



การศึกษาด้านเทคนิคเบื้องต้นของระบบรถไฟฟ้า  
ขนส่งมวลชนใต้ดินสำหรับกรุงเทพมหานคร  
THE TECHNICAL PRELIMINARY STUDY OF THE  
UNDERGROUND MASS RAPID TRANSIT SYSTEM FOR BANGKOK



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคามหัตถ์สู่ตัวรถไฟฟ้ามหานครสายสีแดง  
สาขาวิศวกรรมโยธา  
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2535

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

032513

THE TECHNICAL PRELIMINARY STUDY OF THE  
UNDERGROUND MASS RAPID TRANSIT SYSTEM FOR BANGKOK



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE  
BACHELOR OF CONSTRUCTION ENGINEERING  
KING MONGKUT S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1992

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

032513

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาด้านเทคนิคเบื้องต้นของระบบรถไฟฟ้า  
ขนส่งมวลชนใต้ดินสำหรับกรุงเทพมหานคร

THE TECHNICAL PRELIMINARY STUDY OF THE UNDERGROUND  
MASS RAPID TRANSIT SYSTEM FOR BANGKOK

นักศึกษา

นายธีรเดช ตรีทิพย์บุตร รหัสประจำตัว 321130

หลักสูตร

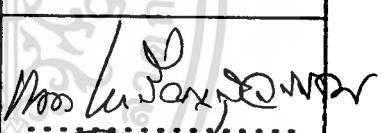
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมการก่อสร้าง

ภาควิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา

Prof. Dr. Felix E.H. Haser

คณะกรรมการการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. แดง เจริญสุวรรณ อาจารย์ จักรพงษ์ พงษ์เพ็ง อาจารย์ เกษม อมันตกุล	 ..... ..... .....

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

  
(นายสุรัตน์ หวังเจริญ)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 10 เดือน พ.ย. พ.ศ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาด้านเทคนิคเบื้องต้นของระบบรถไฟฟ้า ขนส่งมวลชนใต้ดินสำหรับกรุงเทพมหานคร
นักศึกษา	นายธีรเดช ศรีทิพบุตร
อาจารย์ที่ปรึกษา	Prof.Dr. Felix E.H. Haser
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการก่อสร้าง
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2535

### บทคัดย่อ

ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนใต้ดินได้รับการกล่าวถึงมาเป็นเวลานานแล้ว แต่ยังไม่เคยมีการนำเรื่องนี้มาพิจารณากันอย่างจริงจัง ทั้งนี้สาเหตุเนื่องมาจากความเชื่อที่ว่า ดินกรุงเทพฯ ไม่สามารถก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินได้ เพราะเป็นดินอ่อนนั้น เป็นความไม่เข้าใจ และไม่ทราบข้อเท็จจริงเกี่ยวกับสภาพดินของกรุงเทพฯ ดังนั้นโครงการพิเศษฉบับนี้จึงได้นำเอาปัญหานี้มาทำการศึกษาว่าแท้จริงแล้วคุณสมบัติ หรือสภาพของดินกรุงเทพฯ นั้นเป็นอย่างไร สามารถก่อสร้างอุโมงค์ในชั้นดินของกรุงเทพฯ ได้หรือไม่ วิธีการก่อสร้างอุโมงค์แบบใดที่เหมาะสมกับสภาพดินกรุงเทพฯ และจะเกิดผลกระทบอย่างไรบ้างเมื่อทำการก่อสร้าง ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะเริ่มจากการวิเคราะห์สภาพดิน แล้วทำการศึกษาวิธีการก่อสร้างอุโมงค์แบบต่างๆ เพื่อเลือกวิธีที่เหมาะสมที่สุด นำวิธีการนั้นมาศึกษาทดลองเอ็ยต์อีกครั้งเพื่อทำการเปรียบเทียบในข้อปลั๊กย่อยต่างๆ เหตุผลที่ทำการศึกษา เรื่องระบบขนส่งมวลชนใต้ดินนี้ ประการหนึ่งคือ ปัญหาการจราจรติดขัดของกรุงเทพฯ ในขณะนี้ กำลังต้องการระบบขนส่งมวลชนเข้ามาแก้ไข และระบบขนส่งมวลชนใต้ดินก็เป็นอีกระบบหนึ่งที่สามารถช่วยแก้ปัญหาเหล่านี้ได้

**Project Title**            The Technical Preliminary Study of The  
     Underground Mass Rapid Transit System  
**Student**                     Mr.Theeradej Treetipbut  
**Project Advisor**         Prof.Dr. Felix E.H. Haser  
**Level of study**            Bachelor of Engineering  
**Department**              Civil Engineering Faculty of Engineering  
     King Mongkut's Institute of Technology  
     Ladkrabang  
**Academic Year**            1992

### Abstract

The discussion concerning a Mass Rapid Transit System for Metropolis of Bangkok has been going on for a long time . But unfortunately the notion an Underground Mass Rapid Transit System has never been thought of seriously. Because the most people have believed that it's the impossible to tunnel in Bangkok subsoils and soft clay is the biggest obstruction for tunneling in Bangkok. So, this special project chosen to clear this problem, proposed to study the soil conditions , and wanted to know that the tunneling can occur in Bangkok soil, or not. Which are the suitable method for tunneling in Bangkok ? The final step is studying in details of each methods to find the different . One of reasons introduced me to study about the UMRTS is the crisis traffic jam in Bangkok, want some MRTS to release , and The UMRTS is the suitable one .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กิตติกรรมประกาศ

รายงานการศึกษาโครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีทั้งนี้เพราะได้รับความเมตตา  
อนุเคราะห์จากทุกๆฝ่ายด้วยดีตลอดมา จึงจะลืมนิได้ที่จะต้องขอขอบพระคุณและขอมอบคุณความดี  
ให้แก่ บุคคล และหน่วยงานที่ให้การอนุเคราะห์ ตลอดจนผู้ให้คำแนะนำในด้านต่างๆดังต่อไปนี้คือ  
Prof Dr. Felix E.H. Haser อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำแนะนำ และให้ข้อ  
มูลที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อโครงการพิเศษฉบับนี้

ท่านผู้อำนวยการกอง ก่อสร้างงานโยธา การประปานครหลวง  
คุณ วิษณุ สาขพารณีย์ วิศวกรการประปานครหลวง  
คณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน  
บิดา มารดา ผู้ให้ชีวิต โอกาส ตลอดจนถึงกำลังใจและความปรารถนาดีเสมอมา และ  
ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน พี่ๆและเพื่อนๆที่อำนวยความสะดวก  
ให้คำแนะนำ และช่วยเหลือสนับสนุนในด้านต่างๆจนเสร็จสิ้นโครงการ

ผู้จัดทำ

นายธีรเดช ศรีทิพย์บุตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	V
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ	1
1.2 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่เกี่ยวข้อง	1
1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ	2
1.4 วิธีที่ใช้ในการดำเนินโครงการพิเศษ	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2. สภาพทางธรณีวิทยาของดินกรุงเทพฯ	
2.1 ลักษณะทางกายภาพของดินกรุงเทพฯ	3
2.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินกรุงเทพฯ	5
2.3 การเจาะสำรวจดินเพื่อทดสอบ	11
2.4 ความอ่อนไหวของดิน	23
2.5 การกระจายหน่วยแรงในดิน	25
3. การก่อสร้างอุโมงค์	
3.1 ประวัติความเป็นมาของการก่อสร้างอุโมงค์	28
3.2 วัตถุประสงค์ของการก่อสร้างอุโมงค์	31
3.3 การก่อสร้างอุโมงค์แบบต่างๆ	31
3.4 การขุดอุโมงค์ด้วยวิธี Tunnel-Boring Machine	44
3.5 ประเภทของการขุดอุโมงค์ด้วยการใช้ Shield	49
3.6 รูปร่างอุโมงค์แบบต่างๆ	53

3.7	การวิเคราะห์และออกแบบผนังอุโมงค์	56
3.8	ระบบการควบคุมอัตโนมัติ	63
3.9	บ่อก่อสร้าง	66
3.9	ประสบการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินที่กรุงเทพมหานคร ประเทศอิตาลี	72
3.10	การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินที่เมืองแอ่งกัเวิร์บ ประเทศเบลเยียม	75
3.11	ประสบการณ์งานชุดอุโมงค์ในดินกรุงเทพฯ	78
3.12	ความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ	85
4.	<b>การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธี HYDROSHIELD</b>	
4.1	ลักษณะการทำงาน	89
4.2	การป้องกันผิวหน้าของอุโมงค์	91
4.3	การควบคุมแรงดันของของเหลว	91
4.4	ระบบการขนถ่ายดิน	91
4.5	การทำงานในอุโมงค์ที่ระดับความดันบรรยากาศ	93
4.6	สภาวะการทำงานที่เหมาะสม	93
4.7	การติดตั้งแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็ก	94
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำใต้ดิน กับแรงดันของ Slurry	95
4.10	โครงการรถไฟฟ้าลาวาลิน	96
4.11	โครงการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงเทพฯ (BTSC)	98
4.12	ข้อเปรียบเทียบด้านค่าใช้จ่ายของระบบรถไฟฟ้า ขนส่งมวลชนใต้ดินกับระบบอื่น	102
4.13	กระบวนการคัดเลือกชนิดของเครื่องจักร	104
4.14	ข้อพิจารณาในการเลือกเครื่องจักร	105
4.15	ตารางการเปรียบเทียบระหว่าง Slurry shield กับ Earth Pressure Balanced shield	106
5.	<b>บทสรุปและข้อเสนอแนะ</b>	107
6.	<b>บทอ้างอิง</b>	110
7.	<b>ภาคผนวก</b>	111

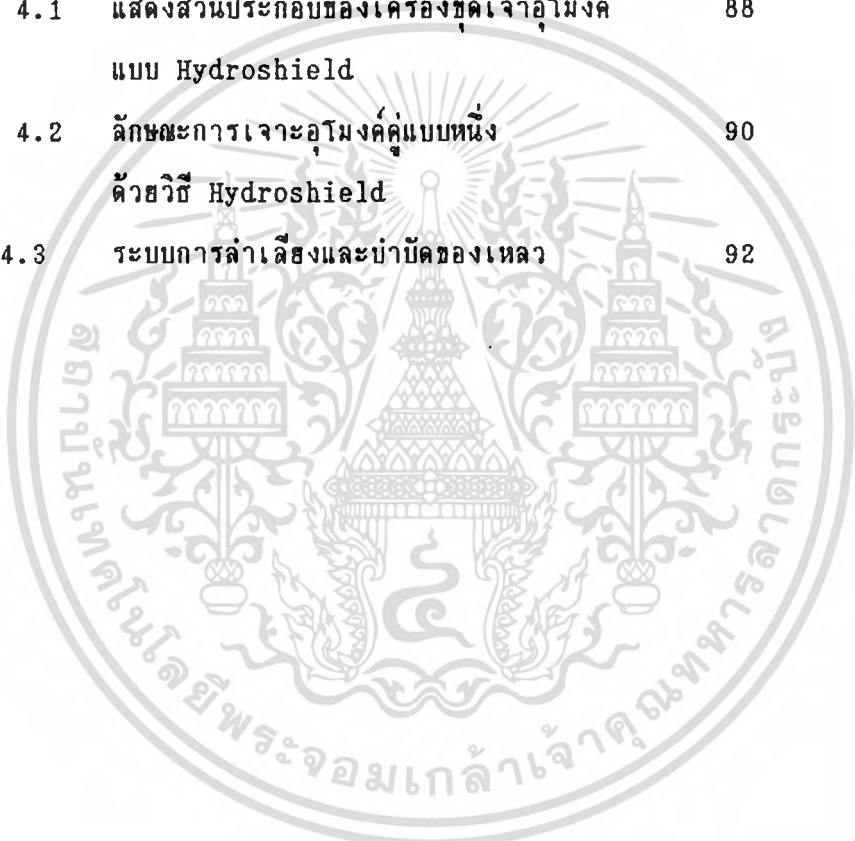
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	บ่อกทดสอบ	13
รูปที่ 2.2	ส่วนมือ	14
รูปที่ 2.3	การเจาะฉีดล้างหาตัวอย่าง	15
รูปที่ 2.4	กระบอกเก็บดิน	17
รูปที่ 2.8	ตัวอย่างรูปตัดของชั้นดิน	21
รูปที่ 2.9	ตัวอย่างผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ	22
รูปที่ 2.10	หน่วยแรงใต้ดินที่ระดับลึก	26
รูปที่ 2.11	การกระจายหน่วยแรงในแนวตั้ง	26
รูปที่ 3.1	เครื่องจักรสำหรับการเจาะอุโมงค์หินยุคเริ่มต้น	29
รูปที่ 3.2	เครื่องจักรสำหรับการเจาะอุโมงค์ที่ได้รับ รับการปรับปรุงให้ทันสมัยขึ้น	30
รูปที่ 3.3	ขบวนการเจาะอุโมงค์แบบ Drilling & Blasting	42
รูปที่ 3.4	การใช้ Shield ในการขุดเจาะอุโมงค์แบบแห้ง	43
รูปที่ 3.5	ตัวอย่างเครื่องเจาะอุโมงค์แบบ TBM	45
รูปที่ 3.6	อุโมงค์รูปทรงแบบ Circular	54
รูปที่ 3.7	อุโมงค์รูปทรงแบบ Vertical Sidewall	54
รูปที่ 3.8	อุโมงค์รูปทรงแบบ Horseshoe	54
รูปที่ 3.9	อุโมงค์รูปทรงแบบ Basket Handle	55
รูปที่ 3.10	น้ำหนักที่กระทำบนผนังอุโมงค์เนื่องจากแรงดันดิน	57
รูปที่ 3.11	รูปร่างหน้ากระทำและลักษณะการเสียรูป ของผนังอุโมงค์	57

รูปที่ 3.12	รูปแสดงความสัมพันธ์ของค่าโมเมนต์ดัดกับการเสี้ยวรูปของผนังอุโมงค์	59
รูปที่ 3.13	รูปแสดงชิ้นส่วนของผนังอุโมงค์และการเชื่อมยึด	59
รูปที่ 3.14	ระบบการประมวลผลข้อมูลการขุดอุโมงค์ด้วยไมโครคอมพิวเตอร์	64
รูปที่ 3.15	การทำบ่อก่อสร้างด้วยวิธี Raising method	68
รูปที่ 3.16	รูปตัดของอุโมงค์กับการทรุดตัวของดิน	76
รูปที่ 4.1	แสดงส่วนประกอบของเครื่องขุดเจาะอุโมงค์แบบ Hydroshield	88
รูปที่ 4.2	ลักษณะการเจาะอุโมงค์แบบหนึ่งด้วยวิธี Hydroshield	90
รูปที่ 4.3	ระบบการลำเลียงและบำบัดของเหลว	92



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตั้งแต่อดีตจนกระทั่งปัจจุบันโครงการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินถูกมองว่าเป็นงานที่ยุ่งยาก ต้องใช้เงินลงทุนสูง และต้องใช้เทคโนโลยีสูงมาก อีกทั้งยังไม่เหมาะสมกับสถานการณ์ก่อสร้างในประเทศไทย แต่เมื่อปัญหาทางด้านการจราจรในกรุงเทพฯ เริ่มเข้าสู่ภาวะวิกฤตจึงจำเป็นต้องหาวิธีการที่มีประสิทธิภาพมาแก้ปัญหาดังกล่าว นั่นก็คือต้องมีระบบขนส่งมวลชนที่มีประสิทธิภาพ และมีความเหมาะสม ดังนั้นระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนใต้ดินจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะนำมาใช้แก้ปัญหา ซึ่งน่าจะมีความเหมาะสมเพราะสามารถบรรทุกผู้โดยสารได้คราวละหลายๆ และไม่ค่อยมีปัญหาด้านการเวนคืนที่ดินสำหรับการก่อสร้างซึ่งมีราคาสูงมากขึ้นเรื่อยๆ ในปัจจุบัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการศึกษาและประเมินผลข้อมูลทางด้านเทคนิคการก่อสร้างต่างๆ เพื่อใช้เป็นส่วนประกอบในการพิจารณาตัดสินใจ

#### วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านเทคนิคของระบบการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินที่เหมาะสมกับดินกรุงเทพฯ และศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของดินกรุงเทพฯ

#### ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในโครงการพิเศษ

โครงการพิเศษเรื่องการศึกษาและประเมินผลทางด้านเทคนิคเบื้องต้นของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนใต้ดินนี้ ควรจะต้องมีการศึกษาและประเมินผลข้อมูลอย่างจริงจัง ทั้งนี้เนื่องจากสภาพปัญหาการจราจรของกรุงเทพฯ อยู่ในขั้นวิกฤต ที่ดินมีราคาแพง และมีแนวโน้มของการขยายตัวในอัตราที่สูง ควรที่จะมีระบบขนส่งมวลชนที่มีประสิทธิภาพ ไม่มีปัญหาหรือผลกระทบต่อการจราจรในขณะก่อสร้างมากนัก ใช้ที่ดินในการก่อสร้างน้อย สอดคล้องกับการขยายตัวของกรุงเทพฯ และต้องไม่ทำลายทัศนียภาพอันสวยงามและทรงคุณค่าของกรุงเทพฯ ซึ่งการดำเนินงานต้องอาศัยข้อมูลจากสภาพความเป็นจริง ทั้งด้านเทคโนโลยีการก่อสร้าง สภาพสังคม สภาพเศรษฐกิจ และผลกระทบต่างๆ ที่จะเกิดขึ้น

## ขอบเขตของโครงการพิเศษ

โครงการพิเศษ เรื่องนี้จะครอบคลุมหัวข้อการศึกษาดังนี้

1. เทคโนโลยีทางการก่อสร้างอุโมงค์
2. วิธีการขุดเจาะและการก่อสร้างอุโมงค์ที่เหมาะสมสำหรับดินกรุงเทพฯ

## วิธีที่ใช้ในการดำเนินโครงการพิเศษ

### 1. ศึกษาวิธีการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน

- 1.1 ศึกษาความเป็นมาของระบบการขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดิน
- 1.2 ศึกษาวิธีการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยวิธีการต่างๆ
- 1.3 ศึกษาการก่อสร้างและปัญหาในการก่อสร้างอุโมงค์ในประเทศต่างๆ

### 2. ศึกษาวิธีการขุดเจาะและการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินที่เหมาะสมกับดินกรุงเทพฯ

- 2.1 ศึกษาสภาพทางกายภาพของดินกรุงเทพฯ
- 2.2 ศึกษาวิธีการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินที่เหมาะสมกับดินกรุงเทพฯ
- 2.3 ศึกษาความเป็นมาและพัฒนาการของระบบการขุดเจาะอุโมงค์ที่เหมาะสมกับดินกรุงเทพฯ
- 2.4 ศึกษาค่าใช้จ่ายในการดำเนินการก่อสร้างอุโมงค์และระบบขนส่งมวลชนใต้ดิน พร้อมทั้ง เปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนระดับ

## ผลที่คาดว่าจะได้รับ

หลังจากที่ได้ทำการศึกษาและประเมินผลแล้ว สามารถนำเอาข้อมูลที่ได้จากการศึกษา การวิเคราะห์ เปรียบเทียบ และข้อดีข้อเสียต่างๆไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นประกอบการพิจารณา และตัดสินใจในการดำเนินโครงการก่อสร้างระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนประเภทต่างๆของรัฐบาล เพื่อใช้แก้ไขปัญหาการจราจรที่ประสบอยู่ในปัจจุบัน และเตรียมพร้อมสำหรับการขยายตัวของ กรุงเทพฯ อีกทั้งยังช่วยทำให้บุคคลทั่วไปมีความเข้าใจที่ถูกต้องและมองเห็นปัญหาการก่อสร้างและผลกระทบได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

## บทที่ 2

### สภาพทางธรณีวิทยาของดินกรุงเทพฯ

กรุงเทพมหานคร เมืองหลวงของประเทศไทย ตั้งอยู่บนสองฝั่งของแม่น้ำเจ้าพระยา และอยู่เหนือจากอ่าวไทยขึ้นมาประมาณ 25 กิโลเมตร เนื่องจากการพัฒนาทางด้านธุรกิจขยายตัวอย่างรวดเร็ว มีการก่อสร้างอาคารสูง เป็นจำนวนมาก สะพาน ทางด่วนยกระดับ และระบบรถไฟฟ้ายกระดับ ดังนั้นข้อแนะนำทางด้านธรณีวิทยาจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อโครงการต่าง ๆ และโครงการใหญ่ ๆ ส่วนมากจะทำการสำรวจข้อมูลทางธรณีวิทยา โดยเฉพาะของแต่ละโครงการเลขที่เดียว

#### ลักษณะทางกายภาพของดินกรุงเทพฯ

ชั้นดินในกรุงเทพฯ เกิดจากการทับถมของ Quaternary Age แบ่งเป็นชั้นดินเหนียวและดินทรายที่สังเกตเห็นสามารถแยกออกเป็น 5 ชั้น คือ

#### 1. ชั้นดินเหนียวอ่อน (The Soft Clay Layer)

ชั้นดินเหนียวอ่อนเป็นชั้นที่อยู่บนสุด โดยเริ่มจากชั้นผิวดิน ดินชั้นนี้ส่วนมากจะราบตามแนวนอน โดยความหนาเฉลี่ยของดินชั้นนี้ คือ 15 เมตร และเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่างความลึก 10 - 20 เมตร โดยปกติแล้วดินชั้นนี้จะมีความหนาทิศด้านทิศเหนือน้อยกว่าด้านทิศใต้ คือทางด้านเหนือจะหนาน้อยกว่า 10 เมตร และทางด้านทิศใต้จะหนามากกว่า 19 เมตร อย่างเช่นพื้นที่เขตบางเขน พระโขนง และภาษีเจริญ มีความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนประมาณ 19 เมตร และมีชั้นของดินทราย หรือดินตะกอนปะปนอยู่โดยทั่วไป ในดินชั้นดินเหนียวอ่อนจะมีชั้นส่วนของเปลือกหอยน้ำเค็มที่อาศัยอยู่ในทะเล เหมือนกับหอยที่อาศัยอยู่ในทะเลอ่าวไทยในปัจจุบัน เช่นเดียวกับเปลือกที่มีให้เห็นในดินชั้นนี้ เพื่อเป็นการยืนยันว่าดินบริเวณนี้เคยเป็นทะเลมาก่อนในอดีต (RAU 1981)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ชั้นดินเหนียวแข็ง (The Stiff Clay Layer)

ชั้นดินเหนียวแข็งวางตัวเป็นแนวยาวแต่ไม่ตรงอยู่ที่ชั้นดินเหนียวอ่อน ดินชั้นนี้มีระยะความลึกโดยทั่วไปจากระดับ 15 เมตร ถึง 27 เมตร ความหนาเฉลี่ยประมาณ 12 เมตร และอาจเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 9 - 15 เมตร ในพื้นที่ของเขตพญาไท ชั้นบนสุดของดินชั้นนี้อยู่ที่ระดับ 17 เมตร และชั้นล่างสุดอยู่ที่ระดับ 29 เมตร นับว่าบริเวณนี้เป็นพื้นที่ที่มีความหนาของชั้นดินเหนียวหนาที่สุดแห่งหนึ่งในกรุงเทพฯ ซึ่งความลึกของชั้นล่างสุดจะอยู่ที่ระดับ 21 ถึง 29 เมตร การเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นดินเหนียวจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งจึงไม่มีรูปแบบที่แน่นอน

## 3. ชั้นทรายชั้นที่หนึ่ง (The upper Bangkok sand)

ชั้นทรายนี้วางตัวไม่เป็นแนวตรงใต้ชั้นดินเหนียวแข็ง ความลึกของชั้นนี้อยู่ที่ระดับประมาณ 20 ถึง 35 เมตร โดยจะมีชั้นของ sandy clay หรือ clayey sand คั่นอยู่ระหว่างชั้นของดินเหนียวแข็ง และชั้นทรายชั้นที่หนึ่งในบางแห่ง ความลึกปกติของชั้นนี้ประมาณ 27 เมตร อาจจะไม่เปลี่ยนแปลงได้ในช่วง 21 - 29 เมตร มีความหนาประมาณ 10 เมตร โดยเฉลี่ย ในพื้นที่ทางด้านทิศใต้ของ อ่าเภอปากเกร็ด ชั้นล่างสุดของดินชั้นนี้ลึกถึง 39 เมตร ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับ การเจาะสำรวจว่าทำการเจาะสำรวจที่หลุมและการเจาะสำรวจกระจายไปตามพื้นที่ต่าง ๆ ทั่วถึงหรือไม่

## 4. ชั้นดินเหนียวแข็งมาก (The Hard clay layer)

ใต้ชั้นทรายนชั้นแรกลงไปนั้นยังมีชั้นดินเหนียวที่มีความแข็งมาก (Hard silty clay layer) ความหนาของดินเหนียวชั้นนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามแต่ละพื้นที่ ในบางพื้นที่ก็ไม่พบดินชั้นนี้ โดยทั่วไปแล้วดินเหนียวชั้นนี้จะอยู่ลึกที่ระดับ 20 ถึง 30 เมตร ในพื้นที่ทางด้านตะวันออกของกรุงเทพฯ พบว่า ดินเหนียวชั้นนี้มีความหนามากกว่าที่อื่น ๆ ในบางครั้งของการเจาะสำรวจก็พบชั้นทรายนบาง ๆ ปะปนอยู่ในดินเหนียวชั้นนี้เหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5. ชั้นทรายชั้นที่ 2 (The second sand layer)

ในบางพื้นที่ชั้นทรายชั้นที่ 2 จะติดกับชั้นทรายชั้นที่ 1 โดยตรง จาก diagram ของพื้นที่ในกรุงเทพฯ แสดงให้เห็นว่า ชั้นทรายทั้งสองนั้นอยู่ติดกันในบริเวณทิศเหนือของกรุงเทพฯ อย่างไรก็ตาม ในบางพื้นที่ชั้นทรายทั้งสองก็แยกออกจากกัน ชั้นทรายชั้นนี้จะพบที่ระดับความลึก 43 - 58 เมตร ความลึกโดยเฉลี่ยประมาณ 45 เมตร และอาจเปลี่ยนแปลงได้ในช่วง 43 - 58 เมตร ความหนาเฉลี่ยประมาณ 12 เมตร อาจเปลี่ยนแปลง 4 ถึง 20 เมตร โดยปกติแล้วดินทางด้านตะวันตกเฉียงเหนือและตะวันออกเฉียงใต้ของกรุงเทพฯ dipping ที่ความหนาเท่าเทียมกัน ความลึกของปลายสุดของดินชั้นนี้ประมาณ 55 เมตร หรืออาจจะอยู่ในช่วง 51 ถึง 63 เมตร บริเวณที่ลึกที่สุดที่สำรวจพบ คือ พื้นที่ในจังหวัดนนทบุรี มีความลึก 63 เมตร

### คุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดิน

(Engineering Properties of Subsoil)

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพของแต่ละพื้นที่ ในที่นี้จะเป็นการแสดงผลการศึกษาและวิเคราะห์ เฉพาะในชั้นดินที่สำคัญ ๆ เท่านั้น โดยแสดง profiles และ fence diagram ของดินในบางชั้นที่มีความสำคัญ ดังนี้คือ

### 1. ชั้นดินเหนียวอ่อน (The soft clay layer)

ดินชั้นดินเหนียวอ่อน แบ่งออกเป็นชั้นย่อย ๆ ได้อีก 2 ชั้น คือ

1) The top weathered clay เป็นชั้นดินเหนียวที่อยู่ด้านบนสุดของดินทุก ๆ ชั้น มีความหนาประมาณ 5 เมตร ดินเหนียวชั้นนี้ได้รับผลกระทบจากขบวนการทางภูมิอากาศ (weathering Processes) เช่น การขึ้น ๆ ลง ๆ ของระดับน้ำใต้ดิน, leaching, การเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้า (ion) และ precipitation of cementing Agent ซึ่งเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาเหตุให้เกิด a hard shallaw crust และทำให้เกิดการทรุดตัวในอัตราที่สูงด้วย

2) The Soft clay layer ซึ่งเป็นชั้นที่อยู่ใต้ชั้น weather ลงไป ดินเหนียวชั้นนี้มีสี oliver or medium to dark gray เทาอ่อน ๆ ปะปนไปด้วยเศษซากเปลือกหอยและซากพืชที่เน่าเปื่อยแร่ธาตุที่สำคัญของดินชั้นนี้คือ Kaolinite, illite และ Monmorillonite มีปริมาณน้ำในมวลดิน (water content) 60 - 80 % หรือมากกว่านี้ plastic limit 25 - 35 % และ liquid limit 85 - 100 % มีค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ต่ำมาก คือ ประมาณ  $25 \text{ KN/m}^2$

### 2. ชั้นดินเหนียวแข็ง (The stiff clay layer)

เป็นดินสีน้ำตาลอ่อนถึงสีน้ำตาลเข้ม ในบางพื้นที่ดินจะมีสีแดงและสีเหลืองแทรกปะปนอยู่ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นถึง Subaerial oxidation before the deposition ดินชั้นนี้ถูกจัดให้อยู่ในประเภท CH Clay ค่ากำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength) จะมีค่าขึ้นตามความลึกของดิน ค่า N-value (SPT) ประมาณ 5 - 20 และ compressive strength 100 - 200  $\text{KN/m}^2$  แร่ธาตุที่สำคัญที่เป็นองค์ประกอบของดินชั้นนี้คือ Kaolinite, illite, Monmorillonite มีปริมาณน้ำในมวลดิน 25 - 40 % plastic limit 20 - 30 % และ liquid limit 35 - 60 %

### 3. ชั้นทรายชั้นที่หนึ่ง (The first sand layer)

ดินชั้นนี้มีสีเทาอ่อนจนถึงน้ำตาลอ่อน เมื่อดินเป็นดินเม็ดละเอียด ขนาดปานกลางปะปนอยู่ด้วยร่องทรายเม็ดใหญ่ (Traces of some coarse sand) ชั้นทรายชั้นแรกนี้จัดอยู่ในประเภท silty sand (SM) ความแน่นของดินจะอยู่ระหว่างแน่นปานกลางถึงแน่นมาก คือ มีค่า N-value (SPT) 30 - 60 มีปริมาณน้ำในมวลดิน (water content 20 %) มีความหนาแน่นประมาณ 2  $\text{ตัน/ม}^3$

#### 4. ชั้นดินเหนียวแข็งมาก (The hard clay layer)

ดินชั้น hard clay หรือ second stiff clay นี้มีการทรุดตัวเป็นปกติสัมพันธ์กับ shear strength ที่มีค่าสูงและ compressibility ต่ำมีค่า N-value (SPT) 20 - 50

#### 5. ชั้นทรายชั้นที่สอง (The second sand layer)

คุณสมบัติของดินชั้นนี้ใกล้เคียงกับดินชั้นทรายชั้นที่หนึ่ง (The first sand layer) มาก แต่จะต่างที่ดินชั้นนี้มีค่า N-value ที่สูงกว่า คือ 50 - 80

#### อันตรายจากดิน (Geological Hazard)

อันตรายต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้นโดยมีความเกี่ยวข้องกับธรณีวิทยา เช่น แผ่นดินไหว น้ำท่วม และ land subsidence นานมาแล้ว โครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ในกรุงเทพฯ มักจะให้ความสำคัญกับอันตรายต่าง ๆ ดังกล่าว และมักจะนำเอาไปคิดรวมกับแผนการก่อสร้างเพื่อป้องกันความเสียหายอันจะเกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้าง หรือหลังจากการก่อสร้าง

#### ปัญหาน้ำท่วม (flooding)

จากการตรวจดูบันทึกเรื่องน้ำท่วม สามารถสรุปได้ว่า สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดน้ำท่วมนั้นคือ การตกของฝนที่หนักมาก พื้นที่กรุงเทพฯ เป็นที่ราบต่ำ และระดับน้ำในแม่น้ำเจ้าพระยาสูงขึ้น และไหลทะลักเข้ามาในพื้นที่ที่มีการทรุดตัวของชั้นดิน การระบายน้ำที่ไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ และสภาพการเปลี่ยนแปลงของการใช้ประโยชน์ที่ดิน (JICA 1984)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทรุดตัวของชั้นดิน (Land Subsidence)

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่าพื้นที่ที่มีการทรุดตัวมากที่สุด อยู่ทางฝั่งตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งมีค่าการทรุดตัวสูงสุดคือ 67.9 cm/5.5 ปี จากบันทึกของข้อมูลการทรุดตัวเมื่อ 10 ปี ที่ผ่านมาพบว่า บางพื้นที่มีอัตราการทรุดตัวเกิน 70 เซนติเมตร คือ บริเวณบางกะปิ พระโขนง และทางด้านทิศใต้ของ อำเภอปากเกร็ด มีอัตราการทรุดตัว 4.2 cm/ปี สำหรับทางฝั่งตะวันตกของแม่น้ำเจ้าพระยา มีอัตราการทรุดตัวสูงสุดที่พื้นที่บางขุนเทียน เท่ากับ 2.9 cm/ปี สาเหตุที่ทำให้เกิดการทรุดตัวของชั้นดิน มี 3 ข้อใหญ่ ๆ คือ

1. การสูบน้ำบาดาลในระดับลึก
2. การทรุดตัวเนื่องจากน้ำหนักของชั้นดินเอง
3. การทรุดตัวเนื่องจากได้รับน้ำหนักบรรทุก Surcharge

## แหล่งน้ำ (Hydrology)

แหล่งน้ำใช้ของพื้นที่กรุงเทพฯ ได้จาก 2 แหล่งใหญ่ ๆ คือ แหล่งน้ำผิวดิน และแหล่งน้ำใต้ดิน โดยเฉพาะกรุงเทพฯ เป็นพื้นที่ที่มีคลองอยู่เป็นจำนวนมาก และการควบคุมปริมาณน้ำไม่ว่าจะเป็นน้ำสำหรับอุปโภคบริโภคหรือการระบายน้ำเสีย ส่วนใหญ่จะอาศัยแม่น้ำเจ้าพระยาเป็นหลัก

แหล่งน้ำผิวดิน นั้นส่วนใหญ่จะได้จากแม่น้ำเจ้าพระยาและลำคลองต่าง ๆ ที่กระจายอยู่ทั่วไปในพื้นที่กรุงเทพฯ และทั้งสองแหล่งนี้เป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบน้ำบาดิน ความกว้างของแม่น้ำเจ้าพระยาเท่าที่เคยมีผลสำรวจเก็บข้อมูลไว้ จะมีความกว้างอยู่ในช่วง 100 - 500 เมตร ความลาดชันของท้องน้ำประมาณ 1 : 80,000 และคลองในพื้นที่กรุงเทพฯ สามารถแจกแจงเป็นความหนาแน่นต่อพื้นที่ได้กว่า 1 กิโลเมตร/ตารางเมตร

แหล่งน้ำใต้ดิน แหล่งน้ำใต้ดินนี้จะอยู่ในชั้นของทรายชั้นที่ 1 และชั้นทรายชั้นที่ 2 มีลักษณะเป็นน้ำกร่อย ดังนั้นน้ำมากกว่า 1 ใน 3 ของการบริโภคในเขตนครหลวงจะถูกสูบน้ำขึ้นมาจากแหล่งน้ำใต้ดินดังกล่าว คุณสมบัติทางเคมีของน้ำใต้ดินจะประกอบไปด้วย สารประกอบคลอไรด์ และ  $\text{HCO}_3$  ของธาตุแคลเซียม และ (Sodium) โซเดียม ซึ่งเป็นของแข็งหรือสารแขวนลอย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ความเหมาะสมของคุณสมบัติทางกายภาพของดินกรุงเทพฯ ต่อการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน

ดินใต้กรุงเทพมหานครนั้นเป็นที่กล่าวขานกันมานานแล้วว่า มีสภาพเป็นดินเหนียวอ่อนมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่ำ โดยเฉพาะชั้นดินที่อยู่ชั้นบนสุดมีความหนาประมาณ 15 ม. นั้นถูกจัดว่าเป็นชั้น Soft Clay Layer ซึ่งข้อมูลเบื้องต้นยังไม่สามารถระบุได้ว่ากรุงเทพมหานครเหมาะสมที่จะทำการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินหรือไม่ เนื่องจาก

จากการศึกษาวิจัยข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินของกรุงเทพมหานครที่ได้รับมาจากแหล่งข้อมูลต่างๆหลายแห่ง สามารถสรุปสภาพทางกายภาพของดินใต้กรุงเทพมหานครได้ว่า

1. ดินชั้นบนสุดหรือชั้นผิวดินเป็นชั้นที่มีความลึกประมาณ 5 เมตร ซึ่งส่วนมากเป็นสารอินทรีย์ที่เกิดจากการทับถมกันเป็นเวลานานไม่มีผลต่อการรับกำลังของดินเหมือนชั้นอื่นๆ อีกเหตุผลหนึ่งคือการก่อสร้างส่วนใหญ่มักจะทำในชั้นที่ลึกกว่า

2. ชั้นดินอ่อน เป็นชั้นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) ซึ่งมีปริมาณส่วนประกอบของน้ำในมวลดิน (Water Content) ประมาณ 60-80% และ มีความลึกของชั้นดินอยู่ในช่วง 15-20 เมตร จากการวิเคราะห์พบว่าดินชั้นนี้ยังมีอัตราการทรุดตัวในอัตราที่สูง มีความสามารถในการรับกำลังทางวิศวกรรมต่ำไม่เหมาะกับการก่อสร้างใหญ่ที่ดินต้องรับกำลังมาก

3. ชั้นดินเหนียวปนทรายอัดแน่น (Stiff Clay) ดินชั้นนี้อยู่ในระดับความลึกประมาณ 25 ม. ลงไปเป็นดินที่มีลักษณะเป็นดินเหนียวปนทรายมีปริมาณน้ำในมวลดินอยู่ในช่วง 15-20 เปอร์เซ็นต์ มีค่า Standard Penetration ตั้งแต่ 40 Blows/ft ขึ้นไป มีอัตราการทรุดตัวต่ำมาก ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์แล้วเห็นว่า ดินชั้นนี้เป็นชั้นที่มีความเหมาะสมพอสมควรในการก่อสร้างทางด้านวิศวกรรม สำหรับในส่วนของงานก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับชั้นดินที่อยู่เหนือกว่าไปและชั้นที่อยู่ต่ำกว่าแล้ว ดินชั้นนี้นับว่ามีความเหมาะสมมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากสภาพดินที่มีความแน่นพอสมควร มีระดับความลึกไม่มากเกินไป ถึงแม้ว่าจะมีปัญหาเรื่องน้ำใต้ดินอยู่บ้างแต่คงไม่เป็นอุปสรรคมากนัก เมื่อใช้วิธีการก่อสร้างที่เหมาะสม ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อต่อไปปัญหาที่ต้องพิจารณาอย่างรอบคอบคือ การทรุดตัวของดิน และปัญหาน้ำใต้ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดินในชั้น Stiff Clay นั้นเนื่องจากอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินจึงมีความจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงความสำคัญของปริมาณและระดับของน้ำใต้ดินด้วย ดินในชั้น Stiff Clay ใต้กรุงเทพมหานครนั้นอาจจะไม่เหมือนกับดินในสถานที่อื่นที่เคยมีการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินมาก่อนเสียเลยที่เดียว แต่ก็สามารถหาดินที่มีลักษณะใกล้เคียงกับดินกรุงเทพมหานครมาเปรียบเทียบกับได้ โดยเฉพาะการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินในหลายประเทศดินส่วนมากจะเป็นดินเหนียว ดินกรวด หรือดินทรายหรือมีลักษณะเป็นดินหลวม แต่ต้องใช้เทคนิคและเครื่องจักรเฉพาะอย่างที่สามารถทำงานภายใต้ระดับน้ำใต้ดินได้โดยไม่เป็นอุปสรรคต่อการก่อสร้าง

วิธีการก่อสร้างอุโมงค์มีด้วยกันหลายวิธี ตั้งแต่วิธีที่ใช้เทคโนโลยีไม่สูงมากนักในอดีตจนกระทั่งปัจจุบันซึ่งมีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆขึ้นมาใช้ อาทิเช่น ระบบที่มีการนำเอาโครงสร้างกันดิน (Shield) มาใช้ในการขุดอุโมงค์ใต้ดิน ยังสามารถแบ่งวิธีย่อยๆออกได้อีกหลายวิธีตามความเหมาะสมกับสภาพดินในบริเวณนั้นๆ ทางประเทศแถบยุโรปที่นับว่าเป็นแหล่งกำเนิดและนำเอาเทคโนโลยีทางด้านการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินมาใช้กันอย่างกว้างขวางที่สุด โดยเฉพาะประเทศอังกฤษ และประเทศเยอรมันนี่ ซึ่งสามารถทำการพัฒนาระบบการขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดินสำหรับดินหลวม และอยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดินได้เป็นประเทศแรกเรียกว่าระบบ HYDROSHIELD ซึ่งยังนิยมใช้จนถึงปัจจุบัน ส่วนทางแถบเอเชียมีประเทศญี่ปุ่นเป็นผู้นำทางด้านเทคโนโลยีการขุดเจาะอุโมงค์ หลังจากที่ได้นำเอาเทคโนโลยีจากทางตะวันตกมาทำการพัฒนาให้สอดคล้องและเหมาะสมกับสภาพดินของภาคพื้นเอเชีย ได้มีการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินในหลายประเทศในเอเชีย เช่น ญี่ปุ่น ฮองกง สิงคโปร์ จีนและไทย เป็นต้นซึ่งแต่ละประเทศจะใช้อุโมงค์ใต้ดินในหลายๆด้านแตกต่างกันไป เช่น ระบบระบายน้ำเสีย ระบบท่อลำเลียงน้ำประปา ระบบขนส่งมวลชนใต้ดิน ระบบป้องกันน้ำท่วม เป็นต้น

## การเจาะสำรวจดินเพื่อการทดสอบ

การสำรวจดินบริเวณสถานที่ที่จะทำการก่อสร้าง นับว่าเป็นงานที่สำคัญ ของการพิจารณาออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรม เพื่อให้เกิดความปลอดภัยและประหยัดในการเลือกใช้วัสดุก่อสร้างและสามารถเลือกใช้วิธีดำเนินการก่อสร้างที่เหมาะสมโดยทั่วไปวัตถุประสงค์ของการสำรวจดินเพื่อให้ทราบถึงข้อมูลของชั้นดินและระดับน้ำใต้ดินตลอดจนคุณสมบัติต่าง ๆ ของดิน ณ ที่นั้น

การสำรวจดินแบ่งออกได้เป็น 2 อย่าง คือ

1. การสำรวจพื้นผิวดิน (Surface Surveys)
2. การสำรวจใต้ผิวดิน (Subsurface Surveys)

การสำรวจพื้นผิวดิน ประกอบด้วยการศึกษาจากแผนที่ภูมิประเทศ แผนที่ทางธรณีวิทยา และจากข้อมูลของการทดสอบดินที่ได้จากการเจาะสำรวจของผู้ที่ได้ทำมาแล้วในบริเวณข้างเคียงกับที่ที่จะทำการก่อสร้าง สิ่งเหล่านี้เป็นเครื่องช่วยให้ทราบถึงสภาพลักษณะภูมิประเทศและความเป็นมาของดินบริเวณนั้นและระดับน้ำใต้ดินได้พอประมาณ และเพื่อการวางแผนเจาะสำรวจดินต่อไป นอกจากนี้ การใช้แผนที่รูปถ่ายทางอากาศจะช่วยให้ได้มาก โดยเฉพาะในการเลือกแนวหรือเส้นทางสำหรับสร้างถนนหรือลานบิน การสำรวจด้านธรณีฟิสิกส์จะทำให้ทราบได้ว่าชั้นดินชั้นหินแต่ละชั้นอยู่ลึกลงไปสักเท่าใด การสำรวจชั้นนี้ถือว่าเป็นเพียงการสำรวจและตรวจสอบชั้นดิน ถ้าต้องการทราบรายละเอียดเพิ่มเติมและคุณสมบัติของดินที่แท้จริง จะต้องทำการเจาะสำรวจ (Subsurface exploration) ซึ่งเป็นวิธีที่เสียเวลาและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูง

การสำรวจใต้ผิวดิน เป็นการสำรวจเพื่อหาขอบเขตและธรรมชาติของชั้นดิน ชั้นหินที่อยู่ลึกต่ำกว่าระดับดิน เพื่อหาระดับน้ำใต้ดิน และเพื่อทดสอบหาคุณสมบัติต่าง ๆ ของดินทั้งนี้ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องในการพิจารณาออกแบบโครงสร้าง และวิธีดำเนินการก่อสร้างที่เหมาะสม

การสำรวจใต้ผิวดิน แบ่งออกเป็น 2 ตอน คือ

- ก. การเจาะสำรวจขั้นต้น (Preliminary exploration)
- ข. การเจาะสำรวจเพื่อหารายละเอียด (Detailed exploration)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเจาะสำรวจชั้นดิน เพื่อต้องการทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของชั้นดินต่าง ๆ (Soil profile) ระดับน้ำใต้ดิน และกำลังของดินบริเวณที่จะทำการก่อสร้าง อย่างคร่าว ๆ ก่อนจำนวนและระยะห่างของหลุมที่จะเจาะ ตลอดจนความลึกของหลุมเจาะขึ้นอยู่กับความสำคัญ ของโครงสร้าง สำหรับงานฐานรากของอาคารสูงควรเจาะให้ลึกจนถึงฐานที่แข็งแรง หรือลึก ประมาณ 1-2 เท่าของด้านแคบที่สุดของอาคาร และจะต้องเจาะลึกต่อไปอีก ถ้าพบว่าชั้นดินที่มี คุณสมบัติที่ไม่ดีในการรับน้ำหนักอยู่ เป็นชั้นหนา

การเจาะสำรวจเพื่อหารายละเอียด เป็นการสำรวจต่อจากการเจาะสำรวจชั้นดิน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องซึ่งขึ้นต่อสภาวะงานออกแบบก่อสร้างใหญ่ ๆ ที่รับน้ำหนักบรรทุกมาก การ เจาะสำรวจในชั้นนี้ จะทำการทดสอบในที่และเก็บตัวอย่างดินมาวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติและกำลัง ต่าง ๆ ของดิน เช่น ปริมาณน้ำในมวลดิน ความหนาแน่น ความถ่วงจำเพาะ ความต้านทานต่อการเฉือน การยุบอัดตัว ความต้านทานต่อแรงกดอัด ดัชนีต่าง ๆ และความชื้นได้ของดิน เป็นต้น

อนึ่ง การเจาะและทดสอบดินจะให้รายละเอียดต่าง ๆ ได้เฉพาะในแนวตั้ง ณ บริเวณหลุมที่เจาะเท่านั้น ดังนั้นควรวางแผนการสำรวจตามแนวราบด้วย เพื่อหารายละเอียดของ ดินบริเวณที่ต่อเนื่องกัน

ตารางที่ 2.1 ระยะระหว่างหลุมและจำนวนหลุมที่ควรเจาะสำรวจตามสภาพของงาน

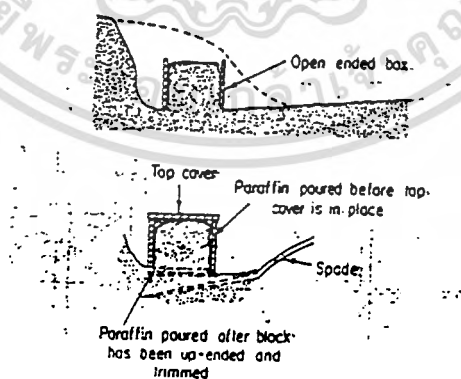
สภาพงาน	ระยะระหว่างหลุม เมตร		จำนวนหลุมที่ควร เจาะอย่างน้อย
	ชั้นดินมีลักษณะ สม่่าเสมอ	ชั้นดินมีลักษณะ เปลี่ยนแปลงขนาด	
อาคารหลายชั้น	45	15	4
ตอม่อสะพาน, หอคอย	30	7	1
ทางหลวง, สนามบิน	300	30	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วิธีเจาะและเก็บตัวอย่างดิน (Soil Sampling)

เนื่องจากดินเบื้องล่างมีความสัมพันธ์กับสิ่งต่าง ๆ มาก ซึ่งทำให้กำลังและคุณสมบัติแตกต่างกันไป การเจาะดินเพื่อเก็บตัวอย่างดินมาวิจัยและทดสอบต้องกระทำด้วยความระมัดระวัง โดยที่จะต้องให้เกิดความกระเทือนต่อดินที่จะนำมาทดสอบให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพราะว่าดินมีความไวตัวมาก เมื่อเกิดแรงกระเทือนก็จะทำให้โครงสร้างของดินเปลี่ยนแปลงไปได้ ค่าที่วิจัยหรือทดลองได้ก็จะผิดไปจากความเป็นจริง ดังนั้นการเจาะและเก็บตัวอย่างดินจึงต้องมีวิธีการที่เหมาะสมกับงาน ซึ่งมีวิธีการต่าง ๆ กัน ดังนี้

1. โดยการขุดและเก็บตัวอย่างดินจากบ่อทดสอบ (Test Pits) ตัวอย่างดินที่เก็บได้เรียกว่า pits sample วิธีนี้ทำได้เฉพาะที่ดิน ๆ ลึกไม่เกิน 6 เมตร หรือเมื่อดินที่ต้องการอยู่ไม่ลึกนัก เพราะถ้าลึกเกินกว่านี้จะได้ไม่สะดวกเพราะต้องทำค้ำยันกันดินพัง และมีปัญหาเรื่องน้ำใต้ดิน ราคาค่าใช้จ่ายก็จะสูง

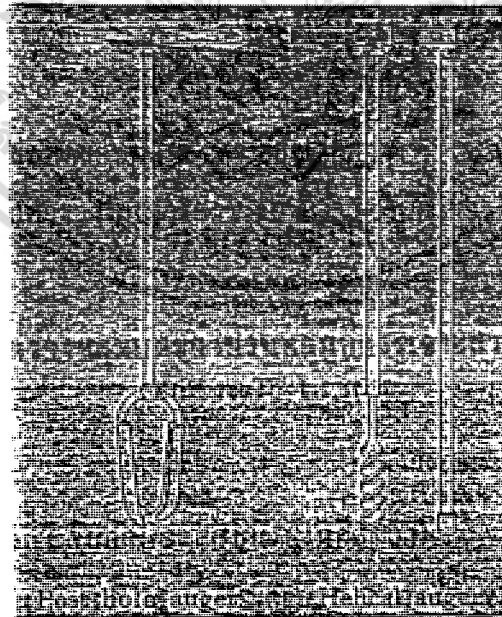


รูปที่ 2.1 Test Pite

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเก็บตัวอย่าง ทำโดยขุดดินให้เป็นบ่อรอบก้อนดินที่ต้องการจะเก็บจากก้อนบ่อแล้ว แต่งก้อนดินให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด 20 ถึง 30 ซม. เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น แล้วนำส่งไปยังห้องทดสอบที่อยู่ใกล้ในบริเวณสถานที่ก่อสร้าง ในกรณีที่ต้องทำการขนส่งต่อไปไกล ต้องระมัดระวังให้ดินได้รับความกระเทือนน้อยที่สุด ให้บรรจุดินตัวอย่างลงในกล่องไม้ที่มีขนาดโตกว่าและตั้งดินให้อยู่ตามแนวธรรมชาติของดินแล้วรอกพาราฟินลงในช่องว่างนี้ อีกที วิธีตัดดินเป็นก้อนนี้ดินตัวอย่างจะได้รับความกระทบกระเทือนน้อยกว่าวิธีอื่น

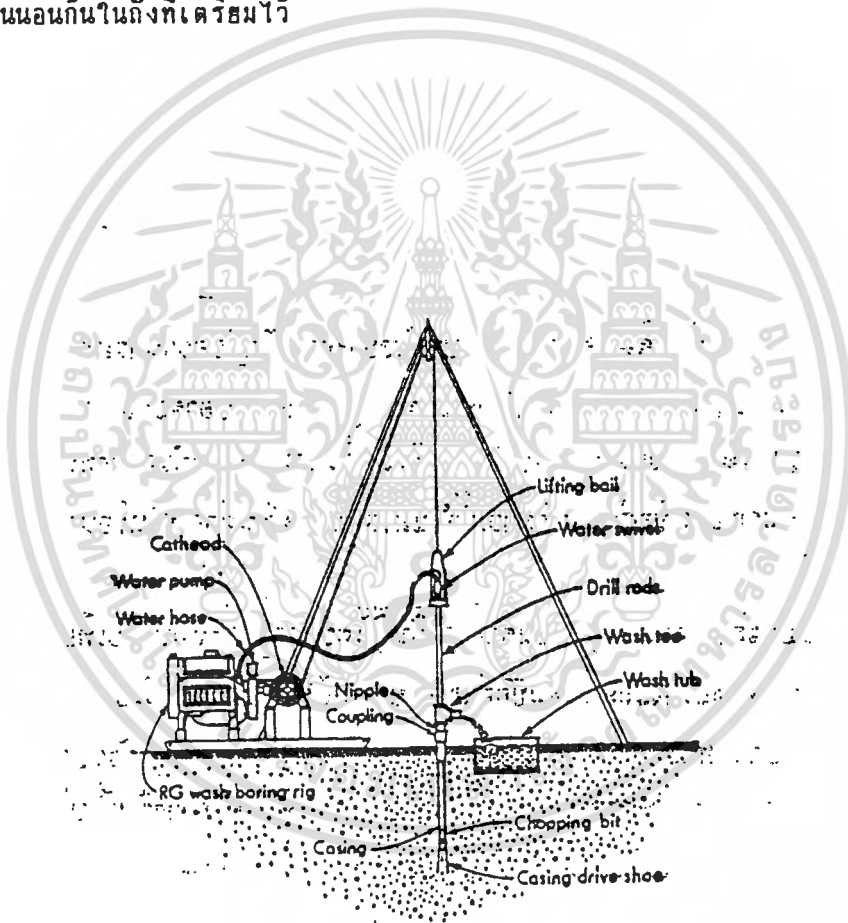
2. โดยใช้สว่านมือ (Auger) เจาะดินและเก็บตัวอย่างดินที่ติดมากับสว่านเหมาะสำหรับดินอ่อนหรือดินที่มีความเชื่อมแน่นมาก วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้กันมานานแล้ว และสะดวกดีสำหรับการขุดเจาะด้วยแรงคนหรือเครื่องจักรที่ไม่ลึกนัก (ประมาณ 4-6 เมตร) เช่น การสร้างทางรถไฟ หรือสนามบิน เป็นต้น เพื่อสำรวจและจำแนกประเภทของดินเท่านั้น เพราะดินตัวอย่างที่ได้จะถูกรบกวน ทำให้การทดสอบหาค่าสมบัติต่าง ๆ ผิดไป ในกรณีที่ต้องเจาะดินลึกกว่านี้ต้องระวังไม่ให้ผนังดินรอบหลุมเจาะพังโดยตอกปลอกหรือท่อเหล็กลงไป รูปที่ 2.2 แสดงสว่านมือแบบ Post-hole (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3-6 นิ้ว) และแบบ Holical (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1-2.5 นิ้ว)



รูปที่ 2.2 สว่านมือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. โดยการเจาะฉีดล้างหาตัวอย่าง (wash sample boring) ทำโดยตอกปลอกเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว หรือ 2.5 นิ้ว สาท่อนละ 1.50 ม. ลงไปก่อนด้วยแรงคนหรือเครื่องจักรเพื่อป้องกันดินพัง ดินภายในปลอกเหล็กนี้จะถูกกระแทกและถูกตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ด้วยหัวเจาะ (Auger bit หรือ Chopping bit) ที่ปลายของก้านเจาะ (drill rod) ซึ่งมีรูภายในขนาด 1 นิ้ว เมื่อเจาะถึงระยะลึกที่ต้องการแล้วใช้น้ำฉีดดินลงไปตามก้านเจาะ น้ำที่ฉีดไหลออกตรงปลายหัวเจาะและละลายดินให้เป็นโคลนแล้วย้อนกลับขึ้นมาข้างบนทางช่องว่างระหว่างก้านเจาะกับปลอกเหล็ก น้ำที่ไหลย้อนขึ้นมาจะไหลออกสู่ถังโดยน้ำผสมดินกันหลุมจะตกตะกอนนอนกันในถังที่เตรียมไว้



รูปที่ 2.3 การเจาะฉีดล้างหาตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การเจาะหาตัวอย่างแห้ง (dry sample boring) วิธีนี้คล้ายกับวิธีการเจาะฉีดล้างหาตัวอย่าง ทำโดยใช้สว่านเจาะคว้านดินออกก่อน เมื่อถึงระดับที่ต้องการจะเก็บตัวอย่างดินก็ใช้กระบอกลักดิน (sampling spoon) ดัดที่ปลายก้านเจาะแทนหัวเจาะ แล้วกดหรือดันกระบอกลักดินลงไปในดิน หมุน 2 รอบให้ดินขาด แล้วดึงก้านเจาะขึ้น วิธีนี้ใช้กันมาก เพราะได้ตัวอย่างดินที่แน่นอนไม่เปลี่ยนจากสภาพเดิม (undisturbed sample)

ในระหว่างการเจาะและเก็บตัวอย่างดิน อาจทำการทดสอบในที่ของกันหลุมเจาะเพื่อหาค่ากำลังของดินควบคู่กันไป เช่น หาค่ากำลังต้านทานของแรงเฉือนของดินโดยทำ vane test หาค่ากำลังต้านทานต่อแรงกดอัดโดยทำ Plate load test หรือ Penetration Test เป็นต้น วิธีการทดสอบในที่นี้จะกล่าวไว้ในบทที่เกี่ยวข้อต่อไป

#### ตัวอย่างดินและกระบอกลักตัวอย่างดิน

ตัวอย่างดินที่เก็บได้จากหลุมเจาะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ ตัวอย่างดินที่เปลี่ยนสภาพ (disturbed sample) และตัวอย่างดินคงสภาพ (undisturbed sample)

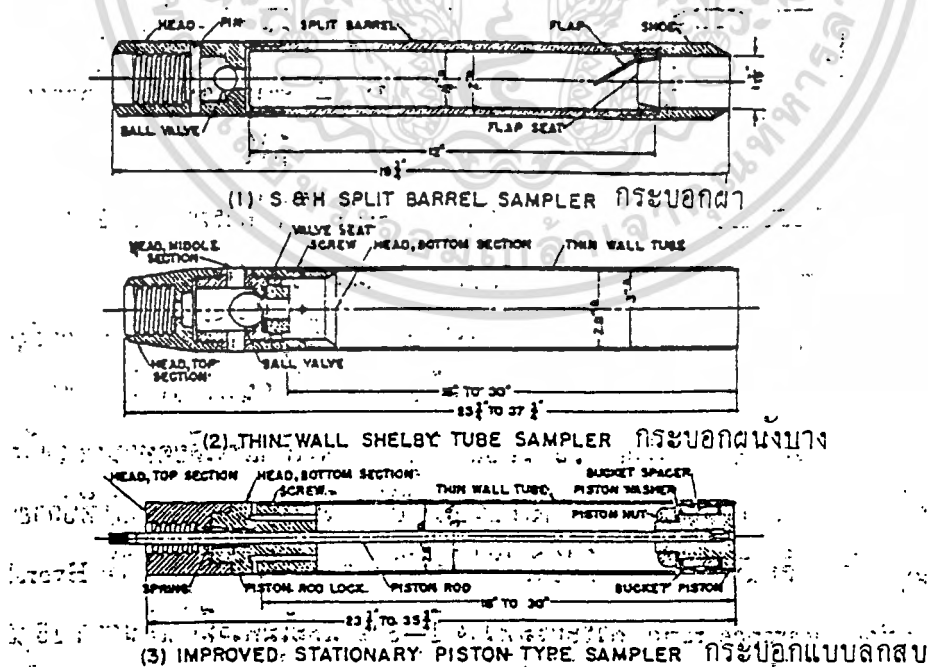
**ตัวอย่างดินที่เปลี่ยนสภาพ** เป็นตัวอย่างดินที่ได้รับความกระทบกระเทือนจากการเจาะดิน ทำให้โครงสร้างของดินเปลี่ยนไปหรือถูกทำลายไปอาจเพียงบางส่วนหรือทั้งหมด อย่างไรก็ตามส่วนประกอบของดินยังคงเดิม ดังนั้นจึงสามารถนำตัวอย่างดินแบบนี้ ไปทดสอบหาการกระจายขนาดของเม็ดดิน ปริมาณน้ำในมวลดิน ดัชนีต่าง ๆ หรือนำไปทดสอบเกี่ยวกับการบดอัดดินได้

**ตัวอย่างดินคงสภาพ** เป็นตัวอย่างดินที่ได้รับความกระทบกระเทือนหรือรบกวนน้อยที่สุด ซึ่งถือว่าโครงสร้างและคุณสมบัติต่าง ๆ ของดินไม่เปลี่ยนแปลงไป ฉะนั้นตัวอย่างดินคงสภาพจึงใช้ในการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการเฉือน การทรุดตัวของดิน การยอมให้น้ำซึมหรือไหลผ่านหรือการทดสอบอื่น ๆ ที่กล่าวแล้วเกี่ยวกับในตัวอย่างดินที่เปลี่ยนสภาพ

ความกระทบกระทั่งที่ดินได้รับนั้นขึ้นกับตัวกระบอเก็บดิน (sample) ว่าเป็นแบบ ฝัหนา (Thick Wall Sample) หรือฝับาง (Thin Wall Sample) ปลายจุ่มมากน้อย เท่าไรและคมหรือไม่ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับวิธีการเจาะและเก็บตัวอย่างดินว่าใช้การกระทบหรือ กดกระบอเก็บดินลงไปนดิน การกดกระบอเก็บดินลงไปจะรบกวนและกระทบกระทั่งนดินน้อย กว่าการกระทบกลงไป

### กระบอเก็บดิน (Sampler)

กระบอเก็บดินมีอยู่หลายแบบหลายชนิดด้วยกันตามชนิดต่าง ๆ ของดินที่จะเก็บ เช่น กระบอกระทบปลายเปิด (Open-Drive Sampler) กระบอสองชั้น (Double-Tube Core Boring Sampler) ที่ใช้เก็บตัวอย่างดินเหนียวแข็งโดยกดและกระทบกลงไปนดิน กระบอผนังบาง (Thin-Wall Seamless Steel Tubing Sampler) กระบอแบบลูกสูบ (Piston Sampler) ที่ใช้เก็บตัวอย่างดินเหนียวอ่อนโดยดันลงไปนดิน และกระบอแบบหมุน (Rotary Sampler) เป็นต้น



รูปที่ 2.4 กระบอเก็บดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของกระบอกเก็บดินมีตั้งแต่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว, 2.8 นิ้ว, 3.37 นิ้ว จนถึง 6 นิ้ว ส่วนความยาวก็มีต่าง ๆ กันตั้งแต่ 18 นิ้ว, 24 นิ้ว และ 30 นิ้ว ผิวหรือผนังภายในของกระบอกเก็บดินต้องเรียบไม่เป็นสนิม กระบอกเก็บดินมักทำด้วยเหล็กหรือทองเหลือง แต่นิยมใช้กระบอกเก็บดินที่ทำด้วยเหล็กมากกว่า เพราะราคาถูกกว่า แข็งแรงกว่า แต่เป็นสนิมง่ายกว่ากระบอกเก็บดินที่ทำด้วยทองเหลือง

M.G. Hvorslev ได้เป็นผู้ริเริ่มและค้นคว้าเกี่ยวกับกระบอกเก็บดินตัวอย่าง เป็นเวลานานถึง 10 ปี และได้ปรับปรุงกระบอกเก็บดินแบบผนังบาง (Thin-wall sampler) เพื่อให้ใช้งานได้ดีที่สุด พบว่าค่า area ratio ซึ่งเป็นอัตราส่วนของพื้นที่ของดินที่ถูกแทนที่ต่อพื้นที่ของตัวอย่างดิน ควรมีค่าต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้

$$\text{area ratio } C = \frac{D_w^2 - D_e^2}{D_e^2}$$

ในเมื่อ  $D_w$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก  
ของกระบอกเก็บดิน

$D_e$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของส่วน  
ปลายที่งม

ค่า area ratio นี้ไม่ควรมากกว่า 25% และสำหรับดินอ่อนที่มีความไวตัวมาก (sensitive) ค่านี้ไม่ควรเกินกว่า 10% กระบอกเก็บดินที่มีผิวหนา หมายถึงกระบอกเก็บดินที่มี area ratio เกินกว่า 10 ถึง 20%

เมื่อดินตัวอย่างเข้าไปอยู่ในกระบอกเก็บดิน จะเกิดแรงเสียดทานที่ผิวหรือผนังด้านในของกระบอก ซึ่งอาจทำให้ดินตัวอย่างเสียรูปไปได้ วิธีแก้ อาจทำได้โดยให้ปลายของกระบอกเก็บดินจุ่มเข้ามาเล็กน้อย แต่ทั้งนี้ต้องไม่ให้ดินมีโอกาสขยายตัวภายหลังได้ Hovoralev แนะนำว่าค่า inside clearance ratio ควรอยู่ระหว่าง 1-3 % และไม่ควรมีค่าเกินกว่า 15% สำหรับดินทั่ว ๆ ไป

$$\text{inside clearance ratio } C_i = \frac{D_s - D_e}{D_e}$$

ในเมื่อ  $D_s$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของกระบอกเก็บดิน

การบันทึกผลของการเจาะดิน (Record of field exploration) ตัวอย่างดิน เหนียวคงสภาพสามารถเอามาได้ 2 วิธี คือ จาก Test pit และจากการใช้กระบอกเก็บดิน ตัวอย่างดินที่ได้จากการทำ Test pit จะถูกรบกวนน้อยกว่า และเมื่อนำตัวอย่างดินขึ้นมาได้แล้ว จะต้องเคลือบด้วยซีฟิ่งพาราฟินทันที ส่วนตัวอย่างดินที่ได้จากการใช้กระบอกเก็บดิน จะต้องนำเข้าเครื่องเพื่อดันให้ดินออกมา แล้วตัดเป็นท่อนตามต้องการ จากนั้นจึงใช้ซีฟิ่งพาราฟินเคลือบ การเคลือบซีฟิ่งพาราฟิน ต้องให้ความร้อนเกินกว่าจุดหลอมเหลวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่าเคียวจนกระทั่งเดือดพล่าน เพราะจะทำให้คุณสมบัติของพาราฟินเสียไป ซึ่งเมื่อเย็นตัวลงจะเปราะง่าย สิ่งหนึ่งที่ลืมไม่ได้คือสลาก (sample label) ซึ่งต้องทำติดไว้กับก้อนดินที่เก็บมา เพราะเป็นการบอกถึงสิ่งต่าง ๆ ของการเก็บตัวอย่างดิน ราชการในสลากควรประกอบด้วยสิ่งต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.6

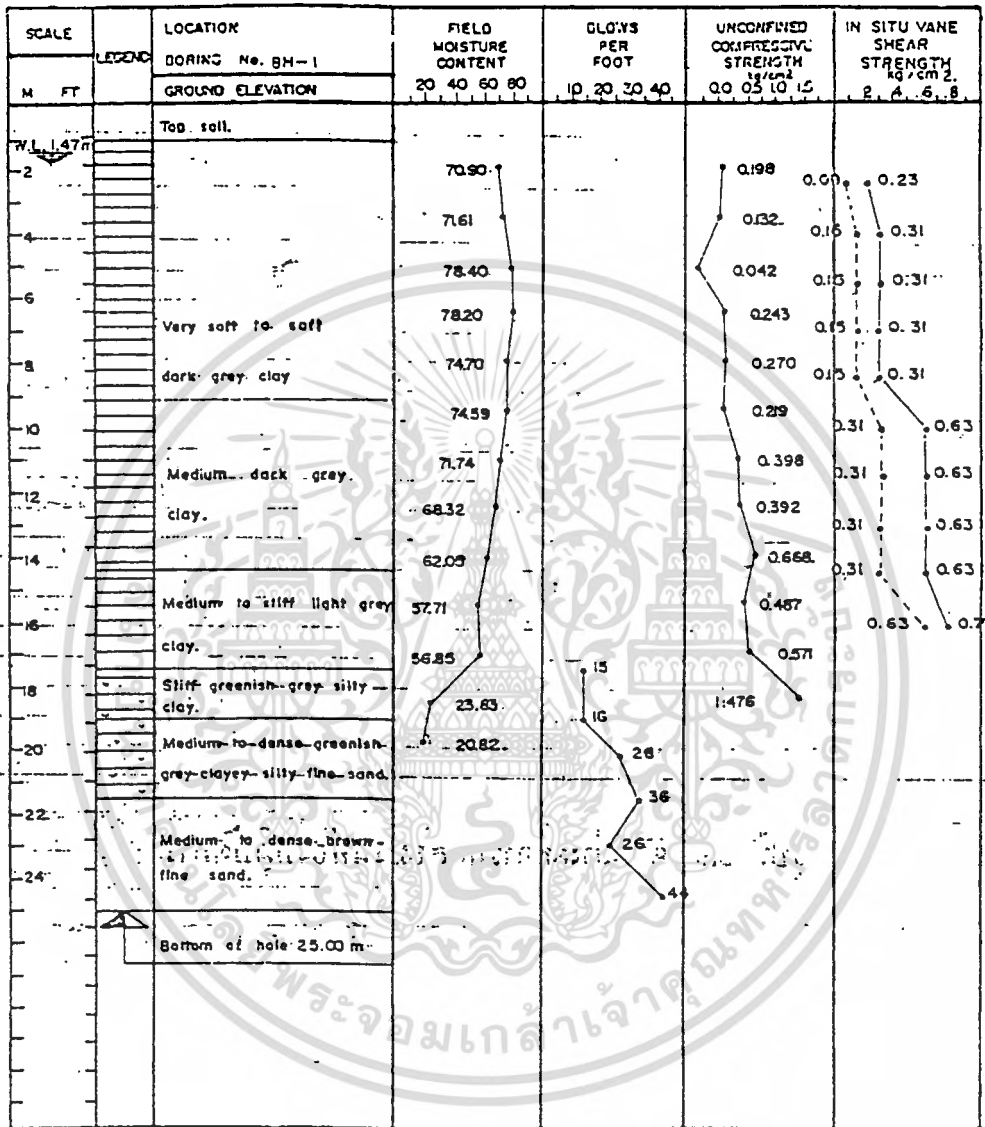
Top of Sample	
Project.....	File No.....
Location.....	Date.....
.....	Sample No.....
Description of Soil.....	
.....	
Depth to sample : Top.....Bottom.....	
Elevation of Ground Surface.....	
Remarks.....	

รูปที่ 2.6

เมื่อได้ตัวอย่างดินแล้วก็นำมาทดสอบและวิเคราะห์หาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานเพื่อนำไปใช้ออกแบบต่อไป ข้อมูลที่ต้องการได้แก่คุณสมบัติทั่วไปของดิน เช่น ขนาดของเม็ดดิน ความกว้างจำเพาะ สถานะสภาพความเหลว ความชื้นได้ ฯลฯ กำลังต้านทานต่อแรงเฉือน ความสามารถรับแรงกดอัด การยุบอัดตัว เสถียรภาพของความลาด เป็นต้น อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้จะใกล้เคียงความเป็นจริงมากเพียงใดขึ้นอยู่กับสภาพของการปฏิบัติการทดสอบซึ่งต้องพยายามให้เหมือนกับสภาพของดินเบื้องล่างมากที่สุด ซึ่งต้องอาศัยเครื่องมือที่ทันสมัยและมีความละเอียดสูง

การบันทึกข้อมูลและรายงาน ควรประกอบด้วย ชื่อโครงการ ลักษณะงาน สถานที่หรือตำแหน่งที่เจาะสำรวจ เบอร์หลุมเจาะ วันที่เริ่มและเสร็จงาน ขนาดหลุมเจาะ เครื่องมือที่ใช้เจาะและเก็บตัวอย่าง ระดับที่เก็บตัวอย่าง ลักษณะและสภาพของชั้นดินที่ตรวจพบ วิธีทดสอบและผลการทดสอบที่ได้ในสนาม ข้อมูลเกี่ยวกับระดับน้ำใต้ดิน และชื่อผู้รับผิดชอบ รูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างการบันทึกข้อมูลในสนาม รูปที่ 2.8 และ 2.9 เป็นการสรุปข้อมูลซึ่งแสดงรูปตัดของชั้นดินและกำลังของดินและผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



----- Remolded  
 ————— Undisturbed

รูปที่ 2.8 ตัวอย่างรูปตัดของชั้นดิน (Boring Log)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเก็บรักษาดินตัวอย่าง

ตามปกติ จะต้องรีบทำการตรวจและทดสอบดินตัวอย่างทันทีในเวลารวดเร็วที่สุดทั้งนี้ เพราะการเก็บรักษาดินตัวอย่างให้คงสภาพเดิม ไม่สามารถทำได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้มีผลต่อค่าที่จะได้จากการทดลอง อย่างไรก็ตามจะต้องทำที่เก็บตัวอย่างดินเมื่อไม่สามารถทำการทดสอบให้เสร็จลงได้ หรือมีตัวอย่างที่ต้องทดสอบมากมาย หรือต้องการทราบคุณสมบัติอื่น ๆ อีกในภายหลัง

SUMMARY OF TEST RESULT															TABLE NO.
PROJECT: BUILDING FOUNDATION										LOCATION:					
Boring No.	Depth of Bore Hole (M)	Sample & Depth		Atterberg Limits			Sieve Analysis - % Passing			Unconfined Compression Tests					Sp. Gr.
		Sample No.	Depth From-To Ft.	LL	PL	PI	No. 10	No. 40	No. 100	q <sub>u</sub> Kg/cm <sup>2</sup>	q <sub>u</sub> Kg/cm <sup>2</sup>	Water Content	Dry Unit Wt. Gm./Cc.	Wet Unit Wt. Gm./Cc.	
BR-1	25.00	1-1	1.50-2.05	73.80	53.00	10.90	99.90	99.40	98.70	0.193	0.179	70.9	0.953	1.546	2.52
		1-2	3.00-3.55	68.6	47.13	21.47	100.00	99.88	99.82	0.132	0.103	71.61	0.944	1.514	2.61
		1-3	4.50-5.05	66.80	49.98	16.82	99.93	98.55	98.37	0.042	0.014	78.40	0.683	1.535	2.60
		1-4	6.00-6.55	63.7	50.04	13.66	99.00	98.35	97.75	0.243	0.087	73.25	0.539	1.496	2.60
		1-5	7.50-8.05	68.00	48.41	19.59	99.68	98.99	98.59	0.270	0.117	74.72	0.833	1.543	2.61
		1-6	9.00-9.55	67.50	48.48	19.02	100.00	99.88	99.70	0.219	0.102	74.39	0.820	1.537	2.61
		1-7	10.50-11.05	62.20	46.07	16.13	99.93	99.76	98.51	0.398	0.141	71.74	0.957	1.543	2.62
		1-8	12.00-12.55	61.1	42.27	18.83	99.93	99.90	99.31	0.392	0.142	68.52	0.922	1.551	2.61
		1-9	13.50-14.05	60.57	46.53	14.02	99.94	99.80	98.71	0.668	0.112	62.05	0.976	1.613	2.62
		1-10	15.00-15.55	60.30	43.40	16.90	99.96	99.81	99.34	0.487	0.125	57.71	1.087	1.714	2.63
		1-11	16.50-17.05	65.18	47.85	17.33	99.92	99.68	98.44	0.571	0.163	56.35	1.083	1.707	2.63
	1-12	18.00-18.55	60.25	45.24	15.02	64.20	61.98	47.31	1.476	1.030	23.33	1.601	1.933	2.65	
	1-13	19.50-19.95				99.96	96.41	73.90		1.601	20.32	1.719	2.076	2.63	

รูปที่ 2.9 ตัวอย่างผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ถ้าเป็นดินประเภทที่ไม่ต้องป้องกันการสูญเสียความชื้น เช่น พวก Subgrade soil สิ่งที่ต้องการคือ ให้มีห้องกว้างพอที่จะเก็บตัวอย่างได้ แต่สำหรับพวกดินเหนียวคงสภาพที่คงระมัดระวังเกี่ยวกับการสูญเสียความชื้น ก็จะต้องทำห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น โดยใช้ Humidifier ซึ่งเป็นเครื่องผลิตไอน้ำให้ความชื้นของห้องมีค่าใกล้ 100% ให้ความชื้นในมวลดินไม่มีโอกาสหนีออกมาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Sensitivity

อัตราส่วนระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินประเภทที่มีแรงยึดเหนี่ยว แบบไม่รบกวน(Undisturbed) ต่อค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบ Remold ที่ปริมาณน้ำในมวลดินเท่ากันคือค่า Sensitivity (St) ของดินนั้น

$$St = \frac{\text{Undisturb Strength}}{\text{Remold Strength}}$$

Remold Strength

สำหรับการทดสอบ Unconfined Compressive Test

$$St = \frac{q_u (\text{Undisturbed})}{q_u (\text{remolded})}$$

$q_u$  (remolded)

สำหรับดินเหนียวสามารถแบ่งระดับความ Sensitive ได้ดังนี้คือ

Level	St	comment
Insensitive	$\leq 4$	เป็นดินเหนียวส่วนใหญ่
Sensitive	$4 < St \leq 8$	-
Extrasensitive	$> 8$	ต้องทำอย่างระมัดระวัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดินตะกอนปากแม่น้ำและทะเลสาบ และดินตะกอนที่มีอินทรีย์สารประกอบอยู่เป็นส่วนใหญ่ มีค่าปริมาณน้ำในมวลดิน (Water content) สูงๆ อาจจะไม่สามารถหาค่า Remold Strength ได้ ในบางกรณีค่าการรับกำลังจะลดลงอันเนื่องมาจากสาเหตุการถูกรบกวนของดินโดยความรู้เท่าไม่ถึงการ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องระมัดระวังในการเก็บตัวอย่าง เพราะการรบกวนอาจทำให้ดินที่ตกตะกอนอยู่กลายเป็นของเหลวข้นเหนียวได้

### Thixotropy

คือการกลับคืนมาของกำลังของดิน จากสภาพ Remold เมื่อเวลาผ่านไป ดินเหนียวทุกชนิดและดินชนิดอื่น ๆ จะต้องถูกปรับสภาพให้มีความแข็งแรงขึ้นโดยการอัดน้ำปูนถ้าความแข็งแรงที่เกิดขึ้น เกิดจากการกระจายของแรงดันน้ำ เสาเข็มที่เสียบลงไปในพื้นที่ดินเหนียวจะรับน้ำหนักได้เล็กน้อย จนกระทั่งกำลังของน้ำปูนที่อัดลงไปในพื้นที่แข็งตัว และเกิดการกระจายของแรงดันขึ้น

## การกระจายหน่วยแรงในดิน

เมื่อต้องรับน้ำหนักหรือแรงกระทำจากภายนอกเช่น จากฐานรากหรือดินถม จะเกิดหน่วยแรงขึ้นในดิน กระจายไปทุกทิศทาง หากพิจารณาในระบบ 3 มิติหน่วยแรงที่กระทำต่อมวลดินก่อนลูกบาศก์เล็กๆจะมีทั้งหมด 6 หน่วยแรง คือหน่วยแรงตั้งฉาก และหน่วยแรงเฉือนในแต่ละระนาบของลูกบาศก์ ซึ่งเมื่อทราบหน่วยแรงตั้งฉากและหน่วยแรงเฉือน ก็สามารถคำนวณหาขนาดและทิศทางของหน่วยแรงหลักที่กระทำ ณ จุดนั้นได้ อย่างไรก็ตาม เพื่อให้การพิจารณาปัญหาง่ายยิ่งขึ้น โดยเฉพาะเรื่องของกำแพงกันดิน หรือฐานรากที่ยาวต่อเนื่องจะพิจารณาปัญหาในระบบ 2 มิติ โดยคิดเฉพาะหน่วยแรงตั้งฉาก และหน่วยแรงเฉือนในระนาบที่ตั้งฉากกับแกนนอนและแกนตั้งเท่านั้น

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในมวลดินจากการกระทำของน้ำหนัก หรือแรงภายนอกเป็นสิ่งสำคัญที่ควรทราบ เพื่อใช้ออกแบบฐานรากและหาปริมาณการทรุดตัว วิธีที่ง่ายและสะดวกที่สุดคือ สมมติให้น้ำหนักจากฐานรากกระจายแผ่ออกอย่างสม่ำเสมอ และเอียงทำมุม 30-45 องศา กับแนวดิ่ง ก็สามารถหาหน่วยแรงใต้ดินที่ระดับใดๆได้ ดังรูปที่ 2.10 แต่วิธีการวิเคราะห์ตามทฤษฎีของการยืดหยุ่นซึ่งเสนอโดยนักคณิตศาสตร์ชาว ฝรั่งเศสชื่อ Boussinesq (1885) เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ทฤษฎีของBoussinesq นี้ใช้สำหรับหาหน่วยแรงใต้ดินที่กระทำเป็นจุด จนถึงน้ำหนักกระทำเป็นแบบแผ่สม่ำเสมอ รูปวงกลมและรูปสี่เหลี่ยมนอกจากนี้ยังอาจใช้แผนภูมิของ Newmark หรือวิธีที่เสนอโดย Westergaard ก็ได้

### การกระจายหน่วยแรงในดิน (Stress Distribution in soils)

หน่วยแรงใต้ดินที่เกิดจากการกระทำของน้ำหนักต่างๆสามารถนำมาเขียน

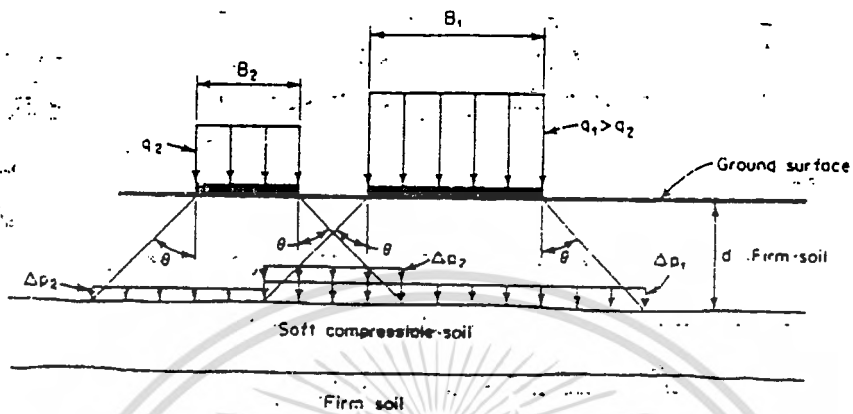
รูปการกระจายของหน่วยแรงได้ 3 แบบคือ

1. รูปกระเปาะความดัน (Pressure Bulb) เป็นการแสดงการกระจายของหน่วยแรงในแนวดิ่งที่มีค่าเท่ากันค่าหนึ่งดังรูป 2.11

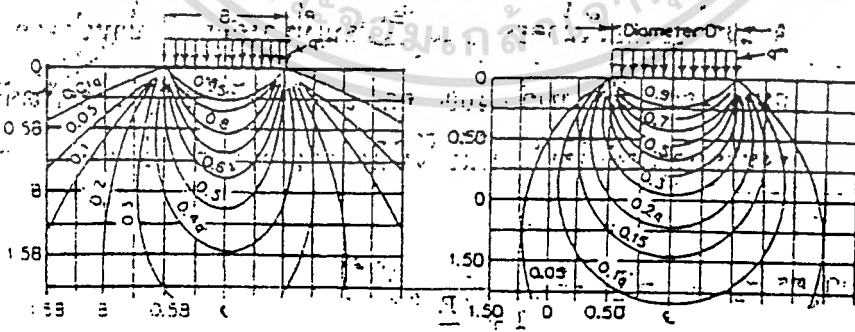
2. รูปการกระจายของหน่วยแรงในแนวดิ่งบนระนาบนอน

3. รูปการกระจายของหน่วยแรงในแนวดิ่งบนระนาบตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 หน่วยแรงใต้ดินที่ระดับลึก



รูปที่ 2.11 การกระจายหน่วยแรงในแนวดิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าหน่วยแรงใต้จุดที่รับน้ำหนักจะมีค่ามากที่สุดและค่อยๆลดลงตามความลึกและความกว้างที่ห่างจากแกนของน้ำหนัก สิ่งเกิดได้ว่าดินใต้ฐานราก ซึ่งอยู่ลึกประมาณ 1.5- 2 เท่าของความกว้างของฐานรากยังมีหน่วยแรงกระทำอยู่และเมื่อฐานรากอยู่ใกล้กัน (ห่างกันน้อยกว่า 5 เท่าของความกว้างของฐานราก) กระเปาะความดันจะซ้อนกันและหน่วยแรงจะกระทำลึกลงไปกว่าระดับที่กล่าวถึง

#### การกระจายของหน่วยแรงใต้ผิวของฐานราก(Contact Pressure)

หน่วยแรงที่สัมผัสใต้ฐานรากเป็นหน่วยแรงในแนวตั้งที่กระทำอยู่ระหว่างฐานรากกับดินใต้ฐานราก ในการคำนวณหาค่าโมเมนต์คัตและค่าแรงเฉือน เพื่อออกแบบฐานรากใดๆจะพิจารณาว่าหน่วยแรงนี้เป็นแบบกระจายสม่ำเสมอ แต่ความจริงแล้วการกระจายของหน่วยแรงขึ้นอยู่กับความแข็งแกร็ง(Flexural Rigidity) ของฐานรากและคุณสมบัติยึดหยุ่นของดินใต้ฐานราก ถ้าฐานรากเป็นแบบปรับตัว(Flexible)มีจุดยึดตัว การกระจายของหน่วยแรงเป็นแบบสม่ำเสมอโดยไม่คำนึงถึงชนิดดินใต้ฐานราก แต่ถ้าฐานรากเป็นแบบแข็งแกร็ง(Rigid)การกระจายของหน่วยแรงจะต่างกันไป แล้วแต่ชนิดของดินใต้ฐานราก เมื่อดินเป็นชนิดที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive Soil) เช่นพวกดินเหนียวเนื้อละเอียดอ่อนตัว จะเกิดหน่วยแรงตามบริเวณขอบของฐานรากสูงกว่าตรงกลางฐาน แต่ถ้าดินเป็นชนิดที่ไม่มีความเชื่อมแน่นเช่น ทรายจะเกิดหน่วยแรงบริเวณเสาซึ่งตั้งอยู่ที่ศูนย์กลางของฐานรากมากที่สุด และการกระจายของหน่วยแรงเป็นรูปโด้งพาราโบลา

## บทที่ 3

## การก่อสร้างอุโมงค์

## ประวัติความเป็นมาของการก่อสร้างอุโมงค์

การก่อสร้างอุโมงค์เริ่มมีมาตั้งแต่สมัยกรีกโบราณ ซึ่งเกิดจากความต้อที่จะสร้างเส้นทางคมนาคมไปยังที่ต่างๆให้สั้นและสะดวกรวดเร็วที่สุดโดยไม่ต้องเดินทางอ้อมและคเคี้ยวไปมา จึงมีการหาวิธีการที่จะเจาะภูเขาที่ขวางทางอยู่เพื่อผ่านทะลุเข้าไป ในสมัยแรกๆนั้นจะอาศัยการให้ความร้อนแก่หินแล้วทำให้เย็นลงอย่างฉับพลันโดยการราดด้วยน้ำที่มีสภาพเป็นกรดอ่อนชนิดหนึ่ง ซึ่งจะทำให้หินเกิดรอยแตกร้าว หลังจากนั้นก็จะใช้ค้อนทุบให้หินแตกออกมา ต่อมาเริ่มมีการพัฒนาเครื่องมือเครื่องจักรต่างๆมาใช้เพื่อทุ่นแรง โดยเริ่มมีการประดิษฐ์เครื่องเจาะในช่วงปลายคริสต์ศตวรรษที่ 19 เรียกว่า Burleigh drills ที่ติดตั้งอยู่บนรถเลื่อน(main-line jumbo) โดยการทำงานของเครื่องเจาะชนิดนี้เป็นแบบเจาะแห้งทำให้เกิดฝุ่นผงจำนวนมากในขณะทำงาน ซึ่งเป็นปัญหาทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับปอด และถุงลมในปอดกับคนงานในเหมืองหิน หลังจากนั้นสภาพปัญหาต่างๆเหล่านี้ก็ถูกแก้ไขให้ดีขึ้น โดยการหันมาใช้ระบบเปียกและมีระบบขนส่งหิน ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นและเครื่องจักรดีเซลล้อย่างก็นำมาใช้ในเวลาต่อมา

เครื่องจักรสำหรับการขุดเจาะดิน (Tunnel-boring machine) ได้รับการพัฒนาขึ้นและจดทะเบียนลิขสิทธิ์ครั้งแรกที่ประเทศอังกฤษ ใน ค.ศ.1856 และเครื่องจักรเครื่องแรกถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างอุโมงค์ลอดใต้ช่องแคบอังกฤษในปี ค.ศ. 1870 เป็นเครื่องจักรที่ใช้พลังงานไอน้ำ และก็เปลี่ยนมาใช้พลังงานจากไฟฟ้าแทนในภายหลัง ในเวลาต่อมาเครื่องเจาะดังกล่าวนี้เสื่อมความนิยมลงไปเพราะมีประสิทธิภาพการทำงานที่ต่ำกว่าวิธีการอื่นที่ใช้กันอยู่ในขณะนั้น แต่ก็ถูกนำกลับมาใช้อีกครั้งในปี ค.ศ.1954 ที่เมือง Oabe Dam เพราะสมัยนั้นมีบริษัทผู้ผลิตต่างๆเห็นมาผลิตและพัฒนาเครื่องจักรประเภทนี้เป็นจำนวนมาก และพัฒนาจนเครื่องจักรแบบนี้สามารถประยุกต์ใช้กับสภาพหินและดินต่างๆได้เกือบทุกประเภทและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

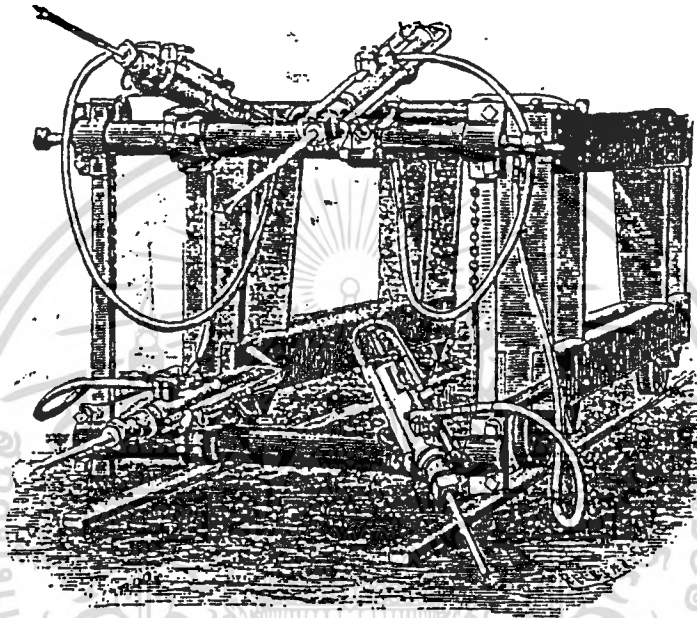


Photo 1 Burleigh drills on a main-line jumbo as used on the Hoosac Tunnel in Massachusetts and the Sutro Tunnel in Nevada in the 1870s. (Ingersoll-Rand Co.)

รูปที่ 3.1

เครื่องจักรสำหรับการขุดเจาะอุโมงค์ในยุคต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 □ Planning and Estimating Underground Construction

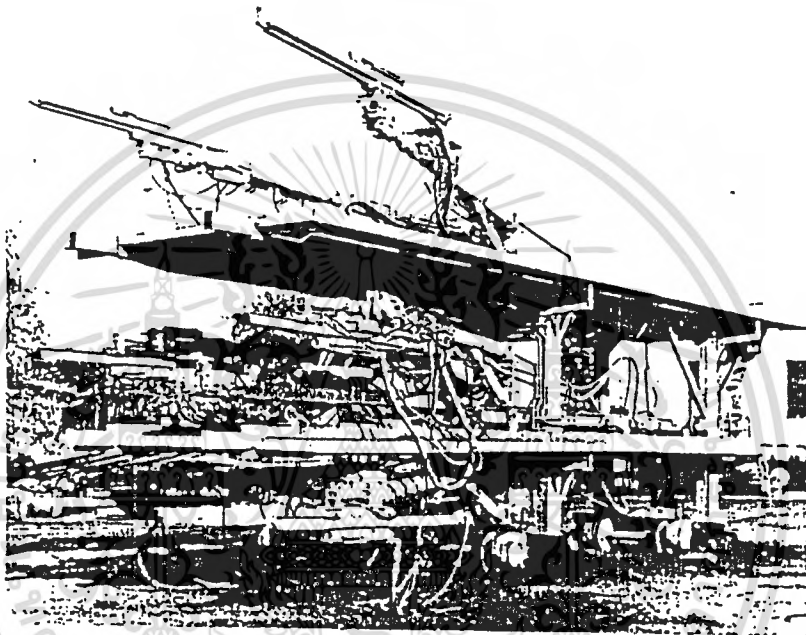


Photo 2 Modern main-line drill jumbo. (Gardner-Denver Co. and George M. Philpott Co., Inc.)

รูปที่ 3.2

เครื่องจักรสำหรับการขุดเจาะอุโมงค์  
ที่ได้รับการปรับปรุงให้ทันสมัยขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วัตถุประสงค์ของการก่อสร้างอุโมงค์

1. ใช้เป็นทางสำหรับเข้าออกของสวนสาธารณะต่างๆ
2. ใช้สำหรับลำเลียงหรือขนส่งน้ำหรือของเหลวอื่นๆ
3. ใช้ในการทำเหมืองแร่
4. ใช้เป็นเส้นทางสำหรับการวางระบบสาธารณูปโภคต่างๆ
5. ใช้เป็นเส้นทางในการเข้าออกของคน

## การก่อสร้างอุโมงค์แบบต่างๆ

ในหลายประเทศซึ่งมีระบบสาธารณูปโภค การระบายน้ำ และระบบอุโมงค์ขนส่งภายในเมืองแบบเก่าและได้ทรุดโทรมลงไปแล้วเป็นจำนวนมาก จำเป็นต้องมีการซ่อมแซมและปรับปรุงเปลี่ยนแปลงอีกหลายแห่ง ระบบเก่าทั้งหลายนั้นส่วนใหญ่ไม่สามารถตอบสนองความต้องการของพลเมืองที่เพิ่มมากขึ้นได้ ตามบริเวณเมืองศูนย์กลางหลายแห่งที่มีชุมชนหนาแน่นมาก นักวางผังเมืองต้องประสบกับปัญหานานาประการในการก่อสร้างและปรับปรุงระบบสาธารณูปโภคแห่งใหม่ๆ วิธีการแก้ปัญหาอย่างหนึ่งก็คือ นำระบบสาธารณูปโภคดังกล่าวไปติดตั้งไว้ใต้ดิน เพื่อให้ส่งผลกระทบต่อชีวิตความเป็นอยู่ของผู้คนภายในเมืองให้น้อยที่สุด แต่จากสถานการณ์ต่างๆทั่วโลกทำให้ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมระบบอุโมงค์ต่างๆให้เพียงพอหรือก่อสร้างอุโมงค์แห่งใหม่ขึ้นมา นั้นทำให้เกิดภาวะความตึงเครียดต่อการควบคุมทางด้านค่าใช้จ่ายของรัฐบาลเป็นอย่างมาก

ส่วนระบบอุโมงค์ภายนอกเมืองใหญ่ๆหลายแห่งนั้นมีความจำเป็นต่อโรงผลิตไฟฟ้า การจ่ายน้ำและการควบคุมภาวะน้ำท่วม และในปัจจุบันโครงการต่างๆ เหล่านี้ในประเทศกำลังพัฒนาทั้งหลายกำลังเพิ่มความจำเป็นมากยิ่งขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็ยังประสบปัญหาทางด้านงบประมาณด้วยเช่นกัน

จากภาวะการบีบรัดตัวทางด้านเศรษฐกิจ ซึ่งส่งผลต่อการซ่อมแซมโครงการในพื้นที่ชนบท และการพัฒนาโครงการสำหรับพื้นที่ในเมือง ทำให้เทคโนโลยีในการก่อสร้างอุโมงค์กลายเป็นสิ่ง ที่ต้องการความคุ้มค่าในการลงทุนเพิ่มมากยิ่งขึ้น แม้ว่าจะมีความคลุมเครือในการจำแนกแยก ประเภทของอุโมงค์ต่างๆอยู่ตามแต่ก็ขอแบ่งออกให้เห็นได้เป็น 3 ประเภทคือ

1. ระบบหินแข็ง
2. ระบบดินอ่อนตัว
3. ระบบดินผสม

### อุโมงค์หินแข็ง

มีการก่อสร้างอุโมงค์หินแข็งทั่วไปตามบริเวณพื้นที่เชิงเขา ในขณะที่เมืองศูนย์กลางหลาย แห่งตั้งอยู่บนที่ราบประกอบด้วยดินอ่อนนุ่ม ปริมาณความต้องการระบบก่อสร้างอุโมงค์บนพื้นที่หินแข็ง ภาสในเมืองต่างๆ เช่น ปารีส และลอนดอน ซึ่งต้องมีการก่อสร้างอุโมงค์แห่งใหม่ภาสได้แนว อุโมงค์เดิมที่มีอยู่เพิ่มขึ้นอีกหลายแห่ง นักออกแบบก่อสร้างอุโมงค์จึงต้องออกแบบให้อุโมงค์อยู่ใน ระดับลึกยิ่งขึ้นไปอีกโดยจะอยู่ในแนวหินแข็ง สำหรับเครื่องจักรที่ใช้ในการเจาะอุโมงค์สามารถ แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. แบบเจาะระเบิด (Drill and Blast Technique)
2. แบบเจาะหมุน (Tunnel Boring Machine)

เครื่องจักรที่ใช้ในการเจาะอุโมงค์แบบ TBM เป็นเครื่องมือที่ค่อนข้างได้รับการปรับปรุงมา โดยตลอดในช่วงระยะเวลา 3 ศตวรรษที่ผ่านมา เพื่อใช้ในการเจาะหินที่แข็งที่สุดได้โดยมี ความรวดเร็วกว่าและมีราคาถูกกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเจาะแบบเจาะระเบิด ด้วย ระบบที่มีความปลอดภัยสูงกว่าและส่งผลกระทบต่อคนบริเวณโดยรอบน้อยกว่า ซึ่งนับว่าเป็นสิ่งสำ คัญที่สุดอย่างหนึ่งสำหรับสภาพแวดล้อมภาสในเมือง คุณสมบัติของเครื่องจักรในการเจาะชนิดนี้ จึงเริ่มเห็นชัดเจนและได้รับการยอมรับเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องจักรสำหรับเจาะอุโมงค์เครื่องแรกได้รับการประดิษฐ์ขึ้นโดยนาย Jame S. Robbins ในปี ค.ศ. 1956 สิ่งสำคัญของความสำเร็จในการประดิษฐ์ครั้งนี้คือ การพัฒนาระบบแผ่นตัด (Rolling Disc Cutter) และนับแต่นั้นมาเทคโนโลยีอันทันสมัยในเครื่องตัดนี้ได้ช่วยให้เกิดวิวัฒนาการของเครื่องเจาะหินแบบ TBM มาโดยตลอด

ปัญหาหลักที่เกิดขึ้นขณะทำการเจาะหินที่มีลักษณะแข็งมากก็คือ การปรับปรุงมาตรฐานของเทคนิคที่ช่วยให้เกิดแรงกดดันในการขุดหินด้วยแผ่นตัดหิน (Disc Cutter) นอกจากนี้กรรมวิธีที่น่าสนใจอื่น ๆ ยังมีการค้นคว้ากันต่อไปอีกจนกระทั่งในปัจจุบัน

ในปี 1988 บริษัท Robbins ได้นำแผ่นตัดหินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 483 ซม. มาใช้ดำเนินการ ขุดเจาะอุโมงค์หินชนิดนี้ถูกนำมาใช้โดยเฉพาะกับหินที่มีความแข็งมากที่สุดและสามารถมีระวางน้ำหนักบรรทุกได้ถึง 312 KN ซึ่งเป็นระวางที่สูงกว่าใบมีดตัดหินชนิดก่อนหน้านี้ ได้มีการใช้เครื่องเจาะอุโมงค์แบบ TBM จำนวน 4 เครื่องในประเทศนอร์เวย์โดยใช้ในโครงการ The Svartisen hydro project จำนวน 3 เครื่องและอีก 1 เครื่องใช้ในโครงการ The Meraaker hydro project สำหรับเครื่องจักรประสิทธิภาพการทำงานสูงเครื่องที่ 5 กำลังดำเนินการเจาะอุโมงค์สายเคเบิลไฟเบอร์ออปติกในอุโมงค์ซึ่งใกล้จะเสร็จสิ้นโครงการแล้ว ขนาดที่ทำการเจาะในประเทศนอร์เวย์มีอุโมงค์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 ม., 4.3 ม. และ 5.0 ม. ผ่านลงไปในพื้นที่แข็งหลายประเภทเช่น Mica Gneiss, Greenstone, Mica Schist, Quartzite และ หินอ่อน เครื่องจักรมีแรงกระทำสูงถึง 300 MPa และในอุโมงค์สูงถึง 310 MPa ประสิทธิภาพการทำงานสูงสุดของเครื่องเจาะแบบ TBM เหล่านี้ได้ถูกบันทึกว่านำมาใช้ในการเจาะอุโมงค์ที่มีความยาว 35 กม. และมีสถิติการทำงานดังนี้คือ การทำงานช่วงเวลาที่ดีที่สุดคือ 61.2 ม. ช่วงวันทำงานที่ดีที่สุดคือ 100.3 ม. ช่วงสัปดาห์การทำงานที่ดีที่สุดคือ 394.5 ม. และช่วงเดือนที่ดีที่สุดคือ 1142.9 ม. สิ่งที่สำคัญยิ่งไปกว่านั้นคือ เครื่องจักรต่างๆ เหล่านี้มีการรักษาอัตราการเจาะทะลุได้อย่างสูงสุดถึง 5.84 ม./ชม. และสามารถทำงานมีประสิทธิภาพกว่า 50% ซึ่งผลการทำงานของเครื่องจักรเหล่านี้ถือได้ว่าคุ้มค่ากับการลงทุนเป็นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อุโมงค์ดินอ่อน

สภาพพื้นที่ตั้งของเมืองใหญ่ๆหลายแห่งในปัจจุบันตั้งอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับระดับน้ำใต้ดิน บางแห่งตั้งอยู่ในสภาพทางธรณีวิทยาซึ่งเป็นชั้นดินที่อ่อนตัว พื้นดินใต้พื้นผิวแม่น้ำ เช่น โคลนตม ดินเหนียว ทราย หรือหินกรวด บางแห่งเป็นพื้นดินที่มีลักษณะคล้ายก้อนน้ำแข็งซึ่งประกอบด้วยแร่ธาตุที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน แต่ก็ประกอบด้วยพื้นหินแข็งและดินที่เกิดจากหินที่ถูกน้ำกัดเซาะโดยทั่วไปแล้วระดับผิวน้ำอยู่ใกล้เคียงกับระดับผิวดินมาก การเจาะผ่านชั้นดินต่างๆเหล่านี้จึงมีปัญหามากเมื่อเทียบกับการป้องกันดินและน้ำไม่ให้ซึมหรือทะลักเข้ามา เพื่อเป็นการแก้ปัญหาการทำงานเจาะอุโมงค์ในสภาพพื้นดินที่อ่อนตัว กลุ่มบริษัทชาวอังกฤษ เซอร์มันนีและญี่ปุ่นที่มีชื่อเสียงได้ทำการพัฒนาการควบคุมสภาพผิวดิน โดยใช้แผ่น Slurry shields และแผ่นควบคุมสภาพความสมดุลของความดันของผิวดิน (EPBS) บริษัทผู้ผลิตเช่น มิตรชุบิชิ คาวาซากิ โคมิตสึ และบริษัทอื่นๆ อีกหลายแห่งได้ทำการออกแบบโดยใช้หลักการ EPB ในการควบคุมสภาพผิวดินในระหว่างการติดตั้งแนวของอุโมงค์ภายในแผ่นควบคุมดังกล่าว

แผ่นควบคุมสภาพความสมดุลของแรงดันบนพื้นผิวดินนั้นใช้ส่วนหัวที่ทำหน้าที่ตัดโดยหมุนได้รอบและเหมาะสมกับสภาพพื้นดิน เกลียวสายพานลำเลียงจะช่วยในการควบคุมการปล่อยดินในช่องส่วนหัวในขณะที่เครื่องจักรเคลื่อนที่ไปข้างหน้า บนส่วนฝาที่กั้นด้านหลังส่วนหัวจะมีเครื่องวัดชนิดพิเศษติดตั้งอยู่ เพื่อคอย ระดับความกดดันของวัสดุภายในช่องส่วนหัวช่วยให้ผู้ควบคุมเครื่องรักษาแรงกดดันในการปล่อยดินจากสลักเกลียวได้นอกจากนี้ยังสามารถฉีดน้ำหรือดิน Bentonite เข้าไปที่ผิวดิน เพื่อช่วยลดหรือเพิ่มความหนืดของเศษวัสดุด้วย

แม้ว่าจะมีการใช้เทคโนโลยีที่ค่อนข้างสมบูรณ์แบบ แต่ระบบการทำงานของ EPBS ก็ยังเป็นสิ่งใหม่สำหรับประเทศส่วนใหญ่ในโลก สำหรับในประเทศญี่ปุ่น กำลังมีการนำเทคโนโลยีนี้ไปทำการเผยแพร่และขยายขนาดทั้งในส่วนของขนาดของเครื่องจักรและความทันสมัยต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริษัทผู้ผลิตเครื่องเจาะอุโมงค์ของ แคนาดา คือ บริษัท Lovat ได้ทำการพัฒนารูปแบบของระบบการควบคุมแรงกดดันของพื้นดินซึ่งได้มีการนำมาใช้งานในโครงการต่างๆหลายโครงการ เครื่องเจาะอุโมงค์ TBM ของ Lovat ได้รับการติดตั้งด้วยระบบไฮดรอลิค ในการควบคุมประตูช่องทางออกของแรงกดดัน ซึ่งติดตั้งอยู่ภายในบริเวณส่วนหัว เมื่อแรงกดดันที่บริเวณพื้นผิวเพิ่มสูงขึ้น ช่องประตูเหล่านี้ก็สามารถปรับเปลี่ยนได้เพื่อรักษาระดับแรงกดดันและช่วยให้เศษวัสดุผ่านเข้ามายังสลักเกลียวสายพานลำเลียงของเครื่องจักรได้ ในกรณีที่สภาพพื้นผิวดินมีลักษณะค้ำขึ้นแล้วก็สามารถใช้สายพานลำเลียงซึ่งเป็นสายขนาดมาตรฐานแทนการใช้สลักเกลียวสายพานได้

ส่วนบริเวณพื้นที่ซึ่งมีการนำเทคโนโลยีของแผ่นกัน Slurry มาใช้โดยเมื่อเร็ววันได้มีการเน้นให้มีการ นำเครื่องจักรขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้นมาใช้ดำเนินงาน แผ่นกัน Slurry นี้มีการติดตั้งไว้บนแผ่นกันโคลน ซึ่งหมุนโดยรอบผ่านช่องส่วนหัวของเครื่องเจาะและเป็นการหมุนภายใต้แรงกดดันเพื่อใช้ช่วยค่าจุนบริเวณพื้นผิวและเพื่อใช้ลำเลียงดินที่ขุดออกมา โครงการก่อสร้างอุโมงค์ที่อ่าว Trans Tokyo Bay ก็เป็นอุโมงค์ที่มีการใช้แผ่นกัน Slurry Shield ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 14 ม. และแผ่นกันขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 13.94 ม. ของคาวาซากิซึ่งมีส่วนประกอบติดตั้งอัตโนมัติกำลังเริ่มนำมาใช้ในการขุดระบบระบายน้ำของโครงการ The Kanda ในเมืองโตเกียวด้วย ส่วนโครงการอื่นๆอีกหลายแห่งในยุโรปก็เริ่มนำเครื่องจักรที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 11-12 ม. มาใช้ดำเนินการอีกหลายเครื่อง

อุโมงค์ในสภาพดินหลายประเภท

อุโมงค์ต่างๆที่ต้องก่อสร้างผ่านชั้นดินหลายประเภทตั้งแต่ชั้นหินแข็งจนถึงชั้นดินอ่อนและย้อนกลับเป็นดินชั้นหินแข็งอีกครั้งหนึ่งนับเป็นปัญหาสำคัญของการก่อสร้างอุโมงค์มาเป็นเวลานาน ในทำนองเดียวกันพื้นดินทรากันน้ำและหินขนาดใหญ่ที่ถูกน้ำเซาะหรือเศษก้อนหินที่รองรับน้ำไว้ก็เป็นอุปสรรคสำคัญต่อเครื่องจักรที่ใช้ในการเจาะอุโมงค์ด้วย แต่เมื่อไม่นานมานี้บริษัทผู้ผลิตเครื่องจักรต่างๆได้ทำการออกแบบและผลิตเครื่องจักรที่ผ่านการทดลองใช้ในสภาพพื้นดินที่มีปัญหาดัง

กล่าวแล้วอย่างได้ผล เครื่องจักรระบบมาตรฐานดังกล่าวสามารถทำงานผ่านชั้นดินชนิดหนึ่งไปยังอีกชั้นหนึ่งได้โดยไม่ต้องมีการปรับเปลี่ยนหรือเกิดความเสียหายขึ้นเลยและในปัจจุบันเครื่องจักรดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการทำภาคสนามอย่างแท้จริงแล้ว

เมื่อเรารู้ว่าได้มีการยอมรับกันแล้วว่า ระบบเครื่องเจาะอุโมงค์ TBH ชนิดใช้แผ่นกำบังสามารถมีประสิทธิภาพในการใช้งานเจาะอุโมงค์ชนิดหินแข็งและหินผสมหลายชนิดรวมทั้ง สภาพพื้นดินธรรมดาได้อย่างประสบความสำเร็จ ทั้งๆที่ก่อนหน้านี้เพียงไม่กี่ปีเป็นสิ่งที่เป็นไปได้ การใช้แผ่น Disc cutters และการออกแบบการเปิดส่วนหัว cutterhead ของเครื่องจักรอย่างระมัดระวังช่วยทำให้เครื่องจักรสามารถขุดดินและหินในขณะเคลื่อนที่ที่กักการไหลเข้าของวัสดุมาซึ่งส่วนภายในของ cutterhead การนำเอาหลักการดังกล่าวนี้มา ร่วมกับการใช้แผ่น slurry หรือระบบการเคลื่อนย้ายวัสดุ EPB และการใช้แผ่นเหล็กกันแรงอัดของของเหลวจะช่วยให้เกิดความเป็นไปได้ในการเจาะอุโมงค์ขึ้นแม้จะเป็นอุโมงค์ใต้น้ำที่มีสภาพพื้นผิวที่มีความขรุขระและประกอบด้วยแร่ธาตุหลายชนิดก็ตาม โดยมีตัวอย่างโครงการสองแห่งในปัจจุบันซึ่งกำลังอยู่ระหว่างการก่อสร้างอุโมงค์ที่มีการใช้เทคโนโลยีการเจาะอุโมงค์ชนิดที่มีสภาพพื้นดินหลายประเภท ได้แก่โครงการสร้างอุโมงค์ข้ามระหว่างช่องแคบประเทศอังกฤษ และฝรั่งเศสและช่องแคบ the Great Belt ข้ามไปยังประเทศเดนมาร์ก

สำหรับงานที่มีความท้าทายที่สุดที่โครงการ The Channel Tunnel คือ โครงการเจาะอุโมงค์ด้านฝั่งประเทศฝรั่งเศสเป็นระยะทางจากชายฝั่งทะเลประมาณ 37 กม. ซึ่งมีสภาพเป็นดินลักษณะซึ่งไม่มีรอยแตกแยกน้ำไม่สามารถซึมผ่านได้และความแข็งแกร่งในพื้นที่ดิน แต่ตามบริเวณใกล้ชายฝั่งประเทศฝรั่งเศสจะเป็นดินซอล์คที่แตกแยกและเสียหาย และภายในบริเวณพื้นที่ซึ่งมีการแตกแยกของผิวดินเหล่านี้บางแห่งจะเป็นทางน้ำไหลโดยตรงลงสู่ทะเลด้วย

เครื่องจักรทั้งหลายที่จำเป็นต่อการเจาะพื้นที่ในแถบนี้ก็คือ เครื่องเจาะหิน TBM ซึ่งมีการติดตั้งการผนึกตราที่ได้รับการออกแบบมาโดยเฉพาะรวมทั้งมีระบบการปล่อยเศษวัสดุซึ่งสามารถทำให้เกิดความกดดันจากน้ำสูงถึง 10 ชั้นบรรยากาศของแรงกดดัน ในขณะที่มีการเจาะอุโมงค์อย่างต่อเนื่อง นอกจากที่กล่าวไปแล้วยังมีเครื่องจักรที่จำเป็นต้องใช้เพื่อใช้ในการติดตั้งการผนึกตราและการวางแนวสลักเกลียวซึ่งทำจากเสาหล่อคอนกรีต จนกระทั่งถึงเดือนมิถุนายนปีที่แล้วได้มีการวางแนวอุโมงค์ไปแล้ว 3 แห่ง ในโครงการ The Great Belt ของประเทศเดนมาร์กนั้นมีสภาพทางธรณีวิทยาซึ่งอาจมีความยากลำบากมากกว่าที่เคยพบในโครงการ The Channel Tunnel เนื่องจากอุโมงค์แห่งนี้เริ่มต้นก่อสร้างที่จากพื้นที่ที่เป็นเกล็ดน้ำแข็งจนกระทั่งเป็นพื้นดินที่ประกอบด้วยก้อนหินขนาดใหญ่ ซึ่งบางแห่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลาย ๆ เมตร ต่อจากนั้น ก็ต้องก่อสร้างเข้าไปยังพื้นดินซึ่งเป็นบริเวณพื้นที่ที่เป็นรอสแซก น้ำสามารถซึมผ่านได้ง่าย ส่วนที่ลึกที่สุดอยู่ในบริเวณพื้นที่ 70 เมตรต่ำกว่าระดับน้ำทะเลและต้องมีการออกแบบเครื่องจักร EPBS ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.5 ม. ซึ่งออกแบบโดย Howden Writch มาโดยเฉพาะซึ่งช่วยให้ใช้งานในด้านแรงดันของน้ำและของเหลวต่างๆ ได้สูงถึง 7 บาร์

โครงการนี้ได้ประสบปัญหาากลำบากหลายประการ คือ เมื่อพ้นจากช่วงแรกดำเนินการแล้วโครงการก็ได้มีการชะงักลงชั่วคราว เนื่องจากผู้รับเหมาได้ประสบกับอุปสรรคที่สำคัญ ซึ่งก็คือ ในขณะที่คนงานกำลังทำการซ่อมบำรุงเครื่องเจาะ TBM เครื่องหนึ่งซึ่งต้องมีการเปิดช่องที่ปิดไว้ในบริเวณส่วนหัวของเครื่องได้มีน้ำทะเล เข้ามารวมในอุโมงค์และจากปากประตูไปท่วมเครื่องจักรเครื่องที่สอง ทำให้เครื่องจักรหลายเครื่องต้องจมลงไปในน้ำทะเลแต่โชคดีที่ไม่มีผู้ใดเสียชีวิต นับแต่นั้นมาผู้รับเหมาทั้งหลายจึงต้องละทิ้งจากอุโมงค์และหันมาดำเนินการซ่อมแซมเครื่องเจาะอุโมงค์ TBM ที่เกิดความเสียหาย แม้กระนั้นก็ตามการดำเนินการก่อสร้างอุโมงค์ให้สำเร็จโดยใช้เครื่องเจาะ TBM ก็ยังมีการยืนยันแน่นอนอยู่ต่อไป

โครงการ The Great Belt คือ สัญลักษณ์ที่แสดงให้เห็นถึงการเสี่ยงภัยอันตรายและ การทำทาสซึ่งจะยังคงพบได้จากการก่อสร้างอุโมงค์ในระดับใต้ทะเล จากบทเรียนที่ได้จาก โครงการแห่งนี้รวมทั้งที่โครงการ The Channel Tunnel จะได้รับการวิเคราะห์เข้ากับ ระบบการประกอบเครื่องจักรที่ใช้เจาะอุโมงค์ที่มีสภาพแตกต่างกันไปเช่นนี้ในอนาคตอย่างไรไม่มีข้อ สงสัยอันใดอีกเลย

สภาพพื้นดินและหินที่มีการรวมตัวกันนี้ เมื่อถูกรบกวนจากสิ่งที่มีน้ำหนักมากเกินไปจะก่อให้เกิด สภาพพื้นดินอัดตัวกันแน่นได้บ่อยครั้ง เคยมีเครื่องเจาะ TBM มากกว่าหนึ่งเครื่องแล้วที่ถูกกัก ติดอยู่ในดินซึ่งมีลักษณะเช่นนี้ ดินเหล่านี้จะถูกบีบเข้าไปติดที่บริเวณโศรอบของเครื่องได้รวดเร็ว เกินกว่าที่เครื่องจักรจะเดินเครื่องให้ดินถูกสลัดออกไปได้ การเปิดเครื่องจักรไว้โดยไม่มีชิ้นแผ่นกัน (shield) จะช่วยให้สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาเช่นนี้ได้ แต่ต้องมีการติดตั้งเครื่องค้ำหินชั่วคราว เนื่องจากหินที่อัดตัวกันนี้ส่วนใหญ่จะไม่ค่อยมีความมั่นคงแข็งแรง วิธีการแก้ปัญหาที่อาจใช้ได้ผลคือ การประยุกต์ใช้วิธีการพ่น Shortcrete เพื่อป้องกันการกัดกร่อนผิวดินโดยใช้สลักหินและตะ แกรงลวดหรือติดตั้ง Yielding Steel Ribs ซึ่งต้องมีการติดตั้งไว้โดยทันทีที่บริเวณด้านหลัง ของส่วนหัวของเครื่องจักรโดยมีการเริ่มใช้วิธีดังกล่าวนี้ที่โครงการเจาะอุโมงค์ The New Austrian Tunneling Method (NATM) อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวนี้ต้องมีการใช้เครื่อง จักรโดยเฉพาะที่มีช่องว่างสำหรับการติดตั้งระบบดังกล่าวในบริเวณตอนหน้าของเครื่อง

อีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าวและได้มีการทดลองใช้มา 2 ครั้งแล้วคือ การติด แผ่นที่ยึดหยุ่นหรือขยายตัวได้ เพื่อใช้เป็นกำบังโศรอบตัวเครื่องโดยมีตัวยึดติดอยู่ด้วยโดยตัวยึดนี้จะ ติดอยู่รอบนอกของกำบังซึ่งจะช่วยป้องกันดินที่อัดเข้ามา ขณะที่มีการเดินเครื่องบีบเข้ามาที่ละน้อย ซึ่งจะช่วยป้องกันเครื่องจักรไม่ให้ถูกดินเกาะได้โดยรอบ วิธีการออกแบบอย่างง่ายและสะดวก เช่นนี้ต้องมีการพัฒนาก่อนที่จะมีการยอมรับอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นระบบที่ค่อนข้างซับซ้อน

## อุโมงค์ลักษณะอื่น

เทคโนโลยีอื่นทันสมัยที่สุดในปัจจุบัน เพื่อทำการก่อสร้างอุโมงค์ก็คือการพัฒนาระบบเครื่องจักรต่างๆ เพื่อใช้ในการขุดเจาะอุโมงค์ที่ไม่ใช่ทรงกลม ได้แก่ อุโมงค์รูปโค้ง อุโมงค์รูปเกือกม้า อุโมงค์รูปตัว U คำว่า อุโมงค์รูปกระดิ่ง หรืออุโมงค์พื้นเรียบหรือโค้ง ซึ่งเป็นที่นิยมของนักออกแบบอุโมงค์ทั้งหลาย โดยเฉพาะอุโมงค์ที่ใช้ในการคมนาคมขนส่ง

ปัจจุบันเทคโนโลยีใหม่ๆ ได้ช่วยให้การใช้เครื่องจักรในการเจาะอุโมงค์รูปทรงต่างๆ เพื่อใช้ในการเจาะอุโมงค์รูปทรงต่างๆ เหล่านั้นในพื้นที่แข็งได้อีกด้วย เช่นมีการใช้เทคนิคในการเจาะรวมทั้งวิธีการขุดและระเบิดหิน เพื่อให้ได้รูปทรงตามต้องการ ในเมือง Bergen ประเทศนอร์เวย์ได้มีการก่อสร้างอุโมงค์รูปทรงกระดิ่งเพื่อใช้ในการก่อสร้างถนนลอดอุโมงค์และที่ช่องทางผ่าน Rogers ใน British Columbia ได้มีการก่อสร้างอุโมงค์รูปตัว U คำว่า เพื่อใช้เป็นเส้นทางรถไฟ

ได้มีการคาดหมายว่าเครื่องเจาะอุโมงค์หินแข็ง TBM จะได้รับการพัฒนาให้เป็นการเจาะทรงกลมโดยให้ส่วนหัวมีรูปทรงกลมคล้ายกลองหรือใช้วิธีติดตั้งแผ่นใบมีดหมุนเพื่อให้สามารถเจาะรูปทรงอุโมงค์ได้ตามต้องการโดยไม่ต้องมีการระเบิดหินอีกเป็นครั้งที่ 2 เครื่อง TBM ของ DEMAG ซึ่งมีผู้ดำเนินการได้ถูกนำมาใช้ในโครงการท่าเหมืองถ่านหินแห่งหนึ่งและในกรณีที่ใช้ในพื้นที่แข็งก็มีผู้ผลิตเครื่องจักรลักษณะนี้ออกมาใช้แล้วหลายราย

เมื่อเรารู้จักสถาบัน Lothar Baumann แห่งเยอรมันได้รายงานผลการพัฒนาระบบเครื่องจักรที่ใช้ในการเจาะอุโมงค์โดยเป็นเครื่องจักรที่มีการติดตั้งเครื่องตัดล้อเลื่อนเพื่อช่วยในการตัดส่วนโค้งหรืออุโมงค์รูปเกือกม้า ก้านทั้งคู่ของเครื่องมีการทำงานเป็นรัศมีของวงกลมในขณะที่มีการเคลื่อนที่โดยรอบช่วยให้ล้อเลื่อนที่ใช้ตัดหินจากด้านบนของอุโมงค์สามารถทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนงานพัฒนาเครื่องจักรในงานอื่นๆ เช่นงานอุตสาหกรรมเหมืองแร่ นั้น บริษัท Robbins ได้ส่งแบบของเครื่องจักรสำหรับขุดอุโมงค์หินแข็งรูปทรงต่างๆ ซึ่งเป็นเครื่องจักรชนิดเคลื่อนที่ได้ ออกมาจำหน่ายแล้ว สำหรับเครื่องจักรรุ่นแรกที่นำมาใช้ในงานเหมืองประเทศออสเตรเลีย นั้นสามารถทำการตัดหินเพื่อก่อสร้างอุโมงค์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก และสามารถเจาะอุโมงค์รูปโค้งและรูปทรงอื่นๆ ได้ เมื่อมีการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์บางอย่าง

ระบบการพัฒนาแบบอื่นๆ คือการมุ่งพัฒนาระบบ Roadheaders ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้งานในสภาพผิวหินแข็งมาก แม้ว่าระบบ Roadheaders ดั้งเดิมจะมีความยืดหยุ่นได้มากในการเจาะหินแข็ง เนื่องจากมีความร้อนจากความเสียดทานที่ดอกสว่านเป็นอย่างมาก แต่จากการพัฒนาครั้งใหม่โดย B.Sole ซึ่งเป็นวิศวกรที่ปรึกษาในด้านการทำเหมืองแร่ จากประเทศเชคโกสโลวาเกีย พบว่าระบบ Roadheaders ที่มีการใช้แผ่นตัดลูกกลิ้งจะช่วยลดแรงเสียดทานของการหมุนซึ่งอาจทำให้เครื่องจักรเหล่านี้สามารถประยุกต์ใช้งานกับการเจาะอุโมงค์หินที่แข็งกว่าได้

ในที่สุดได้มีการออกแบบเครื่องจักรอีกรุ่นหนึ่งสำหรับการเจาะอุโมงค์หินแข็งรูปทรงต่างๆที่ไม่ใช่ทรงกลมซึ่งเรียกว่า เครื่องจักร RAMEX แม้ว่าจำเป็นต้องทดสอบการใช้งานอีกแต่ก็มั่นใจว่าเครื่องจักรนี้เหมาะสำหรับใช้งานในการเจาะอุโมงค์หินแข็งรูปทรงต่างๆ และทรงอื่นๆ ที่ต้องการได้โดยระบบเครื่องของ RAMEX นี้จะทำงานด้วยเครื่องทุบไฮดรอลิกส์ที่พลังงานดีเซลในการเจาะทำลายก้อนหิน

ในประเทศญี่ปุ่นพบว่ามีผู้ใช้ระบบการเจาะอุโมงค์ทรงต่างๆที่พัฒนาใช้สำหรับพื้นดินอ่อนนุ่ม โดยใช้เครื่องจักรชนิดที่มีแผ่นกันผิวทรงกลมหลายชิ้น ซึ่งมีการออกแบบร่วมกันระหว่างผู้รับเหมา Kumaki-Gumi และผู้ผลิตเครื่องจักร Hitachi Zosen ซึ่งมีการใช้เครื่องจักรชนิด Two-headed shield เพื่อก่อสร้างอุโมงค์รูปสองตาในเมือง Kyobashi แม้ว่าจะมีข้อจำกัดในการใช้งานบางประการ ผู้รับเหมาที่ก่อสร้างก็สามารถลดค่าใช้จ่าย ในการก่อสร้างโครงสร้างอุโมงค์รูปตัดขวางได้ถึง 13%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

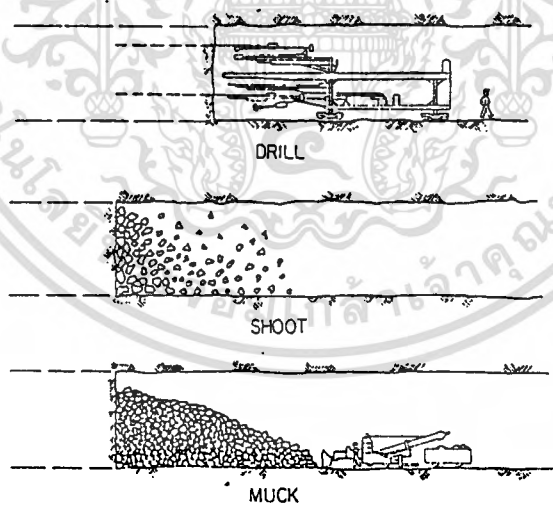
ปัจจุบันเป็นช่วงเวลาที่น่าติดตามเป็นอย่างยิ่งสำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้างอุโมงค์เพราะเมื่อเร็วๆ นี้มีรายงานว่ามีการนำพื้นที่ใต้ดินมาใช้ประโยชน์จะเป็นการลดต้นทุนการใช้จ่ายในการก่อสร้างมากที่สุด ดังนั้นโอกาสและความสามารถในการพัฒนาระบบเครื่องจักรที่มีประสิทธิภาพเพื่อใช้ในการขุดและก่อสร้างใต้ดินจะเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ขั้นตอนการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยวิธี Drilling and Blasting

1. ติดตั้งเครื่องเจาะ (Drilling Machine)
2. เจาะรูตามแบบและวิธีที่ออกแบบไว้
3. บรรจุกินระเบิดในรูเจาะแล้วทำการระเบิด
4. ทำการถ่ายเทระบายนอกอากาศและฝุ่นผงออกไป
5. ตักดินหรือหินที่ถูกระเบิดออกมาและลำเลียงออกไป
6. สูบน้ำออกถ้ามีความจำเป็น
7. ติดตั้งระบบค้ำยันถ้ามีความจำเป็น
8. ติดตั้งแบบและเหล็กเสริมสำหรับงานคอนกรีต
9. หล่อคอนกรีต

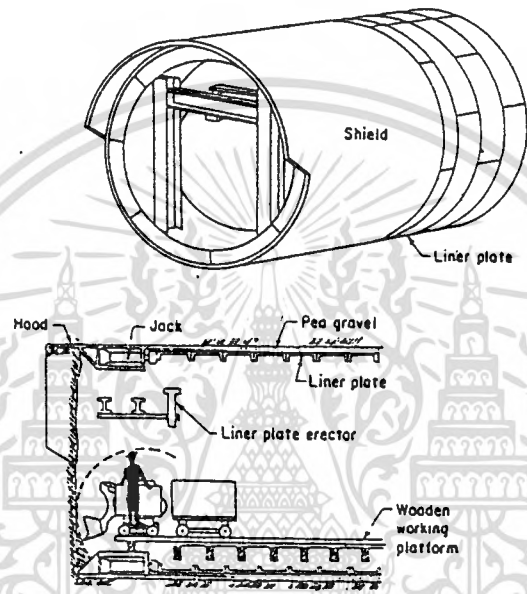


Drawing 1 Conventional tunnel driving.

### รูปที่ 3.3

#### ขบวนการขุดเจาะอุโมงค์แบบ Drilling & Blasting

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Drawing 2. Shield operation used in dry, finely particled material.

รูปที่ 3.4

การใช้ Shield ในการขุดเจาะอุโมงค์แบบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การขุดอุโมงค์ด้วยวิธี Tunnel Boring Machine (TBM)

การขุดอุโมงค์ด้วยวิธีนี้เป็นเทคโนโลยีการขุดอุโมงค์ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาเมื่อไม่นานมานี้ ซึ่งสามารถทำการขุดอุโมงค์ได้ทั้งในสภาพที่เป็นดินแข็งและสภาพที่เป็นหินโดยเป็นการปรับปรุงเพื่อแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นจากการขุดอุโมงค์ด้วยวิธี ขุดและระเบิด (Drilling and Blasting Method) ซึ่งเป็นวิธีการดั้งเดิมที่ใช้กันมาตั้งแต่ยุคแรกๆ และมีปัญหาต่างในการก่อสร้างมากมาย เช่น ความไม่แน่นอนของรูปร่างอุโมงค์ ฝุ่นผงที่เกิดขึ้นระหว่างการระเบิด ความล่าช้าในการทำงาน ด้วยเหตุนี้จึงนำเอาเครื่องจักรที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลม มีใบมีดหมุนสำหรับตัดดินหรือหินแทนการเจาะระเบิด ทำให้ปัญหาต่างๆที่กล่าวมาแล้วข้างต้นหมดไปเมื่อนำวิธีการขุดอุโมงค์แบบ Tunnel-Boring Machine มาใช้

### ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องจักร TBM

- 1.A Cutter Wheel
- 2.Muck Bucket
- 3.Cylindrical Metal Shield
- 4.Extendabel and Retractable Clamp legs
- 5.Thrust Cylinder or Rams
- 6.A Central Console
- 7.Rear Support Legs
- 8.MotorS
- 9.Laser Guidance System

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

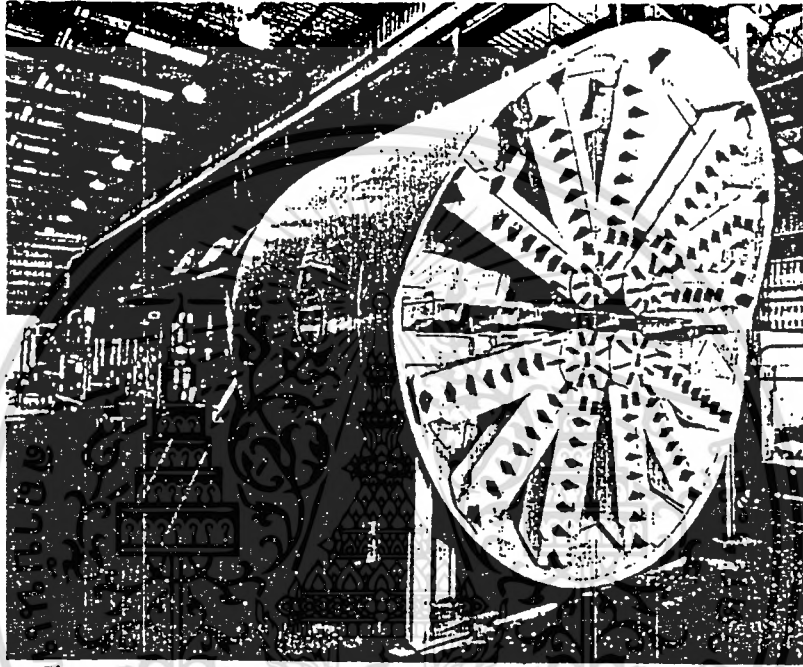


Photo. 20. Calweld oscillating boring machine. (Calweld, Division of Smith Industries, International, Inc.)

รูปที่ 3.5

แสดงตัวอย่างเครื่องเจาะอิมองค์แบบ TBM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทำงานของเครื่องจักร TBM

ขนาดของเครื่องจักรไม่มีข้อจำกัดทางด้านทฤษฎีเช่นเดียวกับเครื่องจักรที่ใช้แผ่นกำบัง (Shield) แบบอื่นๆ จะมีขนาดใหญ่หรือเล็กเท่าใดก็ได้ตามความเหมาะสมและลักษณะการใช้งาน รวมทั้งความประหยัดในการก่อสร้าง แต่โดยปกติแล้วขนาดของเครื่องจักรสำหรับขุดอุโมงค์ที่นิยมใช้กันจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5-40 ฟุตหรือประมาณ 1.50-12 เมตรหรือใหญ่กว่านี้ในบางแห่ง บางครั้งมีการออกแบบอุโมงค์ขึ้นมาใช้เฉพาะงานบางงาน เครื่องจักรบางชนิดถูกปรับให้สามารถทำงานในขณะที่มีการเพิ่มหรือลดขนาดของอุโมงค์หรืออุโมงค์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดอยู่ตลอดเวลา ข้อจำกัดของเครื่องจักร TBM เมื่อใช้ขุดเจาะในดินสภาพต่างๆคือ ที่ผ่านมามีเครื่องจักรชนิดนี้ใช้ในการขุดเจาะอุโมงค์ผ่านไปในดินเหนียวที่มีค่า Compressive Strength ประมาณ 40,000 Psi เมื่อขุดอุโมงค์เข้าไปในหินอัตราการทำงานย่อมลดลงแต่ค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะต้องเปลี่ยนใบมีดตัดดินจาก Cutter Teeth ไปเป็นแบบ Disc แทนเพื่อให้เหมาะสมกับสภาพความแข็งของหินที่มีมากกว่าดิน

## ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการขุดอุโมงค์ด้วยวิธี Tunnel-Boring Machine

1. ชนิดของดินหรือหินที่จะขุดผ่าน
2. ระดับและปริมาณน้ำใต้ดิน
3. กำลังของเครื่องจักร
4. ความชำนาญในการทำงาน
5. วิธีการลำเลียงดินออก
6. ขนาดและพื้นที่ของส่วนค้ำยันที่ต้องการ
7. ชนิดของระบบค้ำยัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข้อได้เปรียบของการใช้เครื่องจักรแบบ TBM

1. สามารถเคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้รวดเร็วกว่า
2. ทำให้อุโมงค์เป็นผิวเรียบกลม ไม่แตกยุบ
3. สามารถลดการพังทลายของดินเหลือ 5 % เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการขุดอุโมงค์ แบบ Drilling and Blasting ซึ่งมีค่าการพังทลายของดินถึง 20 %
4. ในการทำผนังอุโมงค์(Lining) ใช้ปริมาณคอนกรีตน้อยกว่า
5. ดินบริเวณโดยรอบไม่ถูกรบกวนหรือถูกกระทบกระเทือนเหมือนกับวิธี Drilling and Blasting จึงไม่จำเป็นต้องเสียค่าใช้จ่ายในการทำระบบค้ำยันดินมาก
6. ลดปัญหาและอันตรายซึ่งเกิดจากหินร่วงใส่หรือก๊าซพิษ
7. เนื่องจากขั้นตอนการขุดและการขนดินออกสามารถดำเนินไปได้พร้อมกันจึงทำให้ประหยัดเวลาลงและทำงานได้มากขึ้นทั้งคนงานและเครื่องจักร
8. เครื่องขุดเจาะดินมีขนาดเล็กทำให้เหลือพื้นที่ว่างสำหรับการทำงานอื่นๆได้สะดวก เช่น การทำผนังอุโมงค์ การติดตั้งค้ำยัน และติดตั้งท่อระบายอากาศ เป็นต้น
9. คุณสมบัติการรับกำลังของหินไม่ถูกรบกวนกระเทือน เนื่องจากไม่มีขั้นตอนการระเบิดหิน (Blasting)
10. จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบราคาแล้วพบว่า การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธี TBM จะประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากกว่าการก่อสร้างด้วยวิธี Drilling and Blasting ถึง 40%
11. วิธีการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธีTBMสามารถติดตั้งระบบกำจัดฝุ่น หรือแม้กระทั่งก๊าซพิษที่เกิดจากการระเบิดก็ถูกกำจัดออกไปด้วย โดยเสียค่าใช้จ่ายไม่มากนัก

### ข้อเสียเปรียบของการใช้เครื่องจักรแบบ TBM

1. ค่าใช้จ่ายจะสูงแปรเปลี่ยนไปตามแต่ละโครงการ โดยจะมีค่าใช้จ่าย (คอลลาร์) ประมาณ 4,000 - 6,000 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (ฟุต) ยกกำลังสอง
2. ค่าไบบิ้นสำหรับตัดหินแพงมาก
3. ไม่มีความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ถ้าจะใช้ระบบ TBM ที่มีอายุการใช้งานสั้นในการเจาะหิน
4. การก่อสร้างด้วยวิธี TBM จะต้องมีข้อมูลต่างๆอย่างสมบูรณ์แบบ ซึ่งบางครั้งประสบการณ์อาจจะไม่เพียงพอต่อการตัดสินใจ
5. ค่าใช้จ่ายเริ่มต้นและค่าโสหุ้ยต่างๆมีราคาแพงทำให้วิธีการนี้ไม่เหมาะสมต่อการก่อสร้างหรือการลงทุนในระยะสั้น
6. ไม่เหมาะกับการก่อสร้างอุโมงค์ที่มีรูปร่างอื่นที่ไม่ใช่วงกลม เช่น รูปเกือกม้า หรือรูประฆังคว่ำ เป็นต้น

## ประเภทของการขุดคูโมงค์ด้วยการใช้ Shield

### A. Hand Excavation type

#### 1. Hand Excavation

ลักษณะของเครื่องจักร เป็นแบบเปิดหน้าใช้คนขุดดิน ค้ำยันบริเวณผิวขุดเจาะด้วย half moon, movable hood, face jack และ deck jack

ลักษณะเฉพาะ เหมาะกับสภาพดินที่มีการเปลี่ยนแปลงบ่อย หรือมีอุปสรรคในการขุด เช่น มีเสาเข็ม หรือโครงสร้างใด ๆ ขวางอยู่เป็นเครื่องจักรที่ทำงานอย่างง่าย ๆ ราคาเครื่องจักรไม่สูงนัก แต่ต้องมีการปรับสภาพดินด้วยการฉีดน้ำยาหรือสารเคมี หรือต้องอัดความดันเพื่อรักษาสภาพผิวหน้าบริเวณที่ขุดเจาะ

สภาพดินที่เหมาะสม ดินที่สามารถคงตัวอยู่ได้เอง ดินเหนียวแข็ง หรือกรวดทรายที่มีการยุบตัวมานานแล้ว

#### 2. Blind type

ลักษณะของเครื่องจักร บริเวณส่วนหน้าของผิวเจาะจะถูกแบ่งแยกและปิดกั้นกับส่วนหลังและมีประตูสำหรับการขุดดินออก

ลักษณะเฉพาะ ดินที่สามารถปรับปรุงได้ ขนาดของ Jack และขนาดของประตูจะขึ้นอยู่กับขนาดของโครงการนั้น ๆ

สภาพดินที่เหมาะสม ดินเหนียวอ่อนที่เป็นเนื้อเดียวกันและไม่มีดินประเภทอื่นปะปนอยู่

#### 3. Semi-mechanical type แบ่งออกได้เป็นอีก 2 ประเภท คือ

##### 1) Shovel mount

ลักษณะของเครื่องจักร เหมือนกับแบบ Hand excavation type แต่แบบนี้จะใช้ Shovel, back hoe หรือเครื่องขุดในการขุดดินออกแทนคน

สภาพดินที่เหมาะสม ดินที่คงตัวอยู่ได้ด้วยตัวเอง

ลักษณะเฉพาะ มีประสิทธิภาพดีกว่าแบบ Hand excavation type

## 2) load header (Similar machine)

**ลักษณะของเครื่องจักร** ใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Boom Cutter, heading machine มักใช้กับดินหรือหินที่มีความแข็งมาก ๆ แต่ไม่ต้องการใช้วิธีการระเบิด

**สภาพที่เหมาะสม** หินที่มีค่ากำลังรับแรงอัด 1,000 KSC หรือค่อนข้างที่จะเป็น Soft Rock

**ลักษณะเฉพาะ** การทำงานจะใช้เวลาที่สั้นกว่า และจะให้ประสิทธิภาพสูงสำหรับดินที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ถ้าหินที่จะเจาะผ่านมีความแข็งเพิ่มขึ้น ความสึกหรอของใบมีดตัดก็จะเกิดขึ้นมาก ทำให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

## B. Slurry Pressure (Bentonite pressure) type

**ลักษณะเครื่องจักร** Bulk head จะติดตั้งอยู่ทางด้านหลังของใบมีดตัด ผิวหน้าดินรักษาสภาพความมั่นคงไว้ด้วย แรงดันของสารละลาย Bentonite ที่ถูกเติมเข้าไปอยู่ระหว่างผิวเจาะกับใบมีดตัดดิน และบริเวณใบมีดตัดดิน cutter head ดินที่ขุดออกมาได้จะลำเลียงออกด้วยการผสมกับ Bentonite และปั๊มออกไปข้างนอก ชั้นสู่พื้นดินด้านบน

**ลักษณะดินที่เหมาะสม** ใช้ได้กับดินหลายประเภท เช่น ดินทรายอุ้มน้ำ ดินตะกอน (Silt) และกรวด

**ลักษณะเฉพาะ** เนื่องจากต้องลำเลียงดินออกโดยผ่านท่อ จึงจำเป็นต้องมีขนาดของท่อใหญ่พอที่จะให้หินก้อนใหญ่ (Cobble) ถูกขนออกไปได้ การปรับปรุงคุณสมบัติของ Bentonite ตลอดจนแรงดันของสารละลายนี้ก็เป็นสิ่งสำคัญเช่นเดียวกัน

## C. Earth Pressure balanced type แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

### 1. Excavated earth pressure balanced type

**ลักษณะของเครื่องจักร** ใช้หลักการสมดุลแรงดันพื้นฐานโดยการนำดินที่ขุดได้เข้าไปใน cutter drum chamber และนำดินที่มีปริมาตรเท่ากันออกโดยใช้ Screw Conveyer ซึ่งติดตั้งอยู่ด้านใน cutter drum chamber อีกที่หนึ่ง Drum chamber โดยปกติจะมีดินที่ขุดมาได้บรรจุอยู่เต็ม และทำให้แรงดันดินเหล่านี้ป้องกันไม่ให้เกิดการพังทลายของผิวหน้าดิน

- cutter disk ต้องมีรูปร่างที่เหมาะสม
  - ดินที่ขุดออกมาต้องผสมกับสารละลายให้มีความข้นเหลวพอเหมาะ
  - ตีระบบกันน้ำซึม และต้องนำดินออกอย่างต่อเนื่องด้วย Rotary feeder
- สภาพดินที่เหมาะสม ได้แก่ ดินเหนียว ดินตะกอน ดินทรายที่ขอมให้น้ำผ่านได้

### เล็กน้อย

- ลักษณะเฉพาะ**
- ไม่จำเป็นต้องมีการปรับสภาพของ Slurry
  - การขนย้ายดินออกอาจมีปัญหา เนื่องจากการเลือกสารผสมที่ไม่เหมาะสม
  - การจัดการงานก่อสร้างในดินบางสภาพจะลำบาก และยุ่งยาก เช่น บริเวณที่มีหินก้อนใหญ่ หรือ เป็นชั้นหิน

## 2. Earth pressure plus water pressure balance type

**ลักษณะของเครื่องจักร** ใช้หลักการสมดุลแรงดันเหมือนกับวิธีแรก จะแตกต่างกันก็คือ มีการสมดุลแรงดันของน้ำใต้ดิน โดยการให้ความดันกับน้ำใน cutter face plate และใน drum chamber เพื่อรักษาเสถียรภาพของผิวเจาะ พร้อมกับการสมดุลแรงดันดินไปด้วย

สภาพดินที่เหมาะสม ดินทรายหรือกรวดที่อุ้มน้ำ

**ลักษณะเฉพาะ** เครื่องจักรสำหรับการปรับสภาพของ Slurry ต้องนำมาใช้ทั้งนี้ เพราะมีการใช้ Slurry ในการขนส่งลำเลียงดิน การควบคุมอัตราการลำเลียงดินและการควบคุมความดันของของเหลวจะทำให้ลำบาก

## 3. High density Slurry Shield type

**ลักษณะของเครื่องจักร** ใช้หลักการเช่นเดียวกับที่กล่าวมา แต่การรักษาเสถียรภาพของผิวเจาะทำได้โดยการใช้ Slurry ที่มีความหนาแน่นสูง ดินที่ขุดได้จะลำเลียงออกด้วยท่อ

สภาพดินที่เหมาะสม ดินทรายอ่อน หรือดินกรวดอ่อน (Soft sand or silt) ที่ขอมให้น้ำผ่านได้ง่าย

ลักษณะเฉพาะ ใช้ได้ดีกับสภาพดินที่ยอมให้น้ำไหลผ่านได้ง่าย และอุโมงค์ที่อยู่ในระดับตื้น ๆ จากผิวดิน ต้องมีการปรับสภาพของ Slurry การควบคุมความดันของของเหลว และอัตราการลำเลียงดิน เป็นเรื่องที่ทำได้ยาก

#### 4. Mud Pressure Shield type

ลักษณะของเครื่องจักร ใช้หลักการสมมูลย์เช่นเดียวกัน การรักษาเสถียรภาพของผิวเจาะ ทำได้โดยการฉีดดินเหนียวเหลว หรือ สารละลาย Bentonite เข้าไปผสมกับดินใน drum chamber เพื่อเปลี่ยนสภาพของดินให้กลายเป็น โคลน (Clay mud) ซึ่งแรงดันจากโคลนนี้จะช่วยพยุงผิวเจาะ ให้คงอยู่ได้โดยไม่พังทลาย

สภาพดินที่เหมาะสม ใช้กับดินได้เกือบทุกประเภท ยกเว้น หิน

ลักษณะเฉพาะ การควบคุมการขุดอุโมงค์โดยการวัดแรงดันของโคลน เป็นสิ่งสำคัญวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องปรับสภาพ Slurry เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ แต่ปริมาณของดินที่จะลำเลียงออกจะเพิ่มมากขึ้นเนื่องจาก สารละลาย Bentonite ที่ฉีดเข้าไปในบางครั้ง ระบบการลำเลียงและการรักษาสภาพความชื้นเหลวของดินก็อาจทำให้เกิดปัญหาขึ้นได้

## รูปร่างของอุโมงค์แบบต่าง ๆ

ขนาด และรูปร่างของอุโมงค์ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้อุโมงค์และ สภาพดินที่อุโมงค์ขุดผ่าน สำหรับอุโมงค์ที่ใช้ในการคมนาคมขนส่ง (Transit Tunnel) ขนาดของอุโมงค์ที่จะต้องทำการออกแบบนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่อไปนี้คือ

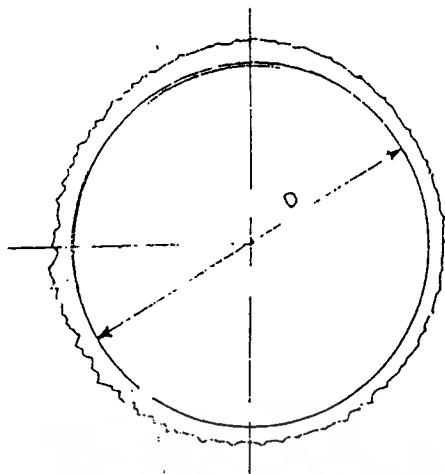
1. ความกว้าง ความยาวของชวดยานพาหนะที่จะแล่นผ่าน
2. รัศมีทางแนวราบและรัศมีทางแนวโค้งของแนวโค้งของอุโมงค์
3. ช่องว่างสำหรับการใช้ประโยชน์ต่าง ๆ เช่น ทางเดินฉุกเฉิน ระบบการระบายน้ำ พื้นที่สำหรับการซ่อมแซม

### Circular shaped

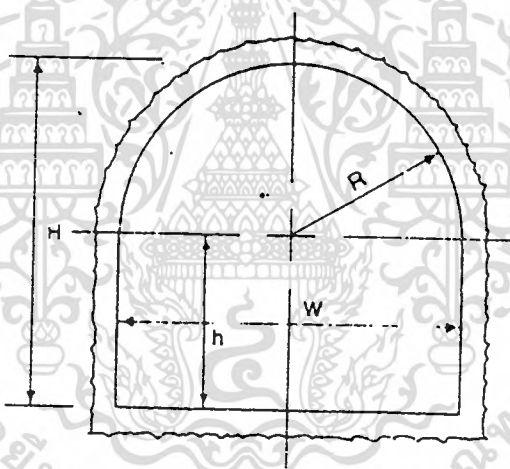
อุโมงค์แบบนี้มีรูปตัดภายนอกเป็นวงกลม ซึ่งลักษณะวงกลมนี้จะช่วยลดผลของแรงดันที่กระทำต่อพื้นผิวอุโมงค์จากทั้งภายในและภายนอก ทั้งนี้เพราะโครงสร้างรูปวงกลมสามารถแผ่กระจายแรงไปยังส่วนต่างๆของโครงสร้างได้ดี และสม่ำเสมอว่าโครงสร้างรูปทรงอื่นๆ ทำให้ชิ้นส่วนคสล. ที่ใช้สำหรับการทำผนังแบบติดตั้งแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปทุกชิ้น และผนังคอนกรีตแบบหล่อในที่รับน้ำหนักได้มากกว่าและมั่นคงกว่าด้วย อุโมงค์รูปแบบนี้เหมาะสำหรับการก่อสร้างในดินอ่อน และเป็นรูปทรงเบื้องต้นที่สามารถตัดแปลงเป็นรูปทรงอื่นๆได้ง่าย

### Horseshoe shaped

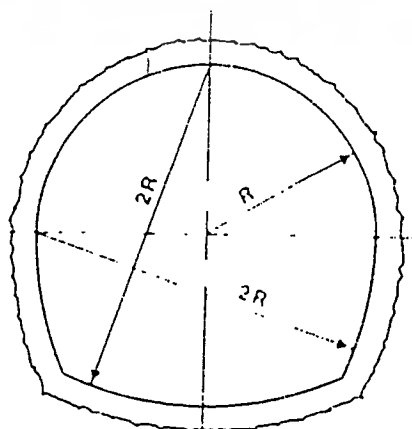
อุโมงค์แบบนี้มีรูปร่างคล้ายเกือกม้า มีพื้นที่ราบซึ่งกว้างพอสำหรับรถบรรทุก และชวดยานสำหรับขนส่งหนักผ่านไปมาได้ โดยที่ส่วนของพื้นทางจะมีลักษณะแคบทำให้ใช้ปริมาณของคอนกรีตในส่วนของ Invert น้อยกว่าแบบอื่นๆ



รูปที่ 3.6 รูปทรงอโคงค์แบบ Circular



รูปที่ 3.7 รูปทรงอโคงค์แบบ Vertical sidewall



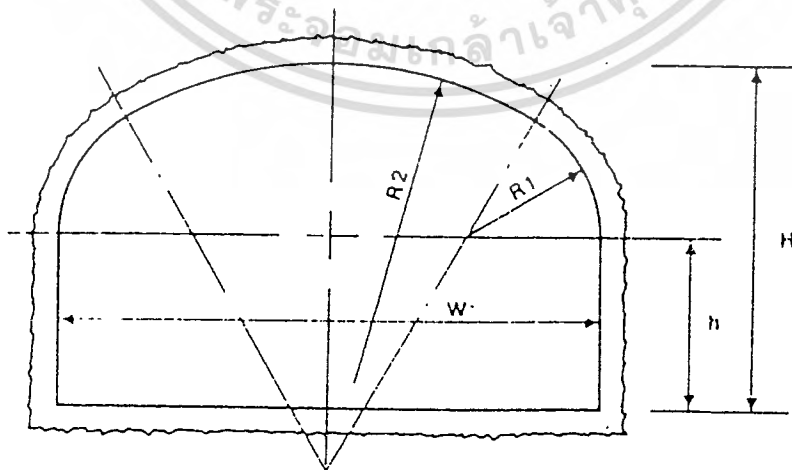
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งรูปที่ 3.8 รูปทรงอโคงค์แบบ Horseshoe ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Vertical sidewall tunnel

เป็นรูปแบบของอุโมงค์ที่คั่นตามากกว่าแบบอื่น เพราะนิยมก่อสร้างอุโมงค์แบบนี้มาตั้งแต่ยุคแรกๆของการก่อสร้างอุโมงค์ ซึ่งส่วนมากจะเป็นการขุดเจาะอุโมงค์ในหินแข็งและมีความมั่นคงพอสมควรใช้สำหรับเป็นเส้นทางขนส่งและการค้าขายมาตั้งแต่อดีต พื้นที่บริเวณฐานกว้างพอสมควรและที่สำคัญไม่จำเป็นต้องทำการปรับพื้นทางมากนักเพียงแค่ทำผิวการจราจรก็สามารถใช้เป็นเส้นทางขนส่งได้ทันที

### Basket handle tunnel

เป็นรูปแบบของอุโมงค์ที่มีพื้นที่กว้างขวางที่สุด สามารถใช้ทำเป็นสถานีภายในอุโมงค์ได้โดยปกติแล้วสามารถทำเป็นเส้นทางขนส่งที่มีความกว้างของผิวถนนประมาณ 3-4 เลน สำหรับอุโมงค์รูปแบบนี้ที่ใช้เป็นอุโมงค์สำหรับการขนส่ง จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในอย่างน้อย 12-13 ฟุต แต่มีข้อจำกัดสำหรับอุโมงค์รูปแบบนี้คือจะต้องก่อสร้างในบริเวณที่เป็นหินแข็งที่มีความมั่นคงแข็งแรงเท่านั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.9 รูปทรงอุโมงค์แบบ Basket Handle  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การวิเคราะห์และออกแบบผนังอุโมงค์

ดินอ่อนมักเป็นชั้นดินที่ได้รับการพิจารณาสำหรับการก่อสร้างอุโมงค์แบบเจาะ ด้วย Shield รูปแบบการออกแบบโครงสร้างพิจารณาหน่วยแรงเพียง 2 แนวแกน ซึ่งก็อาจเพียงพอสำหรับความต้องการ ในปัจจุบันนี้มีการปรับปรุงพัฒนา เปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ทั้งทางด้านเรขาคณิต - และกายภาพ ตลอดจนมา

การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธีการเจาะนั้นจะนำมาใช้กับดินอ่อน หรืออุโมงค์ที่อยู่ในระดับตื้น ๆ การออกแบบโครงสร้างรับน้ำหนักมักจะมีรูปแบบที่ง่ายกว่า การเจาะอุโมงค์ในดินแข็งในชั้นดินอ่อน lining ต้องสามารถรับน้ำหนักได้อย่างรวดเร็ว มีความแข็งแรงของโครงสร้างมากกว่าดินโดยรอบ

### การออกแบบตามข้อสมมติฐาน

1. การออกแบบ lining จะพิจารณาเพียงระนาบของรูปตัดของอุโมงค์และดินโดยรอบเท่านั้น ก็ถือว่าเพียงพอ ผลของแรงที่เกิดขึ้นจากหน่วยแรงในแนวแกนทั้ง 3 แนวใกล้เคียง ๆ กับผิวของอุโมงค์นั้นจะไม่นำมาพิจารณา โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงดันที่ใช้ในการป้องกันกาพังทลายของหน้าดินในขณะเจาะนั้นก็ไม่นำมาพิจารณาเช่นกัน

2. รูปอุโมงค์แบบกลม จะเป็นผลให้ความแข็งแรงของ lining คงที่ตลอดแนวของวงกลม Hinges สำหรับอุโมงค์นั้น อาจจะนำมาพิจารณาร่วมกับการออกแบบด้วยหรือไม่ก็ได้

3. The active Soil Pressure ที่กระทำบนผิวของ lining จะเท่ากับหน่วยแรงของดินในขณะที่ยังไม่ถูกรบกวน (Undisturb ground) เพราะว่าดินอ่อนนั้น จะตั้งข้อสมมติให้สภาพของดินหลังจากที่ผ่านการก่อสร้างอุโมงค์ไปแล้วเป็นเวลา 1 ปี จะกลับสภาพเป็นเหมือนดินก่อนการขุดอุโมงค์ ยกเว้นหน่วยแรง passive stress อันเกิดขึ้นจากการยุบตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

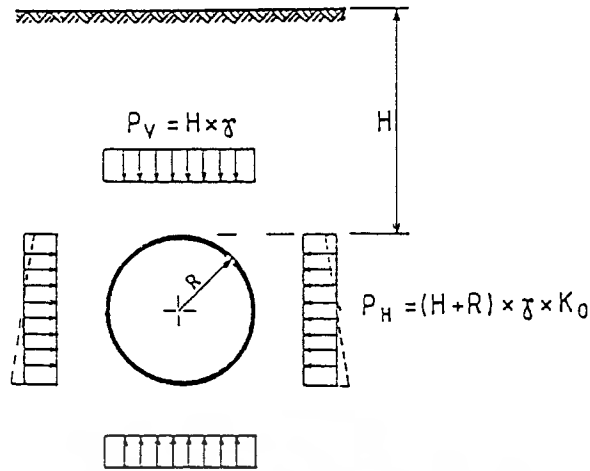
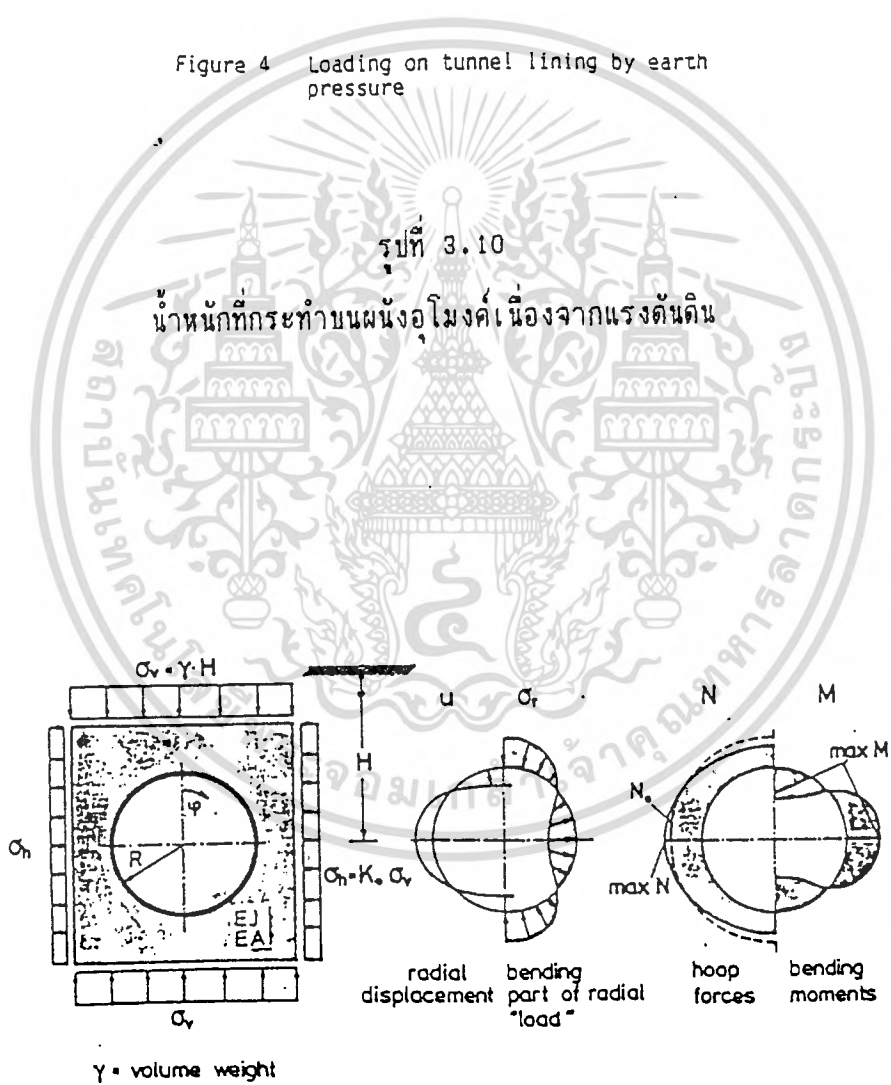


Figure 4 Loading on tunnel lining by earth pressure



รูปที่ 3.11

แสดงน้ำหนักกระทำและการเสียรูปของผนังอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ lining ซึ่งเกี่ยวเนื่องกับการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน ความสิ้นเปลืองของการจราจรบนผิวถนนหรือในอุโมงค์ ข้อสมมติฐานต่าง ๆ เหล่านี้อาจจะเป็นข้อสมมติที่ใช้มานานเกินไปหรือไม่ทันสมัย ซึ่งในปัจจุบันขบวนการเจาะอุโมงค์และการติดตั้ง lining ก็จะถูกตัดทิ้งไปไม่มาพิจารณาแล้ว

4. เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวของ lining กับดินโดยรอบ การยุบตัวของ lining อันเกิดจากปฏิกิริยาของหน่วยแรงในดิน A continuum model จะสามารถสรุปผลกระทบจากสาเหตุต่าง ๆ เหล่านี้ได้โดยอัตโนมัติ คาแบบ bedding spring ต้องนำมาประยุกต์ใช้ดังแสดงในรูป เกิดแรงยึดเหนี่ยวในบริเวณผิวของ lining ซึ่งเกิดจากการลดลงของแรงดันดิน ณ บริเวณที่เกิดการยุบตัว ถ้าการลดลงของแรงดันดินไม่มีผล bedding จะต้องถูกตัดออกไม่นำมาพิจารณาในส่วนนั้น ๆ (ส่วนที่เกิด inward deformation ในรูปตัด cross section)

5. พฤติกรรมของวัสดุในดินและใน lining จะสมมติให้มีสภาพยืดหยุ่น ซึ่งถ้าพิจารณาให้ละเอียดจะแสดงเป็นกราฟ non-linear หรือกฎความยืดหยุ่นของวัสดุ ไม่ว่าจะอย่างไรก็ตาม ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ก็ตาม ก็ยังจำเป็นต้องใช้วิธี numerical

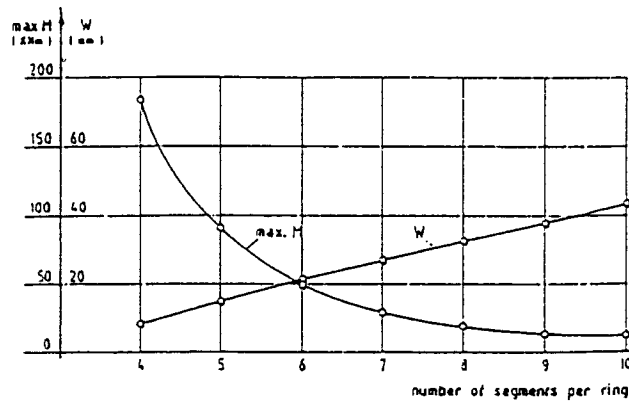


Figure 6 Maximal bending moment and deflection of single ring.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบและติดตั้งแผ่นผนังอุโมงค์ คสล.

สำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ภายใต้อิทธิพลของระดับน้ำใต้ดิน ได้มีการพัฒนาระบบ One-pass Lining System ขึ้นมาซึ่งประกอบด้วยชิ้นส่วนของคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงสำเร็จรูปที่มีความปลอดภัยกันน้ำได้ดี และการโค้งงอเสีรูปร่างมีน้อยมากการทำผนังอุโมงค์(Lining)นั้นประกอบด้วยแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อสำเร็จที่นำมาต่อกันเป็นวงกลมมีความกว้าง 1000- 1200 มม. ในแต่ละวงของแผ่นคอนกรีตนั้นจะประกอบด้วยแผ่นคอนกรีต 5-10 ชั้น และ แผ่น Key Segment อีก 1 ชั้น โดยแผ่น Key Segment จะถูกติดตั้งที่ส่วนบนของอุโมงค์และติดตั้งเป็นชั้นตอนสุดท้าย ส่วนความหนาของแผ่นคอนกรีตนั้นจะขึ้นอยู่กับการรับน้ำหนักของอุโมงค์

แผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปโค้งแต่ละแผ่นผลิตขึ้นจากคอนกรีตประเภทกันน้ำเกรด 40 และเสริมเหล็กกำลังสูงเพียงพอสำหรับการรับน้ำหนักที่คำนวณได้ แผ่นคอนกรีตแต่ละแผ่นถูกยึดติดกันด้วยสลักเกลียวตามแนวนอนและสลับกันไปมา บริเวณรอยต่อของแผ่นคอนกรีตจะได้รับการติดสางกันซึมโดยรอบ แผ่นสางกันซึมจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้น้ำใต้ดินซึมเข้ามาในอุโมงค์โดยที่แผ่นสางจะมีความยืดหยุ่นและสามารถปรับให้เหมาะสมกับขนาดความกว้างของแผ่นคอนกรีต สำหรับสลักเกลียวนั้นทำหน้าที่ยึดแผ่นคอนกรีตให้ติดกัน และทำให้เกิดแรงดันในแผ่นสางกันซึมที่แทรกอยู่ระหว่างแผ่นคอนกรีต ซึ่งในชั้นตอนสุดท้ายสลักเกลียวที่กล่าวถึงนี้จะหมดหน้าที่และความสำคัญไป

น้ำหนักที่กระทำต่ออุโมงค์ประกอบด้วยแรงดันของดินเหนืออุโมงค์ แรงดันของน้ำใต้ดิน โดยปกติแล้วมาตรฐานสำหรับการขุดอุโมงค์ที่ใช้แผ่นกำบัง (Shield) จะวิเคราะห์แรงดันจากดินบริเวณรอบๆแนวการขุดของอุโมงค์แบบไม่รบกวน (Undisturb) ส่วนแรงดันของดินที่อยู่เหนืออุโมงค์ขึ้นไป(Overburden) จะต้องนำมาพิจารณาและจะละเอียดไม่ได้ เพราะจะให้ความปลอดภัยของผลการวิเคราะห์มากยิ่งขึ้น สำหรับแรงดันของน้ำใต้ดินนั้นเป็นแรงที่กระทำตามแนวแกนชนิดหนึ่ง (Axial Forces) ซึ่งโดยปกติแล้วจะนำมาพิจารณาร่วมกับแรงอื่นๆเพราะถือว่ามีความเสี่ยงต่อการออกแบบของผนังอุโมงค์(Lining) เช่นกันแต่ในบางกรณีอิทธิพลของน้ำใต้ดินก็ไม่ได้นำมาพิจารณาเพราะถือว่ามีความปลอดภัยน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ความมั่นคงแข็งแรงของผนังอุโมงค์แบบแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปนั้นอาศัย ทฤษฎีการกระจายแรงในรูปร่างกลม และระบบ Turbular Members โดยในแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป 1 ชั้น (Segment) จะประกอบด้วย 4 Members สำหรับรอยเชื่อมต่อของคอนกรีตสำเร็จรูปถูกออกแบบให้สามารถรับและถ่ายโอนโมเมนต์คัตสามารถยึดหยุ่นได้ตามแนวรัศมี ทำให้เกิดการกระจายแรงเป็นวงกลมไปยังชิ้นส่วนต่างๆ ได้อย่างสม่ำเสมอและเกิดความมั่นคงแข็งแรงในตัวของมันเอง

การแอ่นตัวของผนังอุโมงค์ (Deflection) ที่ผ่านการวิเคราะห์คำนวณจากทฤษฎีดังกล่าวข้างต้นพบว่าจะมีค่าประมาณ 10-20 มม. ที่บริเวณด้านบนสุดของอุโมงค์ซึ่งจะตรวจวัดได้ในขณะทำการก่อสร้าง จากการวิเคราะห์และทำการศึกษาตามทฤษฎีดังกล่าวแล้วได้สรุปความสัมพันธ์ของค่าโมเมนต์คัตที่เกิดขึ้นกับค่าการแอ่นตัวของอุโมงค์ โดยที่ค่าการแอ่นตัวของอุโมงค์ซึ่งแสดงถึงความแข็งแรงของอุโมงค์จะขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งจำนวนแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปที่นำมาประกอบต่อความยาว 1 วงนั้นเมื่อเพิ่มจากจำนวน 6 ชั้นไปเป็น 8 ชั้นจะช่วยทำให้ค่าโมเมนต์คัตมีค่าลดลงได้มากกว่า 50% แต่ในทางกลับกันก็จะเพิ่มค่าการแอ่นตัวประมาณ 50 % เช่นเดียวกัน

#### การผลิตแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป

การผลิตผนังแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปจะยอมให้ผิดพลาดได้ไม่เกิน  $\pm 0.5 - \pm 1.0$  มม. ซึ่งการผลิตจะต้องใช้แบบโลหะที่มีลักษณะโค้งและจะต้องได้รับการตรวจสอบคุณภาพให้แน่ใจก่อนนำออกจากโรงงานผลิต แผ่นยางกันซึมถูกติดไว้กับร่องรอบๆ แผ่นคอนกรีตและปิดทับด้วย Epoxy-mortar ส่วนบริเวณที่รองรับแรงดันจากแม่แรงไฮดรอลิกส์โดยตรงจะต้องติดแผ่นรองรับ (Semi-elastic Softening Plates) เพื่อช่วยแผ่กระจายแรงให้เรียบร้อยเสี้อก่อน ที่เมือง Antwerp ประเทศเบลเยียมสามารถทำการติดตั้งแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปได้เฉลี่ย 15 ม.ต่อวัน และทำได้มากที่สุด 24 ม.ต่อวัน หรือประมาณ 20 วงต่อวัน เท่าที่ผ่านมามีปัญหาในการติดตั้งแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปเพื่อทำผนังอุโมงค์พอสมควรดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เกิดการแตกร้าวของแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป ถ้ารูปร่างทางเรขาคณิตไม่ถูกต้องแม่นยำ เพียงพอเมื่อแม่แรงไฮดรอลิกส์ดันเครื่องจักรไปข้างหน้า
2. การอ่อนตัวและการทรุดตัว มักเกิดขึ้นมากที่สุดในช่วงที่เครื่องจักรเคลื่อนที่ไปข้างหน้าซึ่งทำให้เกิดช่องว่างระหว่างแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปและและผิวคันทอสรอบ ก่อนที่จะมีการอัดน้ำปูน (Mortar) เพื่ออุดช่องว่างดังกล่าวซึ่งการก่อสร้างผนังอุโมงค์ที่เมือง Antwerp มีค่าการทรุดตัวของดินน้อยมากคือมีค่าน้อยกว่า 10 มม. โดยที่ดินอยู่ในสภาวะแรงดันน้ำใต้ดินไม่น้อยกว่า 2.5 บาร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ระบบการควบคุมอัตโนมัติ

การควบคุมระบบต่างๆในการขุดเจาะอุโมงค์ด้วย Slurry Pressure นั้นในปัจจุบันใช้การควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากการทำงานดังกล่าวต้องใช้ความถูกต้องแม่นยำ ความสัมพันธ์ของระบบต่างๆ อาทิเช่น

1. ระบบการรักษาระดับความดันของของเหลวบริเวณผิวหน้าการขุดเจาะ
2. ระบบการขนถ่ายดินออกสู่พื้นดินด้านนอก
3. ระบบการส่งของเหลวที่ผ่านการกรองดินออกแล้วกลับมาใช้อีก
4. การตัดดินของ Cutter Wheel

การควบคุมระบบต่างๆเหล่านี้จะเป็นหน้าที่ของไมโครคอมพิวเตอร์ซึ่งถูกนำมาใช้ในการเก็บข้อมูลประมวลผลข้อมูล และแสดงผลข้อมูลออกทาง Out Put ต่างๆ ซึ่งต้องใช้เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ทั้งหมด 3 เครื่องและสามารถแยกหน้าที่การทำงานของแต่ละเครื่องดังนี้คือ

- CPU-1 ทำหน้าที่คำนวณและประมวลผลข้อมูลต่างที่ได้รับหรือเก็บไว้ใน CPU-2  
 CPU-2 ทำหน้าที่เก็บรักษาข้อมูลที่ได้มาจากระบบต่างๆ  
 CPU-3 ทำหน้าที่แสดงผลของการคำนวณออกทาง Out Put ต่างๆเช่น  
 Printer Monitor

ถ้าข้อมูลทั้งหมดถูกส่งเข้ามาในช่วงเวลาที่สั้นมากๆเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ที่ใช้จะทำงานได้ยาก หรือไม่สามารถทำงานได้เลย ซึ่งมีการประมาณกันไว้ว่าความจุของข้อมูลทั้งหมดที่จะต้องเก็บสำหรับการขุดเจาะอุโมงค์ 1,000 ม. ต้องใช้ความจุของหน่วยความจำถึง 300-500 เมกกะไบต์ ดังนั้นฐานข้อมูลต้องเตรียมพร้อมสำหรับการจัดลำดับของการตรวจวัด ซึ่งเป็นวิธีเดียวที่จะใช้แก้ปัญหาเรื่องหน่วยความจำไม่เพียงพอ

ตำแหน่งการควบคุมนับว่าเป็นอีกข้อหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการควบคุม Slurry shield machine การตรวจวัดแบบอัตโนมัติถูกนำมาใช้ร่วมกับการจัดลำดับเวลา เช่นเดียวกับข้อมูลที่ได้นี้บ้างจากแหล่งอื่นๆคือ

เอกรังสี (รังสีแกมมา) ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

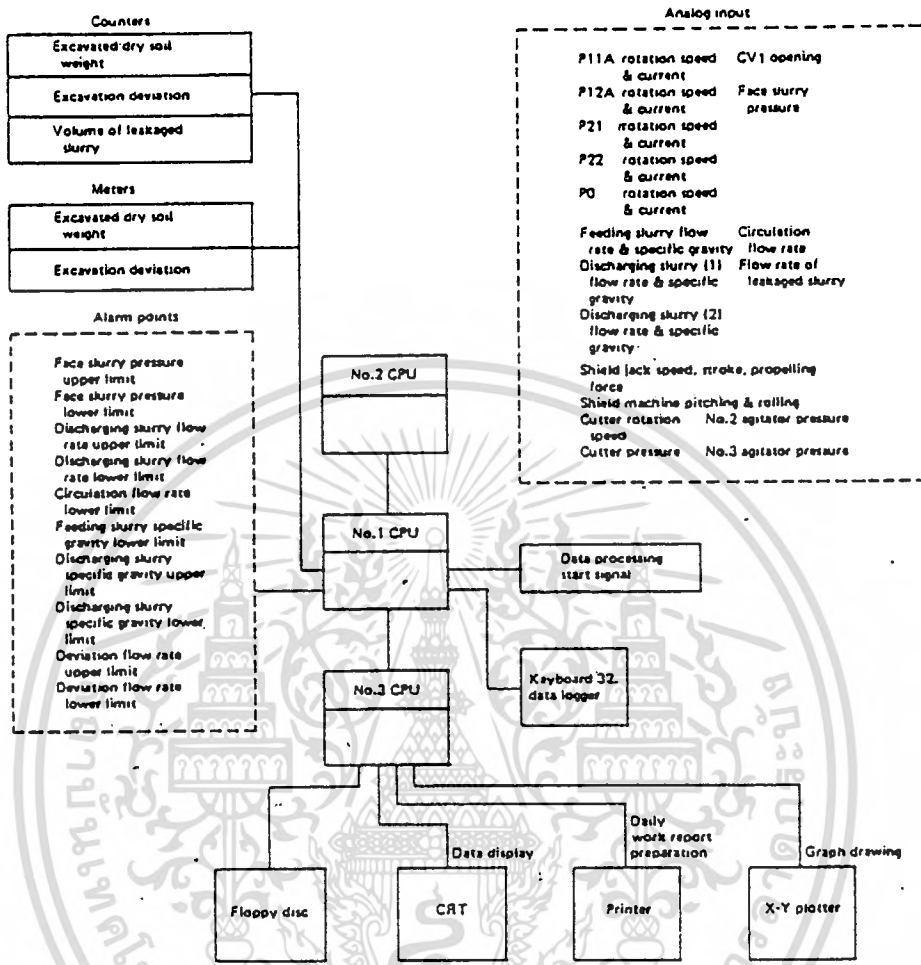


Figure 3. Configuration of Data Processing System

รูปที่ 3.14

ระบบการประมวลผลข้อมูลการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยคอมพิวเตอร์

1. การตรวจสอบการตัดดินไม่ให้เกินจากที่กำหนด เพื่อป้องกันการพังทลายของดินมากเกินไป
2. การตรวจสอบตำแหน่งของเครื่องจักร และเครื่องมือต่างๆ เพื่อให้เกิดความถูกต้องแม่นยำในการทำงาน
3. ตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายเบนโทไนท์ว่ามีความเข้มข้นเพียงพอต่อการป้องกันการพังทลายของดินหรือไม่
4. ตรวจสอบแรงดันของสารละลายเบนโทไนท์ที่ถูกส่งกลับมาใช้ใหม่ว่ามีปริมาณและแรงดันเพียงพอหรือไม่

### การตรวจวัดด้วยระบบอัลตราโซนิก

วิธีการของระบบการตรวจวัดด้วยระบบ Ultrasonic ดังกล่าวนี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งของระบบการตรวจวัดด้วยวิธีอัตโนมัติ โดย ขั้นตอนการทำงานดังนี้คือ

- ขั้นตอนที่ 1 น้ำถูกฉีดออกผ่านอุปกรณ์ชิ้นหนึ่งที่เรียกว่า Nozzel ก่อนออกไปสัมผัสกับดิน
- ขั้นตอนที่ 2 คลื่น Ultrasonic ถูกส่งออกไปยังบริเวณที่สารละลายเบนโทไนท์ถูกเจือจางจากน้ำโดยไม่สัมผัสกับดินหรือกระจัดกระจาย
- ขั้นตอนที่ 3 คลื่นที่ถูกส่งออกไปจะย้อนกลับมาเข้าเครื่องทรานส์ดีวเซอร์
- ขั้นตอนที่ 4 ที่ CRT จะแสดงข้อมูลของเวลาการเดินทางของคลื่นตั้งแต่ถูกส่งออกไปจนกระทั่งกลับเข้าเครื่องทรานส์ดีวเซอร์ ความเร็วของคลื่นและระยะทางที่ใช้ในการเดินทางของคลื่น

การเปลี่ยนแปลงความดันดินชั้นๆลงนั้นจะเป็นเหตุให้เกิดการพังทลายของผิวดินบริเวณที่ขุดเจาะ ดังนั้นจึงมีวิธีการป้องกันการพังทลายดังนี้คือ

1. ใช้ปี้มที่สามารถเคลื่อนย้ายตำแหน่งได้ในการเพิ่มความดัน
2. ใช้วาล์วควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 3. ใช้ปี้มและวาล์วร่วมกัน เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บ่อก่อสร้าง (Shafts)

บ่อก่อสร้างเป็นส่วนสำคัญในการก่อสร้างอุโมงค์เพราะเป็นการก่อสร้างที่จะต้องดำเนินการก่อนที่จะทำการขุดอุโมงค์แบ่งตามประโยชน์การใช้งานได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. Working Shafts
2. Station Shafts

ความหมายของบ่อก่อสร้างคือ ช่องทางใต้ดินที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างอุโมงค์ เช่น ใช้สำหรับเป็นจุดเริ่มต้นของการขุด (Start Shafts) ใช้เป็นช่องทางการขนส่งหรือลำเลียงวัสดุอุปกรณ์ระหว่างผิวดินกับภายในอุโมงค์ ใช้เป็นช่องทางระบายอากาศ ใช้ทำเป็นสถานีสำหรับรับส่งผู้โดยสารใต้ดิน ใช้เป็นเส้นทางขึ้นลงเพื่อเปลี่ยนเส้นทาง หรือแม้กระทั่งใช้เป็น Shopping Center ระหว่างทางลงสู่สถานีใต้ดิน

การก่อสร้างเป็นการขุดและวางแนวอุโมงค์ในแนวดิ่ง แตกต่างจากวิธีการอื่นๆ เพราะสามารถก่อสร้างแบบลงจากผิวดิน หรือแบบขึ้นจากผิวดินก็ได้โดยจะต้องใช้อุปกรณ์เฉพาะในการก่อสร้าง

### ประเภทของบ่อก่อสร้าง

1. Deep Shafts ส่วนมากมักเป็นการก่อสร้างอุโมงค์สำหรับทำเหมืองแร่ อุโมงค์สำหรับการทดลองปฏิบัติการทางนิวเคลียร์ หรือใช้เป็นห้องใต้ดินสำหรับเก็บอาวุธ เก็บก๊าซธรรมชาติ และก๊าซปิโตรเลียม ถ้าการทำงานไม่สามารถจะเจาะไปถึงปลายบ่อก่อสร้างได้ ก็จำเป็นจะต้องขุดหลุมให้ใหญ่ขึ้น หรือขุดจากผิวดินลงไป

2. Shafts สำหรับสิ่งก่อสร้างใต้ดิน เช่น รถไฟใต้ดิน ทางเดินรถไฟใต้ดิน ซึ่งจำเป็นต้องมี Shafts สำหรับเป็นช่องทางระบายอากาศ เป็นลิฟท์สำหรับขนส่งวัสดุอุปกรณ์ โดยการก่อสร้างอาจเป็นแบบ Downward หรือแบบ Upward ก็ได้

3. Shafts ที่สร้างขึ้นเพื่อประโยชน์ในการขุดอุโมงค์ โดยจะเป็นการแบ่งอุโมงค์ออกเป็นช่วงสั้นๆ ทำให้การทำงานสะดวกรวดเร็วยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วิธีการก่อสร้างบ่อก่อสร้าง

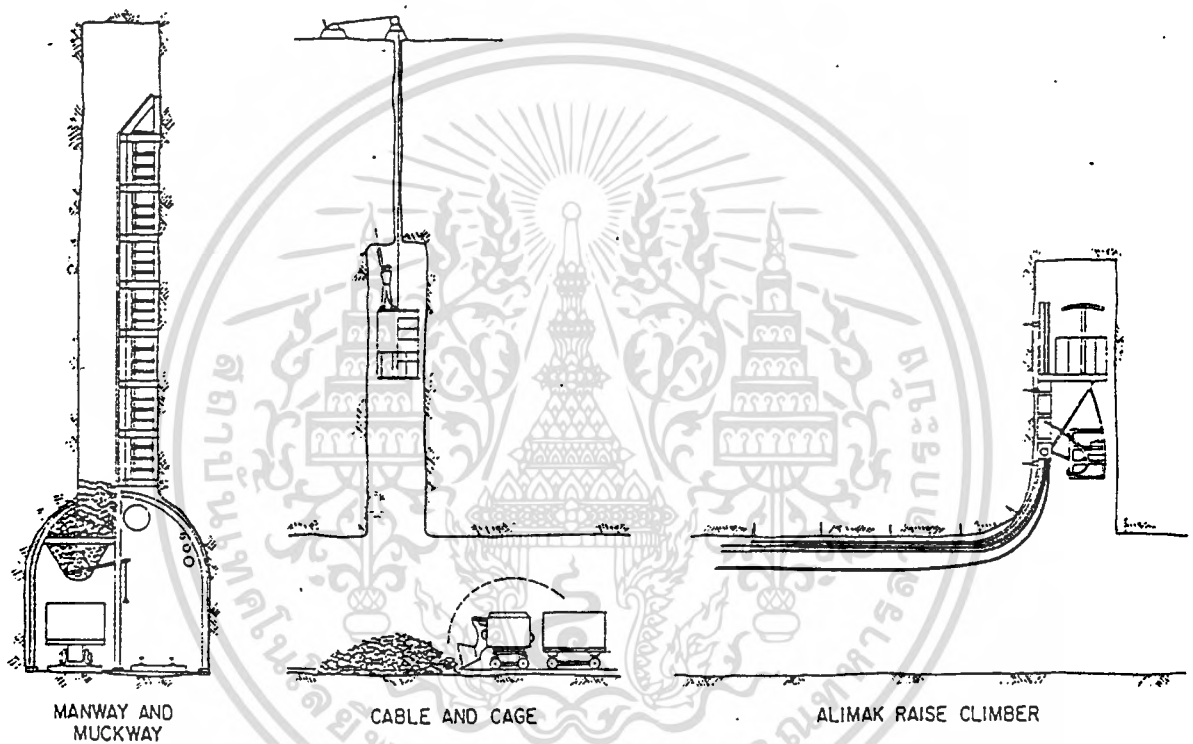
1. Shaft Sinking เป็นการก่อสร้างจากผิวดินลงไป ข้อจำกัดของการก่อสร้างด้วยวิธีการนี้คือ

- เมื่อการก่อสร้างไม่สามารถดำเนินไปจนถึงล่างสุดของบ่อได้ อันเนื่องมาจากวัสดุ เช่นหินหรือดินที่จะต้องขุดผ่านมีชั้นมีคุณสมบัติไม่ดีพอ อาจทำให้เกิดการเสียหายหรือพังทลายได้
- พื้นที่ในการก่อสร้างถูกจำกัด ทำให้จำนวนคน และขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้จึงถูกจำกัดไปด้วย
- การเคลื่อนที่ทำได้ในแนวตั้งอย่างช้าๆ เท่านั้นโดยใช้ Hoist เป็นอุปกรณ์ในการช่วยยก

การเทคอนกรีตหลังจากการขุดดินเสร็จแล้วนั้นจะใช้ได้กับ Shaft ที่ระดับต้นและลึกปานกลางมีข้อดีคือในหนึ่งครั้งจะทำเพียงอย่างเดียวและสามารถเทคอนกรีตได้จากข้างล่างโดยใช้ Slip form มีข้อเสียคือ อาจมีการพังทลายลงมาถ้าไม่มีการติดตั้งค้ำยัน และระบบระบายน้ำ

1.1 ขั้นตอนการขุดโดยการใช้ Hand-held drill จะขุดได้ลึกครั้งละ 5 ฟุต แต่ถ้าใช้ Drill Jumbo จะขุดได้ลึก 10 ฟุต เมื่อขุดเสร็จแล้วจะเอาอุปกรณ์ออกจากหลุม และจะทำการระเบิดหลุม จากนั้นจึงเริ่มนำอุปกรณ์ตักโคลนลงไป ถ้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง Shafts เล็กกว่า 17 ฟุต จะใช้เครื่องขุดโคลนแบบ Crydermans ถ้าขนาดใหญ่ขึ้นก็จะใช้วิธี Front-end loader สำหรับขนาด Shafts ที่ใหญ่มากๆ จะใช้เครื่องตักโคลนชนิด Crawler ด้านหนึ่ง และอีกด้านหนึ่งจะใช้ Bucket ตักดินออก เมื่อตักเสร็จก็จะใช้ค้ำยันค้ำไว้ และเริ่มขุดที่ระดับลึกลงไปอีก หลังจากการขุดดินเสร็จ จะมีการตรวจความเรียบร้อยของ Shafts จึงจะเริ่มการเทคอนกรีต โดยใช้ Slip form และล่าเลียงคอนกรีตด้วยท่อส่งคอนกรีต

1.2 วิธีการขุดดินและการเทคอนกรีตสลับกัน ซึ่งวิธีการนี้จะทำ 3 ครั้ง (ระยะ 30 ฟุต) โดยมักจะทำในสภาพหินที่พังทลายง่าย เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาในเรื่องค้ำยัน โดยเมื่อขุดเสร็จได้ช่วงหนึ่งก็เทคอนกรีตเลย นิยมใช้กับ Shaft ที่ลึกๆ



Drawing 11 Shaft-raising methods.

รูปที่ 3.15

การก่อสร้างข่อก่อสร้าง (Shaft) ด้วยวิธี Raising method

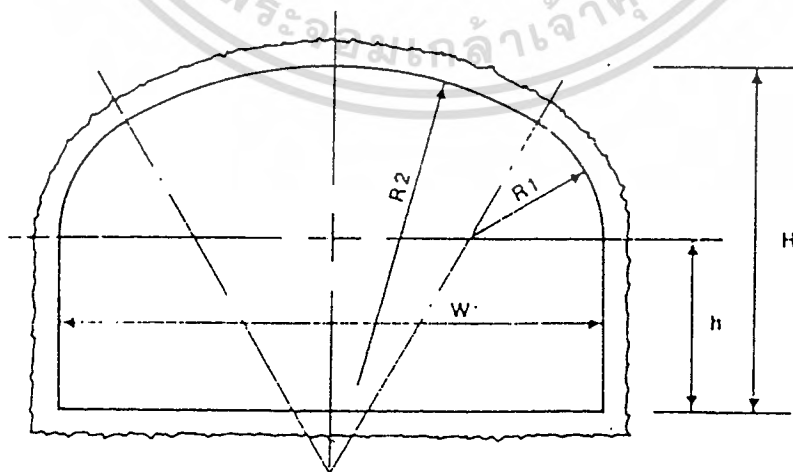
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Vertical sidewall tunnel

เป็นรูปแบบของอุโมงค์ที่คั่นตามากกว่าแบบอื่น เพราะนิยมก่อสร้างอุโมงค์แบบนี้มาตั้งแต่ยุคดึกดำบรรพ์ของการก่อสร้างอุโมงค์ ซึ่งส่วนมากจะเป็นการขุดเจาะอุโมงค์ในหินแข็งและมีความมั่นคงพอสมควรใช้สำหรับเป็นเส้นทางขนส่งและการค้าขายมาตั้งแต่อดีต พื้นที่บริเวณฐานกว้างพอสมควรและที่สำคัญไม่จำเป็นต้องทำการปรับพื้นทางมากนักเพียงแค่ทำผิวการจราจรก็สามารถใช้เป็นเส้นทางขนส่งได้ทันที

### Basket handle tunnel

เป็นรูปแบบของอุโมงค์ที่มีพื้นที่กว้างขวางที่สุด สามารถใช้ทำเป็นสถานีภายในอุโมงค์ได้โดยปกติแล้วสามารถทำเป็นเส้นทางขนส่งที่มีความกว้างของผิวถนนประมาณ 3-4 เลน สำหรับอุโมงค์รูปแบบนี้ที่ใช้เป็นอุโมงค์สำหรับการขนส่ง จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในอย่างน้อย 12-13 ฟุต แต่มีข้อจำกัดสำหรับอุโมงค์รูปแบบนี้คือจะต้องก่อสร้างในบริเวณที่เป็นหินแข็งที่มีความมั่นคงแข็งแรงดีเท่านั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.9 รูปทรงอุโมงค์แบบ Basket Handle  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 วิธีที่ขุดและเทคอนกรีตพร้อมกัน วิธีนี้จะเร็วกว่าวิธีที่ 2 แต่จำเป็นต้องใช้แรงงานมากกว่า และอุปกรณ์ที่ใช้จะยุ่งยากและสลับซับซ้อนมากกว่า ซึ่งวิธีการทำงานต่างๆจะคล้ายกับวิธีที่ 2 จะแตกต่างกันคือ การขุดดินกับการเทคอนกรีตจะดำเนินไปพร้อมกัน

2. Shaft raising เป็นวิธีที่ประหยัดที่สุดสำหรับ Shaft ขนาดเล็กหรือ Shaft นำร่องของ Shaft ขนาดใหญ่โดยจะสามารถเลือกใช้วิธีนี้ได้ ถ้าหินหรือสภาพดินที่ขุดไม่ถล่มง่ายสาเหตุที่ประหยัดกว่าวิธีการอื่น เพราะไม่จำเป็นต้องมีขบวนการกำจัดโคลนออก เพราะหินที่ถูกระเบิดจะตกลงมาจากผิวหน้าที่กำลังขุดโดยตรงและไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์อย่างอื่นมาช่วยแต่อย่างใด สำหรับข้อเสียของวิธีการนี้คือ การขุดดินหรือหินจะต้องทำเหนือ Platform ทำให้การเคลื่อนย้ายคนและอุปกรณ์ต่างๆเข้าและยุ่งยาก วิธีการทำ Shaft raising ที่นิยมแบ่งออกเป็น 3 วิธีคือ

2.1 Manway and Muckway method ในขณะที่มีการเจาะจากด้านล่างขึ้นด้านบน Shaft จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนโดยไม้ค้ำยัน ส่วนหนึ่งจะเป็นรางสำหรับรับ เศษหินหรือดินที่ขุด อีกส่วนหนึ่งจะเป็น Platform และบันไดสำหรับขึ้นสู่ผิวหน้าด้านบน

สำหรับ Shaft ที่ขุดสำหรับนาร่อง จะมีขนาดศูนย์กลางเล็กที่สุดประมาณ 6-8 ฟุต และยอมให้เศษหินหรือดินที่ขุดตกลงสู่ Platform ด้านล่าง ถ้าจำเป็นต้องให้พื้นที่ใต้ Shaft ปราศจากสิ่งของเราจะทำการเก็บดินหรือหินไว้ในรางโดยควบคุมประตูที่ใต้รางนี้ด้วยระบบ Hydraulics ดังนั้นเมื่อมีการรับถ้ำหินหรือดินใต้ประตูนี้การทำงานจะสะดวกขึ้น ในกรณีที่ Shaft อยู่เหนืออุโมงค์ที่มีขนาดเล็กก็จำเป็นต้องขยายขนาดอุโมงค์ให้ใหญ่ เพื่อใช้ติดตั้งห้องสำหรับเก็บหินหรือดินที่ขุดได้นี้

การทำงานของคนงานจะทำงานบน Platform เพื่อทำการเจาะผนัง Shaft หลังจากเจาะเสร็จแล้ว คนงานจะปีนลงมาอยู่ในที่ปลอดภัยและทำการระเบิดหิน จากนั้นเป็นการระบายอากาศออก และคนงานจะปีนกลับขึ้นไปเพื่อทำความสะอาด Platform และเอาเศษหินออกทางด้านข้าง จากนั้นจะเริ่มติดตั้งระบบค้ำยันและเริ่มเจาะรอบต่อไปตามลำดับที่กล่าวมาข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 The Cable and cage method จะมีการเจาะรูขนาด 6 นิ้วตามเส้นแนวศูนย์ กลางของ Shaft ลงมาจากพื้นผิวด้านบนและใช้ Hoist เป็นตัวห้อยสายเคเบิลผ่านรูนี้เพื่อทำ การยก Cage โดยจะมีคนงานยืนทำงานอยู่บนหลังคาของCage เพื่อทำการเจาะหิน จากนั้น Cage จะเลื่อนลงด้านล่างโดยให้คนงานอยู่ในที่ปลอดภัยแล้วจึงทำการระเบิดหิน เมื่อระบาย อากาศและฝุ่นผงเสร็จคนงานจะกลับไปเริ่มทำการเจาะใหม่ โดยที่หินที่ตกลงมาจากการระเบิด จะถูกขนออกไปตามลำดับ

2.3 The Alimak Raise-climber method วิธีการนี้จะใช้อุปกรณ์ที่ประกอบด้วย Platform และ Man-cage elevator เคลื่อนที่ไปบนรางที่ติดกับผนังด้านข้างของShaft หรือ ผนังด้านบนของShaft สำหรับ Shaft ที่มีลักษณะเอียง ขนาดของ Alimak ขึ้นอยู่กับความ สามารถในการรับน้ำหนักของคน รางที่ cage เคลื่อนที่ไปนั้นจะติดท่อ 4 ท่อซึ่งจะเป็นท่อที่จ่าย ถ่างอากาศ ปรับความดันอากาศ ลำเลียงน้ำ และส่งกระแสไฟฟ้า

#### Shafts excavated by Large-hole drilling

เป็นวิธีที่ใช้เมื่อไม่สามารถขุดไปถึงที่ปลายสุดของShaft ได้ โดยวิธีการนี้จะใช้สำหรับขุด Shaft ที่มีขนาดไม่เกิน 8 ฟุต ถ้าShaft ที่ต้องการมีขนาดใหญ่กว่านี้ จะมีปัญหาในการกำจัดดินที่ขุด เมื่อสามารถขุดไปถึงปลายสุดของShaft ได้ ก็จะสามารถเจาะShaft ขนาด 17 ฟุตได้โดยทำ การขุดนำร่อง 12 ฟุต จากนั้นใช้วิธีคว้านให้ช่องShaftกว้างขึ้นเป็น 17 ฟุตด้วยเครื่องคว้าน

#### Shafts excavated by the Pilot-shaft enlargement method

ขั้นตอนแรกเป็นการนำร่องขนาดเล็กไปตามแนว center line ซึ่งอาจจะใช้วิธี Raising method แต่สำหรับShaft ขนาดใหญ่ใช้วิธี Downward จะเหมาะสมกว่าทั้งนี้ขึ้น กับชนิดของหินที่พบ ถ้า Shaft มีขนาดจำกัดไม่สามารถใช้เครื่องจักรในการตักหินหรือดินได้ก็อาจ ใช้น้ำฉีดลงหลุม ถ้าปลาย Shaftไม่มีที่พอที่จะชนหินด้วยระบบสายพานหรือขนาดของหินใหญ่เกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก็อาจใช้วิธีการระเบิดหิน โดยขอมให้หินตกลงไปที่พื้นอุโมงค์แล้วจึงกำจัดออกภายหลัง หรือถ้าอุโมงค์ยังต้องใช้งานอยู่ก็ต้องใช้ Muck pocket ช่วยเก็บดินหรือหินไม่ให้ตกลงไปในอุโมงค์ อุปกรณ์พิเศษที่ใช้ร่วมกับวิธี Pilot-shaft enlargement method

1. เครื่องจักรสำหรับการก่อสร้างแบบขึ้นด้านบน Upward
2. เครื่องจักรสำหรับตักหินหรือดิน เช่น รถแทรกเตอร์
3. เครื่องฉัดน้ำ
4. Hoist หรือ Crane
5. อุปกรณ์อำนวยความสะดวกอื่นๆ

#### อุปกรณ์อำนวยความสะดวกในการเจาะอุโมงค์

ในการขุดเจาะอุโมงค์จำเป็นต้องใช้ Shaft เป็นตัวช่วยในการทำงานเช่น อุโมงค์ที่ใช้เครื่องจักรสำหรับขุด 2 เครื่องอาจจะขุด Shaft ตรงกลางระหว่างแนวของอุโมงค์ที่จะทำการขุด จากนั้นจึงติดตั้งเครื่องจักรให้ขุดออกจาก Shaft ไปแต่ละข้างจะสามารถทำให้เวลา และระยะทางในการก่อสร้างสั้นลงได้มาก ประโยชน์ของ Shaft นี้ใช้เป็นได้ทั้งช่วยขุดอุโมงค์หรือใช้เป็นเส้นทางส่งวัสดุอุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่างๆได้หรืออาจใช้ทั้ง 2 อย่างพร้อมกันเลยทีเดียวซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบของวิศวกร

Shaft ที่ใช้ในการขนส่งอุปกรณ์อำนวยความสะดวก และมีความลึกเกินกว่า 100 ฟุตจะก่อสร้างด้วยวิธี Sinking method และใช้ร่วมกับเครื่องจักรสำหรับอำนวยความสะดวกคือ Headframe และ Hoist ในการก่อสร้างระดับต้นเราอาจใช้ Crane ในการขนส่งอุปกรณ์ต่างๆ เช่น Muck car หรือ Muck skip สำหรับขนหินหรือดินออกจากปลายด้านล่างของ Shaft ขึ้นมาสู่พื้นดินข้างบน เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย สำหรับการก่อสร้างระดับลึกควรใช้ Headframe ที่ประกอบด้วย Muck bin และ Hoist โดย Shaft จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งสำหรับขนเศษหินออก อีกส่วนหนึ่งสำหรับคนงานและอุปกรณ์อำนวยความสะดวกอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสบการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน  
กรุงโรม ประเทศ อิตาลี

โครงการนี้เป็นการก่อสร้างอุโมงค์ผ่านภูเขา The Roman hills เพื่อเชื่อมระบบรถไฟฟ้าภายนอกและภายในกรุงโรมเข้าด้วยกัน โดยการสร้างอุโมงค์มีความยาว 18 กิโลเมตร ตำแหน่งของการก่อสร้างอุโมงค์อยู่ใกล้กรุงวาติกัน (Vatican) เป็นอุโมงค์สำหรับทางรถไฟ 2 เลน (The double trace railway tunnel) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 9.44 เมตร ยาว 3,410 เมตร ผ่านชั้นดินที่มีลักษณะผสมและเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

อุโมงค์ส่วนแรก มีความยาว 1,000 เมตร ก่อสร้างผ่านชั้นดินเหนียวไม่อุ้มน้ำ (watertight clay) และส่วนท้ายผ่านชั้นดินเหนียวอุ้มน้ำ (water bearing) สลับดินทรายปนดินเหนียว ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ระดับ 5 - 10 เมตร และในบางครั้งอาจขึ้นถึง 30 เมตร แปรเปลี่ยนไปตามสภาพภูมิประเทศ และชั้นดิน

หลังจากที่ได้ทำการศึกษาข้อเสนอละเอียดและข้อมูลต่าง ๆ แล้ว ผู้รับผิดชอบโครงการได้ตัดสินใจเลือกระบบการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยระบบ Hydroshield ของบริษัท Wayss & Freytag ของประเทศเยอรมันนี้ สำหรับพื้นที่ที่เป็นทรายอุ้มน้ำ (water bearing sands) สำหรับโครงการนี้ได้มอบหมายให้บริษัท Wayss & Freytag ทำหน้าที่เป็นวิศวกรที่ปรึกษาออกแบบและติดตั้งเครื่องจักรสำหรับขุด (Shield machine)

เครื่องจักรสำหรับขุด (Shield machine) สำหรับดินเหนียว มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10.64 เมตร ติดตั้งใบมีดตัดดินรูปดาว 6 แฉก (Star-shaped cutter wheel) ขับเคลื่อนด้วยไฮดรอลิกส์มอเตอร์ 8 เครื่อง มีแรงบิดสูงสุด 4,000 KN.m เคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยแม่แรงไฮดรอลิกส์ 32 เครื่อง มีระยะการเคลื่อนที่ 1.75 เมตร/ครั้ง มีแรงดัน (Thrust) 2,000 KN. เครื่องจักรสำหรับติดตั้ง lining สามารถรับน้ำหนักของแผ่นคอนกรีตได้ถึง 7,000 กิโลกรัม การลำเลียงดินเป็นระบบดินแห้งซึ่งประกอบด้วย Lobster arm loader และระบบ

เอกสารยานล้าเลียงสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบ Shield machine จะพิจารณาถึงประโยชน์และความเหมาะสมต่อการใช้งานเป็นหลัก เครื่องจักรเครื่องมือต่างๆ จะถูกติดตั้งให้ไกลเท่าที่จะทำได้ในขณะที่ทำการติดตั้ง Shield machine ส่วนล่างของ bulkhead, ปีบ, ท่อลำเลียง และอุปกรณ์ควบคุมการไหล, โรงแยกดินออกจากสารละลาย ไม่สามารถติดตั้งได้โดยตรง

การนำโครงสร้างรับน้ำหนักของอุโมงค์ (lining) ทำขึ้นโดยการใช้แผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปเสริมเหล็ก กว้าง 1.25 เมตร และหนา 0.50 เมตร โดยติดตั้งและยึดเข้าด้วยกันเป็นรูปวงแหวนกลม ซึ่งออกแบบตามระบบของ One - shell lining ที่เคยใช้ในนครต่างๆ เหล่านี้ได้อย่างได้ผลมาแล้วคือ Munick, Antwerp และ Berlin

ระบบกันซึมได้รับการออกแบบและพัฒนาให้มีความเหมาะสมกับขนาดของอุโมงค์ และสภาพที่ไม่มีการอัดความดันในอุโมงค์ จึงมีขนาดใหญ่ขึ้นมีความหนา 6 เซนติเมตร กว้าง 50 เซนติเมตร ซึ่งที่ส่วนท้ายของเครื่องเจาะ แผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปแต่ละแผ่น จะยึดติดกันด้วย Emergency Seal

สำหรับวงจรถาวรไหลหมุนเวียนของสารละลายเบนโทไนท์ เพื่อรักษาเสถียรภาพของผิวดินบริเวณชุดเจาะ ในขณะที่ปกติอัตราการไหลเท่ากับ  $650 \text{ m}^3/\text{h}$  ซึ่งให้ความเร็วในการเจาะ  $1 \text{ m/h}$  ใช้สาร Solid material ในการผลิตเบนโทไนท์  $250 - 270 \text{ g/l}$  สำหรับกรณีของดินอ่อน อัตราการไหลของสารละลายเบนโทไนท์ อาจสูงถึง  $720 \text{ m}^3/\text{h}$  ถ้าระดับของสารละลายเบนโทไนท์ต่ำกว่าระดับมาตรฐาน วาส์วาล์วจะปิดทันที เพื่อไม่ให้เกิดแรงดันในห้องทำงาน

การก่อสร้างอุโมงค์สำหรับโครงสร้างนี้เริ่มชุดเจาะเดือน พฤศจิกายน 1980 และต้องหยุดในกลางเดือนตุลาคม 1981 คือเมื่อติดตั้งแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปไปแล้ว 828 เมตร หรือวัดเป็นความยาวได้ทั้งหมด 1,035 เมตร และเริ่มก่อสร้างอีกครั้งในเดือน พฤษภาคม 1982 การออกแบบระบบการขุดและขนย้ายดินออกจากบริเวณอุโมงค์ จากดินสภาพที่เป็น pun clay เอกสาเปลี่ยนไปเป็น coarse gravel นั้นจะออกแบบระบบดังรูป 1.10 ซึ่งจะเป็นระบบขนถ่ายโคลนไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การก่อสร้างอุโมงค์สำหรับโครงการนี้เริ่มขุดเจาะเดือน พฤศจิกายน 1980 และ  
 ต้องหยุดในกลางเดือนตุลาคม 1981 คือเมื่อติดตั้งแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปไปแล้ว 828 เมตร หรือ  
 วัดเป็นความยาวได้ทั้งหมด 1,035 เมตร และเริ่มก่อสร้างอีกครั้งในเดือน พฤษภาคม 1982  
 การออกแบบระบบการขุดและขนย้ายดินออกจากบริเวณอุโมงค์ จากดินสภาพที่เป็น pun clay  
 เปลี่ยนไปเป็น course gravel นั้นจะออกแบบระบบดังรูป ซึ่งเป็นระบบขนถ่ายโคลน ระบบ  
 การแยกโคลนและปรับสภาพของ Slurry อธิบายโดยสรุปคือ ดินที่ถูกขุดจะถูกลำเลียงเข้าสู่  
 เครื่องแยกดิน Separation plant จากการที่ระยะทางระหว่างเครื่องเจาะและเครื่องแยกดิน  
 ไม่ไกลกัน จึงไม่สามารถแตกสลายก้อนดินเหนียวหวมด้วยใบมีดตัดดิน (Cutting wheel) ได้  
 ดังนั้น จึงมีดินเหนียวที่ถูกแยกโดยผ่านตะแกรงเพียง 30 - 40 % ดินที่ถูกแยกออกมาจะถูกขนย้าย  
 ออกไปด้วยรถรางสำหรับขนดิน (mucking train)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสบการณ์การก่อสร้างอุโมงค์  
เมือง ANTWERP ประเทศเบลเยียม

การก่อสร้างอุโมงค์สำหรับโครงการนี้ เป็นการก่อสร้างระบบขนส่งมวลชนใต้ดิน เป็นการเจาะอุโมงค์ใน (water - bearing soil) ดินประเภทอุ้มน้ำ ซึ่งมี 4 Stations และมี 7 ช่องทางการเจาะโดยมีระยะทางทั้งสิ้น 4,100 เมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 6.40 เมตร การขุดเจาะอุโมงค์ทำโดยการขุดเจาะตามทิศทางในแนวขนานกันตลอดเส้นทาง ซึ่งอาจจะเป็นการขนานในแนวข้างขวา หรือขนานในแนวบนล่าง โดยมีระยะห่างของแนวอุโมงค์ทั้งสอง ประมาณ 2.0 - 3.0 เมตร

โครงการในระยะแรก ทำการเจาะเป็นระยะทาง 1,381 เมตร โดยผ่านไปยัง สถานีต่าง ๆ คือ Zegel และ Drink โดยการก่อสร้างเสร็จสิ้นในวันที่ 20 มีนาคม 1981 การก่อสร้าง Shaft จะทำในบริเวณพื้นที่ซึ่งไม่ถูกพัฒนาจนมีความเจริญมากนัก เช่น บริเวณบ้านพักอาศัยที่มีพื้นที่ว่างเปล่ามากพอสมควร บริเวณที่ไม่มีอาคารขนาดใหญ่อยู่ใกล้เคียง เพราะการก่อสร้าง Shaft จะต้องใช้เวลานานในการดำเนินการ และจำเป็นต้องใช้เป็นทางในการลำเลียงขนส่งวัสดุต่าง ๆ ลงไปสำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ในส่วนอื่น ๆ ด้วย

เนื่องจากการขุดอุโมงค์ต้องผ่านชั้นดินที่มีลักษณะเป็น Silty Sand การรักษาสภาพความมั่นคงของดิน อันมีผลจากแรงดันของน้ำใต้ดินบริเวณอุโมงค์ ทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงมากและจะสูงเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ silt ที่ปนอยู่กับดินทราย ซึ่งจะมีปริมาณมากขึ้นในชั้นดินที่ลึกลงไปอีก ระบบ Hydrosield จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้กับโครงการนี้ หลังจากที่ใช้กับโครงการที่ Wilhelmsberg โดยการปรับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางให้ใหญ่ขึ้น และอุปกรณ์อื่น ๆ ก็ถูกปรับปรุงใหม่ให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ อาทิเช่น

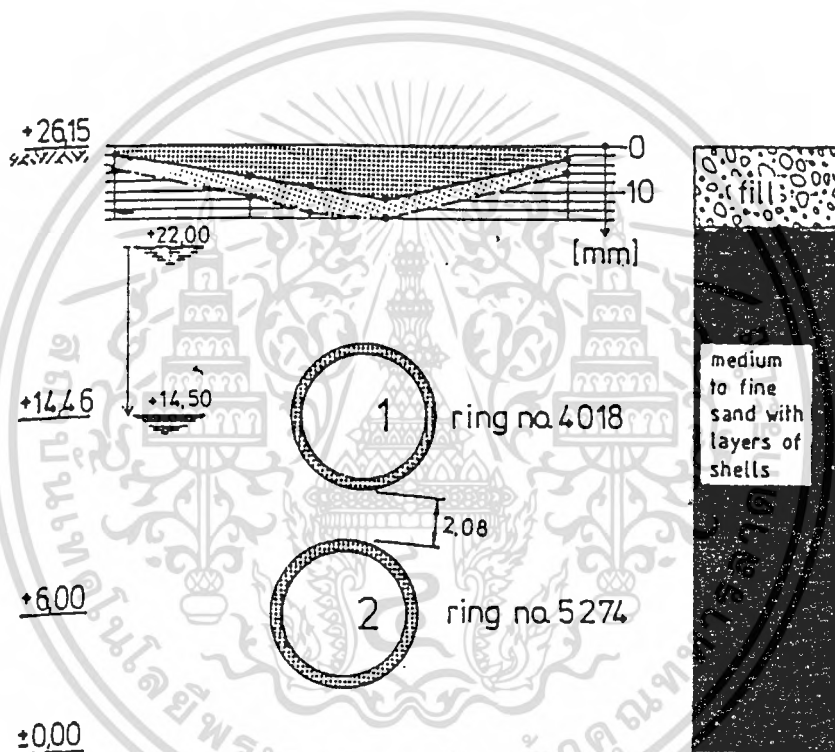


Fig. 6 Pre-Metro, Antwerp: section with settlements and typical soil profile

รูปที่ 3.16

รูปตัดของอุโมงค์และการทรุดตัวของดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เครื่องจักรสำหรับขุดอุโมงค์เป็นแบบวงล้อคาวนจก หมุนได้ทั้ง 2 ทิศทาง ด้วยอัตราเร็วสูงสุด 2 รอบ/นาที
- ไซโครลิกส์มอเตอร์ 4 เครื่องให้แรงบิดสูงสุด 1200 KN.ม
- อัตราการดูดสารละลายเบนโทไนท์กลับเพื่อนำไปแยกดินออกเท่ากับ 2 m<sup>3</sup>/sec

ปัญหาที่เกิดขึ้น คือ การติดตั้งแผ่น lining โดยใช้ระบบกันซึมที่ด้านท้ายของ Shield นั้นเกิดการผิดพลาด ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนขนาดของ Shield ให้ใหญ่ขึ้นนั่นเอง โดยเฉพาะในส่วนแรกของอุโมงค์ หมายเลข 1 ถูกรื้อแซมถึง 2 ครั้ง ซึ่งเป็นความเสียหายอันเกิดจากความไม่แน่นอนแม่นยำของการผลิตช่างกันซึม และตัวยึด (fixing devices) โดยช่างซ่อมแซมต้องใช้เวลาปรับความดันอากาศในอุโมงค์ไม่ให้น้ำซึมเข้า แล้วจึงทำการซ่อมแซม

หลังจากที่เกิดปัญหาคือ ซึ่งมีการกวาดชั้นในชั้นตอนการทำงานมากยิ่งขึ้น ทำให้การก่อสร้างอีก 3,700 เมตร ต่อจากนั้นไม่เกิดปัญหาคืออีกเลย และไม่มีการนำ Air lock กลับมาใช้อีก ทำให้อัตราการการทำงานสูงขึ้นกว่าเดิมมาก

อัตราการทรุดที่กำหนดไว้ไม่เกิน 25 มม. โดยการวัดการทรุดตัวของดินจะดำเนินการตรวจวัดตามจุดต่าง ๆ ที่กำหนดไว้เป็นลักษณะของตาข่ายที่มีความถี่พอสมควร เพื่อให้การวัดผลการทรุดตัวละเอียดขึ้นแน่นอนขึ้น จากการตรวจวัดในสนามได้ค่าการทรุดตัวของชั้นดินมากที่สุดคือ 11 มม. หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ยตามพื้นที่แล้วเท่ากับ 7 มม. ในกรณีที่อุโมงค์ถูกสร้างขึ้นในลักษณะอุโมงค์หนึ่งอยู่เหนืออีกอุโมงค์หนึ่งนั้น ค่าการทรุดตัววัดได้ 15 มม. โดยเฉลี่ยและในบางพื้นที่สูงถึง 18 มม. ซึ่งต่อมามีการแก้ไขปัญหาการทรุดตัวดังกล่าวด้วยการสร้างอุโมงค์หนึ่งก่อน แล้วจึงเจาะอุโมงค์อันล่างในภายหลังแต่ก็ไม่ทำให้ค่าการทรุดตัวเปลี่ยนแปลงไปมากนัก

ประสบการณ์งานสุขอนามัยในดินกรุงเทพฯ

ประวัติความเป็นมาของงานก่อสร้างอุโมงค์ส่งน้ำ การประปานครหลวง

ในระแวกที่ผ่านมา กรุงเทพมหานครต้องเผชิญกับปัญหาขาดแคลนน้ำประปาสำหรับการอุปโภคและบริโภคมาเป็นเวลาช้านาน จนกระทั่งในปี พ.ศ.2511 การประปานครหลวงโดยความเห็นชอบของรัฐบาลในสมัยนั้น ได้ว่าจ้างบริษัทวิศวกรที่ปรึกษา Camp Dresser & Mc.Kee of Boston Massachusetts ให้ดำเนินการศึกษาหาสาเหตุ และกำหนดวิธีการแก้ไขภาวะการขาดแคลนน้ำในเขตนครหลวงเป็นการถาวร

ต่อมาในปี พ.ศ.2513 วิศวกรที่ปรึกษาได้จัดทำรายงานแผนหลักที่เสนอต่อการประปานครหลวง ซึ่งแผนหลักดังกล่าว มีวัตถุประสงค์ในการจัดทำประมาณการเพิ่มของประชากรและความต้องการใช้น้ำในเขตนครหลวงเป็นระยะยาวจนถึงปี พ.ศ. 2543 นอกจากนี้ยังได้จัดทำรายละเอียดของการปรับปรุงระบบการผลิต ระบบการส่งและจ่ายน้ำ ซึ่งแผนหลักได้ประมาณการความต้องการใช้น้ำในปี พ.ศ.2543 ถึง 5 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวันและให้ดำเนินการปรับปรุงกิจการประปาไว้เป็น 4 ขั้นตอน คือ การปรับปรุงระยะแรก การปรับปรุงระยะที่สอง การปรับปรุงระยะที่สาม และการปรับปรุงระยะสุดท้าย

งานก่อสร้างตามโครงการแผนหลักระยะแรก ช่วงแรก (Stage I Phase I) เริ่มดำเนินการตั้งแต่ปี พ.ศ.2517 โดยว่าจ้างบริษัท Metcalf & Eddy Ltd. of Boston, Massachusetts กำหนดที่ทบทวนขอบเขตของงานโครงการและควบคุมการก่อสร้าง ซึ่งแบ่งเป็นโครงการย่อยได้ 8 โครงการ คือ โครงการระบบน้ำดิบ โครงการโรงกรองน้ำบางเขน โครงการอุโมงค์ส่งน้ำ โครงการโรงสูบน้ำและถังเก็บน้ำ โครงการท่อประธาน โครงการท่อจ่ายน้ำ โครงการบ่อบาดาลและโครงการมาตรวัดน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการที่ต้องส่งน้ำเป็นปริมาณมาก ๆ ไปยังสถานีสูบน้ำและถังเก็บน้ำ ณ จุดต่าง ๆ ในกรุงเทพมหานคร ต้องใช้ท่อส่งน้ำขนาดตั้งแต่ 3.4 - 2.0 เมตร จึงจะเพียงพอ ซึ่งท่อที่กล่าวมาเป็นท่อขนาดใหญ่ หากทำการก่อสร้างผ่านเข้าไปในเขตชุมชนจะมีผลกระทบต่อการสัญจรบนพื้นดิน สิ่งก่อสร้างหรือสาธารณูปโภคอื่น ๆ ที่อยู่ใกล้เคียง บริษัทวิศวกรที่ปรึกษา Camp Dresser & Mc.Kee ซึ่งต่อมาได้แก้ไขปรับปรุงโดยบริษัท Metcalf & Eddy เลือกวิธีการส่งน้ำไปยังสถานีสูบน้ำต่าง ๆ ด้วยการก่อสร้างอุโมงค์ส่งน้ำใต้ดินเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่กล่าวข้างต้น และได้เลือกก่อสร้างในชั้นดินที่เป็น Stiff Clay ณ ระดับความลึกประมาณ 17 - 20 เมตร จากผิวดิน การขุดเจาะอุโมงค์กระทำได้ง่าย ปัญหาอุปสรรคน้อยกว่าดินชั้นอื่น ๆ และราคาก่อสร้างถูกกว่า อุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวงที่ได้ดำเนินการก่อสร้างมาตั้งแต่ปี พ.ศ.2518 ถึงปัจจุบันที่กำลังดำเนินการอยู่ มีความยาวประมาณ 36.328 กม.

- หมายเหตุ
1. โครงสร้างอุโมงค์ส่งน้ำ สัญญา G-TN-2, G-TN-1A, G-TN-3-R, G-TN-5A-R และ G-TN-4B-R รูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย
    - 1.1 Primary lining พังชั้นนอกที่ได้จากการนำหิน (Segments) ที่เป็น คสล. หล่อสำเร็จมาประกอบเป็นวงมีทั้งแบบ flat plate type และแบบ box type
    - 1.2 Secondary lining พังชั้นในที่เป็นแบบ คสล. หล่อในที่ (cast-in place)
  2. โครงสร้างอุโมงค์ส่งน้ำ สัญญา G-TN-4A-R, G-TN-1B, G-TN-5B, G-TN-5C และ G-TN-6 รูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วย
    - 2.1 Primary lining เหมือนข้อ 1.1
    - 2.2 Secondary lining พังชั้นใน เป็นท่อเหล็กเหนียว (Steel pipe) และ fill void ด้วยคอนกรีต

จากรูปโครงสร้างของอุโมงค์ข้างต้นจะพบว่า Secondary lining ที่ก่อสร้างใน Stage I-Phase I ที่เป็น คสล. ถูกเปลี่ยนมาเป็นการใส่ท่อเหล็กเหนียว (Steel pipe) แทนเนื่องมาจากมีปัญหาจากการรั่วซึมของน้ำจากอุโมงค์หลังจากที่มีการส่งน้ำแล้ว ซึ่งปัญหาที่กล่าวอาจเกิดจากปัญหา poor workmanship และ unsuitable construction method เพราะงานก่อสร้างอุโมงค์เป็นงานที่ต้องให้เทคโนโลยีสูงและใหม่สำหรับบ้านเราซึ่งต่อมาใน Stage I - Phase II จึงได้มีการปรับปรุงแก้ไขให้ดีขึ้นด้วยการใช้ท่อเหล็กสวมใน Secondary lining แทนที่จะเป็น คสล. และปัญหาการรั่วซึมของน้ำจากอุโมงค์ก็หมดไปจนถึงปัจจุบัน

อนึ่ง การขุดเจาะอุโมงค์ในดินกรุงเทพฯ นอกจากสามารถขุดเจาะในดินชั้น Stiff clay แล้ว ยังขุดเจาะได้ในเกือบทุกชั้นดิน เช่น soft clay, meduim clay, silt และ sand เป็นต้น ทั้งนี้ย่อมขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ชนิดของหัวเจาะ (shield machine), ชนิดของ tunnel wall support หรือ primary lining ด้วย ซึ่งแสดงการวางอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง ส่วนใหญ่จะวางอยู่ในดินชั้น stiff clay และมีบางส่วนอยู่ในชั้น sand ได้ถ้าจำเป็น และสามารถทำงานได้

### วิธีการขุดเจาะอุโมงค์ (Tunnel Construction)

การขุดเจาะอุโมงค์โดยทั่วไป กระทำได้โดยการจมนบ่อก่อสร้าง (working shaft) ที่เตรียมช่องสำหรับต้นหัวเจาะ (shield tunneling machine) ออกไป หรือเรียกว่า starting shaft เมื่อทำการจมนบ่อก่อสร้างถึงระดับที่ต้องการแล้ว จากนั้นก็จะนำหัวเจาะลงไปใบบ่อพร้อมกับถ่านแนว Central Line และระดับของอุโมงค์จากผิวดินลงไปใบบ่อเพื่อใช้ control ในการขุดเจาะในทิศทางที่ขนานกับแนวบนพื้นดินได้ เมื่อทุกอย่างเตรียมพร้อมก็จะทำการต้นหัวเจาะออกจากบ่อก่อสร้าง พร้อมกับขุดเจาะอุโมงค์ในทิศทางและระดับที่ต้องการจนถึงบ่อรับ (arrival shaft) อนึ่งเครื่องมือและอุปกรณ์หลักที่จะต้องมีในงานขุดเจาะอุโมงค์ในชั้นดินอ่อนก็คือ ระบบ compressed air ซึ่งจะใช้ในการปิดกั้นเมื่อพบน้ำหรือชั้นดินอ่อน (soft clay) หรือ silt sand เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขุดเจาะอุโมงค์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

1. Excavation คือ การขุดที่ผู้ควบคุมหัวเจาะจะทำการดัน (shove) หัวเจาะด้วย shoving jack ที่ส่วนท้ายของหัวเจาะ พร้อมกับขุดเจาะดินโดยควบคุมให้อยู่ในแนวระดับที่ต้องการ
2. Erection คือ การประกอบติดตั้ง primary lining ในส่วนท้ายของหัวเจาะ (tail skin) กล่าวคือ หลังจากขุดดินและดันหัวเจาะออกไปได้ระยะที่ส่วนท้ายของหัวเจาะเท่ากับความกว้างของ primary lining แล้วก็จะหยุดขุดพร้อมถอน shoving jacks กลับ ทำการประกอบ primary lining ที่เป็นชิ้น (segments) คสล. มาประกอบเป็นวงกลมยึดแน่นด้วย bolts โดยใช้ erector arm ช่วย
3. Grouting หลังจากประกอบ primary lining เสร็จ ก็จะทำการขุดดินพร้อมดันหัวเจาะออกไปจนเกิดช่องว่างที่ท้ายหัวเจาะอีก จากนั้นจึงใช้ seal ยางอัดช่องระหว่างผนังด้านนอกของ primary lining กับผนังด้านในที่ท้ายหัวเจาะ (tail skin) แล้วทำการอัด grouting material เพื่อ fill void ระหว่างชั้นดินกับผนังด้านนอกของ primary lining ซึ่ง grouting material อาจจะเป็น neat cement, sand cement หรือ quick-set material เป็นต้น

หัวเจาะ (shield machine) ที่เคยใช้ขุดเจาะอุโมงค์ในดินกรุงเทพฯ มีดังนี้

1. Manual shield เป็นหัวเจาะแบบที่ใช้คนออกไปขุดหน้าหัวเจาะในกรณีสภาพดินเป็น stiff clay แต่ถ้าเป็น soft clay ก็จะปิดหน้าเกือบหมดเหลือช่องเล็ก ๆ ตรงกลางให้ดินไหลเข้ามาเองขณะที่ดันหัวเจาะเคลื่อนไปข้างหน้าสามารถขุดเจาะใน curve ที่มีรัศมีน้อย ๆ ได้ เหมาะสำหรับขุดเจาะอุโมงค์ในช่วงสั้น ๆ รูป เช่น การขุดเจาะอุโมงค์ช่วงที่เป็น Branch tunnel ของสัญญา G-TN-5A-R และ G-TN-5C ในดินชั้น stiff clay และงานดันท่อลอด (pipe driving) ต่าง ๆ ของงานวางท่อส่งน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงลวดคลองบางเขน, ถนนวิภาวดีรังสิต และถนนรัชดาภิเษก เป็นต้น ซึ่งจะ  
อยู่ในดินชั้น soft clay ในระหว่างการก่อสร้างไม่มีปัญหา

2. Mechanical shield เป็นหัวเจาะที่ปิดหน้าเกือบหมด เหลือช่องเปิดให้ดิน  
เข้าตรงกลางเท่านั้นทำการขุดดินด้วยการหมุน cutter head เหมาะสำหรับ  
การขุดเจาะในดินชั้น soft to stiff clay ไม่เหมาะสำหรับ silt หรือ  
sand ไม่สามารถขุดเจาะใน curve ที่มีรัศมีต่ำกว่า 300 เมตรครุรูปที่ 9 ใน  
งานก่อสร้างอุโมงค์ที่ผ่านมา ใช้ขุดเจาะอุโมงค์ในสัญญา G-TN-2 ถนน  
ประชาชื่น ช่วงจากหมู่บ้านประชานิเวศน์ 1 ถึงหน้าโรงพยาบาลสมเด็จพระปิยะมหาราชาธิราช  
สัญญา G-TN-1A ช่วงจากสี่แยกสี่พระยาถึงสวนลุมพินี และสัญญา G-TN-4B-R  
ช่วงจากลาดหญ้าถึงท่าพระ ในขณะการขุดเจาะมีปัญหาช่วงจากหมู่บ้านประชา-  
นิเวศน์ไปบางเขน ดูจาก soil profile จะพบว่าเมื่อพ้นจากบ่อก่อสร้าง  
No.1 ออกไปไม่ถึง 100 เมตร ก็จะเป็นชั้นของ sand หรือ sandy clay  
ซึ่งไม่เหมาะกับหัวเจาะแบบ Mechanical shield แต่ผู้รับจ้างยังเสี่ยงใช้  
ผลปรากฏว่าขุดเจาะไปถึงชั้นดินที่กล่าว ก็เกิด failure ที่หน้าหัวเจาะ น้ำ  
และทรายไหลทะลักเข้ามาในอุโมงค์ใช้ compressed air ชั่วส ก็แก้ไขไม่  
ตก จึงทำให้ดินชั้นเหนียวมาสูบลงอย่างรวดเร็ว จึงผลทำให้ถนนทรุด  
segment ของ primary lining ราวต้องเสริม steel ring ชั่วส และ  
ต้อง modified หัวเจาะจาก mechanical shield เป็น slurry  
shield พร้อมกับต้องทำ vertical grouting จากผิวดินด้วยสารเคมีเพื่อ  
ปรับปรุงสภาพ sand ให้เป็น cohesive soil ด้วยในเบื้องต้น จึงสามารถ  
ขุดเจาะต่อไปได้ นอกจากนี้ยังมีปัญหาเรื่องการ control alignment ด้วย
3. Semi-Mechanical shield เป็นหัวเจาะแบบเปิดหน้าหมด ทำการขุดเจาะ  
ด้วย backhoe เหมาะสำหรับดินประเภท medium to stiff clay ไม่  
เหมาะสำหรับ silt และ sand สามารถขุดเจาะใน curve ที่มีรัศมีสั้นถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20 เมตร ได้รูปที่ 10 ในงานก่อสร้างอุโมงค์ที่ผ่านมาใช้ชุดเจาะอุโมงค์ในสัญญา G-TN-3-R, G-TN-1B, G-TN-5B, G-TN-5C และ G-TN-6 ระหว่างการก่อสร้างมีปัญหาบ้าง เช่น กระทบชั้นดินที่เป็น soft clay แต่เป็นช่วงสั้นก็ใช้ระบบ compressed air ช่วยแก้ไขได้ การ control alignment ไม่มีปัญหา

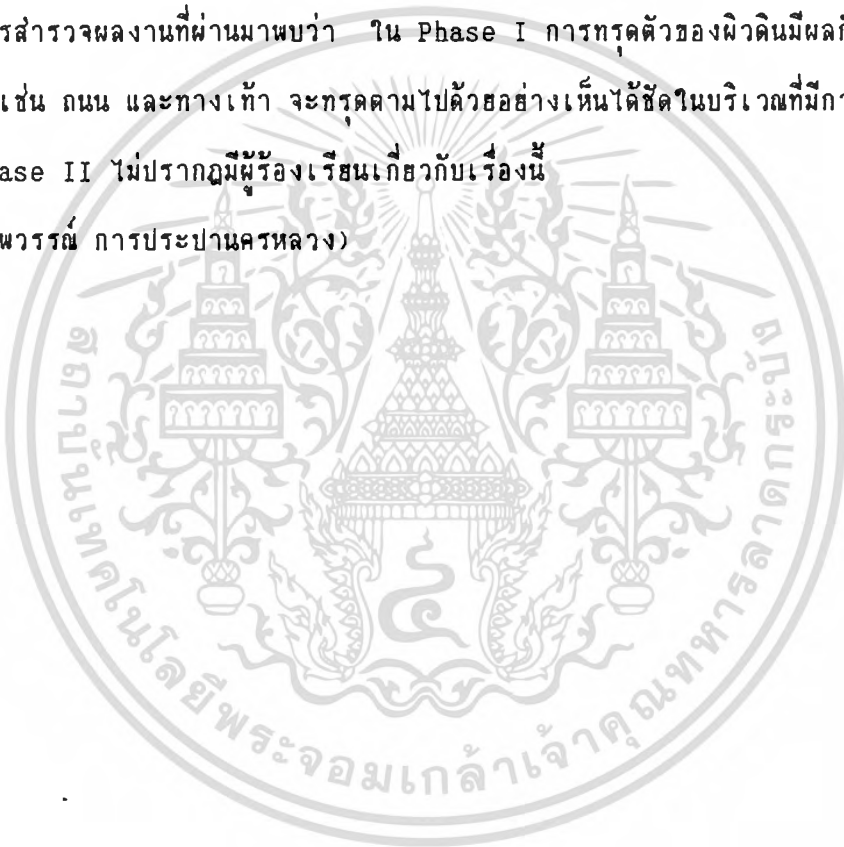
4. Slurry shield เป็นหัวเจาะคล้ายแบบ mechanical shield โดยเพิ่มส่วน mixing chamber ที่หัวเจาะ และระบบ slurry pump and back-up equipment สำหรับแยกดินที่ขุดได้ออกจากน้ำ slurry ที่มีส่วนผสมของ bentonite เป็นหลัก เหมาะสำหรับชุดเจาะในชั้นดินที่เป็น silt และ sand layer ไม่สามารถชุดเจาะใน curve ที่มีรัศมี 300 เมตร ได้ดังรูปที่ 11 ในงานก่อสร้างอุโมงค์ที่ผ่านมาใช้ในงานชุดเจาะอุโมงค์ สัญญา G-TN-2 ถนนประชาชื่น ช่วงจากประชานีเวศน์ 1 ไปยังโรงกรองบางเขน และสัญญา G-TN-4A-R ช่วงลอคใต้แม่น้ำเจ้าพระยา ในสัญญา G-TN-2 มีปัญหาเกี่ยวกับการ control alignment และปัญหาเรื่องน้ำใต้ดินเนื่องจากชุดเจาะอุโมงค์ที่ระดับลึกมากถึง 32 ม. จากผิวดินต้องใช้ compressed air จาก working shaft

งานก่อสร้างอุโมงค์ส่งน้ำจะแล้วเสร็จเร็วหรือช้า ต้องพิจารณาถึงสิ่งต่อไปนี้

1. วิธีการก่อสร้างบ่อก่อสร้าง
2. ต้องเลือกชนิดของหัวเจาะให้เหมาะสมกับสภาพดิน รวมทั้งน้ำหนัก ความยาว เป็นต้น
3. อุปกรณ์ช่วยในการติดตั้ง lining และขนาดของ lining
4. ระบบการลำเลียงและขนถ่ายดิน
5. ระบบการ control alignment

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการทรุดตัวของผิวดินอื่นเนื่องมาจากการขุดเจาะอุโมงค์ จะอยู่ในระหว่าง 1 - 6 ซม. ในโครงการ Stage I-Phase I และ 1 - 3 ซม. ในโครงการ Stage I-Phase II ในสภาพการขุดเจาะปกติจะเห็นได้ว่าผลการทรุดตัวในโครงการ Phase I มากกว่า Phase II ทั้งนี้เพราะใน Phase II ได้มีการปรับปรุงแก้ไขวิธีการ grouting ให้ดีขึ้น โดยการเพิ่มการทำ secondary grouting เข้าไปหลังจากที่ได้มีการทำ primary grouting ไปแล้ว โดยทิ้งช่วงห่างประมาณ 50 ม. พร้อมทั้งการตรวจสอบการขัน bolt & nuts ด้วย และจากการสำรวจผลงานที่ผ่านมาพบว่า ใน Phase I การทรุดตัวของผิวดินมีผลกับโครงสร้างบนผิวดิน เช่น ถนน และทางเท้า จะทรุดตามไปด้วยอย่างเห็นได้ชัดในบริเวณที่มีการทรุดตัวมาก ส่วนใน Phase II ไม่ปรากฏมีผู้ร้องเรียนเกี่ยวกับเรื่องนี้ (วิชญ์ สายพวรรณ์ การประสานครหลวง)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ

ความคิดที่จะนำเอาระบบรถไฟใต้ดินมาใช้ในประเทศไทยได้เกิดขึ้นมานานแล้ว แต่เหตุผลประการสำคัญที่ไม่สามารถดำเนินการก่อสร้างได้คือ ความเข้าใจเรื่องสภาพดินของกรุงเทพมหานครซึ่งเป็นข้อคัดค้านไม่ให้โครงการดังกล่าวเกิดขึ้นได้แม้กระทั่งความคิดที่จะทำก็ตาม

เกี่ยวกับเรื่องดังกล่าว ดร.นพดล เพ็ชรเวช ผู้เชี่ยวชาญด้านการขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดินที่มีประสบการณ์ทั้งในประเทศและต่างประเทศได้กล่าวถึงปัญหาดังกล่าวไว้ว่า " เมืองไทยยังมีความสับสนเรื่องการขนส่งมวลชนด้วยระบบอุโมงค์ใต้ดิน เพราะคนทั่วไปหรือแม้กระทั่งวิศวกรและผู้บริหารประเทศมักจะคาดเดากันไปว่า การขุดเจาะอุโมงค์ซึ่งมีขนาดใหญ่ไม่เหมาะสมกับสภาพดินบริเวณกรุงเทพมหานคร เนื่องจากเป็นดินอ่อนและมีการทรุดตัวของดินอยู่ตลอดเวลา อันเนื่องมาจากปัญหาการขุดเจาะนำน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ ปัญหาน้ำท่วม และปัญหาอื่นๆที่เกิดขึ้นกับกรุงเทพมหานคร ซึ่งถ้าหากมีการก่อสร้างอุโมงค์ขนาดใหญ่โดยเฉพาะอุโมงค์เพื่อการขนส่งมวลชนด้วยแล้วจะเป็นการเสี่ยงต่ออันตรายที่จะเกิดขึ้น ซึ่งเหตุผลดังกล่าวเกิดขึ้นจากการคาดเดาเอาเองมากกว่า

ความจริงแล้วการขุดอุโมงค์ในกรุงเทพฯไม่ใช่เป็นเรื่องใหม่ ปัจจุบันมีการอุโมงค์ขุดเจาะอุโมงค์ในกรุงเทพฯ รวมกันแล้วกว่า 37 ก.ม. แต่จัดว่าเป็นการขุดเจาะอุโมงค์ขนาดเล็กที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 5 เมตร ส่วนใหญ่จะเป็นการขุดอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวงหรืออุโมงค์ระบายน้ำของกทม. ซึ่งชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่างานก่อสร้างอุโมงค์ในดินกรุงเทพฯมีใช้งานยากเย็นและมีปัญหาแต่อย่างใด ทั้งนี้เพราะวิวัฒนาการทางเทคโนโลยีการเจาะอุโมงค์ในปัจจุบันสามารถเอื้ออำนวยให้สามารถทำการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินได้ทุกประเภท ส่วนราคาค่าก่อสร้างจะแพงมากน้อยแค่ไหนนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพดิน วิธีการเจาะและเครื่องจักรที่เลือกใช้

สาเหตุที่แท้จริงของปัญหาการขุดเจาะอุโมงค์ในกรุงเทพฯเกิดจากการขาดประสบการณ์ของวิศวกรไทยที่ได้รับการอบรมและมีความรู้เกี่ยวกับการขุดเจาะอุโมงค์ไม่มากนัก ทำให้เกิดการผิดพลาดในการออกแบบโครงสร้างอุโมงค์รวมทั้งการเลือกใช้วิธีการเจาะที่ผิดพลาดซึ่งทำให้เกิดไม่วาทรมันใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหาชั้นในภายหลัง ความจริงแล้วปัญหาสภาพดินและการทรุดตัวของดินในกรุงเทพฯ นั้นไม่ใช่ อุปสรรคสำคัญของการก่อสร้างอุโมงค์แต่อย่างใด ทั้งนี้จากการเปรียบเทียบกับสภาพดินในเมือง เม็กซิโกซิตี ประเทศเม็กซิโก ซึ่งมีสภาพดินที่อ่อนกว่าดินกรุงเทพฯ มากและยังมีปัญหาการทรุดตัวของดินที่รุนแรงกว่า แต่ก็ยังสามารถทำการก่อสร้างอุโมงค์และใช้งานได้โดยไม่เกิดปัญหาใดๆ

ปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่ถูกนำมาพิจารณาในการเลือกใช้วิธีการก่อสร้างคือ ราคาค่าก่อสร้างของระบบใต้ดินจะแพงกว่าระบบรถไฟฟ้าบนผิวดินหรือทางยกระดับหลายเท่าตัว โดยเฉลี่ยแล้วระบบรถไฟฟ้าใต้ดินจะแพงกว่าระบบรถไฟฟ้าบนทางยกระดับประมาณ 2-3 เท่าและแพงกว่ารถไฟฟ้ายานผิวดินประมาณ 4-5 เท่า แต่ถ้าหากคิดในภาพรวมถึงค่าใช้จ่ายและอุปสรรคในการเวนคืนที่ดิน และค่าเสียหายที่เกิดจากผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อม และการจราจรทั้งในระหว่างการก่อสร้างและในระยะยาวแล้วการเลือกใช้ระบบรถไฟฟ้าใต้ดินจะเหมาะสมกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

## การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยวิธี HYDROSHIELD METHOD

การขุดอุโมงค์ในดินหลวมนั้นเป็นงานวิศวกรรมที่ยากงานหนึ่ง ซึ่งปัญหาคือ การจะหาวิธีการอย่างไรมาป้องกันการพังทลายของดินบริเวณ Tunnel Face ในปัจจุบันมีการแก้ปัญหาเหล่านี้โดยการนำ Shield หลายชนิดมาใช้ ชนิดแรกนำเอา Breasting Plates มาใช้ประกอบกับ Shield บางชนิดมี Horizontal Sand Table เพื่อใช้เป็นตัวสะกด การเคลื่อนตัวของดิน หรือวิธีอื่น ๆ จะมี Cutter Wheel ซึ่งมีประคูปรับได้เพื่อใช้ขุดและรับน้ำหนักพร้อมกันไปด้วย

ถ้าอุโมงค์ต้องก่อสร้างในระดับที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน จำเป็นต้องลดระดับน้ำใต้ดินด้วยการปัมน้ำออกหรือการอัดอากาศเพื่อป้องกันการพังทลายของผิวหน้าดิน ความสำเร็จในการใช้วิธีการอัดความดันนับเป็นความก้าวหน้าด้านการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินในดินอ่อนซึ่งในครั้งแรกที่ประเทศเยอรมันในปี ค.ศ. 1974 มีการใช้สารละลาย Bentonite เป็นตัวป้องกันการพังทลายของผิวดิน บริษัท WAYSS & FREYTAG ได้พัฒนาระบบการก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้ Shield แบบพิเศษขึ้นมาซึ่งเรียกว่า Hydroshield ซึ่งเป็นการประยุกต์และปรับปรุงมาจากวิธีการขุดอุโมงค์แบบ Slurry shield method ให้มีประสิทธิภาพในการทำงานดียิ่งขึ้น ทำให้การการขุดอุโมงค์ในดินหลวม (Loose Soil) ภายใต้ระดับน้ำใต้ดินสามารถทำได้ ไม่ว่าจะในระดับความลึกของการขุดอุโมงค์หรือน้ำใต้ดินจะไม่เป็นอุปสรรคต่อการก่อสร้างอีกต่อไปและนี่คือการอธิบายถึงคุณสมบัติของวิธีการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยวิธี Hydroshield ของบริษัท WAYSS & FREYTAG ในการสัมมนาซึ่งจัดขึ้นโดยความร่วมมือของ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย กรุงเทพมหานคร และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในวันที่ 7 พ.ย. 2534

หลักการสำคัญคือ ใบมีดสำหรับตัดดิน (Cutter Wheel) ของ Hydroshield นั้นจะถูกปิดตายและยึดติดอยู่ในบริเวณของส่วนหัวตัด (Bulk Head) เท่านั้นซึ่งเป็นบริเวณเฉพาะและเป็นบริเวณเดียวที่มีการอัดความดัน ทั้งนี้จะช่วยตัดปัญหาต่างๆที่จะเกิดขึ้นอันเป็นสาเหตุมาจากการที่คนงานต้องเข้าไปทำงานภายใต้สภาวะความดัน ซึ่งสภาวะเช่นนี้จำเป็นจะต้องใช้เวลาใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

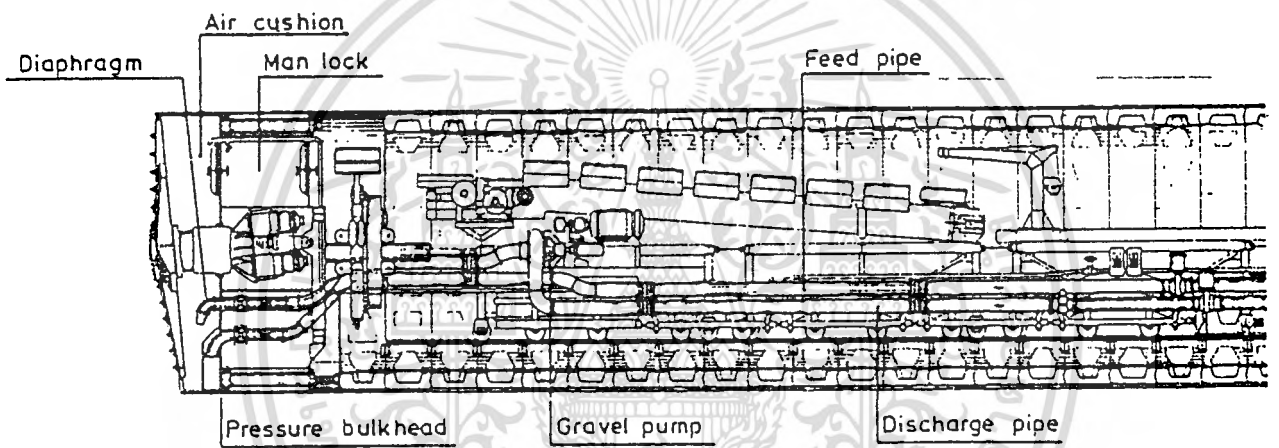


Fig. 7 Pre-Metro, Antwerp: Hydroshield equipment

รูปที่ 4.1

แสดงส่วนประกอบของเครื่องจักร  
สำหรับขุดเจาะอุโมงค์แบบ Hydroshield

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับความดันในร่างกายของผู้ที่จะเข้าไปทำงานนานพอสมควร และอาจทำให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพในภายหลังได้

ระบบ Hydroshield เป็นระบบการขุดเจาะอุโมงค์แบบ Slurry Pressure Method ที่ก้าวหน้าและทันสมัยที่สุดวิธีการหนึ่งในขณะนี้ ถึงแม้ว่าจะนำมาใช้เป็นเวลานานแล้วก็ตาม ทั้งนี้เป็นเพราะหลักการ และระบบการทำงานต่างๆยังสามารถทำงานได้เป็นอย่างดีเยี่ยม โดยเฉพาะระบบการลำเลียงดินออกนั้นวัสดุที่ถูกขุดออกมาแล้วจะถูกขนออกจากบริเวณขุดด้วยระบบการอัดอากาศหรือโดยการปั๊มผ่านท่อออกไปด้านนอกอุโมงค์ ซึ่งประกันได้ว่าจะสามารถขนย้ายดินออกไปได้เป็นปริมาณมากและรวดเร็วสอดคล้องกับอัตราการขุด

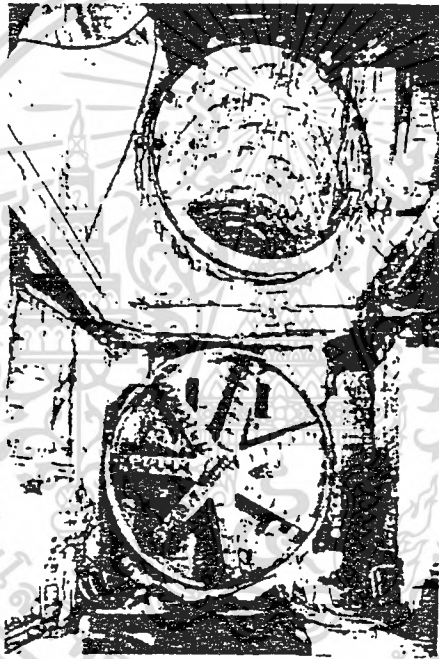
อุโมงค์ที่ขุดจะถูกค้ำไว้ด้วยอุปกรณ์แผ่นโค้งที่สามารถกันน้ำได้หรือที่เรียกว่า Shield และจะทำการติดตั้งแผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปลักษณะโค้งเป็นผนังหรือโครงสร้างรับน้ำหนักถาวร ซึ่งแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปเหล่านี้จะหล่อขึ้นในบริเวณพื้นที่ที่อยู่ห่างออกไปจากบริเวณก่อสร้างซึ่งโดยปกติแล้วจะเป็นบริเวณนอกเมืองที่การจราจรไม่คับคั่งและมีพื้นที่กว้างเพียงพอ และจะขนส่งมายังบริเวณก่อสร้างในเวลากลางคืน

ในปัจจุบันยังไม่มีวิธีการก่อสร้างอุโมงค์ชนิดใดที่สามารถทำงานได้เร็วและมีประสิทธิภาพเท่ากับวิธี Hydroshield ซึ่งเหตุผลหนึ่งก็คือไม่มีปัญหาเรื่องการตัดกันของอุโมงค์เพราะว่าบริเวณที่จะตัดกันนั้นสามารถขุดให้อุโมงค์ทั้งสองอยู่ต่างระดับกันได้ และโดยมากแล้วบริเวณจุดตัดจะทำเป็นสถานีใต้ดินด้วยเพื่อให้การเปลี่ยนเส้นทางทำได้สะดวกยิ่งขึ้น

#### ลักษณะการทำงานของ Hydroshield method

1. ขุดดินด้วยเครื่องจักรกลที่มีลักษณะเป็นวงล้อหมุน
2. มีการป้องกันการพังทลายที่บริเวณผิวเจาะ และการหลุดตัวของดินเหนื่ออุโมงค์ไม่ให้เกินข้อกำหนด
3. สามารถขุดเจาะอุโมงค์ภายใต้ระดับน้ำใต้ดินโดยไม่ต้องมีการอัดความดันให้กับอุโมงค์ในบริเวณที่อยู่หลัง Bulkhead
4. ควบคุมการพังทลายของดินที่ผิวเจาะด้วยแรงดันของของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ระดับความลับของชั้นสูงเป็นการสืบค้นข้อมูลไปบนอินเทอร์เน็ตในรูปของเอกสารคำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Pre-Metro, Antwerp: breakthrough of lower tunnel

รูปที่ 4.2

ลักษณะของการขุดเจาะอุโมงค์คู่แบบหนึ่งด้วยวิธี Hydroshield

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านหลังของ Diaphragm ทางตอนท้ายของ Work Chamber

## 6. การชนลำเลียงดินที่ขุดออกมานั้นทำได้โดยการชนด้วยระบบปั๊มและระบบสายพาน

### การป้องกันผิวหน้าของอุโมงค์ด้วย Thixotropic Fluid

การขุดอุโมงค์ในดินเหนียวเป็นการทำงานที่ยาก และความสูงจะเพิ่มขึ้นเพราะแรงดันของน้ำเป็นตัวลดเวลาความคงตัวของดินลง Hydroshield เป็นวิธีที่มีการปกป้องการพังทลายของดินด้วยแรงดันของของเหลวซึ่งทำหน้าที่เหมือน Sealing Film เคลือบบนผิวหน้าของดิน

### การควบคุมแรงดันของของเหลว

สำหรับวิธีการขุดอุโมงค์แบบ Hydroshield นั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของอากาศใน Working Chamber เป็นการหดเซสหรือการเพิ่มแรงดันให้กับของเหลวที่มีแรงดันเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงอยู่ตลอดเวลา แรงดันอากาศจะไปกระทำที่ผิวหน้าของของเหลวที่อยู่ทางด้านท้ายของ Chamber บริเวณ Bulkhead ซึ่งการเปลี่ยนแปลงแรงดันดังที่กล่าวมานี้ก็เนื่องมาจากสภาพของดินและน้ำที่อยู่รอบๆนั้นนั่นเอง อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการปรับแรงดันของของเหลวนี้เป็นระบบเครื่องอัดอากาศ (Air Compressor) ซึ่งถูกควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ เช่นเดียวกับ การหมุนของ Cutter Wheel เหมือนกัน

### ระบบการชนลำขุดดิน

ดินที่เกิดจากการขุดอุโมงค์จะถูกผสมเข้ากับของเหลวในระหว่างการขุดเจาะ หลังจากนั้นจะถูกปั๊มออกไปตามท่อและเข้าสู่ระบบสายพานลำเลียงหลังจากผ่านการนำแยกของเหลวกับดินออกจากกัน ของเหลวที่ถูกแยกออกมาจะนำกลับไปใช้ในขบวนการขุดเจาะต่อไปอีก โดยของเหลวที่ผ่านการกรองดินออกเรียบร้อยแล้ว จะต้องนำไปปรับปรุงคุณภาพให้ได้ตามมาตรฐานเสียก่อนจึงจะปั๊มกลับไปใช้ได้ ขั้นตอนการปั๊มของเหลวกลับนั้นจะต้องควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้สัมพันธ์กับอัตราการขุดออกและยังคงรักษาสภาพความมั่นคงให้คงที่ตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

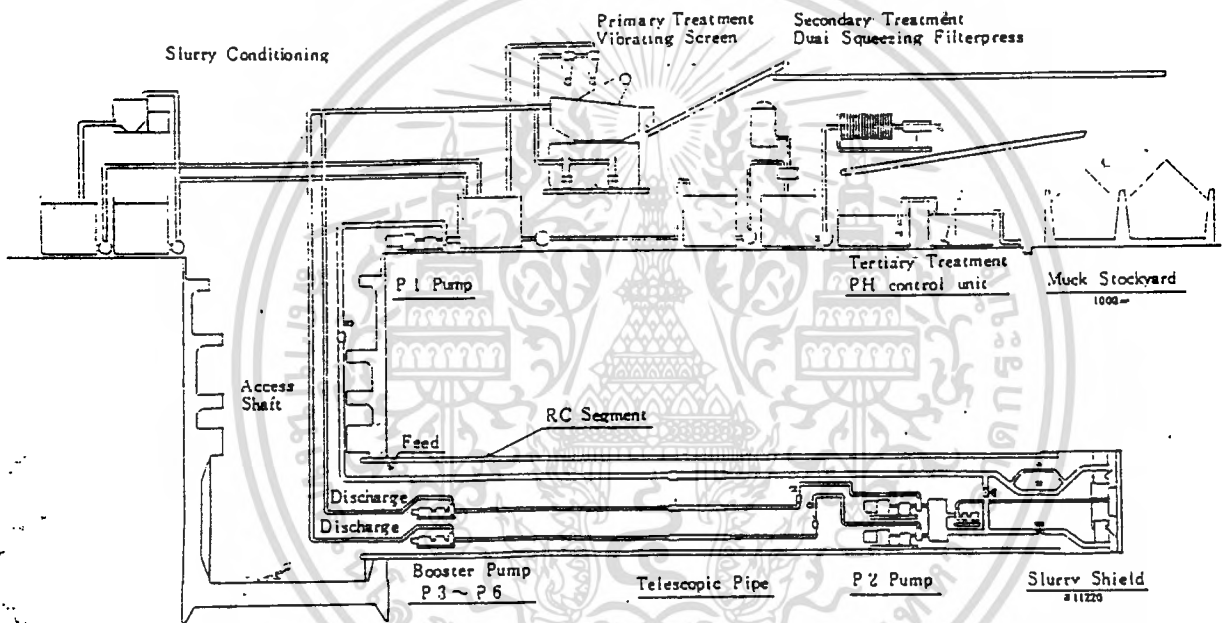


Fig.3-4 Slurry transportation and treatment system

รูปที่ 4.3

ระบบการลำเลียงและบำบัดสารละลาย Slurry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทำงานในอุโมงค์ที่ระดับความดันบรรยากาศ

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าจะมีการอัดแรงดันให้กับของเหลวเฉพาะบริเวณ Work Chamber เท่านั้น ซึ่งบริเวณนี้จะถูกปิดสนิทแยกออกจากส่วนอื่นและจะไม่มีคนเข้าไปปฏิบัติงาน ส่วนที่ใช้เป็นที่ปฏิบัติงานของคนนั้นจะอยู่ทางด้านท้ายของShield ซึ่งอยู่ภายใต้ความดันบรรยากาศคนงานสามารถทำงานได้อย่างปกติโดยไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ หรือต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นสำหรับการปรับความดันให้กับคนงานหลังจากการทำงานเสร็จเหมือนกับวิธีที่ใช้การอัดความดันอื่นๆ

### สภาวะการทำงานที่เหมาะสมกับวิธี Hydroshield

Hydroshield นั้นเป็นวิธีการขุดอุโมงค์ที่เหมาะสมกับดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว ดินหลวมหรือดินที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดินในกรณีที่เป็นกรณีเฉพาะอย่างนั้นHydroshield จะเป็นอย่างไรเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ วิธี Hydroshield นั้นสามารถดำเนินการได้โดยมีค่าก่อสร้างถูกกว่าและปลอดภัยกว่าในกรณีต่างๆ เหล่านี้คือ

1. เป็นทรายคูด(Quicksand) หรือสภาพดินที่เป็นทรายหลวมพังทลายได้ง่ายซึ่งต้องการความปลอดภัยในการทำงานเป็นอย่างมาก
2. บริเวณที่ก่อสร้างอุโมงค์มีลักษณะดินและรับน้ำหนักมากซึ่งเป็นการเสี่ยงต่ออันตรายถ้าใช้ระบบอัดความดันธรรมดา
3. บริเวณที่เป็นดินหลวมหรือดินมีรูพรุนซึ่งต้องใช้อากาศปริมาณมากในการอัดความดัน
4. ถ้ากรณีที่ต้องใช้การอัดความดัน วิธีอื่นๆจะต้องใช้การอัดอากาศใน Working Chamber ซึ่งมีคนทำงานอยู่และต้องเสียเวลากับการปรับแรงดันเป็นผลให้เวลาการทำงานน้อยลงแต่สำหรับวิธี Hydroshield ไม่ต้องทำอย่างนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การติดตั้งแผ่นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

หลังจากที่เครื่องจักรทำงานและเคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้ 110 เซนติเมตรแล้วเครื่องจักรจะหยุดทำงานแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปที่ลำเลียงเข้ามาด้วยรถรางก็จะถูกติดตั้งด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า Hydraulic Erector แผ่นคอนกรีตแต่ละแผ่น จะได้รับการติดขางกันซึมโดยรอบเพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำภายนอกเข้ามาข้างในอุโมงค์ แผ่นคอนกรีตที่นำมาติดใหม่จะถูกยึดให้ติดกับแผ่นคอนกรีตที่ติดไว้ก่อนแล้วด้วยสลักเกลียว (Bolts) เมื่อทำการติดตั้งเรียบร้อยแล้วเครื่องเจาะก็จะเริ่มทำงานต่อไป สำหรับช่องว่างที่เกิดขึ้นหลังจากการเคลื่อนตัวของเครื่องเจาะนั้นจะต้องอัดด้วยซีเมนต์มอร์ต้าเพื่อป้องกันการทรุดตัวของดินด้านข้าง

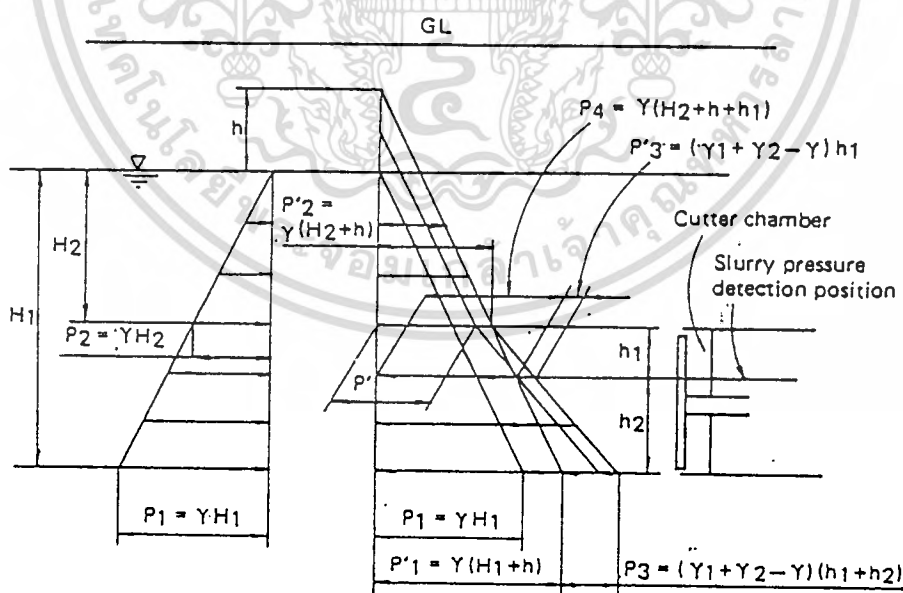


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำใต้ดินกับแรงดันของ Slurry

จากรูป ระดับความสูงของน้ำใต้ดินสามารถวัดได้จากระยะทางจากผิวของน้ำใต้ดินถึงส่วนล่างสุดของ Shield machine กำหนดให้มีค่าเท่ากับ  $H_1$  พลังงานของน้ำที่ความสูง  $H_1$  จะกระทำกับ Shield face ด้วยความดัน  $P_1 = r(H_1)$  ทั้งด้านบนและด้านล่าง แรงดันน้ำ (Fresh water pressure)  $P_2 = r(h_2+h)$  และ  $P_1' = r(H_1+h)$  คือค่าความดันของน้ำที่รวมส่วนปลอดภัย (Safety factor) ไว้ด้วยแล้ว เพื่อป้องกันความผิดพลาดอันเกิดจากการควบคุมแรงดันของ Slurry และหักล้างกับแรงดันที่กระทำบริเวณผิวเจาะ

อย่างไรก็ตามไม่มีความจำเป็นจะต้องรักษาเสถียรภาพของผิวเจาะ ด้วยการควบคุมแรงดันของ Slurry เพียงอย่างเดียว แต่จะอาศัยการเติมเบนโทไนท์ หรือดินเหนียว ผสมไปกับสารละลายเพื่อปรับค่าความถ่วงจำเพาะและความหนืดให้เหมาะสม มีประสิทธิภาพในการรักษาเสถียรภาพของผิวเจาะ ยิ่งไปกว่านั้นความก้าวหน้าทางการวิจัยด้านเคมียังทำให้สารละลาย (Slurry) มีคุณภาพสูงขึ้น แต่ในสภาพความเป็นจริงแล้วเราไม่สามารถเข้าไปตรวจวัดความดันต่างๆ ได้โดยตรง จึงต้องอาศัยการตรวจวัดโดยทางอ้อม เพื่อให้รู้สภาพของและความปลอดภัย



$r$ : ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำ

$r_1$ : ค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลายเบนโทไนท์ที่เข้าสู่ผิวเจาะ

เอกร  $r_2$ : ค่าความถ่วงจำเพาะของสารละลาย เบนโทไนท์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อผสมกับดิน ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โครงการรถไฟฟ้ามหานคร

### ระบบและเทคโนโลยีของฟ้ามหานคร

ระบบรถไฟฟ้ามหานครของฟ้ามหานครจะเป็นรถขนส่งมวลชนขนาดเบาแบบอัตโนมัติ รถ 1 คัน กว้าง 2.9 เมตร ยาว 16.5 เมตร ซึ่งในรถ 1 ขบวน 6 ตู้ ผู้โดยสารได้ 1736 คน สามารถขนส่งผู้โดยสารได้สูงสุด 69440 คน/ชม./ทิศทาง มีความถี่ในการเดินรถต่ำสุด 90 วินาที มีความเร็วสูงสุด 80 กม./ชม. รัศมีความโค้งทางวิ่งต่ำสุด 100 เมตร ใช้ระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 750 โวลต์ แกนล้อ สามารถเลี้ยวตามกันได้ ทำให้งานเลี้ยวแคบ ลดเสียงดังและลดการสึกหรอของล้อ โดยมีรถที่จะใช้รวมทั้งหมด 249 คัน

ระบบควบคุมรถเป็นแบบอัตโนมัติทั้งหมด ไม่ต้องมีคนขับ โดยใช้ระบบ SEL-TRAC แห่งประเทศแคนาดา ซึ่งระบบนี้มี MOVING SIGNALLING ทำให้สามารถปล่อยรถวิ่งได้ถี่มากกว่าระบบอื่น ๆ ทำให้สามารถขนส่งผู้โดยสารได้มาก

ในการก่อสร้างโครงการรถไฟฟ้ามหานครนี้จะแบ่งการก่อสร้างออกเป็น 5 ขั้นตอน คือ

1. โรงซ่อมบำรุง บริเวณพระราม 9 จะเริ่มก่อสร้างในปี 2535 แล้วเสร็จ 2537
2. ช่วงสาทร-ลาดพร้าว ก่อสร้างปี 2535 เปิดดำเนินการปี 2538
3. ช่วงสาทร-นางเลิ้ง ก่อสร้างปี 2536 เปิดดำเนินการปี 2539
4. ช่วงนางเลิ้ง-บางซื่อ ก่อสร้างปี 2537 เปิดดำเนินการปี 2539
5. ช่วงสาทร-พระโขนง ก่อสร้างปี 2538 เปิดดำเนินการปี 2540

ระบบรถไฟฟ้ามหานครขนส่งมวลชนส่วนที่ 1 ขั้นที่ 1 ใช้กำลังไฟฟ้าประมาณ 40 เมกะวัตต์ ซึ่งไม่มากเมื่อเทียบกับกำลังผลิตไฟฟ้าทั้งประเทศ ประมาณ 8000 เมกะวัตต์ ซึ่งทางการพิเศษ ได้ทำการประสานงานกับการไฟฟ้านครหลวง เพื่อเตรียมการแก้ไขไว้ล่วงหน้าแล้ว

ในโครงการรถไฟฟ้ามหานครขั้นที่ 1 นี้จะก่อสร้างไปตามแนวเส้นทางที่การทางกำหนดไว้ตามหลักของวิศวกรรมขนส่ง ซึ่งสรุปวิธีการคร่าว ๆ ได้จากข้อมูลต่างๆ จากจำนวนประชากร จำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สร้างด้วยวิธีการคร่าว ๆ ได้จากข้อมูลต่างๆ จากจำนวนประชากร จำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นวางรถยนต์ ปริมาณการเดินทางไปมาในพื้นที่ส่วนต่าง ๆ แล้วนำข้อมูลต่าง ๆ มาคำนวณและ  
คาดการณ์ปริมาณการเดินทางในอนาคตในช่วง 20-30 ปี

### ประโยชน์ของโครงการ

ในด้านเศรษฐกิจโครงการรถไฟฟ้าจะช่วยทำให้ประหยัดเวลาในการเดินทางประหยัด  
น้ำมันลดการติดขัดของการจราจร ลดมลภาวะอากาศเป็นพิษ และประหยัดค่าใช้จ่ายใน  
การดำเนินการของระบบขนส่งสาธารณะ

นอกจากนี้ประชาชนยังเดินทางด้วย ความสะดวกสบาย รวดเร็ว ปลอดภัย และ  
ตรงต่อเวลา และยังช่วยส่งเสริมและชักจูงให้ประชาชนหันมาใช้รถไฟฟ้า ซึ่งเป็นระ  
บบขนส่งสาธารณะแทนการใช้รถส่วนตัว ซึ่งส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพของการขนส่งโดยสาร  
โดยสารประจำทางของ ขสมก.

กรณีการลดอุบัติเหตุเป็นประโยชน์โดยทางอ้อมที่สำคัญอีกทาง หนึ่งนับการทำให้เกิด  
การจ้างงานในประเทศและทำให้กิจกรรมทางเศรษฐกิจดีขึ้นและช่วยปรับปรุงคุณภาพชีวิตให้  
ดีขึ้น

### ลำดับเหตุการณ์ของโครงการรถไฟฟ้าลาวาลิน

- |               |  |
|---------------|--|
| พ.ศ. 2524     | การทางพิเศษออกแบบสำรวจพร้อมที่จะประกวดราคาก่อสร้าง<br>แต่รัฐบาลไม่มีเงินลงทุนก่อสร้าง  |
| พ.ศ. 2525     | การทางพิเศษกำหนดคนโอบายให้สัมปทาน โครงการแก่เอกชน<br>พร้อมคัดเลือกเอกชน 7 บริษัท แต่ปรากฏว่าไม่มีเอกชนรายใด<br>สามารถทำตามเงื่อนไขที่รัฐบาลกำหนด |
| พ.ศ. 2529     | รัฐบาลผ่อนปรนเงื่อนไขการลงทุน พร้อมเข้าร่วมการลงทุนไม่<br>เกินร้อยละ 25 ของทุนเรือนหุ้น  |
| 7 มิ.ย. 2533  | การทางพิเศษมีมติเอกฉันท์เลือกบริษัทลาวาลินเป็นผู้ดำเนิน<br>โครงการรถไฟฟ้าขั้นที่ 1   |
| 15 มิ.ย. 2533 | การทางพิเศษ เสนอคณะรัฐมนตรีเพื่ออนุมัติและรับทราบ  |
| 16 ก.ค. 2533  | บริษัทลาวาลินแจ้งแผนการจ่ายค่าเวนคืนกรรมสิทธิ์ที่ดิน   |
| 1 ส.ค. 2533   | คณะกรรมการการทางพิเศษ กำหนดให้สัญญาของลาวาลิน  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ **ตั้งอยู่ภายใต้การบังคับของกฎหมายไทย** ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โครงการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงเทพฯ

### วัตถุประสงค์ของโครงการ

ปัจจุบันกรุงเทพฯประสบปัญหาการจราจรติดขัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเขตพื้นที่ธุรกิจย่านใจกลางเมืองซึ่งทวีความรุนแรงขึ้นทุกขณะ กรุงเทพฯจึงพิจารณาเริ่มโครงการระบบขนส่งมวลชนในบริเวณนี้ขึ้น เพื่อให้เป็นทางเลือกหนึ่งในการเดินทางของประชาชนในพื้นที่ ซึ่งจะช่วยลดการใช้รถยนต์ส่วนตัว และให้บริการขนส่งสาธารณะที่ดีกว่าที่เป็นอยู่ในปัจจุบันนอกจากนี้ยังมีวัตถุประสงค์ให้ระบบขนส่งมวลชนนี้ เป็นระบบที่สามารถเสริมสร้างโครงการระบบขนส่งมวลชนในอนาคตด้วยการดำเนินโครงการเพื่อเป็นการส่งเสริมให้เอกชนมีส่วนร่วมในการลงทุน จึงดำเนินการในลักษณะสัมปทาน โดยผู้ที่ได้รับสัมปทานเป็นผู้ออกแบบก่อสร้างและดำเนินการน้อมบำรุงรักษาระบบเป็นเวลา 30 ปี

### การพิจารณาคัดเลือกข้อเสนอของโครงการ

ข้อเสนอสำหรับการลงทุนโครงการระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพฯ ได้รับการพิจารณาจากคณะกรรมการและคณะกรรมการพิจารณาการลงทุนก่อสร้างระบบขนส่งมวลชนของกรุงเทพฯที่ตั้งขึ้น โดยประเมินจากความเหมาะสมและข้อกำหนดเงื่อนไขกว่า 72 รายการ ครอบคลุมเรื่องเกี่ยวกับ

1. ความเหมาะสมด้านเทคนิคและการให้บริการของระบบ
2. ความมั่นคงด้านการเงิน-การลงทุน
3. ความสามารถและประสบการณ์ของกลุ่มที่ยื่นข้อเสนอ

ผลจากการพิจารณาถึงความเหมาะสมและเงื่อนไขต่าง ๆ ตลอดจนการเดินทางไปศึกษา ระบบของจริงที่มีการใช้อยู่ในต่างประเทศ ทำให้คณะกรรมการ ตกลงคัดเลือกบริษัทบางกอกทรานสิท ซิสเต็ม คอร์ปอเรชั่น (BTSC) ซึ่งเป็นบริษัทร่วมทุนนำโดย กลุ่มธนาคาร ให้เข้าเจรจาเป็นอันดับแรก ระบบที่ BTSC เสนอคือ ระบบขับเคลื่อนบนรางยกระดับด้วยพลังงานไฟฟ้า

ความเหมาะสมของข้อเสนอของ BTSC คือ สามารถเพิ่มการให้บริการผู้โดยสารในอนาคตได้โดยง่าย เป็นระบบที่ได้รับการยอมรับและใช้กันอยู่อย่างแพร่หลาย ทำให้มีวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ พร้อมสำหรับการซ่อมบำรุง บริษัทได้รับความเชื่อถือด้านการเงินเป็นอย่างดี อัตราค่าโดยสารต่ำ มูลค่าการลงทุนสูง ทำให้กรุงเทพฯ ได้รับทรัพย์สินที่มีค่า ภายหลังจากโอนกรรมสิทธิ์หลังจากที่คณะกรรมการมีมติเมื่อวันที่ 10 กันยายน 2534 เห็นชอบให้ BTSC เป็นผู้มีข้อเสนอที่เหมาะสมที่สุด ก็ได้มีการเจรจาในรายละเอียดระหว่างกรุงเทพฯ กับ BTSC การเจรจาทางเทคนิค การเงินของโครงการและการเจรจาในข้อสัญญาที่กรุงเทพฯ มหันครเสร็จสิ้นลงเมื่อเดือนตุลาคม 2534 และร่างสัญญาได้ผ่านการพิจารณาของคณะกรรมการซึ่งมีผู้แทนสำนักงานอัยการสูงสุดร่วมอยู่ด้วย เมื่อเดือนธันวาคม 2534

### ลักษณะของระบบ และการออกแบบ

ระบบขนส่งมวลชนที่ BTSC เสนอต่อกรุงเทพฯ นั้นเป็นระบบที่ใช้พลังงานจากกระแสไฟฟ้าวิ่งบนรางคู่ยกระดับ ซึ่งก่อสร้างจากพื้นดินโดยเฉลี่ย 12 เมตร ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ควบคุมด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์และไมโครคอมพิวเตอร์เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ระบบขนส่งมวลชนประเภทนี้ เป็นระบบที่แพร่หลายในเมืองใหญ่ทั่วโลก ข้อได้เปรียบของระบบนี้คือ มีความคล่องตัวและสามารถขยายระบบได้ เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการและจำนวนผู้โดยสารที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นระบบที่ได้รับการพัฒนาจากเทคโนโลยีที่มีแบบอยู่แล้ว ดังนั้นจึงมีความพร้อมทั้งทางด้านวัสดุและอุปกรณ์เครื่องกลต่าง ๆ สำหรับการขยายระบบได้ทันที การวิ่งบนทางยกระดับไม่ได้ทำให้ระบบนี้แตกต่างไปจากการวิ่งบนดินแต่อย่างใด และยังมีความปลอดภัยมากกว่าการวิ่งที่ระดับดินอีกด้วย

รถโดยสารแต่ละขบวนประกอบด้วย

1. ตู้โดยสาร 2 ตู้ รวม 6 ตอน กว้าง 37.85 เมตร ฮาว 2.65 เมตร
2. ประตูเปิดบานคู่กว้าง 1.3 เมตร อยู่ด้านละ 2 ประตู
3. รถแต่ละขบวนมีห้องคนขับทั้งสองด้าน สามารถวิ่งไปและกลับได้ในรางเดี่ยวกัน
4. ตัวรถโดยสารเป็นโลหะเคลือบสี น้ำหนักเบา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ภายในตัวรถติดตั้งระบบปรับอากาศ
6. อุปกรณ์ไฟฟ้าเป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์ ที่ควบคุมด้วยระบบไมโครคอมพิวเตอร์
7. กระแสไฟฟ้าแรงดัน 750 โวลท์

การให้บริการ ระบบขนส่งมวลชนของกรุงเทพมหานคร จะเปิดให้บริการระหว่างเวลา 06.00-24.00 ในชั่วโมงเร่งด่วนขบวนรถจะให้บริการทุก 4 นาที และในระหว่างเวลาปกติขบวนรถจะให้บริการทุก 6-10 นาที ในการจัดตารางเวลาให้บริการคำนึงถึงจำนวนและความต้องการของผู้โดยสาร ในชั่วโมงเร่งด่วนช่วงเช้าและบ่าย ในช่วงเวลาทำงาน และในช่วงเวลาออกทำงาน ระบบขนส่งมวลชนนี้สามารถรับส่งผู้โดยสารได้ไม่น้อยกว่า 10,000 คน ต่อชั่วโมงต่อทิศทาง ผู้โดยสารมีขนาดกว้าง หนึ่งขบวนรถสามารถรองรับผู้โดยสารนั่งได้ 196 คน และผู้โดยสารยืน 780 คน การกำหนดที่ตั้งของสถานีคำนึงถึงความสะดวกของผู้โดยสารและการใช้ระบบให้เกิดประโยชน์สูงสุด สถานีอยู่ห่างกันประมาณ 500-600 เมตร มีสถานีขึ้นลงตลอดทั้งสองเส้นทางรวม 26 สถานี โดยสถานีอนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ มี 11 สถานี และสายสุขุมวิทมี 15 สถานี ในแต่ละสถานีมีทางขึ้นลงได้สองข้างด้วยบันไดและหรือบันไดเลื่อนที่ต่อเชื่อมกับทางเท้าของสองข้างถนน

ในด้านการบำรุงรักษา ในการดำเนินงานจำเป็นต้องมีอาคารและบริเวณสำหรับเก็บขบวนรถซ่อมและบำรุงรักษาทั้งขบวนรถและชิ้นส่วน รวมทั้งเป็นที่เก็บอะไหล่และอุปกรณ์ต่างๆ โรงซ่อมบำรุงและโรงเก็บอะไหล่ และอุปกรณ์ต่าง ๆ นี้จะก่อสร้างในที่ดินที่กรุงเทพมหานครได้จัดเตรียมให้คือ

1. ที่ดินบริเวณสวนลุมพินีด้านมุมถนนราชดำริและถนนสารสินเพื่อใช้เป็นโรงซ่อมบำรุง สถานีใหญ่รางทดสอบ ศูนย์ควบคุม ที่จอดรถเสริมสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย และสิ่งที่เกี่ยวข้อง
2. ที่ดินในโครงการก่อสร้างถนนเลียบคลองช่องนนทรี จากถนนสุวิวงศ์ทางถนนสีลม และถนนสาทร เพื่อใช้เป็นรางทดสอบสำรอง ศูนย์ควบคุม และสิ่งที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ
3. ที่ดินในบริเวณพระโขนง เป็นโรงเก็บอะไหล่และอุปกรณ์ พร้อมสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย

การก่อสร้างราง ใช้วิธีวางบนทางยกระดับระบบคอนกรีตหล่อสำเร็จ ความยาวช่วงเสา 25-30 เมตร นำมาประกอบในสถานที่ ทำให้ได้รูปแบบเดียวกันเป็นระเบียบทางยกระดับตั้งอยู่บนคานเดี่ยวซึ่งสร้างขึ้นบนถนนที่มีอยู่แล้วตลอดเส้นทางที่กำหนดไว้ เพื่อลดผลกระทบของการก่อสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างต่อการจราจรจริงได้มีการวางแผนที่จะดำเนินการก่อสร้าง ตลอดจนการติดตั้งชิ้นส่วนหล่อสำเร็จในเวลากลางคืน เพื่อหลีกเลี่ยงการกีดขวางผิวจราจรในช่วงเวลากลางวัน

#### แนวเส้นทางของโครงการ

โครงการนี้กำหนดเส้นทางไว้ 2 สาย คือ สายอนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ (ระยะทางประมาณ 6.0 กิโลเมตร) จากบริเวณอนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ ผ่านถนนราชวิถี ถนนราชปรารภ ถนนราชดำริ ถนนสีลม ถึงบริเวณแยกถนนสุรศักดิ์

สายสุขุมวิท (ประมาณ 6.5 กิโลเมตร) จากบริเวณแยกคลองตัน ผ่านถนนสุขุมวิท ถนนเพลินจิต ถึงบริเวณแยกปทุมวัน ซึ่งเป็นทางและการให้บริการของโครงการ มีคุณลักษณะสำคัญ คือ

1. เป็นเครือข่ายประสานการเดินทางในเขตใจกลางเมืองที่มีประชากรหนาแน่นเข้าด้วยกัน และเชื่อมต่อกับสถานีหลักเพื่อเดินทางต่อด้วยรถโดยสารประจำทาง หรือระบบขนส่งมวลชนอื่นที่จะก่อสร้างขึ้นในอนาคต
2. ให้การบริการที่สะดวกสบาย รวดเร็ว ปลอดภัย ใช้เวลาแน่นอน และมีประสิทธิภาพ ในราคาที่เหมาะสม เป็นระบบที่สนับสนุนระบบขนส่งมวลชนอื่น ๆ

#### วันเปิดบริการ

ระยะที่ 1 สายอนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิตลอดเส้นทางและสายสุขุมวิท จากแยกราชประสงค์ ถึงบริเวณซอยสุขุมวิท 39 จะเปิดบริการต้นปี 2529

ระยะที่ 2 สายสุขุมวิท จากบริเวณซอยสุขุมวิท 39 ถึงแยกคลองตัน จะเปิดบริการในปลายปี 2539

สรุปการก่อสร้างทั้งหมดของโครงการจะแล้วเสร็จในปี 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อเปรียบเทียบด้านค่าใช้จ่ายของระบบรถไฟฟ้าใต้ดินกับระบบอื่นๆ

### โครงการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนใต้ดิน (MRT)

ค่าออกแบบทางด้านวิศวกรรม	1,177	ล้านบาท
ค่าก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน, สถานี และโรงซ่อม	13,205	ล้านบาท
ตัวรถ, ระบบไฟฟ้า, ระบบราง, เครื่องมือในโรงซ่อม	12,011	ล้านบาท
ระบบบันไดเลื่อน	2,892	ล้านบาท
ค่าดอกเบี้ยเงินกู้	7,518	ล้านบาท
ค่าโยกย้ายสาธารณูปโภคอื่นๆ	500	ล้านบาท
รวมค่าดำเนินการทั้งสิ้น	<u>37,303</u>	บาท

หมายเหตุ ค่าดำเนินการทั้งหมดนี้คิดจากการก่อสร้างเป็นระยะทางเท่ากับ ระยะทางและเส้นทางเดียวกับ ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงเทพมหานคร (BTSC) ตามแนวเส้นทาง สีลม-ราชดำริ 6.0 กิโลเมตร และแนว กิโลเมตร (หนังสือพิมพ์บางกอกโพสต์ ประจำวันที่ 1 มีนาคม

### โครงการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงเทพฯ (BTSC)

ค่าออกแบบทางด้านวิศวกรรม	1,500	บาท
ค่าก่อสร้างอาคารสถานี และทางวิ่ง	7,180	บาท
ระบบไฟฟ้า, เครื่องจักรกล และตัวรถไฟฟ้า	6,320	บาท
ระบบบันไดเลื่อน	1,250	บาท
ค่าดอกเบี้ยเงินกู้	3,250	บาท
ค่าโยกย้ายสาธารณูปโภค	500	บาท
รวมค่าดำเนินการทั้งสิ้น	<u>20,000</u>	บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โครงการรถไฟฟ้า SKYTRAIN

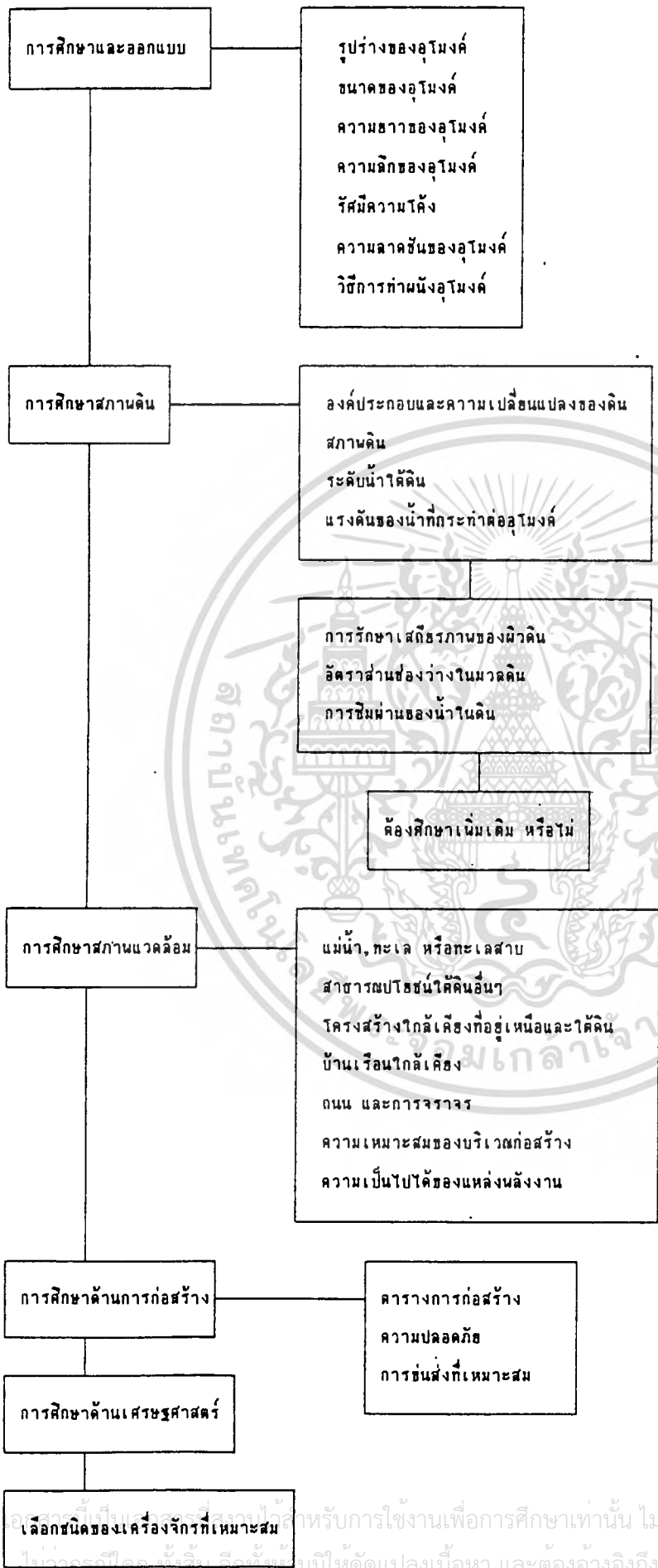
โครงการรถไฟฟ้าของบริษัท ลาวาลิน นั้นได้เสนอราคาค่าก่อสร้างเป็นจำนวนเงินทั้งหมด 82 พันล้านบาท (82,000,000,000 บาท) สำหรับระยะทางการก่อสร้างทั้งหมด 34.8 กิโลเมตร ซึ่งราคาค่าก่อสร้างดังกล่าวนี้เป็นราคาที่แสดงไว้ครั้งล่าสุดอาจ แต่อาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ ตามราคาค่าที่ดินของกรุงเทพมหานครที่มีแนวโน้มจะสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อคิดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างต่อความยาวของระยะทางหนึ่งกิโลเมตรจะได้เท่ากับ 2.356 ล้านบาท

## โครงการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงเทพฯ

โครงการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนของกลุ่มบริษัท ชนาสง ได้รับสัมปทานจากกรุงเทพมหานคร ให้สร้างระบบขนส่งมวลชนแบบยกระดับเหนือพื้นดิน โดยเสนอราคาค่าดำเนินการก่อสร้างไว้ประมาณ 1,800 ล้านบาท (1,800,000,000 บาท) สำหรับระยะทาง 14.5 กิโลเมตร เมื่อคิดค่าดำเนินการก่อสร้างต่อความยาวของระยะทางหนึ่งกิโลเมตรจะได้เท่ากับ 1.24 ล้านบาท

## ข้อเปรียบเทียบราคาค่าก่อสร้างต่อความยาวหนึ่งกิโลเมตร

โครงการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงเทพฯ (BTSC)	1.24	ล้านบาท
โครงการรถไฟฟ้า Skytrain (LAVALIN)	2.36	ล้านบาท
โครงการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนใต้ดิน (MRT)	2.57	ล้านบาท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข้อพิจารณาในการคัดเลือกเครื่องจักรสำหรับการขุดอุโมงค์ใต้ดิน

1. ความเหมาะสมกับสภาพดิน
2. การรักษาสภาพผิวเจาะ
3. การบำรุงรักษา
4. รัศมีความโค้งในการก่อสร้าง
5. ความสามารถในการปรับเปลี่ยนเป็นระบบอื่นเมื่อสภาพดินเปลี่ยนไป
6. ระบบการลำเลียงดินออก
7. ความชำนาญของบุคคลากรที่จะใช้เครื่องจักร
8. ความปลอดภัยในการทำงาน
9. พื้นที่สำหรับการติดตั้งเครื่องจักร
10. ช่วงเวลาการผลิตเครื่องจักร
11. ราคาของเครื่องจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางการเปรียบเทียบระหว่าง

Slurry shield กับ Earth Pressure Balanced shield

ชนิดเครื่องจักร	Slurry shield	EPBS
สภาพดินที่เหมาะสม	ดินเหนียว, ดินทราย	ดินเหนียว
การรักษาสภาพผิวเจาะ	แผ่นงานหมุน และ เบนโทไนท์	แผ่นงานหมุนและดินที่ขุดออกมา
การบำรุงรักษา	ยาก	ยาก
รัศมีความโค้ง	น้อย	น้อย
การปรับเปลี่ยน	ยาก	ยาก
การล่าเลียงดิน	ใช้ปัม	ใช้ระบบสายพานและรถบรรทุก
ความชำนาญ	จำเป็น	จำเป็น
ความปลอดภัย	ทำงานที่ความดันบรรยากาศ	ทำงานที่ความดันบรรยากาศ
พื้นที่สำหรับเครื่องจักร	500-1000 ตร.ม.	450- 750 ตร.ม.
เวลาการผลิต	5.5 เดือนหรือมากกว่า	5.5 เดือนหรือมากกว่า
ราคาเครื่องจักร	6,500-7,000 \$ ต่อตัน	6,500-7,000 \$ต่อตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

1. ชั้นดินของกรุงเทพฯแบ่งออกเป็น 5 ชั้นหลักๆได้ดังนี้คือ

1. ชั้นดินเหนียวอ่อน
2. ชั้นดินเหนียวแข็ง
3. ชั้นทรายชั้นที่หนึ่ง
4. ชั้นดินเหนียวแข็งมาก
5. ชั้นทรายชั้นที่สอง

2. บริเวณกรุงเทพฯมีปัญหาเรื่องการทรุดตัวของดินในอัตราที่สูงอยู่แล้วซึ่งมีผลมาจากการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ในปริมาณมากแต่ปัญหาการทรุดตัวดังกล่าวจะไม่มีผลกระทบต่อโครงสร้างอุโมงค์แต่อย่างใด ถ้าเป็นการทรุดตัวอย่างสม่ำเสมอ และพร้อมเพรียงกันในแนวราบ แต่ถ้าเกิดการทรุดตัวแบบไม่ปกติก็สามารถแก้ไขได้ในขั้นตอนการออกแบบโครงสร้าง

3. กรุงเทพมหานครมักจะประสบกับปัญหาน้ำท่วมอยู่เป็นประจำ ถึงแม้ว่าจะมีการแก้ไขในหลายๆทางแล้วก็ตาม ก็ยังถือเป็นปัญหาสำคัญของกรุงเทพฯอยู่ สำหรับการก่อสร้างอุโมงค์นั้นปัญหาเรื่องน้ำท่วมไม่ใช่ปัญหาใหญ่ สามารถแก้ไขได้โดยการใช้วัสดุกันซึมและการก่อสร้างโครงสร้างบางอย่างให้สูงกว่าระดับน้ำที่เคยท่วมตามสถิติที่บันทึกไว้

4. จากการวิเคราะห์สภาพทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินกรุงเทพฯแล้ว สามารถสรุปได้ว่าดินกรุงเทพฯใช้ทำการก่อสร้างได้อย่างแน่นอนและมีความเหมาะสมเกือบทุกชั้นดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ชั้นดินเหนียวแข็ง (The Stiff clay layer) และ ชั้นทรายชั้นที่หนึ่ง (The First sand layer) อีกทั้งยังเคยทำการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินในดินชั้นดังกล่าวมาแล้ว จึงเป็นเหตุผลที่ชาวฮินฮันฮั้วสรุปนี้ได้เป็นอย่างดี

5. ปัญหาที่น้ำใต้ดินสำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินในกรุงเทพฯ นั้นจะไม่ใช่เป็นอุปสรรค และสร้างความยุ่งยากให้กับ การก่อสร้างมากนัก ถ้ามีการเลือกวิธีการขุดเจาะและเครื่องจักรที่เหมาะสม

6. วิธีการขุดเจาะอุโมงค์ใต้ดินที่เหมาะสมกับดินกรุงเทพฯ คือ วิธีที่ใช้เครื่องเจาะแบบ Tunnel Boring machine (TBM) ที่มีองค์ประกอบต่างๆ ดังนี้คือ มีแผ่นกำบังเป็นรูปทรงกระบอกกลวงที่เรียกว่า shield มีระบบรักษาเสถียรภาพ หรือป้องกันการพังทลายของผิวเจาะอันเนื่องมาจาก แรงดันของน้ำใต้ดิน ซึ่งในปัจจุบันระบบการรักษาเสถียรภาพของผิวเจาะที่เหมาะสมกับสภาพดินกรุงเทพฯ มี 2 ระบบคือ ระบบ Slurry shield และ ระบบ Earth Pressure Balance

7. ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้เมื่อมีการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินคือ

7.1 ความไม่พร้อมทางด้านบุคคลากร ไม่ว่าจะเป็น คนงาน ช่างเทคนิค หรือ นักกระทั่งวิศวกร ซึ่งมีโอกาสสัมผัสเรื่องนี้บ่อยมาก ซึ่งอาจทำให้การตัดสินใจหรือการทำงาน บางอย่างผิดพลาดได้

7.2 การรบกวนผิวการจราจรขณะทำการก่อสร้าง เป็นปัญหาที่ต้องเกิดขึ้นอย่างแน่นอนไม่ว่าจะเป็นการก่อสร้างระบบใต้ดินหรือเหนือดินก็ตาม แต่สำหรับการก่อสร้างระบบใต้ดินนั้นจะมีผลกระทบน้อยกว่า เพราะการก่อสร้างส่วนใหญ่กว่า 80% เป็นการก่อสร้างที่อยู่ใต้ดิน จะมีเฉพาะบริเวณที่ก่อสร้างสถานีและทางขึ้นลงสถานีเท่านั้นที่ต้องก่อสร้างบนผิวดินด้วย

7.3 ข้อจำกัดทางด้านสถานที่ก่อสร้างในบางพื้นที่ เช่นบางพื้นที่อาจมีพื้นที่ในการก่อสร้างจำกัดซึ่งอาจเกิดจาก แนวเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ของอาคารใกล้เคียง เป็นต้น

8. การจะเลือกวิธีการใด หรือจะระบุว่าวิธีการใดเป็นวิธีที่ดีที่สุดหรือเหมาะสมที่สุดนั้น คงจะบอกได้เมื่อมีการศึกษาข้อมูลด้านอื่นๆ ประกอบมีการศึกษาที่ละเอียดถี่ถ้วน และมีการเก็บข้อมูลให้ได้ตัวอย่างมากกว่านี้
9. สภาพของชั้นดินมีการเปลี่ยนแปลงทุกๆ ระยะไม่เกิน 100 ม. และความหนาของชั้นดินก็เปลี่ยนแปลงไม่สม่ำเสมอเช่นกัน ดังนั้นจึงควรมีการเจาะสำรวจเพื่อเก็บข้อมูลดินให้มีระยะห่างของหลุมเจาะที่พอสมควร หรือให้มีความถี่มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพราะซึ่งมีความถี่มากเท่าใดก็ย่อมแสดงถึงความถูกต้องแม่นยำในการทำงานมากขึ้นเท่านั้น
10. การนำเอาระบบรถไฟฟ้ามวลขนส่งใต้ดินมาใช้ในกรุงเทพมหานครนั้น เมื่อพิจารณาด้านการก่อสร้าง ด้านประสิทธิภาพการให้บริการ ด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งไม่ว่าจะเป็นประชากร ทั้งสุขภาพ การจราจร และอาชญากรรมแล้ว กล่าวได้ว่าเป็นระบบที่มีความเหมาะสมมากในปัจจุบันและในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

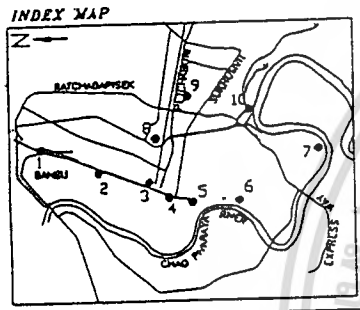
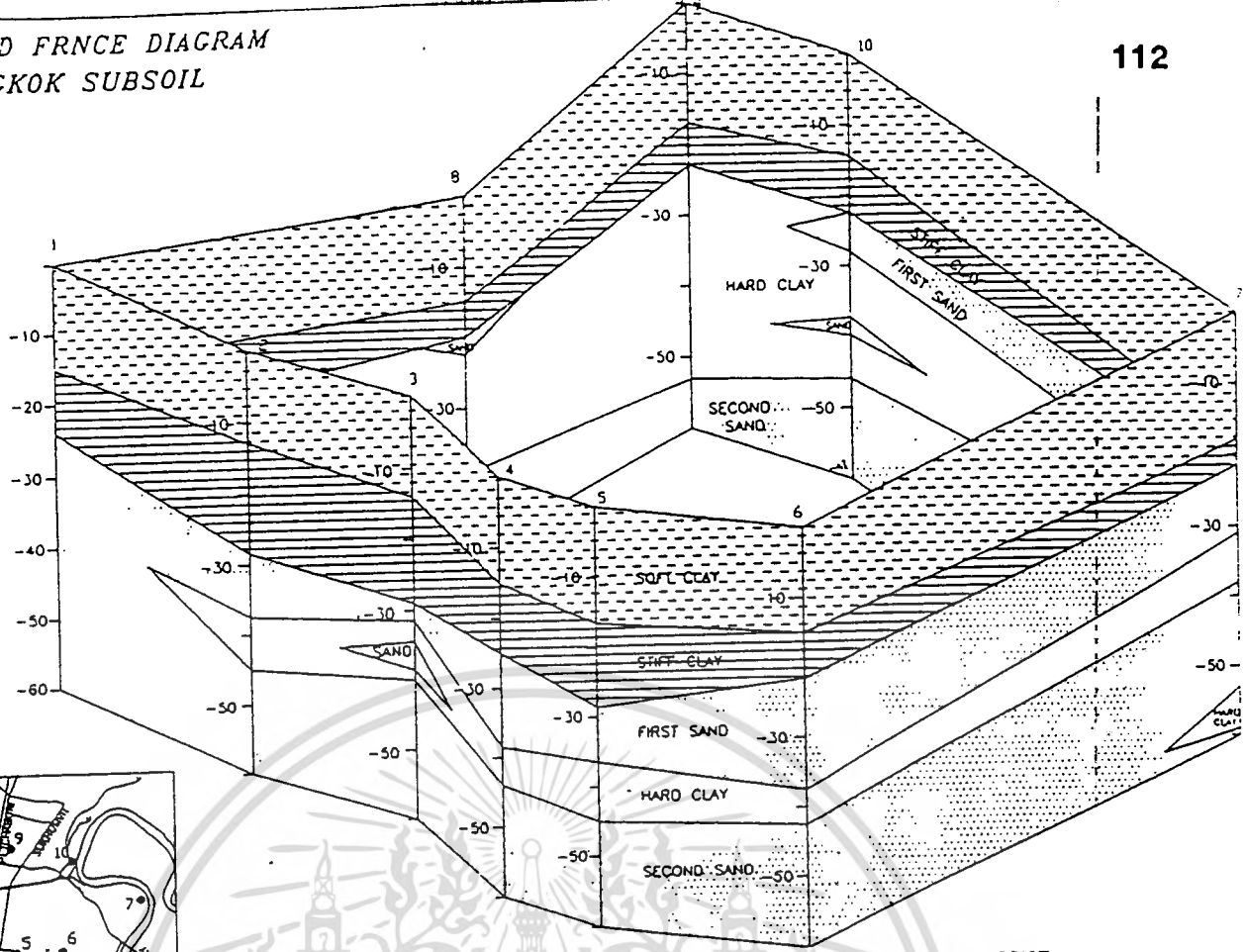
## บทอ้างอิง

1. M. LE GRAND , TUNNELLING IN SOFT AND BEARING  
GROUNDS ,CENTRE D ETUDES DES TUNNEL, BRON.
2. HAVERS & STUBBS , HANDBOOK OF HEAVY CONSTRUCTION
3. JOHN A.FRANKLIN & MAURICE B.DUSSEAULT, ROCK ENGINEERING
4. LAMBE & WHITMAN , SOIL MECHANICS
5. JOSEPH E.BOWLES, FOUNDATION ANALYSIS AND DESIGN,1988
6. HANS E. WINTERKORN AND HSAI YANG-FRANG, FOUNDATION  
ENGINEERING HANDBOOK
7. PROF.DR.FELIX E.H. HASER, เอกสารแนะนำโครงการรถไฟฟ้า  
ขนส่งมวลชนใต้ดินสำหรับกรุงเทพฯ
8. เอกสารการรายงานสภาพดินของบริษัท STS
9. วัฒนา ชรรมาภล และวินิจ ช่อวิเชียร, SOIL MECHANICS, 2532

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



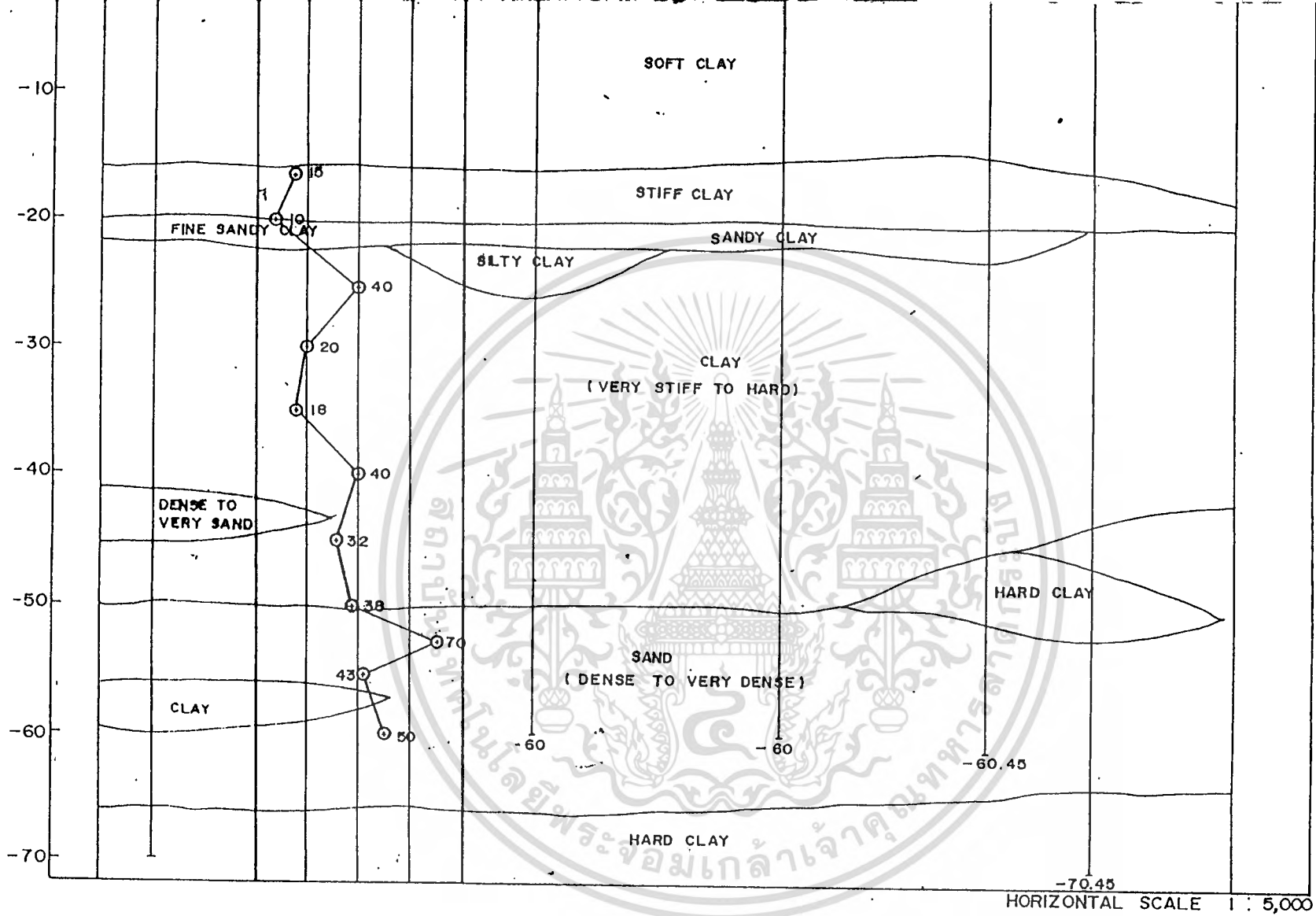
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



SCALE  
VERTICAL SCALE 1:1100  
HORIZONTAL SCALE 1:4400.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



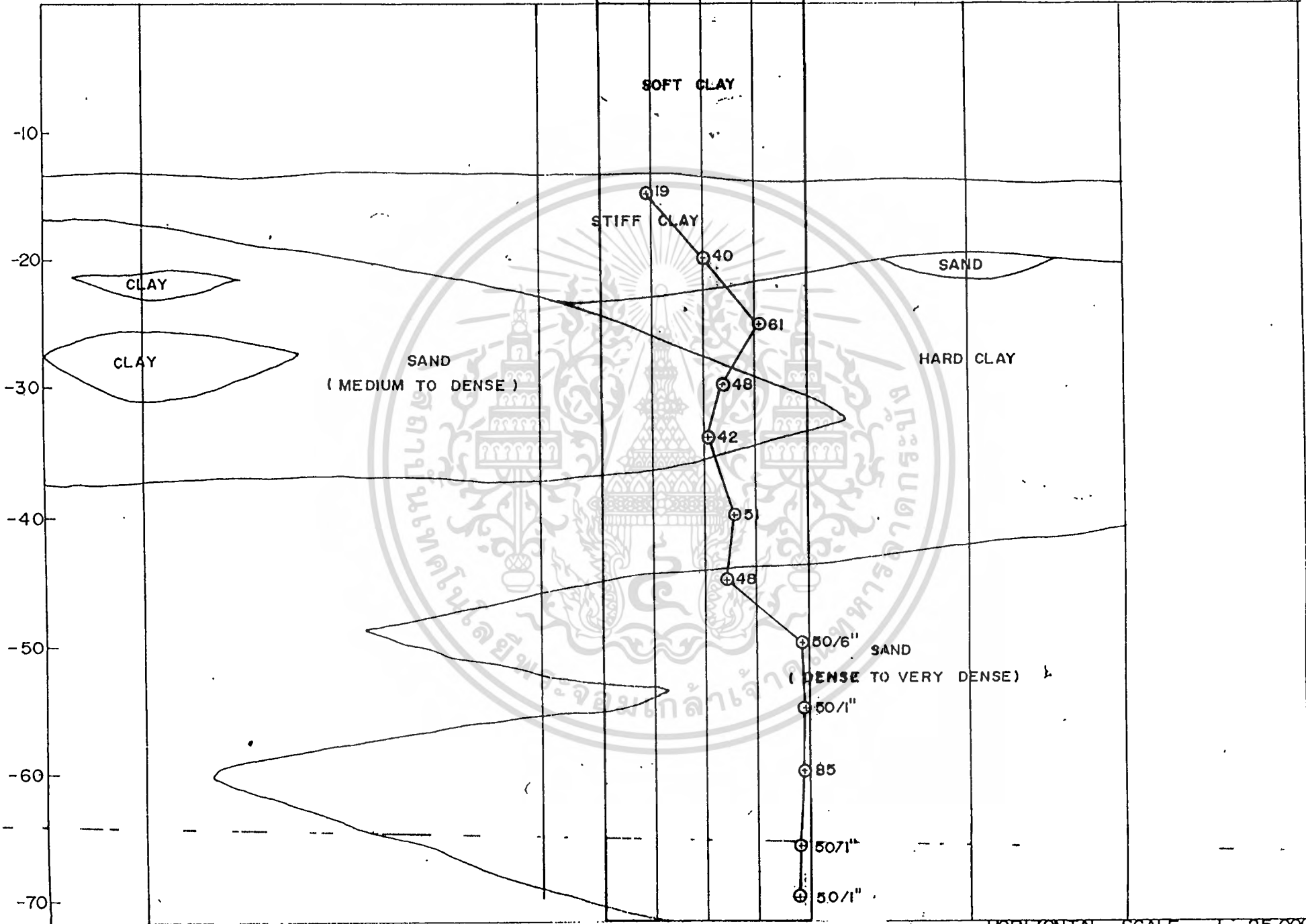
SUBSOIL PROFILE ALONG D - D

BH-30

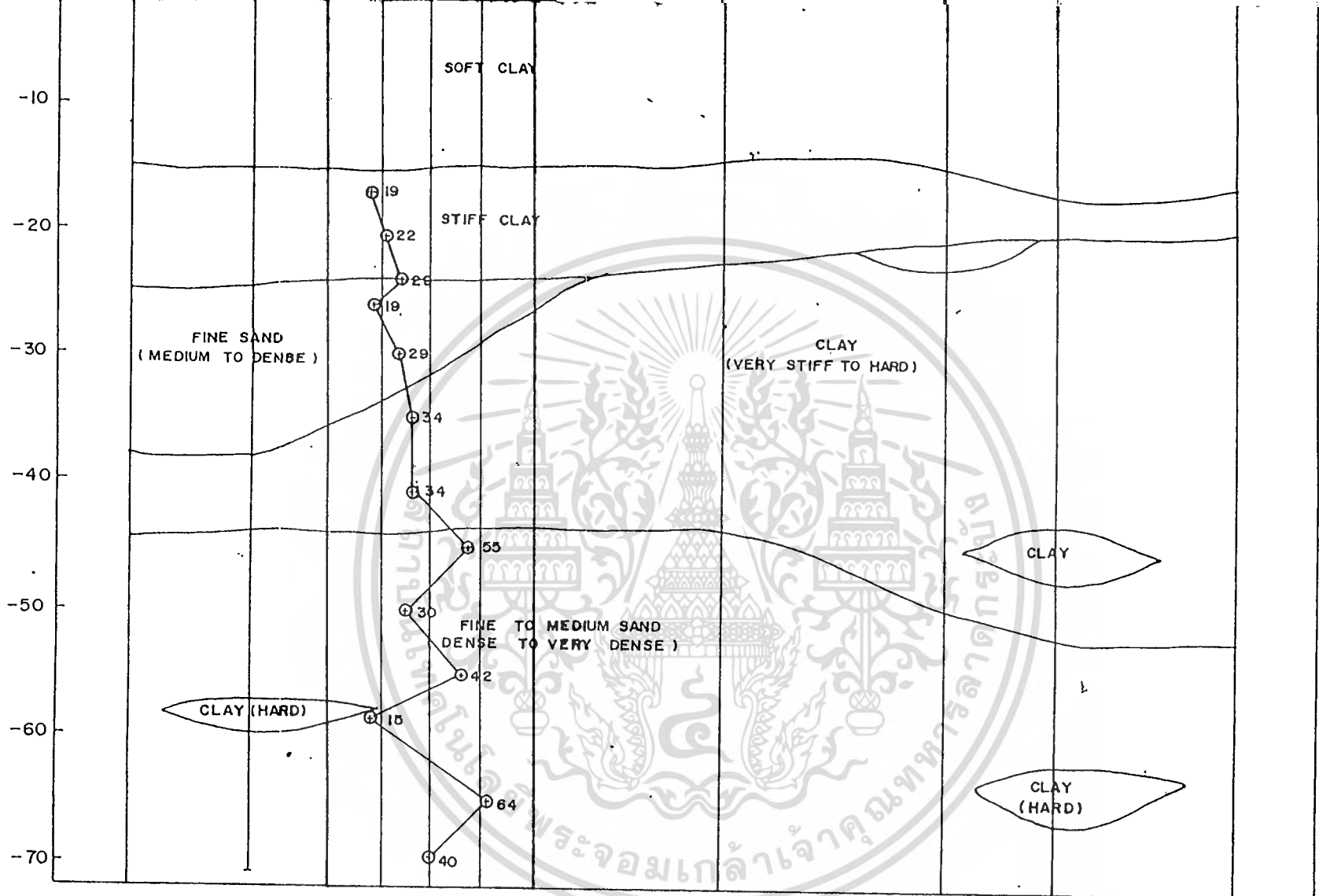
BH-31

20 40 60

BH-32

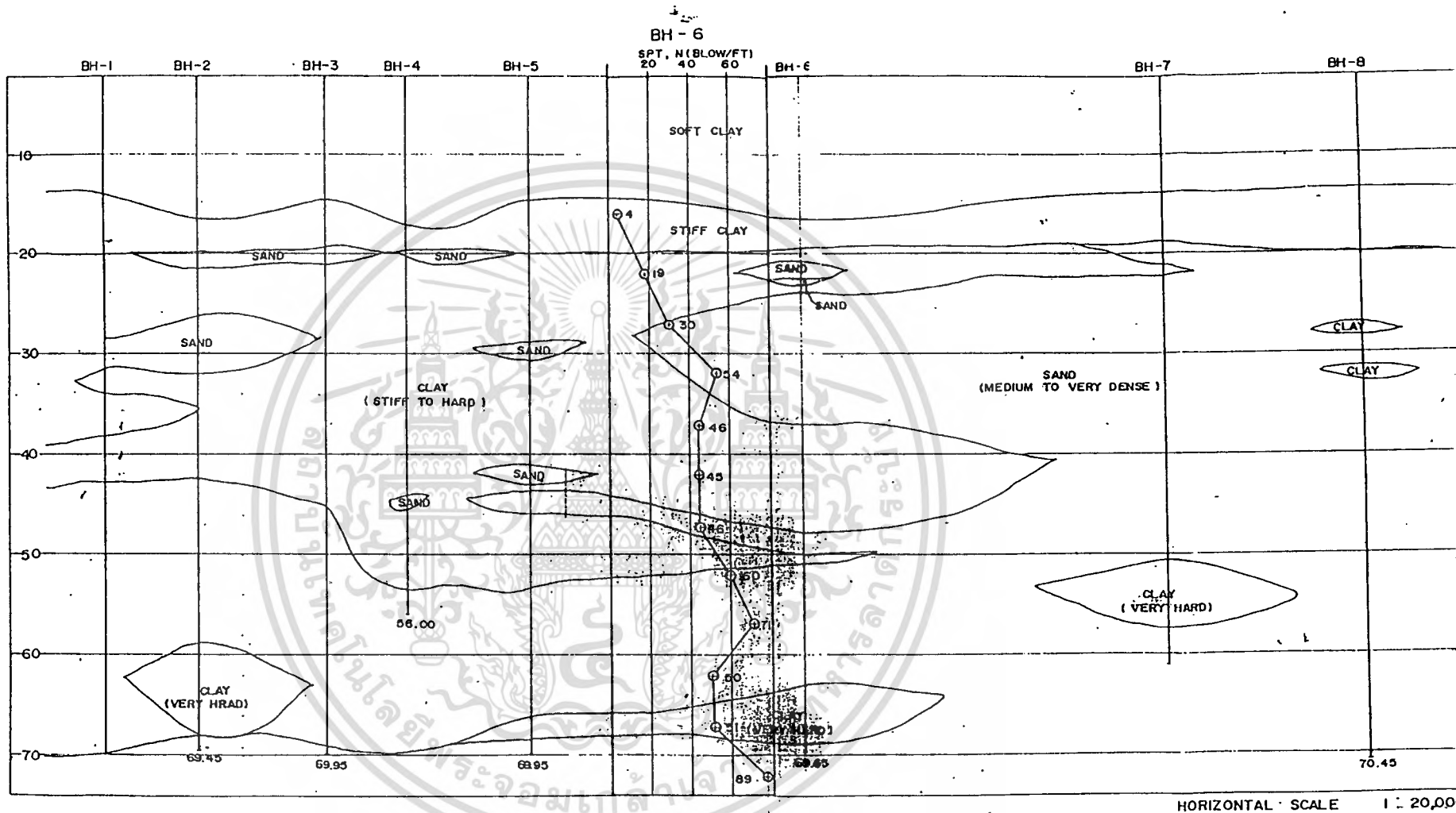


HORIZONTAL SCALE 1: 25,000

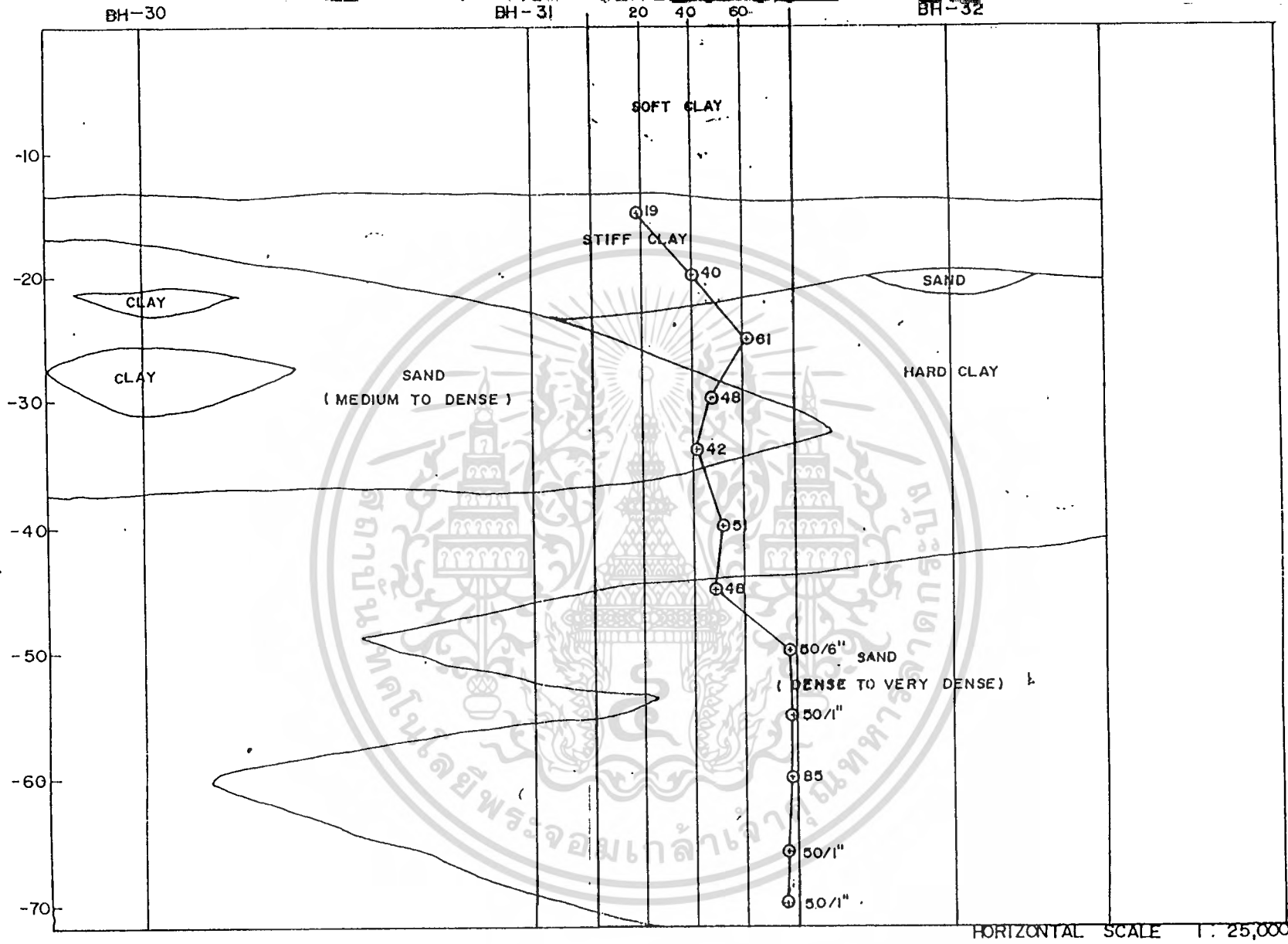


HORIZONTAL SCALE 1 : 20,000

SUBSOIL PROFILE ALONG B - B



SUBSOIL PROFILE ALONG A - A





GEOTECHNICAL PROPERTIES TESTING: INDEX SETTLEMENT, STRENGTH CORRELATIONS

U.S.		British (B.S.)		German DIN		French	
Sieve no.	mm	Sieve no.	mm	Sieve no.	mm	Sieve no.	mm
4	4.76	—	—	—	—	—	—
10*	2.00	8*	2.057	—	—	34*	2.000
20	0.841	16	1.003	—	—	31	1.000
30	0.595	30	0.500	500	0.500	28	0.500
		36†	0.422	400†	0.400	27†	0.400
40†	0.420	—	—	—	—	—	—
50	0.297	52	0.295	—	—	—	—
60	0.250	60	0.251	250	0.250	25	0.250
80	0.177	85	0.178	160	0.160	23	0.160
100	0.149	100	0.152	125	0.125	22	0.125
200	0.074	200	0.076	80	0.080	20	0.080
270	0.053	300	0.053	50	0.050	18	0.050

\* Breakpoint between sand and gravel.

† Use for Atterberg limits.

(a)

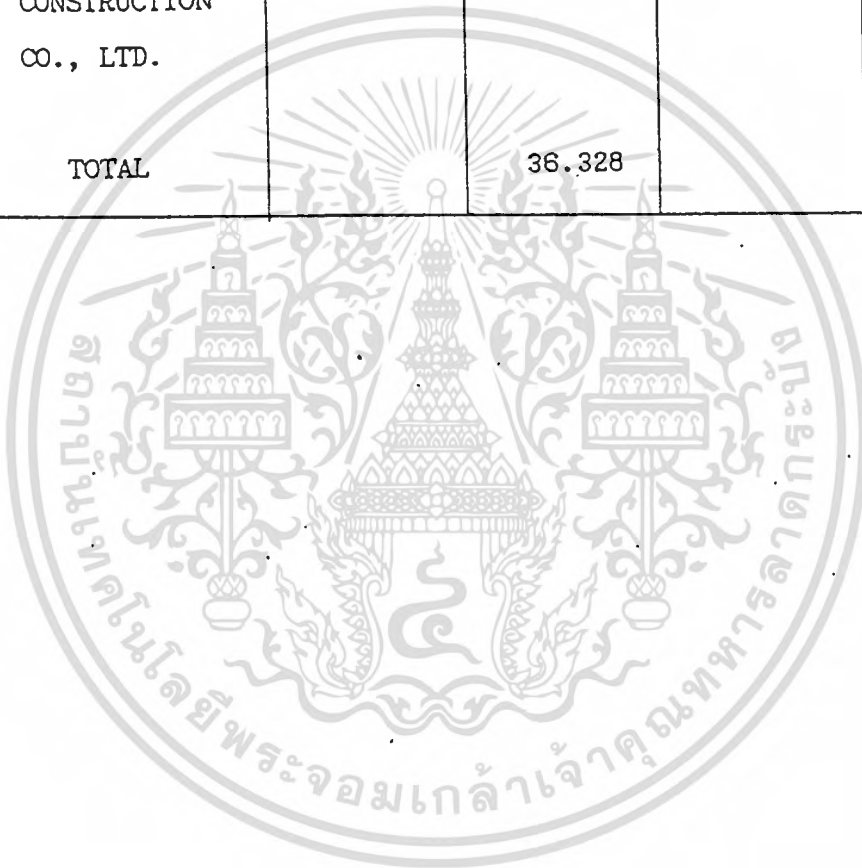
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดงานก่อสร้างอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง

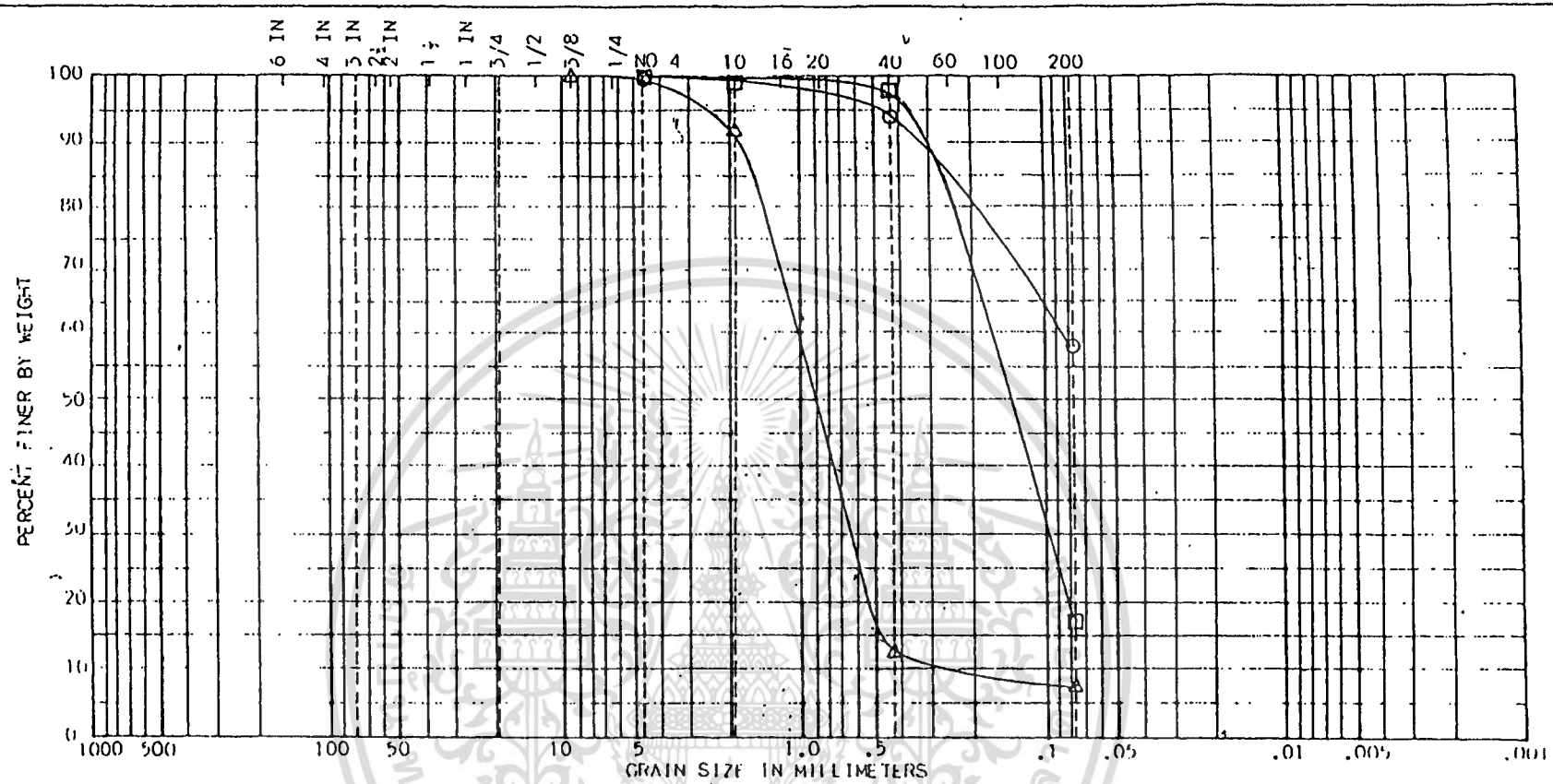
สัญญา	ผู้รับจ้าง	ขนาดอุโมงค์ φ (มม.)	ความยาว (กม.)	ราคา (บาท)	ราคา/เมตร (บาท)
<u>Stage I-Phase I ปี 2518-2522</u>					
G-TN-2	NISHIMATSU CONSTRUCTION CO., LTD.	3,400	8.45	588,000,000	70,000
G-TN-1A	NISHIMATSU CONSTRUCTION CO., LTD.	3,400	1.77	134,000,000	76,000
G-TN-3-R	ITALIAN-THAI SHERIDAN J/V	2,800	7.50	417,000,000	56,000
G-TN-5A-R	OHBAYASHI GUMI LTD.	2,500	2.40	245,000,000	102,000
G-TN-4A-R	OHBAYASHI GUMI LTD.	2,000	0.688	103,000,000	150,000
G-TN-4B-R	NISHIMATSU CONSTRUCTION CO., LTD.	2,000	3.68	194,000,000	53,000
<u>Stage I-Phase II ปี 2524-2526</u>					
G-TN-1B	ITALIAN-THAI SHERIDAN J/V	2,000	2.14	260,000,000	121,000
G-TN-5B	OHBAYASHI GUMI LTD.	2,500	4.84	276,000,000	57,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญา	ผู้รับจ้าง	ขนาดอุโมงค์ φ (มม.)	ความยาว (กม.)	ราคา (บาท)	ราคา/เมตร (บาท)
G-TN-5C	NISHIMATSU CONSTRUCTION CO., LTD.	2,500	2.67	314,000,000	118,000
Stage II-Phase 1B ปี 2533-2534					
G-TN-6	NISHIMATSU CONSTRUCTION CO., LTD.	2,000	2.19	182,000,000	83,000
	TOTAL		36.328		



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

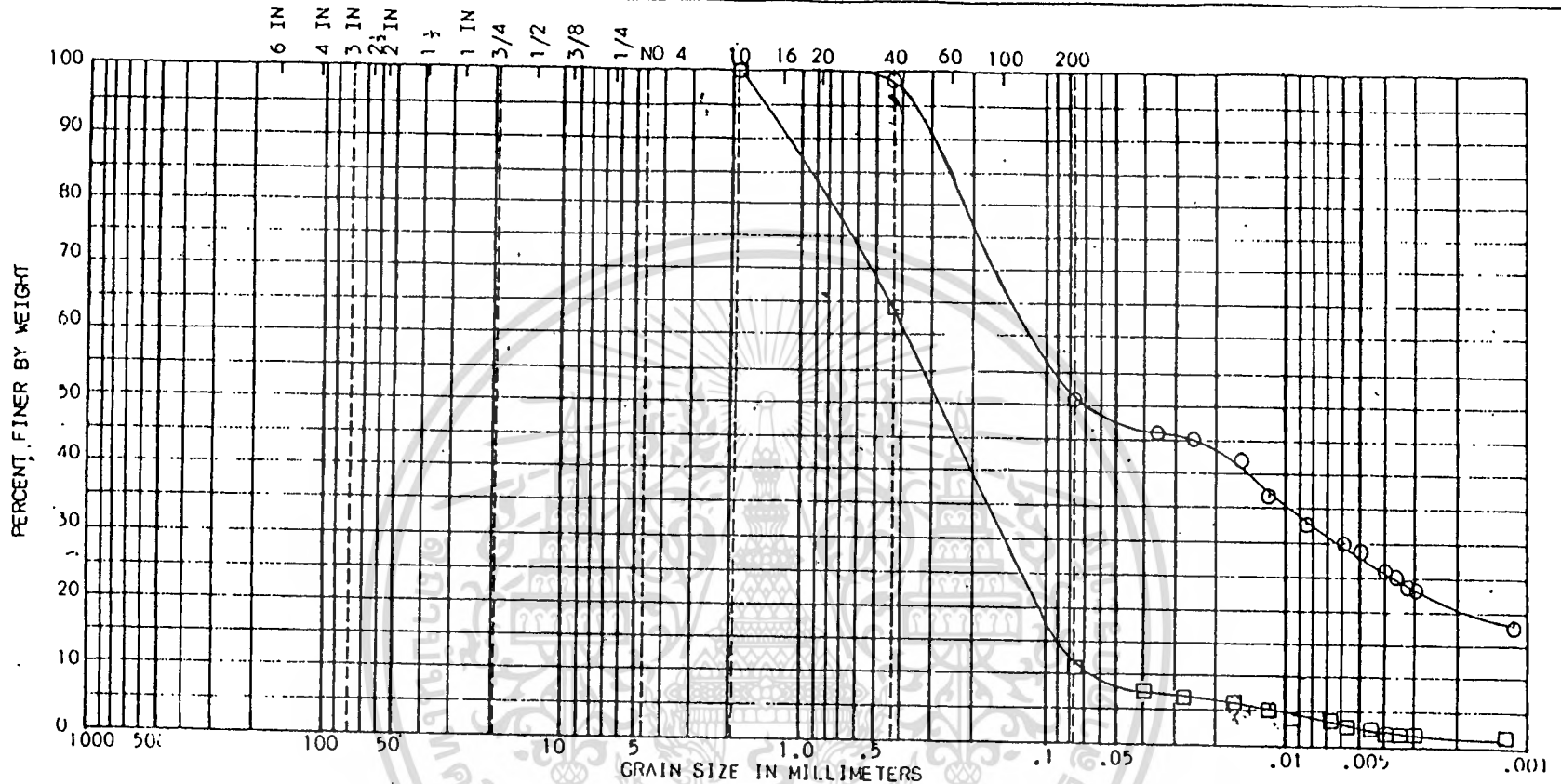


CUMULUS	GRAVEL		SAND			SILT OR CLAY
	COARSE	FINE	COARSE	MEDIUM	FINE	

DEPTH NO.	DEPTH, M.	CLASSIFICATION	NAT	W	LL	PI	PI	REMARKS	PROJECT
ST-14	○	21.00-21.50	CL					BH-2# 23	ELEVATED TRANSPORT SYSTEM
SS-26	□	34.00-34.45	SM						MATERIAL:
SS-33	△	44.50-44.95	SM-SP						SOURCE BANGKOK THAILAND
GRADATION CURVES									DATE 04/06/92

SHEET (1)

STS ENGINEERING CONSULTANTS CO., LTD.

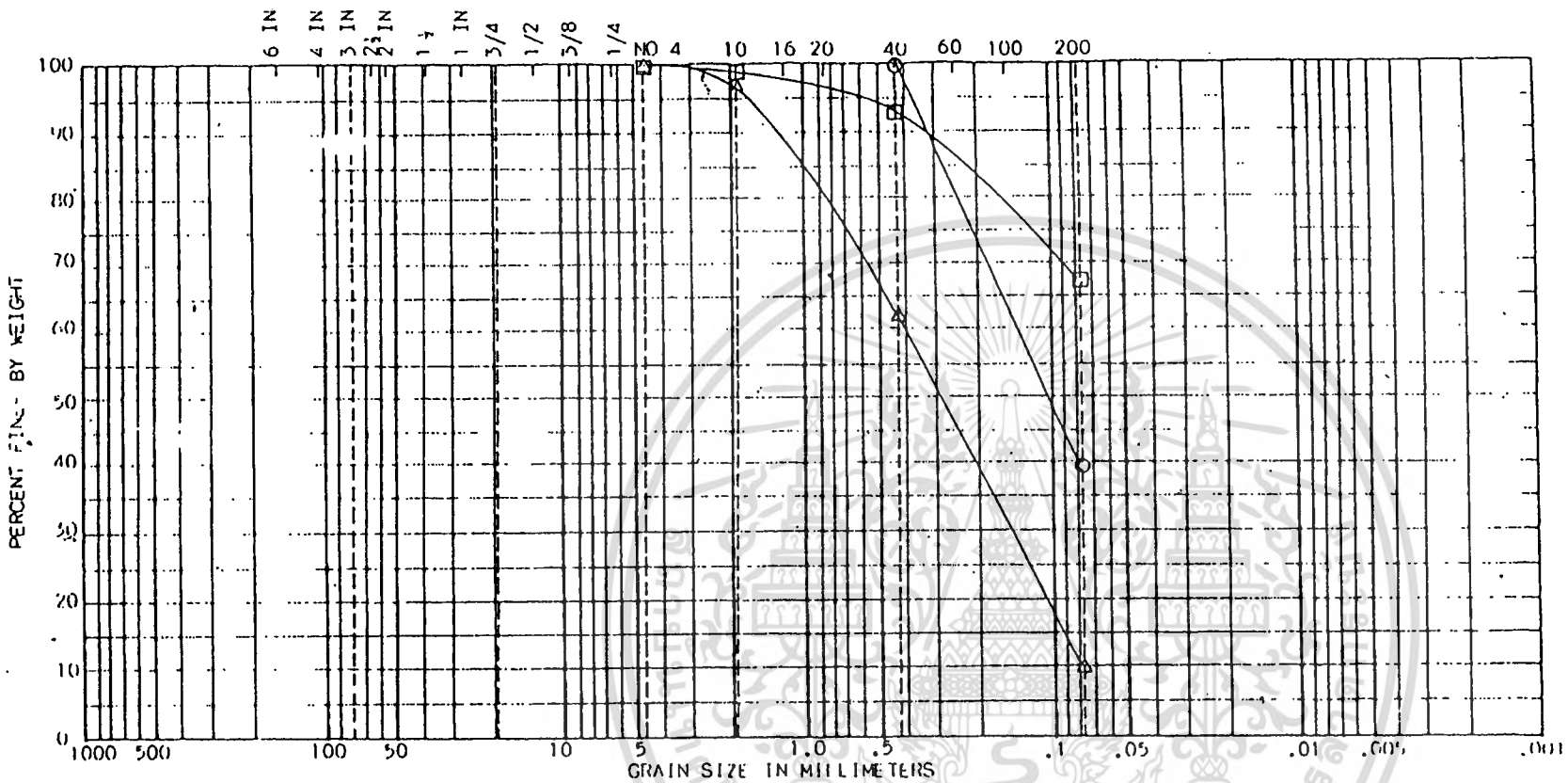


COBBLES	GRAVEL		SAND			SILT OR CLAY
	COARSE	FINE	COARSE	MEDIUM	FINE	

SAMPLE NO.	DEPTH (m)	CLASSIFICATION	NAT W	LL	PL	PI	REMARKS	PROJECT
ST-21	29.00-29.50	CL/SM	25.8				BH- <del>22</del> 23	ELEVATED TRANSPORT SYSTEM
SS-43	59.50-59.95	SM=SP						MATERIAL:
								SOURCE BANGKOK THAILAND
GRADATION CURVES								DATE 25/05/92

SHEET OF

STS ENGINEERING CONSULTANTS CO., LTD.



GRAVELS	GRAVEL		SAND			SILT OR CLAY
	COARSE	FINE	COARSE	MEDIUM	FINE	

DEPTH, M	CLASSIFICATION	NAT	W	LL	PL	PI	REMARKS	PROJECT	ELEVATED TRANSPORT SYSTEM
18.40-18.85	SM						BH: # 24	MATERIAL:	
26.00-26.45	SM/CH							SOURCE	BANGKOK THAILAND
46.00-46.45	SM-SP							DATE	04/06/92

GRADATION CURVES

SHEET 01