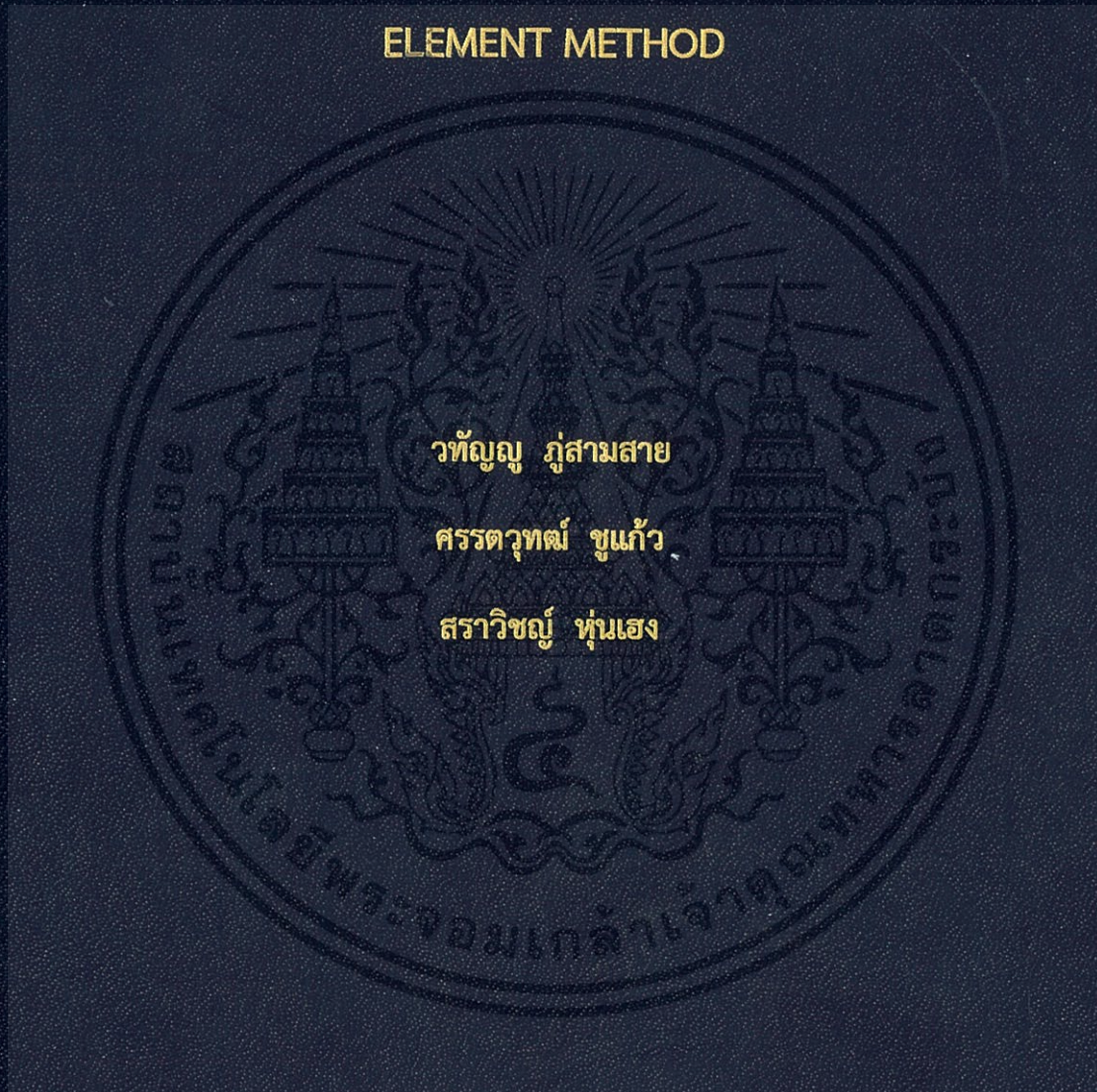


การศึกษาอิทธิพลของการจำลองการก่อสร้างเสาเข็มข้างเคียงที่มีต่อค่าการ  
เสถียรภาพของอุโมงค์เดิมโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

A STUDY OF MODELLING OF ADJACENT PILE CONSTRUCTION  
EFFECT ON EXISTING TUNNEL DEFORMATION BY FINITE  
ELEMENT METHOD



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2561

การศึกษาอิทธิพลของการจำลองการก่อสร้างเสาเข็มข้างเคียงที่มีต่อค่าการ  
เสถียรของอุโมงค์เดิมโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์  
A STUDY OF MODELLING OF ADJACENT PILE CONSTRUCTION  
EFFECT ON EXISTING TUNNEL DEFORMATION BY FINITE  
ELEMENT METHOD



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY OF MODELLING OF ADJACENT PILE CONSTRUCTION  
EFFECT ON EXISTING TUNNEL DEFORMATION BY FINITE  
ELEMENT METHOD



WATHANYU POOSAMSAI

SATTAWUT CHUKAEW

SARAVITCH HOONHENG

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การวิเคราะห์ผลกระทบของอุโมงค์เนื่องจากการก่อสร้างเสาเข็มด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ

A STUDY OF MODELLING OF ADJACENT PILE CONSTRUCTION EFFECT ON EXISTING TUNNEL DEFORMATION BY FINITE ELEMENT METHOD

นักศึกษา นายทัญญู ภู่สามสาย รหัสนักศึกษา 58011088

นายศรุตวุฒิ ชูแก้ว รหัสนักศึกษา 58011189

นายสรวิชัย หุ่นเฮง รหัสนักศึกษา 58011276

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ประทีป หล่อประเสริฐ

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายมือชื่อ
ดร.ศลิษา ไชยพุทธ		
ดร.วิรุฬห์ คำชุม		
ดร.ประทีป หล่อประเสริฐ		
ผศ.ดร.ธนาดล คงสมบูรณ์		
อ.อุปะ ศิริแก้ว		

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศิธร)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การศึกษาอิทธิพลของการจำลองการก่อสร้างเสาเข็มข้างเคียงที่มีต่อค่าการเสียรูป ของอุโมงค์เดิมโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

นาย วทัตญู	ภูสามสาย	รหัสนักศึกษา 58011088
นาย ศรตวุฑฒ์	ชูแก้ว	รหัสนักศึกษา 58011189
นาย สรวริชญ์	หุ่่นเฮง	รหัสนักศึกษา 58011276

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ประทีป หลือประเสริฐ  
ปีการศึกษา 2561

## บทคัดย่อ

จากการศึกษาที่ผ่านมาของผลกระทบของเสาเข็มข้างเคียงต่ออุโมงค์เดิมโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบจำลองของเสาเข็มโดยเฉพาะเสาเข็มเจาะจะไม่พิจารณาขั้นตอนการก่อสร้างในการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตามอิทธิพลของขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออุโมงค์เดิมอย่างมีนัยยะต่อการเคลื่อนตัวของดิน ดังนั้นการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของเสาเข็มข้างเคียงที่มีต่อค่าการเสียรูปของอุโมงค์เดิม โดยพิจารณาปัจจัยการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยผลการวิเคราะห์แสดงการเสียรูปของอุโมงค์โดยใช้การประเมินถึงการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์สูงสุด (the maximum changes in tunnel diameter) จากผลการวิเคราะห์พบว่าการจำลองเสาเข็มที่พิจารณาขั้นตอนการก่อสร้างมีค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์สูงสุดมากกว่าการจำลองเสาเข็มที่ไม่พิจารณาขั้นตอนการก่อสร้างประมาณ 1.4-7.5 เท่า



## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ดร.ประทีป หลือประเสริฐ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะและปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง คอยให้ความรู้ เอาใจใส่ พร้อมทั้งช่วยตรวจสอบความถูกต้องตั้งแต่การใช้โปรแกรมจนถึงการทำเล่มวิทยานิพนธ์จนสำเร็จได้ด้วยดี พวกเราผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ต่าง ๆ ในรายวิชาที่ศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐานในการทำงาน โดยได้รับการถ่ายทอดความรู้ทั้งทางด้านวิชาการ ความรู้ทั่วไป ข้อคิด คุณธรรม และประสบการณ์ต่าง ๆ จากคณาจารย์ทุกท่าน จนสามารถนำมาใช้ในการทำงานและการดำเนินชีวิตได้อย่างดียิ่ง ตลอดจนขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ร่วมเป็นกรรมการในการทดสอบ

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่คอยให้คำแนะนำ ให้ความเห็นเพื่อจะได้นำไปปรับใช้ให้ดีขึ้น และช่วยเหลือซึ่งกันในทุก ๆ เรื่องจนทำให้โครงการสำเร็จ รวมถึงตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษาเรียนรู้และอยู่ร่วมกันในภาควิชาโยธาตลอดมา

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดาอันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ความรักและความอบอุ่น อีกทั้งยังเป็นกำลังใจสำคัญที่ทำให้พวกเราผู้จัดทำได้ทำโครงการที่มีความรู้ที่แปลกใหม่เพิ่มขึ้นมาอย่างที่ไม่เคยได้ศึกษามาก่อน และยิ่งช่วยสนับสนุนให้เล่าเรียนและศึกษาจนผู้จัดทำมีวันนี้ได้ พวกเราผู้จัดทำซึ่งในพระคุณเป็นอย่างสูง

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญตาราง.....	viii
สารบัญรูป.....	viii
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	3
2.1 เสาเข็มเจาะ.....	3
2.1.1 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะ.....	3
2.1.2 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกแบบใช้ส่วนเจาะ.....	3
2.1.3 การศึกษาเรื่องผลกระทบต่อแรงเสียดทานของเสาเข็มเจาะจากระยะเวลา ก่อสร้างและความหนืดของสารละลายเบนโทไนท์.....	5
2.1.4 ความเสียหายต่อเสาเข็มเจาะภายหลังการติดตั้ง.....	6
2.1.5 คุณสมบัติและลักษณะของคอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับงานเสาเข็มเจาะ.....	6
2.1.6 สาเหตุที่คุณสมบัติของคอนกรีตเกิดความผันแปร และผลกระทบที่เกิดขึ้น ต่อเสาเข็ม.....	7
2.2 การใช้เสาเข็มเจาะในกรุงเทพฯ.....	8
2.2.1 คุณสมบัติและลักษณะของคอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับงานเสาเข็มเจาะ ในปัจจุบัน.....	8
2.2.2 ระบบและเทคนิคเสาเข็มเจาะที่ใช้ในกรุงเทพมหานครในอดีตและปัจจุบัน.....	9
2.2.3 การสร้างมาตรฐานงานก่อสร้างเสาเข็มระบบเจาะเปียกในประเทศไทย ที่สอดคล้องกับมาตรฐานสากลในยุคโลกาภิวัตน์.....	15
2.3 ผลการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบและความเสียหายของการก่อสร้างเสาเข็มรับแรง ต่ออุโมงค์ที่มีอยู่เดิม.....	16

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1 ผลการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบและความเสียหายของการก่อสร้าง เสาเข็มรับแรงต้อูโมงค์.....	20
2.4 ข้อมูลทั่วไปโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย (MRTA) .....	23
2.4.1 แนวเส้นทางรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย.....	23
2.4.2 สภาพทางธรณีวิทยา.....	23
2.5 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	26
2.5.1 วิธีการวิเคราะห์.....	26
2.5.2 วิธีการวิเคราะห์แรงที่กระทำต่อผนังอุโมงค์ .....	27
บทที่ 3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ .....	29
3.1 แนวทางการวิเคราะห์ .....	29
3.2 การวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงผนังอุโมงค์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ อ้างอิงลักษณะอุโมงค์จากโครงการ MRTA.....	30
3.2.1 หลักการพิจารณาปัญหา.....	30
3.2.2 กรณีศึกษา.....	30
3.3 การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์.....	32
3.3.1 ลักษณะแบบจำลอง.....	32
3.3.2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลอง (Material Properties).....	33
3.3.3 สภาวะขอบเขตของแบบจำลอง .....	34
3.4 ขั้นตอนการจำลองการก่อสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติ .....	35
3.5 การสังเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาความสัมพันธ์.....	37
บทที่ 4 การวิเคราะห์และประเมินผล .....	39
4.1 บทนำ .....	39
4.2 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของหัวเสาเข็มและค่าการทรุดตัวของดินจาก การสร้างอุโมงค์ จากค่าตรวจวัดจริงกับค่าที่ได้จากโปรแกรม Plaxis 2D.....	39
4.2.1 การเปรียบเทียบการทรุดตัวของดินจากผลกระทบของเสาเข็ม.....	39
4.2.2 การเปรียบเทียบการทรุดตัวของดินจากผลกระทบของอุโมงค์.....	40

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การเปรียบเทียบผลกระทบระหว่างการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มที่พิจารณา ขั้นตอนการก่อสร้างกับการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มที่ไม่พิจารณา ขั้นตอนการก่อสร้างต่อการเสียรูปของอุโมงค์เดิม .....	40
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์สูงสุด กับมุมที่เกิดขึ้น.....	44
บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์.....	45
เอกสารอ้างอิง .....	46



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	ข้อเสนอแนะส่วนผสมคอนกรีตสำหรับเสาเข็มเจาะเปียกโดยสารละลายเบนโทไนท์..... 7
ตารางที่ 2.2	ข้อเสนอแนะใช้ปริมาณปูนซีเมนต์และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ของคอนกรีต เสาเข็ม ในชั้นดินต่าง ๆ ..... 7
ตารางที่ 3.1	คุณสมบัติของชั้นดินในการสร้างแบบจำลอง ..... 34
ตารางที่ 3.2	คุณสมบัติของวัสดุ ..... 34



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกแบบใช้ส่วนเจาะ ..... 4
รูปที่ 2.2	ขั้นตอนการทำเสาเข็ม Micro pile (Thasananipan, 1991)..... 9
รูปที่ 2.3	การนำ Micro pile ไปใช้ในงานเสริมฐานราก (Thasananipan, 1991) ..... 10
รูปที่ 2.4	เครื่องมือทำเสาเข็มเจาะระบบ Reverse Circulation (Thasananipan, 1991)..... 11
รูปที่ 2.5	แสดงขั้นตอนการเจาะเข็มระบบ Reverse Circulation (Thasananipan, 1991) ..... 11
รูปที่ 2.6	แสดงขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเจาะเปียกโดยเครื่อง Rotary drill (R.D.) (Thasananipan, 1991)..... 12
รูปที่ 2.7	ลำดับขั้นตอนการอัดฉีดน้ำปูน (Thasananipan, 1991)..... 14
รูปที่ 2.8	รูปแสดงอุปกรณ์และวงจรการอัดฉีดน้ำปูน (Thasananipan, 1991)..... 14
รูปที่ 2.9	แบบกรณีศึกษาผลกระทบจากเสาเข็มเดี่ยวข้างเคียง (Lee และ Yoo, 2006) ..... 16
รูปที่ 2.10	แบบจำลอง 3 มิติด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีศึกษาผลกระทบจากการก่อสร้างเสาเข็มรับแรงข้างเคียงแนวอุโมงค์เดิมในชั้นดินเหนียว (Schroeder et al, 2004; Arunkumar et al, 2010)..... 17
รูปที่ 2.11	แสดงการเสียรูปของผนังอุโมงค์เมื่อได้รับผลกระทบจากเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกเพียงด้านเดียว (Schroeder et al, 2004) ..... 17
รูปที่ 2.12	แสดงตำแหน่งการวางตัวของเสาเข็ม (Yoo, 2014)..... 18
รูปที่ 2.13	แสดงตำแหน่งของปลายเสาเข็มที่ใช้ในการศึกษา (Heama et. al., 2016)..... 18
รูปที่ 2.14	แสดงรูปแบบของดินที่ใช้ในการศึกษา (Lueprasert et. al., 2015)..... 19
รูปที่ 2.15	แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงตามแนวแกนของผนังอุโมงค์ (Heama et. al., 2016)..... 19
รูปที่ 2.16	แสดงขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็ม (Yao, 2009)..... 20
รูปที่ 2.17	แสดงค่า Horizontal displacement ของดิน ในช่วงระหว่างที่มีการก่อสร้าง เสาเข็มเจาะ ..... 21
รูปที่ 2.18	แสดงค่า Vertical displacement ของดิน ในช่วงระหว่างที่มีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะ ..... 21
รูปที่ 2.19	แสดงค่า Horizontal displacement ของ Tunnel lining ในช่วงระหว่างที่มีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะเปรียบเทียบกับค่าที่ตรวจวัดได้จริง ..... 22
รูปที่ 2.20	แสดงค่า Vertical displacement ของ Tunnel lining ในช่วงระหว่างที่มีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะเปรียบเทียบกับค่าที่ตรวจวัดได้จริง ..... 22
รูปที่ 2.21	เส้นทางรถไฟฟ้าใต้ดินส่วนต่อขยายสายสีน้ำเงินสถานีหัวลำโพง-สถานีอิสรภาพ..... 23

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.22 สภาพทางธรณีวิทยาโครงการรถไฟฟ้าส่วนต่อขยายสีน้ำเงิน.....	25
รูปที่ 2.23 การแบ่งโครงสร้างออกเป็นชิ้นส่วนเล็ก ๆ.....	27
รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการวิเคราะห์.....	29
รูปที่ 3.2 รูปแบบการพิจารณา.....	30
รูปที่ 3.3 รูปแบบชั้นดินที่นำมาวิเคราะห์.....	31
รูปที่ 3.4 ภาพตัดแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกของอุโมงค์.....	31
รูปที่ 3.5 รูปแบบการวางตัวของปลายเสาเข็ม.....	32
รูปที่ 3.6 รูปแบบจำลองการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์.....	33
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการจำลองการก่อสร้างเสาเข็มรับแรง.....	36
รูปที่ 3.8 วิธีคำนวณการเปลี่ยนแปลงขนาดและการบิดตัวของอุโมงค์.....	37
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่าการทรุดตัวของดินเนื่องจากการเสาเข็มรับน้ำหนัก.....	39
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าการทรุดตัวของดินเนื่องจากการการก่อสร้างอุโมงค์.....	40
รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะการเสียรูปของอุโมงค์ MRTA ในชั้นดินเหนียวอ่อน เนื่องจากเสาเข็มยาว 17.85 เมตร.....	41
รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะการเสียรูปของอุโมงค์ MRTA ในชั้นดินเหนียวอ่อน เนื่องจากเสาเข็มยาว 60 เมตร.....	41
รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะการเสียรูปของอุโมงค์ MRTA ในชั้นดินเหนียวแข็ง เนื่องจากเสาเข็มยาว 17.85 เมตร.....	42
รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะการเสียรูปของอุโมงค์ MRTA ในชั้นดินเหนียวแข็ง เนื่องจากเสาเข็มยาว 60 เมตร.....	42
รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะการเสียรูปของอุโมงค์ MRTA ในชั้นดินเหนียวอ่อน เนื่องจากเสาเข็มยาว 60 เมตร.....	43
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอุโมงค์สูงสุดกับมุมที่เกิดขึ้น.....	44

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและปัญหา

ด้วยความต้องการพัฒนาระบบสาธารณูปโภคในกรุงเทพมหานคร การก่อสร้างอุโมงค์ได้มีส่วนสำคัญสำหรับโครงสร้างพื้นฐานของระบบดังกล่าวเนื่องจากพื้นที่การก่อสร้างบนดินที่มีความหนาแน่น อย่างไรก็ตามโครงสร้างพื้นฐานบนพื้นดินก็ยังคงมีความจำเป็นต้องก่อสร้างเช่นกันดังรูปที่ เช่น สะพานข้ามแยก อาคารสูง ด้วยสภาพชั้นดินของกรุงเทพฯทำให้ระบบฐานรากของโครงสร้างดังกล่าวจึงต้องเป็นแบบเสาเข็ม ด้วยความหนาแน่นของพื้นที่การก่อสร้างดังกล่าวอาจมีความจำเป็นต้องก่อสร้างใกล้เคียงกับอุโมงค์เดิมและย่อมส่งผลกระทบต่ออุโมงค์เดิมอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เพื่อป้องกันความเสียหายต่ออุโมงค์ที่มีอยู่เดิมการประเมินผลกระทบของเสาเข็มรับแรงข้างเคียงจึงมีความสำคัญ

จากการศึกษาผลกระทบของเสาเข็มรับแรงที่มีต่ออุโมงค์เดิมพบว่ายังมีอยู่อย่างจำกัดซึ่งส่วนใหญ่ใช้กรณีศึกษาที่ได้รับจากโครงการก่อสร้างจริงโดยส่วนใหญ่เป็นโครงการก่อสร้างในประเทศอังกฤษ [1] โดยผลกระทบของเสาเข็มที่พิจารณาจะแสดงผลลัพธ์ในแง่มุมของความปลอดภัยของอุโมงค์เป็นหลัก ซึ่งการปฏิสัมพันธ์ของเสาเข็ม-ดิน-อุโมงค์ไม่ได้ถูกพิจารณา การศึกษาถึงความสัมพันธ์ดังกล่าวเริ่มต้นจากงานวิจัยของ Lueprasert et al. (2015) [2] ซึ่งพิจารณาผลกระทบของเสาเข็มรับแรงข้างเคียงต่ออุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงิน (The Mass Rapid Transit Authority Blue Line extension project, MRTA) โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method, FEM) ผลการวิเคราะห์บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ของตำแหน่งของปลายเสาเข็มที่มีอิทธิพลต่อค่าการเสีรูปของอุโมงค์และได้นำเสนอพื้นที่อิทธิพลสำหรับการพิจารณาเสาเข็มกระทบกับอุโมงค์ และพื้นที่อิทธิพลดังกล่าวได้ถูกพัฒนาโดยการศึกษาของ Lueprasert P. (2017) [3] ซึ่งใช้การพิจารณาพื้นที่อิทธิพลจากค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของค่าการเสีรูปและแรงภายใน (the maximum changes in, tunnel diameters, and lining forces) ของผนังอุโมงค์เนื่องจากเสาเข็มรับแรงข้างเคียงซึ่งมีขนาดของพื้นที่อิทธิพล นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบของเสาเข็มรับแรงข้างเคียงที่มีต่ออุโมงค์เดิมโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เช่น [4-6] อย่างไรก็ตามการศึกษาก่อนหน้านี้ไม่ได้พิจารณาถึงขั้นตอนการก่อสร้างของเสาเข็มแต่อย่างใด โดยจะเป็นการจำลองเสาเข็มในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยวิธี wish-in-place ในการวิเคราะห์ ซึ่งในทางก่อสร้างจริงผลกระทบเนื่องจากขั้นตอนการก่อสร้างของเสาเข็มย่อมส่งผลต่ออิทธิพลต่อโครงสร้างข้างเคียงอย่างแน่นอน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาผลกระทบของเสาเข็มรับแรงข้างเคียงที่มีต่ออุโมงค์เดิมในแง่ของค่าการเสียรูปสูงสุดของอุโมงค์ โดยพิจารณาขั้นตอนการก่อสร้างของเสาเข็มรับน้ำหนักโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาขั้นตอนการจำลองการก่อสร้างเสาเข็มเจาะเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางธรณีวิทยาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. แบบจำลองใช้เสาเข็มเจาะเดี่ยววางตัวด้านข้างของอุโมงค์เพียงด้านเดียว
2. แบบจำลองผนังอุโมงค์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นแบบต่อเนื่อง (o-ring or continuous ring)
3. แบบจำลองโครงสร้างอุโมงค์อ้างอิงจากโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย (The Mass Rapid Transit Authority Blue Line extension project, MRTA)
4. แบบจำลองชั้นดินอ้างอิงจากคุณสมบัติของชั้นดินในกรุงเทพมหานคร
5. ซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็น PLAXIS 2D 2018

## บทที่ 2

### วรรณกรรมปริทัศน์

#### 2.1 เสาเข็มเจาะ

##### 2.1.1 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะ

เสาเข็มเจาะที่ใช้กันในประเทศต่าง ๆ มีหลายแบบ โดยวิธีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะที่เหมาะสมกับสิ่งแวดล้อมและได้รับความนิยมใช้ในประเทศไทย ได้แก่

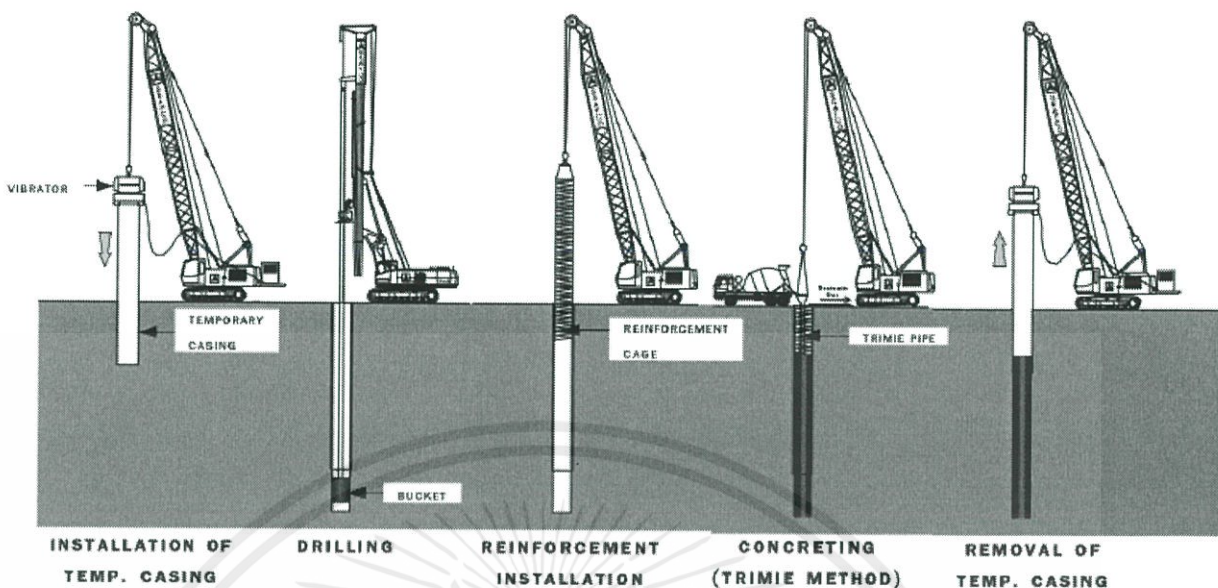
1) การเจาะแบบใช้การทิ้งกระแทก (Percussion Type) โดยเครื่องเจาะแบบสามขา การขุดเจาะดินกระทำโดยใช้กระบอกลูกเหล็กทรงกลมทิ้งกระแทกให้ดินติดขึ้นมาที่กระบอกลูกเหล็กส่วนใหญ่การเจาะแบบนี้เป็นการเจาะระบบแห้ง (Dry Process) การเจาะแบบเปียกโดยใช้เครื่องเจาะสามขาอาจกระทำได้โดยการดัดแปลงเครื่องเจาะให้เป็นการเจาะทิ้งกระแทกแบบระบบน้ำหมุนเวียนโดยตรง (Direct Circulation Method) แต่ควบคุมคุณภาพยาก จึงนิยมก่อสร้างเฉพาะเจาะแบบแห้งเท่านั้น

2) การเจาะแบบใช้การหมุน (Rotary Type) การขุดเจาะดินกระทำโดยใช้เครื่องเจาะแบบสว่านหมุนเจาะดินเป็นรูปทรงกลม การขุดเจาะสามารถทำได้ทั้งเจาะแบบแห้ง (Dry Process) และเจาะแบบเปียก (Wet Process) ภายใต้สารละลายฯ โดยใช้เครื่อง Rotary Drilling Rig

3) การเจาะแบบใช้การขุด (Excavation Type) การขุดดินกระทำโดยใช้หัวเจาะแบบกำมปู (Grab) ที่ใช้ในการก่อสร้างกำแพงกันดินชนิด Diaphragm Wall มาเจาะดินให้เป็นรูปสี่เหลี่ยม การเจาะเป็นแบบเจาะเปียกภายใต้สารละลายเบนโทไนท์ เสาเข็มเจาะรูปสี่เหลี่ยมนี้เรียกว่า Barrette

##### 2.1.2 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกแบบใช้สว่านเจาะ

การก่อสร้างเสาเข็มเจาะในชั้นดินที่ไม่คงตัวเช่นในชั้นทรายที่มีน้ำใต้ดิน ซึ่งหลุมเจาะไม่สามารถมีเสถียรภาพและสึกเกินกว่าที่จะกดบล็อกกันดินชั่วคราวไปสร้างเสถียรภาพของหลุมเจาะจึงใช้ของเหลวเช่นสารละลายเบนโทไนท์หรือสารละลายโพลีเมอร์มาเป็นตัวสร้างเสถียรภาพของหลุมเจาะ โดยสารละลายจะสร้างแรงดันภายในหลุมเจาะต้านแรงดันดินทำให้เกิดเสถียรภาพในหลุมเจาะการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกมีขั้นตอนคล้ายกับเสาเข็มเจาะแห้งที่ใช้สว่านเจาะคือ ชั้นดินอ่อนชั้นบนจะใช้ปลอกชั่วคราวกันดินทั้งแต่ส่วนที่ลึกต่ำกว่าระดับปลายปลอกเหล็กชั่วคราวใช้ของเหลวเป็นตัวพยุงเสถียรภาพของหลุมเจาะ มีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกแบบใช้สว่านเจาะ

1) การลงปลอกเหล็กชั่วคราวกันดินอ่อน ปลอกเหล็กชั่วคราวกันดินพังที่ใช้ต้องมีความยาวลึกเพียงพอที่จะป้องกันชั้นดินอ่อนโดยปลายปลอกเหล็กต้องยาวถึงระดับบนของชั้นดินแข็ง (Stiff clay) และปลอกเหล็กที่ตกลงไปต้องอยู่ในตำแหน่งที่กำหนดและได้ตั้ง นอกจากจะเป็นตัวป้องกันชั้นดินอ่อนแล้วยังเป็นนำสว่านหัวเจาะให้เจาะได้ตั้งด้วย หากกดปลอกเหล็กไว้เอียงเสาเข็มก็จะเอียงด้วย

2) การเจาะดินภายในปลอกเหล็กออก กระทำโดยสว่านเจาะดิน (Earth auger) เมื่อเจาะเกือบถึงระดับชั้นดินที่ไม่คงรูป ทำการเติมสารละลายลงไปในหลุมเจาะให้เต็มเพื่อสร้างแรงดันด้านแรงดันของชั้นดิน แล้วทำการเจาะดินภายใต้สารละลายด้วยหัวเจาะแบบถัง (Bucket) จนถึงระดับที่ออกแบบไว้

3) การทำความสะอาดสารละลายในหลุมเจาะ ในกรณีที่ใช้สารละลายเบนโทไนท์เมื่อหลุมเจาะถูกเจาะจนได้ระดับแล้ว จะต้องทำความสะอาดหลุมเจาะโดยการเปลี่ยนถ่ายสารละลายขึ้นมาทำความสะอาดโดยผ่านตะแกรงแยกดินทราย (Desander และ Desilting) และตรวจสอบจนได้ตามมาตรฐานแล้ว จึงทำการติดตั้งโครงเหล็กเสริม

4) การติดตั้งโครงเหล็กเสริม เหล็กเสริมควรออกแบบให้มีความยาวตลอดต้น และโครงเหล็กเสริมต้องผูกให้แข็งแรง และมีระยะคอนกรีตหุ้ม 7.5 ซม.

5) การเทคอนกรีต คอนกรีตต้องทำการเทแบบเทใต้น้ำ (Tremie concrete) ก่อนทำการเทคอนกรีตชุดแรกลงไปในที่เท จะต้องวางตำแหน่งของปลายท่อเทให้ห่างจากกันหลุมไม่เกิน 10 ซม. และเมื่อเทชุดแรกจนคอนกรีตไหลออกจากท่อหุ้มปลายท่อแล้ว จะต้องรักษาระดับปลายท่อให้ฝังอยู่ใน

คอนกรีตที่เทลงไปก่อนหน้าตลอดเวลา สารละลายที่ถูกแทนที่โดยคอนกรีตจะล้นออกมาจากปากหลุม เจาจะถูกนำไปทำความสะอาดเพื่อปรับปรุงคุณภาพสำหรับการใช้งานซ้ำ

6) การถอนปลอกเหล็ก เมื่อถอนคอนกรีตเสร็จเรียบร้อยแล้วให้ทำการถอนปลอกออกโดย Vibro Hammer

### 2.1.3 การศึกษาเรื่องผลกระทบต่อแรงเสียดทานของเสาเข็มเจาจากระยะเวลาก่อสร้างและความหนืดของสารละลายเบนโทไนท์

1) ลักษณะเฉพาะและความหนืดของสารละลายเบนโทไนท์ เป็นสารละลายที่มีความหนืด (Viscous Slurry) เมื่อปล่อยให้อยู่นิ่งๆ ในระยะเวลาหนึ่งๆ ที่เรียกว่า Exposure Time หรือ Contact Time ความเหนียวหนืดจะเพิ่มขึ้นเองและ Filter Cake จะก่อตัวขึ้น แต่เมื่อถูกกวนให้แตกตัว (Agitated) ความเหนียวหนืดจะลดลงกลับกลายเป็นใสได้อีก ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Thixotropy Characteristic

2) ข้อสังเกตจากรายงานการวิจัยบางงานในอดีต แรงเสียดทานของเสาเข็มระบบเจาเปียกที่ลดลง (Shaft Degradation) ในชั้นทรายมีสาเหตุจาก Filter Cake ก่อตัวขึ้นที่ผนังรูเจาและไม่ถูกกำจัดให้หลุดออกก่อนหรือขณะเทคอนกรีต Corbette (1975) ใช้สารละลายเบนโทไนท์ที่ใช้เวลาก่อสร้าง 48 ชั่วโมง แต่ถ่ายสารละลายใหม่ก่อนเทคอนกรีตเสาเข็มสามารถรับน้ำหนักได้ตามที่ประเมินไว้ล่วงหน้า Cernak (1976) พบว่าการรับน้ำหนักบรรทุกของแบเรตต์ (Barrettes) ในชั้นกรวดผสมทราย (Sandy Gravel) สองต้นแรกขุดโดยสารละลายเบนโทไนท์ที่ใช้เวลาก่อสร้าง 8 และ 97 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับต้นที่สามที่ขุดแบบแห้งและเทคอนกรีตทันทีที่ขุดเสร็จ ค่าแรงเสียดทานของเสาเข็มสองต้นแรกลดลงไป 43% และ 56% ตามลำดับ Littechild และ Plumbridge (1998) สรุปผลการทดลองเสาเข็มเจาโครงการหนึ่งในกรุงเทพฯ ว่าหากใช้เวลาก่อสร้างนานและความหนืดของสารละลายมีค่าสูงแล้วค่าแรงเสียดทานของเสาเข็มมีแนวโน้มที่จะลดลง Fleming และ Sliwinski (1977) ได้รายงานผลการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็มเจาที่มีสภาพผิวขรุขระว่าจะรับน้ำหนักได้สูงกว่าเสาเข็มที่มีผิวเรียบเนื่องจากมีแรงต้านเพิ่ม

3) ผลกระทบจากความหนืดสารละลายเบนโทไนท์ อัตราส่วนของค่าแรงเสียดทานที่ได้ต่อแรงเสียดทานที่ประมาณการไว้กับความหนืด เสาเข็มที่มีระยะเวลาการก่อสร้างต่างกันไม่มากแต่สารละลายที่ใช้ในงานเสาเข็มทั้งสามต้นมีค่าต่างกันอย่างชัดเจน อัตราส่วน Actual / Estimated ของแรงเสียดทานเสาเข็มทั้งสามต้นนี้กลับมีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงว่าความหนืดไม่เกิน 55 sec ไม่มีผลต่อแรงเสียดทาน

4) ผลกระทบจากระยะเวลาก่อสร้างเสาเข็มทดสอบจำนวน 9 ต้นจาก 11 ต้นก่อสร้างด้วยสารละลายเบนโทไนท์ซึ่งมีค่าความหนืดที่แตกต่างกันในช่วงแคบ ๆ คือจาก 37 ถึง 41 sec อัตรา ส่วน

ของแรงที่วัดได้ต่อแรงที่ประเมินไว้กับเวลาที่ใช้ก่อสร้าง แสดงให้เห็นแนวโน้มของการด้อยค่าลงจากเวลา การก่อสร้างจะลดลงในลักษณะ Exponential Decrease

#### 2.1.4 ความเสียหายต่อเสาเข็มเจาะภายหลังการติดตั้ง

ส่วนใหญ่ของความเสียหายนั้นได้เกิดขึ้นจากสาเหตุในขั้นตอนภายหลังการติดตั้งเสาเข็ม (Post Installation Stage) เช่น เกิดจากการขุดดินก่อสร้างฐานราก การสกัดหัวเสาเข็ม หรือเกิดจากน้ำใต้ดินตามธรรมชาติไหลผ่านคอนกรีตเสาเข็มที่ยังไม่แข็งตัวหรือเกิดจากการแย้มของน้ำในคอนกรีต มีจำนวนสูงกว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการก่อสร้าง

สถาบันการวิจัยและรวบรวมข้อมูลอุตสาหกรรมก่อสร้างแห่งสหราชอาณาจักร (Construction Industry Research and Information Association) หรือในชื่อย่อว่า CIRIA โดย Turner ได้แยกหมวดหมู่เสาเข็มเจาะที่เกิดมีปัญหาขึ้นไว้เป็น 4 หมวด

- 1) แบบเอ เกิดขึ้นจากขั้นตอนการติดตั้ง คือ เสาคอด เรียว บวม หรือแห้ว
- 2) แบบบี เกิดการแตกหรือร้าวตามขวางของหน้าตัดเนื่องจากมีแรงดันหรือแรงดึงจากภายนอกที่ไม่ได้คาดคิดไว้มากระทำต่อเสาเข็มในภายหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้วซึ่งมักเกิดในขั้นตอนขณะขุดดินฐานรากหรือจากการสกัดหัวเสาเข็มโดยจะถูกดินหรือเครื่องจักรขุดดินดัน กระแทก หรือเกี่ยวถูกหัวเสาเข็มเสียหาย บางกรณีร้าวอาจเกิดขึ้นจากการยัดหดตัวของคอนกรีต (Shrinkage) หรือการอุบตัวของดิน (Ground Heave) ทำให้เกิดแรงดึงในตัวเสาเข็มจนร้าวได้เช่นกัน
- 3) แบบซี เกิดปัญหาขึ้นกับคอนกรีต ซึ่งอาจเกิดจากเทคนิควิธี เช่น เทโดยตรงลงไป ในรูเจาะที่มีน้ำ หรือเกิดจากคุณภาพคอนกรีตหรือโดนน้ำใต้ดินไหลชะคอนกรีตที่ยังไม่แข็งตัวดี ทำให้กำลังของคอนกรีตลดต่ำลง
- 4) แบบดี ที่เกิดกับปลายเสาเข็ม (Poor Toe Conditions) หรือเกี่ยวกับแรงเสียดทานจากการอ่อนตัวของรูเจาะ (Softening of Bored Hole) หรือ Filter Cake ของสารละลายจับตัวหนาที่ผนังรูเจาะ ปัญหาหมวดนี้จะเกิดในขั้นตอนติดตั้งเสาเข็มและจะมีผลกระทบโดยตรงกับ พฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม ปัญหานี้เกิดขึ้นในขั้นตอนการติดตั้ง

#### 2.1.5 คุณสมบัติและลักษณะของคอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับงานเสาเข็มเจาะ

คอนกรีตสำหรับเสาเข็มระบบเจาะเปียกก่อสร้างในชั้นดินปกติทั่วไปนั้น Fleming และ Sliwinski (1977) ได้แนะนำส่วนผสมไว้นานแล้วแต่ยังใช้ได้ดี ตามตารางที่ 2.1 และ Bartholomew (1979) ยังได้

แนะนำให้ปรับเปลี่ยนส่วนผสมของปูนซีเมนต์ และอัตราส่วนผสมของน้ำต่อปูนซีเมนต์ในปริมาณที่แตกต่างกันให้เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างเสาเข็มเจาะในชั้นดินที่มีสภาวะแวดล้อมผิดปกติต่าง ๆ กันไว้ตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ข้อเสนอแนะส่วนผสมคอนกรีตสำหรับเสาเข็มเจาะเปียกโดยสารละลายเบนโทไนท์ (Fleming และ Sliwinski, 1977)

ค่าการยุบตัว	> 175 มิลลิเมตร
อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	ต่ำกว่า 0.6
ชนิดของหินผสม	ถ้าเป็นไปได้ให้ใช้หินทรงกลมจากธรรมชาติ, ขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 20 มิลลิเมตร
ชนิดของทรายผสม	ทรายธรรมชาติ (Natural and complying with zone 2 or 3 grading)
ปริมาณทราย	30 ถึง 45% ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด
ปริมาณปูนซีเมนต์	ไม่น้อยกว่า 400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
สารผสมเพิ่ม	แนะนำให้ใส่สารผสมเพิ่มที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มการสั่นไหลดีขึ้นและหน่วงเวลาการก่อตัวให้นานขึ้น

ตารางที่ 2.2 ข้อเสนอแนะใช้ปริมาณปูนซีเมนต์และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ของคอนกรีตเสาเข็มในชั้นดินต่าง ๆ (Bartholomew, 1979)

ชนิดเสาเข็ม	คุณสมบัติของคอนกรีต	สภาวะแวดล้อม		
		ปกติ (ก)	ความตึกปกติในชั้นดินระดับปานกลาง (ข)	ความตึกปกติในชั้นดินมีระดับสูงมาก (ค)
เสาเข็มเจาะแห้ง	ปริมาณซีเมนต์(กก.ต่อลูกบาศก์เมตร)	300-450	350-450	380-500
	อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C)	0.5-0.55	0.475-0.5	0.45-0.5
เสาเข็มเจาะเปียก	ปริมาณซีเมนต์(กก.ต่อลูกบาศก์เมตร)	350-450	350-450	400-500
	อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C)	0.5-0.6	0.475-0.5	0.43-0.45

#### 2.1.6 สาเหตุที่คุณสมบัติของคอนกรีตเกิดความผันแปร และผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อเสาเข็ม

1) สาเหตุจากผู้ผลิตคอนกรีต เนื่องจากวัสดุส่วนใหญ่มาจากธรรมชาติ คุณสมบัตินี้จึงไม่ค่อยแน่นอน เช่นความละเอียดของทรายซึ่งจะขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา, กรรมวิธี และช่วงเวลาที่น่าขึ้นมาใช้เป็นต้น นอกจากนั้นแล้วยังอาจมีความไม่แน่นอนเนื่องจากการชั่งตวงส่วนผสม

2) สาเหตุจากเนื้อคอนกรีตเอง คอนกรีตเป็นวัสดุเนื้อผสมประกอบด้วยปูนซีเมนต์, หิน, ทราย, น้ำ, และน้ำยาผสม คอนกรีตนำมาผสม รวมกันเป็นคอนกรีตสดมอร์ต้าจะทำให้หินไม่แยกตัว แต่แรงดึงดูดของโลกทำให้ หิน ทรายหรือผงปูนจมลงดังนั้นหากส่วนผสมของคอนกรีตผสมออกมาแล้วเกิดการยึดเกาะกันไม่ดีพอ หิน, ทรายและปูนซีเมนต์จะจมตัวลงในเนื้อคอนกรีตสด จนเมื่อแรงต้านการ จมตัวมากกว่า น้ำหนักของหินทรายหรือเม็ดปูนหรือจนเมื่ออนุภาคของหินทรายสัมผัสกันจนเป็นโครงข่าย ผลก็คือน้ำที่

เบาที่สุดจะถูกดันขึ้นสู่ด้านบนจนเกิดการเอ็ม (Bleeding) ขึ้น เมื่อคอนกรีตแข็งตัวบริเวณเอ็มน้ำจะเกิดโพรงอากาศเป็นรูพรุน

3) จากการอัดตัวแน่นที่ไม่สมบูรณ์ การจะทำให้คอนกรีตอัดแน่นต้องมีการจี้ฟองอากาศ แต่ในการทำเสาเข็มไม่สามารถจี้ฟองอากาศได้จึงต้องใช้คอนกรีตที่อัดแน่นโดยน้ำหนักตัวเอง ถ้าอัดแน่นไม่ได้จะเกิดรูพรุนทำให้กำลังอัด ความทนทานลดน้อยลงไป Xanthakos (1994) ได้แนะนำว่า คอนกรีตที่เทได้น้ำผ่านท่อเทที่จะสามารถอัดแน่นโดยน้ำหนักตัวเองได้ดี ควรมีค่า Compaction Ratio ของคอนกรีตประมาณ 0.95–0.96

## 2.2 การใช้เสาเข็มเจาะในกรุงเทพฯ

### 2.2.1 คุณสมบัติและลักษณะของคอนกรีตที่เหมาะสมสำหรับงานเสาเข็มเจาะ ในปัจจุบัน

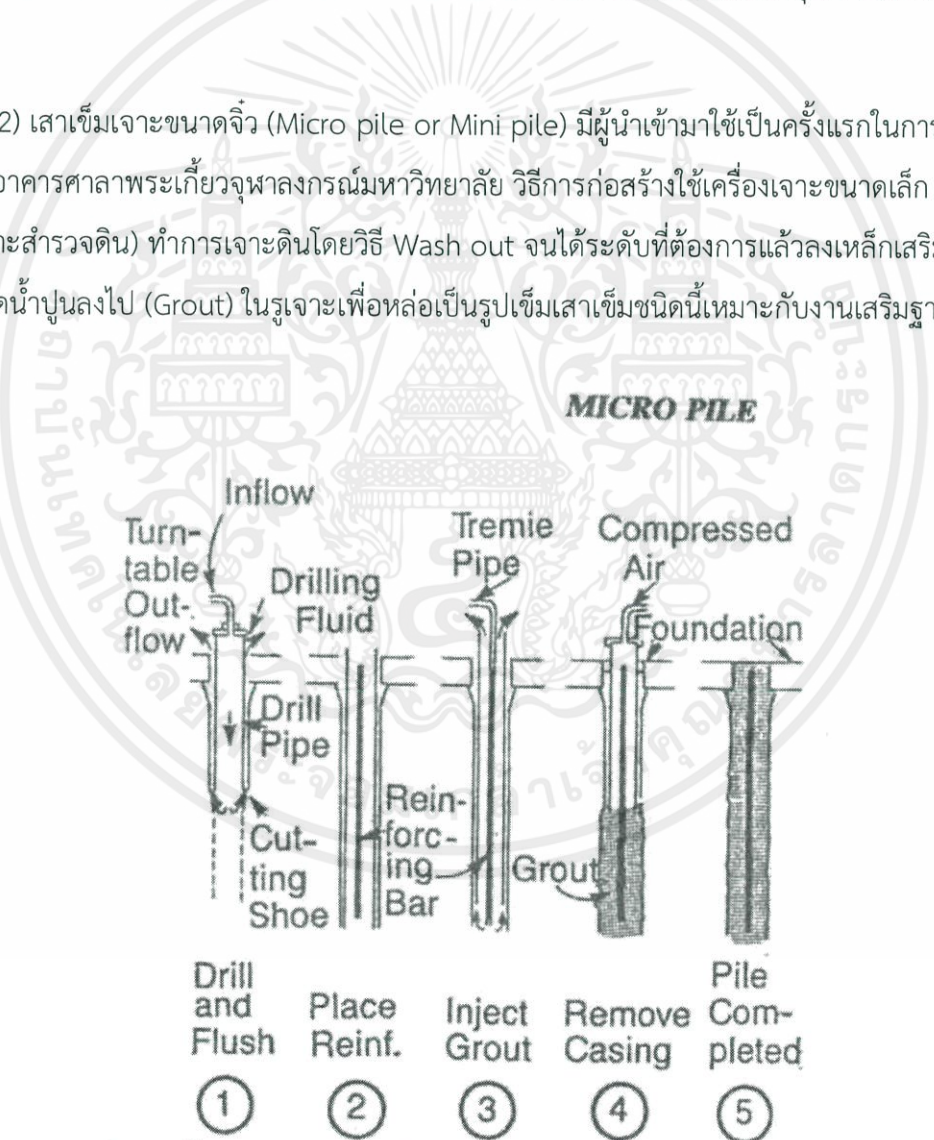
เสาเข็มเจาะได้เข้ามามีบทบาทในวงการก่อสร้างในประเทศไทยโดยเฉพาะในพื้นที่กรุงเทพมหานครมาเป็นเวลากว่า 30 ปีมาแล้ว เสาเข็มเจาะรุ่นแรกที่มีผู้นำมาใช้ในกรุงเทพมหานครเป็นเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ระบบ Wet process โดยใช้เครื่องจักรระบบ Reverse circulation ก่อสร้างในแม่น้ำเพื่อเป็นฐานรากของสะพานข้ามแม่น้ำเจ้าพระยา เช่น สะพานสมเด็จพระปิ่นเกล้า, สะพานสมเด็จพระเจ้าตากสินเป็นต้น เสาเข็มเจาะเริ่มเข้ามามีบทบาทในปี พ.ศ.2510 ใช้ในงานก่อสร้างสะพานที่มีเสาตอม่ออยู่ห่างกันมาก ๆ พ.ศ.2514 ได้มีผู้นำเสาเข็มชนิดอื่น ๆ เข้ามาใช้เป็นเสาเข็มเจาะระบบแห้งเจาะไม่ลึกมากนัก เช่น เข็มเจาะระบบ Tripod (แบบสามขา), ระบบ Continuous Flight Auger, Casing Oscillator, ระบบ BENOTO แต่พบว่าเสาเข็มเจาะระบบ Dry Process รุ่นแรก ๆ ดังกล่าวข้างต้นที่นำมาใช้มีความไม่เหมาะสมกับสภาพดินใน กรุงเทพมหานคร จึงเลิกกันไปเกือบหมด เหลือเพียงระบบสามขาที่ยังมีผู้ใช้กันอยู่แพร่หลายในโครงการต่าง ๆ ที่มีขนาดน้ำหนักบรรทุกออกแบบไม่สูงมากนัก ต่อจากนั้นประมาณปี พ.ศ. 2520 จึงได้มีผู้ทำเครื่องมือทำเสาเข็มเจาะระบบ Rotary drilling rig เข้ามาใช้ในพื้นที่กรุงเทพมหานครโดยเครื่องมือระบบนี้สามารถใช้เจาะได้ทั้งระบบ Dry process และ Wet process อาคารชุดแรก ๆ ที่ใช้เสาเข็มประเภทนี้ จะเจาะโดยระบบ Wet process โดยเจาะให้ความลึกปลายเสาเข็มอยู่ที่ทรายแน่นชั้นแรกความลึกประมาณ 30 - 35 เมตร โดยออกแบบให้เสาเข็มมีค่าการรับน้ำหนักประมาณ 200-300 ตันต่อตัน (DIA. 1.00 ม.) จากนั้นการสร้างตึกที่สูงขึ้นจึงได้เจาะเสาเข็มลงไปถึงชั้นทรายชั้นที่2และ3 ความลึกประมาณ 40-70 เมตร และได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย แม้ว่าจะทำการก่อสร้างเสาเข็มให้ลึกถึงระดับ 60 เมตร แล้วพบเสาเข็มเจาะระบบปรกติยังรับน้ำหนักไม่พอ ระบบเสาเข็มเจาะจึงได้พัฒนาให้เสาเข็มรับน้ำหนักมากขึ้นไปอีกโดยทำการเปลี่ยนรูปทรงเป็นเสาเข็มแบบเหลี่ยม

(Barrette pile) เพื่อให้มีขนาดใหญ่ขึ้น หรือทำการอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาเข็ม (Base grouted bored pile) เพื่อให้สามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าเสาเข็มธรรมดา นอกจากนี้ยังมีการใช้เสาเข็ม Mini pile และ Micro pile เป็นเสาเข็มขนาดจิวไซในงานเสริมฐานรากอาคาร งานแรกที่มีการใช้เสาเข็มเจาะขนาดจิวนี้ คือ งานซ่อมฐานรากอาคารศาลาพระเกี้ยว จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

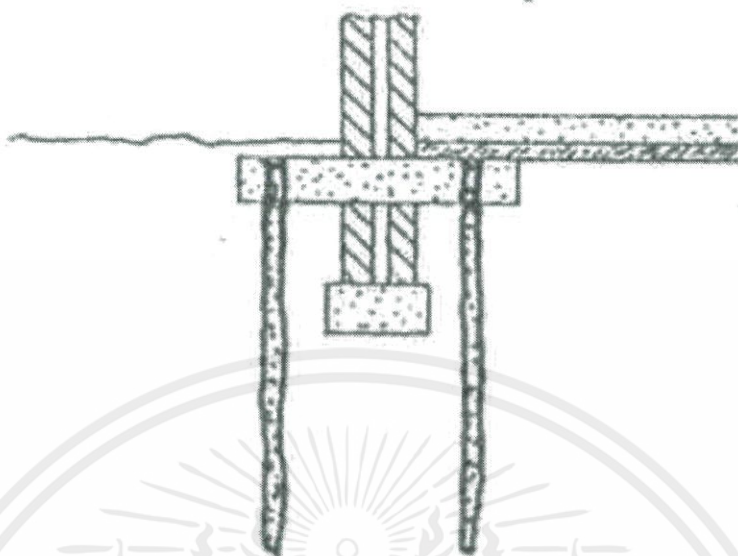
2.2.2 ระบบและเทคนิคเสาเข็มเจาะที่ใช้ในกรุงเทพมหานครในอดีตและปัจจุบัน

1) ระบบเสาเข็มเจาะแบบเปียก (Wet process) โดยทั่วไปจะเป็นเสาเข็มที่เจาะให้ปลายของเสาเข็มหยั่งลงในชั้นทรายแน่น ซึ่งในชั้นดินทราย รูเจาะจะไม่สามารถคงรูปอยู่ในสภาพการเจาะแห่ง ดังนั้นการเจาะแบบนี้จะต้องใช้สารละลายเบนโทไนท์เป็นตัวช่วยด้านมิให้ผนังหลุมเจาะเกิดการพังทลาย

2) เสาเข็มเจาะขนาดจิว (Micro pile or Mini pile) มีผู้นำเข้ามาใช้เป็นครั้งแรกในการซ่อมเสริมฐานรากอาคารศาลาพระเกี้ยวจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วิธีการก่อสร้างใช้เครื่องเจาะขนาดเล็ก (คล้ายกับเครื่องเจาะสำรวจดิน) ทำการเจาะดินโดยวิธี Wash out จนได้ระดับที่ต้องการแล้วลงเหล็กเสริมและทำการอัดฉีดน้ำปูนลงไป (Grout) ในรูเจาะเพื่อหล่อเป็นรูปเข็มเสาเข็มชนิดนี้เหมาะกับการงานเสริมฐานราก

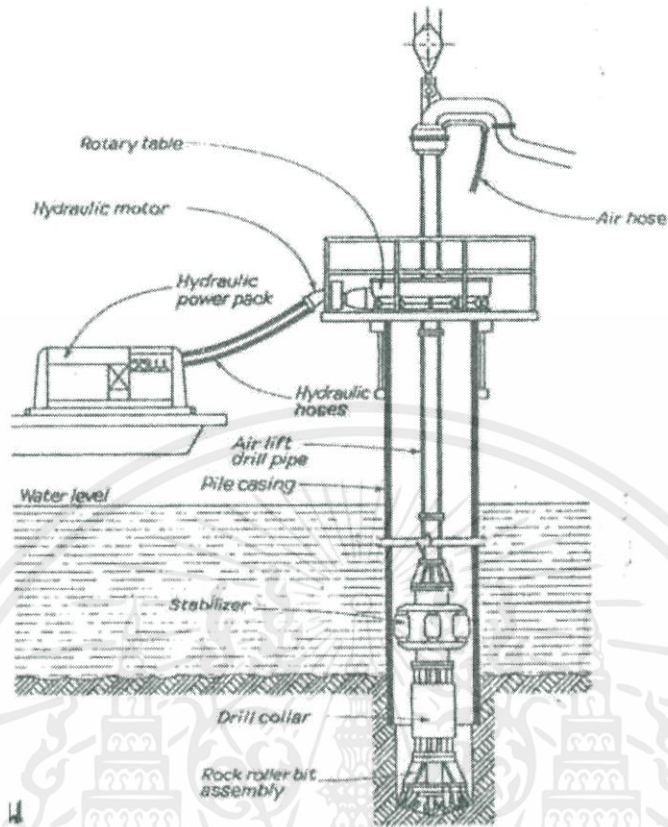


รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการทำเสาเข็ม Micro pile (Thasananipan, 1991)

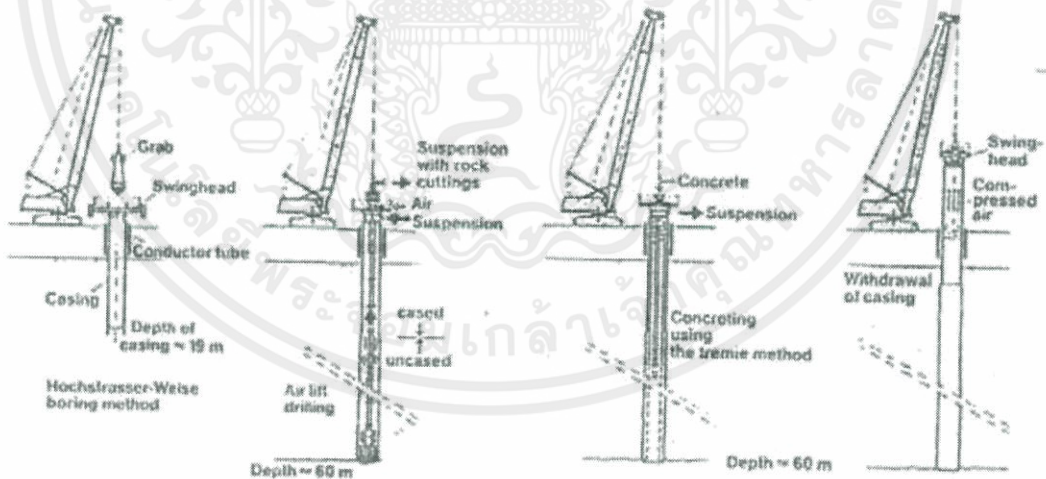


รูปที่ 2.3 การนำ Micro pile ไปใช้ในงานเสริมฐานราก (Thasananipan, 1991)

3) เสาเข็มเจาะขนาดใหญ่แบบเจาะเปียกกระบอก Reverse Circulation เป็นระบบที่แพร่หลายใช้กันทั่วโลก เหมาะสำหรับงานก่อสร้างฐานรากในทะเลหรือในแม่น้ำ วิธีการก่อสร้างเริ่มด้วยการปักปลอกเหล็กถาวรจนปลายปลอกเหล็กจมลงในชั้นดินแข็งใต้ท้องแม่น้ำ และดูดน้ำในปลอกเหล็กออก แล้วใช้ Grab ขุดดินในปลอกเหล็กให้ได้ความลึกเพียงพอที่จะติดตั้งหัวเจาะระบบ R.C. บนปลอกเหล็กขณะที่เครื่อง R.C. หมุนเพื่อกัดเจาะดินให้แตกเป็นเม็ดเล็ก ๆ ก็จะทำการดูดดูดดินที่แตกตัวผสมกับสารละลายขึ้นทางก้านเจาะซึ่งเป็นรูกลวง เพื่อผ่านเข้าเครื่องทำความสะอาด เมื่อระดับสารละลายในปลอกเหล็กลดลงต้องคอยเติมให้เต็มหลุมตลอดเวลา ขั้นตอนดังกล่าวข้างต้นจะดำเนินไปจนกระทั่งเจาะกัดดินลงไปจนได้ระดับที่ต้องการ หลังจากนั้นจึงทำการทำความสะอาดสารละลาย, ลงเหล็กเสริมและเทคอนกรีตผ่านท่อเท (Tremie pipe) เป็นอันเสร็จสิ้นขั้นตอน เสาเข็มเจาะระบบนี้ส่วนมากจะก่อสร้างให้มีขนาดใหญ่ไม่น้อยกว่า DIA. 1.50 เมตรและลึกกว่า 50 เมตร รับน้ำหนักประมาณ 1,000 ตันต่อต้น ระยะเวลาการก่อสร้างแต่ละต้นประมาณ 1-2 วัน เสาเข็มเจาะระบบนี้ไม่นิยมใช้กับการก่อสร้างอาคาร เพราะก่อสร้างได้ช้าและ การทำความสะอาดสารละลายเบนโทไนท์มีความยุ่งยากมากกว่าระบบอื่น ๆ



รูปที่ 2.4 เครื่องมือทำเสาเข็มเจาะระบบ Reverse Circulation (Thasananipan, 1991)



รูปที่ 2.5 แสดงขั้นตอนการเจาะเข็มระบบ Reverse Circulation (Thasananipan, 1991)

4) เสาเข็มเจาะขนาดใหญ่แบบเจาะเปียกกระบบ Rotary drill (R.D.) มีความนิยมใช้ระบบเข็มเจาะชนิดนี้มากเพราะสามารถก่อสร้างได้รวดเร็วกว่าเสาเข็มเจาะระบบอื่น ๆ อีกสามารถก่อสร้างให้มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดใหญ่และลึกให้สามารถรับน้ำหนักได้สูงสุดและคล่องตัวกว่าเสาเข็มเจาะประเภทอื่น ๆ ใช้เครื่องเจาะประเภท Rotary drilling rig ซึ่งมี 2 ประเภท ประเภทแรกเรียกว่า Crane mounted rig เป็นการนำหัวเจาะไปติดตั้งบนรถเครน ดินตะขาบไม่สามารถถอดแยกชิ้นส่วนได้ ข้อดีของเครื่องเจาะระบบแยกส่วนได้คือ มีกำลังในการเจาะมากกว่าและสามารถต่อก้านเจาะได้ยาวกว่าแบบไม่แยกส่วน ส่วนเครื่องเจาะแบบไม่แยกส่วนมีข้อดีที่กว่าแยกส่วนคือเสียงจะเงียบกว่าและการทำงานคล่องตัวกว่าแบบแยกส่วน

ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบ R.D. มีดังนี้คือ

ก. ทำการลงปลอกเหล็กชั่วคราวตามตำแหน่งที่จะขุดเจาะเพื่อป้องกันชั้นดินเหนียวอ่อน ปกติใช้ยาวประมาณ 15.00 ม.

ข. ขุดเจาะดินภายในปลอกเหล็กโดยใช้ส่วนเป็นตัวเจาะจนถึงระดับก่อนพบชั้นทรายชั้น แรก ปกติจะลึกประมาณ 21.00 ม.

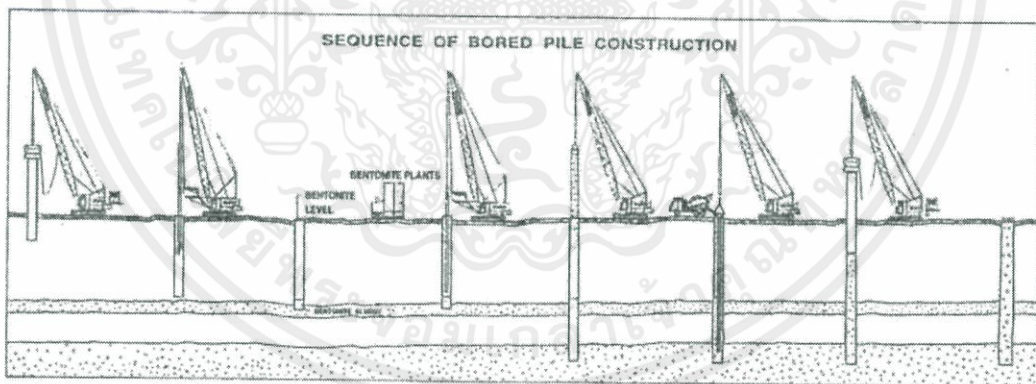
ค. เติมสารละลายเบนโทไนท์ ลงในหลุมเจาะเพื่อต้านแรงดันผนังหลุมเจาะมิให้พังทลาย

ง. ทำการเจาะต่อได้สารละลายเบนโทไนท์ โดยใช้หัวเจาะแบบถัง(BUCKET)

จ. เมื่อเจาะจนได้ระดับแล้ว ทำความสะอาดกันหลุมและลงเหล็กเสริมเสาเข็ม

ฉ. เทคอนกรีตผ่านท่อเท (TREMIE)จนได้ระดับที่ต้องการ

ช. ขั้นตอนสุดท้ายทำการถอนปลอกเหล็กชั่วคราวออก



รูปที่ 2.6 แสดงขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเจาะเปียกโดยเครื่อง Rotary drill (R.D.) (Thasananipan, 1991)

โดยทั่วไปเสาเข็มระบบนี้จะออกแบบให้รับน้ำหนักบรรทุกทุกตั้งแต่ 300-1000 ตัน ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็มเจาะและความลึกปลายเสาเข็ม

5) เสาค้ำเข็มเจาะแบบเจาะเปียกกรุปลีเหลี่ยม บางโครงการต้องการเสาค้ำรับน้ำหนักมาก ถ้าเปลี่ยนเป็นเสาค้ำเข็มกรุปลีเหลี่ยมซึ่ง สามารถก่อสร้างให้มีเส้นรอบรูปและพื้นที่หน้าตัดมากกว่าเสาค้ำเข็มเจาะรูปทรงกลมและสามารถออกแบบให้รับน้ำหนักบรรทุกต่อต้นได้สูงกว่า 1000 ตัน ขั้นตอนการเจาะคล้ายคลึงกับการเจาะเสาค้ำเข็มรูปทรงกลมแบบเจาะเปียก มีส่วนแตกต่างเพียงการเจาะเสาค้ำเข็มกรุปลีเหลี่ยมไม่มีการลงปลอกเหล็กชั่วคราว แต่จะก่อสร้างคอกคอนกรีตเสริมเหล็กให้ได้รูปเสาค้ำเข็มตรงตำแหน่งที่จะขุดเจาะแล้วทำการเจาะใต้สารละลายเบนโทไนท์ตั้งแต่ขั้นตอนแรก เสาค้ำเข็มกรุปลีเหลี่ยมนี้สามารถเจาะให้มีขนาดหน้าตัดกว้างตั้งแต่ 60 ซม., 80 ซม., 100 ซม., 120 ซม. และ 150 ซม. และยาวตั้งแต่ 2.50 เมตร ถึง 6.00 เมตร และความลึกสามารถเจาะได้ประมาณ 60 เมตร

6) เสาค้ำเข็มอัดฉีดน้ำปูนที่ปลายเสาค้ำเข็ม (Based grouted bored pile) เนื่องจากวิธีการเจาะเสาค้ำเข็มระบบใดก็ตามจะมีผลทำให้ดินใต้ปลายเสาค้ำเข็มมีค่าการรับน้ำหนักแบกทาน (Bearing resistant) ลดลง เนื่องจากสาเหตุสองประการ คือ

ก. การขุดเจาะดินเท่ากับเป็นการลด Overburden pressure ของชั้นดินทราย ทำให้เกิด Stress relief ในชั้นทรายระดับใต้หลุมที่เจาะ ทำให้ค่าการรับน้ำหนักของชั้นทรายเป็นผลลดลงและมีค่าทรุดตัวมากกว่าปกติเมื่อรับน้ำหนัก

ข. ดินทรายก้นหลุมเจาะอาจจะถูกรบกวนกระเทือน (Disturbed) จากวิธีการเจาะหรืออาจมีตะกอนดินจากการเจาะตกค้างอยู่ที่ก้นหลุม ทำให้กำลังแบกทานของดินที่ระดับปลายเสาค้ำเข็มลดลงจากธรรมชาติการอัดฉีดน้ำปูนจะทำให้เสาค้ำเข็มสามารถรับน้ำหนักมากขึ้น และลดค่าการทรุดตัวของ เสาค้ำเข็มเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทดสอบ

วิธีการอัดฉีดน้ำปูนที่ทำกันอยู่มีอยู่หลายวิธี คือ

ก. แบบฝังท่อเหล็กในตัวเสาค้ำเข็มและเจาะดินใต้ปลายเสาค้ำเข็มผ่านท่อที่ฝังไว้ลงไปประมาณ 30 ซม. นำ Packer หย่อนผ่านท่อเหล็กลงไปในรูที่เจาะเตรียมไว้ใต้ปลายเสาค้ำเข็มและอัดน้ำปูนผ่าน Packer การฝังท่อเหล็กอาจฝัง 2, 3 หรือ 4 ท่อก็ได้ ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาค้ำเข็มอัดฉีดน้ำปูน โดยฝังท่อเหล็กนี้มักจะทำควบคู่ไปกับการทำ Cross hole ultrasonic testing เพราะสามารถส่งเซนเซอร์ผ่านท่อที่ฝังไว้เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของตัวเสาค้ำเข็มได้ทุกระดับ

ข. การอัดฉีดน้ำปูนปลายเสาค้ำเข็มโดยติดตั้ง Grouting cell (Flat-jack) Grouting cell จะประกอบด้วยแผ่นเหล็กบางมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใกล้เคียงกับขนาดของเสาค้ำเข็มหุ้มด้วยแผ่นยางที่ด้านล่าง การติดตั้งจะผูกติดกับปลายโครงเหล็กเสริมหย่อนลงจนถึงก้นรูเจาะและที่ด้านบนของ Grouting cell จะต่อด้วยท่อผูกติดโครงเหล็กขึ้นมาบนหัวเสาค้ำเข็ม การอัดฉีดน้ำปูนจะอัดฉีดผ่านท่อเข้าไปใน



### 2.2.3 การสร้างมาตรฐานงานก่อสร้างเสาเข็มระบบเจาะเปียกในประเทศไทย ที่สอดคล้องกับมาตรฐานสากลในยุคโลกาภิวัตน์

มาตรฐานงานเสาเข็มระบบเจาะเปียกในประเทศไทยไม่มีมาตรฐานกลางที่เหมาะสม เสาเข็มที่ติดตั้งแล้วเสร็จในเมืองไทยจึงมีสมรรถนะหลากหลายระดับที่ไม่อยู่ในระดับมาตรฐานเดียวกัน มาตรฐานสารละลายที่ใช้ในงานเสาเข็มระบบเจาะเปียก

#### 1) สารละลายเบนโทไนท์

คุณสมบัติ ในอดีตผู้ออกแบบในประเทศไทยจะกำหนดมาตรฐานการตรวจสอบคุณสมบัติของสารละลายเบนโทไนท์ไว้แต่เพียงค่า Density, Viscosity, Sand content และ pH Value เท่านั้น แต่ในการก่อสร้างเสาเข็มระบบเจาะเปียกตามมาตรฐานของประเทศที่มีการพัฒนาแล้วหลาย ๆ ประเทศเช่นของอังกฤษ (ICE, 1996) และของสหรัฐอเมริกา (ADSC, 1995) กำหนดให้มีการตรวจสอบเรื่องการปริมาณน้ำในสารละลายที่ซึมหายเข้าไปในชั้นดิน (Fluid Loss) และ ปริมาณความหนาของผงเบนโทไนท์ที่ก่อตัวขึ้นที่ผิวผนังชั้นทรายในรูเจาะ (Filter Cake) และค่าอื่น ๆ ไปด้วย

การเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบ รายการก่อสร้างเสาเข็มที่กำหนดโดยผู้ออกแบบในประเทศไทยมักจะกำหนดคุณสมบัติของสารละลายไว้ลอย ๆ ในงานสนามผู้ควบคุมงานจึงให้เก็บตัวอย่างจากถังเก็บหรือตักจากผิวบนของสารละลายในรูเจาะมาทดสอบ แต่ในต่างประเทศจะกำหนดให้เก็บตัวอย่างของสารละลายที่ก้นหลุมเจาะมาทำการทดสอบก่อนทำการเทคอนกรีต (เช่น ICE, 1996 และ ADSC, 1995 เป็นต้น) หากคุณสมบัติของสารละลายไม่ได้ตามเกณฑ์จะต้องทำการปรับปรุง เปลี่ยนถ่ายและทดสอบใหม่จนกว่าจะได้จึงเทคอนกรีต

ระยะเวลาในการติดตั้ง เมื่อเวลาผ่านไปยิ่งนานน้ำก็จะซึมหายมากขึ้น และผงตะกอนเบนโทไนท์ก็จะเกาะติดที่ผิวผนังหนาขึ้นตามลำดับ ซึ่งจะทำให้แรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มลดลง เคยมีการศึกษาผลกระทบของระยะเวลาที่ใช้ในการติดตั้งเสาเข็มในชั้นดินกรุงเทพฯพบว่าเมื่อใช้เวลาการติดตั้งที่ยาวนาน ค่าแรงเสียดทานก็จะยิ่งลดต่ำลง มาตรฐาน ADSC จึงกำหนดไว้ว่าหากใช้เวลาการติดตั้งเสาเข็มนานมากกว่า 24 ชั่วโมงหรือปล่อยให้สารละลายในรูเจาะอยู่นานเกินกว่า 4 ชั่วโมงแล้วก่อนจะเทคอนกรีตต้องทำการเจาะคว้านใหม่เพื่อครูดผงเบนโทไนท์ที่เกาะติดผิวรูเจาะออก

#### 2) สารละลายโพลีเมอร์

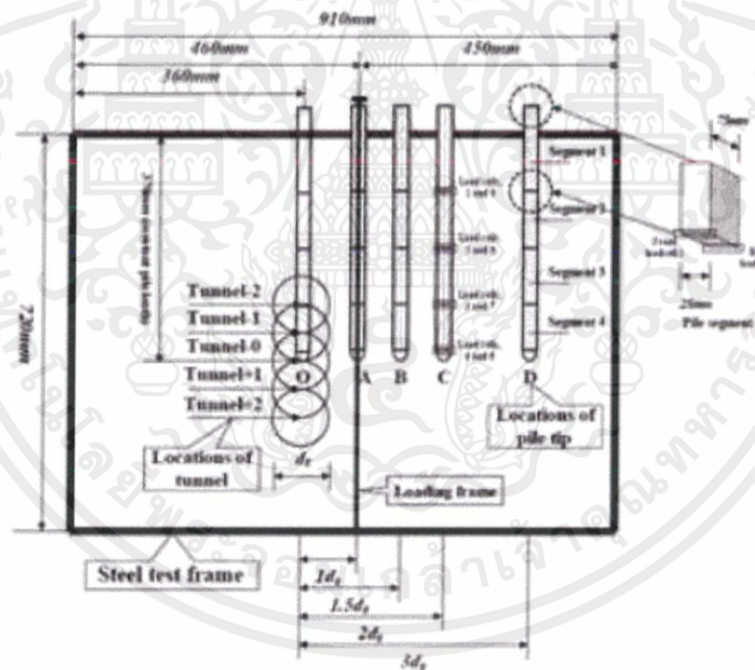
คุณสมบัติ เนื่องจากสารละลายโพลีเมอร์ยังเป็นของใหม่ในวงการเสาเข็มเจาะในประเทศไทยจึงยัง ไม่มีการกำหนดคุณสมบัติไว้

ระยะเวลาในการติดตั้ง เนื่องจากสารละลายโพลีเมอร์ไม่มีคุณสมบัติ Thixotropy Characteristic ดังนั้นระยะเวลาก่อสร้างหรือระยะเวลาที่สารละลายอยู่นิ่ง ๆ จึงไม่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของเสาเข็ม แต่ประการใด

### 2.3 ผลการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบและความเสียหายของการก่อสร้างเสาเข็มรับแรงต่อนอุมงค์ที่มีอยู่เดิม

ส่งผลกระทบในรูปแบบของการเคลื่อนตัวของผนังอุมงค์หรือการเปลี่ยนแปลงของแรงภายในผนังอุมงค์ สามารถแบ่งลักษณะปัญหาได้ดังนี้

- 1) ผลกระทบจากการก่อสร้างเสาเข็มเดี่ยว
- 2) ผลกระทบจากเสาเข็มกลุ่ม
- 3) ผลกระทบจากเสาเข็มแถว



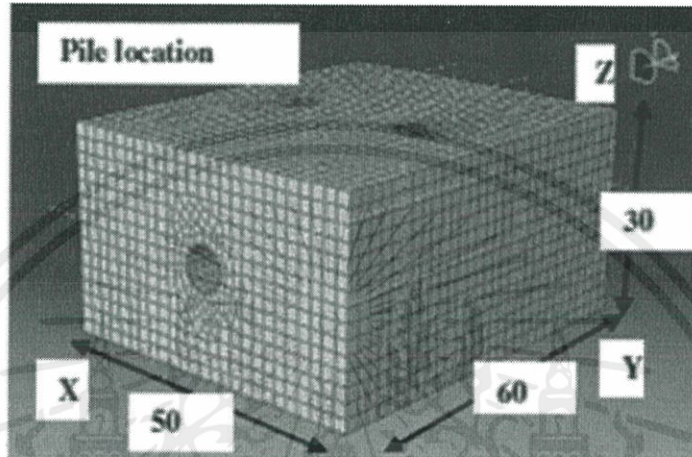
รูปที่ 2.9 แบบกรณีศึกษาผลกระทบจากเสาเข็มเดี่ยวข้างเคียง (Lee และ Yoo, 2006)

จากการศึกษาของ Lee และ Yoo (2006) พบว่าตำแหน่งของปลายเสาเข็ม มีผลต่อการเคลื่อนตัวของผนังอุมงค์ในแนวตั้งและแนวราบ เช่น ถ้าปลายเข็มอยู่ที่ตำแหน่งยอดอุมงค์ จะมีการเคลื่อนตัวมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

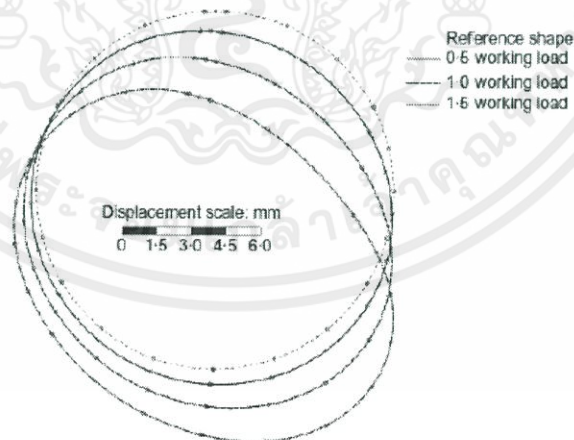
จากการศึกษาดังกล่าว สามารถสรุปผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อมีเสาเข็มรับน้ำหนักอยู่ใกล้อุโมงค์ดังนี้

1) ค่าการเสียรูปของผนังอุโมงค์ที่ตำแหน่งยอดอุโมงค์ crown, ด้านล่างอุโมงค์ invert และด้านข้างอุโมงค์ spring line จะมีค่าลดลงเมื่อปลายเสาเข็มมีค่าห่างมากขึ้น และตำแหน่งที่ทำให้ค่าการเสียรูปของผนังอุโมงค์มีค่ามากที่สุดเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ที่ตำแหน่งยอดอุโมงค์ (Schroeder et al, 2004; Arunkumar et al, 2010)



รูปที่ 2.10 แบบจำลอง 3 มิติด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีศึกษาผลกระทบจากการก่อสร้างเสาเข็มรับแรงข้างเคียงแนวอุโมงค์เดิมในชั้นดินเหนียว (Schroeder et al, 2004; Arunkumar et al, 2010)

2) การเสียรูปของอุโมงค์เดิมเมื่อได้รับผลกระทบจากเสาเข็มรับน้ำหนักด้านข้างเพียงด้านเดียวนั้น มีลักษณะคล้ายเมล็ดถั่ว ดังรูปด้านล่าง (Schroeder et al, 2004)



รูปที่ 2.11 แสดงการเสียรูปของผนังอุโมงค์เมื่อได้รับผลกระทบจากเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกเพียงด้านเดียว (Schroeder et al, 2004)

3) ในกรณีที่มีเสาเข็มรับน้ำหนักอยู่เหนืออุโมงค์เดิมนั้นจะส่งผลกระทบต่อค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นในผนังอุโมงค์ในแนวราบอยู่ในระยะ  $-1D_f$  ถึง  $+1D_f$  จากกึ่งกลางฐานราก แต่เมื่อปลายเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกอยู่ห่างออกไปในแนวราบจะทำให้ค่าความเค้นในผนังอุโมงค์ ซึ่งอยู่ห่างประมาณ  $+0.75D_t$  (จากกึ่งกลางอุโมงค์ถึงกึ่งกลางฐานรากค่าความเค้นสูงสุดในผนังอุโมงค์จะลดลงครึ่งหนึ่ง (Yoo, 2014)

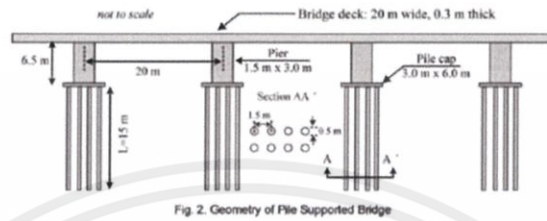
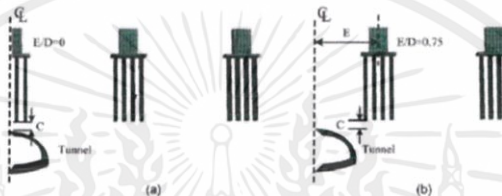
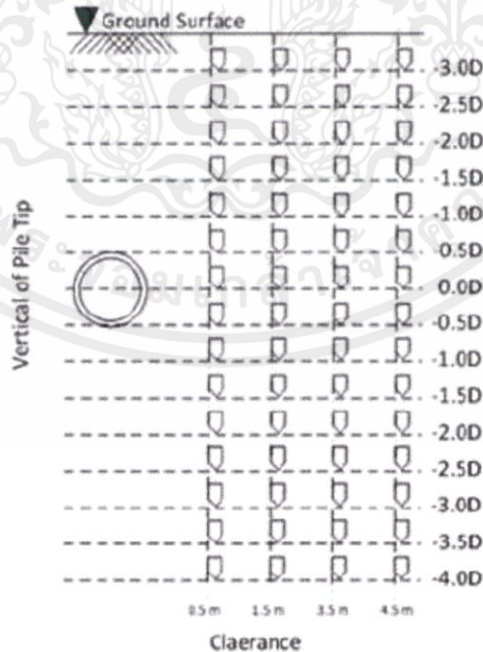


Fig. 2. Geometry of Pile Supported Bridge

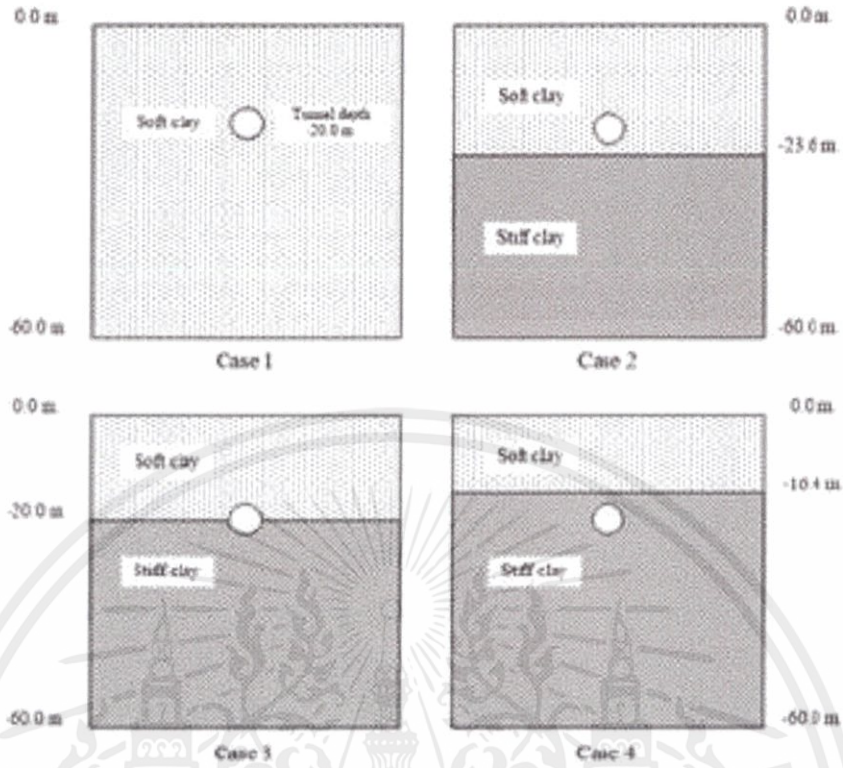


รูปที่ 2.12 แสดงตำแหน่งการวางตัวของเสาเข็ม (Yoo, 2014)

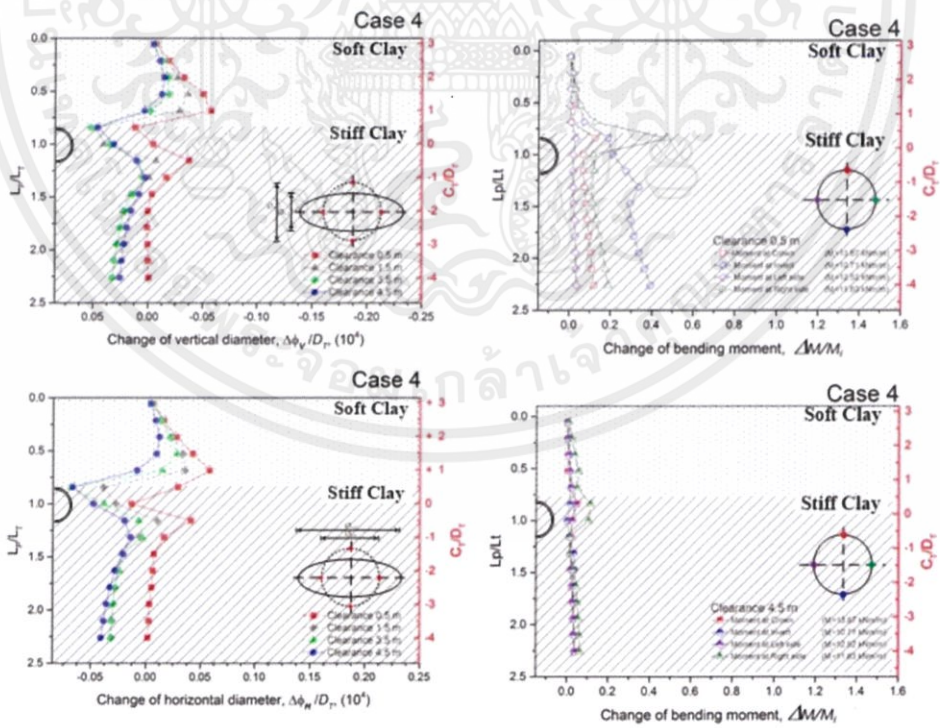
4) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาค่าการเปลี่ยนแปลงและรวมถึงค่าแรงภายในผนังอุโมงค์ที่เปลี่ยนแปลงไปโดย Lueprasert 2015, Heama 2016 ซึ่งศึกษาปัจจัยต่าง ๆ แสดงดังรูป



รูปที่ 2.13 แสดงตำแหน่งของปลายเสาเข็มที่ใช้ในการศึกษา (Heama et. al., 2016)



รูปที่ 2.14 แสดงรูปแบบของดินที่ใช้ในการศึกษา (Lueprasert et. al., 2015)



รูปที่ 2.15 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงตามแนวแกนของผนังอุโมงค์ (Heama et. al., 2016)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการศึกษาดังกล่าวนำมาพัฒนาโซนพื้นที่ปลอดภัยในการก่อสร้างเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกทุกใกล้เคียงอุโมงค์เดิมในกรุงเทพฯ สามารถสรุปได้ดังนี้

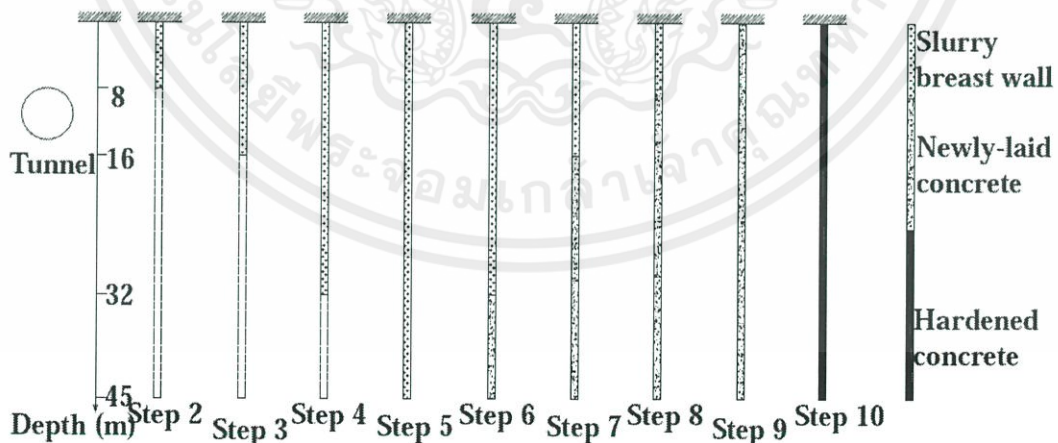
1) ค่าการเสียรูปตามแนวแกนของผนังอุโมงค์และค่าการเปลี่ยนแปลงค่าแรงภายในผนังอุโมงค์จะมีค่าลดลงเมื่อเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกมีระยะห่างเพิ่มมากขึ้นโดยจะมีค่าคงที่เมื่อเสาเข็มอยู่ห่างประมาณ  $0.6 Dt$  (นับจากขอบอุโมงค์ถึงขอบเสาเข็ม)

2) การเสียรูปตามแนวแกนของอุโมงค์เดิมที่วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนจะมีค่าการเสียรูปมากกว่าอุโมงค์เดิมที่วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งโดยผลกระทบต่อค่าการเสียรูปอุโมงค์จะมีค่ามากเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ที่ระยะ  $-2 Dt$  ถึง  $+2 Dt$  (นับจากกึ่งกลางอุโมงค์ในแนวดิ่ง)

3) ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงในผนังอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวแข็งมีค่ามากกว่าอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวอ่อน รูปแบบของการเปลี่ยนแปลงค่าแรงภายในของผนังอุโมงค์จะมีลักษณะคล้ายกับการเสียรูปตามแนวแกนของผนังอุโมงค์

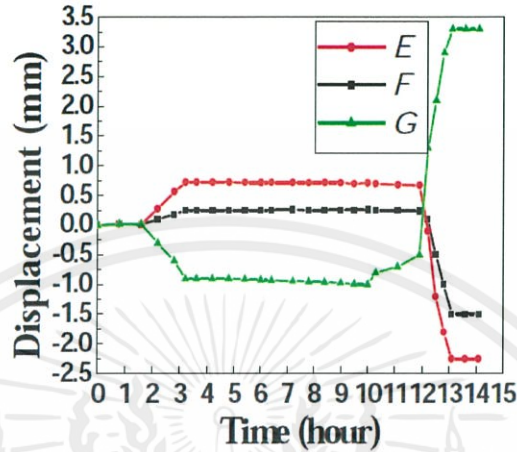
### 2.3.1 ผลการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบและความเสียหายของการก่อสร้างเสาเข็มรับแรงต่ออุโมงค์

ได้มีการศึกษาอิทธิพลของเสาเข็มเจาะที่อยู่ใกล้เคียงอุโมงค์เชิงคำนวณ (Yao, 2009) โดยได้ทำการสร้างแบบจำลองการก่อสร้างเสาเข็มใกล้เคียงแนวอุโมงค์ โดยใช้โปรแกรม FRAC3D เพื่อวิเคราะห์หารายละเอียดอิทธิพลของการก่อสร้างเสาเข็มที่อยู่ใกล้อุโมงค์ โดยมีขั้นตอนการสร้างแบบจำลองการก่อสร้างเสาเข็มดังรูป

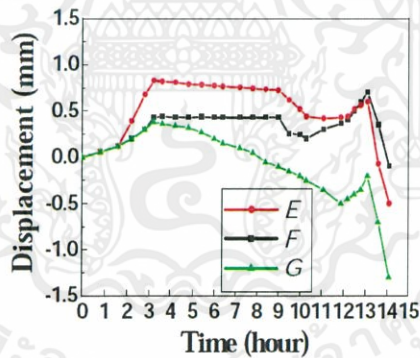


รูปที่ 2.16 แสดงขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็ม (Yao, 2009)

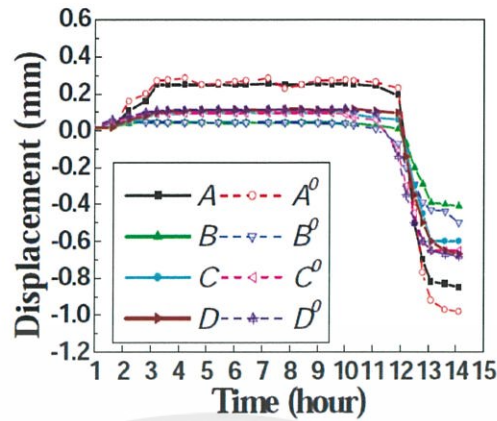
โดยใช้ตัวแปรต่าง ๆ ในการบ่งบอกอิทธิพลของการก่อสร้างเสาเข็ม เช่น Soil displacement, Deformation of tunnel, Bending moment โดย soil displacement แยกย่อยออกได้เป็น Horizontal displacement และ Vertical displacement ดังรูป



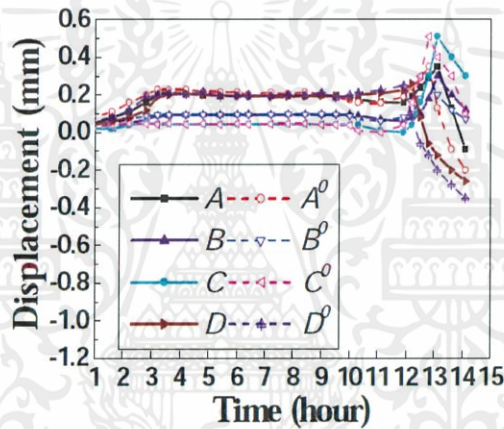
รูปที่ 2.17 แสดงค่า Horizontal displacement ของดิน ในช่วงระหว่างที่มีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะ



รูปที่ 2.18 แสดงค่า Vertical displacement ของดิน ในช่วงระหว่างที่มีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะ



รูปที่ 2.19 แสดงค่า Horizontal displacement ของ Tunnel lining ในช่วงระหว่างที่มีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะเปรียบเทียบกับค่าที่ตรวจวัดได้จริง



รูปที่ 2.20 แสดงค่า Vertical displacement ของ Tunnel lining ในช่วงระหว่างที่มีการก่อสร้างเสาเข็มเจาะเปรียบเทียบกับค่าที่ตรวจวัดได้จริง

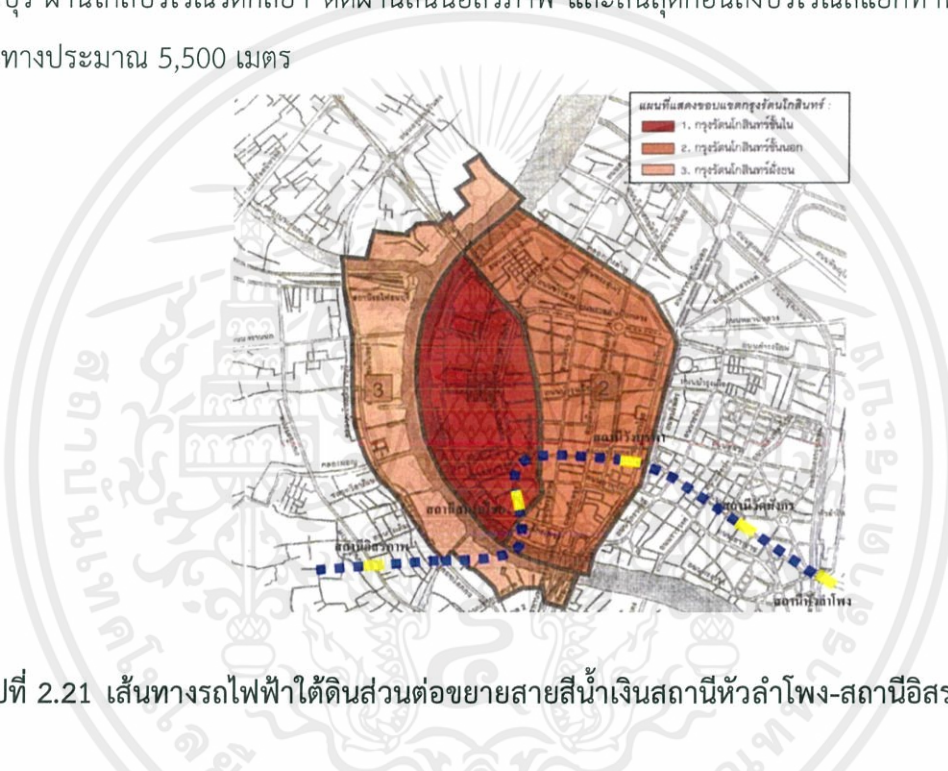
สามารถสรุปผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อมีเสาเข็มรับน้ำหนักข้างเคียงแนวอุโมงค์เดิมได้ดังนี้

- อิทธิพลของเสาเข็มเจาะที่อยู่ใกล้เคียงอุโมงค์มีผลมากในช่วงระหว่างขั้นตอนการจำลอง การเทคอนกรีตที่ผิว ซึ่งอยู่เหนือจุดที่ทำการตรวจสอบอยู่ และ ขั้นตอนการจำลอง การแข็งตัวของคอนกรีต
- ผลกระทบจากอิทธิพลของเสาเข็มเจาะที่อยู่ใกล้เคียงอุโมงค์เกิดขึ้นที่ด้านนอกของของหลุมเจาะ น้อยกว่า 3 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางหลุมเจาะ

## 2.4 ข้อมูลทั่วไปโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย (MRTA)

### 2.4.1 แนวเส้นทางรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย

แนวเส้นทางรถไฟฟ้าใต้ดินในโครงการส่วนต่อขยายสายสีน้ำเงิน เริ่มออกจากสถานีหัวลำโพงซึ่งเป็นสถานีเดิมของโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน ขุดเจาะตามถนนพระราม 4 ในแนวทิศตะวันตกผ่านถนนเจริญกรุง คลองผดุงกรุงเกษม พื้นที่เมืองเยาวราช จนถึงแยกวัดพระเชตุพนวิมลมังคลาราม จึงเลี้ยวซ้ายไปตามถนนมหาไชยผ่านหน้าโรงเรียนวัดราชบพิศ ตลาดปากคลองตลาด แล้วลอดใต้แม่น้ำเจ้าพระยาข้ามไปฝั่งธนบุรี ผ่านใกล้บริเวณวัดกัลยา ตัดผ่านถนนอิสรภาพ และสิ้นสุดก่อนถึงบริเวณสี่แยกท่าพระ รวมเป็นระยะทางประมาณ 5,500 เมตร



รูปที่ 2.21 เส้นทางรถไฟฟ้าใต้ดินส่วนต่อขยายสายสีน้ำเงินสถานีหัวลำโพง-สถานีอิสรภาพ

### 2.4.2 สภาพทางธรณีวิทยา

พื้นที่บริเวณสถานีหัวลำโพงถึงสถานีวัดมังกร ผ่านถนนเจริญกรุงและถนนเยาวราช ซึ่งเคยเป็นพื้นที่ราบลุ่มและน้ำท่วมถึง ทำให้การจัดเรียงตัวของชั้นดินเป็นดังรูป 2.17 โดยช่วงความลึก 3 เมตรแรกเป็นดินถม หลังจากนั้นเป็นชั้นของดินเหนียวอ่อนโดยมีความลึกอยู่ในช่วง 3-12 เมตรจากผิวดิน ถัดจากชั้นดินเหนียวอ่อน เป็นชั้นดินเหนียวปานกลาง ความหนาประมาณ 3-4 เมตร จากนั้นเป็นชั้นดินเหนียวแข็ง ที่มีความหนาของชั้นประมาณ 10 เมตร ส่วนชั้นถัดไปเป็นชั้นดินทรายที่ 1 ที่มีความหนาของชั้น 5 เมตร ต่อมาเป็นชั้นดินเหนียวแข็งมากและชั้นดินทรายที่ 2 รายละเอียดลักษณะทั่วไปของชั้นดินต่าง ๆ มีดังนี้

ชั้นที่ 1 : ดินถมและเศษวัสดุเป็นชั้นบนสุดที่เป็นพวกวัสดุถม (Very loose to medium dense silty sand) และพวกเศษผุร่อน (Medium to stiff silty clay) ที่มีสีค่อนข้างเหลืองและเทา ความหนาของชั้นนี้อยู่ที่ประมาณ 2-5 เมตรและค่า SPT N value อยู่ในช่วง 2-21 blow/ft ค่า Water content ในชั้นนี้อยู่ที่ระหว่าง 10%-35% ระดับน้ำใต้ดินสามารถพบได้ที่ชั้นนี้

ชั้นที่ 2 : Very soft to soft clay ชั้นนี้อยู่ที่ความลึก 3-12 เมตรประกอบด้วย Medium gray to dark gray very soft to soft clay ค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำมีค่าระหว่าง 10-25 kPa และค่า Water content มีค่า 60%-105%

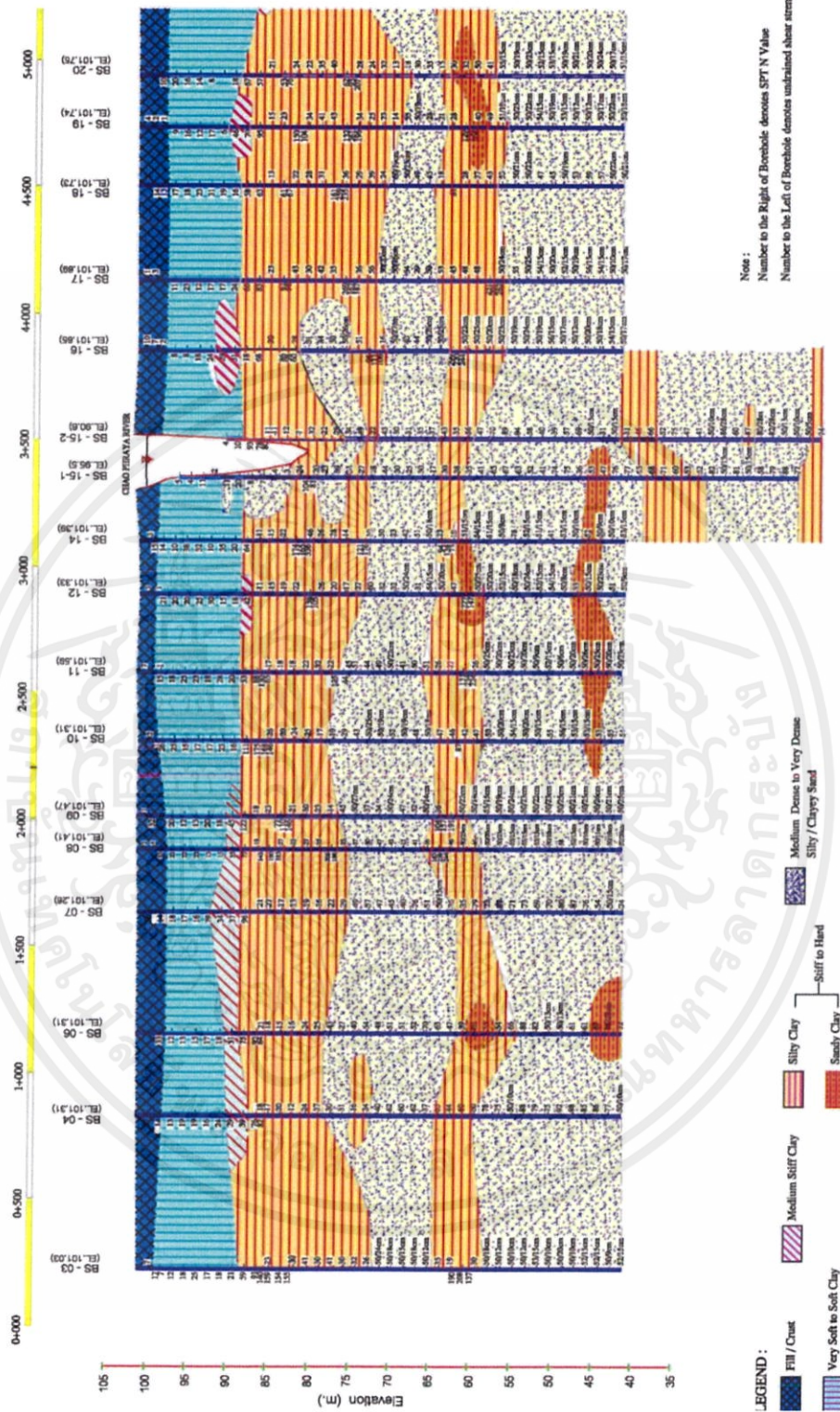
ชั้นที่ 3 : Medium stiff clay ชั้นนี้ประกอบไปด้วย Dark gray to brownish gray, Medium stiff clay อยู่ใต้ชั้น Soft clay มีความหนา 3-4 เมตร ค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำมีค่าระหว่าง 26-47 kPa และค่า Water content มีค่า 31%-62%

ชั้นที่ 4 : Stiff to hard clay ชั้นนี้ประกอบไปด้วย Yellowish to light grayish brown, Stiff to very stiff clay อยู่ที่มีความลึก 15-25 เมตร บางจุดจะพบ Sandy soil ด้วย ค่า SPT N value มีค่าระหว่าง 9-35 blow/ft และค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำมีค่าระหว่าง 75-162 kPa และค่า Water content มีค่าระหว่าง 15-32%

ชั้นที่ 5 : Medium dense to very dense sand ชั้นนี้ประกอบไปด้วย Medium to very dense clayey and silty sand with yellowish to grayish brown อยู่ที่มีความลึกประมาณ 35-40 เมตร และค่า Water content มีค่า 12-25% ค่า SPT N value > 20 blow/ft

ชั้นที่ 6 : Very stiff to hard clay ชั้นนี้ประกอบด้วย Light gray to grayish brown, Very stiff to hard clay มีความหนา 10-12 เมตร และค่า Water content มีค่า 15%-22% ค่า SPT N value > 30 blow/ft

ชั้นที่ 7 : Very dense sand ชั้นนี้ประกอบไปด้วย Silty sand and poorly graded sand with silt, Yellowish brown to brownish gray พบที่ปลายสุดของหลุมเจาะสำรวจที่ 60-65 เมตร ค่า SPT N value > 50 blow/ft ปลายเข็มเจาะขนาดใหญ่มักจะวางที่ชั้นนี้เพื่อให้ได้ค่า Bearing capacity สูงที่สุด



รูปที่ 2.22 สภาพทางธรณีวิทยาโครงการรถไฟฟ้าส่วนต่อขยายสีน้ำเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้นานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในปัจจุบันการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์งานด้านโครงสร้างต่าง ๆ และงานทางธรณีวิทยาอย่างแพร่หลาย เพราะใช้งานง่ายและสะดวกกว่าวิธีการอื่น อีกทั้งสามารถใช้ในงานที่สภาพทางธรณีวิทยาซับซ้อน เช่น การออกแบบอุโมงค์ที่วางตัวอยู่ในชั้นดินผสมหรืออุโมงค์ที่ก่อสร้างในตำแหน่งที่ใกล้กัน ปัญหาความสัมพันธ์ระหว่างดินและผนังอุโมงค์ (Soil-structure interaction) ปัญหาผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียงบนผิวดินและใต้ดิน เช่น อาคารที่มีความสำคัญทางประวัติศาสตร์ โบราณสถาน วัด หรือสถานที่ที่มีความสำคัญ โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีหลักการคือ แบ่งโครงสร้างที่จะทำการวิเคราะห์ออกเป็นชิ้นส่วน (Element) เล็ก ๆ โดยจุดที่ชิ้นส่วนมาบรรจบกันเรียกว่าจุดต่อ (Node) หากกำหนดตำแหน่งต่าง ๆ ของชิ้นส่วน จะสามารถหาความเครียดได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของชิ้นส่วนกับแรงที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนนั้น ความสัมพันธ์ดังกล่าวอยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ (Matrix) เช่นเดียวกันจะสามารถหาความเครียดได้ หากทราบค่าการเคลื่อนตัวที่จุดนั้น และสามารถหาความเค้นได้จากความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด

ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีรูปร่างชิ้นส่วน (Geometric shape of element) หลายชนิดแต่รูปร่างที่ง่ายต่อการวิเคราะห์ คือ ชิ้นส่วนในมิติเดียว และชิ้นส่วนรูปสามเหลี่ยม เช่น การวิเคราะห์ความเค้นในแต้ละระนาบ ถ้าใช้ชิ้นส่วนสามเหลี่ยมจะวิเคราะห์ได้ง่ายกว่าชิ้นส่วนอื่น

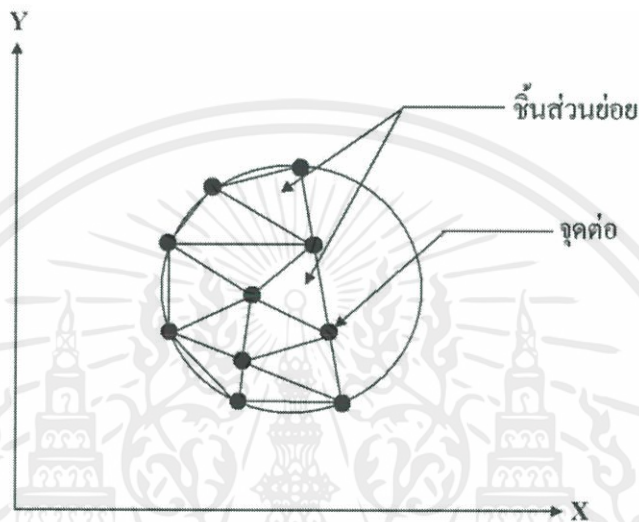
การวิเคราะห์โครงสร้างทางธรณีวิทยาในงานอุโมงค์นั้น นิยมใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์หาค่าแรงที่กระทำต่อผนังอุโมงค์ ค่าการเสียรูปของผนังอุโมงค์ เสถียรภาพของดินโดยรอบอุโมงค์ ขอบเขตและแนวการเคลื่อนตัวของดินทั้งใน 2 มิติ และ 3 มิติที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์ ผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียงทั้งบนผิวดินและใต้ดินที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์ ผลกระทบจากเครื่องขุดเจาะอุโมงค์ และผลกระทบที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์ที่สอง เป็นต้น

### 2.5.1 วิธีการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ปัญหาทางธรณีเทคนิคโดยใช้หลักการของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการวิเคราะห์ โดยทำการแบ่งโครงสร้างออกเป็นชิ้นส่วนเล็ก ๆ จำนวนหนึ่ง ซึ่งชิ้นส่วนเล็ก ๆ นี้เรียกว่า ชิ้นส่วนย่อย (Element) และชิ้นส่วนย่อยเหล่านี้เชื่อมติดกันด้วยจุดที่เรียกว่า จุดต่อ (Node)

หลังจากนั้น ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของแต่ละชิ้นส่วนย่อยแล้วนำชิ้นส่วนย่อยทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์พร้อมอีกครั้ง เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างทั้งหมด สำหรับการเคลื่อนที่หรือการเสียรูปของแต่ละ

ละชิ้นส่วนย่อย จะพิจารณาว่าเป็นผลที่เกิดจากการเคลื่อนที่หรือการเสียรูปของจุดต่อของชิ้นส่วนย่อยนั้น ๆ ซึ่งลักษณะการเคลื่อนที่นี้สามารถแทนได้ด้วยฟังก์ชันการเสียรูป (Displacement function) และจากผลของแรงภายนอกรวมทั้งคุณสมบัติของชิ้นส่วนย่อย ทำให้สามารถหาค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างได้



รูปที่ 2.23 การแบ่งโครงสร้างออกเป็นชิ้นส่วนเล็ก ๆ

### 2.5.2 วิธีการวิเคราะห์แรงที่กระทำต่อผนังอุโมงค์

ในการวิเคราะห์แรงภายในที่กระทำต่อผนังอุโมงค์นั้น ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ เช่น ค่าโมเมนต์ดัด (Bending moment) ค่าแรงเฉือน (Shear force) และค่าแรงตามแนวแกน (Axial force) สามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่ วิธีที่หนึ่งเป็นการกำหนดค่าการสูญเสียมวลดิน (Ground loss) โดยเป็นการกำหนดค่า Contraction cavity ส่วนวิธีที่สองใช้การกำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงความเค้นในดิน (Stress relief) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) วิธีการกำหนดค่าการสูญเสียมวลดิน (Ground loss) วิธีนี้เป็นการกำหนดค่าการสูญเสียมวลดิน โดยค่าที่นำมาป้อนนั้น นิยมนำมาจากประสบการณ์การขุดเจาะอุโมงค์ของโครงการที่ผ่านมาในอดีต โดยสำหรับประเทศไทยกรณีโครงการรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคลมีขอบเขตค่าการสูญเสียมวลดินอยู่ที่ 0.5 - 3.0 เปอร์เซ็นต์ โดยในขั้นตอนของการคำนวณ (Calculation step) สามารถให้ป้อนค่าการสูญเสียมวลดินในรูปของค่า Contraction cavity ได้

2) วิธีการกำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงความเค้นในดิน (Stress relief) วิธีการนี้มีขั้นตอนที่ค่อนข้างซับซ้อนกว่าวิธีการกำหนดค่าการสูญเสียมวลดิน โดยในวิธีการนี้ต้องทำการสมมติค่า Stress relief ก่อน

จากนั้นจึงวิเคราะห์แรงกระทำและการเคลื่อนตัวของดินที่เกิดขึ้นจากการกำหนดค่า Stress relief โดยอ้างอิงจาก Mair et. al. (1993) ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการทำนายการเคลื่อนตัวของดินของ Peck (1969) โดยที่รูปร่างการทรุดตัวที่ผิวดินที่เกิดขึ้นจากการขุดเจาะอุโมงค์นั้น สามารถประมาณโดยใช้สมการ Gaussian ได้ จากนั้นทำการตรวจสอบว่าค่าการทรุดตัวที่ผิวดินที่เกิดขึ้นอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่ และไม่สร้างความเสียหายให้กับโครงสร้างข้างเคียง แล้วจึงทำการคำนวณย้อนกลับ (Back calculation) จากค่าการทรุดตัวที่ผิวดิน ได้ค่าการสูญเสียมวลดินที่สามารถนำไปใช้ในการควบคุมการขยับเคลื่อนของหัวเจาะต่อไป ส่วนค่าโมเมนต์ดัด ค่าแรงตามแนวแกน และค่าแรงเฉือนที่ได้ ก็นำไปคำนวณหาหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กต่อไป

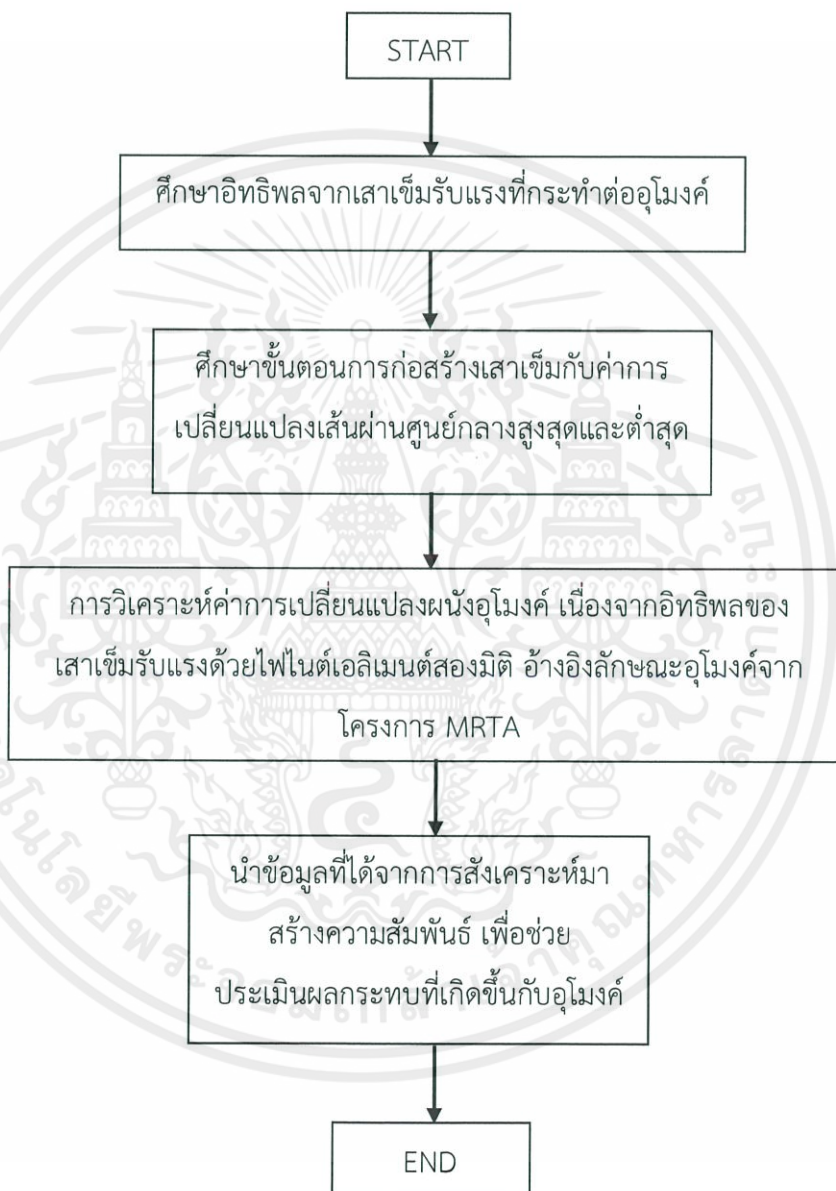


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการวิเคราะห์

#### 3.1 แนวทางการวิเคราะห์



รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการวิเคราะห์

## 3.2 การวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงผนังอุโมงค์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ อ้างอิงลักษณะอุโมงค์จากโครงการ MRTA

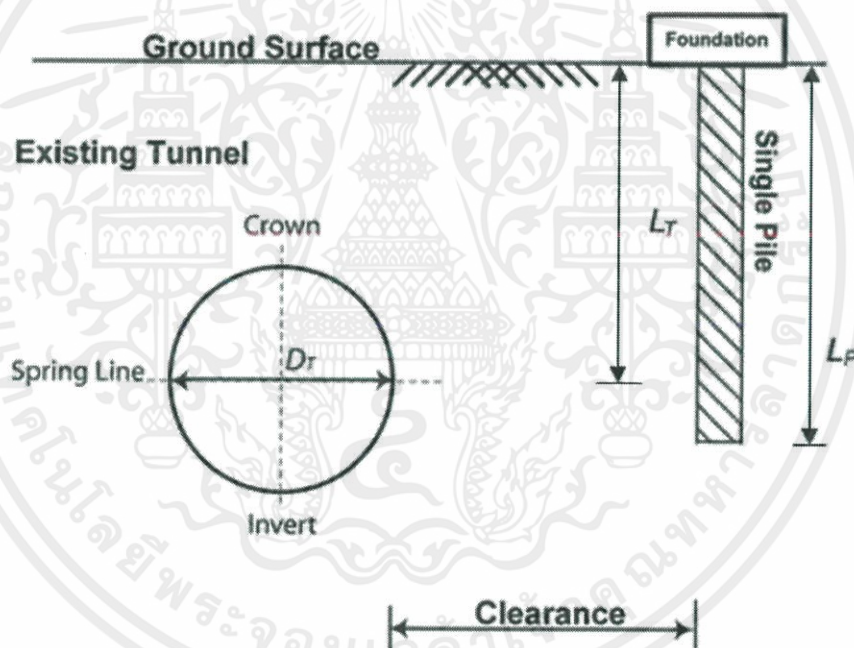
### 3.2.1 หลักการพิจารณาปัญหา

หลักการพิจารณาปัญหาแสดงดังรูปที่ 3.1 โดยขนาดอุโมงค์และตาดอุโมงค์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แตกต่างกัน โดยอ้างอิงลักษณะอุโมงค์จากโครงการอุโมงค์รถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย (MRTA) โดยมีการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มที่มีความยาวต่างกันวางตัวอยู่เพียงด้านเดียวของอุโมงค์ และมีระยะห่างระหว่างขอบอุโมงค์กับขอบเสาเข็ม (Clearance)

โดยที่  $L_T$  คือ ระยะความลึกของอุโมงค์

$L_P$  คือ ระยะความยาวของเสาเข็ม

$D_T$  คือ ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์



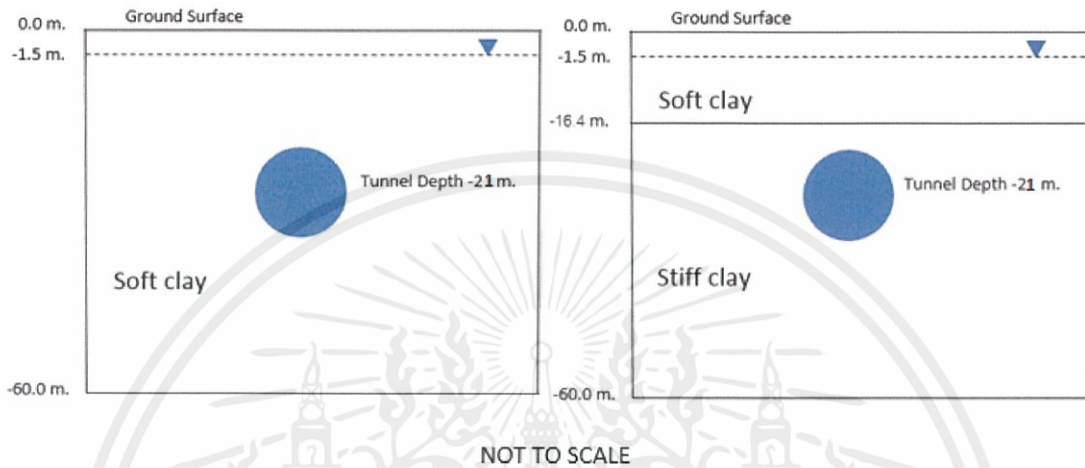
รูปที่ 3.2 รูปแบบการพิจารณา

### 3.2.2 กรณีศึกษา

#### 1) ลักษณะชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์

ลักษณะชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้พิจารณาจากโครงการก่อสร้างอุโมงค์ในพื้นที่กรุงเทพฯ โดย

แบ่งออกเป็น 2 กรณี กรณีแรก เป็นกรณีอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นกรณีในช่วงกำลังเข้าสู่สถานีของรถไฟฟ้าใต้ดิน MRTA ส่วนกรณีที่ 2 เป็นกรณีที่แนวเส้นทางของอุโมงค์ของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินที่ส่วนใหญ่วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็ง โดยพิจารณาความลึกอุโมงค์คงที่ที่ระดับ 21 เมตร ดังรูปที่ 3.3 โดยมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับ -1.50 เมตรจากผิวดิน



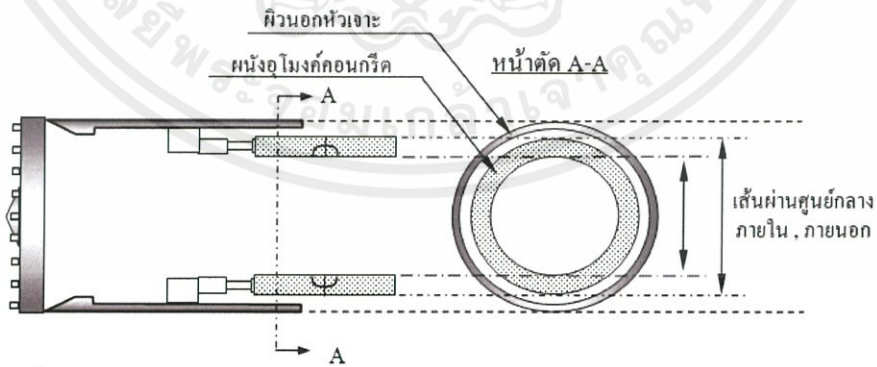
กรณีที่ 1

กรณีที่ 2

รูปที่ 3.3 รูปแบบชั้นดินที่นำมาวิเคราะห์

2) ลักษณะทางกายภาพของอุโมงค์

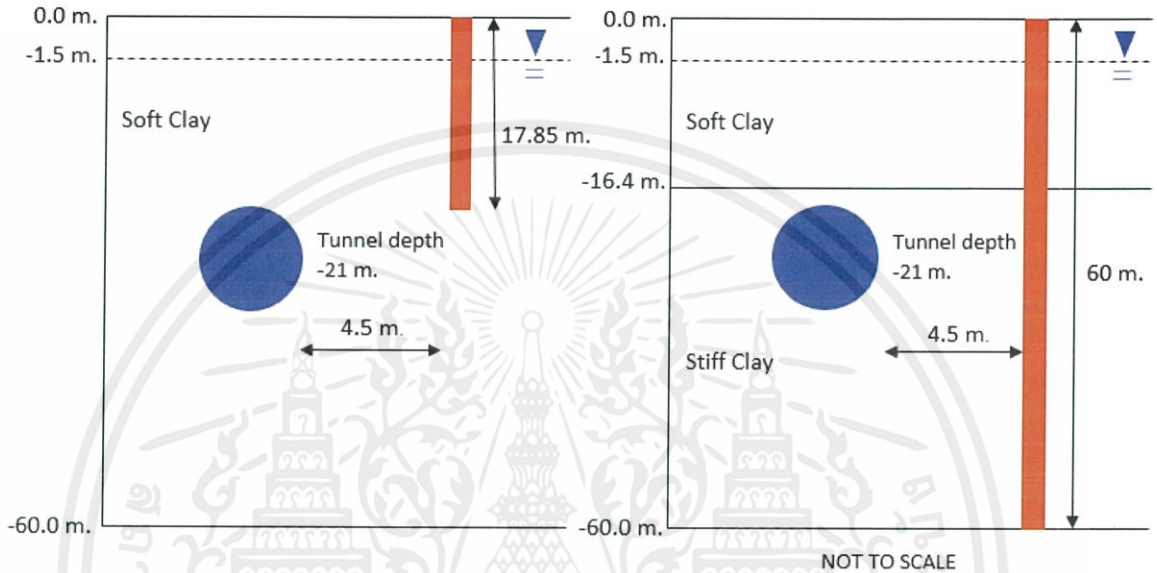
การวิเคราะห์จะกำหนดให้อุโมงค์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกของอุโมงค์ ดังรูปที่ 3.3 โดยแบบจำลองนี้ศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของอุโมงค์รถไฟฟ้า (MRTA) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอก 6.30 และ 5.70 เมตรตามลำดับ



รูปที่ 3.4 ภาพตัดแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกของอุโมงค์

3) ลักษณะของเสาเข็มและตำแหน่งที่ใช้พิจารณา

การศึกษาครั้งนี้กำหนดให้เสาเข็มเป็นแบบเสาเข็มเดี่ยวรับแรงกระทำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เมตรวางตัวอยู่ทางด้านขวาของอุโมงค์ และระยะห่างระหว่างขอบอุโมงค์กับขอบเสาเข็ม (Clearance) คือ 4.5 เมตรตำแหน่งของปลายเสาเข็มอยู่ที่ระดับ -17.85 เมตร และ -60 เมตร ดังรูปที่ 3.4

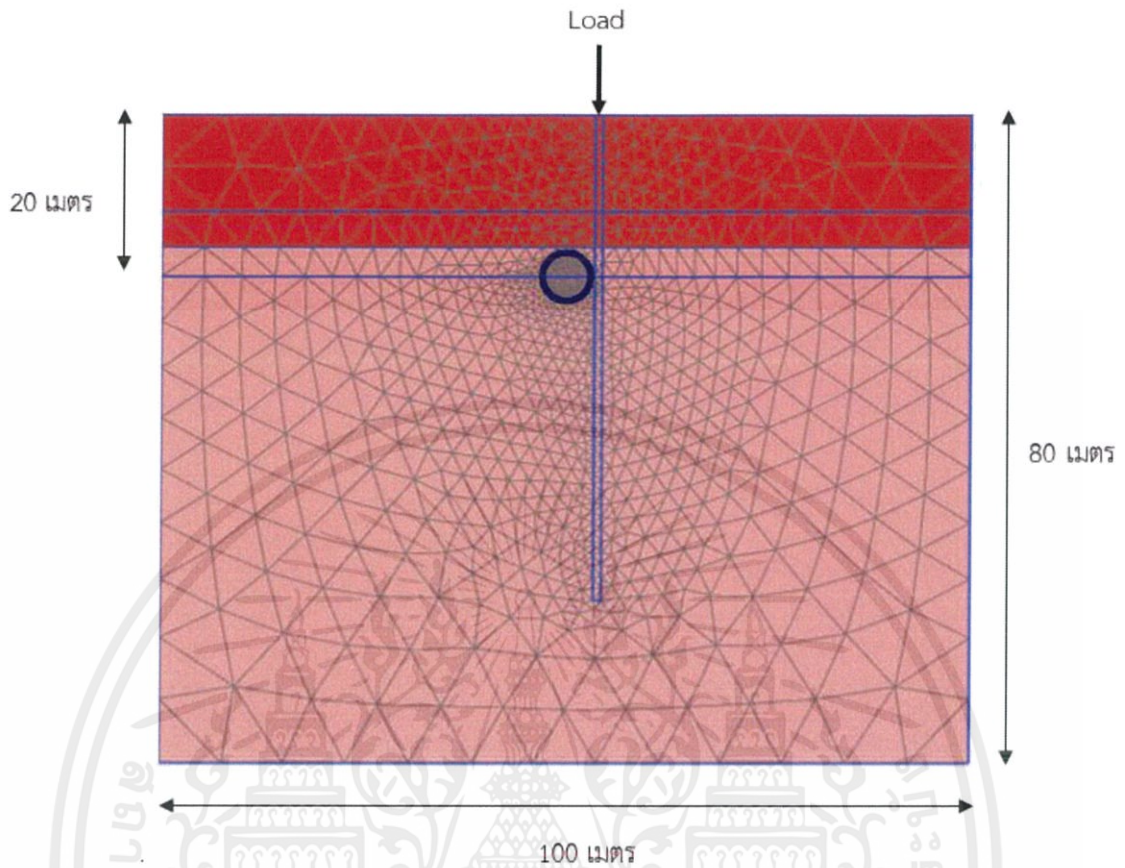


รูปที่ 3.5 รูปแบบการวางตัวของปลายเสาเข็ม

3.3 การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

3.3.1 ลักษณะแบบจำลอง

การวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ ได้ใช้ซอฟต์แวร์ทางคอมพิวเตอร์ คือ PLAXIS 2D เวอร์ชัน 2018 โดยชิ้นส่วนต่าง ๆ ในการวิเคราะห์ (Element) เป็นรูปทรงพีระมิดสามเหลี่ยม (Tetrahedron) แบบจุดต่อ (Node) โดยขั้นตอนการวิเคราะห์ จะจำลองขั้นตอนของเสาเข็มรับแรงกระทำ ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อขั้นตอนการจำลองการวิเคราะห์ โดยมีแบบจำลองที่มีขนาดแนวราบ 100 เมตร และขนาดแนวตั้ง 80 เมตรจากผิวดิน มีการกำหนดขอบเขตพื้นที่ให้มีความละเอียดในการวิเคราะห์พื้นที่บริเวณใกล้อุโมงค์ในแนวตั้งให้มีความละเอียดในการวิเคราะห์มากกว่าบริเวณอื่น



รูปที่ 3.6 รูปแบบจำลองการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

### 3.3.2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลอง (Material Properties)

คุณสมบัติของชั้นดินที่ใช้ในแบบจำลองได้มาจากการเทียบวัดจากโครงการอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินในกรุงเทพมหานคร ดังตารางที่ 3.1 [25] ชั้นดินที่ใช้ในการศึกษาเป็นชั้นดินจากโครงการรถไฟฟ้าใต้ดิน ชั้นดินเหนียวและชั้นดินเหนียวอ่อนนั้น กำหนดให้มีคุณสมบัติชั้นดินเป็นแบบ Hardening Soil Model (HS) ซึ่งเป็นแบบจำลองชั้นดิน (Soil model) ที่เหมาะสมกับสภาพชั้นดินของกรุงเทพฯ [26] ดังตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติของผนังอุโมงค์และเสาเข็มซึ่งกำหนดคุณสมบัติให้เป็นแบบอีลาสติกเชิงเส้น (Linear elastic)

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของชั้นดินในการสร้างแบบจำลอง [27]

Soil layer	Soft Clay	Stiff Clay
Material Model	HS	HS
$E' (kPa)$	-	-
$E_{oed}^{ref} (kPa)$	5,000	5,000
$E_{50}^{re} (kPa)$	5,000	60,000
$E_{ur}^{ref} (kPa)$	15,000	180,000
$\gamma_{sat} (kN / m^3)$	16	18
$\nu'$	0.33	0.33
$\phi (^\circ)$	22	22
$C (kPa)$	5	18
$M$	1	1
$P_{ref} (kPa)$	100	95

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของวัสดุ [28][29][30]

	Young Modulus ( $E$ ) ( $kN / m^2$ )	Poisson's ratio ( $\nu_c$ )	Unit weight ( $\gamma_c$ ) ( $kN / m^2$ )
Tunnel lining and Pile	$3.1 \times 10^7$	0.20	24
Grouting Concrete	$1 \times 10^6$	0.30	21

### 3.3.3 สภาวะขอบเขตของแบบจำลอง

การกำหนดสภาวะขอบเขตของแบบจำลองมีผลต่อผลการวิเคราะห์ จึงต้องกำหนดให้มีความเหมาะสม โดยสภาวะขอบเขต (Boundary condition) กำหนดให้บริเวณด้านข้าง ด้านหน้าและด้านหลัง ถูกจำกัดการเคลื่อนที่ในแนวราบแต่ปล่อยให้เคลื่อนที่ในแนวตั้งได้อย่างอิสระ ส่วนสภาวะขอบเขตบริเวณด้านล่างจะถูกกำหนดให้จำกัดการเคลื่อนที่ในทุกทิศทาง ผิวด้านบนของแบบจำลองปล่อยให้เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในทุกทิศทาง และการวิเคราะห์ในการศึกษานี้เป็นแบบไม่ระบายน้ำ (Undrain analysis) โดย

กำหนดให้สถานะเริ่มต้นของความเค้นสุทธิของชั้นดิน (Effective stress) แนวตั้งและแนวราบถูกกำหนดด้วยค่าหน่วยน้ำหนักของดิน (Unit weigh) และค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง ( $K_0$ ) เพิ่มขึ้นตามระดับความลึกของชั้นดิน โดยกำหนดระดับน้ำใต้ดินเป็นแบบ Piezometric drawdown

### 3.4 ขั้นตอนการจำลองการก่อสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติ

ขั้นตอนการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ เริ่มจากการจำลองให้เสาเข็มตั้งอยู่ในดิน โดยปรับเปลี่ยนแรงกระทำลงเสาเข็มเป็นค่าแรงกระทำต่อพื้นที่ วิเคราะห์พื้นที่หน้าตัดที่แรงลงเข็มเพียงต้นเดียว เพื่อเป็นตัวแทนการวิเคราะห์ในลักษณะเข็มเดี่ยวรับแรงกระทำวางตัวข้างขวาของอุโมงค์ การวิเคราะห์ในครั้งนี้เลือกพิจารณาในกรณีศึกษาจากขั้นตอนที่ 3.2 ซึ่งจะได้กรณีที่อุโมงค์ได้รับผลกระทบจากเสาเข็มมากที่สุด และระดับที่ปลายเสาเข็ม 17.85 เมตรสำหรับเสาเข็มสั้น 60 เมตรสำหรับเสาเข็มยาว เป็นระดับที่อุโมงค์ได้รับผลกระทบมากที่สุดเป็นกรณีศึกษา โดยสามารถแบ่งออกเป็นสามขั้นตอน ได้ดังนี้

1) จำลองชั้นดินและอุโมงค์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.30 เมตร หนา 0.3 เมตร ประกอบด้วยขั้นตอนการขุดดินและขั้นตอนการจำลองผนังอุโมงค์ ให้มีคุณสมบัติดังตาราง 3.1 และ 3.2

2) คำนวณน้ำหนักกระทำที่บนเสาเข็ม ซึ่งคำนวณได้จากวิธี Alpha-method โดยใช้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ (Safety factor) 2.5 กำหนดให้การวิเคราะห์ในการศึกษานี้ใช้น้ำหนักบรรทุกยอมให้ (Allowable load) เหมือนกับการวิเคราะห์ในหัวข้อ 3.2 และทำการจำลองโดยการเปลี่ยนขนาดอุโมงค์ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.30 เมตร มีความหนา 0.3 เมตร ตามลำดับ กำหนดให้เสาเข็มวางตัวด้านข้างด้านเดียวของอุโมงค์ กำหนดขอบเขตพื้นที่ที่มีความละเอียดในการวิเคราะห์บริเวณใกล้อุโมงค์ทั้งแนวราบและแนวตั้งให้มีความละเอียดในการวิเคราะห์มากกว่าบริเวณอื่น เพื่อศึกษาพฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงของเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์สูงสุด โดยมีคุณสมบัติของชั้นดินและสถานะขอบเขตของแบบจำลอง เหมือนกับหัวข้อ 3.2.2

3) ใส่ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มในการจำลอง โดยมีขั้นตอนดังนี้

#### 3.1) ขุดเจาะดิน

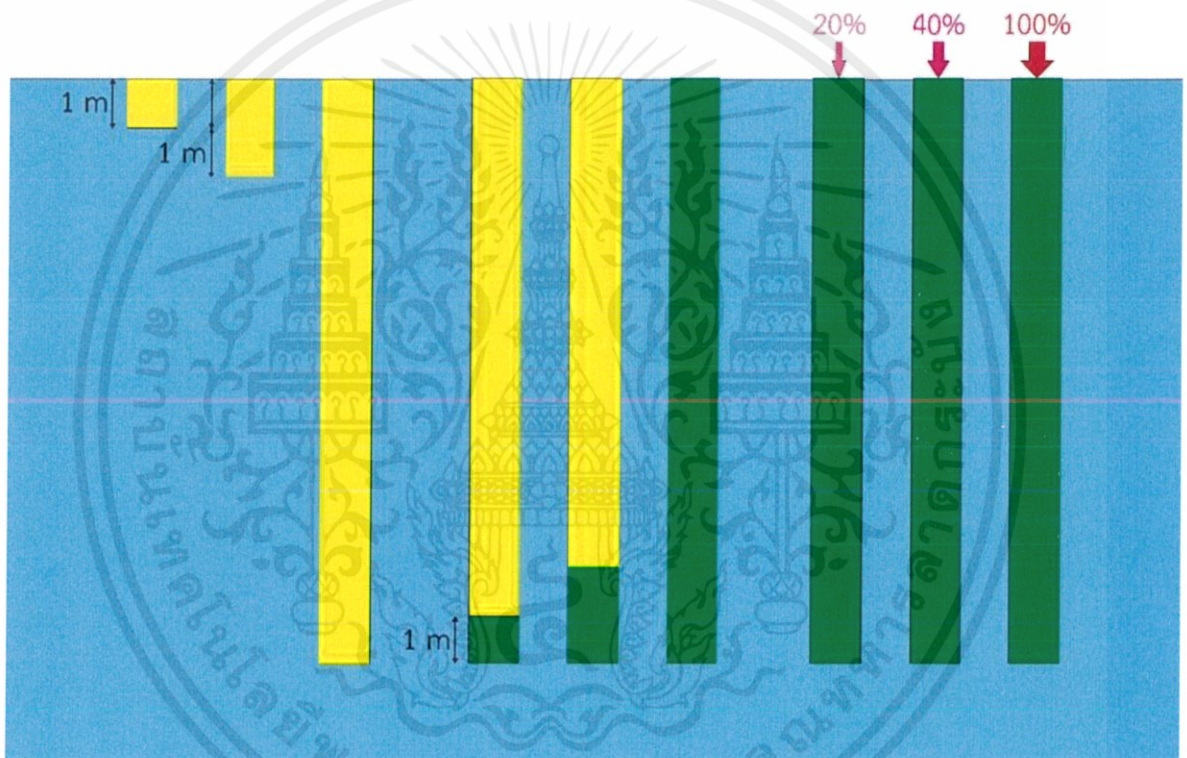
- จำลองการขุดเจาะดินสำหรับสร้างเสาเข็มโดยการแทนที่ชั้นดินด้วยเบนโทไนต์ลงไปทีละ 1 เมตร ที่ด้านขวาห่างจากขอบอุโมงค์ 4.5 เมตร แล้วตั้งค่าเงื่อนไขส่วนที่ถูกแทนให้เป็น Undrained ตั้งแต่ผิวดินจนถึงความลึกที่กำหนด

### 3.2) แทนที่ด้วยคอนกรีต

- จำลองการสร้างเสาเข็มโดยการแทนที่เบนโทไนต์ด้วยคอนกรีตขึ้นมาทีละ 1 เมตร จากกันหลุมขึ้นมาจนถึงผิวดิน

### 3.3) ใส่น้ำหนักที่กระทำลงบนเสาเข็ม

- น้ำหนักที่กระทำลงบนเสาเข็มด้วยวิธี Alpha-method แล้วใส่น้ำหนักที่กระทำกับเสาเข็มเพิ่มขึ้นทีละ 20% ของน้ำหนักที่คำนวณ จนถึง 100%

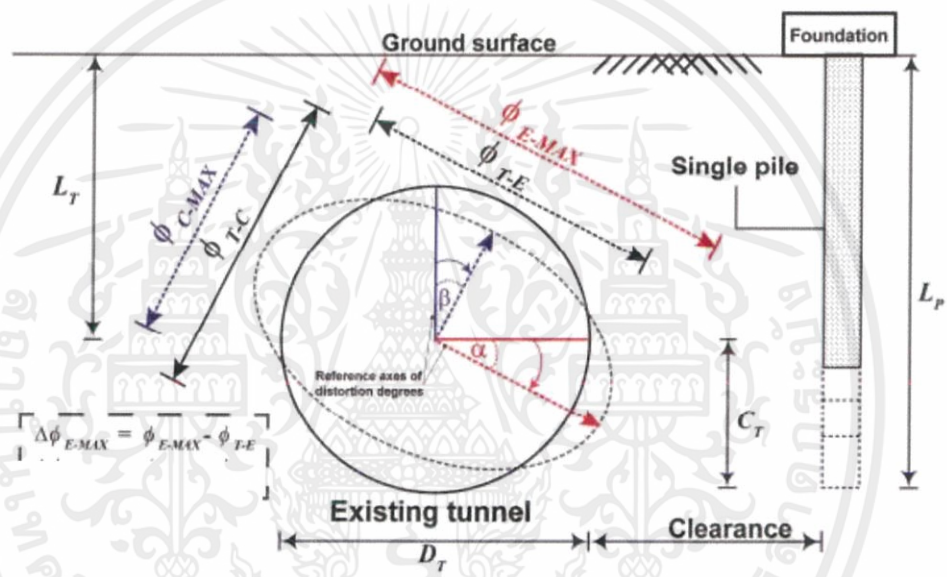


รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการจำลองการก่อสร้างเสาเข็มรับแรง

โดย สีฟ้า แทน ชั้นดิน  
 สีเหลือง แทน เบนโทไนต์  
 สีเขียว แทน เสาเข็มรับแรง

### 3.5 การสังเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาความสัมพันธ์

ได้อ้างอิงจากงานวิจัย [31] วิธีการประเมินผลที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการติดตามค่า การเสียรูปมากที่สุด (Maximum deformation) ของผนังอุโมงค์ในทอมของค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่าศูนย์กลางอุโมงค์ ในกรณีที่เสาเข็มข้างเคียงอยู่ด้านใดด้านหนึ่งของอุโมงค์ การเสียรูปของโครงสร้างอุโมงค์ที่ไม่สมมาตร ควรประเมินโดยอยู่ในทอมค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์ (Out of roundness) ค่าเบี่ยงเบนรูปร่างผนังอุโมงค์ (Out of roundness) อยู่ในทอมของตัวแปรหลายตัว รวมถึง เส้นผ่าศูนย์กลางสูงสุด,น้อยสุด โครงสร้างที่เสียรูป



รูปที่ 3.8 วิธีคำนวณการเปลี่ยนแปลงขนาดและการบิดตัวของอุโมงค์

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{E-MAX} &= \phi_{E-MAX} - \phi_{T-E} \\ \Delta\phi_{C-MAX} &= \phi_{C-MAX} - \phi_{T-C} \end{aligned}$$

(3.2)

โดย  $\Delta\phi_{C-MAX}$  = ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ในลักษณะหดตัว (Contraction)

$\Delta\phi_{E-MAX}$  = ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์ในลักษณะยืดตัว (Extension)

$\phi_{C-MAX}$  = ขนาดอุโมงค์ในแนวหดตัวสูงสุด หลังได้รับแรงกระทำ

$\phi_{E-MAX}$  = ขนาดอุโมงค์ในแนวยึดตัวสูงสุด หลังได้รับแรงกระทำ

$\phi_{T-E}$  = ขนาดอุโมงค์ในแนวยึดตัวสูงสุด ก่อนได้รับแรงกระทำ

$\phi_{T-C}$  = ขนาดอุโมงค์ในแนวหดตัวสูงสุด ก่อนได้รับแรงกระทำ

$L_P$  = ความยาวเสาเข็ม

$L_T$  = ความลึกอุโมงค์

$C_T$  = ผลต่างระหว่างความลึกของอุโมงค์กับปลายเสาเข็ม

$\alpha$  = องศาการบิดตัวจากการยึดตัวสูงสุดของผนังอุโมงค์ (จากแนวแกน x ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา)

$\beta$  = องศาการบิดตัวจากการหดตัวสูงสุดของผนังอุโมงค์ (จากแนวแกน y ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา)

เมื่อ 
$$\phi_{C-MAX} = \sqrt{[(X_w + U_{xw}) - (X_z + U_{xz})]^2 + [(Y_w + U_{yw}) - (Y_z + U_{yz})]^2} \quad (3.3)$$

$$\phi_{T-C} = \sqrt{[X_w - X_z]^2 + [Y_w - Y_z]^2} \quad (3.4)$$

โดยที่  $X_w, Y_w$  = พิกัดของจุดที่มีการเคลื่อนตัวต่ำสุด ก่อนได้รับแรงกระทำ  
 $U_{xw}, U_{yw}$  = ปริมาณการเคลื่อนตัวของพิกัดที่มีการเคลื่อนตัวต่ำสุด  
 $X_z, Y_z$  = พิกัดตรงข้ามของจุดที่มีการเคลื่อนตัวต่ำสุด ก่อนได้รับแรงกระทำ  
 $U_{xz}, U_{yz}$  = ปริมาณการเคลื่อนตัวของพิกัดตรงข้ามที่มีการเคลื่อนตัวต่ำสุด

เมื่อ 
$$\phi_{E-MAX} = \sqrt{[(X_i + U_{xi}) - (X_j + U_{xj})]^2 + [(Y_i + U_{yi}) - (Y_j + U_{yj})]^2} \quad (3.5)$$

$$\phi_{T-E} = \sqrt{[X_i - X_j]^2 + [Y_i - Y_j]^2} \quad (3.6)$$

โดยที่  $X_i, Y_i$  = พิกัดของจุดที่มีการเคลื่อนตัวสูงสุด ก่อนได้รับแรงกระทำ  
 $U_{xi}, U_{yi}$  = ปริมาณการเคลื่อนตัวของพิกัดที่มีการเคลื่อนตัวสูงสุด  
 $X_j, Y_j$  = พิกัดของจุดตรงข้ามที่มีการเคลื่อนตัวสูงสุด ก่อนได้รับแรงกระทำ  
 $U_{xj}, U_{yj}$  = ปริมาณการเคลื่อนตัวของพิกัดตรงข้ามที่มีการเคลื่อนตัวสูงสุด

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์และประเมินผล

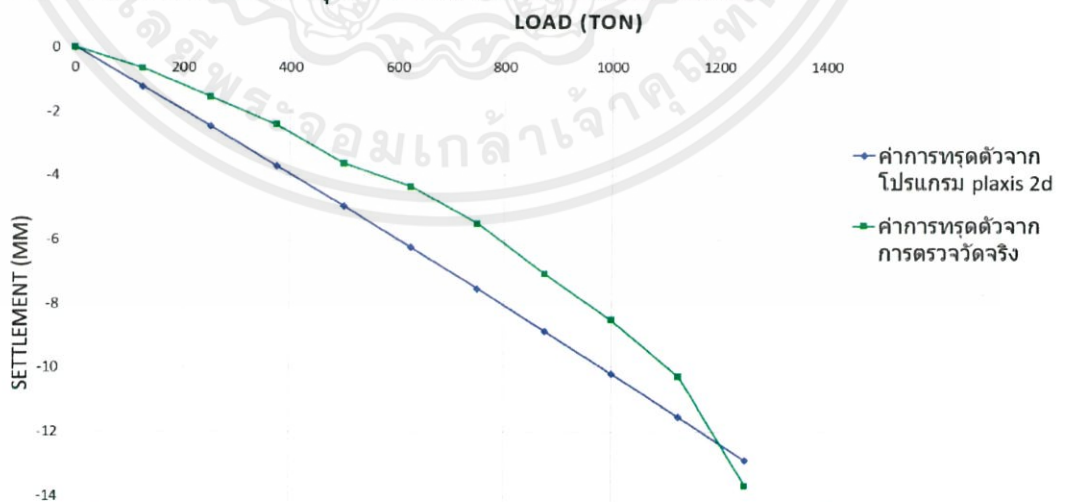
#### 4.1 บทนำ

ในบทนี้ส่วนแรกจะเป็นการสอบเทียบผลจากอุปกรณ์ที่ใช้ให้สอดคล้องกับค่าความเป็นจริง โดยการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของดินเนื่องจากการจำลองการสร้างอุโมงค์ และค่าการทรุดตัวของดินที่หัวเสาเข็มกับค่าตรวจวัดจริง ส่วนที่สองจะเปรียบเทียบผลกระทบระหว่างการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มที่พิจารณาขั้นตอนการก่อสร้างกับการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มที่ไม่พิจารณาขั้นตอนการก่อสร้างจะส่งผลกระทบต่ออุโมงค์เดิมแตกต่างกันอย่างไร อ้างอิงจากอุโมงค์รถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย (The Mass Rapid Transit Authority Blue Line extension project, MRTA) โดยจะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของการเสียรูปในค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์เดิม

#### 4.2 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของหัวเสาเข็มและค่าการทรุดตัวของดินจากการสร้างอุโมงค์ จากค่าตรวจวัดจริงกับค่าที่ได้จากโปรแกรม Plaxis 2D

หัวข้อนี้แสดงผลการเปรียบเทียบของค่าการทรุดตัวของดินที่หัวเสาเข็ม และค่าการทรุดตัวของดินเนื่องจากการจำลองการก่อสร้างอุโมงค์ โดยเปรียบเทียบจากค่าตรวจวัดจริง

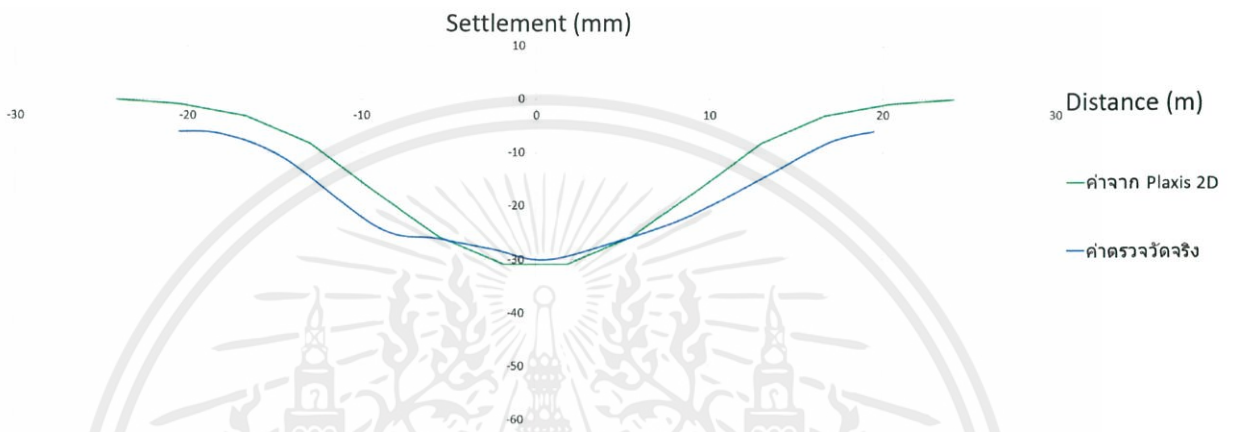
##### 4.2.1 การเปรียบเทียบการทรุดตัวของดินจากผลกระทบของเสาเข็ม



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่าการทรุดตัวของดินเนื่องจากการเสาเข็มรับน้ำหนัก

กรณีนี้ได้นำผลการตรวจวัดจริงของค่าการทรุดตัวของเสาเข็มจากงานของ Supawo (2015) และผลการตรวจวัดการทรุดตัวของดินที่หัวเสาเข็มในโปรแกรม plaxis 2D นำมาเปรียบเทียบให้สอดคล้องกัน และนำคุณสมบัติของชั้นดินไปสร้างแบบจำลอง ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 4.1

#### 4.2.2 การเปรียบเทียบการทรุดตัวของดินจากผลกระทบบของอุโมงค์



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าการทรุดตัวของดินเนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์

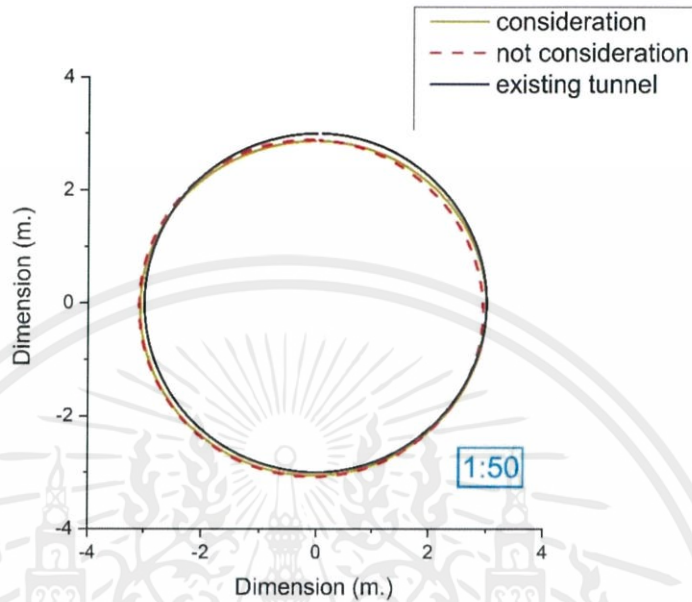
เปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของดินเนื่องจากการจำลองการสร้างอุโมงค์จาก plaxis 2D มาเทียบกับค่าการทรุดตัวของดินจากอุโมงค์รถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน (MRTA) เพื่อหาค่า line contractions ซึ่งเป็นค่าที่ส่งผลกระทบต่อทรุดตัวของดินแล้วนำไปใช้ในแบบจำลอง ได้กราฟการทรุดตัวของดินดังแสดงในรูปที่ 4.2

ผลจากการเปรียบเทียบในหัวข้อที่ 4.2.1 และ 4.2.2 พบว่าค่าที่ได้จากโปรแกรม plaxis 2D กับค่าตรวจวัดจริงนั้นมีความใกล้เคียงกัน

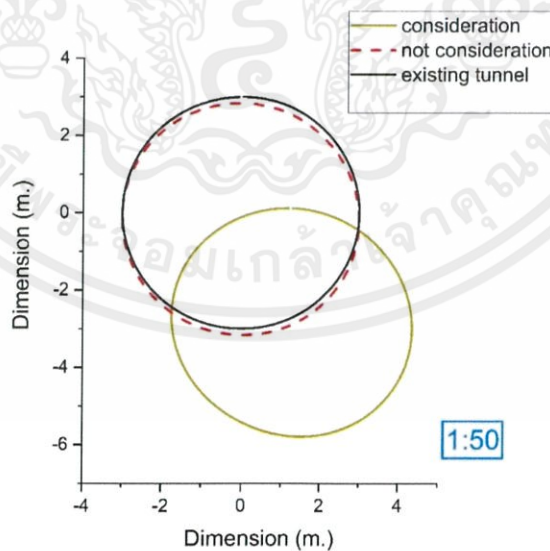
#### 4.3 การเปรียบเทียบผลกระทบระหว่างการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มที่พิจารณาขั้นตอนการก่อสร้างกับการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มที่ไม่พิจารณาขั้นตอนการก่อสร้างต่อการเสียรูปของอุโมงค์เดิม

อุโมงค์ โดยกำหนดให้อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน และดินเหนียวแข็ง เปรียบเทียบที่ระยะ Clearance 4.5 เมตร โดยอ้างอิงลักษณะอุโมงค์รถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน MRTA ที่มีขนาด 6.30 เมตร

และมีความหนา 0.30 เมตร เพื่อศึกษาค่าการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางหลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็มเป็นดังรูปต่อไปนี้

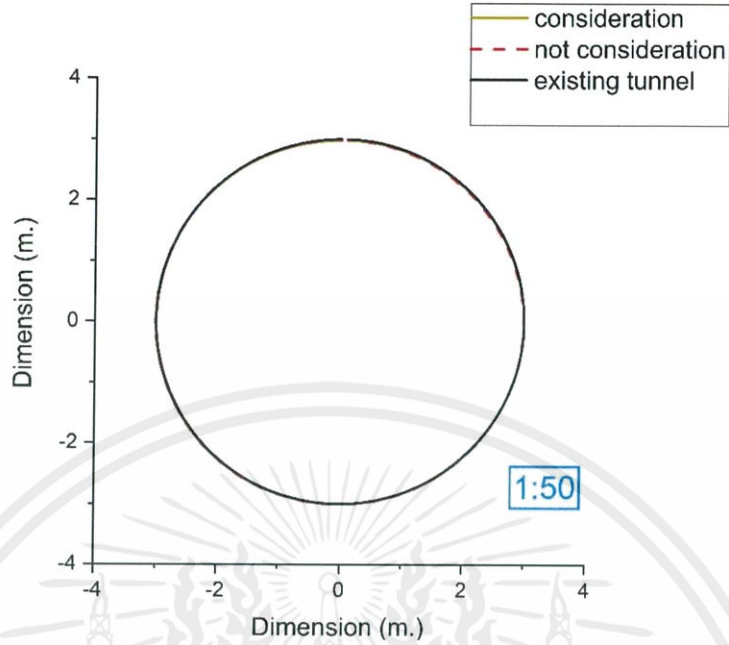


รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะการเสีรูปของอุโมงค์ MRTA ในชั้นดินเหนียวอ่อน เนื่องจากเสาเข็มยาว 17.85 เมตร

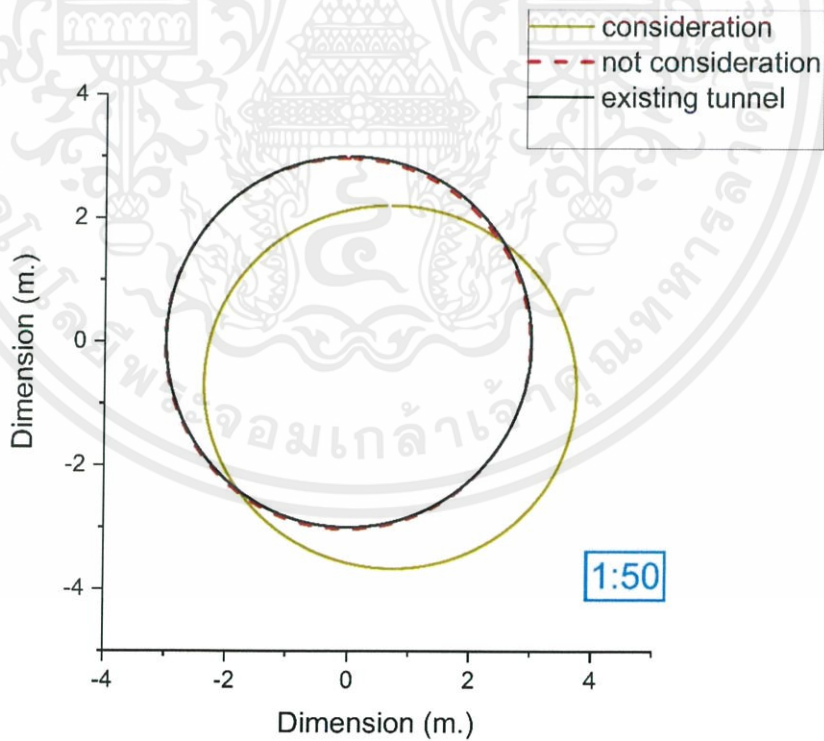


รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะการเสีรูปของอุโมงค์ MRTA ในชั้นดินเหนียวอ่อน เนื่องจากเสาเข็มยาว 60 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะการเสีรูปของอุโมงค์ MRTA ในชั้นดินเหนียวแข็ง เนื่องจากเสาเข็มยาว 17.85 เมตร

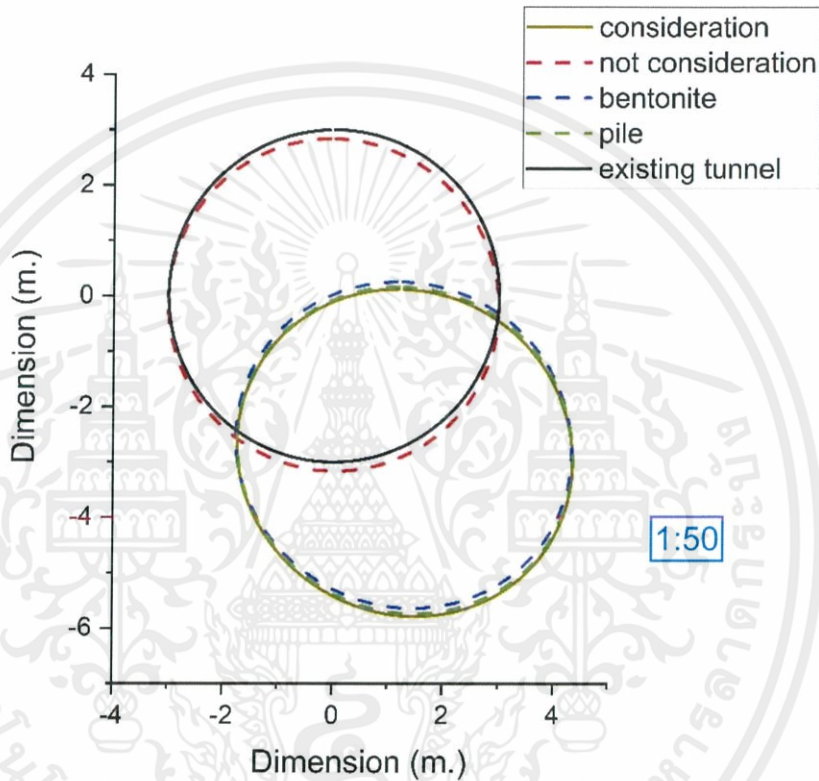


รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะการเสีรูปของอุโมงค์ MRTA ในชั้นดินเหนียวแข็ง เนื่องจากเสาเข็มยาว 60 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อนี้แสดงผลกระทบระหว่างการจำลองการก่อสร้างเสาเข็มแบบพิจารณาขั้นตอนการก่อสร้างกับไม่พิจารณาขั้นตอนการก่อสร้างที่มีต่ออุโมงค์ แบ่งเป็น 4 กรณี ตามรูปที่ 4.3-4.6

ผลการวิเคราะห์ลักษณะการเคลื่อนตัวของอุโมงค์ จากรูปที่ 4.3-4.6 พบว่าการก่อสร้างเสาเข็มลึก 60 เมตร หากมีการพิจารณาขั้นตอนการก่อสร้างจะเกิดการเคลื่อนตัวของอุโมงค์ชัดเจนกว่าการก่อสร้างเสาเข็มลึก 17.85 เมตร

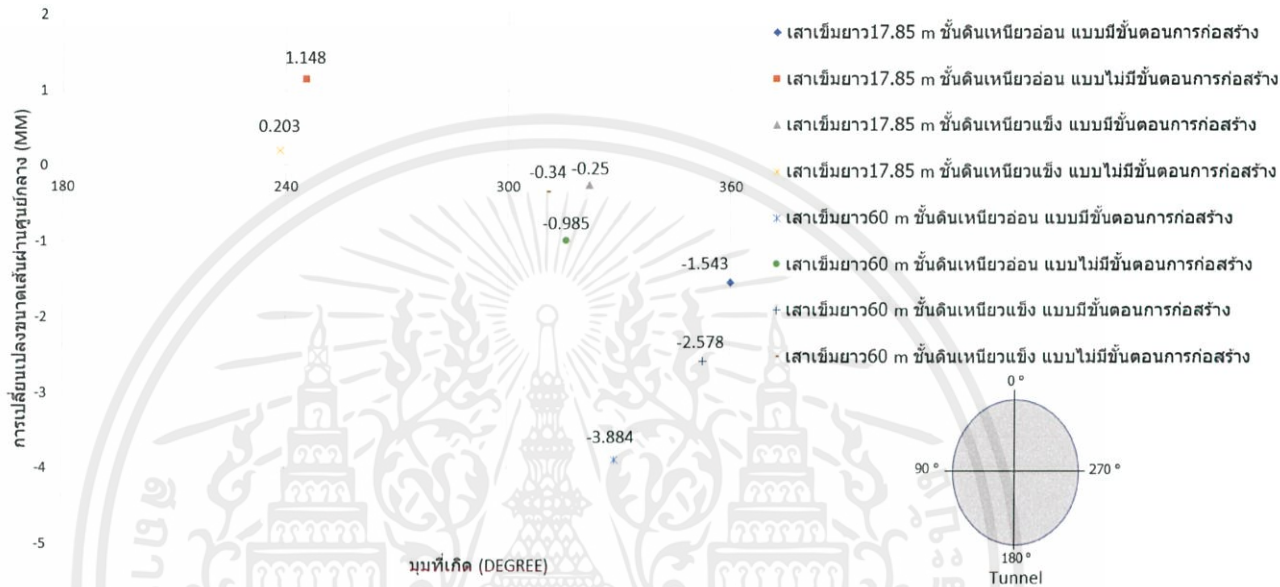


รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะการเสียรูปของอุโมงค์ MRTA ในชั้นดินเหนียวอ่อน เนื่องจากเสาเข็มยาว 60 เมตร

จากรูปที่ 4.7 พบว่าอุโมงค์ที่ได้รับผลกระทบจากการจำลองการก่อสร้างเสาเข็มโดยพิจารณาขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มเริ่มมีการเสียรูปชัดเจนและแตกต่างจากอุโมงค์ที่ได้รับผลกระทบจากการจำลองการก่อสร้างเสาเข็มที่ไม่พิจารณาขั้นตอนการก่อสร้างตั้งแต่ขั้นตอนการใส่เบนโทไนต์ เนื่องจากการขุดดินออกแล้วแทนที่ด้วยเบนโทไนต์จึงทำให้อุโมงค์มีการเคลื่อนตัวไปทางเสาเข็ม จากนั้นจึงแทนที่เบนโทไนต์ด้วยคอนกรีตเพื่อให้เป็นเสาเข็มและให้น้ำหนักกับเสาเข็มจึงได้การเสียรูปของอุโมงค์ดังรูป จะเห็นว่าการพิจารณาขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มตรงขั้นตอนการใส่เบนโทไนต์เป็นสำคัญที่ทำให้อุโมงค์เกิดการเสียรูปชัดเจนมากขึ้น

### 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์สูงสุดกับมุมที่เกิดขึ้น

ผลกระทบของเสาเข็มรับแรงที่กระทำต่ออุโมงค์โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้จะแสดงในรูป ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ ได้ผลดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์สูงสุดกับมุมที่เกิดขึ้น

จากรูปที่ 4.8 เป็นกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์สูงสุด พบว่าในกรณีเสาเข็มมีความยาวเท่ากันและอุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเดียวกัน การจำลองการก่อสร้างเสาเข็มที่พิจารณาชั้นตอนการก่อสร้างส่งผลกระทบต่ออุโมงค์ในค่าของการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีมากกว่าการจำลองการก่อสร้างเสาเข็มที่ไม่พิจารณาชั้นตอนการก่อสร้าง จะเห็นความแตกต่างชัดเจนในกรณีที่ใช้เสาเข็มที่มีความยาว 60 เมตร แต่ในกรณีเสาเข็มที่มีความยาว 17.85 เมตร จะพบว่า การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกันไม่มากนักทั้งในกรณีที่อุโมงค์วางตัวในชั้นดินเหนียวอ่อน และชั้นดินเหนียวแข็ง จากมุมที่เกิดค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์มากที่สุด พบว่าอุโมงค์จะเกิดการยุบตัวมากสุดในช่วงมุม 270°-360° และเกิดการขยายตัวมากสุดในช่วงมุม 180°-270°

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิเคราะห์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาอิทธิพลของขั้นตอนการก่อสร้างเสาชემรับแรงข้างเคียงต่อผลการเสียรูปของอุโมงค์จากเสาชემรับแรงที่อยู่ใกล้เคียงโดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มุ่งเน้นการเปรียบเทียบเพื่อให้เห็นอิทธิพลของขั้นตอนการก่อสร้างที่ส่งผลต่ออุโมงค์ โดยใช้ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการเคลื่อนตัวของอุโมงค์เป็นตัวชี้วัดดังกล่าว ลักษณะอุโมงค์อ้างอิงจากโครงการรถไฟฟ้าสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย (The Mass Rapid Transit Authority Blue Line extension project, MRTA) ผลการวิเคราะห์ในการศึกษานี้ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากผลการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากเสาชემรับแรงข้างเคียง จะพบว่าการก่อสร้างเสาชემโดยพิจารณาขั้นตอนการก่อสร้างด้วยจะทำให้ค่าการเคลื่อนตัวและค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์มีค่ามากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรก่อสร้างเสาชემที่ไม่ได้มีการพิจารณาถึงขั้นตอนการก่อสร้าง
2. จากผลการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นของการก่อสร้างเสาชემที่พิจารณาขั้นตอนการก่อสร้างในชั้นดินเหนียวอ่อนและเสาชემยาว 60 เมตร มีอิทธิพลส่งผลให้ค่าการเคลื่อนตัวและค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์มีค่ามากขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] F.C. Schroeder, D.M. Potts and T.I. Addenbrooke. *Geotechnique*, 54. 2004. pp.351-362
- [2] Lueprasert P., Jongpradist P., Charoenpak P., Chaipanna P., and Suwansawat S. “Three Dimensional Finite Element Analysis for Preliminar Establishment of Tunnel Influence Zone Subject to Pile Loading”. *Maejo Int. J. Sci. Technol.* vol.9. July 2015. pp. 209-233.
- [3] Prateep Lueprasert. **Numerical investigation on the responses of existing tunnel due to adjacent loaded pile for development of the influence zone and construction guideline.** Doctoral Thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2017.
- [4] Kodchamon Ruangvirrojanakul. **Effect of size and thickness of tunnel lining on tunnel deformation due to adjacent loaded pile.** Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2016.
- [5] Nattida Kwanlikit. **3-D Finite Element Analysis on Behavior of Existing Tunnel due to Influence of Pile Row.** Master's Thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2017.
- [6] Bakker K.J. and C.B.M.Blom C.B.M. “Ultimate limit state design for linings of bored tunnels”. *Geomechanics and tunneling*, 2, No.4, 2009. pp.345-358.
- [7] ณรงค์ ทศนิพนธ์. ความก้าวหน้าทางเทคนิคการก่อสร้างเสาเข็มเจาะในกรุงเทพฯ ในปัจจุบัน. ใน การสัมมนาทางวิชาการ เรื่อง ฐานราก' 40, กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2540.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [8] ณรงค์ ทศนนิพันธ์. การสร้างมาตรฐานงานก่อสร้างเสาเข็มระบบเจาะเปียกในประเทศไทยที่สอดคล้องกับมาตรฐานสากลในยุคโลกาภิวัตน์. ในการประชุมใหญ่ทางวิศวกรรมประจำปี 2543 “เทคโนโลยีใหม่ในทศวรรษหน้า”, กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระราชูปถัมภ์, 2543.
- [9] ณรงค์ ทศนนิพันธ์, เผด็จ รุจิขจรเดช, สิทธิพล สุรอังกูร และพรพจน์ ต้นเส็ง. การศึกษาเรื่องผลกระทบต่อแรงเสียดทานของเสาเข็มเจาะจากระยะเวลาก่อสร้างและความหนืดของสารละลายเบนโทไนท์. ในการประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 7, กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระราชูปถัมภ์, 2544.
- [10] ณรงค์ ทศนนิพันธ์ และทัชชะพงษ์ ประเวศวรารัตน์. สมรรถนะของเสาเข็มระบบเจาะเปียกด้วยสารละลายเบนโทไนท์ในชั้นดินกรุงเทพฯ. ในการประชุมใหญ่ทางวิศวกรรมประจำปี 2542, กรุงเทพมหานคร : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระราชูปถัมภ์, 2542.
- [11] ณรงค์ ทศนนิพันธ์, กมล สิงห์โตแก้ว และพรพจน์ ต้นเส็ง. ประสบการณ์การก่อสร้างเสาเข็มเจาะแบบสี่เหลี่ยม. ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5, ชลบุรี : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระราชูปถัมภ์, 2542.
- [12] ณรงค์ ทศนนิพันธ์, เผด็จ รุจิขจรเดช และพรพจน์ ต้นเส็ง. การใช้โพลีเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มระบบเจาะเปียกในชั้นดินกรุงเทพฯ. ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6, เพชรบุรี : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระราชูปถัมภ์, 2543.
- [13] วันชัย เทพรักษ์ และธยานันท์ บุญรักษ. พฤติกรรมของสารละลายโพลีเมอร์ในการก่อสร้างเสาเข็มเจาะระบบเปียกในชั้นดินกรุงเทพฯ. ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8, ขอนแก่น : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระราชูปถัมภ์, 2545.
- [14] ณรงค์ ทศนนิพันธ์, เผด็จ รุจิขจรเดช, ซอว์ ซอว์ เอย์ และธยานันท์ บุญรักษ. คอนกรีตเทคโนโลยีสำหรับงานเสาเข็มเจาะลิกระบบเปียก. ในการประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 1, กาญจนบุรี : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระราชูปถัมภ์, 2546.
- [15] นฤนาท เหมะ. โครงการพัฒนาเขตคุ้มครองและมาตรการป้องกันท่อส่งน้ำและอุโมงค์ส่งน้ำจากการก่อสร้างในบริเวณข้างเคียงเสนอการประปานครหลวง. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2561.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [16] ณัฐธิดา ขวัญลิขิต. การวิเคราะห์พฤติกรรมของโหมงค์ที่มีอยู่เดิมเนื่องจากอิทธิพลของเสาเข็มแถวด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3มิติ. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2560.
- [17] Cernak, B., The Time Effect of Suspension on the Behaviour of Piers., **Sixth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.**, Vienna , Austria., 1976
- [18] Corbett, B. O., Davie, R.V. and Landford, A.D., A Load Bearing Diaphragm Wall at Keinsington and Chelsa Town Hall, London. Conf. on Diaphragm Walls and Anchorages, ICE , London. pp.57-62., 1975.
- [19] Fleming, W. K., Sliwinski, Z.J., **The Use and Influence of Bentonite in Bored pile Construction**, CIRIA Report PG3., 1977.
- [20] Littlechild, B. and Plumbridge, G., Effect of Construction Technique on The Behaviour of Plain Bored Cast In Situ Piles Constructed under Drilling Slurry., **7th Intl Conf. and Exh. on Piling and Deep Foundation.**, Vienna, pp. 1.6.1 –1.6.8., 1998.
- [21] Bartholomew, R.F., The Protection of Concrete Pile in Aggressive Ground Conditions: An International Appreciation in Proceeding. Conference on. **Recent Piling Developments in the Design and Construction of Piles.** Organized by Institution of Civil Engineers, London,. 1979. pp. 131 –141.
- [22] Fleming, W.K and Sliwinski, Z. J.,**The Use and Influent of Bentonite in Bored Piles Construction.** Construction Industry Research and Information Association. (CIRIA Report PG 3), 1977
- [23] Fleming, W. G. K., Weltman, A. J., Randolph, M. F., Elson, W. K. (1992), Piling Engineering, John Wiley&Sons, Inc. Xanthakos (1994), P. P., **Slurry Walls as Structural Systems.** McGraw – Hill Inc.
- [24] Guo-Sheng YAO, Jing-Pei LI, Feng CHU. “Numerical Analysis for the Influence of Bored Piles on Adjacent Tunnels”. **Contemporary Topics in In Situ Testing, Analysis, and Reliability of Foundations.** 2009. pp. 143-150.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [25] Jongpradist P.,Kaewsri T.,Sawatparnich A.,Suwansawat S.,Youwai S.,Kongkitkul W. and Sunitsakul J. “ Development of tunneling influence zones for adjacent pile foundations by numerical analyses.” *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol.34, 2013. pp. 96-109
- [26] Schanz T., Vermeer P.A. and bonnier P.G. “The hardening soil model: formulation and verification” *Beyond 2000 in Computational Geotechnics 10 years of Plaxis, Balkema, Rotterdam*, 1999. pp.281-296
- [27] T. Rukdeechuai, P. Jongpradist, A. Wonglert, and T. Kaewsri, “Influence of soil models on numerical simulation of geotechnical works in Bangkok subsoil,” *EIT Res. Dev. J.* vol. 20 (3), pp. 17–28, 2009
- [28] H. Katebi, A. H. Rezaei, M. Hajjalilue-Bonab, and A. Tarifard, “Assessment the influence of ground stratification, tunnel and surface buildings specifications on shield tunnel lining loads (by FEM),” *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 49, pp. 67–78, 2015.
- [29] T. Kasper and G. Meschke, “A 3D finite element simulation model for TBM tunnelling in soft ground,” *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, vol. 28, no. 14,. 2004. pp. 1441–1460.
- [30] T. Kasper and G. Meschke, “A numerical study of the effect of soil and grout material properties and cover depth in shield tunnelling,” *Comput. Geotech.*, vol. 33, no. 4–5,. 2006. pp. 234–247.
- [31] Lueprasert P., “Numerical investigation on the responses of existing tunnel due to adjacent loaded pile for development of the influence zone and construction guideline”. *Civil Doctoral Thesis, Department of Engineering, Faculty of Civil Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang*, 2017.