

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบการเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากการสร้างอุโมงค์
STUDY AND ANALYSIS OF EFFECT INCLINED BY
GROUND DEFORMATION DUE TO TUNNELING



โดย
นายวิฑูรย์ เรืองปัญญาวิ
นายสุเมธี สอนธิกุล
นายเสถียร ฐิติสุนทรจักร

๒๖
๑๖ ๑๒๗
๒๕๕๐

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 72957
วัน,เดือน,ปี..... 26 ส.ย. 2550

b. 11๓๑๕๒๔๔
i.....

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**STUDY AND ANALYSIS OF EFFECT INCLINED BY
GROUND DEFORMATION DUE TO TUNNELING**



MR. VITTHAWAT RUENGPANYAWUT
MR. SUMETHEE SONTIKUL
MR. SEDTAWUT SUNTHORNJAK

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

2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์



สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองโครงการพิเศษ

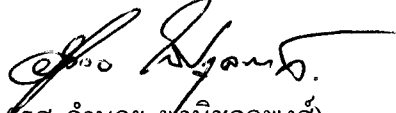
หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบการเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากการสร้างอุโมงค์

STUDY AND ANALYSIS OF EFFECT INCLINED BY GROUND DEFORMATION DUE TO TUNNELING

นักศึกษา นายวิวัฒน์ เรืองปัญญาวุฒิ รหัสประจำตัว 46010708
นายสุเมธี สนธิกุล รหัสประจำตัว 46010865
นายเสฏฐวุฒิ สุนทรจักร รหัสประจำตัว 46010893
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. สุัชชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์

คณะกรรมการสอบหัวข้อโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.สุพจน์ ศรีนิล	
ผศ.ดร.สุัชชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์	
ผศ.สมเกียรติ ขวัญฤกษ์	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว


(รศ. อำนวย พานิชกุลพงศ์)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 13 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบการเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากการสร้างอุโมงค์ STUDY AND ANALYSIS OF EFFECT INCLINED BY GROUND DEFORMATION DUE TO TUNNELING	
นักศึกษา	นายวิวัฒน์	เรื่องปัญญาวุฒิ
	นายสุเมธี	สนธิกุล
	นายเสกฐวุฒิ	สุนทรจักร
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์	
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา	
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์	
ปีการศึกษา	2549	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิเคราะห์ผลการทรุดตัวที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟใต้ดินในกรุงเทพฯ คือ โครงการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยาย เพื่อสามารถทราบถึงความรุนแรง ขอบเขตของผลกระทบ และสามารถเลือกใช้เครื่องมือติดตามการเคลื่อนตัวของดินในบริเวณที่มีความเสี่ยงได้อย่างถูกต้องเหมาะสม

จากการศึกษาการติดตามการเคลื่อนตัวของดิน พบว่าการเคลื่อนตัวในลักษณะหนึ่งๆ สามารถเลือกใช้เครื่องมือได้หลายชนิดขึ้นกับคุณสมบัติของเครื่องมือ ลักษณะการเคลื่อนตัว และลักษณะของข้อมูลที่ต้องการ ซึ่งการเลือกใช้จำเป็นต้องทราบถึงหลักการและวิธีการทำงานของเครื่องมือชนิดนั้นๆ เป็นอย่างดี

งานวิจัยนี้ได้สร้างโปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ขอบเขต และผลการทรุดตัวที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน โดยใช้ทฤษฎีของ Peck ในการคำนวณ เนื่องจากให้ค่าการทรุดตัวสูงสุดใกล้เคียงกับความจริง โดยเปิดโอกาสให้บุคคลที่สนใจสามารถนำไปใช้งานและใช้เป็นแม่แบบในการพัฒนาต่อได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title : STUDY AND ANALYSIS OF EFFECT INCLINED BY GROUND
DEFORMATION DUE TO TUNNELING
Name : MR. VITTHAWAT RUENGPANYAWUT
MR. SUMETHEE SONTIKUL
MR. SEDTAWUT SUNTHORNJAK
Field : CIVIL ENGINEERING
Department : CIVIL ENGINEERING
Faculty : ENGINEERING
Adviser : ASST.PROF.SUCHATVEE SUWANSAWAT

ABSTRACT

This research focuses on the study of analysis of settlement from Bangkok metro tunnel construction. The study project is the blue line extension from Hualampong to Sanamchai. For study of damage degree and scope of effect. Addition to choosing monitoring field performance instrument in risk area.

For the study of monitoring field performance, one type displacement can choose to use several type instruments. It's depend on instrument qualification, displacement specification and detail data. For choosing to use instrument, it would consider principle and working process of that instrument

Additionally,an analysis displacement program was developed for analysis scope and effect of displacement from tunnel construction by using Peck(1969) theorem is near to actual settlement. Interest people can practically use the program and develop later.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้จัดทำโครงการพิเศษขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษนี้ อีกทั้งท่านยังได้สละเวลาอันมีค่าที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ จนทำให้โครงการพิเศษนี้ได้บรรลุวัตถุประสงค์ได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.สุพจน์ ศรีนิล และ ผศ.สมเกียรติ ขวัญพฤษ์ ซึ่งเป็นกรรมการคุมสอบโครงการพิเศษนี้ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่มีประโยชน์ต่างๆ ต่อการทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในด้านวิศวกรรม ทำให้สามารถนำความรู้มาประยุกต์ใช้ในโครงการพิเศษได้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณพี่ๆ นักศึกษาปริญญาโทภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกคนที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือการทำโครงการพิเศษฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ บิดามารดา ที่ให้การเลี้ยงดู ดูแลเอาใจใส่ และคอยเป็นกำลังใจให้ตลอดเวลาเสมอมา ตลอดจนพี่ๆ เพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ตลอดระยะเวลาที่ทำโครงการพิเศษฉบับนี้

สุดท้ายนี้ทางผู้จัดทำโครงการพิเศษฉบับนี้หวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ซึ่งนำตัวโปรแกรมไปใช้คำนวณหาค่าการทรุดตัวในแนวดิ่งเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่อาจจะเกิดต่อสิ่งก่อสร้างข้างเคียง ซึ่งจะได้หาทางป้องกันและแก้ไขต่อไป

นายวิวัฒน์ เรืองปัญญาวุฒิ

นายสุเมธี สนิธิกุล

นายเสฏฐวุฒิ สุนทรจักร

ผู้ประพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	ปกใน (ภาษาไทย)	ก
	ปกใน (ภาษาอังกฤษ)	ข
	หน้าอนุมัติ	ค
	บทคัดย่อภาษาไทย	ง
	บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
	กิตติกรรมประกาศ	ฉ
	สารบัญ	ช
	สารบัญตาราง	ญ
	สารบัญรูป	ฎ
1	บทนำ	
	1.1. กล่าวนำ	1
	1.2. ความเป็นมาและที่มาของปัญหา	1
	1.3. วัตถุประสงค์ของ โครงการพิเศษ	1
	1.4. ทฤษฎีและแนวคิดที่ใช้ใน โครงการพิเศษ	2
	1.5. ขอบเขตของ โครงการพิเศษ	2
	1.6. วิธีที่ใช้ในการดำเนินงาน	2
	1.7. ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการดำเนิน โครงการพิเศษ	3
2	วรรณกรรมปริทัศน์	
	2.1. การตอบสนองของดินซึ่งถูกก่อให้เกิดขึ้นโดยหิวเจาะอุโมงค์	4
	2.2. วิธีการทำนายการเสีรูปของดิน	8
	2.2.1. Stochastic and Empirical Methods	10
	2.2.1.1 Litvinniszyn (1956)	10
	2.2.1.2 Peck (1969)	11
	2.2.1.3 O'Relly and New (1982)	14
	2.2.1.4 Attewell and Woodman (1982)	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	2.3. การวิเคราะห์การทรุดตัวของดินที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์	23
	2.3.1. การเคลื่อนตัวของดินที่เกิดขึ้นบนผิวดิน	23
	2.3.1.1. การเคลื่อนตัวของดินในแนวยาว	23
	2.3.1.2. การเคลื่อนตัวของดินในแนวขวางอันเนื่องจากการขุดเจาะ อุโมงค์เดี่ยว	26
	2.3.1.3. แนวการทรุดตัวตามขวางอันเนื่องมาจากการขุดเจาะ อุโมงค์คู่	27
	2.4. วิธีทับซ้อนกราฟ	30
	2.5. ประโยชน์จากการทบทวนวรรณกรรม	32
3	เครื่องมือตรวจวัดงานอุโมงค์	
	3.1. เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวระดับลึก	33
	3.2. เครื่องมือวัดการทรุดตัวระดับลึก	62
	3.2.1. Magnetic extensometer	68
	3.2.2. Sondex extensometer	70
	3.2.3. Settlement probe	74
	3.2.4. Borros point	76
	3.2.5. Tensioned and Untensioned rod extensometer	79
	3.3. Piezometer	85
	3.3.1. Standpipe piezometer	91
	3.3.2. Hydraulic piezometer	94
	3.3.3. Pneumatic piezometer	95
	3.3.4. Vibrating wire piezometer	96
	3.4. Tape extensometer	101
	3.5. Pressure cells	106
	3.5.1. Total pressure cell	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	3.5.2. Jackout pressure cell	113
	3.5.3. Pressure cell for tunnels	115
	3.6. Strain gauges	118
	3.6.1. Surface mount strain gauge	122
	3.6.2. Embedment strain gauge	127
	3.7. Beam sensors และ Tiltmeter	130
	3.7.1. Beam sensor	133
	3.7.2. Tiltmeter	138
	3.8. หมุดวัดการทรุดตัวระดับผิวดิน	142
	3.8.1 หมุดวัดการทรุดตัวระดับผิวดินด้านขนานอุโมงค์	142
	3.8.2 หมุดวัดค่าการทรุดตัวบนผิวดินเป็นแนวขวาง	147
4.	โปรแกรมวิเคราะห์การทรุดตัวของดินบริเวณแนวอุโมงค์	
	4.1. ทฤษฎีและการคำนวณ	151
	4.1.1 การคำนวณการทรุดตัวแบบอุโมงค์เดี่ยว	151
	4.1.2 การคำนวณการทรุดตัวแบบอุโมงค์คู่	152
	4.1.2.1 อุโมงค์คู่แนวตั้ง	156
	4.1.2.2 อุโมงค์คู่แนวนอน	157
	4.2. คู่มือการใช้งานโปรแกรม	162
	4.3. กรณีศึกษา	167
5.	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	183
	บรรณานุกรม	184

สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
2.1.	แสดงข้อมูลการทรุดตัวของดินช่วงต่างๆ (after O'Reilly and New; 1982)	15
4.1.	แสดงค่าการทรุดตัวของอุโมงค์คู่ในแนวราบจากสถานีหัวลำโพงถึง สถานีวัดมงคล	169
4.2.	แสดงค่าการทรุดตัวของอุโมงค์คู่ในแนวตั้งจากสถานีหัวลำโพงถึง สถานีวัดมงคล	169
4.3.	แสดงค่าการทรุดตัวของอุโมงค์คู่ในแนวตั้งระหว่างสถานีวัดมงคลถึง สถานีวังบูรพา	172
4.4.	แสดงค่าการทรุดตัวของอุโมงค์คู่ในแนวตั้งระหว่างสถานีวังบูรพาถึง สถานีสนามไชย	177
4.5.	แสดงค่าการทรุดตัวของอุโมงค์คู่ในแนวราบระหว่างสถานีวังบูรพาถึง สถานีสนามไชย	177

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ญ

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
2.1.	การสูญเสียมวลดินที่ผิวหน้าของหัวเจาะ	5
2.2.	การสูญเสียมวลดินจากการตัดดินเกินเส้นรอบวงของหัวเจาะ	5
2.3.	มวลดินที่สูญเสียจากการเอียงของหัวเจาะขณะขุดอุโมงค์	6
2.4.	การสูญเสียมวลดินที่เกิดจากการรบกวนมวลดินขณะเลื่อนหัวเจาะ	6
2.5.	การสูญเสียมวลดินที่เกิดจากช่องว่างหลังหัวเจาะ	7
2.6.	รูปแสดงการเสียรูปของมวลดินจากการขุดเจาะอุโมงค์	8
2.7.	รูปแสดงผิวหน้าเหนือหัวเจาะที่มีปริมาตรสมมูลเป็นบวก	8
2.8.	แบบจำลองแสดงกระบวนการทรุดตัวแบบ stochastically (after Attewell, 1978)	11
2.9.	ความน่าจะเป็นของเส้นโค้งที่ใช้อธิบายการทรุดตัวทางขวาง	12
2.10.	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัว พารามิเตอร์และความลึกของอุโมงค์	13
2.11.	การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของดินรอบๆแบบจำลองอุโมงค์ในดินเหนียว	16
2.12.	การเปลี่ยนแปลงช่วงกว้างของพารามิเตอร์ของอุโมงค์ในดินเหนียว	17
2.13.	การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของดินรอบๆดินทราย (after Potts, 1976)	18
2.14.	การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของดินรอบๆดินทราย (after Potts, 1976)	19
2.15.	รูปตัดแสดงการทรุดตัวของทราย	19
2.16.	การทรุดตัวตามยาวบนผิวหน้าเนื่องจากการการขุดเจาะอุโมงค์	20
2.17.	ระบบพิกัดของอุโมงค์สำหรับการทรุดตัวตามยาวบนผิวหน้า (after Attewell and Woodman, 1982)	21
2.18.	รูปร่างการทรุดตัวตามแนวยาวที่เสนอโดยAttewell and Woodman (1982)	22
2.19.	กราฟแสดงแนวโน้มการทรุดตัวในแนวยาวของอุโมงค์	25
2.20.	รูปแบบการเคลื่อนตัวของดินบริเวณหน้าหัวเจาะ	25
2.21.	แสดงการทรุดตัวตามขวางของอุโมงค์เดี่ยวโดยใช้วิธีการของ peck	26
2.22.	แนวการทรุดตัวที่สมมาตรเหนืออุโมงค์เดี่ยว	27
2.23.	แนวการทรุดตัวที่สมมาตรเหนืออุโมงค์คู่	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
2.24.	แนวการทรุดตัวที่ไม่สมมาตรเหนืออุโมงค์คู่	27
2.25.	แสดงการใช้ Gaussian curve อธิบายแนวการทรุดตัวของผิวดิน	28
2.26.	แสดง Addition Settlement หลังจากหัวขุดเจาะแรกเจาะผ่าน	31
2.27.	การทรุดตัวของผิวดินและแนวการทรุดตัวที่แสดงโดย Gaussian Curve และ Superposition Curve	31
2.28.	แสดงค่า Trough Width Parameter (i) ที่แนะนำโดย O'Reilly and New (1982)	32
3.1.	แสดงสัญลักษณ์ของเครื่องมือต่างๆ	33
3.2.	ตำแหน่งของเครื่องมือในการ Cut and Fill Tunnel	34
3.3.	ตำแหน่งและชนิดเครื่องมือของอุโมงค์ดินและดินที่ไม่มั่นคง	35
3.4.	ตำแหน่งและชนิดเครื่องมือของอุโมงค์ลึกในหิน	36
3.5.	วัดค่าการเคลื่อนตัวในบริเวณที่เกิดแรงเฉือน	39
3.6.	ใช้ตรวจสอบการเคลื่อนที่ของดินที่มีผลต่อ สิ่งก่อสร้างข้างเคียง ความมั่นคง และระบบค้ำยัน	40
3.7.	ติดตามค่าการเคลื่อนตัวของดินรอบอุโมงค์ขณะขุดเจาะ	40
3.8.	ติดตามค่าเสถียรภาพและการเคลื่อนตัวของดินด้านข้างเขื่อน	41
3.9.	ใช้วัดการเคลื่อนตัวของดินด้านหลังเขื่อน และการเคลื่อนตัวของคอนกรีตที่ด้านหน้า	42
3.10.	วัดการเคลื่อนตัวของดินบริเวณที่เกิดแรงเฉือน	42
3.11.	ใช้วัดการเคลื่อนตัวของดินในบริเวณที่ตัดดินออก	43
3.12.	ติดตามเสถียรภาพของเขื่อนและการเคลื่อนตัวของบริเวณที่เกิดแรงเฉือน	43
3.13.	ติดตามการบิด การหมุน และการเคลื่อนที่ของเขื่อน	44
3.14.	วัดการตัดและตรวจสอบการหมุนในกำแพงกันดิน	44
3.15.	ติดตามค่าการค้ำของเสาเข็ม	45
3.16.	แสดงส่วนประกอบของ Inclinator	46
3.17.	ตัวอย่าง Casing ชนิดต่างๆ	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
3.18.	แสดง Inclinator Probe	48
3.19.	แสดง readout unit	48
3.20.	Inclinator	49
3.21.	หลักการทํางานของ Inclinator	50
3.22.	แสดงการเบี่ยงตัวด้านข้าง	51
3.23.	ลักษณะของ O-ring	53
3.24.	การติดตั้งแบบ Grout Valve	55
3.25.	การติดตั้งแบบ Pre-Grouted Borehold	56
3.26.	แสดงทิศทางของ A ₀ A ₁₈₀ B ₀ B ₁₈₀	57
3.27.	การแสดงตำแหน่งการวัดค่าการเคลื่อนตัวของดินทางด้านข้าง โดยการ ใช้ inclinometer	59
3.28.	แสดงการเคลื่อนตัวของดินในทิศทางตั้งฉากกับอุโมงค์	60
3.29.	แสดงการเคลื่อนตัวของดินในทิศทางขนานกับอุโมงค์	61
3.30.	ติดตามค่าการทรุดตัวแนวคิ่งที่ฐานของเขื่อน(ใช้ Magnetic extensometer)	62
3.31.	ติดตามค่าการทรุดตัวเพื่อสามารถก่อสร้างต่อไปได้ (ใช้ Magnetic extensometer)	63
3.32.	ติดตามค่าการทรุดตัวของดินอัดตัวคายน้ำ(Consolidation)	63
3.33.	ติดตามเสถียรภาพของเขื่อน (ใช้ Rod extensometer)	64
3.34.	ติดตามเสถียรภาพของอุโมงค์ (ใช้ Rod extensometer)	64
3.35.	ติดตามเสถียรภาพ การทรุดตัว และการหมุน	65
3.36.	ติดตามขนาดและอัตราการเคลื่อนตัว (ใช้ Rod extensometer)	65
3.37.	ติดตามค่าแรงอัดในเสาเข็ม และการเคลื่อนตัวของดินใต้เสาเข็ม	66
3.38.	แสดงความแตกต่างของ Extensometer ในแบบ Probe และแบบ Rod	67
3.39.	ส่วนประกอบของMagnetic Extensometer	68
3.40.	แสดงการติดตั้ง Megnetic Extensometer	69
3.41.	ส่วนประกอบของ Sondex extensometer	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
3.42.	แสดงการติดตั้ง Sondex extensometer	71
3.43.	Magnetic extensometer และ Sondex extensometer	73
3.44.	หัวอ่านประเภท USBR และ Hook	74
3.45.	Settlement probe แบบ Hook และ USBR	75
3.46.	Borros anchor	76
3.47.	แสดงการติดตั้งHeave-Settlement Point	77
3.48.	Borros point	78
3.49.	Tension & Untension Rod Extensometer	79
3.50.	Depth Micrometer และ Top Caps สำหรับป้องกันส่วนหัวอ้างอิง(Reference Head)	79
3.51.	Multi-Point Rod Extensometer	80
3.52.	ติดตามแรงดันน้ำขณะปั้มน้ำเข้า	85
3.53.	ติดตามแรงดันน้ำก่อนเสาเข็มรับน้ำหนัก	86
3.54.	หาแรงดันน้ำด้านต่างๆที่กระทำกับโครงสร้าง	86
3.55.	หาแรงดันน้ำในดินที่ถูกบดอัด	87
3.56.	แรงดันและติดตามการเปลี่ยนแปลง ณ. จุดต่างๆ	87
3.57.	ติดตามแรงดันตำแหน่งต่างๆระหว่างปั้มน้ำออก	88
3.58.	ติดตามแรงดันน้ำที่กำแพงกันดิน	88
3.59.	ติดตามแรงดันในบริเวณที่อาจเกิดการเคลื่อนตัว	89
3.60.	ติดตามแรงดันที่ตัวเขื่อนและท้ายเขื่อน	89
3.61.	ติดตามแรงดันใต้ตัวเขื่อน	90
3.62.	การหาค่าระดับน้ำใต้ดินที่หลุมสำรวจ	90
3.63.	ติดตามแรงดัน ณ ตำแหน่งใดๆเพื่อทราบสภาพของเขื่อน	91
3.64.	แสดงวิธีการติดตั้ง Standpipe ในแบบต่างๆ	92
3.65.	แสดงการทำงานของหัวตรวจระดับน้ำ(water level indicator)อย่างง่าย	92
3.66.	ตัวอย่างหัวตรวจระดับน้ำ(water level indicator)และท่อขึ้น(Stand pipe)	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
3.67.	แสดงหลักการทำงานของ Hydraulic piezometer	94
3.68.	แสดงการทำงานของ Pneumatic piezometer	95
3.69.	ส่วนประกอบของหัว Pneumatic piezometer อย่างง่าย	95
3.70.	ตัวอย่างหัว Pneumatic piezometer และ Read out unit	95
3.71.	ส่วนประกอบของหัว Vibrating wire piezometer อย่างง่าย	96
3.72.	ตัวอย่าง Vibrating wire piezometer	97
3.73.	แสดงขั้นตอนการติดตั้ง Standpipe piezometer	98
3.74.	แสดงการติดตั้งหัว Piezometer ชนิดต่างๆในชั้นดินเหนียว	99
3.75.	แสดงวิธีการติดตั้งหัว Piezometer ชนิดต่างๆในชั้นทราย	100
3.76.	รูปแสดงการติดตั้งจุดอ้างอิง(Reference point) ตำแหน่งต่างๆ	101
3.77.	Tape extensometer	101
3.78.	แสดงส่วนประกอบของ Tape extensometer	102
3.79.	จุดอ้างอิง(Reference point)	102
3.80.	Index Mark	102
3.81.	Digital Display	103
3.82.	Groutable Rebar Anchors	104
3.83.	Expansion Anchors	104
3.84.	ติดตั้งEyebolt โดยตรง	105
3.85.	หาค่าของการกระจาย ขนาด และทิศทางของความเค้นรวมในแกนดินเหนียวเจือปูน	106
3.86.	ประมาณค่าแรงดันที่เกิน(Overburden Pressure)ที่กระทำต่อฐานรากและความเค้นที่เกิด	106
3.87.	วัดค่าความเค้น(Total Stress)รวมที่กระทำต่อฐานราก	107
3.88.	หาค่าความเค้นและแรงดันที่กระทำต่อโครงสร้าง	108
3.89.	ใช้วัดความเค้นในShotcrete(รูปบน) และความเค้นที่กระทำต่ออุโมงค์(รูปล่าง)	108
3.90.	ใช้ติดตามค่า Active และ Passive Pressure และแรงยกตัวที่เกิดกับฐานราก	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
3.91.	ใช้ยืนยันค่าการออกแบบของ Active Pressure	109
3.92.	Total Pressure Cell	110
3.93.	แสดงการติดตั้ง Total Pressure Cell ในดิน	111
3.94.	แสดงการติดตั้ง Total Pressure Cell ในโครงสร้างสำเร็จรูป	112
3.95.	Jackout Pressure Cell	113
3.96.	แสดงการติดตั้ง Jackout Pressure cell	114
3.97.	Radial และ Tangential Pressure Cells	115
3.98.	Radial Pressure Cells	115
3.99.	Tangential Pressure Cells	115
3.100.	แสดงการติดตั้ง Radial และ Tangential Pressure Cells	116
3.101.	ใช้คำนวณน้ำหนักในโครงข้อหมุนและประมาณค่า bending stress ในคานได้	118
3.102.	สามารถคิดค่า แรงกดเนื่องจาก Post-tension น้ำหนัก และ in-service bending	118
3.103.	ติดตามการกระจายของน้ำหนักใน restraining anchor และการเชื่อมต่อระหว่างสาร grout และดินว่ายังเชื่อมต่อกันอยู่	119
3.104.	ติดตามค่าแรงตัดในผนัง และคำนวณน้ำหนักในชิ้นส่วนค้ำยัน	119
3.105.	ติดตามน้ำหนักที่เกิดขึ้นใน Tie-back bar เพื่อตรวจสอบการสูญเสียแรงดึง	120
3.106.	ใช้หาค่าน้ำหนักกระจายในเข็ม วิเคราะห์การออกแบบ และการก่อสร้าง เสาเข็มแบบหล่อในที่	120
3.107.	ติดตามการรับน้ำหนักในเส้นเอ็น	121
3.108.	ใช้หาค่าการกระจายของน้ำหนัก และตรวจสอบแรงตัด	121
3.109.	ส่วนประกอบของ Surface Mount Strain Gauge	122
3.110.	การติดตั้ง Mounting plate กับ โครงสร้างเหล็ก	123
3.111.	การติดตั้ง Mounting plate กับ โครงสร้างคอนกรีต	125
3.112.	ส่วนประกอบของ Embedment Strain Gauge	126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
3.113.	การติดตั้ง Embedment Strain Gauge	128
3.114.	ตรวจวัดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างใกล้กำแพงกันดิน	130
3.115.	ตรวจวัดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์	131
3.116.	วัดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างบริเวณที่อาจเกิดการพังทลายของดิน	131
3.117.	ตรวจวัดการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างวงปิด	132
3.118.	ตรวจวัดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างสะพาน	132
3.119.	แสดงการติดตั้งและอุปกรณ์ของ EL-Beam Sensor	134
3.120.	แสดงทิศทาง แขนที่วางในแนวราบ (Horizontal beam)	134
3.121.	แสดงทิศทาง แขนที่วางตัวในแนวตั้ง (Vertical beam)	135
3.122.	แสดงการติดตั้ง Vertical-Beam Sensor	136
3.123.	ประกอบการคำนวณ	137
3.124.	ตัวอย่าง Tilt meter และอุปกรณ์	138
3.125.	แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ Tiltmeter เข้ากับโครงสร้าง	139
3.126.	ประกอบความเข้าใจการแปลผลข้อมูล	140
3.127.	แสดงการวัดค่าการทรุดตัวของดินในแนวนานกับอุโมงค์	143
3.128.	ตำแหน่งหมุดวัด (Settlement marker)	143
3.129.	แสดงระยะการทรุดตัวตามแนวยาวบนผิวดินที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์	144
3.130.	แสดงการทรุดตัวตามยาวบนผิวดินในรูปของกราฟ	145
3.131.	แสดงผลการวัดค่าการทรุดบนผิวดินตามแนวนานอุโมงค์ในรูปของกราฟ	146
3.132.	แสดงการวัดการทรุดตัวของดินในแนวขวางกับตัวอุโมงค์	148
3.133.	แสดงผลการวัดค่าการทรุดบนผิวดินตามแนวขวางอุโมงค์ในรูปของกราฟ	149
3.134.	แสดงผลการวัดค่าการทรุดบนผิวดินตามแนวขวางอุโมงค์ในรูปของกราฟ	150
4.1.	แสดงการทรุดตัวแบบอุโมงค์เดี่ยว	152
4.2.	แสดงการทรุดตัวแบบสมมาตรในอุโมงค์คู่แนวนอน	153
4.3.	แสดงการทรุดตัวแบบไม่สมมาตรในอุโมงค์คู่แนวนอน	154
4.4.	แสดงการทรุดตัวของอุโมงค์คู่ในแนวตั้ง	155

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
4.5.	แสดงค่าความลึก z ของอุโมงค์คู่แบบตั้ง	156
4.6.	แสดงค่าระยะตามแกน x ของอุโมงค์คู่แบบนอนที่ $x \leq 0$	157
4.7.	แสดงค่าระยะตามแกน x ของอุโมงค์คู่แบบนอนที่ $x \geq 0$	158
4.8.	แสดงตำแหน่งของอุโมงค์ที่ 1 และ 2 ในกรณีที่ 1	160
4.9.	แสดงตำแหน่งของอุโมงค์ที่ 1 และ 2 ในกรณีที่ 2	160
4.10.	แสดงตำแหน่งของอุโมงค์ที่ 1 และ 2 ในกรณีที่ 3	161
4.11.	แสดงตำแหน่งของอุโมงค์ที่ 1 และ 2 ในกรณีที่ 4	161
4.12.	แสดงส่วนต่างๆของโปรแกรม	162
4.13.	แสดงหน้าต่างโปรแกรมเมื่อเปิดขึ้น และพร้อมใช้งาน	163
4.14.	แสดงการค้นหาและป้อนภาพแผนที่	164
4.15.	แสดงหน้าต่างโปรแกรมเมื่อยืนยันการป้อนภาพแผนที่	164
4.16.	แสดงการป้อนค่าตัวแปรในโปรแกรมทั้งอุโมงค์เดี่ยว และอุโมงค์คู่	165
4.17.	แสดงเส้นอิทธิพลของการทรุดตัวบนแผนที่	165
4.18.	แสดงค่าการทรุดตัวออกมาในรูปแบบของกราฟ	166
4.19.	แสดงการแก้ค่าตัวแปรในโปรแกรม	166
4.20.	แสดงผลการวิเคราะห์หลังจากยืนยันค่าตัวแปรใหม่	167
4.21.	แสดงแนวเส้นทางจากสถานีหัวลำโพงถึงสถานีสนามไชย	168
4.22.	ข้อมูลการก่อสร้างอุโมงค์ตั้งแต่สถานีหัวลำโพงถึงสถานีวัดมงคล	169
4.23.	แสดงแนวการทรุดตัวระหว่างสถานีหัวลำโพงถึงสถานีวัดมงคล(จุด 1 ถึงจุด 2)	170
4.24.	แสดงการทรุดตัวของอุโมงค์คู่แนวตั้งก่อนถึงสถานีวัดมงคล(จุด 2 ถึงจุด 3)	171
4.25.	ข้อมูลการก่อสร้างอุโมงค์ระหว่างสถานีวัดมงคลถึงสถานีวังบูรพา	172
4.26.	แสดงการทรุดตัวของอุโมงค์คู่ในแนวตั้ง ระหว่างสถานีวัดมงคลถึงสถานีวังบูรพา(จุด 3 ถึงจุด 4)	173
4.27.	แสดงการทรุดตัวของอุโมงค์คู่ในแนวตั้ง ระหว่างสถานีวัดมงคลถึงสถานีวังบูรพา(จุด 4 ถึงจุด 5)	174

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
4.28.	แสดงการทรวดตัวของอุโมงค์คูในแนวตั้ง ระหว่างสถานีวัดมงคลถึงสถานีวังบูรพา(จุด 5 ถึงจุด 6)	175
4.29.	แสดงการทรวดตัวของอุโมงค์คูในแนวตั้ง ระหว่างสถานีวัดมงคลถึงสถานีวังบูรพา(จุด 6 ถึงจุด 7)	176
4.30.	ข้อมูลการก่อสร้างอุโมงค์ระหว่างสถานีวังบูรพาถึงสถานีสนามไชย	177
4.31.	แสดงการทรวดตัวของอุโมงค์คูในแนวตั้ง ระหว่างสถานีวังบูรพาถึงสถานีสนามไชย(จุด 7 ถึงจุด 8)	178
4.32.	แสดงการทรวดตัวของอุโมงค์คูในแนวตั้ง ระหว่างสถานีวังบูรพาถึงสถานีสนามไชย(จุด 8 ถึงจุด 9)	179
4.33.	แสดงการทรวดตัวของอุโมงค์คูในแนวราบ ระหว่างสถานีวังบูรพาถึงสถานีสนามไชย(จุด 9 ถึงจุด 10)	180
4.34.	แสดงการทรวดตัวของอุโมงค์คูในแนวราบ ระหว่างสถานีวังบูรพาถึงสถานีสนามไชย(จุด 10 ถึงจุด 11)	181
4.35.	แสดงการทรวดตัวของอุโมงค์คูในแนวราบ ระหว่างสถานีวังบูรพาถึงสถานีสนามไชย(จุด 11 ถึงจุด 12)	182

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

การก่อสร้างสิ่งก่อสร้างได้ดินจะรบกวนเสถียรภาพของดิน จึงทำให้ต้องศึกษาพฤติกรรมและการเคลื่อนตัวของดิน ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึง ความเป็นมา ความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขต และผลที่คาดว่าจะได้รับจากการดำเนินโครงการพิเศษนี้

1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันตัวเมืองอย่างกรุงเทพมหานครนี้มีประชากรอาศัยอยู่อย่างหนาแน่น จึงต้องมีการก่อสร้างระบบสาธารณูปโภคและระบบขนส่งมวลชนขนาดใหญ่เกิดขึ้น เพื่อให้เพียงพอต่อการรองรับประชากรจำนวนมากได้ แต่เนื่องจากการเติบโตของเมืองเป็นไปอย่างรวดเร็ว ทำให้สิ่งก่อสร้างบนดินและผิวดินต่างๆเกิดขึ้นอย่างหนาแน่น และเพื่อใช้พื้นที่ให้คุ้มค่าที่สุด จึงจำเป็นต้องก่อสร้างบางส่วนของระบบดังกล่าวไว้ใต้ดินลึก เพราะไม่สามารถก่อสร้างบนผิวดินได้ทั้งหมด

การเคลื่อนตัวของดิน ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างข้างเคียง รวมถึงการป้องกัน และเนื่องจากโครงการสาธารณูปโภคและระบบขนส่งมวลชนต่างๆ เช่น รถไฟฟ้า คลองส่งน้ำ คลองระบายน้ำมีโครงข่ายที่ครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง จึงจำเป็นต้องก่อสร้างบางส่วนของโครงการดังกล่าวไว้ใต้ดินลึก อันเป็นที่มาของการก่อสร้างอุโมงค์ต่างๆ ใต้ดิน ซึ่งยังถือเรื่องใหม่ในประเทศไทย และยังมีการศึกษาผลกระทบจากก่อสร้างอุโมงค์อยู่อย่างไม่มากนัก จึงเป็นที่มาและมีความสำคัญยิ่งที่จะศึกษาถึงปัจจัยที่ทำให้เกิดการการแก้ไขปัญหาดังกล่าวที่อาจจะเกิดขึ้นจากการก่อสร้างอุโมงค์ได้

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

1. ศึกษาลักษณะการเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์
2. ศึกษาวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของดิน
3. สามารถเลือกใช้เครื่องมือติดตามการเคลื่อนตัวของดินได้อย่างเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สามารถบอกถึงบริเวณที่อาจจะเกิดผลกระทบจากการเคลื่อนตัวของดินและนำเสนอให้ฝ่ายต่อความเข้าใจของบุคคลทั่วไป

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในโครงการพิเศษ

โครงการพิเศษเรื่อง ศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบการเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากการสร้างอุโมงค์ ได้พิจารณาองค์ประกอบทางเทคนิคโดยรวมดังนี้

- 1.คุณสมบัติการสูญเสียมวลดิน(Ground loss) เนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์
- 2.ทฤษฎีต่างๆในการทำนาค่าการเคลื่อนตัวของดิน
- 3.พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินทั้งแนวยาวและแนวขวาง

1.5 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

- 1.ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะการเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์
- 2.ศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากปัจจัยขั้นต้น
- 3.ศึกษาวิธีการทดสอบ วัดการเคลื่อนตัวของดินในปัจจุบันเนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์
- 4.ศึกษาการเคลื่อนตัวของดินและวิเคราะห์ผลกระทบที่มีต่อสิ่งก่อสร้างข้างเคียง กรณีศึกษาโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยายจากหัวลำโพงถึงสนามไชย
- 5.ศึกษาและพัฒนาโปรแกรมเพื่อนำเสนอถึงขอบเขตและผลกระทบที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของดิน

1.6 วิธีที่ใช้ในการดำเนินงาน

- 1.ดำเนินการศึกษาข้อมูลของปัญหา และข้อมูลที่เป็นปัญหาเนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์ และการก่อสร้างอุโมงค์ในอดีต
 - 2.ดำเนินการศึกษาถึงทฤษฎีและปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของดินเนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์
 - 3.ศึกษากรณีศึกษาต่างๆในการก่อสร้างอุโมงค์ เพื่อนำผลที่ได้มาเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ผลกระทบต่อไป
 - 4.ดำเนินการศึกษาวิธีการวัด การแปลผลข้อมูล และทดสอบเครื่องมือที่ใช้ในการวัดการเคลื่อนตัวของดินในแนวราบและแนวตั้ง โดยการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนตัวของดิน
 - 5.รวบรวมข้อมูลทั้งหมดที่ได้ศึกษามาเพื่อใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินในบริเวณต่างๆ
 - 6.ดำเนินการศึกษาถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. นำข้อมูลที่ได้ศึกษามานำเสนอในรูปแบบที่ง่ายที่การเข้าใจ

1.7 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการดำเนินโครงการพิเศษ

สามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการก่อสร้างอุโมงค์หรือใช้ในการพิจารณาเทคนิคที่จะใช้ในการก่อสร้างอุโมงค์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 การตอบสนองของดินซึ่งถูกก่อให้เกิดขึ้นโดยหัวเจาะอุโมงค์

โดยทั่วไป การขุดเจาะดินอ่อนส่งผลต่อการเสถียรของดินในสองทาง ก็คือ การเสถียรที่มีสาเหตุโดยตรงมาจากการเจาะอุโมงค์ การเสถียรในลักษณะสำคัญมักจะอธิบายได้โดยการสูญเสียดิน (ground loss) อีกข้อหนึ่งก็คือ การทรุดตัว ซึ่งจัดเป็นการทรุดตัวในระยะยาว ที่มีสาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของความเครียดรอบๆ อุโมงค์ การทรุดตัวในกรณีนี้มักจะเกิดในระยะยาว หลังจากที่มีการขุดเจาะ ซึ่งขึ้นอยู่กับ เงื่อนไขของดิน การศึกษาี้ เราจะพูดถึงแค่เพียงการสูญเสียดิน ซึ่งเกิดจากการขุดเจาะและเกิดขึ้นระหว่างการการขุดเจาะ

การสูญเสียดินมีสองประเภท ประเภทแรกเกิดขึ้นในปีแรกของพัฒนาหัวเจาะ การสูญเสียดินอาจเกิดขึ้นโดยทันที ไม่สามารถควบคุมได้และมีลักษณะรุนแรง เหตุที่เป็นอย่างนี้เนื่องมาจากการเคลื่อนตัวของหัวเจาะ การไหลของดินและน้ำลงสู่ผิวหน้าของอุโมงค์ อย่างไรก็ตาม หลังจากที่ เทคนิค close face shield tunneling ได้ถูกแนะนำ ซึ่งผิวหน้าของอุโมงค์อยู่ภายใต้การควบคุมโดยแรงดันอากาศ แรงดันของโคลน หรือแรงดันของดินที่ถูกให้ที่ด้านหน้าของหัวเจาะ การเคลื่อนตัวของดินอย่างรุนแรงจะสามารถป้องกันได้ ดังนั้น เราจะไม่กล่าวถึงอีก

การสูญเสียดินในประเภทที่สองเกิดขึ้นมาจากกระบวนการการขุดเจาะดินซึ่งในทางปฏิบัติแล้วมักจะต้องควบคุมปริมาณการสูญเสียมวลดินหรือ ground loss ให้ต่ำที่สุด โดยปัจจัยสำคัญของการสูญเสียมวลดินอันได้แก่ ขนาดของอุโมงค์ วิธีการขุดเจาะ ชนิดและสภาพของดินเป็นสำคัญ

$$\text{ground loss(\%)} = \frac{(\text{ปริมาณมวลดินที่ไหลเข้าอุโมงค์ต่อหนึ่งหน่วยเมตร}) \times 100}{\text{ปริมาตรของอุโมงค์ต่อหนึ่งหน่วยเมตร}} \quad (2.1)$$

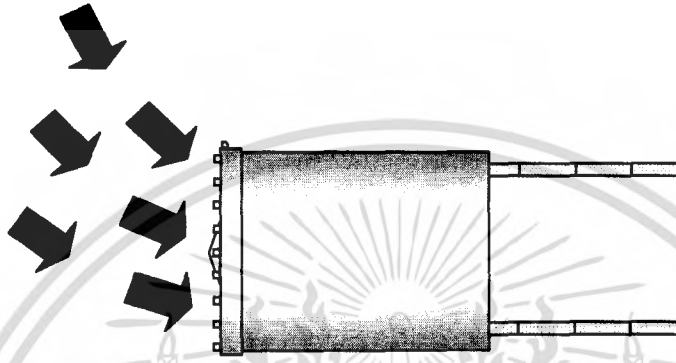
$$\text{ปริมาตรของอุโมงค์ต่อเมตร ในกรณีอุโมงค์กลม} = \frac{(\pi D^2)}{4} \times 1 \text{ เมตร}$$

โดย D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา ⁴ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

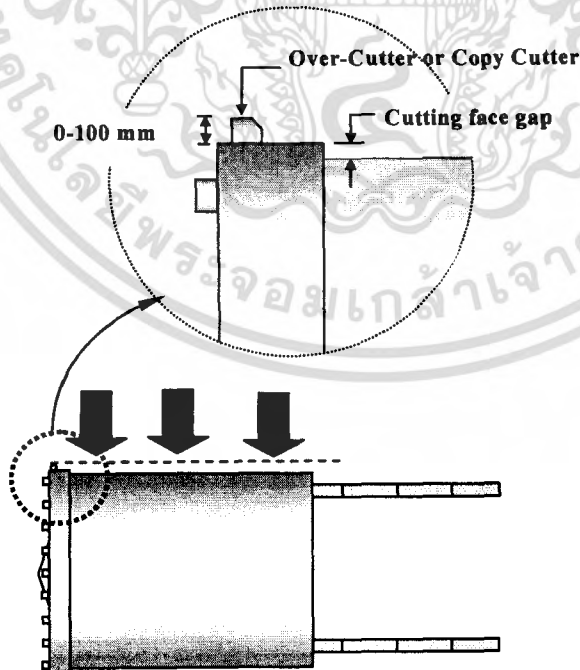
โดยการสูญเสียมวลดินเหนือหัวเจาะจะเกิดขึ้นได้ 5 ระยะดังรูป 2.1 – 2.5 (ความเป็นไปได้รูปแบบหลักๆสำหรับการสูญเสียมวลดินดิน)

ระยะที่ 1 การสูญเสียที่ผิวหน้าอุโมงค์เกิดขึ้นเมื่อใช้หัวเจาะแบบเปิด หรือเมื่อหัวเจาะมีความดันที่ต่ำ ทำให้ดินสามารถเคลื่อนตัวไปที่ผิวหน้าได้ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในกรณีนี้ ปริมาตรเป็นลบ หรือปริมาตรส่วนมากจะถูกเอาออก



รูปที่ 2.1 การสูญเสียมวลดินที่ผิวหน้าของหัวเจาะ

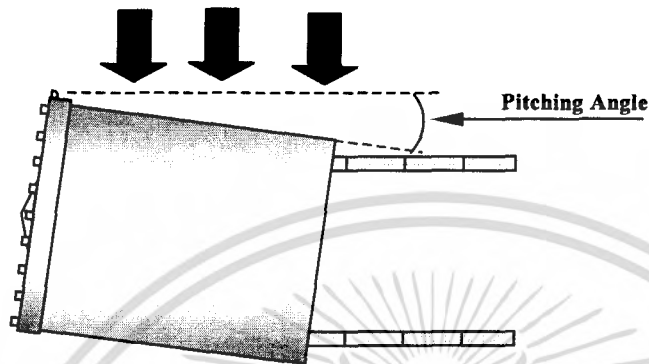
ระยะที่ 2 การขุดเจาะที่มากเกินไปด้านนอกอุโมงค์โดยรอบบริเวณผิวหน้าของเครื่องจักรซึ่งถูกทำให้เกิดโดยการมีใบพัดที่ใหญ่เกินไป



รูปที่ 2.2 การสูญเสียมวลดินจากการตัดดินเกินเส้นรอบวงของหัวเจาะ

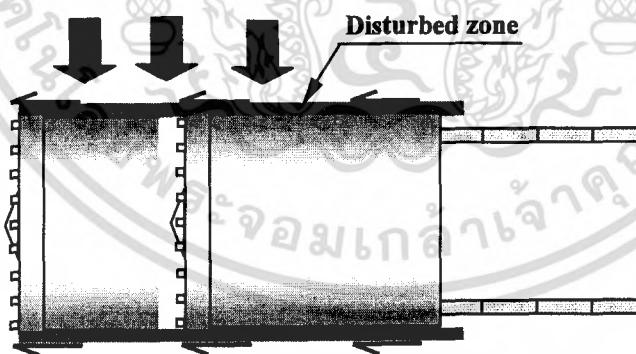
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา⁵ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะที่ 3 การไหลหรือการออกนอกเส้นทางของเครื่องจักรซึ่งเกิดขึ้นจากการเหวี่ยงสามารถตัดให้เกิดวงรีขนาดใหญ่ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่าหัวเจาะ ดังรูปที่ 2.3 ณ ที่มุมที่เกิดจากการเหวี่ยง ในทางทฤษฎี หัวเจาะที่มีขนาดยาวจะทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ได้มากกว่าหัวเจาะที่มีขนาดสั้น



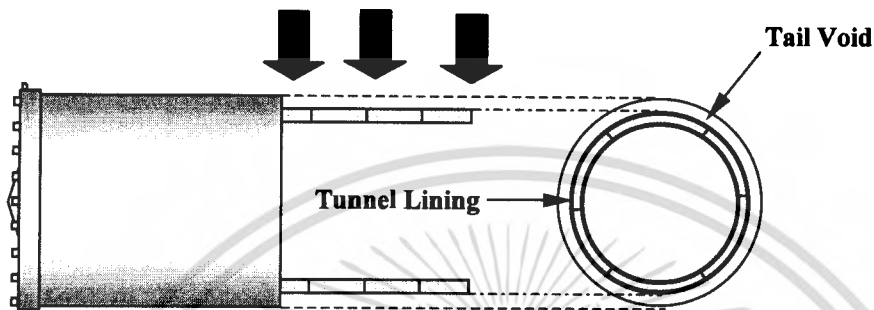
รูปที่ 2.3 มวลดินที่สูญเสียจากการเอียงของหัวเจาะขณะขุดคูโมงค์

ระยะที่ 4 บริเวณที่ถูกรบกวนหรือเกิดการแข็งตัวใหม่รอบๆ ผิวหน้าของหัวเจาะเนื่องมาจาก การเคลื่อนอย่างแรงของหัวเจาะที่มีเส้นศูนย์กลางขนาดใหญ่ สามารถเกิดการเคลื่อนตัวของดินเหนือหัวเจาะ รูปที่ 2.4



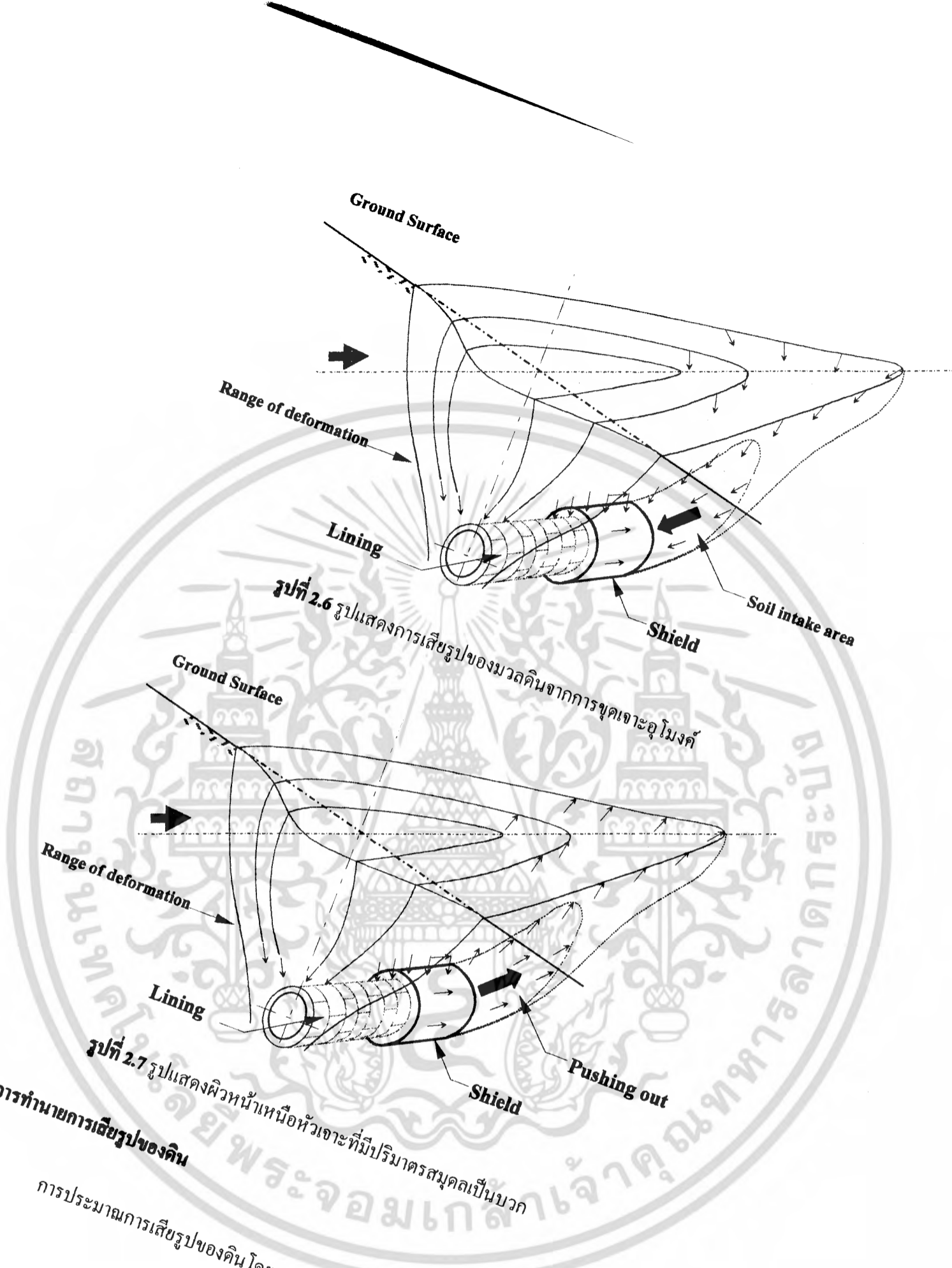
รูปที่ 2.4 การสูญเสียมวลดินที่เกิดจากการรบกวนมวลดินขณะเลื่อนหัวเจาะ

ระยะที่ 5 ช่องว่างที่ส่วนท้ายของหัวเจาะหลังจากที่หัวเจาะผ่านเข้าไปทำให้เกิดการเสียดรูปของดินที่มีองค์ประกอบเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากดินที่อยู่ด้านนอกเคลื่อนเข้ามาในช่องว่าง ช่องว่างที่เกิดขึ้นการความแตกต่างของดินที่อยู่รอบๆ การขุดเจาะกับ outer liner surface (รูปที่ 2.5) หนึ่งในวิธี การที่มักจะใช้ก็คือพยายามที่จะกำจัดช่องว่าง โดยการขยายตัวอุโมงค์หรือการก่อสร้างซีเมนต์รอบๆ อุโมงค์ เหมือนกับที่มันเกิดจากด้านท้ายของหัวเจาะก่อนที่ดินเคลื่อนตัวเข้ามาแทนที่ในช่องว่าง



รูปที่ 2.5 การสูญเสียมวลดินที่เกิดจากช่องว่างหลังหัวเจาะ

การเคลื่อนตัวของดินอันเนื่องมาจากการสูญเสียดินโดยตัวมันเองที่ผิวหน้าในช่องที่ขยายไปทางด้านข้างและด้านเหนือของผิวที่เกิดขึ้นมาก่อน รูปที่ 2.6 แสดงให้เห็น รูปสามมิติของ surface settlement ของตัวอุโมงค์ซึ่งถูกทำให้เกิด โดยการสร้างอุโมงค์ในดินอ่อน อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ ปริมาตรของดินที่ขุดออกไปน้อยกว่าปริมาตรของหัวเจาะที่เข้าไปอยู่ในดิน (อย่างเช่น หัวเจาะถูกกำหนดให้มีปริมาตรสมดุลเป็นบวก) ดินจะถูกดึงออก (รูปที่ 2.7) ในกรณีนี้สามารถเป็นผลของการให้แรงดันมากเกินไปที่ด้านหน้าของหัวเจาะ



รูปที่ 2.6 รูปแสดงการเสีรูปร่างของมวลดินจากการขุดเจาะอุโมงค์

รูปที่ 2.7 รูปแสดงผิวหน้าเหนือหัวเจาะที่มีปริมาตรสมดุลเป็นบวก

2.2 วิธีการทำนายการเสีรูปร่างของดิน

การประมาณการเสีรูปร่างของดิน โดยหลักๆ แล้วสามารถทำได้ด้วย 4 วิธีนี้

1. การคำนวณในทางสถิติและการใช้สูตร ทางคณิตศาสตร์ ถูกศึกษาเป็นครั้งแรกโดย Litwinisyn ในปี 1956 ต่อมา ปี 1969 Peck เสนอว่า การกระจายของการทรุดตัวของผิวดินควรที่จะอธิบายได้โดยสูตรที่ใช้เส้นกราฟปกติของความน่าจะเป็น หรือ Gaussian curve ตัวแปรที่นำมาออกแบบถูกใช้ในรูปของ error function รวบรวมมาจากการวัดปริมาณในสนามในอุโมงค์ที่มีสภาพดินที่แตกต่างกัน วิธีการนี้ถูกสนับสนุนโดยการศึกษาของ O'Relly and New ในปี 1982 นอกจากนี้ Attawell and Woodman ยังได้พัฒนาทฤษฎีทางสถิติสำหรับการทำนายการทรุดตัวของผิวน้ำในแนวตั้ง
2. วิธีการวิเคราะห์ ความเครียดของดินและการเคลื่อนตัวถูกคำนวณ โดยวิธีการวิเคราะห์ ผู้ศึกษาหลายคนได้อธิบายวิธีการซึ่งตั้งอยู่บนพื้นฐานของสมการรูปแบบปิด ในปี 1987 Sagaseta ได้แสดงการวิเคราะห์สองมิติของการเสถียรภาพของดินสำหรับการได้รับความเค้นของดินในมาจากดินที่มีคุณสมบัติทางกายภาพเหมือนกันและมีส่วนผสมไม่แน่นอน (อย่างเช่นวิธีการขยายหน้าตัดของความเค้นของ Baligh (1985) โดยการนำดินที่ไม่เคยถูกรบกวน) ในปี(1996)Verruijt And Booker ได้ปรับปรุงวิธีการประมาณที่ถูกคิดโดย Sagaseta เพื่อที่จะให้วิธีการแก้ปัญหาสำหรับกรณีการสูญเสียดินไม่เฉพาะเพียงแต่สำหรับกรณีที่ไม่มีการเอาน้ำออกที่มี Poisson's ratio เท่ากับ 0.5 แต่ยังใช้สำหรับค่าประมาณของ Poisson's ratio เหมือนเดิม ในปี 1998 Loganathan And Poulos ได้ปรับปรุงวิธีการแก้ปัญหของ Verruijt And Booker และละทิ้งองค์ประกอบที่เบี่ยงเบนซึ่งส่งผลในแนวอุโมงค์ที่มีการทรุดตัวของผิวน้ำที่แคบลง ต่อจากนั้น ในปี 1997 Pintoขยายวิธีการแก้ปัญหเชิงวิเคราะห์ เพื่ออธิบายการเสถียรภาพทั้งในผิวและด้านข้างของอุโมงค์
3. Finite Element And Numerical Method เนื่องจากความยากที่เกี่ยวข้องในการสร้างสมการที่เหมาะสมเชิงวิเคราะห์ Finite Element And Numerical Method ได้ถูกนำมาใช้สำหรับปัญหาทางกลศาสตร์ของดินและหิน อย่างไรก็ตามยังคงมีความยากที่เกี่ยวกับความถูกต้องขอตัวแปรเชิงวัสดุและข้อเท็จจริงที่ว่า การจำลองความเค้นในระนาบสองมิติในอุโมงค์ในดินไม่ได้คำนึงถึงการเคลื่อนตัวของดินด้านหน้าผิวน้ำอุโมงค์(Mair And Taylor 1997)อย่างไรก็ตามการทำนายการเคลื่อนตัวของดินที่มีพื้นฐานอยู่บน Finite Element หรือ Numerical Method มีประโยชน์สำหรับการจัดรูปแบบต่างๆไปของการเสถียรภาพในภาคสนาม
4. การทดลองในห้องทดลองอุโมงค์จำลอง Cohesive And Cohesionless ได้ถูกทำขึ้นเพื่อศึกษากระบวนการการเคลื่อนตัวของดินและกาชนที่เกิดจากหัวเครื่องจักร (Atkinsor et al., 1975 Atkinsor And Potts 1977 Kimura And Mair 1981 Nomoto et al., 1999) จากผลการศึกษาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา⁹ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มันถูกแนะนำว่าตัวแปรในการเลือกรูปของดินที่ถูกอธิบายในแบบจำลองสามารถนำมาใช้สำหรับการประมาณรูปร่างของกรทรุดตัวของอุโมงค์และการทรุดตัวอย่างมากของผิวมากไปกว่านั้นผลของการทดลองยังมีประโยชน์ในการตรวจสอบความถูกต้องของสมการทางคณิตศาสตร์

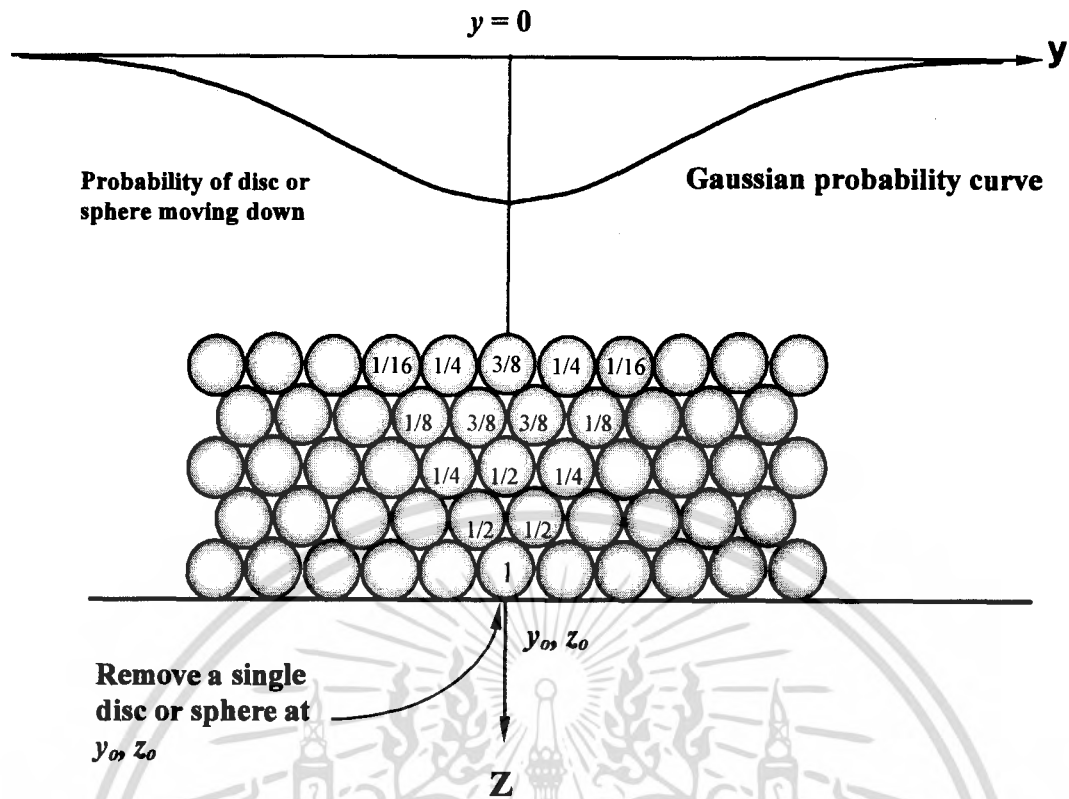
2.2.1 Stochastic and Empirical Methods

2.2.1.1 Litvinniszyn (1956)

กระบวนการทาง Stochastic เป็นหนึ่งในกระบวนการที่ทำตามกฎของความน่าจะเป็นมากกว่ากฎการจำกัด(deterministic laws) มักจะเกี่ยวข้องกับเวลาเนื่องจากเป็นตัวแปรอิสระที่โดดเด่น ในรูปแบบของ Stochastic นี้ดินจะถูกแทนที่ด้วยวัสดุที่มีลักษณะเป็นทรงกลมขนาดเท่าๆกันดังรูปที่ 2.8 การเคลื่อนตัวถูกสร้างขึ้นที่ฐานของชั้นของทรงกลมที่รวมกันอยู่ด้วยการเอาลูกทรงกลมออกหนึ่งลูก การเอาออกนี้สามารถถูกพิจารณาเหมือนกับการเคลื่อนตัวของดินเข้าด้านในหรือการสูญเสียดินที่ตัวอุโมงค์ แบบจำลองนี้ นำไปสู่การทรุดตัวในรูปประฆังหงาย ของอุโมงค์ ในรูปแบบของความน่าจะเป็นปกติหรือ Gaussian curve การพิจารณานี้เกี่ยวข้องกับเลือกรูปของดินแต่ไม่เกี่ยวข้องกับแรงเครียดหรือแรงเค้นจากคุณสมบัติของของดิน

จากแบบจำลองนี้ การทรุดตัวของอุโมงค์ของความน่าจะเป็นปกติสามารถถูกแสดงได้โดย

$$\delta_v(y,z) = \frac{0.8t}{K_a} \left(\frac{z_0 - z}{2a} \right)^{-n} \exp \left[-0.5 \left(\frac{y}{aK_a} \right)^2 \left(\frac{z_0 - z}{2a} \right)^{-2n} \right] \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.8 แบบจำลองแสดงกระบวนการทรุดตัวแบบ stochastically (after Attewell, 1978)

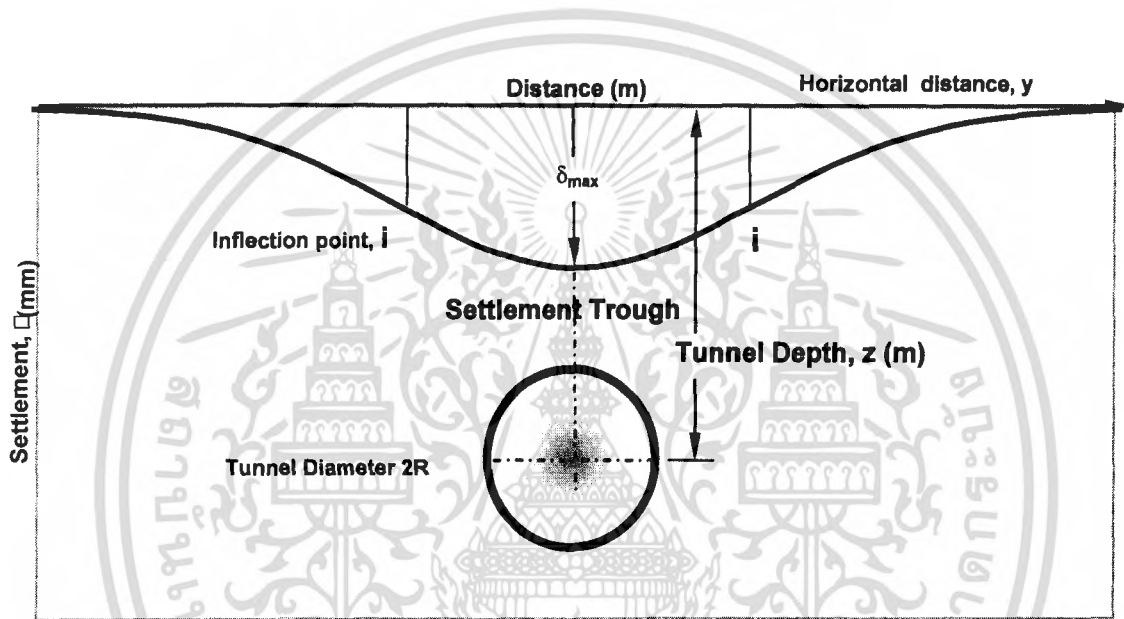
2.2.1.2 Peck (1969)

จากการศึกษาข้อมูลที่มีอยู่ที่ได้จากการขุดเจาะอุโมงค์ ในปี 1969 Peck ได้สังเกตการทรุดตัวของดินเหนืออุโมงค์เดี่ยวๆ มักจะถูกแสดงภายในข้อจำกัดที่มีเหตุมีผลโดย error function หรือ กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ (Gaussian curve) โดยพื้นฐานแล้ว Peck ทำให้สมการ stochastic ของ Litwinniszyn (1956) สมการของ Peck ช่วยให้การประมาณการทรุดตัวสามารถถูกทำได้ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงระยะด้านข้างจากเส้นผ่าศูนย์กลางของอุโมงค์คุณสมบัติที่ต่างประเด็นของ สมการความน่าจะเป็นปกติ และ ความสัมพันธ์ของสมการความน่าจะเป็นต่อมิติของอุโมงค์ได้ถูกแสดงในรูปที่ 2.9 รัศมีของอุโมงค์ถูกแสดงด้วย R และความลึกตั้งแต่ผิวดินจนถึงระดับของอุโมงค์ถูกแสดงด้วยค่า z จุดสูงสุดของกราฟความน่าจะเป็นก็คือ ค่าสูงสุดของการทรุดตัว (maximum settlement) ดังนั้น ค่าการทรุดตัว ณ จุดต่างๆคือ

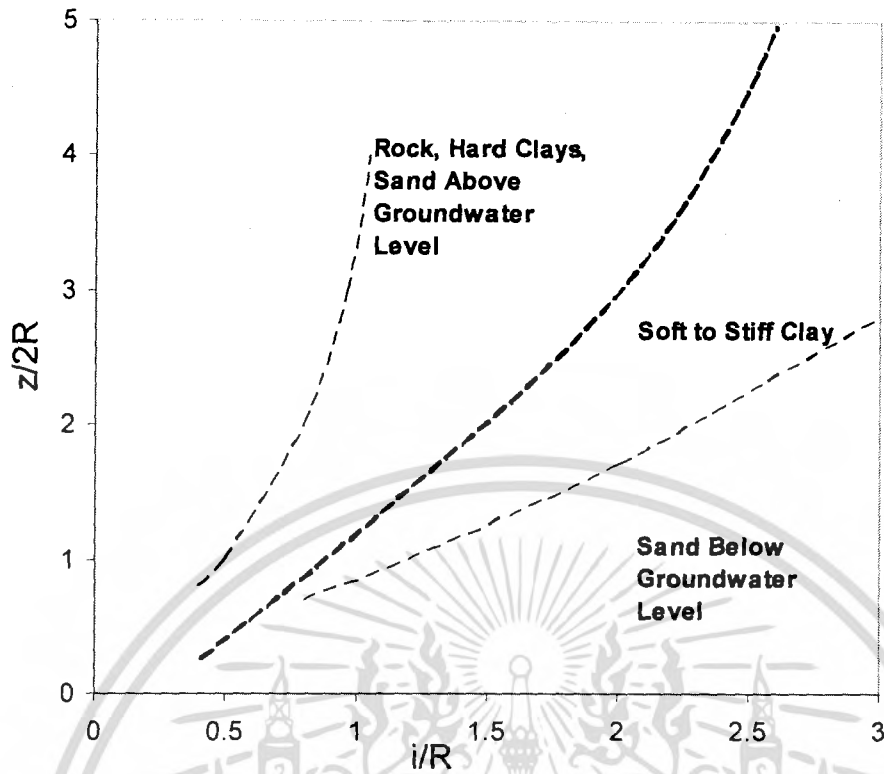
$$\delta = \delta_{\max} \exp\left[-\frac{y^2}{2i^2}\right] \quad (2.3)$$

ค่า δ_{max} ได้ถูกนำมาให้คำอธิบายด้านล่างนี้ ตำแหน่ง inflection ของเส้นกราฟถูกกำหนดที่ค่าระยะทาง i ในอีกด้านหนึ่งของแนวตรงกลางของอุโมงค์ ค่า i ก็คือคุณสมบัติของกราฟความน่าจะเป็นปกติหรือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ $0.61 \delta_{max}$

ค่า i ได้ถูกคำนวณสำหรับอุโมงค์ ซึ่งมีข้อมูลการทรุดตัวที่น่าเชื่อถือ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่ง plot ระหว่าง i/R และ $z/2R$ กราฟแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มและผลที่เกี่ยวข้องกับชนิดของดิน ดังเช่นที่คาดไว้ ยังมีค่าความลึกมากเท่าไร ค่าความกว้างของการทรุดตัวของอุโมงค์จะยิ่งมากขึ้น



รูปที่ 2.9 ความน่าจะเป็นของเส้นโค้งที่ใช้อธิบายการทรุดตัวของอุโมงค์



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัว พารามิเตอร์และความลึกของอุโมงค์ (รายละเอียดข้อมูลของโครงการจริงสามารถหาได้จาก Peck, 1969)

ค่าปริมาณของการทรุดตัวของอุโมงค์ (ยกตัวอย่างเช่น ปริมาตรต่อหน่วยความยาว) มีลักษณะเป็นกราฟความน่าจะเป็นปกติ ดังสมการ

$$V_s = 2.5i \delta_{\max} \quad (2.4)$$

จากการศึกษาในภาคสนามที่รายงานโดย Cording and Hansmire (1975) เขาทั้งสองคนได้สังเกตเห็นว่า อุโมงค์ในดินส่วนมากพัฒนาปริมาณการทรุดตัวโดยประมาณได้เท่ากับปริมาณของดินที่เสียไปจากการสูญเสียดินในตัวอุโมงค์ โดยทั่วไป การสูญเสียดิน (G.L%) ถูกแสดงด้วยค่า ส่วนเปอร์เซ็นต์ของบริเวณที่มีการขุดอุโมงค์ (ยกตัวอย่างเช่น ในอุโมงค์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ D)

$$V_s = \frac{G.L\%}{100} \left(\pi \frac{D^2}{4} \right) \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น δ_{\max} สามารถหาได้ถ้ารู้ค่าการสูญเสียดิน

2.2.1.3 O'Relly and New (1982)

O'Relly and New เสนอว่าการเคลื่อนตัวของดินเหนืออุโมงค์ สามารถประมาณจากการใช้ empirical methods เหมือนกับ Peck ซึ่งมีพื้นฐานอยู่บนข้อมูลที่มีมาก่อน โดยทั่วไป สูตรที่ถูกรายงานโดย O'Relly and New (1982) มีรากฐานอยู่บนค่าการประเมินทางสถิติจากการสังเกตการณ์ในภาคสนามของการทรุดตัวของดินเหนือ tabular mine opening (Litwinniszyn, 1956)

O'Relly and New (1982) สมมติว่า การเคลื่อนตัวทั้งหมดในดิน เกิดขึ้นจากดินที่เกิดขนานไปกับ Radial path ที่นำไปสู่แกนของอุโมงค์ และการเคลื่อนตัวเกิดในสภาพที่ได้ให้ค่าความเค้นคงตัวของปริมาตรของการเสียรูปของดิน

สมมติฐานนี้ได้รับการสนับสนุนโดยข้อมูลการวัดในภาคสนามและผลของการทำ centrifuge tests อุโมงค์จำลองที่สร้างจากดินอ่อน ดังรูปที่ 2.11 ข้อมูลที่มีอยู่พยายามที่จะให้คำแนะนำว่า การไหลถูกกำหนดทิศทางให้ตรงกับ sink ซึ่งถูกกำหนดให้มีตำแหน่งที่จุดซึ่งจะอยู่ได้ระดับแกนของอุโมงค์

พัฒนาการของ Radial flow assumption หมายความว่า ความกว้างของบริเวณที่มีการเสียรูปของดินลดลงโดยเป็นเส้นตรงกับความลึกใต้ระดับของผิวดิน ผลของการเคลื่อนตัวของดินอย่างมากเพิ่มขึ้นโดยเป็นเส้นตรงกับความลึกใต้ผิว เป็นไปตาม สมการปริมาตรความเค้นคงตัวในแนวระนาบ (the plane strain constant volume assumption) :

$$i = Kz \quad (2.6)$$

i = inflection point (เช่น ค่าความกว้างของอุโมงค์) ที่ความสูง (z) เหนือแกนอุโมงค์

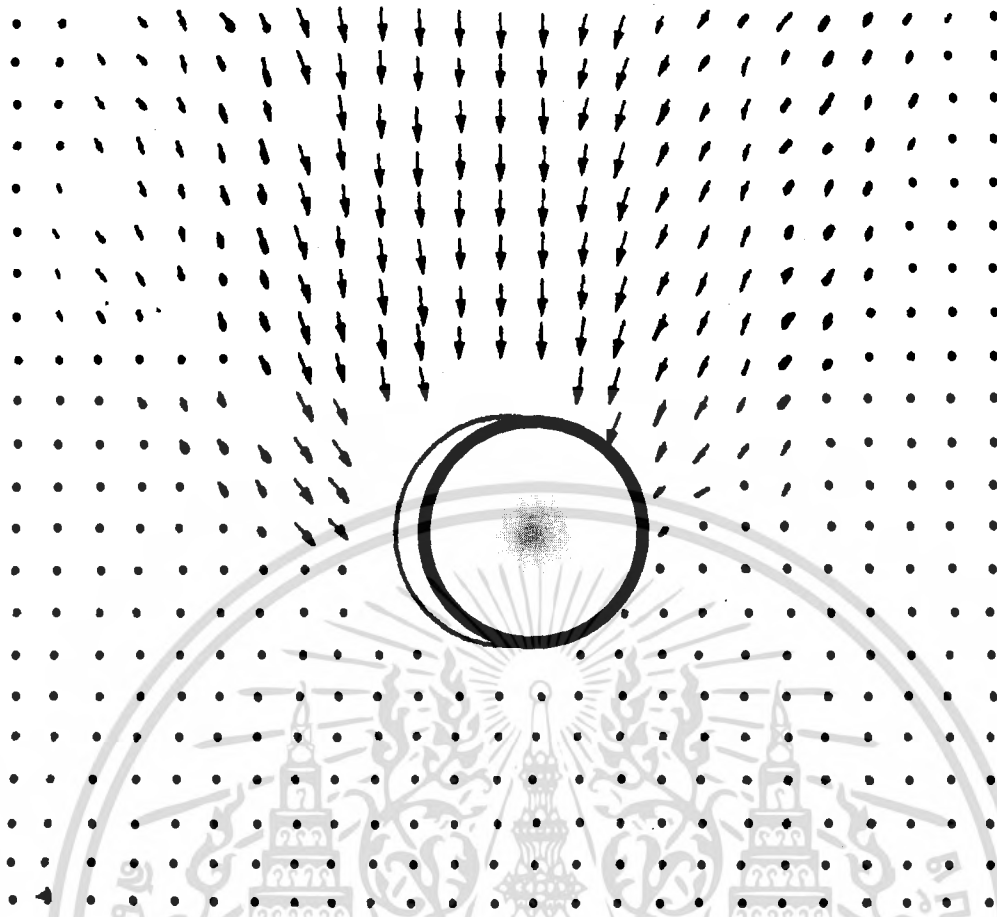
K = ค่าคงตัว ซึ่งจะเท่ากับ 0.5 สำหรับ cohesive soil

0.25 สำหรับ granular soil

การศึกษาต่อมาในภาคสนามชี้ให้เห็นว่า สำหรับ ดินเหนียว (clay) K จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.4 (ดินเหนียวแข็ง) ถึง 0.7(ดินเหนียวอ่อน) สำหรับดินที่มีลักษณะเป็นเม็ดเหนือน้ำ K จะประมาณ 0.2-0.3 ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงข้อมูลการทรุดตัวของดินช่วงต่างๆ (after O'Reilly and New; 1982)

Ground Conditions	Tunneling Methods	Trough width parameter constant, K	Remarks
Stiff fissured clay	Shield or hand	0.4-0.5	Considerable data available; losses normally 1-2 %
Glacial deposits	Shield in free air Shield with compressed air	0.5-0.6	Compressed air to assist control of ground movements
Recent silty clay deposit ($C_u = 10-40$ kPa)	Shield with compressed air	0.6-0.7	
Granular material above the water table		0.2-0.3	

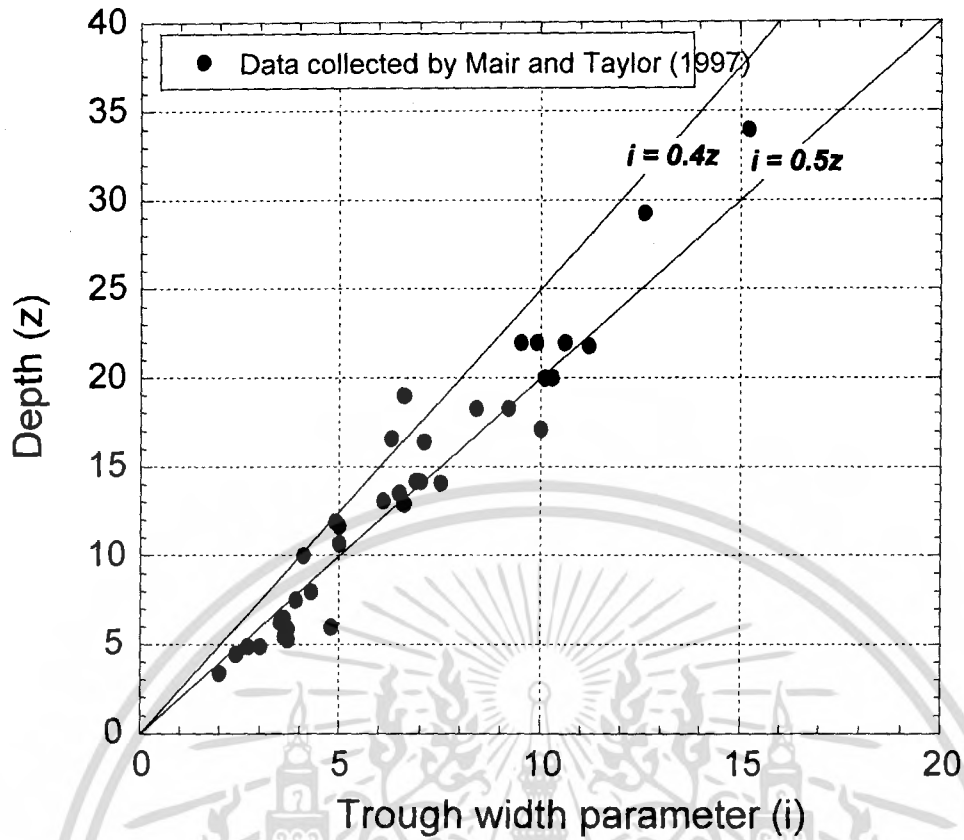


รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของดินรอบๆแบบจำลองอุโมงค์ในดินเหนียว

ค่า Inflection point มีพื้นฐานอยู่บนรายงานและกราฟที่ plot ระหว่าง ความลึกของอุโมงค์ดังแสดงในรูป 2.12

นอกจากนี้ ผลการศึกษานี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Fujita (1981) ผู้ซึ่งได้ศึกษาข้อมูลจากหลายๆ กรณีในญี่ปุ่น สำหรับอุโมงค์ที่ขุดโดยหลายๆเทคนิค เช่น hand mined shield, blind shield, slurry shield และ EPB shield Fujita สนับสนุนข้อสรุปของ O'Relly and New ที่ว่า ความกว้างรูปแบบของการทรุดตัวเหนืออุโมงค์ในดินเหนียวไม่เกี่ยวข้องกับวิธีการก่อสร้าง

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

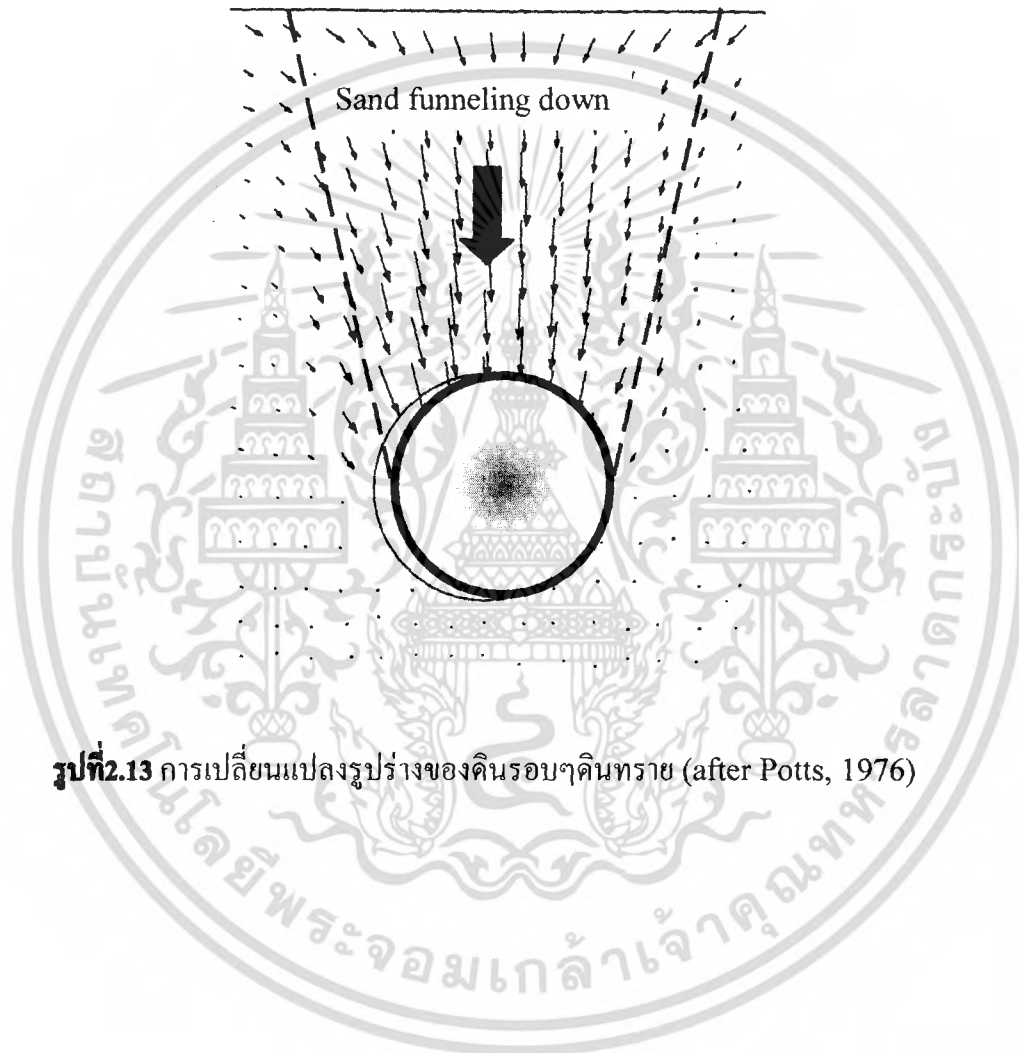


รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงช่วงกว้างของพารามิเตอร์ของอุโมงค์ในดินเหนียว

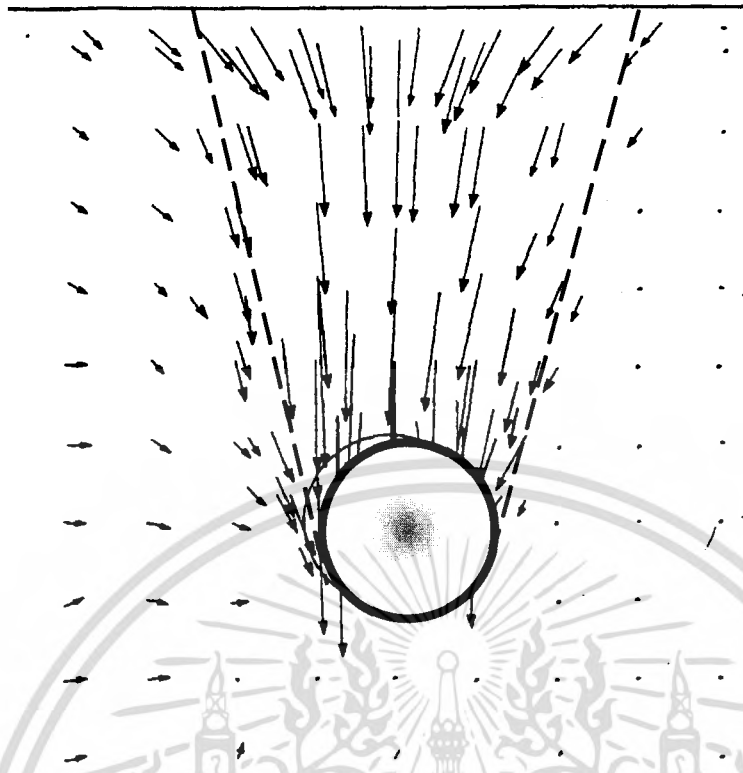
อย่างไรก็ตาม สมการดังกล่าวสำหรับ cohesive soil ค่อนข้างที่จะใช้ไม่ได้กับ granular soil เนื่องจาก สมมติฐานที่ว่า particle displacement จากอุโมงค์ถูกกำหนดให้มีทิศทางไปตามแกนอุโมงค์ที่ไม่ได้มีการศึกษาในห้องทดลองสนับสนุน ต่อมา สมมติฐานของการเสีรูปร่างของดินที่ปริมาตรคงตัวไม่สามารถรักษาไว้ได้ดังเช่นการขยายตัวหรือหดตัวของ granular soil อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ระหว่างการเสีรูปร่างของดิน Potts and Cording, 1976 ยังรายงานว่าการหดแคบตัวลงอย่างรวดเร็วที่มี inward displacement ขนาดใหญ่ของการทรุดตัวของอุโมงค์ ใกล้กับผิวหน้าของดินที่มี การไหลของทรายลงสู่ในช่องซึ่งเกิดจากการขุดดิน (รูปที่ 2.13 และ 2.14) ในปี 1975 Atkinson et al อธิบายการทรุดตัวประเภทนี้ในลักษณะของการขยายของลิ่มเหนียวอุโมงค์ ด้านบน ซึ่งพัฒนาจนเกิดการยุบลงของผิวหน้าที่ขยายในแนวตั้งไปสู่ด้านบนจากส่วนโค้งของอุโมงค์

O'Relly and New บอกว่า การเคลื่อนตัวของดินในดินที่ cohesionless นำไปสู่การทรุดตัวที่ลึกและแคบด้วยความเค้น ในแนวนอนที่ผิวเมื่อรวมกันกับความเค้นในแนวตั้งที่มากกว่า 0.5% ดังนั้น Gaussian curve ไม่สามารถใช้ประมาณค่าการทรุดตัวได้อย่างถูกต้องเสมอ

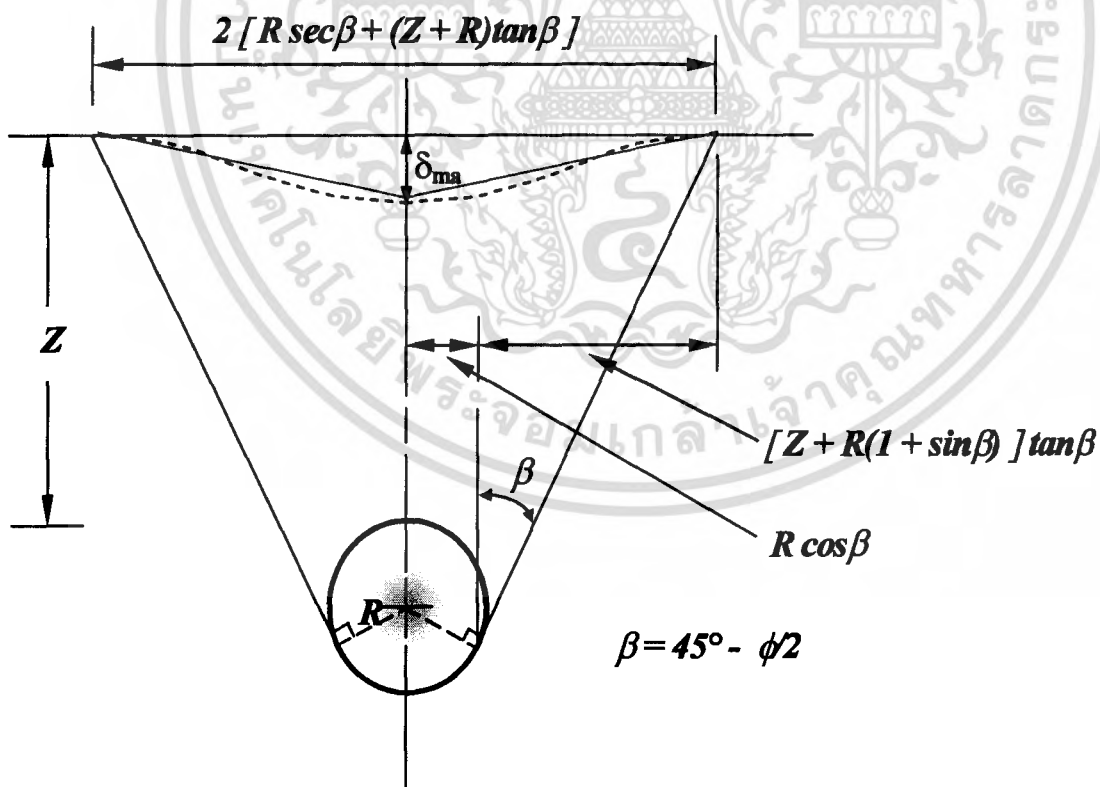
ไปในดินชนิดนี้ สมมติฐานนี้ยังสอดคล้องกับการรายงานของ Cording and Hansmire and Attewell ที่ว่า ในหลายๆ กรณี โดยเฉพาะในดินที่เป็น granular การทรุดตัวของอุโมงค์ การทรุดตัวทางด้านข้างไม่สามารถอธิบายโดยกราฟความน่าจะเป็นปกติ ดังนั้น พวกเขาจึงเสนอว่า การทรุดตัวในรูปแบบที่ต่างออกไปในลักษณะเป็นรูปลิ้ม การทรุดตัวทางด้านข้างถูกจำกัดโดย the shear surface ซึ่งเพิ่มขึ้นจากขอบของอุโมงค์ที่มุม β ซึ่ง $\beta = 45 - \phi / 2$ และ ϕ เป็นมุมของแรงเสียดทานของดิน ที่เป็น granular ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของดินรอบๆดินทราย (after Potts, 1976)



รูปที่ 2.14 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของดินรอบๆดินทราย (after Potts, 1976)

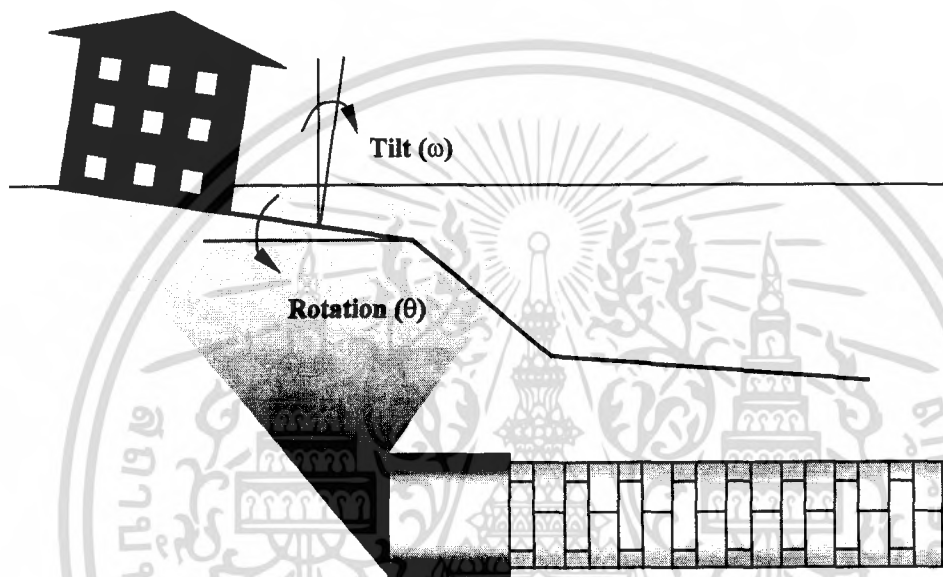


รูปที่ 2.15 รูปตัดแสดงการทรุดตัวของทราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

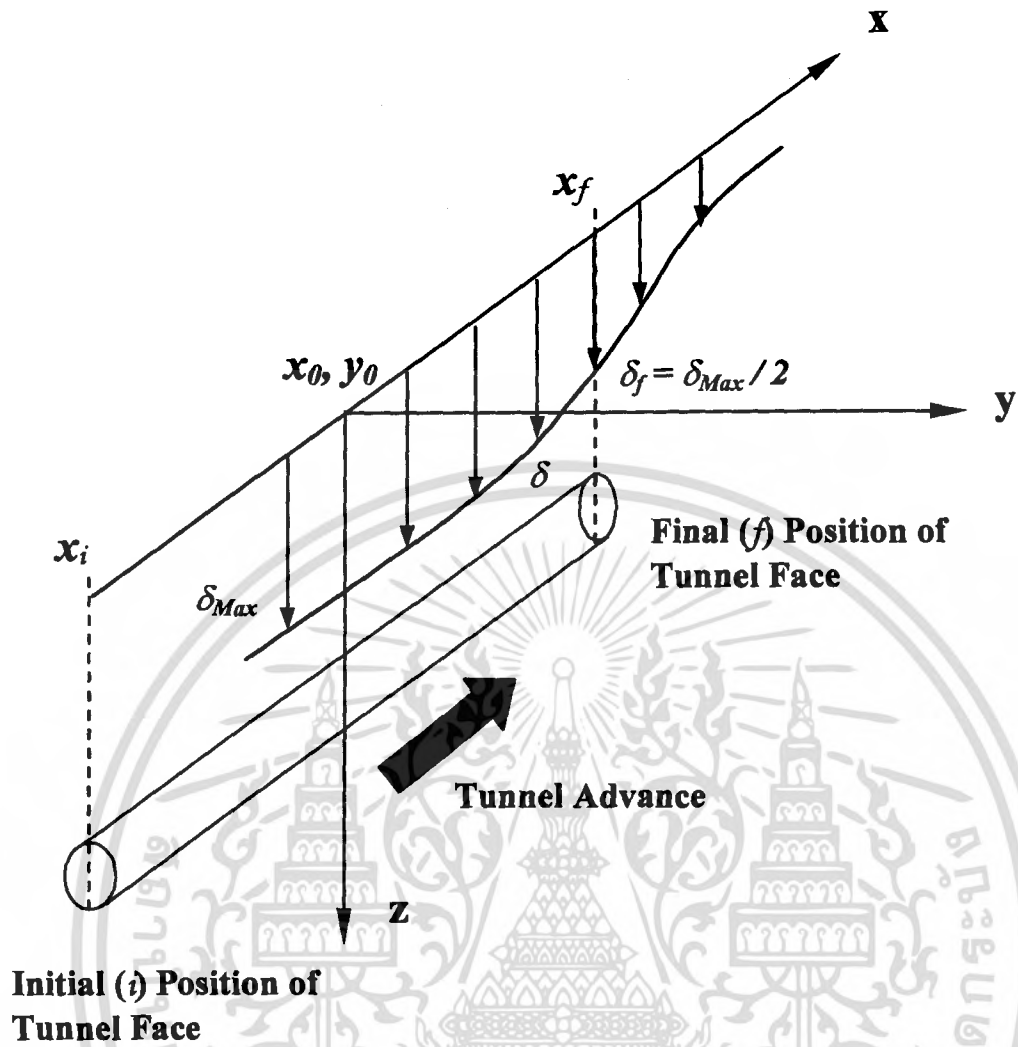
2.2.1.4 Attewell and Woodman (1982)

หวัเงาะอุโมงค์ไม่เพียงแต่ก่อให้เกิดการเสีรูปร่างของดินในทิศทางตรงกันข้าม ส่งผลให้เกิดการทรุดตัวของดิน แต่ยังทำให้เกิดการเสีรูปร่างของดินในแนวยาว นี้สามารถเป็นอันตรายต่อการก่อสร้างที่มีอยู่ดังรูป 2.16 เป็นที่น่าเสียดายว่าการศึกษาวิจัยส่วนน้อยที่ทำเพื่อศึกษากระบวนการทรุดตัวของดินในแนวยาว



รูปที่ 2.16 การทรุดตัวตามยาวบนผิวหน้าเนื่องจากการการขุดเจาะอุโมงค์

Attewell and Woodman เสนอว่า empirical solution สำหรับการทรุดตัวในแนวยาวของผิวหน้าดินที่ได้จากการปรับปรุง สมการความน่าจะเป็นปกติ เขาได้พัฒนาทฤษฎีของ Litwinniszyn อย่างไรก็ตาม เขาบอกว่า สมการจำกัดเพียงแต่อุโมงค์ฝีกัด โดยเฉพาะ ในแนวยาว จำเป็นจะต้องพิจารณาตำแหน่งการสูญเสียที่ความลึก z_0 ในแนวที่ $y = 0$ จาก x_i ไปจนถึง x_f ซึ่ง i คือจุดเริ่มต้นของอุโมงค์ และ f เป็นจุดสิ้นสุดดังรูป



รูปที่ 2.17 ระบบพิกัดของอุโมงค์สำหรับการทรุดตัวตามยาวบนผิวหน้า
(after Attewell and Woodman, 1982)

ตั้งเงื่อนไขในรูปที่ 2.17 สามารถประมาณค่า การทรุดตัวของดินในแนวยาวได้จาก การสูญเสียดิน ดังสมการที่ 2.7

$$\delta = \frac{V}{\sqrt{2\pi \cdot i^2}} \exp\left[\frac{-y^2}{2i^2}\right] \left\{ G\left(\frac{x-x_i}{i}\right) - G\left(\frac{x-x_f}{i}\right) \right\} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

G = ฟังก์ชันของความน่าจะเป็นที่ถูกกำหนดโดย Attewell and Woodman (1982). In particular $G(0) = 0.5$ and $G(\infty) = 1$

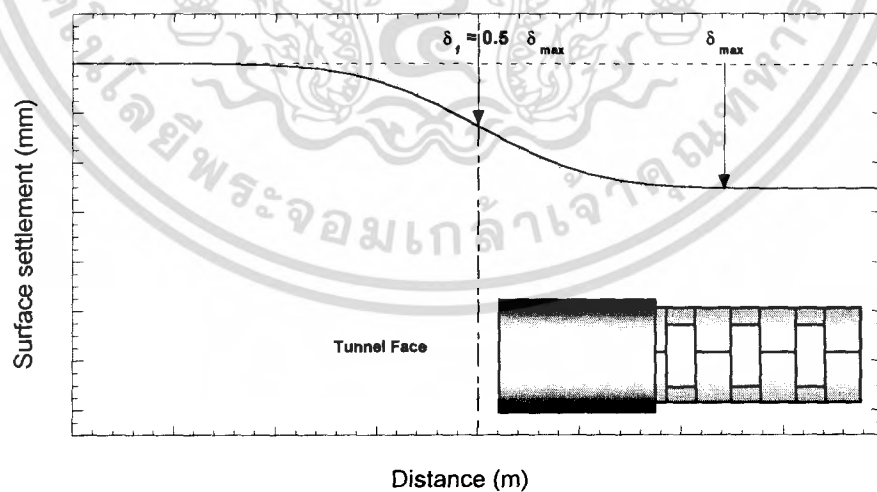
V = ปริมาตรของมวลดินที่สูญเสียโดยกำหนดให้อ่านค่าเป็นเปอร์เซ็นต์การสูญเสีย
มวลดิน (G.L.%)

G.L.% x ปริมาตรของอุโมงค์ (volume of tunnel)

I = ระยะทางแนวราบตามขวางระหว่างตำแหน่งสูงสุด การทรุดตัว ณ. (จุดเปลี่ยนโค้ง) นั้นสามารถแทนได้โดยสูตรของ Peck (1969) or O'Reilly and New (1982) as shown in and Equation (2-6), respectively

z = แนวแกนความลึกของอุโมงค์

Attewell and Woodman สมมติว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของการเสียรูปที่ผิวหน้าอย่างมาก เกิดที่ระยะเวลาที่ผิวของหัวเจาะ ดังรูปที่ 2.18 อย่างไรก็ตาม เขาก็เห็นว่า สมการนี้ใช้ได้สำหรับการทรุดตัวที่เกิดจากการขุดเจาะในดินเหนียวเหมือนเปรียบเทียบกับสมการที่ใช้ในการทรุดตัวที่เกิดจาก The Jubilee Line Project ที่ลอนดอน นอกจากนี้ เขาเห็นพ้องกันว่า ยังมีความต้องการข้อมูลการเสียรูปของดินที่มากกว่าสามมิติ (เช่น ทั้งในแนวขวางและแนวยาว) จากการวัดในภาคสนามเพื่อที่จะให้ข้อมูลพื้นฐานในการปรับปรุงและขยายผลของเทคนิคนี้



รูปที่ 2.18 รูปร่างการทรุดตัวตามแนวยาวที่เสนอโดย Attewell and Woodman (1982)

2.3 การวิเคราะห์การทรุดตัวของดินที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์

ในการวิเคราะห์ข้อมูลการเคลื่อนตัวของดิน อยู่ด้วยกัน 2 กรณี กรณีที่หนึ่งจะเป็นการวัดการเคลื่อนตัวของดินที่เกิดขึ้นที่บนผิวดิน (Surface Settlement) โดยสามารถแบ่งออกเป็น 1. การทรุดตัวของผิวดินในแนวยาว (Longitudinal Surface Settlement) 2.การทรุดตัวของดินในแนวขวาง(Transverse Surface Settlement) กรณีที่สองจะเป็นการวัดการเคลื่อนตัวของดินที่เกิดขึ้นใต้ผิวดิน โดยสามารถแบ่งออกเป็น 1.การเคลื่อนตัวของดินทางด้านข้างอุโมงค์(Lateral deformation) 2. การเคลื่อนตัวของดินในแนวดิ่ง

2.3.1 การเคลื่อนตัวของดินที่เกิดขึ้นบนผิวดิน (Surface Settlement)

จุดประสงค์ของการวัดการทรุดตัวของดินที่เกิดจากการขุดเจาะนี้เพื่อที่จะดูแนวโน้มการเคลื่อนตัวของดินในระหว่างที่หัวเจาะกำลังจะมาถึงตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องมือวัดจนกระทั่งหัวเจาะได้ขุดผ่านออกไปจากตำแหน่งนั้นเพื่อที่จะดูแนวโน้มพฤติกรรมของดิน เพื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะการทรุดตัวของดินเพื่อที่จะนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อหาทางลดค่าการทรุดตัวให้น้อยลง

ในการวิเคราะห์ข้อมูลการทรุดตัวของดินบริเวณผิวดิน โดยจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 กรณีด้วยกัน กรณีแรกจะเป็นการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินในแนวยาว (Longitudinal Surface Settlement) กรณีที่สองเป็นการทรุดตัวของดินในแนวขวาง (Transverse Surface Settlement)

2.3.1.1 การเคลื่อนตัวของดินในแนวยาว (Longitudinal Surface Settlement)

ในการวัดการเคลื่อนตัวของดินในแนวยาวของอุโมงค์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือ

ระยะที่ 1

การทรุดตัวก่อนที่หัวเจาะจะเคลื่อนที่ผ่าน (Prior to Arrival of Shield Face) เป็นการเกิด Heave ก่อนที่ส่วนตัดดินของหัวเจาะ (Shield Cutter) จะเคลื่อนที่มาถึง ซึ่งมีสาเหตุมาจาก Ground Loss ที่ด้านหน้าของอุโมงค์อันเนื่องมาจากความไม่สมดุลระหว่างแรงดันดิน (Earth Pressure) ที่อยู่ด้านหน้าหัวเจาะกับแรงดันส่วนหน้าของหัวเจาะ (Face Pressure) ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา²³ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 นอกจากนี้ในดินที่มีความเชื่อมแน่นยังสามารถเกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรดินเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำ(Consolidation) เมื่อ Face Pressure มีค่าสูงเกินกว่า At Rest Pressure ของดินที่อยู่ด้านหน้าอุโมงค์

ระยะที่ 2 นี้จะมีการทรุดตัวด้วยกัน 2 ข้อคือ

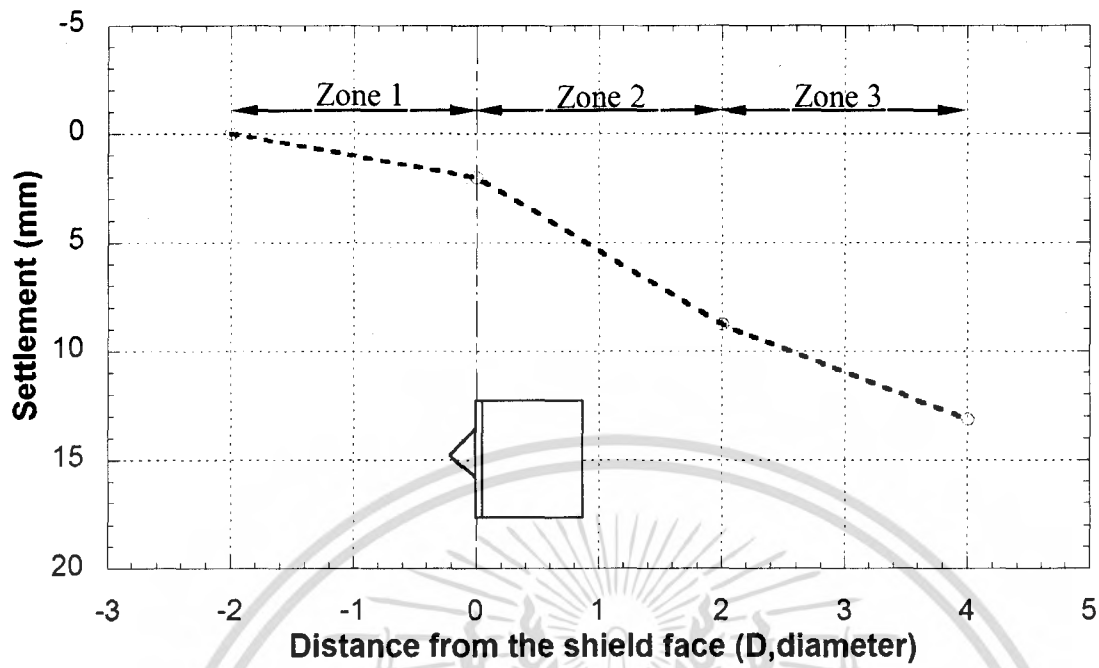
การทรุดตัวระหว่างหัวเจาะเคลื่อนที่ผ่าน (Passing of Shield) เป็นการทรุดตัวระหว่างที่หัวเจาะเคลื่อนที่ผ่านจากส่วนหน้าจนถึงส่วนท้าย โดยมีสาเหตุจาก Ground Loss ที่เกิดขึ้นรอบหัวเจาะอันเนื่องมาจาก Over-Cutting ดังรูปที่ 2.2 การทรุดตัวที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของตัวของอุโมงค์ดังรูปที่ 2.4 การทรุดตัวที่เกิดจากการขยับของหัวเจาะดังรูปที่ 2.5

การทรุดตัวหลังจากที่หัวเจาะเคลื่อนที่ผ่าน (Occurrence of Tail Void and Backfilling) เป็นการทรุดตัวหลังจากที่ส่วนท้ายของหัวเจาะเคลื่อนที่ผ่าน โดยมีสาเหตุมาจาก Ground Loss เนื่องจากช่องว่างที่อยู่รอบผนังอุโมงค์ซึ่งไม่สามารถทำการเกร็งได้ทันทีหลังจากที่เกิดช่องว่างขึ้นมีการใช้แรงดันและปริมาตรในการเกร็งที่ต่ำเกินไป และการเสียรูปของ Segment ดังรูปที่ 2.6

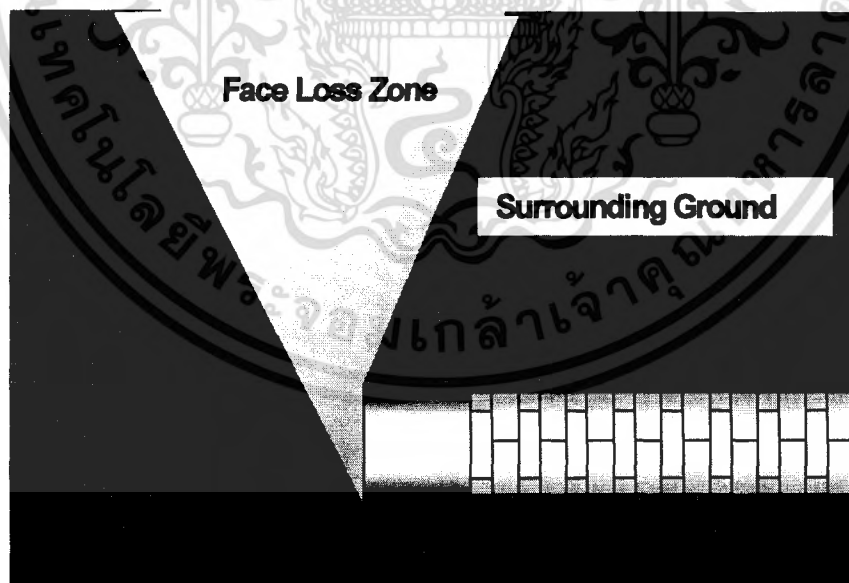
ระยะที่ 3

การทรุดตัวที่ตามมา (Following Settlement) เป็นการทรุดตัวในระยะยาวหลังจากที่หัวเจาะเคลื่อนที่ผ่านไปโดยจะมีการ Grouting เสร็จเรียบร้อยแล้ว

จากการสังเกต การทรุดตัวของผิวดินจากการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบแรงดันดินสมดุล โดยการแบ่งการทรุดเป็น 3 ระยะ นั้น ในช่วงก่อนที่หัวเจาะจะเข้าถึงบริเวณที่ติดตั้งหมุดวัดค่า การทรุดตัวของดินจะเริ่มสูงขึ้น และเมื่อหัวเจาะเคลื่อนที่เข้าใกล้จุดที่ทำการวัดค่า การทรุดตัวของผิวดินหน้าดินจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็วขึ้นเหนือหัวเจาะ ที่ระยะนี้การทรุดตัวของดินจะทำให้เกิดจุดแบ่งช่วงชัดเจนระหว่างระยะที่ 1 และระยะที่ 2 โดยค่าการทรุดตัวในระยะที่ 2 จะเกิดมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทรุดตัวของดินทั้งหมดที่เกิดโดยการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยการใช้หัวเจาะแบบแรงดันดินสมดุล และหลังจากที่ส่วนท้ายของหัวเจาะเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งที่ทำการวัดค่า การทรุดตัวของดินจะเริ่มลดลงและเข้าสู่ระยะที่ 3 การทรุดตัวของดินในระยะสุดท้ายนี้จะหยุดเมื่อหัวเจาะเคลื่อนที่ไปได้สักระยะหนึ่ง ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 กราฟแสดงแนวโน้มการทรุดตัวในแนวยาวของอุโมงค์



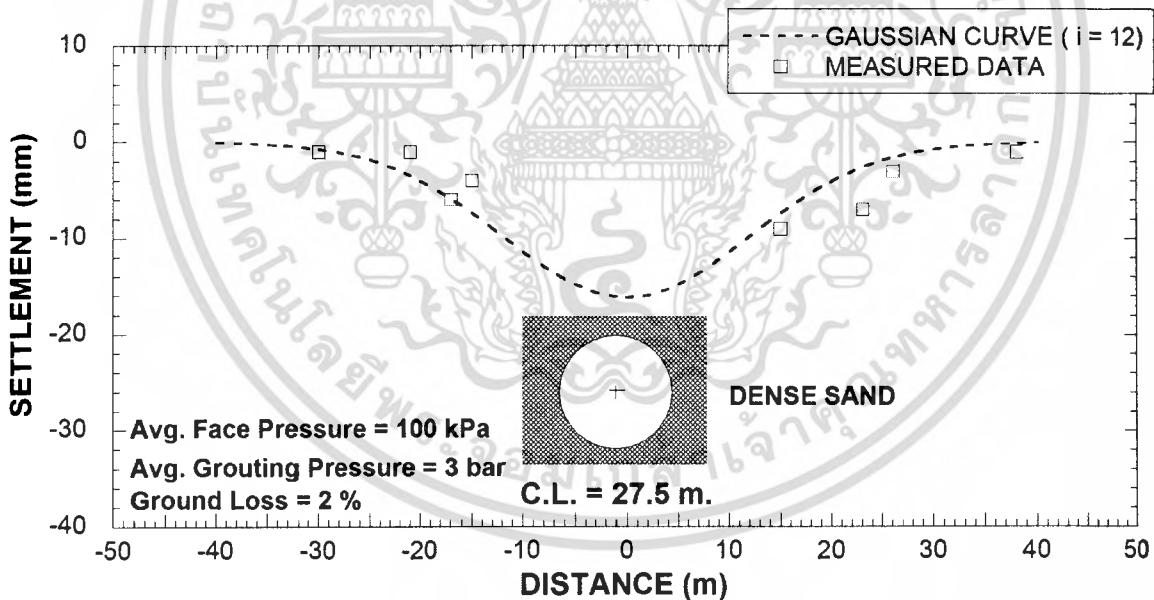
รูปที่ 2.20 รูปแบบการเคลื่อนตัวของดินบริเวณหน้าหัวเจาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.2 การเคลื่อนตัวของดินในแนวขวางอันเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์เดี่ยว (Transverse Surface Settlement)

ในการขุดเจาะอุโมงค์ย่อมมีเกิดการทรุดตัวของดินที่ผิวพื้นผิวดิน โดยการทรุดตัวที่ผิวดินนั้นไม่เพียงแต่มีการพัฒนายาวหรือทิศทางเดียวกับแนวอุโมงค์ แต่ยังมีทรุดตัวตามขวาง (Transverse Surface Settlement) โดยการทรุดตัวของดินจะมีการแผ่กระจายออกเป็นบริเวณกว้างเปรียบเสมือนรูปกรวย ดังรูปที่ 2.21 โดยจะมีการติดตั้งหมุดวัดระดับการทรุดตัว (Settlement Point arrays) เพื่อดูการทรุดตัวในแนวขวาง

ในทรุดตัวของดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ส่วนมากจะทรุดตัวแบบสมมาตรกับแนวกึ่งกลางอุโมงค์ (ในการทรุดตัวของอุโมงค์เดี่ยว) กล่าวคือในระยะที่เท่ากันทางด้านซ้าย-ขวาของแนวกึ่งกลางอุโมงค์ผลของการทรุดจะมีแนวโน้มที่เท่ากัน ซึ่งการทรุดตัวแบบสมมาตรนี้สามารถนำข้อมูลนี้มาทำการวิเคราะห์กับกราฟของความน่าจะเป็น (Gaussian Curve) โดยกราฟนี้จะเป็นอธิบายการทรุดตัวของผิวดินในแนวขวางอุโมงค์ซึ่งได้อธิบายโดยการใช้วิธีของ peck ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แสดงการทรุดตัวตามขวางของอุโมงค์เดี่ยว โดยใช้วิธีการของ peck

2.3.1.3 แนวการทรุดตัวตามขวางอันเนื่องมาจากการขุดเจาะอุโมงค์คู่ (Transverse Surface Settlement)

นักวิจัยหลายคนได้ตั้งข้อสังเกตจากงานวิจัยทางด้านอุโมงค์ (Cording and Hansmire, 1975; Shirlaw et al., 1988) ว่าแนวการทรุดตัวของผิวดิน ที่เกิดจากอุโมงค์คู่ นั้นจะมีได้หลายรูปแบบ ไม่เหมือนในกรณีอุโมงค์เดี่ยว ซึ่งก่อแนวการทรุดตัวที่สมมาตรดังรูปที่ 2.22 จาก การสังเกตแนวการทรุดตัวของผิวดิน ที่เกิดจากอุโมงค์คู่ อาจสมมาตรได้ โดยจะขึ้นอยู่กับระยะจุดกึ่งกลางระหว่างอุโมงค์ 2 อุโมงค์ ดังรูปที่ 2.23 อย่างไรก็ตามแนวการทรุดตัวก็สามารถที่จะไม่สมมาตรได้ซึ่งจะมีลักษณะเบื้องต้น ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.22 แนวการทรุดตัวที่สมมาตรเหนืออุโมงค์เดี่ยว

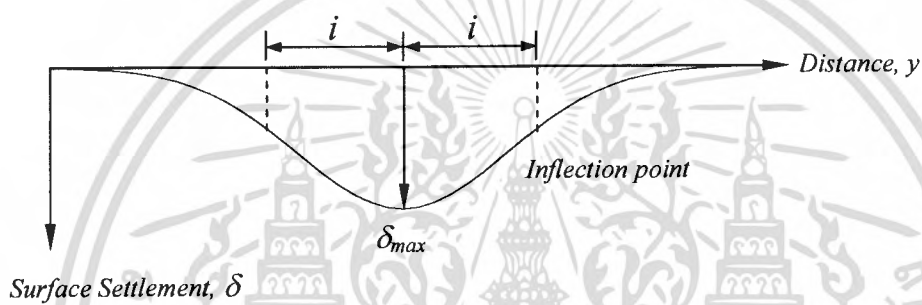
รูปที่ 2.23 แนวการทรุดตัวที่สมมาตรเหนืออุโมงค์คู่

รูปที่ 2.24 แนวการทรุดตัวที่ไม่สมมาตรเหนืออุโมงค์คู่

Peck (1969) สังเกตว่าแนวการทรุดตัวของอุโมงค์เดี่ยวสามารถเขียนได้โดย Gaussian curve คุณสมบัติของ Gaussian function และความสัมพันธ์กับมิติของอุโมงค์ ดังแสดงในรูปที่ 2.25. ระยะสูงสุดตามแนวแกนของ Gaussian curve นั่นก็คือค่าการทรุดตัวสูงสุดสูงสุดที่ได้จากการทดลอง δ_{max} ดังนั้นค่าการทรุดตัว δ ณ จุดใดๆ คือ

$$\delta = \delta_{max} \exp\left[-\frac{y^2}{2i^2}\right] \quad (2.8)$$

เมื่อ i คือ ตัวแปรความกว้างของแนวการทรุดตัว ที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 2.25 แสดงการใช้ Gaussian curve อธิบายแนวการทรุดตัวของผิวดิน

พฤติกรรมของ Gaussian สำหรับแนวการทรุดตัวเหนืออุโมงค์เดี่ยว ถูกใช้กันอย่างกว้างขวาง (O'Reilly and New, 1982) แต่ก็ยังมีแนวคิดที่ต่างออกไป (Cording and Hansmire, 1975; Shirlaw et al., 1988).

จากการสำรวจอุโมงค์ใต้ดินใน Chicago, Peck (1969) ยังบอกอีกว่าเส้นโค้งการทรุดตัวของอุโมงค์แฝดน่าจะ ไม่สมมาตร เขามุ่งประเด็นไปว่าการทรุดตัวของดินที่เกี่ยวข้องกับอุโมงค์ที่สองจะมีมากกว่าจากอุโมงค์แรก อย่างไรก็ตาม Peck (1969) ยังบอกได้ว่าเมื่ออุโมงค์แฝดอยู่ชิดกันมากพอที่จะสามารถเกิดแนวการทรุดตัวที่สมมาตรเกิดขึ้นได้ และสามารถใช้ Gaussian Function อธิบายแนวการทรุดตัวได้ โดยการใช้แผนภาพจากการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรความกว้างของแนวการทรุดตัว(i) กับความลึกแนวศูนย์กลางของอุโมงค์ ซึ่งโดยปกติจะขึ้นอยู่กับรัศมีของอุโมงค์ (R) สามารถประเมินค่าตัวแปรความกว้างของแนวการทรุดตัว(i) สำหรับอุโมงค์คู่โดยการแทนที่ R ด้วย $R' = R + d/2$ เมื่อ d คือระยะระหว่างแนวศูนย์กลางของอุโมงค์คู่ทั้ง

สอง ดังรูปที่ 2.24 ผลที่ได้คือเส้นโค้งการทรุดตัวสำหรับอุโมงค์คู่สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 2.8

จากบันทึกของ Peck's (1969) เราจะสังเกตได้ว่าใช้วิธีการขุดเจาะแบบ Open-Faced Shields with Compressed Air ซึ่งจะแตกต่างจากหัวขุดเจาะอุโมงค์แบบวิธีสมดุลแรงดันดินเล็กน้อยเมื่อพิจารณาตัวแปรทั้งหมด นอกจากนี้ ในกรณีการทรุดตัวที่ผิวดินที่เกิดจากอุโมงค์คู่ ปัจจัยต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน เช่น เมื่อหัวเจาะแตกต่างกัน ช่วงเวลาระหว่างที่หัวเจาะแรก และ หัวเจาะที่สองทำงาน และระยะระหว่างอุโมงค์ทั้งสอง ดังนั้น การทดลองของ Peck's (1969) อาจไม่สามารถใช้อธิบายได้เมื่อใช้หัวเจาะแบบสมดุลแรงดันดิน (EPB)

นักวิจัยหลายคนได้ศึกษารูปแบบของแนวการทรุดตัวที่ผิวดินสำหรับอุโมงค์คู่ Cording and Hansmire (1975) สังเกตการเคลื่อนที่ของพื้นดินที่เกิดขึ้นเหนืออุโมงค์คู่ของโครงการ Washington D.C. Metro พวกเขาบอกว่ารูปแบบของแนวการทรุดตัวที่ไม่สมมาตรหลังหัวเจาะที่สองเจาะผ่านอาจเกิดจากการรบกวนกันเองระหว่างอุโมงค์ทั้งสอง การรบกวนนี้เพิ่มขึ้นเมื่อความกว้างระหว่างอุโมงค์ทั้งสองลดลง

จากคำแนะนำของ Peck (1969), ฟังก์ชัน Gaussian ยังใช้ได้กับอุโมงค์คู่ โดยการสมมติให้การทรุดตัวสูงสุด (δ_{max}) เกิดขึ้นตลอดแนวกลางของอุโมงค์ทั้งสอง อย่างไรก็ตาม โดยส่วนใหญ่ มักจะพบว่า การจะให้ฟังก์ชันที่ใกล้เคียงความจริงของการวัดข้อมูลการทรุดตัวหลังจากหัวเจาะที่สองผ่านไป Gaussian Curve ต้องเลื่อนไปตามอุโมงค์แรก ซึ่งหมายความว่า การทรุดตัวสูงสุด (δ_{max}) จะไม่เกิดขึ้นพอดีที่จุดกึ่งกลางระหว่างอุโมงค์ทั้งสอง แต่จะเกิดเบี่ยงไปทางบริเวณอุโมงค์แรก การเลื่อนของ Gaussian Curve เรียกว่า "Offset Gaussian curve" ผลการสังเกตนี้สอดคล้องกับการสังเกตของ New and Bowers (1993). ในบางบริเวณของผิวหน้าที่ทรุดตัวนั้น การทรุดตัวสูงสุด (δ_{max}) อาจเกิดขึ้นที่กึ่งกลางระหว่างอุโมงค์ทั้งสอง

New and Bowers (1993) บอกว่า Gaussian Curve สามารถใช้อธิบายแนวการทรุดตัวที่เกิดจากอุโมงค์คู่จากการแทน New offset parameter (a) ลงใน Gaussian function:

$$\delta = \delta_{max} \exp\left[-\frac{(y-a)^2}{2i^2}\right] \quad (2.9)$$

สมการนี้ใช้สำหรับการแทนที่ด้วยค่า Offset parameter (a) ซึ่งเท่ากับระยะ offset แต่ค่า Offset parameter (a) สามารถหาได้จากวิธีสุ่มแทนค่า (trial and error) เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

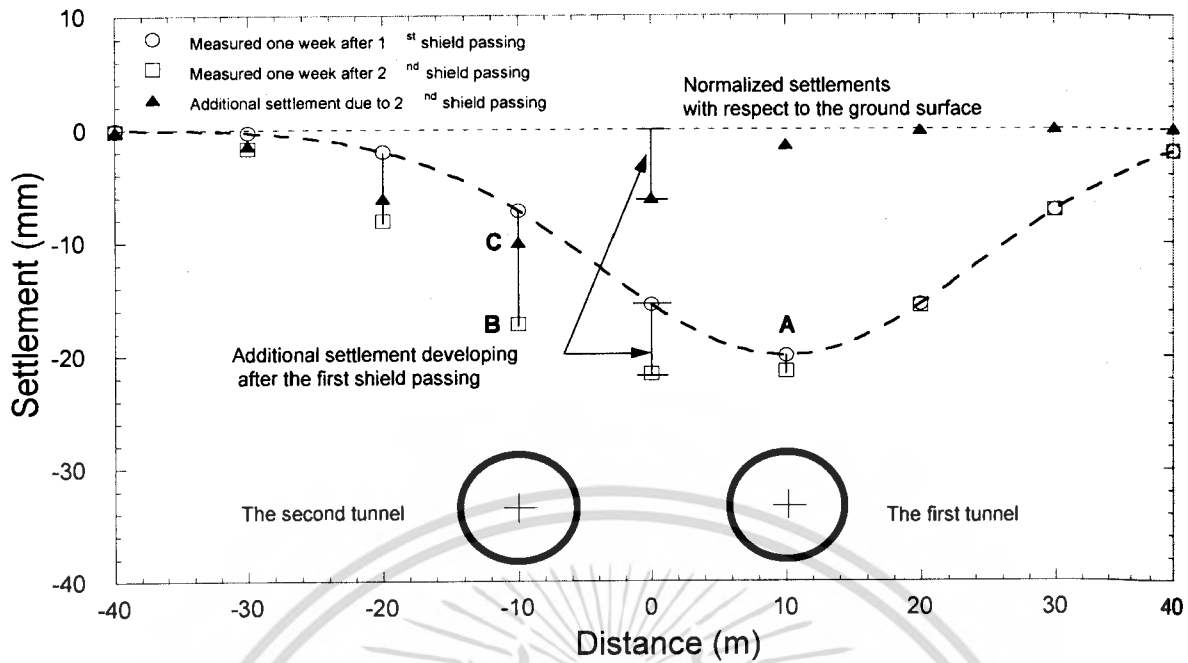
ดังนั้น เทคนิคนี้จึงไม่ใช่วิธีที่ดีที่สุดในการทำนายแนวการทรุดตัวที่ผิวหน้า ในส่วนต่อไปจะนำเสนอเทคนิค Normalization และวิธีทับซ้อนกราฟ Superposition ในกรณีของ อุโมงค์คู่ เทคนิคนี้สามารถใช้อธิบายแนวการทรุดตัวที่ผิวหน้าได้ดีกว่าวิธีอื่น

2.4. วิธีทับซ้อนกราฟ (Superposition Technique)

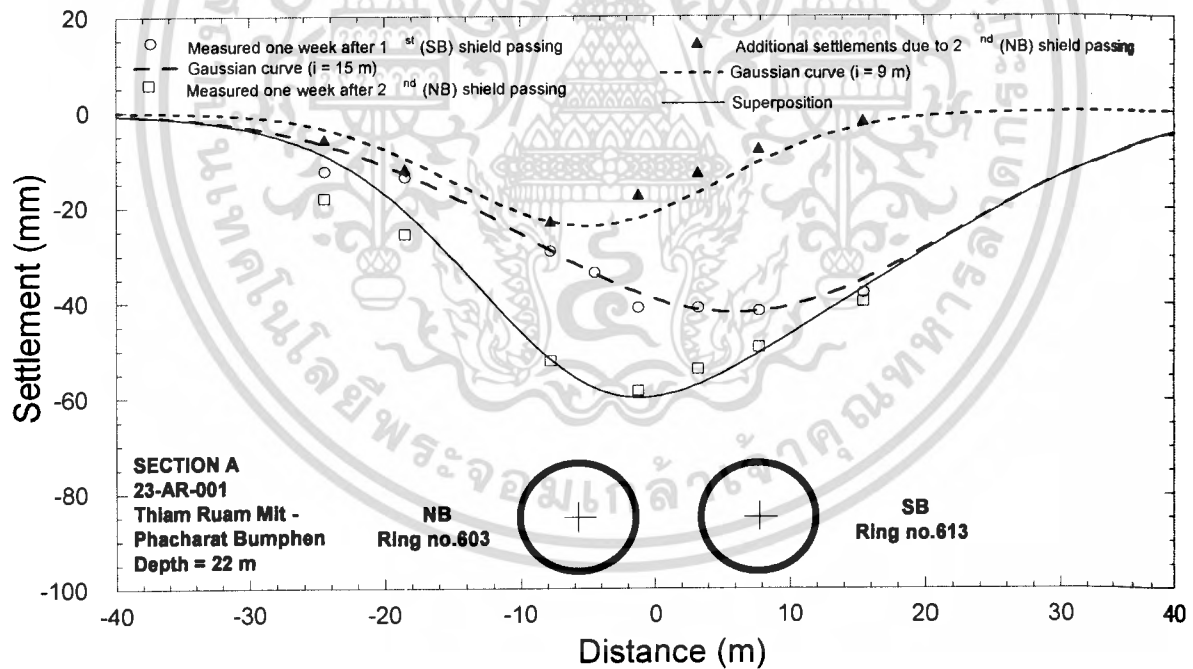
ในการตรวจสอบการตอบสนองของผิวดินจากผลของอุโมงค์ที่สอง จำเป็นต้องหาการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการทรุดตัวของผิวดินเพิ่มเติมหลังหัวเจาะแรกผ่านไป ดังแสดงในรูปที่ 2.23. การทรุดตัวเพิ่มเติมนี้ได้จากการหักลบการทรุดตัว หลังหัวเจาะแรกผ่านไปจากการวัดการทรุดตัวหลังหัวเจาะที่สองผ่านเพื่อแทนที่การทรุดตัวที่ผิวหน้าที่เกิดจากหัวเจาะที่สองเท่านั้น เทคนิค Normalization นี้ใช้กับบริเวณที่วัด ดังแสดงก่อนหน้า ผลที่ได้จะแสดงในรูปที่ 2.24 จากรูป ผลแสดงให้เห็นว่า โดยส่วนใหญ่การทรุดตัวเพิ่มเติมที่เกิดจากหัวเจาะที่สองจะมีค่าน้อยกว่าการทรุดตัวเนื่องจากหัวเจาะแรก ดังนั้น ถ้ามองในรายละเอียดของแนว “Additional Settlement” จะพบว่ามี ความสมมาตรตาม แกนกลางอุโมงค์ที่สอง

เทคนิค Gaussian Curve อาจใช้อธิบายการทรุดตัวเพิ่ม (i.e. Normalized settlements over the second tunnel) ดังในรูปที่ 2.24 จากค่าตัวแปรความกว้างของแนวการทรุดตัว (i), Gaussian curve สามารถหาแนวการทรุดตัวเพิ่มได้ใกล้เคียง ค่าตัวแปรความกว้างของแนวการทรุดตัว (i) ของ “Additional Settlement” สามารถแสดงด้วยกับ $i = Kz$ lines จากการแนะนำของ O'Reilly and New (1982) ในรูปที่ 2.25. จุดข้อมูลส่วนใหญ่จะตกภายในขอบเขตของ $i = 0.4z$ และ $i = 0.6z$. ซึ่งคล้ายกับในกรณีของการวัดแนวการทรุดตัวของอุโมงค์เดี่ยว และสอดคล้องกับผลสรุปของ O'Reilly and New (1982) ที่ว่าโดยส่วนมาก $i = 0.5z$ โดยไม่คำนึงว่าอุโมงค์จะสร้างด้วยชั้นดินเหนียวแบบอ่อน หรือ แข็ง จุดหนึ่งในรูป ที่ 30 อยู่ระหว่าง $i = 0.4z$ และ $i = 0.3z$ ข้อมูลจุดนี้ได้จากการขุดอุโมงค์คู่ในชั้นทราย

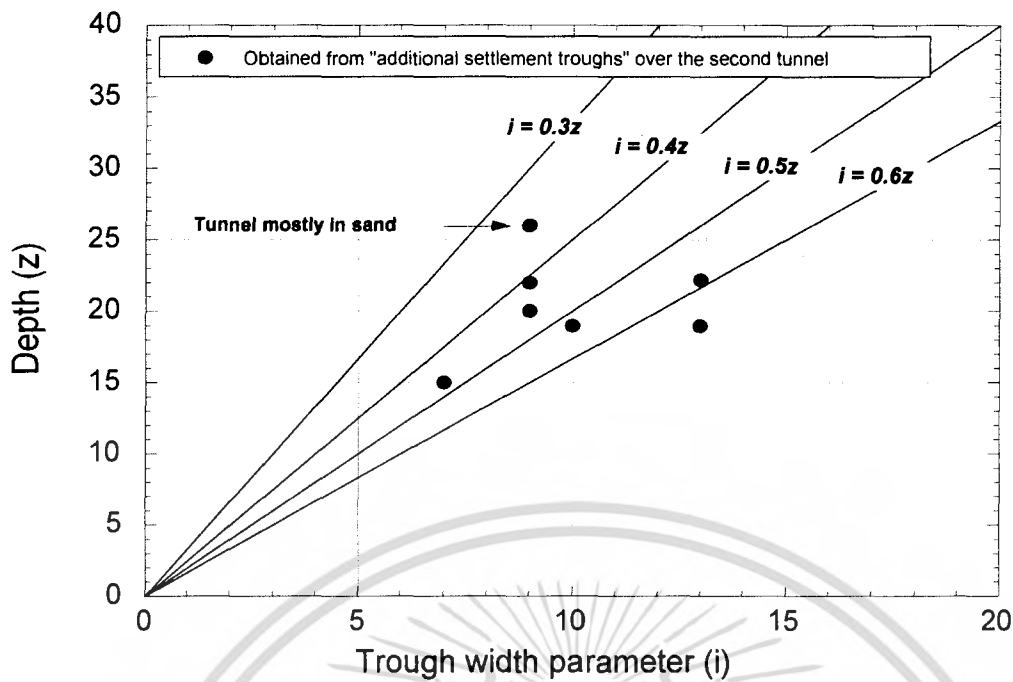
เราสามารถสร้างเส้นโค้งการทรุดตัวที่เกิดจากหัวเจาะแรก และ เส้นโค้งการทรุดตัวที่เกิดจากหัวเจาะที่สอง โดยใช้ Gaussian Function. ดังนั้นวิธีทับซ้อนกราฟ สามารถใช้ในการหาแนวการทรุดตัวทั้งหมดที่เกิดจากอุโมงค์คู่ ค่าแนวการทรุดตัวเหล่านี้ยังแสดงในรูปที่ 2.24 เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟบันทึกข้อมูลการทรุดตัวหลังจากหัวเจาะที่สองผ่าน Superposition Curves และ ข้อมูลจากการสังเกตจะใกล้เคียงกัน



รูปที่ 2.26 แสดง Addition Settlement หลังจากหัวขุดเจาะแรกเจาะผ่าน



รูปที่ 2.27 การทรุดตัวของผิวดินและแนวการทรุดตัวที่แสดงโดย Gaussian Curve และ Superposition Curve



รูปที่ 2.28 แสดงค่า Trough Width Parameter (i) ที่แนะนำโดย O'Reilly and New (1982)

2.5 ประโยชน์จากการทบทวนวรรณกรรม

ในการวัดค่าการเคลื่อนตัวของดินจำเป็นต้องวัดค่าก่อนที่หัวเจาะของอุโมงค์ได้ดินจะมาถึง ขณะที่หัวเจาะถึงตำแหน่งที่วัด และหลังจากที่หัวเจาะเคลื่อนที่ผ่านเพื่อนำค่ามาเปรียบเทียบกับค่าการเคลื่อนตัวและการทรุดตัวของดิน ซึ่งการวัดการเคลื่อนตัวของดินสามารถแบ่งได้หลายกรณีดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์การทรุดตัวของผิวดินตามแนวยาว (Longitudinal surface settlements) ซึ่งจะแสดงพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินที่สัมพันธ์กับตำแหน่งของหัวเจาะ ซึ่งนำมาใช้วิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาการสูญเสียมวลดินเข้าสู่อุโมงค์
2. การวิเคราะห์แนวการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากอุโมงค์เดี่ยว (Transverse settlements due to a single tunnel) ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงค่าการทรุดตัวสูงสุดและแนวขอบเขตอิทธิพลที่มีผลต่อสิ่งก่อสร้างข้างเคียง
3. การวิเคราะห์แนวการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากอุโมงค์คู่ (Transverse settlements due to a twin tunnels)
4. การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้านข้างของดิน (Lateral ground deformation) ซึ่งจะถูกต้องตั้งตัวอุปกรณ์ไว้ที่ระยะห่างจากอุโมงค์ประมาณ 1 เมตร เพื่อทำการอ่านค่าการเคลื่อนตัวด้านข้าง

ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้วัดข้อมูลทางธรณีวิทยานั้นได้กล่าวไว้อย่างละเอียดในบทต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

เครื่องมือตรวจวัดงานอุโมงค์

3.1 กล่าวนำ

การติดตามพฤติกรรมของโครงสร้างอุโมงค์และดินมีความสำคัญในทุกขั้นตอน การก่อสร้างอุโมงค์ตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบ ก่อสร้าง ตลอดจนเมื่ออุโมงค์ถูกใช้งานเพราะการทราบถึงการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนั้น ทำให้เราสามารถทำนายการพังทลายของอุโมงค์และโครงสร้างใกล้เคียง เพื่อที่จะหาวิธีการป้องกันและแก้ไขให้เกิดความเสียหายน้อยที่สุด

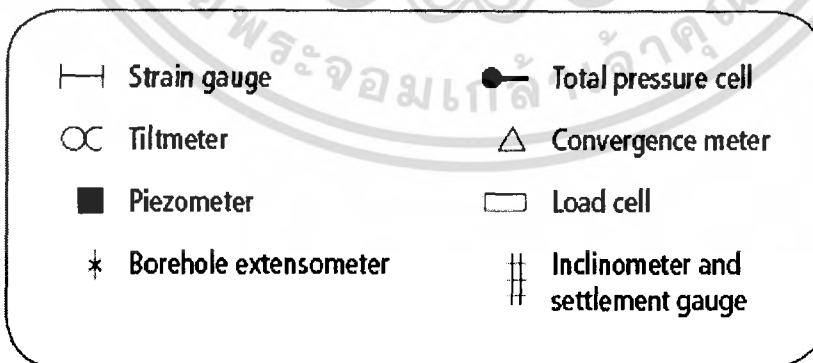
3.2 เกณฑ์การเลือกใช้เครื่องมือ (Selection Criteria for Instrumentation)

เกณฑ์การเลือกใช้เครื่องมือมี 3 หลักคือ

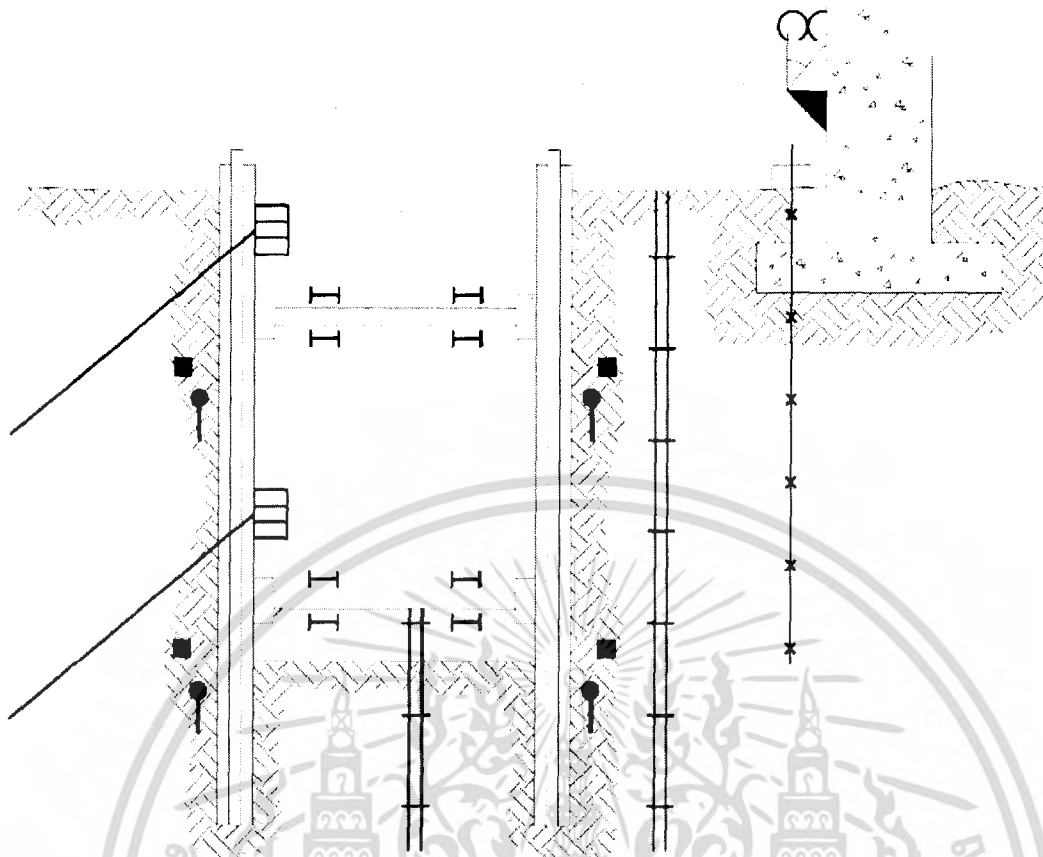
- ความน่าเชื่อถือในการวัด(ความแม่นยำ,ความละเอียด)
- ระยะเวลาการใช้งานและความสามารถในการใช้ร่วมกับเครื่องมืออื่นๆ
- การเก็บข้อมูล(Automatic)และการแปลผลข้อมูลที่มีประสิทธิภาพ

3.3 ประเภทของการตรวจวัด (Type of Measurement)

ประเภทและตำแหน่งการติดตั้งของการตรวจวัดนั้นจะขึ้นกับสภาพของดิน สิ่งแวดล้อม และวิธีการก่อสร้างแต่โดยทั่วไปสามารถแบ่งตามการก่อสร้างอุโมงค์ได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 แสดงสัญลักษณ์ของเครื่องมือต่างๆ



Cut and Fill Tunnel

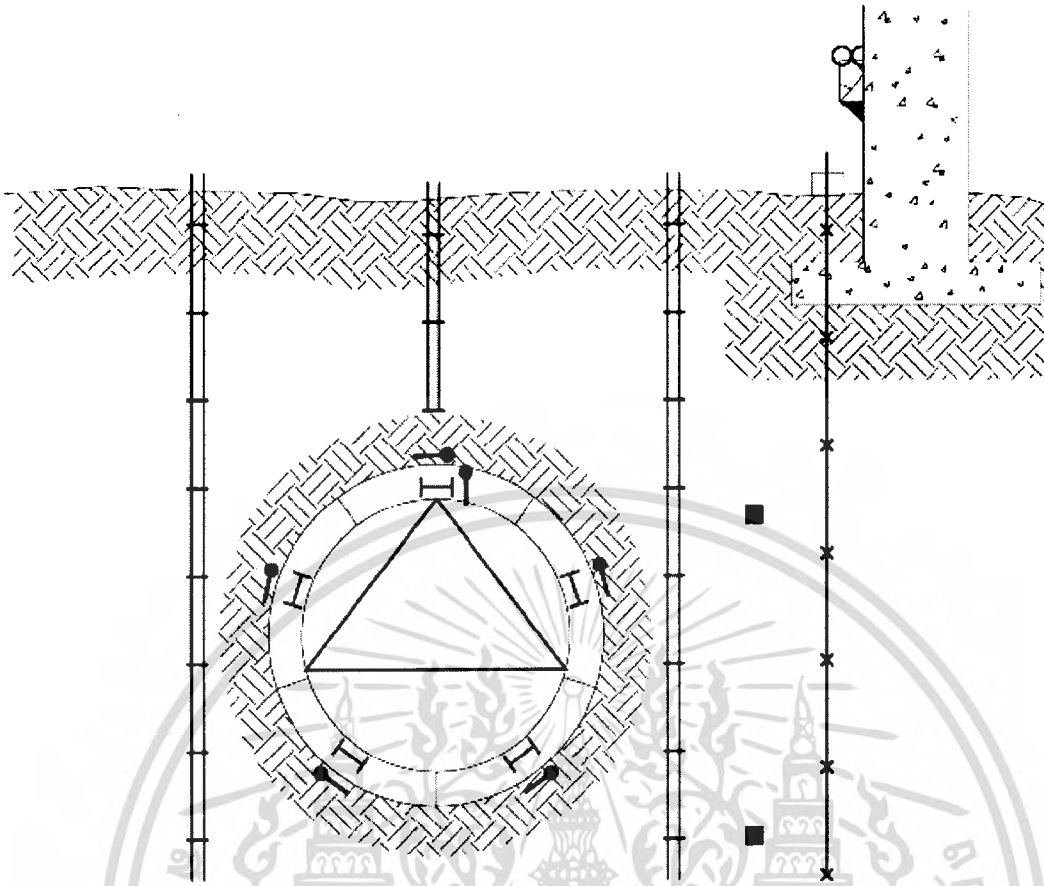
รูปที่ 3.2 ตำแหน่งของเครื่องมือในการ Cut and Fill Tunnel

วัตถุประสงค์

- เพื่อทราบถึงสภาพของกำแพงกันดิน
- ติดตามสภาพของสิ่งก่อสร้างใกล้เคียง

ปัจจัยที่ต้องการวัด

- ความเครียด(Stress)ของสิ่งก่อสร้าง
- น้ำหนักกดทับสมอ(Load in anchors)
- การเคลื่อนตัวของดินและสิ่งก่อสร้าง



Shallow Tunnel in Unconsolidated Ground

รูปที่ 3.3 ตำแหน่งและชนิดเครื่องมือของอุโมงค์ดินและดินที่ไม่มั่นคง

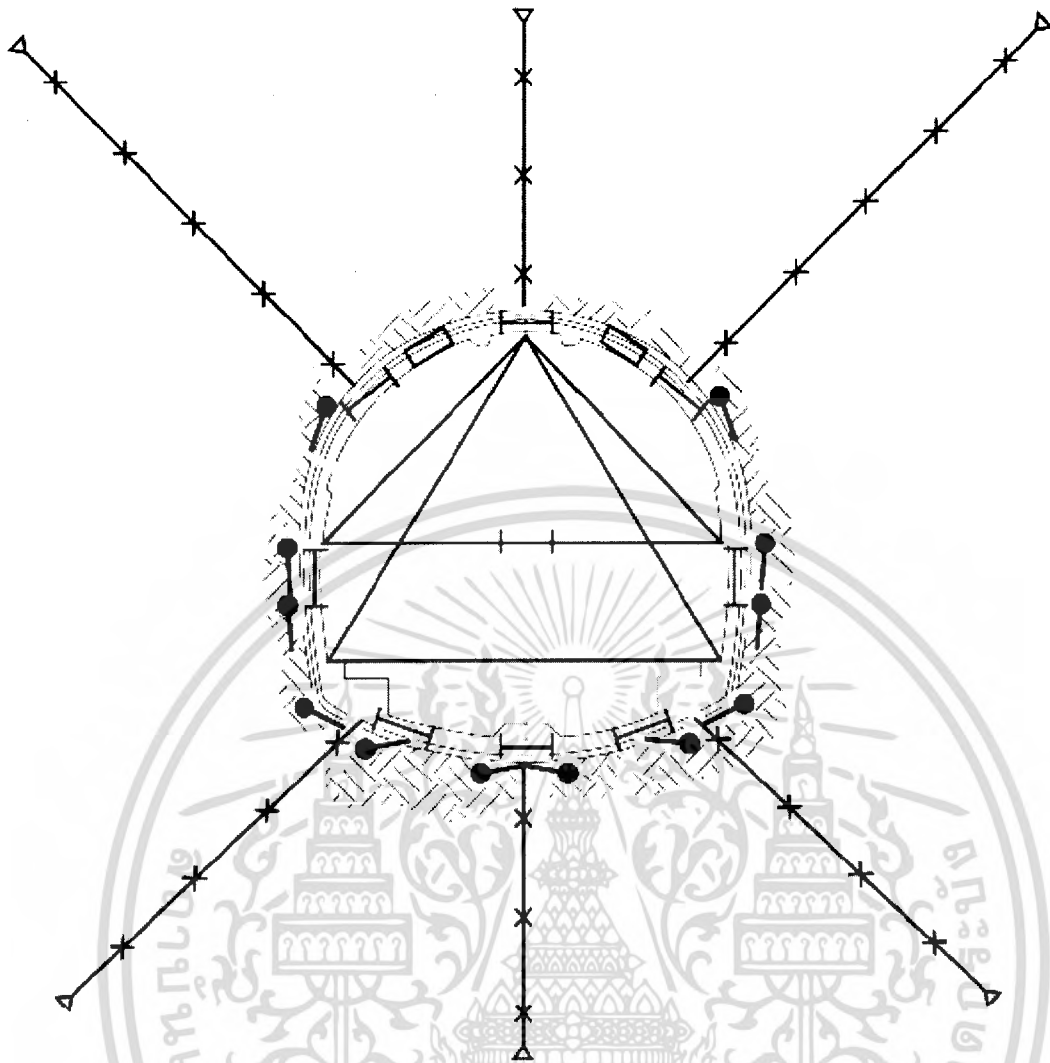
วัตถุประสงค์

- ติดตามสภาพของสิ่งก่อสร้างใกล้เคียง
- ทราบถึงสภาพของ Segments

ปัจจัยที่ต้องการวัด

- ความเครียดของ Segments
- น้ำหนักกดทับตามแนวอุโมงค์
- การเคลื่อนตัวของดินและสิ่งก่อสร้าง
- Convergence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา³⁵ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Deep Tunnel in Rock

รูปที่ 3.4 ตำแหน่งและชนิดเครื่องมือของอุโมงค์ลึกในหิน

วัตถุประสงค์

- ติดตามสถานะภาพของตัวอุโมงค์
- เพื่อทราบถึงสถานะภาพการขุดเจาะ

ปัจจัยที่ต้องการวัด

- การเคลื่อนตัวของเนื้อหินและรูเจาะ
- ความเครียดตามแนวเจาะ
- Convergence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา³⁶ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การเก็บและแปลผลข้อมูล

การเก็บและแปลผลข้อมูลสามารถจำแนกได้เป็นแบบอัตโนมัติ(automated) และแบบไม่อัตโนมัติ(without automated) โดยจะตัดสินจากปริมาณข้อมูลและระยะเวลาในการเก็บข้อมูล หากมีปริมาณมากและใช้ระยะเวลานาน เพื่อที่จะได้มาซึ่งการแปลผลที่ถูกต้องรวดเร็ว จึงจำเป็นต้องเลือกใช้เครื่องมือแบบอัตโนมัติ(automated)ถึงแม้จะมีราคาสูงกว่า เพราะจะทำให้สามารถหาวิธีแก้ไขปัญหามีแนวโน้มจะเกิดขึ้นได้ทันถ่วงที

ชนิดของสัญญาณที่พบบ่อยในงาน Geotechnical Instrument:

- 1 สัญญาณค่าความต่างศักย์ (Voltage signal) จะเป็นสัญญาณพื้นฐานที่ใช้กันในห้องอ่านทั่วไป หลักการทำงานของห้องอ่านแบบนี้ก็คือ จะต้องจ่ายไฟเข้าไปเพื่อกระตุ้นห้องอ่านให้ทำงาน และจากนั้นห้องอ่านจะส่งค่าความต่างศักย์ออกมาโดยมากจะเป็นช่วงกระแสต่ำ ๆ อาจจะเป็น โวลต์ หรือ มิลลิโวลต์ แล้วแต่ประเภทของห้องอ่าน และการใช้งาน จากค่าที่ได้ก็สามารถนำไปแปลงให้อยู่ในรูปข้อมูลต่าง ๆ ที่ต้องการวัดได้ ข้อดีของสัญญาณแบบนี้คือ มีความเสี่ยงต่อการเกิดของสัญญาณรบกวนค่อนข้างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากต้องอ่านค่าในช่วงของสัญญาณที่ต่ำมาก อาจจะได้ข้อมูลที่คลาดเคลื่อนได้ จะต้องมีการจัดการเรื่องตัวกรองสัญญาณที่ดี เพื่อเลี่ยงจากปัญหานี้
- 2 สัญญาณกระแสไฟฟ้า (Current Signal) เป็นห้องอ่านที่ให้สัญญาณออกมาในรูปของค่ากระแสไฟฟ้า ที่พบกันมากคือ 4 ถึง 20 mA เช่นเดียวกับแบบแรก จะต้องมีการจ่ายไฟให้กับห้องอ่านก่อนจึงจะสามารถวัดค่าสัญญาณได้ จุดประสงค์หลักที่เลือกใช้สัญญาณประเภทนี้ก็คือ เพื่อลดปัญหาเรื่องของสัญญาณรบกวน เนื่องจากว่าค่ากระแสของไฟฟ้าจะคงที่ตลอดเวลา ไม่แปรปรวนเหมือนค่าความต่างศักย์ ซึ่งอาจจะเปลี่ยนแปลงได้จากปัจจัยหลายประการ และยังสามารถที่จะวัดค่าสัญญาณในช่วงที่ต่ำมากได้ โดยไม่มีปัญหาเรื่องความคลาดเคลื่อน นอกจากนี้จุดเด่นอีกข้อของสัญญาณแบบกระแสก็คือ สามารถทำการส่งข้อมูลได้ระยะทางที่ไกลกว่าสัญญาณแบบค่าศักย์ไฟฟ้าที่สัญญาณอาจเกิดการลดทอนลงได้เนื่องจากความยาวของสายไฟ
- 3 สัญญาณความถี่ (Frequency Signal) หรือ ที่เรียกกันทาง Geotechnical ว่า Vibrating Wire การทำงาน จะเป็นการวัดค่าความถี่ที่เกิดขึ้นในเส้นลวด พบบ่อยกับห้องอ่านที่ใช้ในการวัดค่าแรงดัน, Tension(Compression) และ การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็ก ข้อดีของห้องอ่านแบบนี้คือ อายุการใช้งานค่อนข้างนาน เหมาะสำหรับการติดตั้งที่ต้องการการวัดผลระยะยาว

3.5 เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวระดับลึก (INCLINOMETER)

ที่มาและความสำคัญ

Inclinometer เป็นอุปกรณ์ที่วัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างในพื้นที่ที่มีการเลื่อนไถลตัวด้านข้างของดิน กล่าวคือ เมื่อมีการขุดเจาะอุโมงค์ภายใต้พื้นดิน มวลดินซึ่งเคยอยู่แบบอัดตัวแน่นก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งสามารถวัดค่าการเปลี่ยนแปลงด้านข้างได้โดยอาศัย Inclinometer ซึ่งการเบี่ยงเบนของตัวท่อ (Casing) ไปจากตำแหน่งแนวตั้งเดิม จะส่งตัวข้อมูลโดย ตัวอ่านค่า (Porbe) ไปยัง Readout unit เพื่อเก็บข้อมูลและแสดงผลข้อมูลต่อไป

ความสำคัญที่จะต้องติดตั้ง Inclinometers ประกอบด้วย

ใช้เพื่อการสำรวจที่ตั้งภาคสนาม (Site investigation)

การสำรวจภาคสนามทางปฐพีเทคนิค นั้นจะเกี่ยวข้องกับการ สำรวจและหาค่าของความแข็งแรงและเสถียรภาพของดิน เครื่องมือ Inclinometers จะเป็นเครื่องมือที่ใช้ติดตามและวัดทิศทางการเคลื่อนตัวของเสถียรภาพโดยตรงของดิน ตัวอย่างกรณี ติดตั้ง Inclinometers เพื่อตรวจสอบการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นบริเวณระบายที่จะเกิดแรงเฉือนของตัวเขื่อน ซึ่งถ้าไม่มีการตรวจสอบก็จะเป็นปัญหาเกิดขึ้นเมื่อมีการเก็บกักน้ำจนเต็ม จะทำให้แรงดันของน้ำในระบายที่เกิดแรงเฉือน

ใช้ตรวจสอบข้อเท็จจริงในการออกแบบ (Verification design assumption)

Inclinometers ถูกติดตั้งเพื่อใช้ตรวจสอบค่าความถูกต้องของการเคลื่อนตัวของโครงสร้างซึ่งจะเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ในการพยากรณ์ ค่าระหว่าง Design phase ต่างๆ ตัวอย่าง เช่น การติดตั้ง Inclinometers เพื่อทำการวัดค่าการเบี่ยงเบนของกำแพงกันดิน (retaining wall) ซึ่งผลจากการวัดปรากฏว่าเกิดการเบี่ยงเบนไปไม่เกิน 7.5 cm ณ ขณะที่มีน้ำหนักมากระทำอย่างเต็มที่ ดังนั้นการวัดของ Inclinometers จึงทำให้รู้ค่าถึงขอบเขตการเบี่ยงเบนของดิน และทำให้ผู้ออกแบบ สามารถแก้ไขการออกแบบในอนาคตในส่วนของหน้าตัดกำแพง

ช่วยในการตัดสินใจในช่วงที่จำเป็นต้องแก้ไขการวัด (Determining the need for corrective Measures)

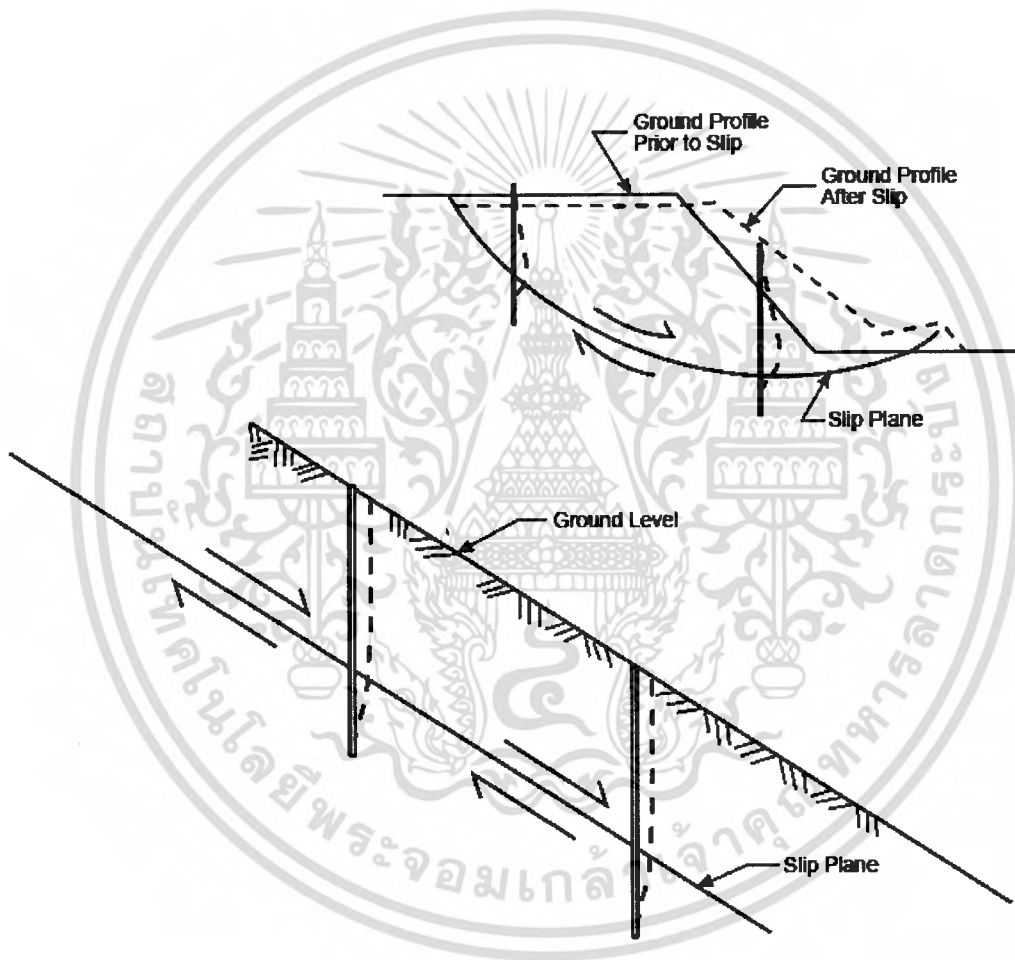
Inclinometers ถูกติดตั้งเป็นเครื่องมือที่วัดทั้งขนาด ทิศทาง และอัตราการเคลื่อนตัวของดิน ข้อมูลเหล่านี้จะช่วยให้อวิศวกรสามารถตัดสินใจได้ถึงความจำเป็น สำหรับการแก้ไขการวัด ตัวอย่าง เช่น ฝ่ายงานก่อสร้างเส้นทางถนน จะต้องรู้ถึงความเสี่ยงที่จะเกิดการเคลื่อนตัวของดิน เอกสารนี้เป็นเอกสารทส่งวนเวียนสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

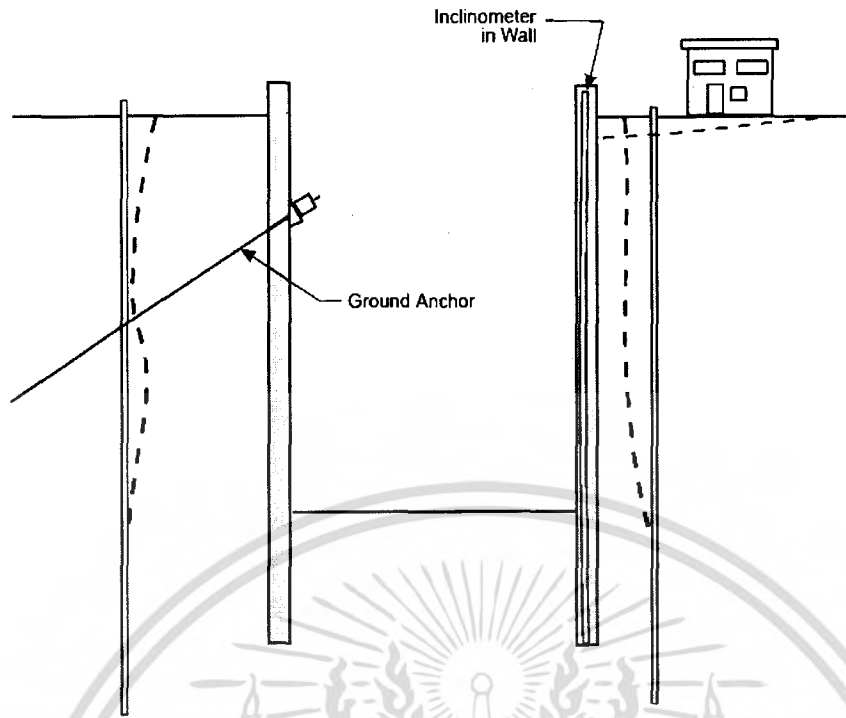
ไม่ควรที่จะมีการลงทุนเพื่อหาแรงงานในทำการตรวจสอบการเคลื่อนตัวและการถล่มของดิน ดังนั้น จึงตรวจสอบการเคลื่อนตัวของดินโดยใช้ Inclinometers แทน

เป็นเครื่องเตือนความปลอดภัย (Safety Monitoring)

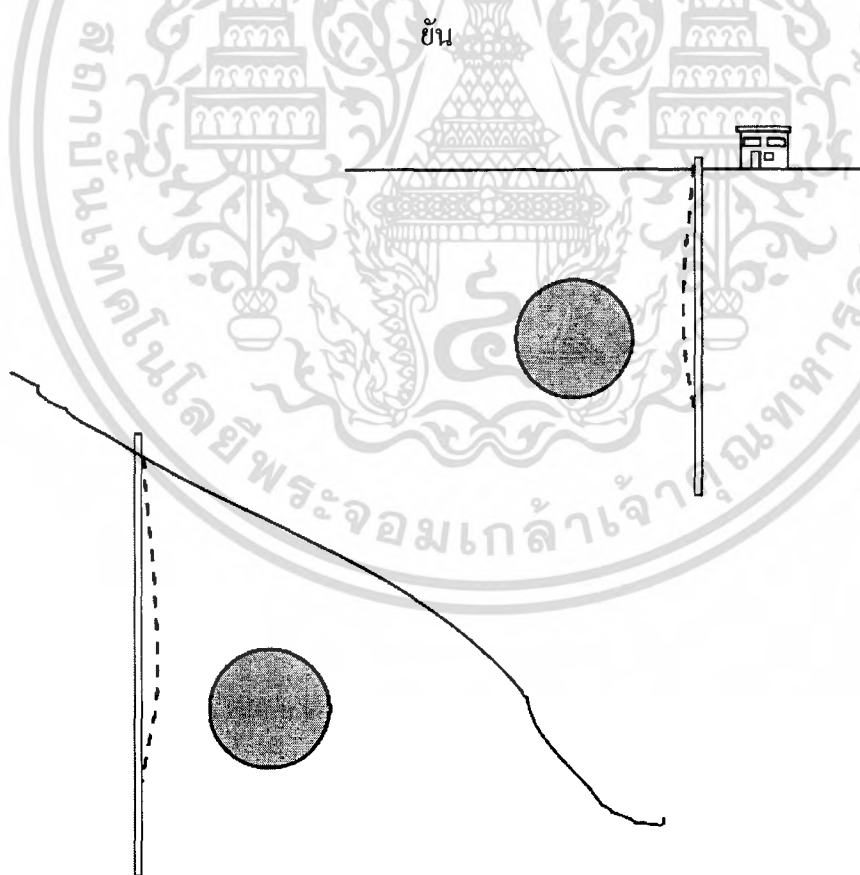
Inclinometer เป็นเครื่องมือที่ใช้บอกความปลอดภัยอย่างต่อเนื่อง Inclinometer สามารถเตือนถึงความไม่ปลอดภัย ความเสียหาย ซึ่งตัวอุปกรณ์อาจจะถูกติดตั้งไว้ใกล้กับ ถนน ทางรถไฟ อุโมงค์ส่งน้ำ อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน เพื่อบอกถึงลักษณะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของ ดิน



รูปที่ 3.5 วัดค่าการเคลื่อนตัวในบริเวณที่เกิดแรงเฉือน

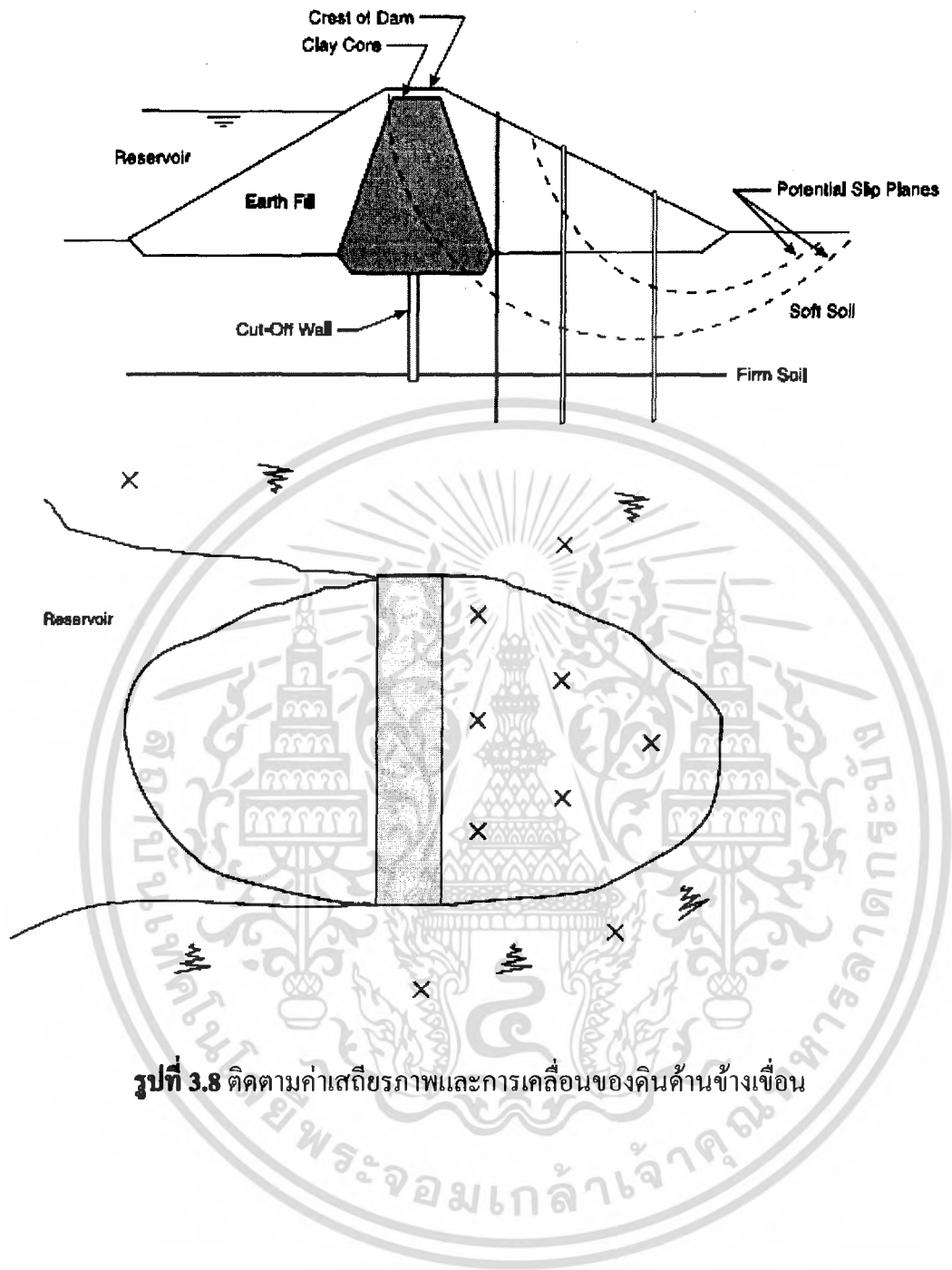


รูปที่ 3.6 ใช้ตรวจสอบการเคลื่อนที่ของดินที่มีผลต่อ สิ่งก่อสร้างข้างเคียง ความมั่นคงและระบบค้ำ
ยัน



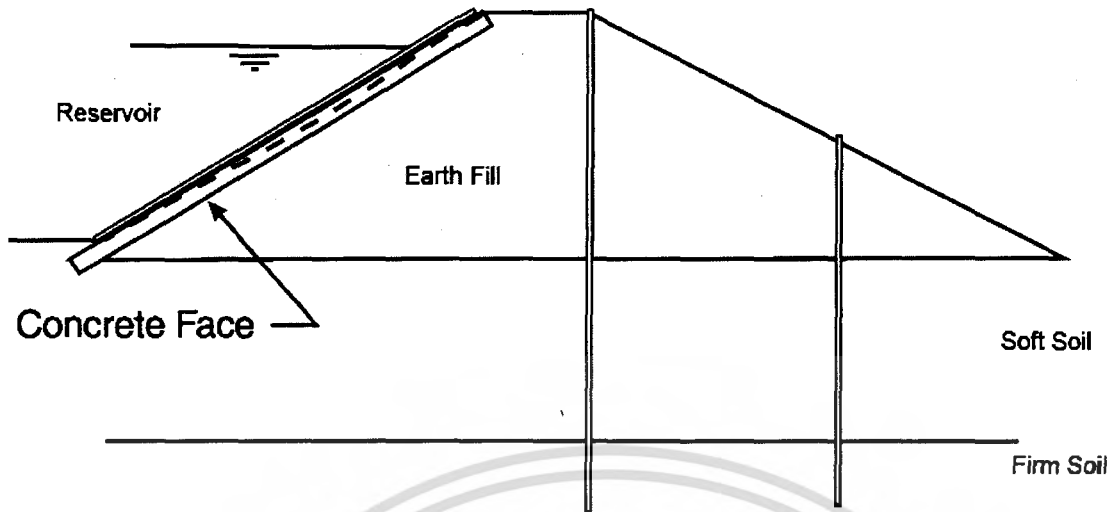
รูปที่ 3.7 ติดตามค่าการเคลื่อนตัวของดินรอบอุโมงค์ขณะขุดเจาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

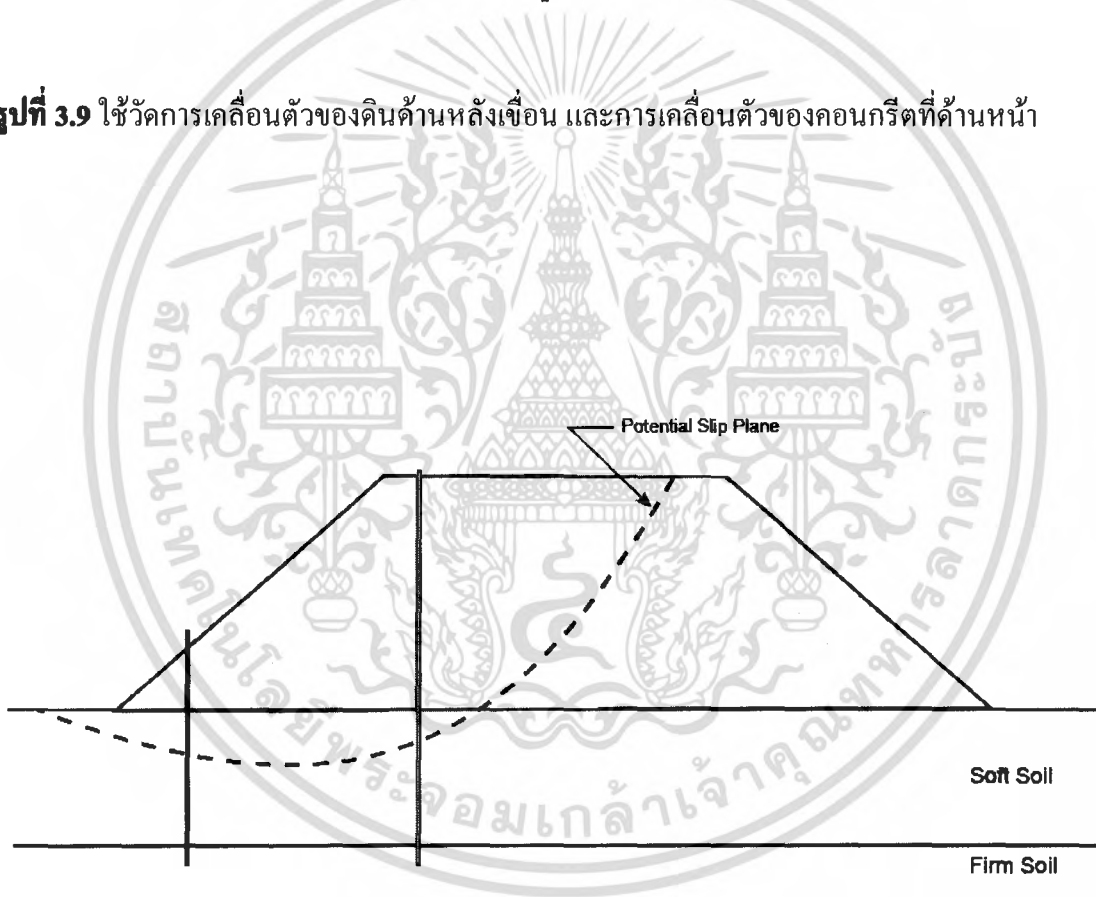


รูปที่ 3.8 ติดตามค่าเสถียรภาพและการเคลื่อนของดินด้านข้างเขื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ⁴¹ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

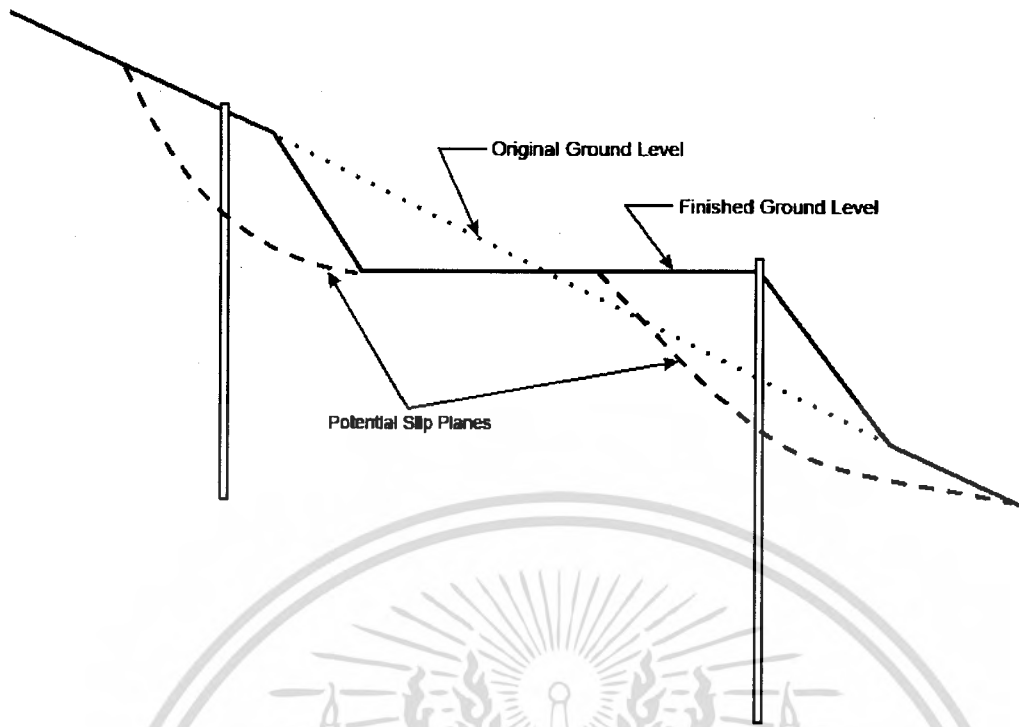


รูปที่ 3.9 ใช้วัดการเคลื่อนตัวของดินด้านหลังเขื่อน และการเคลื่อนตัวของคอนกรีตที่ด้านหน้า

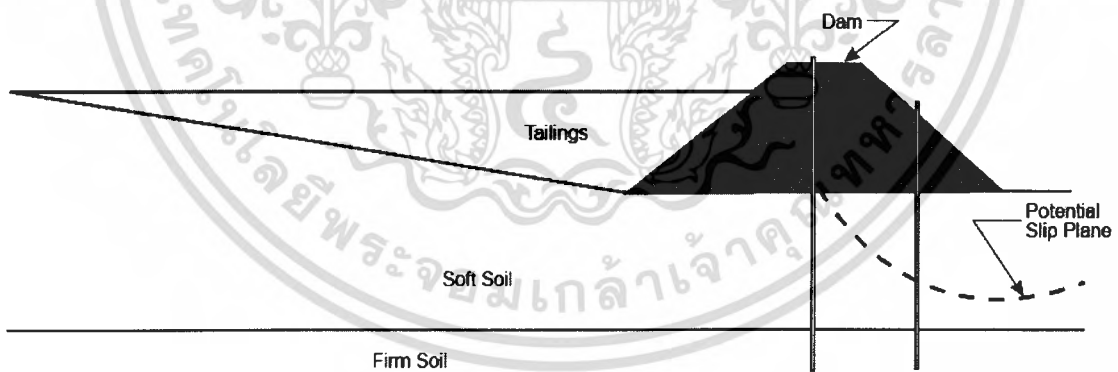


รูปที่ 3.10 วัดการเคลื่อนตัวของดินบริเวณที่เกิดแรงเฉือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา⁴² และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

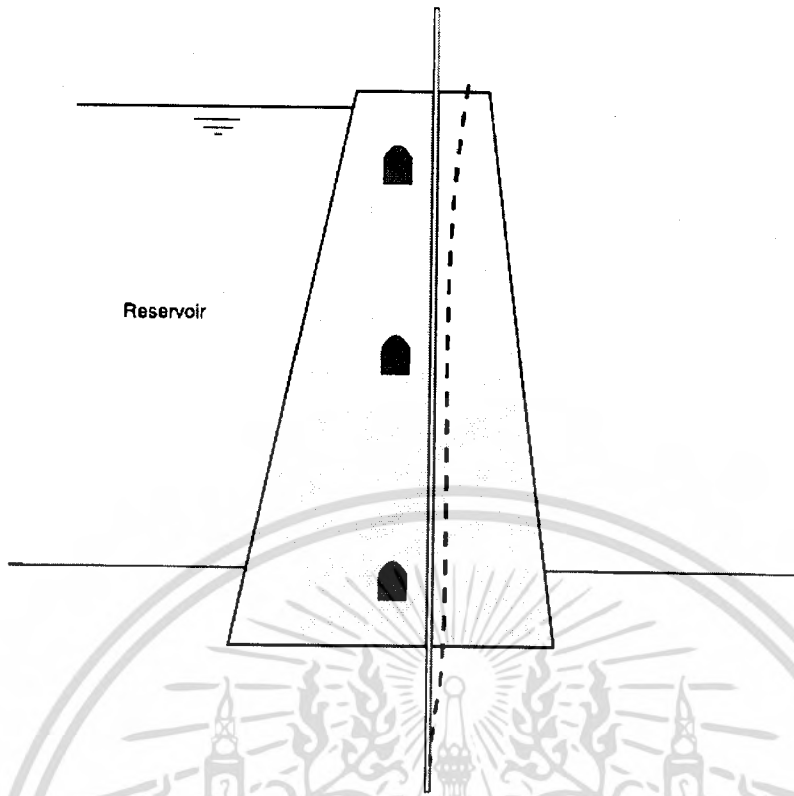


รูปที่ 3.11 ใช้วัดการเคลื่อนตัวของดินในบริเวณที่ตัดดินออก

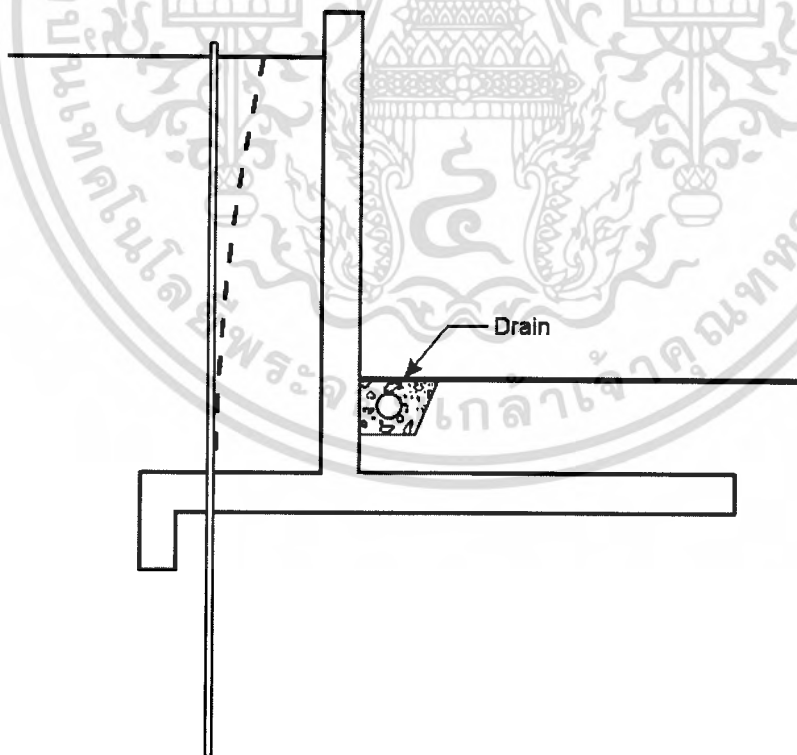


รูปที่ 3.12 ติดตามเสถียรภาพของเขื่อนและการเคลื่อนตัวของบริเวณที่เกิดแรงเฉือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

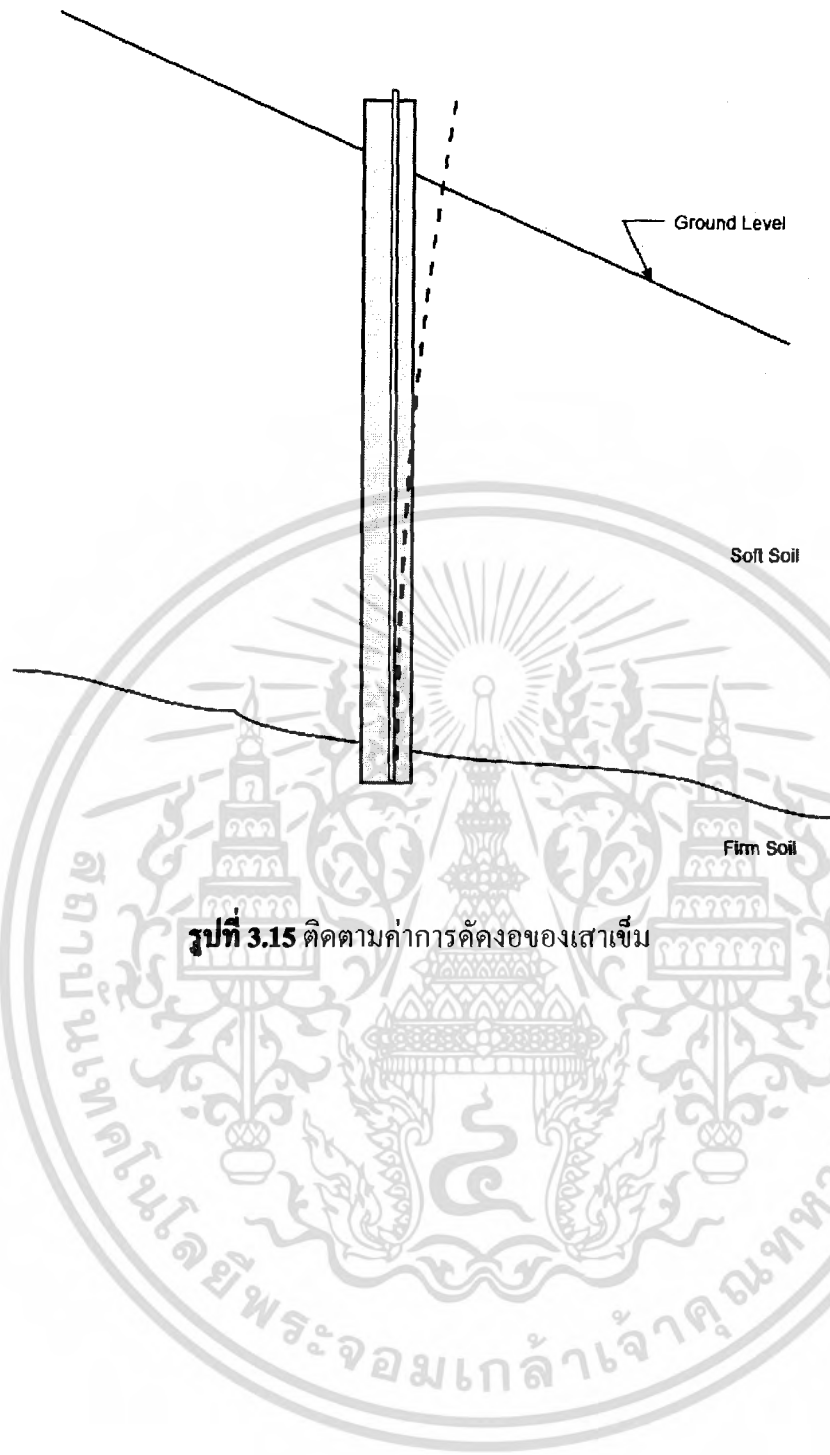


รูปที่ 3.13 ติดตามการบิด การหมุน และการเคลื่อนที่ของเขื่อน



รูปที่ 3.14 วัดการตัดและตรวจสอบการหมุนในกำแพงกันดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบ



รูปที่ 3.16 แสดงส่วนประกอบของ Inclinometer

Casing

ใช้สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของ Inclinometer โดยจะทำมาจาก พลาสติก อลูมิเนียม ไฟเบอร์กลาสหรือเหล็ก เมื่อต้องการทดลองการเปลี่ยนแปลงของดินในแนวราบ ควรที่จะทำการติดตั้งท่อ casing ให้ใกล้เคียงแนวของเส้นตรงให้มากที่สุด โดยปกติแล้วท่อ casing จะต้องเป็นตัวกำหนดทิศทางของการเคลื่อนที่ของ Inclinometer

Plastic Casing

ท่อทำจากวัสดุ ABS (acrylonitrile butadiene styrene) เนื่องจากใช้งานง่าย ในการ Grout ที่ระดับน้ำใต้ดินท่อชนิดนี้จะทนต่อการสึกกร่อนได้ดีและจะเกิดการจืดว่าโครงสร้างของท่อได้ดีสำหรับการวัดการเคลื่อนตัวของทางด้านข้างของดินแต่จะมีการเปราะแตกง่ายที่อุณหภูมิต่ำ

Aluminum Casing

จะมีปัญหาเรื่องสนิม เนื่องจากน้ำใต้ดินหรือน้ำปูนที่เกิดจากการ Grouting ในระหว่างการติดตั้ง จากการรายงานพบว่า ในหลายกรณีจะเกิดสนิมที่ท่อในเวลาไม่นานซึ่งถ้าเลือกใช้ท่อประเภทนี้จะต้องทำการป้องกันการเกิดสนิมด้วย

Steel Casing

ร่องของท่อจะเชื่อมติดกับท่อเหล็ก สามารถใช้เป็น Inclinator casing ใช้ในการวัดกับเสาเข็มเหล็ก มีราคาถูกที่สุดแต่จะให้ความแม่นยำต่ำ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2 นิ้ว และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.75 นิ้ว เป็นขนาดทั่วไป การเชื่อมต่อจะต้องไม่ให้ร่องเกิดการบิด โดยขนาดของ couple จะต้องมีความพอดีกับขนาดของท่อ



รูปที่ 3.17 ตัวอย่าง Casing ชนิดต่างๆ

A portable probe containing a gravity – sensing transducer



รูปที่ 3.18 แสดง Inclinator Probe

A portable readout

เป็นตัวเก็บข้อมูลและแสดงข้อมูลการวัดการเคลื่อนตัวของดิน ซึ่งจะรับค่ามาจาก

Inclinometer probe

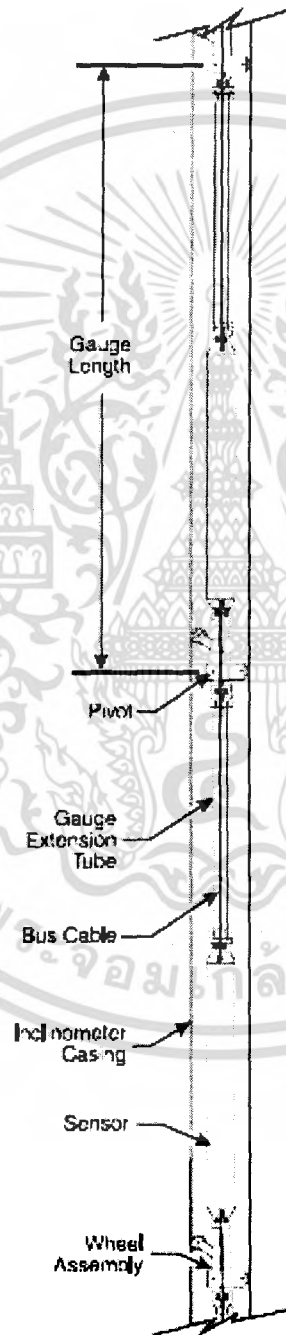


รูปที่ 3.19 แสดง readout unit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A graduated electrical cable

เป็นสายเก็บข้อมูล โดยจะถูกใช้ในการเก็บข้อมูลการเคลื่อนตัวที่ความลึกต่างๆกัน ซึ่งเป็นสายที่ทำหน้าที่ในการเชื่อมโยงข้อมูลที่ได้จากการทดลองส่งไปยังตัวเก็บข้อมูล readout unit และตัวสายเก็บข้อมูล control cable โดยทั่วไปจะถูกกำหนดไว้เป็นระยะห่างที่เท่ากันทุกๆ 0.5 เมตร

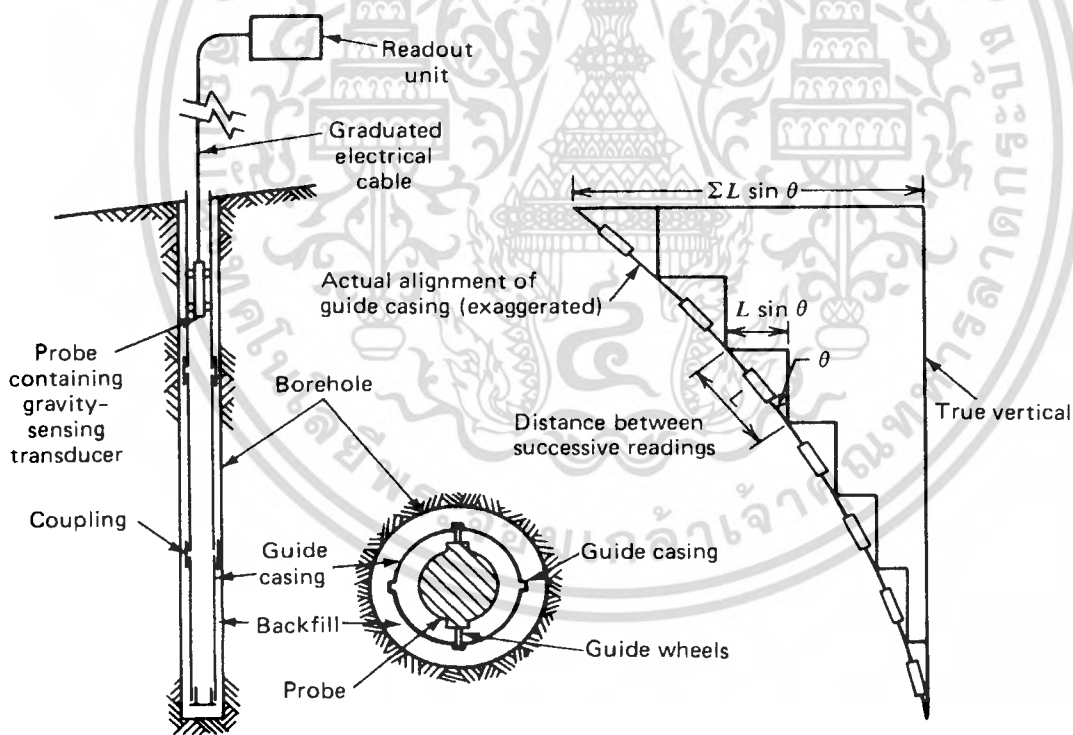


รูปที่ 3.20 Inclinometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงาน

จากรูปเป็นแสดงหลักการทำงานของเครื่องมือ Inclinator สำหรับการเคลื่อนที่ในท่อ casing จากที่มีการติดตั้ง casing เสร็จเรียบร้อยแล้วแนวของท่อจะต้องใกล้เคียงกับแกนตั้ง จากการทดลองจะได้ค่าเบี่ยงเบนค้อยๆ ลดลงในช่วงที่อยู่บริเวณด้านล่างของท่อ และจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อทำการทดลองในระดับที่สูงขึ้นเรื่อยๆ โดยจะมีการกำหนดแนวแรกเป็นแนวหลักเพื่อเป็นข้อมูลที่ยังไม่มีมีการเคลื่อนตัวของดิน ผลต่างระหว่างการอ่านค่าในครั้งแรกและการอ่านค่าในครั้งที่สองเมื่อเวลาผ่านไป จะเห็นได้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงแนวของเส้นตรง ในการติดตั้งท่อ casing จะต้องทำการติดตั้งให้บริเวณด้านล่างสุดของท่อ casing ต้องไม่มีการเคลื่อนตัวของท่อ และจากข้อมูลสามารถแปลงผลข้อมูลทำได้โดยการหาค่าเฉลี่ยของการวัดค่าในครั้งแรกและการวัดค่าในครั้งที่สองและนำผลต่างของค่าทั้งสองมา Plot กราฟก็จะทำให้ได้การเคลื่อนตัวของท่อ Casing ในแนวราบตลอดความยาวของท่อ



รูปที่ 3.21 หลักการทำงานของ Inclinator

การได้มาของข้อมูล (Data Reduction)

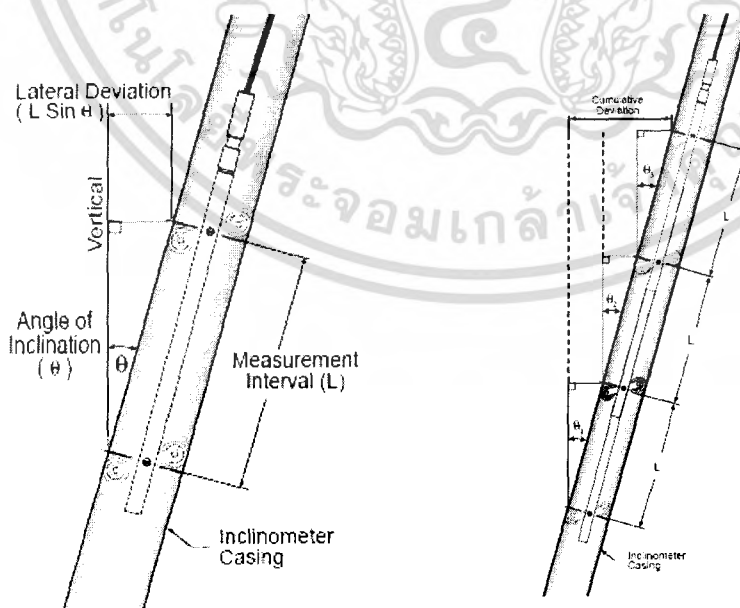
การวัดค่าการเอียงในท่อ casing

ตัว Inclinometer probe และในทีนี่เป็นตัวส่งสัญญาณในการวัดการเอียงตัวของท่อ casing สำหรับตัวอ่านค่า (probe), การวัดค่าการเอียงของดิน ลักษณะจะเหมือนตัวอย่างรูปข้างล่าง โดยตัวหัวอ่านค่า (probe) จะมีความยาวอยู่ที่ 0.5 เมตร ณ ตำแหน่งจากล่างถึงบริเวณบนของท่อ casing โดยที่ตัวส่งสัญญาณจะถูกติดตั้งตามสาย cable ทุกๆความยาว 0.5 เมตร เพื่อส่งข้อมูลการเคลื่อนตัวของดิน ไปยัง A portable readout การอ่านค่าการเอียงภายในท่อ casing ที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับค่าความลึกหรือค่าระดับ

การเอียงตัวออกทางข้าง (Lateral Deviation)

เมื่อเครื่องมือวัด Inclinometer เริ่มทำการอ่านค่าตั้ง การเอียงตัวภายในท่อจะถูกเปลี่ยนไปเป็นระยะการเคลื่อนตัวด้านข้าง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงระยะห่างจะถูกเรียกว่า การเพิ่มขึ้นของการเบี่ยงเบนของดิน (Incremental deviation) และผลของการรวมกันของการเบี่ยงเบนด้านข้างของดินจะถูกเรียกว่า การเอียงตัวสะสม (Cumulative deviation)

ระยะการเคลื่อนตัวด้านข้าง เป็นเสมือนตัวแทนที่แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของท่อ (casing) ที่เบนออกจากแนวเดิม ซึ่งระยะทางจะถูกคำนวณโดยการหักลบการเปลี่ยนแปลงในขั้นต้น



รูปที่ 3.22 แสดงการเบี่ยงตัวด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อที่ 51 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอ่านค่าในแต่ละตำแหน่ง

การอ่านค่าไม่ได้กำหนดค่าตำแหน่งการวัดที่แน่นอน โดยแต่ละตำแหน่งจะต้องมีการกำหนดไว้แน่นอน เคมิลที่ใช้ต่อกับ Inclinometer จะต้องไม่มีการขีด ตำแหน่งที่ทำการวัดจะต้องเป็นจุดถาวรและแน่นอนอีกสาเหตุหนึ่งที่จะเป็นการเพิ่มความผิดพลาดได้คือการเพิ่มความยาวของ Casing ถ้าร่องของ Casing ไม่ตรงกันหรือบริเวณที่ต่อตัวท่อไม่ตรงแนวจะยังทำให้เกิดข้อผิดพลาดได้ วิธีการอ่านค่าใน Casing จะอ่านค่าเมื่อระยะช่องว่างระหว่างล้อยของ Inclinometer มีค่าเท่ากัน ถ้าระยะไม่เท่ากันการเคลื่อนตัวของ Casing จะทำให้กราฟที่ได้ไม่สม่ำเสมอในแต่ละตำแหน่งที่ทำการวัด ทำให้เกิดข้อผิดพลาดขึ้นได้

วิธีการวัด (Measurement method)

Probe จะยึดแนวปลายท่อแนวตั้ง ปลายท่อเอียง หรือระยะหยุดของท่อแนวราบ การวัดทำได้โดยการถือ Probe ในแต่ละความลึกภายในท่อ แล้วบันทึกค่าความลึกและค่าความโน้มเอียง ซึ่งค่าความแม่นยำสูงสุดสามารถอ่านได้ในช่วงที่เท่ากับระยะห่างระหว่างล้อย การอ่านค่าในท่อแนวตั้งโดยทั่วไปจะอ่านหน้าศูนย์ก่อนแล้วค่อยกลับด้านไปอ่านค่าหน้า 180 องศา และจะต้องทำการวัดค่า ณ สถานที่เดิม ถ้าใช้ Probe ที่อ่านค่าได้หน้าเดียวจะต้องหมุน Probe ไป 90 องศาเพื่ออ่านค่าอีกหน้าหนึ่ง โดยต้องทำทั้งหน้า 0 องศาและหน้า 180 องศาด้วย ความน่าเชื่อถือของข้อมูลสามารถคำนวณได้เมื่อทำการอ่านค่าหน้า 180 องศาและได้ยืนยันข้อมูลในสนามไปแล้ว เมื่ออ่านค่าในท่อในแนวราบ check-sum สามารถทำได้หลังจากอ่านค่าจบจากปลายถึงปลาย ส่วนการอ่านค่าในท่อเอียงเป็นไปได้ว่าแกนของ transducer อาจยกตัวขนานหรือตั้งฉากกับแกนของ Probe ได้แต่เป็นไปได้ที่จะยกตัวในแนวเอียง

check-sums คือ ผลรวมของการอ่านหน้า 0 และหน้า 180 องศา ในความลึกเดียวกัน โดยการอ่านเมื่อมีสัญญาณให้อ่าน ในทางปฏิบัติจะมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากตัวท่อ (casing) มีการจัดวางตำแหน่งในการทดลอง และออฟเซตศูนย์ของการทดลองที่ไม่เป็นศูนย์ เครื่องมือสามารถตรวจเช็คผลรวมของสถิติได้เพื่อประเมินค่าความถูกต้องของข้อมูลได้ Slope Indicator's Digitilt Datamate คือผลรวมของสถิติในระยะแรกจะอ่านได้เมื่อพบเห็นปัญหาจากการอ่านที่ผิดพลาด เมื่อยังคงทำการทดลองอยู่ในสนาม และสามารถแก้ไขข้อมูลนั้นถูกต้องได้จากสถิติ ถ้าผลการทดลองใช้ไม่ได้ในสนาม ผลรวมของสถิติเดิมที่อยู่ใน PC สามารถนำมาใช้ในการปรับลดค่าใน Software ได้ ตัวอย่างเช่น โปรแกรม DigiPro ซึ่งผลรวมนี้จะนำมา Plot กราฟซึ่งจะได้ค่าที่ติดตามสถิติที่เก็บมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การติดตั้ง Inclinometer casing

กระบวนการติดตั้ง ของ Inclinometer casing การติดตั้งจะเปลี่ยนแปลงตามระดับความลึกโดยต้องมีการเลือกใช้ชนิดของ casing couple และข้อกำหนดของแต่ละ site งาน กระบวนการอธิบายโดย AASHTO (1978) , ISRM (1981a) , Wilson and Mikkelsen (1977,1978) และคู่มือการใช้งานจากบริษัทผู้ผลิตเมื่อทำการติดตั้ง Inclinometer casing ร่วมกับ extensometer

ข้อกำหนดของ couple

จะต้องมีความระมัดระวังทุกครั้ง ปิดรอยต่อของ couple และ bottom cap เพื่อป้องกันการรบกวนดินเนื่องจากการถดถอย couple แบบ O-rings ไม่จำเป็นต้องทำการปิดผนึก (seal) แต่ถ้าเป็น couple ชนิดอื่นจะต้องทำการปิดผนึก (seal) ด้วยยางหรือเทป และการยึดด้วย rivet เพื่อควบคุมแรงเฉือนที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนตัว การปิดด้วยยางหรือเทปจะทำการปิดที่หัวของ rivet โดยหัวของ rivet ต้องเรียบ rivet ที่ติดตั้งแต่ละตัว ส่วนใหญ่จะใช้ซีเมนต์ทำการปิด couple ที่เป็นพลาสติก และหาค่ากำลังรับแรงดึงเพื่อคำนวณหาความแข็งแรงของซีเมนต์ได้ เมื่อกำลังรับแรงดึงสูงสุดต้องการในซีเมนต์ couple ที่ใช้ใน PVC หรือ ABS casing ควรผสม primer เพื่อให้มีการยึดเกาะที่ผิว การยึดด้วย rivet จะต้องทำการยึดโดยไม่ให้โดนกับร่องของ casing ต้องติดตั้งโดยเรียงแนวทางการเคลื่อนตัวของ inclinometer probe



รูปที่ 3.23 ลักษณะของ O-ring

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา⁵³ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การติดตั้งในสนาม

Inclinometer casing ที่ติดตั้งในสนาม แล้วใช้ Inclinometer probe หย่อนลงใน Inclinometer casing จะสามารถตรวจสอบการกระทำของดินด้านข้างที่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของท่อ casing

Grout Backfill

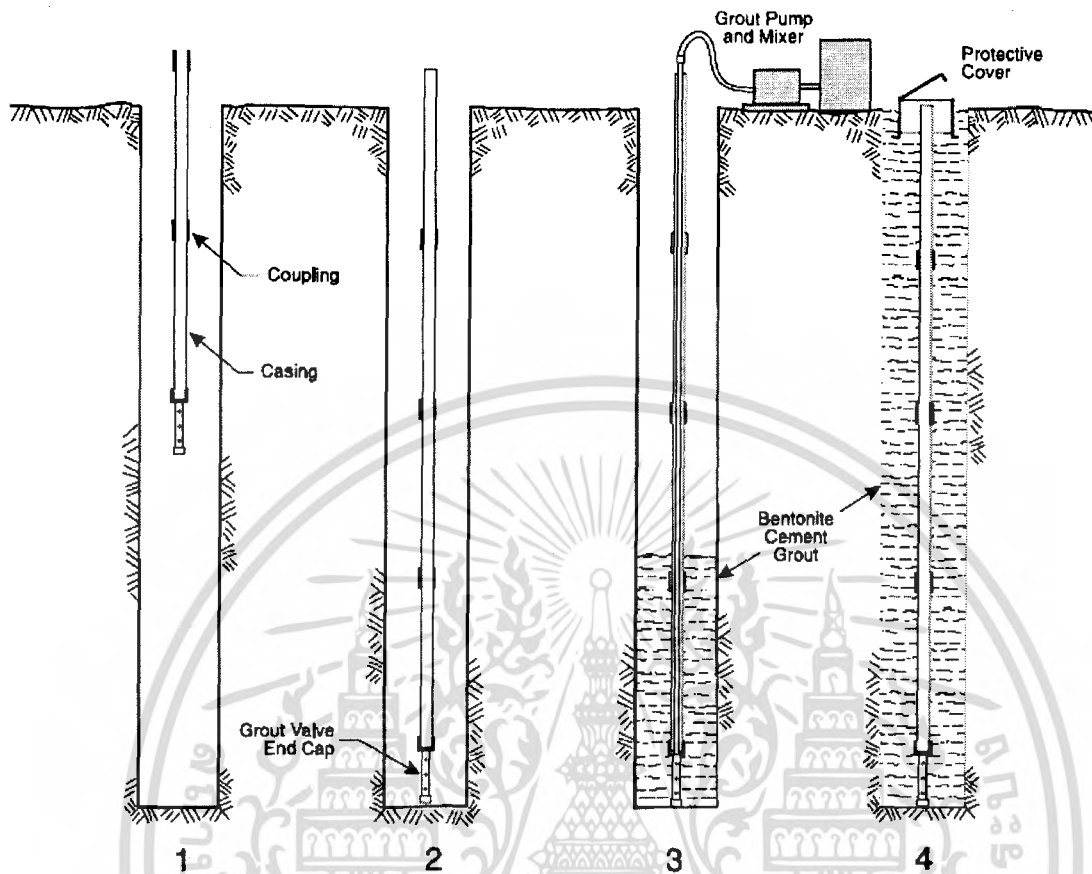
- การ grout จะทำให้กำลังที่มีอยู่รอบๆของท่อ casing ให้มีลักษณะที่เหมือนกัน
- ความหนาแน่นของสารที่ใช้ grout จะส่งผลทำให้เกิดแรงลอยตัว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มน้ำหนักเพื่อรักษาสมดุลไม่ให้ ท่อ casing ลอยตัวหลังติดตั้งไปแล้ว ท่อเหล็กที่อยู่ระดับต่ำสุดบริเวณหัวท้ายสุดจะช่วยให้รักษาท่อให้นิ่ง น้ำหนักภายนอกจะส่งผลทำให้ด้านล่างของท่อ casing ติดกัน เมื่อที่ระดับความลึกลงไปจะมีแรงลอยตัวที่คอยค้ำท่อ casing ขึ้นจึงจำเป็นต้องมีน้ำหนักมากดทับต่างหากเพื่อป้องกันท่อเกิดการแยกตัว

การติดตั้งในหลุมเจาะ

ระยะระหว่างผนังของหลุมเจาะกับ Inclinometer casing จะต้องทำการ grout ด้วย Bentonite ซึ่งจะมีคุณสมบัติเหมือนกับทรายหรือกรวดขนาดเล็ก เพื่อป้องกันการสูญเสียมวลดินรอบๆ

เมื่อถึงขั้นตอนที่จำเป็นต้องทำการ grout จะทำการ grout โดยแบบแยกเป็น 2 วิธี และมีลำดับขั้นตอนดังนี้

วิธีที่ 1 Using Grout Valve



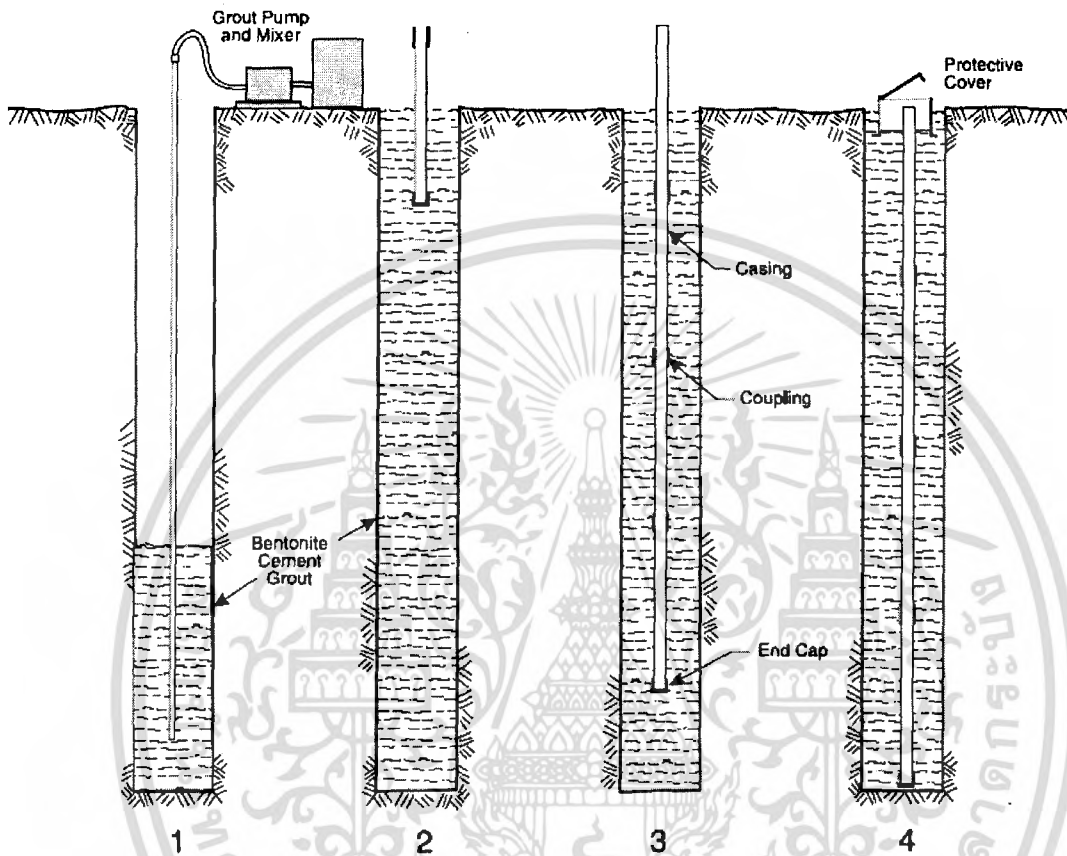
รูปที่ 3.24 การติดตั้งแบบ Grout Valve

- ทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่เหลือจากการเจาะ เช่น โคลน ซากปรักหักพัง ออกจากหลุมเจาะ ทำการติดตั้งตัว Grout Valve เป็นชิ้นส่วนล่างสุดของท่อ casing
- ทำการติดตั้งท่อ casing ในหลุมเจาะ โดยทำการเพิ่มชิ้นส่วนของท่อ casing จนกระทั่งตัวท่อหยั่งถึงความลึกที่กำหนดไว้ (ควรตรวจสอบบริเวณ couple ตลอดเพื่อป้องกันการเสียหาย) และถ้ามีน้ำอยู่เต็มหลุมเจาะ ในตัวท่อ casing ต้องมีน้ำเพื่อ ด้านแรงลอยตัว ส่วนในหลุมแบบแห้ง ตัวท่อ casing จะต้องมีน้ำเพื่อ ด้านแรงลอยตัว เมื่อไรก็ตามที่เริ่มทำการ grouting ควรรักษาระดับน้ำในอยู่ในระดับเดียวกับการ grout เพื่อหลีกเลี่ยง ความเสียหายบริเวณ coupling
- ที่ระดับต่ำกว่าตำแหน่งของท่อ grout จะต้องเชื่อมติดกับ grout valve โดยห้อย grout valve ไปถึงตำแหน่งล่างสุดของหลุมเจาะ จากนั้นเริ่มทำการปั๊มเพื่อทำการ grout โดยระดับน้ำในหลุมเจาะจะสูงขึ้นเรื่อยๆ
- จะหยุดปั๊มเมื่อการ grout มาถึง ณ. ตำแหน่งบนสุดของหลุมเจาะ จากนั้นจับตัวท่อ casing ไว้แล้วดึงเอาท่อ grout ออกมา และบริเวณบนสุดของหลุมเจาะจะต้องติดตั้ง protective cover

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 55 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อป้องกันสิ่งสกปรกตกลงไปในท่อ จากนั้นทิ้งไว้ประมาณ 1 วัน เพื่อให้ Bentonite เริ่ม set ตัวแล้วจึงค่อยหย่อนหัวอ่าน (probe) เพื่ออ่านค่าต่อไป

วิธีที่ 2 Using pre-grouted borehole



รูปที่ 3.25 การติดตั้งแบบ Pre-Grouted Borehold

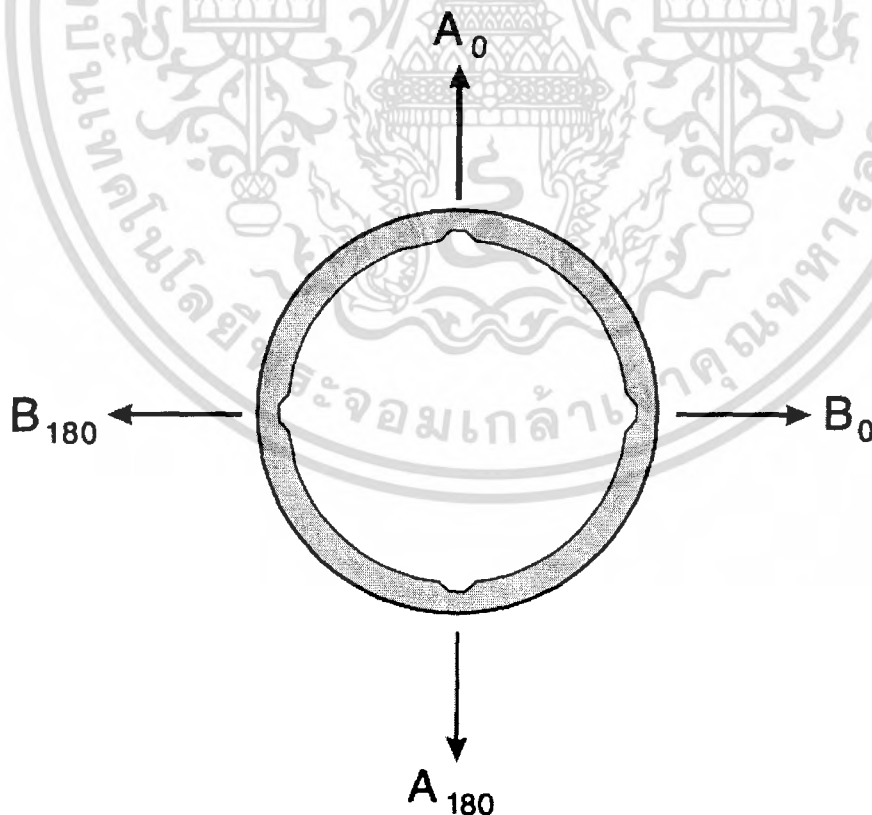
- ความสะอาดหลุมเจาะ เมื่อขุดเสร็จอาจจะมีน้ำโคลนและเศษวัสดุ จากนั้นใส่ตัว ท่อ grout ไปยังตำแหน่งล่างสุดของหลุมเจาะเริ่มทำการปั๊ม (pump grout) โดยค่อยๆขยกลบปลายท่อให้อยู่ต่ำกว่าระดับเบนโทไนท์ประมาณ 30-50 เซนติเมตร ตลอดการเกร้าที่จนเต็มหลุม
- ติดตั้งตัว bottom cap เป็นชิ้นส่วนด้านล่างสุดของท่อ casing แล้วจึงค่อยทำการติดตั้งท่อ casing ลงในหลุมเจาะ
- เพิ่มจำนวนตัวท่อ casing โดยต่อเข้าด้วย couple จนกระทั่งตัวท่อ casing หย่อนลงไปยังตำแหน่งความลึกที่กำหนดไว้ ในตัวท่อ casing จะเต็มไปด้วยน้ำเพื่อเป็นแรงดันแรงลอยตัว
- ณ ตำแหน่งที่ต่ำลงจากบริเวณที่ทำการเจาะถึง ตัวล่างสุดของท่อ casing จะมีแรงดันการลอยตัว ขณะที่ grout set และ ตำแหน่งบนสุดของหลุมเจาะจะติดตั้ง protective cover เพื่อ

ป้องกันสิ่งสกปรกตกลงไปในท่อ จากนั้นทิ้งไว้ประมาณ 1 วัน เพื่อให้ Bentonite เริ่ม set ตัว แล้วจึงค่อยหย่อนหัวอ่าน (probe) เพื่ออ่านค่าต่อไป

การอ่านค่าจากเครื่อง Digitilt DataMate

จะแสดงการเบี่ยงเบนการเคลื่อนตัวของดิน โดยข้อมูลที่ได้ คือ ให้ A_0 มีทิศทางวิ่งผ่านทางที่อุโมงค์ตัดผ่าน (ตั้งฉากกับอุโมงค์) เวลาจะวัดค่าให้หย่อนตัวหัวอ่าน(probe)พร้อมด้วยสาย Control cable ลงไปจนถึงระดับความลึกสูงสุดที่กำหนดไว้ จากนั้นเริ่มอ่านค่า A_0 โดยจะดึงตัว Control cable ขึ้นมาทุกๆ 0.5 เมตร ค่ามุมที่ได้จะถูกส่งข้อไปแปลข้อมูลในตัว Reading unit ดึงตัวสาย control cable จนกระทั่งถึงตำแหน่งบนสุด จากนั้นค่อยหมุนเปลี่ยนด้านไปเป็น A_{180} แล้วจึงหย่อนเพื่ออ่านค่าตามเดิม ดังนั้นค่าที่อ่านได้จากเครื่อง Reading unit คือค่า A_0 และ A_{180}

ส่วนค่า B_0 เป็นทิศทาง ที่วัดในแนวที่ขนานไปกับอุโมงค์ โดยทำการทดลองเหมือนการอ่านค่า A_0 จากนั้นเมื่ออ่านค่า B_0 ถึงตำแหน่งบนสุดแล้วจึงค่อยหมุนเปลี่ยนทิศทางไปเป็น B_{180} แล้วทำการทดลองเหมือนทำการอ่านค่า A_{180}



รูปที่ 3.26 แสดงทิศทางของ A_0 A_{180} B_0 B_{180}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยการอ่านค่าของเครื่องมือ Digitilt datamate จะเป็นการแสดงการเบี่ยงเบนการเคลื่อนตัว ซึ่งสามารถแยกออกได้เป็นหน่วยเมตริกซ์ และหน่วยอังกฤษ ดังแสดงดังนี้

$$\text{ค่า Display reading} = \sin\theta * \text{Instrument constant}$$

$$\text{ค่า Reading}_{\text{Metric}} = \sin\theta * 25000$$

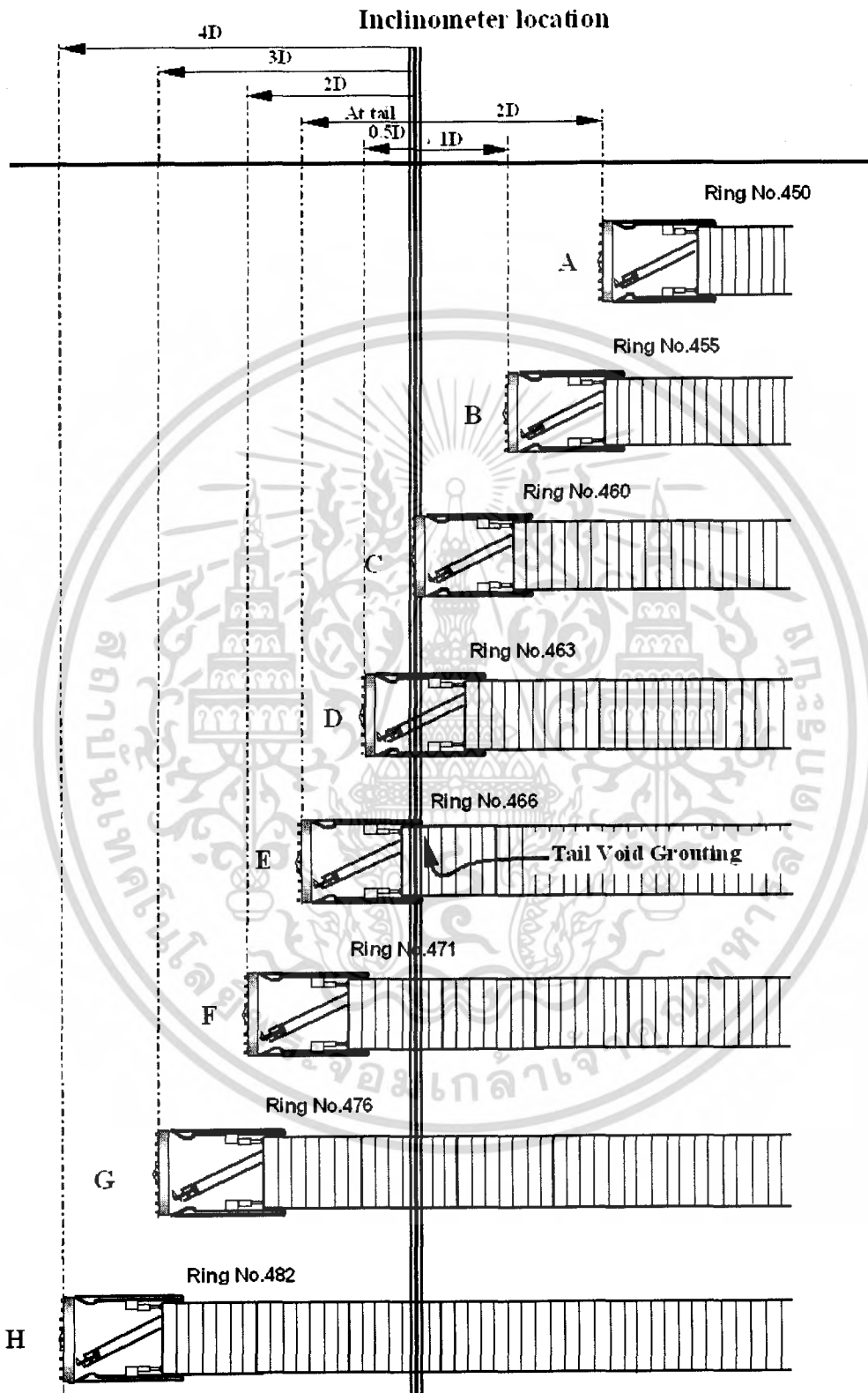
$$\text{ค่า Reading}_{\text{English}} = \sin\theta * 20000$$

$$\text{ค่า Averaged Reading} = (A_0 - A_{180})/2$$

ค่าการเคลื่อนตัวสะสมจากด้านล่างของหลุมเจาะถึงด้านบนของหลุมเจาะ (Cumulative displacement from bottom to top) คือ ค่าผลรวมของความลึกทุกๆ ตำแหน่งที่กำหนด เช่นอาจจะเป็นที่ 1 เมตร , 0.5เมตร จากด้านล่างของหลุม

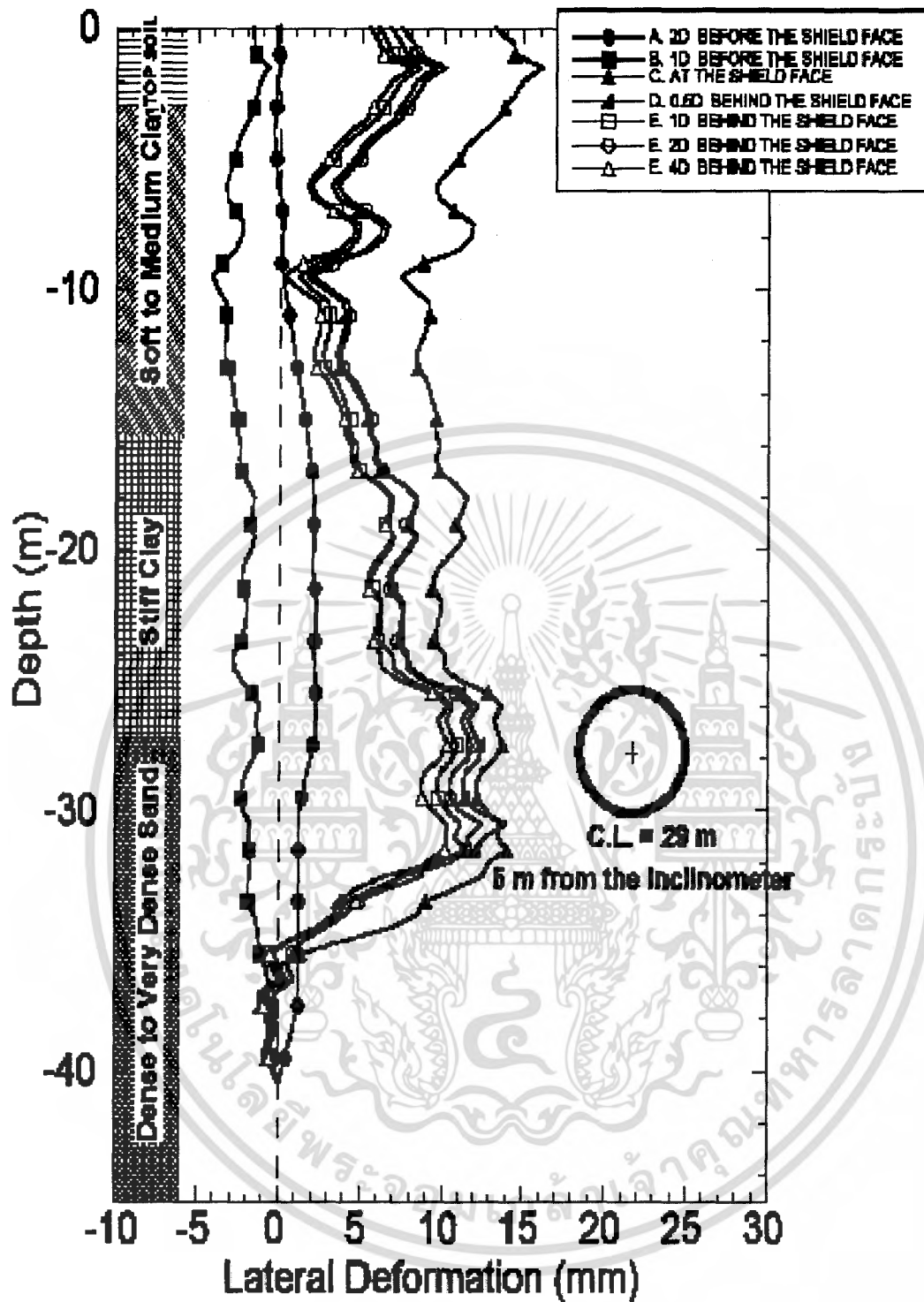


การนำข้อมูลที่ได้มาแปลผลและนำเสนอในรูปแบบกราฟ



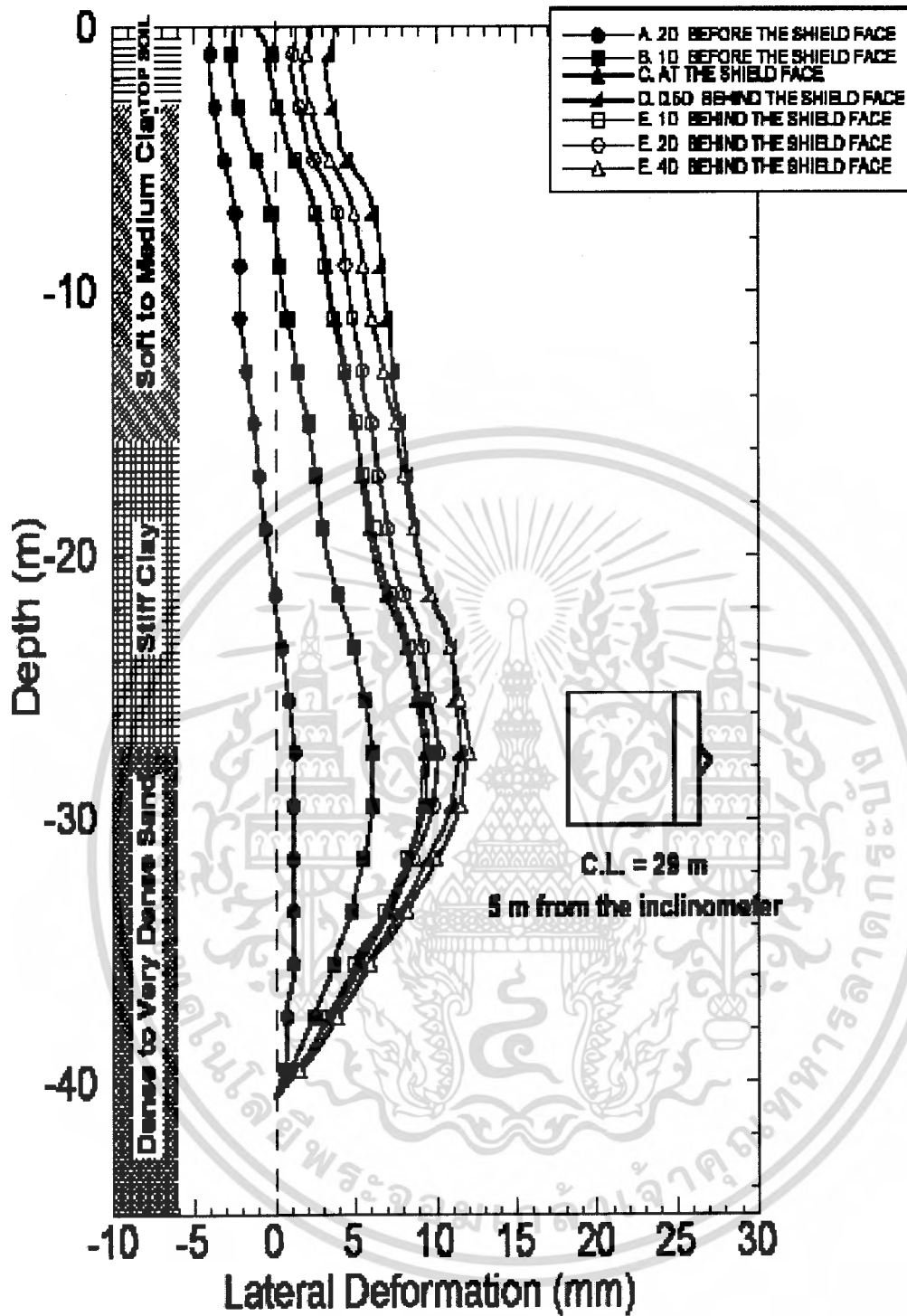
รูปที่ 3.27 การแสดงตำแหน่งการวัดค่าการเคลื่อนตัวของดินทางด้านข้างโดยการใช้ inclinometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 แสดงการเคลื่อนตัวของดินในทิศทางตั้งฉากกับอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา⁶⁰ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 แสดงการเคลื่อนตัวของดินในทิศทางขนานกับอุโมงค์

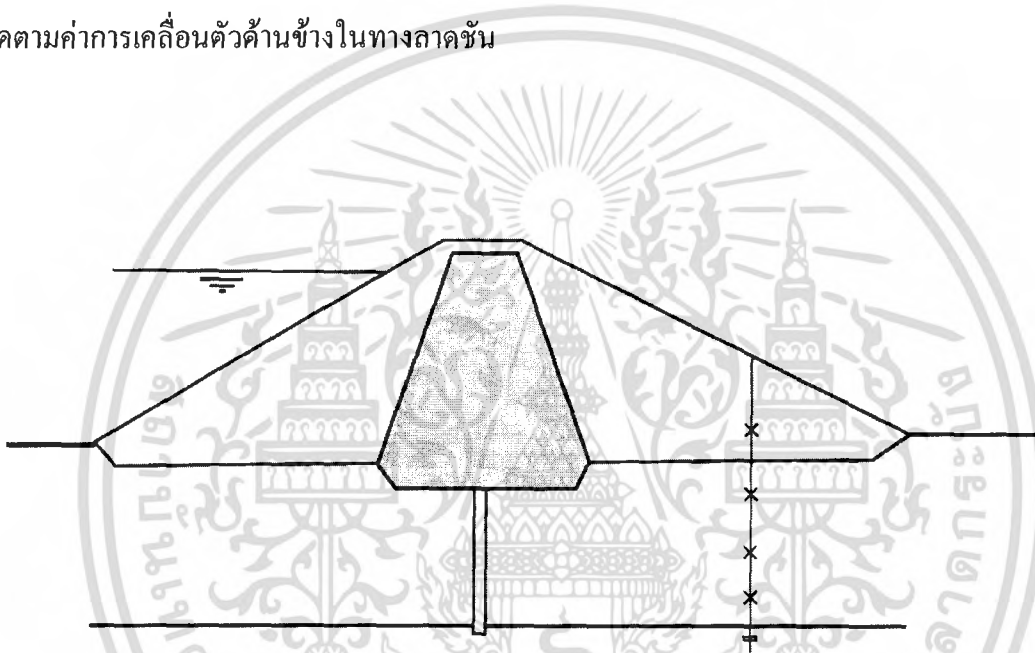
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา⁶¹ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 เครื่องมือวัดการทรุดตัวระดับลึก (BOREHOLE EXTENSOMETERS)

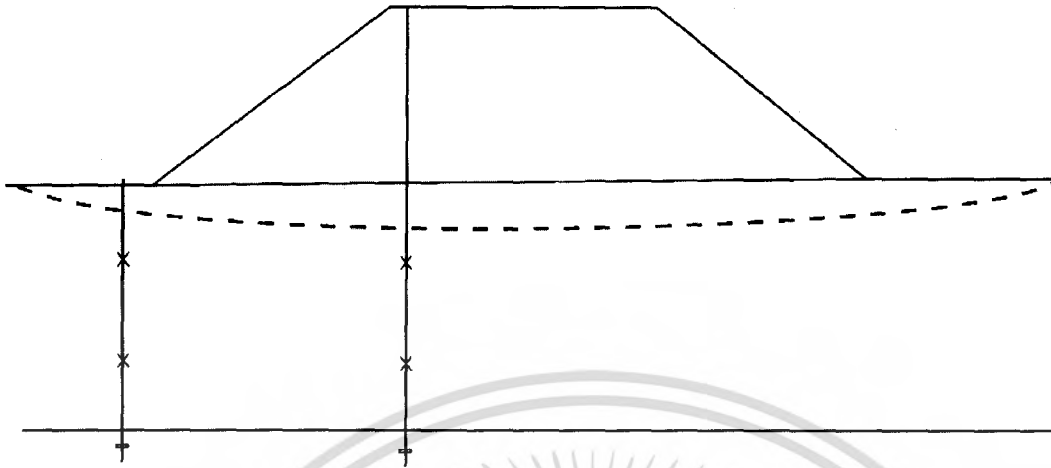
ที่มาและความสำคัญ

เป็นเครื่องมือที่ใช้ติดตามค่าการเคลื่อนตัวของดิน รวมถึงวัดการเสียรูปของดินและหินในบริเวณที่ต้องการ ซึ่งมีวิธีใช้งานทั่วไปดังนี้

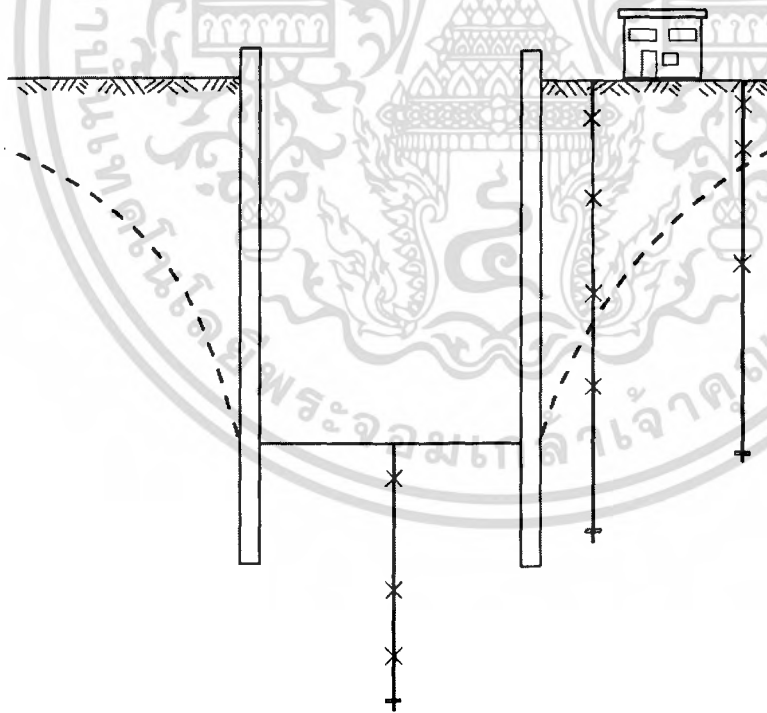
- ติดตามค่าการทรุดตัวในงานขุด ฐานราก และงานเขื่อน
- ติดตามค่าการทรุดตัวในงานอุโมงค์ และการเปิดหน้าดิน
- ติดตามค่าการบรจบกั้นของผนังอุโมงค์
- ติดตามค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างในทางลาดชัน



รูปที่ 3.30 ติดตามค่าการทรุดตัวแนวตั้งที่ฐานของเขื่อน(ใช้ Magnetic extensometer)

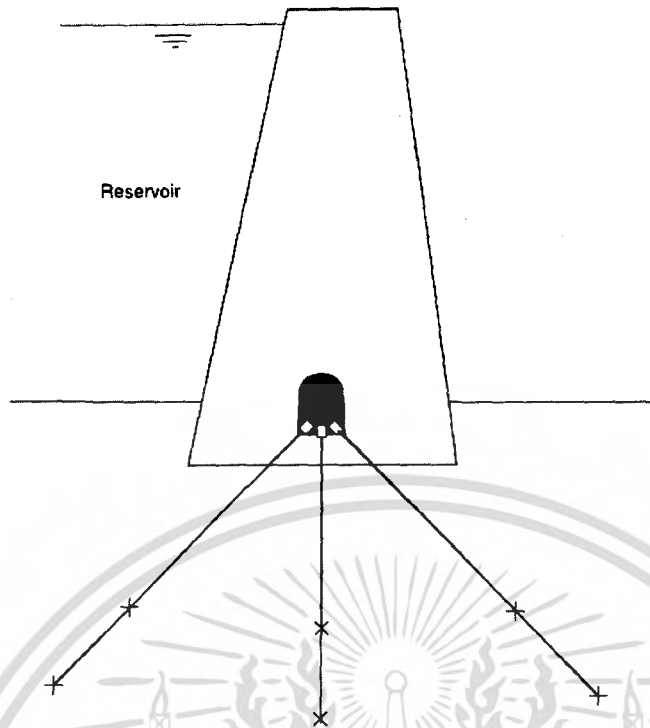


รูปที่ 3.31 ติดตามค่าการทรุดตัวเพื่อสามารถก่อสร้างต่อไปได้(ใช้ Magnetic extensometer)

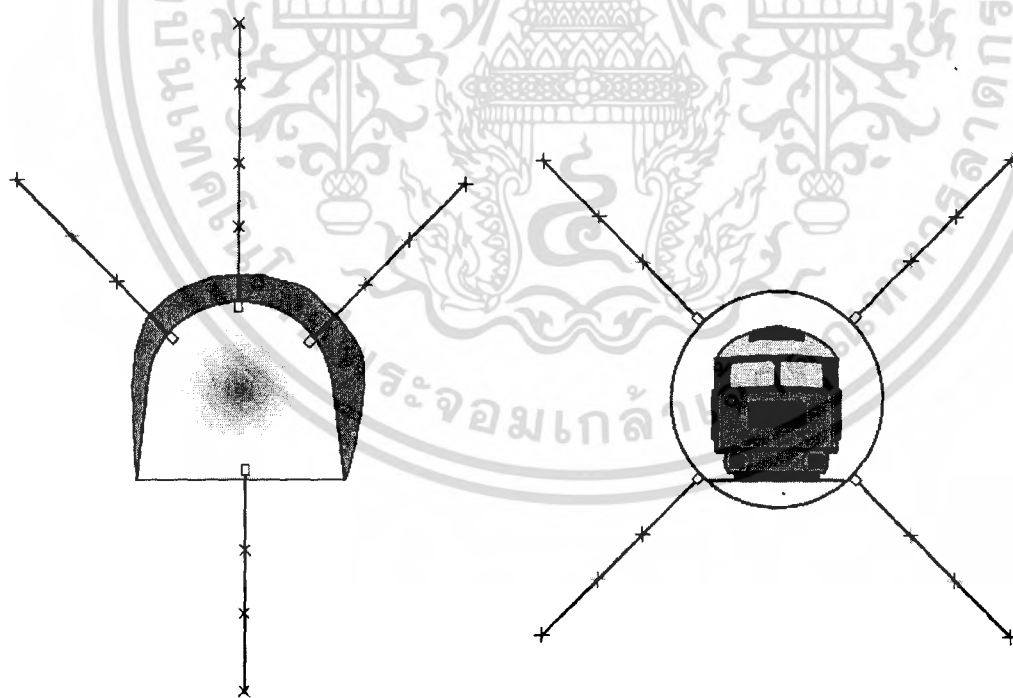


รูปที่ 3.32 ติดตามค่าการทรุดตัวขณะดินอัดตัวคายน้ำ(Consolidation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา⁶³ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

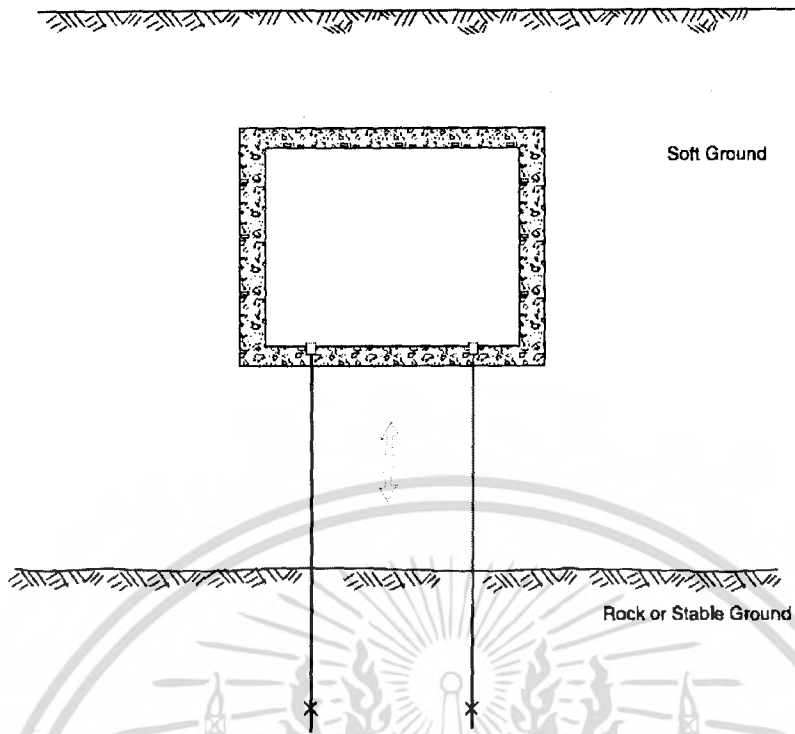


รูปที่ 3.33 ติดตามเสถียรภาพของเขื่อน (ใช้ Rod extensometer)

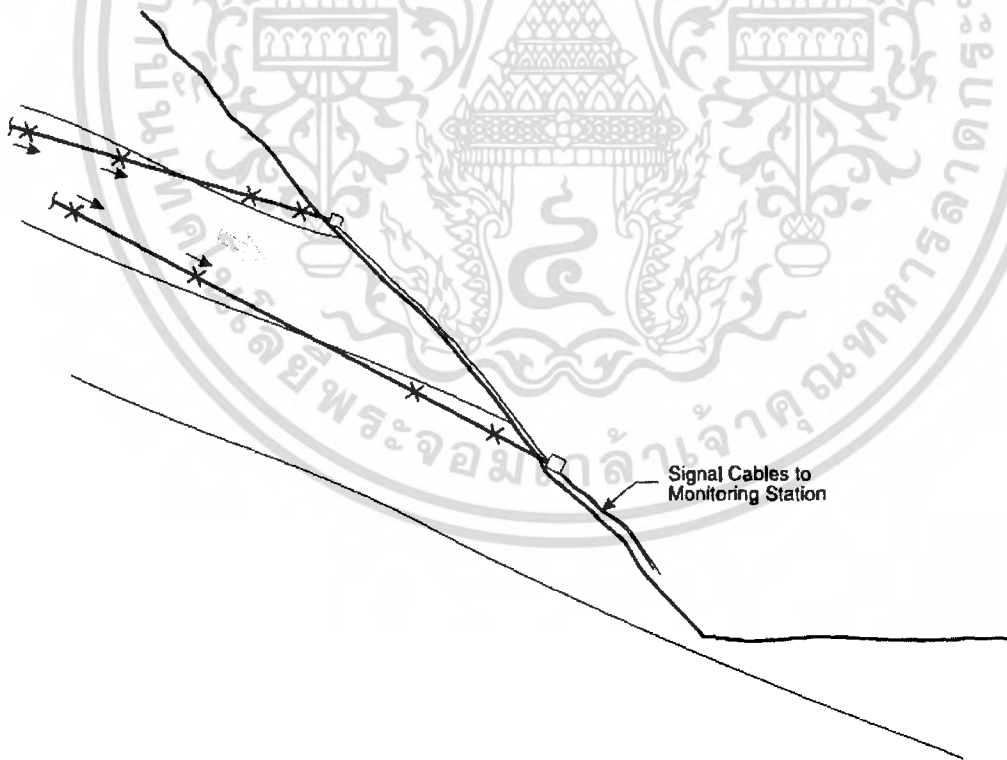


รูปที่ 3.34 ติดตามเสถียรภาพของอุโมงค์ (ใช้ Rod extensometer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

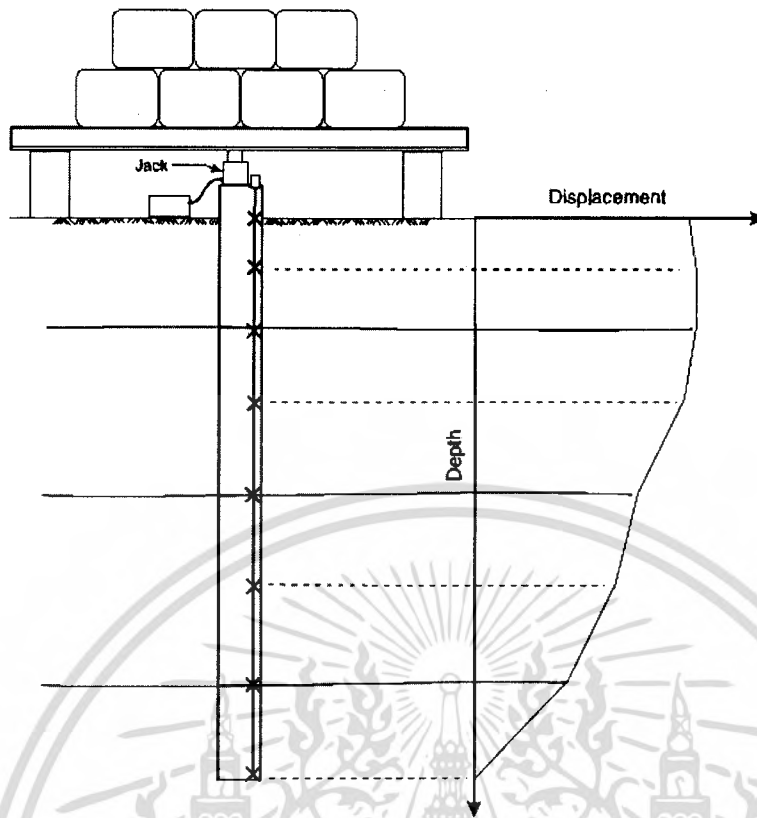


รูปที่ 3.35 ติดตามเสถียรภาพ การทรุดตัว และการหมุน



รูปที่ 3.36 ติดตามขนาดและอัตราการเคลื่อนตัว (ใช้ Rod extensometer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.37 ติดตามค่าแรงอัดในเสาเข็ม และการเคลื่อนตัวของดินใต้เสาเข็ม

ประเภทของ EXTENSOMETER

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการติดตามการทรุดตัวของดินแนวต่างๆในบริเวณที่ต้องการได้ โดยมีลักษณะพิเศษคือสามารถวัดการทรุดตัวในระยะต่างๆที่ต้องการและการทรุดตัวรวมได้ และสามารถจำแนกตามลักษณะการเก็บข้อมูลดังนี้

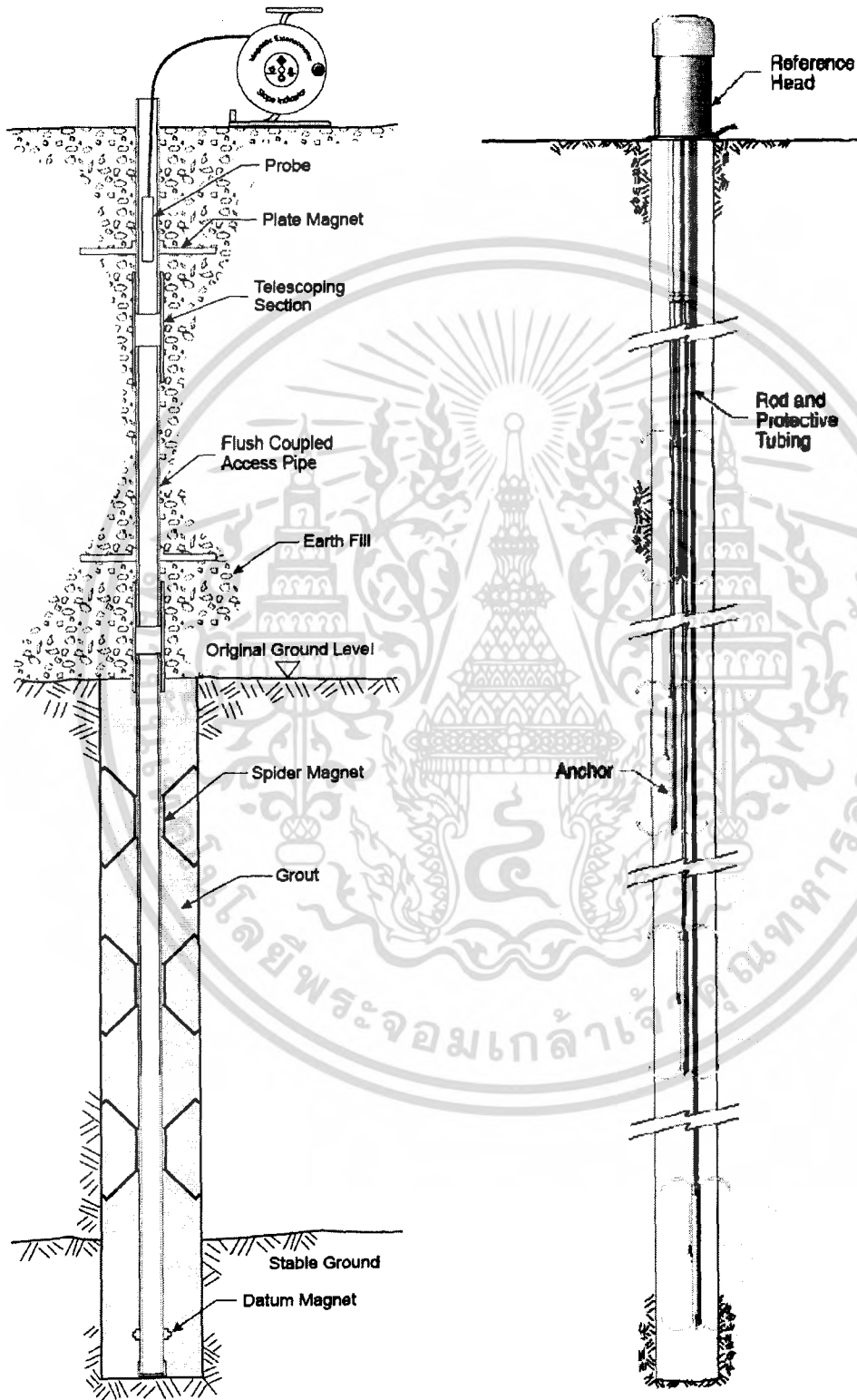
1 Probe extensometers

ใช้งานโดยส่งหัวอ่าน (probe) ผ่านท่อ (access pipe) เพื่อบอกค่าการทรุดตัวในตำแหน่งต่างๆเหมาะสำหรับใช้วัดค่าการทรุดตัวที่มีค่ามากโดยมากจะใช้ในงานดิน ตัวอย่าง probe extensometers เช่น Magnetic extensometers และ Sondex extensometer มีความละเอียดถึงหน่วยมิลลิเมตร

2 Rod extensometers

อ่านค่าจากการทรุดตัวของrod ซึ่งประกอบติดกับสมอ(anchor)ที่ติดตั้งในบริเวณที่ต้องการทราบการทรุดตัวจะเหมาะกับการวัดค่าการทรุดตัวน้อยและมากขึ้นอยู่กับชนิดอุปกรณ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อที่⁶⁶ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง rod extensometers เช่น Borros Point ใช้ในดินอ่อน Tensioned and Untensioned-rod extensometer เหมาะกับงานหินที่มีความละเอียดถึงหน่วยไมโครมิลลิเมตร

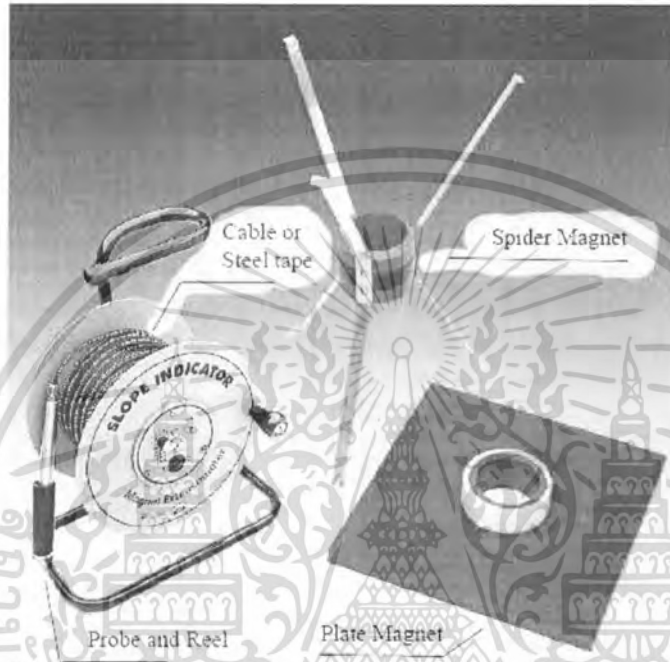


รูปที่ 3.38 แสดงความแตกต่างของ Extensometer ในแบบ Probe และแบบ Rod เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.1 Magnetic extensometer

ใช้ติดตามค่าการทรุดตัวในแนวตั้ง สามารถหาการทรุดตัวในระดับความลึกที่ต้องการ และการทรุดตัวรวมทั้งหมดได้

ส่วนประกอบ



รูปที่ 3.39 ส่วนประกอบของMagnetic Extensometer

- 1 หัวอ่าน(Probe) และเครื่องม้วนเคเบิล (Reel) ซึ่งจะมีหลอดไฟและเครื่องส่งสัญญาณติดตั้งอยู่
- 2 เคเบิล (Cable) หรือเทปเหล็ก (Steel survey tape)
- 3 ท่อ (Access Pipe)
- 4 มีแม่เหล็ก (Spider Magnet) ติดอยู่ตลอดความยาวท่อ (Access Pipe) ซึ่งแม่เหล็กจะยึดแน่นกับดินในบริเวณรอบๆท่อ แต่จะสามารถเครื่องที่ขึ้นลงได้ตามการทรุดตัว

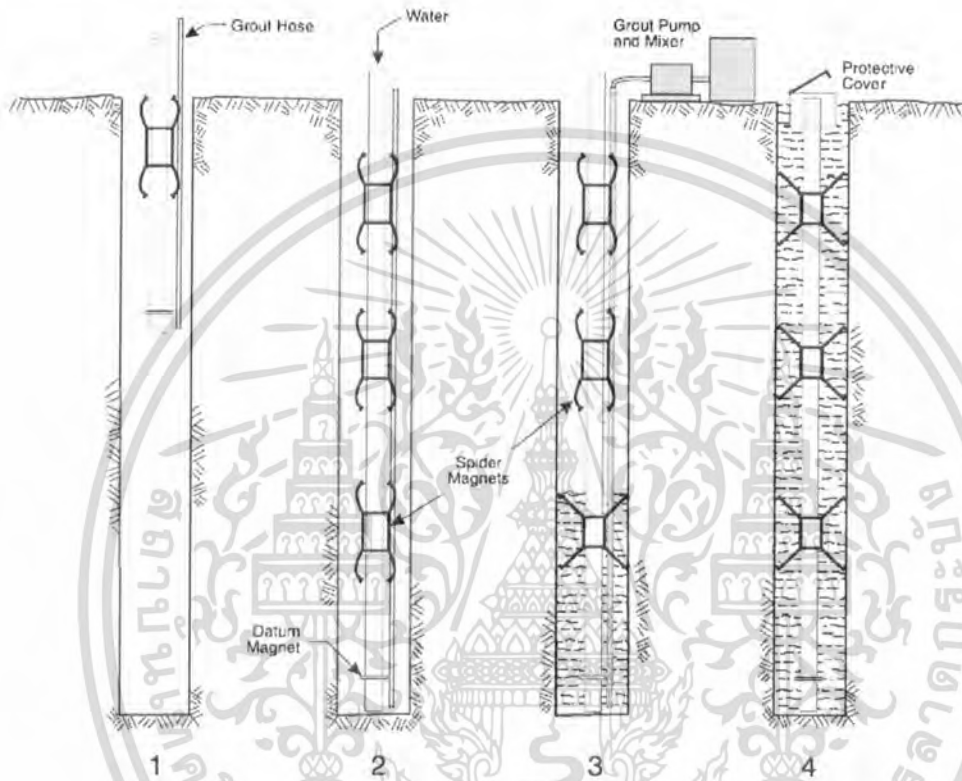
การทำงาน

เมื่อส่งหัวอ่าน (Probe) ลงไปตามท่อจนถึงบริเวณที่มีแม่เหล็ก (Spider Magnet) หัวอ่านจะส่งสัญญาณและแสงไฟที่เครื่องหมุนจะกระพริบ ให้ทำการเก็บตำแหน่งของแม่เหล็ก (Spider Magnet) ปัจจุบันไว้ และนำมาเปรียบเทียบกับค่าของแม่เหล็กในการติดตั้งครั้งแรก จะได้เป็นค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ปลายท่อติดตั้งอยู่ในดินที่มีเสถียรภาพ จะกำหนดตำแหน่งแม่เหล็ก (Datum Magnet) อ่างอิงขึ้น เพื่อใช้ในการอ้างอิงค่าการทรุดตัว แต่ถ้าปลายท่อไม่ได้อยู่ในบริเวณดังกล่าว ให้ทำการสำรวจระดับ(Optical survey) เพื่อหาค่าระดับที่ปากท่อเป็นจุดอ้างอิง

การติดตั้ง



รูปที่ 3.40 แสดงการติดตั้ง Magnetic Extensometer

- 1 ทำความสะอาดหลุมเจาะ ติดตั้งแม่เหล็กอ้างอิง(Datum magnet) ที่ปลายของท่อ(Access pipe) ส่วนท่อชั้นอื่นให้ทำการติดตั้ง แม่เหล็ก(Spider Magnet) ทำสัญลักษณ์กับเชือก ขดลวด เทป และท่อ
- 2 ส่วนประกอบ Grout hose เข้ากับปลายท่อ แล้วส่งลงในหลุมเจาะ ทำการติดตั้งชิ้นส่วนต่อไป ของท่อ พร้อมขานวรอยต่อ ควรระวังอย่าให้ เชือกที่ขาของแม่เหล็กหลุด จากนั้นส่งท่อลงหลุม เจาะ แล้วเช็ดความลึกของแม่เหล็กด้วย
- 3 เริ่มการฉีดน้ำปูน(Grouting) และปลดเชือกที่ขาแม่เหล็กเมื่อ Grout ถึงระดับ ถ้าเป็นการใช้ส่วน ดึงท่อก่อนจะปลดเชือกที่ขา ทำต่อเนื่อง ไปจนกระทั่งปลดขาแม่เหล็กจนขยาออกทั้งหมดและทำ การGroutจนเต็มหลุมเจาะ
- 4 สูดท้ายเมื่อ ได้ค่าเริ่มต้นที่ดีแล้ว จากนั้นส่งข้อมูลให้ผู้ว่าจ้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์

- 1 เก็บค่าได้หลากหลาย สามารถหาการทรุดตัวตำแหน่งที่ต้องการ รวมถึงการทรุดตัวรวมได้
- 2 ไม่ต้องทำการสำรวจ(Optical survey)หากปลายท่ออยู่ในชั้นดินที่มีเสถียรภาพ
- 3 ค่าใช้จ่ายไม่แพง
- 4 สามารถใช้ร่วมกับInclinometerได้
- 5 อ่านค่าได้ง่าย

ข้อจำกัด

ต้องมีคนควบคุม ไม่เป็นอัตโนมัติ

3.6.2 Sondex extensometer

ใช้ติดตามค่าการทรุดตัวในแนวตั้ง สามารถหาการทรุดตัวในระดับความลึกที่ต้องการ และการทรุดตัวรวมทั้งหมดได้

ส่วนประกอบ



รูปที่ 3.41 ส่วนประกอบของ Sondex extensometer

- 1 หัวอ่าน(Sondex probe) ติดกับเทปเหล็ก(Steel survey tape) หรือเคเบิล(Cable)
- 2 เครื่องม้วนเคเบิล(Cable Reel)ซึ่งติดตั้งโวลต์มิเตอร์(Voltmeter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

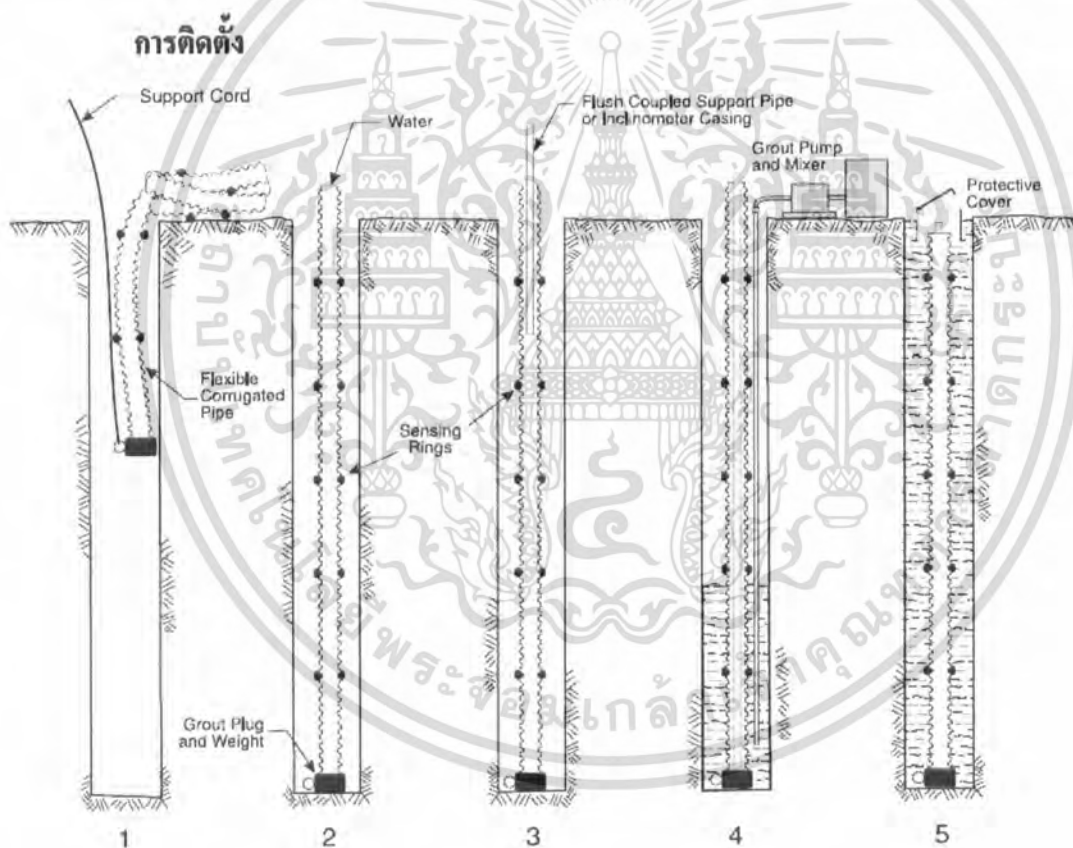
3 ท่อ(Access pipe)

4 ท่อขุ่น(Corrugated pipe) หุ้มอยู่ด้านนอกของท่อ(Access pipe) สามารถเคลื่อนที่อิสระในแนวตั้งตามดินบริเวณรอบๆ

5 วงแหวนเซ็นเซอร์(Sensing ring)ติดตั้งอยู่ตลอดความยาวท่อขุ่น(Corrugated pipe) ถัด 1 บริเวณรอบๆ ถ้าเป็นดินแข็งสามารถติดตั้งวงแหวนเซ็นเซอร์กับท่อ(Access pipe)ได้โดยตรง

การทำงาน

เมื่อส่งหัวอ่านไปตามท่อ เมื่อขดลวด(Coil)พบกับตำแหน่งที่มีวงแหวนเซ็นเซอร์ โวลต์มิเตอร์จะส่งสัญญาณ และทำการบันทึกค่าตำแหน่งที่พบวงแหวนเซ็นเซอร์ เมื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าตำแหน่งวงแหวนเซ็นเซอร์ตอนติดตั้ง จะได้ค่าการทรุดตัวของดินที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.42 แสดงการติดตั้ง Sondex extensometer

ประกอบแหวนเซ็นเซอร์(Sensing ring) ในตำแหน่งที่ถูกต้องบนท่อขุ่น (Corrugated pipe) จากนั้นGrouเปิดและเป็นน้ำหนักถ่วงปลายท่อ ติดตั้งวงแหวน(Eye bolt) เข้ากับลวดรับน้ำหนัก (Support Cord) เพื่อให้ส่งท่อลงด้านล่างหลุมเจาะ ทำความสะอาดหลุมเจาะ แล้วส่งท่อลงไปด้านล่างหลุมเจาะ บางครั้งอาจต้องเติมน้ำลงในท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

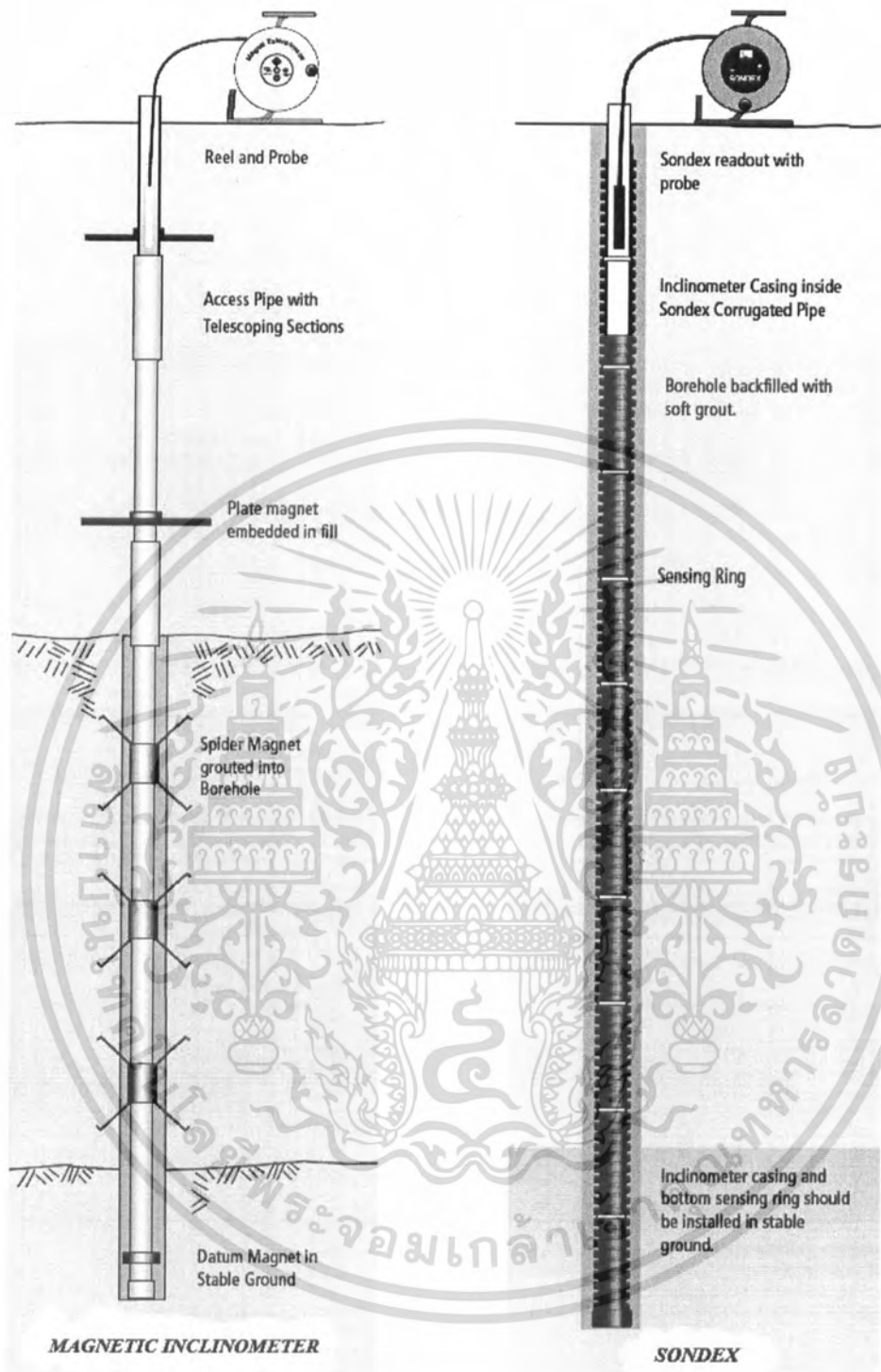
- 2 ยึดปากท่อชั้น(Corrugated pipe)และเติมน้ำให้เต็ม จากนั้นปลดลวด(Support Cord)ออก
- 3 สอดท่อ(Access pipe) ระวังอย่าให้มีเศษวัสดุตกลงไประหว่างท่อ(Access pipe) และท่อชั้น(Corrugated pipe)
- 4 ตรวจสอบความถูกต้องของปากท่อด้านบนบนหลุมเจาะ จากนั้นทำการGrouting แต่ต้องระวังอย่าให้เข้าไปในท่อชั้น(Corrugated pipe)
- 5 สุกท้ายเมื่อได้ค่าเริ่มต้นที่ดีแล้ว จากนั้นส่งข้อมูลให้ผู้ว่าจ้าง

ประโยชน์

- 1 เก็บค่าได้หลากหลาย สามารถหาการทรุดตัวตำแหน่งที่ต้องการ รวมถึงการทรุดตัวรวมได้
- 2 ไม่ต้องทำการสำรวจ(Optical survey)หากปลายท่ออยู่ในชั้นดินที่มีเสถียรภาพ
- 3 สามารถใช้ร่วมกับInclinometerได้

ข้อจำกัด

- 1 ต้องมีคนควบคุม ไม่เป็นอัตโนมัติ
- 2 ต้องใช้ผู้ควบคุมที่มีความชำนาญในการเก็บข้อมูล
- 3 ติดตั้งยาก



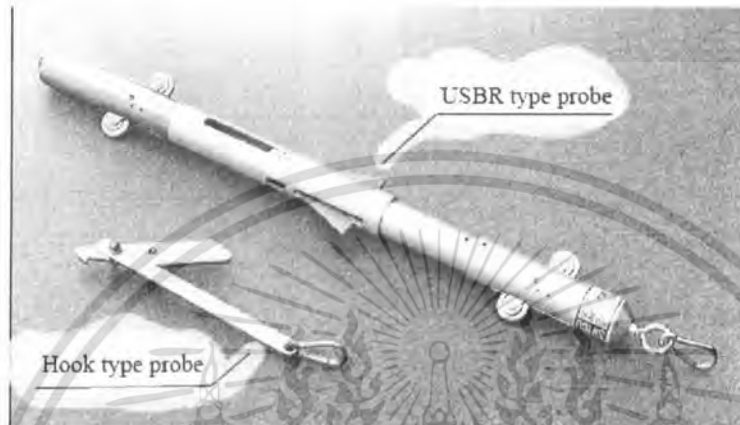
รูปที่ 3.43 Magnetic extensometer และ Sondex extensometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.3 Settlement probe

ใช้ติดตามค่าการทรุดตัวในแนวตั้ง สามารถหาการทรุดตัวในระดับความลึกที่ต้องการ และการทรุดตัวรวมทั้งหมดได้

ส่วนประกอบ



รูปที่ 3.44 หัวอ่านประเภท USBR และ Hook

- 1 หัวอ่านประเภทฮุก(Hook type probe) หรือหัวอ่านประเภทUSBR(USBR type probe)
- 2 เคเบิล (Cable) หรือเทปเหล็ก (Steel survey tape)
- 3 ท่อInclinometer(Inclinometer Casing)

การทำงาน

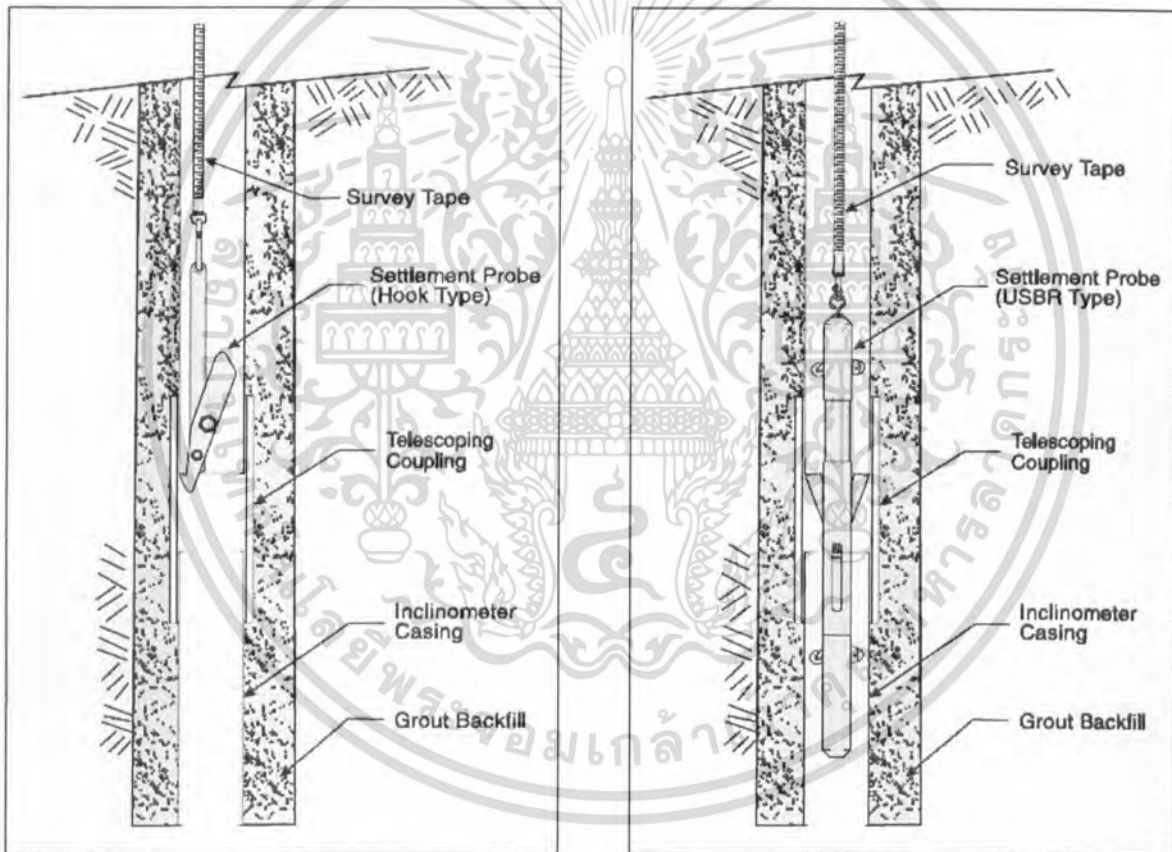
ปล่อยหัวอ่านเคลื่อนตัวลงไปตามท่อInclinometer โดยหัวอ่าน(Probe)จะติดตั้งกับเทปเหล็ก(Steel survey tape) เมื่อผ่านเข้าไปบริเวณข้อต่อ(Coupling) แขนของหัวอ่านจะทำการเกี่ยวกับริมขอบท่อ การเก็บข้อมูลอ่านค่าจากเทปวัดระยะ เมื่อหัวอ่านเคลื่อนตัวลงไปถึงปลายท่อ กลไกที่แขนจะถูกปลดล๊อค และหากปลายท่อตั้งอยู่ในดินที่มีเสถียรภาพ ค่าที่อ่านได้สามารถอ้างอิงกับปลายท่อได้ หากไม่ได้ยู่บริเวณดังกล่าวจะอ้างอิงจากปากท่อแทน แต่ต้องทำการสำรวจระดับ(Survey)ก่อน และนำค่าที่ได้จากการอ่านมาเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้นจะได้ค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้น

ประโยชน์

- 1 หัวอ่านประเภทฮุก(Hook type probe) ราคาไม่แพง
- 2 สามารถหาค่าการทรุดตัวได้เป็น Profile

ข้อจำกัด

- 1 ต้องใช้ท่อ Inclinator (Inclinometer Casing)
- 2 ต้องใช้คนควบคุม ไม้อัด โนมัติ
- 3 หัวอ่านประเภทUSBR(USBR type probe)มีราคาสูง
- 4 การอ่านค่ายาก



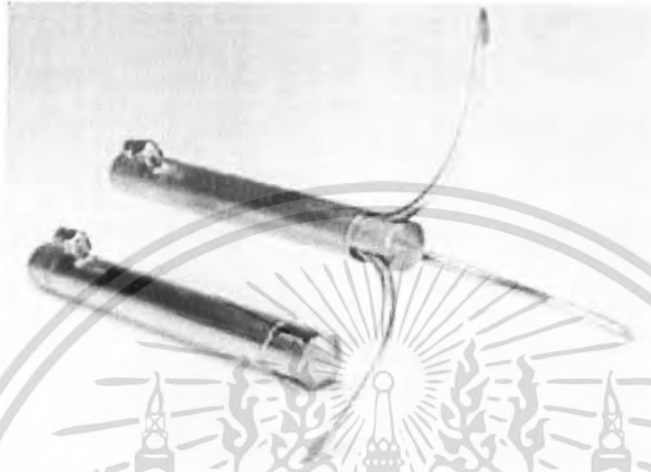
รูปที่ 3.45 Settlement probe แบบ Hook และ USBR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา 75 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.4 Borros point

ใช้หาค่าการทรุดตัวที่ตำแหน่งเดียว

ส่วนประกอบ



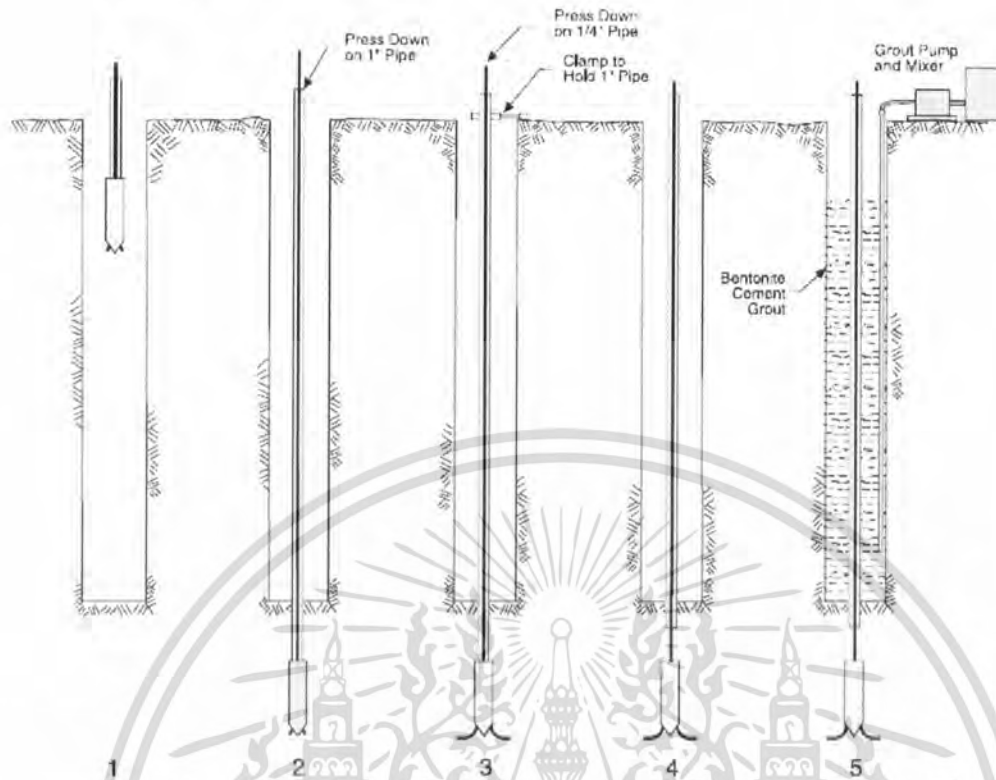
รูปที่ 3.46 Borros anchor

- 1 สมอสามง่าม (Anchor) ดังรูปที่ 3.45
- 2 ท่อนอกขนาด 1 นิ้ว (1" Outer pipe)
- 3 ท่อในขนาด ¼ นิ้ว (¼" Inner pipe) ท่อในจะต้องสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในแนวตั้งภายในท่อนอก

การทำงาน

หาค่าการทรุดตัวได้จาก การสำรวจทำระดับ(Survey)ปากท่อใน(Inner pipe) การเปลี่ยนแปลงระดับของท่อในแสดงถึงการทรุดตัวที่เกิดขึ้น

การติดตั้ง



รูปที่ 3.47 แสดงการติดตั้งHeave-Settlement Point

- 1 ในการขุดหลุมเจาะจะต้องให้มีความลึกน้อยกว่าความลึกของสมอ(anchor)ที่ต้องการ ทำความสะอาดหลุมเจาะให้สะอาด ใส่ท่อใน(inner pipe)โดยการทาน้ำมันบริเวณรอบนอกของท่อ จากนั้นสวมท่อใน(inner pipe)เข้าไปในท่อนอก(outer pipe)แล้วทำการต่อลวดเข้ากับสมอ(anchor)การที่ท่อใน(inner pipe)มีความถี่นยาทำให้สามารถดันท่อใน(inner pipe)ออกจากสมอได้ง่าย อย่าเพิ่งให้ท่อใน(inner pipe)ไหลออกมาจากสมอ(anchor)
- 2 นำสมอ(anchor)ลงสู่หลุมเจาะ โดยขณะเวลานำลงให้ดันท่อนอก(outer pipe) จนกระทั่งสมอ(anchor)ลึกถึงระดับที่ต้องการ
- 3 ยึดท่อนอก(outer pipe)บริเวณปากหลุมไว้ จากนั้นกดท่อใน(inner pipe)ลงไปประมาณ 180 cm. ขาของสมอ(anchor)จะยึดออกมายึดติดกับดิน อย่าให้มีเศษดินหรือหินเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างท่อใน(inner pipe) และท่อนอก(outer pipe)
- 4 ทำการปลดท่อนอก(outer pipe)ออกจากสมอ(anchor)โดยการหมุนตามเข็มนาฬิกาประมาณ 15 รอบ แล้วดึงขึ้น โดยให้ปลายท่อนอก(outer pipe)อยู่ห่างจากสมอมากกว่าระยะที่คาดว่าดินจะเกิดการทรุดตัวมากที่สุด

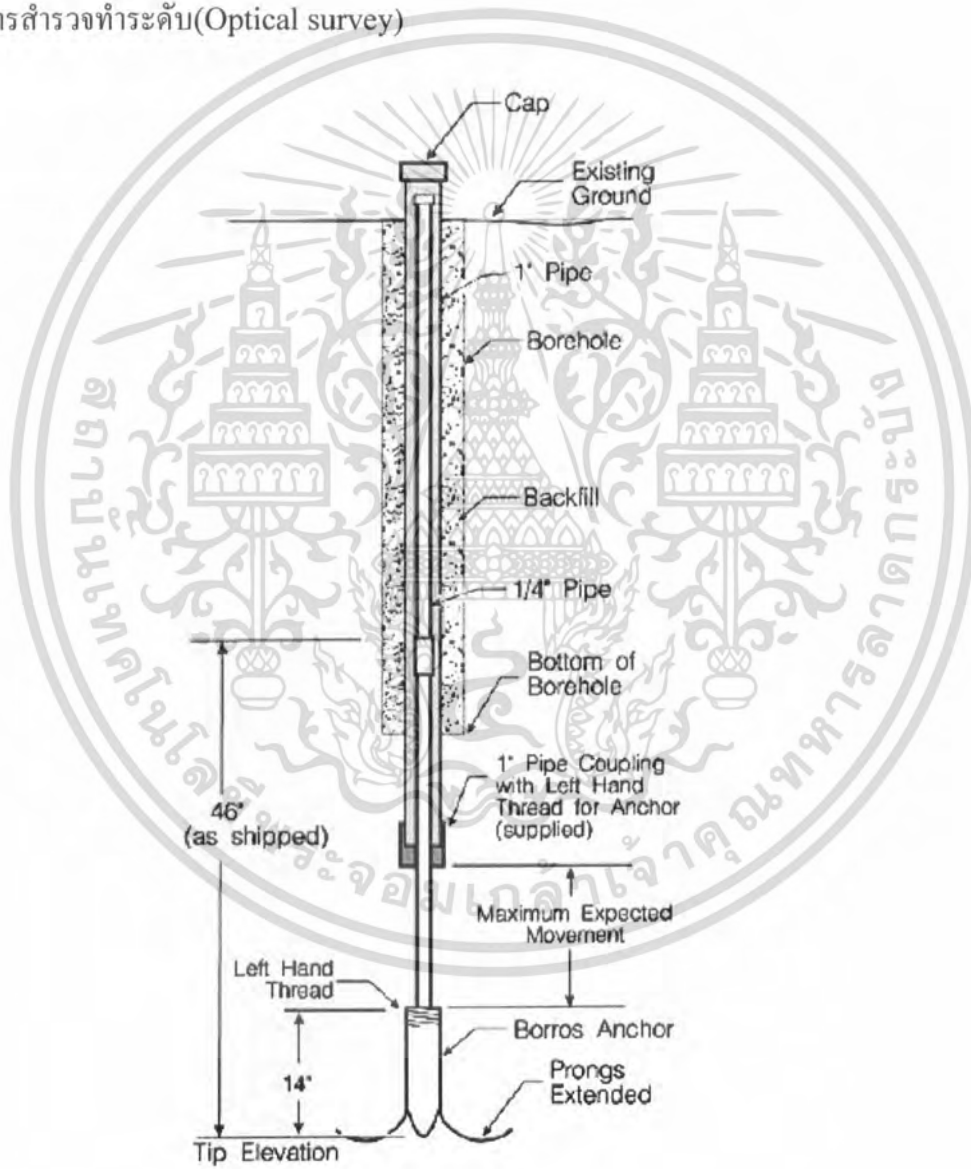
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 77 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์

- 1 การติดตั้งง่าย และราคาไม่แพง
- 2 มีกลไกลดการทำงานที่ทนทาน

ข้อจำกัด

- 1 ใช้ในดินอ่อนเท่านั้น
- 2 ต้องมีคนควบคุม ไม่อัตโนมัติ
- 3 ต้องใช้การสำรวจทำระดับ(Optical survey)



รูปที่ 3.48 Borros point

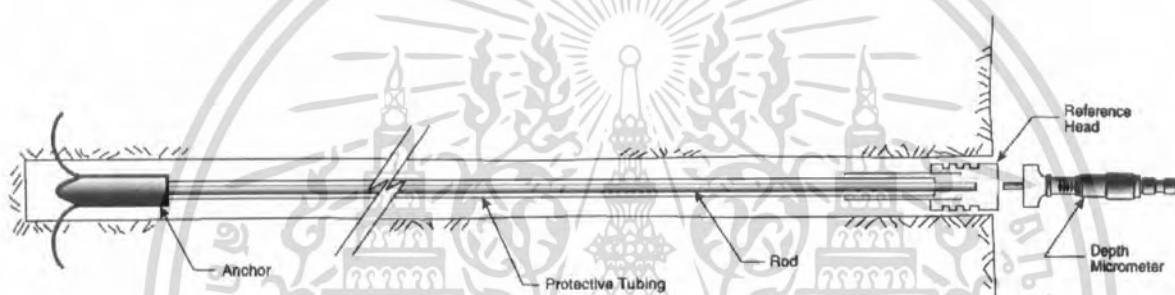
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ⁷⁸ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.5 Tensioned and Untensioned rod extensometer

สามารถแสดงค่าเคลื่อนตัวของดินหรือหินที่มีค่าน้อยๆได้ เนื่องจากมีค่าความละเอียดถึงไมโครมิลลิเมตร และยังสามารถวัดการเคลื่อนตัวได้ในตามแนวของหลุมเจาะ ไม่เพียงแต่แนวตั้ง

แบบ Tensioned-Rod เหมาะกับหลุมที่มีความลึกมาก เพราะในการติดตั้งแรงเสียดทานระหว่างRodและท่อป้องกัน จะเข้ามาเป็นปัจจัยสำคัญซึ่งซ่อนอยู่ในการเคลื่อนตัวจริง กลไกในหัวอ้างอิงจะทำให้ Rod อยู่ภายใต้แรงดึง ซึ่งช่วยลดผลกระทบจากแรงเสียดทานได้

แบบ Untensioned-Rod ไม่มีกลไกแรงดึงอยู่ที่หัวอ้างอิง



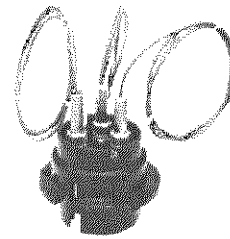
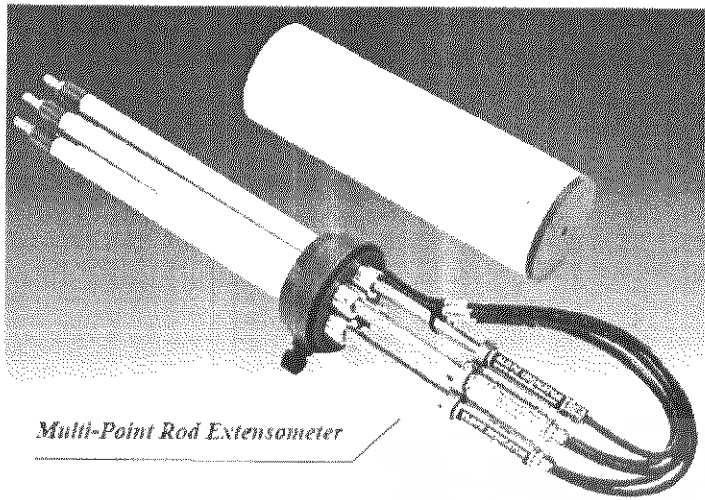
รูปที่ 3.49 Tension & Untension Rod Extensometer



รูปที่ 3.50 Depth Micrometer และ Top Caps

สำหรับป้องกันส่วนหัวอ้างอิง(Reference Head)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.51 Multi-Point Rod Extensometer

ประกอบด้วย

- 1 สมอ(Anchor) 1 ตัว ในกรณีที่เป็น Single-Point Rod Extensometer และแบบ Multi-Point Rod Extensometer จะมีสมอ(Anchor) หลายตัว จำนวนจะขึ้นอยู่กับอุปกรณ์
- 2 Rod ตามจำนวนสมอ
- 3 หัวอ้างอิง(Reference Head)
- 4 Depth Micrometer

การทำงาน

แบบ Single-Point Rod Extensometer สมอ(anchor)และRodจะประกอบติดกันติดตั้งอยู่ในหลุม และหัวอ้างอิงจะติดตั้งอยู่บริเวณปากหลุม Rodจะมีความยาวตั้งแต่สมอจนถึงหัวอ้างอิง และการเคลื่อนตัวของRodจะแสดงถึงการเคลื่อนตัวของดิน สามารถวัดได้โดย Depth Micrometers หรือ Electronic sensor และคอมพิวเตอร์ จะ ได้ทั้ง ขนาด อัตราและความเร็วในการเคลื่อนตัวของดิน และเมื่อสมอหยุดการเคลื่อนตัวจะหาการเคลื่อนตัวที่สมบูรณ์ได้

แบบ Multi-Point Rod Extensometer สมอแต่ละอันจะติดตั้งอยู่ในตำแหน่งที่แตกต่างกันของดินในบริเวณที่ต้องการ ทุกอย่างจะเหมือนแบบ Single-Point Rod Extensometer แต่ค่าที่วัดได้จะเพิ่มค่า ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนระหว่างสมอและการกระจายของการเคลื่อนตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อ 80 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rod Material

Tensioned-Rod มีไฟเบอร์กลาส (Fiberglass) และอลูมิเนียม(Aluminum) มีลักษณะคล้ายกันในการใช้งาน แต่ไฟเบอร์กลาสจะไม่เกิดสนิม ผุกร่อน

Untensioned-Rod มีทั้งสแตนเลส(Stainless) เหล็ก(Steel) และไฟเบอร์กลาส (Fiberglass)

1 สแตนเลส(Stainless) จะติดตั้งยาว 10 ft และต้องมีการดูแลระหว่างติดตั้ง

2 เหล็ก(Steel)จะใช้ได้ดีภายใต้แรงอัด แต่จะติดตั้งยากในพื้นที่จำกัด เช่น อุโมงค์ขนาดเล็ก

3 ไฟเบอร์กลาส(Fiberglass) ติดตั้งตลอดความยาวและต้องการพื้นที่น้อยในการติดตั้ง

ชนิดของสมอ(Anchor)

Groutable Anchors

ติดตั้งง่าย ป้องกันน้ำไหลเข้าในหลุมเจาะ เหมาะกับการติดตามผลในระยะยาว ต้องใช้เครื่องมือในการ Grout ความแข็งแรงในการ Grout จะต้องเท่ากับดินบริเวณรอบๆ ถ้าแข็งเกินไประบบสมออาจเสียหายได้บริเวณรอยต่อ และการ Grout จะต้องให้สมอสามารถเคลื่อนที่ไปกับดินบริเวณรอบๆได้ บางครั้งการเติม Styrofoam spacers เพื่อให้แน่ใจว่าสมอเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ แต่วิธีนี้ไม่สามารถใช้กับดินที่มีรอยแยกหรือโพรงมากได้

Hydraulic Anchors

Bladder type ใช้ได้ดีกับหินหลายชนิดและในคอนกรีต เมื่อ Bladder ซึ่งเป็นแม่แรงของขดลวดถูกกระตุ้นขดลวดจะคลายและออกแรงกระทำต่อผนังหลุมเจาะ ส่วน Prong type ใช้ได้ดีในงานดิน เมื่อถูกกระตุ้นขาจะขยายออกเพื่อยึดเกาะกับดินภายนอก สมอแบบเดี่ยว(Single-acting anchor)จะมีขา 3 ขา และสมอแบบคู่(Double-acting anchor)จะมีขา 6 ขา ซึ่งจะใช้งานได้ดีกว่าในหลุมที่มีความลึก และภายใต้สภาวะวิกฤต สมอทั้ง 2 แบบสามารถทำการ Grout เพื่อกันน้ำไหลเข้าหลุม

Hydraulic anchors จะมีราคาแพงกว่า Groutable anchors จะใช้กับงานที่ต้องการความรวดเร็ว เพราะไม่ต้องสาร Grout เซตตัว และในสภาพที่ไม่เหมาะสมที่จะทำการ Grout เช่น หินมีรอยร้าวมาก

Mechanical Anchor

จะใช้กับ Rod ที่สั้น โดยปลอกจะขยายตัวออกเมื่อถูกกระตุ่น โดย อัด โน้มติจาก การหันของ anchor bolt สมอบแบบนี้สามารถถอดและนำมาใช้ใหม่ได้ แต่ระบบนี้ไม่สามารถใช้ กับ Grout ได้เนื่องจาก Rod ไม่มีที่ต่อหุ้ม (Protective sleeves)

การติดตั้ง (ROD EXTENSOMETER)

เพื่อประโยชน์ในการติดตั้ง นี้คือคุณสมบัติทั่วไป

Bore holes

ส่วนมาก Rod Extensometer ออกแบบสำหรับติดตั้งในหลุมเจาะขนาด 75-83 mm. (3-3.25 in) บางครั้งอาจต้องขยายปากหลุมเจาะเพื่อติดตั้งหัวอ้างอิง ควรระบายน้ำใต้ดิน สะอาด กำจัดเศษวัสดุหรือขยะก่อนทำการติดตั้ง บางครั้งใช้การเจาะแบบ diamond และ percussive

ทิศทางของหลุมเจาะจะต้องขนานกับทิศทางของการเคลื่อนตัวของดินที่ต้องการวัด เพราะ Extensometer สามารถวัดการเคลื่อนตัวได้ในแกนเดียว เช่น การติดตั้งในอุโมงค์ หลุมเจาะ และ Extensometer จะตั้งฉากกับผนังอุโมงค์ ในบริเวณ fault zone ตำแหน่งของ Extensometer แต่ละตัวจะห่างกัน แต่ในบริเวณ shear zone ตำแหน่งจะมีมุมที่แคบลงเพื่อวัดการเคลื่อนตัว

ระยะห่างระหว่างสมอ (Anchor) หาได้จากปัจจัยทางด้านธรณีวิทยา และลักษณะ ทางเรขาคณิตของอุปกรณ์ ควรปรับแก้สมอ (Anchor) ให้เหมาะสมกับดิน เพื่อไม่ให้เกิดการวิบัติ ของดินขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินอ่อน

ควรมีสมอ (Anchor) อยู่ในดินที่มั่นคงแข็งแรง 1 ตัว เพื่อใช้หาค่าความสัมพันธ์กับ สมอ (Anchor) ตัวอื่นๆ เช่น ในงานอุโมงค์ สมอ (Anchor) ตัวที่ลึกที่สุดควรอยู่ห่างจากผิวอุโมงค์ไม่ น้อยกว่า 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์

Grouting

ปรกติอัตราส่วนระหว่างน้ำกับซีเมนต์จะใช้ค่า Water/Cement Ratio ไม่เกิน 1:1 เพื่อให้มีความสามารถในการเทได้เพียงพอสำหรับท่อ Grout ซึ่งมีขนาดเล็กได้ ความดันในการ Grout จะถูกควบคุมโดยความแข็งแรงของท่อหุ้ม (Sleeves Protecting) ของ Extensometer Rods ในการ Grout จะส่งน้ำผ่านท่อให้ท่อเป็ยกก่อนเพื่อให้เกินแรงเสียดทานภายในท่อมีค่าน้อย ที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อที่ 82 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Grouting Down-Holes

โดยทั่วไปจะใช้ท่อ Grout เพียงท่อเดียวสำหรับหลุมในแนวตั้งและแนวเฉียง การส่งท่อ Grout ลงหลุมเจาะ จะทำได้โดยการพันท่อ Grout ติดกับท่อหุ้ม(Protective Sleeve)ของ Rod Extensometer ห่างจากปลายประมาณ 5 ft แล้วส่งไปยังก้นหลุมเจาะ บางครั้งอาจใช้ท่อสั้นพันติดกับระยะครึ่งหนึ่งของความยาว Extensometer เพราะการที่จะใช้ท่อยาวมากนั้นทำได้ยากขณะ Grout ให้ปลดท่อ Grout ออกจากท่อหุ้ม(Protective Sleeve) และดึงท่อ Grout ขึ้นตามระดับการเพิ่มขึ้นของสาร Grout

Grouting Up-Holes

- 1 พันติดท่อ Grout แรกกับท่อหุ้ม(Protective Sleeve) ซึ่งถัดจากสมอ(Anchor) ที่ลึกที่สุด ทำหน้าที่เป็นท่อระบาย(Vent Tube) ท่อที่ 2 พันติดกับสมอ(Anchor) ที่ลึกที่สุด และท่อที่ 3 พันติดกับท่อหุ้ม(Protective Sleeve) ให้ห่างจากปากหลุมประมาณ 2-3 m.
- 2 นำ Extensometer และท่อ Grout เข้าไปยังหลุมเจาะ ทำการปิดปากหลุมเจาะด้วยซีเมนต์แบบเซ็ทตัวเร็ว จากนั้นปั๊มสาร Grout เข้าไปยังหลุมเจาะโดยผ่านท่อสั้น(ท่อที่3) แล้วปล่อยให้สาร Grout เซ็ทตัว
- 3 ปั๊มสาร Grout เข้าสู่หลุมเจาะ โดยใช้ท่อยาว(ท่อที่2) จนกระทั่งสาร Grout ออกจากท่อระบาย(Vent Tube)แสดงว่าการ Grout เสร็จสิ้น จากนั้นปิดปากท่อ

ข้อควรพิจารณาอื่นๆ (Other Considerations)

ส่วนมากปัญหาทั่วไปที่เกิดขึ้นกับ Extensometer จะเป็นปัญหาเกิดความเสียหายทางกลไกของเครื่องมือ เช่น instrument head, dial indicator, signal cable, signal connectors และการเป็ยกหรือสกปรกใน signal cable connectors หรือ dial indicator ในการติดตั้งแบบเป็ยก ปัญหาใหญ่คือการที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง จะมีน้ำแข็งเกาะและสะสมบริเวณใกล้ๆ instrument head ซึ่งอาจรบกวนการทำงานของเครื่องมือได้ ป้องกันโดยติดตั้งฝาครอบบริเวณหัวอ้างอิง(Reference Head)

ประโยชน์

Tensioned-Rod Extensometer

- 1 ทำงานได้ในทุกทิศทาง ทั้งแนวตั้งและแนวราบ
- 2 ทำงานได้ดีทั้งการยืดขยายและการกดอัด

Untensioned-Rod Extensometer

- 1 ราคาถูก
- 2 ติดตั้งง่าย

ข้อจำกัด

Tensioned-Rod Extensometer

- 1 ราคาสูง
- 2 ติดตั้งยาก
- 3 การเสีรูปด้านข้างจะมีผลต่อค่าที่อ่านได้

Untensioned-Rod Extensometer

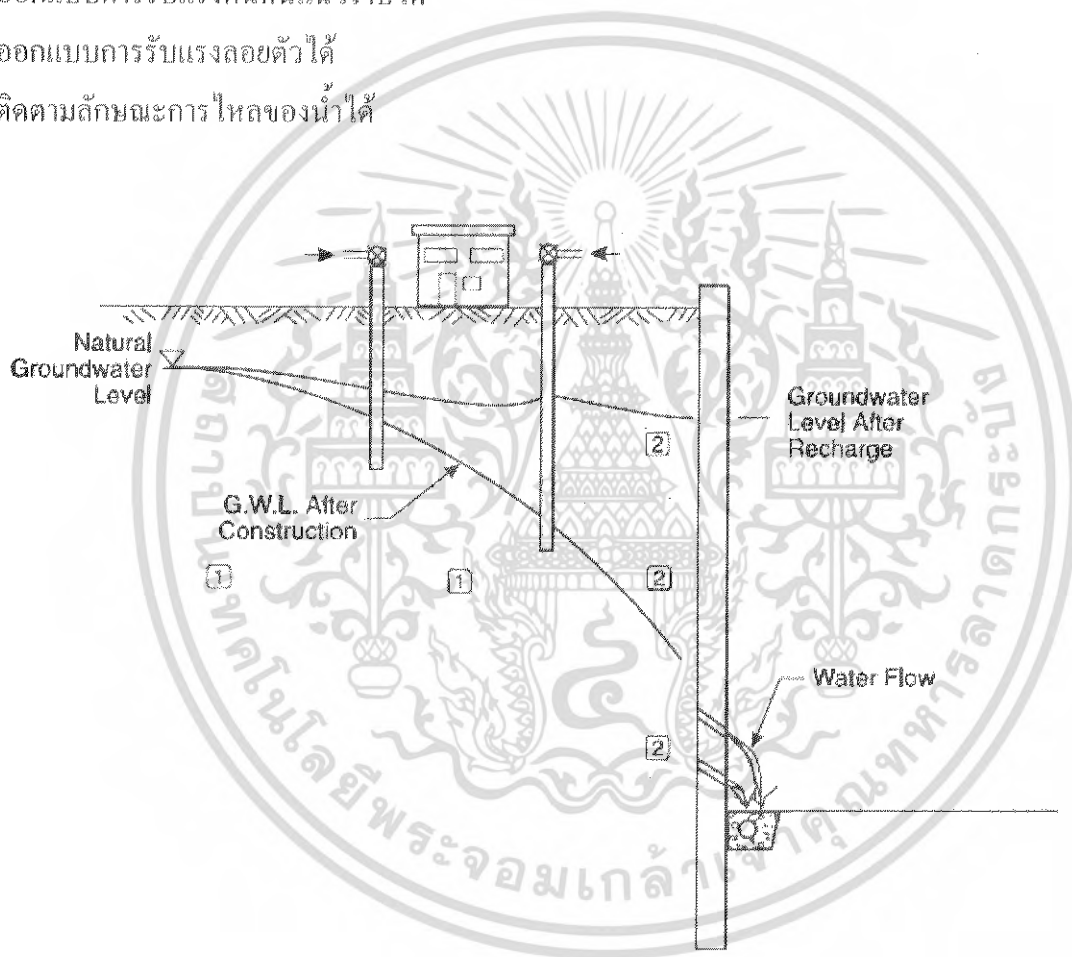
- 1 ความยาวของRodจำกัด 30 m. ในไฟเบอร์กลาส(Fiberglass) และ 50 m. ในเหล็ก
- 2 การเสีรูปด้านข้างมีผลต่อการอ่าน

3.7 Piezometer

ที่มาและความสำคัญ

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าติดตามแรงดันน้ำและระดับน้ำใต้ดิน มีประโยชน์ทั้งในด้าน Geotechnical , Environmental , Hydrological เช่น

- ตรวจสอบ placement of fill
- ทำนาย Slope stability
- ออกแบบการรับแรงดันดินแนวราบได้
- ออกแบบการรับแรงลอยตัวได้
- ติดตามลักษณะการไหลของน้ำได้

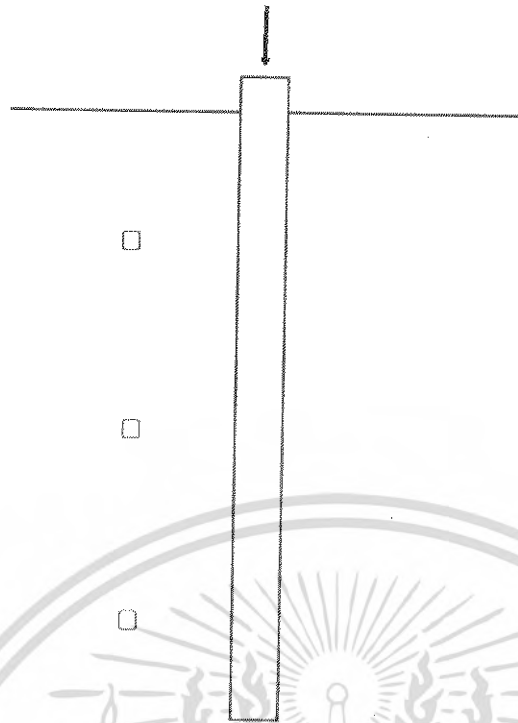


รูปที่ 3.52 ติดตามแรงดันน้ำขณะป้อนน้ำเข้า

[1] หาผลกระทบที่เกิดจาก Recharge system

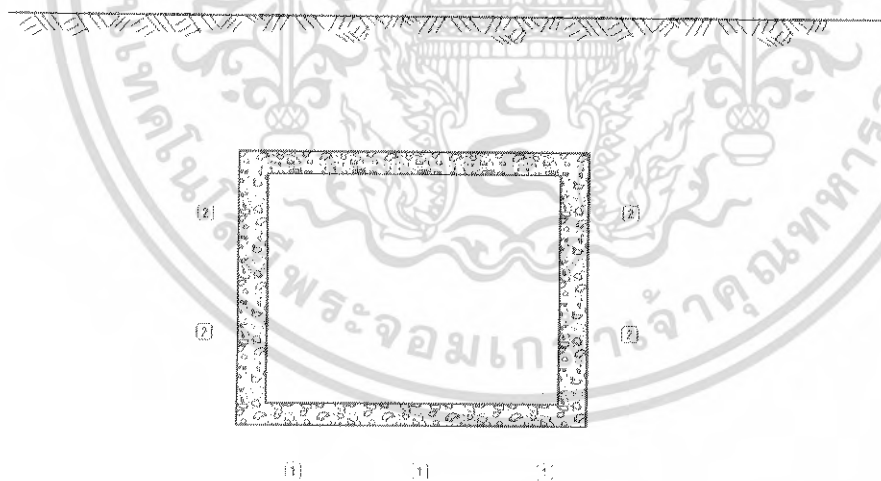
[2] หาแรงดันน้ำที่กระทำกับกำแพงกันดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.53 ติดตามแรงดันน้ำก่อนเสาเข็มรับน้ำหนัก

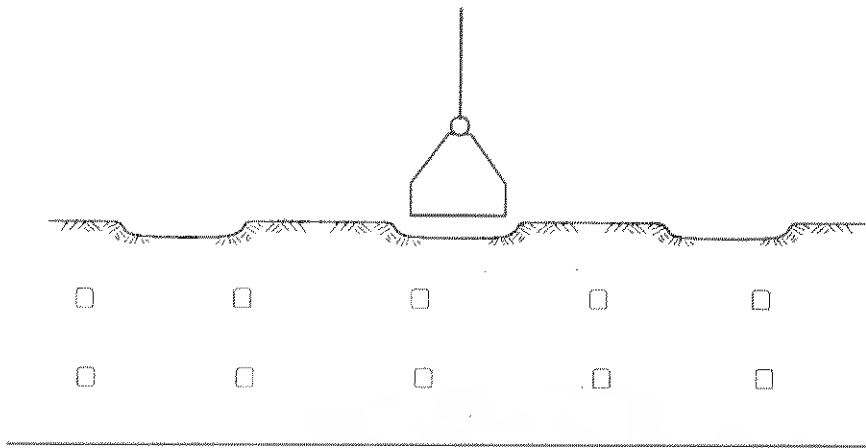
[] ติดตามแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดจากการตอกเข็ม



รูปที่ 3.54 หาแรงดันน้ำด้านต่างๆที่กระทำกับโครงสร้าง

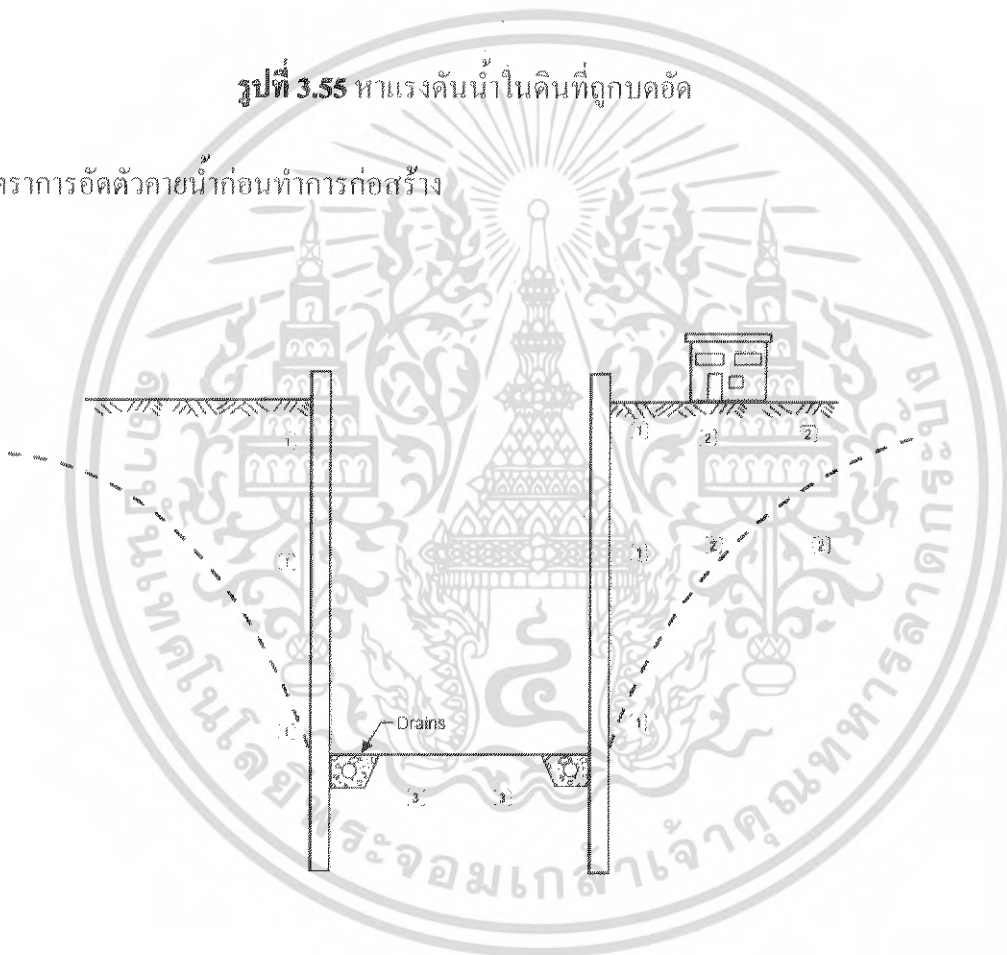
- [1] หาแรงลอยตัวที่น้ำกระทำกับโครงสร้าง
- [2] หาแรงดันของน้ำที่กระทำกับโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.55 หาแรงดันน้ำในดินที่ถูกบดอัด

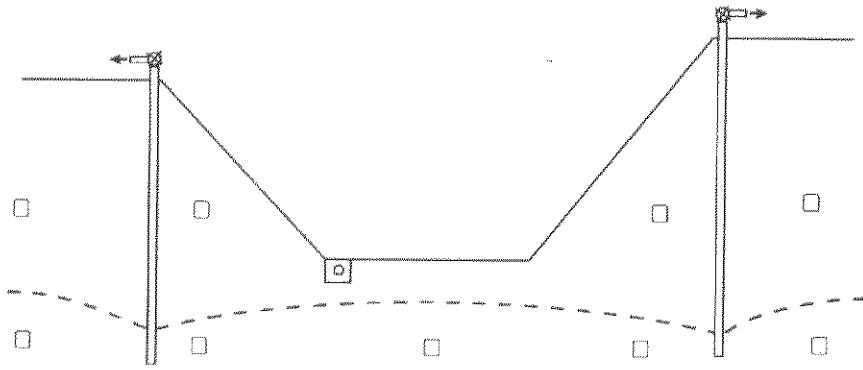
[] ทำอัตราการอัดตัวคายน้ำก่อนทำการก่อสร้าง



รูปที่ 3.56 แรงดันและติดตามการเปลี่ยนแปลง ณ. จุดต่างๆ

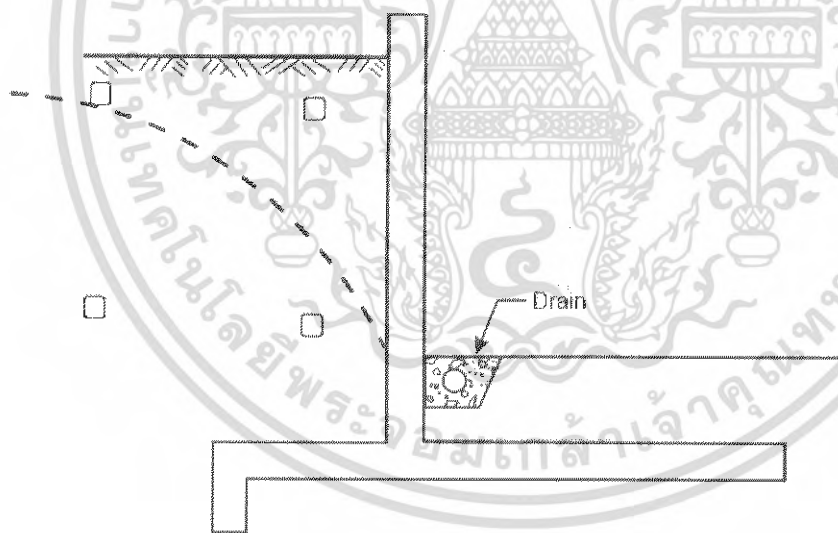
- [1] ติดตามแรงดันน้ำที่กระทำกับกำแพง
- [2] ติดตามการซึมออกของน้ำเพื่อทำนายการทรุดตัวของสิ่งก่อสร้าง
- [3] ตรวจวัดแรงลอยตัวเพื่อหาเสถียรภาพของฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.57 ติดตามแรงดันตำแหน่งต่างๆระหว่างปั้มน้ำออก

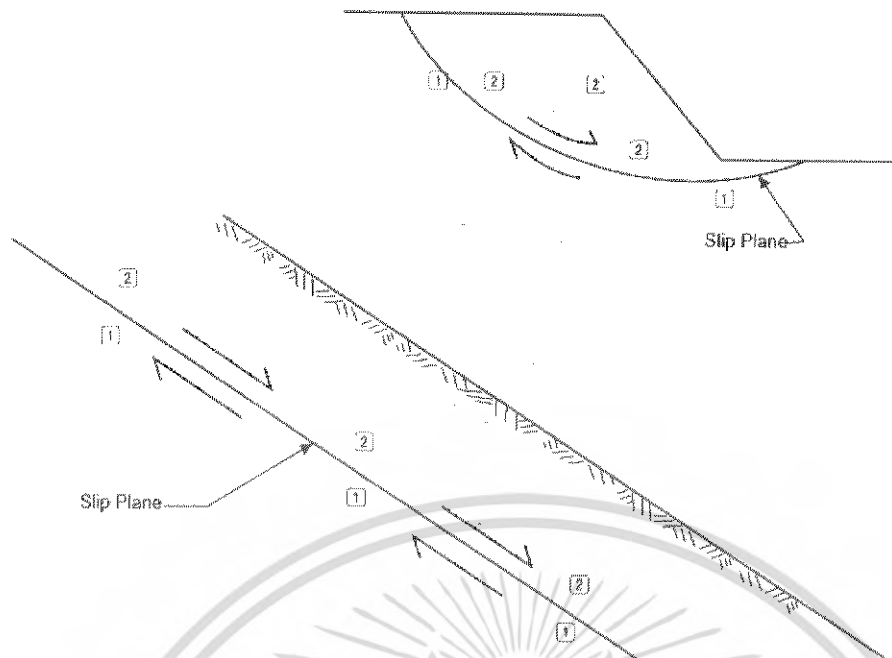
- [] ช่วยในการวางแผนการสูบน้ำออก
- [] หาผลกระทบจากการสูบน้ำออก
- [] ใช้เตือนภัยน้ำล้น



รูปที่ 3.58 ติดตามแรงดันน้ำที่กำแพงกันดิน

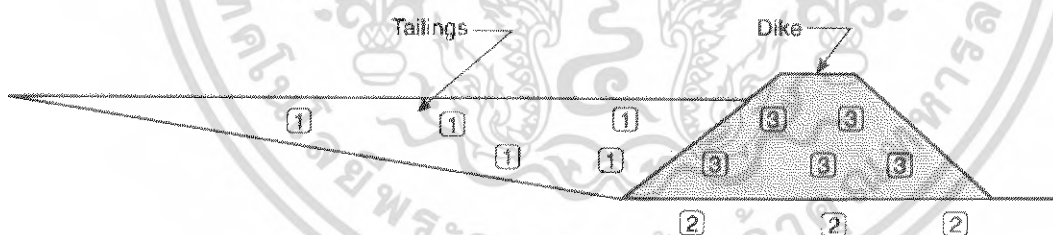
- [] ติดตามแรงดันน้ำที่กระทำกับกำแพงกันดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อที่ 88 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.59 ติดตามแรงดันในบริเวณที่อาจเกิดการเคลื่อนตัว

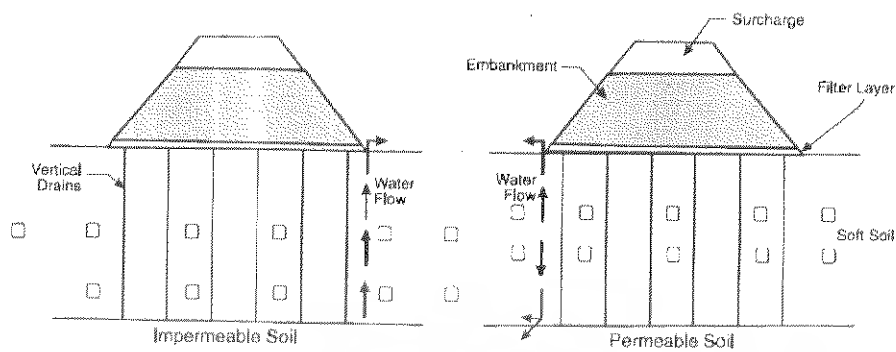
- [1] ติดตามแรงดันน้ำเพื่อคำนวณหาความเค้นเฉือนของดิน
- [2] ติดตามระดับน้ำใต้ดินเพื่อคำนวณมวลดิน



รูปที่ 3.60 ติดตามแรงดันที่ตัวเขื่อนและท้ายเขื่อน

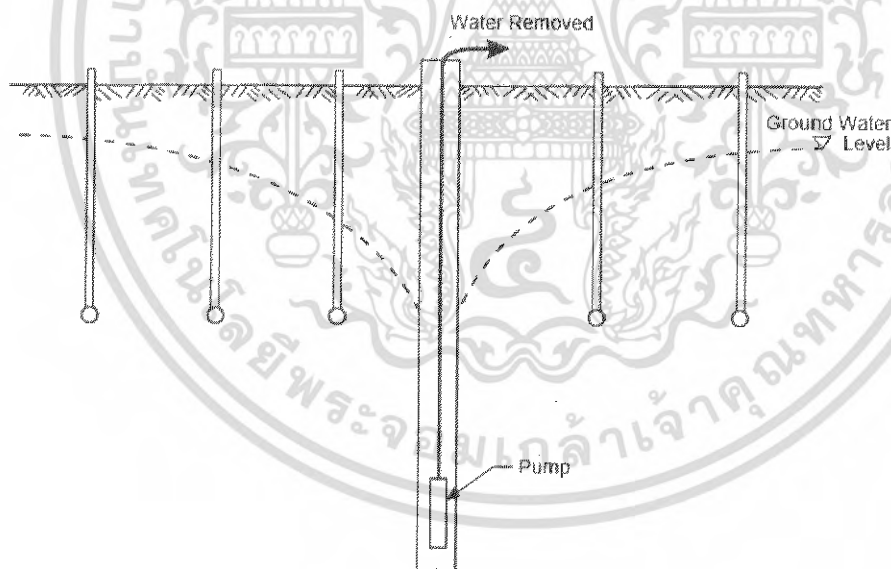
- [1] ตรวจสอบแรงดันน้ำขณะก่อสร้างท้ายเขื่อนเพื่อหาความเค้นเฉือนและอัตราการอัดตัวคายน้ำ
- [2] ติดตามแรงดันน้ำเพื่อหาความเค้นเฉือนและตรวจวัดแรงลอยตัว
- [3] ติดตามการซึมของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.61 ติดตามแรงดันใต้ตัวเขื่อน

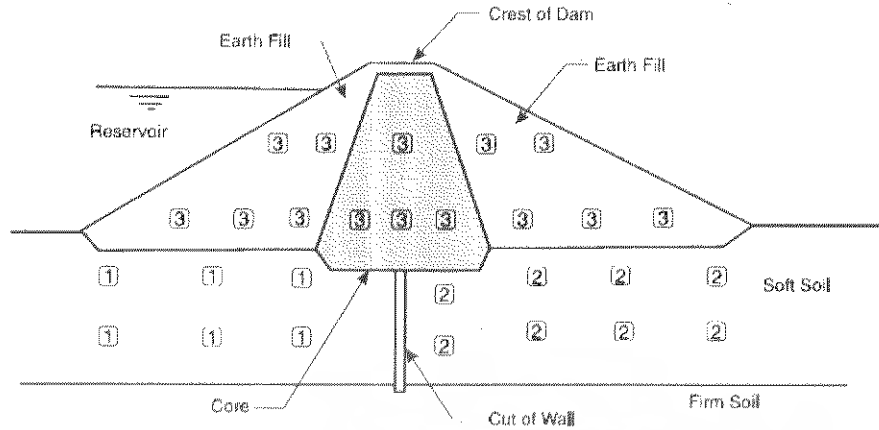
[] ติดตามการอัดตัวคาน้ำก่อนการก่อสร้าง



รูปที่ 3.62 การหาค่าระดับน้ำใต้ดินที่หลุมสำรวจ

- ติดตามระดับน้ำใต้ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อ 90 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.63 ติดตามแรงดัน ณ ตำแหน่งใดๆเพื่อทราบสภาพของเขื่อน

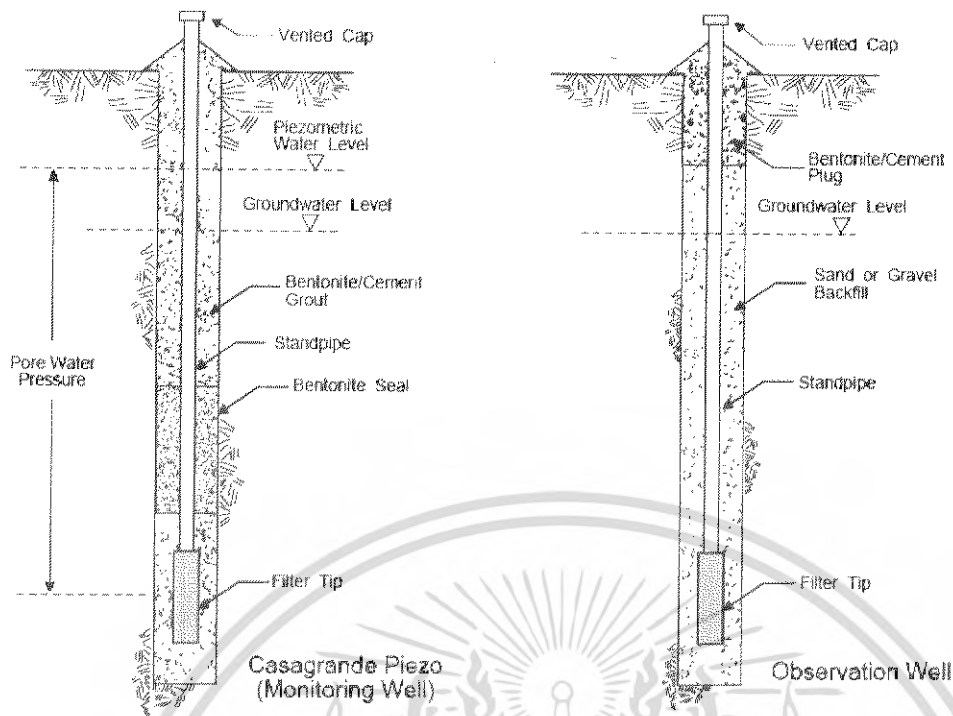
- [1] ติดตามแรงดันน้ำเพื่อหาความเค้นเฉือนและตรวจวัดแรงลอยตัว
- [2] ติดตามแรงดันน้ำเพื่อหาความเค้นเฉือน การซึมของน้ำ และ ตรวจวัดแรงลอยตัว
- [3] ติดตามการซึมของน้ำ

ประเภทของ Piezometer

Piezometer มีหลายชนิดแบ่งเป็น Piezometer ที่ใช้หาระดับน้ำได้ (Standpipe piezometer) และ Piezometer ที่ใช้หาแรงดันน้ำใต้ดิน (Pneumatic, Hydraulic, Vibrating wire) งานงานหนึ่งสามารถเลือกใช้ได้หลายแบบ โดยเกณฑ์การเลือกใช้นั้นจะขึ้นกับความต้องการในใช้งานและวิจารณ์านของวิศวกรผู้ควบคุมงาน

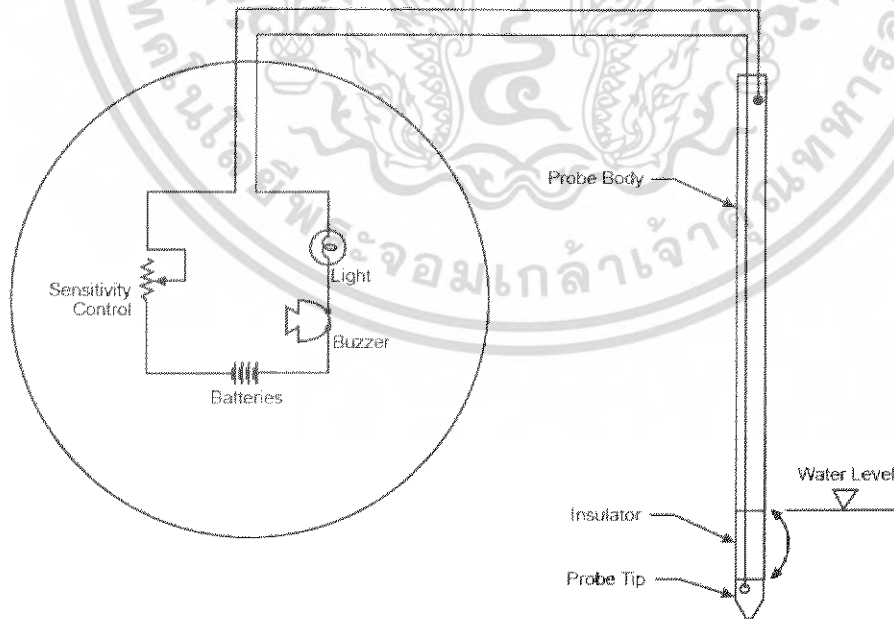
3.7.1 Standpipe piezometer

สามารถใช้หาระดับน้ำใต้ดินและระดับความดันน้ำได้โดยดูจากระดับน้ำในท่อขึ้น (Standpipe) ค่าที่ได้จะเป็นระดับน้ำใต้ดิน (Groundwater Level) หรือระดับความดันน้ำ (Water Pressure) นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการติดตั้งภาพ



รูปที่ 3.64 แสดงวิธีการติดตั้ง Standpipe ในแบบต่างๆ

การหาระดับน้ำในท่อขึ้นนั้นจะใช้หลักการง่ายๆ โดยใช้สื่อทางไฟฟ้าส่งลงไปตามท่อขึ้น(Standpipe) เมื่อถึงระดับน้ำจะมี ไฟสัญญาณสว่างขึ้นทำให้ทราบว่ระดับน้ำในท่อขึ้นอยู่ลึกลงไปเป็นระยะเท่าใด



รูปที่ 3.65 แสดงการทำงานของหัวตรวจระดับน้ำ(water level indicator)อย่างง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อที่ 92 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.66 ตัวอย่างหัวตรวจระดับน้ำ(water level indicator)และท่อยืน(Stand pipe)

ข้อดี

- ราคาถูก
- สามารถใช้ในการหาค่าความสามารถในการซึม(Permeability)ได้

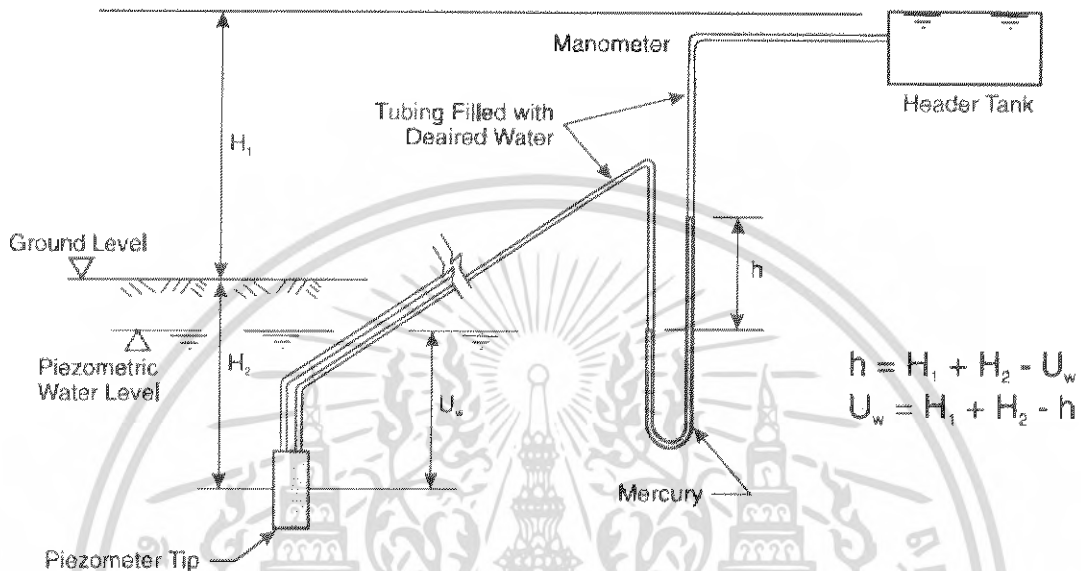
ข้อจำกัด

- ตอบสนองช้าในดินที่มีความสามารถในการซึมต่ำ
- ไม่สามารถอ่านค่าแรงดันติดลบได้
- ยากต่อการทำให้อ่านค่าแบบอัตโนมัติ
- มีปลายท่อยื่นขึ้นขึ้นมาเหนือผิวดินอาจกีดขวางการทำงานที่หน้างานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2 Hydraulic piezometer

ใช้หลักการของมานอมิเตอร์ (Manometer) ในการหาค่าความดันน้ำใต้ดิน เป็นอุปกรณ์ที่ผู้ติดตั้งควรมีความชำนาญในระดับหนึ่ง เพราะหากมีอากาศในมานอมิเตอร์จะทำให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อน



รูปที่ 3.67 แสดงหลักการทำงานของ Hydraulic piezometer

ข้อดี

- สามารถตอบสนอง ได้ดีแม้ในดินที่มีความสามารถในการซึมต่ำ
- สามารถใช้ในการหาค่าความสามารถในการซึม (Permeability) ได้
- สามารถอ่านค่าความดันตติลยได้
- ไม่กีดขวางการทำงานที่หน้างาน

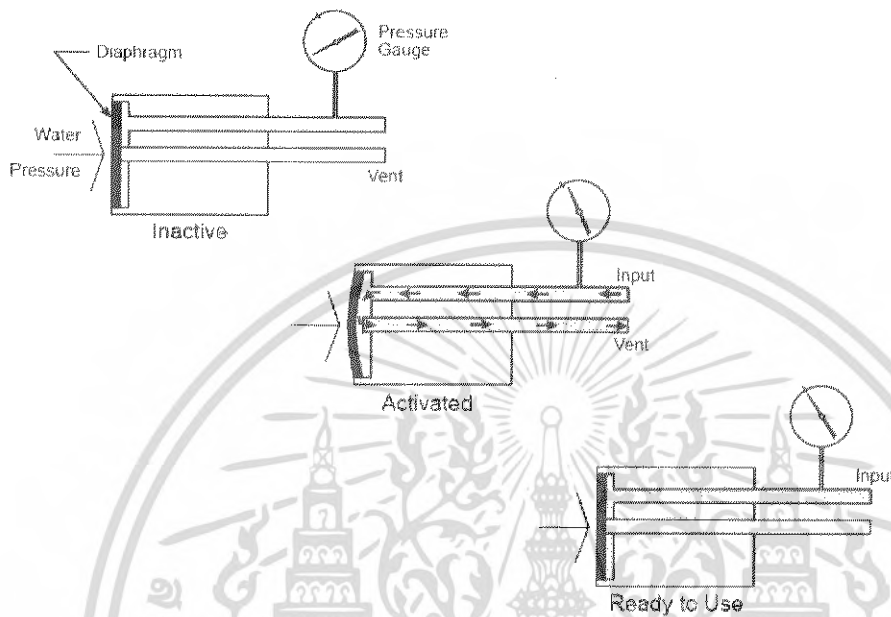
ข้อจำกัด

- ต้องไล่อากาศจากท่อให้หมด
- ระดับของมานอมิเตอร์กับหัว Piezometer ต่างกันได้ไม่เกิน 5 m
- ไม่สามารถใช้งานในที่ที่มีอุณหภูมิมีต่ำกว่าจุดเยือกแข็งได้

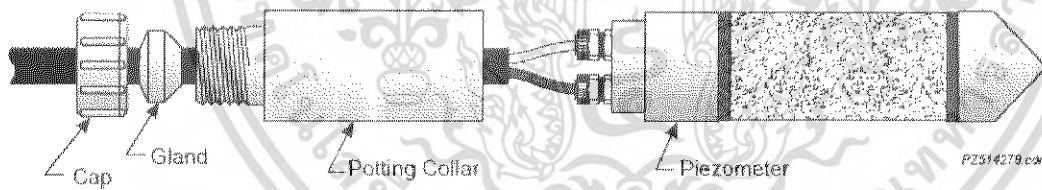
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.3 Pneumatic piezometer

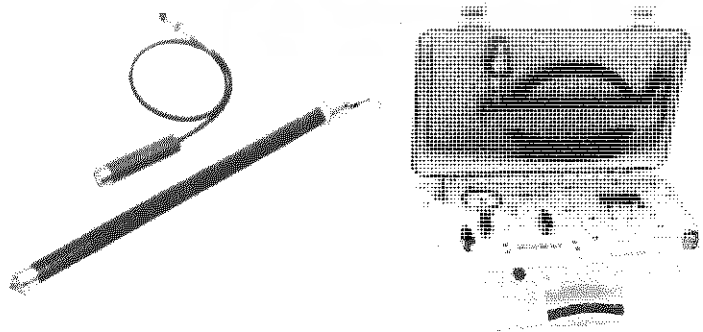
ใช้หลักการสมดุลระหว่างแรงดันน้ำกับแรงดันอากาศที่ดันแผ่นไวสัมผัส (Diaphragm) จากรูปจะเห็นว่าสามารถทราบค่าแรงดันน้ำได้จากมาตรวัดแรงดันอากาศ ซึ่งขณะที่แรงดันน้ำกับอากาศมีค่าเท่ากันนั้นจะเป็นช่วงที่เริ่มมีอากาศระบายออกมาจากท่อระบาย



รูปที่ 3.68 แสดงการทำงานของ Pneumatic piezometer



รูปที่ 3.69 ส่วนประกอบของหัว Pneumatic piezometer อย่างง่าย



รูปที่ 3.70 ตัวอย่างหัว Pneumatic piezometer และ Read out unit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดี

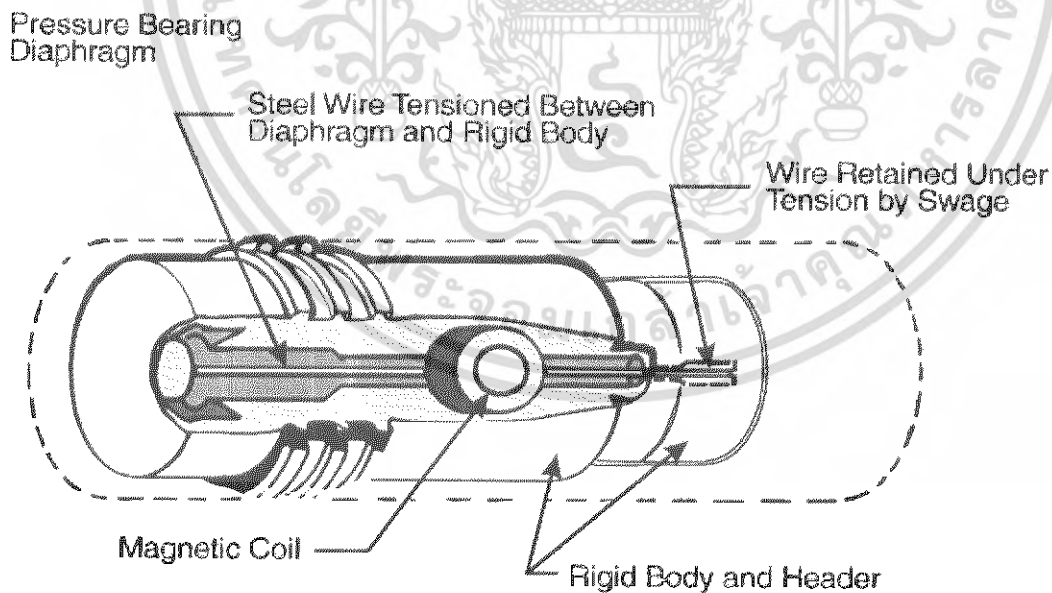
- ไม่เกิดขบวนการทำงานที่หน้างาน
- มีราคาถูกกว่า piezometer อื่นที่ใช้แผ่นไวสั่มผัส(Diaphragm)
- ใช้งานได้แม้ในที่ๆอุณหภูมิต่ำ
- สามารถตอบสนองได้ดีแม้ในดินที่มีความสามารถในการซึมต่ำ

ข้อจำกัด

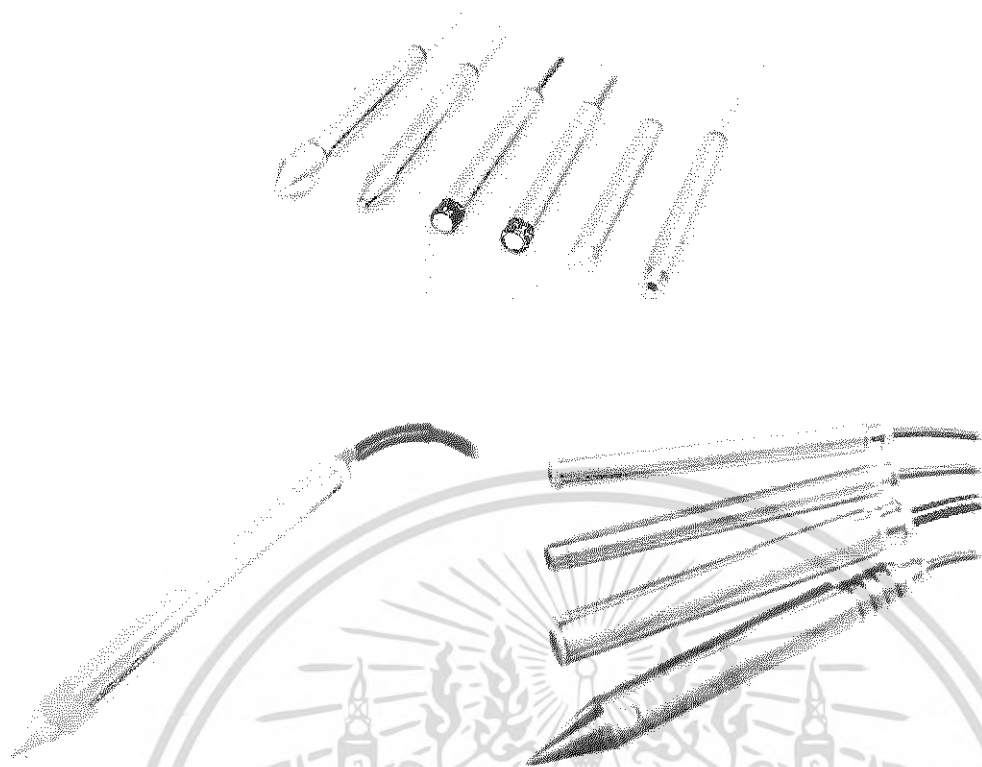
- ระยะเวลาที่ใช้ในการอ่านค่าขึ้นกับความยาวท่อส่งอากาศ
- ขาดต่อการทำให้อ่านค่าได้แบบอัตโนมัติ
- ต้องใช้ก๊าซไนโตรเจน

3.7.4 Vibrating Wire Piezometer

Piezometer ประเภทนี้ค่าที่อ่านได้จะเป็นความถี่สัญญาณทางไฟฟ้าทำให้ง่ายต่อการอ่านค่าและแปลผลข้อมูลแบบอัตโนมัติ โดยทั่วไปจะมีมากมายหลายรุ่นมีประสิทธิภาพแตกต่างกัน หรือในบางโอกาสการใช้งานก็สามารถสั่งทำได้ตามความต้องการของเจ้าของงานก็ได้เช่นกัน



รูปที่ 3.71 ส่วนประกอบหัว Vibrating wire piezometer อย่างง่าย



รูปที่ 3.72 ตัวอย่าง Vibrating wire piezometer

ข้อดี

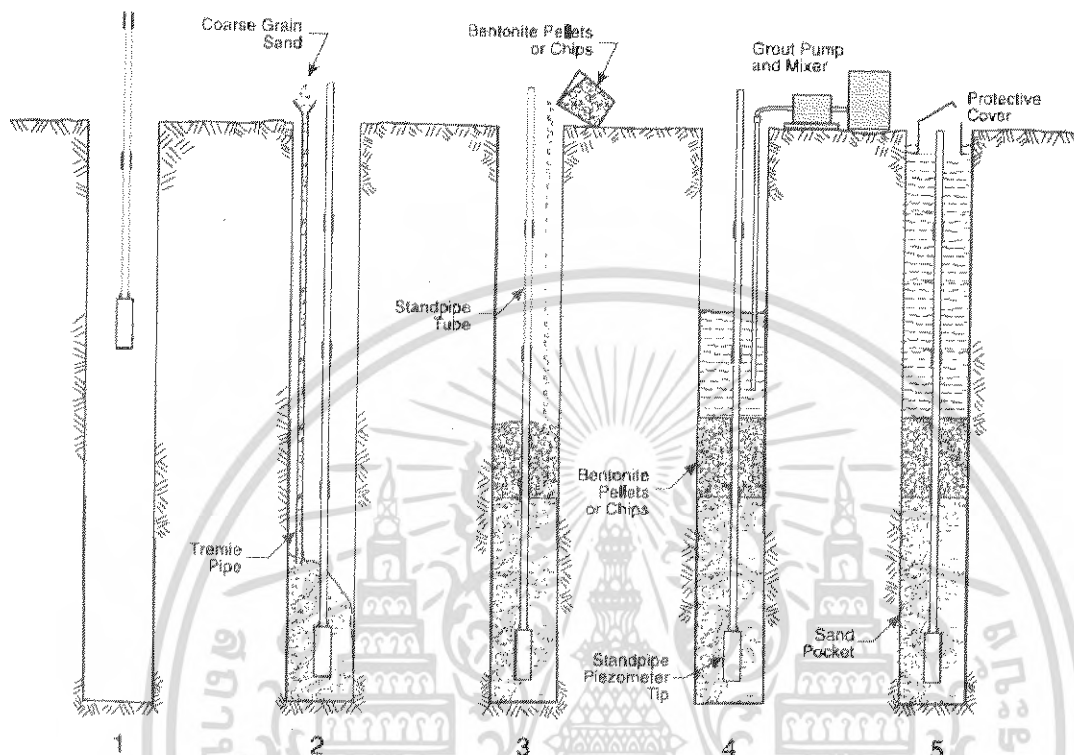
- ง่ายต่อการอ่านค่าและแปลผลข้อมูล
- สะดวกและน่าเชื่อถือในการใช้งานระยะยาว
- ไม่กีดขวางการทำงานที่หน้างาน

ข้อจำกัด

- ตัวเครื่องมือมีความซับซ้อนยากต่อการดูแลรักษา

การติดตั้ง

การติดตั้ง Standpipe Piezometer

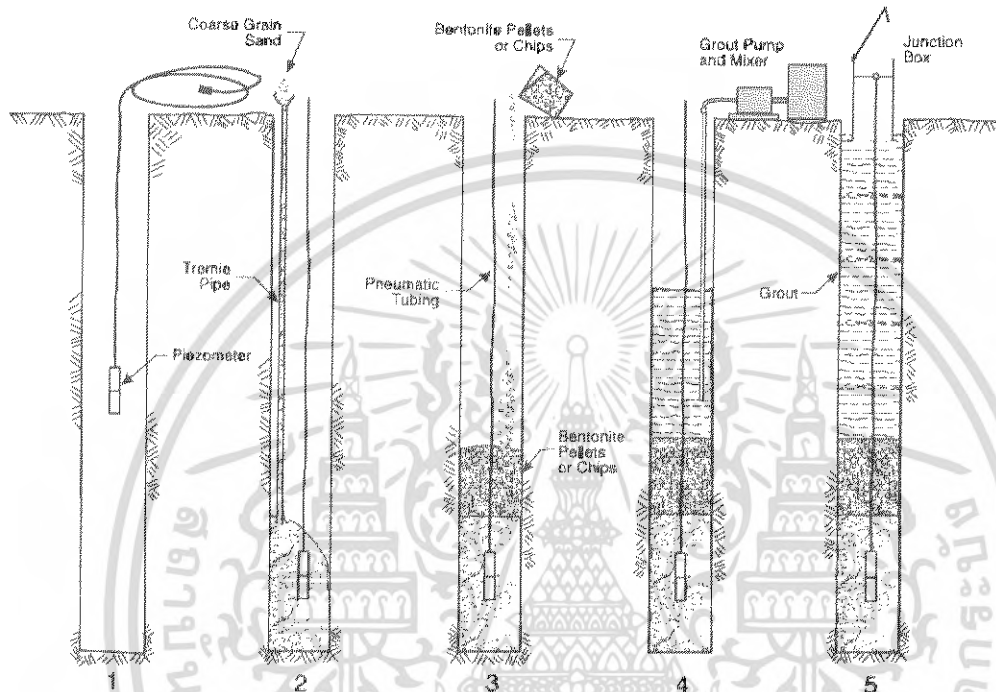


รูปที่ 3.73 แสดงขั้นตอนการติดตั้ง Standpipe piezometer

- 1 ทำความสะอาดหลุมให้สะอาดและนำหัว Piezometer ขึ้นลงที่ก้นหลุม
- 2 ทำการถมกลับด้วยทรายหุ้มหัว Piezometer ไว้
- 3 หากเป็นหลุมติดตาม (Monitoring well) ให้ใช้เม็ดเบนโทไนท์ (Bentonite) ถมชั้นทรายอีกที หากเป็นหลุมสำรวจ (Observation well) จะไม่จำเป็นต้องใช้ชั้นเบนโทไนท์
- 4 ถมหลุมเหนือชั้นเบนโทไนท์(หากเป็นหลุมติดตาม)หรือชั้นทราย(หากเป็นหลุมสำรวจ) ด้วยวัสดุ Grout จนถึงปากหลุม
- 5 ติดตั้งกล่องป้องกันการรบกวน(Junction box)ที่ปากหลุม

การติดตั้ง Piezometer ชนิดต่างๆในชั้นดินเหนียว

เนื่องจากตัว Piezometer นั้นจะวัดแรงดันน้ำที่กระทำกับแผ่นโวลัมผัส (Diaphragm) ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวจะมีการอุดตันได้ง่าย และในช่วงที่ไม่มีน้ำในชั้นดินเหนียวเม็ดดินเหนียวจะแห้งและจับเป็นก้อนทำให้เกิดการอุดตันได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำชั้นทรายหุ้มไว้

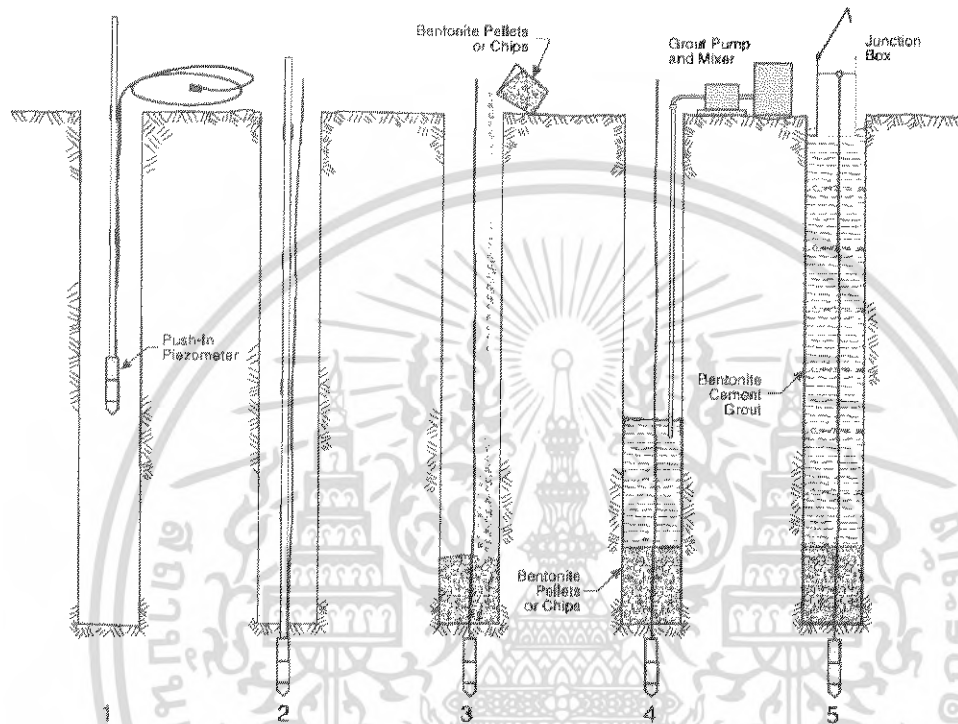


รูปที่ 3.74 แสดงการติดตั้งหัว Piezometer ชนิดต่างๆในชั้นดินเหนียว

- 1 ทำการขุดหลุมสำรวจถึงชั้นดินที่ต้องการติดตั้งและทำความสะอาดหลุมด้วยน้ำสะอาด
- 2 หย่อน Piezometer ลงในหลุมถึงระดับที่ต้องการและใช้ทรายฝังหุ้มไว้
- 3 ใช้เม็ดเบนโทไนท์ (Bentonite) กลบชั้นทรายอีกทีเพื่อป้องกันไม่ให้แรงดันน้ำด้านบนมารบกวนแรงดันน้ำชั้นที่ต้องการศึกษา
- 4 กลบหลุมเหนือชั้นเบนโทไนท์ด้วยวัสดุ Grout จนถึงปากหลุม
- 5 ติดตั้งกล่องป้องกันการรบกวน (Junction box) ที่ปากหลุม

การติดตั้ง Piezometer ชนิดต่างๆในชั้นดินทราย

หากมั่นใจว่าในระดับที่ต้องการสำรวจเป็นชั้นดินทรายแล้วก็สามารถใช้ Piezometer ที่มีกรอกแบบมาให้สามารถกดฝังได้ฝังลงในชั้นทรายนั่นๆ โดยไม่จำเป็นต้องทำชั้นทรายหุ้ม Piezometer ใว้อีก



รูปที่ 3.75 แสดงวิธีการติดตั้งหัว Piezometer ชนิดต่างๆในชั้นทราย

- 1 ทำการขุดหลุมสำรวจถึงชั้นทรายที่ต้องการติดตั้งและทำความสะอาดหลุมด้วยน้ำสะอาด
- 2 ใช้ท่อส่งส่ง Piezometer ลงในหลุมและกดฝังให้จมในชั้นทราย
- 3 ใช้เม็ดเบนโทไนท์ (Bentonite) กลบชั้นทรายอีกทีเพื่อป้องกันไม่ให้แรงดันน้ำดันบนมารบกวนแรงดันน้ำชั้นที่ต้องการศึกษา
- 4 กลบหลุมเหนือชั้นเบนโทไนท์ด้วยวัสดุ Grout จนถึงปากหลุม
- 5 ติดตั้งกล่องป้องกันการรบกวน (Junction box) ที่ปากหลุม

3.8 Tape extensometer

ที่มาและความสำคัญ

Tape Extensometer ใช้หาค่าระยะที่เปลี่ยนแปลงระหว่างตำแหน่งอ้างอิงบนผนัง หรือ โครงสร้างที่อยู่ใต้ดิน ซึ่งมีวิธีใช้งานทั่วไปดังนี้

- ติดตาม Covergence ของผนังอุโมงค์
- ติดตามการเสียรูปของการก่อสร้างใต้ดิน
- ติดตามการเคลื่อนตัวของสิ่งก่อสร้างเดิม การขุดหลุมลึก โครงสร้างสะพาน และ โครงสร้างเหล็ก หรือคอนกรีตอื่นๆ



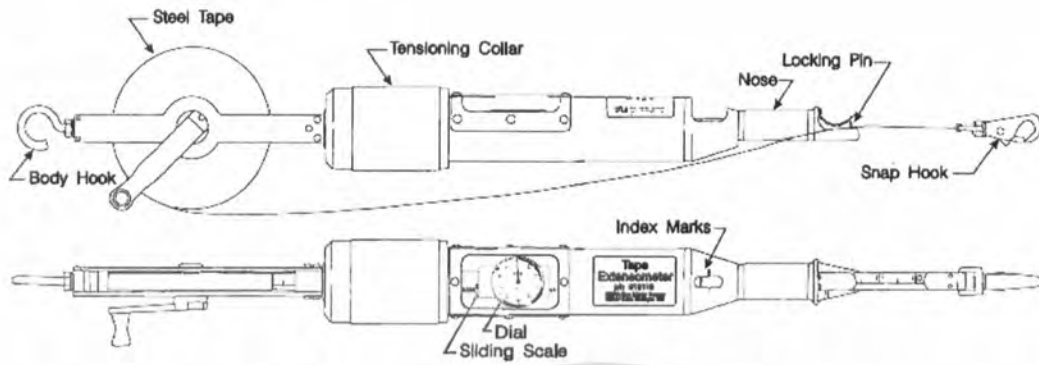
รูปที่ 3.76 รูปแสดงการติดตั้งจุดอ้างอิง(Reference point) ตำแหน่งต่างๆ



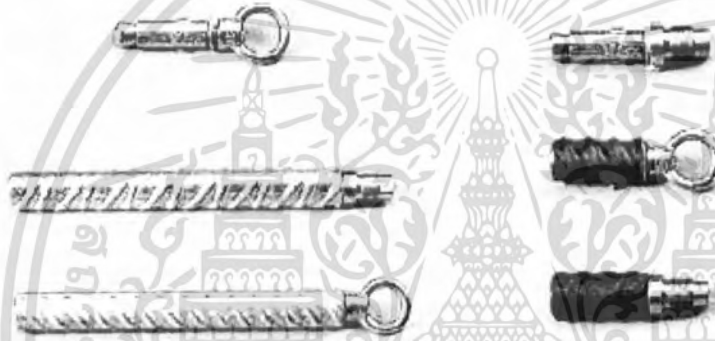
รูปที่ 3.77 Tape extensometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่ 101 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

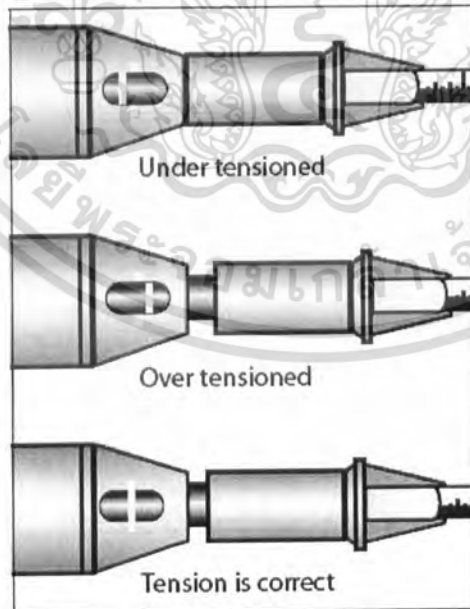
ส่วนประกอบ



รูปที่ 3.78 แสดงส่วนประกอบของ Tape extensometer



รูปที่ 3.79 จุดอ้างอิง (Reference point)



รูปที่ 3.80 Index Mark

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงนี้ 102 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.81 Digital Display

- 1 จุดอ้างอิง(Reference point) จะฝังอยู่ตลอดความยาวอูโมงค์หรือโครงสร้าง
- 2 เทปเหล็ก (Steel tape) ใช้วัดระยะระหว่างจุดอ้างอิง(Reference point)ทั้ง 2 จุด
- 3 ตะขอ(Hook) ใช้เกี่ยวกับจุดอ้างอิงทั้ง 2 จุด
- 4 Index Mark ซึ่งตำแหน่งที่ถูกต้องของแรงดึง
- 5 Tension Collar ใช้หมุนเพื่อปรับค่าแรงดึงให้ Index Mark อยู่ในแนว และได้ค่าแรงดึงที่ถูกต้อง
- 6 หน้าปัดแสดงค่า(Dial) ใช้แสดงค่าที่อ่านได้ บางทีอาจเป็นแบบดิจิตอล

การทำงาน

การอ่านค่าผู้ควบคุมงานจะทำการเกี่ยวเทปเหล็ก (Steel tape) กับจุดอ้างอิง (Reference point) 2 จุด โดยปล่อยให้เทปเหล็ก(Steel tape)หมุนคลายออกจากนั้นดึงเทปให้ตึงแล้วปรับค่าแรงดึงโดยใช้ Tension Collar บันทึกระยะระหว่างจุดอ้างอิงทั้ง 2 ทำเช่นเดิมกับจุดที่เหลืออยู่

ในการเปรียบเทียบค่าที่อ่านได้กับค่าตั้งต้น ผู้ควบคุมจะสามารถคำนวณค่าระยะที่เปลี่ยนแปลงระหว่างจุดทั้ง 2 จุดได้ ซึ่งผลของข้อมูลสามารถบอกได้ทั้ง ขนาด ทิศทาง และอัตราของการเคลื่อนที่

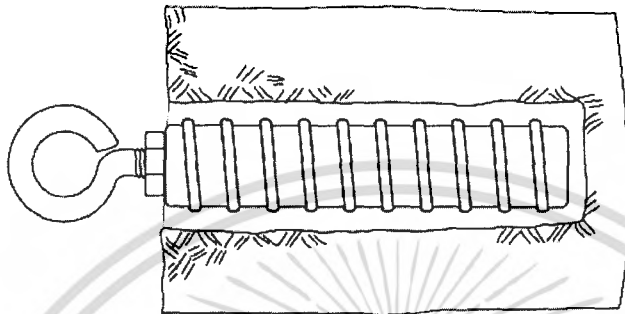
การติดตั้งจุดอ้างอิง(Reference point)

จุดอ้างอิง(Reference point)ของ Tape extensometer จะประกอบด้วย Eyebolt ซึ่งติดตั้งโดยตรงกับตัวโครงสร้าง หรือติดตั้งกับสมอ(Anchor) ซึ่งมีอยู่ 2 แบบคือแบบ Groutable และ Expansion ซึ่งจะติดตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการทราบ ขนาดและทิศทางของการเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่ เริ่มจากติดตั้งให้อยู่ในแนวเดียวกันก่อน เพราะตะขอ(Hook) และ Eyebolt สามารถปรับมุมให้เหมาะกับเทพได้ ตำแหน่งของ Eyebolt ที่ติดตั้งมีความสำคัญมากเพราะการเคลื่อนของตำแหน่งจะมีผลต่อค่าที่อ่านได้

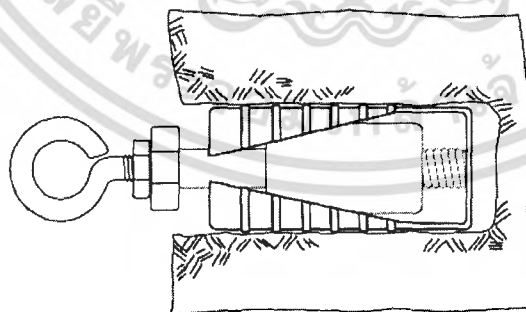
Groutable Rebar Anchors



รูปที่ 3.82 Groutable Rebar Anchors

- 1 เจาะรูสำหรับใส่สมอ(Anchor) ใส่สมอ(Anchor)เข้าไปยังรูเจาะและทำการ Grouting และปล่อยให้เซตตัว
- 2 ชั้น Eyebolt ส้ารองติดกับสมอ(Anchor) และทดสอบแรงดึง 130N ถ้าไม่มีการเคลื่อนที่ให้ถอด Eyebolt ส้ารองออก
- 3 ชั้น lock nut ใส่ Eyebolt และชั้น Eyebolt เข้ากับสมอ(Anchor) จากนั้นชั้น lock nut ให้แน่น

Expansion Anchors

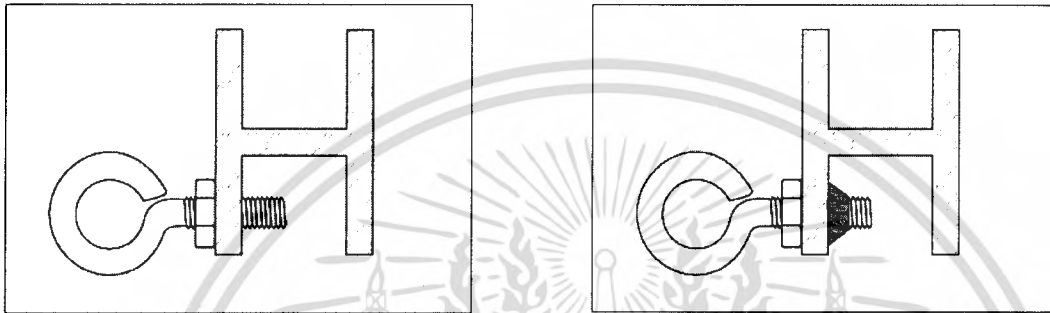


รูปที่ 3.83 Expansion Anchors

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงนี้ 104 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1 เจาะรูสำหรับใส่สมอ(Anchor) ปรับสมอ(Anchor) ให้ยึดติดกับรูเจาะ โดยการขันเกลียวที่อยู่ด้านในให้สมอ(Anchor)ขยายตัวและยึดแน่นกับรูที่เจาะ
- 2 ขัน Eyebolt สำรองติดกับสมอ(Anchor) และทดสอบแรงดึง 130N ถ้าไม่มีการเคลื่อนที่ให้ถอด Eyebolt สำรองออก
- 3 ขัน lock nut ใส่ Eyebolt และขัน Eyebolt เข้ากับสมอ(Anchor) จากนั้นขัน lock nut ให้แน่น

การติดตั้ง Eyebolt โดยตรงกับโครงสร้าง



รูปที่ 3.84 ติดตั้งEyebolt โดยตรง

- 1 เจาะรูสำหรับEyebolt
- 2 ขัน lock nut ใส่ Eyebolt และขัน Eyebolt เข้าไปยังหลุมเจาะ และขัน lock nut ให้แน่น
- 3 ทำการเชื่อม Eyebolt ติดกับรูเจาะเพื่อความแข็งแรง

ประโยชน์

- 1 เครื่องมือขนาดเล็กและน้ำหนักเบา
- 2 แข็งแรงทนทาน
- 3 ง่ายในการใช้งานและบำรุงรักษา

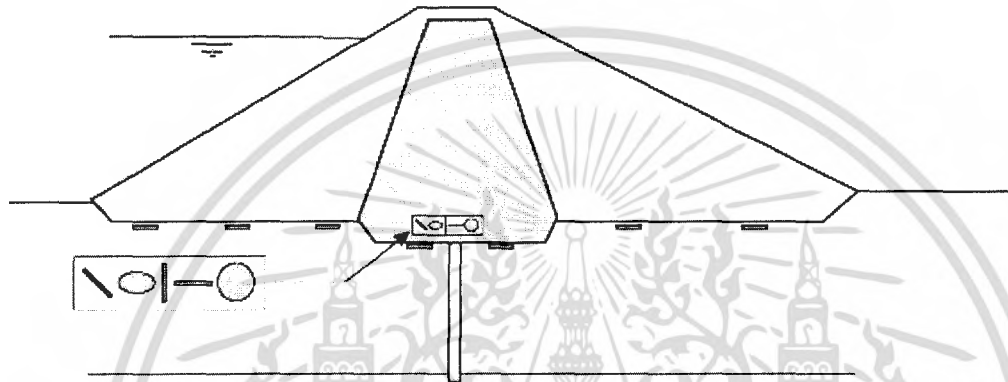
ข้อจำกัด

สัมประสิทธิ์การขยายตัวของอุปกรณ์จะมีผลต่อการวัด

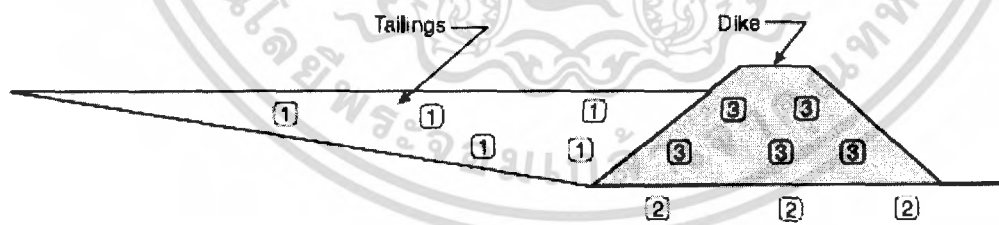
3.9 Pressure cells

ที่มาและความสำคัญ

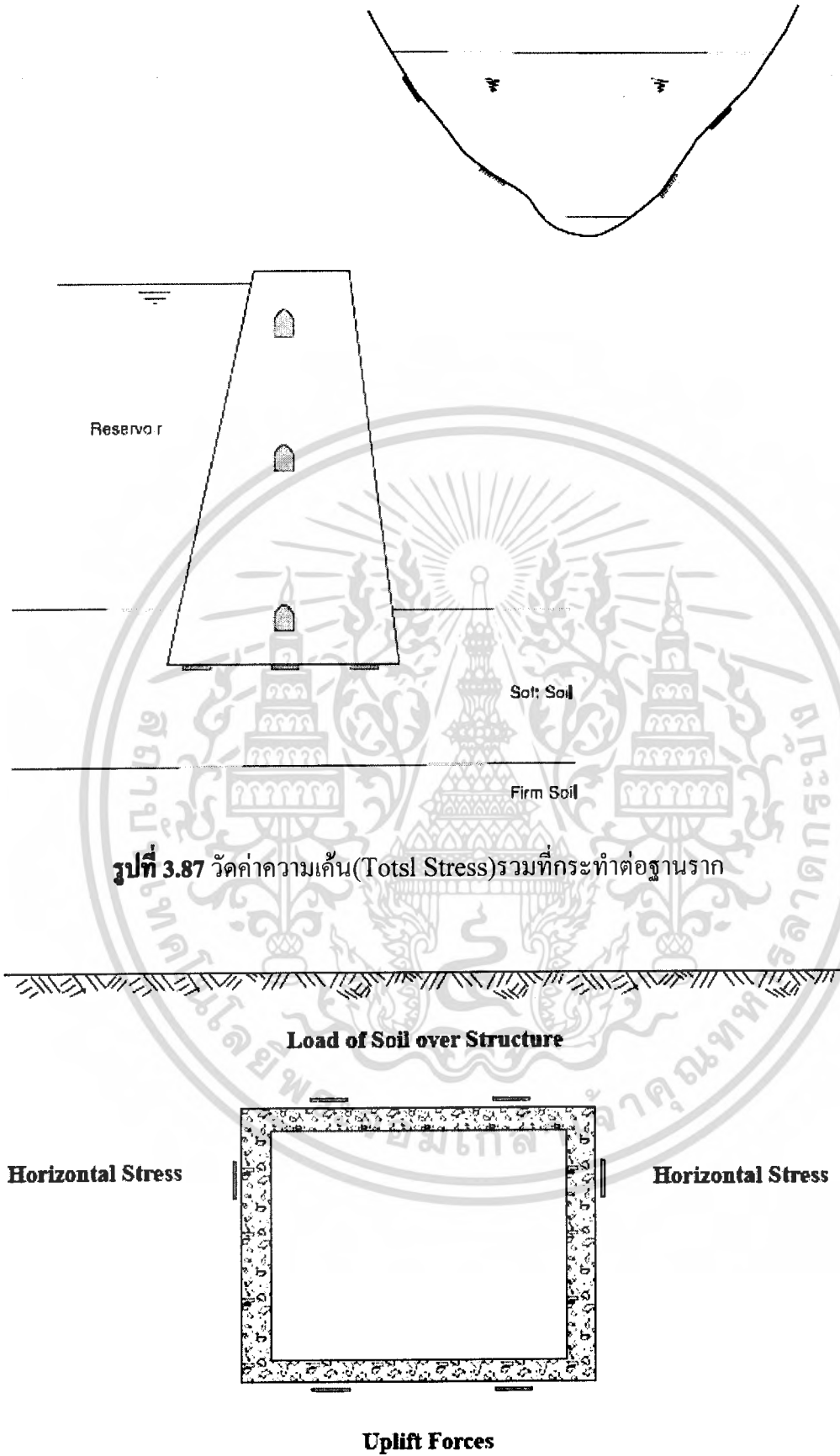
Total Pressure Cells ใช้วัดแรงดันรวม (Total Pressure) ซึ่งเกิดจากความเค้นประสิทธิผล (Effective Stress) และแรงดันน้ำ (Pore-water Pressure) โดยทั่วไปจะใช้วัดค่าเพื่อการออกแบบ และแจ้งเตือนเมื่อแรงดันดินมีค่าเกินกว่าที่ออกแบบของโครงสร้างจะรับได้



รูปที่ 3.85 หาค่าของการกระจาย ขนาด และทิศทางของความเค้นรวมในแกนดินเหนียวเขื่อน



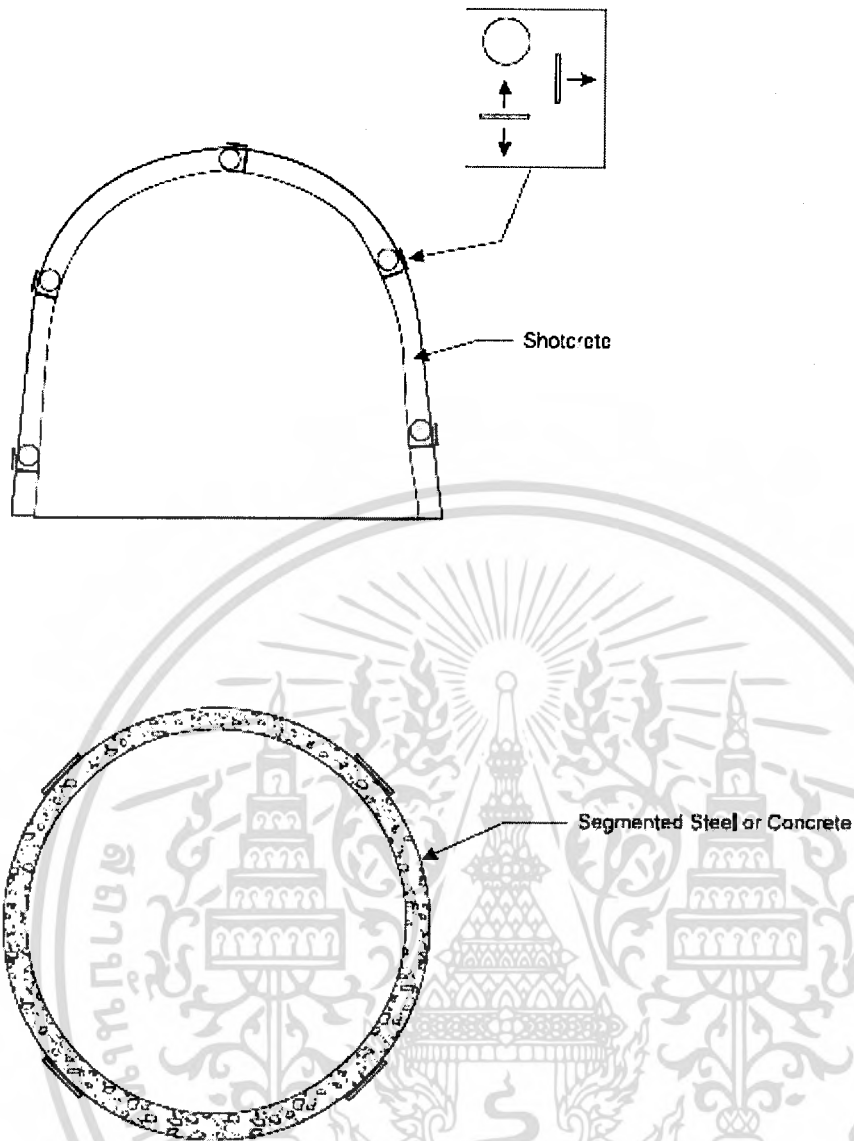
รูปที่ 3.86 ประมาณค่าแรงดันที่เกิน (Overburden Pressure) ที่กระทำต่อฐานรากและความเค้นที่เกิด



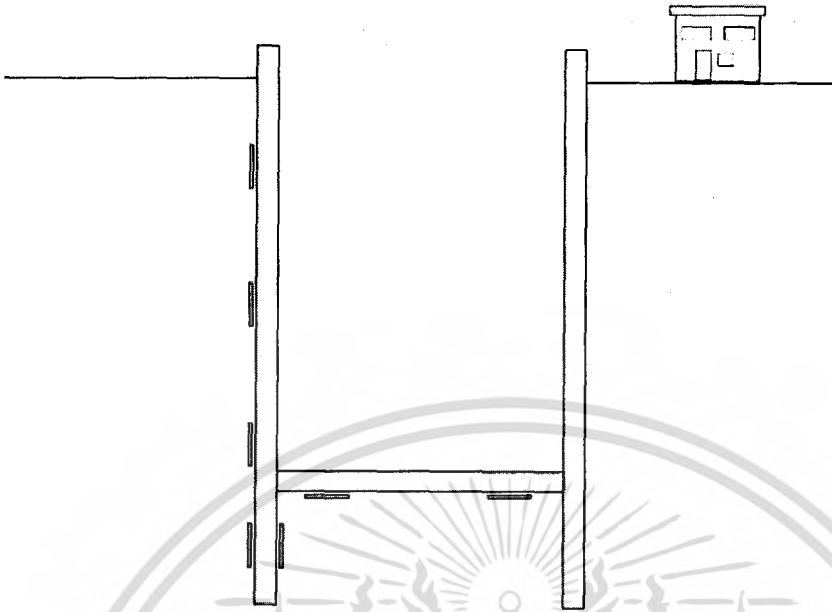
รูปที่ 3.87 วัดค่าความเค้น (Total Stress) รวมที่กระทำต่อฐานราก

รูปที่ 3.88 หาค่าความเค้นและแรงดันที่กระทำต่อโครงสร้าง

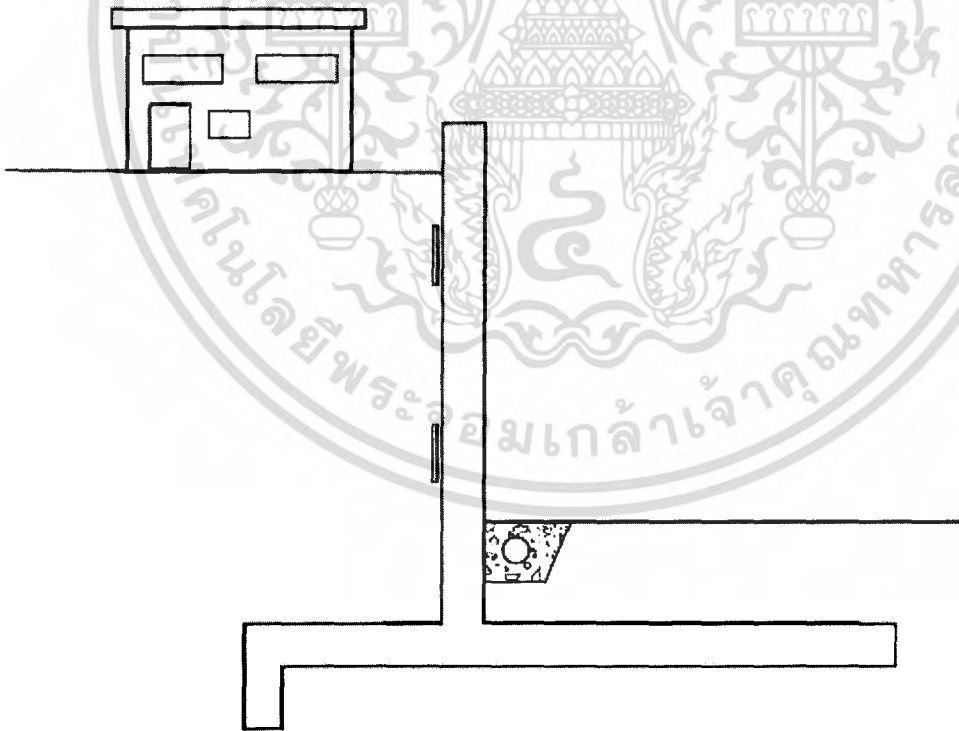
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 107 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.89 ใช้วัดความเค้นในShotcrete(รูปบน) และความเค้นที่กระทำต่ออุโมงค์(รูปล่าง)



รูปที่ 3.90 ใช้ติดตามค่า Active และ Passive Pressure และแรงยกตัวที่เกิดกับฐานราก



รูปที่ 3.91 ใช้ยืนยันค่าการออกแบบของ Active Pressure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงนี้ 109 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทของ PRESSURE CELLS

ประเภทของ Pressure Cells แบ่งตามลักษณะการใช้งานได้ 3 ประเภท ดังนี้

- 1 Total Pressure Cell ใช้ติดตามค่าแรงดันต่างๆไป เช่น การติดตามค่าแรงยกตัวใต้ฐานราก ติดตามค่าแรงดันในโครงสร้างใต้ดิน
- 2 Jackout Pressure Cell ออกแบบไว้สำหรับการติดตั้งในโครงสร้าง เช่น Diaphragm wall ซึ่ง hydraulic jake จะทำหน้าที่ขึ้นให้ Cell สัมผัสกับดินระหว่างการเทคอนกรีต
- 3 Pressure Cell for Tunnels ออกแบบเพื่อนการติดตามค่า radial และ tangential stress ในอุโมงค์

3.9.1 Total pressure cell

ส่วนประกอบ



รูปที่ 3.92 Total Pressure Cell

- 1 แผ่นเหล็ก(Steel Plate) ผ่านศูนย์กลาง 9 นิ้ว 2 ชั้น ช่องว่างภายในมีของเหลวบรรจุอยู่
- 2 ท่อความดันสูง (High Pressure Tube)
- 3 Vibrating Wire Pressure Transducer
- 4 เคเบิลส่งสัญญาณ (Signal Cable)
- 5 ตัวอ่านค่า (Readout Unit)

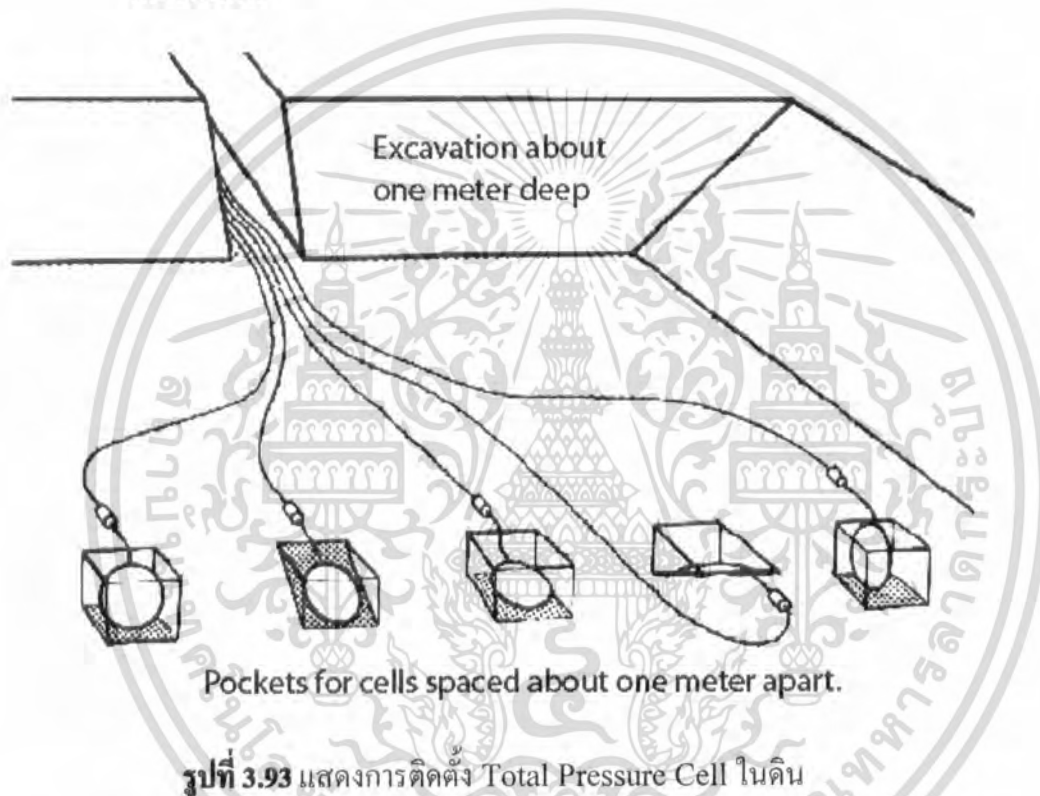
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่ 110 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงาน

ติดตั้ง Cell ในบริเวณผิวที่ต้องการและให้สัมผัสโดยตรงกับดิน แรงดันรวม (Total Pressure) ที่กระทำต่อผิวจะส่งผ่านไปยังของเหลวที่บรรจุภายใน Cell และวัดค่าด้วย Vibrating Wire Pressure Transducer และส่งข้อมูลไปแสดงผลยัง Readout Unit

การติดตั้ง

ติดตั้งในดิน



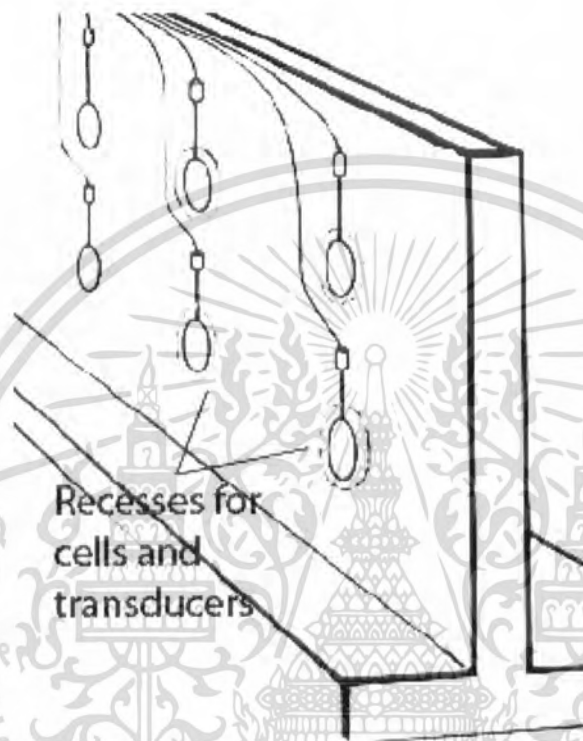
รูปที่ 3.93 แสดงการติดตั้ง Total Pressure Cell ในดิน

- 1 ขุดหลุมลึกประมาณ 1 เมตร ให้ขนาดหลุมเหมาะสมสำหรับฝัง Pressure Cell ทั้งหมด และ Pressure Cell แต่ละตัวห่างกันอย่างน้อย 1 เมตร ปรับระดับพื้นแล้วทำการบดอัดดิน แล้วทำช่องสำหรับวางสายเคเบิล
- 2 สิ่งที่ต้องระวังคือ Pocket ของแต่ละ Pressure Cell จะต้องให้ขนาดนั้นพอดีและผิวของ Pocket ด้านหนึ่งจะต้องราบเหมาะกับการวาง Pressure Cell ในระนาบที่ต้องการ
- 3 นำหินออกจาก Pocket วาง Pressure Cell ลงไปและเช็คค่าที่อ่านได้ จากนั้นถมดินกลบ Pocket ถ้าเป็นไปได้ควรใช้ดินชนิดเดิมโดยปราศจากหินและความชื้นเท่าเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 ข้อสำคัญในการถมดินกลับ วัสดุถมต้องเป็นชนิดเดิมและจะต้องมีความชื้นเท่าเดิม บดอัดดินด้วยมือทุกๆ 100-200 มิลลิเมตร เมื่อถมกลับถึง 1 เมตรแล้วใช้ลูกลิ้งสั่น (heavy vibrating roller) บดอัดทับ

ติดตั้งในโครงสร้างสำเร็จรูป (Precast Structures)



รูปที่ 3.94 แสดงการติดตั้ง Total Pressure Cell ในโครงสร้างสำเร็จรูป

- 1 เตรียมช่องที่โครงสร้างเพื่อติดตั้ง cell และ transducer
- 2 ติด cell กับโครงสร้างโดยใช้ mortar cement เป็นตัวยึดระหว่าง cell และโครงสร้าง เพื่อ cell จะไม่หลุดออกขณะถมดินกลับ

3.9.2 Jackout pressure cell

ส่วนประกอบ



รูปที่ 3.95 Jackout Pressure Cell

- 1 แผ่นเหล็ก(Steel Plate) ผ่านศูนย์กลาง 9 นิ้ว ช่องว่างภายในมีของเหลวบรรจุอยู่
- 2 Hydraulic Jack ใช้ยึดแน่นระหว่างเทคอนกรีต
- 3 Vibrating Wire Pressure Transducer
- 4 เคเบิลส่งสัญญาณ (Signal Cable)
- 5 ตัวอ่านค่า (Readout Unit)

การทำงาน

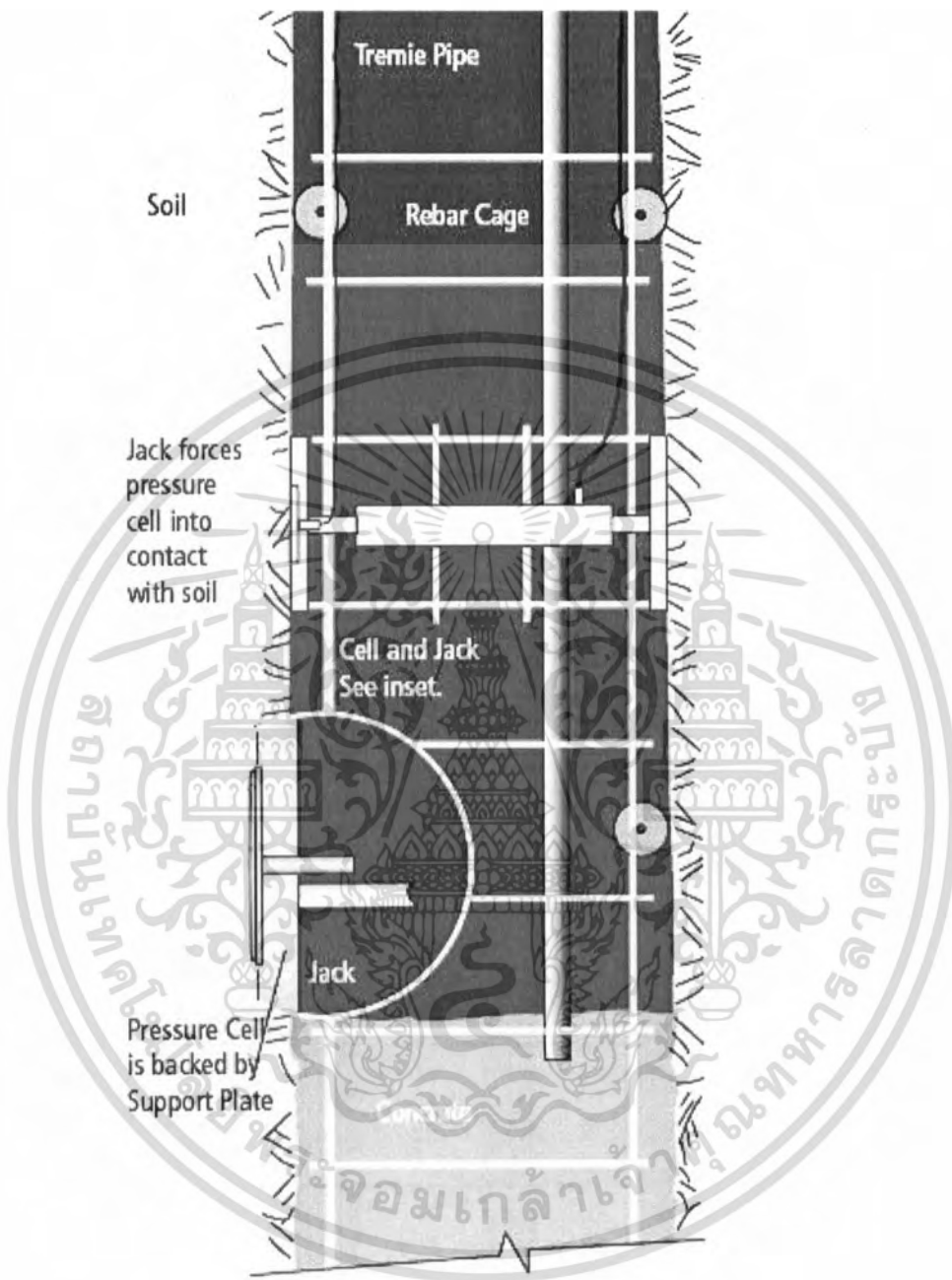
ลักษณะเหมือน Total Pressure Cell แต่จะติดตั้งอยู่ภายในโครงสร้างที่หล่อในที่ และมี Hydraulic jack ยึดแน่นให้ cell ติดกับดินระหว่างเทคอนกรีต

การติดตั้ง

- 1 Jackout Pressure cell ติดตั้งที่ reinforcing cage ดังแสดงในรูป เคเบิลส่งสัญญาณจะถูกปกป้องไว้ และ reinforcing cage จะถูกกดต่ำลงเข้าไปยังช่องน้ำโคลน (slurry trench)
- 2 เมื่อ reinforcing cage ลงมายังตำแหน่งที่ต้องการแล้ว jack จะเริ่มทำงาน โดยออกแรงดันให้ cell สัมผัสกับดินและแผ่นรองรับ (support plate) เพื่อป้องกันการบิดจะต้องให้แรงทั้ง 2 ด้านเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

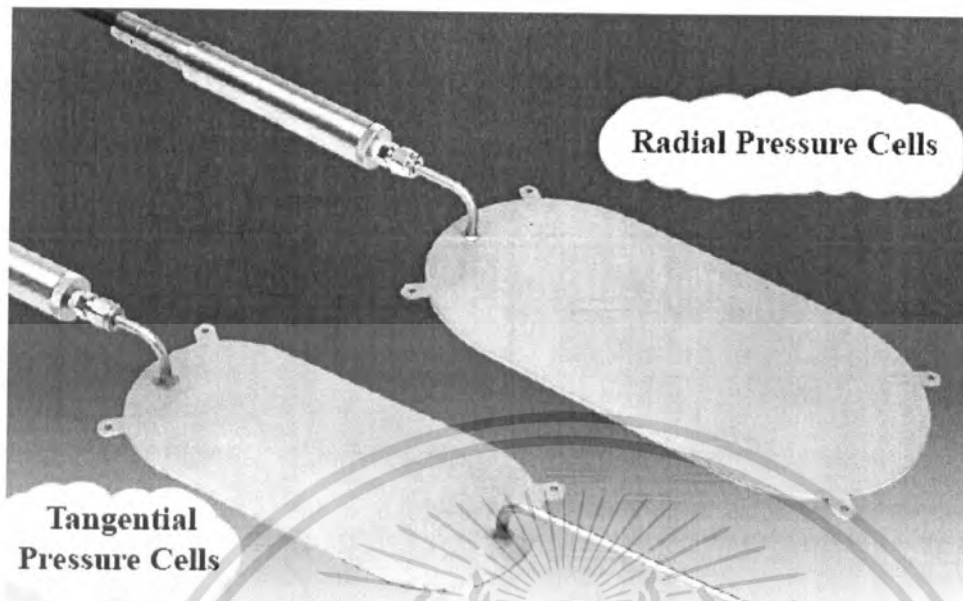
3 จากนั้นส่งคอนกรีตผ่านท่อส่งคอนกรีต (tremie pipe) จนกระทั่งคอนกรีตแทนที่น้ำโคลนทั้งหมด



รูป 3.96 แสดงการติดตั้ง Jackout Pressure cell

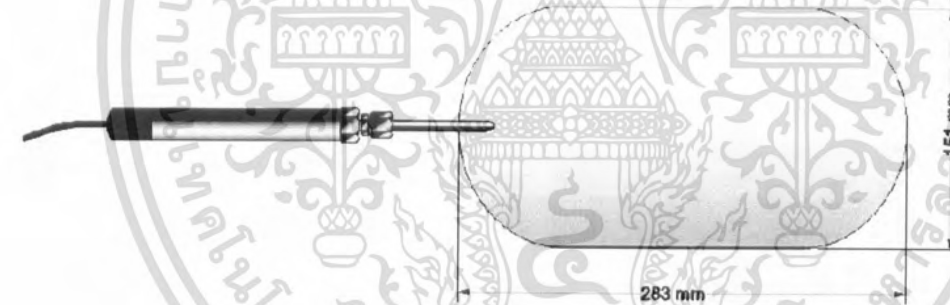
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่ 114 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9.3 Pressure cell for tunnels

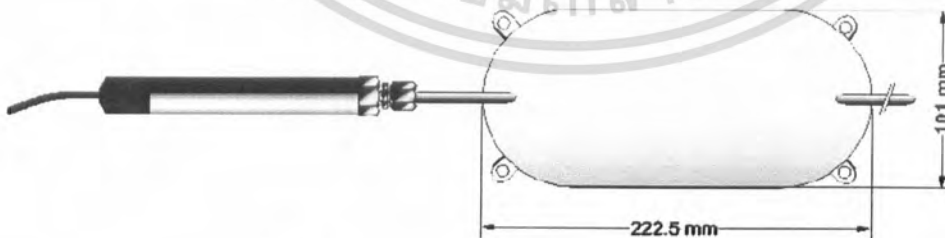


รูปที่ 3.97 Radial และ Tangential Pressure Cells

ส่วนประกอบ



รูปที่ 3.98 Radial Pressure Cells



รูปที่ 3.99 Tangential Pressure Cells

1 TCP body ทำจาก stainless steel โดยภายในบรรจุของเหลวอยู่ ทำหน้าที่วัดแรงดัน

2 Vibrating Wire Pressure Transducer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 Pinch Tube มีเฉพาะ Tangential Pressure Cells

4 Mounting eyes คือ รูที่ส่วนมุมทั้ง 4 ของ Tangential Pressure Cells

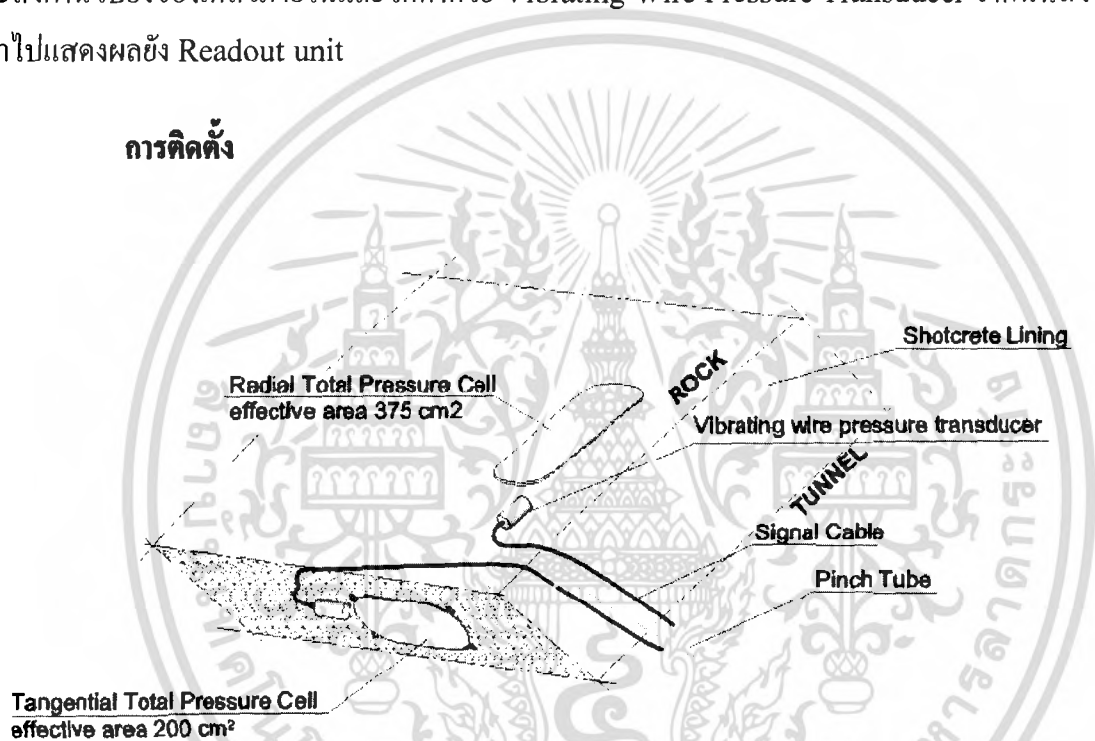
5 เคเบิลส่งสัญญาณ (Signal Cable)

6 ตัวอ่านค่า (Readout Unit)

การทำงาน

เมื่อติดตั้ง cell ในตำแหน่งที่ต้องการวัดแรงดันแล้ว เมื่อมีแรงดันกระทำต่อ cell จะส่งผ่านไปยังของเหลวภายในและวัดค่าด้วย Vibrating Wire Pressure Transducer จากนั้นส่งค่าไปแสดงผลยัง Readout unit

การติดตั้ง



รูปที่ 3.100 แสดงการติดตั้ง Radial และ Tangential Pressure Cells

Radial Pressure Cells

Radial Pressure Cells ติดตั้งโดยหันด้าน sensitive ไปยังหินดังรูปที่ 3.100 จะทำการวัดค่าแรงดันที่หินหรือหินกระทำต่ออุโมงค์ ถ้าผิวของหินขรุขระสามารถใช้ mortar cement ทำให้ผิวเรียบพอที่จะสามารถติด cell ได้ cell จะสัมผัสกับหินแต่จะไม่ถูกฝังอยู่ในคอนกรีต ทำให้อุณหภูมิไม่มีผลมากเหมือน Tangential Pressure Cells จึงไม่จำเป็นต้องมี Pinch Tube

Tangential Pressure Cells

Tangential Pressure Cells ติดตั้งโดยให้ด้าน sensitive ตั้งฉากกับแนวหินคังรูปที่ เพื่อวัดค่าแรงดันภายในแนวอุโมงค์ cell จะฝังอยู่ใน shotcrete โดยการติดตั้งจะใช้สวดผูก Mounting eye ติดกับเหล็กภายใน shotcrete เพื่อที่จะไม่ให้ cell เคลื่อนที่ และแน่ใจว่าปลาย Pinch Tube ยื่นออกมาจาก shotcrete สู่ภายในช่องว่างของอุโมงค์ จากนั้นจัดทิศทางของ Tube ให้เหมาะสม

ขณะที่ shotcrete เริ่มการ curing จะเกิดความร้อนขึ้น cell จะขยายออก และเมื่อเย็นลง cell จะหดตัวลง ทำให้เกิดช่องว่างขึ้น ซึ่งจำเป็นจะต้องให้ cell ขยายออกสัมผัสดินเดิมที่เดิม โดยใช้คีม (Repressurization pliers) หนีบตั้งแต่ปลาย Pinch Tube เข้ามาตามแนวไปยัง cell และคอยระวังความดันที่ readout unit เมื่อแสดงค่ามากขึ้นแสดงว่า cell ขยายเต็มผิวสัมผัสแล้ว โดยทั่วไปจะใช้คีมหนีบ Pinch Tube ประมาณ 10-20 มิลลิเมตร

ประโยชน์

- 1 ได้ค่าละเอียดและแม่นยำ เนื่องจาก body ของ Pressure Cell แต่ละแบบบรรจุของเหลวไว้ภายใน ไม่มีอากาศ จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรถ้าอุณหภูมิไม่เปลี่ยน
- 2 สามารถอ่านค่าได้ทั้งแบบธรรมดาและอัตโนมัติ

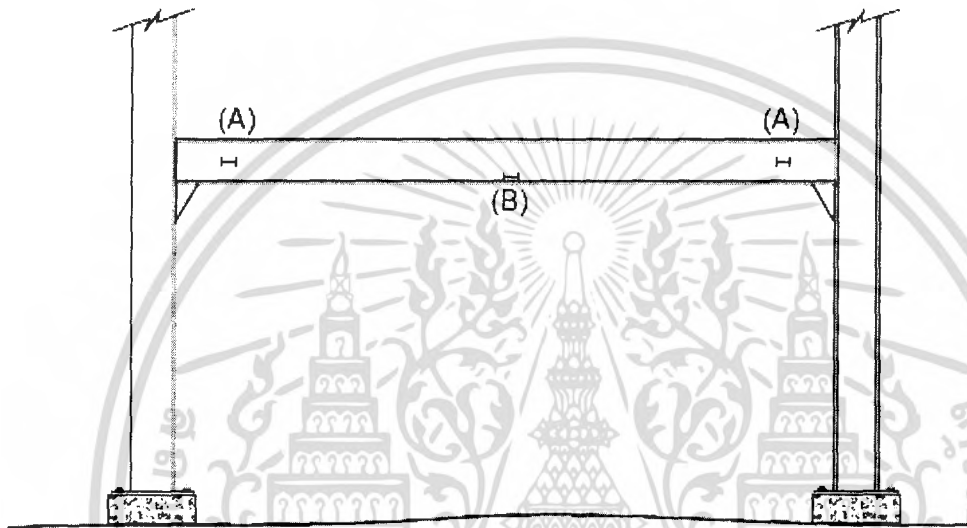
ข้อจำกัด

- 1 เนื่องจากภายใน body บรรจุของเหลวจึงต้องระวังในเรื่องอุณหภูมิ
- 2 สามารถวัดแรงได้เฉพาะในแนวที่ตั้งฉากกับ body เท่านั้น

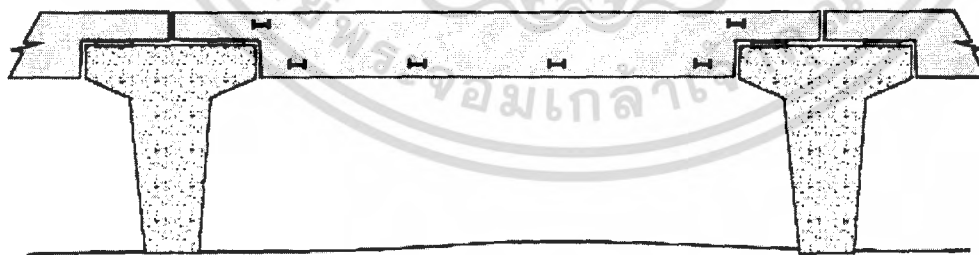
3.10 Strain gauges

ที่มาและความสำคัญ

Strain gauges ใช้หาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง ซึ่งมีวิธีใช้งานทั่วไปดังต่อไปนี้

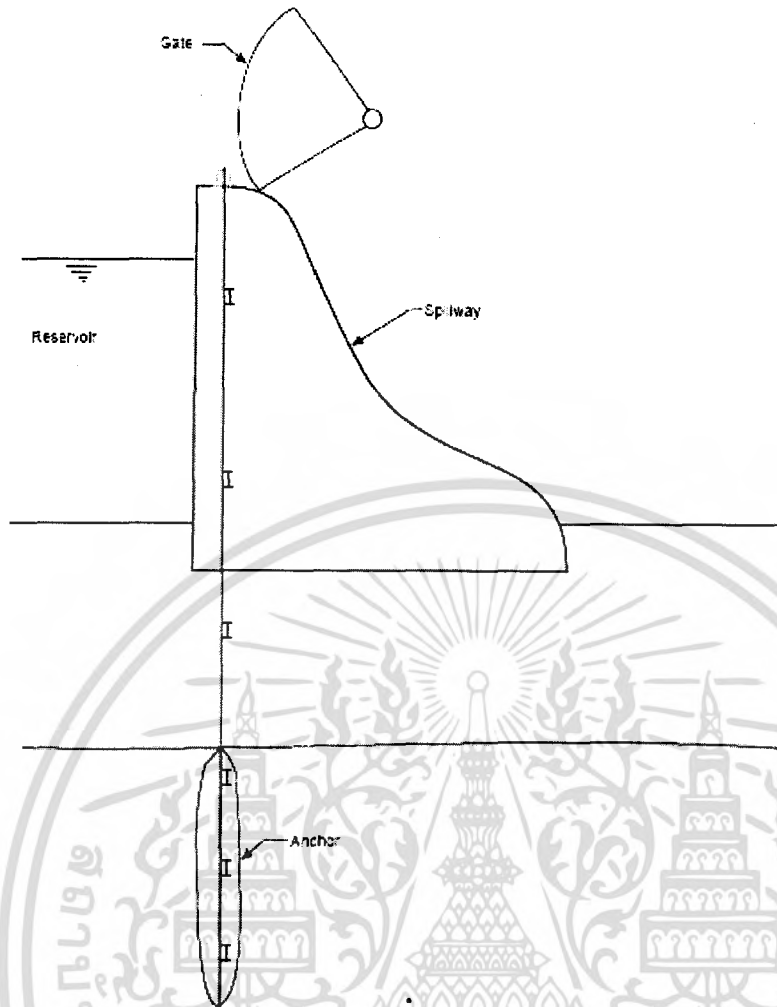


รูปที่ 3.101 ใช้คำนวณน้ำหนักใน โครงข้อหมุนและประมาณค่า bending stress ในคานได้

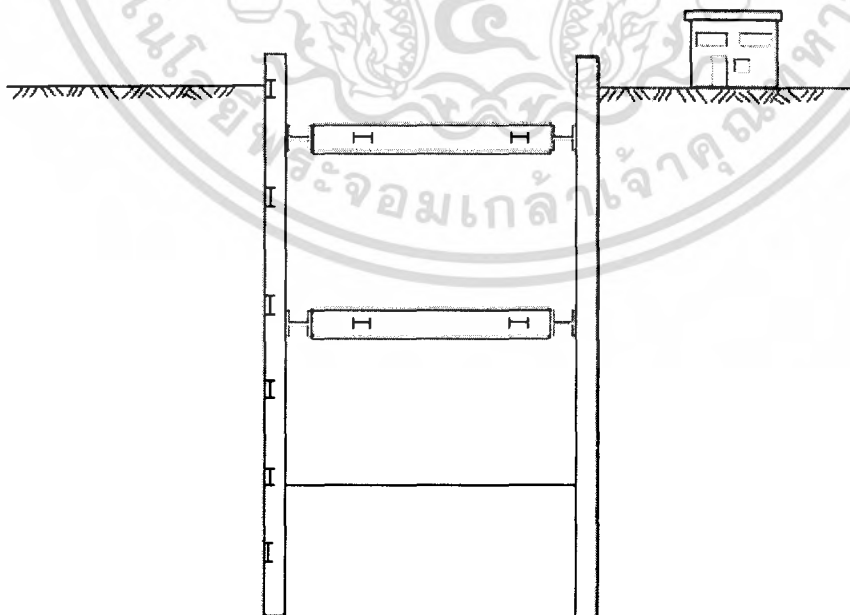


รูปที่ 3.102 สามารถติดค่า แรงกดเนื่องจาก Post-tension น้ำหนัก และ in-service bending

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

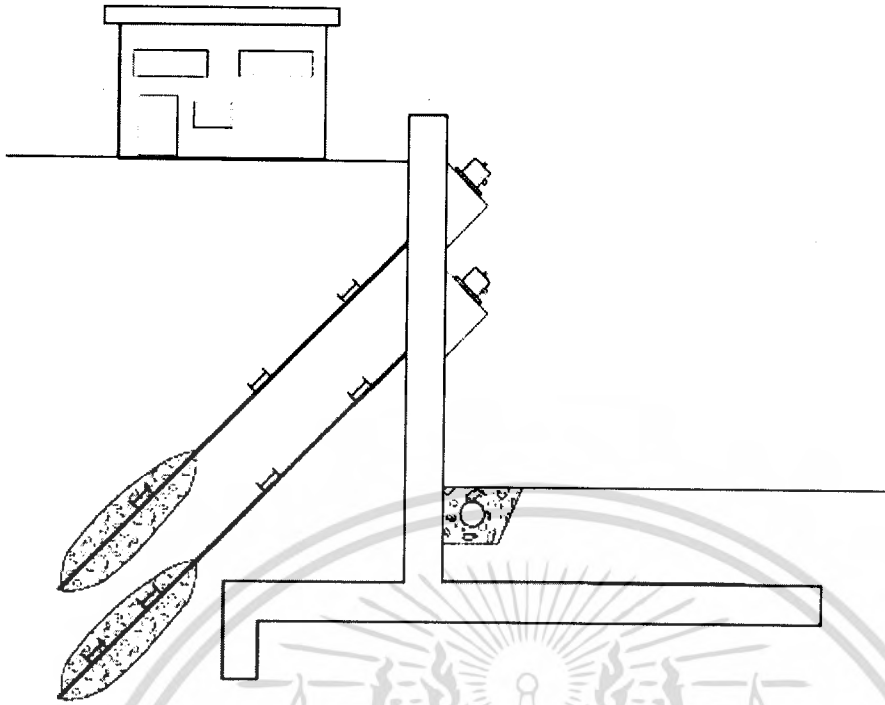


รูปที่ 3.103 ติดตามการกระจายของน้ำหนักใน retaining anchor และการเชื่อมต่อระหว่างสาร grout และดินว่ายังเชื่อมต่อกันอยู่

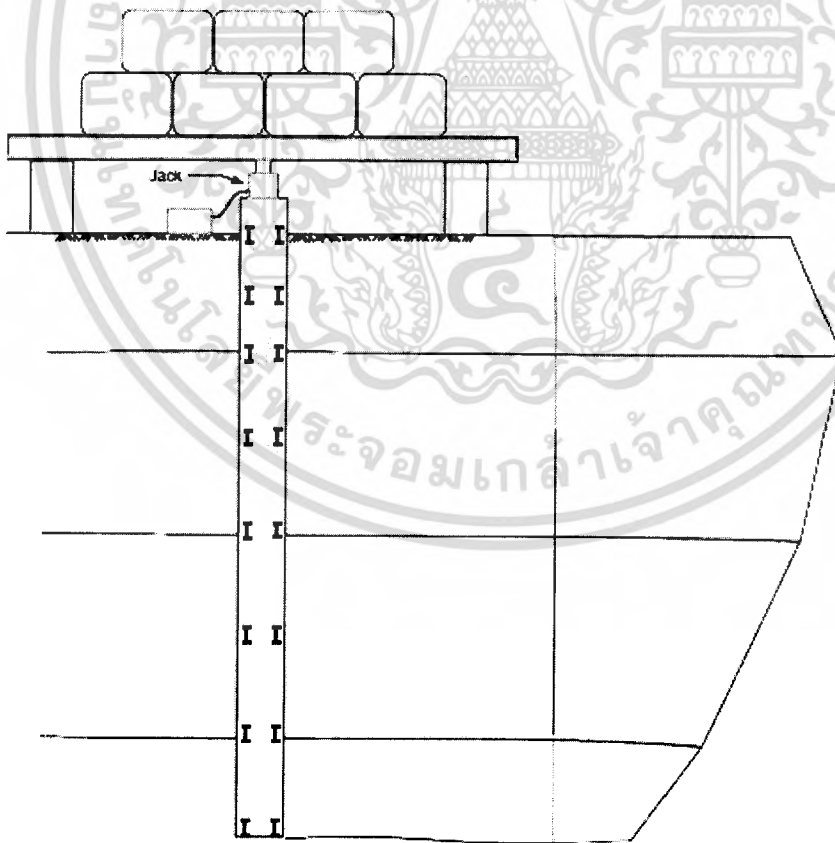


รูปที่ 3.104 ติดตามค่าแรงตัดในผนัง และคำนวณน้ำหนักในชั้นส่วนค้ำยัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ 119 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



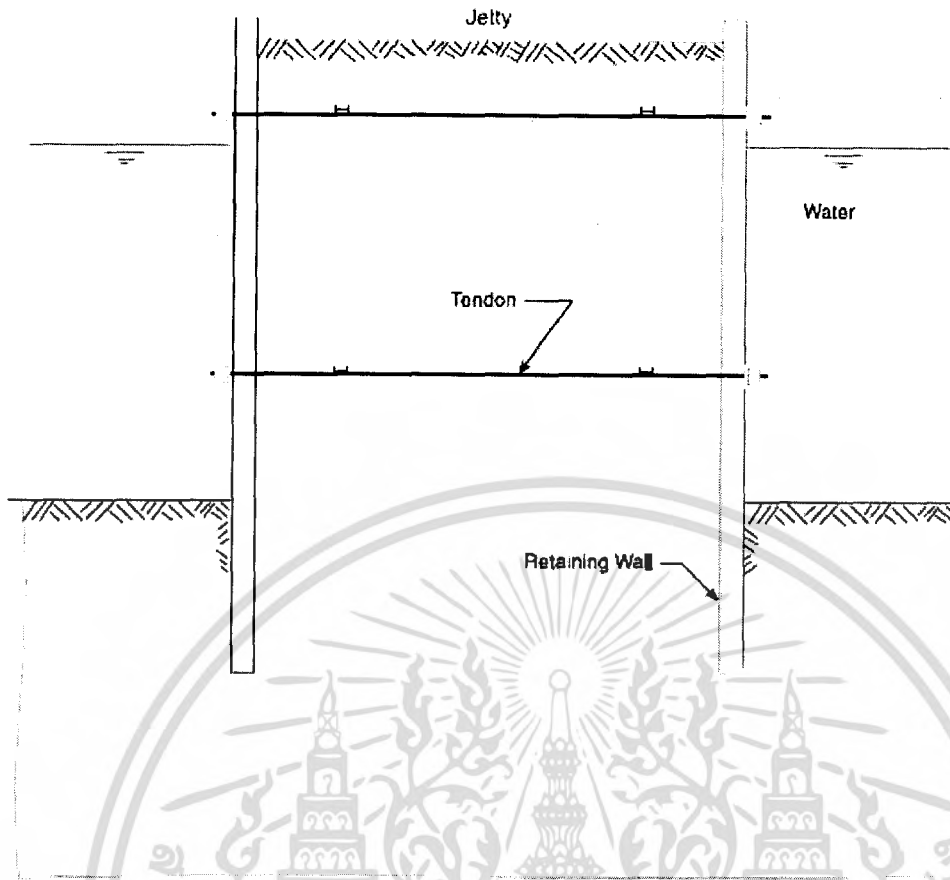
รูปที่ 3.105 ติดตามน้ำหนักที่เกิดขึ้นใน Tie-back bar เพื่อตรวจสอบการสูญเสียแรงดึง



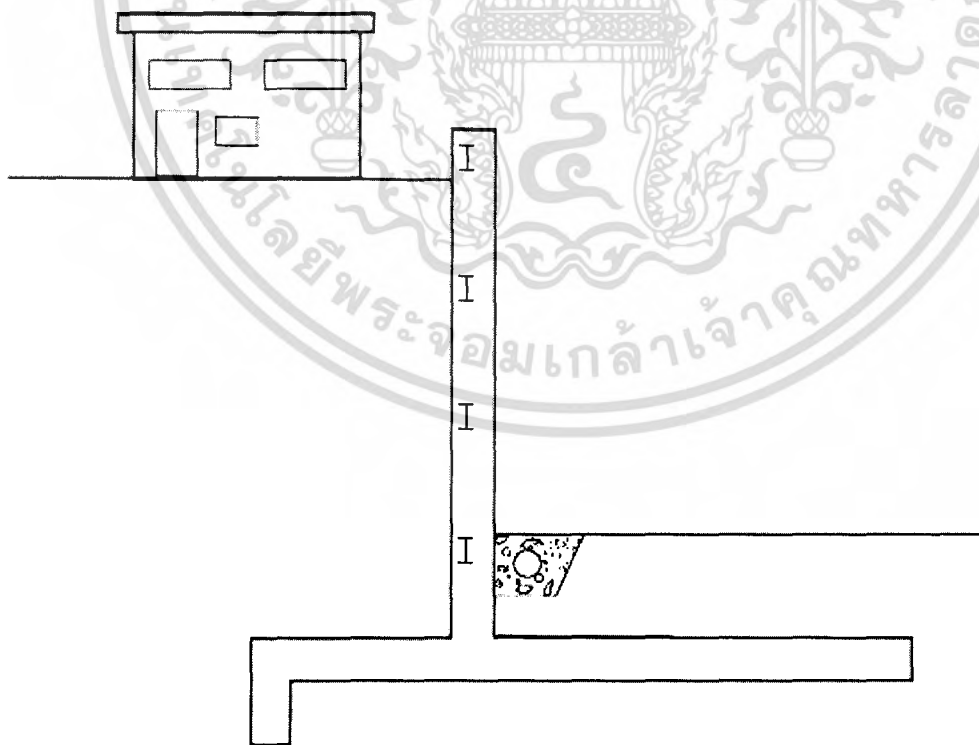
รูปที่ 3.106 ใช้หาค่าน้ำหนักกระจายในเข็ม วิเคราะห์การออกแบบ และการก่อสร้างเสาเข็มแบบ

หล่อในที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.107 ติดตามการรับน้ำหนักในเส้นเอ็น



รูปที่ 3.108 ใช้หาค่าการกระจายของน้ำหนัก และตรวจสอบแรงคัต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่ 121 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

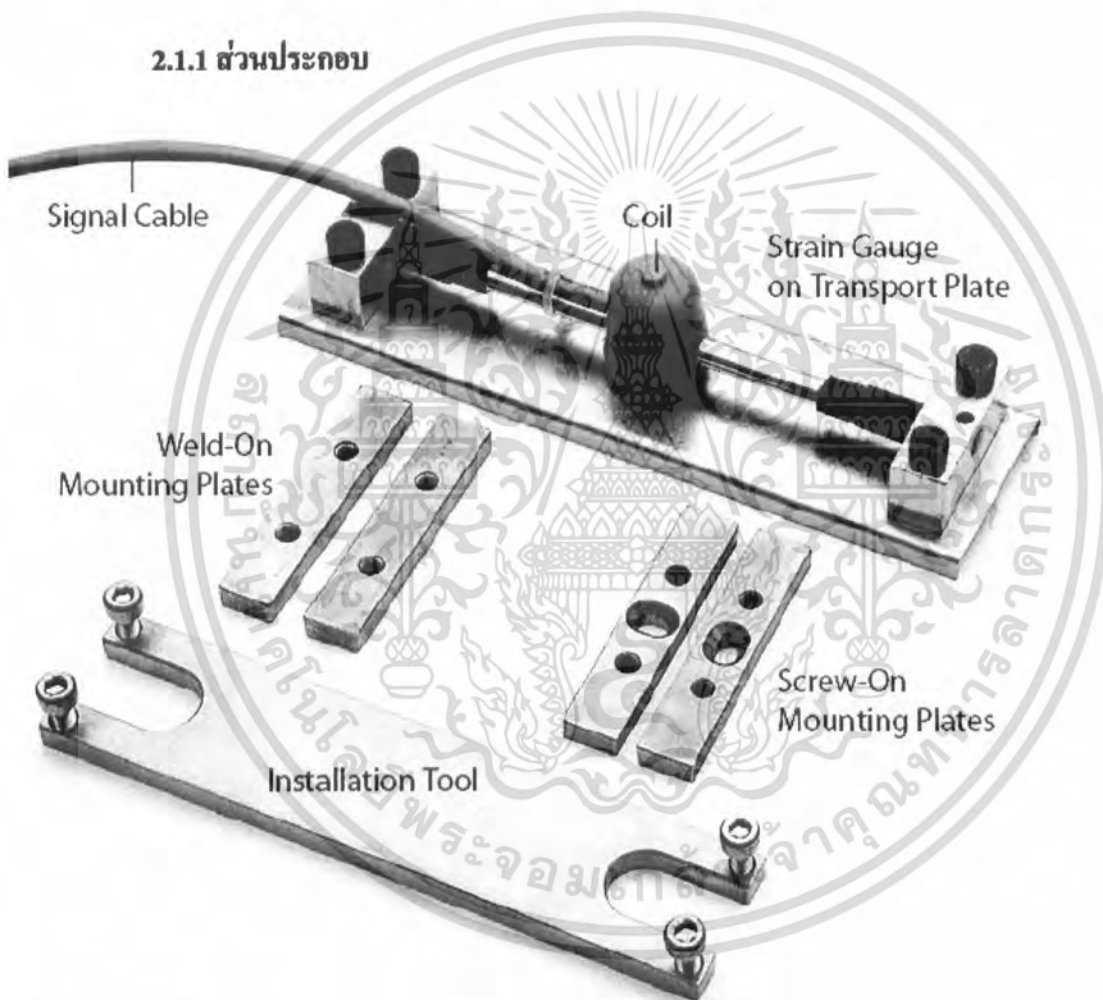
ประเภทของ STRAIN GAUGE

- 1 Surface Mount Strain Gauge สำหรับหาค่าความเครียดบริเวณผิวใช้ได้ทั้งในเหล็กและคอนกรีต
- 2 Embedment Strain Gauge สำหรับหาค่าความเครียดในเหล็กเสริมคอนกรีต

3.10.1 Surface mount strain gauge

ใช้ติดตั้งบนชิ้นส่วนของโครงสร้างเหล็ก หรือคอนกรีต

2.1.1 ส่วนประกอบ



รูปที่ 3.109 ส่วนประกอบของ Surface Mount Strain Gauge

- 1 Body ปลายจะยึดติดกับ Mounting Plate และบรรจุลวด(Wire) ไว้ภายใน
- 2 ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro-Magnetetic Coil)
- 3 เส้นลวด (Wire) ยึดระหว่างปลาย Body ทั้ง 2 ด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4 Mounting plate จะยึด Strain Gauge ติดชิ้นส่วนของโครงสร้างที่ต้องการติดตั้งแบบ Weld-on จะเชื่อมติดกับโครงสร้างเหล็ก และแบบ Screw-on จะใช้สลักเกลียวฝึ่งยึดกับคอนกรีต
- 5 เคเบิลส่งสัญญาณ (Signal Cable)

การทำงาน

หลักการทำงานของเส้นลวด(Wire) เมื่อได้รับแรงดึง จะเกิดการสั่นขึ้น ความถี่ของการสั่นจะเป็นสัดส่วนกับแรงดึง

เมื่อ Mounting Plate เคลื่อนที่เนื่องจากเกิดแรงดึงจะความเครียด ความเครียดจะถูกถ่ายทอดผ่าน Body ไปยังลวด (Wire) ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro-Magnetetic Coil) จะเกิดการสั่นสะเทือนสัมพันธ์กับแรงดึง จะส่งสัญญาณความถี่ไปยังตัวอ่านค่า(Readout device) ค่าที่อ่านได้จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าตั้งต้น แปรผลสัญญาณความถี่และปรับแก้ค่าปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง และนำค่าที่ได้มาแสดงอีกครั้ง



รูปที่ 3.110 การติดตั้ง Mounting plate กับ โครงสร้างเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1 กำหนดตำแหน่งที่ต้องการติดตั้ง
- 2 ขันสกรูยึด Mounting plate กับ Installation Tool
- 3 นำ Mounting plate ไปติดตั้งยังจุดที่กำหนดไว้ อย่าให้เอียงและระวางความสูงต่ำปรับระดับให้เหมาะสม
- 4 กด Installation Tool และทำการเชื่อมมุมของ Mounting plate ติดกับโครงสร้าง โดยให้เชื่อมที่จุด a , b ,c , d ดังแสดงในรูปที่ 3.110
- 5 ถอด Installation Tool ออกจาก Mounting plate และนำสกรูไปใช้ยังจุดต่อไป
- 6 ตรวจสอบรอยเชื่อมและทำความสะอาด

การติดตั้ง Strain Gauge

- 1 ถอด Strain Gauge ออกจาก Transport plate ขันสกรูกลับไปและอย่าให้ End block หมุน
- 2 วาง Strain Gauge บน Mounting plate ใส่สกรูและขันสกรูที่ End block ชั้นแรกและหมุน Body ไปหน้าหลังเล็กน้อยเพื่อให้หมุนได้ราบรื่น
- 3 เชื่อมต่อ Readout กับ Strain Gauge
- 4 ดึงหรือดัน End block ชั้นที่ 2 จนกระทั่ง Readout แสดงค่าอ้างอิง
- 5 ขันสกรู End block ชั้นที่ 2 ให้แน่น ปรับละเอียดค่าอ้างอิงให้แปรผันตามความแน่นของสกรู จากนั้นตรวจสอบ Gauge barrel ไม่ให้เกิดการหมุน
- 6 กำหนดรหัส Strain Gauge และบันทึกค่าอ้างอิงที่อ่านได้
- 7 พ่นสเปรย์ที่บริเวณ Gauge และ Mounting plate เพื่อป้องกันการสึกกร่อนบริเวณรอยเชื่อม
- 8 เดินสายเคเบิลไปยัง Readout Station

การติดตั้งบนโครงคอนกรีต

การติดตั้ง Mounting plate



Mark centers
for wall plugs

รูปที่ 3.111 การติดตั้ง Mounting plate กับ โครงสร้างคอนกรีต

- 1 กำหนดตำแหน่งที่ต้องการติดตั้ง
- 2 ชันสกรูยึด Mounting plate กับ Installation Tool
- 3 นำ Mounting plate ไปวางยังจุดที่กำหนดไว้ และทำเครื่องหมายตำแหน่งที่จะใส่สลักเกลียว จากนั้นนำ Installation Tool ไปวางไว้ด้านข้าง
- 4 เจาะรูแล้วใส่ทุก(Plugs)ลงไป จากนั้นเช็คความถูกต้องของตำแหน่งรูเจาะกับ Installation Tool
- 5 ทำความสะอาดบริเวณรูเจาะ และติดตั้ง Mounting plate ด้วยสลักเกลียว
- 6 ตรวจสอบความแข็งแรงตามคำแนะนำของผู้ผลิต

การติดตั้ง Strain Gauge

- 1 ถอด Strain Gauge ออกจาก Transport plate ชันสกรูกลับไปและอย่าให้ End block หมุน
- 2 วาง Strain Gauge บน Mounting plate ใส่สกรูและขันสกรูที่ End block ขึ้นแรกและหมุน Body ไปหน้าหลังเล็กน้อยเพื่อให้หมุนได้ราบรื่น
- 3 เชื่อมต่อ Readout กับ Strain Gauge
- 4 ดึงหรือดัน End block ขึ้นที่ 2 จนกระทั่ง Readout แสดงค่าอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5 ชั้นสกรู End block ชั้นที่ 2 ให้แน่น ปรับละเอียดค่าอ้างอิงให้แปรผันตามความแน่นของสกรู จากนั้นตรวจสอบ Gauge barrel ไม่ให้เกิดการหมุน
- 6 กำหนดรหัส Strain Gauge และบันทึกค่าอ้างอิงที่อ่านได้
- 7 พันสเปรย์ที่บริเวณ Gauge และ Mounting plate เพื่อป้องกันการสึกกร่อนบริเวณรอยเชื่อม
- 8 เดินสายเคเบิลไปยัง Readout Station

ประโยชน์

- 1 ลวดรับแรงดึงสามารถปรับช่วงของค่าสูงสุดได้
- 2 ไม่จำเป็นต้องเตรียมพื้นที่ผิวมาก
- 3 สามารถถอดและติดตั้งในตำแหน่งใหม่ได้ง่าย
- 4 ทนทานมาก
- 5 การส่งสัญญาณสามารถไว้วางใจได้
- 6 ติดตั้ง Sensor วัตถุอันตรายไว้ภายใน

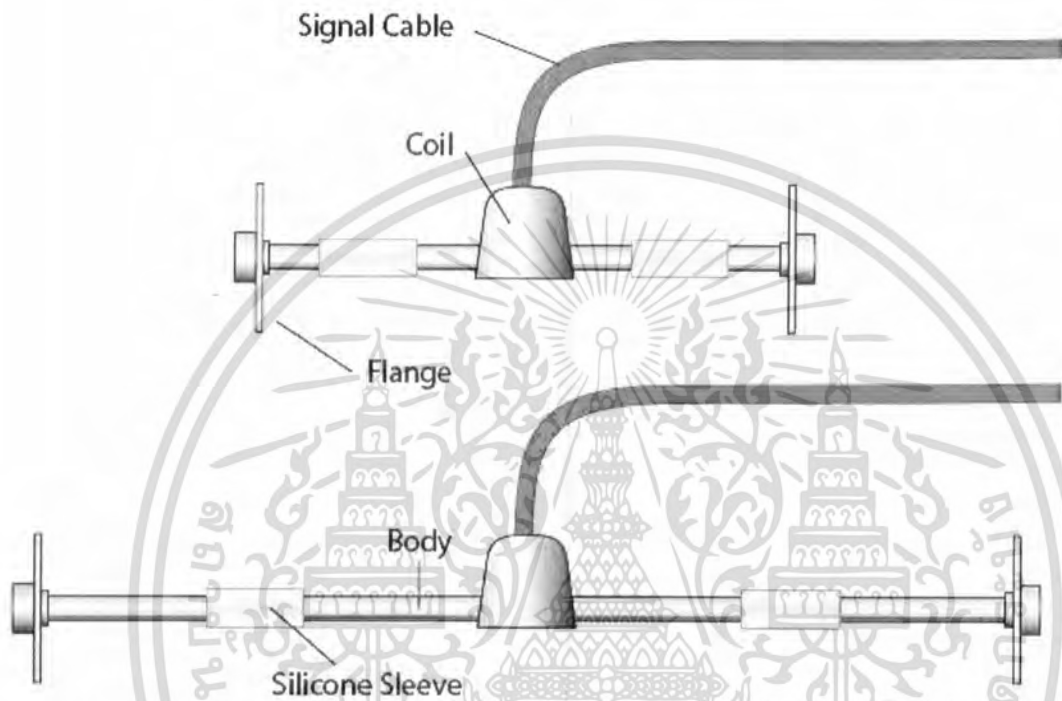
ข้อจำกัด

- 1 ผู้ปฏิบัติงานต้องมีความชำนาญ
- 2 ค่าใช้จ่ายสูง

3.10.2 Embedment strain gauge

สำหรับหาค่าความเครียดในเหล็กเสริมคอนกรีต

ส่วนประกอบ



รูปที่ 3.112 ส่วนประกอบของ Embedment Strain Gauge

- 1 Body ปลายจะมี Flange และบรรจุลวด (Wire) ไว้ภายใน
- 2 ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro-Magnetic Coil)
- 3 เส้นลวด (Wire) ถูกดึงอยู่ระหว่างปลาย Flange ทั้ง 2 ด้าน
- 4 เคเบิลส่งสัญญาณ (Signal Cable)

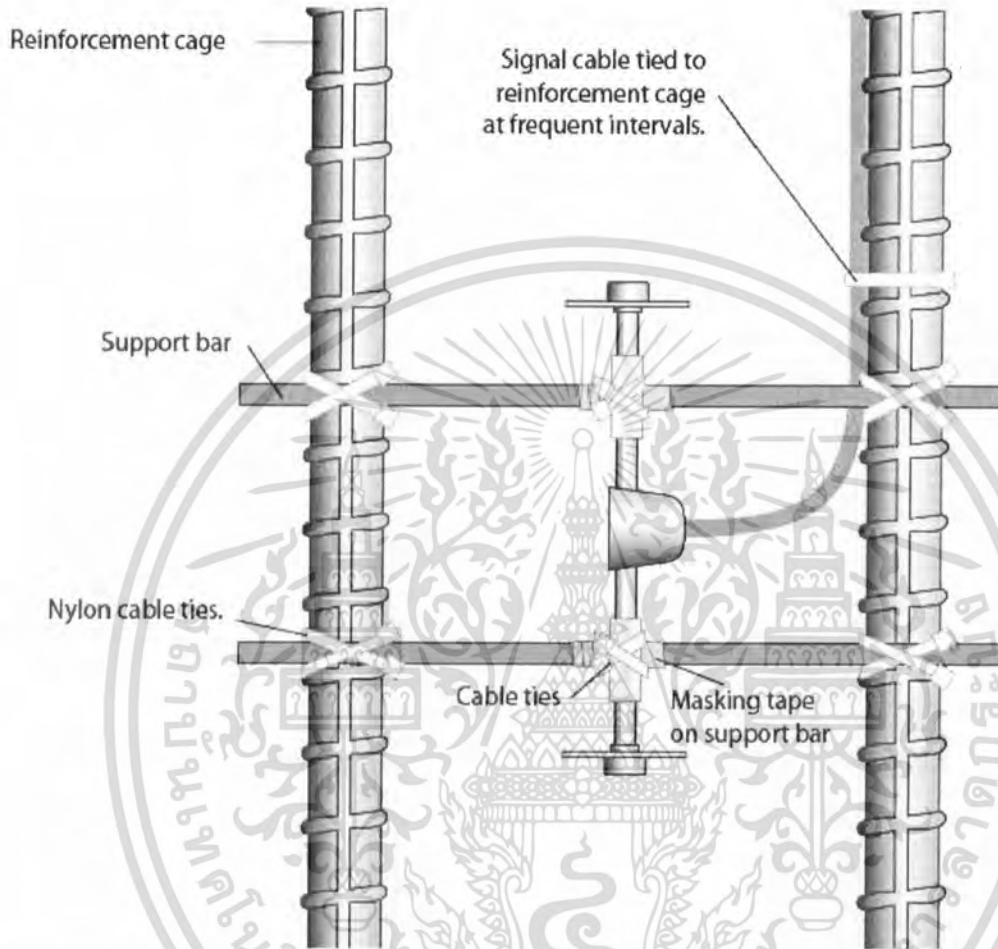
การทำงาน

หลักการทำงานของเส้นลวด (Wire) เมื่อได้รับแรงดึง จะเกิดการสั้นขึ้น ความถี่ของการสั้นจะเป็นสัดส่วนกับแรงดึง

เมื่อ Flange เคลื่อนที่เนื่องจากเกิดแรงดึงจะความเครียด ความเครียดจะถูกถ่ายทอดผ่าน Body ไปยังลวด (Wire) ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro-Magnetic Coil) จะเกิดการสั้นสะท้อนสัมพันธ์กับแรงดึง จะส่งสัญญาณความถี่ไปยังตัวอ่านค่า (Readout device) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อที่ 127 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าที่อ่านได้จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าตั้งต้น แปรผลสัญญาณความถี่และปรับแก้ค่าปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง และนำค่าที่ได้มาแสดงอีกครั้ง

การติดตั้ง



รูปที่ 3.113 การติดตั้ง Embedment Strain Gauge

- 1 ทำเครื่องหมายบนเหล็กเสริมคอนกรีตแสดงตำแหน่งที่กรวัด ซึ่งตำแหน่งจาสามารถหาได้จากแบบDrawingของวิศวกรผู้ออกแบบ
- 2 ใช้เชือกหรือลวด และ 2 Support bar ผูกติดกับเหล็กเสริมดังรูป 3.113 โดยกำหนดตำแหน่งของ coil ให้ห่างจากด้านข้าง 85 mm สำหรับ Gauge ขนาด 5.5 inch และ 150 mm สำหรับ Gauge ขนาด 250 mm
- 3 ใช้ Marking tape พันรอบ Support bar ประมาณ 5-6 รอบและกำหนดตำแหน่งที่จะพันติดกับ Body บริเวณ Silicon rubber sleeves เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับ Gauge
- 4 นำ Gauge ออกจากบรรจุภัณฑ์ และวางตั้งฉากกับ Support bar ดังรูป.. แล้วเช็กระยะไม่ให้มีสิ่งกีดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ 128 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5 ยึดติด Gauge ด้วยเชือกไนลอน แล้วจากนั้นพันเทปติดกับ sleeves ให้แน่น
- 6 เชื่อมต่อ Gauge กับ Readout และสังเกตค่าที่อ่านได้
- 7 ทำเครื่องหมายยังตำแหน่งที่อ่าน Gauge อ่านค่า และตรวจสอบว่าค่าตัวเลขที่ได้นั้นเหมาะสมแล้วบันทึกเห็นค่าตำแหน่งจริง

ประโยชน์

- 1 สามารถติดตั้งกับโครงสร้างที่มีอยู่แล้วได้
- 2 สามารถหาค่าได้ในช่วง 5-10 inch
- 3 สามารถถอดและติดตั้งในตำแหน่งใหม่ได้ง่าย
- 4 ทนทานมาก
- 5 การส่งสัญญาณสามารถไว้วางใจได้
- 6 ติดตั้ง Sensor วัดอุณหภูมิไว้ภายใน

ข้อจำกัด

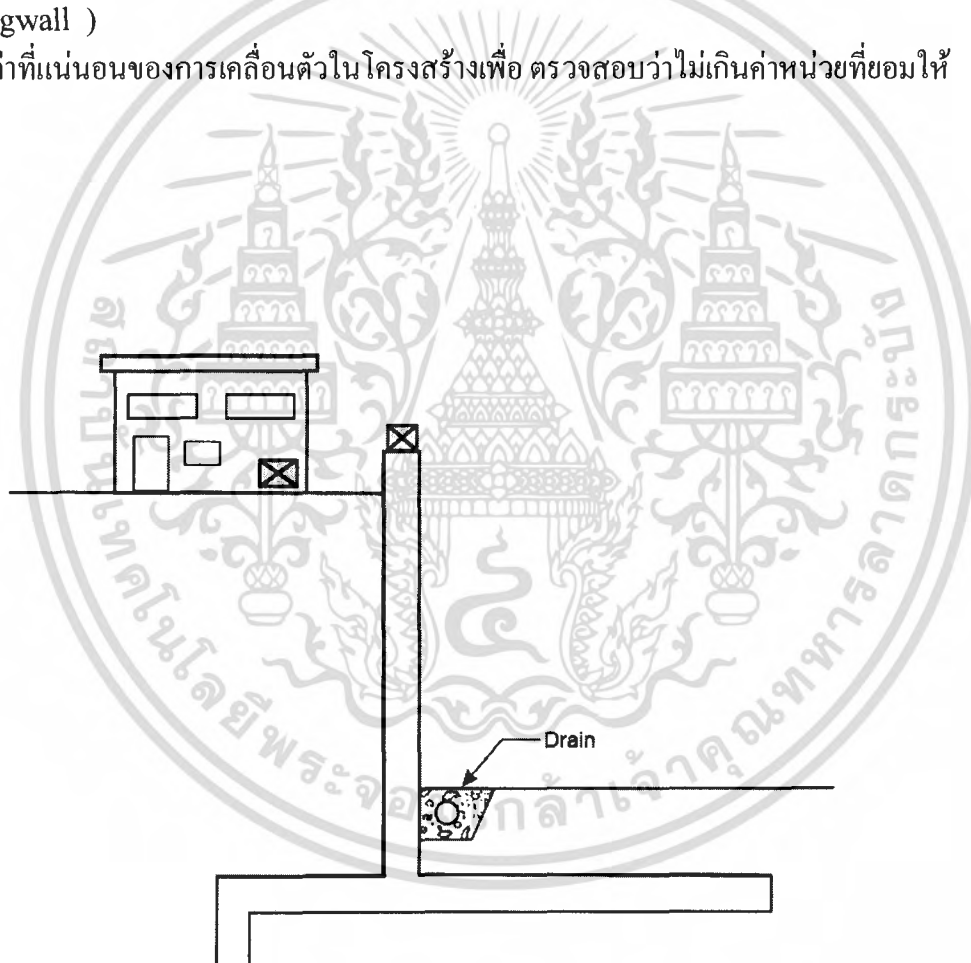
ในคอนกรีตความเครียด ไม่ได้เกิดจากความเค้น และการเปลี่ยนอุณหภูมิเท่านั้น แต่รวมถึงการเลื้อน(creep) การหดตัว(shrinkage) การบวม(swelling) และการเปลี่ยนปริมาตร(volume change) Strain Gauge จะต้องวัดค่าเหล่านี้ทั้งหมด

3.11 Beam sensors และ Tiltmeter

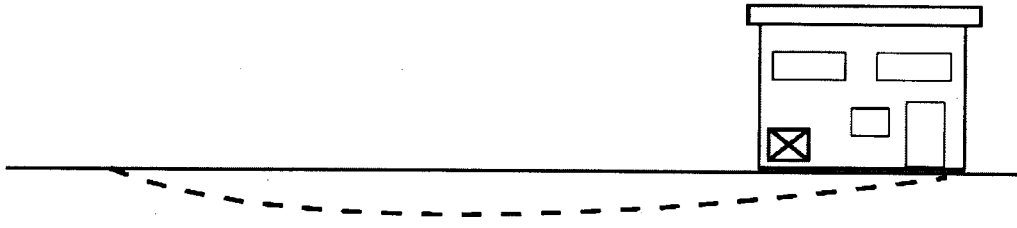
ที่มาและความสำคัญ

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการติดตามตรวจสอบการเคลื่อนตัวของสิ่งก่อสร้าง โดยจะได้เป็นองศาที่สิ่งก่อสร้างเอียงหรือเสียรูปไป

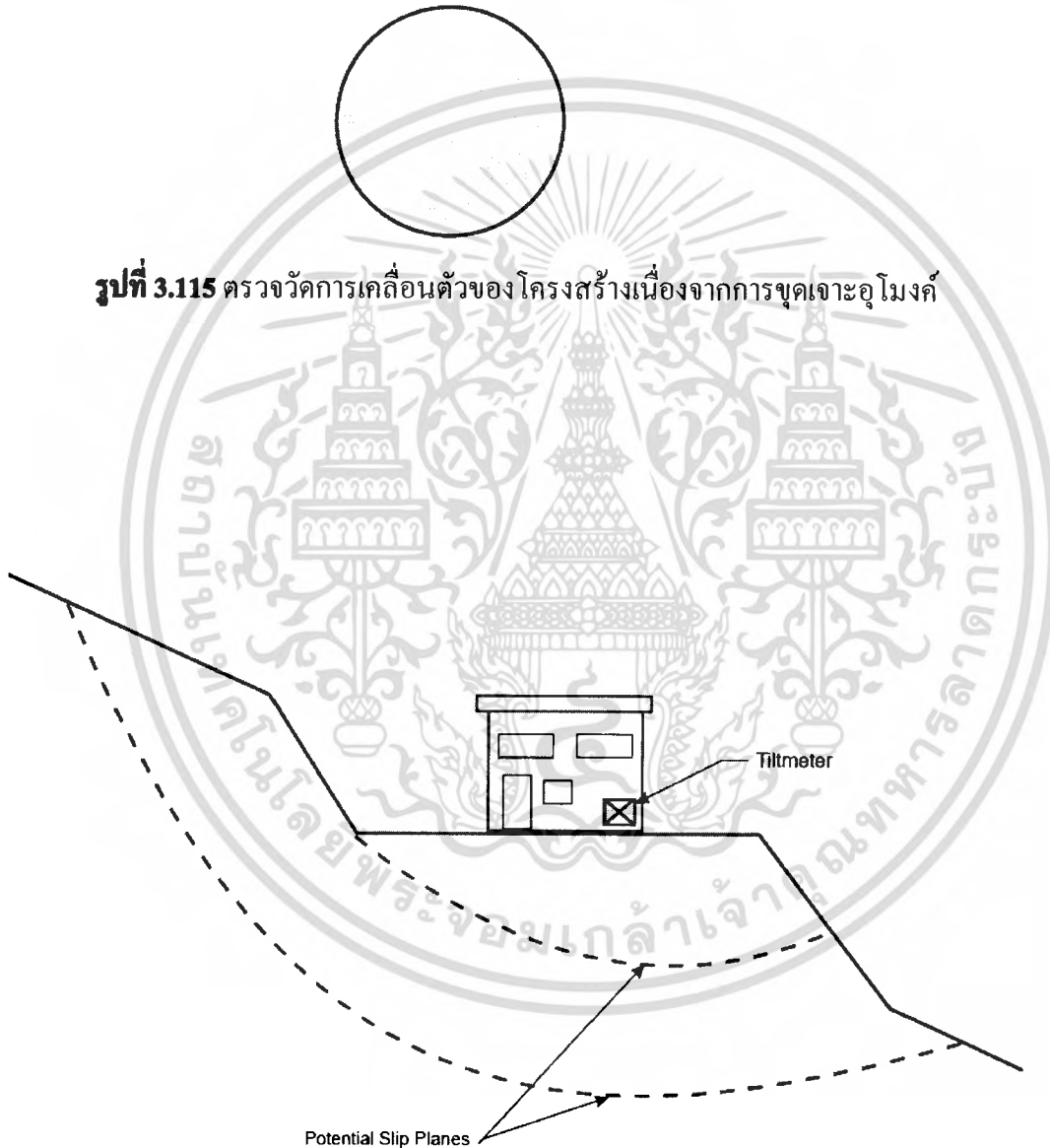
- เป็นเครื่องวัดถึงอันตรายต่อโครงสร้างซึ่งเป็นผลเนื่องจากการสร้างอุโมงค์และการขุดเจาะ
- เป็นการประเมินค่าถึง ลักษณะของโครงสร้าง (สะพาน ,คาน , เขื่อน) ภายใต้น้ำหนักที่กระทำ
- เป็นเครื่องวัดถึงเสถียรภาพของโครงสร้างในพื้นที่หรือขอบเขตที่มีการเคลื่อนตัวของดิน
- เป็นการวัดถึงการเบี่ยงเบนและการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของกำแพงกันดินด้านข้าง (retaining wall)
- ช่วยบอกค่าที่แน่นอนของการเคลื่อนตัวในโครงสร้างเพื่อ ตรวจสอบว่าไม่เกินค่าหน่วยที่ยอมให้



รูปที่ 3.114 ตรวจสอบวัดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างใกล้กำแพงกันดิน

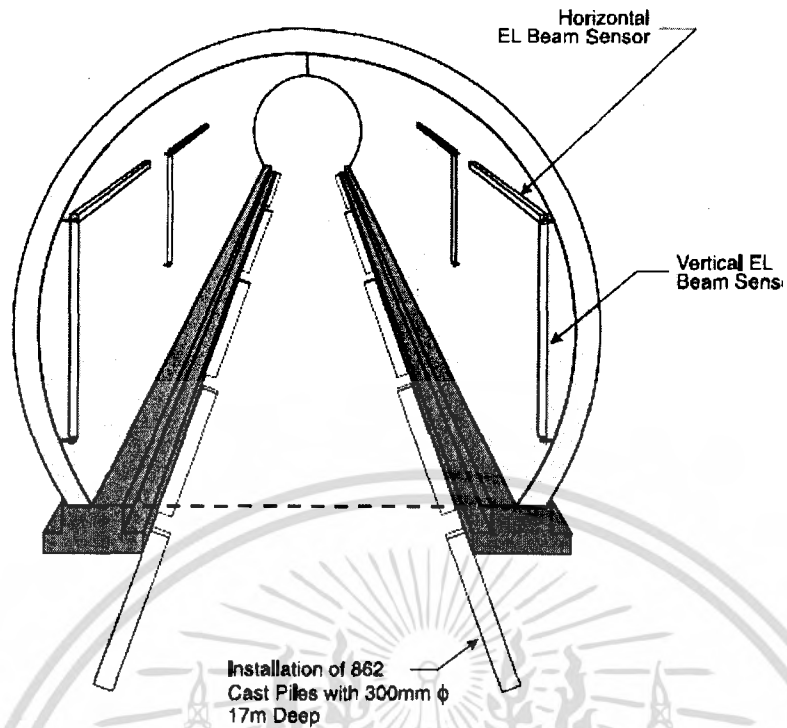


รูปที่ 3.115 ตรวจสอบวัดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์

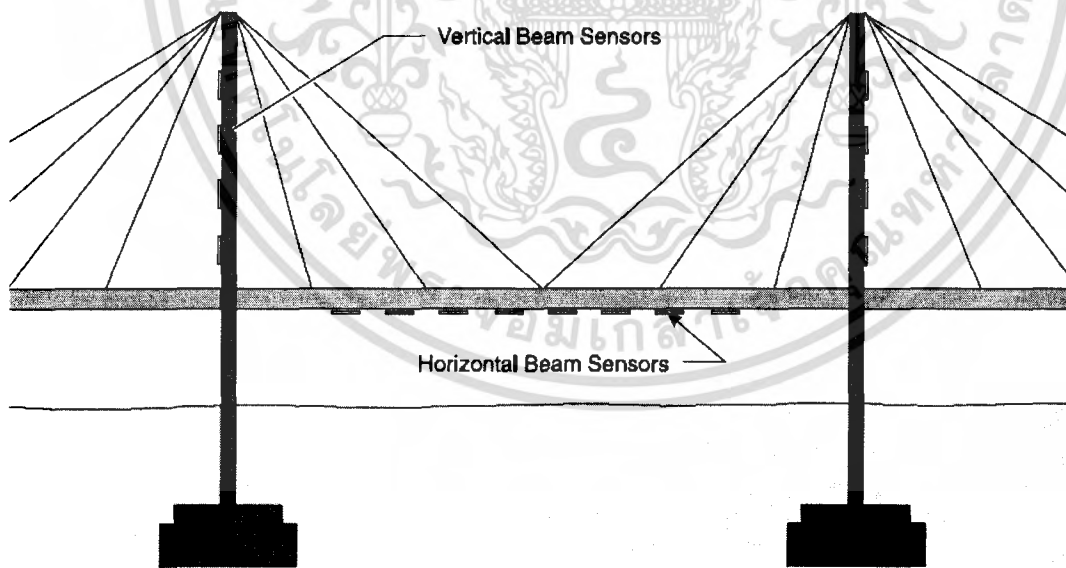


รูปที่ 3.116 วัดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างบริเวณที่อาจเกิดการพังทลายของดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเป็น 131 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.117 ตรวจสอบการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างวงปิด



รูปที่ 3.118 ตรวจสอบการเคลื่อนตัวของโครงสร้างสะพาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อที่ 132 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแตกต่างระหว่าง Beam sensors และ Tiltmeter

- ตัวของ Beam sensors จะมีความยาวอยู่ที่ 1 ถึง 3 เมตร ดังนั้นการเสียบรูปจะแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนและถูกต้องแม่นยำถึงหน่วยมิลลิเมตรของการเคลื่อนตัว
- Beam sensors ค่าได้วัดได้จะเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าทำให้ง่ายต่อการอ่านค่าและแปลผลข้อมูล ส่วนTiltmeter จะมีการทำงานในเชิง mechanic ทำให้มีความทนทานและดูแลรักษาง่ายกว่า

3.11.1 Beam sensor

Beam Sensor ทำงานโดยอาศัยการตรวจวัดค่าสัญญาณทางไฟฟ้า เมื่อ โครงสร้าง มีการเคลื่อนที่จะทำให้ตัวรับสัญญาณวัดค่าสัญญาณได้ในระดับต่างๆกัน

- ในแนวราบจะวัดค่าที่เกิดจากการทรุดตัวและยกตัว
- ในแนวดิ่งจะวัดค่าที่เกิดจากการเคลื่อนตัวด้านข้างและการรวมตัว(convergence)

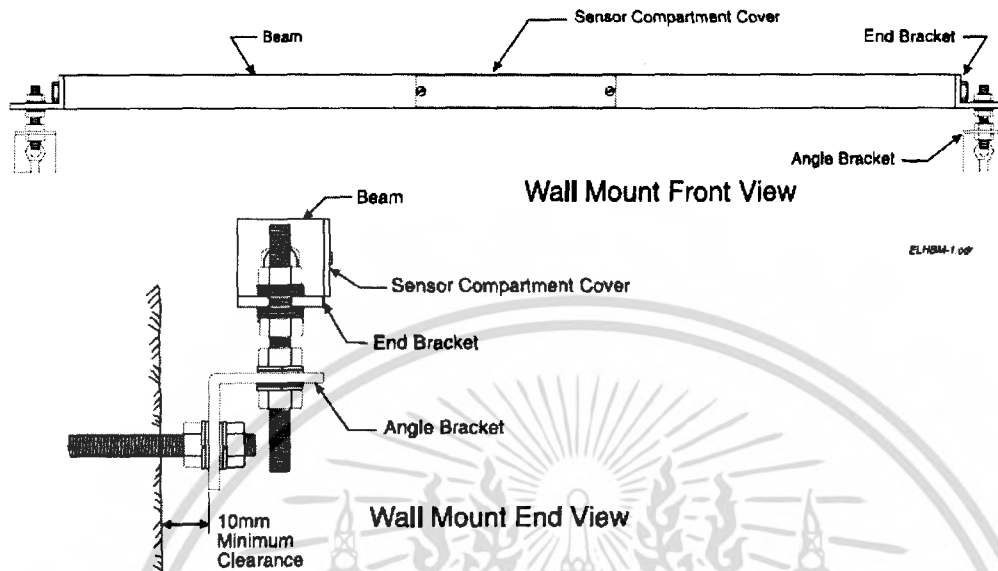
ส่วนประกอบของ Beam sensor

- ตัวส่งสัญญาณการเอียงตัวด้วย (electrolytic tilt sensor) จะติดตั้งอยู่ที่บริเวณผิวปลาย beam
- ตัวส่งสัญญาณการเอียงตัว (tilt sensor) จะเป็นคั้งตัววัดระดับที่ซึ่งส่งสัญญาณทางไฟฟ้าในรูปของค่าความต้านทานในวงจร โดยวงจรแบบ bridge จะแสดงผลออกมาในรูปของความต่างศักย์ทางไฟฟ้าเนื่องจากการเอียงตัวของเครื่องส่งสัญญาณ
- ตัวแขน (beam) จะมีความยาวอยู่ที่ 1 ถึง 3 เมตร และติดตั้งอยู่บน Anchor Bolt ที่จะฝังเข้าไปในโครงสร้าง ตัวเครื่องส่งสัญญาณการเอียงตัว (tilt sensor) จะถูกปรับค่าไว้ที่ศูนย์องศาและถูกตรึงไว้ในตำแหน่งนั้น

การติดตั้ง Beam Sensor

- หมุดที่ปักเข้าไปในชิ้นส่วนโครงสร้าง (Anchor studs) ควรจะติดตั้งให้อยู่ในแนวขนานกับหมุดอีกอันหนึ่ง เมื่อตัวแขน (beam) ถูกติดตั้งไว้บน studs โดยตรง
- ตัวค้ำยันแบบงอฉาก (Angle brackets) เป็นอุปกรณ์ชิ้นส่วนหนึ่งของชุดสมอ (Anchor kit) โดยตัวอุปกรณ์นี้จะช่วยปรับ , ขยับ ตัวหมุดที่ไม่ขนาน และตัวค้ำยันแบบงอฉาก (Angle brackets) ยังช่วยในการงอ เพื่อช่วยปักหมุดลงไป ในโครงสร้าง ดังนั้น การเอียงตัวทางข้างจึงไม่มีผลต่อการอ่านค่า

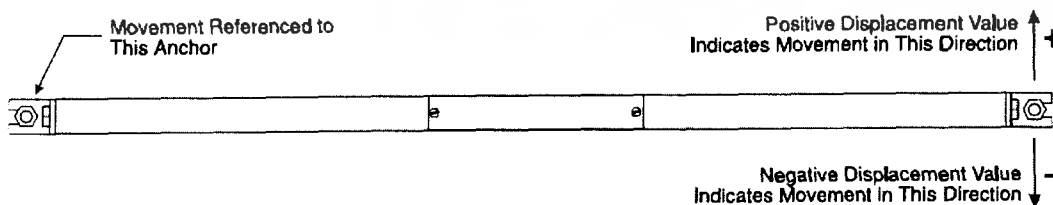
- ที่สำคัญควรจะต้องติดตั้งวงรองข้อต่อ(washers) และยางรอง (bushing) ให้ถูกต้องตามลำดับขั้นตอน โดยตัวยางรอง (bushing) จะช่วยให้เกิดการเคลื่อนตัวอย่างอิสระ ,และวงแหวนสปริงควรจะต้องติดตั้งให้มีแรงกดกระทำเล็กน้อยเพื่อให้เกิดการยึดหยุ่น



รูปที่ 3.119 แสดงการติดตั้งและอุปกรณ์ของ EL-Beam Sensor

การติดตั้ง Beam Sensor ในแนวระนาบ

- ทำการติดตั้งตัวส่งสัญญาณแบบแขน (beam sensor) เข้าไปใน ตัวเครื่อง sensor compartment
- ทำการเจาะรูเพื่อทำการฝังสมอ จากนั้นทำการฝังตัวสมอ แล้วตามด้วยการ grout ให้แน่น
- ติดตั้งสายสัญญาณและร้อยใส่ตัวท่อ
- ติดตั้งตัว angle-brackets ตามรูปที่ 3.119
- ติดตั้งตัว end-brackets เข้ากับ angle brackets ตรวจสอบ end-brackets ว่าหลวมเพียงพอก็จะต้องปรับหรือไม่
- ปรับเครื่องส่งสัญญาณโดยตั้งค่าไว้ที่ 0 องศาแล้วใช้เครื่อง Read out unit อ่านค่า

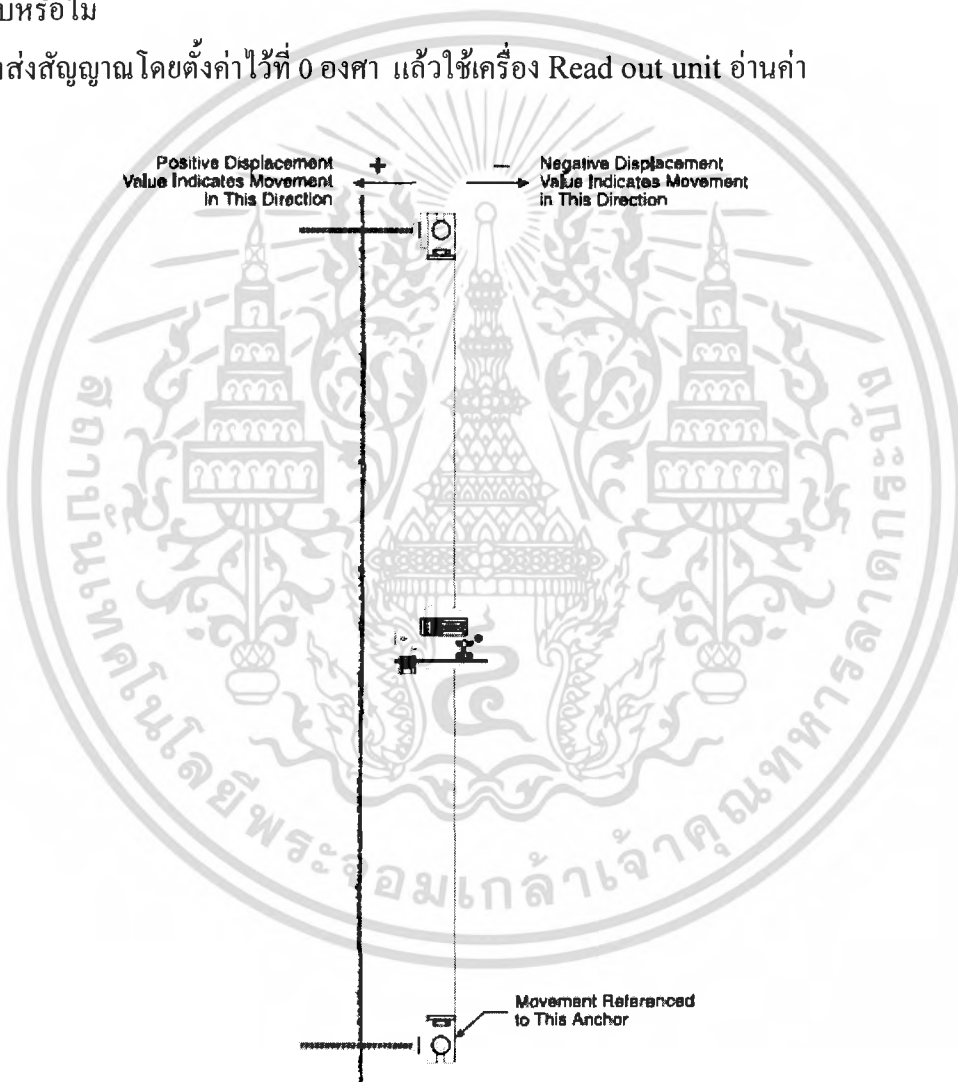


รูปที่ 3.120 แสดงทิศทาง แขนงที่วางในแนวราบ (Horizontal beam)

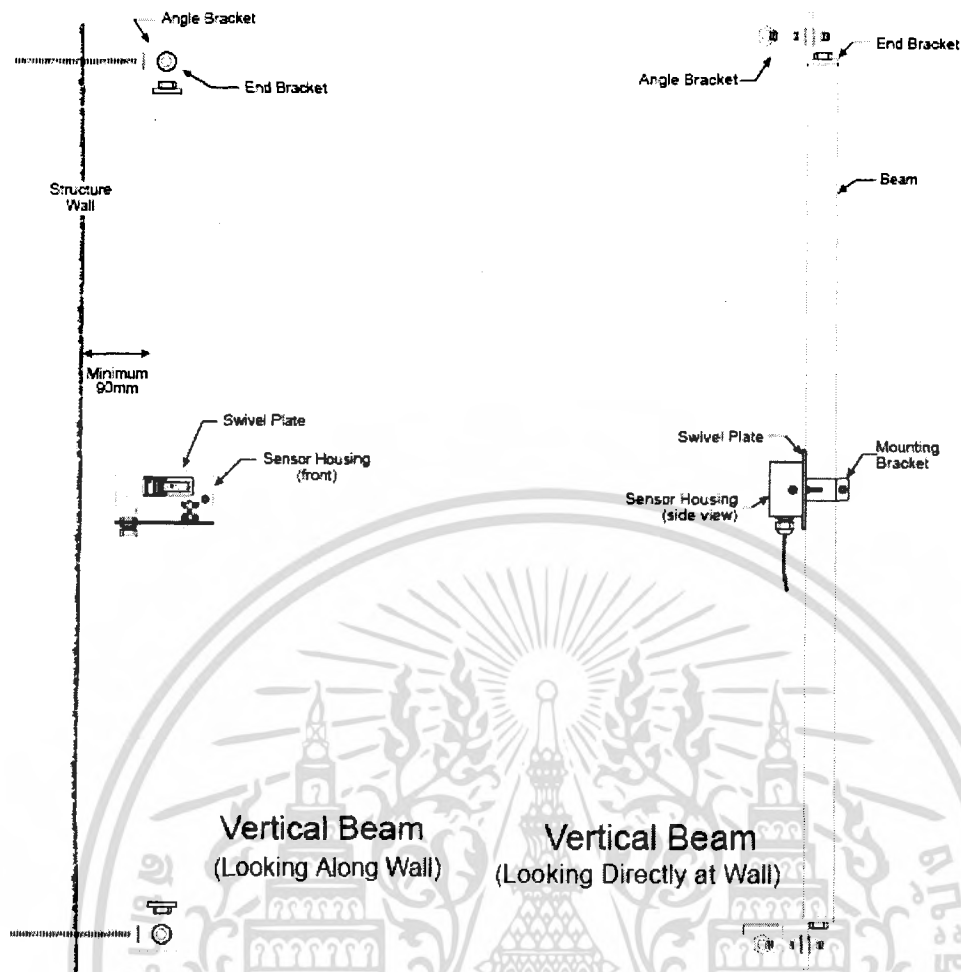
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อที่ 134 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การติดตั้ง Beam Sensor ในแนวดิ่ง

- การติดตั้งโดยการเลื่อนตัวค้ำยันและกล่องส่งสัญญาณ (housing) ที่อยู่บนแขน (beam) ดังรูป ประกอบด้านล่าง ซึ่งจะแสดงให้เห็นทิศทางที่เหมาะสมของตัวกล่องส่งสัญญาณ (housing)
- ทำการเจาะรูเพื่อทำการฝังสมอ จากนั้นทำการฝังตัวสมอ แล้วตามด้วยการ grout ให้แน่น
- ติดตั้งสายสัญญาณและรอยใส่ตัวท่อ
- ติดตั้งตัว angle-brackets ตามรูปที่แสดง
- ติดตั้งตัว end-brackets เข้ากับ angle brackets ตรวจสอบ end-brackets ว่าหลวมเพียงพอกี่ จะต้องปรับหรือไม่
- ปรับเครื่องส่งสัญญาณ โดยตั้งค่าไว้ที่ 0 องศา แล้วใช้เครื่อง Read out unit อ่านค่า



รูปที่ 3.121 แสดงทิศทาง แขนที่วางตัวในแนวดิ่ง (Vertical beam)



รูปที่ 3.122 แสดงการติดตั้ง Vertical-Beam Sensor

การแปลงข้อมูล

การเคลื่อนตัวในโครงสร้างจะทำให้เกิดการเอียงตัวของแกน (beam) การเปลี่ยนตำแหน่งระยะทางของโครงสร้างที่เคลื่อนตัวไปจะถูกคำนวณโดยสูตร

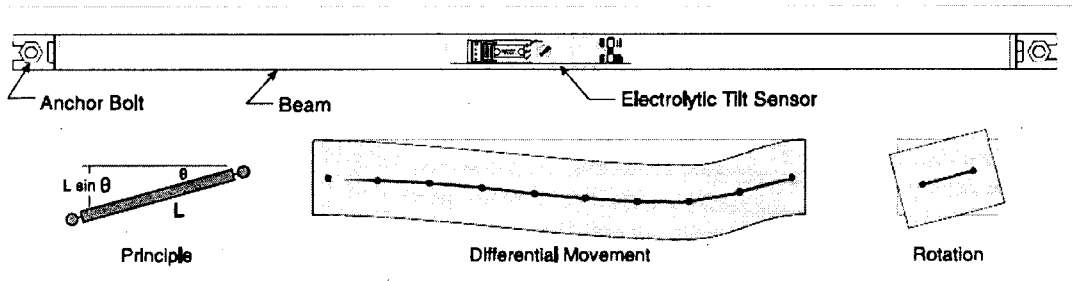
$$L (\sin\theta_1 - \sin\theta_0)$$

โดยที่

L = ค่าความยาวของเครื่องวัด

$\sin\theta_1$ = มุมที่หมุนเอียงไปของแกน (beam)

$\sin\theta_0$ = มุมที่เริ่มต้นก่อนเกิดการเอียง



รูปที่ 3.123 ประกอบการคำนวณ

ข้อดี

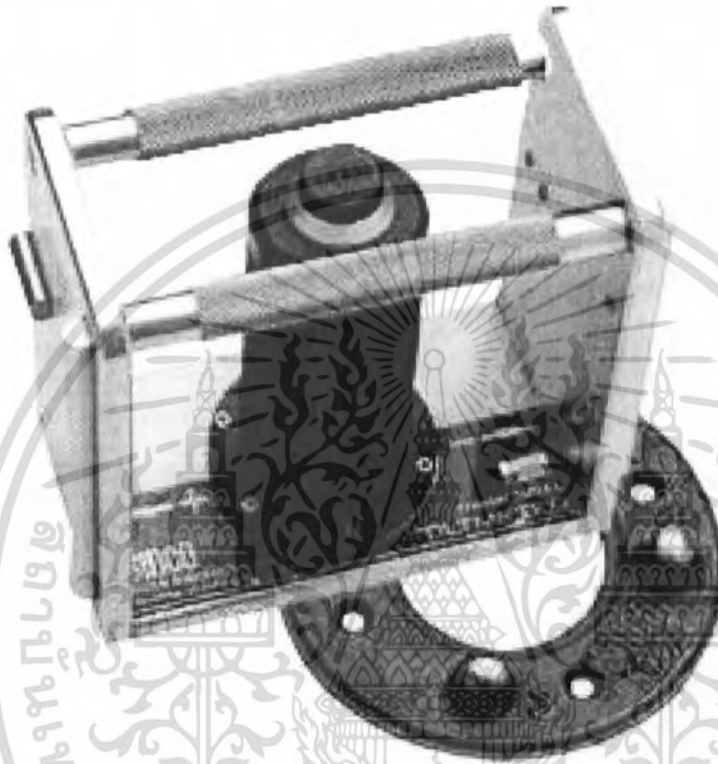
- เครื่องส่งสัญญาณ (beam sensor) จะแสดงถึงค่าการเปลี่ยนแปลงที่แท้จริง ซึ่งวัดค่าละเอียดได้ถึง ลำดับที่ 2 ของส่วนโค้ง ถึง 0.005 มิลลิเมตร ต่อความยาว 1 เมตรของแขน (beam)
- การเปลี่ยนแปลงการเอียงตัว จะแสดงอย่างชัดเจนและถูกต้องแม่นยำถึงหน่วยมิลลิเมตรของการเคลื่อนตัว
- ตัวเครื่องส่งสัญญาณ (beam sensor) จะสามารถเชื่อมโยงข้อมูลจากจุดปลายถึงอีกปลายหนึ่ง เพื่อวัดค่าความถูกต้องของการเคลื่อนตัวของดิน โดยจะให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งที่สมบูรณ์และแนวการทรุดตัว (Settlement profile)
- ค่า low-profile ที่ออกแบบมาจะเป็นค่าที่ใช้ได้จริงกับงานอุโมงค์
- สามารถอ่านค่าตำแหน่งจากเครื่องควบคุมระยะไกลได้ โดยไม่มีการรบกวนสัญญาณจากสิ่งก่อสร้างข้างเคียง

ข้อจำกัด

- ช่วงระยะปกติจะมีขอบเขตถึง +/- 40 arc minute , เท่ากับ 23 มิลลิเมตรของการเคลื่อนตัวต่อ 1 เมตร เมื่อไรก็ตามที่การเคลื่อนตัวเกินกว่าช่วงระยะข้างต้น ตัวส่งสัญญาณจะถูกกลับไปตั้งค่าใหม่ที่ 0 องศา เมื่อเริ่มตั้งค่าใหม่ที่ 0 องศา กลไกการทำงานจะยอมให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนได้ +/- 4 องศา โดยจะต้องไม่มีการเคลื่อนตัวของแขน (beam)
- เมื่อมีความต้องการในการกระตุ้นกระแสไฟฟ้าสลับ (AC) จะทำให้ข้อมูลบางตัวไม่สามารถนำมาใช้ด้วยกันได้
- ไม่สามารถใช้ใต้ดินหรือใต้น้ำได้

3.11.2 Tiltmeter

การใช้งานจะคล้ายกันกับ Beam sensor จะไม่สามารถอ่านค่าแบบอัตโนมัติได้ แต่มีความทนทานมากกว่า



รูปที่ 3.124 ตัวอย่าง Tilt meter และอุปกรณ์

ส่วนประกอบของ Tiltmeter

- แผ่นงานโลหะที่ใช้วัดค่าการเอียงตัว (tilt meter)
- ตัวอ่านค่า (portable meter)
- ตัวแสดงผลข้อมูล (readout unit)

ตัวเครื่องมือ Tiltmeter แบบเคลื่อนที่จะใช้หลักการสมดุลของแรงซึ่งจะวัดการเคลื่อนตัวของดิน ซึ่งจะมีตัวเครื่อง accelerometer ซึ่งจะถูกติดตั้งไว้ในโครงเหล็ก (rugged frame) ซึ่งตัวโครงเหล็กจะมีพื้นผิวที่เรียบเป็นตัวช่วยทำให้เกิดค่าความถูกต้องมากขึ้นบนผิวงานโลหะ (tilt plate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

โปรแกรมวิเคราะห์การทรุดตัวของดินบริเวณแนวอุโมงค์

4.1 กล่าวนำ

โปรแกรมนี้เขียนขึ้นด้วย Java ออกแบบมาให้สามารถใช้งานร่วมกับโปรแกรม Point asia โดยใช้ทฤษฎีของ Peck(1969) ในการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวของดินบริเวณรอบแนวอุโมงค์เพื่อประกอบการตัดสินใจในการกำหนดแนวของอุโมงค์

4.2 วัตถุประสงค์

1. โปรแกรมนี้เขียนขึ้นเพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินและช่วยประกอบการตัดสินใจในการกำหนดแนวอุโมงค์
2. เพื่อให้บุคคลที่สนใจสามารถนำโปรแกรมนี้ไปประยุกต์และพัฒนาต่อได้
3. เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินในการก่อสร้างอุโมงค์
4. เพื่ออำนวยความสะดวกแก่การเข้าใจของบุคคลทั่วไปถึงผลที่เกิดจากการวางแนวอุโมงค์

4.3 ทฤษฎีและการคำนวณ

การคำนวณค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากการขุดเจาะอุโมงค์ของโปรแกรมนี้อ้างอิงมาจากทฤษฎีของ Peck ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยมีสมการที่ใช้ในการคำนวณ ดังนี้

4.3.1 การคำนวณการทรุดตัวแบบอุโมงค์เดี่ยว

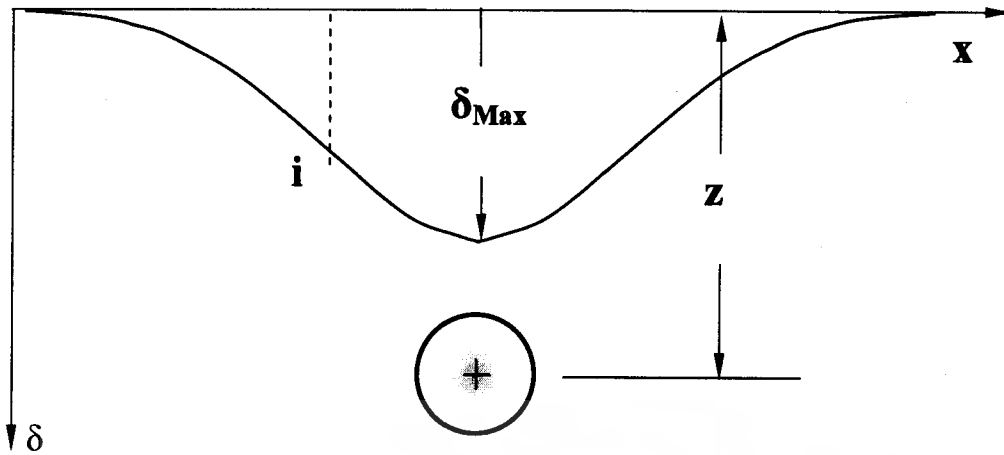
$$GroundLoss\%(G_L) = \frac{V_L}{V_T} = \frac{2.5i\delta_{max}}{\pi D^2 / 4} \cdot 100 \quad (4.1)$$

$$\delta_{max} = \left(\frac{\pi D^2}{i} \right) G_L \cdot 10^{-3} \quad (4.2)$$

$$i = kz \quad (4.3)$$

$$\delta = \delta_{max} \cdot \exp\left[-\frac{x^2}{2i^2}\right] \quad (4.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

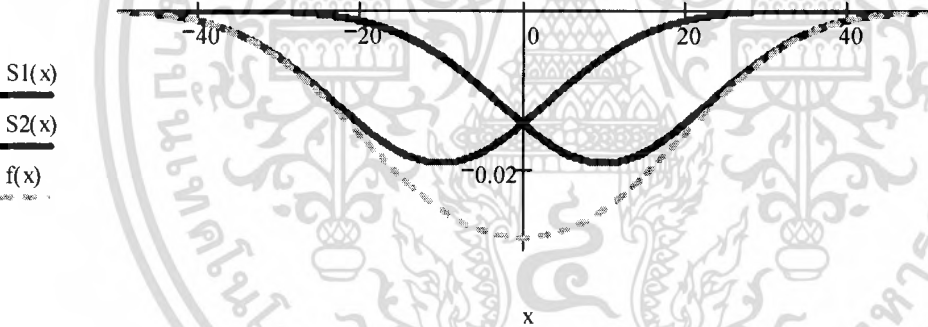
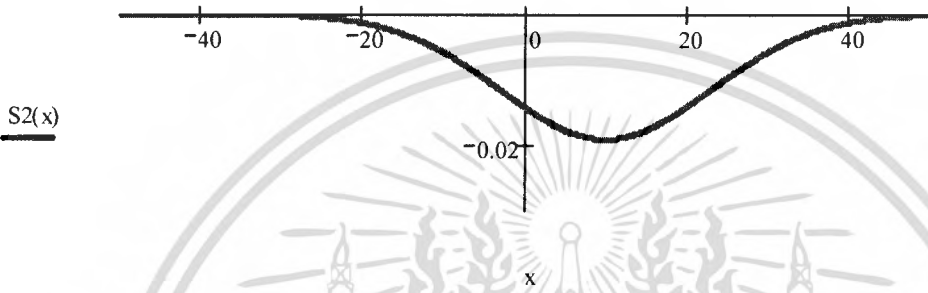
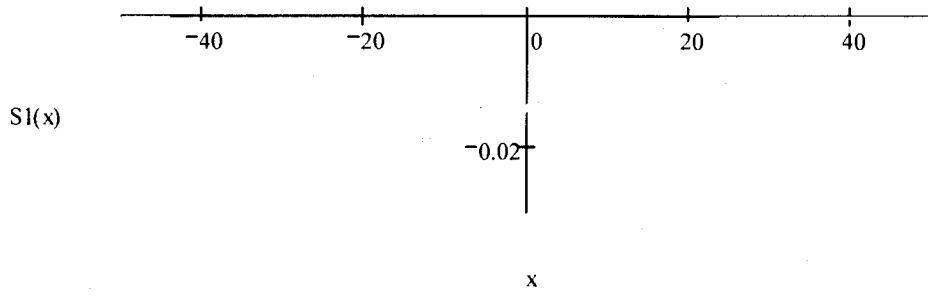


รูปที่ 4.1 แสดงการทรุดตัวแบบอุโมงค์เดี่ยว

- $G_L\%$ = เปอร์เซ็นต์การสูญเสียมวลดิน
- V_L = ปริมาตรมวลดินที่สูญเสีย
- V_T = ปริมาตรอุโมงค์
- i = จุดเปลี่ยนโค้งของ Gaussian curve
- k = ค่าคงที่มีค่า 0.3 สำหรับดินทราย และ 0.5 สำหรับดินเหนียว
- z = ความลึกของอุโมงค์
- D = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางอุโมงค์
- δ_{max} = ค่าการทรุดตัวสูงสุด
- δ = ค่าการทรุดที่ตำแหน่งใดๆ

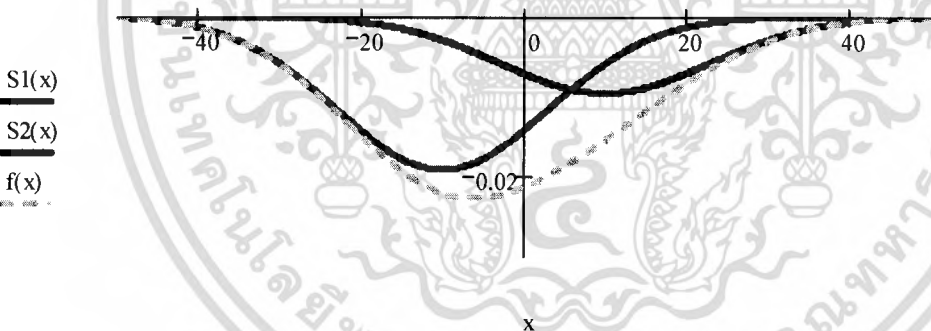
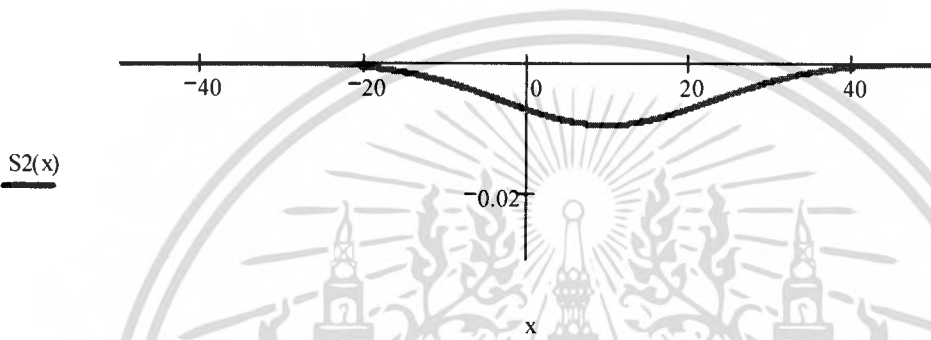
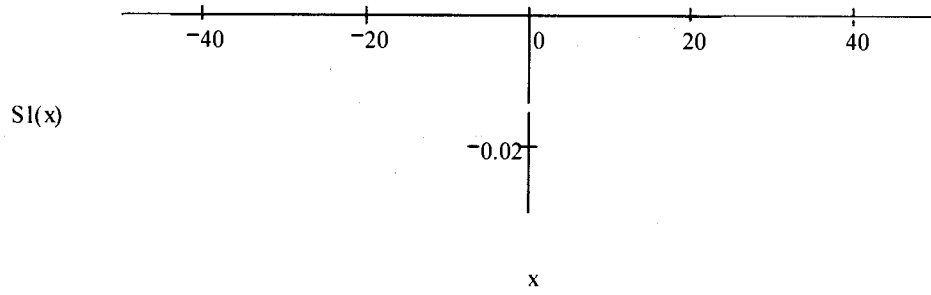
4.3.2 การคำนวณการทรุดตัวแบบอุโมงค์คู่

ในการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวของอุโมงค์คู่ นั้น จะใช้วิธีซ้อนทับกราฟ (Superposition) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ กล่าวคือ แยกพิจารณาเป็นอุโมงค์เดี่ยวสองอุโมงค์และนำค่าการทรุดตัวที่ได้ในแต่ละตำแหน่งมารวมกัน ดังรูปที่ 4.2 ถึง 4.4



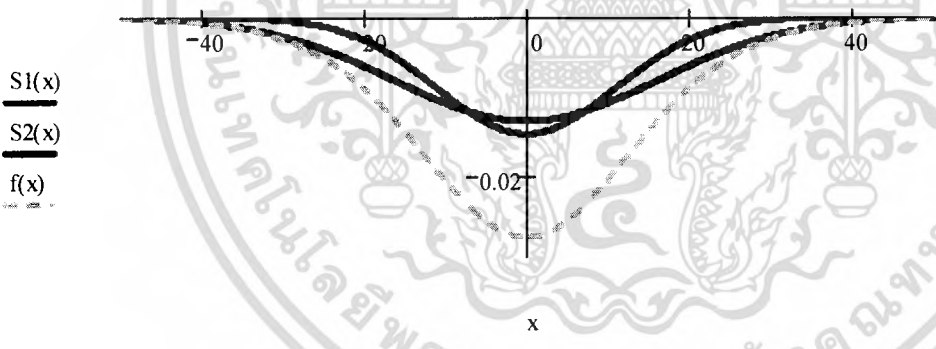
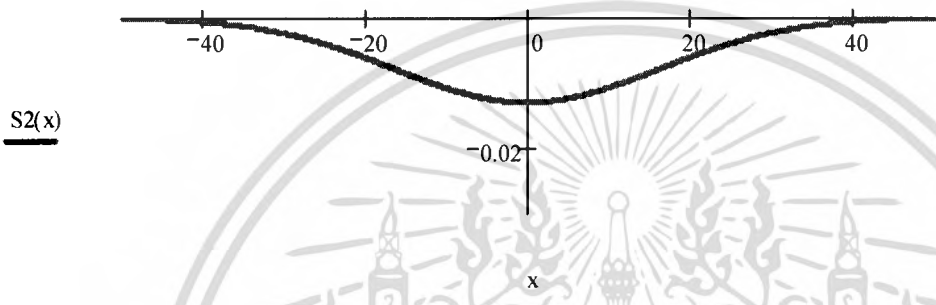
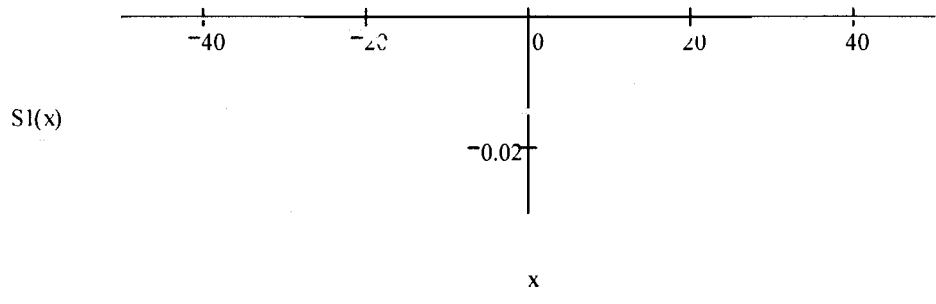
รูปที่ 4.2 แสดงการทรุดตัวแบบสมมาตรในอุโมงค์คู่แวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่ 153 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงการทรุดตัวแบบไม่สมมาตรในอุโมงค์คู่แวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อที่ 154 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

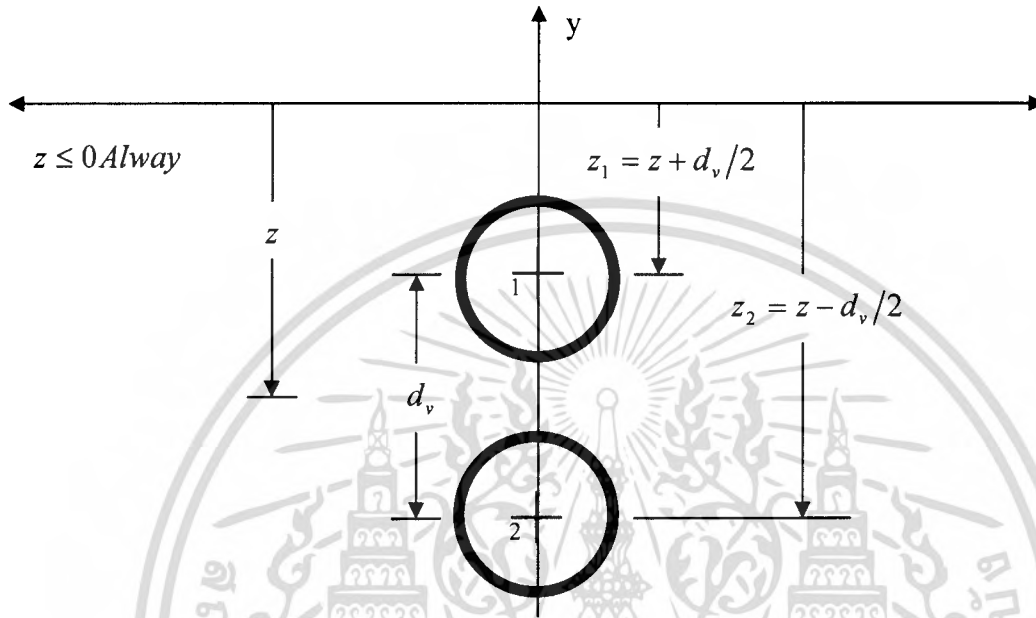


รูปที่ 4.4 แสดงการทรุดตัวของอุโมงค์คูในแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อ **155** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุโมงค์คู่แนวตั้ง

ในการวิเคราะห์ห้อุโมงค์คู่แบบตั้งนั้นจะกำหนดให้ค่า z เป็นระยะจากผิวดินถึงตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างสองอุโมงค์โดยสมมติให้อุโมงค์ที่ 1 อยู่เหนืออุโมงค์ที่ 2 และ $z \leq 0$ เสมอ



รูปที่ 4.5 แสดงค่าความลึก z ของอุโมงค์คู่แบบตั้ง

$$\delta_{1v}(x) = \delta_{1v\max} \cdot \exp\left[-\frac{x^2}{2i_1^2}\right] \quad (4.5)$$

$$\delta_{2v}(x) = \delta_{2v\max} \cdot \exp\left[-\frac{x^2}{2i_2^2}\right] \quad (4.6)$$

$$\delta_{1v\max} = \left(\frac{\pi D_1^2}{i_1}\right) G_{L1} \cdot 10^{-3} \quad (4.7)$$

$$\delta_{2v\max} = \left(\frac{\pi D_2^2}{i_2}\right) G_{L2} \cdot 10^{-3} \quad (4.8)$$

$$i_1 = kz_1 = k(z + d_v/2) \quad (4.9)$$

$$i_2 = kz_2 = k(z - d_v/2) \quad (4.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

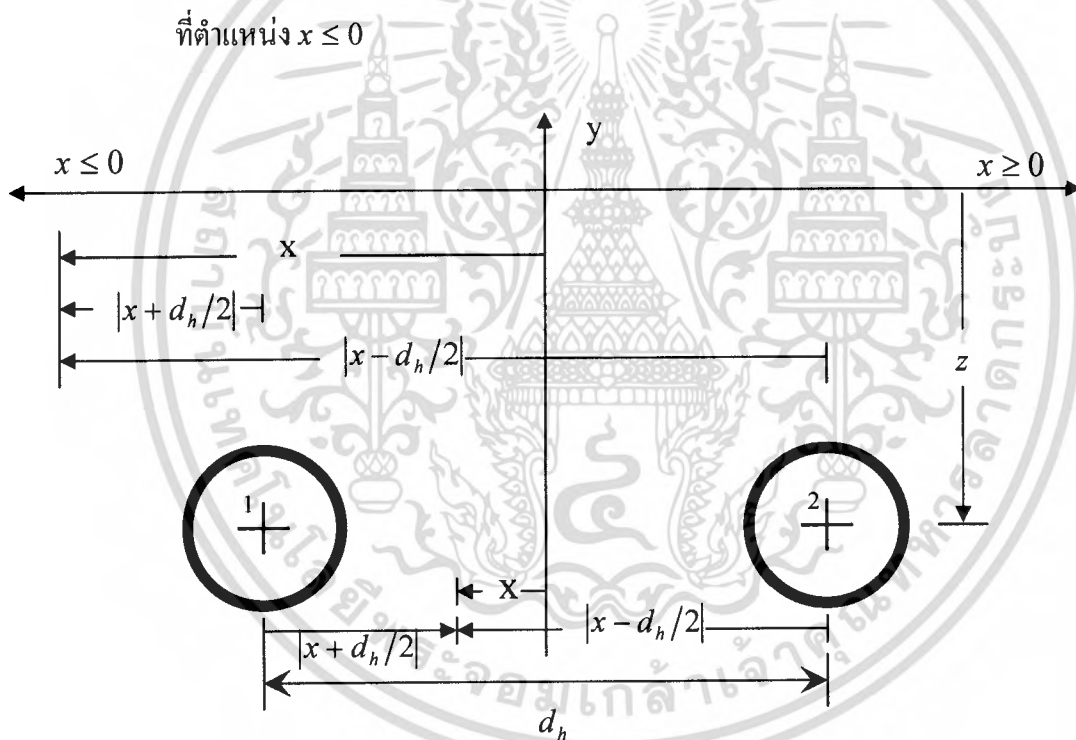
จากสมการที่ 4.5 และ 4.6 จะสามารถบอกได้ว่าค่าการทรุดตัวรวม ($v(x)$) มีค่าเท่ากับ $v(x) = \delta_{1v}(x) + \delta_{2v}(x)$ ที่ทุกค่าของ x

$$v(x) = \delta_{1v}(x) + \delta_{2v}(x) \quad (4.11)$$

***หมายเหตุ** ตัวพิมพ์ห้อย 1 และ 2 หมายถึงค่าของอุโมงค์ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

อุโมงค์คู่แวนอน

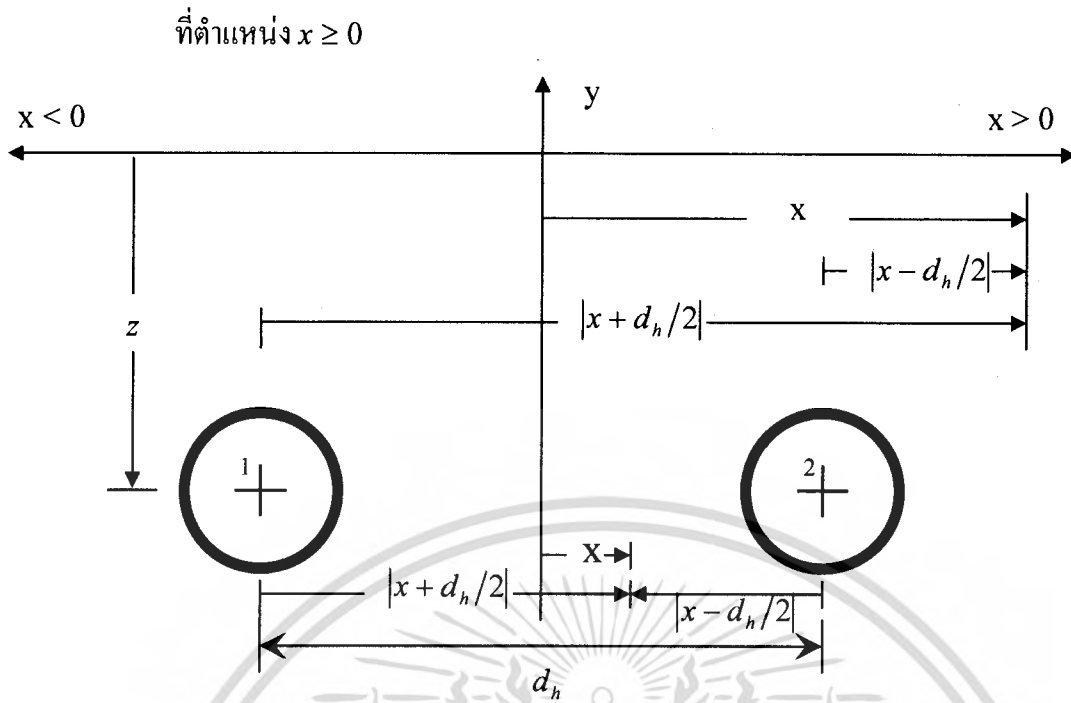
ในการวิเคราะห์อุโมงค์คู่แวนอนนั้นจะแยกวิเคราะห์เป็นสองช่วงคือ $x \leq 0$ และ $x \geq 0$ เนื่องจากจะสมมติให้จุดศูนย์กลางระหว่างสองอุโมงค์อยู่บนแกน y ($x = 0$) โดยอุโมงค์ 1 และ 2 อยู่ด้านซ้ายและขวาของแกน y ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 แสดงค่าระยะตามแกน x ของอุโมงค์คู่แบบนอนที่ $x \leq 0$

$$\delta_{1h}(x) = \delta_{1h\max} \cdot \exp\left[-\frac{(x+d_h/2)^2}{2i^2}\right] \quad (4.12)$$

$$\delta_{2h}(x) = \delta_{2h\max} \cdot \exp\left[-\frac{(x-d_h/2)^2}{2i^2}\right] \quad (4.13)$$



รูปที่ 4.7 แสดงค่าระยะตามแกน x ของอูโมงค์คู่แบบนอนที่ $x \geq 0$

$$\delta_{1h}(x) = \delta_{1h\max} \cdot \exp\left[-\frac{(x+d_h/2)^2}{2i^2}\right] \quad (4.14)$$

$$\delta_{2h}(x) = \delta_{2h\max} \cdot \exp\left[-\frac{(x-d_h/2)^2}{2i^2}\right] \quad (4.15)$$

$$\delta_{1h\max} = \left(\frac{\pi D_1^2}{i}\right) G_{L1} \cdot 10^{-3} \quad (4.16)$$

$$\delta_{2h\max} = \left(\frac{\pi D_2^2}{i}\right) G_{L2} \cdot 10^{-3} \quad (4.17)$$

$$i = kz \quad (4.18)$$

***หมายเหตุ** ตัวพิมพ์ห้อย 1 และ 2 หมายถึงค่าของอูโมงค์ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

จากสมการที่ 4.12 กับ 4.14 และ 4.13 กับ 4.15 จะได้ว่าค่า $\delta_{1h}(x)$ และ $\delta_{2h}(x)$ ของทั้งสองช่วง ($x \leq 0$ และ $x \geq 0$) มีค่าเท่ากันจึงสามารถบอกได้ว่าการหาค่ารวม ($h(x)$) มีค่าเท่ากับ $h(x) = \delta_{1h}(x) + \delta_{2h}(x)$ ที่ทุกค่าของ x

$$h(x) = \delta_{1h}(x) + \delta_{2h}(x) \quad (4.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกิจการงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา 158 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์หุ้โมงค์คู่แบบตั้งและหุ้โมงค์คู่แบบนอนข้างต้นนั้น จะสามารถ
สรุปรูปแบบการทรุดของดินเนื่องจากหุ้โมงค์คู่ได้ดังนี้

$$f(x) = \delta_1(x) + \delta_2(x) \quad (4.20)$$

$$\delta_1(x) = \delta_{1\max} \cdot \exp\left[-\frac{(x+d_h/2)^2}{2i_1^2}\right] \quad (4.21)$$

$$\delta_2(x) = \delta_{2\max} \cdot \exp\left[-\frac{(x-d_h/2)^2}{2i_2^2}\right] \quad (4.22)$$

$$\delta_{1\max} = \left(\frac{\pi D_1^2}{i_1}\right) G_{L1} \cdot 10^{-3} \quad (4.23)$$

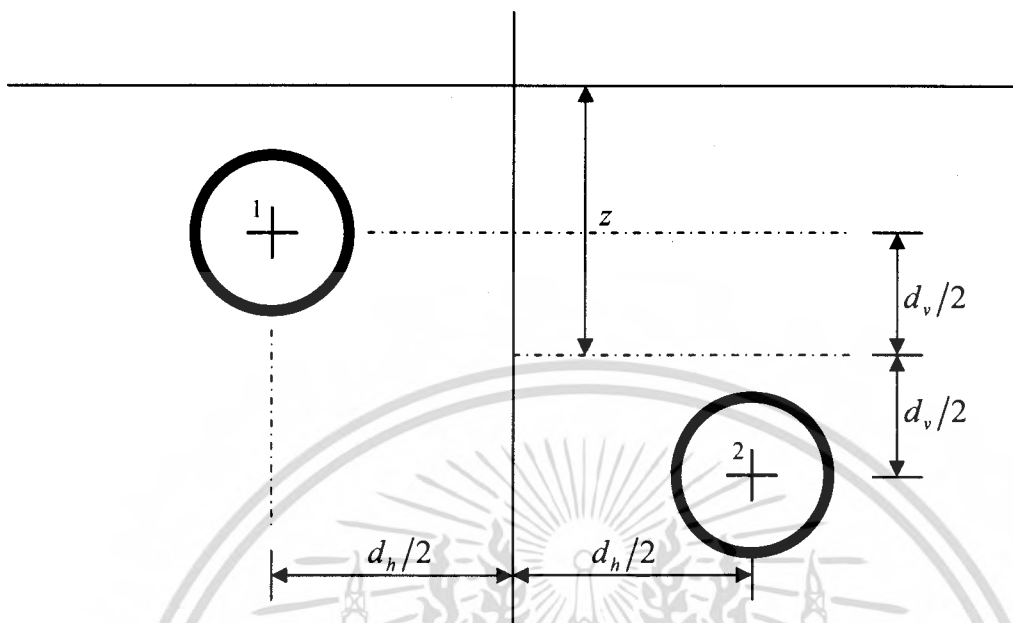
$$\delta_{2\max} = \left(\frac{\pi D_2^2}{i_2}\right) G_{L2} \cdot 10^{-3} \quad (4.24)$$

$$i_1 = kz_1 = k(z + d_v/2) \quad (4.25)$$

$$i_2 = kz_2 = k(z - d_v/2) \quad (4.26)$$

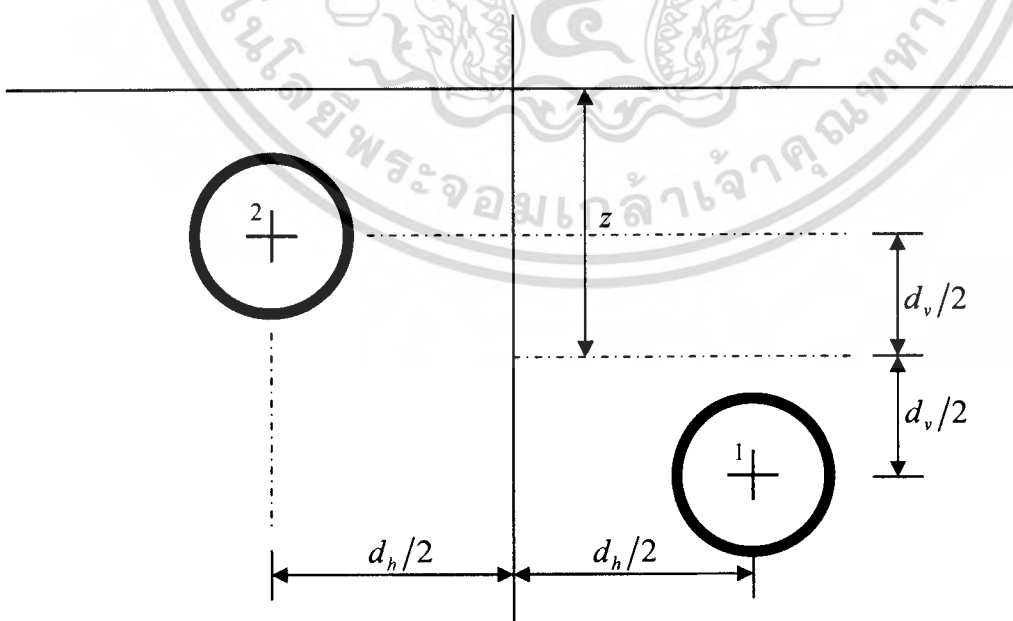
- เมื่อ
- $f(x)$ คือค่าการทรุดตัวที่เกิดจากทั้งสองหุ้โมงค์
 - $\delta_1(x)$ คือค่าการทรุดตัวที่เกิดจากหุ้โมงค์ที่ 1
 - $\delta_2(x)$ คือค่าการทรุดตัวที่เกิดจากหุ้โมงค์ที่ 2
 - $\delta_{1\max}$ คือค่าการทรุดตัวสูงสุดที่เกิดจากหุ้โมงค์ที่ 1
 - $\delta_{2\max}$ คือค่าการทรุดตัวสูงสุดที่เกิดจากหุ้โมงค์ที่ 2
 - D_1 คือเส้นผ่านศูนย์กลางของหุ้โมงค์ที่ 1
 - D_2 คือเส้นผ่านศูนย์กลางของหุ้โมงค์ที่ 2
 - G_{L1} คือค่าการสูญเสียมวลดินของหุ้โมงค์ที่ 1
 - G_{L2} คือค่าการสูญเสียมวลดินของหุ้โมงค์ที่ 2
 - d_h คือระยะห่างระหว่างสองหุ้โมงค์ในแนวนอน
 - d_v คือระยะห่างระหว่างสองหุ้โมงค์ในแนวตั้ง
 - z คือค่าระยะจากผิวดินถึงกึ่งกลางความลึกของทั้งสองหุ้โมงค์

กรณีที่ 1 อุโมงค์ที่ 1 อยู่ทางด้านซ้ายบนของอุโมงค์ที่ 2 d_h และ d_v จะต้องแทนค่าเป็นบวกทั้งสองค่า(+,+)



รูปที่ 4.8 แสดงตำแหน่งของอุโมงค์ที่ 1 และ 2 ในกรณีที่ 1

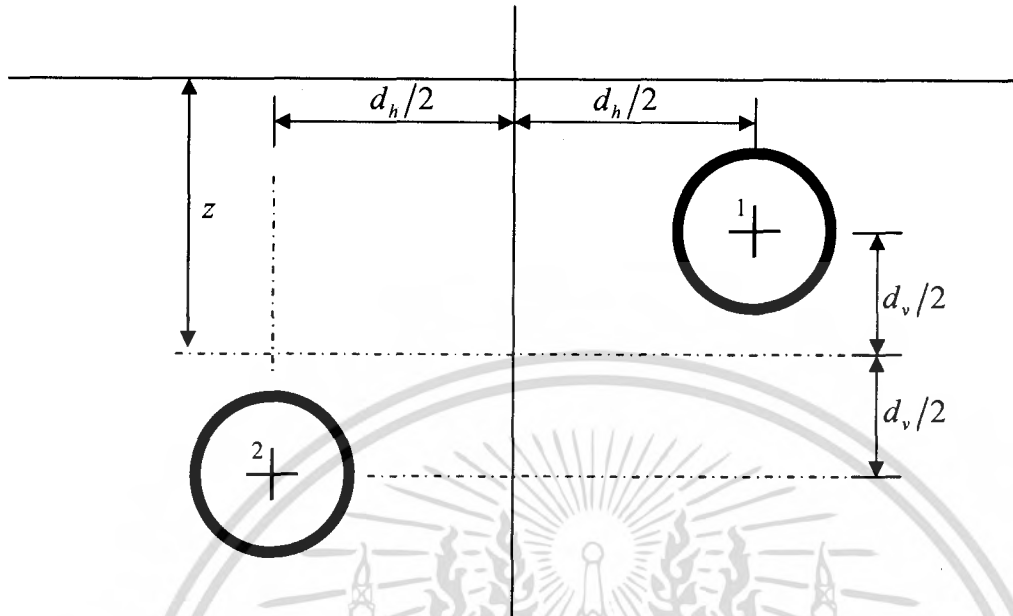
กรณีที่ 2 อุโมงค์ที่ 1 อยู่ทางด้านขวาล่างของอุโมงค์ที่ 2 d_h และ d_v จะต้องแทนค่าเป็นลบทั้งสองค่า(-,-)



รูปที่ 4.9 แสดงตำแหน่งของอุโมงค์ที่ 1 และ 2 ในกรณีที่ 2

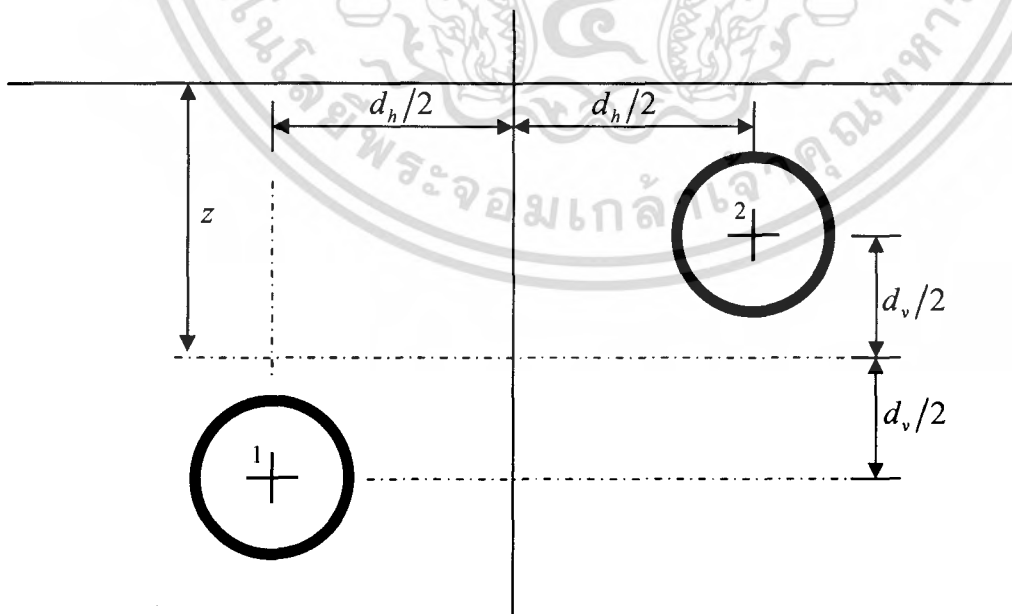
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา 160 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที 3 อุโมงค์ที่ 1 อยู่ทางด้านขวาบนของอุโมงค์ที่ 2 d_h และ d_v จะต้องแทนค่า เป็นลบและบวกตามลำดับ(-,+)



รูปที่ 4.10 แสดงตำแหน่งของอุโมงค์ที่ 1 และ 2 ในกรณีที 3

กรณีที 4 อุโมงค์ที่ 1 อยู่ทางด้านซ้ายล่างของอุโมงค์ที่ 2 d_h และ d_v จะต้องแทนค่า เป็นลบและบวกตามลำดับ(+,-)



รูปที่ 4.11 แสดงตำแหน่งของอุโมงค์ที่ 1 และ 2 ในกรณีที 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

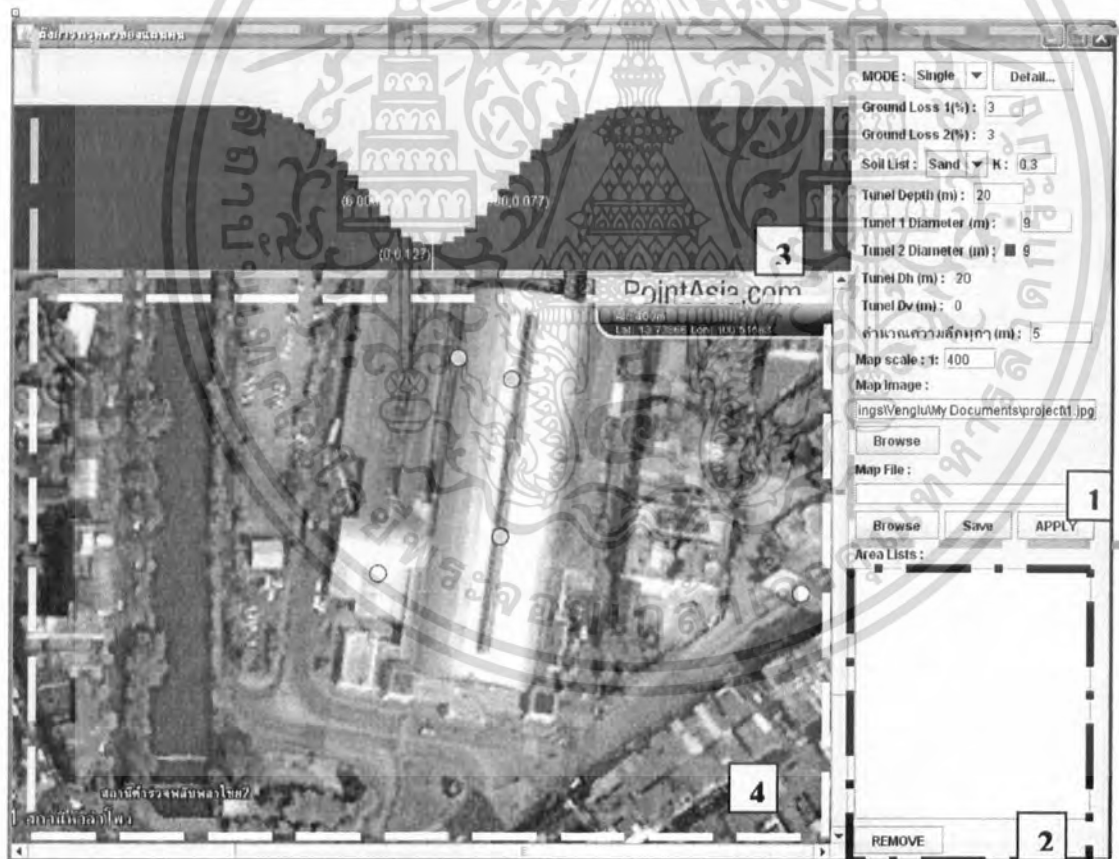
4.4 คู่มือการใช้งาน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงส่วนประกอบต่างๆของโปรแกรมและวิธีการใช้งาน เพื่อให้สามารถใช้โปรแกรมได้อย่างถูกต้อง

4.4.1 ส่วนประกอบของโปรแกรม

จากรูปที่ 4.12 โปรแกรมจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน

1. หน้าต่างป้อนค่าโดยจะสามารถป้อนค่าตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการทรุดตัวของดินในการก่อสร้างอุโมงค์ได้
2. หน้าต่างเก็บข้อมูลแนวอุโมงค์สามารถใช้ในการแก้ไขตัวแปรต่างๆของแนวอุโมงค์ที่ได้
3. หน้าต่างแสดงหน้าตัดการทรุดตัวของดินในลักษณะของกราฟ x-y
4. หน้าต่างแสดงค่าการทรุดตัวของดินในแนวอุโมงค์ที่วางไว้เทียบกับแผนที่



รูปที่ 4.12 แสดงส่วนต่างๆของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 วิธีการใช้งานโปรแกรม

1. ติดตั้ง Java Runtime Edition เพื่อให้สามารถเรียกใช้โปรแกรมได้

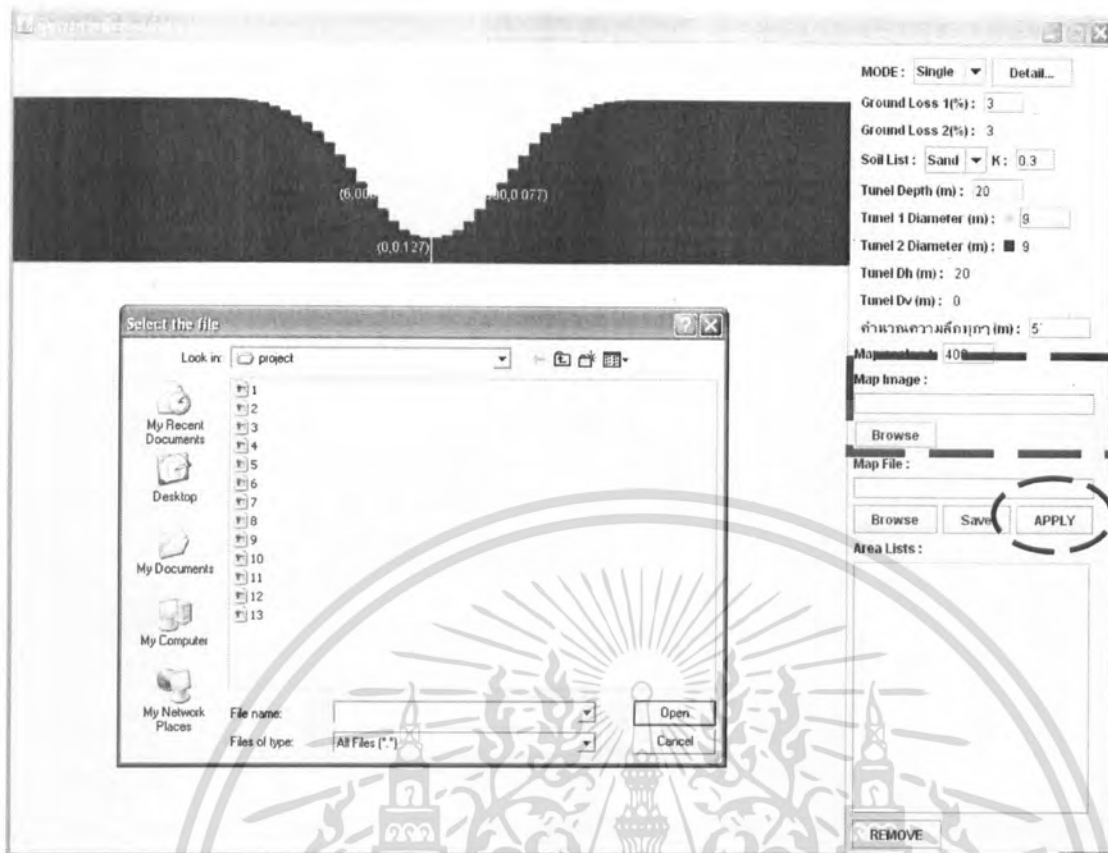
2. เปิดโปรแกรมเตรียมพร้อมใช้งาน ดังรูปที่ 4.13



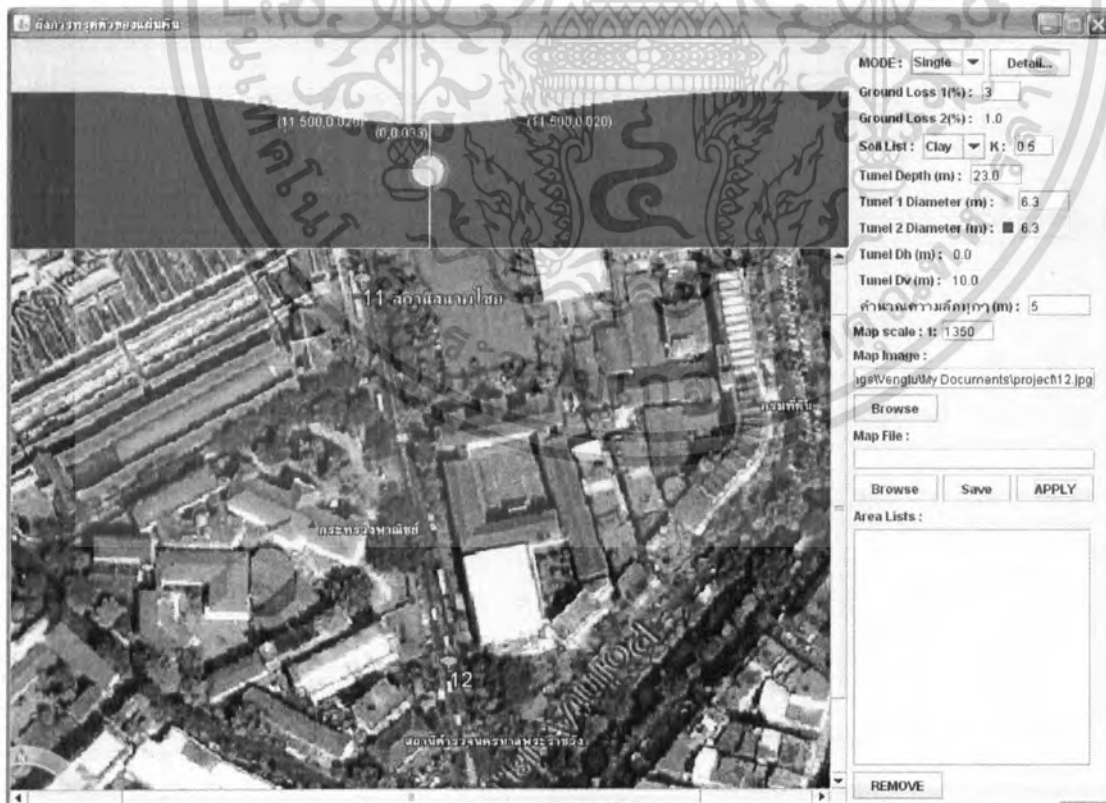
รูปที่ 4.13 แสดงหน้าต่าง โปรแกรมเมื่อเปิดขึ้น และพร้อมใช้งาน

3. ทำการค้นหาภาพแผนที่ที่ต้องการจะศึกษา เช่น ภาพแผนที่ที่บันทึกจากโปรแกรม Point Asia และกดปุ่ม apply ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่ 163 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดงการค้นหาและป้อนภาพแผนที่



รูปที่ 4.15 แสดงหน้าต่าง โปรแกรมเมื่อยืนยันการป้อนภาพแผนที่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ป้อนค่าตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการทรุดตัวของดินในการก่อสร้างอุโมงค์ดังรูปที่ 4.16 เมื่อใส่ค่าต่างๆตามที่ต้องการแล้วให้กดปุ่ม APPLY เพื่อยืนยันค่าตัวแปร

MODE : <input type="button" value="Single"/> <input type="button" value="Detail..."/>	MODE : <input type="button" value="Double"/> <input type="button" value="Detail..."/>
Ground Loss 1(%) : <input type="text" value="3"/>	Ground Loss 1(%) : <input type="text" value="3"/>
Ground Loss 2(%) : <input type="text" value="3"/>	Ground Loss 2(%) : <input type="text" value="3"/>
Soil List : <input type="button" value="Sand"/> <input type="button" value="K: 0.3"/>	Soil List : <input type="button" value="Sand"/> <input type="button" value="K: 0.3"/>
Tunnel Depth (m) : <input type="text" value="20"/>	Tunnel Depth (m) : <input type="text" value="20"/>
Tunnel 1 Diameter (m) : <input type="text" value="9"/>	Tunnel 1 Diameter (m) : <input type="text" value="9"/>
Tunnel 2 Diameter (m) : <input checked="" type="checkbox"/> <input type="text" value="9"/>	Tunnel 2 Diameter (m) : <input checked="" type="checkbox"/> <input type="text" value="9"/>
Tunnel Dh (m) : <input type="text" value="20"/>	Tunnel Dh (m) : <input type="text" value="20"/>
Tunnel Dv (m) : <input type="text" value="0"/>	Tunnel Dv (m) : <input type="text" value="0"/>

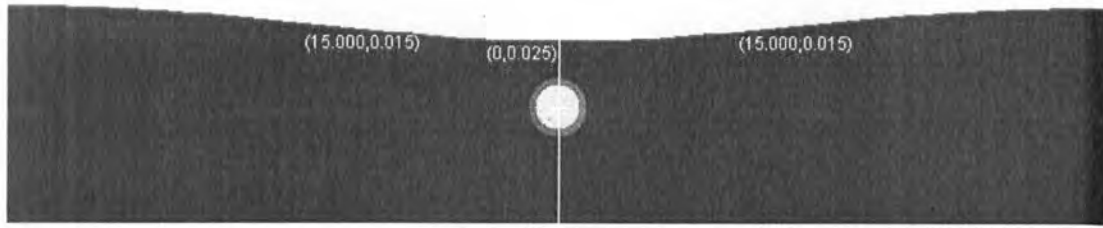
รูปที่ 4.16 แสดงการป้อนค่าตัวแปรใน โปรแกรมทั้งอุโมงค์เดี่ยว และอุโมงค์คู่

5. โปรแกรมจะทำการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัว จากนั้นแสดงผลออกมาในรูปแบบของเส้นอิทธิพลบนแผนที่ และกราฟ Gaussian curve



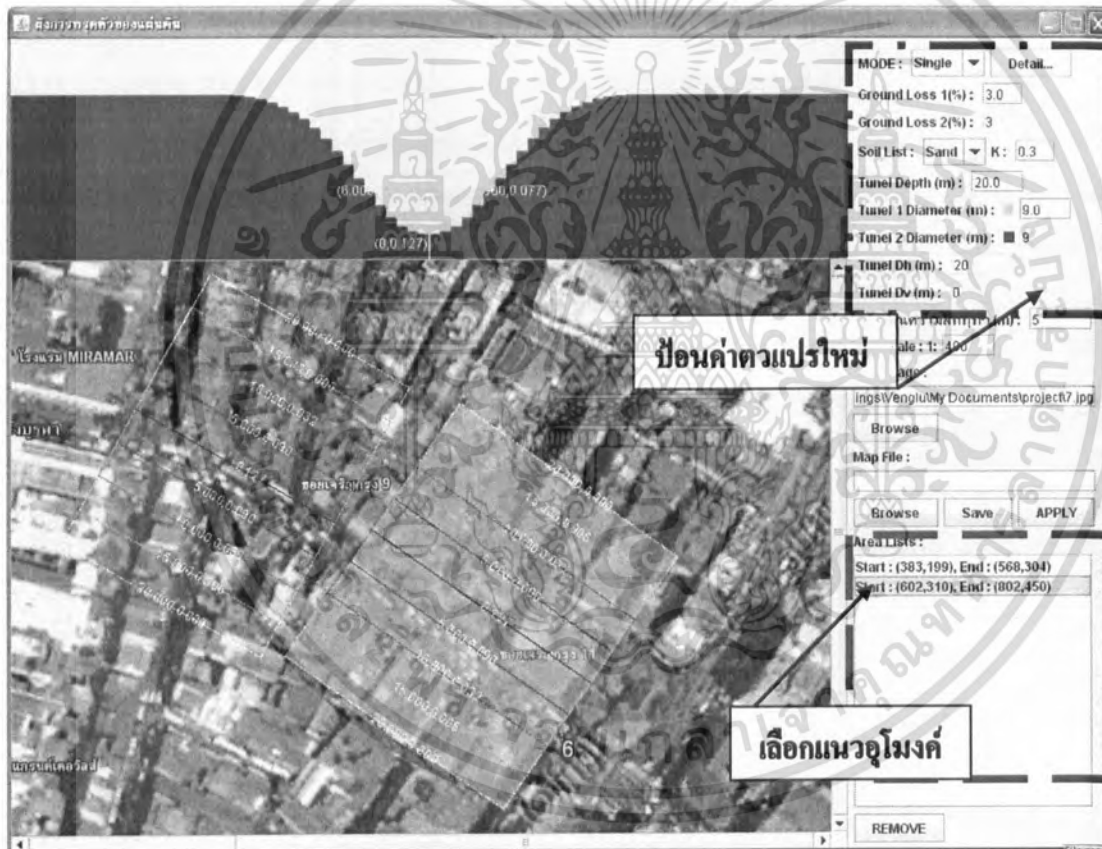
รูปที่ 4.17 แสดงเส้นอิทธิพลของการทรุดตัวบนแผนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อที่ 165 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



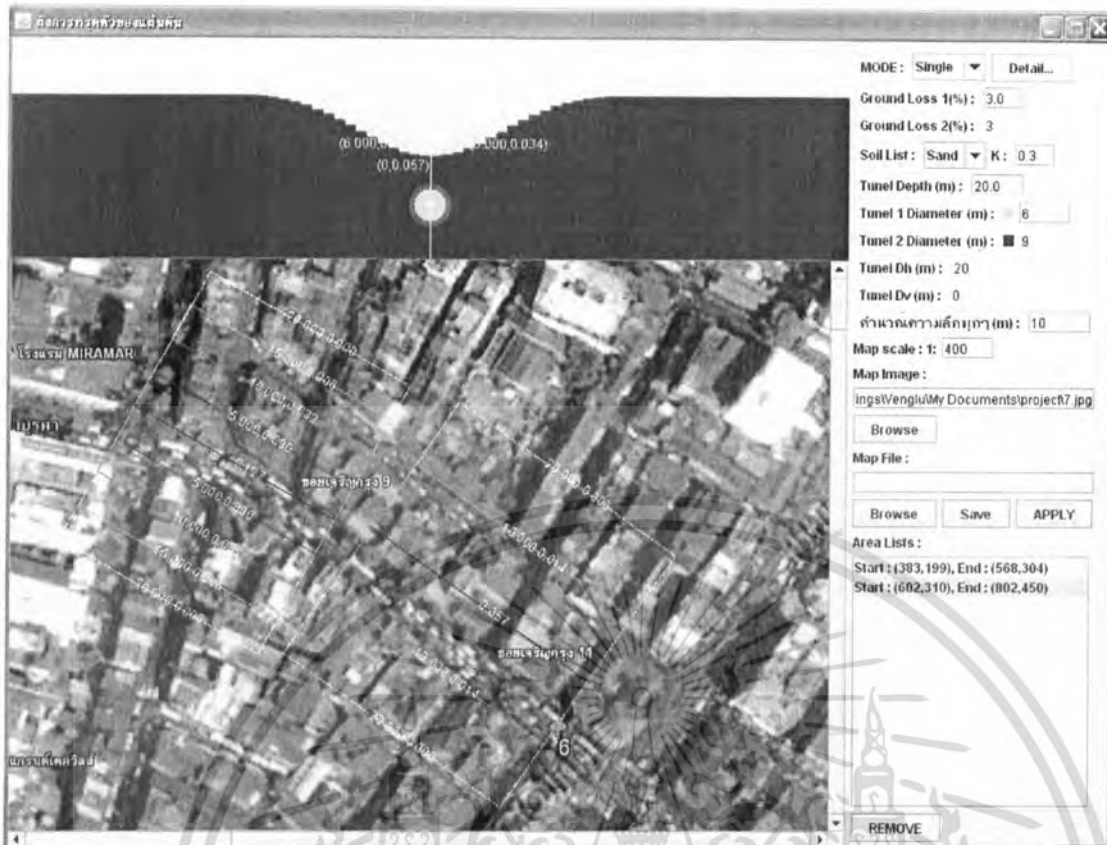
รูปที่ 4.18 แสดงค่าการทรุดตัวออกมาในรูปแบบของกราฟ

6. หากค่าการทรุดตัวที่ได้ยังไม่เป็นที่น่าพอใจ สามารถปรับแก้ค่าตัวแปรต่างๆ โดยกดที่รายการแนวอุโมงค์ที่วางไว้ และป้อนค่าตัวแปรต่างๆใหม่ จากนั้นกด APPLY เพื่อยืนยันดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 แสดงการแก้ค่าตัวแปรในโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข 166 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

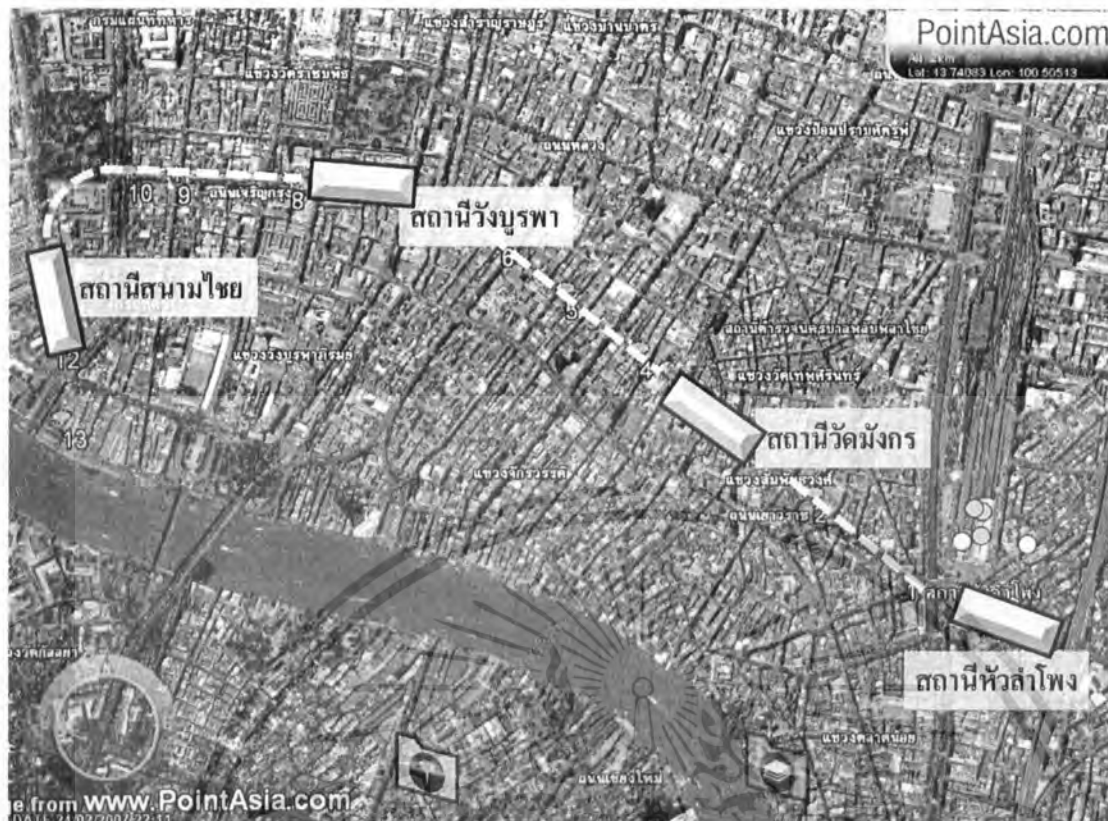


รูปที่ 4.20 แสดงผลการวิเคราะห์หลังจากยืนยันค่าตัวแปรใหม่

4.5 กรณีศึกษา

ปัจจุบันโครงข่ายหลักของการขนส่งมวลชนในเขตกรุงเทพฯ คือรถไฟฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคลและรถไฟฟ้า BTS มีระยะทางรวมทั้งสิ้นเพียงประมาณ 44 กิโลเมตร ซึ่งไม่เพียงพอต่อการแก้ไขปัญหาการเดินทางของประชาชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้จำเป็นต้องมีการสร้างรถไฟฟ้าส่วนต่อขยายขึ้น ในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างการวิเคราะห์ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินส่วนต่อขยายตั้งแต่สถานีหัวลำโพงถึงสถานีสนามไชย

โดยเส้นทางที่ศึกษาเริ่มต้นจากสถานีหัวลำโพงเข้าสู่ถนนเจริญกรุง ผ่านเยาวราช วังบูรพา และเลี้ยวซ้ายที่วัดโพธิ์ถึงสถานีสนามไชยดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 แสดงแนวเส้นทางจากสถานีหัวลำโพงถึงสถานีสามไชย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.1 สถานีหัวลำโพงถึงสถานีวัดมังกร

จากสถานีหัวลำโพงลักษณะของอุโมงค์จะเป็นอุโมงค์คู่ในแนวราบจนถึงกิโลเมตรที่ 0+300 จะเริ่มบิดตัวเป็นอุโมงค์คู่ในแนวโค้งเพื่อเข้าสู่สถานีวัดมังกร ซึ่งสามารถคำนวณค่าการทรุดตัวที่ระยะต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

MODE : Double ▼ Detail...	MODE : Double ▼ Detail...
Ground Loss 1(%) : 1	Ground Loss 1(%) : 1
Ground Loss 2(%) : 1	Ground Loss 2(%) : 1
Soil List : Clay ▼ K : 0.5	Soil List : Clay ▼ K : 0.5
Tunnel Depth (m) : 18	Tunnel Depth (m) : 23
Tunnel 1 Diameter (m) : 6.3	Tunnel 1 Diameter (m) : 6.3
Tunnel 2 Diameter (m) : 6.3	Tunnel 2 Diameter (m) : 6.3
Tunnel Dh (m) : 10	Tunnel Dh (m) : 0
Tunnel Dv (m) : 0	Tunnel Dv (m) : 10
ค่าแนวความลึกทุกๆ (m) : 5	ค่าแนวความลึกทุกๆ (m) : 5

รูปที่ 4.22 ข้อมูลการก่อสร้างอุโมงค์ตั้งแต่สถานีหัวลำโพงถึงสถานีวัดมังกร

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าการทรุดตัวของอุโมงค์คู่ในแนวราบจากสถานีหัวลำโพงถึงสถานีวัดมังกร

ระยะจากแนวอุโมงค์ (m.)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
ค่าการทรุดตัว(mm.)	1	4	9	15	21	24	21	15	9	4	1

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการทรุดตัวของอุโมงค์คู่ในแนวโค้งจากสถานีหัวลำโพงถึงสถานีวัดมังกร

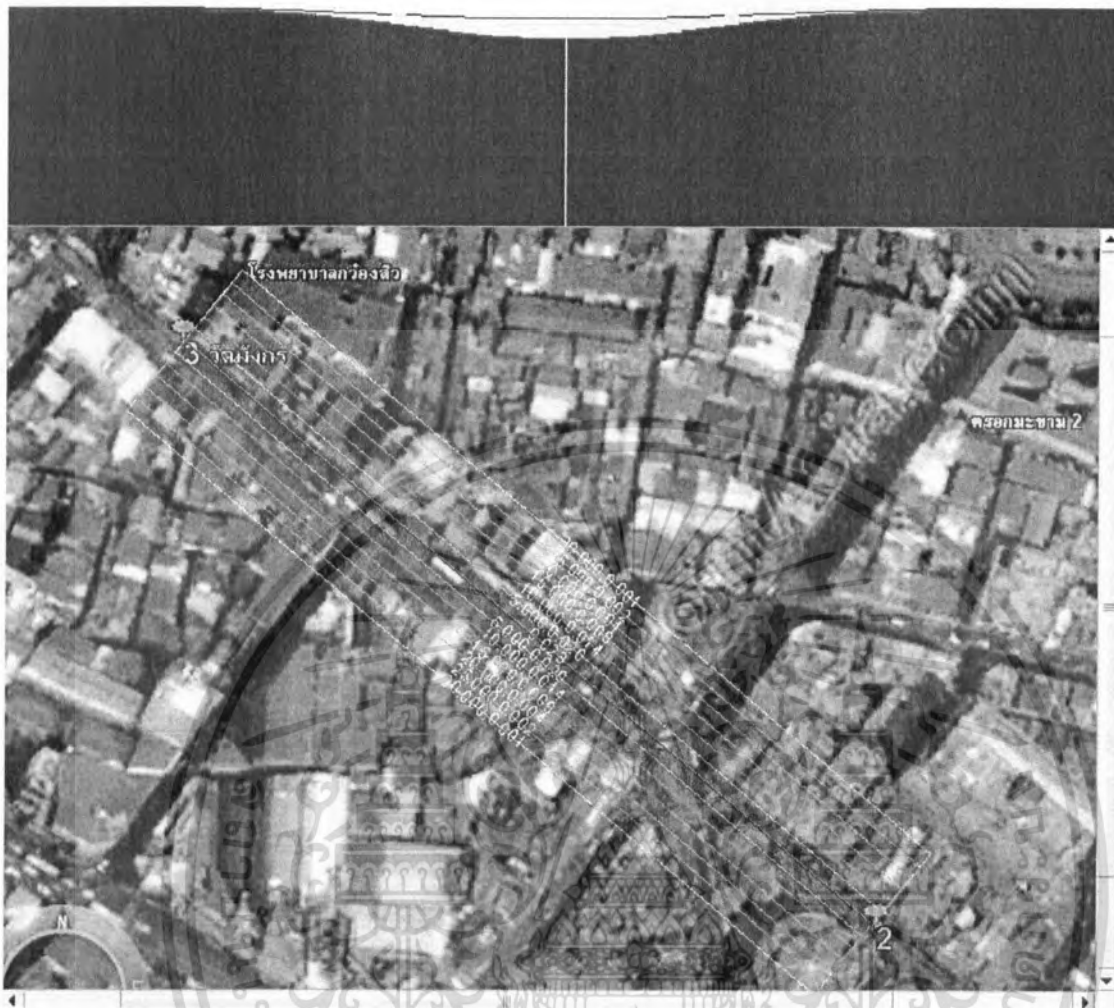
ระยะจากแนวอุโมงค์ (m.)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
ค่าการทรุดตัว(mm.)	2	4	8	14	20	23	20	14	8	4	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 แสดงแนวการทอดตัวระหว่างสถานีหัวลำโพงถึงสถานีวัดมังกร(จุด 1 ถึงจุด 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข 170 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 แสดงการทรุดตัวของอุโมงค์คูแวนคิงก่อนถึงสถานีวัดมังกร(จุด 2 ถึงจุด 3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.1 สถานีวัดมังกรถึงสถานีวังบูรพา

แนวอุโมงค์จากสถานีวัดมังกรถึงสถานีวังบูรพาจะเป็นอุโมงค์คู่ในแนวคิงตลอด ทั้งสาย เนื่องจากมีข้อจำกัดทางด้านพื้นที่ และบริเวณนี้ยังจำเป็นต้องติดตั้งเครื่องมือติดตามการเคลื่อนตัวของดินอย่างใกล้ชิด เนื่องจากเป็นย่านที่อยู่อาศัยหนาแน่น สามารถคำนวณค่าการทรุดตัวที่ระยะต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.3

MODE: Double ▼ Detail...

Ground Loss 1(%): 1

Ground Loss 2(%): 1

Soil List: Clay ▼ K: 0.5

Tunnel Depth (m): 23

Tunnel 1 Diameter (m): 6.3

Tunnel 2 Diameter (m): 6.3

Tunnel Dh (m): 0

Tunnel Dv (m): 10

ค่าแนวความลึกทุกๆ (m): 5

รูปที่ 4.25 ข้อมูลการก่อสร้างอุโมงค์ระหว่างสถานีวัดมังกรถึงสถานีวังบูรพา

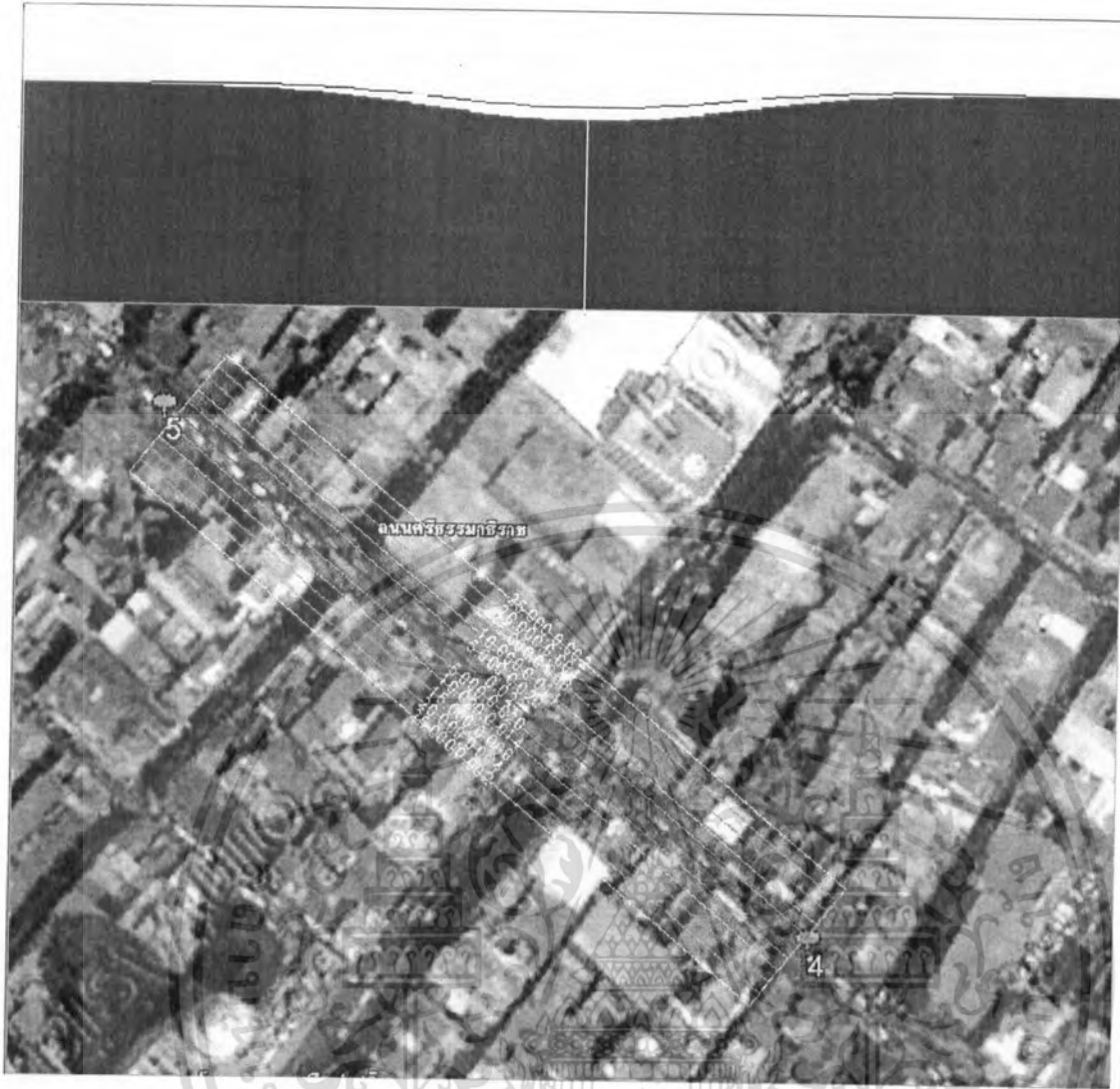
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการทรุดตัวของอุโมงค์คู่ในแนวคิงระหว่างสถานีวัดมังกรถึงสถานีวังบูรพา

ระยะจากแนวอุโมงค์ (m.)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
ค่าการทรุดตัว(mm.)	2	4	8	14	20	23	20	14	8	4	2



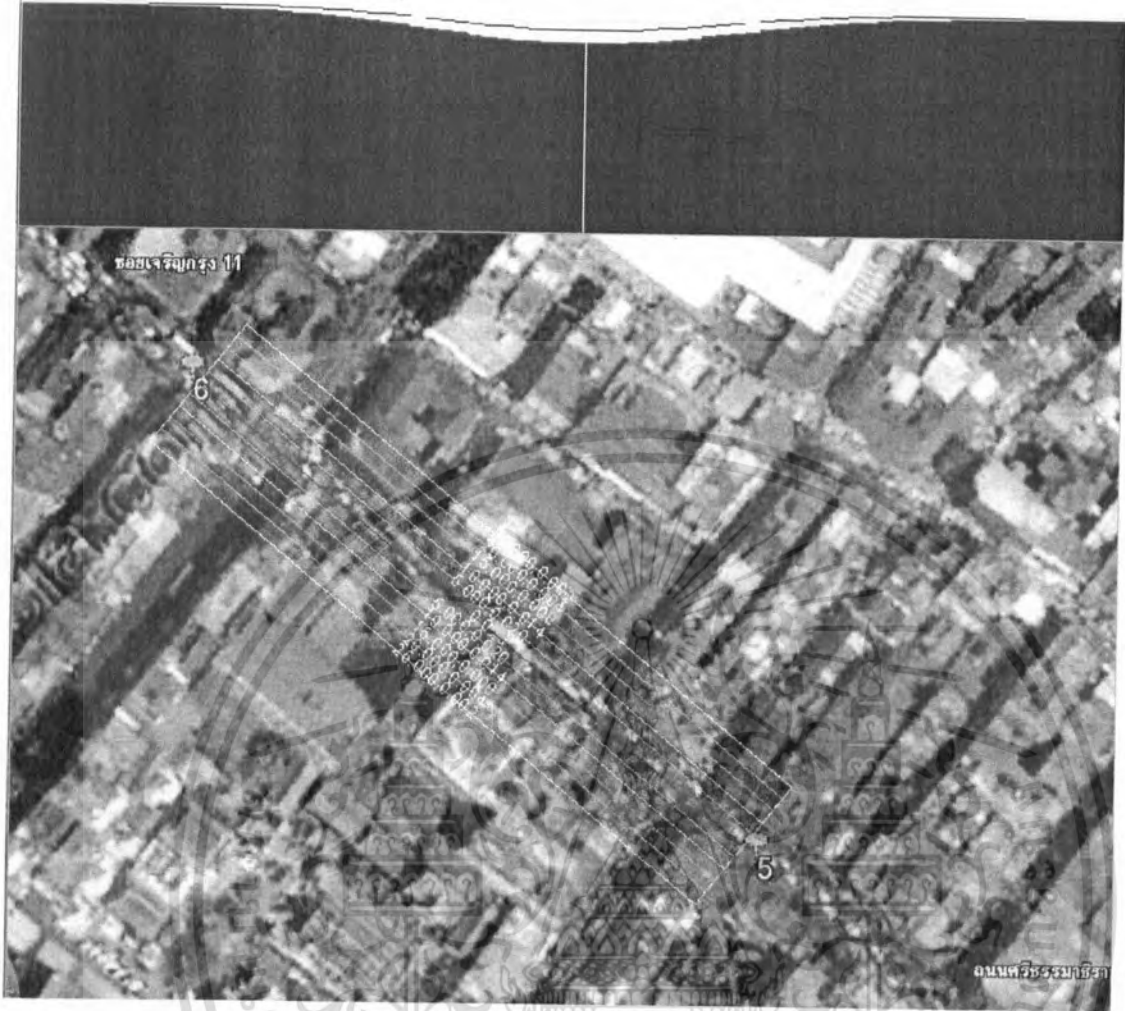
รูปที่ 4.26 แสดงการทอดตัวของอุโมงค์คูในแนวตั้ง
ระหว่างสถานีวัดมังกรถึงสถานีวังบูรพา(จุด 3 ถึงจุด 4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงนี้ 173 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 แสดงการทอดตัวของอุโมงค์คูในแนวตั้ง
ระหว่างสถานีวัดมังกรถึงสถานีวังบูรพา(จุด 4 ถึงจุด 5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 แสดงการทอดตัวของอุโมงค์กูโบในแนวตั้ง
ระหว่างสถานีวัดมังกรถึงสถานีวังบูรพา(จุด 5 ถึงจุด 6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 แสดงการทอดตัวของอุโมงค์คู่ในแนวตั้ง
ระหว่างสถานีวัดมังกรถึงสถานีวังบูรพา(จุด 6 ถึงจุด 7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลง 176 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.3 สถานีวังบูรพาถึงสถานีสนามไชย

แนวอุโมงค์จากสถานีวังบูรพาถึงสถานีสนามไชยจะเป็นอุโมงค์คู่ในแนวตั้ง โดยจะเริ่มบิตตัวเป็นอุโมงค์คู่ในแนวราบที่กิโลเมตรที่ 2+400 จนถึงสถานีสนามไชย

MODE: <input type="button" value="Single"/> <input type="button" value="Detail..."/>	MODE: <input type="button" value="Double"/> <input type="button" value="Detail..."/>
Ground Loss 1(%): <input type="text" value="3"/>	Ground Loss 1(%): <input type="text" value="3"/>
Ground Loss 2(%): <input type="text" value="3"/>	Ground Loss 2(%): <input type="text" value="3"/>
Soil List: <input type="button" value="Sand"/> K: <input type="text" value="0.3"/>	Soil List: <input type="button" value="Sand"/> K: <input type="text" value="0.3"/>
Tunnel Depth (m): <input type="text" value="20"/>	Tunnel Depth (m): <input type="text" value="20"/>
Tunnel 1 Diameter (m): <input type="text" value="9"/>	Tunnel 1 Diameter (m): <input type="text" value="9"/>
Tunnel 2 Diameter (m): <input checked="" type="checkbox"/> 9	Tunnel 2 Diameter (m): <input checked="" type="checkbox"/> 9
Tunnel Dh (m): <input type="text" value="20"/>	Tunnel Dh (m): <input type="text" value="20"/>
Tunnel Dv (m): <input type="text" value="0"/>	Tunnel Dv (m): <input type="text" value="0"/>

รูปที่ 4.30 ข้อมูลการก่อสร้างอุโมงค์ระหว่างสถานีวังบูรพาถึงสถานีสนามไชย

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการทรุดตัวของอุโมงค์คู่ในแนวตั้งระหว่างสถานีวังบูรพาถึงสถานีสนามไชย

ระยะจากแนวอุโมงค์ (m.)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
ค่าการทรุดตัว(mm.)	2	4	8	14	20	23	20	14	8	4	2

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าการทรุดตัวของอุโมงค์คู่ในแนวราบระหว่างสถานีวังบูรพาถึงสถานีสนามไชย

ระยะจากแนวอุโมงค์ (m.)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
ค่าการทรุดตัว(mm.)	1	4	9	15	21	24	21	15	9	4	1



รูปที่ 4.31 แสดงการทรุดตัวของอุโมงค์กูโมเนวตั้ง
ระหว่างสถานีวังบูรพาถึงสถานีสนามไชย(จุด 7 ถึงจุด 8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 แสดงการทรุดตัวของอุโมงค์คูในแนวตั้ง
ระหว่างสถานีวังบูรพาถึงสถานีสนามไชย(จุด 8 ถึงจุด 9)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



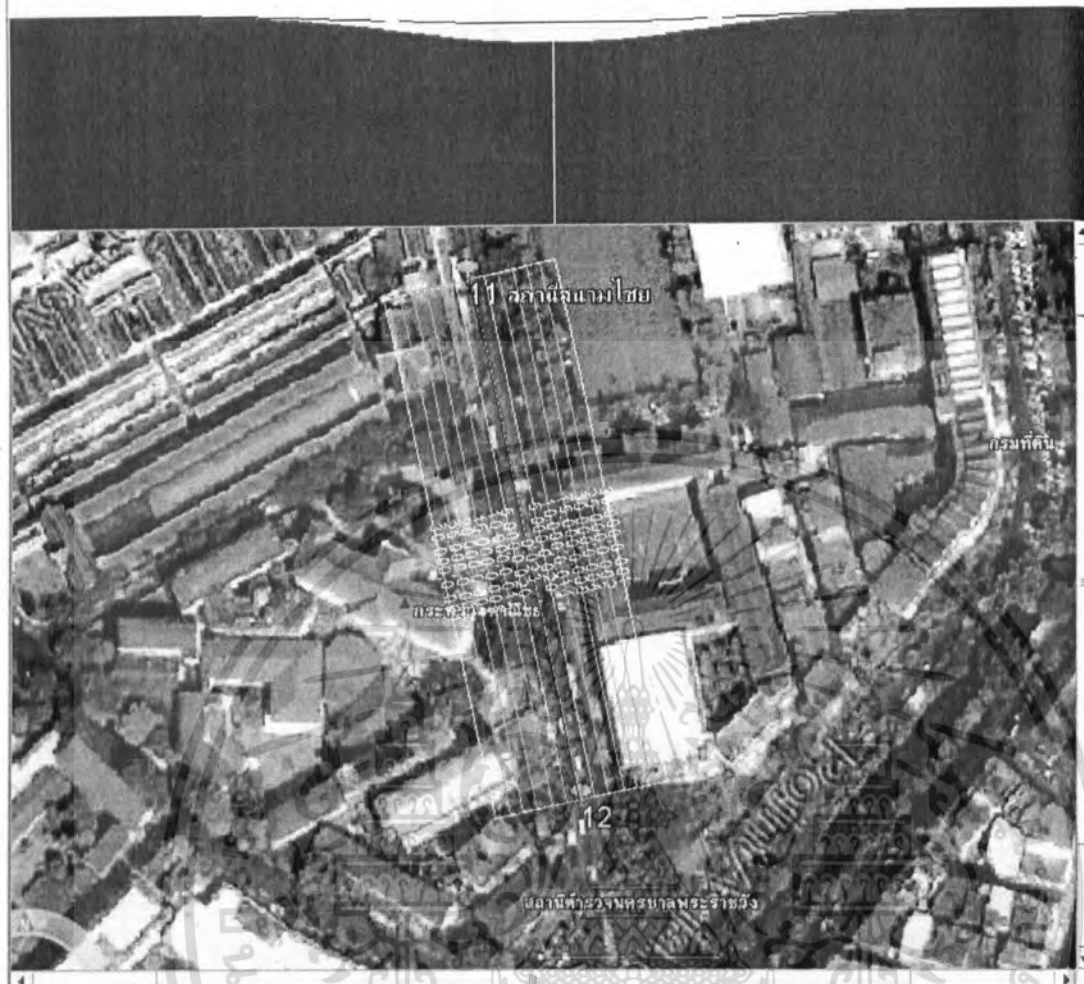
รูปที่ 4.33 แสดงการทรุดตัวของอุโมงค์คูโนแนวราบ
ระหว่างสถานีวังบูรพาถึงสถานีสนามไชย(จุด 9 ถึงจุด 10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 แสดงการทรวดตัวของอุโมงค์คูในแนวราบ
ระหว่างสถานีวังบูรพาถึงสถานีสนามไชย(จุด 10 ถึงจุด 11)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 แสดงการทรุดตัวของอุโมงค์คูในแนวราบ
ระหว่างสถานีวังบูรพาถึงสถานีสนามไชย(จุด 11 ถึงจุด 12)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุปของโครงการพิเศษที่ทำมาทั้งหมด และข้อเสนอแนะที่ได้จากการศึกษาโครงการพิเศษนี้

5.2 บทสรุป

1. ค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากการก่อสร้างอุโมงค์สามารถพิจารณาได้หลายวิธี ซึ่งการนำไปใช้ควรดูที่ความนิยมและความเชื่อถือเป็นหลัก โดยพิจารณาจากความสำเร็จในการก่อสร้างอุโมงค์ที่ผ่านมา
2. เครื่องมือที่ใช้ในการติดตามการเคลื่อนตัวของดินมีหลายชนิด ซึ่งการจะเลือกใช้ได้อย่างถูกต้องเหมาะสมนั้นจำเป็นจะต้องเข้าใจถึงหลักการทำงานของเครื่องมือเหล่านั้นเสียก่อน
3. โปรแกรมวิเคราะห์การทรุดตัวใช้ทฤษฎีของ Peck (1969) ในการคำนวณ เนื่องจากง่ายต่อการใช้งาน และมีลักษณะการทรุดตัวที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจริงจากการก่อสร้างอุโมงค์ในกรุงเทพมหานคร
4. สามารถใช้โปรแกรมวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวเพื่อช่วยในการตัดสินใจในการกำหนดแนวอุโมงค์ และปัจจัยที่มีผลต่อการทรุดตัว เช่น ค่าการสูญเสียมวลดิน ระดับความลึกของอุโมงค์ เป็นต้น
5. วิธีซ้อนทับกราฟสามารถช่วยในการวิเคราะห์ค่าการทรุดตัวที่เกิดอุโมงค์คู่ในแนวราบ และอุโมงค์คู่ในแนวโค้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ
6. การใช้โปรแกรมผู้ใช้ควรเข้าใจถึงทฤษฎีและหลักการคำนวณ เพื่อที่จะสามารถกำหนดค่าตัวแปรต่างๆได้อย่างถูกต้อง

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ในบริเวณที่คาดว่ามีการทรุดตัวมากควรมีการติดตามการเคลื่อนตัวของดินอย่างใกล้ชิด เพราะการทราบถึงการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้ ทำให้เราสามารถทำนายการพังทลายของอุโมงค์และโครงสร้างใกล้เคียง เพื่อที่จะหาวิธีการป้องกันและแก้ไขให้เกิดความเสียหายน้อยที่สุด
2. โปรแกรมวิเคราะห์การทรุดตัวของดินนี้สามารถใช้เป็นต้นแบบเพื่อประโยชน์ในการพัฒนาต่อเนื่องต่อไปได้

บรรณานุกรม

- ชูเกียรติ กิตติภาคากุล ศิวะ วาสาธา และ อลงการ เฉลิมแสนยากร, 2548. การศึกษาการเคลื่อนตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน. ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง.
- มณเฑียร กังศศิเทียม, 2543. กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม : สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรม ชลประทาน ในพระบรมราชูปถัมภ์
- Slope Indicate, 1994. Applications Guide . Second Edition..
- John Dunicliff, 1998. Geotechnical Instrumentation For Monitoring Field Performane.
- Suchatvee Suwansawat, 2002. Earth Pressure Balance (EPB) Shield Tunneling in Bangkok. Doctor of Science in Civil and Environmental Engineering Thesis Massachusetts Institute of Technology.
- Peck, R. B., 1969. Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground. In: Proceedings, 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State of the Art Volume. pp. 225-290.
- Shirlaw, J. N., Doran, S., Bejamin, B., 1988. A Case Study of Two Tunnels Driven in the Singapore 'Boulder Bed' and in Grout Coral Sands. Engineering Geology and Underground Movements, Geological Society Engineering Geology Special Publication, No. 5. pp. 93-103.