

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฦ

บทที่

1	บทนำ.....	1
1.1	ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2	วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3	ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2	ปฐมนิเทศวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1	พฤติกรรมการรับแรงกระทำด้านข้างของเสาเข็มในชั้นดินเหนียว.....	4
2.1.1	เสาเข็มที่ไม่มีการยึดรั้งที่หัวเสาเข็ม	5
2.1.2	เสาเข็มที่มีการยึดรั้งที่หัวเสาเข็ม	6
2.2	การทดสอบเสาเข็มรับแรงด้านข้าง.....	7
2.2.1	การทดสอบเสาเข็มรับแรงด้านข้างในห้องปฏิบัติการ	8
2.2.2	การทดสอบเสาเข็มรับแรงด้านข้างในสนาม	15
2.3	วิธี p-y curve.....	25
2.4	การวิเคราะห์เสาเข็มที่รับแรงกระทำด้านข้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	27
2.4.1	การวิเคราะห์เสาเข็มรับแรงกระทำด้านข้างในชั้นดินกรุงเทพ	27

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5	ผลของ pile cap ต่อการโก่งตัวของเสาเข็มภายใต้แรงกระทำด้านข้าง.....	35
2.6	การจำลองเสาเข็มในซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์.....	37
2.7	พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองดิน Mohr-Coulomb soil model.....	39
2.7.1	ค่าโมดูลัสของชั้นดินเหนียวกรุงเทพ.....	39
2.7.2	ค่าโมดูลัสของชั้นดินทราย	46
2.8	พารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองดิน Hardening soil model.....	47
3	วิธีดำเนินงานวิจัย	48
3.1	ตำแหน่งที่ตั้งและลักษณะทางกายภาพของโครงการ.....	49
3.2	ตำแหน่งการเจาะสำรวจข้อมูลชั้นดินและการทดสอบเสาเข็ม.....	49
3.2.1	ข้อมูลแผนผังหลุมเจาะและตำแหน่งที่ทดสอบเสาเข็ม.....	49
3.2.2	ข้อมูลลักษณะชั้นดินและผลการเจาะสำรวจชั้นดิน	50
3.3	การทดสอบเสาเข็มรับแรงกระทำด้านข้าง.....	51
3.3.1	ข้อมูลการก่อสร้างและทดสอบเสาเข็ม	51
3.4	การวิเคราะห์เสาเข็มด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	52
3.4.1	การวิเคราะห์ห้กลับสำหรับแบบจำลองดิน HSM	55
3.4.2	การวิเคราะห์ห้กลับสำหรับแบบจำลองดิน MC	56
3.5	การประยุกต์ใช้ EBE กับเสาเข็มแบบรับแรงด้านข้าง.....	58
3.6	สรุปกรณีวิเคราะห์ในงานวิจัย.....	60
4	ผลการวิจัย.....	61
4.1	ข้อมูลผลทดสอบเสาเข็มขนาดใหญ่ในสนาม.....	61
4.1.1	การทดสอบเสาเข็มเดี่ยว.....	61
4.1.2	การทดสอบเสาเข็มกลุ่ม.....	62

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.3	การทดสอบเสาเข็มแบบเรีตูปตัวที่.....	65
4.1.4	เปรียบเทียบผลการทดสอบเสาเข็มขนาดใหญ่ในสนาม	67
4.2	การวิเคราะห์กลับเพื่อหาสตีฟเนสของแบบจำลองดิน.....	69
4.2.1	การวิเคราะห์กลับหาสตีฟเนสสำหรับแบบจำลองดิน MCCS.....	69
4.2.2	การวิเคราะห์กลับหาสตีฟเนสสำหรับแบบจำลองดิน MCVS.....	69
4.2.3	การวิเคราะห์กลับหาสตีฟเนสสำหรับแบบจำลองดิน HSM	70
4.2.4	ความสัมพันธ์ของความเครียดเฉือนเชิงวิศวกรรมกับสตีฟเนสของดิน.....	71
4.3	เปรียบเทียบแบบจำลองดินจากผลการวิเคราะห์.....	73
4.4	อิทธิพลความละเอียดของตาข่ายวิเคราะห์.....	74
4.5	ผลการจำลองเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มภายใต้แรงกระทำด้านข้าง.....	76
4.6	ผลของระยะห่างระหว่างเสาเข็มในกลุ่ม.....	82
4.7	การประยุกต์ใช้ EBE กับเสาเข็มแบบเรีต.....	84
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	87
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	87
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	88
	เอกสารอ้างอิง.....	89
	ภาคผนวก.....	92
	ภาคผนวก ก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	93
	ประวัติผู้เขียน.....	119

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลการทดสอบเสาเข็มในห้องปฏิบัติการแบบ in-line (Cox et al., 1984)	9
2.2 ผลการทดสอบเสาเข็มในห้องปฏิบัติการแบบ side-by-side (Cox et al., 1984)	10
2.3 การทดสอบเสาเข็มในห้องปฏิบัติการ (Shibata et al., 1989).....	14
2.4 ประสิทธิภาพเสาเข็มกลุ่มแบบ side-by-side (Shibata et al., 1989).....	15
2.5 ประสิทธิภาพของเสาเข็มกลุ่มแบบ in-line (Schmidth, 1981,1985).....	16
2.6 การทดสอบเสาเข็มกลุ่มแบบ in-line (Schmidth, 1985)	16
2.7 พารามิเตอร์ดินสำหรับวิเคราะห์เสาเข็มเจาะ (Submaneeewong, 2009)	31
2.8 พารามิเตอร์ดินสำหรับวิเคราะห์เสาเข็มแบบรีดรูปตัวที (Submaneeewong, 2009).....	31
2.9 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการจำลอง (Ding et al., 2010)	36
2.10 ความแตกต่างของความละเอียด mesh (Dao, 2012)	38
2.11 ความแตกต่างของความละเอียด mesh (Dao, 2012)	39
2.12 อัตราส่วน E_u / S_u สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ	44
2.13 อัตราส่วน E_u / S_u สำหรับชั้นดินเหนียวแข็งกรุงเทพ.....	45
2.14 พารามิเตอร์ของชั้นดินเหนียวกรุงเทพ (Surarak et al., 2012).....	47
2.15 พารามิเตอร์ชั้นดินเหนียวกรุงเทพของโครงการรถไฟฟ้า MRT (Likitlersuang et al., 2018)	47
3.1 คุณสมบัติของเสาเข็มคอนกรีตเสาเข็มและแผ่นเหล็กกระจายแรง.....	55
3.2 พารามิเตอร์ของแบบจำลองดิน HSM ที่ใช้ในการจำลองวิเคราะห์ด้วย FEM	56
3.3 พารามิเตอร์ของแบบจำลองดิน MC ที่ใช้ในการจำลองวิเคราะห์ด้วย FEM.....	56
3.4 พารามิเตอร์ของแบบจำลองดิน MCVS ที่ใช้ในการจำลองวิเคราะห์ด้วย FEM.....	56
3.5 พารามิเตอร์ของแบบจำลองดิน MCCS ที่ใช้ในการจำลองวิเคราะห์ด้วย FEM.....	57
3.6 คุณสมบัติของเสาเข็มแบบรีดที่ใช้ในการวิเคราะห์	59
3.7 พารามิเตอร์ของแบบจำลองดิน HSM สำหรับเสาเข็มแบบรีด TB	60
3.8 พารามิเตอร์ของแบบจำลองดิน MC สำหรับเสาเข็มแบบรีด TB.....	60
4.1 เปรียบเทียบการจำลองความละเอียด mesh ของเสาเข็มเดี่ยว F1.....	75
4.2 เปรียบเทียบการจำลองความละเอียด mesh ของเสาเข็มกลุ่ม F2	75

สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

2.1	ลักษณะการวิบัติของเสาเข็มที่ไม่มีการยึดรั้งหัวเสาเข็ม (Broms, 1964).....	4
2.2	ลักษณะการวิบัติของเสาเข็มที่มีการยึดรั้งหัวเสาเข็ม (Broms, 1964).....	4
2.3	ลักษณะการวิบัติ หน่วยแรงต้านทานของดิน และโมเมนต์ดัดเสาเข็มสั้น (Broms, 1964).....	5
2.4	ลักษณะการวิบัติ หน่วยแรงต้านทานของดิน และโมเมนต์ดัดเสาเข็มยาว (Broms, 1964).....	5
2.5	ลักษณะการวิบัติ หน่วยแรงต้านทานของดิน และโมเมนต์ดัดเสาเข็มสั้น (Broms, 1964).....	6
2.6	ลักษณะการวิบัติ หน่วยแรงต้านทานของดิน และโมเมนต์ดัดเสาเข็มปานกลาง (Broms, 1964)	6
2.7	ลักษณะการวิบัติ หน่วยแรงต้านทานของดิน และโมเมนต์ดัดเสาเข็มยาว (Broms, 1964).....	7
2.8	รูปแบบการจัดเรียงเสาเข็มกลุ่มสำหรับทดสอบรับแรงด้านข้าง	7
2.9	ผลของการเคลื่อนที่ของดินซ้อนทับกันในเสาเข็มกลุ่ม (Snyder, 2004).....	8
2.10	การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ (Wang and Reese, 1986).....	11
2.11	ผลการทดสอบเสาเข็มในชั้นดินทราย (Wang and Reese, 1986).....	11
2.12	ผลการทดสอบเสาเข็มในชั้นดินเหนียว (Wang and Reese, 1986)	12
2.13	ผลการทดสอบเสาเข็มที่แปรผันระยะห่างในชั้นดินเหนียว (Wang and Reese, 1986).....	12
2.14	อัตราส่วนแรงประลัยของการทดสอบเสาเข็มในชั้นดินเหนียว (Wang and Reese, 1986)	13
2.15	การติดตั้งเครื่องมือทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Shibata et al., 1989)	14
2.16	ผลการทดสอบเสาเข็มในห้องปฏิบัติการ (Shibata et al., 1989).....	14
2.17	ประสิทธิภาพของเสาเข็มที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Shibata et al., 1989).....	15
2.18	การทดสอบเสาเข็มกลุ่มจัดเรียงแบบ in-line (Schmidth, 1985)	17
2.19	ประสิทธิภาพของเสาเข็มกลุ่มแบบ in-line (Schmidth, 1985).....	17
2.20	ผลคำนวณ p-y curve ของเสาเข็มเดี่ยว (Wachiraprakarnpong, 1993).....	18
2.21	ผลทำนาย load-deflection curve เสาเข็มเดี่ยว (Wachiraprakarnpong, 1993)	18
2.22	ผลทำนาย load-deflection curve เสาเข็มกลุ่ม F2 (Wachiraprakarnpong, 1993).....	19
2.23	ผลทำนาย load-deflection curve เสาเข็มกลุ่ม F3 (Wachiraprakarnpong, 1993).....	19
2.24	ผลทดสอบเสาเข็มเดี่ยว PL1 และ PL2 (Wachiraprakarnpong, 1993)	20
2.25	ผลทดสอบเสาเข็มกลุ่ม PL3 และ PL4 (Wachiraprakarnpong, 1993)	20
2.26	ผลทดสอบเสาเข็มกลุ่ม PL5, PL6, และ PL7 (Wachiraprakarnpong, 1993)	21
2.27	load-displacement curve เสาเข็มเดี่ยว (Wachiraprakarnpong, 1993)	21

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.28 load-displacement curve เสาเข็มกลุ่ม (Wachiraprakarnpong, 1993)	22
2.29 พื้นฐานรากอาคาร Millennium Residence (Submaneeewong, 2009)	22
2.30 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบเสาเข็มเจาะ (Submaneeewong, 2009)	23
2.31 การทดสอบเสาเข็มเจาะในสนาม (Submaneeewong, 2009)	23
2.32 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบเสาเข็มแบบเรีตรูปตัวที (Submaneeewong, 2009)	24
2.33 การทดสอบเสาเข็มแบบเรีตรูปตัวทีในสนาม (Submaneeewong, 2009)	24
2.34 ผลการทดสอบเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพ (Submaneeewong, 2009)	25
2.35 การจำลองเสาเข็มโดยวิธี p-y curve (Reese, 1997)	26
2.36 เปรียบเทียบ p-y curve กับผลวิเคราะห์กลับ (Thipsumontha et al., 2016)	26
2.37 การวิเคราะห์การทรุดตัวฐานรากเสาเข็มแผ่ของอาคารสูง (ยอดตะวัน, 2562)	27
2.38 การทดสอบในสนามสำหรับเสาเข็มเจาะ (Submaneeewong, 2009)	28
2.39 การทดสอบในสนามสำหรับเสาเข็มแบบเรีตรูปตัวที (Submaneeewong, 2009)	29
2.40 การวิเคราะห์เสาเข็มเจาะด้วย PLAXIS 3D (Submaneeewong, 2009)	30
2.41 การวิเคราะห์เสาเข็มแบบเรีตรูปตัวทีด้วย PLAXIS 3D (Submaneeewong, 2009)	30
2.42 การเลือกสถิติเนสดินของเสาเข็มแบบเรีตรูปตัวทีและเสาเข็มเจาะ (Submaneeewong, 2009)	32
2.43 ความสัมพันธ์ระหว่างสถิติเนสการตัดกับโมเมนต์ดัด (Submaneeewong, 2009)	33
2.44 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้ง (Submaneeewong, 2009)	34
2.45 ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวเสาเข็มแบบเรีตรูปตัวที (Submaneeewong, 2009)	34
2.46 ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวเสาเข็มเจาะ (Submaneeewong, 2009)	35
2.47 การจำลองเสาเข็มและดินล้อมรอบในซอฟต์แวร์ ABAQUS (Ding et al., 2010)	35
2.48 ผลของ pile cap ภายใต้แรงกระทำด้านข้าง (Ding et al., 2010)	36
2.49 ผลของ pile cap ที่การเคลื่อนตัว 8 มิลลิเมตร (Ding et al., 2010)	37
2.50 ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเสาเข็มรับแรงด้านข้างที่จำลอง (Dao, 2012)	37
2.51 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วย EBE และ VE (Dao, 2012)	38
2.52 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสเฉือนและความเครียดเฉือน (Mair, 1993)	40
2.53 รูปแบบของความความเครียดเฉือน (Atkinson and Bransby, 1977)	40
2.54 ผลทดสอบ self-boring pressuremeter ชั้นดินเหนียวอ่อน (Teparaksa et al., 1999)	41
2.55 ผลทดสอบ self-boring pressuremeter ชั้นดินเหนียวแข็ง (Teparaksa et al., 1999)	41
2.56 ผลทดสอบ self-boring pressuremeter ชั้นดินกรุงเทพ (Prust et al., 2005)	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.57 การคำนวณ engineers' shear strain จากผลทดสอบ inclinometer	43
2.58 ความสัมพันธ์ระหว่าง E' / N_{60} กับ q_{net} / q_{ult} ของดินทราย (Stroud, 1989)	46
3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัย	48
3.2 ตำแหน่งการเจาะสำรวจชั้นดินของโครงการ (Wachiraprakarnpong, 1993).....	49
3.3 ข้อมูลผลการเจาะสำรวจดินของโครงการ (Wachiraprakarnpong, 1993)	50
3.4 การทดสอบเสาเข็มเดี่ยว (Wachiraprakarnpong, 1993).....	51
3.5 การทดสอบเสาเข็มกลุ่ม (Wachiraprakarnpong, 1993).....	52
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสถิติในการตัดกับโมเมนต์ดัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (Wang et al., 1998).....	53
3.7 รูปแบบการจัดเรียงเหล็กในการวิเคราะห์หาหน่วยแรงคราก.....	54
3.8 FEM mesh ที่ใช้ในการจำลองเสาเข็มเดี่ยว F1	57
3.9 FEM mesh ที่ใช้ในการจำลองเสาเข็มเสาเข็มกลุ่ม F2 ดันกับ F3.....	57
3.10 การรับแรงด้านข้างของเสาเข็ม TB.....	58
3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งของเสาเข็ม TB.....	59
3.12 FEM mesh ที่ใช้ในการจำลองเสาเข็ม TB	59
3.13 สรุปกรณีวิเคราะห์เสาเข็มในงานวิจัย	60
4.1 ผลทดสอบในสนามของการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็มเดี่ยว F1	61
4.2 ผลทดสอบในสนามของการโก่งตัวเสาเข็มเดี่ยว F1.....	62
4.3 ผลทดสอบในสนามของการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็มกลุ่ม F2	63
4.4 ผลทดสอบในสนามของการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็มกลุ่ม F3	63
4.5 ผลทดสอบในสนามของการโก่งตัวเสาเข็มกลุ่ม F2	64
4.6 ผลทดสอบในสนามของการโก่งตัวเสาเข็มกลุ่ม F3	65
4.7 ผลทดสอบในสนามของการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็ม TB.....	66
4.8 ผลทดสอบในสนามของการโก่งตัวเสาเข็ม TB	66
4.9 เปรียบเทียบการโก่งตัวของเสาเข็มที่แรงกระทำ 1000 กิโลนิวตันต่อตัน.....	67
4.10 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่เป็นแรงกระทำเฉลี่ยต่อตัน	68
4.11 เปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงด้านข้างของเสาเข็ม	68
4.12 ผลวิเคราะห์กลับเพื่อกำหนดสถิติของชั้นดินเหนียวอ่อนกับแบบจำลองดิน MCCS	69
4.13 ผลวิเคราะห์กลับเพื่อกำหนดสถิติของชั้นดินเหนียวอ่อนกับแบบจำลองดิน MCVS	70
4.14 ผลวิเคราะห์กลับเพื่อกำหนดสถิติของชั้นดินเหนียวอ่อนกับแบบจำลองดิน HSM.....	71

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 ความเครียดเฉือนเชิงวิศวกรรมของการทดสอบเสาเข็มเดี่ยวในสนาม	72
4.16 การพิจารณาใช้สถิติเฟนสของดินเหนียวจากค่าความเครียดเฉือน	73
4.17 ผลของ mesh dependency ของการวิเคราะห์เสาเข็มเดี่ยว F1	75
4.18 ผลของ mesh dependency ของการวิเคราะห์เสาเข็มกลุ่ม F2	76
4.19 ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเสาเข็มเดี่ยวกับผลทดสอบในสนามของเสาเข็มเดี่ยว F1	77
4.20 load-displacement curve ผลการวิเคราะห์ของเสาเข็มเดี่ยว F1	77
4.21 เปรียบเทียบการโก่งตัวของเสาเข็มเดี่ยวกับโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นของเสาเข็ม F1	78
4.22 load-displacement curve ผลการวิเคราะห์ของเสาเข็มกลุ่ม F2	79
4.23 load-displacement curve ผลการวิเคราะห์ของเสาเข็มกลุ่ม F3	79
4.24 ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเสาเข็มเดี่ยวกับผลทดสอบในสนามของเสาเข็มกลุ่ม F2	80
4.25 ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเสาเข็มเดี่ยวกับผลทดสอบในสนามของเสาเข็มกลุ่ม F3	81
4.26 เปรียบเทียบการโก่งตัวของเสาเข็มกลุ่มกับโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้น	82
4.27 ผลวิเคราะห์ FEM สำหรับอิทธิพลระยะห่างของเสาเข็มกลุ่ม	83
4.28 ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินใต้ pile cap	83
4.29 ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้วย FEM ของเสาเข็ม TB	84
4.30 ผลวิเคราะห์การโก่งตัวด้วย FEM ของเสาเข็ม TB	85
4.31 เปรียบเทียบการโก่งตัวกับโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นของเสาเข็ม TB	86
4.32 ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวแนวนอนด้วย FEM ของเสาเข็ม TB	86

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

S_u	= undrained shear strength
E	= elastic modulus
E_{50}^{ref}	= reference secant stiffness from drained triaxial test (HSM)
E_{oed}^{ref}	= reference tangent stiffness for oedometer primary loading (HSM)
E_{ur}^{ref}	= reference unloading/reloading stiffness (HSM)
R_f	= failure ratio (HSM)
m	= exponential power (HSM)
K_0^{nc}	= coefficient of earth pressure at rest (NC state) (HSM)
R_{eq}	= equivalent radius (HSM)
ν_{ur}	= unloading/reloading Poisson's ratio (HSM)
ψ	= dilatancy angle
G	= shear modulus
ε, γ	= shear strain, engineers' shear strain
c'	= cohesion
φ'	= internal friction angle
I	= moment of inertia
M	= bending moment
ν_u	= undrained Poisson's ratio
ν'	= drained Poisson's ratio
γ	= unit weight
γ_t, γ_{sat}	= total unit weight, saturated unit weight
γ_{unsat}	= unsaturated unit weight
R_{inter}	= interface reduction factor
A	= cross section area
FEM	= finite element method
VE	= volume element
EBE	= embedded beam element
N-N anchor	= node to node anchor
MC	= Mohr-Coulomb soil model
HSM	= Hardening soil model