

การประเมินการตอบสนองของอุโมงค์ในแนวยาวเนื่องจากผลกระทบของเสาเข็ม
รับแรงกระทำข้างเคียงโดยวิธีไฟไนต์แบบสามมิติ

The assessment of tunnel response in longitudinal direction due to
adjacent pile under loading by 3D finite element method



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE ASSESSMENT OF TUNNEL RESPONSE IN LONGITUDINAL
DIRECTION DUE TO ADJACENT PILE UNDER LOADING BY 3D FINITE
ELEMENT METHOD



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 2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title The assessment of tunnel response in longitudinal direction due to adjacent pile under loading by 3D finite element method

Student Mr.Kongpop Wongchotikul ID 59010064
Mr.Jakrapong Sertsri ID 59010184
Mr.Jirawat Limaviratchapong ID 59010209

Degree Bachelor's Degree

Program Civil Engineering

Year 2019

Thesis Advisor Dr.Prateep Lueprasert

ABSTRACT

Nowadays, because of urban sprawl which causes traffic issue, tunnel take an important role to solve them, from traffic problems to water supply tunnels. Simultaneously, the number of construction of new infrastructures which require deep plies, such as flyovers, tall buildings, thus it is unavoidable constructed in the closed proximity to the existing tunnels which can be damaged by the change of the stress of state. This study presents the effect of pile row under loading on the existing tunnel by using 3D FEM analysis to install a surveillance device at various risky points in tunnel by studying the impact of tunnel in longitudinal plan. That show the deformation of the tunnel lining, axial force of the tunnel lining and bending moment of the tunnel lining. The results show that the maximum deformation and longitudinal axial force of the tunnel lining is reduced with the increase of spacing. The circumferential axial force and changing of bending moment is greater when spacing is increased, In addition to monitoring the middle of the tunnel ,should be examine on the tunnel longitudinal infection point.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จด้วยความร่วมมือของสมาชิกในกลุ่ม ประกอบด้วย นายก้องภพ ว่องโชติกุล , นายจักรพงษ์ เสริฐศรี , นายจิรวุฒน์ ลิ้มวิรัชพงษ์ ที่คอยช่วยเหลือกันจนสำเร็จวิทยานิพนธ์ได้

ขอขอบคุณ ดร.ประทีป หลือประเสริฐ ที่ให้ความช่วยเหลือชี้แนะและคอยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และคำปรึกษาจนมีแนวทางในการดำเนินงานต่อได้

ขอขอบคุณพี่ในศูนย์นวัตกรรมการก่อสร้างใต้ดินและอุโมงค์พระจอมเกล้าลาดกระบัง (LUTIC) ที่คอยให้คำแนะนำให้เข้าใจถึงขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์ทำให้มีแนวคิดเป็นลำดับขั้นตอนมากขึ้น และ สอนใช้โปรแกรม PLAXIS 3D และ คอยช่วยเหลือตอบคำถามและให้แนวทางจนทำให้มีความเข้าใจ แนวทางในการดำเนินงานต่อได้

ขอขอบคุณ ศูนย์นวัตกรรมการก่อสร้างใต้ดินและอุโมงค์พระจอมเกล้าลาดกระบัง (LUTIC) ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้ ที่ให้ใช้โปรแกรม PLAXIS 3D

ขอขอบคุณ บิตามารดาที่สนับสนุนและคอยเป็นกำลังใจมาจนถึงตอนนี้
การที่ปริญญานิพนธ์สำเร็จมาด้วยดีจะเป็นไปไม่ได้ถ้าขาดปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งไปก็จะไม่อาจออกมาสำเร็จแบบนี้ได้

ก้องภพ ว่องโชติกุล

จักรพงษ์ เสริฐศรี

จิรวุฒน์ ลิ้มวิรัชพงษ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 สภาพทางธรณีวิทยาของกรุงเทพมหานคร.....	4
2.2.1 ข้อมูลโครงการที่ทำการศึกษา.....	4
2.2.2 โครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน.....	5
2.3 วิธีการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบ earth balance pressure.....	7
2.3.1 เทคนิคการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบ earth balance pressure...7	
2.3.2 ผนังอุโมงค์.....	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.3 การอัดฉีดน้ำปูนในช่องว่างที่เกิดขึ้น.....	10
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างอุโมงค์.....	12
2.4.1 ลักษณะทั่วไปของอุโมงค์.....	12
2.4.2 สภาพทางธรณีวิทยา.....	12
2.4.3 ปัจจัยการควบคุมหัวเจาะ.....	13
2.5 การถ่ายน้ำหนักของเสาเข็ม.....	14
2.6 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุโมงค์และเสาเข็ม.....	17
2.7 ทฤษฎีการวิเคราะห์โดย Finite Element 3D.....	19
2.7.1 วิธีการวิเคราะห์.....	19
2.8 พฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาว.....	20
บทที่ 3 วิธีการวิเคราะห์.....	23
3.1 กล่าวนำ.....	23
3.2 ลักษณะศึกษาที่พิจารณา.....	23
3.3 การศึกษาพฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาว.....	26
3.3.1 การเสียรูปของผนังอุโมงค์ ณ ตำแหน่งต่าง ๆเนื่องจากการทรุดตัวของดิน.....	26
3.3.2 แรงตามแกนภายในผนังอุโมงค์.....	26
3.3.3 โมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์.....	27
3.4 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.4.1 ลักษณะแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา (โครงข่ายแบบจำลอง).....	27
3.4.2 คุณสมบัติแบบจำลอง.....	27
3.4.3 ขอบเขตแบบจำลองการวิเคราะห์และเงื่อนไขเริ่มต้น.....	28
3.4.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์.....	29
3.4.5 การประเมินผล.....	30
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์.....	35
4.1 กล่าวนำ.....	35
4.2 พฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาว (longitudinal).....	35
4.2.1 การเสียรูปของผนังอุโมงค์.....	38
4.2.2 การเปลี่ยนแปลงแรงตามแกนภายในผนังอุโมงค์.....	39
4.2.3 การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์.....	42
บทที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์.....	44
เอกสารอ้างอิง.....	45
ภาคผนวก.....	47
ภาคผนวก ก.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 คุณสมบัติชั้นดิน.....	28
3.2 คุณสมบัติของผนังอุโมงค์และเสาเข็มเจาะ.....	28
4.1 ตารางแสดงตำแหน่งหน้าตัดจุดกึ่งกลางของอุโมงค์, จุดตัดกลับของอุโมงค์, ระยะ 0.7 เท่าของจุดตัดกลับของอุโมงค์ และ ระยะ 2.2 เท่าของจุดตัดกลับของอุโมงค์.....	36
4.2 แสดงค่าการเสียรูปของอุโมงค์ในแนวตั้งโดยระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถวเท่ากับ 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม.....	38
4.3 แสดงค่าการเสียรูปของอุโมงค์ในแนวตั้งโดยระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถวเท่ากับ 4 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม.....	38
4.4 แสดงค่าการเสียรูปของอุโมงค์ในแนวตั้งโดยระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถวเท่ากับ 5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม.....	38
4.5 แสดงภาพการเสียรูปของผนังอุโมงค์ในแต่ละกรณีศึกษา.....	39
4.6 แสดงค่าแรงตามแกนภายในผนังอุโมงค์โดยระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถวเท่ากับ 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม.....	40
4.7 แสดงค่าแรงตามแกนภายในผนังอุโมงค์โดยระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถวเท่ากับ 4 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม.....	40
4.8 แสดงค่าแรงตามแกนภายในผนังอุโมงค์โดยระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถวเท่ากับ 5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม.....	40
4.9 แสดงภาพแอมพลิจูดแรงตามแกนภายในผนังอุโมงค์ในแต่ละกรณีศึกษา.....	41
4.10 แสดงค่าโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์โดยระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถวเท่ากับ 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11 แสดงค่าโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์โดยระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว เท่ากับ 4 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม.....	42
4.12 แสดงค่าโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์โดยระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว เท่ากับ 5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม.....	42
4.13 แสดงภาพแผนภูมิโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์ในแต่ละกรณีศึกษา.....	43



สารบัญรูป

รูป	หน้า
1.1 โครงสร้างใต้ดินวางตัวใกล้กับอุโมงค์เดิม.....	1
2.1 สภาพความดันน้ำทั่วไปในกรุงเทพฯ [9].....	4
2.2 โครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน Metropolitan Rapid Transit Authority (MRTA).....	5
2.3 สภาพชั้นใต้ดินส่วนเหนือของโครงการ.....	6
2.4 สภาพชั้นใต้ดินส่วนใต้ของโครงการ.....	6
2.5 ผนังอุโมงค์คอนกรีตเสริมเหล็กในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยายMRTA[8].....	9
2.6 ช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างผนังอุโมงค์และหัวเจาะ[9].....	10
2.7 ส่วนปิดผิวบริเวณด้านท้ายหัวเจาะด้วยแปรงลวดเหล็ก (Wire brush) [9].....	11
2.8 การอัดฉีดน้ำปูนผ่านรูภายในชั้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์[9].....	11
2.9 การถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มเดี่ยว.....	14
2.10 แรงฉุดที่เกิดขึ้นบริเวณรอบเสาเข็ม.....	16
2.11 กระเปาะความเค้นของเข็มตันเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่ม.....	16
2.12 แบบจำลองที่ Schroeder et al.ใช้ในการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ.....	18
2.13 โซนอิทธิพล.....	18
2.14การแบ่งโครงสร้างออกเป็นชิ้นส่วนเล็ก ๆ.....	20
2.15 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอุโมงค์ในแนวยาว.....	21
2.16 การเสียรูประหว่างรอยต่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์.....	22
3.1 ลักษณะอุโมงค์ที่ใช้ในการจำลอง.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
3.2 กรณีศึกษาที่ 1 ระยะห่างระหว่างเสาเข็มภายในแถวเท่ากับ3เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Spacing 3D).....	24
3.3 กรณีศึกษาที่ 2 ระยะห่างระหว่างเสาเข็มภายในแถวเท่ากับ4เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Spacing 4D).....	25
3.4 กรณีศึกษาที่ 3 ระยะห่างระหว่างเสาเข็มภายในแถวเท่ากับ5เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Spacing 5D).....	25
3.5 อุโมงค์ในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงิน (MRTA).....	26
3.6 ลักษณะแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ.....	27
3.7 กราฟการเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของผิวดินที่ได้จากโครงการ MRTA กับ 3D-FEM.....	29
3.8 วิธีการคำนวณการสัຍรูปของผนังอุโมงค์.....	30
3.9 ตำแหน่งหน้าต่างตัดตามขวางเพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาวสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 (Spacing 3D).....	32
3.10 ตำแหน่งหน้าต่างตัดตามขวางเพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาวสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 (Spacing 4D).....	32
3.11 ตำแหน่งหน้าต่างตัดตามขวางเพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาวสำหรับกรณีศึกษาที่ 3 (Spacing 5D).....	32
3.12 แสดงทิศทางของแรงตามแกนภายในผนังอุโมงค์.....	33
3.13 แสดงทิศทางของโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์.....	34
4.1 ภาพแสดงหน้าต่างตัดจุดกึ่งกลางของอุโมงค์, จุดตัดกลับของอุโมงค์, ระยะ 0.7 เท่าของจุดตัดกลับของอุโมงค์ และ ระยะ 2.2 เท่าของจุดตัดกลับของอุโมงค์ที่ Spacing 3D.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

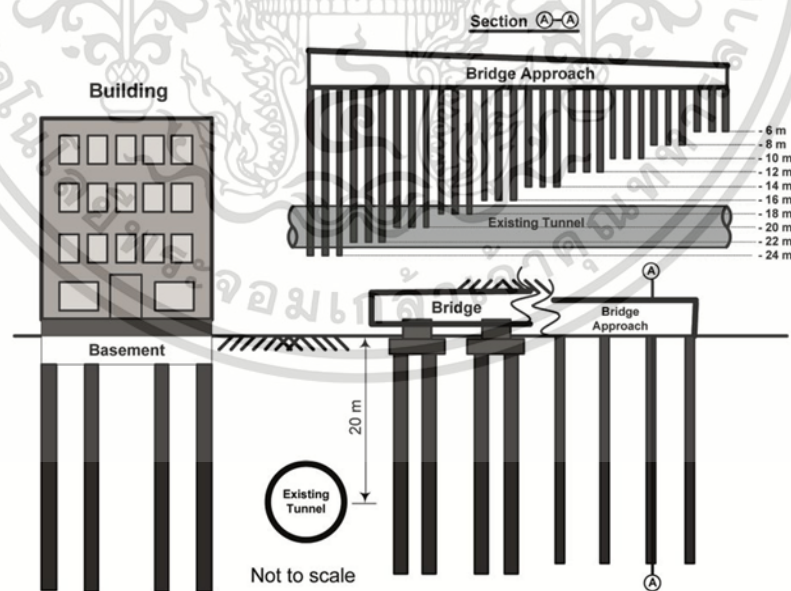
รูป	หน้า
4.2 ภาพแสดงหน้าตัดจุดกึ่งกลางของอูโมงค์, จุดตัดกลับของอูโมงค์, ระยะ 0.7 เท่าของจุดตัดกลับของอูโมงค์ และ ระยะ 2.2 เท่าของจุดตัดกลับของอูโมงค์ ที่ Spacing 4D.....	37
4.3 ภาพแสดงหน้าตัดจุดกึ่งกลางของอูโมงค์, จุดตัดกลับของอูโมงค์, ระยะ 0.7 เท่าของจุดตัดกลับของอูโมงค์ และ ระยะ 2.2 เท่าของจุดตัดกลับของอูโมงค์ ที่ Spacing 5D.....	37
ก.1 รูปแสดงการเสียรูปที่จุดบนของอูโมงค์ที่เสาเข็มระยะ Spacing 3D.....	48
ก.2 รูปแสดงการเสียรูปที่จุดล่างของอูโมงค์ที่เสาเข็มระยะ Spacing 3D.....	48
ก.3 รูปแสดงการเสียรูปที่จุดซ้ายของอูโมงค์ที่เสาเข็มระยะ Spacing 3D.....	49
ก.4 รูปแสดงการเสียรูปที่จุดขวาของอูโมงค์ที่เสาเข็มระยะ Spacing 3D.....	49
ก.5 รูปแสดงการเสียรูปที่จุดบนของอูโมงค์ที่เสาเข็มระยะ Spacing 4D.....	50
ก.6 รูปแสดงการเสียรูปที่จุดล่างของอูโมงค์ที่เสาเข็มระยะ Spacing 4D.....	50
ก.7 รูปแสดงการเสียรูปที่จุดซ้ายของอูโมงค์ที่เสาเข็มระยะ Spacing 4D.....	51
ก.8 รูปแสดงการเสียรูปที่จุดขวาของอูโมงค์ที่เสาเข็มระยะ Spacing 4D.....	51
ก.9 รูปแสดงการเสียรูปที่จุดบนของอูโมงค์ที่เสาเข็มระยะ Spacing 5D.....	52
ก.10 รูปแสดงการเสียรูปที่จุดล่างของอูโมงค์ที่เสาเข็มระยะ Spacing 5D.....	52
ก.11 รูปแสดงการเสียรูปที่จุดซ้ายของอูโมงค์ที่เสาเข็มระยะ Spacing 5D.....	53
ก.12 รูปแสดงการเสียรูปที่จุดขวาของอูโมงค์ที่เสาเข็มระยะ Spacing 5D.....	53

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันการก่อสร้างอุโมงค์ มี บทบาทสำคัญต่อการพัฒนาประเทศเป็นอย่างมาก การสร้างระบบคมนาคมเพื่อรองรับจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้นแก้ปัญหาด้านจราจรในเมืองใหญ่หรืออุโมงค์ส่งน้ำประปา ขณะที่การก่อสร้างพื้นฐาน(Infrastructure)ก็ยังคงต้องมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ยกตัวอย่างเช่น อาคารสูง ทางแยกยกระดับ ทำให้เกิดความหนาแน่นของพื้นที่ในการก่อสร้างอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งโครงการขนาดใหญ่เหล่านี้ จำเป็นต้องตั้งอยู่บนฐานรากที่เสถียร เนื่องจากสภาพชั้นดินในพื้นที่ ทำให้เกิดผลกระทบจากอิทธิพลของเสาเข็มที่ส่งผลต่อบูมิ่งค์เดิมทำให้เกิดความเสียหายต่อบูมิ่งค์ขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพใต้ดินทำให้เกิดความเครียดและการเสียรูปของดินรอบอุโมงค์ส่งผลต่อโครงสร้างอุโมงค์ซึ่งการวางตัวของฐานราก(เสาเข็ม)ใกล้กับอุโมงค์เดิมอาจส่งผลกระทบ ทำให้อุโมงค์เกิดความเสียหายทางด้านเสถียรภาพ (stability) เช่น คอนกรีตผนังอุโมงค์เกิดการแตกร้าว หรือทางด้านการใช้งาน (service ability) เช่น รางรถไฟบิดตัวเนื่องจากการทรุดตัวของอุโมงค์ เป็นต้น



รูปที่ 1.1 โครงสร้างใต้ดินวางตัวใกล้กับอุโมงค์เดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาผลกระทบเสาเข็มรับแรงที่มีผลต่ออุโมงค์ที่มีอยู่เดิมนั้นในอดีตมีการศึกษาที่น้อยมากซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดผลกระทบที่มีต่ออุโมงค์ทำได้ยากลำบาก ซึ่งการศึกษาในอดีต ส่วนใหญ่มาจากโครงการก่อสร้างในอังกฤษ [1-6] ต่อมาในปัจจุบันมีการศึกษาเพิ่มมากขึ้น เช่น การศึกษา ผลกระทบเสาเข็มที่มีต่ออุโมงค์โครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย (The Mass Rapid Transit Authority Blue Line extension project, MRTA) [9] การศึกษานี้พิจารณาตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างปลาย เสาเข็มกับอุโมงค์ที่มีต่อค่าการเสียรูปของอุโมงค์ในด้านการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวราบและ แนวตั้ง (changes in horizontal and vertical diameters) โดยการศึกษาเป็นอิทธิพลของเสาเข็มเดี่ยว และ ต่อมา Lueprasert et al., (2015) [3] ได้มีการศึกษาเพิ่มเติมจากงานวิจัยดังกล่าวโดยการนำเสนอพื้นที่ อิทธิพลสำหรับผลกระทบของเสาเข็มรับแรงที่มีต่ออุโมงค์โดยใช้วิธีการพิจารณาค่าการเสียรูปแบบเดียวกันกับ งานวิจัย [8] โดยพื้นที่อิทธิพล (influence zone) เนื่องจากอิทธิพลของเสาเข็มดังกล่าวมีขนาดเล็กลง

นักวิจัยส่วนใหญ่มักสนใจศึกษาเพียงผลกระทบในแนวระนาบ(transverse plane) ซึ่งการวิเคราะห์ในแนวระนาบ อาจไม่เพียงพอต่อการตรวจสอบการทรุดตัว เนื่องจากแนวระนาบเป็นการตรวจสอบที่จุดจุดเดียว แต่ในความเป็นจริงอิทธิพลจากเสาเข็มก็ทำให้เกิดการพฤติกรรมการเสียรูปในแนวยาว เช่น การบิดตัวเสียรูปในทิศทางต่าง ๆ การหมุนตัวของอุโมงค์ล้วนส่งผลต่ออุโมงค์ทั้งหมด เพื่อการวิเคราะห์ที่สมจริงที่สุดเราจึงต้องศึกษาพฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาว (longitudinal) และ ศึกษา ระยะปลอดภัยหรือระยะห่าง(spacing)ในการตอกเสาเข็มแถวเพื่อจะรู้ว่าผลกระทบมากน้อยแค่ไหนต่ออุโมงค์เดิมด้วยการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะห่างของเสาเข็มภายในแถวที่มีต่ออุโมงค์เดิมในรูปของการเสียรูป, ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัด และค่าการเปลี่ยนแปลงแรงภายในที่ตำแหน่งต่างๆภายในผนังอุโมงค์
2. ค้นหาจุดที่มีค่าการเสียรูป, ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัด และค่าการเปลี่ยนแปลงแรงภายในที่มีผลกระทบมากที่สุดต่ออุโมงค์เพื่อติดเครื่องระวางภัย

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.วิเคราะห์ผลกระทบโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ซอฟต์แวร์ PLAXIS 3D
- 2.ขั้นตอนการวิเคราะห์จะไม่พิจารณาถึงขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็ม
- 3.การวิเคราะห์ไม่พิจารณาถึงการอัดตัวคายนํ้าของชั้นดิน
- 4.สภาพทางธรณีวิทยาพิจารณาโดยอ้างอิงจากคุณสมบัติของชั้นดินในโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย (The Mass Rapid Transit Authority Blue Line extension project, MRTA)
- 5.แบบจำลองของผนังอุโมงค์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นแบบต่อเนื่อง (continuous ring)
- 6.เสาเข็มแถววางตัวอยู่ด้านข้างของอุโมงค์เพียงด้านเดียว



บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

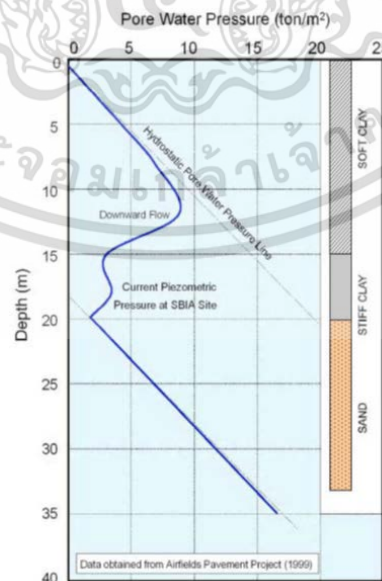
2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้บรรยายเนื้อหาองค์ความรู้ที่ใช้ประกอบในการทำวิจัย แบ่งออกเป็น 8 หัวข้อหลัก คือ 1.สภาพทางธรณีวิทยาของกรุงเทพ 2.วิธีการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบ earth pressure balance 3.ปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างอุโมงค์ 4.การถ่ายน้ำหนักของเสาเข็ม 5.ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุโมงค์และเสาเข็ม 6.ทฤษฎีการวิเคราะห์โดย Finite Element 3D 7.พฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาว 8.ลักษณะการเสียรูปของอุโมงค์

2.2 สภาพทางธรณีวิทยาของกรุงเทพมหานคร

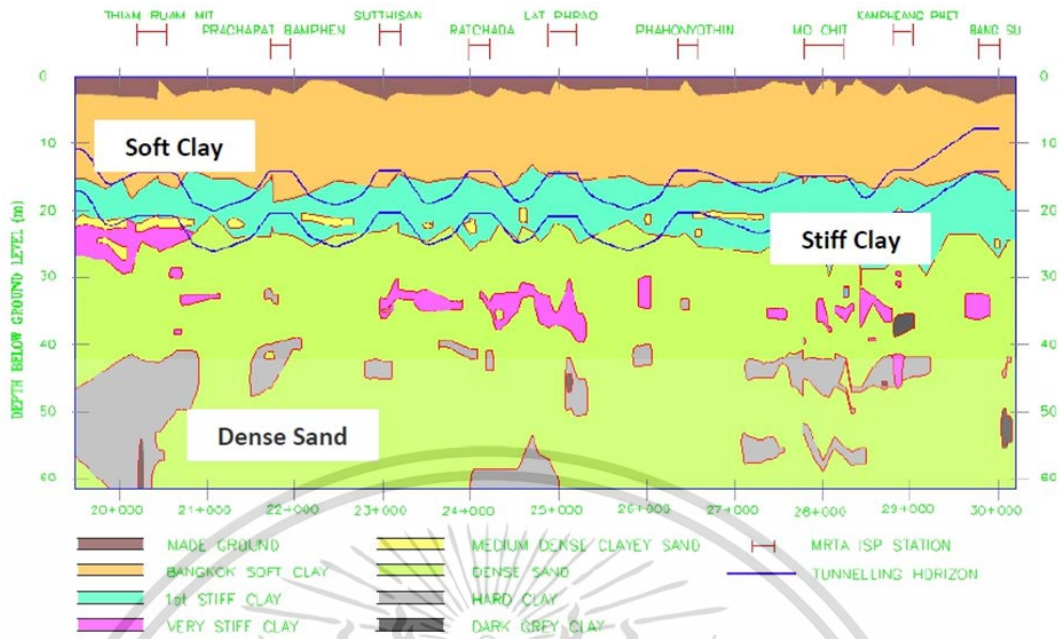
2.2.1 ข้อมูลโครงการที่ทางการศึกษา

กรุงเทพฯ ตั้งอยู่ในบริเวณพื้นที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาทำให้มีสภาพชั้นดินที่หลากหลายสามารถแบ่งสภาพชั้นดินออกเป็น 6 ประเภท ได้แก่ ชั้นดินถม ชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft clay) ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium clay) ชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) ชั้นทราย (Sand) ชั้นดินเหนียวแข็งมาก (Hard clay) และชั้นทรายแน่น (Very dense sand) ตั้งแต่ระดับความลึก 6 เมตรจากผิวดิน ความดันน้ำมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง (Non-hydrostatic) ซึ่งเกิดจากการสูบน้ำบาดาล จากการสำรวจพบว่า ในชั้นดินเหนียวความดันน้ำที่วัดได้มีค่าไม่คงที่และค่อนข้างมีค่ากระจายหากนำมาสร้างกราฟ ที่ระดับความลึก 20 เมตร ซึ่งเป็นชั้นทรายพบว่า ความดันน้ำมีค่าใกล้เคียงศูนย์ที่จุดบนสุดของชั้นทรายดังแสดงใน รูปที่ 2.1

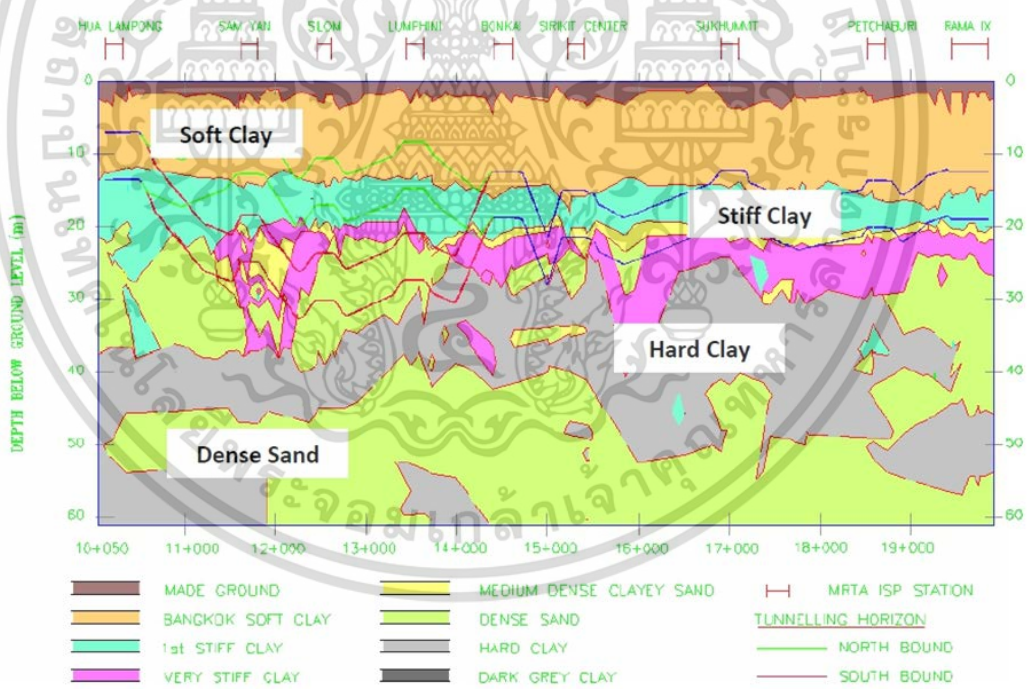


รูปที่ 2.1 สภาพความดันน้ำทั่วไปในกรุงเทพฯ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 สภาพชั้นใต้ดินส่วนเหนือของโครงการ



รูปที่ 2.4 สภาพชั้นใต้ดินส่วนใต้ของโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 วิธีการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบ earth balance pressure

ในปัจจุบัน โครงการก่อสร้างอุโมงค์ในดินอ่อนส่วนใหญ่ได้นำเทคนิคการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบ earth balance pressure มาใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยที่หัวเจาะแบบนี้จะมีความเหมาะสมสำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินเหนียว (Cohesive soil) สำหรับในกรุงเทพฯ การก่อสร้างอุโมงค์ส่วนใหญ่จะใช้วิธีการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล เนื่องจากสภาพดินในกรุงเทพฯ มีลักษณะเป็นดินเหนียวอ่อนถึงดินเหนียวแข็งที่มีความเหมาะสมกับหัวเจาะประเภทนี้ อีกทั้งระดับน้ำใต้ดินยังอยู่ในระดับลึกอีกด้วย

2.3.1 เทคนิคการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบ earth balance pressure

เทคนิคการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบ earth balance pressure อุโมงค์จะถูกขุดเจาะโดย หัวตัดดินด้านหน้าหัวเจาะ ดินที่ถูกขุดออกจะถูกลำเลียงด้วยเกลียวหมุนลำเลียงดิน (Screw conveyor) และสายพานลำเลียงดิน (Belt conveyor) จากห้องกักดิน (Earth chamber) จากนั้นการลำเลียงดินจะผ่านการขนย้ายโดยรถรางลำเลียงดินหรือใช้ระบบท่อสูบต่อเข้ากับเกลียวหมุนลำเลียงดินโดยตรงนอกจากนี้ ในทางปฏิบัติเพื่อลดการเคลื่อนตัวของดินให้น้อยที่สุด ความดันดินที่หัวตัดดินด้านหน้าหัวเจาะจะต้องคอยติดตามและควบคุม ดังนี้

- 1).การกำหนดความดันหน้าหัวเจาะ (Face pressure) ในแต่ละรอบการขุดเจาะ จำเป็นที่จะต้องถูกกำหนดไว้ก่อนที่การขุดเจาะจะเกิดขึ้น โดยทำการประเมินจากแนวเส้นทางอุโมงค์และสภาพทางธรณี ซึ่งความดันหน้าหัวเจาะที่กำหนดนี้จะใช้เป็นปัจจัยควบคุมขณะทำการขุดเจาะ
 - 2).ในระหว่างการขุดเจาะ ความดันหน้าหัวเจาะที่ใช้จะต้องถูกบันทึก ควบคุม และรักษาให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้
 - 3).ในแต่ละรอบของการขุดเจาะ ความดันหน้าหัวเจาะที่ทำการกำหนดไว้ก่อนการขุดเจาะและความดันหน้าหัวเจาะที่เกิดขึ้นจริงขณะทำการขุดเจาะ ต้องถูกบันทึกในรายงานการขุดเจาะเพื่อใช้อ้างอิง
- ห้องควบคุมปัจจัยการควบคุมหัวเจาะอุโมงค์มีหน้าที่ในการติดตามปัจจัยการควบคุมหัวเจาะในขณะที่ทำการขุดเจาะ นอกจากนี้ความดันหน้าหัวเจาะที่กำหนดจะใช้เป็นปัจจัยควบคุมในระหว่างการขุดเจาะจะถูกควบคุมอย่างใกล้ชิดเพื่อที่จะทำให้แน่ใจว่าการปฏิบัติการของหัวเจาะอยู่ภายใต้แผนผังการควบคุมของความดันที่กำหนดไว้

นอกจากนี้กรณีที่ใช้วิธีท่อบุบในการลำเลียงดินออกจะมีประเด็นสำคัญที่ต้องพิจารณาเนื่องมาจากท่อ
สูบลำเลียงดินจะถูกเชื่อมต่อโดยตรงกับเกลียวหมุนลำเลียงดิน ความเร็วในการลำเลียงดินผ่านท่อสูบ
จะต้องสูงพอที่จะหลีกเลี่ยงการอุดตันเนื่องจากตะกอนดิน และก็ต้องไม่สูงเกินไปที่จะทำให้ท่อสึก
แต่เนื่องด้วยวิธีการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล อัตราของการลำเลียงดิน
จะต้องมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับความดันที่ถูกควบคุมบริเวณส่วนหน้าของห้องกักดินโดยการ
ปฏิบัติการของหัวเจาะจะต้องทำการรักษาสมดุลของอัตราการลำเลียงดินและการเคลื่อนตัวไป
ข้างหน้าของหัวเจาะเพื่อที่จะควบคุมความดันหน้าหัวเจาะตามที่กำหนด

ในปี 2544 [8] ได้ศึกษาศึกษาพฤติกรรมของหัวเจาะระบบ earth pressure balance ขณะขุดเจาะ
อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน โครงการรถไฟฟ้ามหานครในชั้นดินกรุงเทพฯ เพื่อพิจารณาปัจจัยควบคุมการขุด
เจาะที่มีผลต่อการทรุดตัวของผิวดิน การควบคุมการขุดเจาะจะกำหนดอัตราส่วนดินขุด โดยการ
กำหนดความเร็วรอบของ Screw conveyor เพื่อควบคุมปริมาณดินออกจากห้องพักดิน การกำหนด
Face Pressure ต้องให้สอดคล้องกับอัตราส่วนดินขุดพฤติกรรมเคลื่อนตัวของหัวเจาะจะมี
ลักษณะการเลื้อยคล้ายงู ซึ่งเป็นผลมาจากการทำงานของแม่แรงในการควบคุมทิศทางการขุดเจาะ
การวางตัวของหัวเจาะโดยปกติจะทำมุมเงยเมื่อเทียบกับแนวการขุดเจาะ เพื่อป้องกันการจมเนื่องจาก
น้ำหนักของหัวเจาะ ซึ่งจะเป็นผลให้เกิด Over-Excavation การควบคุมการทรุดตัวของผิวดิน ทำได้
โดยการรักษาความมั่นคงของดินบริเวณหน้าหัวเจาะ ด้วยการควบคุม Face Pressure ให้มีความ
เหมาะสมกับสภาพของชั้นดิน และสอดคล้องกับหน่วยแรงดันดิน

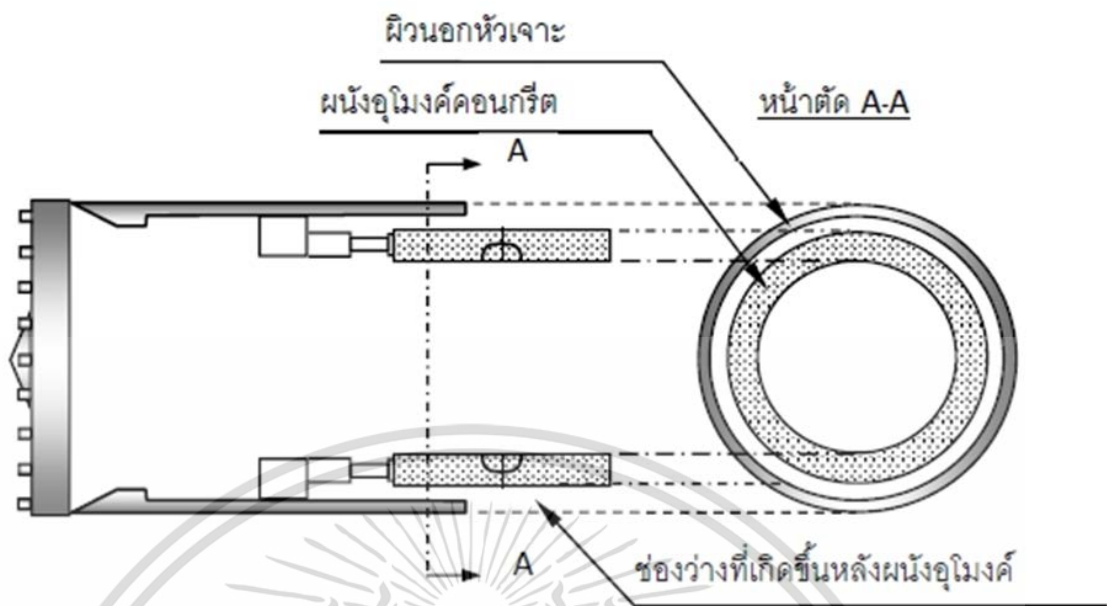
รวมด้านข้างสถิตย์ นอกจากนี้จะต้องควบคุมประสิทธิภาพการทำ Backfill Grouting ด้วยการกำหนด
แรงดันที่ใช้ให้สอดคล้องกับสภาพของชั้นดินและหน่วยแรงดันดินรวมในแนวตั้ง และจะต้องควบคุม
อัตราส่วนการอุดช่องว่างให้มีค่ามากกว่า 100% เพื่อควบคุมปริมาณการทรุดตัวให้อยู่ในพิสัยที่
เหมาะสม ($GL < 2.5\%$) ค่า Face Pressure ในกรณีการขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดินในชั้นดินเหนียวแข็ง
กรุงเทพฯ ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 60-130 kN/square m. หรือ 45-100% ของหน่วยแรงดันดินรวม
ด้านข้างสถิตย์ และควบคุมอัตราส่วนดินขุดมีค่าอยู่ระหว่าง 100-115% การทำ Backfill Grouting
ควรกำหนดแรงดันมีค่าอยู่ระหว่าง 2-3 bar หรือ 70-100% ของหน่วยแรงดันดินรวมแนวตั้ง และ
ควบคุมอัตราส่วนการอุดช่องว่างอยู่ในช่วง 110-150%

2.3.2 ผนังอุโมงค์

ผนังอุโมงค์มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับวิธีการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ โดยที่จะทำการติดตั้งบริเวณส่วนท้ายของหัวเจาะ ผนังอุโมงค์ที่เป็นระบบแบบผนังถาวรในขั้นตอนเดียว (One-pass) เป็นระบบที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขในการรักษาเสถียรภาพของการก่อสร้าง และใช้เป็นผนังอุโมงค์ถาวรในส่วนเดียวกัน โดยรูปที่ 2.5 แสดงผนังอุโมงค์คอนกรีตเสริมเหล็กในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย (MRTA) ในส่วนผนังอุโมงค์ที่เป็นระบบแบบสองขั้นตอน (Two-pass) จะประกอบด้วยผนังอุโมงค์ชั่วคราวที่ติดตั้งขึ้นเพื่อเสถียรภาพในการก่อสร้างเท่านั้น แล้วหลังจากนั้นจึงทำการติดตั้งผนังอุโมงค์ถาวร โดยทั่วไปผนังอุโมงค์ที่ประกอบกันเป็นอุโมงค์จะมีขนาดเล็กกว่าหัวเจาะ เพราะว่าการติดตั้งจะเกิดขึ้นภายในส่วนท้ายของหัวเจาะ ดังนั้น ช่องว่างที่เกิดขึ้นโดยรอบแสดงไว้ใน รูปที่ 2.6 จะถูกเติมเต็มด้วยการอัดฉีดน้ำปูน ในกรณีที่อุโมงค์ทำการก่อสร้างในดินเปียก ผนังอุโมงค์จะถูกยึดด้วยสลักเข้าหากันเพื่อป้องกันการไหลซึมของน้ำ ตรงกันข้ามในกรณีที่อุโมงค์ทำการก่อสร้างในดินแห้ง ผนังอุโมงค์อาจจะไม่จำเป็นต้องยึดเข้าหากันด้วยสลัก



รูปที่ 2.5 ผนังอุโมงค์คอนกรีตเสริมเหล็กในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยายMRTA[9]



รูปที่ 2.6 ช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างฉนวนฉนวนคองกรีตและหัวเจาะ[9]

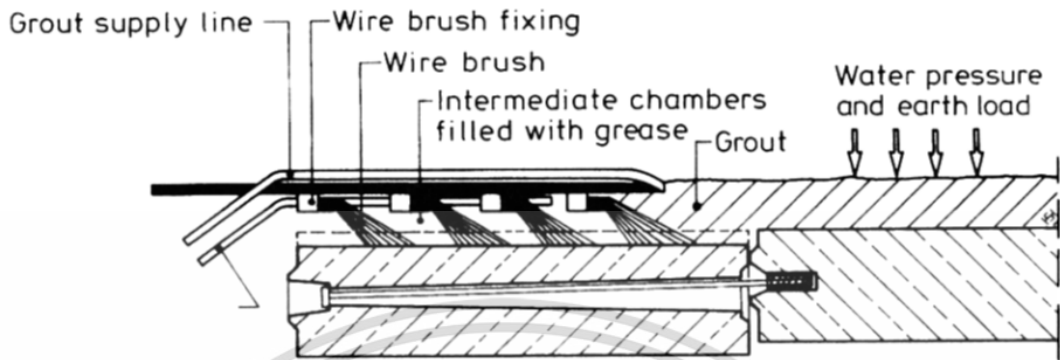
2.3.3 การอัดฉีดน้ำปูนในช่องว่างที่เกิดขึ้น

วิธีการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะนั้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจาะจะมีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์เนื่องจาก 1) ผิวของหัวเจาะจะต้องซ้อนกับแนวอุโมงค์ เพื่อให้การประกอบฉนวนฉนวนคองกรีตเกิดขึ้นได้ในบริเวณด้านท้ายหัวเจาะ และ 2) จะต้องมีช่องว่างระหว่างบริเวณผิวด้านนอกของฉนวนฉนวนคองกรีตและบริเวณส่วนท้ายหัวเจาะ เพื่อที่จะทำให้หัวเจาะสามารถขุดเจาะอุโมงค์เป็นแนวโค้ง และแก้ไขการวางแนวที่ผิดพลาดได้ ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้เกิดช่องว่างโดยรอบฉนวนฉนวนคองกรีตขณะที่หัวเจาะเคลื่อนไปข้างหน้า นำมาซึ่งการอัดฉีดน้ำปูนเพื่อปิดช่องว่างด้านท้ายหัวเจาะโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการเคลื่อนตัวของดินเข้าสู่อุโมงค์

โดยบริเวณด้านท้ายหัวเจาะจะมีส่วนปิดผิวด้านท้ายเพื่อป้องกันการไหลเข้ามาของน้ำใต้ดินดินโดยรอบ และน้ำปูนจากการอัดฉีดเพื่ออุดช่องว่างรอบฉนวนฉนวนคองกรีต ส่วนปิดผิวด้านท้ายหัวเจาะจะแยกออกมาจากส่วนท้ายหัวเจาะ และถูกออกแบบขึ้นเพื่อปิดรอยต่อระหว่างส่วนท้ายและฉนวนฉนวนคองกรีต เพื่อให้สามารถที่จะทนต่อความดันดิน ความดันน้ำ และความดันน้ำปูนที่ค่อนข้างสูงดังแสดงไว้ใน รูปที่ 2.7 วัสดุที่ใช้เป็นส่วนปิดผิวด้านท้ายในโครงการรถไฟใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยายคือ แปรงลวดเหล็ก (Wire brush) ที่ได้ทำการพัฒนามาจากประเทศญี่ปุ่น โดยหัวเจาะ Kawasaki และ Herrenknecht ที่ใช้ในโครงการนี้จะมีส่วนปิดผิวด้านท้ายที่เป็นแปรงลวดเหล็กจำนวน 3 แถวช่องว่าง

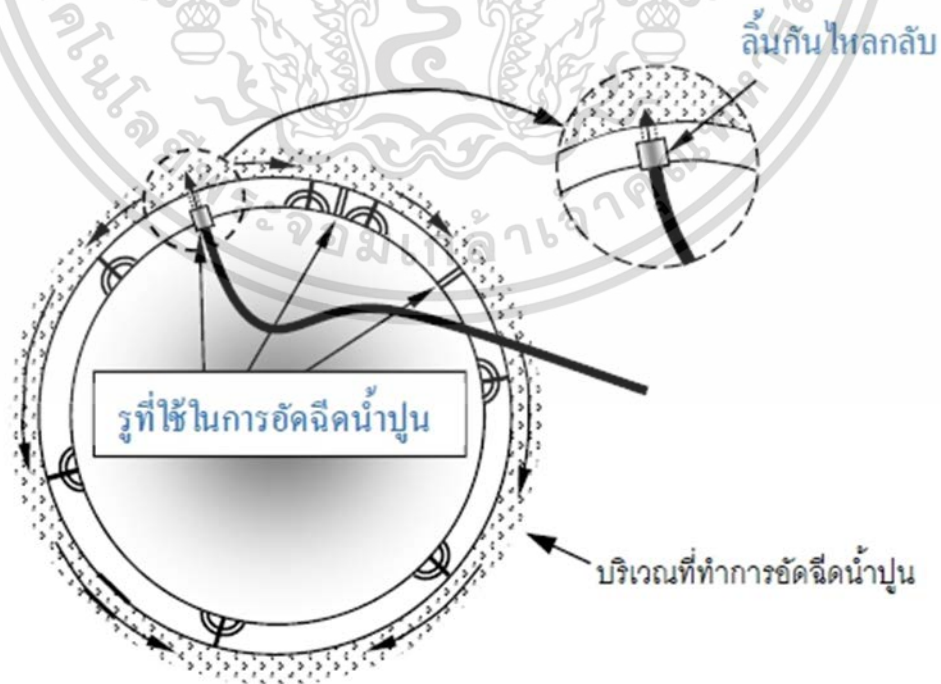
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแต่ละแถวจะมีน้ำมันหล่อลื่นความดันสูงบรรจุอยู่เพื่อป้องกันน้ำ ดินหรือน้ำปูนจากการแทรกซึมเข้ามาสู่พื้นที่ปิดผิวด้านท้าย



รูปที่ 2.7 ส่วนปิดผิวบริเวณด้านท้ายหัวเจาะด้วยแปรงลวดเหล็ก (Wire brush) [9]

น้ำปูนจะถูกอัดฉีดผ่านรูของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์แสดงไว้ใน รูปที่ 2.8 ในระหว่างการอัดฉีด น้ำปูนจะถูกอัดฉีดจากบริเวณส่วนยอดของอุโมงค์เพื่อที่จะทำให้น้ำปูนสามารถเคลื่อนที่ปิดช่องว่างโดยรอบผนังอุโมงค์ด้วยความดันของการอัดฉีดที่สูง และแรงโน้มถ่วงของตัวน้ำปูนเอง การอัดฉีดจะถูกทำอย่างต่อเนื่องด้วยความดันที่สูงในช่องว่างที่เกิดขึ้นบริเวณด้านท้ายหัวเจาะ สิ่งที่ควบคุมการอัดฉีดนอกเหนือไปจากปริมาณของน้ำปูนก็คือ ความดันในการอัดฉีดน้ำปูน ซึ่งจะทำการตรวจวัดค่าจากภายในท่อน้ำปูนหรือจากแรงที่กระทำต่อชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์



รูปที่ 2.8 การอัดฉีดน้ำปูนผ่านรูภายในชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์[8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในเชิงวิชาการเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย ค่าความดันดังกล่าวจะถูกควบคุมให้อยู่ที่ประมาณ 3 บาร์ (300 กิโลปาสคาล) ภายใต้เงื่อนไขการออกแบบชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ที่สามารถรับได้ด้วย ความดันในการอัดฉีดที่สูงทำให้ช่องว่างรอบอุโมงค์ถูกเติมเต็มภายในระยะเวลาอันสั้น และสามารถป้องกันการเคลื่อนตัวของดินบริเวณด้านท้ายหัวเจาะได้อย่างมีประสิทธิภาพ การติดตาม ตรวจวัดปริมาตรและความดันในการอัดฉีดน้ำปูนจะถูกบันทึกค่าไว้ในทุกรอบของการขุดเจาะ

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างอุโมงค์

2.4.1 ลักษณะทั่วไปของอุโมงค์ (Tunnel geometry)

1.) ความลึกของอุโมงค์เป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลกระทบต่ออุโมงค์ การทรุดตัวที่เกิดขึ้นยังมีความสัมพันธ์ ที่เกี่ยวเนื่องกับปัจจัยอื่นๆ เช่น ปัจจัยการควบคุมหัวเจาะ และสภาพทางธรณีวิทยา จึงทำให้ไม่สามารถหา ความสัมพันธ์ของความลึกของอุโมงค์กับการทรุดตัวของผิวดินได้อย่างชัดเจน

2.) ระยะจากจุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ (Distance from launching station) โดยมีระยะ จาก จุดเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์มีผลกระทบต่อปริมาณการทรุดตัวของผิวดินนั้นเนื่องมาจากปัจจัยนี้ จะมี ความสัมพันธ์ควบคู่ไปกับทักษะในการควบคุมหัวเจาะหรือระยะเวลาการเรียนรู้ (Learning curve) ของผู้ ควบคุมหัวเจาะ และประสิทธิภาพของหัวเจาะ

3.) เส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ (Tunnel diameter) เส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์เป็น ปัจจัยที่มีผล ต่อการทรุดตัวของผิวดิน อุโมงค์ที่มีขนาดใหญ่ย่อมส่งผลให้เกิดการทรุดตัวมากกว่า อุโมงค์ที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากอุโมงค์ยังมีขนาดใหญ่ปริมาณในการขุดเจาะจะยิ่งมาก ก็มักก่อให้เกิด การสูญเสียมวลดินเป็นปริมาณ ที่มากกว่าอุโมงค์ที่มีขนาดเล็กกว่าเป็นธรรมดา

2.4.2 สภาพทางธรณีวิทยา (Geological conditions)

1.) สภาพทางธรณีวิทยาเป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีความสำคัญที่มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับแต่ละ วิธีการที่ นามาใช้ในการก่อสร้างอุโมงค์ ชนิดของดิน (Soil type) จะมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพ ของหัวเจาะในการ ขุดเจาะอุโมงค์ รวมถึงต่อปริมาณการทรุดตัวที่เกิดขึ้น สภาพทางธรณีวิทยาที่มีความเหมาะสมในการก่อสร้าง อุโมงค์ด้วยหัวเจาะมากที่สุดคือ ชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) โดยมี ที่มาจากการสังเกตในโครงการที่ผ่านมาในอดีต สาเหตุที่ชั้นดินเหนียวแข็งมีความเหมาะสม เนื่องมาจากมีค่ากำลังรับแรงเฉือน (S_u) ที่สูง ทำให้ดินมีเสถียรภาพในระหว่างที่ทำการขุดเจาะ

อุโมงค์ รวมทั้งกระบวนการการขนถ่ายดินผ่านสายพานลาก็เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ยิ่งไปกว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่น คุณสมบัติของดินเหนียวแข็งที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ การซึมผ่านของน้ำในดินมีค่าที่ต่างทำให้ลดปัญหาการไหลซึมของน้ำใต้ดิน (Groundwater seepage) เข้าสู่พื้นที่ที่ทำการขุดเจาะอุโมงค์ ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดการทรุดตัวของผิวดินเนื่องมาจากการเกิดช่องว่างในเม็ดดิน [10]

2.) ระดับน้ำใต้ดิน (Water table level) ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการทรุดตัวของผิวดิน ซึ่งระดับน้ำใต้ดินเป็นเรื่องที่น่าเป็นห่วงมากสำหรับแต่ละวิธีการที่นำมาใช้ในการก่อสร้างอุโมงค์ที่มีระดับความลึกมาจากผิวดิน การทรุดตัวที่เกิดขึ้นยังคงมีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยอื่นๆ โดยระดับน้ำใต้ดินในชั้นน้ำใต้ดินของกรุงเทพฯ ยังคงไม่ปรากฏการณ์เปลี่ยนแปลงจากปี พ.ศ. 2522 จนถึงปัจจุบันคือ อยู่ที่ประมาณ 22-24 เมตรจากผิวดิน

2.4.3 ปัจจัยการควบคุมหัวเจาะ (Shield operation factors)

1.) ความดันหน้าหัวเจาะ (Face pressure) การควบคุมปริมาณการขุดดินออกในขณะทำการก่อสร้างอุโมงค์ การลาเลียงดินจะเริ่มตันที่บริเวณส่วนหน้าของหัวเจาะด้วยเกลียวหมุนลาเลียงดิน (Screw conveyor) ในปริมาณที่เหมาะสม ถือเป็นพื้นฐานของวิธีการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อปริมาณการทรุดตัวของผิวดิน โดยสามารถพิสูจน์ได้จากข้อมูลพื้นฐานในอดีต [11]

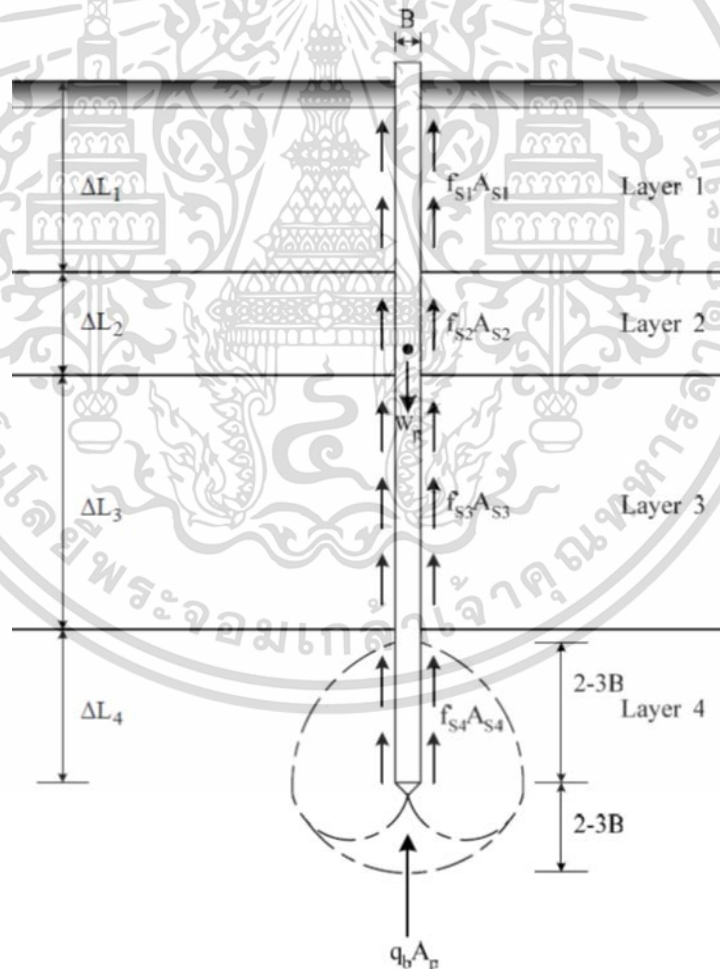
2.) ความเร็วขณะขุดเจาะ (Penetration rate) ซึ่งในการปฏิบัติงานของหัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุลจะมีการควบคุมหัวเจาะให้อัตราการลาเลียงดินมีความสัมพันธ์สอดคล้องไปกับความเร็วขณะขุดเจาะ ทำให้เกิดความไม่สมดุลกันระหว่างอัตราการลาเลียงดินและความเร็วขณะขุดเจาะ

3.) มุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะ (Pitching angle) การเปลี่ยนแนวหัวเจาะที่มีมุมก้มหรือมุมเงยของหัวเจาะที่สูง ย่อมจะทำให้เกิดช่องว่างในปริมาณมากด้านหลังอุโมงค์ ซึ่งเป็นเหตุให้ดินโดยรอบเคลื่อนตัวลงมาแทนที่ช่องว่างนั้น

4.) คุณภาพการอัดฉีดน้ำปูน (Grouting quality) ประกอบไปด้วย ความดันของการอัดฉีดน้ำปูน และเปอร์เซ็นต์การเติมน้ำปูน ในขณะที่หัวเจาะเคลื่อนตัวไปข้างหน้าจะทำให้เกิดช่องว่างบริเวณด้านหลังของหัวเจาะโดยรอบของผนังอุโมงค์ การอัดฉีดน้ำปูนบริเวณช่องว่างด้านหลังที่เกิดขึ้นจึงมีความจำเป็นเพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของดินลงมาแทนที่ช่องว่างได้

2.5 การถ่ายน้ำหนักของเสาเข็ม

เสาเข็มเดี่ยวถ่ายน้ำหนักจากโครงสร้างสู่ดินโดยผ่านความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดิน (Skin friction) และแรงแบกทานที่ปลายเข็ม (End bearing) ความเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดินคือผลรวมของแรงเสียดทานอันเกิดจากแรงยึดเกาะ (Adhesion) ระหว่างเสาเข็มและดินตลอดความยาวเสาเข็ม ส่วนแรงแบกทานที่ปลายเข็ม คือกำลังรับแรงแบกทานของดินที่ปลายเข็ม ดังรูปที่ 2.9 เสาเข็มในชั้นดินเหนียวส่วนมากจะเป็นเสาเข็มเสียดทาน ซึ่งรับน้ำหนักบรรทุกโดยแรงเสียดทานรอบเสาเข็มเป็นส่วนใหญ่ เพื่อความสะดวกในการออกแบบ (ไม่ต้องพิจารณาความดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นขณะรับน้ำหนักบรรทุก) ซึ่งมักจะคำนวณน้ำหนักบรรทุกประลัยจากกำลังต้านทานแรงเฉือนรวม (Total shear strength analysis) แม้ว่าการคำนวณโดยใช้กำลังต้านทานแรงเฉือนประสิทธิผลจะให้ความละเอียดถูกต้องมากกว่า



รูปที่ 2.9 การถ่ายน้ำหนักของเสาเข็มเดี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (Failure load, Q_f) ของเสาเข็มคำนวณได้จากผลรวมของแรงต้านเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างเสาเข็มและดินเหนียว (Q_f) และแรงต้านทานที่ปลายเข็ม (Q_b) ดังสมการที่ 2.1

$$Q_f = Q_s + Q_b \quad (2.1)$$

$$Q_f = \frac{P_s + P_b}{2.5} \quad (2.2)$$

โดย $P_s = 0.45 S_u A_s$

$$P_b = 9w S_u A_b$$

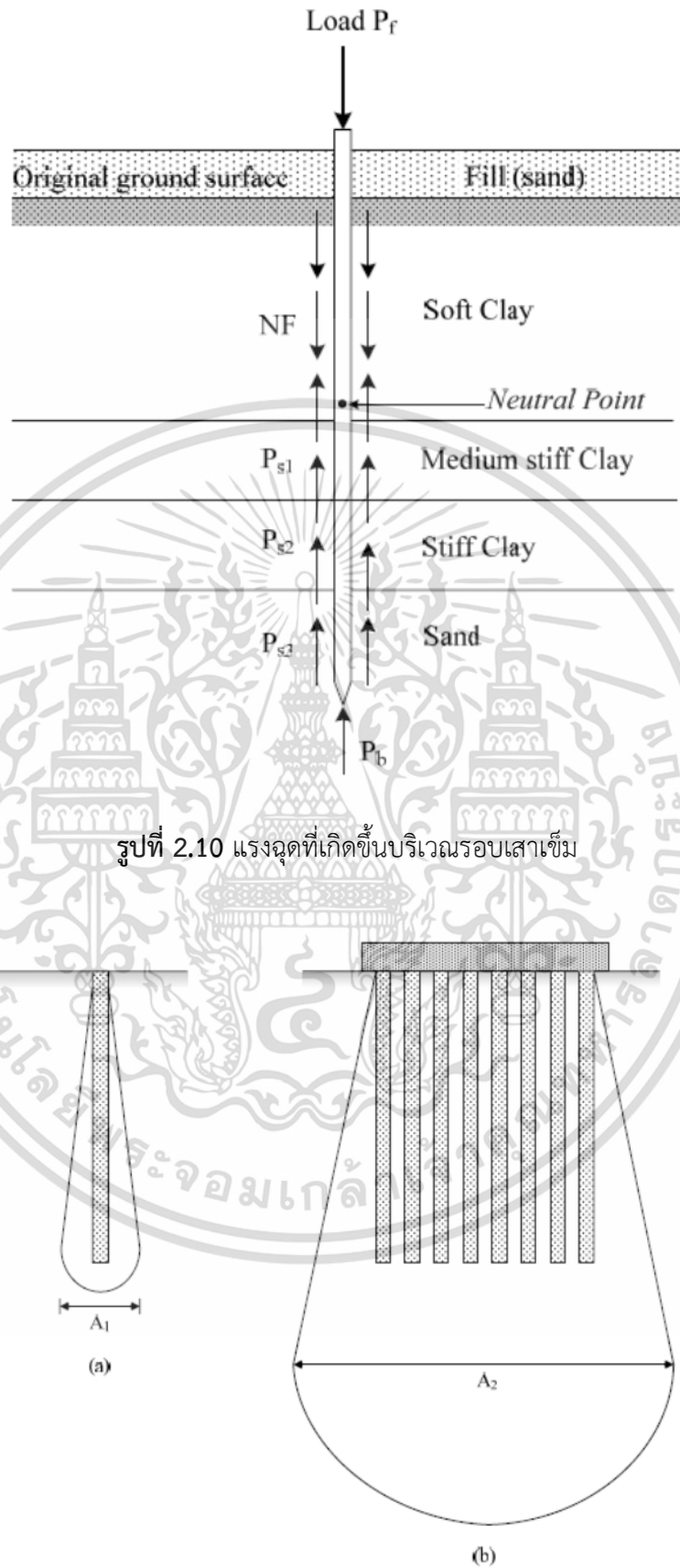
สำหรับเสาเข็มเจาะใช้ค่า factor ยึดเกาะ (Adhesion factor) = 0.45 และเสนอสมการคำนวณ น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยไว้ดังสมการที่ 2.2 เมื่อ w คือตัวคูณปรับลดกำลัง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.8 และ 0.75 สำหรับ เสาเข็มที่มีขนาดเล็กกว่าและใหญ่กว่า 1.0 เมตร ตามลำดับ น้ำหนักบรรทุกยอมให้ นำไปใช้ในการวิเคราะห์ใน การศึกษานี้ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Q_f = \frac{Q_s + Q_b}{2.5} \quad (2.3)$$

เมื่อกำหนดให้ FS คืออัตราส่วนปลอดภัยรวม ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 2.0 ถึง 2.5

แรงกดลงของเสาเข็ม คือแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างมวลดินกับเสาเข็ม อันเป็นผลจากการที่ดินบริเวณรอบเสาเข็มเกิดการเคลื่อนตัวมากกว่าการทรุดตัวของเสาเข็ม สภาพที่ทำให้เกิดแรงกดลง คือ ปลาย เสาเข็มวางตัวในชั้นที่มีการทรุดตัวน้อยและมีชั้นดินอัดตัวสูง (Highly compressive soil) เช่น ดินเหนียวอ่อนวางตัวอยู่ด้านบนแรงกดลงจะเกิดในชั้นดินเหนียวอ่อนตั้งแต่หัวเสาเข็มจนถึงจุดสะเทิน (Neutral point) ซึ่ง เป็นจุดที่การเคลื่อนตัวของมวลดินกับเสาเข็มประมาณเท่ากัน ดังรูป 2.10

น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของฐานรากเสาเข็มไม่จำเป็นต้องเท่ากับผลรวมของน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของเสาเข็มแต่ละต้นเสมอไป เนื่องจากกระเปาะความเค้นของเสาเข็มหนึ่งต้นและเสาเข็มกลุ่มมีความแตกต่างกัน ดังรูป 2.11 การทรุดตัวแบบทันที (Immediate settlement) จะเกิดขึ้นขณะก่อสร้าง และระหว่างการก่อสร้าง จึงไม่มีผลมากนักต่อโครงสร้างในระยะยาว ส่วนการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำทุติยภูมิ (Secondary settlement) ที่เกิดขึ้นมีผลน้อยมาก เมื่อเทียบกับการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำปฐมภูมิในชั้นดิน (Consolidation settlement) ดังนั้น การทรุดตัวที่มีผลต่อโครงสร้างมากที่สุดคือการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำปฐมภูมิในชั้นดิน



รูปที่ 2.10 แรงจุดที่เกิดขึ้นบริเวณรอบเสาเข็ม

รูปที่ 2.11 กระจายความเค้นของเข็มต้นเดียวและเสาเข็มกลุ่ม

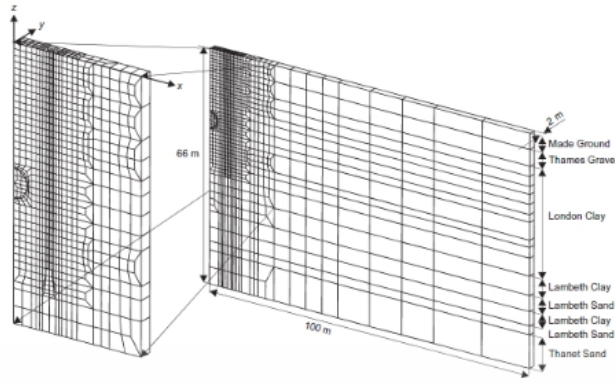
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุโมงค์และเสาเข็ม

Mroueh และ Shahrour(2002)[12] ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติในการวิเคราะห์ผลกระทบจากการขุดเจาะอุโมงค์ต่อเสาเข็มข้างเคียงโดยพิจารณาทั้งผลกระทบต่อเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มจากผลการวิเคราะห์พบว่าผลกระทบจากการขุดเจาะอุโมงค์ส่งผลกระทบต่อเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มภายในของเสาเข็มโดยเฉพาะเมื่อเสาเข็มวางตัวใกล้กับอุโมงค์การกระจายของแรงจากการขุดเจาะอุโมงค์จะส่งผลกระทบต่อแรงภายในผนังอุโมงค์มากขึ้นเพียงใดขึ้นอยู่กับระยะห่างของระดับปลายเสาเข็มกับอุโมงค์หากระดับปลายเสาเข็มวางตัวต่ำกว่าส่วนท้องของอุโมงค์ก็จะยิ่งส่งผลกระทบต่อเสาเข็มมากสำหรับปฏิสัมพันธ์ระหว่างการขุดเจาะอุโมงค์และเสาเข็มกลุ่มพบว่าเสาเข็มแถวหน้าของกลุ่มจะได้รับอิทธิพลจากการขุดเจาะมากที่สุดโดยแรงภายในสูงสุดที่เกิดขึ้นกับเสาเข็มแถวหน้าจะมีค่ามากกว่าเสาเข็มแถวหลังของกลุ่มเป็นจำนวนมาก

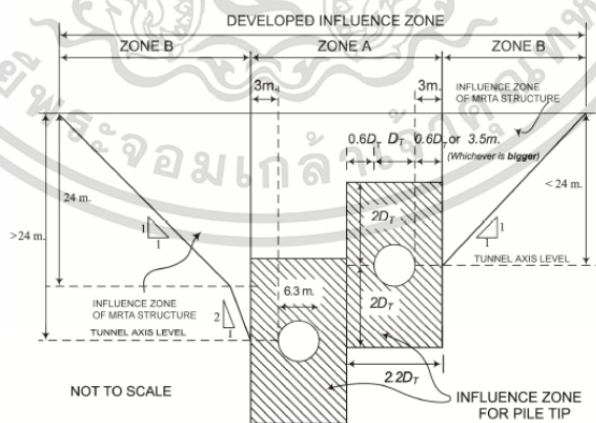
Schroeder et al.(2004)[1] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากขอบผนังอุโมงค์ถึงขอบของเสาเข็ม (clearance) และค่าการเสีรูปของอุโมงค์สูงสุดที่ยอมรับได้โดยประเมินอิทธิพลจากน้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับเสาเข็มแถวต่ออุโมงค์นครลอนดอนประเทศอังกฤษด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติในการจำลองได้แบ่งกรณีศึกษาเป็น 2 กรณีกรณีที่ 1 กำหนดให้เสาเข็มวางตัวอยู่ห่าง 2 ด้านของอุโมงค์กรณีที่ 2 กำหนดให้เสาเข็มวางตัวทางด้านขวาของอุโมงค์เพียงด้านเดียวโดยทั้ง 2 กรณีศึกษาได้จำลองให้ขอบเสาเข็มวางตัวห่างจากของอุโมงค์ (clearance) ที่ระยะต่าง ๆ 4 ระยะจากผลการวิเคราะห์พบว่าอุโมงค์จะเกิดการบิดตัวเมื่อมีเสาเข็มวางตัวอยู่เพียงด้านเดียวซึ่งการบิดตัวการเคลื่อนตัวและการเสีรูปของอุโมงค์เพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะ clearance ลดน้อยลงและ ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้กล่าวถึงงานวิจัยของตัวเองในปี 2002 ที่ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติในการวิเคราะห์ผลกระทบของเสาเข็มแถวต่ออุโมงค์โดยได้มองเสาเข็มแถวเป็นกำแพงและมีการแปลงค่าYoung's Modulus of Concreteจากเสาเข็มเพื่อใช้สำหรับกำแพงซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4 และในงานวิจัยยังได้นำผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 2 มิติเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการจำลองแบบ 3 มิติด้วยแบบจำลองชิ้นส่วนสมมาตรแบบครึ่งเดียวดังรูปที่ 2.12 พบว่าค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของอุโมงค์จากการวิเคราะห์แบบ 2 มิติมีค่าใกล้เคียงกับแบบ 3 มิติ

$$E_{pile} \left(\frac{\pi D_{pile}^2}{4} \right) = E_{wall} t_{wall} \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.12 แบบจำลองที่ Schroeder et al.ใช้ในการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ

Lueprasert et al.(2015)[3] ศึกษาผลกระทบของเสาเข็มรับน้ำหนักบรรทุกต่ออุโมงค์ที่มีอยู่เดิมด้วยวิธีไฟโวลูเมนต์แบบ 3 มิติโดยศึกษาผลกระทบจากทั้งเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มแถวและสร้างโซนอิทธิพลขึ้นจากผลกระทบที่ได้รับจากเสาเข็มโดยจำลองให้อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดิน 4 ลักษณะ กำหนดให้ขอบของเสาเข็มวางตัวห่างจากขอบอุโมงค์ (clearance) เป็น 4 ระยะและมีการจำลองให้ปลายเสาเข็มวางตัวอยู่ที่ระดับความลึกต่าง ๆ จากการศึกษพบว่าตำแหน่งของปลายเสาเข็มและชนิดของดินที่อุโมงค์วางตัวอยู่เป็นปัจจัยสำคัญต่อการเสีรูปของอุโมงค์ที่มีอยู่เดิมส่งผลให้ได้รับโซนอิทธิพลในแนวตั้งที่แตกต่างกันเมื่ออุโมงค์วางตัวในชั้นดินลักษณะต่าง ๆ แต่ในท้ายสุดได้แนะนำโซนที่ปลอดภัยที่สุดคือปลายเสาเข็มควรวางตัวเหนือและใต้ระดับแนวแกนอุโมงค์ 2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โซนอิทธิพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ทฤษฎีการวิเคราะห์โดย Finite Element 3D

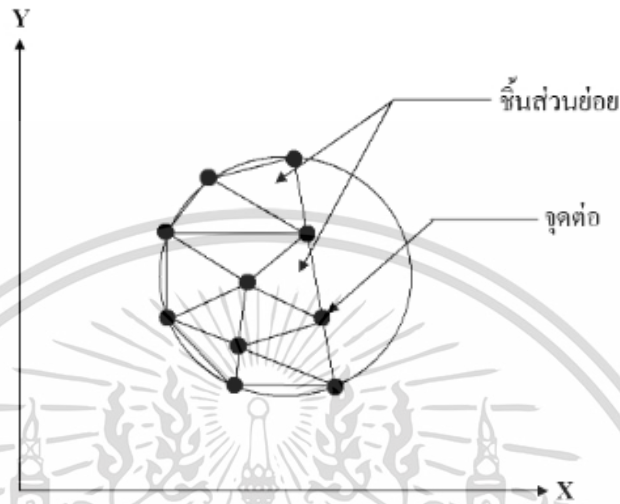
ในปัจจุบันการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์งานด้านโครงสร้างต่าง ๆ และงานทางธรณีวิทยาอย่างแพร่หลายเพราะใช้งานง่ายและสะดวกกว่าวิธีการอื่น อีกทั้งสามารถใช้ในงานที่สภาพทางธรณีวิทยาซับซ้อนเช่นการออกแบบอุโมงค์ที่วางตัวอยู่ในชั้นดินผสมหรืออุโมงค์ที่ก่อสร้างในตำแหน่งที่ใกล้กับปัญหาความสัมพันธ์ระหว่างดินและผนังอุโมงค์ (Soil-structure interaction) ปัญหาผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียงบนผิวดินและใต้ดินเช่นอาคารที่มีความสำคัญทางประวัติศาสตร์โบราณสถานวัดหรือสถานที่ที่มีความสำคัญโดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีหลักการคือแบ่งโครงสร้างที่จะทำการวิเคราะห์ออกเป็นชิ้นส่วน (Element) เล็ก ๆ โดยจุดที่ชิ้นส่วนมาบรรจบกันเรียกว่าจุดต่อ (Node) หากกำหนดตำแหน่งต่าง ๆ ของชิ้นส่วนจะสามารถหาความเครียดได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของชิ้นส่วนกับแรงที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนนั้น ความสัมพันธ์ดังกล่าวอยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ (Matrix) เช่นเดียวกันจะสามารถหาความเครียดได้หากทราบค่าการเคลื่อนตัวที่จุดนั้นและสามารถหาความเค้นได้จากความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีรูปร่างชิ้นส่วน (Geometric shape of element) หลายชนิดแต่รูปร่างที่ง่ายต่อการวิเคราะห์คือชิ้นส่วนในมิติเดียวและชิ้นส่วนรูปสามเหลี่ยมเช่นการวิเคราะห์ความเค้นในแต่ละระนาบถ้าใช้ชิ้นส่วนสามเหลี่ยมจะวิเคราะห์ได้ง่ายกว่าชิ้นส่วนอื่นการวิเคราะห์โครงสร้างทางธรณีวิทยาในงานอุโมงค์นั้นนิยมใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์หาค่าแรงที่กระทำต่อผนังอุโมงค์ค่าการเสียรูปของผนังอุโมงค์เสถียรภาพของดินโดยรอบอุโมงค์ขอบเขตและแนวการเคลื่อนตัวของดินทั้งใน 2 มิติและ 3 มิติที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์ผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียงทั้งบนผิวดินและใต้ดินที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์ผลกระทบต่อเครื่องขุดเจาะอุโมงค์และผลกระทบที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์ที่สองเป็นต้น

2.7.1 วิธีการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ปัญหาทางธรณีเทคนิคโดยใช้หลักการของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการวิเคราะห์โดยทำการแบ่งโครงสร้างออกเป็นชิ้นส่วนเล็ก ๆ จำนวนหนึ่งซึ่งชิ้นส่วนเล็ก ๆ นี้เรียกว่าชิ้นส่วนย่อย (Element) และชิ้นส่วนย่อยเหล่านี้เชื่อมติดกันด้วยจุดที่เรียกว่าจุดต่อ (Node) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.15 หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของแต่ละชิ้นส่วนย่อยแล้วนำชิ้นส่วนย่อยทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์รวมอีกครั้งเป็นการวิเคราะห์โครงสร้างทั้งหมดสำหรับการเคลื่อนที่หรือการเสียรูปของแต่ละชิ้นส่วนย่อยจะพิจารณาว่าเป็นผลที่เกิดจากการเคลื่อนที่หรือการเสียรูปของจุดต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของชิ้นส่วนย่อยนั้น ๆ ซึ่งลักษณะการเคลื่อนที่แบบนี้สามารถแทนได้ด้วยฟังก์ชันการเสียรูป (Displacement function) และจากผลของแรงภายนอกรวมทั้งคุณสมบัติของชิ้นส่วนย่อยทำให้สามารถหาค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างได้



รูปที่ 2.14 การแบ่งโครงสร้างออกเป็นชิ้นส่วนเล็ก ๆ

2.8 พฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาว

Liao et al.(2008)[4] ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติศึกษาพฤติกรรมของแรงภายในผนังอุโมงค์ตามแนวยาว (longitudinal) ของอุโมงค์โดยศึกษาจากหน้าตัดตามขวาง (cross section) ของผนังอุโมงค์ประเด็นที่ Liao et al. ศึกษาได้แก่ผลกระทบของ ground stiffness ต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์และโมเมนต์ตัดภายในผนังอุโมงค์ผลกระทบของ bending stiffness และ shear stiffness ที่มีต่อค่าโมเมนต์ตัดภายในผนังอุโมงค์จากผลการวิเคราะห์พบว่าการออกแบบผนังอุโมงค์ควรลดค่า bending stiffness แต่เพิ่มค่า shear stiffness เพื่อลดแรงที่เพิ่มขึ้นภายในผนังอุโมงค์และเพื่อเพิ่มความมีเสถียรภาพของอุโมงค์ในแนวยาว (longitudinal) ภายใต้การทรุดตัวที่แตกต่างกันของผิวดิน

Wu et al.(2015)[5] ได้เสนอแบบจำลองโครงสร้างอุโมงค์ในแนวยาวโดยพิจารณา shearing dislocation ระหว่างรอยต่อของชิ้นส่วนประกอบอุโมงค์เน้นศึกษาอิทธิพลของ shear stiffness ต่อรอยต่อของอุโมงค์รวมถึงแรงภายในผนังอุโมงค์ทั้งแรงเฉือนและโมเมนต์ตัดได้สร้างแบบจำลองอย่างง่ายด้วยทฤษฎีของ Timoshenko beam เป็นอุโมงค์ที่วางตัวในชั้นดินอ่อนของประเทศจีนที่ขุดเจาะ

โดยใช้หัวเจาะแบบปรับความดันดินสมดุล (EPB) อุโมงค์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

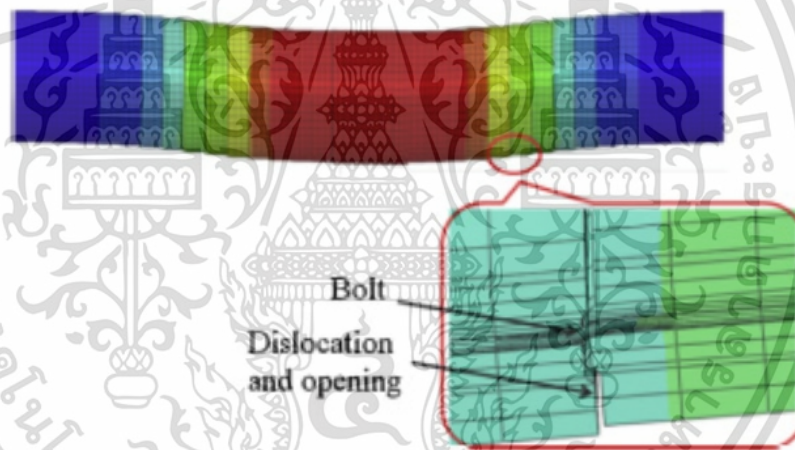
ภายในเป็น 6.2 และ 5.5 เมตรตามลำดับชั้นส่วนประกอบมีขนาดความกว้าง 1 เมตร[5]ได้บรรยายไว้ว่ารอยต่อระหว่างชั้นส่วนประกอบเป็นส่วนที่อันตรายต่อโครงสร้างอุโมงค์มากที่สุดและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของรอยต่อในแนว circumferential ระหว่างชั้นส่วนประกอบเป็นปัจจัยหลักในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอุโมงค์ในแนวยาว (longitudinal) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอุโมงค์ในแนวยาวสามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบ (ดังรูปที่ 2.16) คือ 1.Bending mode เนื่องจากชั้นส่วนประกอบเกิดการหมุนรอบจุดศูนย์กลางของแนวโค้งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอุโมงค์ทำให้เกิดแรงอัดภายในคอนกรีตชั้นฝั่งหนึ่งส่งผลให้อีกฝั่งเกิดช่องว่างระหว่างรอยต่อ(opening of the joints) และแรงดึงที่สลัก (tension of bolts) 2.Dislocation mode เกิดจากการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นส่วนประกอบส่งผลให้อุโมงค์เกิดการเคลื่อนตัวที่แตกต่างกันการเสียรูปทั้ง 2 รูปแบบสัมพันธ์กับการเสียรูปแบบโค้งเนื่องจากโมเมนต์ดัดและการเปลี่ยนแปลงของแรงเฉือนจากการส่งผ่านของน้ำหนักบรรทุกทุกทิศทางตามแนวยาวจากผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อ shear stiffness ลดลงทำให้องศาการหมุนของอุโมงค์และช่องว่างระหว่างรอยต่อลดลงแต่การเคลื่อนตัวระหว่างรอยต่อเพิ่มขึ้นในส่วนของแรงภายในผนังอุโมงค์มีค่าลดลงเมื่อ shear stiffness ลดน้อยลงและมีค่าเป็นศูนย์เมื่อ shear stiffness เท่ากับ 0.01



รูปที่ 2.15 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอุโมงค์ในแนวยาว

Wang et al.(2014)[13] ได้จำลองกลไกการพังของรอยต่อชั้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์และสลักในแนวยาวภายใต้การทรุดตัวที่แตกต่างกันของดินในแนวยาวด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้มีการสร้างวงผนังอุโมงค์และสลักในแบบจำลองน้ำหนักรรทุกที่กระทำต่ออุโมงค์ได้แบ่งเป็น 2 ส่วนคือความดันดินรอบอุโมงค์หลังจากการก่อสร้างและ displacement load จากค่าตรวจวัดจริงของการทรุดตัวที่แตกต่างกันตามแนวยาวของดินมีการพิจารณาปฏิกริยาระหว่างเดือผนังอุโมงค์สลักและรูใส่สลักจากผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการเสีรฐระหว่างรอยต่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์ในแนว circumferential joints ประกอบด้วยช่องว่างระหว่างรอยต่อ (opening) และการเคลื่อนตัวระหว่างรอยต่อ (dislocation) ดังรูปที่ 2.17 ซึ่งการเคลื่อนตัวระหว่างรอยต่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์จะเกิดขึ้นที่ส่วนยอดและท้องของอุโมงค์เมื่อมีการทรุดตัวที่แตกต่างกันเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเค้นในสลักเข้าใกล้ค่าความเค้นสูงสุดจะเกิดการพังภายใต้แรงดึงและสลักที่ส่วนยอดและส่วนท้องของอุโมงค์จะพังก่อนเนื่องจากเกิดแรงดึงสูงสุดในส่วนของการเสีรฐของผนังอุโมงค์เกิดขึ้นสูงสุดบริเวณจุดศูนย์กลางของแบบจำลอง



รูปที่ 2.16 การเสีรฐระหว่างรอยต่อของชิ้นส่วนประกอบผนังอุโมงค์

บทที่ 3

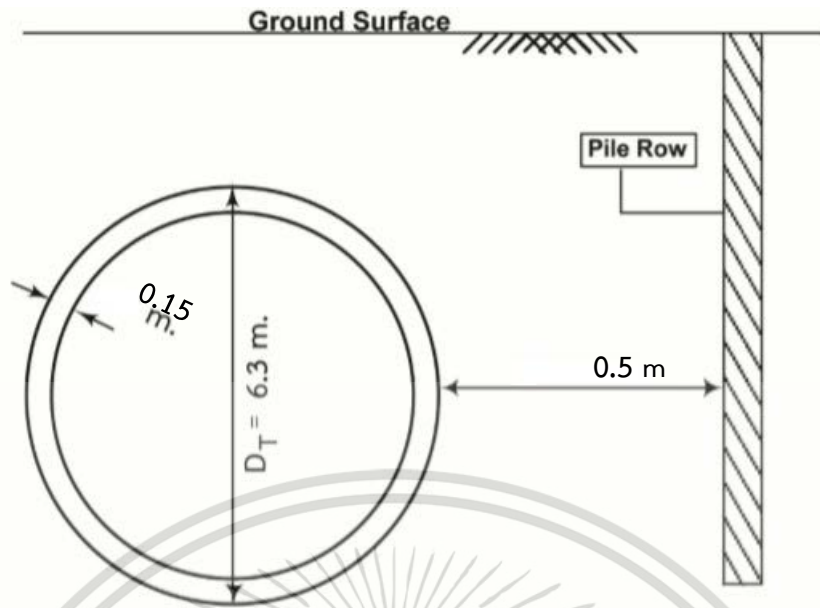
วิธีการวิเคราะห์

3.1 กล่าวนำ

บทนี้บรรยายถึงวิธีการวิเคราะห์อิทธิพลของเสาเข็มแถวที่มีต่ออุโมงค์ที่มีอยู่เดิมโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม PLAXIS 3D เวอร์ชัน 2013.1 ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนที่ 1 อธิบายถึงลักษณะการศึกษาที่พิจารณาซึ่งประกอบด้วย ลักษณะอุโมงค์ที่ใช้ในการจำลอง รูปแบบชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ ตำแหน่งการวางตัวของเสาเข็มในแบบจำลอง ส่วนที่ 2 กล่าวถึงการศึกษาพฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาว (longitudinal axis) ซึ่งเป็นการศึกษาค่าการเคลื่อนตัวในแนวยาว ตำแหน่งต่าง ๆ ในแนวยาวของอุโมงค์ และส่วนที่ 3 บรรยายถึงการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ประกอบด้วยลักษณะแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา คุณสมบัติของแบบจำลอง ทั้งคุณสมบัติของชั้นดินแต่ละชั้น คุณสมบัติของเสาเข็มเจาะ และผนังอุโมงค์ ขอบเขตแบบจำลองและเงื่อนไขเริ่มต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์ ขั้นตอนการวิเคราะห์ และวิธีการประเมินผลต่าง ๆ ได้แก่ การวิเคราะห์ตำแหน่งจุดตัดกลับอุโมงค์ (Infection point) การเสียรูปของผนังอุโมงค์และแรงภายในอุโมงค์ตำแหน่งต่าง ๆ

3.2 ลักษณะศึกษาที่พิจารณา

งานวิจัยนี้ใช้สภาพทางธรณีวิทยาจากโครงการอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย (The Mass Rapid Transit Authority Blue Line extension project, MRTA) ดังรูปที่ 3.5 เป็นกรณีศึกษา โดยความหนาผนังอุโมงค์เท่ากับ 0.15 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ภายในและภายนอก เท่ากับ 6 เมตร และ 6.3 เมตร ตามลำดับ วางตัวอยู่ที่ระดับความลึกคงที่ 19 เมตรจากระดับผิวดิน ดังรูปที่ 3.1



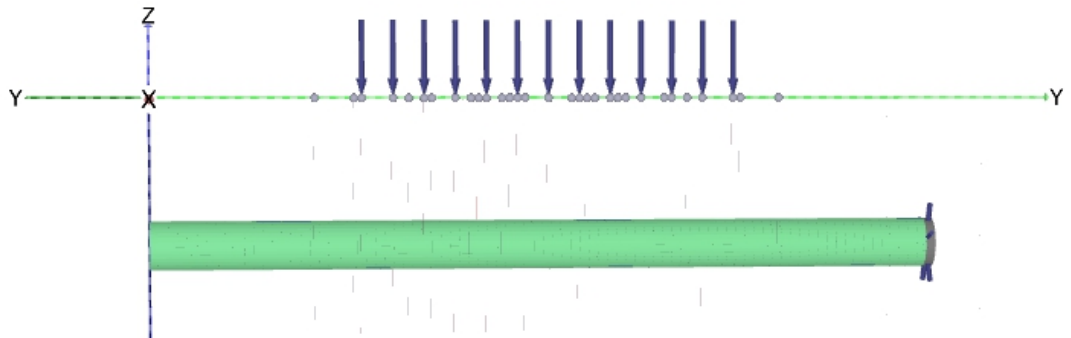
รูปที่ 3.1 ลักษณะอุโมงค์ที่ใช้ในการจำลอง

โดยกรณีศึกษาจะกำหนด ระยะห่างระหว่างอุโมงค์กับเสาเข็ม(Clearance) เป็น 0.5 เมตร และมี ระยะห่างระหว่างเสาเข็มภายในแถว(Spacing) ที่ 3D 4D และ 5D ตามลำดับ โดยที่เสาเข็มจะรับแรง 2100 kN ตั้งอยู่บนชั้นทราย ลึกลงไปจากผิวดิน 30 เมตร จำนวน 13 ต้น ดังรูปที่ 3.2, 3.3 และ 3.4



รูปที่ 3.2 กรณีศึกษาที่ 1 ระยะห่างระหว่างเสาเข็มภายในแถวเท่ากับ 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง(Spacing 3D)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

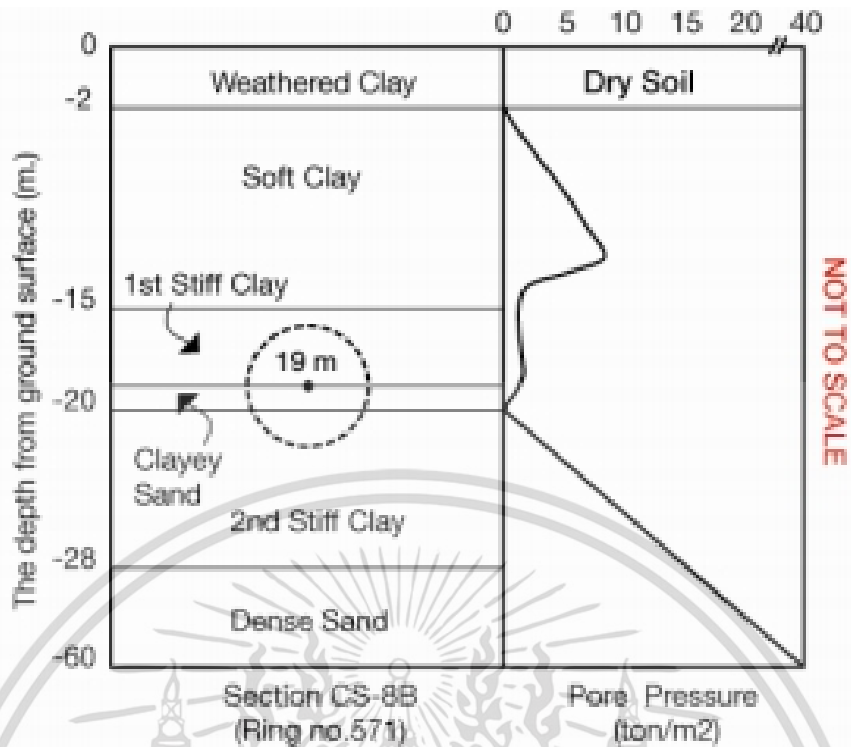


รูปที่ 3.3 กรณีศึกษาที่ 2 ระยะห่างระหว่างเสาเข็มภายในแถวเท่ากับ 4 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Spacing 4D)



รูปที่ 3.4 กรณีศึกษาที่ 3 ระยะห่างระหว่างเสาเข็มภายในแถวเท่ากับ 5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Spacing 5D)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 อุโมงค์ในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงิน (MRTA)

3.3 การศึกษาพฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาว (longitudinal)

3.3.1 การเสีรูปร่างของผนังอุโมงค์ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ เนื่องจากการทรุดตัวของดิน

การศึกษาการเสีรูปร่างของผนังอุโมงค์ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ เนื่องจากการทรุดตัวของดินเนื่องจากผลกระทบจากเสาเข็มแถว กำหนดให้เสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เมตรจำนวน 13 ต้น วางตัวห่างจากขอบผนังอุโมงค์ถึงขอบของเสาเข็ม (clearance) เป็นระยะ 0.5 เมตร มีระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว (spacing) เป็น 3.4 และ 5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มโดยจำลองเหมือนอุโมงค์ในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงิน (MRTA) และศึกษาขณะที่อุโมงค์เกิดการทรุดตัวมากที่สุด

3.3.2 แรงตามแกนภายในผนังอุโมงค์

การศึกษาแรงตามแกนภายในผนังอุโมงค์ ใช้แบบจำลองเดียวกับหัวข้อ 3.4.1 โดยจะแสดงผลในเทอมของค่าการเปลี่ยนแปลงแรงตามแกนภายในผนังอุโมงค์ทั้งในแนวระนาบ (circumferential axial force) และการเปลี่ยนแปลงแรงตามแกนภายในผนังอุโมงค์ทั้งในแนวยาว (longitudinal axial force)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

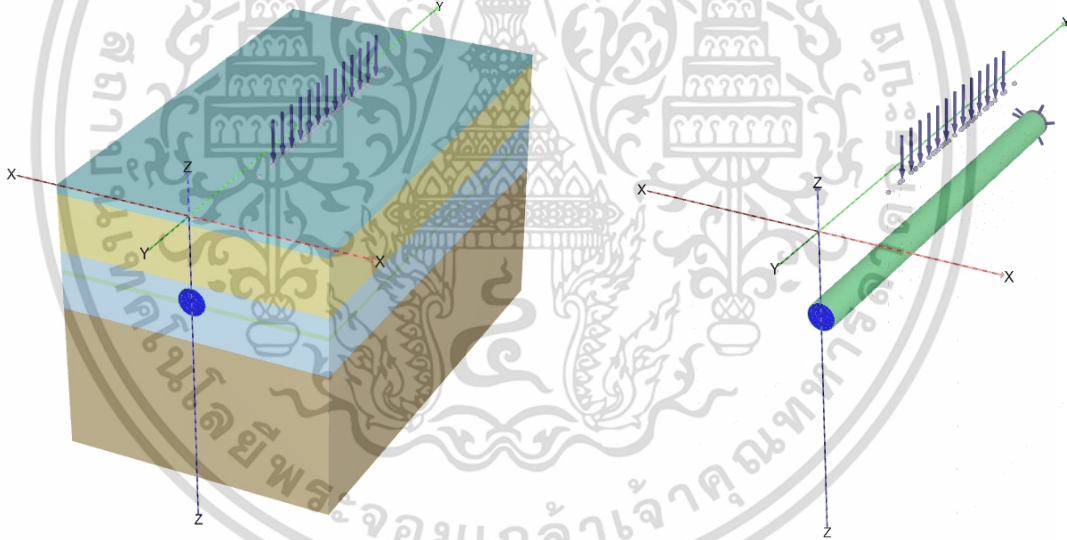
3.3.3 โมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์

การศึกษาโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์ ใช้แบบจำลองเดียวกับหัวข้อ 3.4.1 เช่นเดียวกัน โดยจะแสดงผลในเทอมของค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์ในแนวยาว (longitudinal bending moment)

3.4 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.4.1 ลักษณะแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา (โครงข่ายแบบจำลอง)

ลักษณะโครงข่าย (mesh) ของแบบจำลอง มีขนาดความกว้าง 60 เมตร ความยาว 102 เมตร และความลึก 60 เมตร เสาค้ำเชื่อมแฉววางตัว ด้านขวามือของอุโมงค์ที่ spacing ต่าง ๆ และกำหนดรูปแบบการวิเคราะห์เป็นแบบไม่ระบายน้ำ (undrained analysis) ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ลักษณะแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ

3.4.2 คุณสมบัติแบบจำลอง

คุณสมบัติชั้นดินกรุงเทพฯที่ใช้ในการจำลองได้รับการตรวจสอบกับข้อมูลการตรวจวัดจริงจากการศึกษาการขุดเจาะอุโมงค์และการขุดดินลึก[22]ในอดีต ดังแสดงในตารางที่ 3.1 แบบจำลองชั้นดินกำหนดให้มีคุณสมบัติแบบ Mohr Coulomb(MC) และ Hardening soil Model(HS) ในส่วนของผนังอุโมงค์และเสาค้ำ กำหนดให้มีคุณสมบัติแบบ linear elastic ดังตารางที่ 3.2 โดยในงานวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผนังอุโมงค์ใช้แบบจำลอง แบบ shell element ส่วนเสาเข็มเจาะและชั้นดินใช้การจำลองแบบ solid element

Soil layer	Wea. crust	Soft clay	Stiff clay	Sand
Material model	MC	Hardening Soil Model (HS)	Hardening Soil Model (HS)	MC
E'	6,000	-	-	80,000
E_{oed}^{ref}	-	5,000	60,000	-
E_{50}^{ref}	-	5,000	60,000	-
E_{ur}^{ref}	-	15,000	180,000	-
γ_{sat}	17	16	18	20
ϑ'	0.32	0.33	0.33	0.3
ϕ'	22	22	22	36
C	8	5	18	0
m	-	1	1	-
P_{ref}	-	100	95	-

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติชั้นดิน

EPB Element	Yong modulus [E] (kN/m ²)	Poisson's ratio [ν]	Unit weight [γ] (kN/m ³)
Tunnel lining	31x10 ⁶	0.2	24
EPB shield	210x10 ⁶	0.28	78
Grouting layer	1x10 ⁶	0.3	21

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของผนังอุโมงค์และเสาเข็มเจาะ

3.4.3 ขอบเขตแบบจำลองการวิเคราะห์และเงื่อนไขเริ่มต้น

ขอบเขตแบบจำลอง

สภาวะขอบเขตของแบบจำลอง (boundary condition) ได้กำหนดให้ด้านข้างของแบบจำลองสามารถเคลื่อนตัวในแนวตั้งได้แต่ไม่ยอมให้เกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบ ส่วนด้านล่างของแบบจำลองไม่ยอมให้เกิดการเคลื่อนตัวทั้งในแนวตั้งและแนวราบ และสำหรับด้านบนกำหนดให้มีการเคลื่อนตัวแบบอิสระ

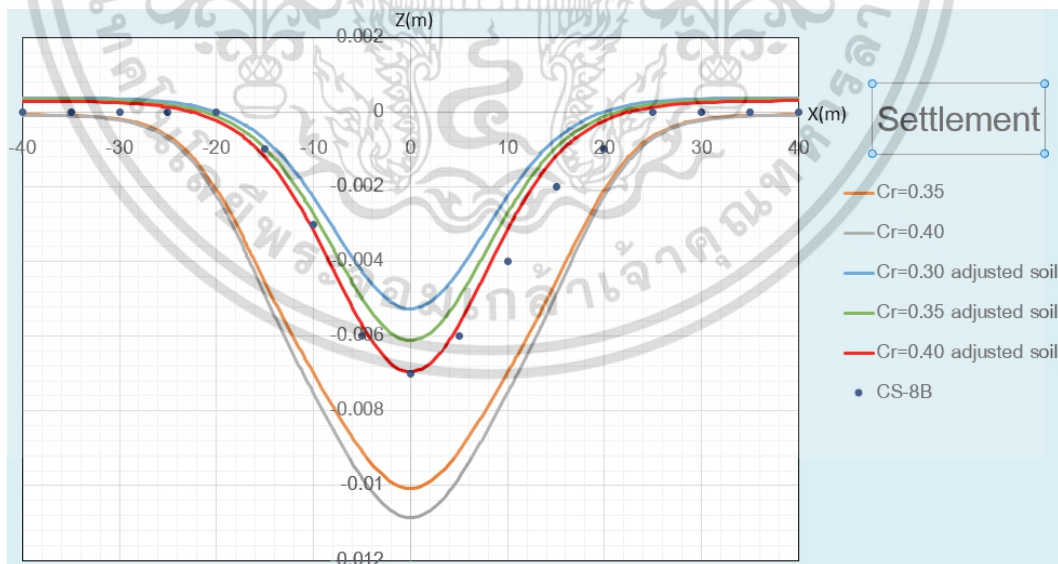
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เงื่อนไขเริ่มต้น

ในการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น การกระจายของความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่งและแนวราบขึ้นอยู่กับหน่วยน้ำหนักของดินและสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง (k_0) ของแต่ละชั้นดิน ซึ่งหน่วยน้ำหนักดิน และ k_0 ของแต่ละชั้นดินได้มาจากโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงิน (MRT) [23]

3.4.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์

การวิเคราะห์แบ่งเป็นสองขั้นตอน เริ่มจากการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์โดยวิธีที่ปรับปรุงจากคู่มือของซอฟต์แวร์ทางคอมพิวเตอร์ (PLAXIS 3D เวอร์ชัน 2013.1) ที่เสนอโดย Lueprasert et al. (2016) [24] เมื่อทำการตรวจสอบค่าการเคลื่อนตัวของผิวดินเปรียบเทียบกับผล (Calibrate) ตรวจสอบจากโครงการ MRTA ดังรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าค่าการเคลื่อนตัวของผิวดินมีค่าใกล้เคียงกับ ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด (MRTA monitoring data) ขั้นตอนที่สอง วิเคราะห์เสาะเข็มรับแรงกระทำ ที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็มต่าง ๆ โดยน้ำหนักบรรทุกทุกพลอดภัยที่เสาเข็มเจาะรับได้คำนวณตามวิธี α -method [18] โดยไม่คำนึงถึงขั้นตอนการก่อสร้าง และวิเคราะห์การทรุดตัวในแนวยาว เพื่อหาจุดตัดกลับ (Infection point)



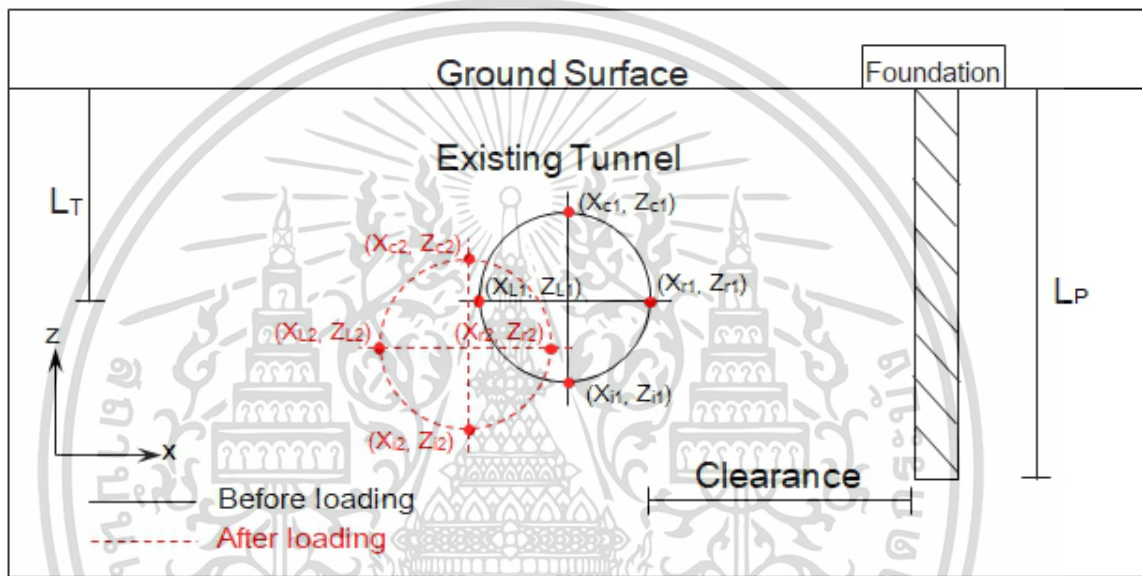
รูปที่ 3.7 กราฟการเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของผิวดินที่ได้จากโครงการ MRTA กับ 3D-FEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.5 การประเมินผล

การเสีयरูปของผนังอุโมงค์

การวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดอุโมงค์($\Delta\phi$) จะไม่คำนึงถึงการเคลื่อนตัวของผนังอุโมงค์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการก่อสร้าง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 3.8 โดยจะทำการวิเคราะห์ผนังอุโมงค์ ณ ตำแหน่ง monitoring plane และตำแหน่งต่าง ๆ ในแนวยาวของอุโมงค์ดังรูปที่ 3.9, 3.10 และ 3.11



รูปที่ 3.8 วิธีการคำนวณการเสีयरูปของผนังอุโมงค์

- เมื่อ L_p = ความยาวเสาเข็ม
- L_T = ความลึกเสาเข็ม
- U_{cz} = ค่าการเสีयरูปของส่วนบนผนังอุโมงค์
- U_{iz} = ค่าการเสีयरูปของส่วนท้องผนังอุโมงค์
- U_{rz} = ค่าการเสีयरูปของส่วนด้านขวาผนังอุโมงค์
- U_{Lz} = ค่าการเสีयरูปของส่วนด้านซ้ายผนังอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $U_{cz} = Z_{c2} - Z_{c1}$

$$U_{iz} = Z_{i2} - Z_{i1}$$

$$U_{rz} = Z_{r2} - Z_{r1}$$

$$U_{Lz} = Z_{L2} - Z_{L1}$$

โดยที่ Z_{c1} = พิกัดแกนตั้งของส่วนยอดอุโมงค์ก่อนรับแรงกระทำ

Z_{c2} = พิกัดแกนตั้งของส่วนยอดอุโมงค์หลังรับแรงกระทำ

Z_{i1} = พิกัดแกนตั้งของส่วนท้องอุโมงค์ก่อนรับแรงกระทำ

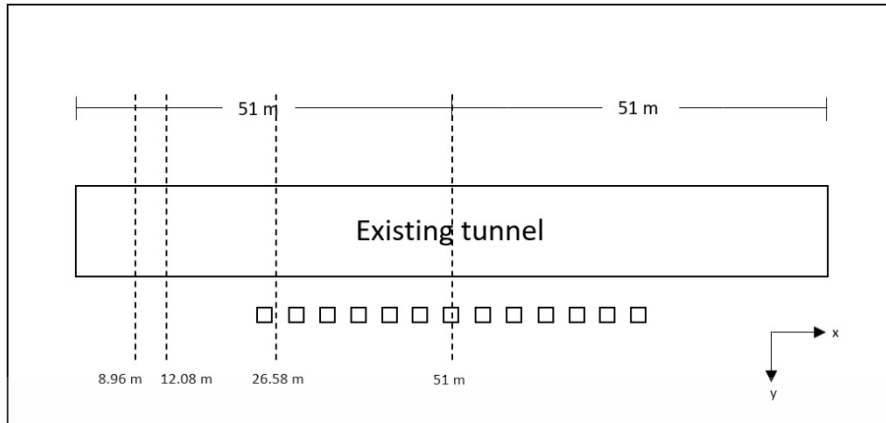
Z_{i2} = พิกัดแกนตั้งของส่วนท้องอุโมงค์หลังรับแรงกระทำ

Z_{r1} = พิกัดแกนตั้งของส่วนด้านขวาอุโมงค์ก่อนรับแรงกระทำ

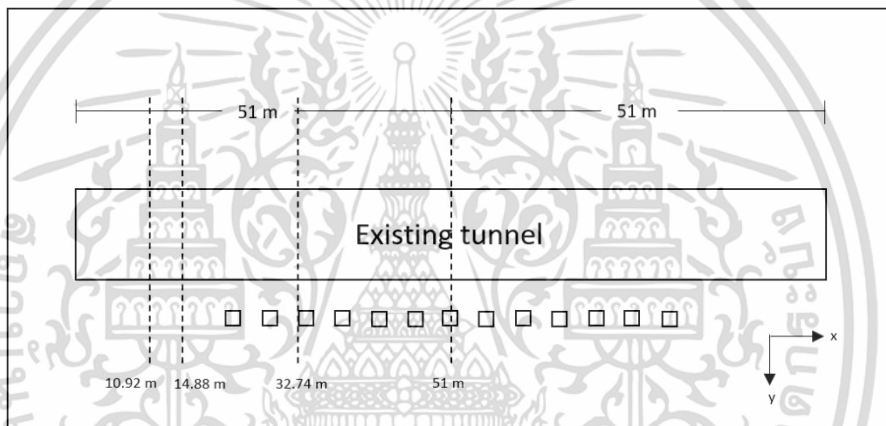
Z_{r2} = พิกัดแกนตั้งของส่วนด้านขวาอุโมงค์หลังรับแรงกระทำ

Z_{L1} = พิกัดแกนตั้งของส่วนด้านซ้ายอุโมงค์ก่อนรับแรงกระทำ

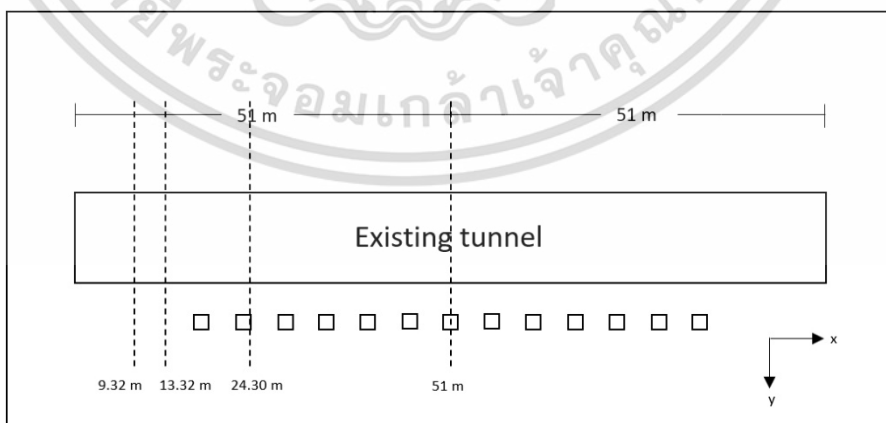
Z_{L2} = พิกัดแกนตั้งของส่วนด้านซ้ายอุโมงค์หลังรับแรงกระทำ



รูปที่ 3.9 ตำแหน่งหน้าตัดตามขวางเพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาวสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 (Spacing 3D)



รูปที่ 3.10 ตำแหน่งหน้าตัดตามขวางเพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาวสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 (Spacing 4D)



รูปที่ 3.11 ตำแหน่งหน้าตัดตามขวางเพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาวสำหรับกรณีศึกษาที่ 3 (Spacing 5D)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงของแรงตามแกนภายในผนังอุโมงค์

การวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงภายในอุโมงค์ จะทำการวิเคราะห์แรงภายในของอุโมงค์ตามแนวระนาบ (circumferential axial force, N_1) และวิเคราะห์แรงภายในตามแนวยาว (longitudinal axial force, N_2) ดังรูปที่ 3.12 สามารถคำนวณได้จากสมการ ที่ 3.1 และ 3.2

ΔN_1 = ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงภายในอุโมงค์ในแนวระนาบ

ΔN_2 = ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงภายในอุโมงค์ในแนวยาว

$$\Delta N_1 = N_{11} - N_{12} \quad (3.1)$$

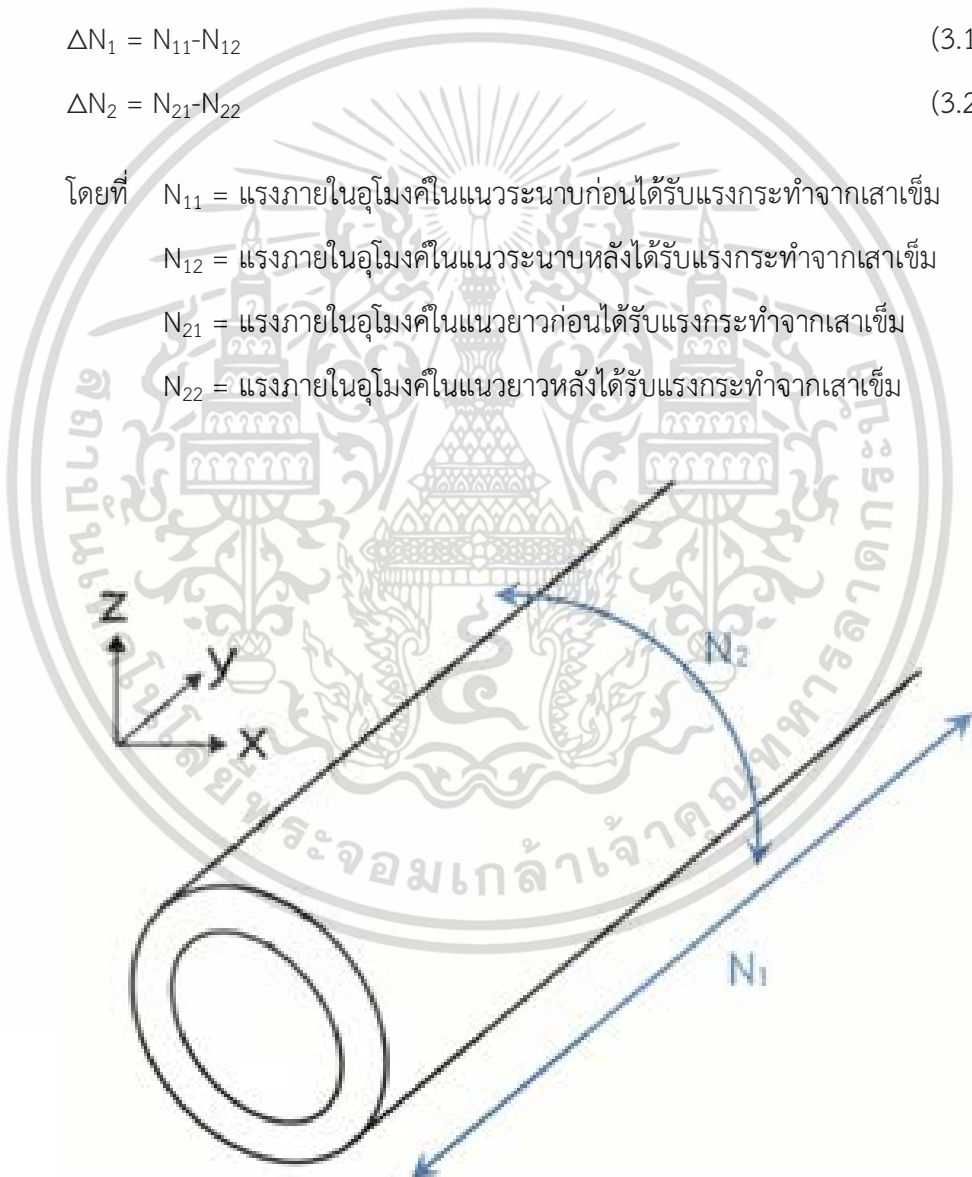
$$\Delta N_2 = N_{21} - N_{22} \quad (3.2)$$

โดยที่ N_{11} = แรงภายในอุโมงค์ในแนวระนาบก่อนได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม

N_{12} = แรงภายในอุโมงค์ในแนวระนาบหลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม

N_{21} = แรงภายในอุโมงค์ในแนวยาวก่อนได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม

N_{22} = แรงภายในอุโมงค์ในแนวยาวหลังได้รับแรงกระทำจากเสาเข็ม



รูปที่ 3.12 แสดงทิศทางของแรงตามแกนภายในผนังอุโมงค์

การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์

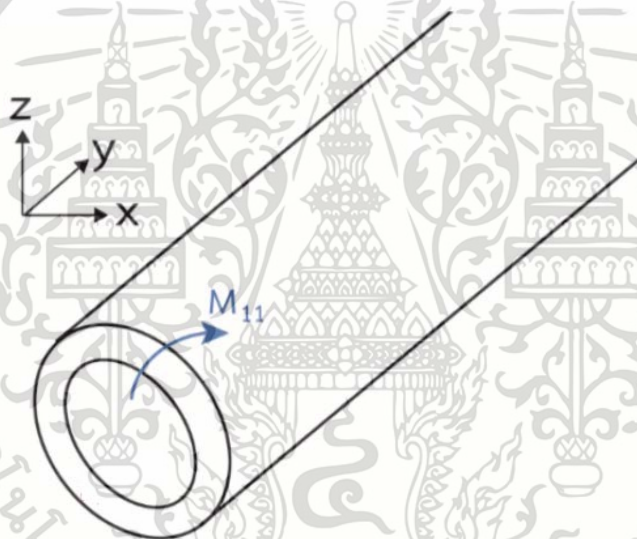
การวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์จะทำการวิเคราะห์โมเมนต์ดัดในแนวยาว (longitudinal bending moment, M) ของผนังอุโมงค์ ดังรูปที่ 3.13 จากหน้าตัดตามขวาง ณ จุด ต่าง ๆ ของอุโมงค์ในแนวยาว สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.3

ΔM = ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์

$$\Delta M = M_2 - M_1 \quad (3.3)$$

โดยที่ M_1 = โมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์ก่อนได้รับผลกระทบจากเสาเข็มแถว

M_2 = โมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์หลังได้รับผลกระทบจากเสาเข็มแถว



รูปที่ 3.13 แสดงทิศทางของโมเมนต์ดัดภายในผนังอุโมงค์

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์

4.1 กล่าวนำ

บทนี้บรรยายถึงผลการวิเคราะห์อิทธิพลของเสาเข็มแถวต่ออุโมงค์ที่มีอยู่เดิมในแนวยาว (longitudinal) แบบ 3 มิติ ในบทนี้ได้แบ่งผลการวิเคราะห์ออกเป็น 3 หัวข้อย่อย ได้แก่ ผลการวิเคราะห์การเสีรูปของผนังอุโมงค์, แรงภายในของอุโมงค์ และโมเมนต์ดัดในแนวยาว ซึ่งจะแสดงให้เห็นการเสีรูปของผนังอุโมงค์ ของอุโมงค์ในแนวยาว แรงตามแกนของอุโมงค์ และการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดภายใน (longitudinal bending moment, M_{11}) ของหน้าตัดที่สนใจ

โดยจะบรรยายถึงผลกระทบเนื่องจากอิทธิพลของเสาเข็มแถวจำนวน 13 ต้นวางตัวอยู่ด้านขวาของอุโมงค์ที่มีอยู่เดิม มีระยะ clearance เท่ากับ 0.5 เมตร โดยมุ่งเน้นศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถวคือ 3, 4 และ 5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม

4.2 พฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาว (longitudinal)

ในหัวข้อนี้เป็นการบรรยายถึงผลการวิเคราะห์ผลกระทบของเสาเข็มแถวต่ออุโมงค์ที่เสาเข็มภายในแถวมีขนาด 1.0 เมตร โดยแสดงผลในแนวยาว (longitudinal plane) ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์ที่ใช้จากหน้าตัดบริเวณกึ่งกลางแบบจำลอง (monitoring plane) และบริเวณอื่นที่น่าสนใจ

จากงานวิจัยของ Gong et al.(2015)[6] ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของอุโมงค์ในแนวยาว จากงานวิจัยนี้พบว่าค่าการทรุดตัวในแนวยาวที่ไม่เท่ากันและมีลักษณะเป็นแบบ Gaussian curve นั้นเมื่อแสดงค่าจุดดัดกลับ (inflection point) จะสามารถบ่งบอกถึงตำแหน่งของอุโมงค์ที่ทำให้ค่าโมเมนต์ดัดในผนังอุโมงค์มีค่าการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดและส่งผลทำให้ค่า structural safety ลดลง ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวอยู่ในช่วง $-0.7i$ ถึง $-2.2i$ และ $0.7i$ ถึง $2.2i$ (i คือระยะจุดดัดกลับของอุโมงค์) โดยในการทดลองนี้จุดที่เราสนใจทั้งหมด 4 จุดคือ จุดกึ่งกลางของอุโมงค์, จุดดัดกลับของอุโมงค์, ระยะ 0.7 เท่าของจุดดัดกลับของอุโมงค์ และ ระยะ 2.2 เท่าของจุดดัดกลับของอุโมงค์

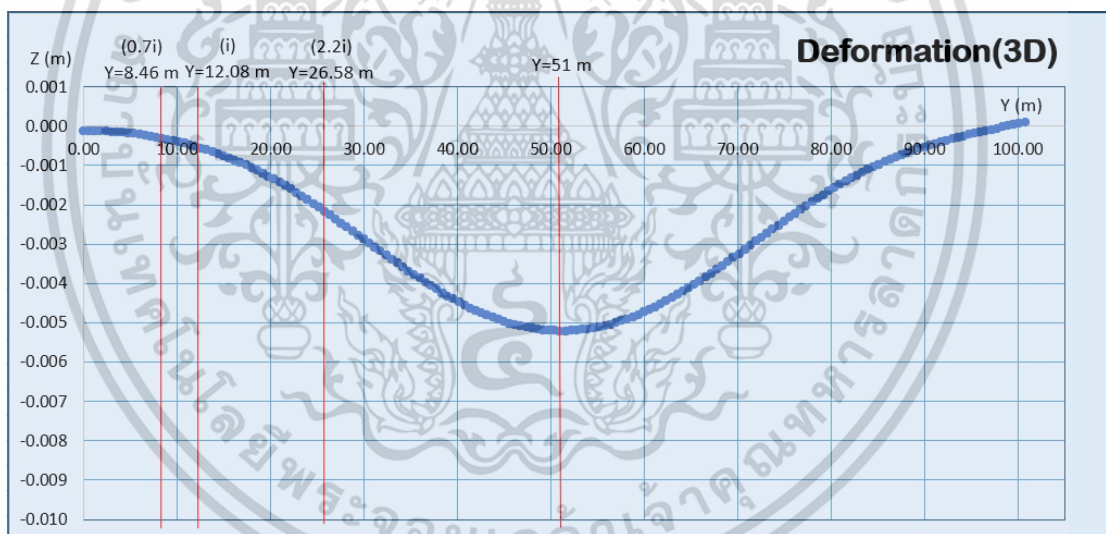
จุดดัดกลับของอุโมงค์หาได้จากอนุพันธ์อันดับสอง ($\frac{d^2y}{dx^2} = 0$) ของกราฟการเสีรูปในแนวตั้งของ

ผนังอุโมงค์ โดยที่จุดดัดกลับของอุโมงค์ในแต่ละกรณีศึกษาจะมีค่าไม่เท่ากันเนื่องจากค่าการทรุดตัวในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

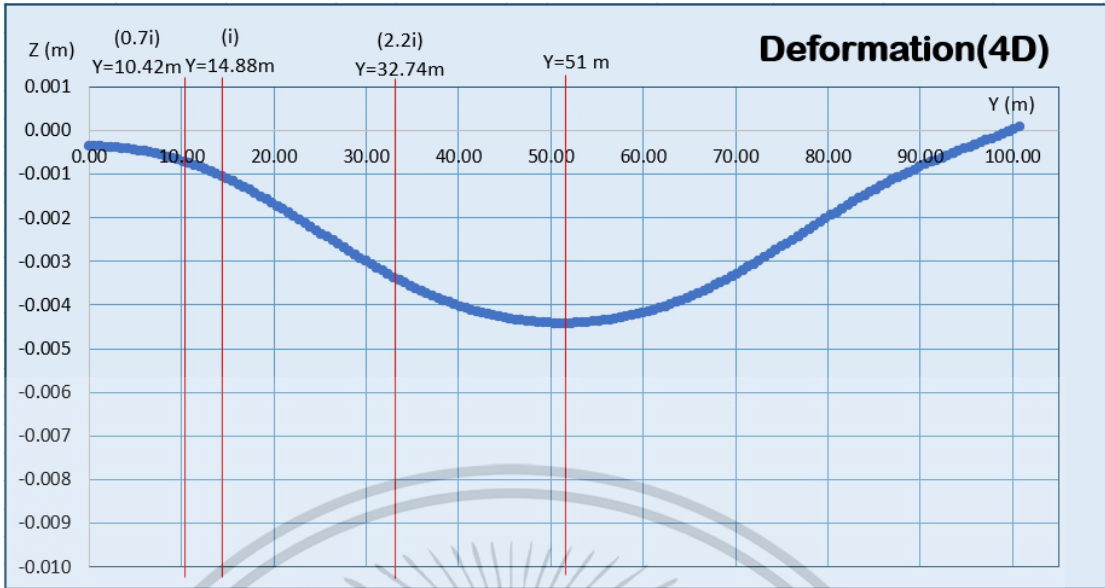
แต่ละกรณีศึกษาไม่เท่ากัน ทำให้แต่ละกรณีศึกษามีหน้าตัดที่สนใจไม่เหมือนกันโดยแต่ละกรณีศึกษามีหน้าตัดที่สนใจดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3

	ระยะ 0.7 เท่า ของจุดตัดกลับ ของอุโมงค์ (0.7i)	จุดตัดกลับของ อุโมงค์ (i)	ระยะ 2.2 เท่า ของจุดตัดกลับ ของอุโมงค์ (2.2i)	จุดกึ่งกลางของ อุโมงค์
(Spacing 3D)	Y=8.46m	Y=12.08m	Y=26.58m	Y=51m
(Spacing 4D)	Y=10.42m	Y=14.88m	Y=32.74m	Y=51m
(Spacing 5D)	Y=9.32m	Y=13.32m	Y=29.30m	Y=51m

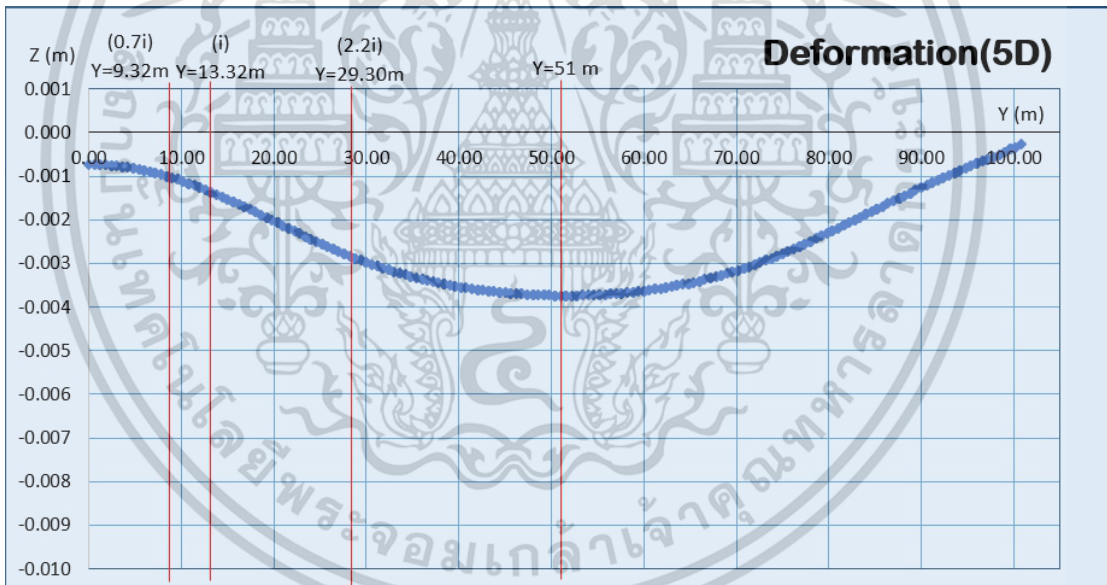
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงตำแหน่งหน้าตัดจุดกึ่งกลางของอุโมงค์, จุดตัดกลับของอุโมงค์, ระยะ 0.7 เท่าของจุดตัดกลับของอุโมงค์ และ ระยะ 2.2 เท่าของจุดตัดกลับของอุโมงค์



รูปที่ 4.1 ภาพแสดงหน้าตัดจุดกึ่งกลางของอุโมงค์, จุดตัดกลับของอุโมงค์, ระยะ 0.7 เท่าของจุดตัดกลับของอุโมงค์ และ ระยะ 2.2 เท่าของจุดตัดกลับของอุโมงค์ที่ Spacing 3D



รูปที่ 4.2 ภาพแสดงหน้าตัดจุดกึ่งกลางของอุโมงค์, จุดตัดกลับของอุโมงค์, ระยะ 0.7 เท่าของจุดตัดกลับของอุโมงค์ และ ระยะ 2.2 เท่าของจุดตัดกลับของอุโมงค์ ที่ Spacing 4D



รูปที่ 4.3 ภาพแสดงหน้าตัดจุดกึ่งกลางของอุโมงค์, จุดตัดกลับของอุโมงค์, ระยะ 0.7 เท่าของจุดตัดกลับของอุโมงค์ และ ระยะ 2.2 เท่าของจุดตัดกลับของอุโมงค์ ที่ Spacing 5D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 การเสีรูปของผนังอุโมงค์

จากตารางที่ 4.2-4.5เป็นตารางที่แสดงการเสีรูปของผนังอุโมงค์ที่หน้าตัดต่าง ๆ โดยที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถวคือ 3, 4 และ 5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม(กรณีศึกษาที่1, 2 และ 3)ตามลำดับ

จากข้อมูลดังกล่าว ค่าการเสีรูปของอุโมงค์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนสูงสุดที่จุดกึ่งกลางของอุโมงค์ทั้ง 3 กรณีศึกษา และยิ่งระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถวมากขึ้น การทรุดตัวสูงสุดจะมีค่าน้อยลง

	Y=8.46m	Y=12.08m	Y=26.58m	Y=51m
การเสีรูปของอุโมงค์(mm)	-0.316	-0.599	-2.298	-5.213

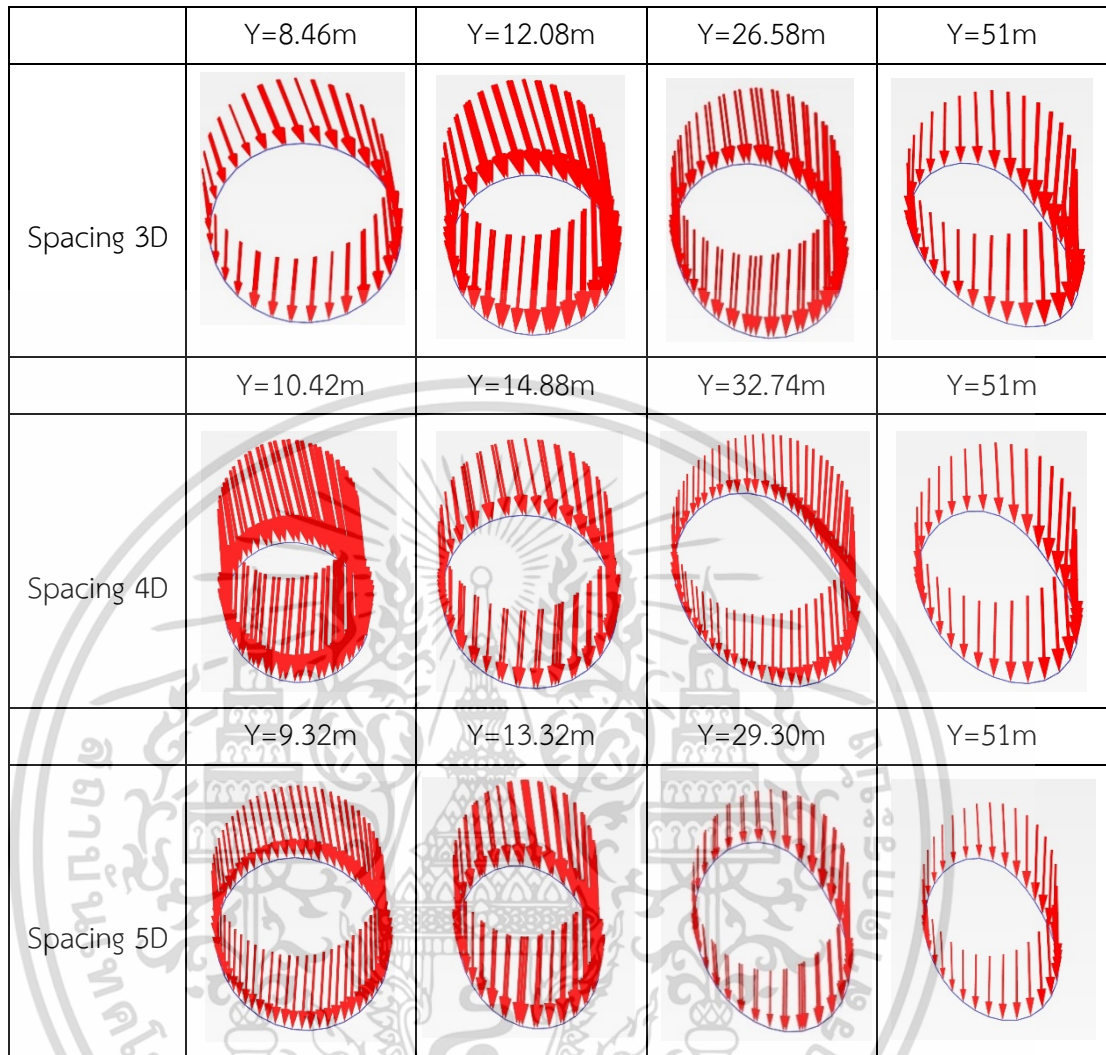
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการเสีรูปของอุโมงค์ในแนวตั้งโดยระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถวเท่ากับ 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม

	Y=10.42m	Y=14.88m	Y=32.74m	Y=51m
การเสีรูปของอุโมงค์(mm)	-0.726	-1.103	-3.337	-4.420

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการเสีรูปของอุโมงค์ในแนวตั้งโดยระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถวเท่ากับ 4 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม

	Y=9.32m	Y=13.32m	Y=29.30m	Y=51m
การเสีรูปของอุโมงค์(mm)	-1.508	-1.375	-2.940	-3.738

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการเสีรูปของอุโมงค์ในแนวตั้งโดยระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถวเท่ากับ 5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม



ตารางที่ 4.5 แสดงภาพการเสียรูปของผนังอุโมงค์ในแต่ละกรณีศึกษา

4.2.2 การเปลี่ยนแปลงแรงตามแกนภายในผนังอุโมงค์

จากตารางที่ 4.6-4.9 เป็นตารางที่แสดงค่าแรงตามแกนภายในผนังอุโมงค์ที่หน้าตัดต่าง ๆ โดยที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถวคือ 3, 4 และ 5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (กรณีศึกษาที่ 1, 2 และ 3) ตามลำดับ

จากข้อมูลดังกล่าวเมื่อระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถวเพิ่มขึ้นค่าแรงภายในผนังอุโมงค์ตามแนวระนาบที่จุดกึ่งกลางของอุโมงค์จะมีค่ามากขึ้นแต่แรงภายในผนังอุโมงค์ตามแนวยาวที่จุดกึ่งกลางของอุโมงค์จะมีค่าลดลง

	Y=8.46m	Y=12.08m	Y=26.58m	Y=51m
แรงภายในของอุโมงค์ ตามแนวระนาบ(kN/m)	105.663	69.770	66.919	20.459
แรงภายในของอุโมงค์ ตามแนวยาว(kN/m)	-219.512	-204.678	-284.013	-300.812



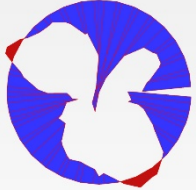
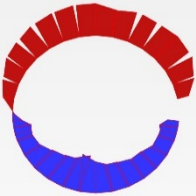



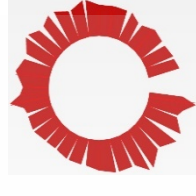


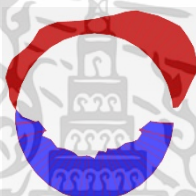
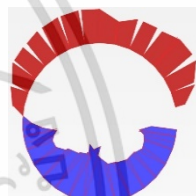






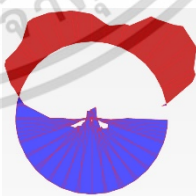
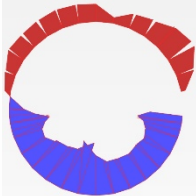

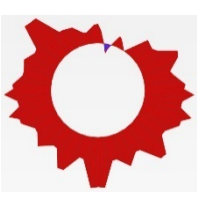
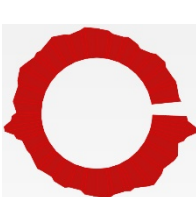

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าแรงตามแกนภายในผนังอุโมงค์โดยระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็ม
ภายในแถวเท่ากับ 3 เสาของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม

	Y=10.42m	Y=14.88m	Y=32.74m	Y=51m
แรงภายในของอุโมงค์ ตามแนวระนาบ(kN/m)	111.116	74.956	27.653	36.125
แรงภายในของอุโมงค์ ตามแนวยาว(kN/m)	-284.394	-262.141	-285.935	-296.449

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าแรงตามแกนภายในผนังอุโมงค์โดยระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็ม
ภายในแถวเท่ากับ 4 เสาของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม

	Y=9.32m	Y=13.32m	Y=29.30m	Y=51m
แรงภายในของอุโมงค์ ตามแนวระนาบ(kN/m)	111.116	74.956	27.653	36.125
แรงภายในของอุโมงค์ ตามแนวยาว(kN/m)	-284.394	-262.141	-285.935	-296.449

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าแรงตามแกนภายในผนังอุโมงค์โดยระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็ม
ภายในแถวเท่ากับ 5 เสาของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม

กรณีศึกษาที่1 Spacing 3D	Y=8.46m	Y=12.08m	Y=26.58m	Y=51m
แผนภูมิแรง ภายในของอุโมงค์ ตามแนวระนาบ				
แผนภูมิแรง ภายในของอุโมงค์ ตามแนวยาว				
กรณีศึกษาที่2 Spacing 4D	Y=10.42m	Y=14.88m	Y=32.74m	Y=51m
แผนภูมิแรง ภายในของอุโมงค์ ตามแนวระนาบ				
แผนภูมิแรง ภายในของอุโมงค์ ตามแนวยาว				
กรณีศึกษาที่3 Spacing 5D	Y=9.32m	Y=13.32m	Y=29.30m	Y=51m
แผนภูมิแรง ภายในของอุโมงค์ ตามแนวระนาบ				
แผนภูมิแรง ภายในของอุโมงค์ ตามแนวยาว				

ตารางที่ 4.9 แสดงภาพแผนภูมิแรงตามแกนภายในผนังอุโมงค์ในแต่ละกรณีศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ตัดภายในผนังอุโมงค์

จากตารางที่ 4.10-4.13 เป็นตารางที่แสดงค่าโมเมนต์ตัดภายในผนังอุโมงค์ที่หน้าตัดต่าง ๆ โดยที่ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถวคือ 3, 4 และ 5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม(กรณีศึกษาที่1, 2 และ 3)ตามลำดับ

จากข้อมูลดังกล่าว ค่าโมเมนต์ตัดภายในผนังอุโมงค์มีค่าใกล้เคียงกันในทุกหน้าตัดทั้ง 3 กรณีศึกษา

	Y=8.46m	Y=12.08m	Y=26.58m	Y=51m
ค่าโมเมนต์ตัดภายในผนังอุโมงค์(kN-m)	6.133	6.361	6.649	6.636

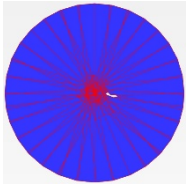
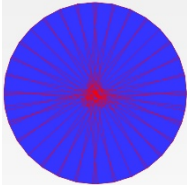
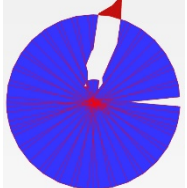
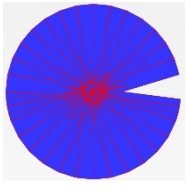
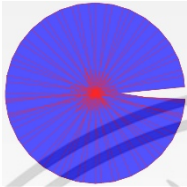
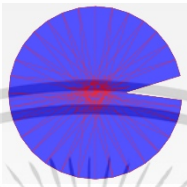
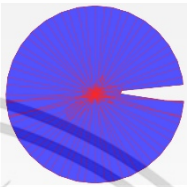
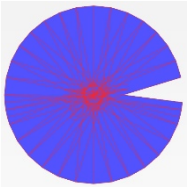

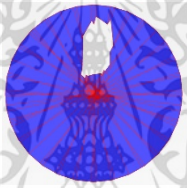

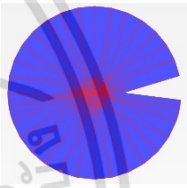
ตารางที่ 4.10 แสดงค่าโมเมนต์ตัดภายในผนังอุโมงค์โดยระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถวเท่ากับ 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม

	Y=10.42m	Y=14.88m	Y=32.74m	Y=51m
ค่าโมเมนต์ตัดภายในผนังอุโมงค์(kN-m)	6.635	6.377	6.655	6.642

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าโมเมนต์ตัดภายในผนังอุโมงค์โดยระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถวเท่ากับ 4 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม

	Y=9.32m	Y=13.32m	Y=29.30m	Y=51m
ค่าโมเมนต์ตัดภายในผนังอุโมงค์(kN-m)	6.672	6.218	6.329	6.631

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าโมเมนต์ตัดภายในผนังอุโมงค์โดยระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถวเท่ากับ 5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม

Spacing 3D	Y=8.46m	Y=12.08m	Y=26.58m	Y=51m
แผนภูมิ โมเมนต์ตัด				
Spacing 4D	Y=10.42m	Y=14.88m	Y=32.74m	Y=51m
แผนภูมิ โมเมนต์ตัด				
Spacing 5D	Y=9.32m	Y=13.32m	Y=29.30m	Y=51m
แผนภูมิ โมเมนต์ตัด				

ตารางที่ 4.13 แสดงภาพแผนภูมิโมเมนต์ตัดภายในผนังอุโมงค์ในแต่ละกรณีศึกษา

บทที่ 5

สรุปผลการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของเสาเข็มแถวต่ออุโมงค์ที่มีอยู่เดิม ในกรณีเสาเข็มแถววางตัวเพียงด้านเดียวของอุโมงค์ จากผลการวิเคราะห์ผลกระทบต่ออุโมงค์ในแนวยาว(longitudinal direction) สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่าการเสีรูปร่างของผนังอุโมงค์สูงสุดและแรงภายในผนังอุโมงค์ในแนวแกนยาวมีค่าน้อยลง เมื่อระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว(spacing)มากขึ้น ส่วนแรงภายในผนังอุโมงค์ในแนวแกนระนาบและค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดมีค่ามากขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถว (spacing) มากขึ้น

2. เมื่อระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเสาเข็มภายในแถวค่าหนึ่ง ค่าการเสีรูปร่างของผนังอุโมงค์มีค่ามากขึ้นเมื่อเข้าใกล้จุดกึ่งกลางของอุโมงค์ส่วนค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัด และค่าการเปลี่ยนแปลงแรงตามแนวแกนมีแนวโน้มที่จะแกว่งเนื่องจาก ค่าอาจแปรผันตามตำแหน่งที่เสาเข็มกระทำมากกว่า

3. การพิจารณาเพื่อติดตั้งเครื่องฝ้าระวางภัยในจุดที่มีความเสี่ยงอันเนื่องมาจากการเสีรูปร่างของผนังอุโมงค์, ค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัด และค่าการเปลี่ยนแปลงแรงภายใน นอกจากจะต้องติดตั้งเครื่องฝ้าระวางที่จุดกึ่งกลางของอุโมงค์แล้ว ควรจะติดตั้งเครื่องฝ้าระวางที่จุดตัดกลับของอุโมงค์ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Schroeder F.C., Potts D.M. and Addenbrooke T.I. “The Influence of Pile Group on Existing Tunnels” *Geotechnique*. vol.54, no. 6. May 2004. pp. 351-362.
- [2] Heama N., Suwansawat S., Lueprasert P. and Jongpradist P. “Study of Lining Behavior Affected by Adjacent Loading Pile in MRTA Blue Line Project” *The 21st National Convention on Civil*. vol 21.
- [3] Lueprasert P., Jongpradist P., Charoenpak P., P. Chaipanna. 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.
- [4] Liao S.-M., Peng F.-L. and Shen S.-L. “Analysis of Shearing Effect on Tunnel Induced by Load Transfer along Longitudinal Direction” *Tunnelling and Underground Space Technology*. no. 23. 2008. pp. 421-430.
- [5] Wu H.-N., Shen S.-L., Liao S.-M. and Yin Z.-Y. “Longitudinal Structural Modelling of Shield Tunnels Considering Shearing Dislocation between Segmental Rings”. *Tunnelling and Underground Space Technology*. no. 50. 2015. pp. 317-323.
- [6] Gong W., Juang C.-H., Huang H., Zhang J. and Luo Z. “Improved Analytical Model for Circumferential Behavior of Jointed Shield Tunnels Considering the Longitudinal Differential Settlement” *Tunnelling and Underground Space Technology*. no. 45. 2015. pp. 153-165.
- [7] กীরติ เมืองแสน. “พฤติกรรมของหัวเจาะระบบแรงดันดินสมดุลในการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินในดินกรุงเทพฯ” *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*. 2544.
- [8] สุขชัยวีร์ สวรรณสวัสดิ์. *วิศวกรรมอุโมงค์. ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ โรงพิมพ์มีน เซอร์วิส ซัพพลาย*. 2552.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

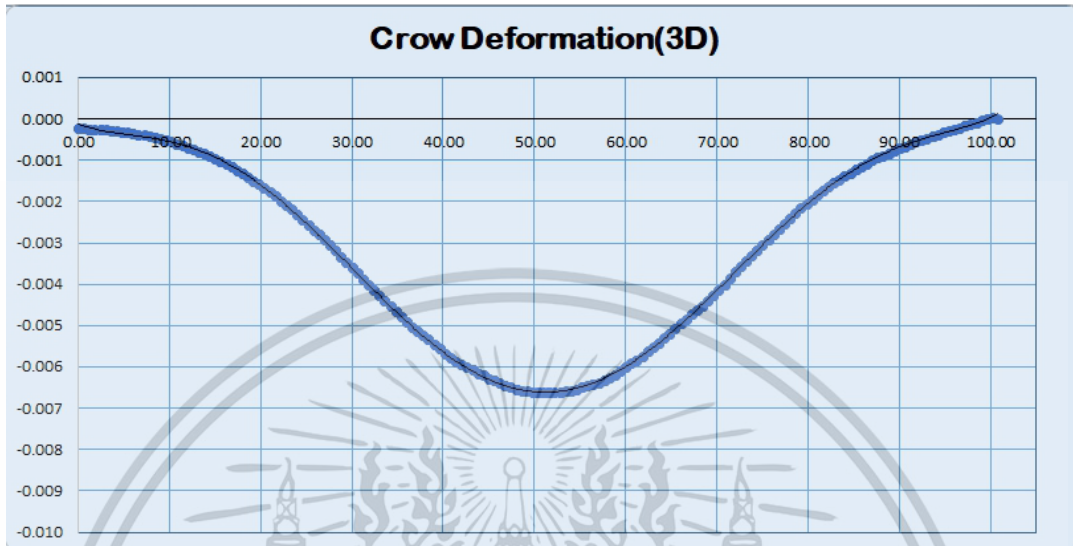
- [9] สุขชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์. “ปัญหาการเคลื่อนตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ”. วารสารโยธาสาร. 2549. หน้า 22-28.
- [10] พิชากร ศรีจันทร์ทอง และสุขชวีร์สุวรรณสวัสดิ์. “การศึกษาปัจจัยในการควบคุมหัวเจาะที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวของดินโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม,” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14, นครราชสีมา. 2552
- [11] Mair R. J., Taylor R. N., and Bracegirdle A. “Subsurface Settlement Profiles above Tunnels in Clays”. Geomechanique. vol.43. No. 2. 1993. pp.315-320.
- [12] Mroueh H. and Shahrour I. “Three-Dimension Finite Element Analysis of the Interaction between Tunneling and Pile Foundations”. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 26. 2002. pp.217-230
- [13] Wang Z., Wang L., Li L. and Wang J. “Failure Mechanism of Tunnel Lining Joints and Bolts with uneven Longitudinal Ground Settlement”. Tunnelling and Underground Space Technology. no. 40. 2014. pp. 300-308.
- [14] Rukdeechuai T., Jongpradist P., Wonglert A. Wonglert, and Kaewsri T. “Influence of Soil Models on Numerical Simulation of Geotechnical Works in Bangkok Subsoil”. EIT Research and Development Journal. vol. 20. no. 3. 2009. pp. 17-28.



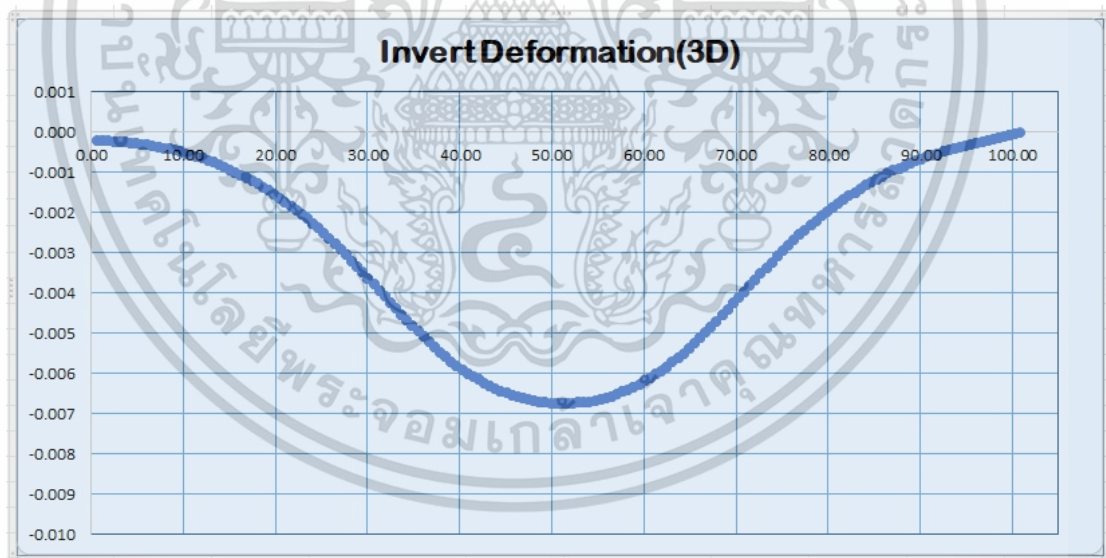
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การเสีรูปร่างของอุโมงค์

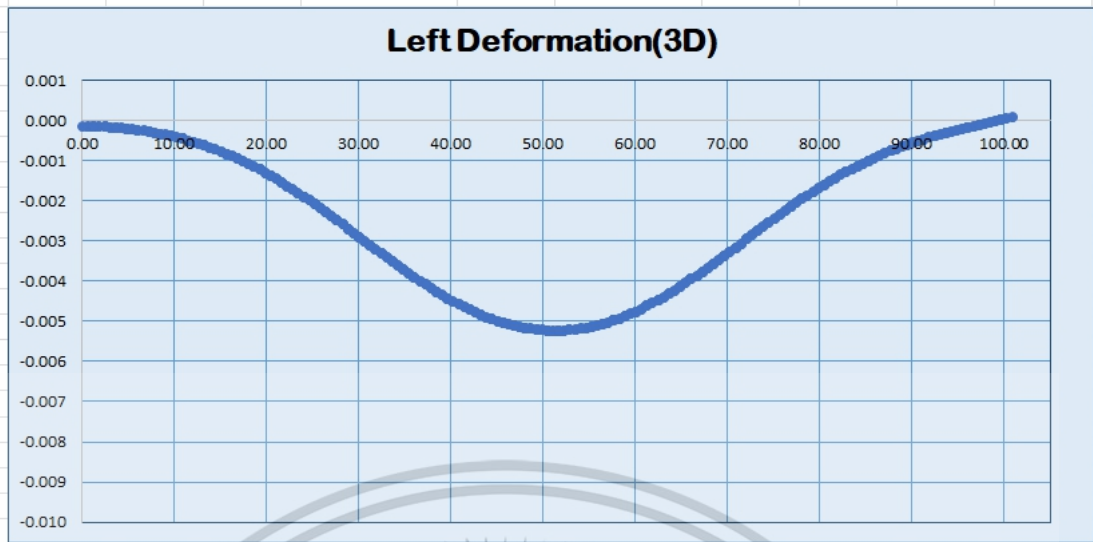


รูปที่ ก.1 รูปแสดงการเสีรูปร่างที่จุดบนของอุโมงค์ที่เสาเข็มระยะ Spacing 3D

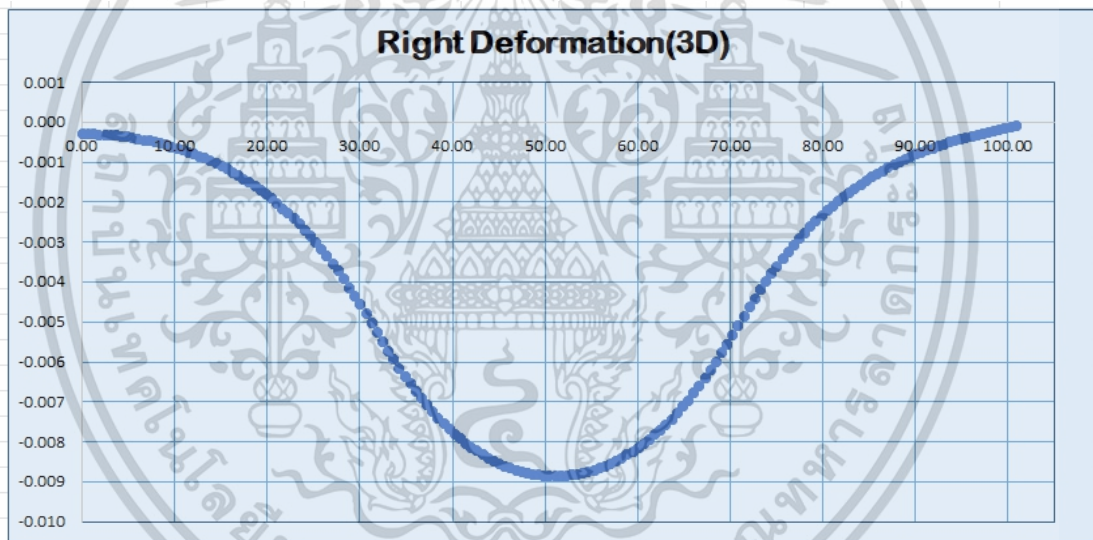


รูปที่ ก.2 รูปแสดงการเสีรูปร่างที่จุดล่างของอุโมงค์ที่เสาเข็มระยะ Spacing 3D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

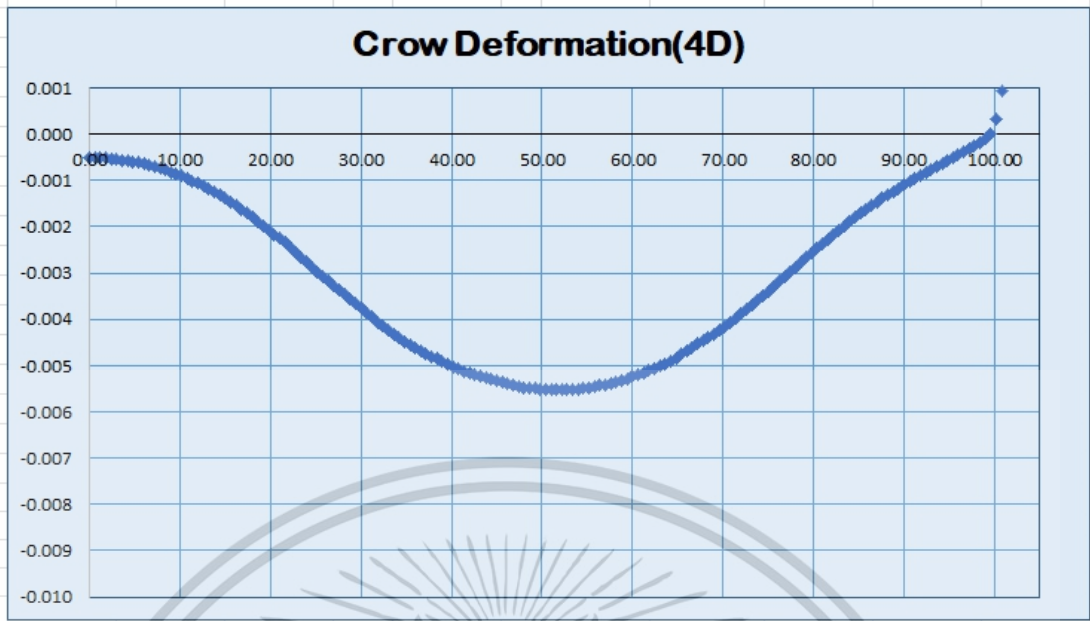


รูปที่ ก.3 รูปแสดงการเสียรูปที่จุดซ้ายของอุโมงค์ที่เสาเข็มระยะ Spacing 3D

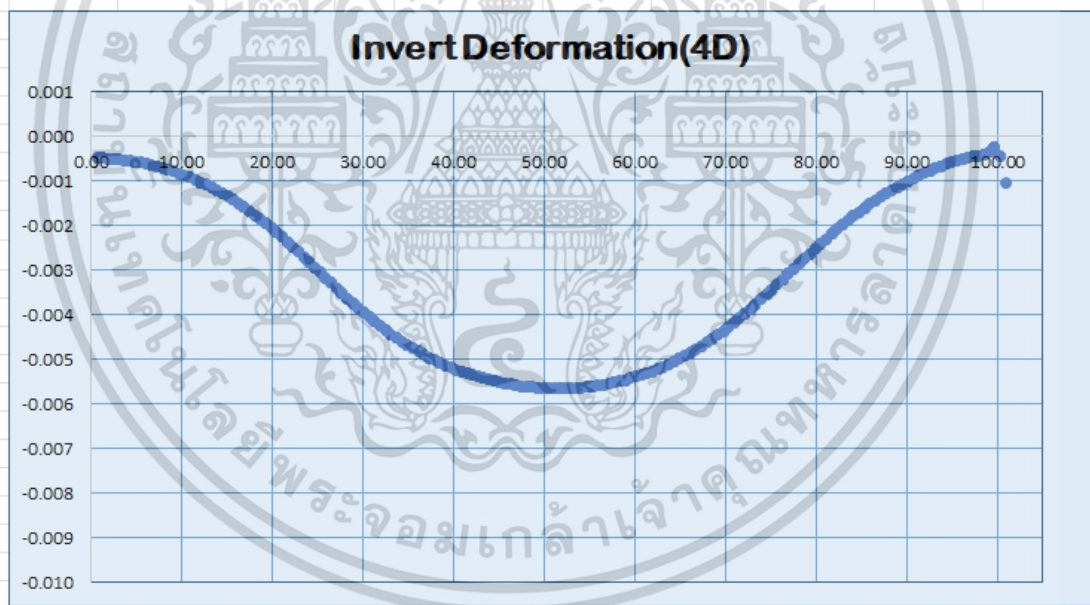


รูปที่ ก.4 รูปแสดงการเสียรูปที่จุดขวาของอุโมงค์ที่เสาเข็มระยะ Spacing 3D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

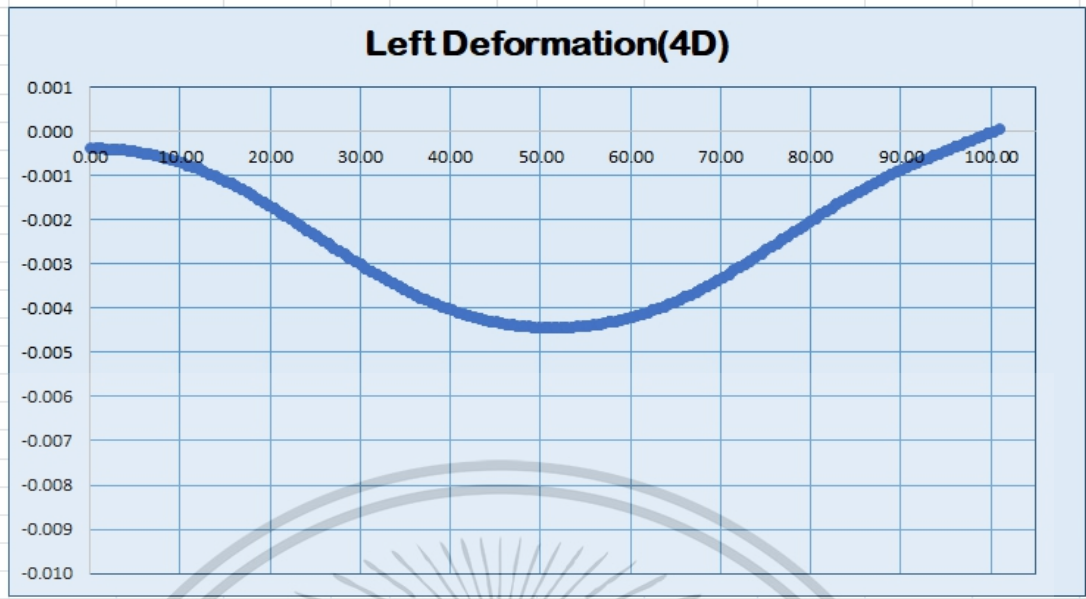


รูปที่ ก.5 รูปแสดงการเสียรูปที่จุดบนของอุโมงค์ที่เสาเข็มระยะ Spacing 4D

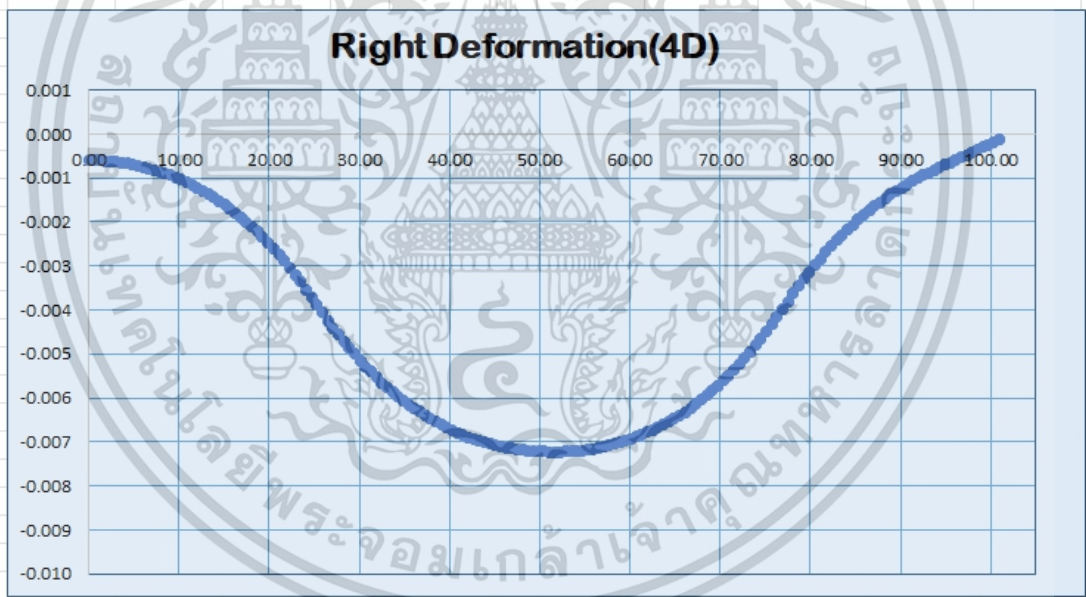


รูปที่ ก.6 รูปแสดงการเสียรูปที่จุดล่างของอุโมงค์ที่เสาเข็มระยะ Spacing 4D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

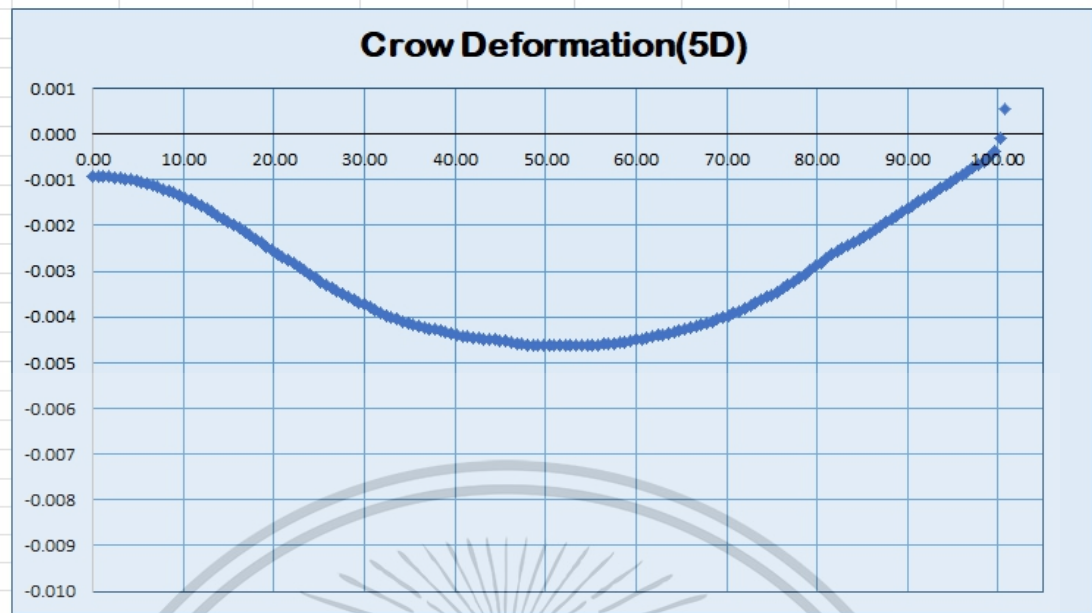


รูปที่ ก.7 รูปแสดงการเสียรูปที่จุดซ้ายของอุโมงค์ที่เสาเข็มระยะ Spacing 4D

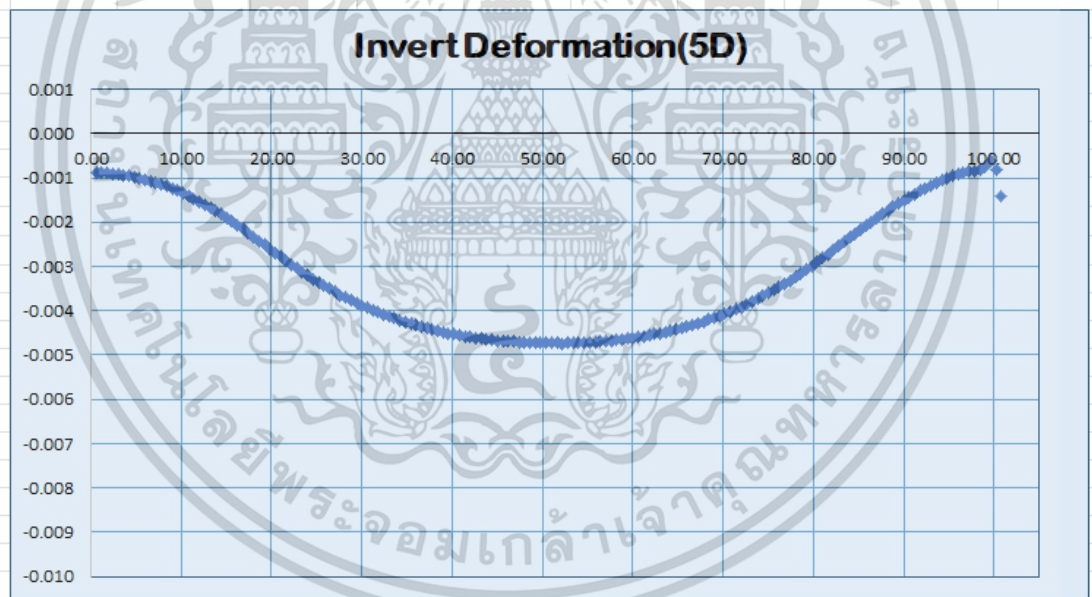


รูปที่ ก.8 รูปแสดงการเสียรูปที่จุดขวาของอุโมงค์ที่เสาเข็มระยะ Spacing 4D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

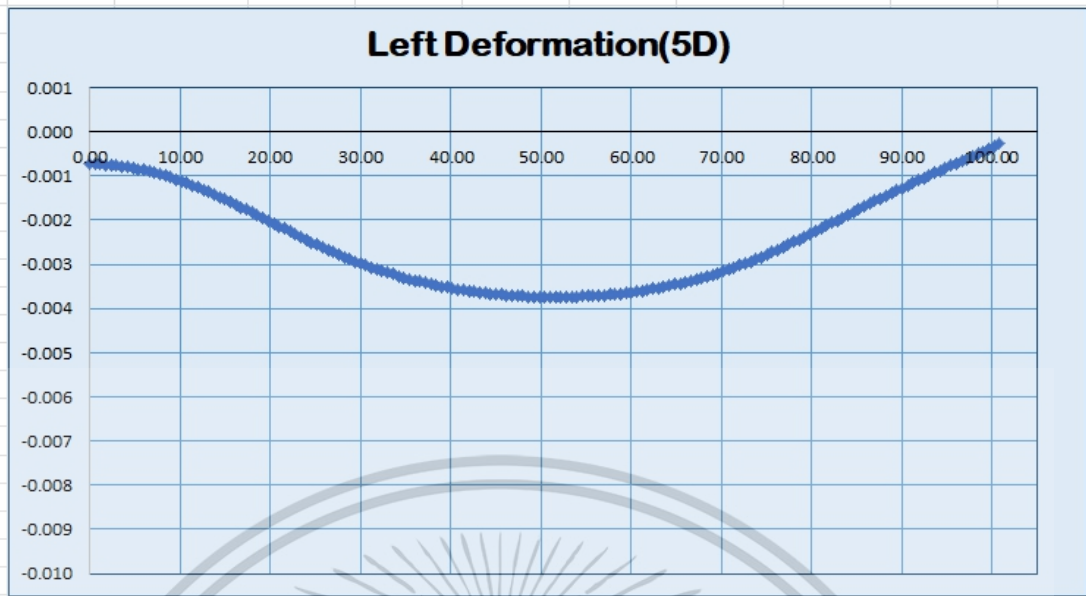


รูปที่ ก.9 รูปแสดงการเสียรูปที่จุดบนของอุโมงค์ที่เสาเข็มระยะ Spacing 5D

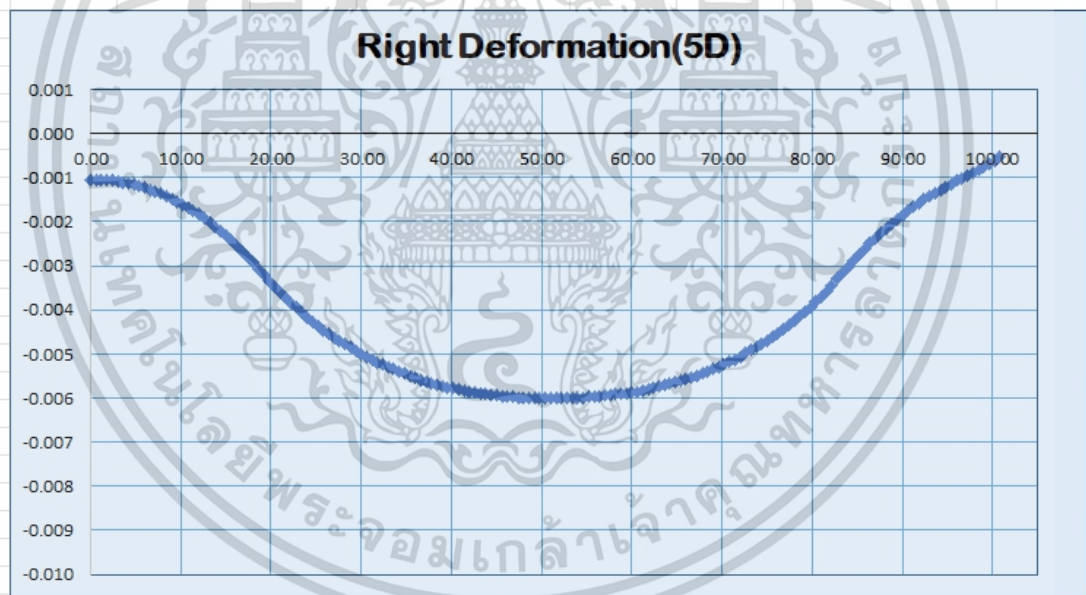


รูปที่ ก.10 รูปแสดงการเสียรูปที่จุดล่างของอุโมงค์ที่เสาเข็มระยะ Spacing 5D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.11 รูปแสดงการเสียรูปที่จุดซ้ายของอุโมงค์ที่เสาเข็มระยะ Spacing 5D



รูปที่ ก.12 รูปแสดงการเสียรูปที่จุดขวาของอุโมงค์ที่เสาเข็มระยะ Spacing 5D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้