

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฒ
สัญลักษณ์	บ
 บทที่ 1 บทนำ	 1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย	2
 บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	 4
2.1 ทฤษฎี	4
2.1.1 วิธีวิเคราะห์โดยใช้หน่วยแรงรวม	4
2.1.2 วิธีวิเคราะห์โดยใช้หน่วยแรงประสิทธิผล	6
2.1.3 วิธีวิเคราะห์โดยใช้หน่วยแรงรวมร่วมกับหน่วยแรงประสิทธิผล	8
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการวิเคราะห์หน่วยแรงเสียดทานผิว	10
2.2.1 วิธีหน่วยแรงรวม	10
2.2.2 วิธีหน่วยแรงประสิทธิผล	14
2.2.3 วิธีหน่วยแรงรวมร่วมกับหน่วยแรงประสิทธิผล	17
2.3 คุณสมบัติของชั้นดินเชิงใหม่ในทางวิศวกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการทดสอบเสาเข็ม	20

	หน้า
บทที่ 3 การวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็มตอกในดินเหนียวแข็ง เชียงใหม่	23
3.1 บทนำ	23
3.2 ข้อมูลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็มตอกในดินเหนียว แข็งเชียงใหม่	
3.2.1 ลักษณะข้อมูลเสาเข็มทดสอบที่ใช้ในการศึกษา	23
3.2.2 ข้อมูลดินในพื้นที่ทำการทดสอบเสาเข็ม	23
3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล	24
3.3.1 การวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็มตอก	24
3.3.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ข้อมูลดินกับหน่วยแรงเสียดทานผิว	25
3.3.3 การวิเคราะห์ผลการศึกษาเชิงสถิติ	26
บทที่ 4 การทดสอบดินในห้องปฏิบัติการ และ การทดสอบเสาเข็มในสนาม	28
4.1 บทนำ	28
4.2 การเจาะเก็บตัวอย่างดิน	28
4.3 การทดสอบดินในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์	29
4.3.1 การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดิน	29
4.3.2 รายการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่มีขอบเขตจำกัด (Unconfined Compressive Test)	29
4.3.3 รายการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดิน (One- Dimensional Consolidation Test)	30
4.3.4 รายการทดสอบหากล้างรับแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test)	31
4.3.4 รายการทดสอบหากล้างรับแรงเฉือนด้วยเครื่องทดสอบ Triaxial Test	31
4.4 การทดสอบเสาเข็มในสนาม	33
4.4.1 เสาเข็มทดสอบ	33
4.4.2 การติดตั้งเสาเข็ม	33
4.4.3 การทดสอบเสาเข็ม	34
4.4.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ	37

	หน้า
บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์ ผลการทดสอบและการวิจารณ์	39
5.1 บทนำ	39
5.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มตอกในดินเหนียวแข็งเชิงใหม่	39
5.2.1 วิธีหน่วยแรงรวม	42
5.2.2 วิธีหน่วยแรงประสิทธิภาพ	46
5.2.3 วิธีหน่วยแรงรวมร่วมกับหน่วยแรงประสิทธิภาพ	49
5.2.4 การวิจารณ์ผลการวิเคราะห์	52
5.3 ผลการทดสอบตัวอย่างดินในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์	52
5.3.1 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวแข็งเชิงใหม่	52
5.3.2 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดิน (One-Dimensional Consolidation Test)	53
5.3.3 ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test)	54
5.3.3.1 ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือน โดยตรงแบบไม่ระบายน้ำของดิน	54
5.3.3.2 ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือน โดยตรงแบบไม่ระบายน้ำระหว่าง ดิน กับ คอนกรีตผิวเรียบ	57
5.3.4 ผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนด้วยเครื่องทดสอบ Triaxial Test	63
5.3.4.1 การทดสอบ Consolidated Undrained Triaxial Compression with Pore Pressure Measurement $\bar{C}_U$	63
5.4 ผลการทดสอบเสาเข็มในสนาม	64
5.4.1 ผลการทดสอบเสาเข็มโดยการดึง	64
5.4.2 ผลการทดสอบเสาเข็มโดยการกด	76
5.5 การเปรียบเทียบงานวิจัยทั้ง 3 ส่วน	82
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	88
6.1 สรุปผลการวิจัย	88
6.2 ข้อเสนอแนะ	89

	หน้า
บรรณานุกรม	90
ภาคผนวก	93
ภาคผนวก ก แสดงข้อมูลการทดสอบน้ำหมักบรรทุกเสาเข็มคอกในดินเหนียว แข็งเชียงใหม่ที่ผ่านมา	93
ภาคผนวก ข แสดงผลการทดสอบดินในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์	121
ภาคผนวก ค แสดงผลการทดสอบเสาเข็มที่ทำการทดสอบ	135
ภาคผนวก ง แสดงรายการอุปกรณ์ การติดตั้งและ การทดสอบเสาเข็ม	144
ภาคผนวก จ แสดงข้อมูลการทดสอบน้ำหมักบรรทุกเสาเข็มทดสอบ T1 T2 และTC	150
ประวัติผู้เขียน	158

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 แสดงคุณสมบัติทั่วไปของชั้นดินเชิงใหม่	19
2.2 แสดงการหาความเร็วในการเคลื่อนดินด้วยช่าง	20
4.1 แสดงรายการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน	30
4.2 แสดงรายการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่มีขอบเขตจำกัด (Unconfined Compressive Test)	30
4.3 แสดงรายการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดิน (One-Dimension Consolidation Test)	31
4.4 แสดงรายการทดสอบหาลำดับรับแรงเฉือน โดยตรงแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Direct Shear Test)	32
4.5 แสดงรายการทดสอบ Consolidated Undrained Triaxial Compression with Pore Pressure Measurement CU	32
4.6 แสดงการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการทดสอบเสาเข็ม	33
4.7 แสดงโปรแกรมการทดสอบเสาเข็มในสนาม	36
5.1 แสดงสรุปผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอกในดินเหนียวแข็ง เชิงใหม่	40
5.2 แสดงผลการวิเคราะห์เชิงสถิติโดยวิธีหน่วยแรงรวม	43
5.3 แสดงผลการวิเคราะห์เชิงสถิติของวิธีหน่วยแรงรวม จากรูปที่ 5.4	46
5.4 แสดงผลการวิเคราะห์เชิงสถิติของหน่วยแรงประสิทธิภาพโดยใช้ β เท่ากับ 1.1	47
5.5 แสดงผลการวิเคราะห์เชิงสถิติของวิธีหน่วยแรงรวมร่วมกับหน่วยแรงประ สิทธิภาพ	50
5.6 แสดงคุณสมบัติของตัวอย่างดินทางวิศวกรรม	53
5.7 แสดงผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดิน (One-Dimension Consolidation Test)	53
5.8 แสดงผลการทดสอบหาลำดับรับแรงเฉือน โดยตรงแบบไม่ระบายน้ำ (Direct Shear Test) ระดับความลึก 2.40-3.00 เมตร	60

ตาราง	หน้า
5.9 แสดงผลการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือน โดยตรงแบบ ไม่ระบายน้ำ (Direct Shear Test) ระดับความลึก 3.00-3.60 เมตร	60
5.10 แสดงหน่วยแรงและความเครียดของดินเหนียวแข็งเชิงใหม่ Consolidated Undrained Triaxial Compression with Pore Pressure Measurement CU	63
5.11 แสดงสรุปผลการทดสอบเสาเข็มในสนาม	64
5.12 แสดงแรงเสียดทานและหน่วยแรงเสียดทานในแต่ละระดับช่วงความลึก ของเสาเข็มทดสอบ T1 T2 และ TC	67
5.13 แสดงสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ สัมประสิทธิ์เบต้าและสัมประสิทธิ์แถมค้ำใน แต่ละระดับช่วงความลึกของเสาเข็มทดสอบ T1 T2 และ TC	71
5.14 แสดงสมการที่ใช้ในการประมาณหน่วยแรงเสียดทานผิว	73
5.15 แสดงสรุปข้อมูลดินที่ใช้สำหรับการประมาณหน่วยแรงเสียดทานผิว	73
5.16 แสดงผลการวิเคราะห์เชิงสถิติของการทำนายแรงเสียดทานผิวโดยใช้กราฟ รูปที่ 5.46	83
5.17 แสดงแรงดึงสุทธิของเสาเข็มทดสอบ T1 T2 และ TC	84
5.18 แสดงผลการวิเคราะห์เชิงสถิติของการทำนายแรงเสียดทานผิวโดยใช้กราฟ รูปที่ 5.49	85
ก.1 ที่ตั้งโครงการของข้อมูลการทดสอบน้ำหนักรรทุกเสาเข็ม	95
ก.2 แสดงรายละเอียดเสาเข็มที่ทำการทดสอบน้ำหนักรรทุกในดินเหนียวแข็ง เชิงใหม่	97
ก.3 แสดงสรุปลักษณะของชั้นดินบริเวณที่ทำการทดสอบเสาเข็ม	99
ก.4 แสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักรรทุกประลัษที่ประมาณได้โดยวิธีต่างๆ	120
ข.1 แสดงสรุปคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวแข็งในบริเวณที่ทำการ ทดสอบเสาเข็ม	125
ข.2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางค้ำนี้ผลการเจาะสำรวจบริเวณประดู คณะวิศวกรรมศาสตร์	126
ค.1 แสดงกำลังรับแรงดึงประลัษ กับ เวลา	137
ค.2 แสดงการเปรียบเทียบแรงเสียดทานผิวที่ประมาณจากวิธีต่างๆกับแรงเสียด ทานผิวที่วัดได้จากการทดสอบเสาเข็มโดยการดึง (วิธีหน่วยแรงรวม)	138

ตาราง	หน้า
ค.3 แสดงการเปรียบเทียบแรงเสียดทานผิวที่ประมาณจากวิธีต่างๆกับแรงเสียดทานผิวที่วัดได้จากการทดสอบเสาเข็มโดยการดึง (วิธีหน่วยแรงประสิทธิผล และวิธีหน่วยแรงรวมร่วมกับหน่วยแรงประสิทธิผล)	138
ค.4 แสดงการเปรียบเทียบแรงเสียดทานผิวที่ประมาณจากวิธีต่างๆกับแรงเสียดทานผิวที่วัดได้จากการทดสอบเสาเข็มโดยเปรียบเทียบแรงกดจากแรงดึง (วิธีหน่วยแรงรวม)	140
ค.5 แสดงการเปรียบเทียบแรงเสียดทานผิวที่ประมาณจากวิธีต่างๆกับแรงเสียดทานผิวที่วัดได้จากการทดสอบเสาเข็มโดยเปรียบเทียบแรงกดจากแรงดึง (วิธีหน่วยแรงประสิทธิผลและวิธีหน่วยแรงรวมร่วมกับหน่วยแรงประสิทธิผล)	140
ค.6 แสดงการเปรียบเทียบแรงเสียดทานผิวที่ประมาณจากรูปที่ 5.44 กับแรงเสียดทานผิวที่วัดได้จากการทดสอบเสาเข็ม โดยเปรียบเทียบแรงจากแรงดึงเป็นแรงกด	141
ง.1 แสดงน้ำหนักของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเสาเข็ม โดยการกดและการดึง	145

สารบัญ ภาพ

รูป	หน้า
2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า สัมประสิทธิ์การยึดเกาะ กับ กำลังรับแรง เฉือนแบบไม่ระบายน้ำ	5
2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์การยึดเกาะ กับ กำลังรับแรง เฉือนแบบไม่ระบายน้ำโดยนักวิจัยต่างๆ :Kerisel (1965), Tomlinson (1957), Woodward and Boitano (1961), Peck (1958), Dennis and Olson (1983), American Petroleum Institute (1974), Sowers and Sowers (1970), McCarthy (1977).	6
2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงในแนวดิ่ง กับ หน่วยแรงสูงสุดใน แนวนอนโดยวงกลมของมอร์	8
2.4 แสดงวิธีการประเมินหาแรงเสียดทานผิวโดยวิธี Vijakverjiya and Focht	9
2.5 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า λ กับ ความยาวเสาเข็มที่ฝังในดิน	9
2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ กับ ค่ากำลังรับแรง เฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวแข็ง	11
2.7 แสดงการเปรียบเทียบการทำนายน้ำหนักรบรรทุกประลัยกับน้ำหนักที่ทำ การวัดได้จริงในสนามจากผลการทดสอบเสาเข็ม	10 12
2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion Factor กับค่า Undrained Shear Strength	13
2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยแรงเสียดทานผิว กับ หน่วยแรงประ สิทธิภาพในแนวดิ่ง	15
2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิว กับ ระยะที่เสาเข็มอยู่ ในดินเหนียวแข็ง	15
2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิวกับค่าหน่วยแรงประ สิทธิภาพในแนวดิ่ง	16
2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิวกับค่ากำลังรับแรงเฉือน ของดินแบบไม่ระบายน้ำ	16

รูป	หน้า
2.13 แสดงรูปแบบของกราฟวิธี Modified Mazurkiewicz	21
3.1 แสดงขั้นตอนในการประเมินหาค่าหน่วยแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มคอก ในชั้นดินเหนียวแข็งเชียงใหม่	25
4.1 แสดงระดับการทดสอบเสาเข็ม โดยการดึงและการทดสอบโดยการกด	35
4.2 แสดงขั้นตอนการประเมินหาหน่วยแรงเสียดทานผิวในช่วงระดับการ ทดสอบ	37
5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f_s กับ $S_{u(avg.)}$	41
5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f_s กับ $\sigma'_{v(avg.)}$	42
5.3 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างแรงเสียดทานผิวจากผลการทดสอบน้ำ หนักบรรทุเสาเข็ม กับ การทำนายโดยใช้วิธีหน่วยแรงรวม โดยนักวิจัย ต่างๆ	43
5.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ กับ ค่ากำลังรับ แรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวแข็งเชียงใหม่	45
5.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การยึดเกาะ กับ ค่ากำลังรับ แรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ : เปรียบเทียบกับนักวิจัยอื่นๆ	45
5.6 แสดงแรงเสียดทานผิวที่ประเมินได้จากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 5.4 เทียบกับที่ได้จากการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็ม	46
5.7 การประเมินหาสัมประสิทธิ์เบต้าเฉลี่ย	47
5.8 แสดงการเปรียบเทียบแรงเสียดทานผิวจากการสำรวจ กับ การทำนายโดย β เฉลี่ย = 1.1	48
5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์เบต้า กับ ความยาวเสาเข็มที่ฝัง ในดินเหนียว	48
5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิว กับ กำลังรับน้ำหนัก แบบไม่มีการระบายน้ำ และ หน่วยแรงสุทธิในแนวตั้ง	49
5.11 แสดงการเปรียบเทียบแรงเสียดทานผิวประเมินจริง กับ ที่คาดคะเนโดยสม การของ Vijakverjiya and Focht	50
5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แถมดำ (λ) กับ ระยะความยาวที่ เสาเข็มฝังใน ดิน (ดินเหนียวแข็งเชียงใหม่)	51

รูป	หน้า
5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แลมด้า (λ) กับ ระยะความยาวที่เสาเข็มฝังในดิน (เทียบกับข้อมูลของ Vijakverjiya and Focht (1972))	51
5.14 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง Shear Stress กับ Horizontal Strain จากการทดลองการเฉือนตรงของตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 2.40-3.00 เมตร	55
5.15 แสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงในแนวตั้งของดินตัวอย่างกับความเครียด จากการทดสอบการเฉือนตรง ที่ระดับความลึก 2.40-3.00ม.	55
5.16 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง Shear Stress กับ Horizontal Strain จากการทดลองการเฉือนตรงของตัวอย่างดินที่ระดับ ความลึก 3.00-3.60 เมตร	56
5.17 แสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงในแนวตั้งของดินตัวอย่างกับความเครียด จากการทดสอบการเฉือนตรง ที่ระดับความลึก 3.00-3.60 ม.	56
5.18 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง Shear Stress กับ Horizontal Strain จากการทดลองการเฉือน ตรง ระหว่างตัวอย่างดินกับตัวอย่างคอนกรีต ที่ระดับความลึก 2.40-3.00 เมตร	58
5.19 แสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงในแนวตั้งของดินตัวอย่างกับความเครียด จากการทดสอบการเฉือนตรง ระหว่างตัวอย่างดินกับตัวอย่างคอนกรีต ที่ระดับความลึก 2.40-3.00 เมตร	58
5.20 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง Shear Stress กับ Horizontal Strain จากการทดลองการเฉือน ตรง ระหว่างตัวอย่างดิน กับตัวอย่างดิน ที่ระดับความลึก 3.00-3.60 เมตร	59
5.21 แสดงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงในแนวตั้งของดินตัวอย่างกับความเครียด จากการทดสอบการเฉือนตรง ระหว่างตัวอย่างดินกับตัวอย่างคอนกรีต ที่ระดับความลึก 3.00-3.60 ม.	59
5.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Shear Stress กับค่า Normal Stress ของดินตัวอย่าง และดินตัวอย่างกับคอนกรีตผิวเรียบ ที่ระดับความลึก2.40-3.00ม.	61
5.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Shear Stress กับค่า Normal Stress ของดินตัวอย่างและดินตัวอย่างกับคอนกรีตผิวเรียบ ที่ระดับความลึก3.00-3.60 ม.	61
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.	62

รูป	หน้า
5.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion Factor กับ Undrained Shear Strength จากการทดสอบ Direct Shear Test (ปรับแก้จากรูปที่ 5.24)	63
5.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึง กับ ระยะเคลื่อนตัวของเสาเข็มของเสาเข็ม T1	65
5.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึง กับ ระยะเคลื่อนตัวของเสาเข็มของเสาเข็ม T2	65
5.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึง กับ ระยะเคลื่อนตัวของเสาเข็มของเสาเข็ม TC	66
5.29 แสดงการกระจายน้ำหนักตามความลึกของเสาเข็มที่ทดสอบโดยการดึง	66
5.30 แสดงหน่วยแรงเสียดทานผิวในแต่ละช่วงของการทดสอบ	67
5.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง δ/δ_{max} กับ $Q_u/Q_{u(max)}$ พฤติกรรมการรับแรงดึงของเสาเข็มทดสอบ T1	68
5.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง δ/δ_{max} กับ $Q_u/Q_{u(max)}$ พฤติกรรมการรับแรงดึงของเสาเข็มทดสอบ T2	69
5.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง δ/δ_{max} กับ $Q_u/Q_{u(max)}$ พฤติกรรมการรับแรงดึงของเสาเข็มทดสอบ TC	69
5.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า α , λ , β กับความลึกในแต่ละระดับความลึก	70
5.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิวกับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ	72
5.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทานผิว กับ หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง	72
5.37 แสดงการเปรียบเทียบแรงเสียดทานผิวที่ประเมินจากสมการวิธีหน่วยแรงรวม กับ แรงเสียดทานผิวที่วัดได้	74
5.38 แสดงการเปรียบเทียบแรงเสียดทานผิวที่ประเมินจากสมการวิธีหน่วยแรงประสิทธิผล และวิธีหน่วยแรงรวมร่วมกับหน่วยแรงประสิทธิผล กับ แรงเสียดทานผิวที่วัดได้	78
5.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion Factor กับ ค่า Undrained Shear Strength จากผลการทดสอบเสาเข็มในสนาม	76

รูป	หน้า
5.40 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง น้ำหนักบรรทุก กับ การเคลื่อนตัวของเสา เข็มของการทดสอบ โดยการกด และ การดึง เสาเข็มทดสอบ TC (Stage IV กรณีที่ไม่มี Endbearing)	78
5.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง δ/δ_{max} กับ $Q_u/Q_{u(max)}$ พฤติกรรมการรับแรง ดึง-แรงกดของเสาเข็มทดสอบ TC ที่ระดับทดสอบ -2.40 ม.	78
5.42 แสดงการเปรียบเทียบแรงเสียดทานผิวที่วัดได้ กับ ที่ประมาณจากวิธีหน่วย แรงรวม (ใช้ผลการทดสอบ Tension Test ปรับเทียบมาเป็น Compression Test)	79
5.43 แสดงการเปรียบเทียบแรงเสียดทานผิวที่วัดได้ กับ ที่ประมาณจากวิธีหน่วย แรงประสิทธิผลและวิธีหน่วยแรงประสิทธิผลร่วมกับหน่วยแรงรวม (ปรับ เทียบแรงดึงเป็นแรงกด)	80
5.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion Factor กับ ค่า Undrained Shear Strength จากผลการทดสอบเสาเข็มในสนาม (ปรับแก้จากรูปที่ 5.39)	81
5.45 แสดงการเปรียบเทียบหน่วยแรงเสียดทานผิวที่ประเมินจากรูปที่ 5.46 กับ หน่วยแรงเสียดทานผิวที่วัดได้	81
5.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion Factor กับ ค่า Undrained Shear Strength จากผลการทดสอบเสาเข็มในสนาม จากงานวิจัยทั้ง 3 ส่วน	82
5.47 แสดงแรงเสียดทานผิวที่ประเมินได้จากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 5.46 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบเสาเข็ม	83
5.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion Factor กับ ค่า Undrained Shear Strength จากผลการทดสอบเสาเข็มในสนาม (ปรับเทียบจากผลการ ทดสอบโดยการดึง) กรณีคิดช่วงเฉื่อยเฉื่อย	84
5.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion Factor กับ ค่า Undrained Shear Strength (ปรับแก้เส้นแนวโน้ม)	85
5.50 แสดงแรงเสียดทานผิวที่ประมาณได้จากกราฟในรูปที่ 5.49 เทียบกับค่าที่ วัดได้	86
5.51 แสดงขอบเขตความสัมพันธ์ระหว่างค่า Adhesion Factor กับ ค่า Undrained Shear Strength	86

รูป	หน้า
5.52 แสดงการเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Adhesion Factor กับ Undrained Shear Strength กับนักวิจัยอื่นๆ	87
ก.1 แสดงตำแหน่งที่ตั้งของพื้นที่ทำการทดสอบหาแรงเสียดทานผิวของเสาเข็มตอกในดินเหนียวแข็งเชียงใหม่	94
ก.2 แสดงตำแหน่งที่ตั้งของโครงการ 9 โครงการจากข้อมูลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกทุกเสาเข็ม	96
ก.3 แสดงวิธีหา Average Undrained Shear Strength โดยวิธีค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก	98
ก.4 แสดงวิธีการหา Average Effective Overburden Pressure โดยวิธีค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก	98
ก.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัวในการให้น้ำหนักรอบสุดท้าย ของเสาเข็มทดสอบโครงการ ก่อสร้างอาคารศูนย์การค้ากาดสวนแก้ว	102
ก.6 แสดงกราฟการหาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัย โดยวิธี Modified Mazurkiewicz ของโครงการ ก่อสร้างอาคารศูนย์การค้ากาดสวนแก้ว	103
ก.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัวในการให้น้ำหนักรอบสุดท้าย ของเสาเข็มทดสอบโครงการ ก่อสร้างอาคารสำนักงานท่าอากาศยาน	104
ก.8 แสดงกราฟการหาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัย โดยวิธี Modified Mazurkiewicz ของโครงการ ก่อสร้างอาคารสำนักงานท่าอากาศยาน	105
ก.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัวในการให้น้ำหนักรอบสุดท้าย ของเสาเข็มทดสอบโครงการ ก่อสร้างอาคาร SRLAND G4	106
ก.10 แสดงกราฟการหาค่าน้ำหนักบรรทุกประลัย โดยวิธี Modified Mazurkiewicz ของโครงการ ก่อสร้างอาคาร SRLAND G4	107
ก.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัวในการให้น้ำหนักรอบสุดท้าย ของเสาเข็มทดสอบโครงการ ก่อสร้างอาคาร SRLAND F5	108

รูป	หน้า
ก.12 แสดงกราฟการหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยโดยวิธี Modified Mazurkiewicz ของโครงการก่อสร้างอาคาร SRLAND F5	109
ก.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัวในการให้น้ำหนักรอบสุดท้าย ของเสาเข็มทดสอบ โครงการก่อสร้าง โรงแรมพรพิงค์	110
ก.14 แสดงกราฟการหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยโดยวิธี Modified Mazurkiewicz ของโครงการก่อสร้าง โรงแรมพรพิงค์	111
ก.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัวในการให้น้ำหนักรอบสุดท้าย ของเสาเข็มทดสอบ โครงการสำนักงานบริษัทนิคมพาณิชย์	112
ก.16 แสดงกราฟการหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยโดยวิธี Modified Mazurkiewicz ของโครงการสำนักงานบริษัทนิคมพาณิชย์	113
ก.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัวในการให้น้ำหนักรอบสุดท้าย ของเสาเข็มทดสอบ โครงการเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยแม่โจ้	114
ก.18 แสดงกราฟการหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย โดยวิธี Modified Mazurkiewicz ของโครงการเทคโนโลยีการประมงมหาวิทยาลัยแม่โจ้	115
ก.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัวในการให้น้ำหนักรอบสุดท้าย ของเสาเข็มทดสอบ โครงการ ก่อสร้างอาคารเรียน พลศึกษามหาวิทยาลัยแม่โจ้	116
ก.20 แสดงกราฟการหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย โดยวิธี Modified Mazurkiewicz ของโครงการ ก่อสร้างอาคารเรียนพลศึกษามหาวิทยาลัยแม่โจ้	117
ก.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัวในการให้น้ำหนักรอบสุดท้าย ของเสาเข็มทดสอบ โครงการ ก่อสร้างแฟลตข้าราชการมหาวิทยาลัยแม่โจ้	118
ก.22 แสดงกราฟการหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยโดยวิธี Modified Mazurkiewicz ของโครงการ ก่อสร้างแฟลตข้าราชการมหาวิทยาลัยแม่โจ้	119
ข.1 แสดงที่ตั้งที่ทำการเจาะเก็บตัวอย่างดินและตำแหน่งเสาเข็มทดสอบ บริเวณประตูคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	122

รูป	หน้า
ข.2 แสดงตำแหน่งหลุมเจาะเก็บตัวอย่างดินและตำแหน่งเสาเข็มทดสอบ	123
ข.3 แสดงสรุปลักษณะชั้นดินบริเวณที่ทดสอบเสาเข็ม	124
ข.4 แสดง $c\text{-log } \sigma_v'$ จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดิน	132
ข.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงควีเอเคอร์กับความเครียด จากการทดสอบ Consolidated Undrained Triaxial Compression with Pore Pressure Measurement $\overline{CU}$	133
ข.6 แสดงพารามิเตอร์ c' และ ϕ' จากการทดสอบ Consolidated Undrained Triaxial Compression with Pore Pressure Measurement $\overline{CU}$	134
ค.1 แสดงการเปรียบเทียบ กำลังรับแรงดิ่ง กับ การเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ทดสอบ T1,T2 และ TC ในการทดสอบครั้งแรก	136
ค.2 แสดงกำลังรับแรงดิ่งประลัย กับ เวลา ของเสาเข็มตอก	137
ค.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำในแต่ละช่วงของการทดสอบเสาเข็ม	139
ค.4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง น้ำหนักบรรทุก กับ การเคลื่อนตัวของเสาเข็มของการทดสอบโดยการกดและการดึง เสาเข็มทดสอบ TC (Stage I กรณีที่มี End Bearing)	142
ค.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง δ/δ_{max} กับ $Q_u/Q_{u(max)}$ พฤติกรรมการรับแรงดิ่ง-แรงกดของเสาเข็มทดสอบ TC ที่ระดับทดสอบ -3.60 ม.	143
ง.1 แสดงรูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบเสาเข็มโดยการดึง	146
ง.2 แสดงตัวอย่างคอนกรีตผิวเรียบที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตรงระหว่างตัวอย่างดินกับตัวอย่างคอนกรีตผิวเรียบ	147
ง.3 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเสาเข็ม	147
ง.4 แสดงตัวอย่างการทดสอบเสาเข็มใน Stage II ของเสาเข็มทดสอบ TC โดยการดึง	148
ง.5 แสดงตัวอย่างการทดสอบเสาเข็มใน Stage IV ของเสาเข็มทดสอบ TC โดยการกด	148
ง.6 แสดงสรุป Stage การทดสอบ จากเสาเข็มทดสอบ TC	149

สัญลักษณ์

A_s	=	พื้นที่ผิวของเสาเข็ม
c_a	=	หน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างดิน กับ เสาเข็ม
c'_a	=	หน่วยแรงยึดเหนี่ยวประสิทธิผลระหว่างดิน กับ เสาเข็ม
$\overline{CU}$	=	Consolidated Undrained Triaxial Compression with Pore Pressure Measurement
f_s	=	หน่วยแรงเสียดทานผิว (Unit Skin Friction)
I_p	=	ดัชนีความเหนียว
K_s	=	สัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างของดิน
OCR	=	อัตราส่วนของหน่วยแรงดันของดินในแนวดิ่งในอดีต ต่อ หน่วยแรงดันดินในแนวดิ่งปัจจุบัน
Q_p	=	แรงต้านทานปลายเสาเข็ม (End Bearing Capacity)
Q_{ult}	=	น้ำหนักบรรทุกปลาย (Ultimate Pile Capacity)
R^2	=	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination)
S_u	=	กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength)
T1	=	เสาเข็มทดสอบ T1
T2	=	เสาเข็มทดสอบ T2
TC	=	เสาเข็มทดสอบ TC
τ_a	=	หน่วยแรงเฉือนระหว่างดิน กับ เสาเข็ม
ϕ_a	=	มุมของแรงเสียดทานระหว่างดิน กับ เสาเข็ม
σ_n	=	หน่วยแรงตั้งฉากกระทำที่เสาเข็ม
δ'	=	มุมของแรงเสียดทานประสิทธิผลระหว่างดิน กับ เสาเข็ม
τ_{rz}	=	หน่วยแรงเฉือน หรือ หน่วยแรงเสียดทานผิว
σ	=	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error)
ϕ'	=	มุมของแรงเสียดทานประสิทธิผลของดินในสภาวะถูกกระทบกระเทือน
σ'_n	=	หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวรัศมี
β	=	สัมประสิทธิ์เบต้า (Beta Factor)

α = สัมประสิทธิ์การยึดเกาะ (Adhesion Factor)

$\sigma_v'_{(av)}$ = หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งเฉลี่ย (Average Effective Vertical Stress)

λ = สัมประสิทธิ์แลมด้า (Lamda Factor)

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University