค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ กับ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ที่ประเมินได้จากผลการทดสอบเสาเข็มทั้ง 9 ต้น ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ ได้กราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 5.4 และพบว่าลักษณะกราฟความสัมพันธ์ที่ได้มีแนวโน้ม (โดยใช้ Regression Line) ที่ใกล้เคียงกับ กราฟความสัมพันธ์ของ Peck (1958) ดังรูปที่ 5.5 คล้ายกับชั้นดินเหนียวแข็งกรุงเทพที่ลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับ Peck (1958) (Sambhandharaksa and Pitupakorn, 1988) และจากการใช้กราฟในรูปที่ 5.4 ประเมินหาแรงเสียดทานผิวจากข้อมูลเสาเข็ม 9 ต้นที่มีอยู่ข้างต้นพบว่าให้ค่าการประมาณได้ดี โดยมีค่าทางสถิติแสดงดังตารางที่ 5.3 กล่าวคือ ให้ค่า a จากรูปแบบสมการทางสถิติ แบบผ่านจุดกำเนิด ใกล้เคียง 1 (1.1) ค่า R^2 ของทั้ง 2 สมการมีค่า 0.80 และ 0.83 ในสมการแรกและสมการที่สอง ตามลำดับ แรงเสียดทานผิวที่ประมาณได้มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 23 ตัน จัดว่าการประมาณโดยกราฟที่ได้นี้อยู่ในระดับดี และรูปที่ 5.6

แสดงการเปรียบเทียบระหว่างแรงเสียดทานผิวที่ประเมินได้จากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 5.4 เทียบกับแรงเสียดทานผิวที่วัดได้จากผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็ม 9 ต้น



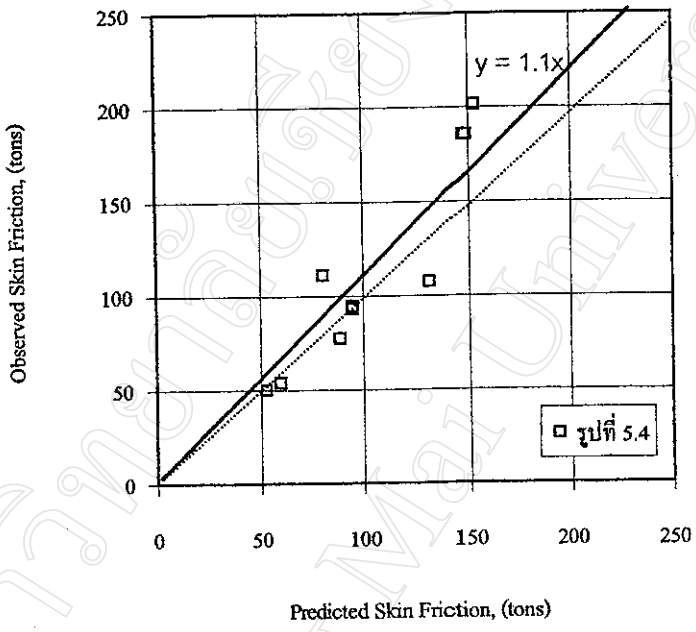
รูปที่ 5.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ กับ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ของดินเหนียวแข็งเชียงใหม่



รูปที่ 5.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ กับ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ : เปรียบเทียบกับนักวิจัยอื่นๆ

ตารางที่ 5.3 แสดงผลการวิเคราะห์เชิงสถิติของวิธีหน่วยแรงรวม จากการประมาณโดยรูปที่ 5.4

วิธี	y = ax			y = ax + b			
	a	R^2	σ	a	b	R^2	σ
รูปที่ 5.4	1.10	0.80	23.51	1.32	-24.86	0.83	23.43

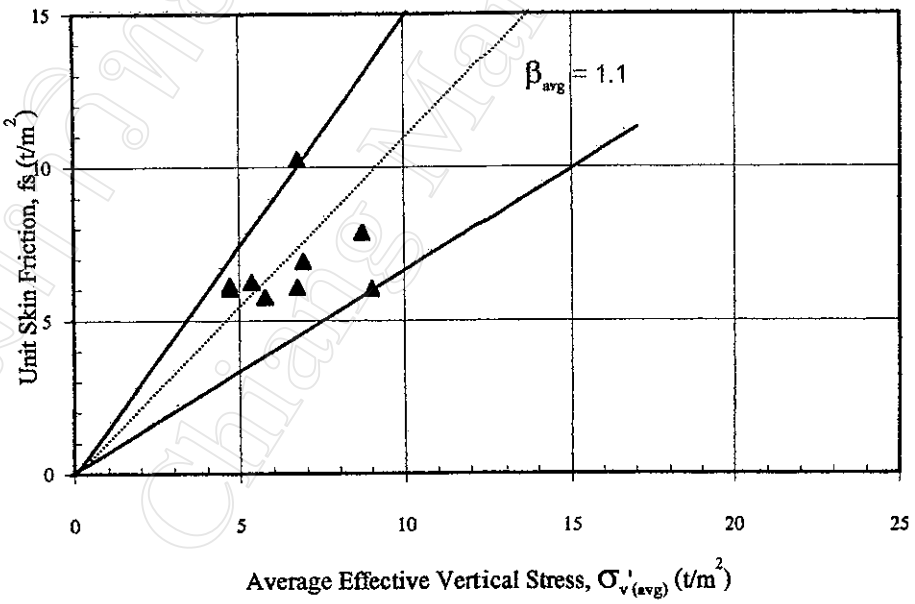


รูปที่ 5.6 แสดงแรงเสียดทานผิวที่ประเมินได้จากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 5.4 เทียบกับที่วัดได้จากผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็ม

5.2.2 วิธีหน่วยแรงประสิทธิผล

ในส่วนนี้ไม่ได้ทำการเปรียบเทียบค่าแรงเสียดทานผิวที่วัดได้กับงานวิจัยทางหน่วยแรงประสิทธิผล เช่น Meyerhof (1976), Flaate and Selnes (1977) เนื่องจากข้อมูลดินมีข้อมูลที่ต้องใช้ในสมการคังกล่าวไม่ครบ เช่น OCR, ϕ' เป็นต้น และการใช้สมการในแต่ละคนยังไม่ได้ให้สมการที่แน่นอนสำหรับใช้กับดินเหนียวแข็ง เช่น Burland (1973) ดังนั้น ผลการศึกษาในส่วนนี้จึงกล่าวเฉพาะการหาตัวแปรทางหน่วยแรงประสิทธิผลเพื่อใช้ในดินเหนียวแข็งเชียงใหม่ และลองใช้ประมาณผลแรงเสียดทานผิวที่วัดได้

สำหรับวิธีหน่วยแรงประสิทธิผลใช้การหาค่าสัมประสิทธิเบต้า (β) เฉลี่ย ตามวิธีการของ Burland (1973) และ Balasubramaniam (1981) พบว่าได้ค่าสัมประสิทธิเบต้า (β) เฉลี่ย เท่ากับ 1.1 วิธีการหาแสดงดังรูปที่ 5.7 และจากการที่ใช้ค่า β เฉลี่ยเท่ากับ 1.1 ประเมินหาแรงเสียดทานผิวจากข้อมอมูล 9 ต้นเทียบกับแรงเสียดทานผิวที่วัดได้ พบว่า สามารถใช้ประมาณค่าไม่ดีเท่ากับวิธีหน่วยแรงรวมที่ใช้สมการความสัมพันธ์จากรูปที่ 5.4 โดยวิธีหน่วยแรงประสิทธิผลมีค่าทางสถิติแสดงในตารางที่ 5.4 โดยจะเห็นว่า วิธีหน่วยแรงประสิทธิผลให้ค่าทางสถิติไม่ดีกว่าวิธีหน่วยแรงรวม โดยการใช้ค่า β เฉลี่ยเท่ากับ 1.1 ให้ค่าคาดเคลื่อนประมาณ 29-30 ตัน R^2 เท่ากับ 0.68 และค่า a มีค่าใกล้ 1 (0.93) เป็นต้น ผลของการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 5.8 พบว่าค่า β สำหรับดินเหนียวแข็งเชียงใหม่มีค่าระหว่าง 0.67-1.52และมีแนวโน้มลดลงที่ระยะความลึกของเสาเข็มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.9 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Meyerhof (1976) ที่พบว่าเสาเข็มตอกสั้นในดินเหนียวแข็ง (ไม่เกิน 50 ฟุต) มีค่า β ระหว่าง 0.5-2.5 ซึ่งจะมีแนวโน้มที่ลดลงตามความลึกเสาเข็ม

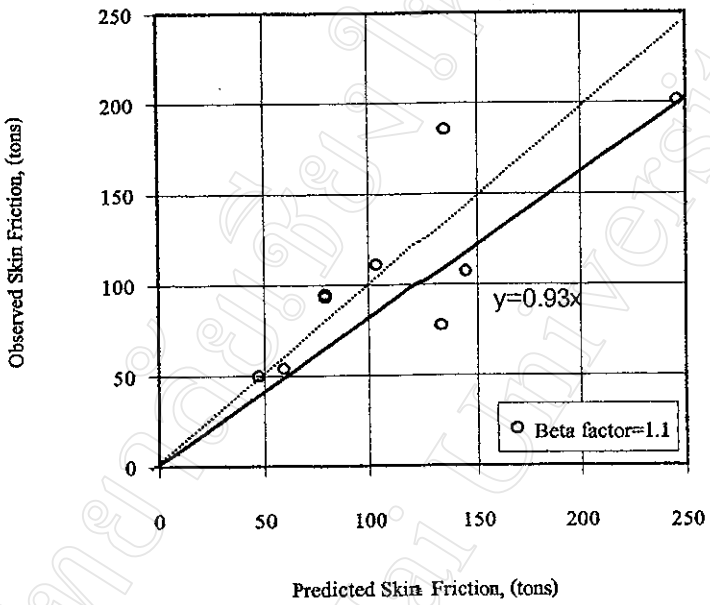


รูปที่ 5.7 แสดงการประเมินหาค่าสัมประสิทธิ์เบต้าเฉลี่ย

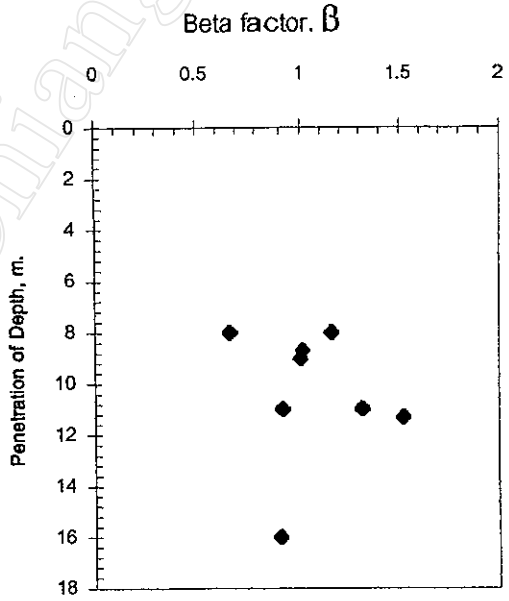
ตารางที่ 5.4 แสดงผลการวิเคราะห์เชิงสถิติของหน่วยแรงประสิทธิผลโดยใช้ β เท่ากับ 1.10

วิธี	y = ax			y = ax + b			
	a	R^2	σ	a	b	R^2	σ
Beta factor (β = 1.10)	0.93	0.68	30	0.76	23.09	0.72	29.88

วิธีการใช้ β เฉลี่ย สามารถใช้ได้ดีกับดินเหนียวอ่อน ซึ่งจะไม่เหมาะกับการนำมาใช้กับดินเหนียวแข็งเนื่องจากยังมีความซับซ้อนพฤติกรรมระหว่างเสาเข็มกับดินรอบเสาเข็ม (Burland (1973), Balasubramaniam (1981))



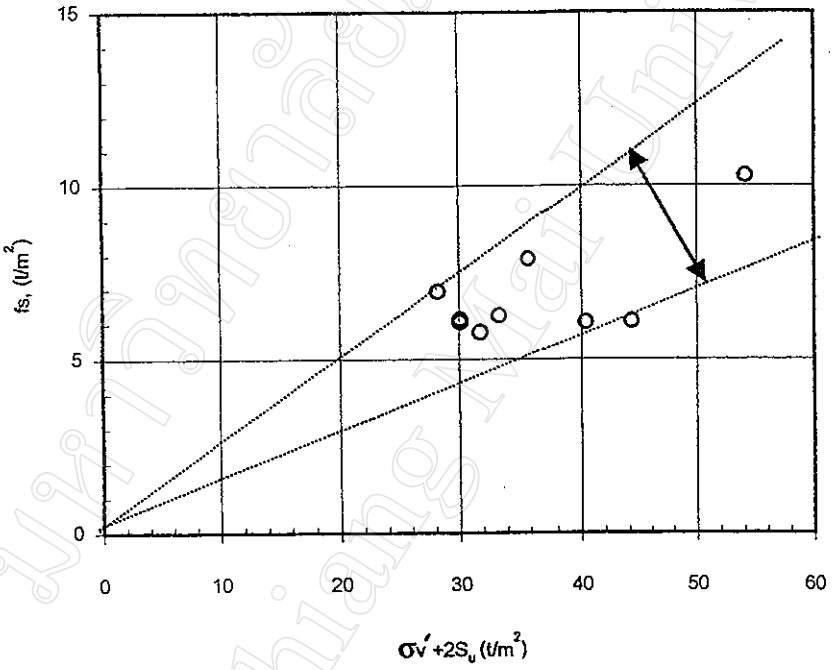
รูปที่ 5.8 แสดงการเปรียบเทียบแรงเสียดทานผิวจากการสำรวจ กับ การทำนายโดย β เฉลี่ย = 1.1



รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิเบต้า กับ ความยาวเสาเข็มที่ฝังในดินเหนียว

5.2.3 วิธีหน่วยแรงรวมร่วมกับหน่วยแรงประสิทธิผล

งานวิจัยที่นำมาศึกษาเปรียบเทียบ ได้แก่ Vijakverjiya and Focht (1972) ที่เสนอสมการความสัมพันธ์ที่มีทั้งค่า กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเฉลี่ย และ หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งเฉลี่ย ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่าสมการของ Vijakverjiya and Focht (1972) มีการกระจายค่าหน่วยแรงเสียดทานผิวค่อนข้างสูง ดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.10 และเมื่อใช้สมการนี้ประมาณค่าแรงเสียดทานผิวเทียบกับแรงเสียดทานผิวที่วัดได้ พบว่าแรงเสียดทานผิวมีค่าสูงกว่าที่วัดได้จริงในสนาม ดังแสดงดังรูปที่ 5.11 ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติแสดงดังตารางที่ 5.5 โดยมีค่า a น้อยกว่า 1 ค่า R^2 ต่ำ ค่าคาด



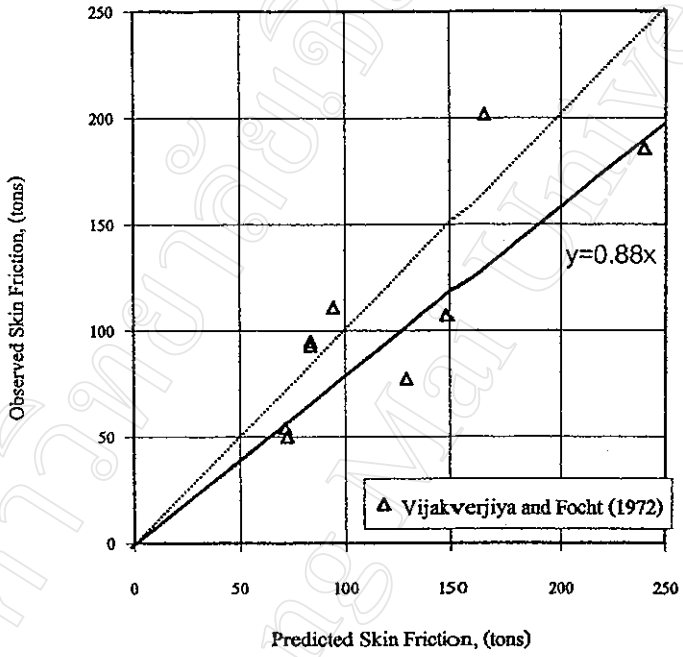
รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิว กับ กำลังรับน้ำหนักแบบไม่มีการระบายน้ำเฉลี่ย ร่วมกับ หน่วยแรงสุทธิในแนวดิ่งเฉลี่ย

เคลื่อนการประมาณประมาณ 30-31 ตัน ทั้งนี้งานวิจัยของ Vijakverjiya and Focht (1972) รวบรวมจากผลการทดสอบเสาเข็มยาว และลักษณะของดินจัดเป็น Marine Clay ทั้งนี้การสมมุติให้ดินอยู่ในสภาวะ Passive ซึ่งอาจจะมากเกินไปทำให้แรงเสียดทานที่ประมาณได้มีค่ามากว่าความเป็นจริงมาก ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ สมการหน่วยแรงรวมร่วมหน่วยแรงประสิทธิผลที่ใช้สมการ

$fs = \lambda (\sigma_v' + 2S_u)$

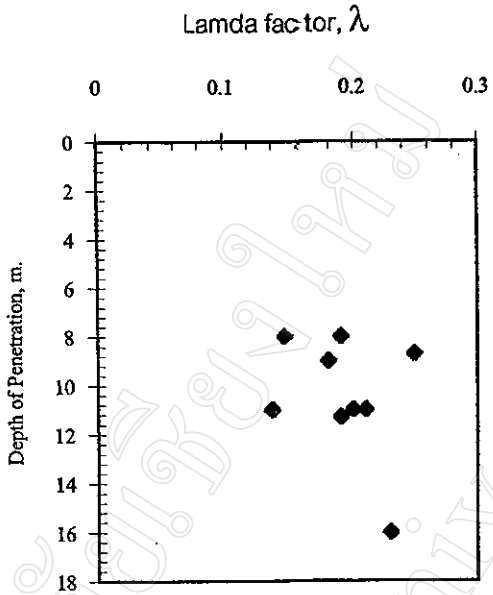
ตารางที่ 5.5 แสดงผลการวิเคราะห์เชิงสถิติของวิธีหน่วยแรงรวมร่วมกับหน่วยแรงประสิทธิผล

วิธี	y = ax			y = ax + b			
	a	R^2	σ	a	b	R^2	σ
Vijakverjiya and Focht	0.88	0.67	31.02	0.77	14.93	0.67	32.46

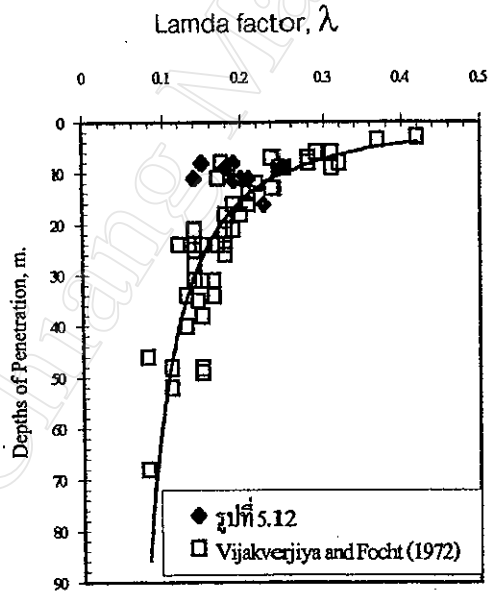


รูปที่ 5.11 แสดงการเปรียบเทียบแรงเสียดทานผิวประเมินจริง กับ ที่คาดคะเนโดยสมการ Vijakverjiya and Focht (1972)

นอกจากนี้ในการวิจัยยังพบว่าค่าสัมประสิทธิแลมด้า (λ) มีค่าระหว่าง 0.14-0.25 และพบว่า ไม่มีความสัมพันธ์กับระยะของความยาวเสาเข็มที่ฝังในดิน โดยความสัมพันธ์มีการกระจายข้อมูลสูงดังแสดงในรูปที่ 5.12 และรูปที่ 5.13 แสดงค่าสัมประสิทธิแลมด้าเทียบกับงานวิจัยของ Vijakverjiya and Focht (1972) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงข้อมูลของ Vijakverjiya and Focht (1972) พอสมควร แต่ก็ยังหาความสัมพันธ์ไม่ได้



รูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิแลมด้า (λ) กับ ระยะความยาวที่เสาเข็มฝังในดิน (ดินเหนียวแข็งเชียงใหม่)



รูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แลมด้า (λ) กับ ระยะความยาวที่เสาเข็มฝังในดิน (เทียบกับข้อมูลของ Vijakverjiya and Focht (1972))

5.2.4 การวิจารณ์ผลการวิเคราะห์

จากผลการศึกษาเรื่องแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มตอกในดินเหนียวแข็งเชียงใหม่ ในส่วนแรกของการศึกษาวิจัย โดยใช้ผลการทดสอบเสาเข็มตอกในดินเหนียวแข็งเชียงใหม่ พบว่า วิธีการในการประเมินหาค่าหน่วยแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มตอก วิธีแบบการใช้หน่วยแรงรวม ใช้ประมาณค่าหน่วยแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มในดินเหนียวแข็งได้ดีกว่าวิธีการใช้หน่วยแรงประสิทธิผลและวิธีการใช้หน่วยแรงรวมร่วมกับหน่วยแรงประสิทธิผลซึ่งวิธีการหลังนี้จะให้ค่าการประมาณค่อนข้างสูงกว่าค่าที่วัดได้ สำหรับวิธีหน่วยแรงรวมมีบางสมการที่ให้ค่าการประมาณสูง เช่น Bowles (1997) นอกจากนี้ Tomlinson (1994) ให้ค่า R^2 ค่อนข้างต่ำ ถ้าเทียบกับในวิธีเดียวกัน

สำหรับวิธีการใช้หน่วยแรงรวม ที่อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่า สัมประสิทธิ์การยึดเกาะ กับ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (จากการทดสอบ Unconfined Compressive Test) ในการคาดคะเนแรงเสียดทานผิว ในกรณีดินเหนียวแข็งเชียงใหม่พบว่าจะสอดคล้องกับกราฟที่เสนอโดย Peck (1958) กราฟที่ได้จากผลการทดสอบเสาเข็ม (รูปที่ 5.4) นี้สามารถนำมาใช้กับดินเหนียวแข็งเชียงใหม่ได้ดี สำหรับค่า สัมประสิทธิ์การยึดเกาะ (Adhesion Factor) ของดินเหนียวแข็งเชียงใหม่ มีค่าระหว่าง 0.33-0.65

สำหรับวิธีการใช้หน่วยแรงประสิทธิผล ที่อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่า สัมประสิทธิเบต้า กับ ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งเฉลี่ยของดิน สามารถนำมาใช้กับดินเหนียวแข็งเชียงใหม่ได้ และค่า β เฉลี่ยเท่ากับ 1.1 สามารถใช้ได้กับการทำนายแรงเสียดทานผิว แต่ไม่ดีเท่ากับการใช้วิธีหน่วยแรงรวม

ดังนั้นแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มตอกในดินเหนียวแข็งเชียงใหม่สามารถที่จะคาดคะเนได้ทั้งวิธีหน่วยแรงรวม และวิธีหน่วยแรงประสิทธิผล โดยใช้กราฟความสัมพันธ์ที่ได้ในการคาดคะเนสำหรับดินเหนียวแข็งเชียงใหม่ วิธีหน่วยแรงรวมยังคงใช้ได้ดี ซึ่งดีกว่าวิธีหน่วยแรงประสิทธิผลและวิธีหน่วยแรงรวมร่วมกับหน่วยแรงประสิทธิผล

5.3 ผลการทดสอบตัวอย่างดินในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์

5.3.1 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวแข็งในบริเวณที่ทำการทดสอบเสาเข็ม

คุณสมบัติทางดัชนีของดินเหนียวแข็งที่ทำการทดสอบแสดงดังตารางที่ ข.1 (ภาคผนวก ข) โดยสรุปลักษณะชั้นดินที่จะทำการทดสอบเสาเข็ม แสดงในรูปที่ ข.3 (ภาคผนวก ข) ซึ่งจากระดับผิวดินประกอบด้วย ชั้นดินถมมีความหนาประมาณ 0.50-1.00 เมตร ชั้นดินเดิมหนาประมาณ 0.80-1.00 เมตร มีความหนาแน่น 1.979 ตัน/ตร.ม. ที่ระดับความลึก 2.00-5.00 เป็นชั้นดินเหนียวแข็ง พบว่ามีค่าพิกัดพลาสติกอยู่ระหว่าง 14-20 เปอร์เซ็นต์ ความชื้นในมวลดิน 14-19

เปอร์เซ็นต์ หน่วยน้ำหนักดิน 2.04-2.17 ตัน/ตร.ม. ค่ากำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบ Unconfined Compressive Strengths มีค่าระหว่าง 15-20 ตัน/ตร.ม. OCR ประมาณ 7 และพบชั้นดินทรายที่ระดับ 5.00 เมตร และได้สรุปคุณสมบัติของดินเหนียวแข็งที่ทำการทดสอบแสดงดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 แสดงคุณสมบัติของตัวอย่างดินทางวิศวกรรม

คุณสมบัติ	ค่าเฉลี่ย
Natural Water Content, w (%)	16.64
Liquid Limit, LL (%)	39.63
Plastic Limit, PL (%)	17.78
Plasticity Index, I_p (%)	21.80
Sand (%)	28.45
Clay + Silt (%)	71.55
Specific Gravity, G_s	2.71
Bulk Density (ton/m^2)	2.14
Dry Density (ton/m^2)	1.83
Natural Void Ratio, e_o	0.543
Maximum Past Pressure, p_c' (ton/m^2)	28
OCR	7

5.3.2 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดิน (One-Dimensional Consolidation Test)

ผลจากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวแข็งเชียงใหม่ด้วยเครื่อง Lever Arm Oedometer แสดงดังตารางที่ 5.7 พบว่า OCR มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7

ตารางที่ 5.7 แสดงผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดิน (One-Dimension Consolidation Test)

หมายเลขตัวอย่าง	หลุมทดสอบที่	ระดับความลึก (ม.)	หน่วยแรงกดทับประสิทธิผล (ตัน/ตร.ม.)	p_c' (ตัน/ตร.ม.)	OCR
CON-1	BH 1	2.90-2.95	4.02	30	7.5
CON-2	BH 5	2.95-3.00	4.08	32	7.8
CON-3	BH 5	3.00-3.05	4.13	22	5.3

5.3.3 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test)

5.3.3.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงแบบไม่ระบายน้ำของตัวอย่างดิน

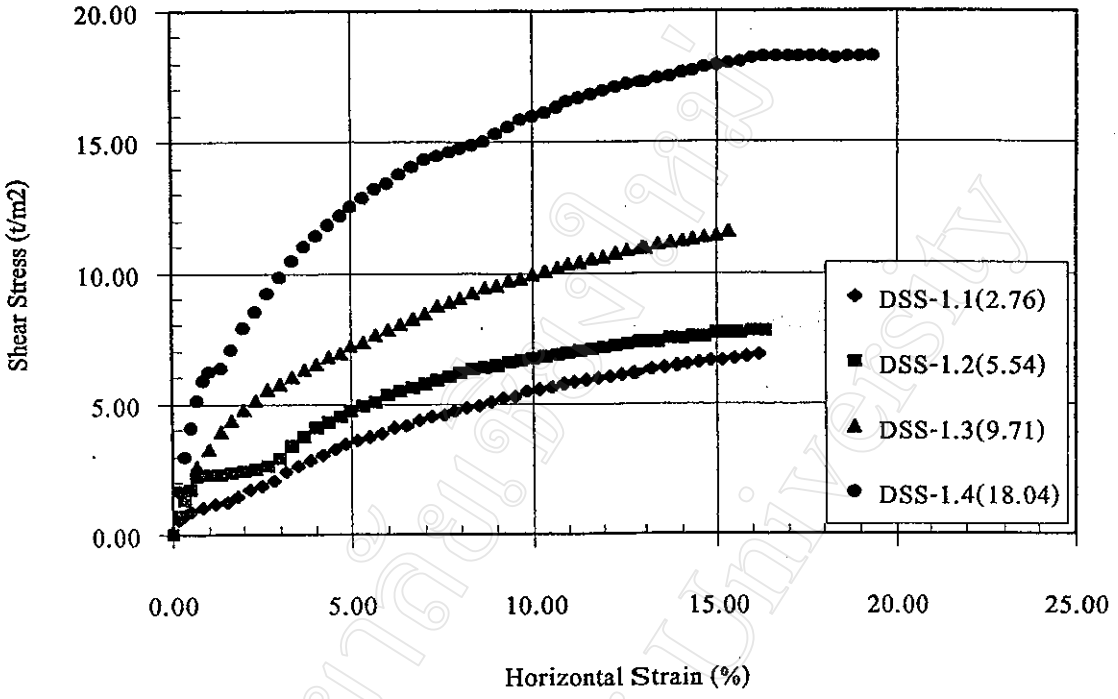
ก. พฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียด

จากผลการทดลองการเฉือนของดินเหนียวแข็งทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ซึ่งทำการตัดตัวอย่างเอียงทำมุม 90 องศา กับแนวราบที่ค่าหน่วยแรงตั้งฉาก (Normal Stress) ต่างๆกันพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่แสดงออกมาในรูปของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strengths) กับความเครียดที่เสนอในรูปของระยะการเคลื่อนของตัวอย่างทดสอบของทั้ง 4 ตัวอย่างมีลักษณะคล้ายกันกล่าวคือ ลักษณะของเส้นกราฟจะเป็นเส้นตรงที่ช่วงความเครียดต่ำ (ประมาณ 0-6 มม.) และที่ความเครียดสูงเส้นกราฟจะมีลักษณะปลายเริ่มโค้งแต่ไม่แสดงจุดสูงสุดของกราฟให้เห็นชัดเจน (สำหรับตัวอย่าง DSS-2.1 DSS-2.2 มีจุดสูงสุดให้เห็น) ดังนั้นในการเลือกหน่วยแรงเฉือนสูงสุดจะใช้ที่เปอร์เซ็นต์ความเครียดที่ 15 เปอร์เซ็นต์ โดยมีระยะการเคลื่อนที่ เท่ากับ 9 มม. ดังแสดงในรูปที่ 5.14 และ รูปที่ 5.16 และสรุปผลการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 5.6 และตารางที่ 5.7

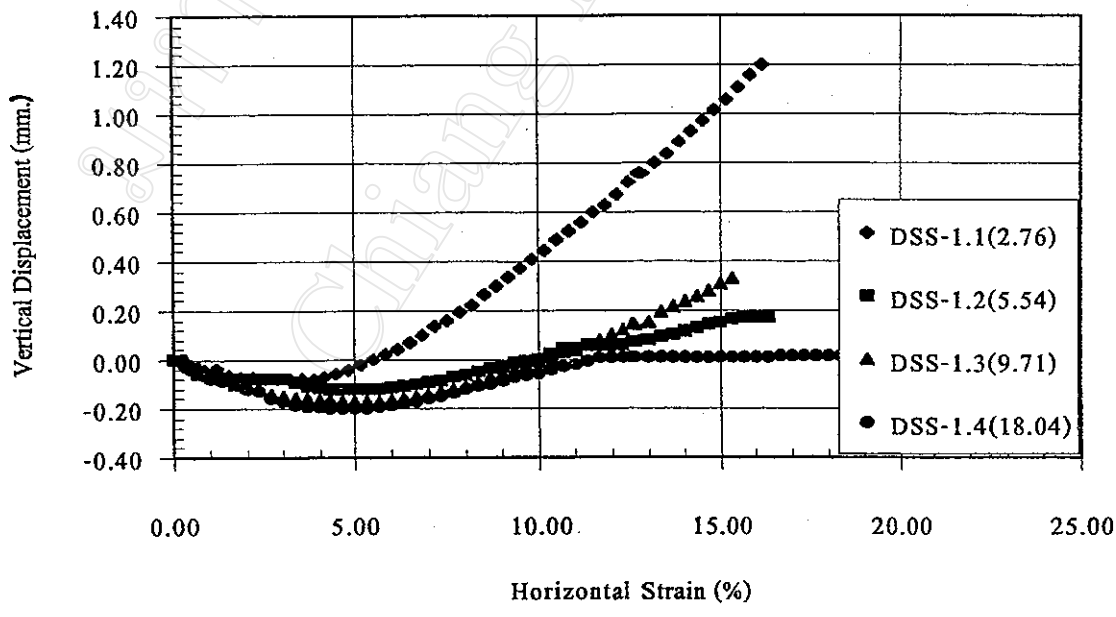
ข. พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงในแนวดิ่ง

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงในแนวดิ่งของตัวอย่างดิน กับ ความเครียด พบว่าสำหรับตัวอย่างที่มีหน่วยแรงตั้งฉากต่ำ (DSS-1.1 DSS-2.1 เท่ากับ 2.76 ตัน/ตร.ม.) ดินจะมีการอัดตัวลงก่อนหลังจากนั้นจะบวมตัวขึ้นเรื่อยๆ ที่ระยะความเครียดประมาณ 2-3 มม. ส่วนดินที่มีค่าหน่วยแรงตั้งฉากสูงกว่า หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง ดินจะมีการอัดตัวเพียงอย่างเดียวช่วงแรกจะมีการอัดตัวมาก หลังจากนั้นจะค่อนข้างคงที่ ไม่มีการบวมตัวเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.15 และรูปที่ 5.17

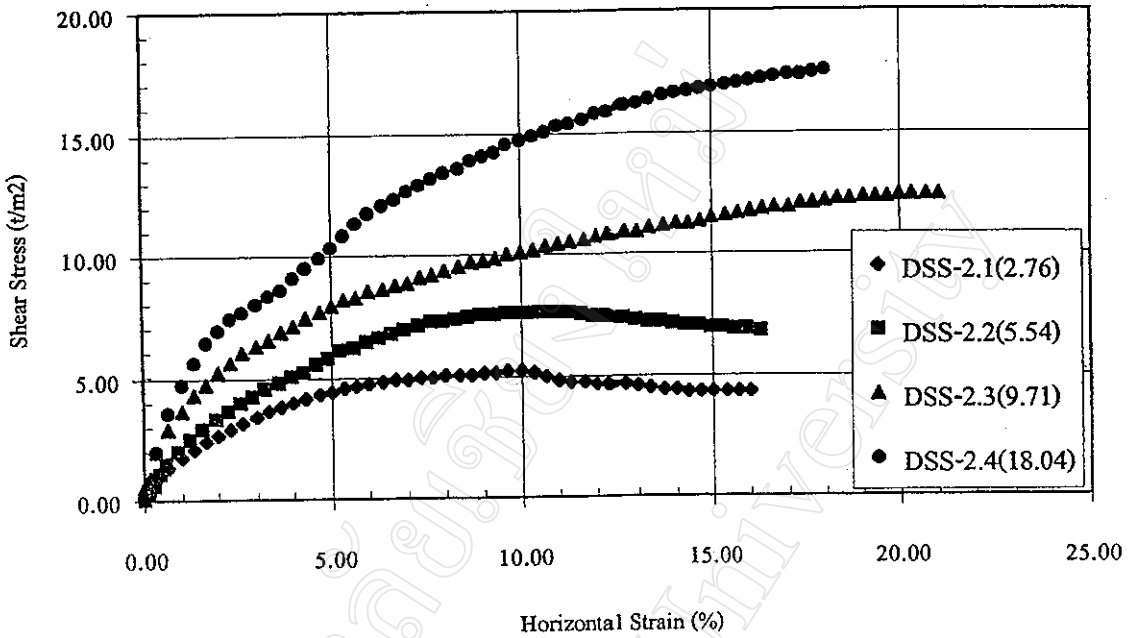
เมื่อนำค่าหน่วยแรงเฉือน กับ หน่วยแรงตั้งฉากไปพล็อตหาค่า c และ ϕ ที่ระดับความลึก 2.4-3.0 ม. พบว่ามีค่า c เท่ากับ 3.97 ตัน/ตร.ม. ค่ามุม ϕ มีค่าเท่ากับ 37.6 องศา ส่วนที่ระดับความลึก 3.0-3.6 ม. มีค่า c เท่ากับ 3.42 ตัน/ตร.ม. ค่ามุม ϕ มีค่าเท่ากับ 37.3 องศา



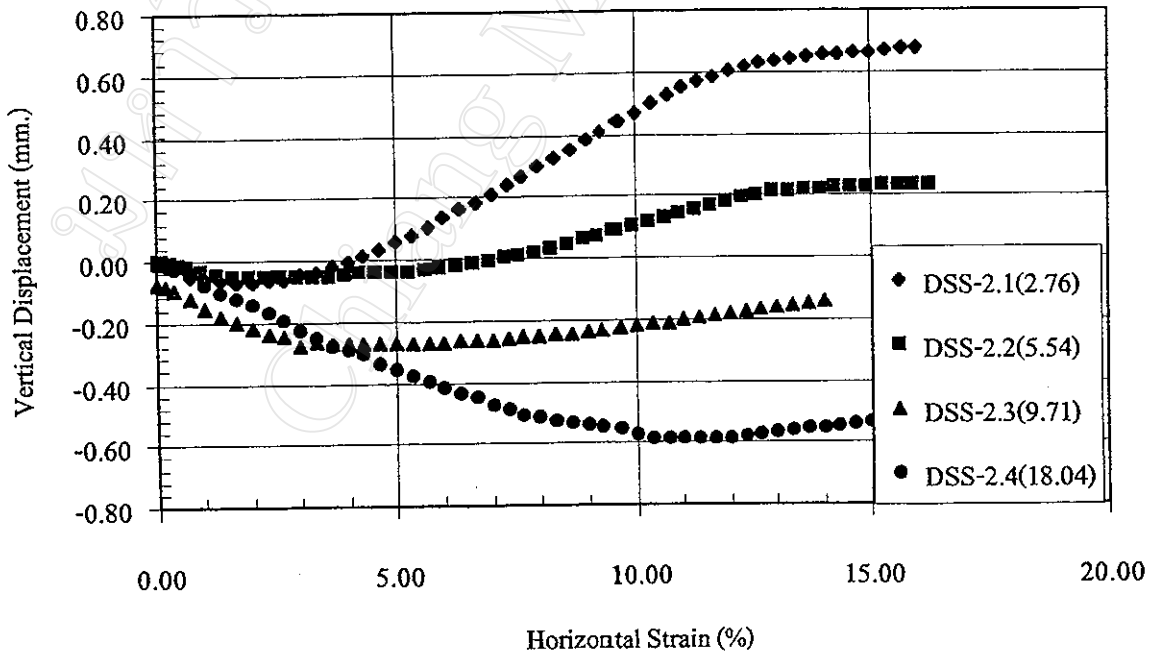
รูปที่ 5.14 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง Shear Stress กับ Horizontal Strain จากการทดลองการเฉือน ตรงตัวอย่างดิน ที่ระดับความลึก 2.40-3.00 เมตร



รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงในแนวดิ่งของดินตัวอย่างกับความเครียด จากการทดสอบการเฉือนตรง ที่ระดับความลึก 2.40-3.00 เมตร



รูปที่ 5.16 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง Shear Stress กับ Horizontal Strain จากการทดลองการเฉือน ตรงตัวอย่างดิน ที่ระดับความลึก 3.00-3.60 เมตร



รูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงในแนวดิ่งของดินตัวอย่างกับความเครียด จากการทดสอบการเฉือนตรง ที่ระดับความลึก 3.00-3.60 เมตร

5.3.3.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรงแบบไม่ระบายน้ำระหว่าง ดิน กับคอนกรีตผิวเรียบ

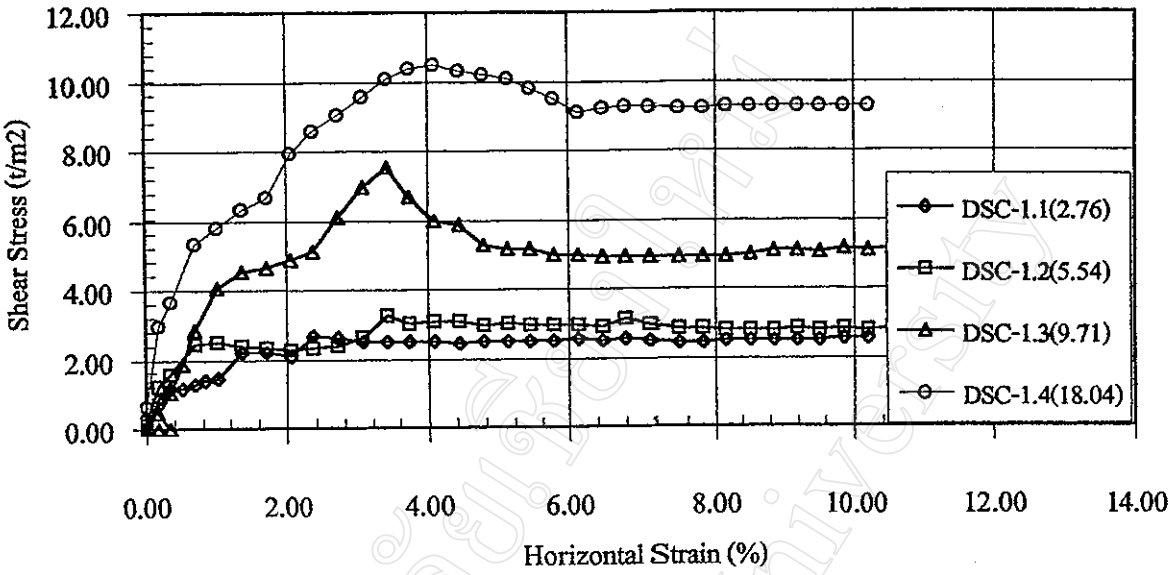
ก. พฤติกรรมหน่วยแรงและความเครียด

ผลการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงที่แสดงออกมาในรูปของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strengths) กับความเครียดที่เสนอในรูปของระยะการเคลื่อนของตัวอย่างทดสอบ (Displacement) ของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5.18 และ รูปที่ 5.20 พบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะเปลี่ยนแปลงขึ้นลงไม่ราบเรียบในช่วงความเครียดต่ำ (1-2 มม.) และจะเริ่มคงที่เมื่อความเครียดมากๆ (มากกว่า 5 % Strain) การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะพบมากสำหรับกรณีที่ตัวอย่างทดสอบมีหน่วยแรงตั้งฉากต่ำ เช่น ตัวอย่าง DSC-1.1 และ DSC-2.1 เป็นต้น ค่าความเครียดเมื่อกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดมีค่าระหว่าง 2-4 มม. ซึ่งจากรูปทั้ง 2 นี้แสดงให้เห็นว่าที่ค่าหน่วยแรงตั้งฉากต่ำลักษณะกราฟจะมีไม่คงที่สาเหตุอาจเนื่องมาจากตัวอย่างดินจัดเป็นดินเหนียวประเภท overconsolidate การให้หน่วยแรงตั้งฉากกระทำที่มีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่ดินนั้นเคยรับมาก่อนทำให้ตัวอย่างดินมีลักษณะพยามพองตัวดังนั้นพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวอย่างดินกับตัวอย่างคอนกรีตจะมีช่องว่างอยู่มากทำให้กราฟความสัมพันธ์มีลักษณะไม่คงที่ แต่เมื่อหน่วยแรงตั้งฉากมากขึ้นอย่างเช่นตัวอย่าง DSC-1.4 กับ DSC2.4 ลักษณะกราฟค่อนข้างเป็นไปอย่างราบเรียบแสดงให้เห็นว่ามีการสัมผัสระหว่างตัวอย่างดินกับตัวอย่างค่อนข้างดี

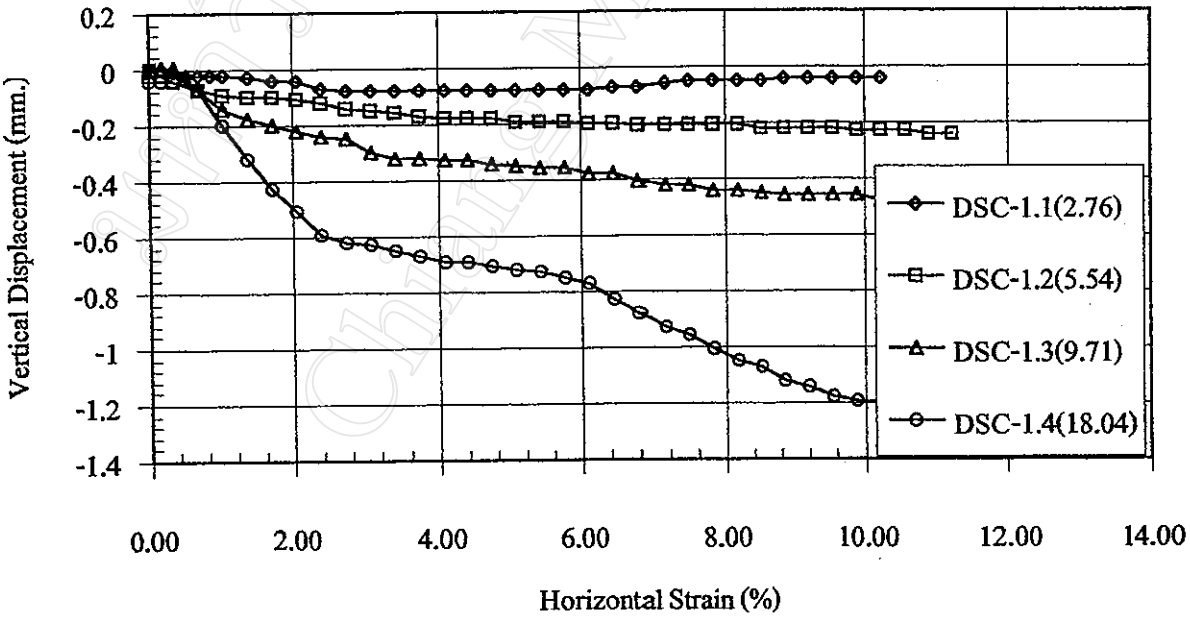
ข. พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงในแนวดิ่งของตัวอย่างทดสอบ

การเปลี่ยนแปลงในแนวดิ่งที่หน่วยแรงประสิทธิผลต่ำดังแสดงดังรูปที่ 5.19 และรูปที่ 5.21 ตัวอย่างทดสอบจะมีการอัดตัวที่ความเครียดต่ำ (1-3 มม.) และที่ความเครียดมากขึ้นตัวอย่างทดสอบจะมีการอัดตัวมากกว่าที่หน่วยแรงประสิทธิผลต่ำและเมื่อผ่านช่วง 5 % ของเปอร์เซ็นต์ความเครียด ไปแล้วจะค่อนข้างคงที่ สรุปผลการทดลองเฉือนตรงทั้งตัวอย่างดินและตัวอย่างดินกับตัวอย่างคอนกรีตผิวเรียบแสดงในตารางที่ 5.8 และตารางที่ 5.9

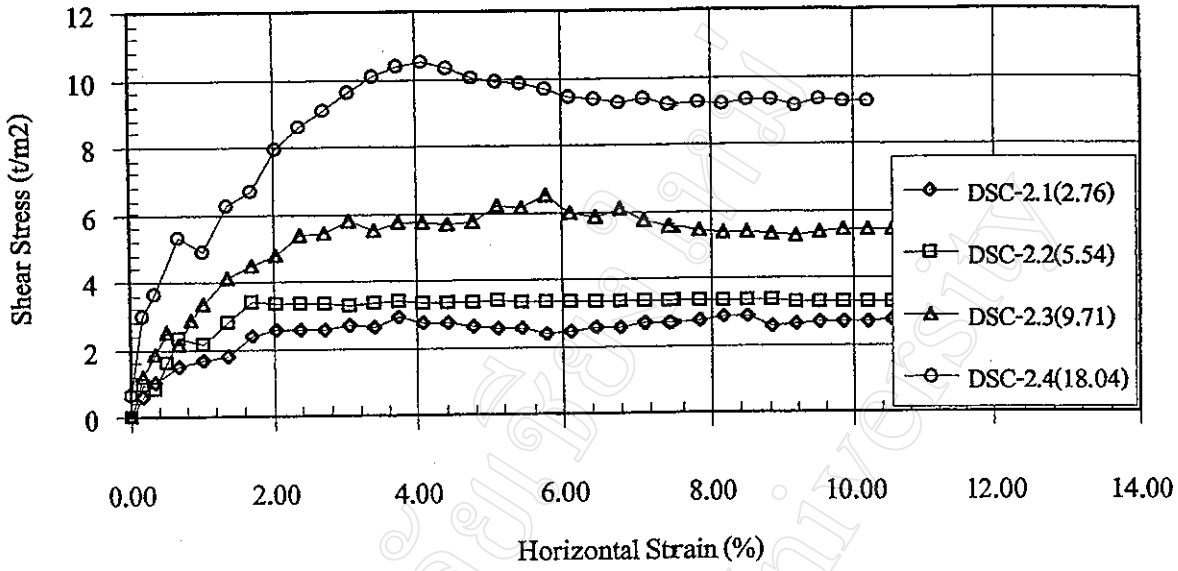
ผลการทดสอบหาค่า c_a และ δ ระหว่างตัวอย่างดินกับตัวอย่างคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 5.22 และรูปที่ 5.23 ซึ่งแสดงเส้นขอบเขตการวิบัติ (Failure Envelope) ของการเฉือนตรงระหว่างตัวอย่างดิน และ ระหว่างตัวอย่างดินกับตัวอย่างคอนกรีตผิวเรียบ ที่ความลึก 2.4-3.6 เมตร พบว่าลักษณะของเส้นขอบเขตการวิบัติของการเฉือนตัวอย่างดินมีลักษณะคล้ายกันกับเส้นขอบเขตการวิบัติของการเฉือนระหว่างตัวอย่างดินกับตัวอย่างคอนกรีต กล่าวคือมีแนวโน้มค่ากำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่อหน่วยแรงตั้งฉากสูงขึ้นและลักษณะกราฟค่อนข้างชัน ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ Potyondy (1961) ที่พบว่าลักษณะดินเหนียวปนทรายเมื่อหน่วยแรงกระทำในแนวดิ่งเพิ่มมาก



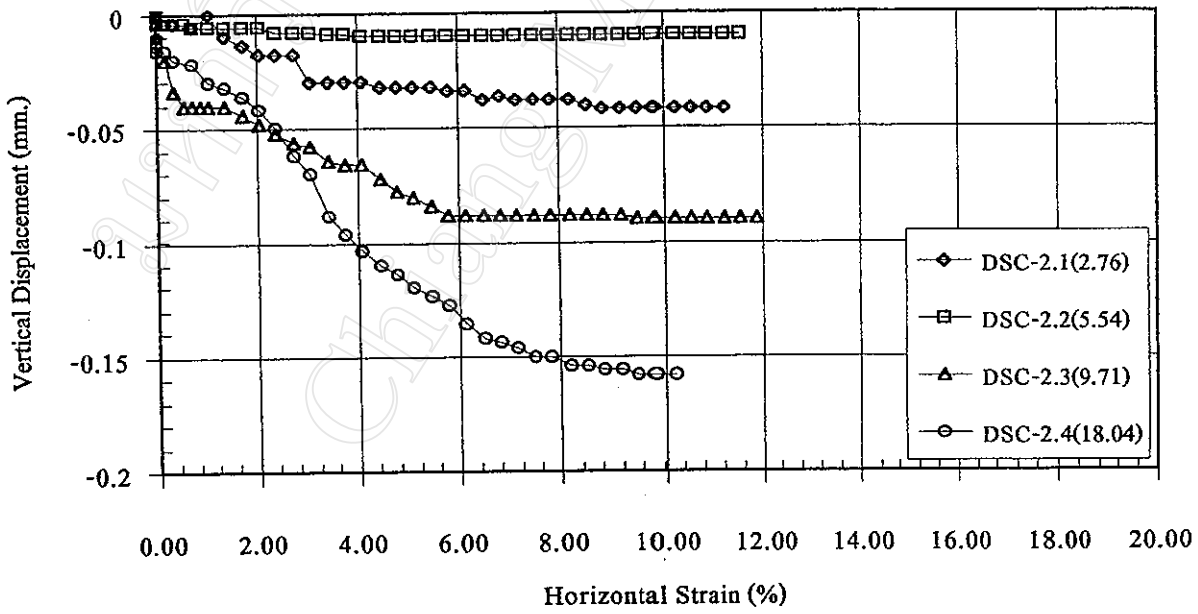
รูปที่ 5.18 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง Shear Stress กับ Horizontal Strain จากการทดสอบการเฉือนตรง ระหว่างตัวอย่างดินกับตัวอย่างคอนกรีต ที่ระดับความลึก 2.40-3.00 เมตร



รูปที่ 5.19 แสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงในแนวดิ่งของดินตัวอย่างกับความเครียด จากการทดลองการเฉือน ตรง ระหว่างตัวอย่างดินกับตัวอย่างคอนกรีต ที่ระดับความลึก 2.40-3.00 เมตร



รูปที่ 5.20 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง Shear Stress กับ Horizontal Strain จากการทดลองการเฉือน ตรง ระหว่างตัวอย่างดินกับตัวอย่างคอนกรีต ที่ระดับความลึก 3.00-3.60 เมตร



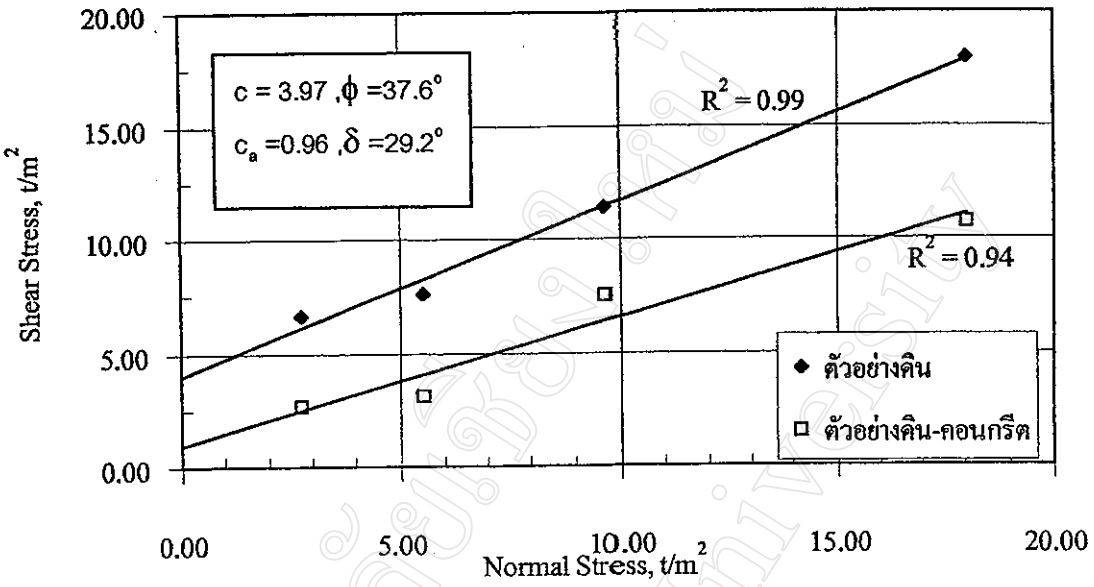
รูปที่ 5.21 แสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงในแนวดิ่งของดินตัวอย่างกับความเครียด จากการทดสอบการเฉือนตรง ระหว่างตัวอย่างดินกับตัวอย่างคอนกรีต ที่ระดับความลึก 3.00-3.60 เมตร

ตารางที่ 5.8 แสดงผลการทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนโดยตรงแบบไม่ระบายน้ำ (Direct Shear Test) ระดับความลึก 2.40-3.00 เมตร

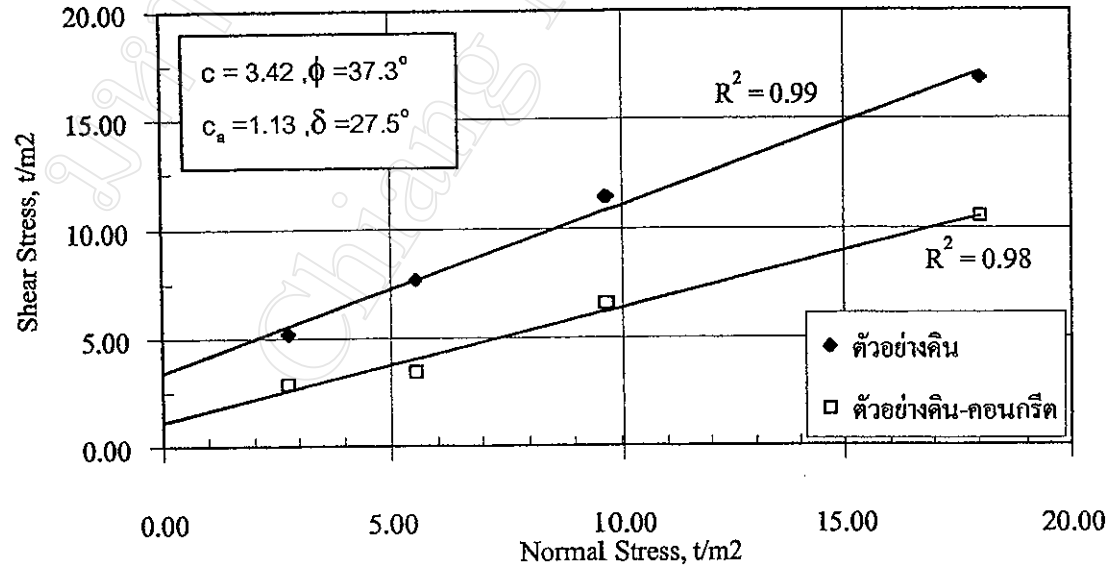
หมายเลขตัวอย่าง	หลุมทดสอบ	ระดับความลึก (ม.)	คอนโซลิเดชั่นเพลสเซอร์ (ตัน/ตร.ม)	หน่วยแรงเฉือน (ตัน/ตร.ม.)	ความเครียด (มม.)	ตัวแปรที่ได้จากการทดลอง
DSS-1.1	BH 4	2.30-2.40	2.76	6.60	9.0	c = 3.97 ตัน/ตร.ม.
DSS-1.2	BH 4	2.40-2.50	5.54	7.65	9.0	
DSS-1.3	BH 4	2.50-2.60	9.71	11.40	9.0	ϕ= 37.6 องศา
DSS-1.4	BH 4	2.60-2.70	18.04	18.00	9.0	
DSC-1.1	BH 5	2.30-2.40	2.76	2.66	1.4	c_a = 0.96 ตัน/ตร.ม.
DSC-1.2	BH 5	2.40-2.50	5.54	3.10	2.6	
DSC-1.3	BH 5	2.50-2.60	9.71	7.56	2.0	δ = 29.2 องศา
DSC-1.4	BH 5	2.60-2.70	18.04	10.7	2.4	

ตารางที่ 5.9 แสดงผลการทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนโดยตรงแบบไม่ระบายน้ำ (Direct Shear Test) ระดับความลึก 3.00-3.60 เมตร

หมายเลขตัวอย่าง	หลุมทดสอบ	ระดับความลึก (ม.)	คอนโซลิเดชั่นเพลสเซอร์ (ตัน/ตร.ม)	หน่วยแรงเฉือน (ตัน/ตร.ม.)	ความเครียด (มม.)	ตัวแปรที่ได้จากการทดลอง
DSS-2.1	BH 4	3.25-3.35	2.76	5.19	6.0	c = 3.42 ตัน/ตร.ม.
DSS-2.2	BH 4	3.35-3.45	5.54	7.64	6.35	
DSS-2.3	BH 4	3.45-3.55	9.71	11.45	9.0	ϕ= 37.3 องศา
DSS-2.4	BH 4	3.55-3.65	18.04	16.90	9.0	
DSC-2.1	BH 5	3.25-3.35	2.76	2.90	2.2	c_a = 1.13 ตัน/ตร.ม.
DSC-2.2	BH 5	3.35-3.45	5.54	3.40	3.0	
DSC-2.3	BH 5	3.45-3.55	9.71	6.50	3.4	δ = 27.5 องศา
DSC-2.4	BH 5	3.55-3.65	18.04	10.50	2.4	

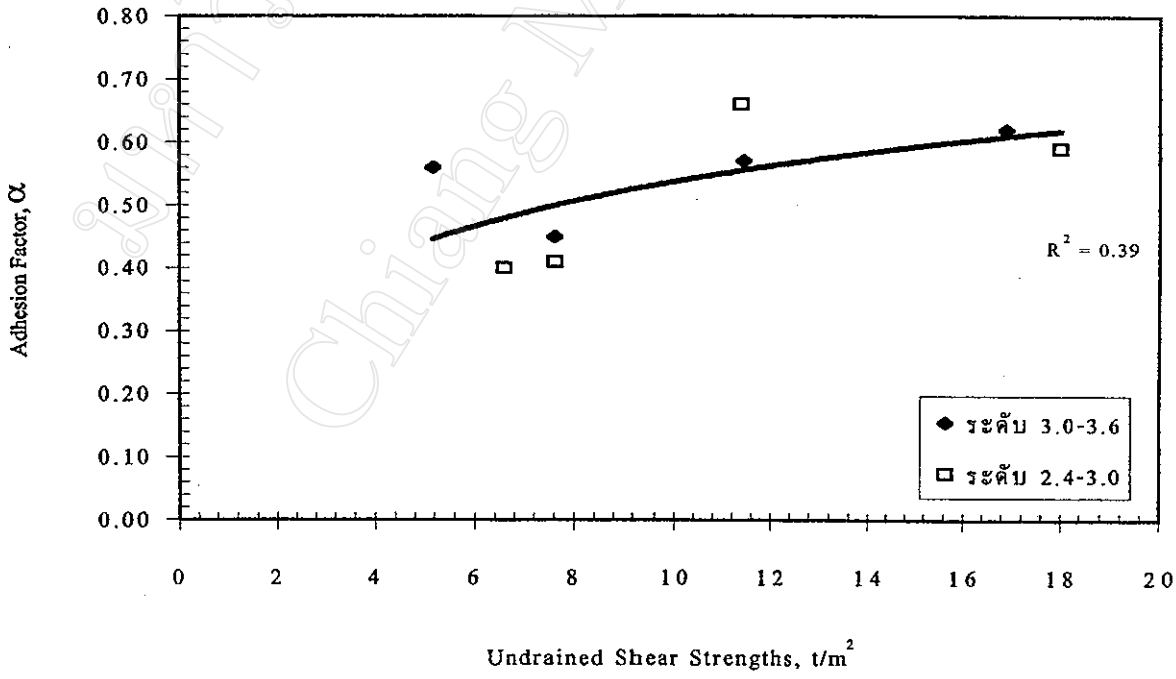


รูปที่ 5.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Shear Stress กับค่า Normal Stress ของดินตัวอย่าง และดินตัวอย่างกับคอนกรีตผิวเรียบ ที่ระดับความลึก 2.40-3.00 ม.

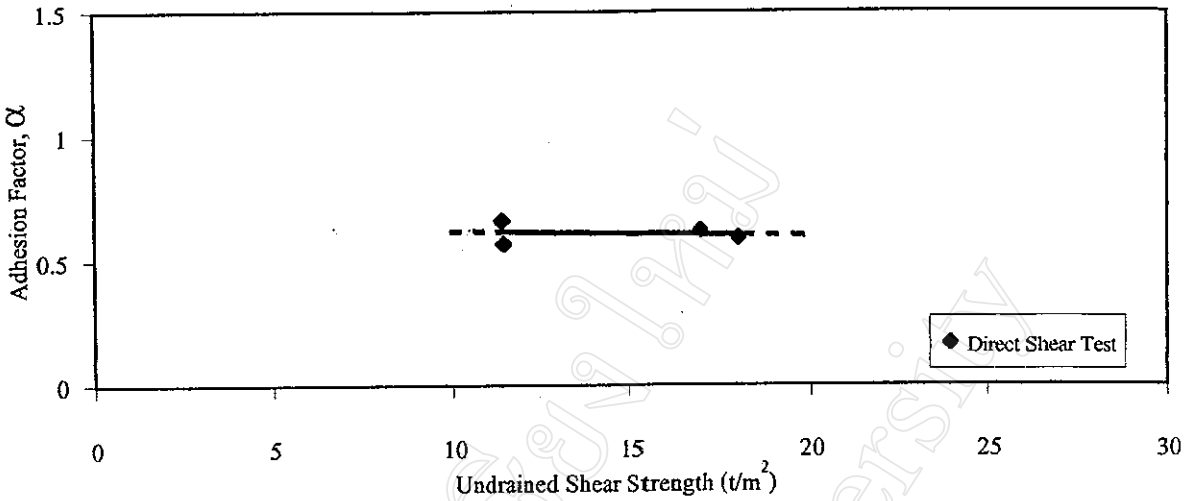


รูปที่ 5.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Shear Stress กับค่า Normal Stress ของดินตัวอย่าง และดินตัวอย่างกับคอนกรีตผิวเรียบ ที่ระดับความลึก 3.00-3.60 ม.

ขึ้นกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างดินจะมีค่าสูงกว่ากำลังรับแรงเฉือนระหว่างตัวอย่างดินกับตัวอย่างคอนกรีตผิวเรียบ โดยเส้นขอบเขตการวิบัติมีแนวโน้มเกือบขนานกัน และจากการใช้กราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 5.22 และ 5.23 เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะจากผลการทดลองกำลังรับแรงเฉือนตรงดังกล่าวข้างต้น พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ กับ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ เมื่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำมีค่ามากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะมีแนวโน้มคงที่ระหว่าง 0.50-0.60 กราฟความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 5.24 จะเห็นว่าลักษณะกราฟโค้งลงในช่วงแรกเนื่องมาจากเหตุผลในเรื่องหน่วยแรงตั้งฉากต่ำประกอบกับดินตัวอย่างเป็นดิน overconsolidated ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะต่ำกว่าความเป็นจริง ดังนั้นจึงละทิ้งในช่วงที่หน่วยแรงตั้งฉากต่ำ (2.76 และ 5.54 ตัน/ตร.ม.) และทำการปรับกราฟความสัมพันธ์ใหม่ได้ดังรูปที่ 5.25 ซึ่งจะเห็นว่าในกรณีที่หน่วยแรงตั้งฉากเพิ่มขึ้นสัมประสิทธิ์การยึดเกาะมีแนวโน้มคงที่ซึ่งคล้ายกันกับดินเหนียวกรุงเทพในชั้นดินเหนียวแข็งจะลักษณะหน่วยแรงและความเครียดทั้งการเฉือนตัวอย่างดินและการเฉือนระหว่างตัวอย่างดินกับตัวอย่างคอนกรีตผิวเรียบมีลักษณะใกล้เคียงกัน เมื่อหน่วยแรงตั้งฉากเพิ่มขึ้น (Phamvan, 1989) และจากการทดลองเฉือนตรงนี้พบว่าดินเหนียวแข็งที่นำมาทดสอบมีค่าอัตราส่วนระหว่าง c_a/c ระหว่าง 0.24-0.33 และค่า δ/ϕ ระหว่าง 0.74-0.78



รูปที่ 5.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion Factor กับ Undrained Shear Strength จากการทดสอบ Direct Shear Test ที่ระดับความลึก 2.4-3.0 ม. และ ที่ระดับความลึก 3.0-3.6 ม.



รูปที่ 5.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion Factor กับ Undrained Shear Strength จากการทดสอบ Direct Shear Test (ปรับแก้จากรูปที่ 5.24)

5.3.4 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนด้วยเครื่องทดสอบ Triaxil Test

5.3.4.1 การทดสอบ Consolidated Undrained Triaxial Compression with Pore Pressure Measurement ($\overline{CU}$)

ผลการทดสอบพบว่าตัวแปรในกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวแข็งเชียงใหม่จากการพล็อตวงกลมของมอร์ ได้ค่า c′ เท่ากับ 5.5 ตัน/ตร.ม.ได้ค่า ϕ' เท่ากับ 28.8 องศา และพบว่าที่หน่วยแรงสูงสุดค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดมีค่าอยู่ระหว่าง 12 ถึง 17 เปอร์เซ็นต์ (9-12 มม.) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 แสดงหน่วยแรงและความเครียดของดินเหนียวแข็งเชียงใหม่ Consolidated Undrained Triaxial Compression with Pore Pressure Measurement $\overline{CU}$

หมายเลขตัวอย่าง	หลุมทดสอบ	ระดับความลึก (ม.)	คอนโซลิเดชั่นเพรสเชอร์ (ตัน/ตร.ม)	ที่หน่วยแรงดีวิเอเตอร์สูงสุด				
				ε (%)	$\Delta\sigma$ (ตัน/ตร.ม.)	ΔU (ตัน/ตร.ม.)	σ_1' (ตัน/ตร.ม.)	σ_3' (ตัน/ตร.ม.)
CU-1	BH 1	2.40-2.50	10.55	17.08	40.2	0.55	50.2	10
CU-2	BH 1	2.60-2.70	7.03	13.41	32.53	1.01	38.55	6.02
CU-4	BH 1	2.70-2.80	17.55	12.70	57.52	0.05	75.02	17.50

หมายเหตุ 1 ตัน/ตร.ม. เท่ากับ 9.81 กน./ตร.ม. หรือ 1.4223 psi

5.4 ผลการทดสอบเสาเข็มในสนาม

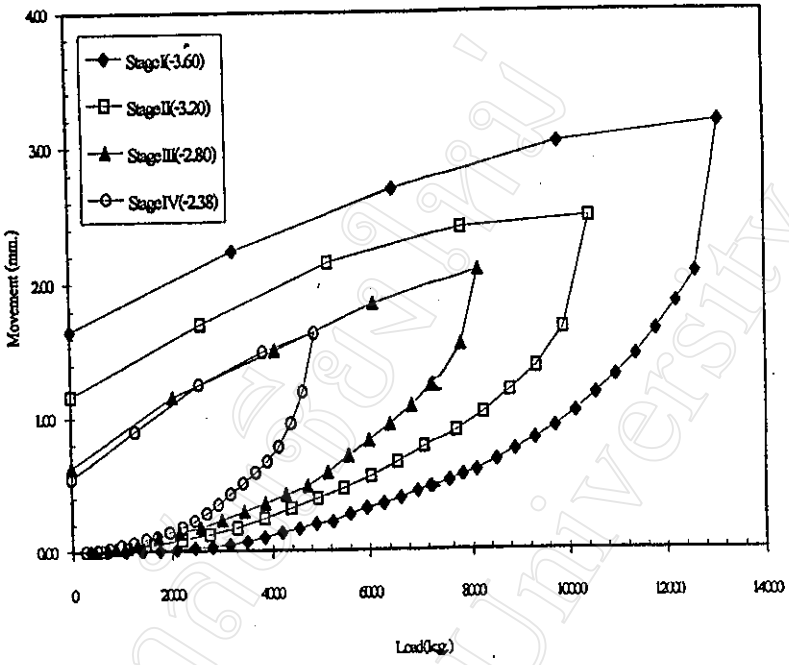
5.4.1 ผลการทดสอบเสาเข็มโดยการดึง

ในการทดสอบเสาเข็มโดยการดึงได้ทำการทดสอบเสาเข็มจำนวน 3 ต้น และผลการทดสอบเสาเข็มทั้ง 3 ต้นแสดงไว้ในตารางที่ 5.11 กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึง กับ ระยะเคลื่อนตัวของเสาเข็มจัดแสดงไว้ในรูปที่ 5.26 ถึงรูปที่ 5.28 และลักษณะการกระจายน้ำหนักตามความลึก ของเสาเข็มทดสอบโดยการดึง แสดงดังรูปที่ 5.29 และหน่วยแรงเสียดทานผิวในแต่ละช่วงของการทดสอบ แสดงไว้ในรูปที่ 5.30 ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.12 และผลการทดสอบโดยการดึงพบว่ากำลังรับน้ำหนัก ของเสาเข็มทดสอบที่ทำการทดสอบในครั้งแรกจะมีค่าสูงตามเวลา แต่หลังจากที่ผ่านการทดสอบครั้งแรก หรือ ถูกกระทบกระเทือน พฤติกรรมการรับน้ำหนักจะไม่ขึ้นกับเวลา

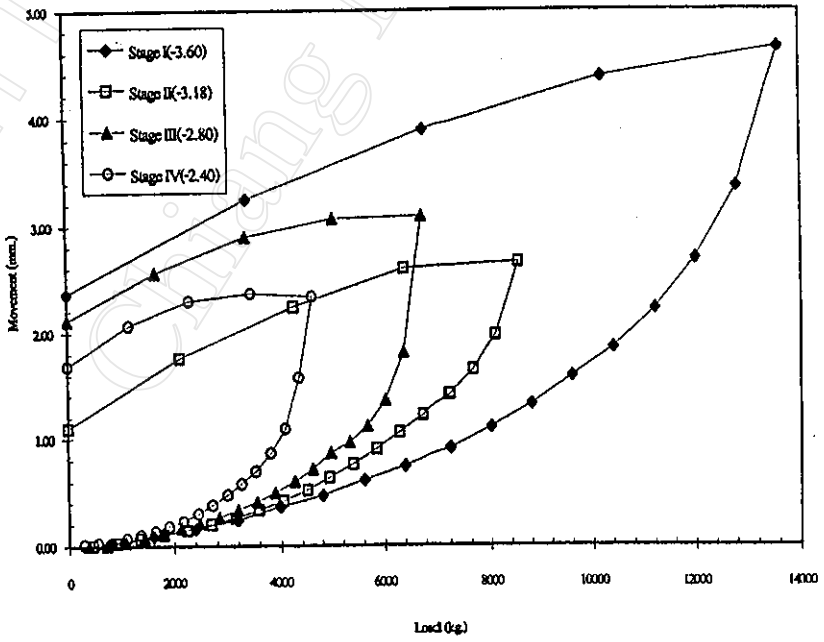
ตารางที่ 5.11 แสดงสรุปผลการทดสอบเสาเข็มในสนาม

Pile	Test No.	Time After Driven(Days)	Pile Elevation (m.)	Failure Load (tons)	Pile Head Movement (mm.)	
					Total	Permanent
T1	1	14	3.60	12.71	3.17	1.65
	2	21	3.20	10.06	2.48	1.17
	3	28	2.80	7.78	2.09	0.63
	4	35	2.38	4.51	1.63	0.55
T2	1	41	3.60	13.21	4.65	2.37
	2	48	3.18	8.16	2.66	1.10
	3	55	2.80	6.36	3.09	2.12
	4	62	2.40	4.24	2.33	1.69
TC*	1	105	3.60	21.73	14.69	-
TC	2	116	3.60	12.52	5.99	4.46
	3	123	3.20	9.72	3.41	1.89
	4	130	2.80	7.57	3.57	2.23
	5	137	2.39	4.22	2.85	1.99
TC*	6	142	2.39	3.24	8.82	8.21

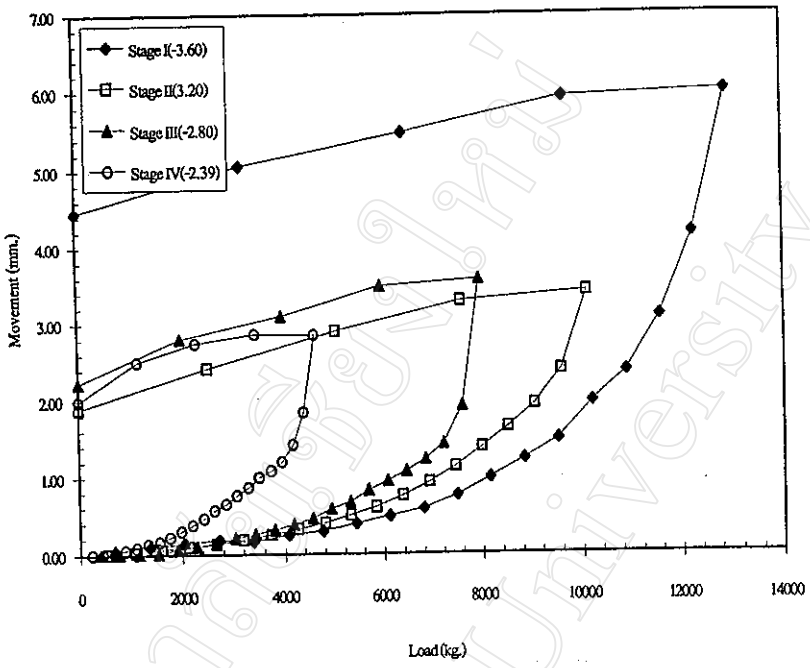
หมายเหตุ TC* การทดสอบเสาเข็มโดยการกด



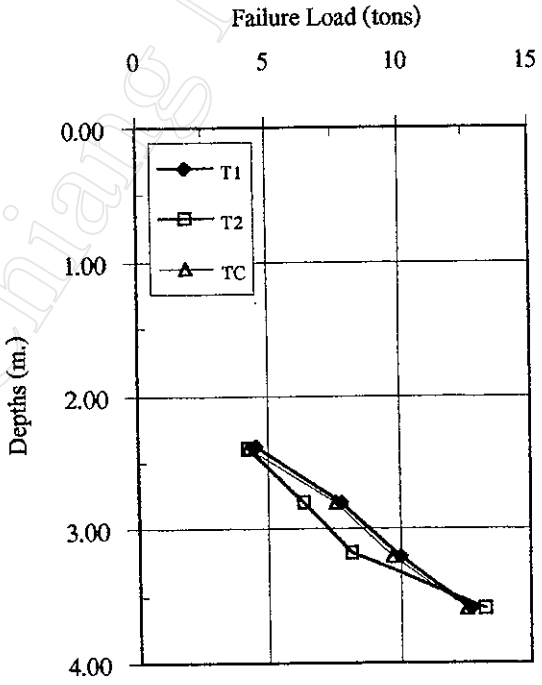
รูปที่ 5.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึง กับ ระยะเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ของเสาเข็ม T1



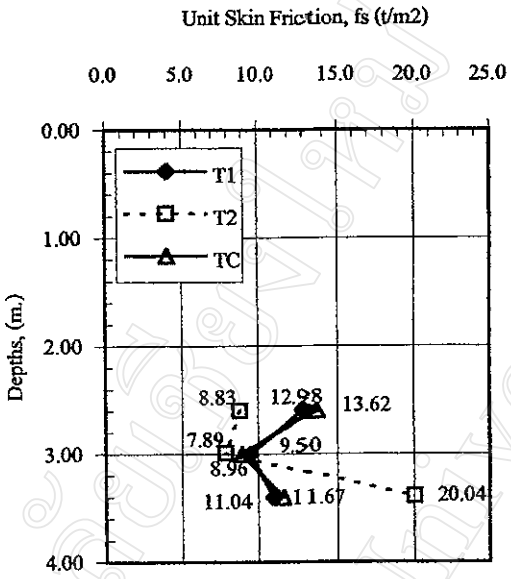
รูปที่ 5.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึง กับ ระยะเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ของเสาเข็ม T2



รูปที่ 5.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึง กับ ระยะเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ของเสาเข็ม TC



รูปที่ 5.29 แสดงการกระจายน้ำหนักตามความลึกของเสาเข็มที่ทดสอบโดยการดึง



รูปที่ 5.30 แสดงหน่วยแรงเสียดทานผิวในแต่ละช่วงของการทดสอบ

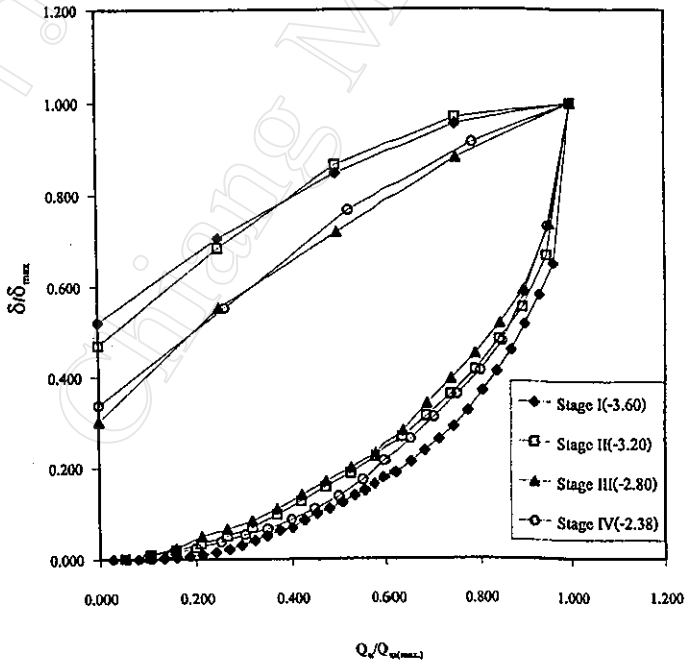
ตารางที่ 5.12 แสดงแรงเสียดทานและหน่วยแรงเสียดทานในแต่ล่ะระดับช่วงความลึกของเสาเข็มทดสอบ T1 T2 และ TC

เสาเข็ม	ช่วงความลึก(ม.)	ความลึกเฉลี่ย(ม.)	แรงดึง(ตัน)	หน่วยแรงเสียดทานผิว (ตัน/ตร.ม.)
T1	2.38-2.80	2.59	3.24	12.98
	2.80-3.20	3.00	2.28	9.50
	3.20-3.60	3.40	2.65	11.04
T2	2.40-2.80	2.60	2.12	8.83
	2.80-3.18	2.99	1.80	7.89
	3.18-3.60	3.39	5.05	20.04
TC	2.39-2.80	2.60	3.35	13.62
	2.80-3.20	3.00	2.15	8.96
	3.20-3.60	3.40	2.80	11.67

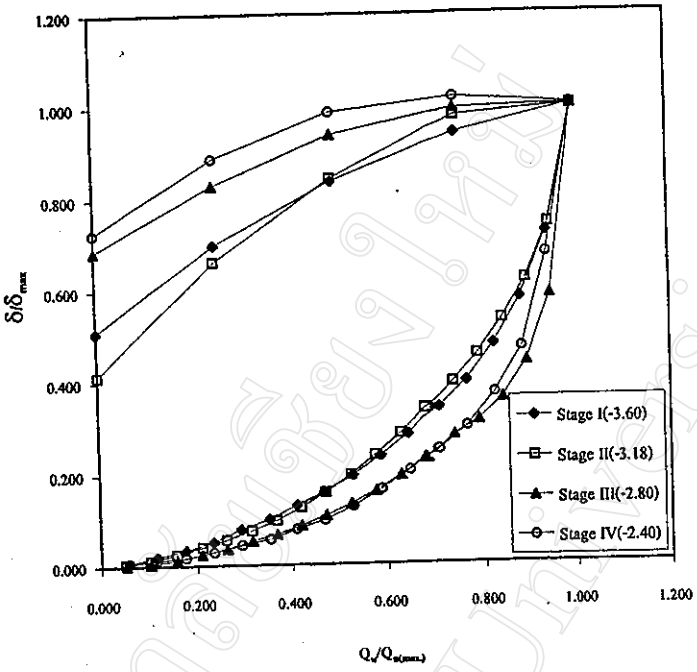
และเมื่อทำการ Normalized การทดสอบโดยการดึงเสาเข็มตามวิธีของ Phamvan (1989) ที่น้ำหนักบรรทุก (Q_u) ด้วยน้ำหนักบรรทุกประลัย (Q_{ult}) และการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม (δ) ด้วยการ

เคลื่อนตัว ณ จุดพิบัติ (δ_{max}) แสดงดังรูปที่ 5.31 ถึงรูปที่ 5.33 ซึ่งจะเห็นลักษณะกราฟของเสาเข็มทดสอบทั้ง 3 ต้นไม่แตกต่างกัน นั้นแสดงว่าพฤติกรรมการรับแรงดึงในแต่ละระดับของเสาเข็มทดสอบทั้ง 3 ต้นเหมือนกัน (Phamvan, 1989)

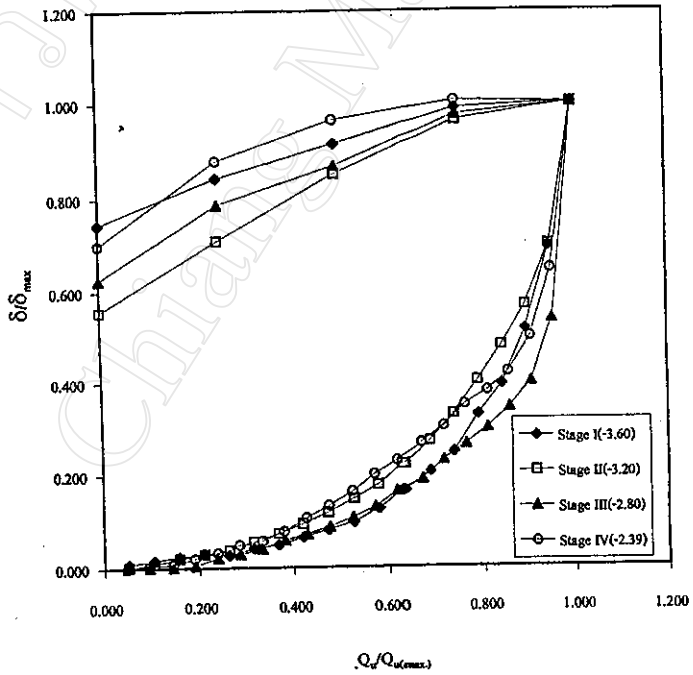
ผลการทดสอบจากตารางที่ 5.12 พบว่า หน่วยแรงเสียดทานผิว ซึ่งการวิเคราะห์ตามวิธีที่เสนอไว้ในหัวข้อ 4.4.4 ที่ผ่านมา โดยหน่วยแรงเสียดทานผิวมีค่าระหว่าง 7.89-20.04 ตัน/ตร.ม. โดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 11.57 ตัน/ตร.ม. ซึ่งจากกราฟทั้ง 3 เส้นแสดงให้เห็นว่าหน่วยแรงเสียดทานมีค่าลดลงที่ช่วงความลึก 2.80-3.20 และเพิ่มขึ้นที่ระดับ 3.20-3.60 ซึ่งสาเหตุที่หน่วยแรงลดลงในช่วง 3 เมตร อาจเนื่องมาจากช่วงความลึก 3 เมตร เป็นช่วงดินเหนียวที่มีกำลังรับแรงเฉือนสูงกว่าช่วงความลึกอื่นๆ (ลักษณะเป็นดินเหนียวแข็งมาก) จึงอาจทำให้ช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสเสาเข็มกับดินช่วงความลึกนี้มากกว่าช่วงอื่น (ดินมีการเคลื่อนตัวกลับมาสัมผัสผิวเสาเข็มน้อยหลังการตอก) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิวที่ได้ กับ คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินจากผลการทดสอบตัวอย่างดินในห้องปฏิบัติการ แสดงไว้ในสรุปไว้ในตารางที่ 5.13 และรูปที่ 5.34 ได้แสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ สัมประสิทธิ์เบต้า และสัมประสิทธิ์แลมด้า ตามลำดับ ในแต่ละช่วงความลึก ซึ่งประสิทธิ์การยึดเกาะ มีค่าระหว่าง 0.38-1.11 โดยเฉลี่ยมีค่า 0.67 สัมประสิทธิ์เบต้ามีค่าระหว่าง 1.96-4.58 โดยเฉลี่ยมีค่า 3.27 และสัมประสิทธิ์แลมด้ามีค่าระหว่าง 0.17-0.49



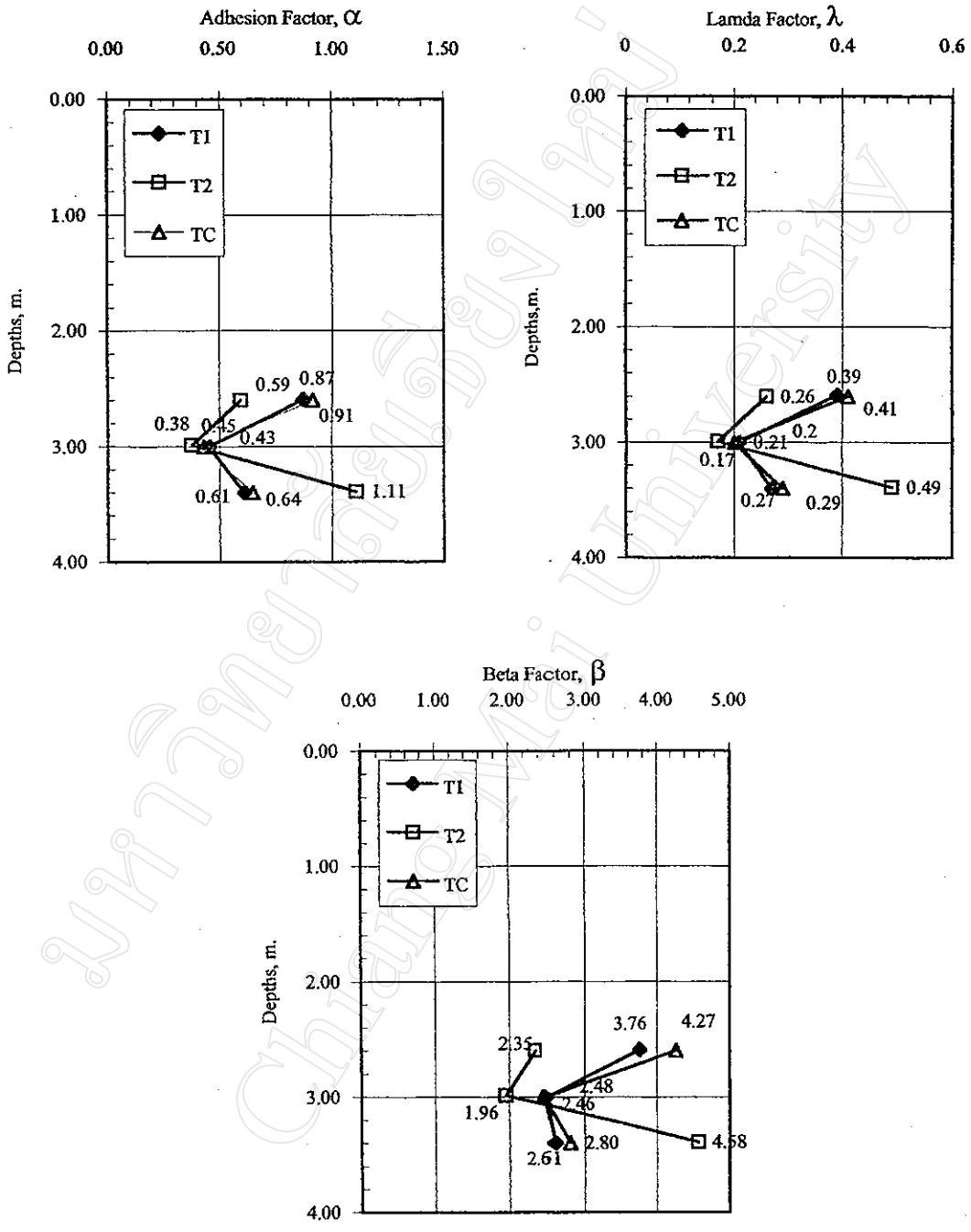
รูปที่ 5.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง δ/δ_{max} กับ $Q_u/Q_{u(max)}$ พฤติกรรมการรับแรงดึงของเสาเข็มทดสอบ T1



รูปที่ 5.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง δ/δ_{max} กับ $Q_u/Q_{u(max.)}$ พฤติกรรมการรับแรงดึงของเสาเข็มทดสอบ T2



รูปที่ 5.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง δ/δ_{max} กับ $Q_u/Q_{u(max.)}$ พฤติกรรมการรับแรงดึงของเสาเข็มทดสอบ TC

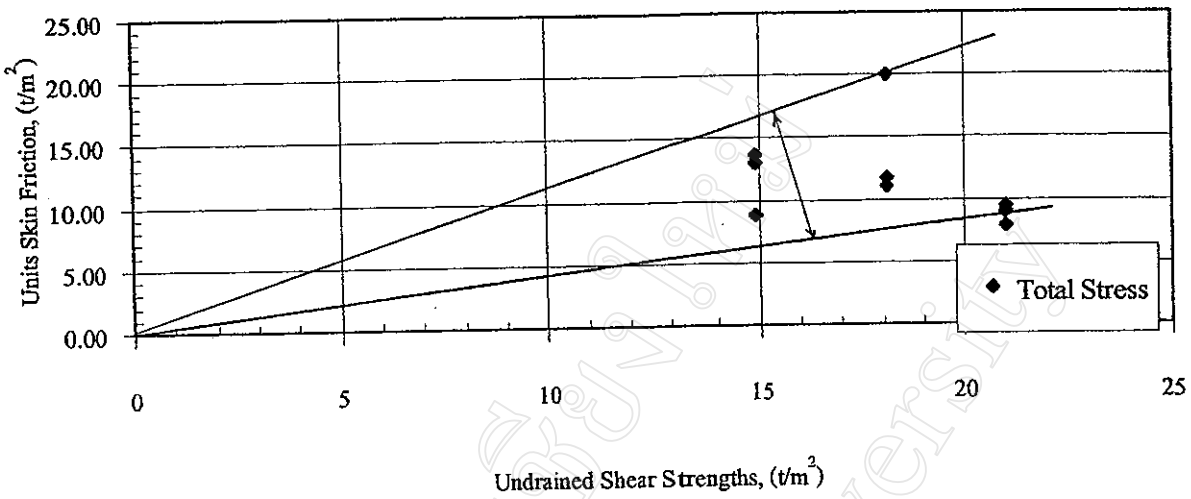


รูปที่ 5.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α, λ, β กับ ความลึกในแต่ละดับความลึก (ม.)

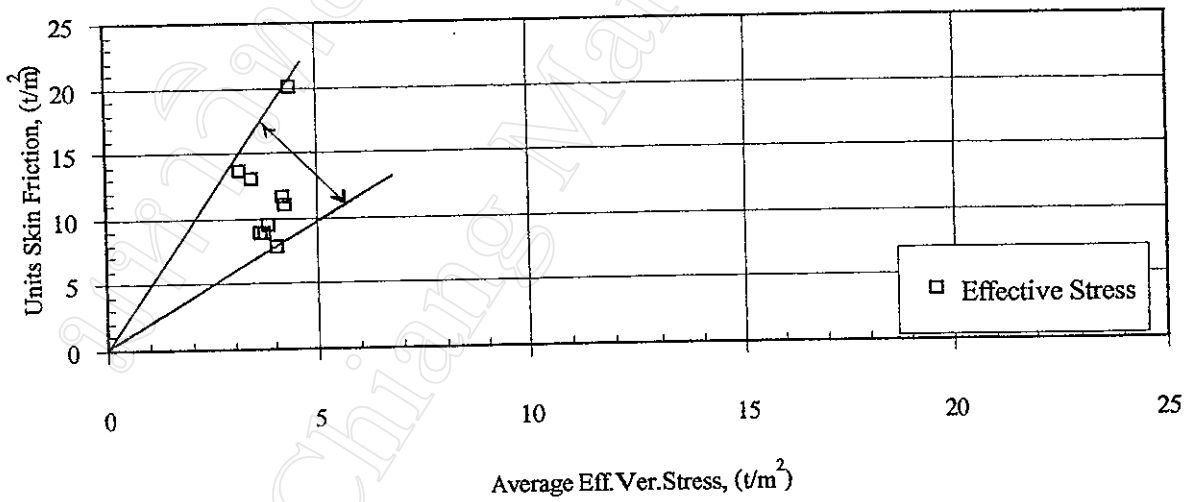
ตารางที่ 5.13 แสดงสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ สัมประสิทธิ์เบต้า และสัมประสิทธิ์แลมด้าในแต่ละระดับช่วงความลึกของเสาเข็มทดสอบ T1 T2 และTC

เสาเข็ม	ช่วงความลึก (ม.)	fs (t/m^2)	S_u (t/m^2)	σ_v' (t/m^2)	$\alpha=fs/S_u$	$\beta=fs/\sigma_v'$	$\lambda=fs/(\sigma_v'+2S_u)$
T1	2.38-2.80	12.98	14.9	3.451	0.87	3.76	0.39
	2.80-3.20	9.50	21	3.829	0.45	2.48	0.21
	3.20-3.60	11.04	18.1	4.237	0.61	2.61	0.27
T2	2.40-2.80	8.83	14.9	3.752	0.59	2.35	0.26
	2.80-3.18	7.89	21	4.026	0.38	1.96	0.17
	3.18-3.60	20.04	18.1	4.374	1.11	4.58	0.49
TC	2.39-2.80	13.62	14.9	3.190	0.91	4.27	0.41
	2.80-3.20	8.96	21	3.648	0.43	2.46	0.20
	3.20-3.60	11.67	18.1	4.168	0.64	2.80	0.29

จากการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิว กับ หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง และ กำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่มีขอบเขตจำกัด ตามวิธีการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 5.2 (Flaate and Selness (1977)) ที่ผ่านมา พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิว กับ หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งมีการกระจายของข้อมูลไม่ต่างกันมากเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ ผลการเปรียบเทียบแสดงในรูปที่ 5.35 และ5.36 นั้นแสดงให้ว่าการประมาณหน่วยแรงเสียดทานทั้งวิธีหน่วยแรงรวมและหน่วยแรงประสิทธิผลน่าจะสามารถใช้ในการประมาณได้ไม่แตกต่างกัน และในการศึกษาการประมาณหน่วยแรงเสียดทานผิวได้ใช้สมการในแต่ละวิธีดังแสดงในตารางที่ 5.14 โดยผลการทดสอบดินได้เลือกตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในสมการต่างๆในแต่ละวิธีสรุปไว้ในตารางที่ 5.15 ดังนั้นจึงได้นำผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบ โดยการดึงนี้เปรียบเทียบกับการประมาณค่าหน่วยแรงเสียดทานด้วยวิธีหน่วยแรงรวม วิธีหน่วยแรงประสิทธิผลและวิธีหน่วยแรงรวมร่วมกับหน่วยแรงประสิทธิผล พบว่าค่าที่ประมาณได้จะมีค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากผลการทดสอบยกเว้นแต่วิธีของ Vijakverjiya and Focht (1972) ที่ให้ค่าการประมาณสูงกว่าค่าจากผลการทดสอบผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 5.37 และรูปที่ 5.38 (สรุปผลการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ ค.1 และตารางที่ ค.2) ซึ่งจะเห็นว่าวิธีหน่วยแรงรวมมีแนวโน้มการประมาณที่ดีกว่าวิธีหน่วยแรงประสิทธิผลและวิธีหน่วยแรงรวมร่วมกับหน่วยแรงประสิทธิผล สำหรับวิธีหน่วยแรงรวมที่ให้ค่าประมาณได้ดี ได้แก่ วิธีของ Bowles (1997) วิธีของงานวิจัยที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจากรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิว กับ กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ



รูปที่ 5.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิว กับ หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง

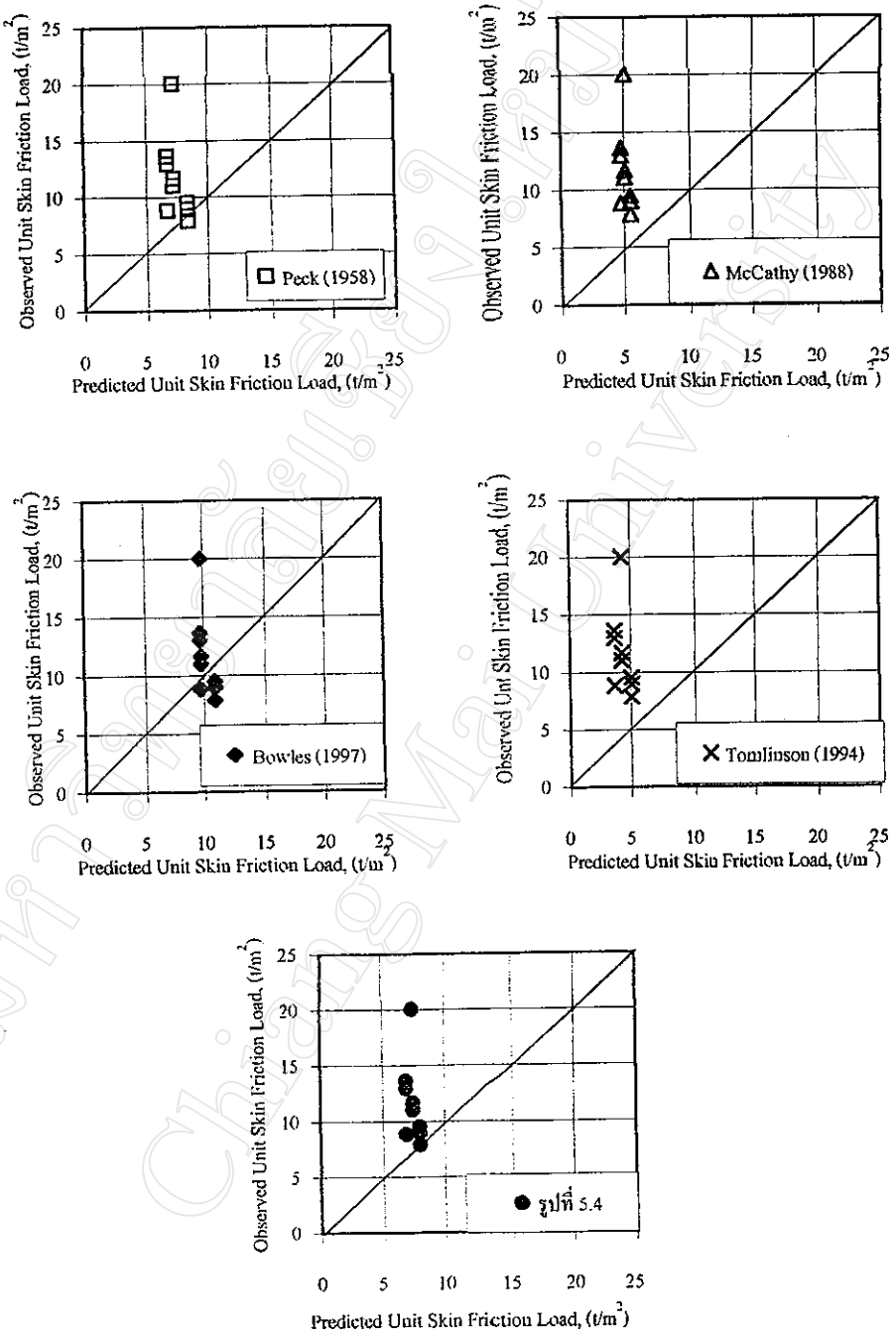
และวิธีของ Peck (1958) เป็นต้น ส่วนวิธีที่ใช้หน่วยแรงรวมร่วมกับหน่วยแรงประสิทธิผลมีสมการของ Flaate and Selnes (1977) ที่ให้ค่าการประมาณค่อนข้างดี แต่โดยภาพรวมวิธีหน่วยแรงรวมยังคงเป็นวิธีที่ใช้ในการประมาณได้ดีกว่า

ตารางที่ 5.14 แสดงสมการที่ใช้ในการประมาณหน่วยแรงเสียดทานผิว

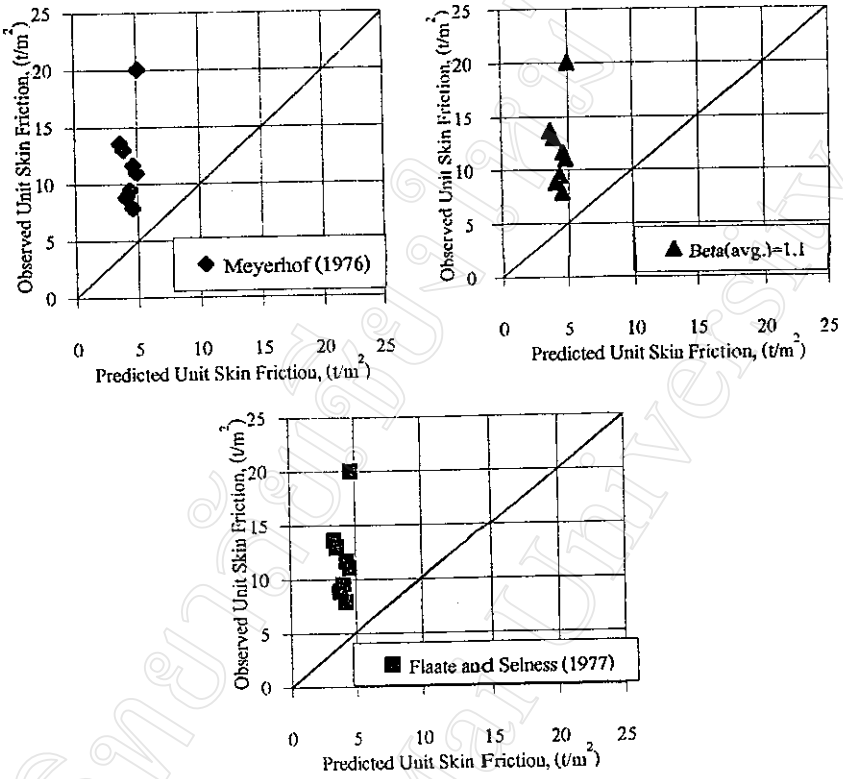
วิธี	นักวิจัย	สมการ	หมายเหตุ
หน่วยแรงรวม	Bowles (1997) Peck (1958) McCarthy (1988) Tomlinson (1994) งานวิจัยส่วนแรก	$fs = \alpha S_u$	ใช้สมการเดียวกันแต่ใช้กราฟ α, S_u ต่างกัน และ งานวิจัยส่วนแรกใช้กราฟรูปที่ 5.4
หน่วยแรงประสิทธิผล	Meyerhof (1976) Flaate and Selness I (1977) งานวิจัยส่วนแรก	$fs = 1.5(1-\sin\phi')\sqrt{OCR}\tan\phi'$ $fs = \mu_L\ 0.4\sqrt{OCR}\ \sigma_v'$ $fs = \beta\sigma_v' = 1.1\sigma_v'$	β เฉลี่ย เท่ากับ 1.1
หน่วยแรงรวมร่วม หน่วยแรงประสิทธิผล	Flaate and Selness II (1977) Vijakverjiya and Focht (1972)	$fs = \mu_L[(0.3-0.001Ip)*\sqrt{OCR}\ \sigma_v' + 0.008IpS_u]$ $fs = \lambda(\sigma_v' + 2\ S_u)$	ความหมายของตัวแปรต่างๆแสดงไว้ในบทที่ 2

ตารางที่ 5.15 แสดงสรุปข้อมูลดินที่ใช้สำหรับการประมาณหน่วยแรงเสียดทานผิว

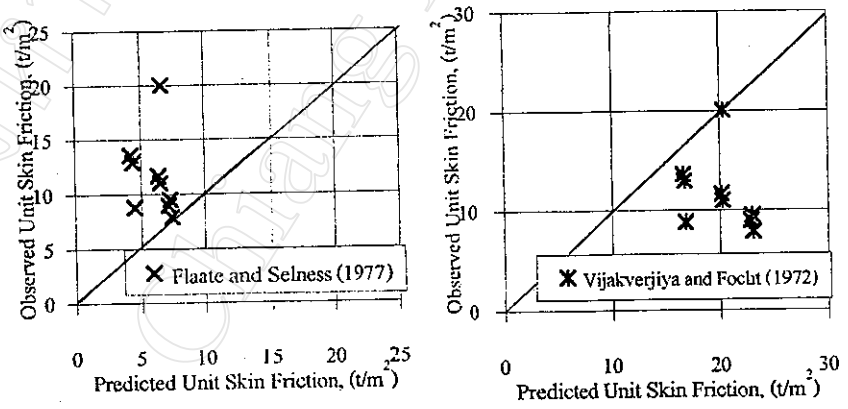
เสาเข็ม	ช่วงการทดสอบ	S_u (ton/m^2)	σ_v' (ton/m^2)	I_p (%)	อื่นๆ
T1	2.38-2.80	14.9	3.451	15.6	OCR = 7
	2.80-3.20	21	3.829	27.2	$\phi' = 28.8^\circ$
	3.20-3.60	18.1	4.237	23.7	
T2	2.40-2.80	14.9	3.752	15.6	OCR = 7
	2.80-3.18	21	4.026	27.2	$\phi' = 28.8^\circ$
	3.18-3.60	18.1	4.374	23.7	
TC	2.39-2.80	14.9	3.190	15.6	OCR = 7
	2.80-3.20	21	3.648	27.2	$\phi' = 28.8^\circ$
	3.20-3.60	18.1	4.168	23.7	



รูปที่ 5.37 แสดงการเปรียบเทียบแรงเสียดทานผิวที่ประเมินจากสมการวิธีหน่วยแรงรวม กับ แรงเสียดทานผิวที่วัดได้



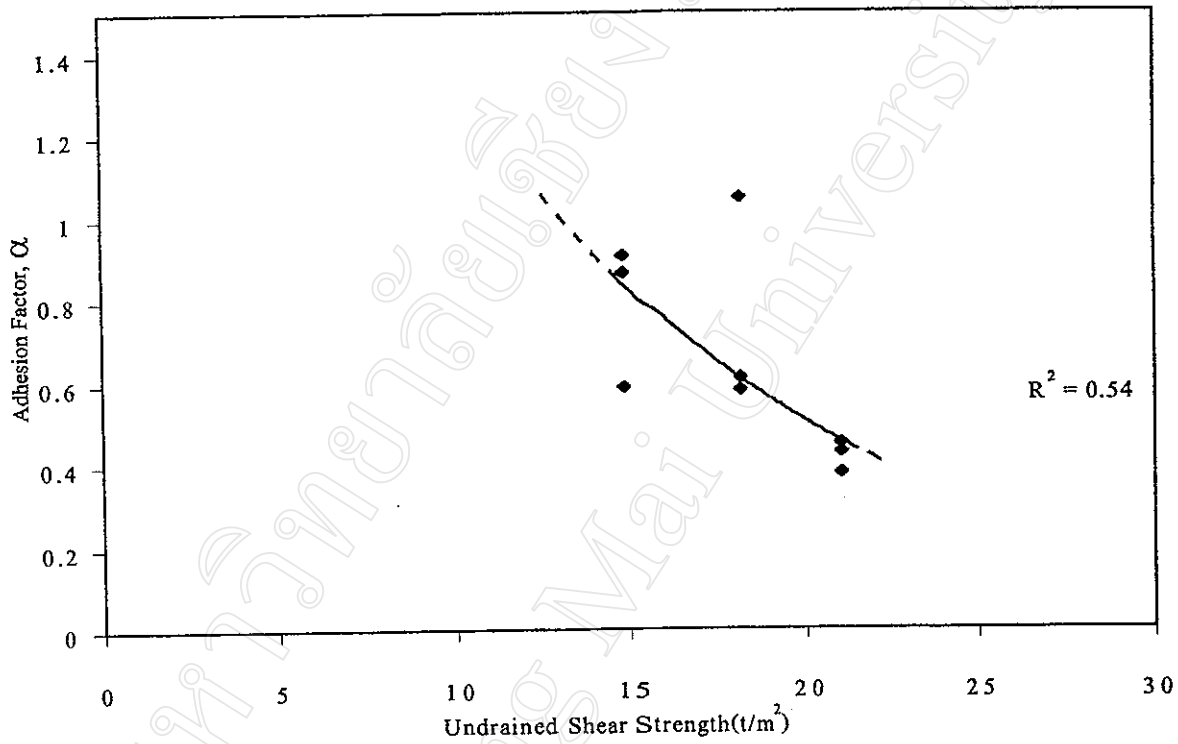
ก) วิธีหน่วยแรงประสิทธิผล



ข) วิธีหน่วยแรงรวมร่วมกับหน่วยแรงประสิทธิผล

รูปที่ 5.38 แสดงการเปรียบเทียบแรงเสียดทานผิวที่ประเมินจากสมการวิธีหน่วยแรงประสิทธิผล และวิธีหน่วยแรงรวมร่วมกับหน่วยแรงประสิทธิผล กับ แรงเสียดทานผิวที่วัดได้

จากการที่วิธีหน่วยแรงรวมให้การประมาณค่าหน่วยแรงเสียดทานผิวได้ค่าการประมาณดีกว่าวิธีอื่นๆ จึงได้ทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ กับ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ โดยใช้ผลการทดสอบเสาเข็มโดยการดึง พบว่ากราฟความสัมพันธ์มีลักษณะค่อนข้างชันในช่วง กำลังรับแรงเฉือน 15-25 ตัน/ตร.ม. แสดงในรูปที่ 5.39

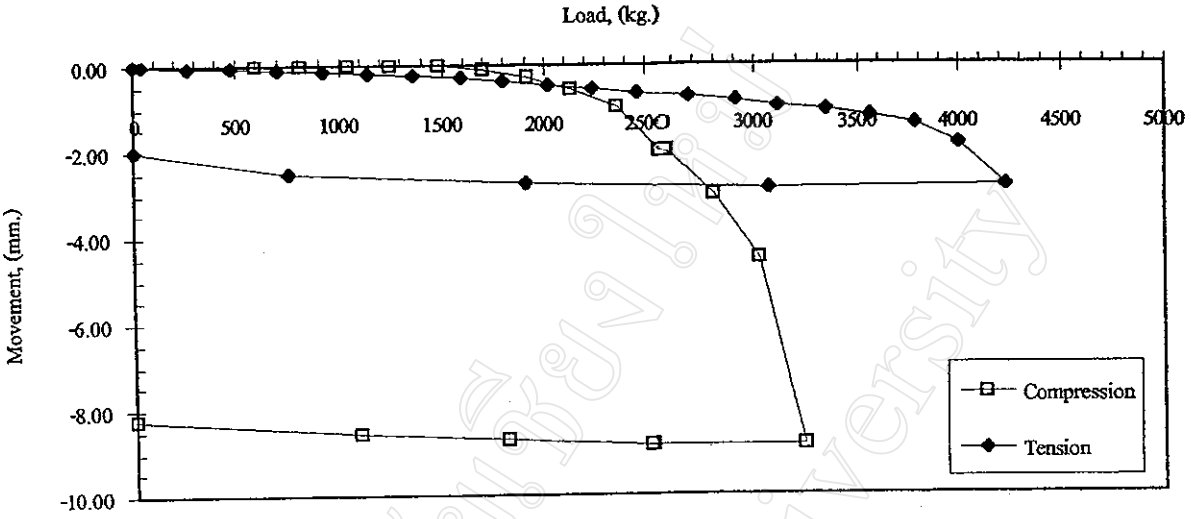


รูปที่ 5.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion Factor กับ ค่า Undrained Shear Strength จากผลการทดสอบเสาเข็มในสนาม

5.4.2 ผลการทดสอบเสาเข็มโดยการกด

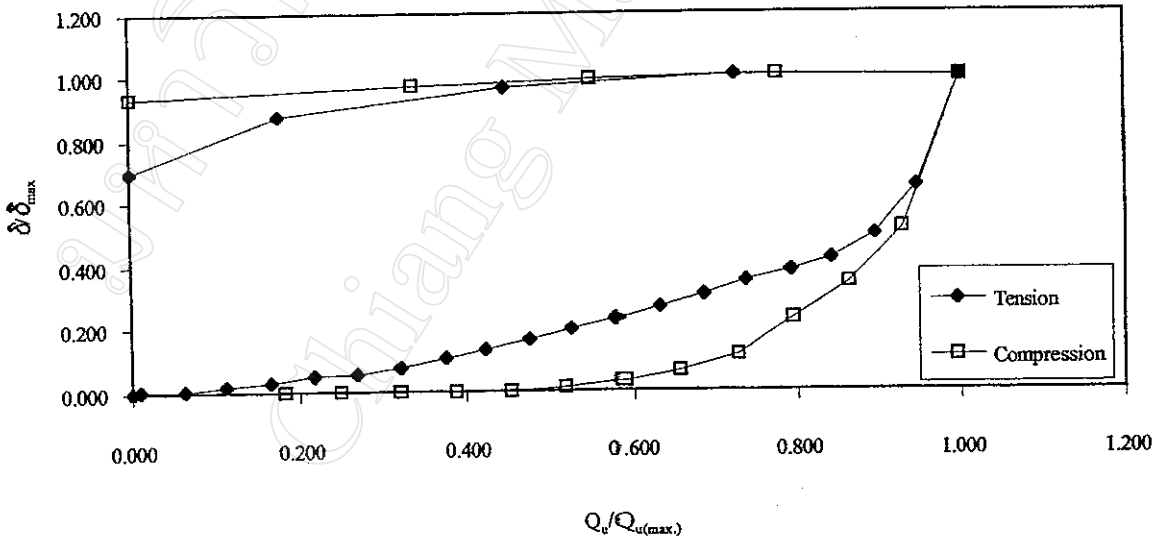
จากการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการรับแรงดึงและแรงกดของเสาเข็มทดสอบ TC ในกรณีที่เสาเข็มไม่มีแรงต้านที่ปลายเสาเข็ม ซึ่งทำการทดสอบเสาเข็ม TC โดยการกดที่ระดับทดสอบ –2.40 เมตร (หลังจากทำการทดสอบโดยการดึงที่ระดับ –2.40 เมตรแล้วเป็นเวลา 7 วัน) พบว่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม TC โดยการกดมีค่าเท่ากับ 3.24 ตัน ซึ่งมีค่าที่น้อยกว่ากำลังรับแรงดึงของเสาเข็มที่ระดับทดสอบเดียวกัน โดยแรงดึงประลัยมีค่าเท่ากับ 4.22 ตัน คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่มากกว่าการกดเท่ากับ 23.8 เปอร์เซ็นต์ หรือ $Q_{S(compression)} = 0.768Q_{S(tension)}$ ซึ่งจากผลการทดสอบมีลักษณะคล้ายกับ Bond and Jadine (1995) ที่ทำการเปรียบเทียบกำลังรับแรงดึง กับ กำลังรับแรงกด

ของเสาเข็มในดินเหนียวแข็งลอนดอน มีค่า OCR สูง และได้ค่า กำลังรับแรงดึง มีค่าสูงกว่ากำลังรับแรงกด คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ระหว่าง 12-28 เปอร์เซ็นต์ ผลการเปรียบเทียบเสาเข็มทดสอบ TC แสดงดังรูปที่ 5.40 ซึ่งจากกราฟน้ำหนักบรรทุกกับ ระยะการเคลื่อนที่ของเสาเข็ม จะเห็นว่าในช่วงน้ำหนักบรรทุกแรกๆ การทดสอบแบบดึงจะมีค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มมากกว่า การทดสอบแบบกดเล็กน้อย หลังจากนั้น การทดสอบแบบกดจะมีการเคลื่อนที่ที่มากกว่าจนกระทั่งถึงน้ำหนักบรรทุกประลัย ผลการทดสอบพบว่า การทดสอบเสาเข็ม TC ในระดับ –2.40 โดยการดึงมีการเคลื่อนที่ของเสาเข็มที่จุดวิบัติ 2.33 มม. ซึ่งน้อยกว่า การทดสอบแบบกดที่มีระยะการเคลื่อนที่ของเสาเข็มถึง 8.82 มม. และเมื่อทำการ Normalized ตามวิธีของ Phamvan (1989) โดยน้ำหนักบรรทุก (Q_u) ด้วยน้ำหนักบรรทุกประลัย (Q_{ult}) และการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม (δ) ด้วยการเคลื่อนตัว ณ จุดพิบัติ (δ_{max}) ผลการ Normalized แสดงดังรูปที่ 5.41 ซึ่งจะเห็นลักษณะกราฟแตกต่างกัน แสดงว่าพฤติกรรมเสาเข็มรับแรงดึงกับเสาเข็มรับแรงกดมีความแตกต่างกันโดยที่น้ำหนักกระทำเท่ากันการเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่ทดสอบโดยการดึงจะมากกว่าการทดสอบโดยการกด จากพฤติกรรมความแตกต่างระหว่างการรับแรงของเสาเข็มรับแรงดึงและเสาเข็มรับแรงกด ดังนั้นจึงทำการปรับแก้ผลการทดสอบเสาเข็มโดยการดึงเป็นเสาเข็มรับแรงกดเนื่องจากทฤษฎีต่างๆที่ใช้พัฒนามาจากเสาเข็มรับแรงกดจึงได้ใช้ตัวแปรปรับเทียบเท่ากับ 0.768 (เนื่องจากแรงดึงวิบัติมีค่ามากกว่าแรงกดวิบัติ 23.2 เปอร์เซ็นต์) เป็นค่าปรับแก้แรงจากการทดสอบโดยการดึงมาเป็นแรงกด ผลการปรับแก้แรงพบว่า การประมาณค่าโดยวิธีหน่วยแรงรวม หน่วยแรงประสิทธิผลและหน่วยแรงรวมร่วมกับหน่วยแรงประสิทธิผล โดยสมการต่างๆ มีแนวโน้มการประมาณได้ดีขึ้น ผลการประมาณเปรียบเทียบแสดงในรูปที่ 5.42 และรูปที่ 5.43 (ข้อมูลสรุปผลการเปรียบเทียบแสดงไว้ในตารางที่ ค.3 ถึง ตารางที่ ค.6) จากการคิดแบบแบ่งชั้นเป็นช่วงการทดสอบ โดยวิธีหน่วยแรงรวมสมการที่ประมาณได้ดี คือ Bowles (1997) และจากการใช้รูปที่ 5.4 ส่วนวิธีหน่วยแรงรวมร่วมกับหน่วยแรงประสิทธิผลสมการที่ใกล้เคียงกับแรงเสียดทานที่วัดได้ คือ Flaate and Selness (1977)

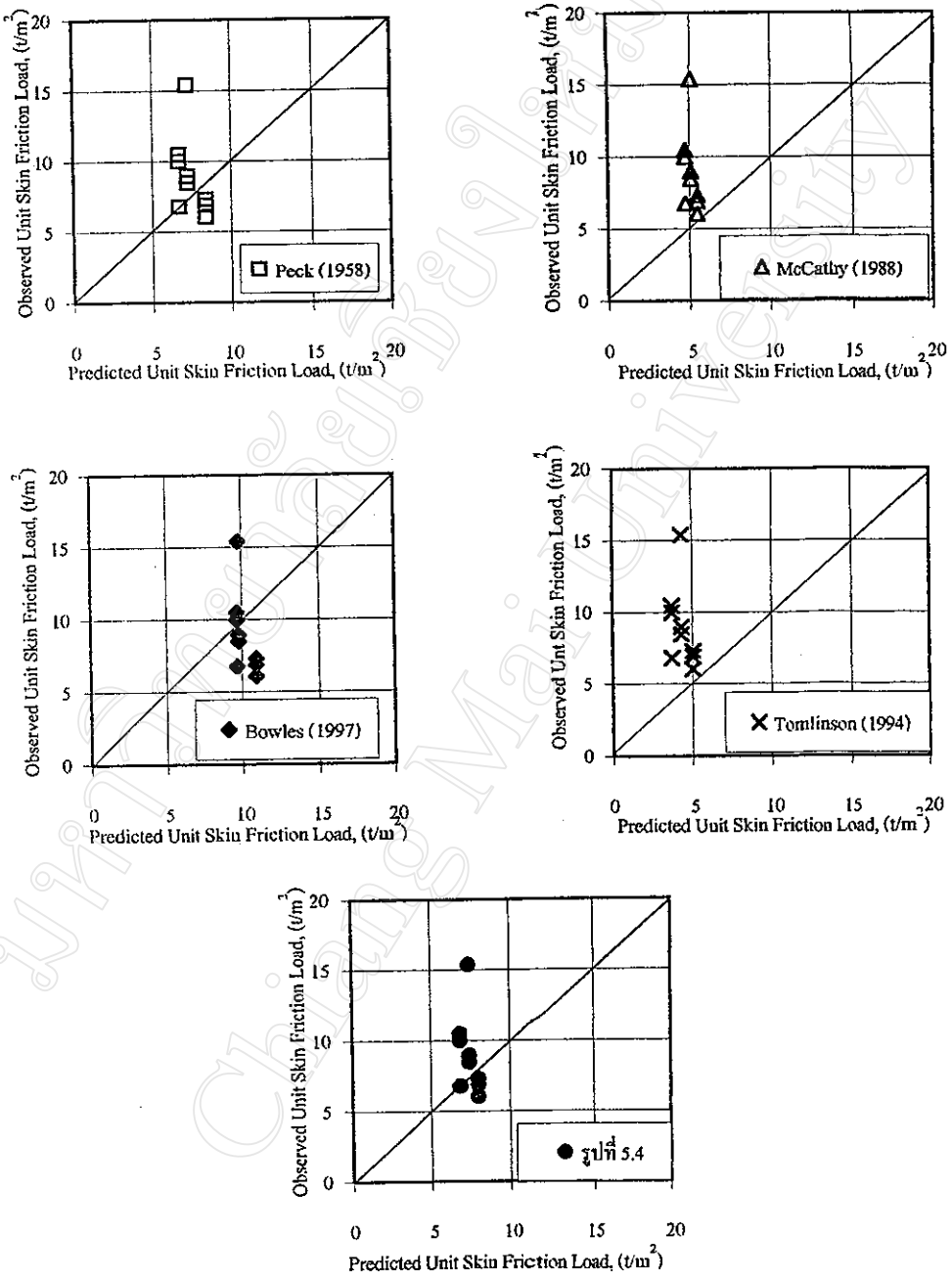


รูปที่ 5.40 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง น้ำหนักบรรทุก กับ การเคลื่อนตัวของเสาเข็มของการทดสอบ โดยการกด และ การดึง เสาเข็มทดสอบ TC

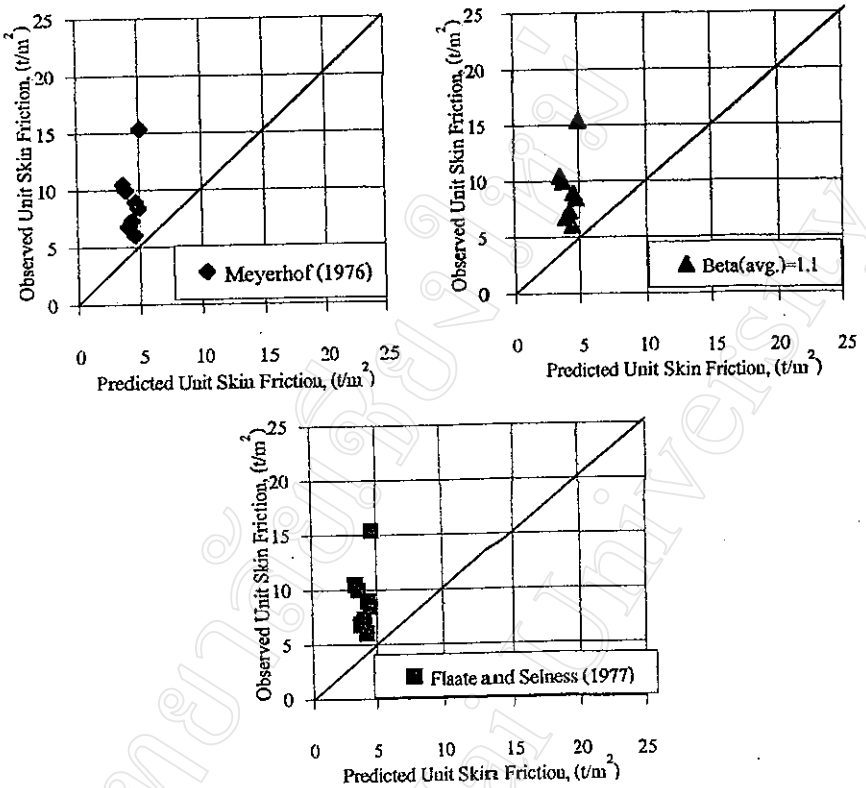
(Stage IV กรณีที่ไม่มี End Bearing)



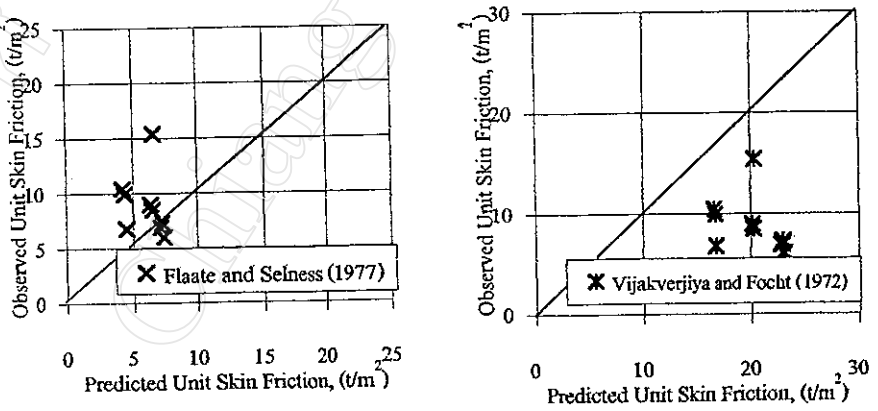
รูปที่ 5.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง δ/δ_{max} กับ $Q_u/Q_{u(max)}$ พฤติกรรมการรับแรงดึง-แรงกดของเสาเข็มทดสอบ TC ที่ระดับทดสอบ –2.40 ม.



รูปที่ 5.42 แสดงการเปรียบเทียบแรงเสียดทานผิวที่วัดได้ กับ ที่ประมาณจากวิธีหน่วยแรงรวม (ใช้ผลการทดสอบ Tension Test ปรับเทียบมาเป็น Compression Test)



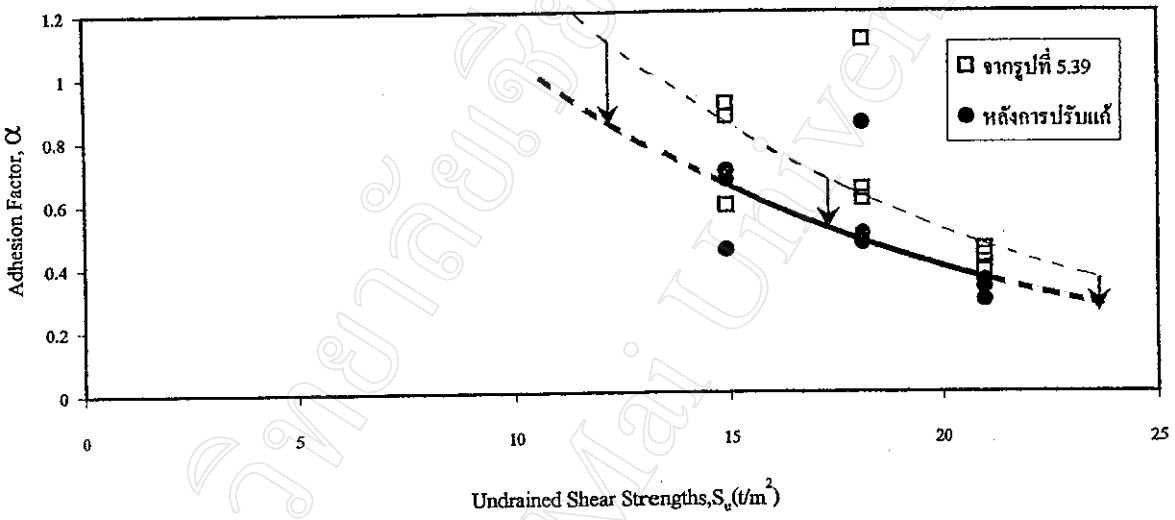
ก) วิธีหน่วยแรงประสิทธิผล



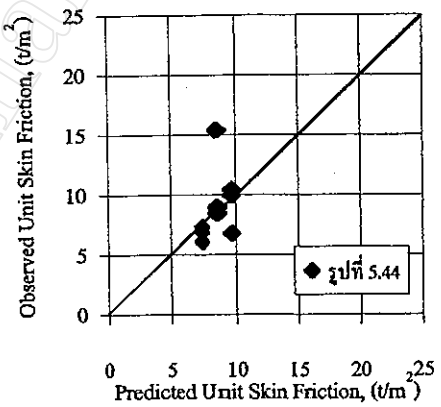
ข) วิธีหน่วยแรงรวมร่วมกับหน่วยแรงประสิทธิผล

รูปที่ 5.43 แสดงการเปรียบเทียบแรงเสียดทานผิวที่วัดได้ กับ ที่ประมาณจากวิธีหน่วยแรงประสิทธิผล และ วิธีหน่วยแรงประสิทธิผลร่วมกับหน่วยแรงรวม (ปรับเทียบแรงดึงเป็นแรงกด)

จากความแตกต่างแรงดึงกับแรงกดดังกล่าวได้ทำการปรับแก้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะกับค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำจากรูปที่ 5.39 มาเป็นกราฟความสัมพันธ์ใหม่ได้แสดงดังรูปที่ 5.44 และเมื่อใช้กราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 5.44 นี้ประมาณหน่วยแรงเสียดทานผิวจากข้อมูลเสาเข็มทดสอบ T1 T2 และTC (คิดแบบการกดและข้อมูลแสดงไว้ในตารางที่ ค.6 ภาคผนวก ค) ผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 5.45 ซึ่งให้ค่าการประมาณได้ดีกว่าวิธีของ Bowles (1997), Peck (1958), McCarthy (1988) และ Tomlinson (1994)



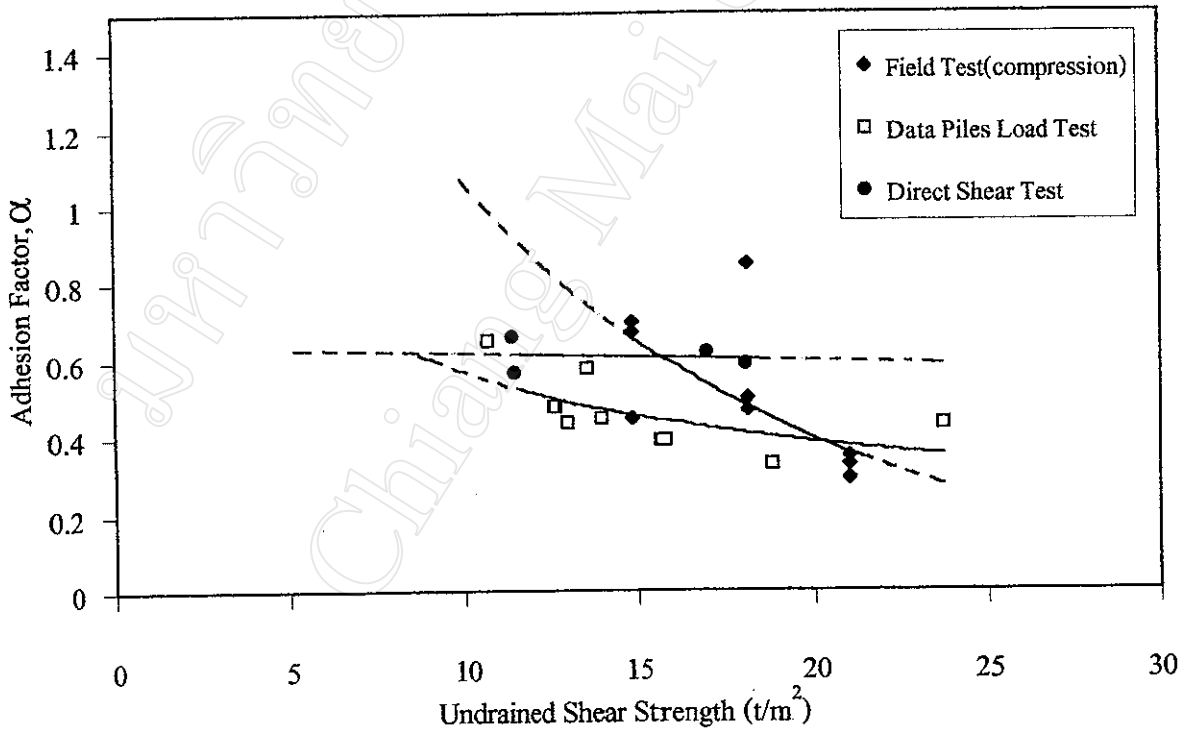
รูปที่ 5.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion Factor กับ ค่า Undrained Shear Strength จากผลการทดสอบเสาเข็มในสนาม (ปรับแก้จากรูปที่ 5.39)



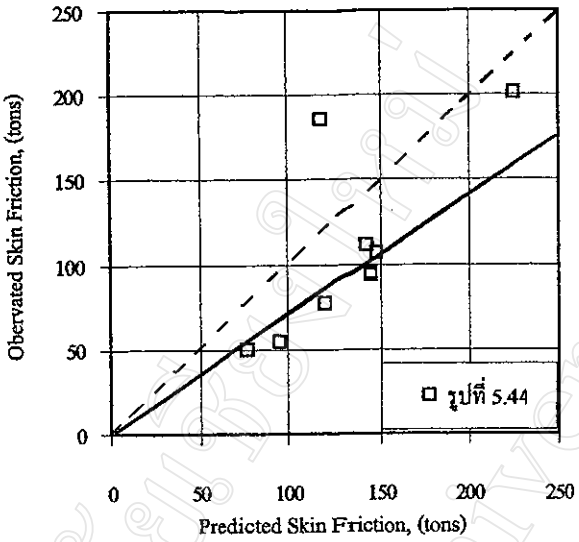
รูปที่ 5.45 แสดงการเปรียบเทียบหน่วยแรงเสียดทานผิวที่ประเมินจากรูปที่ 5.44 กับ หน่วยแรงเสียดทานผิวที่วัดได้

5.5 การเปรียบเทียบงานวิจัยทั้ง 3 ส่วน

เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การยึดเกาะกับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ได้จากงานวิจัยทั้ง 3 ส่วนเปรียบเทียบร่วม กันซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.46 จะเห็นได้ว่าลักษณะกราฟจากการทดสอบเสาเข็มมีความชันมากกว่ากราฟความสัมพันธ์จากงานวิจัยส่วนแรกและกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองเฉือนตรงและจากการที่ใช้กราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากผลการทดสอบเสาเข็มในสนาม (ปรับเทียบแรงแล้ว รูปที่ 5.44) ประมาณค่าแรงเสียดทานผิวของข้อมูลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกเสาเข็ม 9 ต้น (จากงานวิจัยส่วนแรก) ซึ่งผลการประมาณและเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 5.47 และค่าทางสถิติแสดงดังตารางที่ 5.16 นั้นคือการประมาณแรงเสียดทานผิวโดยรูปที่ 5.46 มีแนวโน้มให้ค่าการประมาณมากกว่าค่าที่วัดได้ (a = 0.81) และ ค่า R^2 ต่ำกว่าสมการอื่นๆ ในวิธีเดียวกัน เช่น Bowles (1997), Peck (1958), McCarthy (1988) และ รูปที่ 5.4 (จากงานวิจัยส่วนแรก)



รูปที่ 5.46 แสดงการเปรียบเทียบค่า Adhesion Factor กับ ค่า Undrained Shear Strength จากงานวิจัยทั้ง 3 ส่วน



รูปที่ 5.47 แสดงแรงเสียดทานผิวที่ประมาณได้จากกราฟจากรูปที่ 5.44 เทียบกับค่าที่ได้จากผลการทดสอบเสาเข็ม

ตารางที่ 5.16 แสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการทำนายแรงเสียดทานผิวโดยใช้กราฟรูปที่ 5.44

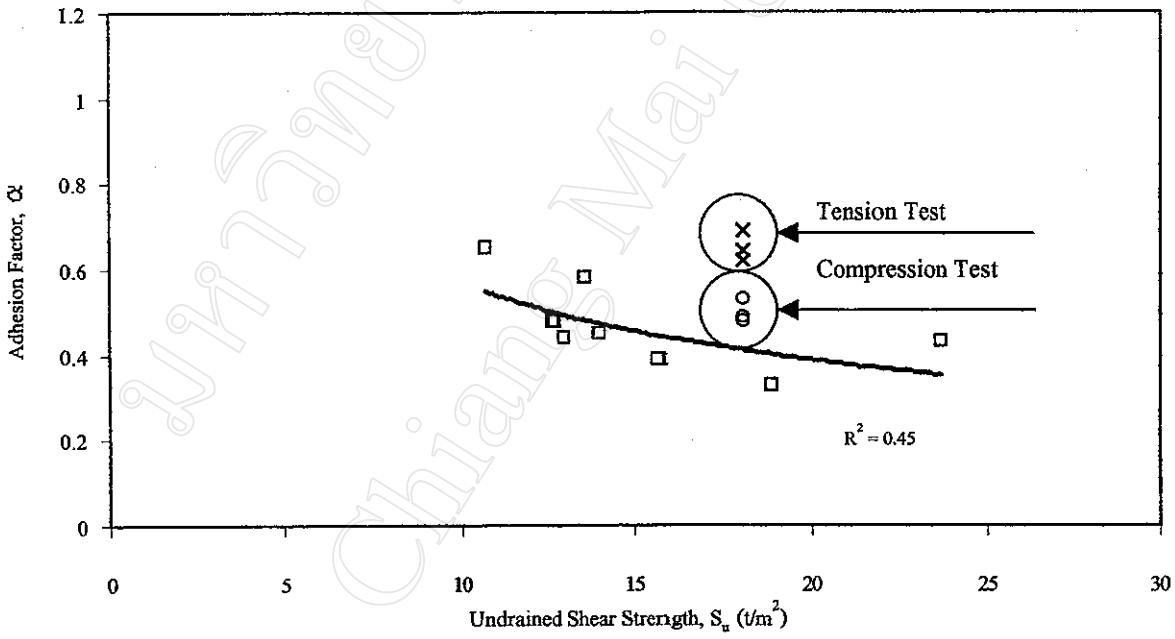
วิธี	y = ax			y = ax + b			
	a	R^2	σ	a	b	R^2	σ
รูป 5.44	0.81	0.53	36.22	0.95	-19.73	38.22	0.54

กรณีที่นำผลทดสอบเสาเข็มทั้ง 3 ต้นพิจารณาร่วมกับข้อมูลจากงานวิจัยส่วนแรก 9 ต้น โดยที่พิจารณาเสาเข็มทั้ง 3 ต้นที่ทำการทดสอบเป็นดินชั้นเดียว (คิดเฉลี่ยจากช่วง 2.40 ถึง 3.60) โดยไม่แบ่งคิดเป็นช่วงๆของการทดสอบเหมือนที่ผ่านมา ดังนั้นสรุปแรงดึงสุทธิของเสาเข็มทดสอบทดสอบแต่ละต้นแสดงดังตารางที่ 5.17 โดยใช้ผลต่างระหว่าง Stage I (ระดับ 3.60 ม.) กับ Stage IV (ระดับ 2.40) ในการวิเคราะห์หาหน่วยแรงเสียดทานผิวและสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ ใช้การวิเคราะห์ตามหัวข้อ 3.3.2 โดยค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำใช้การเฉลี่ยตามจำนวนตัวอย่างที่ได้ทำการทดสอบตลอดความยาวเสาเข็มและทำปรับแก้แรงดึงสุทธิจากตารางที่ 5.17 เป็นแรงกดเพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกเสาเข็ม 9 ต้นจากงานวิจัยส่วนแรก กราฟความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ กับ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ที่ได้แสดงดังรูป 5.48 และเมื่อใช้ผลทั้ง 3 ค่าที่ได้นี้ (Compression Test) ปรับแก้เส้นแนวโน้มใหม่ร่วมกับข้อมูล

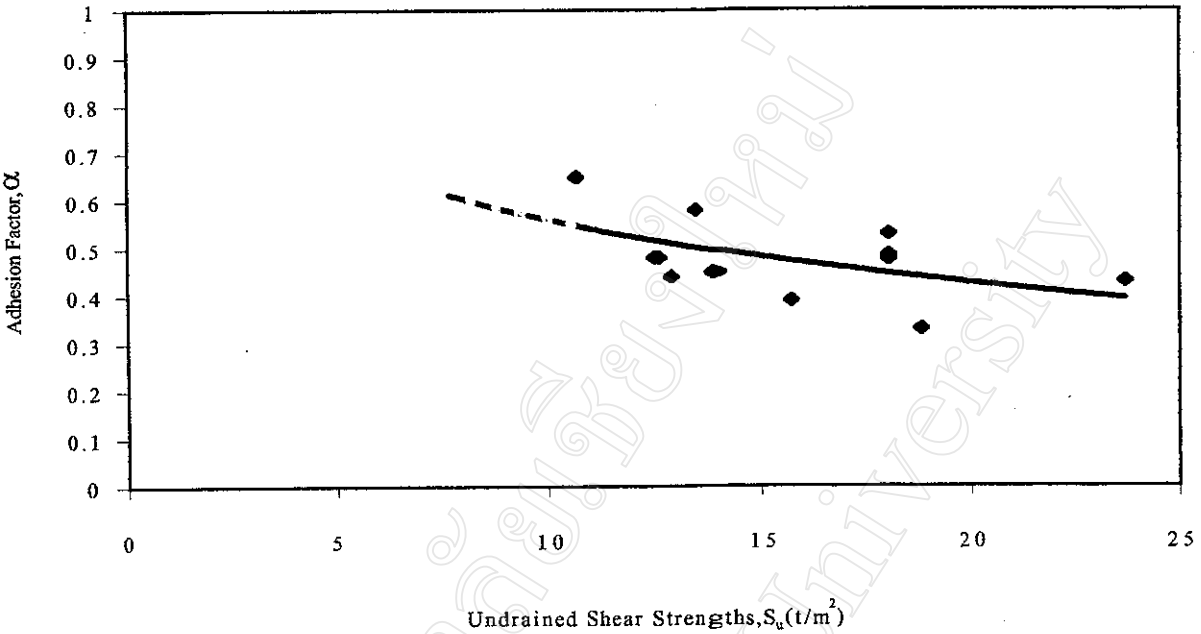
เดิม 9 ต้น ทำให้ได้เส้นกราฟความสัมพันธ์ ใหม่แสดงดังรูปที่ 5.49 และจากการใช้กราฟนี้ประมาณค่าแรงเสียดทานผิวกับข้อมูลเดิม (12 ต้น) ที่มีอยู่ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงดังตารางที่ 5.19 ผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 5.50 พบว่าให้ค่าการประมาณได้ดี โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.91 ค่าการประมาณใกล้เคียงกับ 1 (a = 0.91) มีค่าความคลาดเคลื่อน 18.9 ตัน และรูปที่ 5.51 เป็นการเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ที่ได้กับกราฟความสัมพันธ์ของนักวิจัยอื่นๆ

ตารางที่ 5.17 แสดงแรงดึงสุทธิของเสาเข็มทดสอบ T1 T2 และ TC

เสาเข็ม	แรงดึง Stage I (ตัน)	แรงดึง Stage IV (ตัน)	แรงดึงสุทธิ (ตัน)
T1	12.71	4.51	8.20
T2	13.21	4.24	8.97
TC	12.52	4.22	8.30



รูปที่ 5.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion Factor กับ ค่า Undrained Shear Strength จากผลการทดสอบเสาเข็มในสนาม (ปรับเทียบจากผลทดสอบการดึง) กรณีช่วงเดียวเฉลี่ย



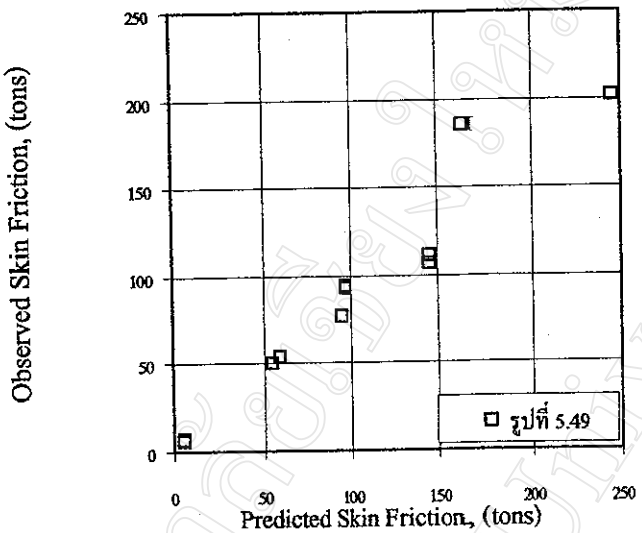
รูปที่ 5.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion Factor กับ ค่า Undrained Shear Strength (ปรับแก้เส้นแนวโน้ม

ตารางที่ 5.18 แสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการทำนายแรงเสียดทานผิวโดยใช้กราฟรูปที่ 5.49

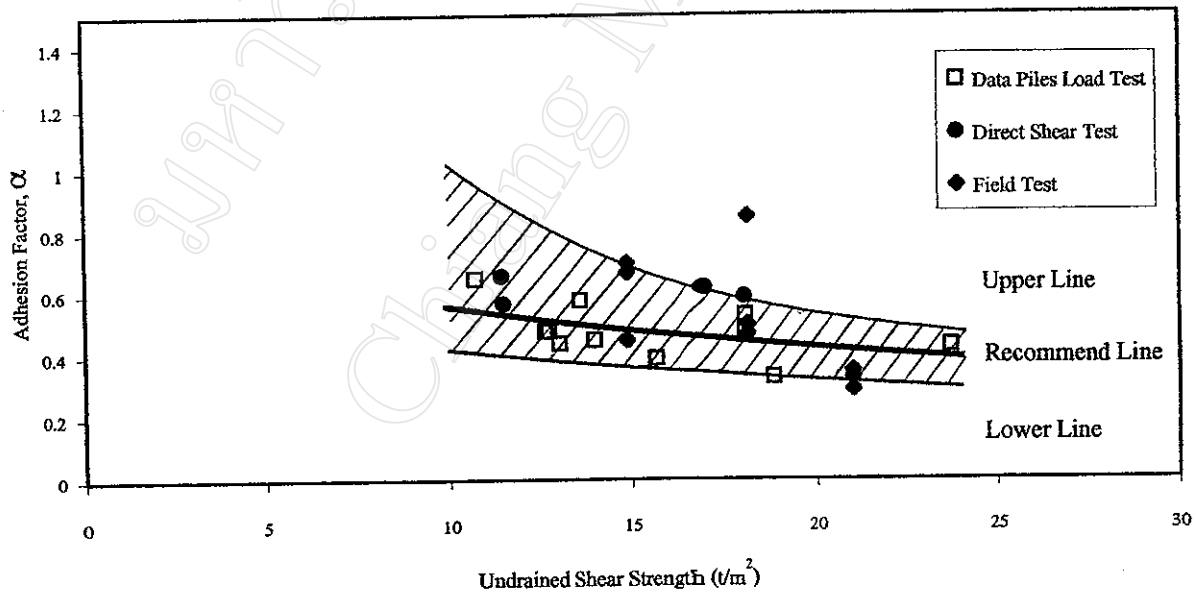
วิธี	y = ax			y = ax + b			
	a	R^2	σ	a	b	R^2	σ
รูป 5.49	0.91	0.91	18.94	O.86	6.92	0.92	19.31

ดังนั้นสำหรับเสาเข็มตอกในดินเหนียวแข็งเชียงใหม่การใช้วิธีหน่วยแรงรวมแนะนำให้ใช้วิธีหน่วยแรงรวมโดยอาศัยกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 5.49 ซึ่งสามารถใช้ประมาณได้ดีและลักษณะกราฟเมื่อเทียบกับนักวิจัยอื่นๆ ไม่แตกต่างมาก ส่วนวิธีหน่วยแรงประสิทธิผลในตอนนี้ยังไม่แนะนำให้ใช้เนื่องจากยังมีความซับซ้อนในเรื่องพฤติกรรมระหว่างเสาเข็มกับดินรอบๆ ทำให้การประมาณยังไม่ดีพอ จากกราฟความสัมพันธ์ที่ได้ในรูปที่ 5.49 ได้ทำการกำหนดขอบเขตเส้นกราฟขอบเขตสูงและขอบเขตต่ำโดยใช้จากผลการทดสอบเสาเข็มโดยการกด (ปรับเทียบจากแรง

ดึง) เพื่อเป็นช่วงในการพิจารณาควบคู่เส้นกราฟความสัมพันธ์ที่แนะนำไว้เส้นกราฟความสัมพันธ์ที่แสดงขอบเขตแสดงดังรูปที่ 5.51

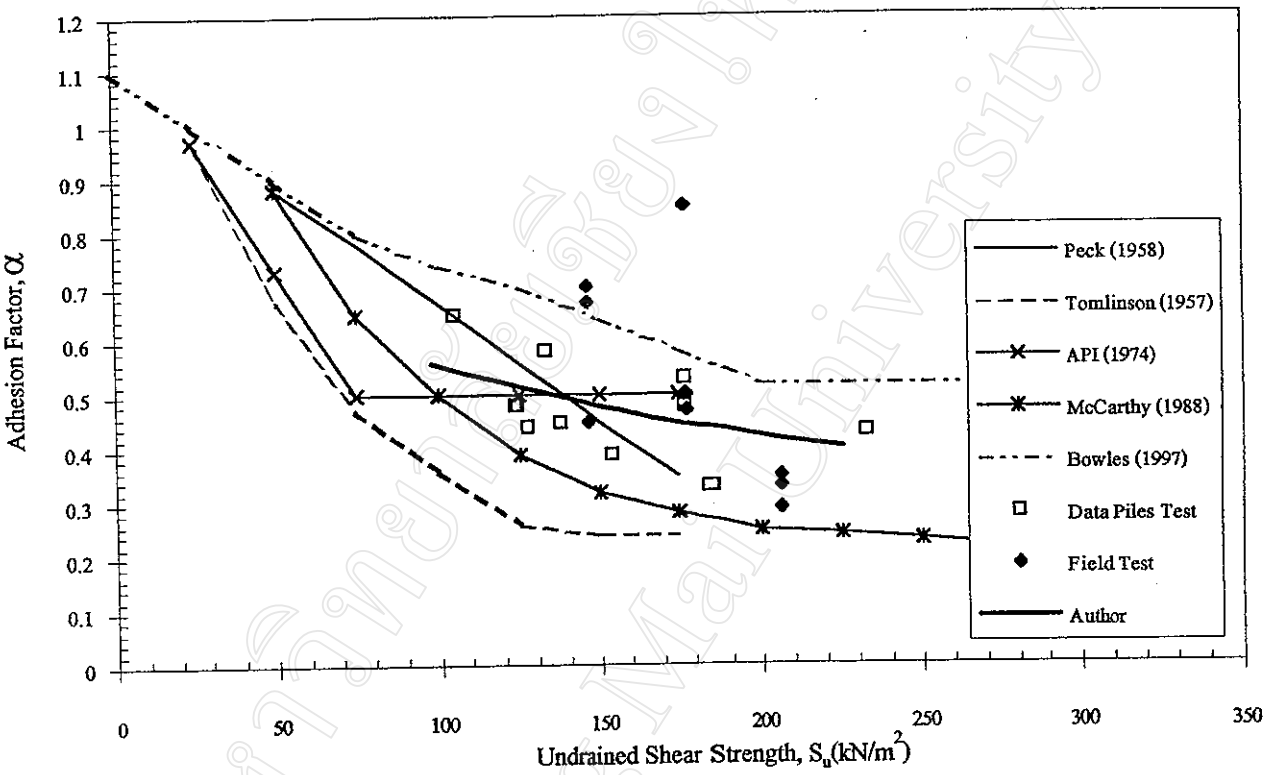


รูปที่ 5.50 แสดงแรงเสียดทานผิวที่ประมาณได้จากกราฟในรูปที่ 5.49 เทียบกับค่าวัดได้



รูปที่ 5.51 แสดงขอบเขตความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion Factor กับ ค่า Undrained Shear Strength

และได้ทำการเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ที่ได้กับนักวิจัยอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 5.52 พบว่ากราฟความสัมพันธ์ที่ได้เป็นไปลักษณะสอดคล้องกับนักวิจัยอื่นๆ โดยมีลักษณะวางตัวอยู่ในช่วงกลางๆ ของกลุ่มเส้นกราฟความสัมพันธ์



รูปที่ 5.52 แสดงการเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Adhesion Factor กับ Undrained Shear Strength กับนักวิจัยอื่นๆ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University