สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VIII

สารบัญรูป.....IX

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....2

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....2

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....3

1.5 ขอบเขตการวิจัย.....3

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....4

บทที่ 2 หัวเจาะอุโมงค์ใต้ดิน.....6

2.1 กล่าวนำ.....6

2.2 วิวัฒนาการของการก่อสร้างอุโมงค์.....6

2.3 ประวัติการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ.....8

2.4 ชนิดของหัวเจาะ.....13

2.4.1 หัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล (Earth Pressure Balance Shield, EPBS).....18

2.4.2 หัวเจาะแบบแรงดันน้ำโคลน (Slurry Shield).....20

2.4.3 หัวเจาะแบบขุดและควบคุมด้วยมือ (Manual Excavation Type Shield Machines).....20

2.4.4 หัวเจาะแบบกึ่งเครื่องยนต์ (Semi Mechanical Type Shield Machines).....22

2.4.5 หัวเจาะแบบเครื่องยนต์ (Mechanical Type Shield Machines).....22

2.4.6 หัวเจาะแบบ Blind (Blind Type Shield Machines).....23

2.5 ประเภทของดินในงานก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินอ่อน.....24

2.6 เสถียรภาพของดินในการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ.....26

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7 ปัจจัยในการควบคุมหัวเจาะ.....38
2.7.1 แรงดันที่ด้านหน้าของหัวเจาะ (Face pressure).....38
2.7.2 อัตราการขุดเจาะ (Penetration rate).....40
2.7.3 มุมเอียงของหัวเจาะ (Pitching angle).....40
2.7.4 การฉีดอัดน้ำปูนปิดช่องว่างส่วนหาง (Tail void grouting).....41

บทที่ 3 การเคลื่อนตัวของดินจากการขุดเจาะอุโมงค์.....43
3.1 กล่าวนำ.....43
3.2 ประเภทของการสูญเสียมวลดิน.....43
3.3 พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินจากการสูญเสียมวลดิน (Ground loss).....44
3.4 การเคลื่อนตัวของดินจากขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ.....53
3.5 ชนิดการเคลื่อนตัวของดิน.....57
3.5.1 การทรุดตัวของผิวดินตามแนวยาว (Longitudinal surface settlements).....57
3.5.2 การทรุดตัวของผิวดินตามแนวขวาง (Transverse surface settlements) จากการขุดเจาะอุโมงค์เดี่ยว.....67
3.5.3 การทรุดตัวของผิวดินตามแนวขวาง (Transverse surface settlements) จากการขุดเจาะอุโมงค์คู่.....71
3.5.4 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์ (Lateral ground deformation).....74

บทที่ 4 กรณีศึกษาผลกระทบต่อเสาเข็มจากการขุดเจาะอุโมงค์.....82
4.1 กล่าวนำ.....82
4.2 วิธีการทำนายผลกระทบของเสาเข็มอันเนื่องมาจากการขุดเจาะอุโมงค์.....82
4.3 กรณีศึกษาผลกระทบต่อเสาเข็ม.....84
4.3.1 Loganathan et al. (2000).....84
4.3.2 Mroueh and Shahrour (2002).....94
4.3.3 Cheng et al (2007).....102
4.3.4 Shahin et al (2006).....109
4.3.5 Chen et al (1999).....115

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.6 Suwansawat, (2006).....122

4.3.7 Lee and Bassett (2006).....126

บทที่ 5 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์.....136

5.1 กล่าวนำ.....136

5.2 สภาพทางธรณีวิทยา.....136

5.2.1 สภาพชั้นดินทั่วไปตามแนวเส้นทางของโครงการ.....137

5.2.2 สภาพแรงดันน้ำใต้ดิน.....143

5.3 ข้อมูลของหัวเจาะอุโมงค์.....143

5.4 เสาเข็ม.....145

5.4.1 กลไกการส่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม.....145

5.4.2 พฤติกรรมของเสาเข็มตอกในชั้นดินเหนียว.....147

5.4.3 พฤติกรรมของเสาเข็มตอกในชั้นทราย.....147

5.4.4 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม.....147

5.5 ทฤษฎีไฟไนต์อิลิเมนต์.....156

5.5.1 ข้อพิจารณาเชิงทฤษฎีในการออกแบบทางวิศวกรรม (Theoretical consideration).....157

5.5.2 ลักษณะของชิ้นส่วนย่อย.....161

5.5.3 ลักษณะทางเรขาคณิตของปัญหาทางด้านธรณีวิทยา.....163

5.5.4 การวิเคราะห์แบบความเค้นรวม (Total stress analysis).....164

5.5.5 การวิเคราะห์แบบความเค้นประสิทธิผล (Effective stress analysis).....165

5.5.6 การคำนวณแรงดันของเหลวในโพรง (Pore fluid pressure calculation).....166

5.5.7 ปัญหาปฏิสัมพันธ์กับโครงสร้าง (Soil-structure interaction problems).....168

5.5.8 วิธีการวิเคราะห์.....170

5.5.9 แบบจำลองพฤติกรรมของดิน (Soil Model).....171

บทที่ 6 การวิเคราะห์ผลกระทบต่อเสาเข็ม.....184

6.1 กล่าวนำ.....184

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.2 วิธีการวิเคราะห์.....184
6.2.1 หัวเจาะอุโมงค์.....184
6.2.2 เสาเข็ม.....186
6.2.3 ชั้นดินและแรงดันน้ำใต้ดิน.....186
6.2.4 การวิเคราะห์.....187
6.2.4.1 การวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 1.....187
6.2.4.2 การวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 2.....190

บทที่ 7 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบต่อเสาเข็ม.....192
7.1 กล่าวนำ.....192
7.2 พฤติกรรมการเคลื่อนตัวรวมของเสาเข็ม(δ_T).....192
7.3 พฤติกรรมการเคลื่อนตัวทางแนวราบในแนวแกน X ของเสาเข็ม (δ_X).....195
7.4 พฤติกรรมการเคลื่อนตัวทางแนวราบในแนวแกน Z ของเสาเข็ม (δ_Z).....196
7.5 พฤติกรรมของแรงตามแนวแกนของเสาเข็มจากการเจาะอุโมงค์, F_P..... 199
7.6 การประยุกต์ใช้.....201

บทที่ 8 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....204
8.1 กล่าวนำ.....204
8.2 บทสรุป.....204
8.3 ข้อเสนอแนะ.....207

บรรณานุกรม.....208

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ประวัติของการเจาะอุโมงค์ในอดีตที่ผ่านมา (Tunnel Engineering Handbook, 1996) 9

2.2 รายละเอียดเกี่ยวกับประวัติงานก่อสร้างอุโมงค์ในกรุงเทพฯ 12

2.3 การแบ่งประเภทของหัวขุดเจาะอุโมงค์ตามลักษณะการค้ำยันด้านหน้า..... 14

2.4 การเลือกประเภทหัวขุดเจาะอุโมงค์ที่เหมาะสม 17

2.5 Stability Factor ของ Cohesive Soils และพฤติกรรมของดินที่ด้านหน้าอุโมงค์ (Peck, 1969 และ Phien-wej, 1987) 27

2.6 ค่า Stability Factor ของ Silty Sand เหนือระดับน้ำใต้ดิน (Heuer, 1994)..... 27

2.7 พฤติกรรมของ Sand และ Gravel (Terzaghi, 1977)..... 28

3.1 การประมาณค่าการสูญเสียมวลดินตามคุณภาพการก่อสร้างและลักษณะดิน (Tunnel Engineering Handbook, 1996)..... 52

3.2 ความดันการอัดฉีดน้ำปูนและขนาดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินออกจากอุโมงค์.....81

4.1 รายละเอียดการทดสอบแบบจำลองหมุนเหวี่ยง (ขนาดจริง).....84

4.2 แสดงค่าการเคลื่อนที่บริเวณส่วนหัวของเสาเข็มที่วัดได้จากการทดสอบ.....93

4.3 สรุปลักษณะของกรณีศึกษาผลกระทบต่อเสาเข็มจากอดีตจนถึงปัจจุบัน.....134

5.1 แสดงคุณสมบัติของชั้นดินถม.....139

5.2 แสดงคุณสมบัติของชั้นดินเหนียวอ่อน.....140

5.3 แสดงคุณสมบัติของชั้นดินเหนียวแข็ง.....141

5.4 แสดงคุณสมบัติของชั้นทราย.....141

5.5 แสดงคุณสมบัติของชั้นดินเหนียวแข็งมาก.....142

5.6 ข้อมูลหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุลที่ใช้ในโครงการรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล 144

5.7 ข้อมูลของเสาเข็มที่ใช้โดยทั่วไปในเขตกรุงเทพมหานคร-ปริมณฑลและบางจังหวัด.....149

6.1 ค่าพารามิเตอร์ของเสาเข็มที่ใช้ในการวิเคราะห์.....186

6.2 ค่าพารามิเตอร์ของชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์..... 187

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 หัวเจาะ Screw Shield ของ มาร์ค บรูเนล (1818) (Mechanised Shield Tunneling, 1996) 13

2.2 หัวเจาะ Compartment Shield ของ มาร์ค บรูเนล (1818) (Mechanised Shield Tunneling, 1996) 13

2.3 ลักษณะการค้ำยันด้านหน้าของหัวขุดเจาะประเภทต่างๆ (Mechanised Shield Tunneling, 1996) 15

2.4 ลักษณะการขนย้ายดินภายในหัวเจาะแบบต่างๆ (Mechanised Shield Tunneling, 1996)....16

2.5 ลักษณะของหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล (Earth Pressure Balance Shield)..... 19

2.6 หัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล 1: Face, 2: Cutterhead, 3: Working Chamber, 4: Bulkhead, 5: Thrust cylinder, 6: Screw conveyor, 7: Erector, 8: Segments 19

2.7 ลักษณะของหัวเจาะแบบแรงดันน้ำโคลน (Slurry Shield) 20

2.8 หัวเจาะแบบแรงดันน้ำโคลน 1: Cutterhead, 2: Bulkhead, 3: Air-cushion, 4: Submerged wall, 5: Slurry line, 6: Stone crusher, 7: Feeding Line, 8: Erector (Rehm, Herrenknecht, 2006) 21

2.9 ลักษณะของหัวเจาะแบบขุดและควบคุมด้วยมือ (Manual shield) 21

2.10 กลไกการทำงานภายในหัวเจาะแบบขุดและควบคุมด้วยมือ (Manual shield) 22

2.11 หัวเจาะแบบเครื่องยนต์ (Mechanical Type Shield Machines) 23

2.12 ลักษณะของหัวเจาะแบบ Blind (Blind Shield) 23

2.13 แผนภูมิการกระจายตัวของเม็ดดินสัมพันธ์กับ การเลือกใช้หัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุลและหัวเจาะแบบแรงดันน้ำโคลน 24

2.14 แผนภูมิการทำนายพฤติกรรมของดินขนาด D_{10} (Tunnel Engineering Handbook, 1996) 28

2.15 การค้ำยันด้านหน้า (Face support) ในหัวเจาะแบบปิด (Closed Shield) (Kovari et al, 2004) 29

2.16 รูปแบบอย่างง่ายในการวิเคราะห์เสถียรภาพที่ด้านหน้าของอุโมงค์ในระดับตื้น (Leca and Dormieux, 1990) 30

2.17 พฤติกรรมการพังทลายแบบรูปกรวย (a) MI (b) MII และ (c) MIII (Leca และ Dormieux, 1990) 31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.18 พฤติกรรมการพังทลายที่ประกอบด้วยรูปลิ่มและรูปทรงสี่เหลี่ยม (after Horn, 1961, adopted by Kovari and Anagnostou, 1996) 34

2.19 แบบจำลองการคำนวณออกแบบเสถียรภาพที่ด้านหน้าอุโมงค์พร้อมตัวแปร 34

2.20 แรงดันของการไหลซึมและแรงดันค้ำยันประสิทธิผล 37

2.21 Nomograms สำหรับ dimensionless factor F_0 ถึง F_3 38

2.22 การควบคุมแรงดันดินให้สมดุลด้วยการรักษาแรงดันในห้องกักดินและการขนถ่ายดิน 39

2.23 การเคลื่อนตัวของดินที่เกิดจากมุมเงยของหัวเจาะ 41

2.24 ลักษณะของช่องว่างส่วนหางระหว่างหัวเจาะและผนังอุโมงค์ 41

2.25 การฉีดอัดน้ำปูนและปริมาตรของวัสดุที่ใช้ฉีดอัด 42

3.1 การพังทลายของอุโมงค์ลอดใต้แม่น้ำเทมส์ 45

3.2 การสูญเสียมวลดินที่ด้านหน้าหัวเจาะ 46

3.3 การสูญเสียมวลดินจากการตัดดินเกินเส้นรอบวงของหัวเจาะ 46

3.4 การสูญเสียมวลดินจากการก้มเงยของหัวเจาะ 47

3.5 การสูญเสียมวลดินจากการรบกวนสภาพดิน 47

3.6 การสูญเสียมวลดินจากช่องว่างส่วนท้ายของหัวเจาะ 47

3.7 การเคลื่อนตัวของดินในลักษณะที่เข้าสู่ตัวอุโมงค์ 48

3.8 การเคลื่อนตัวของดินในลักษณะที่ถูกผลักออกจากตัวอุโมงค์ 48

3.9 นิยามที่เกี่ยวกับการทรุดตัวและการสูญเสียมวลดิน (Ground loss) ของอุโมงค์ (Tunnel Engineering Handbook, 1996) 49

3.10 Normal probability curve หรือ Gaussian distribution Curve ประมาณค่าแนวการทรุดตัวที่ผิวดินจากการขุดเจาะอุโมงค์ (Peck, 1969) 52

3.11 การเคลื่อนตัวของดินจากการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะในแต่ละช่วง 53

3.12 การเคลื่อนตัวของดินจากการสูญเสียมวลดินรอบหัวเจาะและอุโมงค์ (Chiriotti, 2006) 54

3.13 ข้อมูลการตรวจวัดเปรียบเทียบกับพฤติกรรมการขุดเจาะที่เวลาต่างๆ 55

3.14 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการฉีดอัดน้ำปูนและการทรุดตัว 56

3.15 กราฟแสดงค่าการทรุดตัวของผิวดิน ความดันหน้าหัวเจาะ และความเร็วขณะขุดเจาะโดยบันทึกระหว่างสถานีศูนย์วัฒนธรรมฯ และสถานีประชาราษฎร์บำเพ็ญ 58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.16 การเตรียมช่องเปิดบนกำแพงพืด 59
3.17 โครงเหล็กรับแรงผลักที่ติดตั้งในช่วงเริ่มต้นของการขุดเจาะอุโมงค์ 59
3.18 หัวเจาะอุโมงค์กำลังเคลื่อนตัวผ่านผนังกำแพงพืดของสถานีศูนย์วัฒนธรรมฯ 60
3.19 ผนังอุโมงค์ชั่วคราว 60
3.20 อุปกรณ์สนับสนุนหลังหัวเจาะอุโมงค์ 61
3.21 การทรุดตัวตามแนวยาวของผิวดินที่วัดในช่วงเริ่มต้นการขุด (ผนังอุโมงค์วงที่ 49) 62
3.22 พฤติกรรมการพังทลายของดินหน้าอุโมงค์ภายใต้การทดสอบแบบหมุนเหวี่ยง Kimura and Mair (1981) 63
3.23 รูปแบบการเคลื่อนตัวของดินบริเวณหน้าหัวเจาะ 64
3.24 การทรุดตัวตามแนวยาวของดินวัด ณ ตำแหน่ง b (ผนังอุโมงค์วงที่ 101) 65
3.25 การทรุดตัวตามแนวยาวของดินวัด ณ ตำแหน่ง c (ผนังอุโมงค์วงที่ 164) 65
3.26 การทรุดตัวตามแนวยาวของดินวัด ณ ตำแหน่ง d (ผนังอุโมงค์วงที่ 208) 66
3.27 แผนภาพแสดงรูปตัดการทรุดตัวผิวดินตามแนวยาวที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์ 67
3.28 แนวการทรุดตัวของผิวดินวัดจากแนวหมุดวัดการทรุดตัวที่ตำแหน่ง CS-8E 68
3.29 แนวการทรุดตัวของผิวดินวัดจากแนวหมุดวัดการทรุดตัวที่ตำแหน่ง CS-9A 68
3.30 แนวการทรุดตัวของผิวดินวัดจากแนวหมุดวัดการทรุดตัวที่ตำแหน่ง CS-8G 68
3.31 แนวการทรุดตัวของผิวดินวัดจากแนวหมุดวัดการทรุดตัวที่ตำแหน่ง CS-7C 69
3.32 แนวการทรุดตัวของผิวดินวัดจากแนวหมุดวัดการทรุดตัวที่ตำแหน่ง SS-5T-21a-o 69
3.33 การใช้กราฟความน่าจะเป็นปกติประมาณแนวการทรุดตัวของผิวดินเหนืออุโมงค์เดี่ยว 70
3.34 รูปแบบแนวการทรุดตัวของผิวดินเหนืออุโมงค์คู่ 72
3.35 ตำแหน่งแนวหมุดวัดการทรุดตัวผิวดิน (Surface settlement array) เหนืออุโมงค์คู่ 73
3.36 การทรุดตัวของผิวดินวัดด้วยแนวหมุดวัดการทรุดตัวที่ตำแหน่ง 23-AR-001 เหนืออุโมงค์คู่ 73
3.37 การทรุดตัวของผิวดินวัดด้วยแนวหมุดวัดการทรุดตัวที่ตำแหน่ง CS-8B เหนืออุโมงค์คู่ 73
3.38 การทรุดตัวของผิวดินวัดด้วยแนวหมุดวัดการทรุดตัวที่ตำแหน่ง SS-5T-52e-s เหนืออุโมงค์คู่ 74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.39 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดิน (Inclinometer)..... 75

3.40 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินที่ตำแหน่ง IN-T7-03.....76

3.41 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินที่ตำแหน่ง IN-T7-05 77

3.42 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินที่ตำแหน่ง IN-T7-04 77

3.43 ตำแหน่งของหัวเจาะอุโมงค์ขณะเคลื่อนที่ผ่านเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง 79

3.44 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของหัวเจาะอุโมงค์กับการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดิน 80

3.45 อิทธิพลจากการอัดฉีดน้ำปูนที่ส่งผลกระทบต่อการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดิน 81

4.1 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์การวัดการตอบสนองต่อแรงทางด้านข้างและแรงตามแนวแกนของเสาเข็มในแบบจำลองของเสาเข็มแบบย่อส่วน 86

4.2 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่ผิวดินในการทดสอบที่ 1 (Test 1).....87

4.3 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่ผิวดินในการทดสอบที่ 2(Test 2).....87

4.4 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่ผิวดินในการทดสอบที่ 3 (Test 3).....88

4.5 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวใต้ผิวดิน: (a) test 1, (b) test 2, (c) test 3.....89

4.6 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินที่ระยะห่างจากแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวดิ่งของอุโมงค์เท่ากับ 5.5 เมตร : (a) Test 1, (b) Test 2, (c) Test 3 90

4.7 โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในเสาเข็มจากการทดสอบ: (a) Test 1, (b) Test 2, (c) Test 3.....91

4.8 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของเสาเข็มจากการทดสอบ: (a) Test 1, (b) Test 2, (c) Test 3 92

4.9 แรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นในเสาเข็มจากการทดสอบ 92

4.10 ค่าโมเมนต์สูงสุดที่เกิดขึ้นจากการทดสอบสำหรับค่าการสูญเสียมวลดินที่ต่างกัน..... 94

4.11 ปัญหาที่วิเคราะห์: ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุโมงค์และเสาเข็ม..... 95

4.12 การโก่งตัวของเสาเข็มจากการขุดเจาะอุโมงค์: (a) การโก่งตัวตามแนวขวางของอุโมงค์ และ (b) การโก่งตัวตามแนวยาวของอุโมงค์ 96

4.13 แรงภายในที่เกิดขึ้นอันเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์: (a) แรงตามแนวแกน (N),(b) โมเมนต์ดัด (M_{yp}) และ (c) โมเมนต์ดัด (M_{zp}).....98

4.14 อิทธิพลของระยะห่างปลายเสาเข็มจากศูนย์กลางอุโมงค์ที่เกิดแรงตามแกนและโมเมนต์ดัดในเสาเข็ม: (a) แรงตามแนวแกน N, (b) โมเมนต์ดัด M_{zp} 99

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.15 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มกับศูนย์กลางของอุโมงค์ที่เกิดแรงตามแกนและโมเมนต์ดัดในเสาเข็ม : (a) แรงตามแนวแกน N, (b) โมเมนต์ดัด M_{zp}.....100

4.16 ระยะห่างของศูนย์กลางเสาเข็มถึงศูนย์กลางของอุโมงค์ในเสาเข็มกลุ่ม 101

4.17 การตอบสนองของเสาเข็มกลุ่มที่ไม่มีการยึดรั้งส่วนบนของเสาเข็ม : (a) แรงตามแนวแกน N, (b) โมเมนต์ดัด M_{zp}.....101

4.18 รูปแบบเชิงเรขาคณิตของชิ้นส่วนสำหรับทำการวิเคราะห์ย้อนกลับจากการทดสอบจำลองแบบหมุนเหวี่ยง Test 3 ของ Loganathan et al (2000).....103

4.19 การเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของเสาเข็มและดินในแนวราบและแนวดิ่ง : (a) การเคลื่อนตัวในแนวราบและ (b) การเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง.....104

4.20 การแปรเปลี่ยนของแรงที่เกิดขึ้นในเสาเข็ม: (a) โมเมนต์ดัด, (b) แรงตามแนวแกน.....105

4.21 การเปรียบเทียบแรงตามแนวแกนสูงสุดและโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดขึ้นในเสาเข็ม.....106

4.22 ความสัมพันธ์ของตอม่อสะพานสูง ตำแหน่งของอุโมงค์ เสาเข็มกลุ่มพร้อมกับระยะต่างๆ.....107

4.23 แสดงขนาดของ Mesh ที่ทำการวิเคราะห์สำหรับอุโมงค์คู่สาย NEL.....107

4.24 การทรุดตัวที่ผิวดินที่เพิ่มขึ้นเมื่อขุดเจาะอุโมงค์ SB ก่อนและตามด้วยเจาะอุโมงค์ NB.....108

4.25 ค่าโมเมนต์ดัดและแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการขุดเจาะอุโมงค์ NB และ SB: (a) ค่าโมเมนต์ดัดในเสาเข็ม P1, (b) ค่าแรงตามแนวแกนในเสาเข็ม P2.....109

4.26 อุปกรณ์การทดสอบโดยการใช้แบบจำลองสองมิติ ที่จำลองขึ้นสำหรับทดสอบฐานรากแบบ Piled Raft.....110

4.27 การแบ่งชิ้นส่วนในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ 2 มิติ: (a) Flat foundation, (b) Piled raft.....111

4.28 การทรุดตัวที่ผิวดินของ Flat Foundation: (a) จากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพ 2 มิติ (b) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ 2 มิติ.....112

4.29 การทรุดตัวที่ผิวดินของ Piled raft: (a) จากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพ 2 มิติ, (b) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ 2 มิติ.....112

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.30 เส้นระดับค่าการเคลื่อนตัวของ Flat Foundation: (a) จากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพ 2 มิติ ,(b) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ 2 มิติ.....113

4.31 เส้นระดับค่าการเคลื่อนตัวของ Piled raft: (a) จากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพ 2 มิติ ,(b) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ 2 มิติ.....114

4.32 ค่า Shearing Strain ของ flat foundation: (a) จากการทดสอบด้วยแบบจำลองทางกายภาพ 2 มิติ ,(b) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ 2 มิติ.....115

4.33 เสาเข็มเดี่ยวที่อยู่ใกล้กับบริเวณก่อสร้างอุโมงค์ซึ่งเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์.....116

4.34 การเคลื่อนตัวของดินในแนวราบและในแนวดิ่งที่ระยะ X = 4.5 เมตร.....117

4.35 ตัวอย่างการตอบสนองของเสาเข็มที่ตำแหน่ง X = 4.5 เมตร (L_P=25 m.).....119

4.36 การตอบสนองของเสาเข็มที่มีค่าสูงสุดที่ระยะ X ต่างๆสำหรับเสาเข็มยาว.....120

4.37 เปรียบเทียบการตอบสนองสูงสุดของเสาเข็มที่มีความยาวเสาเข็ม15, 20 และ 25 เมตร.....121

4.38 ลักษณะรูปแบบและตัวแปรสำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบต่อเสาเข็ม.....123

4.39 กราฟความสัมพันธ์เพื่อการออกแบบ (Design chart) ระหว่างระยะห่างของเสาเข็มจากอุโมงค์และผลกระทบ ที่การสูญเสียมวลดิน Ground loss = 0.5%.....124

4.40 รูปแบบการแอ่นตัวของเสาเข็มจาก FEM (Ground loss = 0.5%).....125

4.41 กราฟความสัมพันธ์เพื่อการออกแบบ (Design chart) ระหว่างระยะห่างของเสาเข็มจากอุโมงค์และผลกระทบ ที่การสูญเสียมวลดิน Ground loss = 1.5%.....125

4.42 รูปแบบการแอ่นตัวของเสาเข็มจาก FEM (Ground loss = 1.5%).....126

4.43 ตำแหน่งของปลายเสาเข็มที่ทำการทดสอบเมื่อเสาเข็มมีความยาวเท่ากัน.....127

4.44 ปฏิสัมพันธ์ของเสาเข็มและดินจากการขุดเจาะอุโมงค์ในสภาพระนาบความเครียด 2 มิติ...128

4.45 2D finite element mesh สำหรับกรณี B +1.....128

4.46 แรงตามแนวแกนของแบบจำลองเสาเข็มจากชุดการทดสอบต่างๆ (V_L = 18.65 %).....130

4.47 การทรุดตัวของปลายเสาเข็มในแนวดิ่ง(ρ_y) กับการสูญเสียมวลดินแบบ 2 มิติ (V_L) จากการทดสอบแบบจำลองทางกายภาพ 2 มิติ.....131

4.48 การทรุดตัวของปลายเสาเข็มในแนวดิ่ง(ρ_y) กับการสูญเสียมวลดินแบบ 2 มิติ (V_L) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์.....132

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.49 แสดงบริเวณที่มีอิทธิพลต่อเสาเข็มสำหรับปฏิสัมพันธ์ของเสาเข็มและดินอันเนื่องมาจากการขุดเจาะอุโมงค์ในดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น....133

5.1 แนวเส้นทางของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล.... 137

5.2 สภาพชั้นดินจากสถานีศูนย์วัฒนธรรมไปจนถึงสถานีบางซื่อ.... 138

5.3 สภาพชั้นดินจากสถานีหัวลำโพงไปจนถึงสถานีศูนย์วัฒนธรรม 138

5.4 แรงดันน้ำใต้ดินโดยทั่วไปในชั้นดินกรุงเทพฯ (Geotechnical report BMTC, 2006).....143

5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและการทรุดตัวของเสาเข็มที่รับแรงอัดจนเกิดการวิบัติ.....146

5.6 แสดงการถ่ายน้ำหนักบรรทุกภายนอกจากหัวเสาเข็มไปสู่แรงเสียดทานและแรงต้านส่วนปลายเสาเข็มตามรูปที่ 5.4 : (a) ณ. จุด A , (b) ณ.จุด B , (c) ณ.จุด D 146

5.7 แสดงสภาวะที่เสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่ง.....148

5.8 ส่วนประกอบของความเค้น (Stress components) 3 มิติ.....158

5.9 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมการสมดุล สมการคอมแพตติบิลิตีและสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด.....159

5.10 ลักษณะชิ้นส่วนย่อยรูปทรงสามเหลี่ยม.....161

5.11 แสดงตัวแปรอิสระของชิ้นส่วนย่อยรูปสามเหลี่ยม.....162

5.12 ตัวอย่างระนาบความเครียด.....163

5.13 ตัวอย่างปัญหาที่มีความสมมาตรตามแนวแกน.....164

5.14 ตัวอย่างปัญหาที่เกี่ยวข้องกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับโครงสร้าง.... 168

5.15 ตัวอย่างการใช้ชนิดชิ้นส่วนต่อเชื่อมแบบต่างๆ.....169

5.16 การแบ่งโครงสร้างเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ.....171

5.17 ภาพจำลองหลักการคำนวณความเครียดพลาสติกโดยกฎการไหลแบบไม่สอดคล้อง.....176

5.18 พื้นผิวครากของ มอร์-คูลอมบ์ ในสองมิติ (Mohr-coulomb failure criterion).....177

5.19 พื้นผิวครากของ มอร์-คูลอมบ์ ในแบบสามมิติ (Mohr-coulomb failure criterion).....178

5.20 ผลของมุมไดเลชั่นต่อพื้นผิวครากของ มอร์-คูลอมบ์.....179

5.21 แสดงเส้นสถานะวิกฤตในความสัมพันธ์ของความเค้น (Stress path) และใน ความสัมพันธ์การอัดตัวคายน้ำ (Consolidation plot).....180

5.22 ขอบเขตการวิบัติ (State boundary surface, SBS).....181

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.23 ความสัมพันธ์ของแบบจำลองชนิด Hardening Soil.....182

5.24 กราฟความสัมพันธ์ของ Stress กับ Strain ในการทดสอบ Triaxial.....182

5.25 กราฟความสัมพันธ์ของ Stress กับ Strain ใน Consolidation test.....183

6.1 ปัญหาที่ทำการวิเคราะห์เมื่อพิจารณาทางแนวขวาง.....185

6.2 ปัญหาที่ทำการวิเคราะห์เมื่อพิจารณาทางแนวยาว.....185

6.3 การทรุดตัวทางแนวยาวเมื่อหัวเจาะทำการขุดเจาะผ่านที่ระยะต่างๆ 188

6.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของอุโมงค์กับค่า Trough width parameter (i)..... 189

6.5 แสดงค่าการเคลื่อนตัวของดิน 190

6.6 ตำแหน่งของเสาเข็มที่ทำการวิเคราะห์ 191

6.7 Three dimension finite element mesh..... 191

7.1 ค่า Total displacement, δ_T ของเสาเข็มที่มีระยะห่างจากด้านหน้าของหัวเจาะ D_Z และตำแหน่งปลายของเสาเข็ม L_P ที่แตกต่างกัน 193

7.2 ค่าการเคลื่อนตัวรวมของเสาเข็ม δ_T เมื่อระยะ D_X และ D_Z แตกต่างกัน: (a) L_P = 9.0 m., (b) L_P = 12.0 m., (c) L_P = 15.0 m.....194

7.3 ค่า Horizontal displacement, δ_X ทางแนวแกน X ของเสาเข็มที่มีระยะห่างจากด้านหน้าของหัวเจาะ D_Z และตำแหน่งปลายของเสาเข็ม L_P ที่แตกต่างกัน.....196

7.4 ค่า Horizontal displacement, δ_Z ทางแนวแกน Z ของเสาเข็มที่มีระยะห่างจากด้านหน้าของหัวเจาะ D_Z และมีตำแหน่งปลายของเสาเข็ม L_P ที่แตกต่างกัน.....198

7.5 ค่า Axial force, F_P ของเสาเข็มที่มีระยะของ D_Z ที่แตกต่างกัน และระยะ L_p เท่ากับ 9, 12 และ 15 เมตร: (a) D_Z = +10.0 m., (b) D_Z = 0.0 m., (c) D_Z = - 20.0 m.....200

7.6 กราฟความสัมพันธ์เพื่อการออกแบบ ค่าการเคลื่อนตัวรวมของเสาเข็ม δ_T: (a) ค่าการสูญเสียมวลดิน 1%, (b) ค่าการสูญเสียมวลดิน 3%.....202

7.7 กราฟความสัมพันธ์เพื่อการออกแบบ ค่าแรงตามแกนของเสาเข็ม F_P: (a) L_P =9 m., (b) L_P =12 m., (c) L_P =15 m.....203

8.1 พฤติกรรมของเสาเข็มในแต่ละโซนจากการขุดเจาะอุโมงค์ในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ.....206