



ความปลอดภัยในโครงการ
โครงสร้างพื้นฐานด้านอุโมงค์

รศ.ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์



ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก (GERD)

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Drill and Blast

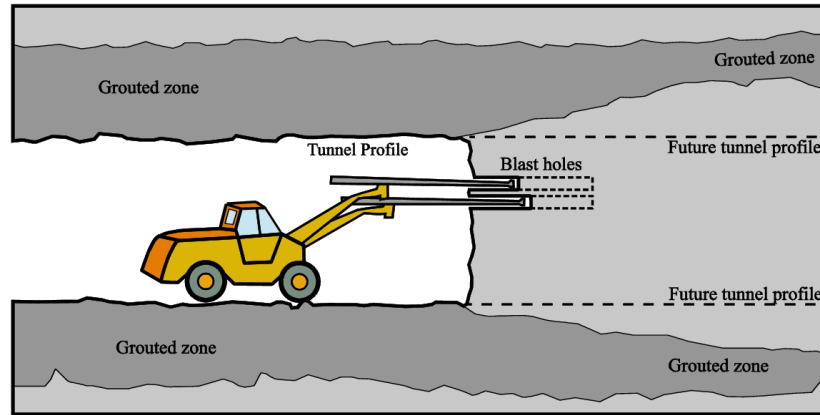
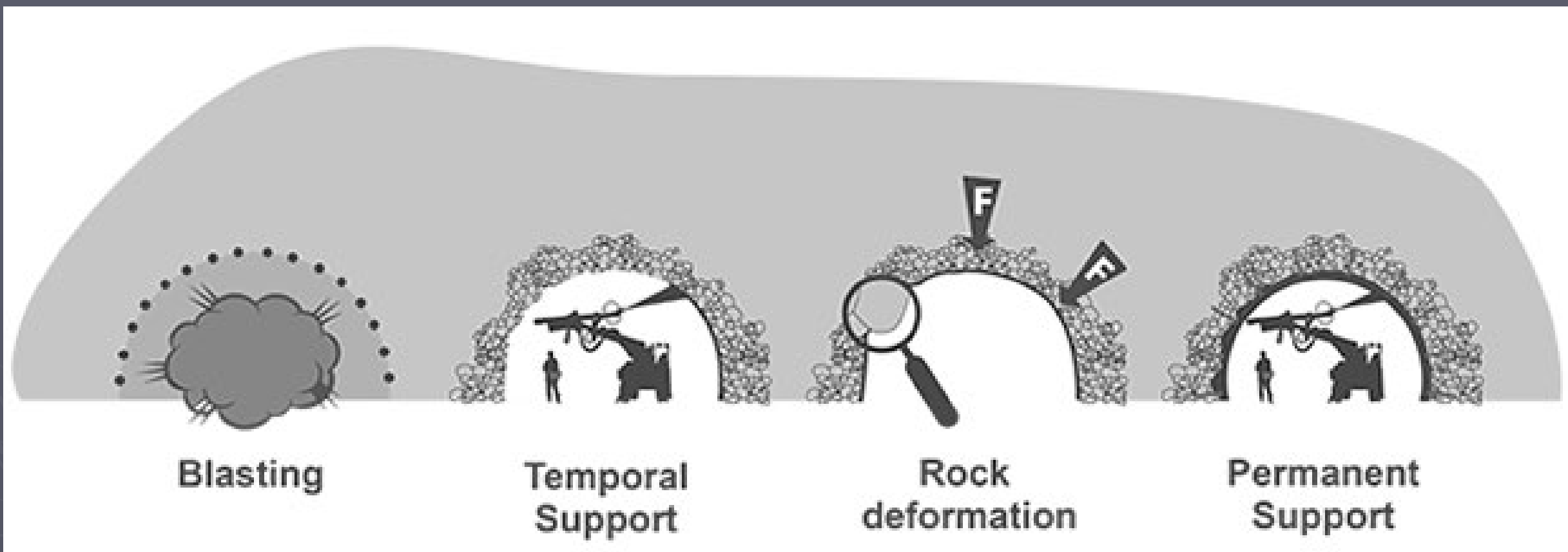


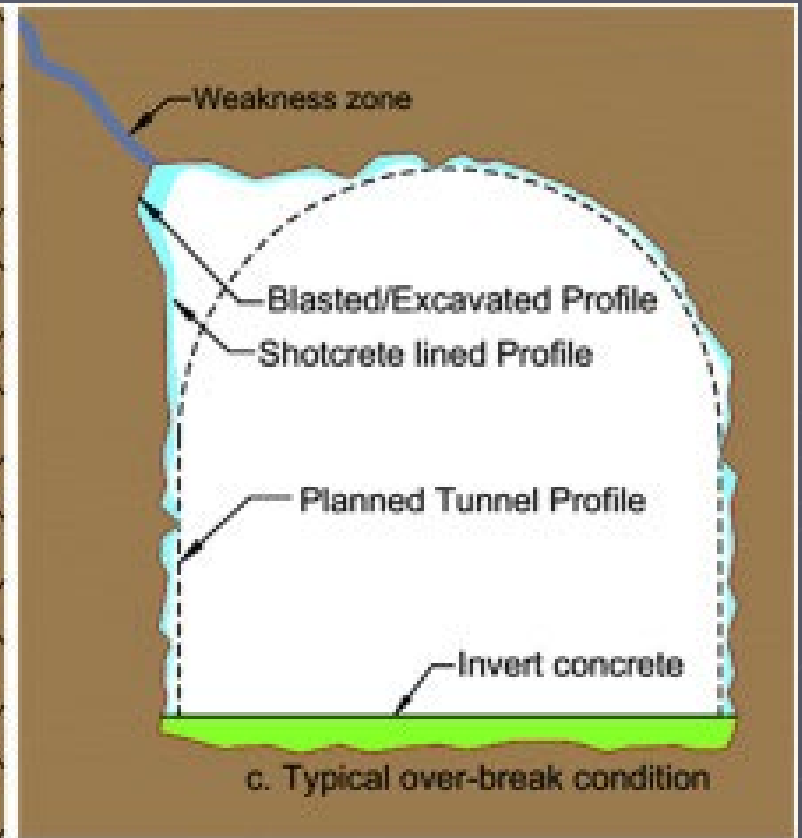
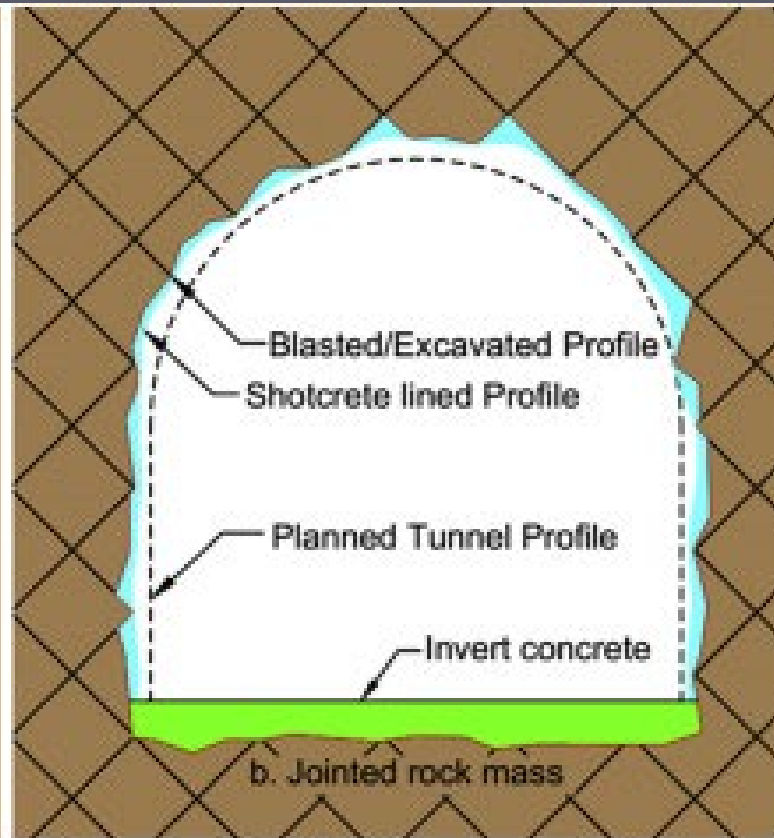
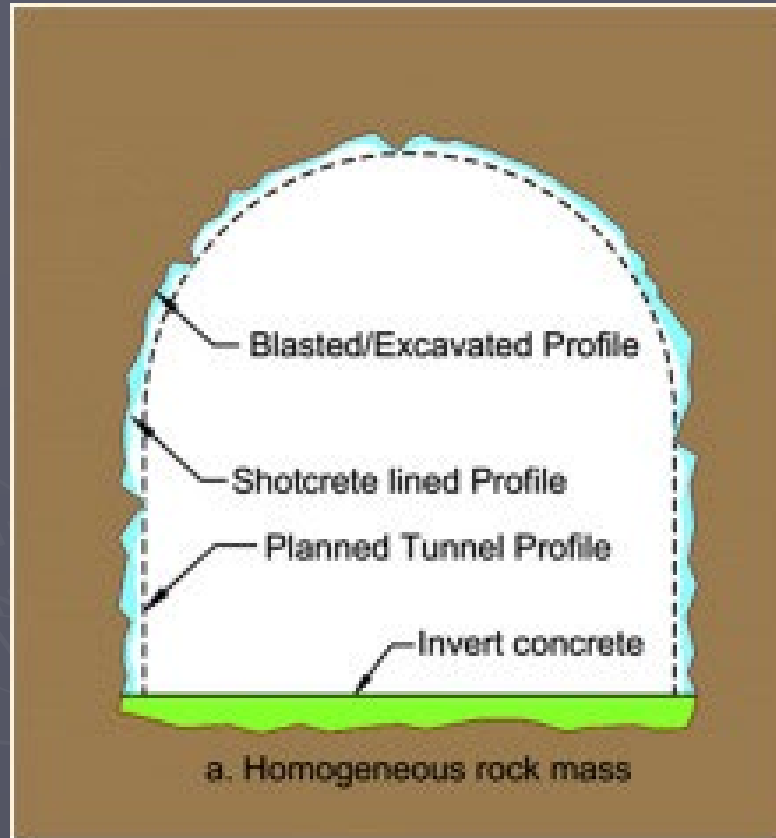
Figure 4 Sketch showing the drilling of blast holes after the completion of



Tunnelling Boring Machine (TBM)



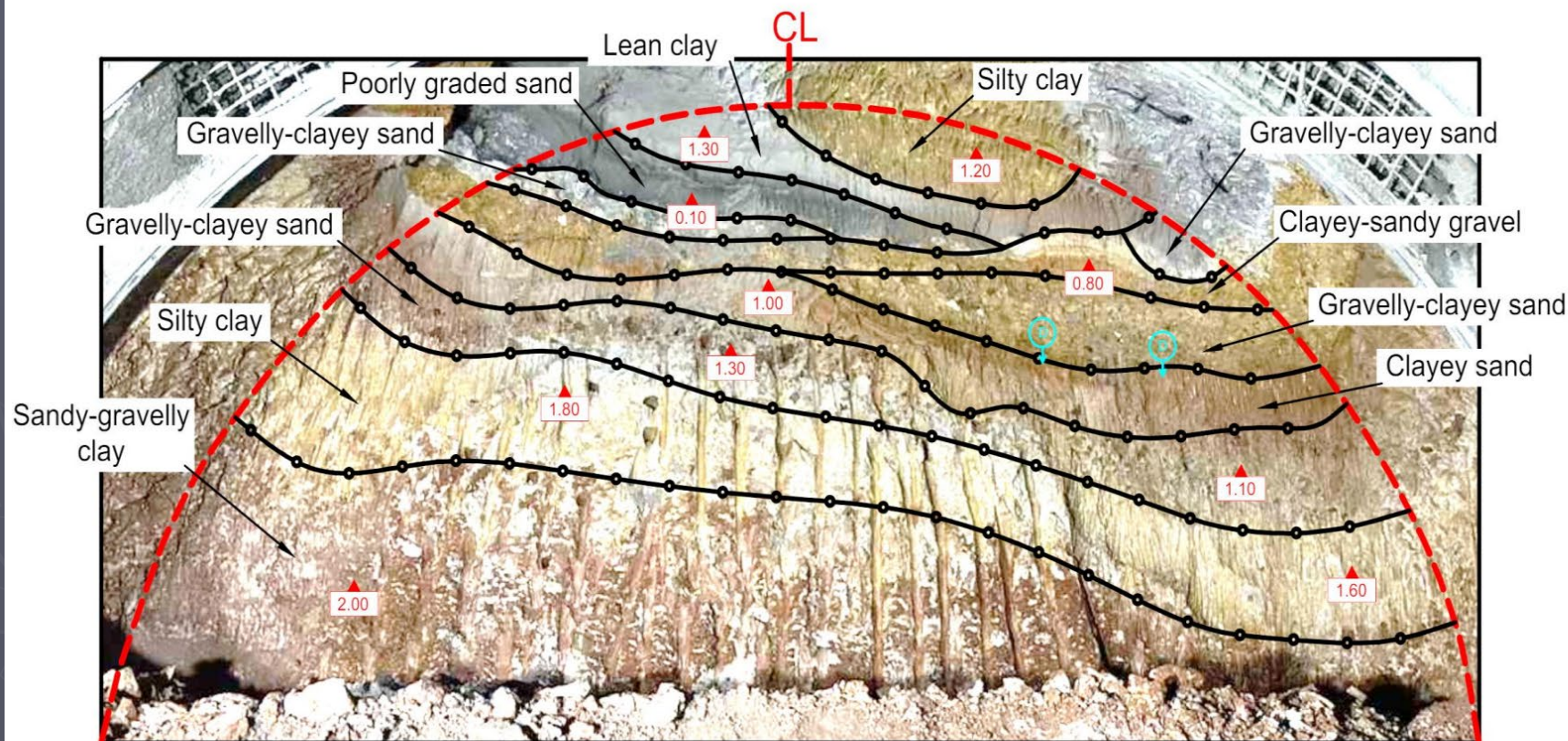




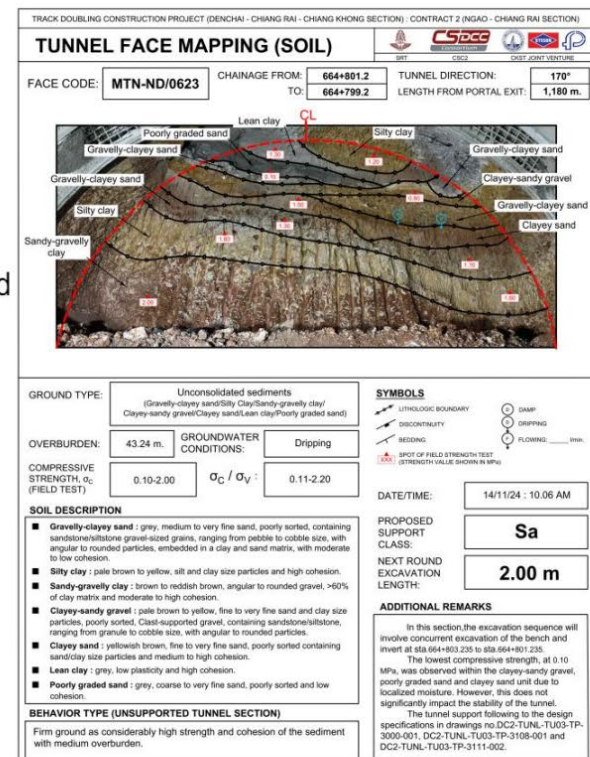


Sequence of Construction : ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์

- ❑ **Tunnel Face Mapping** : การประเมินสภาพทางธรณีวิทยาของหน้าอุโมงค์ (Tunnel Face) ตรวจวัดกำลังของดินและการจำแนกประเภทของดิน รอยเลื่อน ความชื้นหรือปริมาณการไหลของน้ำที่พบ เพื่อนำมาพิจารณาเลือกประเภทของการค้ำยัน รวมถึงระยะการขุด ให้เหมาะสมและปลอดภัย (โดยนักธรณีวิทยา : Geologist)



- ❑ สภาพทางธรณีวิทยา ลักษณะเป็นดิน



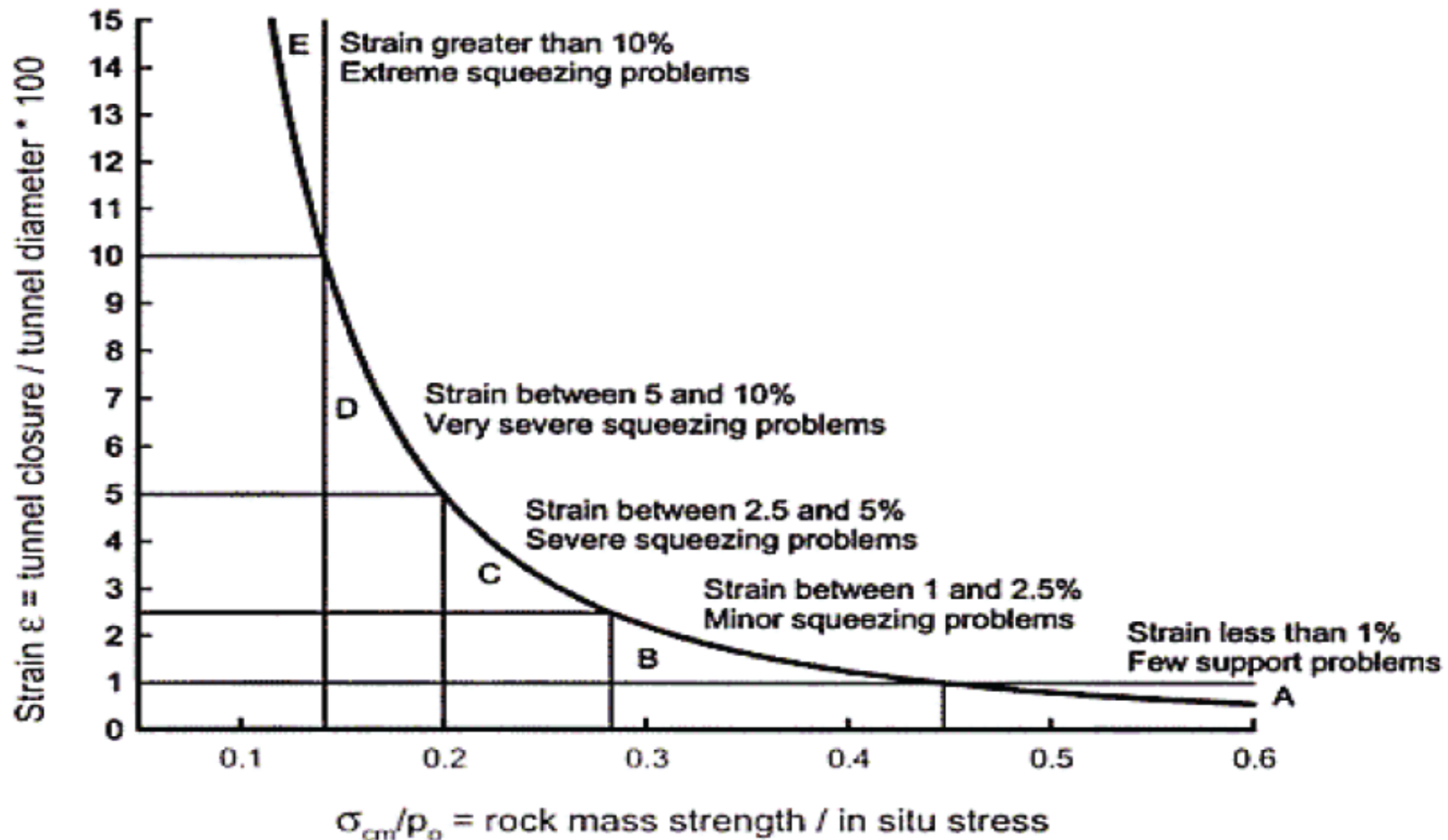
Pocket Penetrometer : เครื่องมือวัดกำลังของดิน

TUNNEL FACE GEOLOGICAL MAPPING						
Date: 20-8-2014			Time:			
Site: North Portal			Chainage: 15+415 - 15+680			
Rock Type: Schist			Rock Support Class:			
Round Length: 265m			Phot No.			
Weathering:						
	Fresh	Slightly	Moderately	Highly ✓	Completely	Residual Soil
Rock Strength:						
	Very Strong	Strong	Med. Strong	Weak ✓	V. Weak ✓	Ext. Weak
Rock Quality						
	V. Good	Good	Fair	Poor ✓	V. Poor ✓	Ext. Poor
Water Condition:						
	Dry	Damp	Wet ✓	Dripping	Seepage	Flowing
Discontinuity Characteristics						
Set No.	Three joint set + Random					
Type	Schist					
Strike	Perpendicular to Tunnel Axis					
Dip	Drive against the Dip between 45 - 90 degree					
Persistence (m)	3-10 m					
Aperture (mm)	0.1-1mm					
Spacing (mm)	> 60 mm					
Filling	Soft filling <5mm					
Weathering	Highly Weather					
Rock Support						
Lattice Girder	Recommended	Length 4m-5m @ (1.5m)	As built	(25x25 cm) (1-1.5m) spacing		
Rock Bolt 20mm				Length (3-4m) @ (1-1.5m) Ø 32mm		
Wire Mesh				(75*75cm) spacing 7.5cm		
Force Polling						
Shotcrete				20-15 cm		
Type						
Fault	F					
Joint	J ✓					
Slickensided	Sl					
Fractured	F ✓					
Schistosity	Sc					
Bedding Plan	B					
Foliation	Fl					
Shear	Sh					
Fold	Fo					
Roughness		Aperture (mm)				
Stepped Rough	Sr	Very Tight	<0.01			
Stepped Smooth	Ss	Tight	0.01-0.2 ✓			
Stepped Slickensided	Ssl	Partly Open	0.25-0.5 ✓			
Undulating Rough	U ✓	Open	0.5-2.5 ✓			
Undulating Smooth	Us	Widely open	2.5-10			
Undulating Slickensided	Usl	V. Wid. Open	10-jan			
Planar Rough	Pr	Extr. Wid. Oper	10-100			
Planar Smooth	Ps	Cavernous	>1			
Planar Slickensided	Psl					
Spacing (m)		Persistence (m)		Block size Joint/ m²		
Extr. Low	<0.02	very Low	<1	very Large	<1	
Very Low	0.02-0.0 ✓	Low	1-3	Large	1-3	
Close	0.06-0.2 ✓	Medium	3-10 ✓	Medium	3-10	
Moderate	0.2-0.6	High	10-20	Small	10-30	
Wide	0.6-2	Very High	>20	Very Small	>30	
Very Wide	2-6			Crushed	>60	
Extr. Wide	>6					

Geology				
The exit section at North Portal of Nahakki tunnel is characterized by the presence of schist and metacarbonate. This strata is highly weathered and mainly very weak metamorphic rock. The rock across the proposed tunnel alignment are characterised by the presence of well developed three to three plus random joint sets. Discontinuity length (Persistence) is medium and varies between 3 to 10m. The aperture size varies between tight to partly open i.e 0.1 to 1 mm Average spacing of joints in the schist are extremely low to very low and ranges between 0.02 to 0.06m The major controlling joint set is the one parallel to the schistosity which is generally dipping 40° Water condition is wet				
RQD/JN:	Jr/Ja:	Jw/SRF:	Q Va,ue:	Rock Class:
10/24=0.416	1.5/4=0.375	0.66/1=0.66	0.103	E

กราฟแสดงค่า % Strain ตามสภาพธรณี (Geotechnical Issue) และประเภทค้ำยัน (Support Type)

Ref : Hoek and Marinos 2,000) , RocSupport v.4.0 Tutorial Manual



ประเภท	% การยืด	สภาพธรณี	ความต้องการของค้ำยัน
	(% Strain)	(Geotechnical Issues)	(Support Types Require)
A	< 1	ส่วนใหญ่อุโมงค์มีเสถียรภาพ และความต้องการค้ำยันเป็นแบบธรรมดา ๆ ขึ้นกับประเภทหิน ตามที่ออกแบบไว้	ค้ำยันแบบธรรมดา เช่น สลักยึดหิน คอนกรีตพ่น
B	1 ถึง 2.5	ใช้ทฤษฎี Convergence Confinement Method ในการประเมินหิน บริเวณรอบอุโมงค์ที่เป็นแบบพลาสติก (Plastic Zone)	มีการหดตัวบางส่วนเล็กน้อย (Minor Squeezing) ค้ำยันสลักยึดหิน คอนกรีตพ่น และคานเหล็กโค้งขนาดเล็ก
C	2.5 ถึง 5	ต้องมีการวิเคราะห์อย่างละเอียด โดยใช้ Finite Element เกี่ยวกับการค้ำยัน ขั้นตอนการทำงาน แต่บริเวณหน้าอุโมงค์ (Face Tunnel) มีเสถียรภาพ	มีการยึดหด ต้องทำการค้ำยันอย่างรวดเร็ว ควบคุมคุณภาพค้ำยันอย่างดี ต้องใช้คานเหล็กโค้งขนาดใหญ่ช่วย
D	5 ถึง 10	ต้องมีการป้องกันบริเวณหน้าอุโมงค์ (Face Tunnel) ให้มีเสถียรภาพ พร้อมทั้งวิเคราะห์เสถียรภาพอย่างละเอียดโดยใช้ วิธี Finite Element มีการค้ำยันล่วงหน้าก่อนขุด โดยใช้ Fore-poling และค้ำยันหน้าอุโมงค์ (Tunnel Face) ให้แข็งแรง	มีการยึดหดมาก ต้องมีการค้ำยันหน้าอุโมงค์ (Face Stability) ก่อนทำการขุด แล้ว ทำการค้ำยันอย่างมาก
E	> 10	ต้องมีการป้องกันบริเวณหน้าอุโมงค์ (Face Tunnel) ให้มีเสถียรภาพ พร้อมทั้งวิเคราะห์เสถียรภาพอย่างละเอียดโดยใช้ วิธี Finite Element ในระบบ 3 มิติ มีการค้ำยันล่วงหน้าก่อนขุด โดยใช้ Fore-poling และค้ำยันหน้าอุโมงค์ (Tunnel Face) ให้แข็งแรง ต้องอาศัยประสบการณ์ในการแก้ปัญหา	มีการยึดหดอย่างมาก ต้องมีการค้ำยันหน้าอุโมงค์ (Face Stability) ก่อนทำการขุด แล้ว ทำการค้ำยันอย่างมาก ๆ ตามกำลังของค้ำยัน

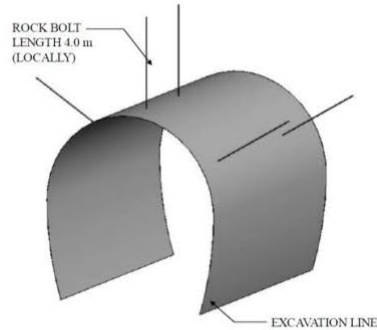


Typical Cross-Section of Support Class for Main Tunnel : รูปแบบการขุดและติดตั้งโครงสร้างค้ำยัน

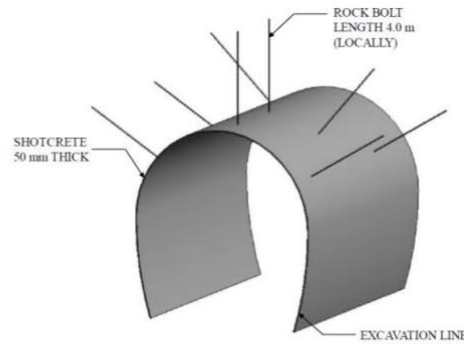
Support Class		RMR	Description	Excavation	Rock Bolts	Shotcrete	Steel Set	Pre-support
Class	Sub Class							
I	-	100-81	Very Good Rock	Full Face	Generally, no support is required except local bolting			
II	-	80-61	Good Rock	Full Face	✓	✓	-	-
III	-	60-41	Fair Rock	Full Face	✓	✓	-	-
IV	-	40-21	Poor Rock	Top Heading and Benching	✓	✓	✓	(If Required)
V	Va	<21	Very Poor Rock	Top Heading and Benching	✓	✓	✓	Pipe Forepoling / Pipe Roof
	Vb	<21	Very Poor Rock (high overburden > 150 m)		✓	✓	✓	Pipe Forepoling / Pipe Roof
S	Sa	-	Extremely weak rock, Unconsolidated sediments or soils	Sequential Excavation Top Heading, Benching and Invert	-	✓	✓	(If Required)
	Sb	-	Extremely weak rock, Unconsolidated sediments or soils where squeezing problem		-	✓	✓	Pipe Roof



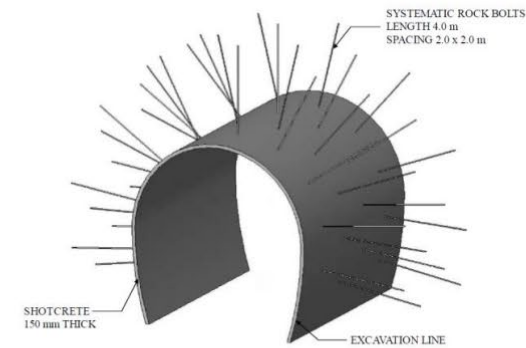
Typical Cross-Section of Support Class for Main Tunnel : รูปแบบการขุดและติดตั้งโครงสร้างค้ำยัน



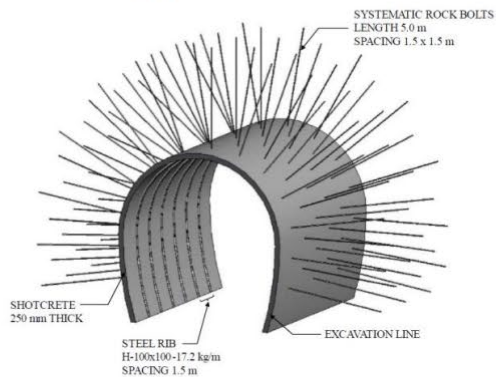
Support Class I



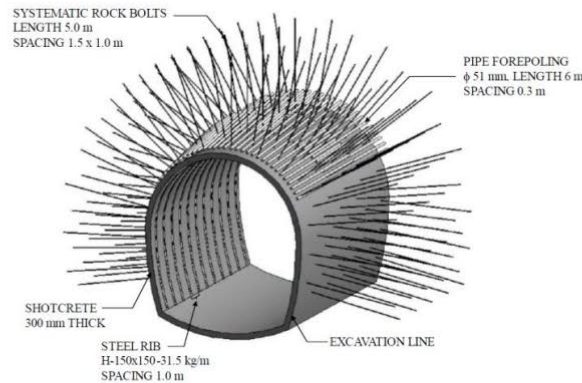
Support Class II



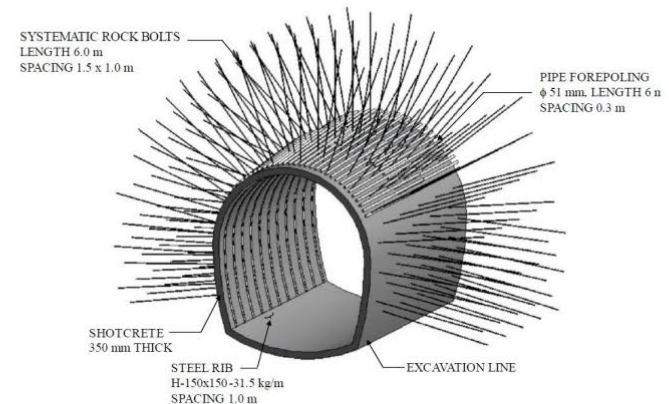
Support Class III



Support Class IV

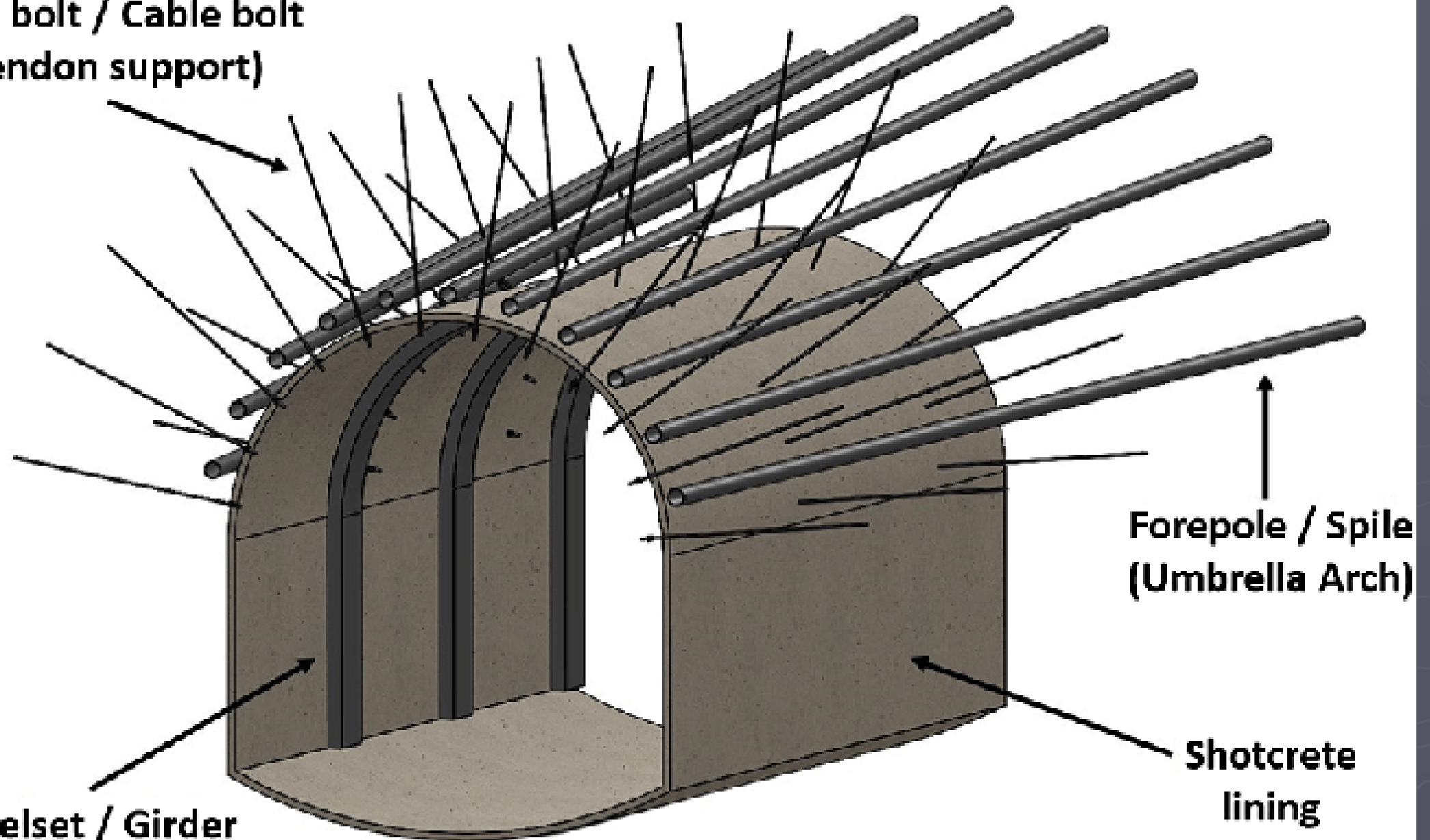


Support Class Va



Support Class Vb

**Rock bolt / Cable bolt
(Tendon support)**



**Forepole / Spile
(Umbrella Arch)**

**Shotcrete
lining**

Steelset / Girder

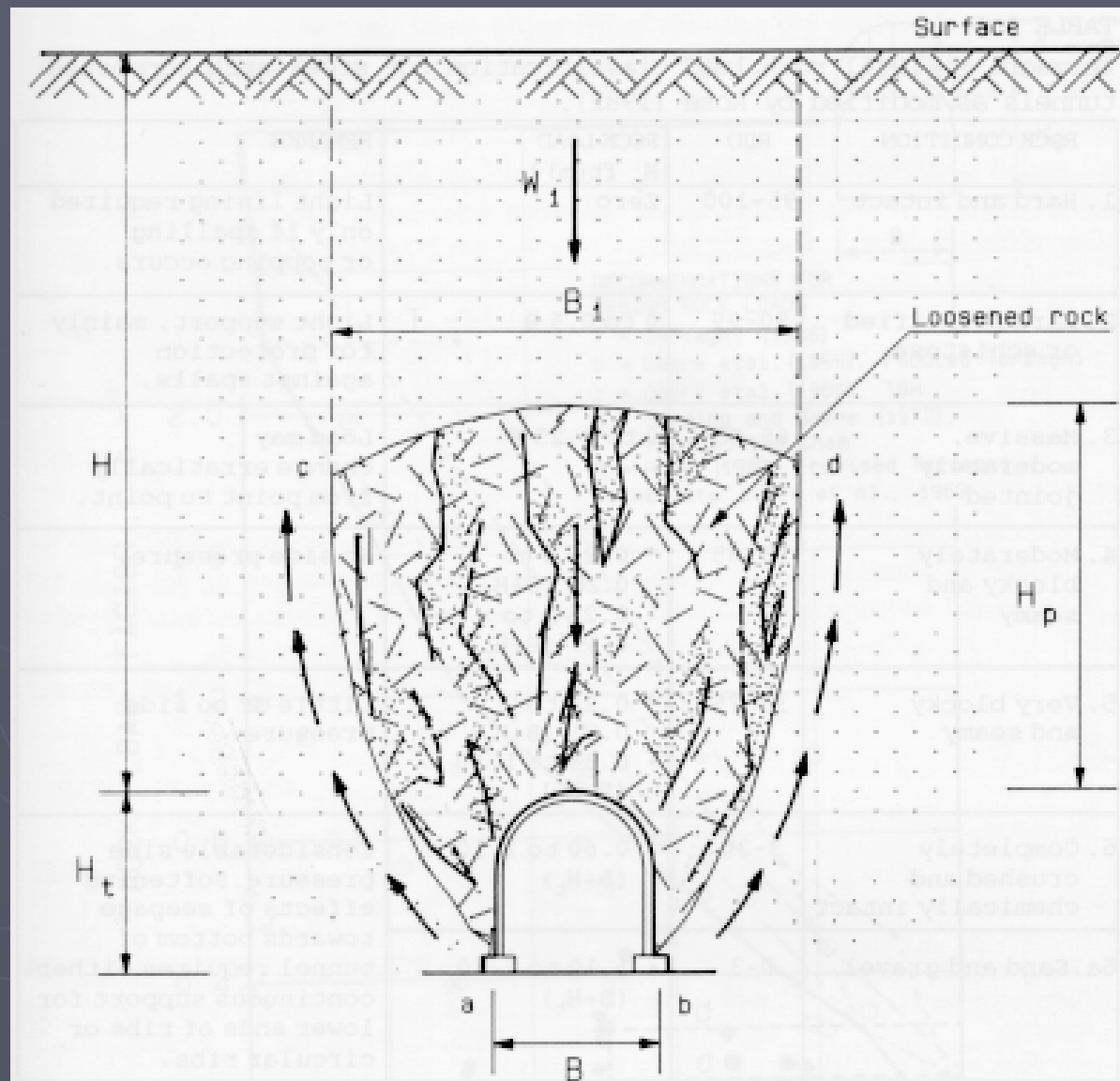
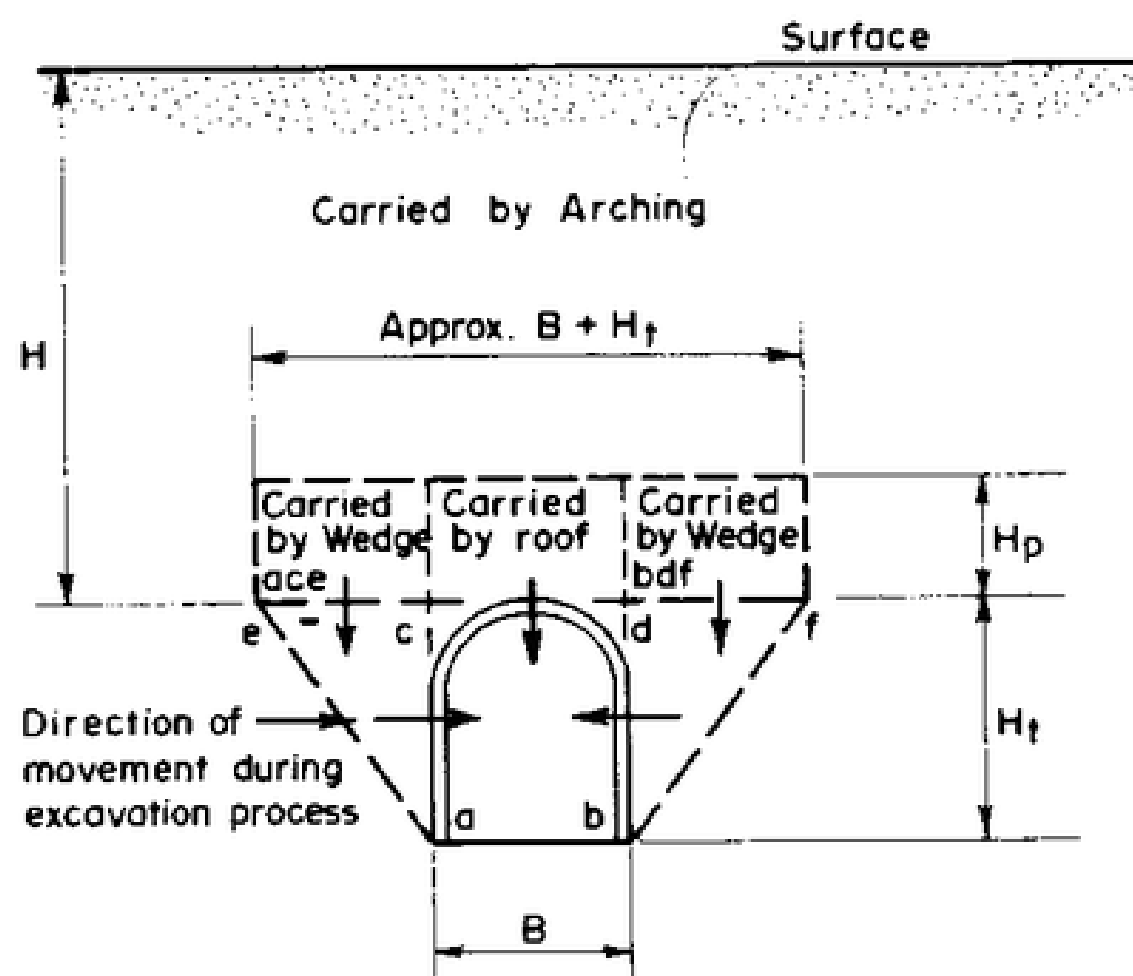
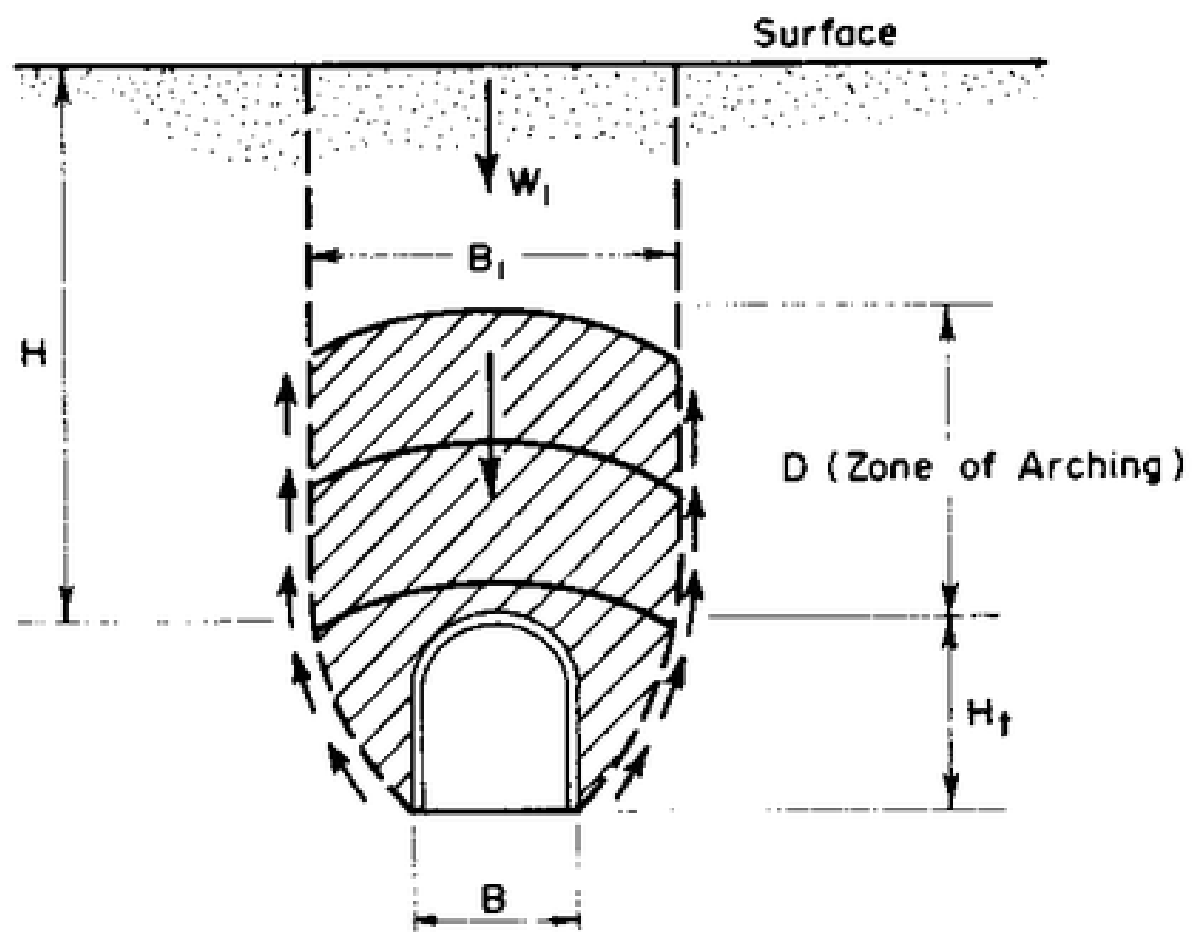
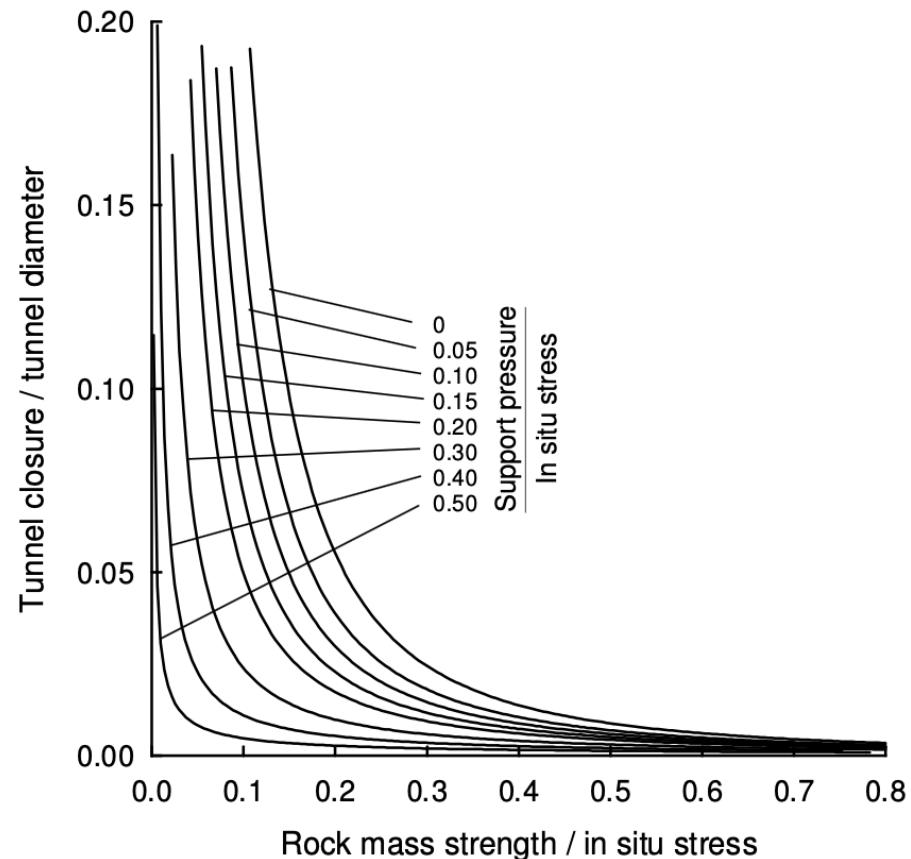


Fig. 2.10. Terzaghi's (1946) concept of movement of loosened rock toward a tunnel (of width B and height H_t) and transfer of rock load, H_p (see Table 2.5).



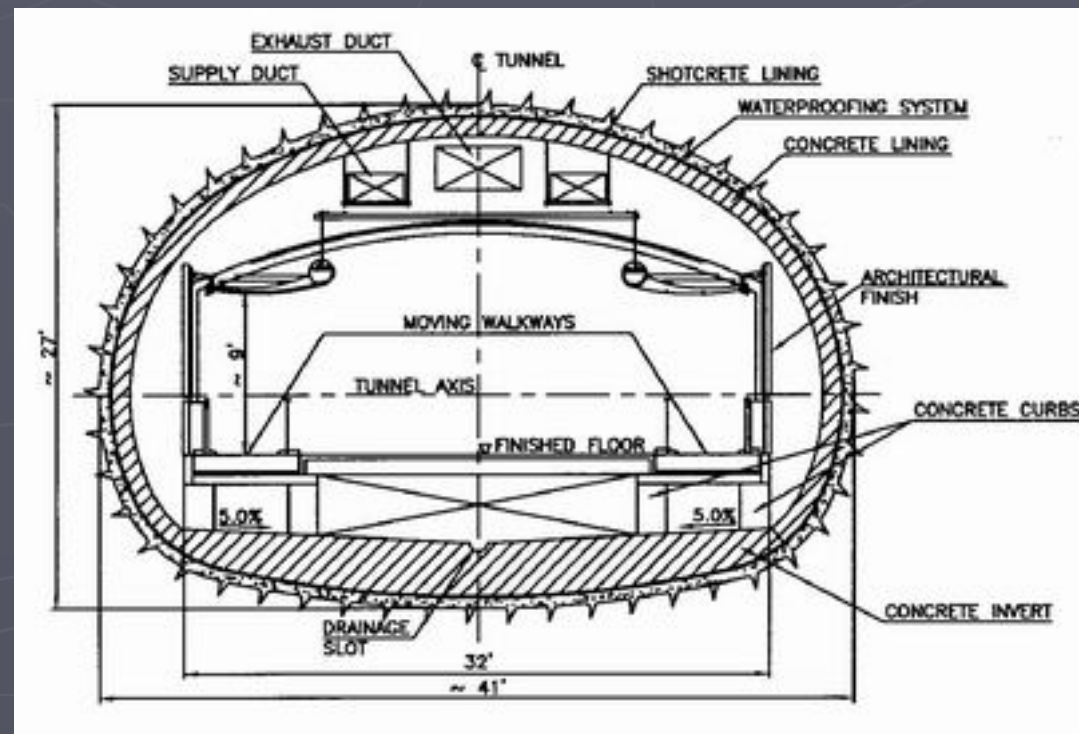
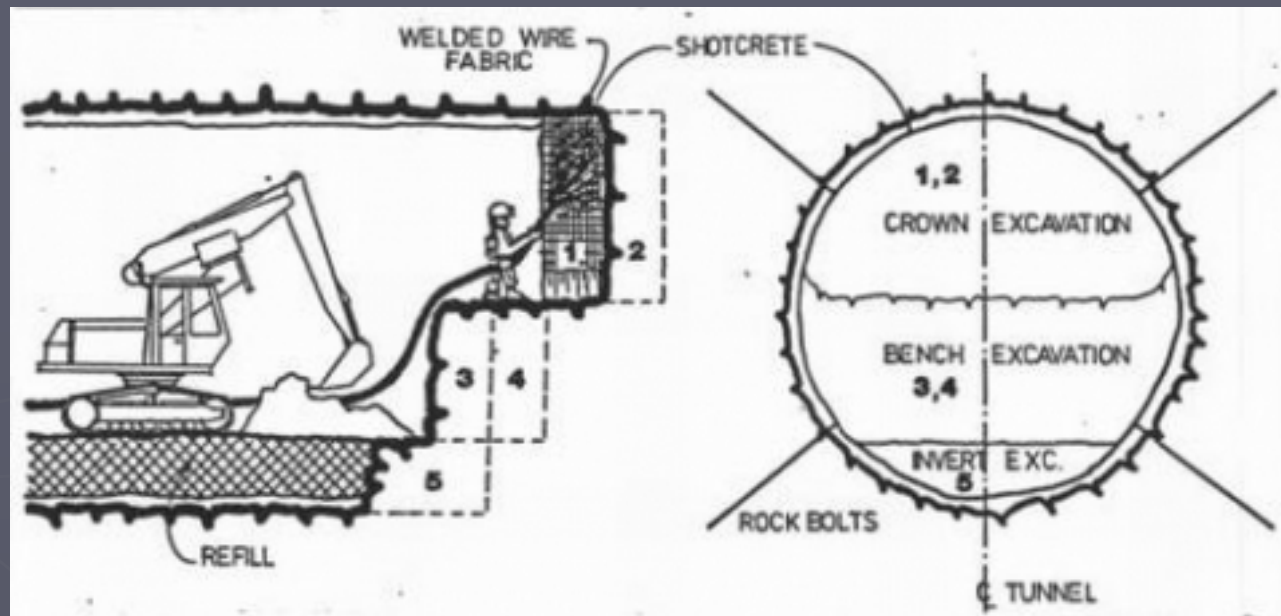
1

The stability of tunnels excavated in weak rock is primarily assessed by monitoring the strain within the surrounding rock mass. Hoek (1998) uses Montecarlo simulation to simulate tunnel closure and construct design chart by normalizing tunnel closure as a ratio to tunnel's diameter. Many analytical approaches were introduced in attempt to estimate time-dependent tunnel closure and verify by numerical modeling (FEM).

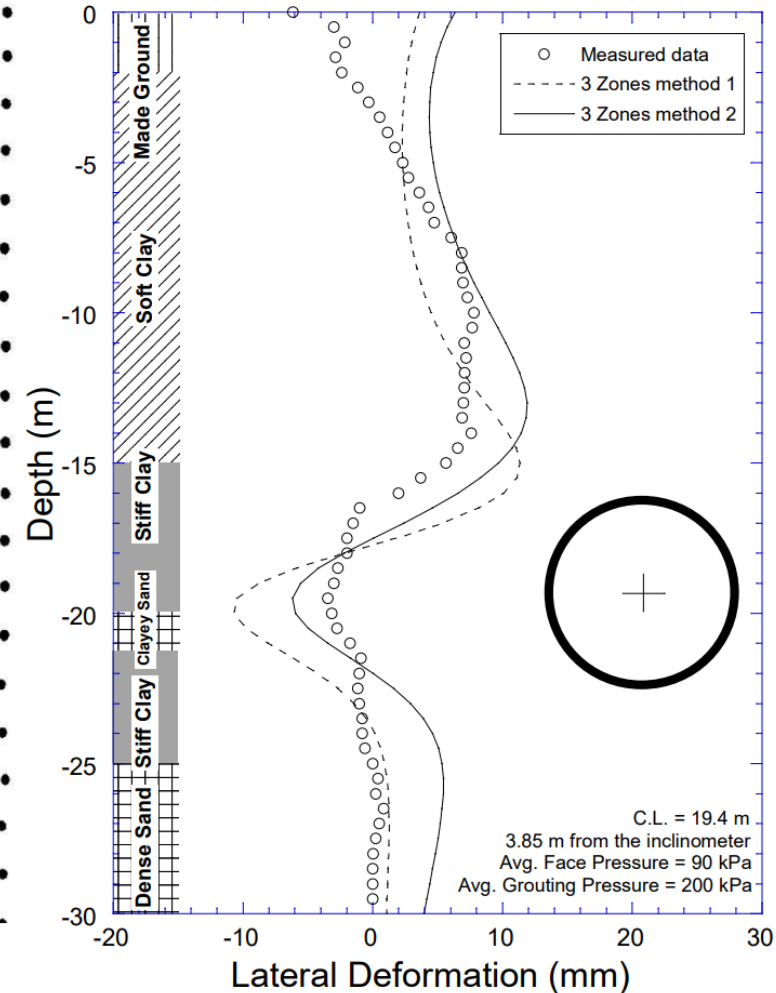
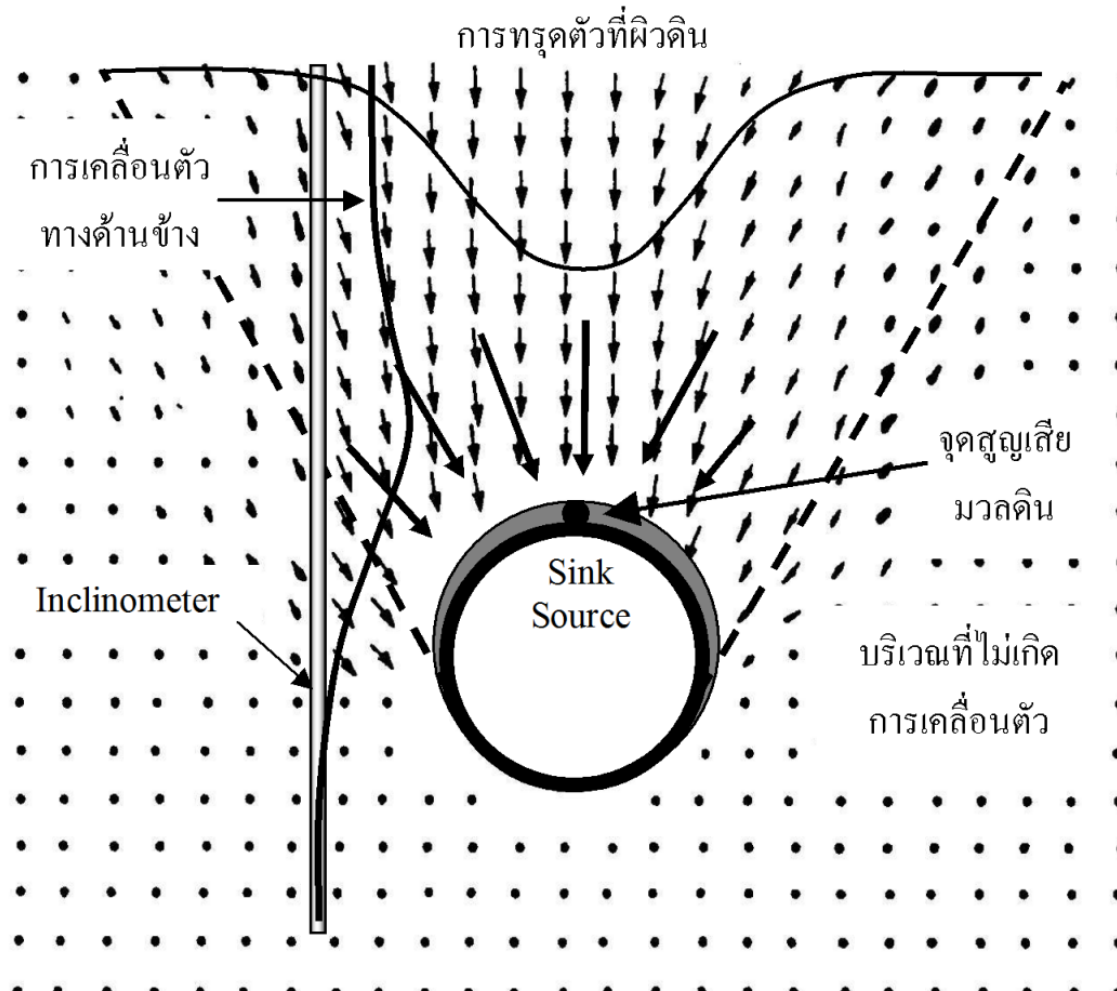


Tunnel Closure by Hoek (1998)



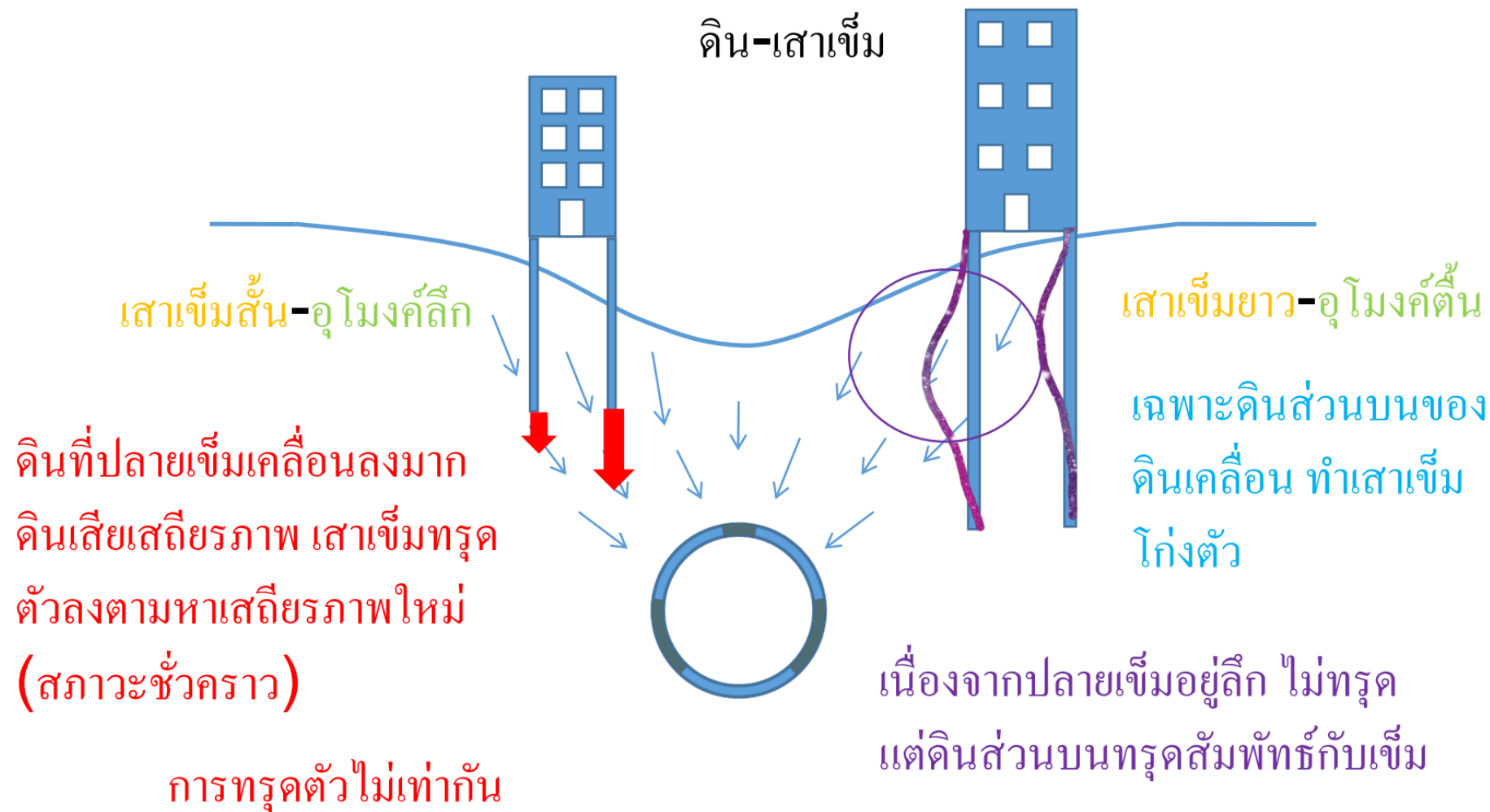


การเคลื่อนตัวของมวลดินจากการขุดอุโมงค์



ผลกระทบต่อการบข้าง

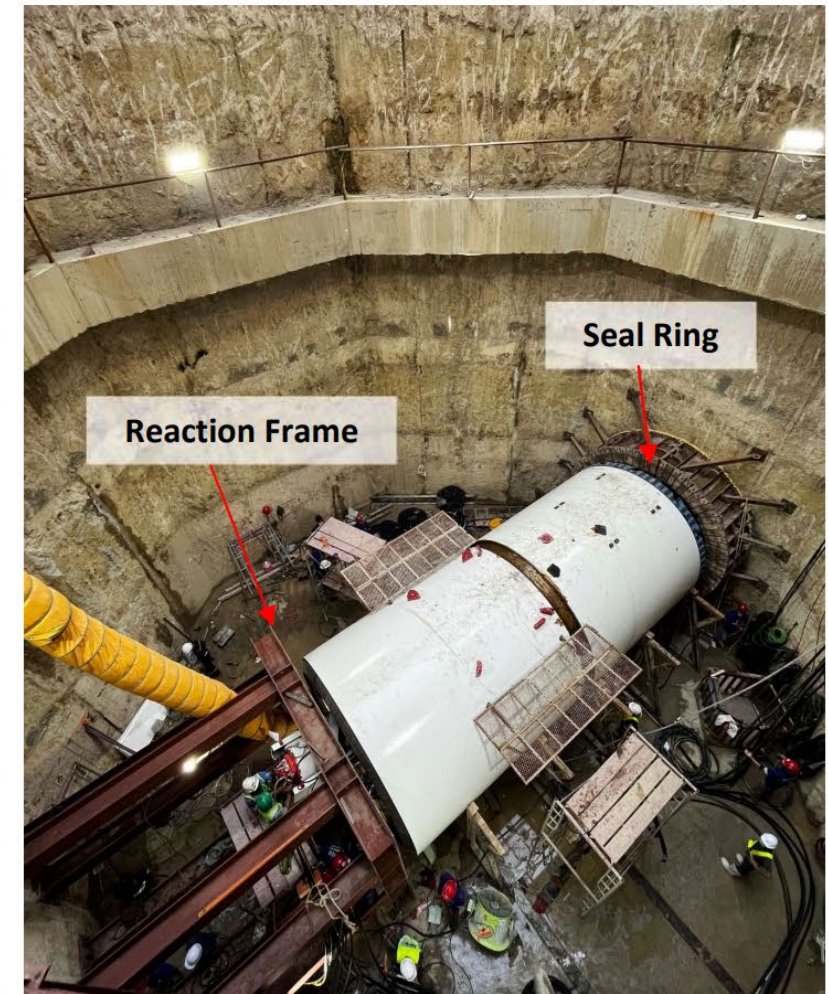
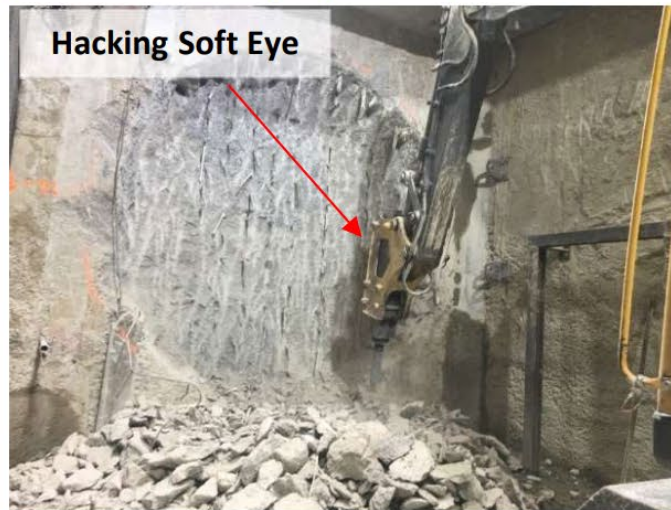
ความเข้าใจถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุโมงค์-ดิน-เสาเข็ม



Negative skin friction: แรงต้านลดลง แรงกดมากขึ้น

4. Tunnelling Boring Machine (EPB Type)

TBM Break-out preparation

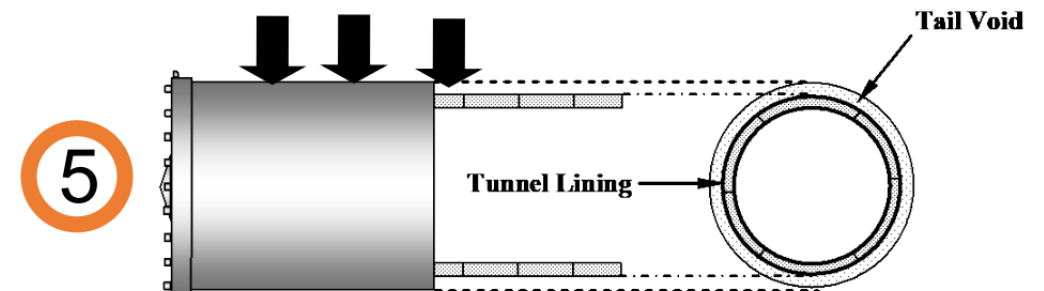
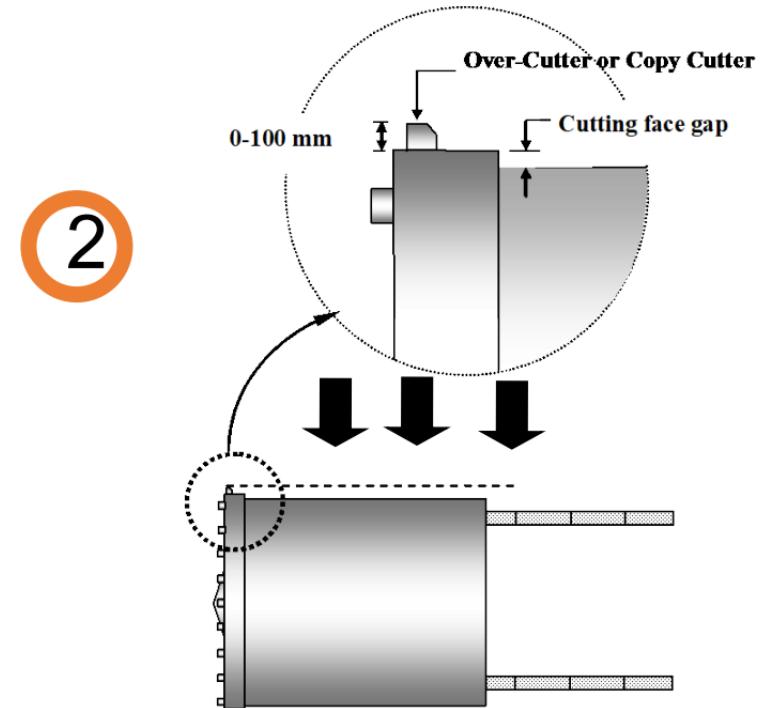
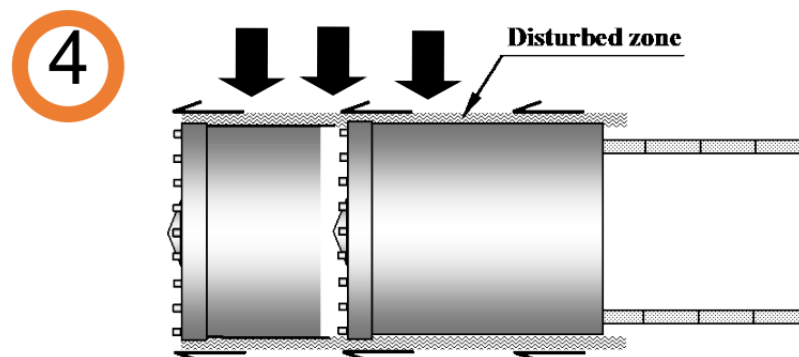
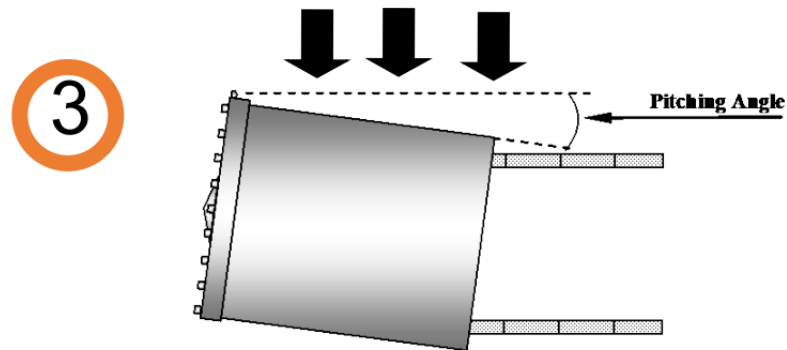
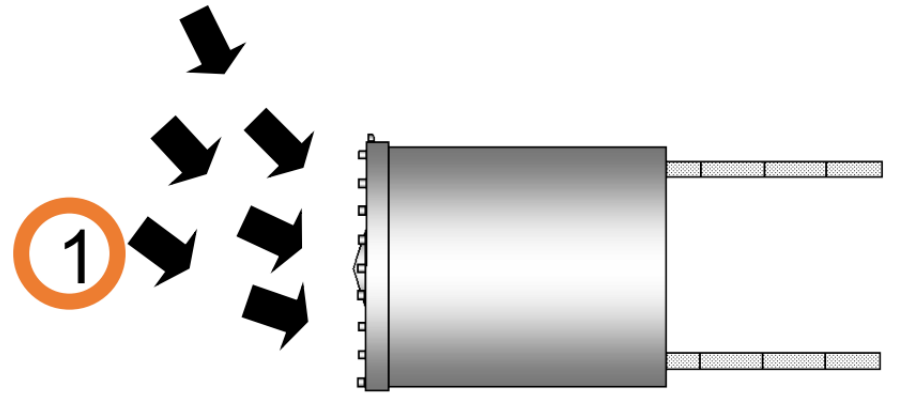


5. Segmental Tunnel Lining

TBM Excavation and Ring building

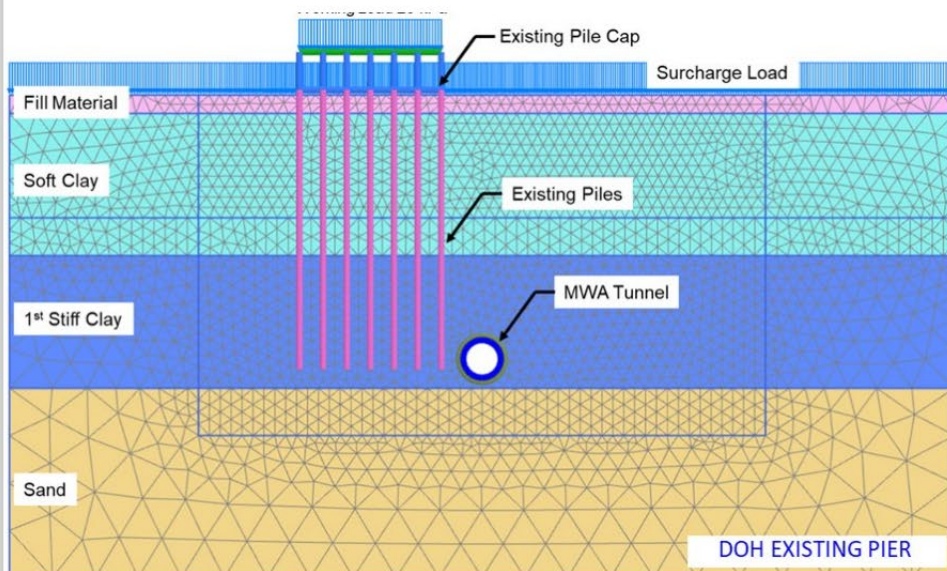


การเคลื่อนตัวของดินจากการเจาะอุโมงค์



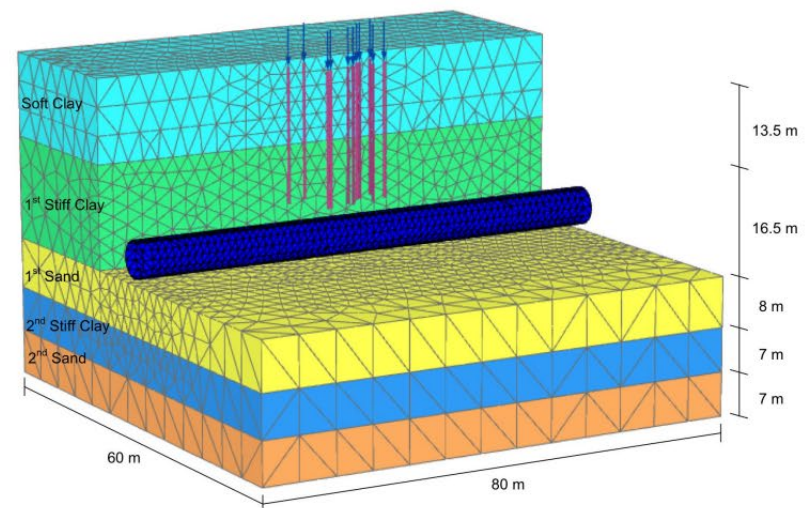
การวิเคราะห์และประเมินผลกระทบ (Impact Assessment) ในรายละเอียด

การวิเคราะห์ 2D



- ✗ - Face pressure
- ✓= - Grouting pressure, grouting material
- ✗ - Penetration rate and soil disturbance
- ✗ - Pitching & yawing
- - Tail void
- ✗ - Overcut, turning

การวิเคราะห์ 3D

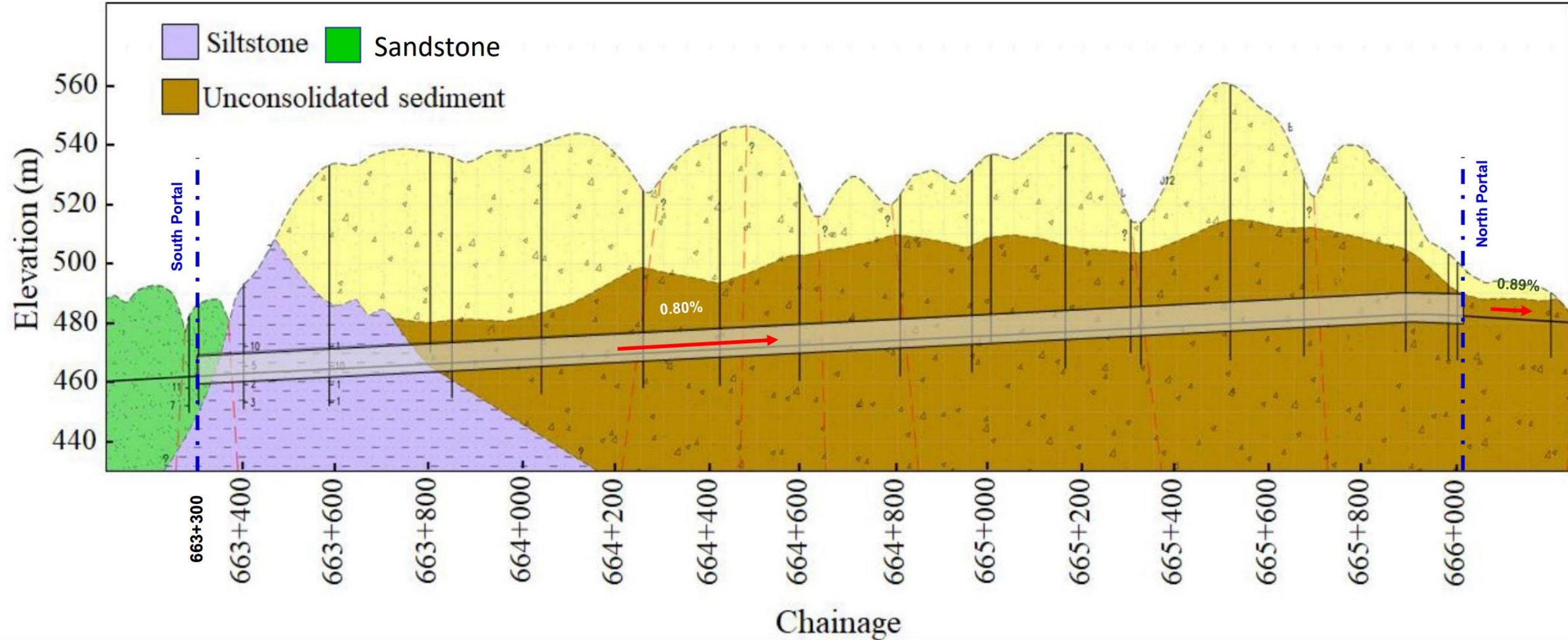


- ✓= - Face pressure
- ✓= - Grouting pressure, grouting material
- ✗ - Penetration rate and soil disturbance
- ✗ - Pitching & yawing
- - Tail void
- ✗ - Overcut, turning



Longitudinal Profile of Geology Along The Tunnels Alignment : ลักษณะทางธรณีวิทยาตามยาวของอุโมงค์แม่กา

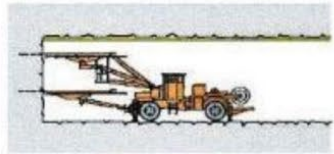
ความหนาของชั้นดินและหินที่ปิดทับเหนืออุโมงค์ (Overburden) ประมาณ 40 – 80 เมตร



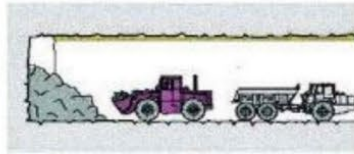


Method of Construction : วิธีการก่อสร้างอุโมงค์แม่กา

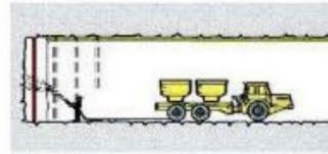
☐ New Austrian Tunnelling Method (NATM)



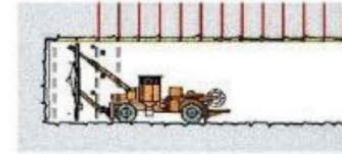
Excavating



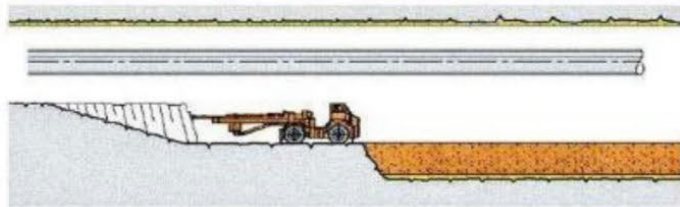
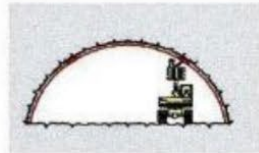
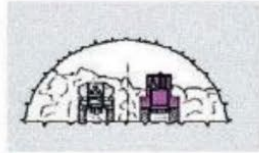
Mucking



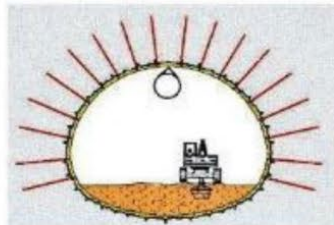
Installing Lattice Girders



Rockbolting



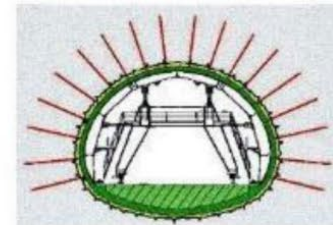
Bench Excavation



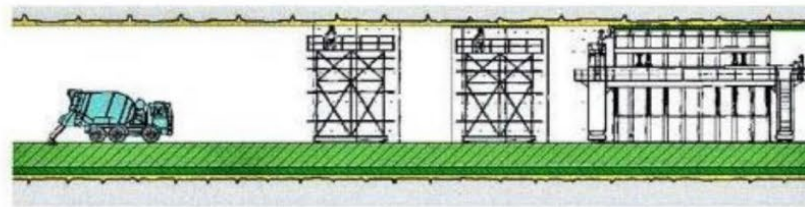
Invert Excavation
Shotcrete Arch in invert



Invert Concreting



Final Lining CIP Concrete



Waterproofing

Reinforcement

Formwork

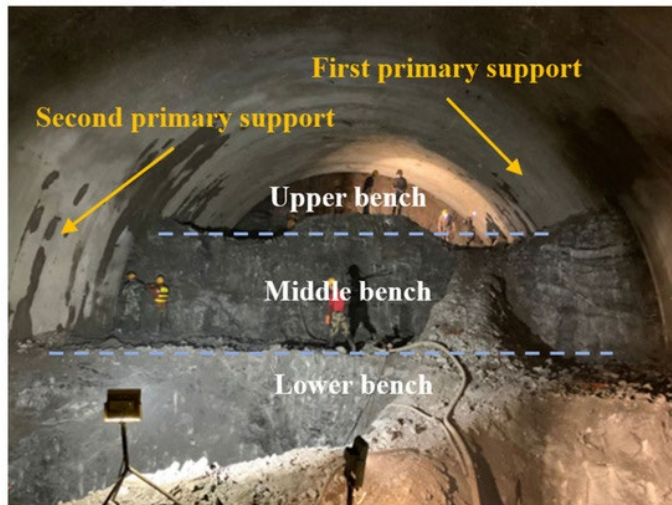
- ❖ Excavation : งานขุด
 - Drill and Blast (rock) : ใช้วัตถุระเบิด (หินแข็ง)
 - Tunnel excavator (stiff clay to weak rock) : ใช้รถขุด (ดินเหนียวแข็งถึงหินนุ่ม)
- ❖ Mucking : ขนย้ายไปยังกองวัสดุงานขุด
- ❖ Tunnel face mapping and select the support class by geologist : ประเมินสภาพทางธรณีวิทยาเพื่อพิจารณาเลือกประเภทของโครงสร้างค้ำยัน
- ❖ Primary lining: โครงสร้างค้ำยัน
 - Installing lattice girder/steel arch : โครงเหล็กค้ำยัน
 - Rock bolting (rock) : สลักยึดหิน
 - Shotcrete : คอนกรีตพ่น
- ❖ Final lining : ฉาดอุโมงค์
 - Waterproofing : ระบบแผ่นกันซึมน้ำ
 - Reinforcement : เหล็กเสริมโครงสร้าง
 - Formwork : แบบหล่อคานคองกริตอุโมงค์
 - Invert concrete : คอนกรีตพื้นอุโมงค์
 - CIP concrete lining : ฉาดคานกริต ชนิดหล่อในที่

• Justification for Drill & Blast Method based on NATM

- D&B allows rock mass to carry load gradually.
- D&B enables controlled sequence for timely invert closure, ensuring ring action.
- Staged D&B sequence (heading & bench) aligns with NATM by controlling stresses, enabling early support, and allowing continuous monitoring.
- Shotcrete application can be done to minimize loosening.



Image source: Frontier-Kemper Constructors, Inc., Drill-and-Blast Tunneling
(www.frontierkemper.com/services/drill-and-blast-tunneling.html)



Source: Nie, J.; He, C.; Kou, H.; Liu, F.; Yang, W.
Research on Excavation Method for
Soft Rock Tunnel Based on Stress Release Rate.
Appl. Sci. 2024, 14, 668.
<https://doi.org/10.3390/app14020668>



Source: Natural Cement Distribution Ltd., SHOTCRETE 530.
Available at:
<https://naturalcement.co.uk/product/shotcrete-530/>

• Justification for TBM based on NATM

- Immediate ring closure conserves in-situ stress and prevents loosening.
- Uniform excavation profile reduces overbreak and ground relaxation compared to cyclic methods.
- Instrumented lining and ground measurements enable observational method for adaptive support.



Source: Hyundai Engineering & Construction. "Hyundai E&C builds tunnels fast and safe (TBM Method)." Hyundai E&C Newsroom.



(a) TBM transportation platform



(b) CFST arch installation



(c) CFST arch concrete grouting



(d) Steel fiber shotcrete spraying

Source: Wei Lu, Shuguang Song, Shucai Li, Bingchen Liang, Jiabin Li, Yingcheng Luan, Lei Wang, Huibin Sun,

Study on mechanical properties of composite support structures in TBM tunnel under squeezing soft rock conditions, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 144, 2024, 105530, ISSN 0886-7798, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105530>.

Major Cases Of Tunnel Failure

Construction Phase Failures

1. Silkyara Tunnel Collapse(2023)

- Silkyara Bend–Barkot Tunnel, Uttarakhand, India collapsed at Ch 203m-Ch240 m from portal; 41 workers trapped for 17 days, all rescued.
- According to the Disaster Management Cell, India, the potential reasons of tunnel collapse were: weak/fractured rock patch, water seepage and erosion, and other undetectable geological issues during construction.



Silkyara Tunnel before the incident



Section collapse trapping 41 workers

Source: Disaster Management Cell, Dr. R. S. Tolia, Uttarakhand Academy of Administration, Nainital.

"Silkyara Tunnel Section Collapse: A Case Study"

Major Cases Of Tunnel Failure

Construction Phase Failures

2. São Paulo Metro Tunnel Collapse (2007)

- On January 12, 2007, a massive sinkhole formed during the construction of the Pinheiros Metro Station in São Paulo, Brazil.
- 7 fatalities and significant damage to nearby roads and buildings.
- Approximately 6m of rock above the tunnel.
- Rate of displacement was 15mm to 20mm two to three days before the accident.



Fig: Drilling in a tunnel to extend the metro system caused a massive sinkhole ,Brazil,2007

Source:BBC News, 18 Feb 2024



อ่อนนุช



อ่อนนุช

Major Cases Of Tunnel Failure

Construction Phase Failures

3. Heathrow Express Rail Link Tunnel Collapse (1994)

- Occurred during the night of 20–21 October 1994, causing a £150 million recovery cost, 6-month project delay, and disruption to the Jubilee Line Extension (London Underground).

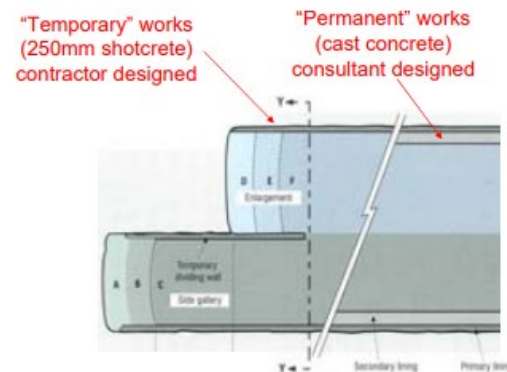
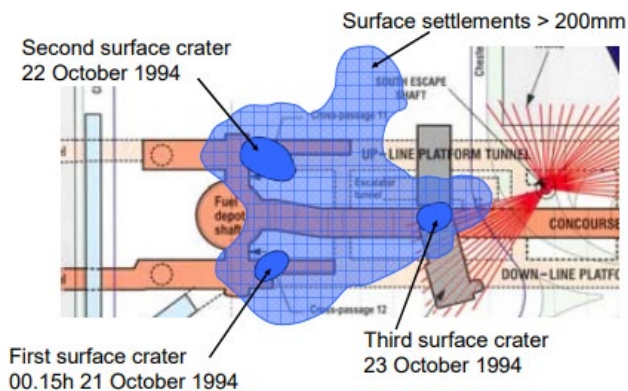


Fig: Buildings were damaged and a crater appeared between the airport's two runway

Source: Daily Mirror

Major Cases Of Tunnel Failure

Operational Failures

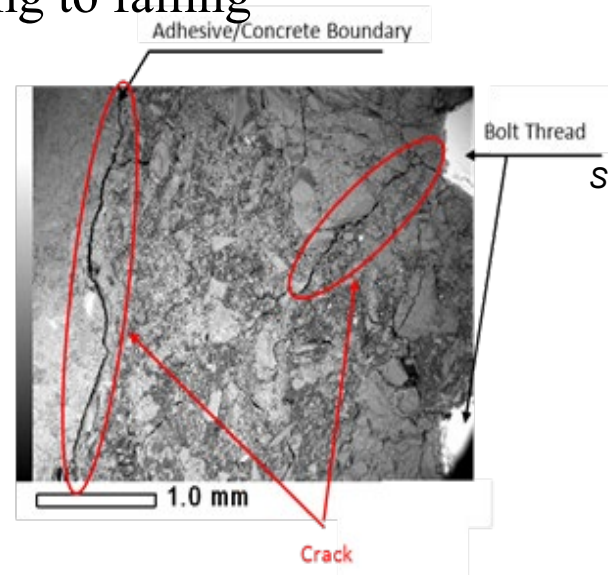
1. Sasago Tunnel (Chuo Expressway, 2012)

- An estimated 270 concrete slabs, each weighing 1.4 metric tons, fell from the roof of the Sasago Tunnel onto moving vehicles below.
- 9 fatalities, several injuries.
- Failure of ceiling support bolts due to corrosion and inadequate inspection, leading to falling concrete panels.



Fig: Broken concrete ceiling panels after collapsing inside Sasago Tunnel

Source: *The Christian Science Monitor*, "Japan begins inspection of 50 tunnels after collapse kills nine people," December 3, 2012.



Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT), Japan,
"Sasago Tunnel Collapse Investigation Report", 2013.

Major Cases Of Tunnel Failure

Operational Failures

2. Gotthard Road Tunnel Fire (Switzerland, 2001)

- Occurred October 24, 2001 in the 17 km Gotthard Road Tunnel due to a truck collision.
- Fire lasted ~2 days with intense heat and toxic smoke.
- 11 fatalities and dozens of injuries.
- Highlighted the need for advanced fire detection and suppression systems, emergency exits, ventilation, and evacuation procedures.
- Influenced Swiss and European tunnel fire safety regulations.

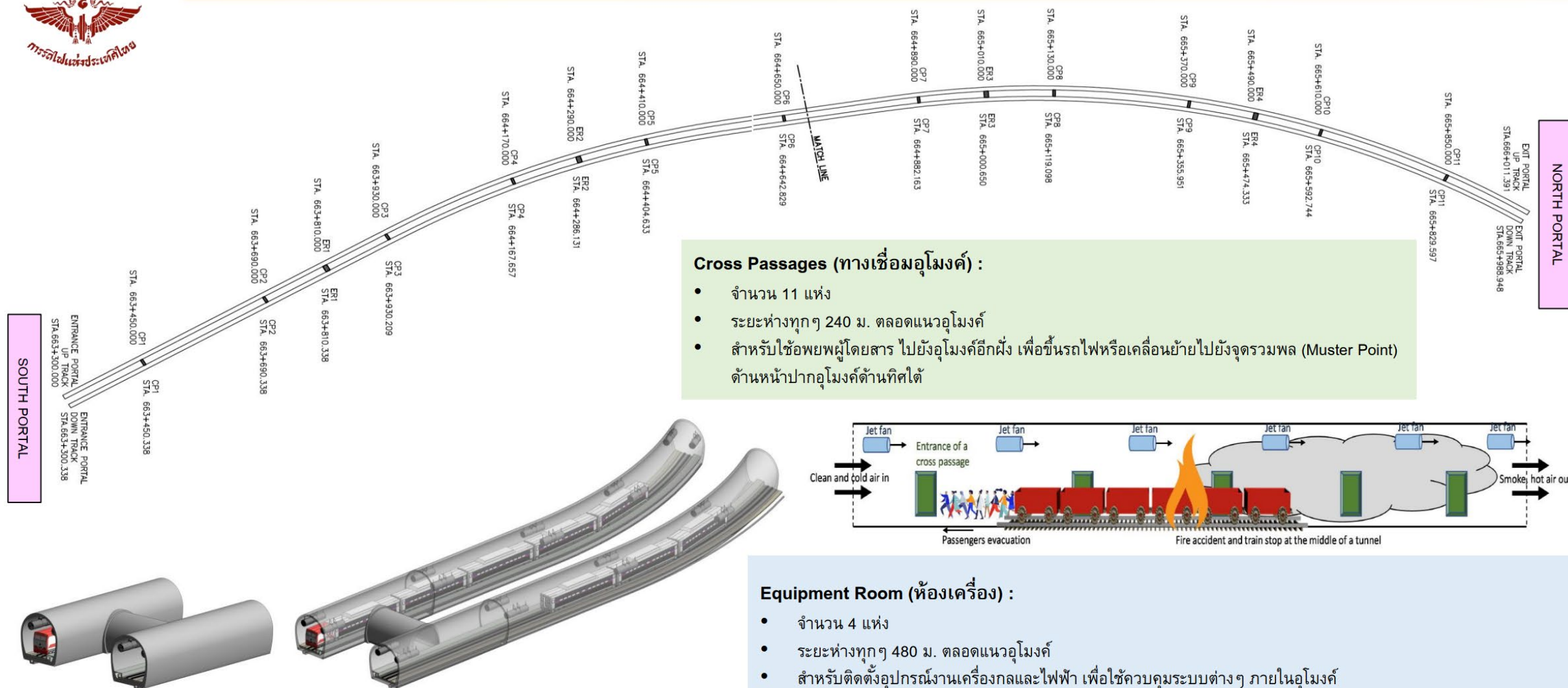


Fig: Swiss tunnel ablaze after head-on crash

Source: Ticino Cantonal Police. "In the 'red zone' close to the seat of the fire, the tunnel's false ceiling collapsed." Alptransit Portal



Layout of Cross Passages and Equipment Rooms : แผนผังแสดงตำแหน่งจุดเชื่อมต่อระหว่างอุโมงค์รถไฟ





Completion of Primary Lining : โครงสร้างค้ำยันอุโมงค์แล้วเสร็จ



ทางแยก (Junction) ระหว่างอุโมงค์รถไฟ (Main Tunnel) และห้องเครื่อง (Equipment Room)



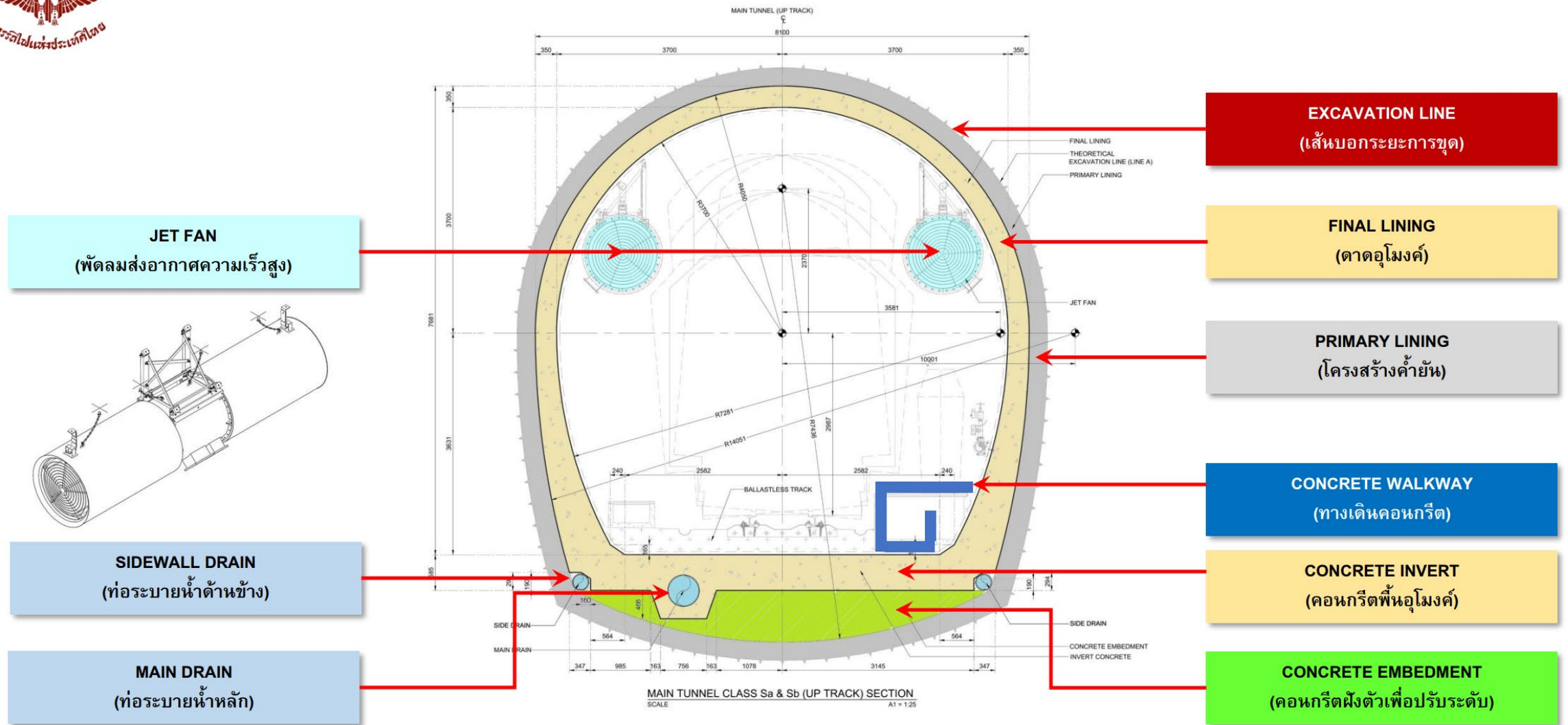
ห้องเครื่อง (Equipment Room)

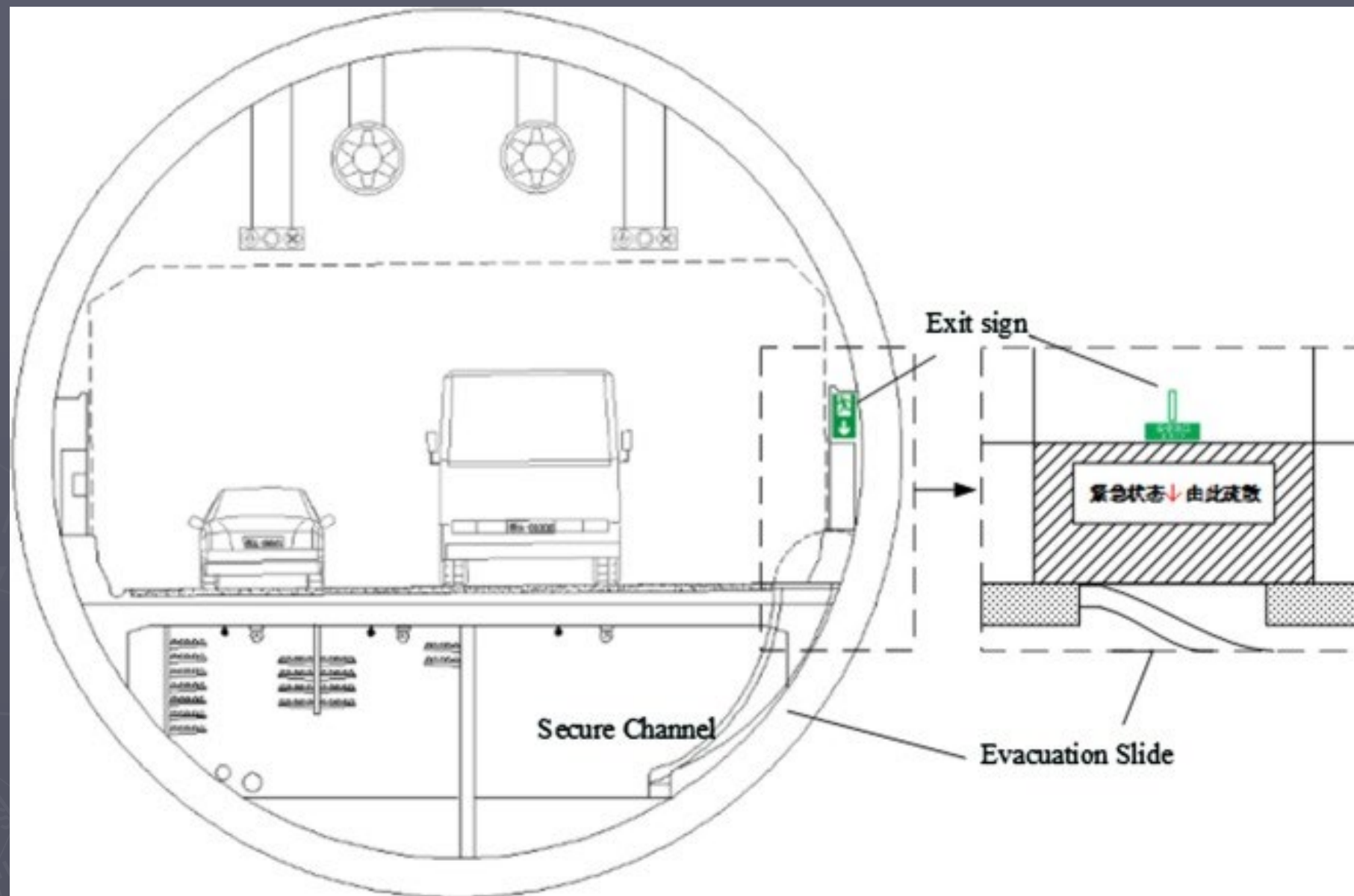


ทางเชื่อมอุโมงค์ (Cross Passage)



Typical Cross-Section of Main Tunnel : องค์ประกอบหลักของอุโมงค์รถไฟ





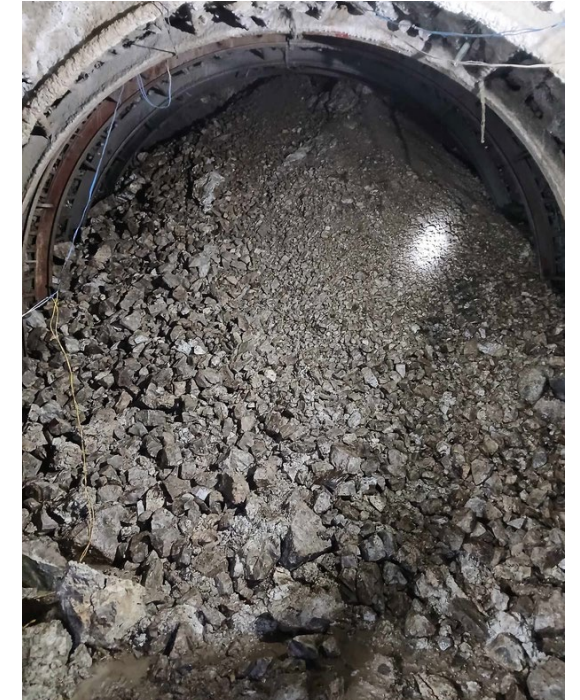
Minor Failures For Illustration



- KU Research Tunnel, Nepal
- Excessive deformation of rib support due to rockfall



- Overbreaks a common issue in tunnels

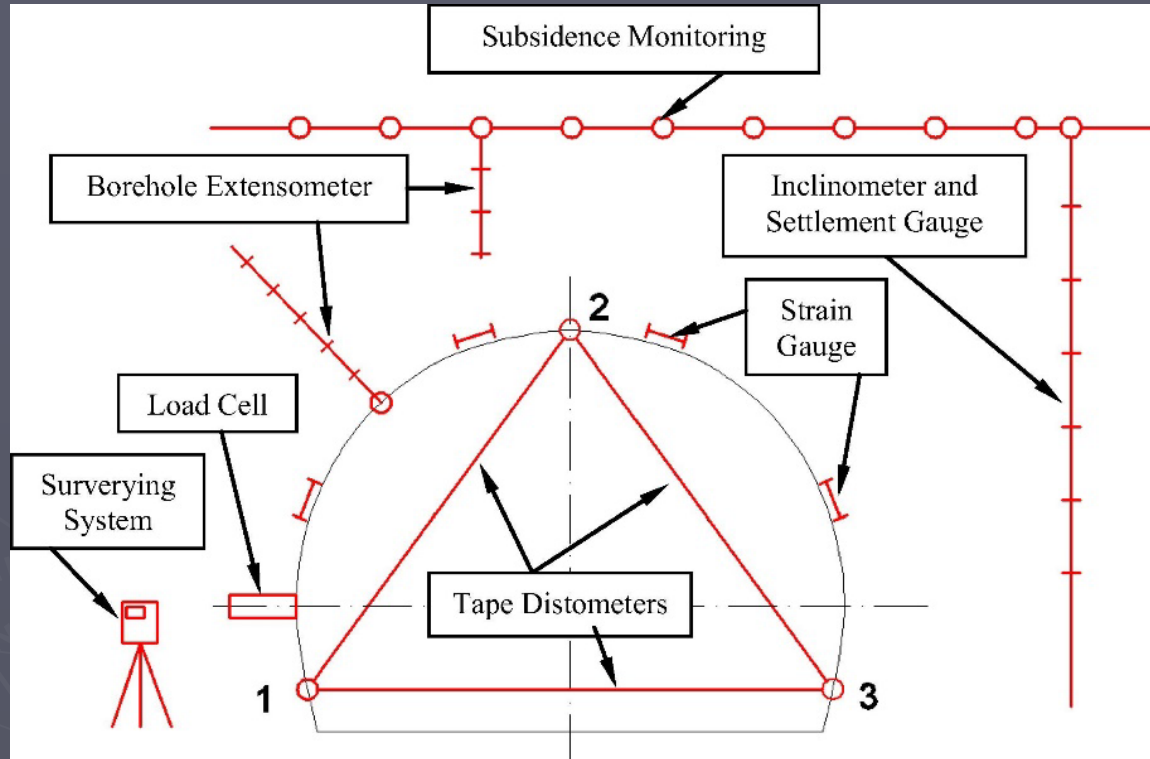


- Sandstone weakened by water, causing loss of shear strength and localized face collapse.



พบไฟรังก้าใต้ดินแม่แตง

วิธีการตรวจวัดในงานอุโมงค์



Ariznavarreta-Fernández, González-Palacioa,
Menéndez-Díazb and Ordoñez (2016)

Table 2. Observation variables and applicable observation methods

	Absolute 3D displacement monitoring	Face displacement monitoring	Levelling	Extensometer	Load cell	Tilt meter	Hydrostatic levelling system	Borehole inclinometers	Piezometers	Water level gauge	Strain gauges	Invert probe	Geological compass-clinometer	Digital ground mapping	Visual inspection
Surface Settlements	■	-	■	■	-	-	□	■	-	-	-	-	-	-	-
Structures and utilities deformation	■	-	■	■	-	■	□	■	-	-	-	-	-	-	-
Lining displacements	■	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lining strains	■*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■	-	-	-	-
Anchor loads	-	-	-	-	■	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Invert integrity	■	-	-	■	-	-	-	-	-	-	■	■	-	-	■
Water level	-	-	-	-	-	-	-	-	■	■	-	-	-	-	-
Pore pressure	-	-	-	-	-	-	-	-	■	-	-	-	-	-	-
Face displacements	-	■	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ground structure	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■	■	■
Ground displacements	-	-	-	■	-	-	-	■	-	-	-	-	-	-	-
Qualitative inspection of lining integrity	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	■	■
■ very valuable □ limited value - no value * - possible with computer-based interpolation and evaluation methods															

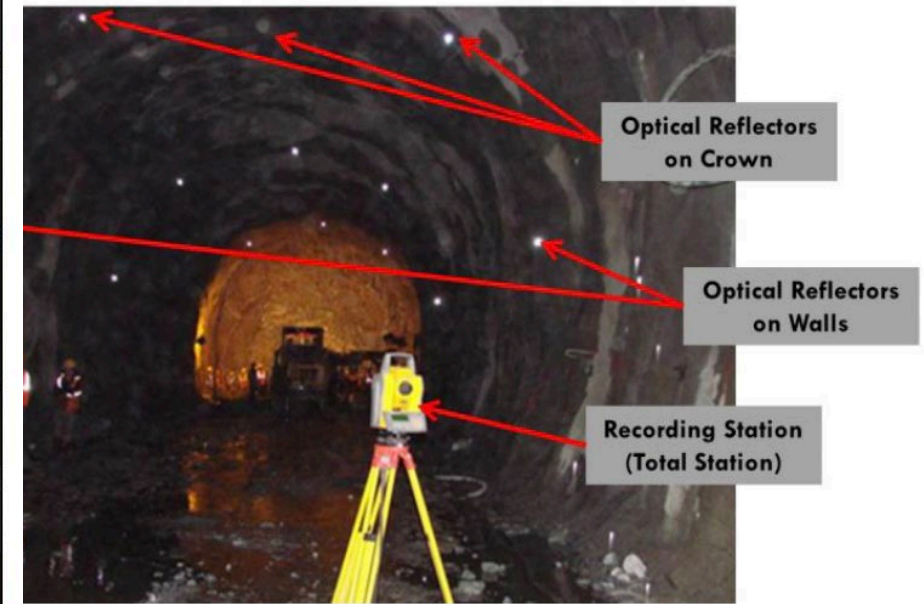
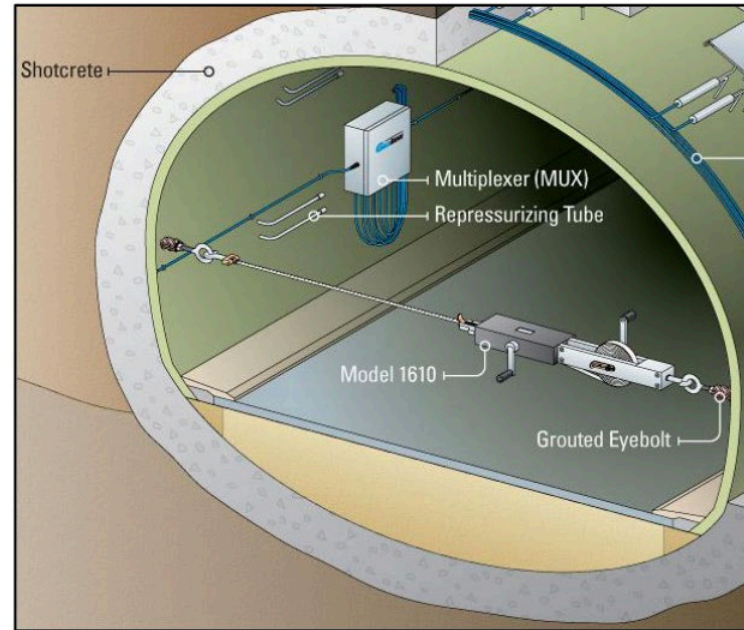
Method of Convergence Monitoring

Tunnel Construction requirements on Tunnel convergence monitoring

AI DRIVEN CONVERGENCE MONITORING

The three methods was commonly found on construction site.

- Crack Gauge : only measure progressive of crack but not see the holistic view of the deformation.
- Extensometers: simple interpretation but not give engineer of overall tunnel closure.
- Geodetic Survey by Total Station: most commonly found on site, but difficult to maintain fixed reference point in deep tunnel.



วิธีการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของอุโมงค์

- ▶ วัดตำแหน่งสมบูรณ์ (Absolute displacements in space) ใช้อุปกรณ์สำรวจที่มีความละเอียด เช่น Total station, Tachymeter สำรวจหาค่าทั้ง 3 แกน (X,Y, Z) ได้แก่ พิกัด Easting , พิกัด Northing และ ค่าระดับ (Elevation)



วิธีการนี้จะทำให้เห็นการเคลื่อนตัวทั้ง 3 แกน และ
หากอ่านค่าด้วยความประณีตจะยังได้ค่าที่น่าเชื่อถือ



เทคนิคการสำรวจ

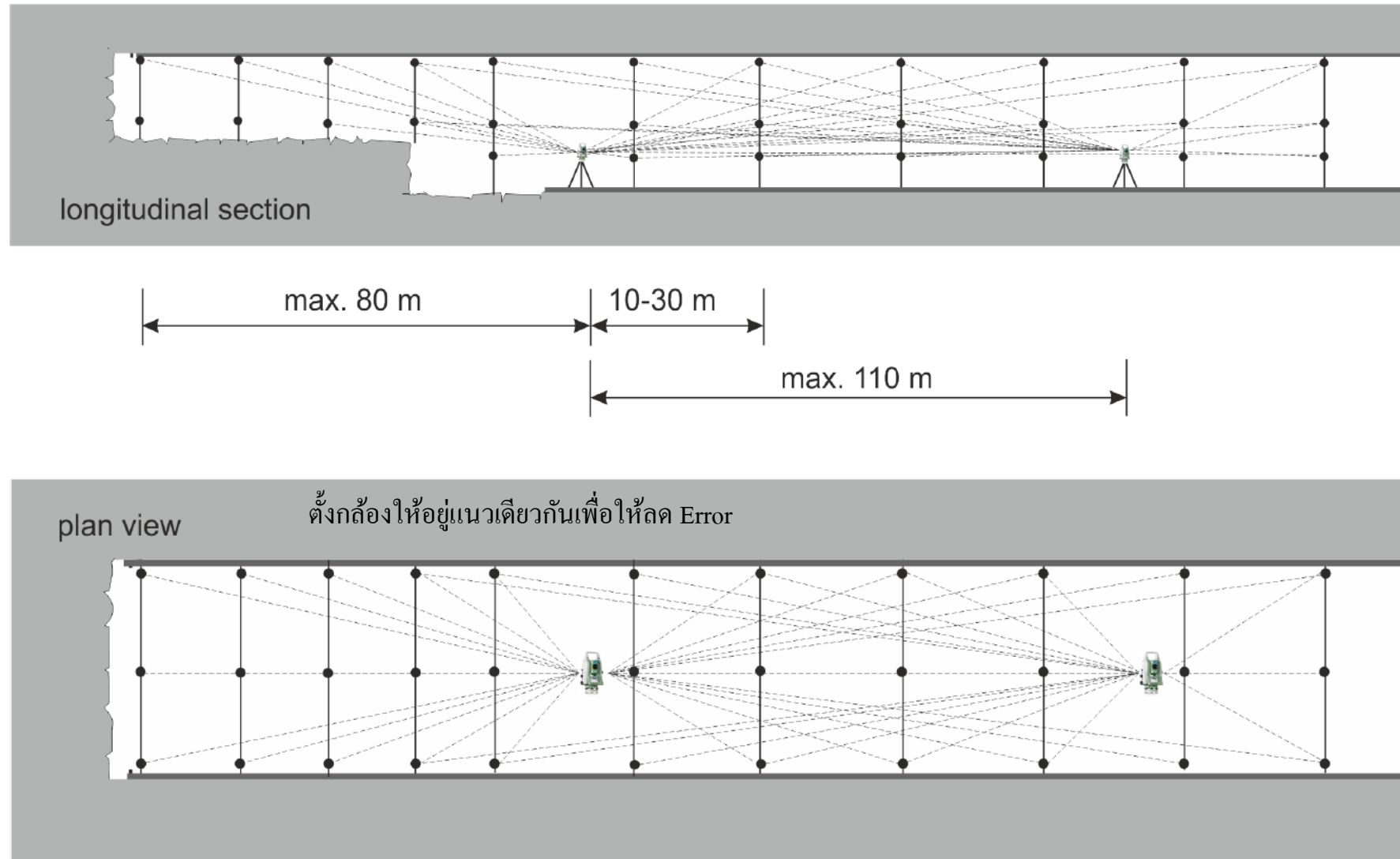
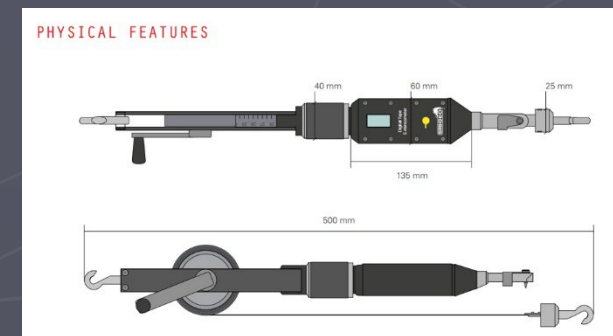
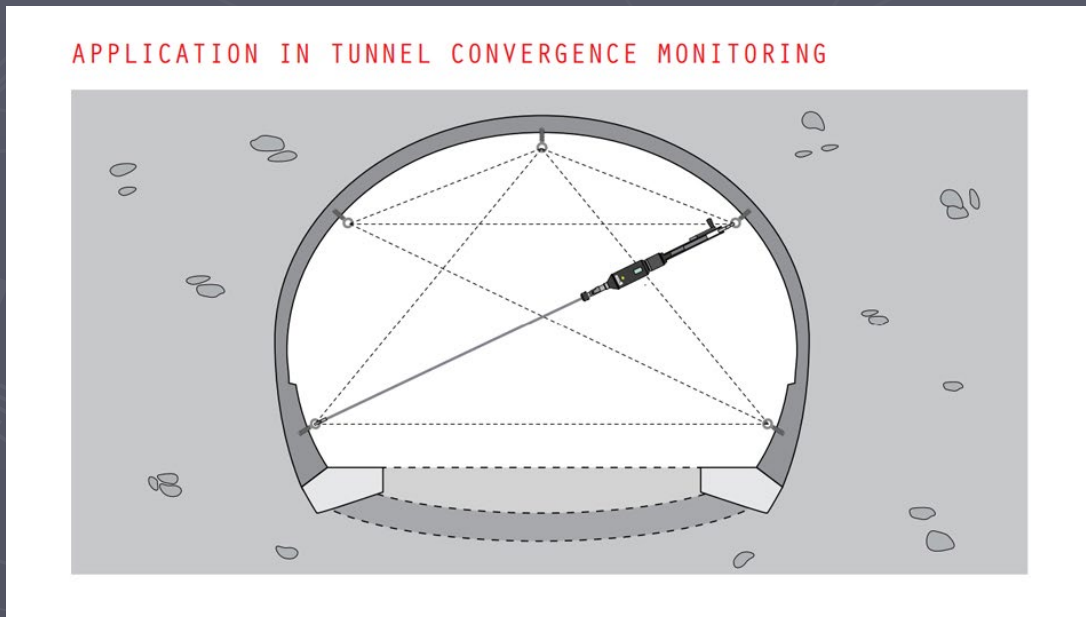


Figure 7. Sketch of an interlinked free station method in the tunnel

วิธีการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของอุโมงค์

- อีกวิธีหนึ่งคือ การเคลื่อนตัวเชิงสัมพัทธ์ (Relative displacements) ระหว่างจุด 2 จุด ในที่คือ Convergence ข้อสังเกตจะวัดได้จากเครื่องมือ Tape measurements, Extensometer, Measuring anchor

การอ่านทำได้ง่าย แต่จะไม่สามารถแยกการเคลื่อนตัวในแต่ละระนาบได้





อุปกรณ์สำรวจระยะการเคลื่อนตัว
แบบอัตโนมัติ

Method of Convergence Monitoring

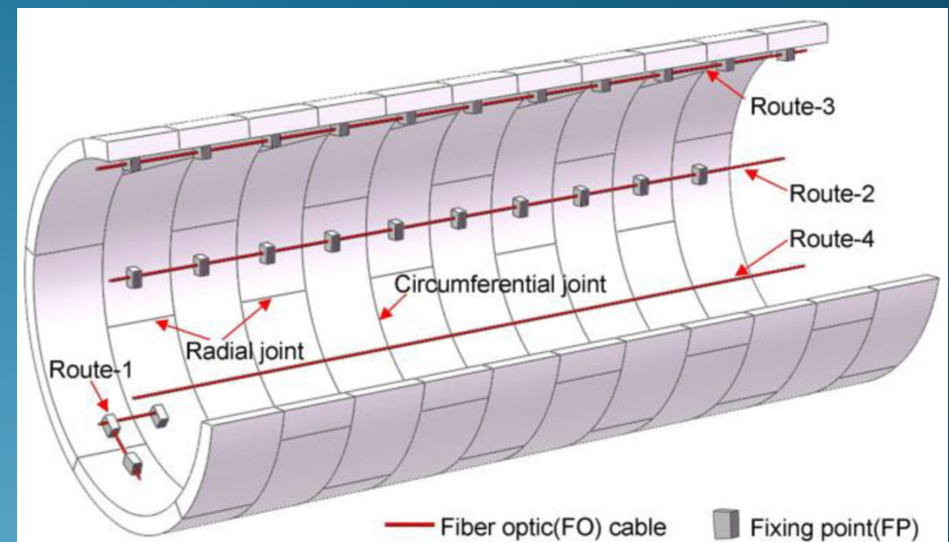
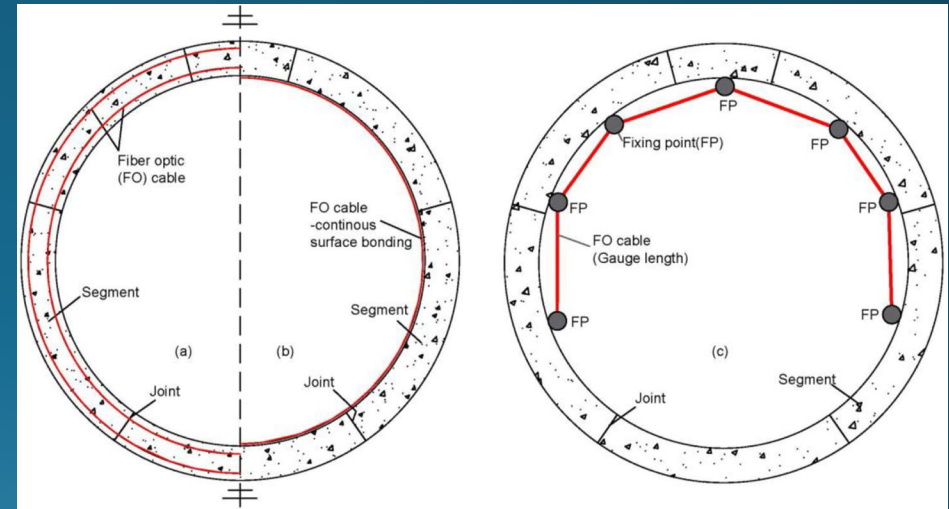
Tunnel Construction requirements on Tunnel convergence monitoring

Less common on construction site:

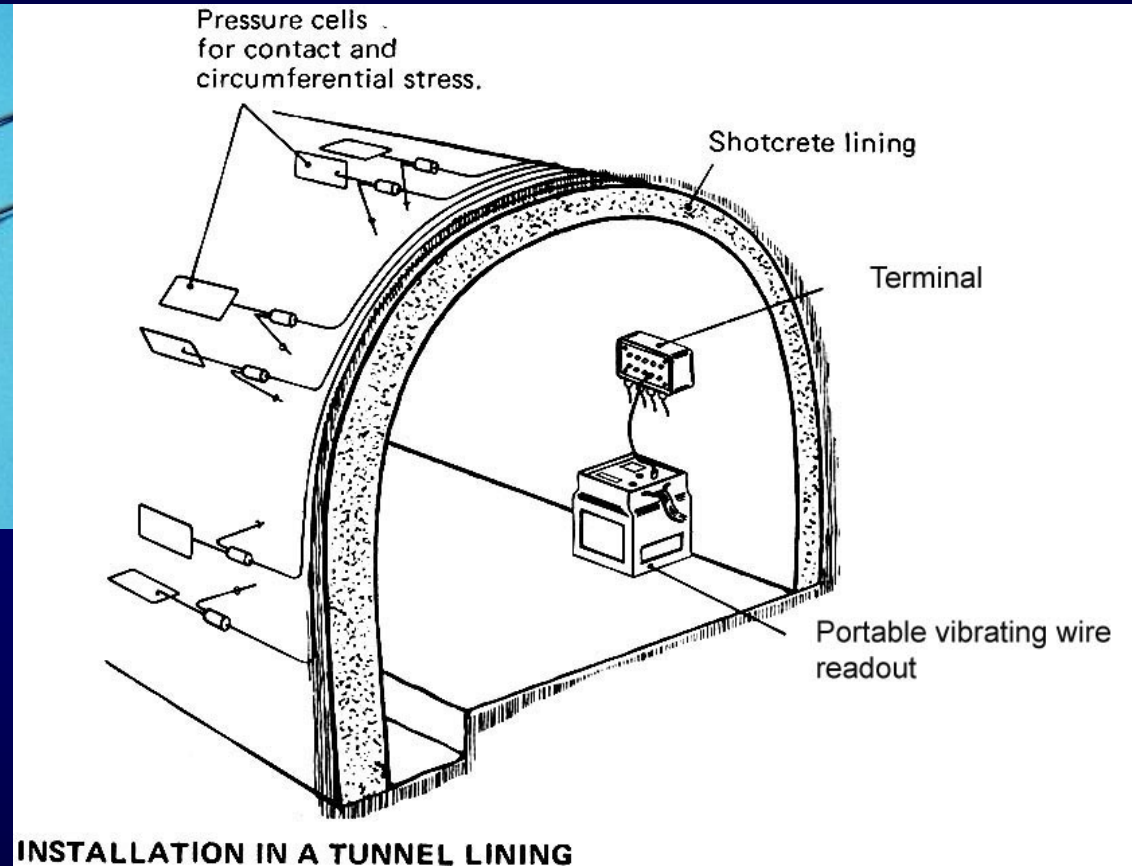
- Laser Scanning
- Fiber Optic Cable



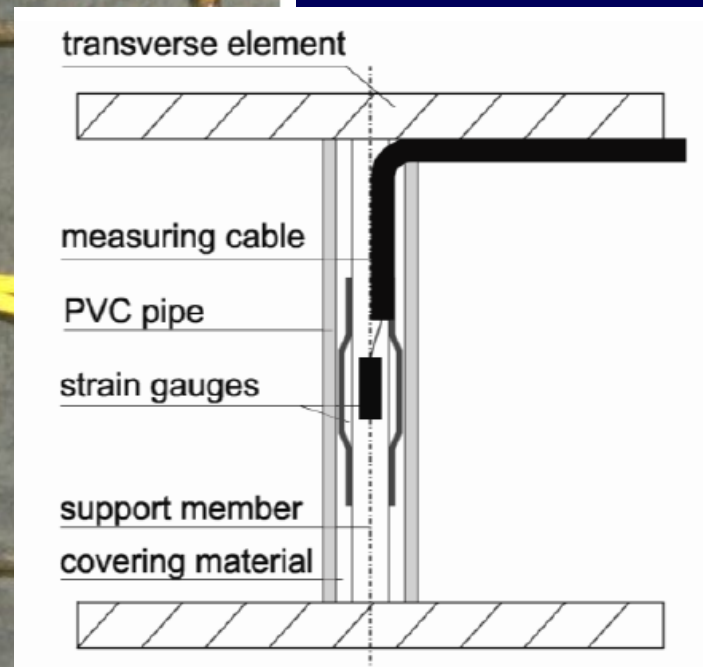
(a)



Earth Pressure Cells



Strainmeter

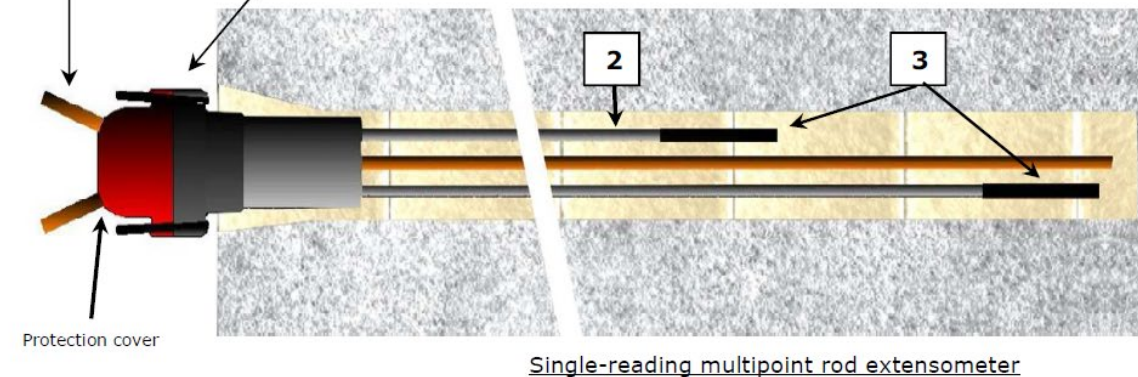
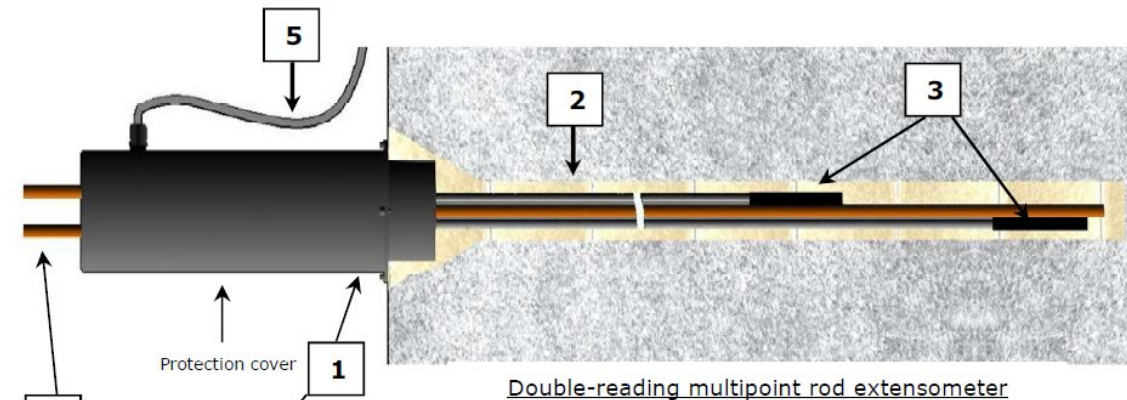


Borehole Rod Extensometer

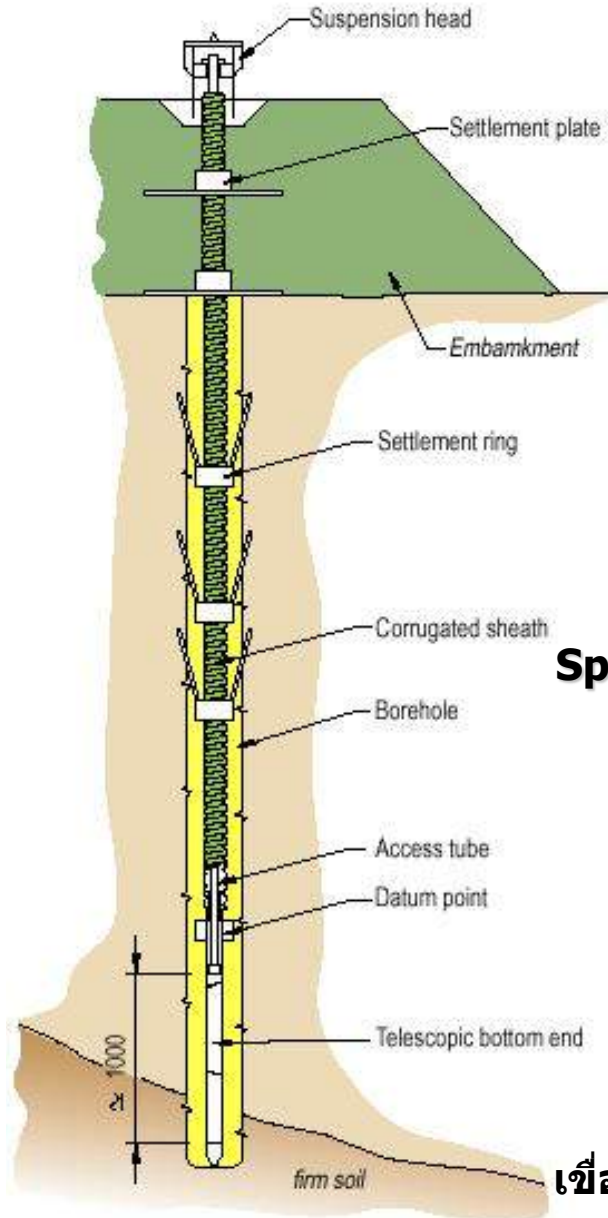
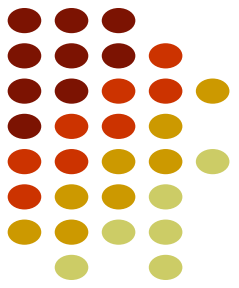
Description

Multipoint rod extensometer consists in:

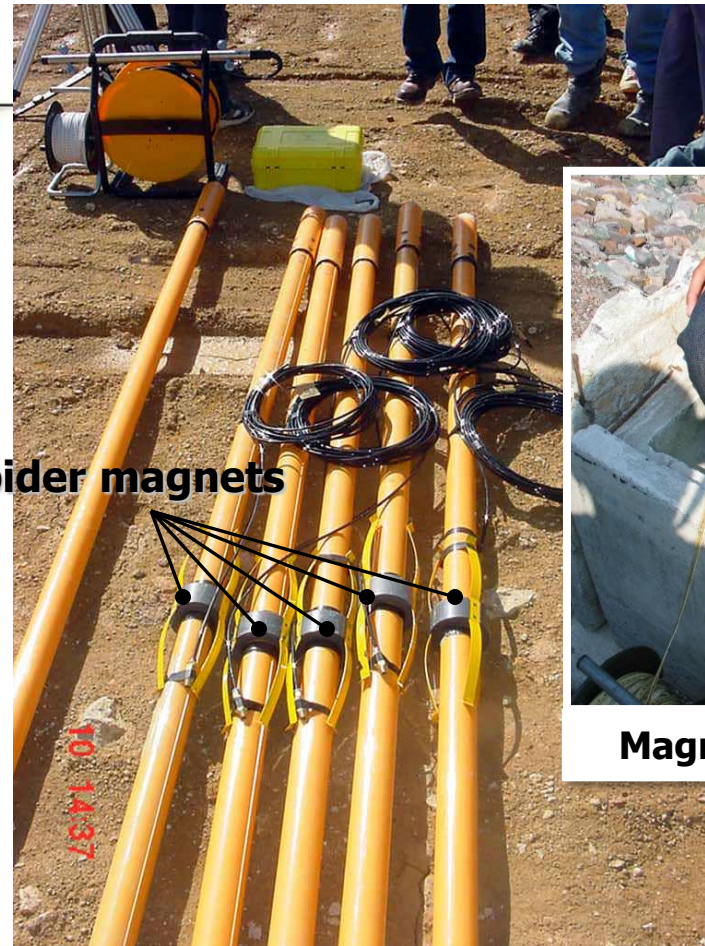
1. A head where the rods are fixed.
2. One or more measuring rods. Available in fiberglass, steel or invar. They are protected from grouting through a protection sleeve.
3. Bottom anchors. One for each measuring rod, to be grouted in the ground.
4. 2 grouting tubes.
5. Multicore cable (optional) for connection to a readout.



Magnetic Settlement gauge



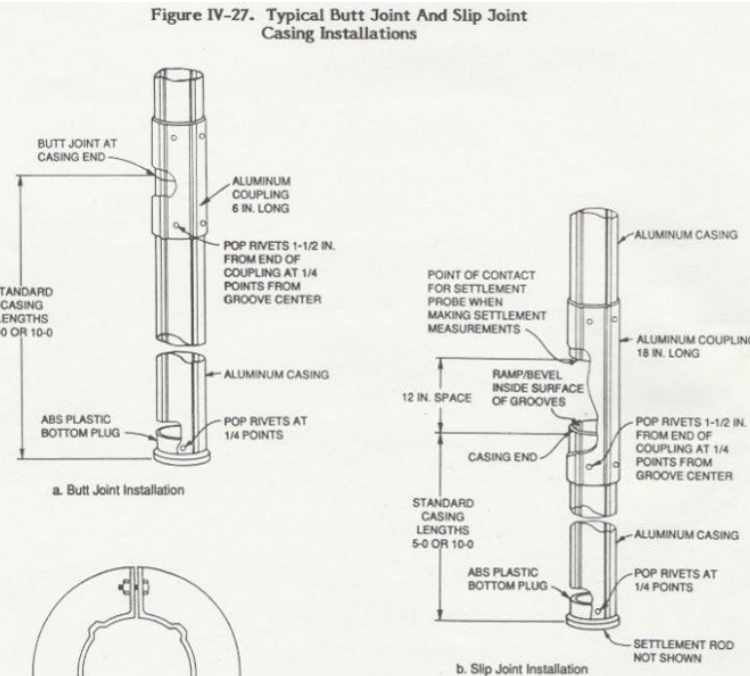
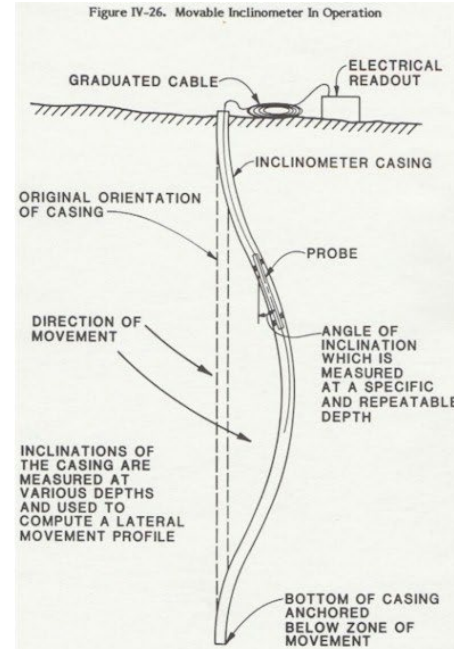
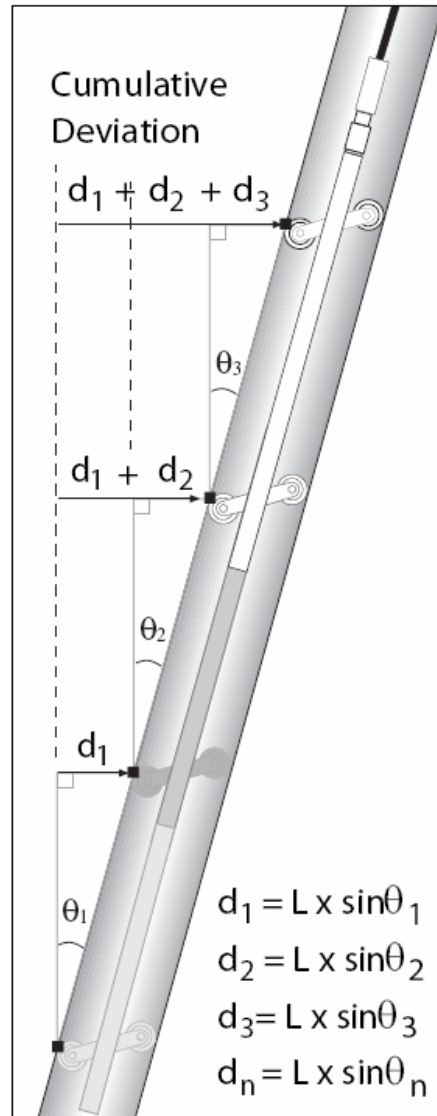
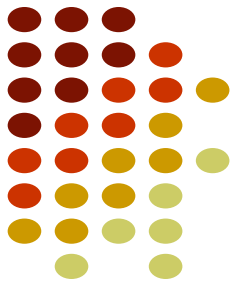
Spider magnets



Magnetic Settlement Probe

เขื่อนดินปิดช่องเขาดำ เขื่อนขุนด่านปราการชล จังหวัดนครนายก

Inclinometer – Slope indicator



ตัวอย่างการติดตั้ง

Case 1: Shallow tunnel in soft ground beneath groundwater table

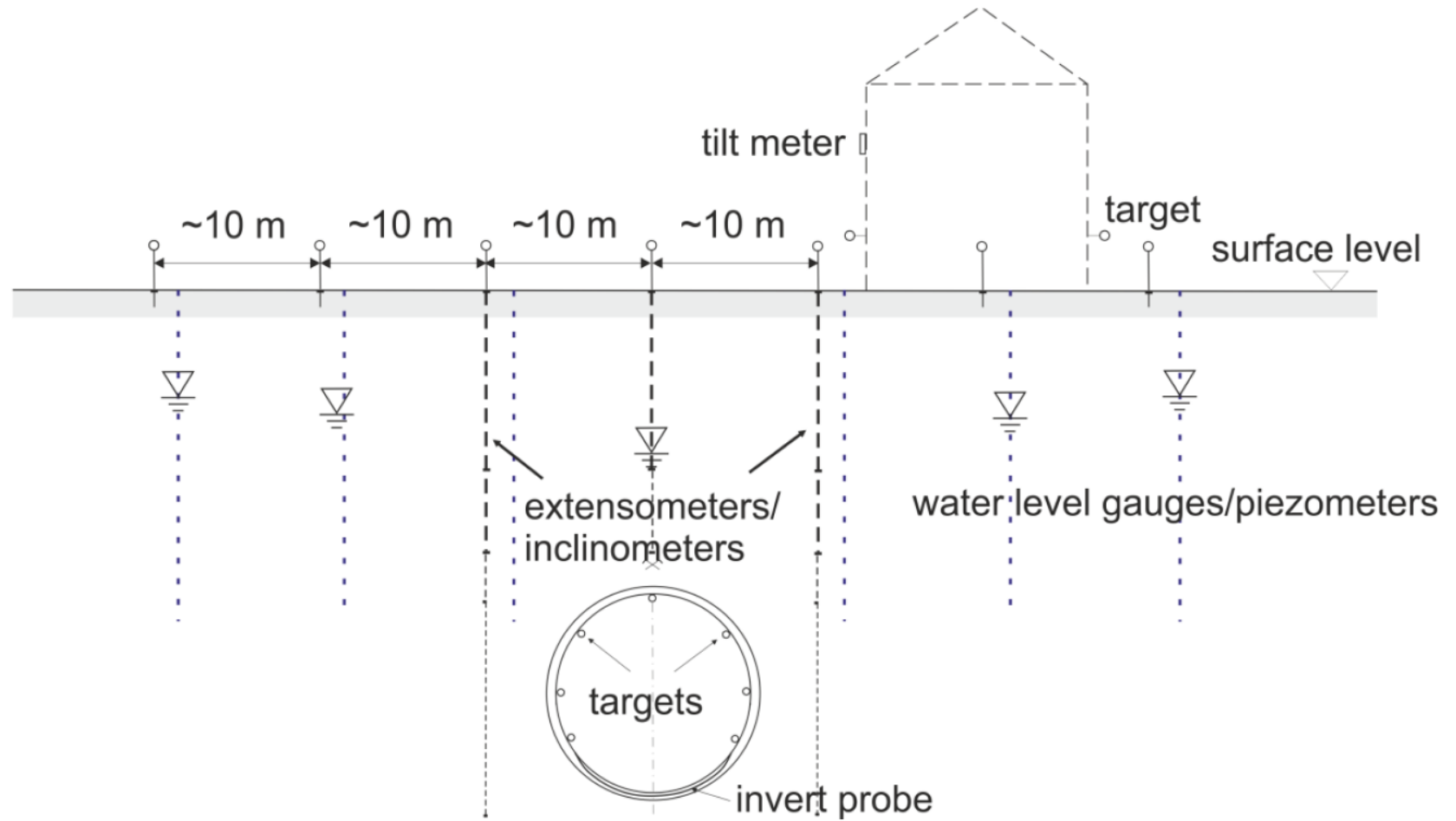


Figure 2: Surface monitoring cross section consisting of targets, extensometers, piezometers, and tilt meters on the same station of a monitoring section in the tunnel

Case 2: Tunnel in blocky rock mass

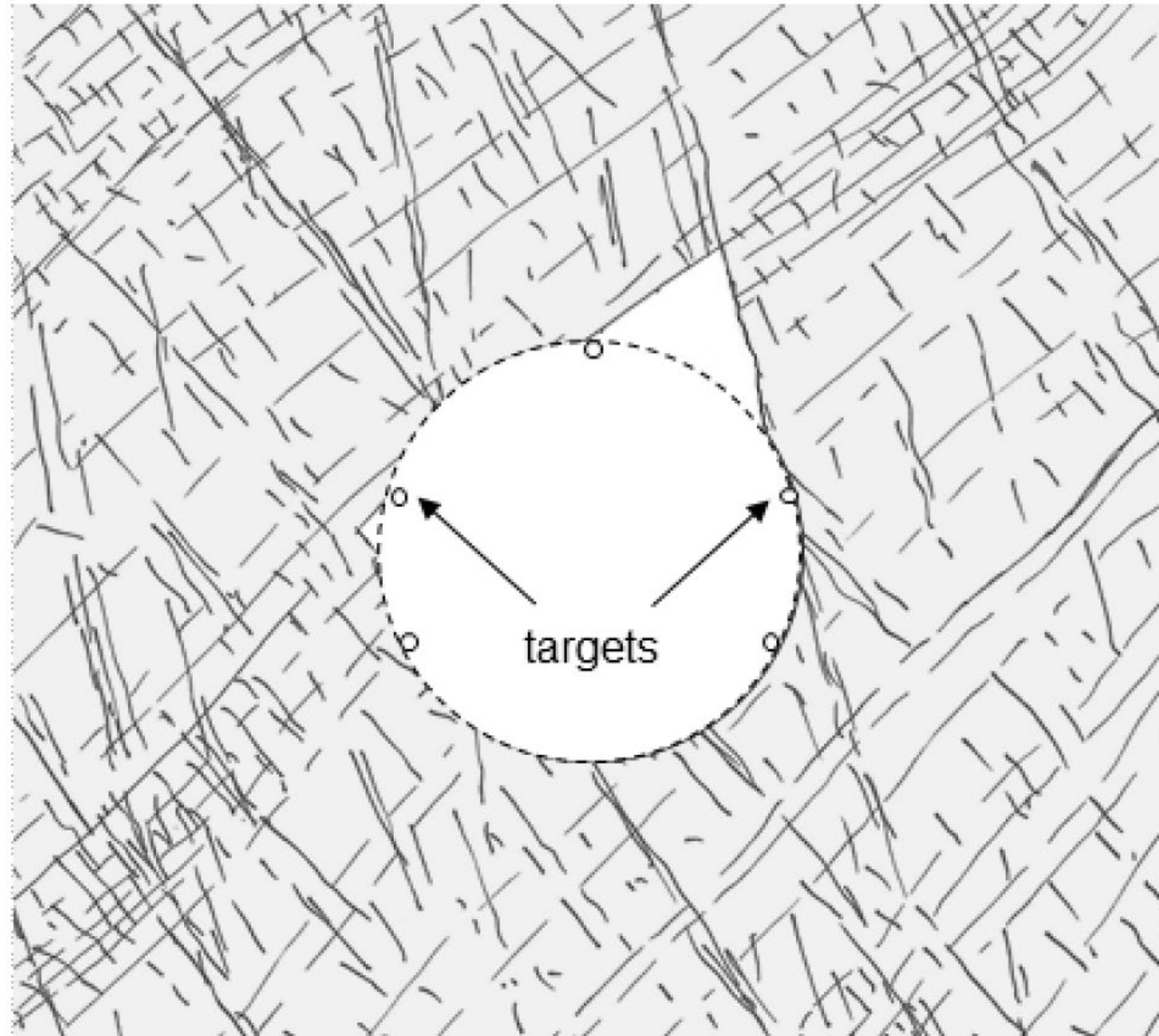


Figure 3. Blocky rock mass with potential for overbreak; with installed monitoring targets

Case 3: Tunnel with moderate to high overburden in bedded or foliated rock mass

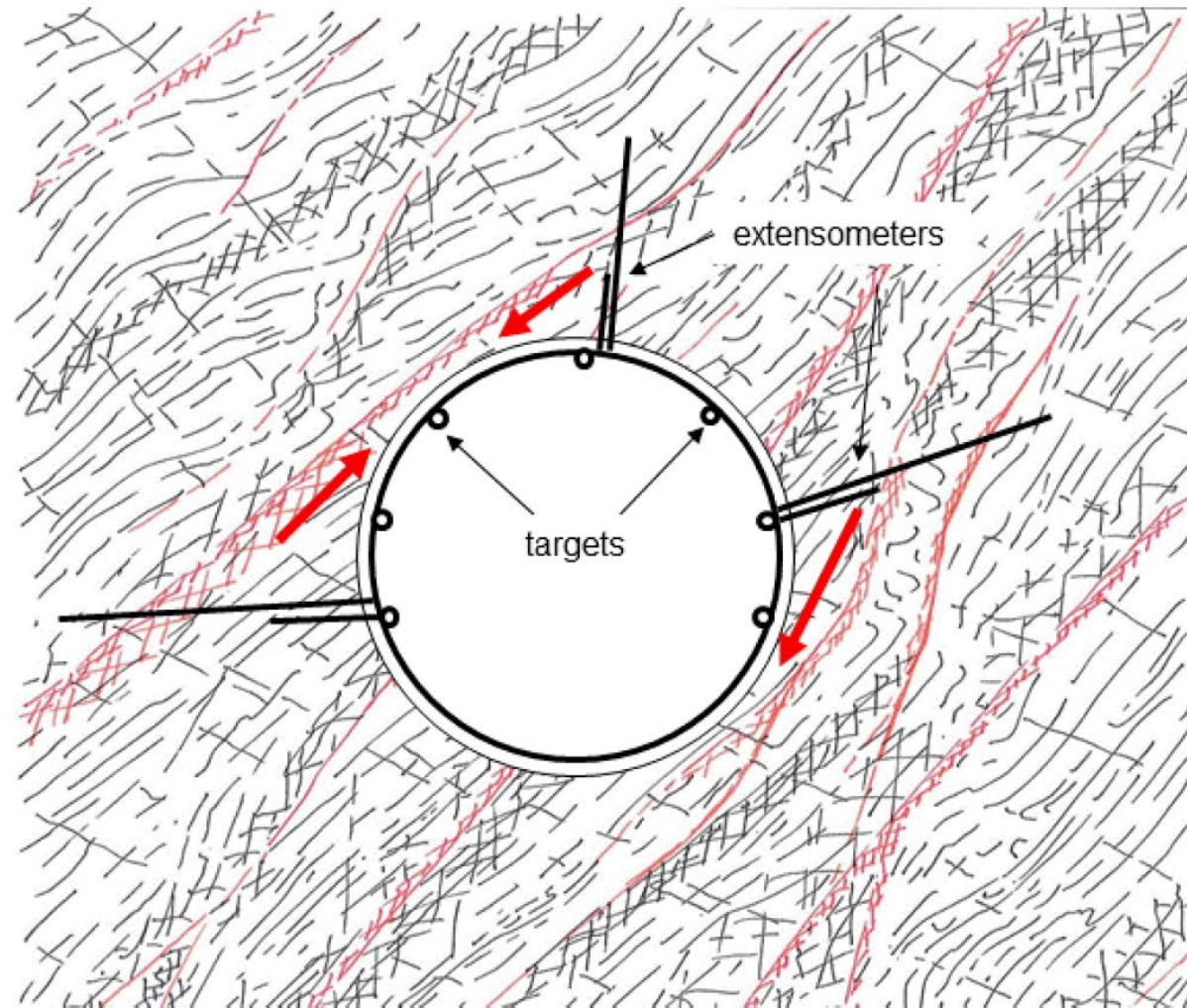


Figure 4. *Bedded/foliated rock mass with the potential to shear along faults/slickensides/foliation/bedding and dilate perpendicular to foliation/bedding; equipped with monitoring targets and optional extensometers; arrows indicate assumed shearing along faults*

Case 4: Tunnel in swelling ground

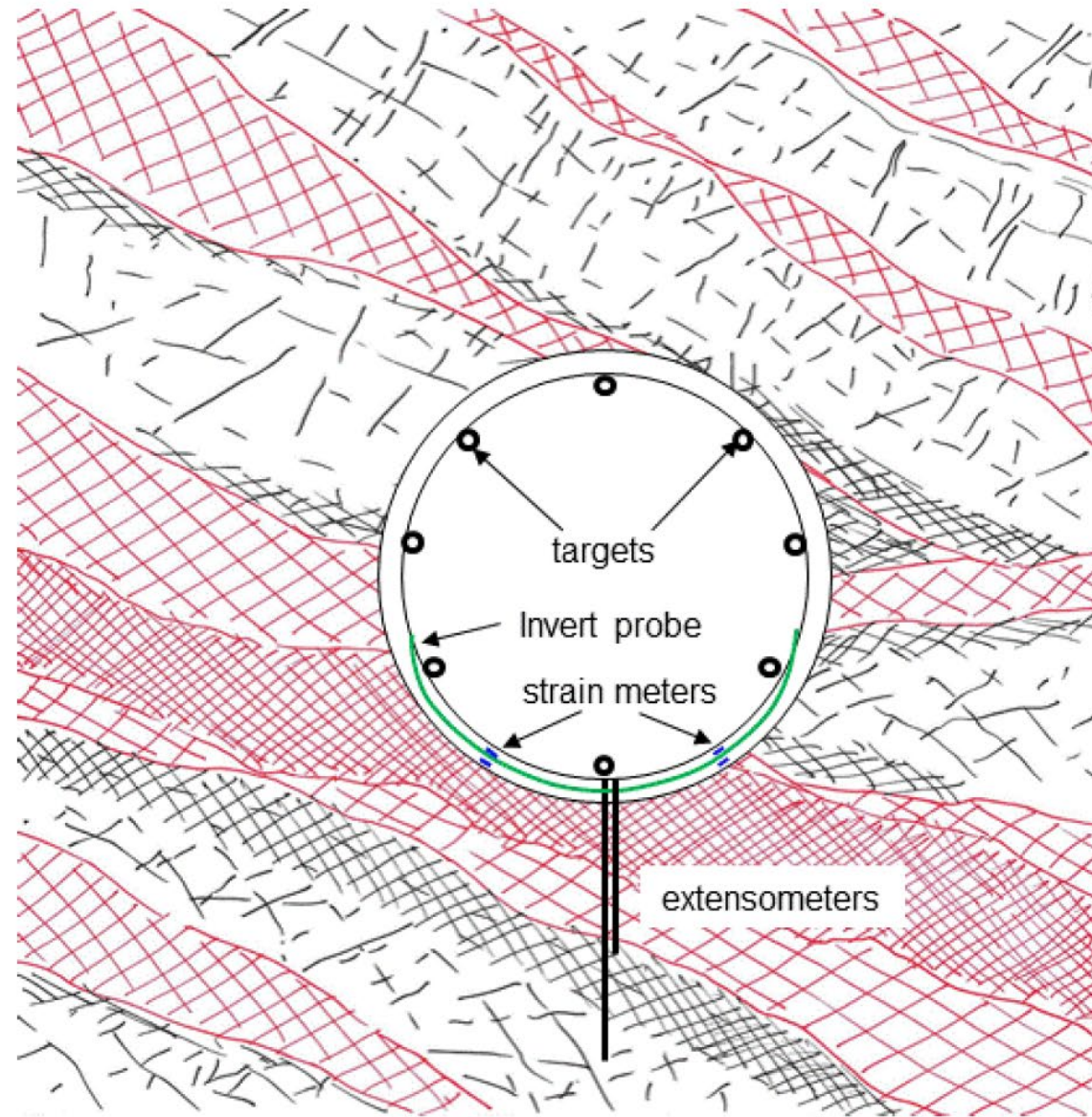
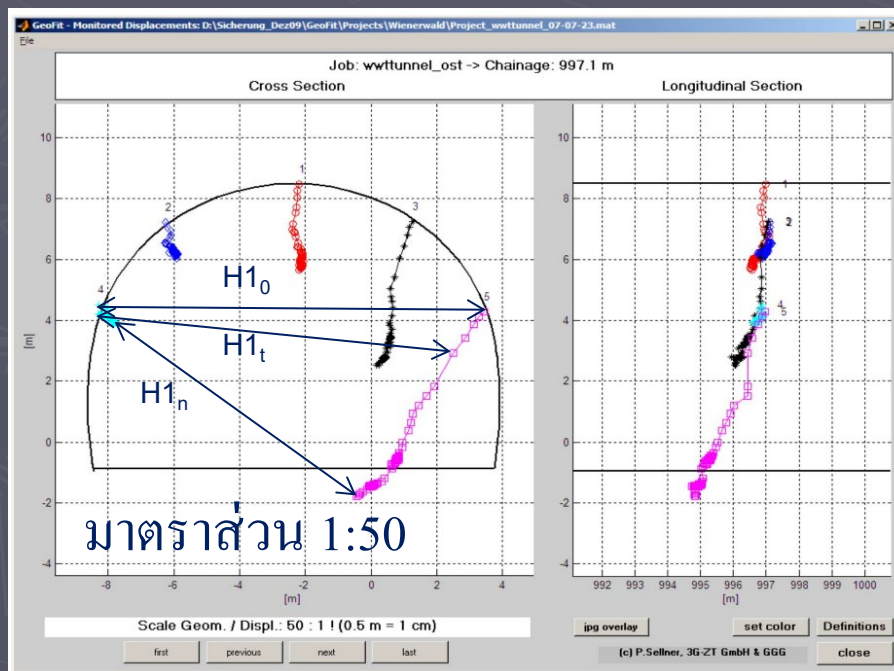
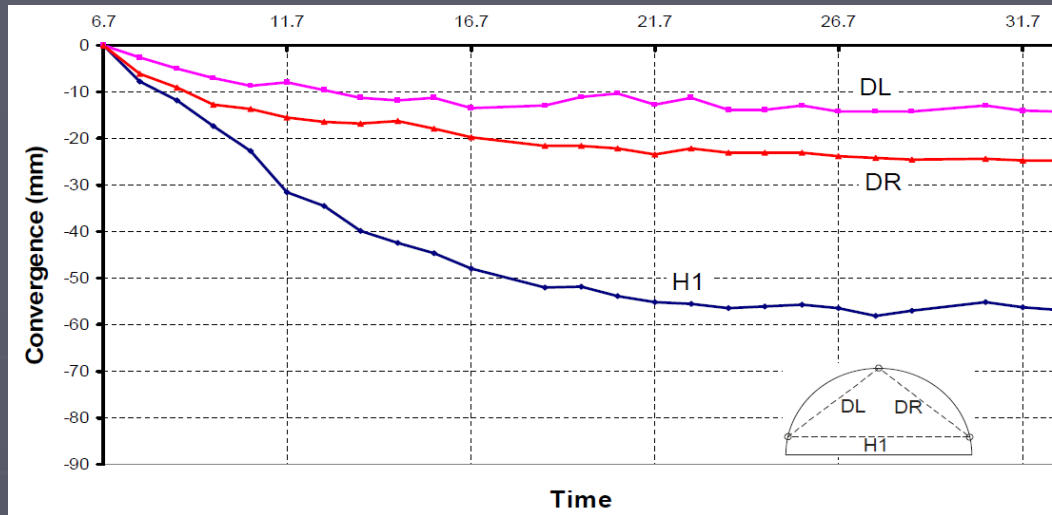
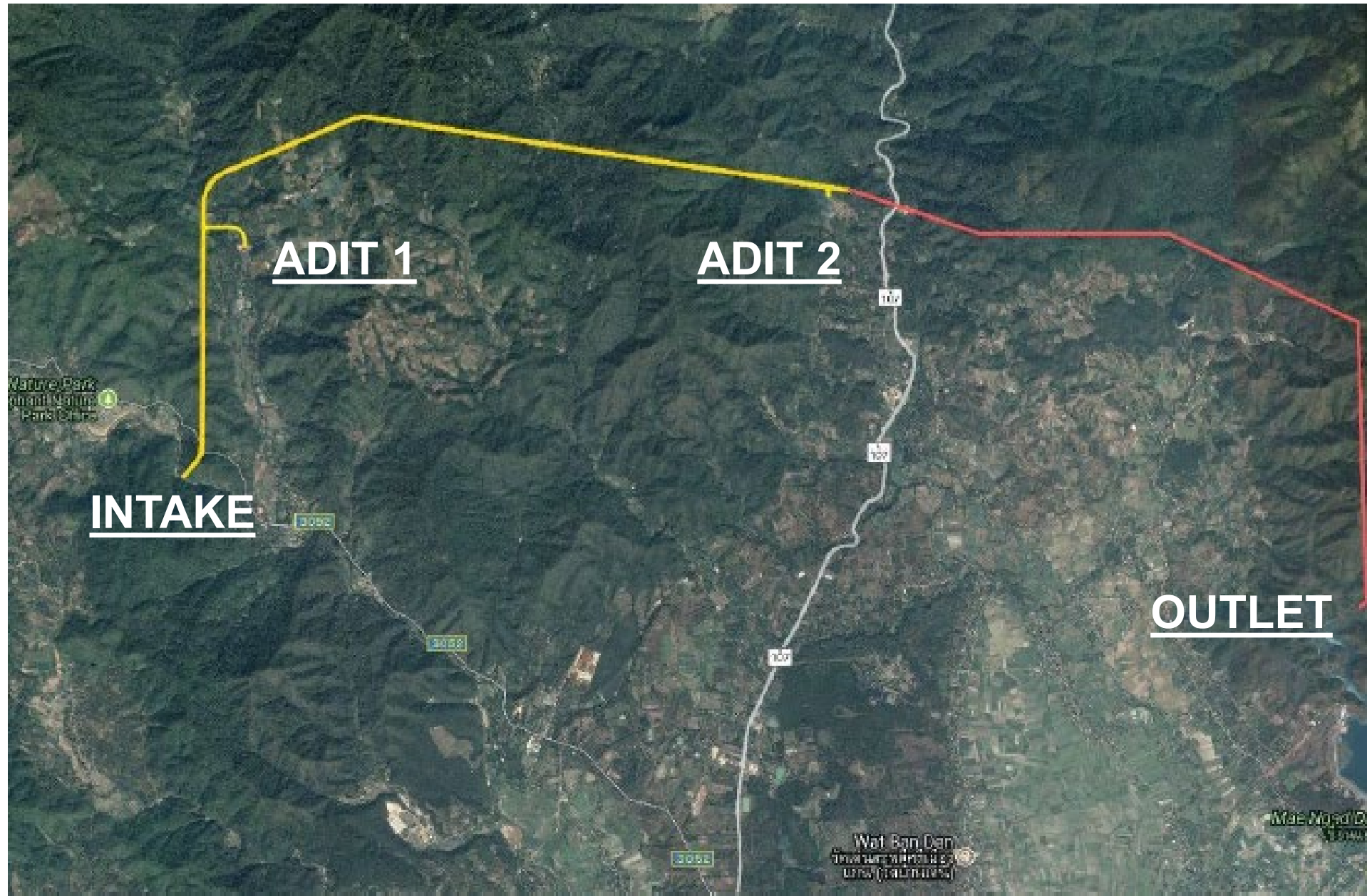


Figure 5. Rock mass with swelling potential; equipped with targets, extensometers combined with measurement point, invert probe, and strain meters installed

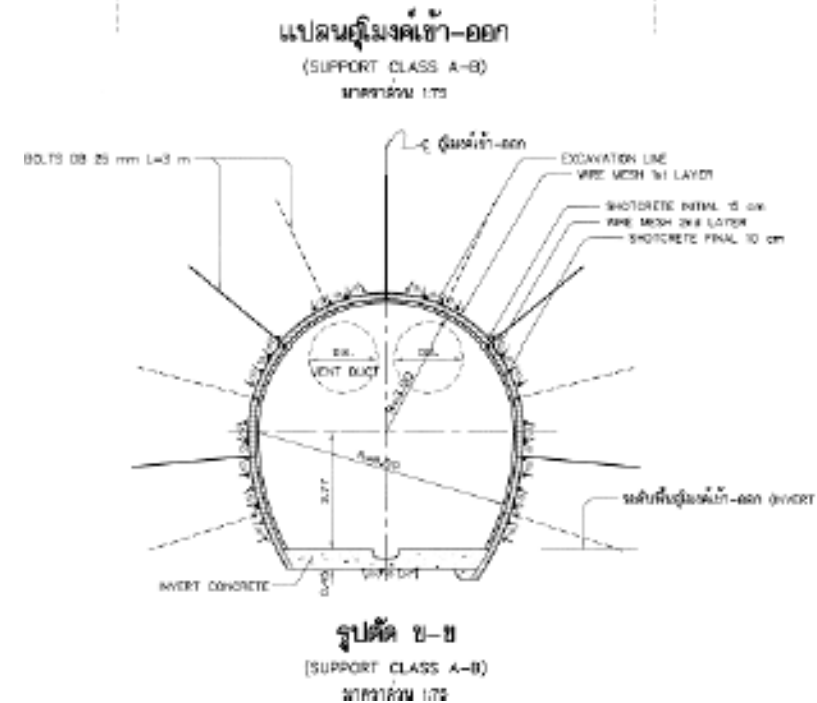
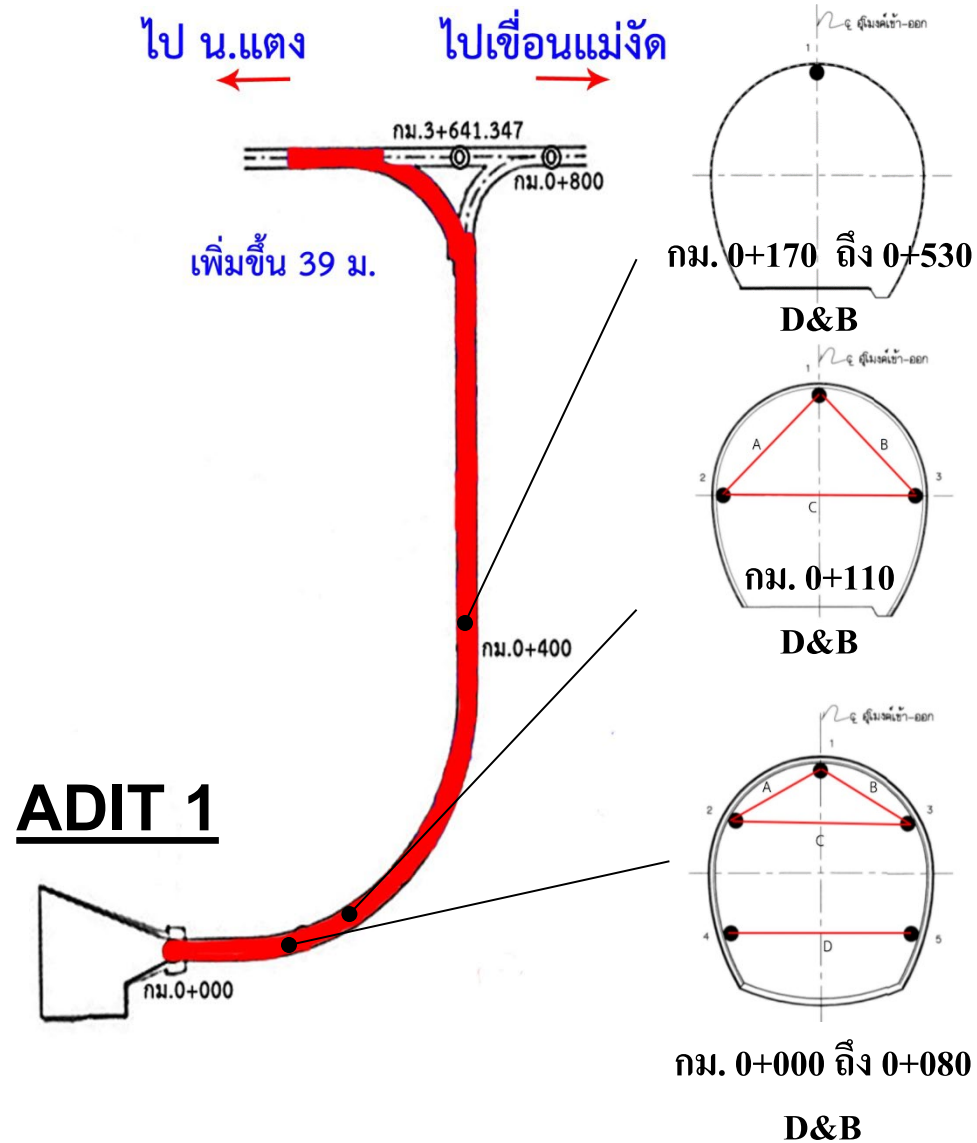


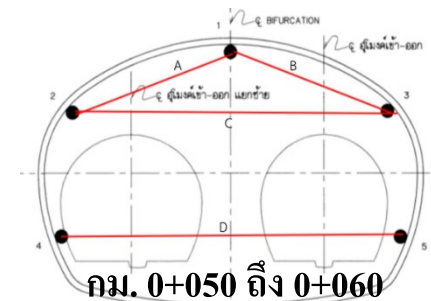
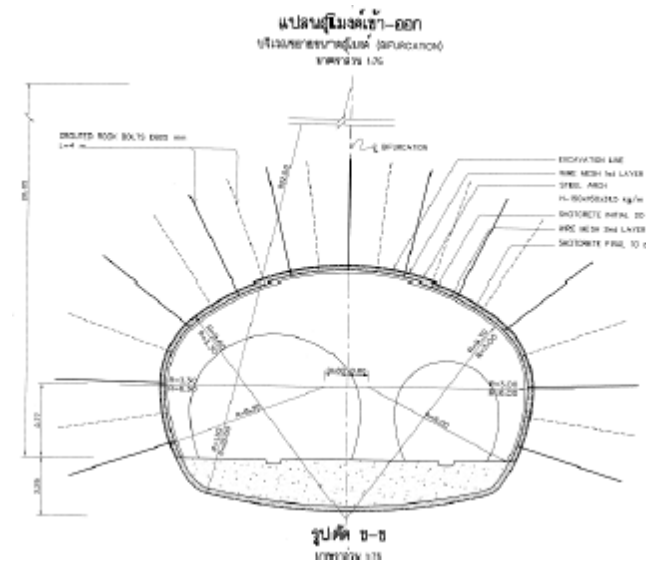
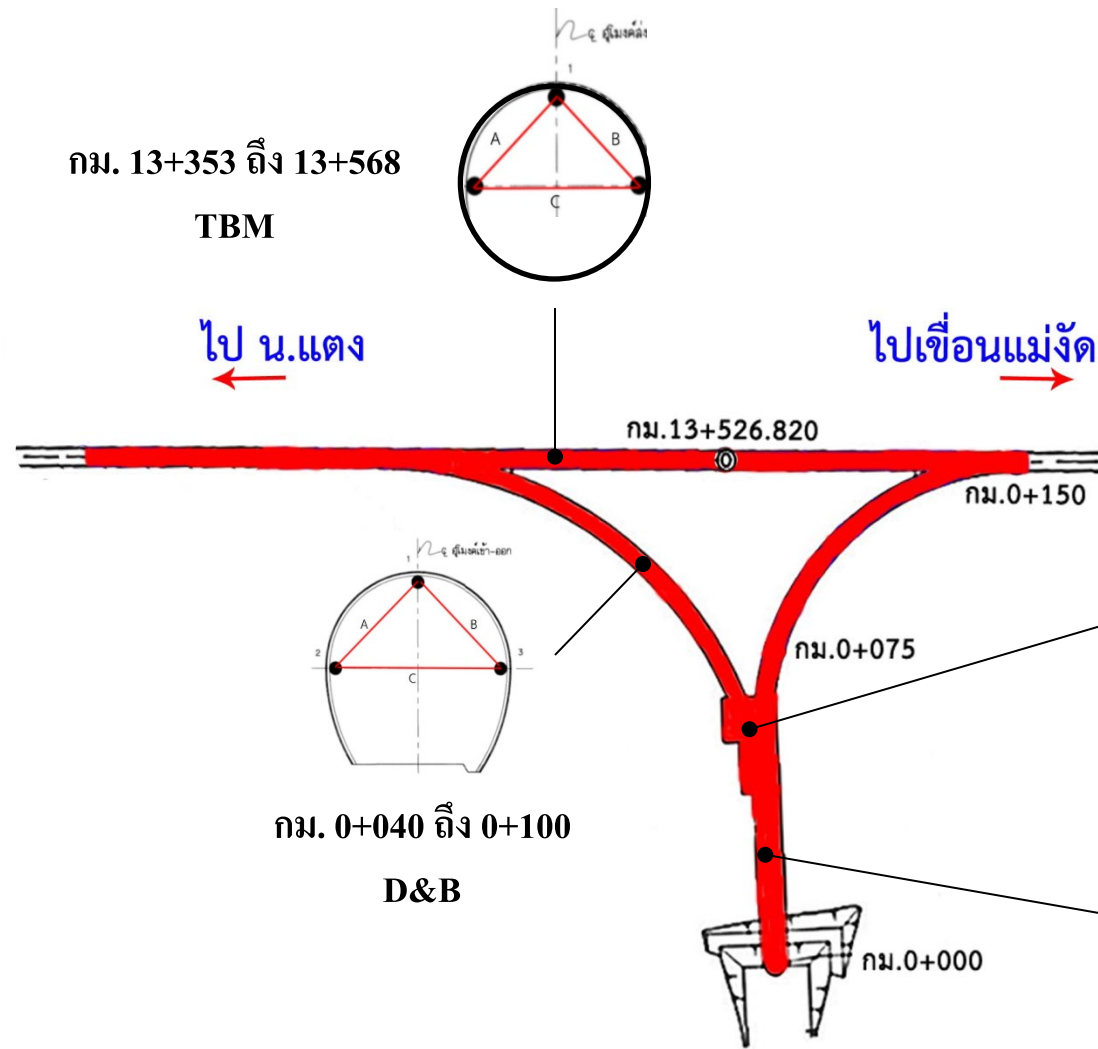
การแสดงผลด้วย การเคลื่อนตัว
สัมพัทธ์ (relative displacements)
อาจไม่ระบุการเคลื่อนตัวที่ไม่
เท่ากันในแต่ละทิศทางได้
(anisotropic displacements)

แนวอุโมงค์ แม่แตง - แม่จัด

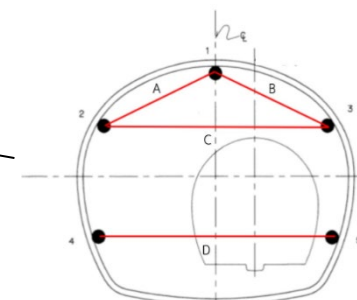


หน้าตัดทั่วไปและตำแหน่งการตรวจวัด





D&B

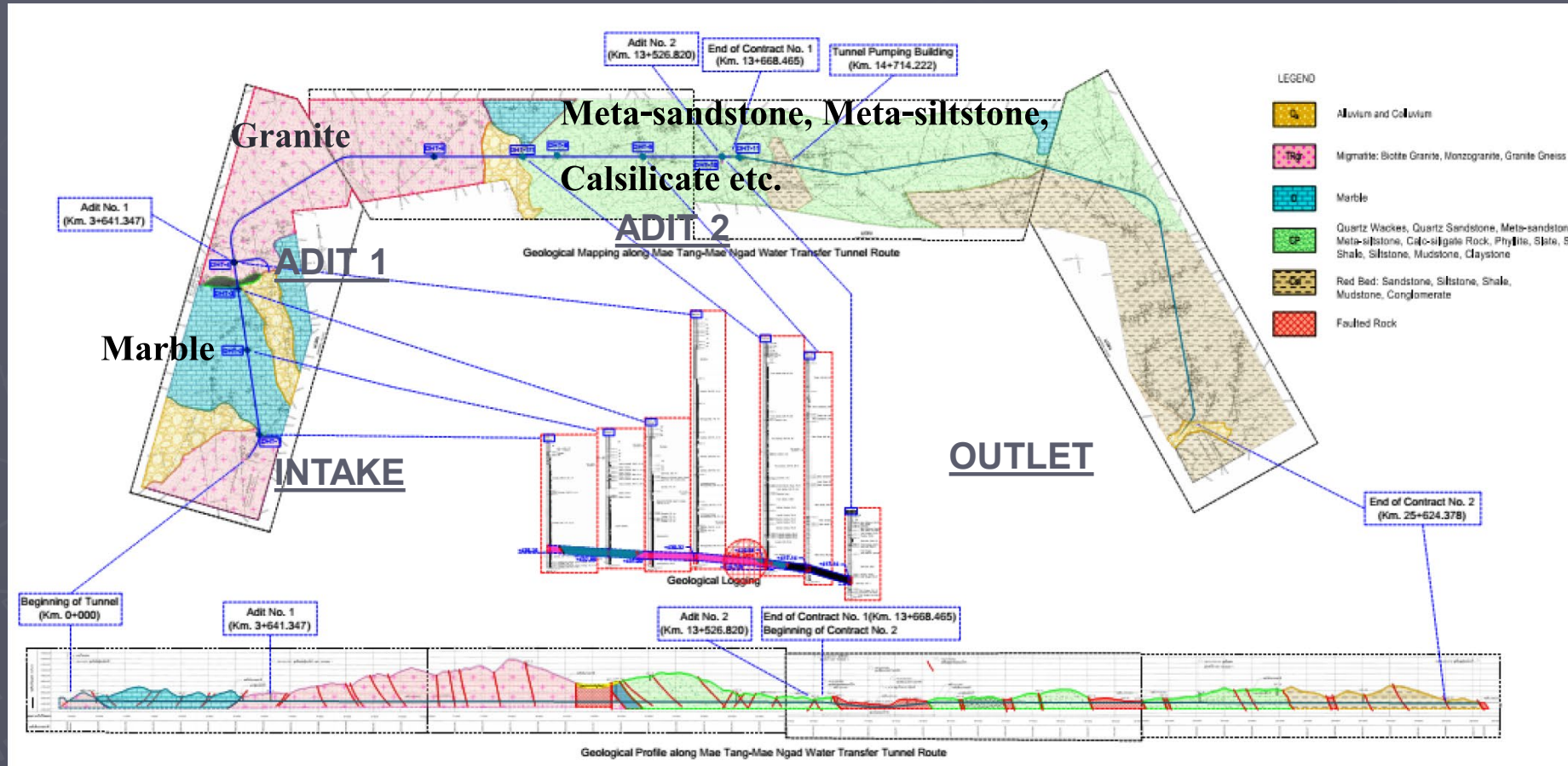


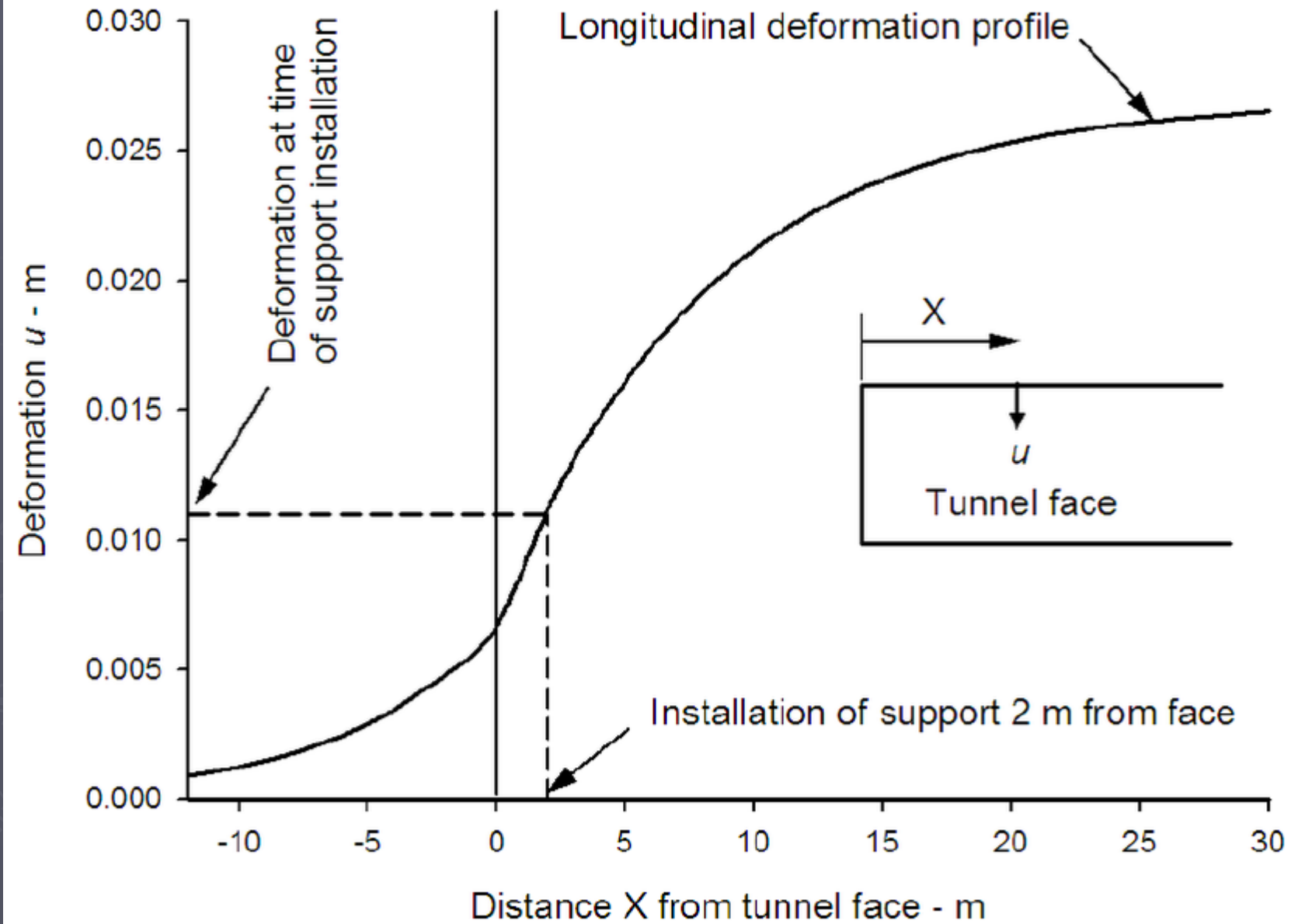
กม. 0+000 ถึง 0+040

D&B

ADIT 2

ลักษณะธรณีวิทยาของแนวอุโมงค์ แม่แตง - แม่จัด





Reference Point

ในความเป็นจริง ค่าการเคลื่อนตัวที่ตรวจวัดได้
ยังไม่เป็นการเคลื่อนตัวทั้งหมดที่เกิดขึ้น เพราะ
ก่อนติดตั้ง Reference Point ได้เกิดการเคลื่อนตัว
ก่อนแล้วตั้งแต่การขุดในช่วงก่อนหน้านี้

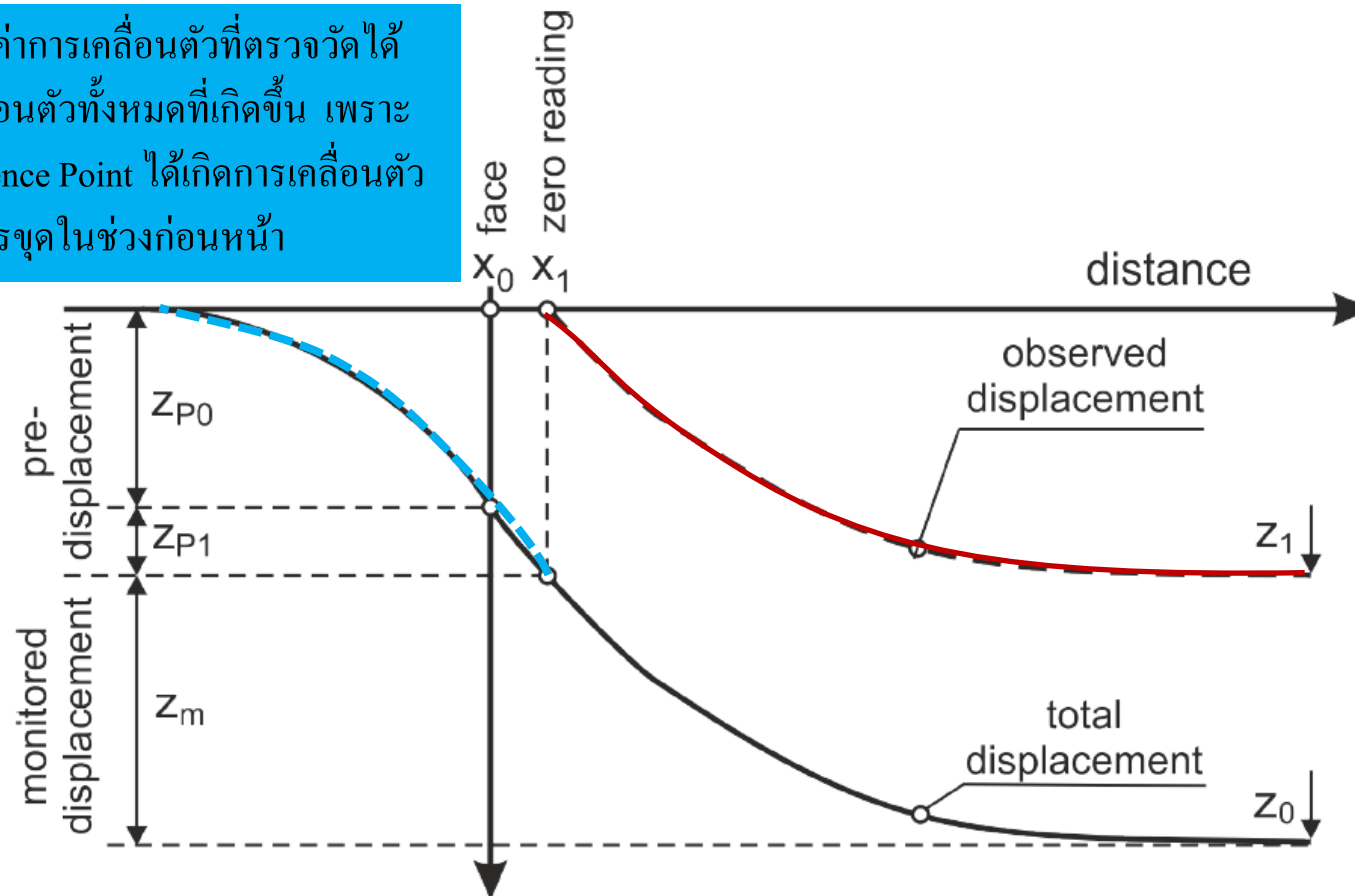
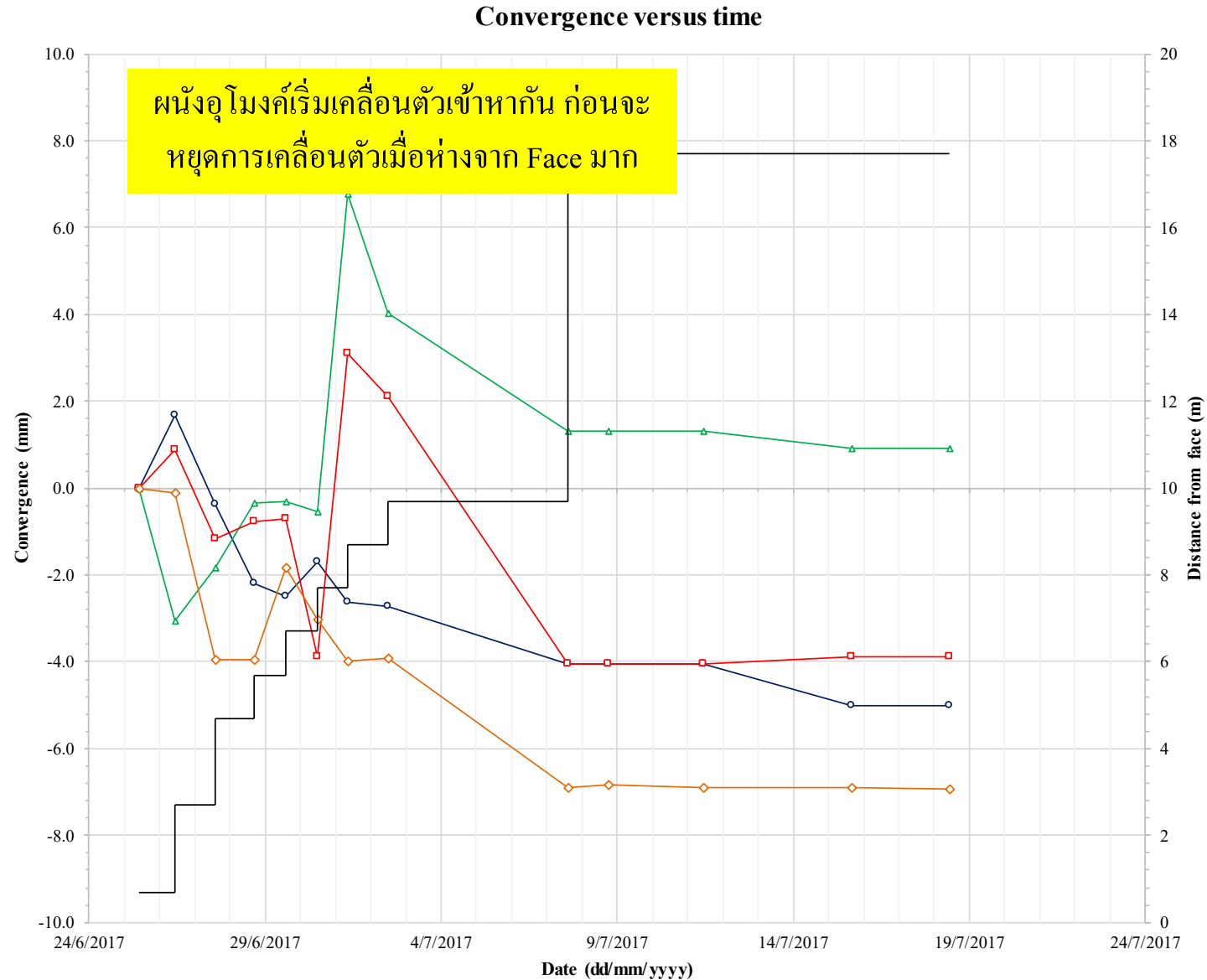


Figure 37. Typical radial displacement development

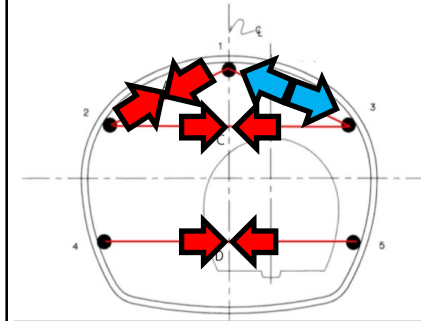
กราฟ Convergence ตามเวลา



Section Name

Adit.2 No. 0+020.30 (ข-ข)

Legends



Num.	Length
1-2	A
1-3	B
2-3	C
4-5	D

1-2	A	
1-3	B	
2-3	C	
4-5	D	

Num.	Name
1	Face section

1 Face section

Remarks: Shrinks (-), Elongates (+)

Project:	Mae Taeng - Mae Ngud
----------	----------------------

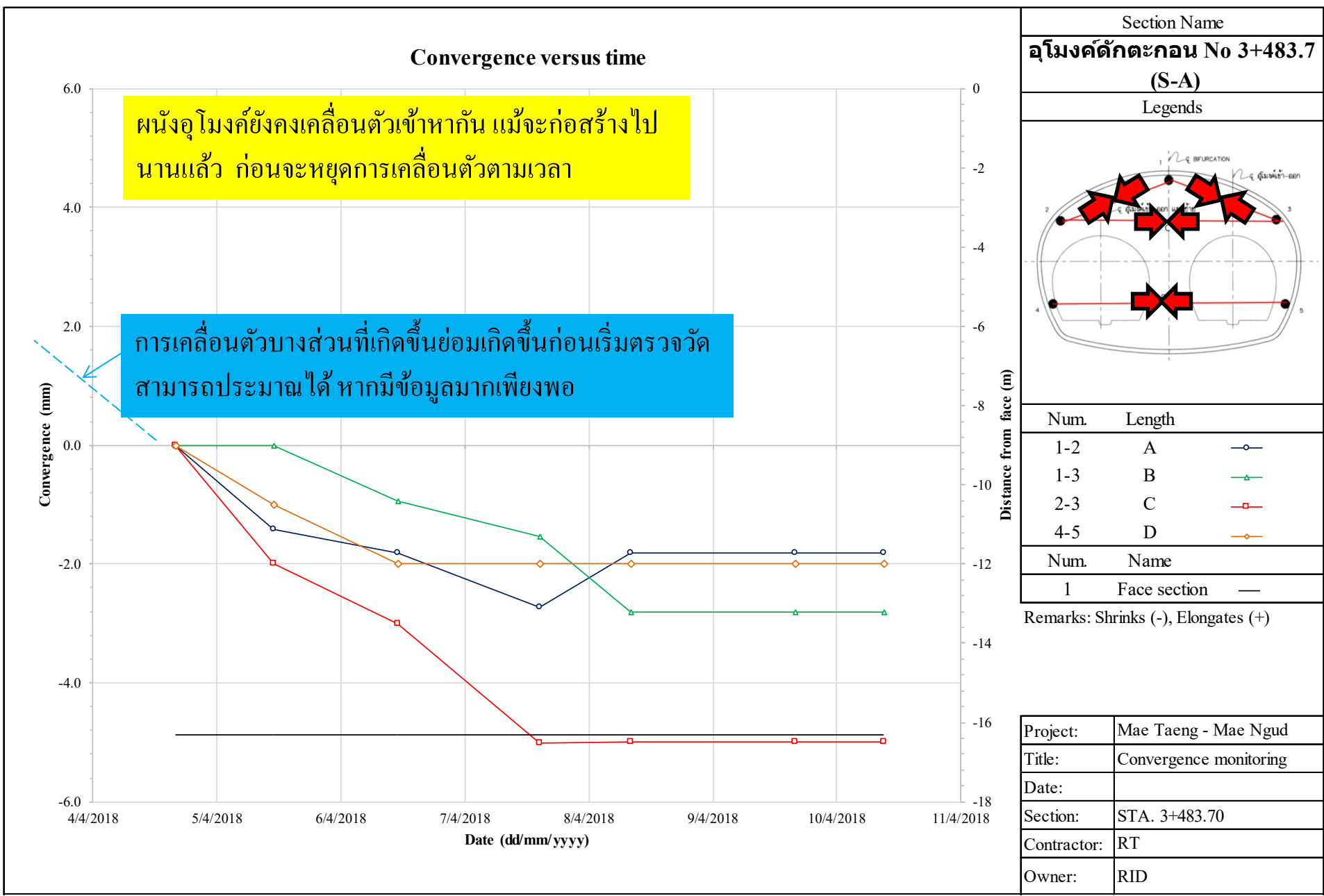
Title:	Convergence monitoring
--------	------------------------

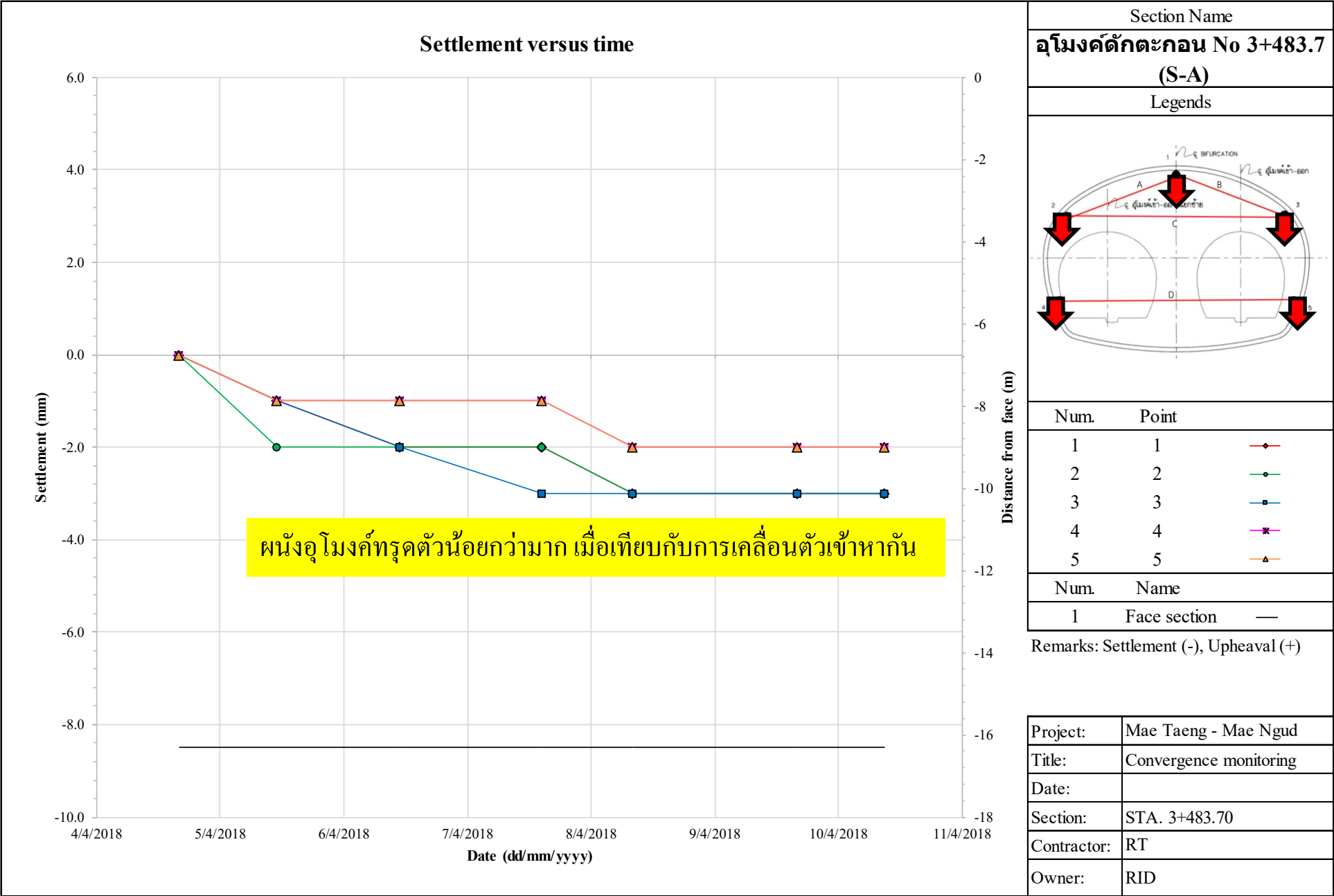
Date:	7/18/2017
-------	-----------

Section:	STA. 0+020.30
----------	---------------

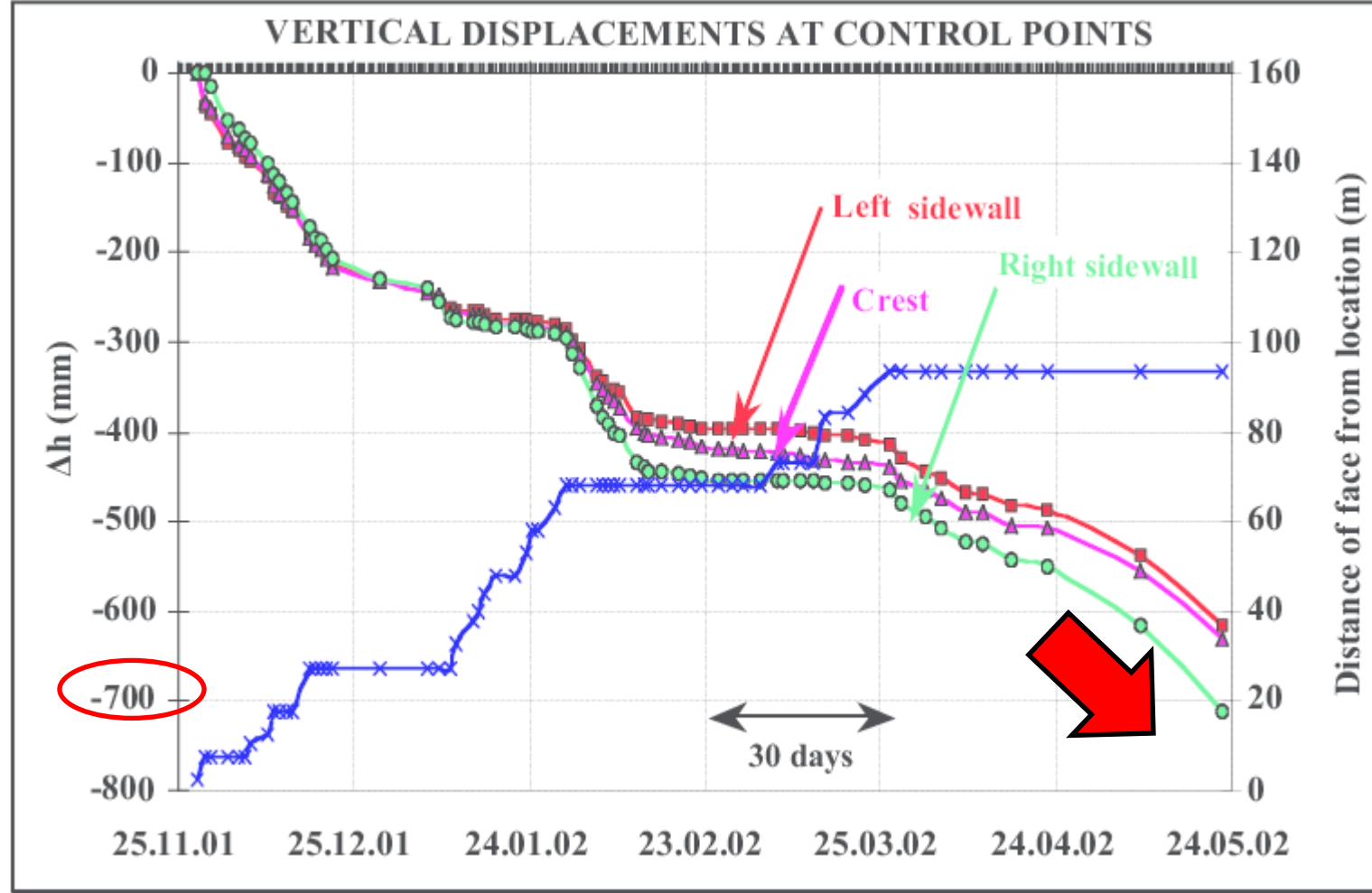
Contractor:	RT
-------------	----

Owner:	RID
--------	-----



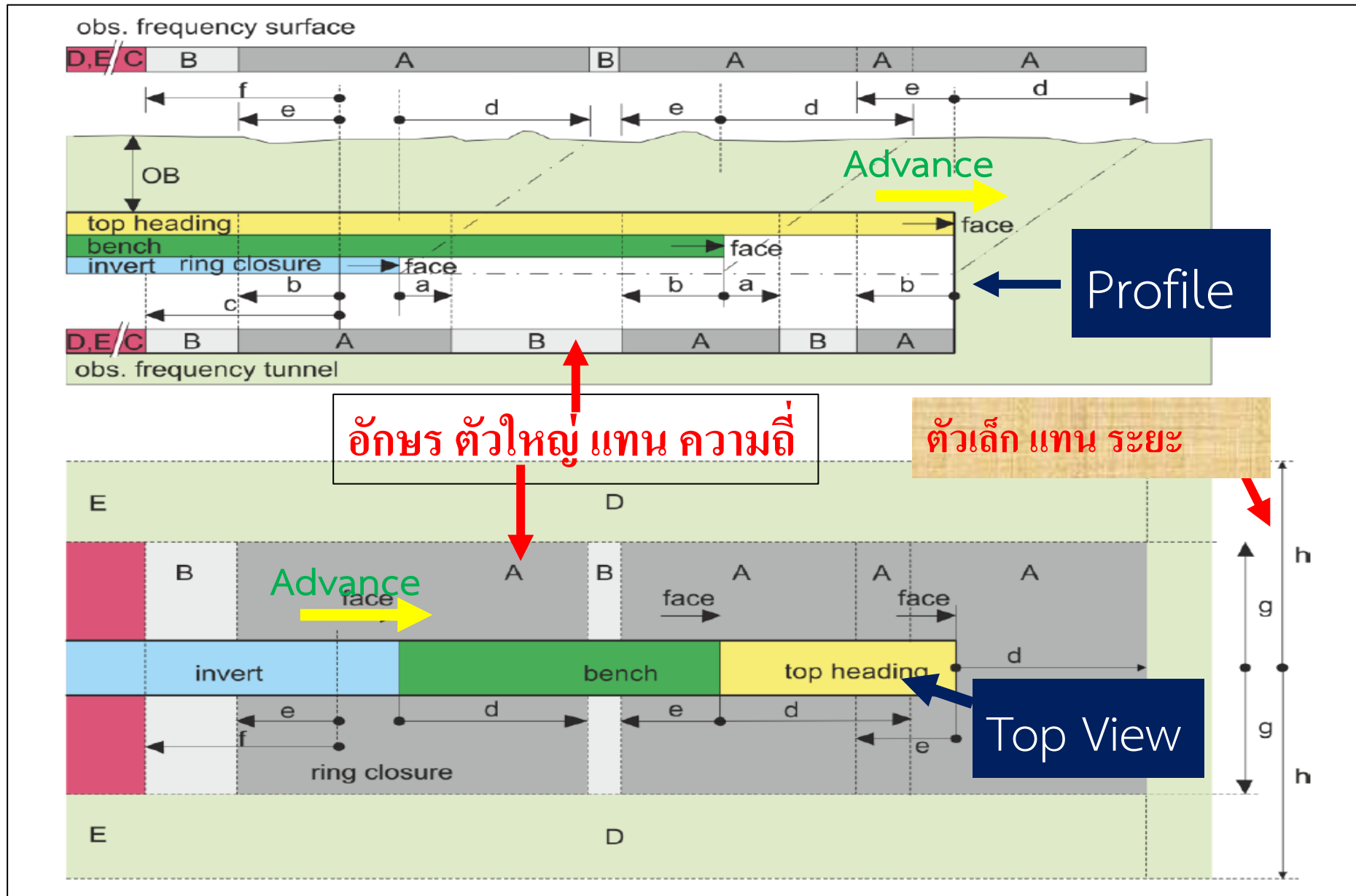


ตัวอย่างผลการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นในกรณีพิบัติ



Monitoring of wall deformation (settlement) in a mountain tunnel. The abrupt increase of settlement after a period of apparent stabilization indicates failure of the tunnel invert. After two consecutive such failures and repairs, the tunnel failed completely as shown by the abrupt increase of settlement at the end of May 2002.

ภาพแสดงพื้นที่ ที่อ่านค่า ด้วยความถี่และระยะต่างกัน



ความถี่การตรวจวัดติดตาม (Frequency)

range	min. observation frequency
A	1 per day
B	2 per week
C	1 per week
D	1 per month
E	as required

Computer Vision Based

Tunnel Construction requirements on Tunnel convergence monitoring

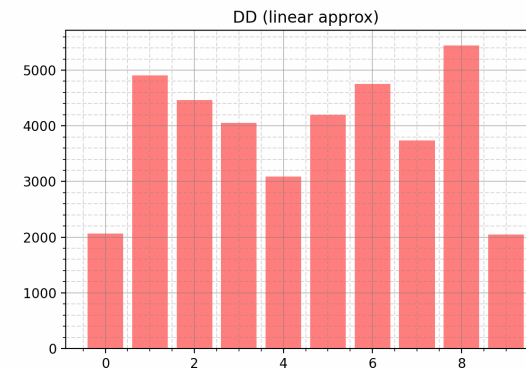
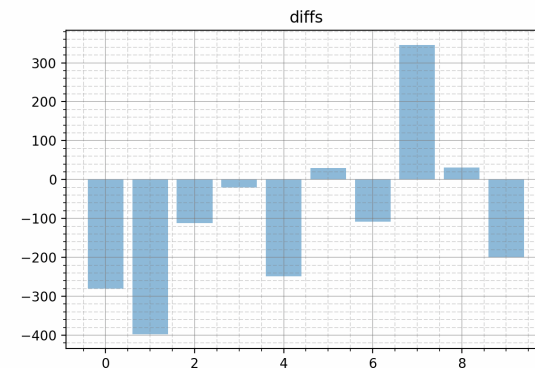
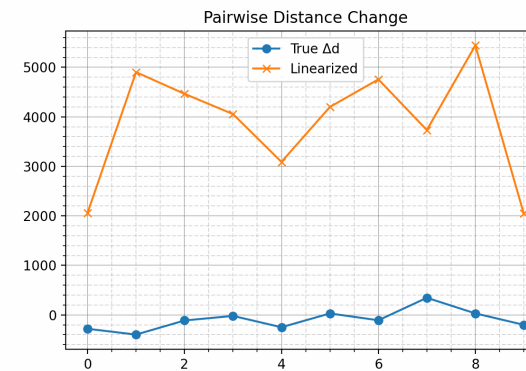
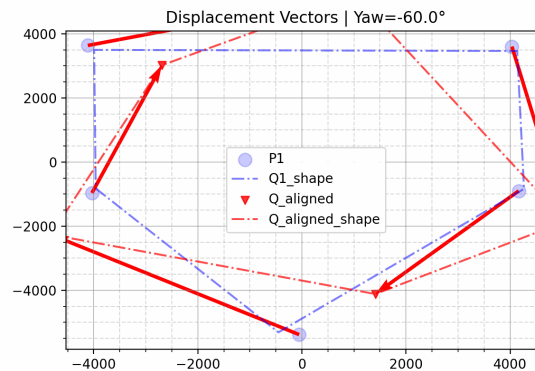
AI DRIVEN CONVERGENCE MONITORING

New Proposed Method (powered by Computer Vision and New Algorithm IDE) use itself as reference frame to compare the movement across time periods. This improve workflow and applicable for both manual and automation. The data will be transmitted to cloud and visualized realtime in remote computer.



New Proposed Algorithm (IDE) use pairwise distance data to align geometric points to its pervious state and retrieve approximate deformation.

The movement generally combination of deformation + translation.

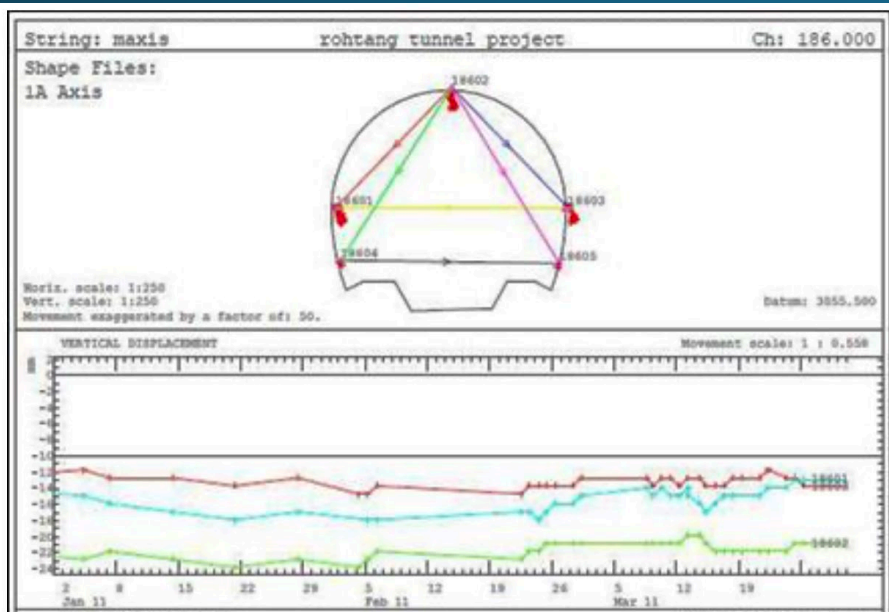


Data Representation

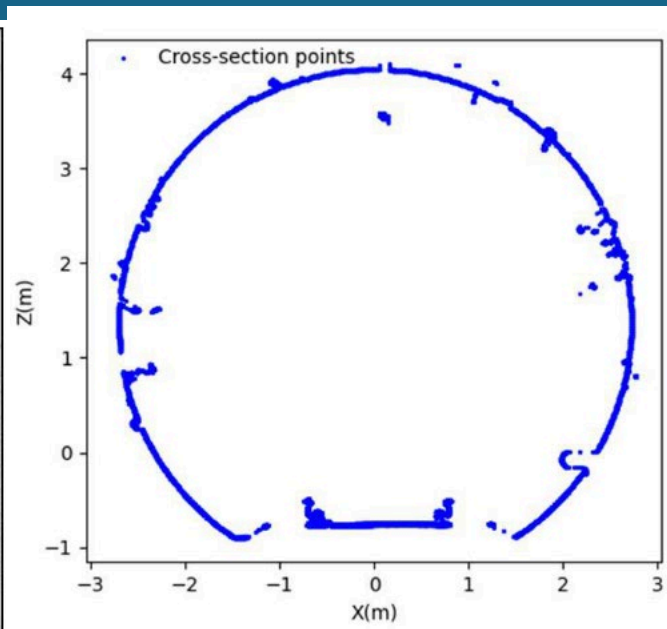
Tunnel Construction requirements on Tunnel convergence monitoring

AI DRIVEN CONVERGENCE MONITORING

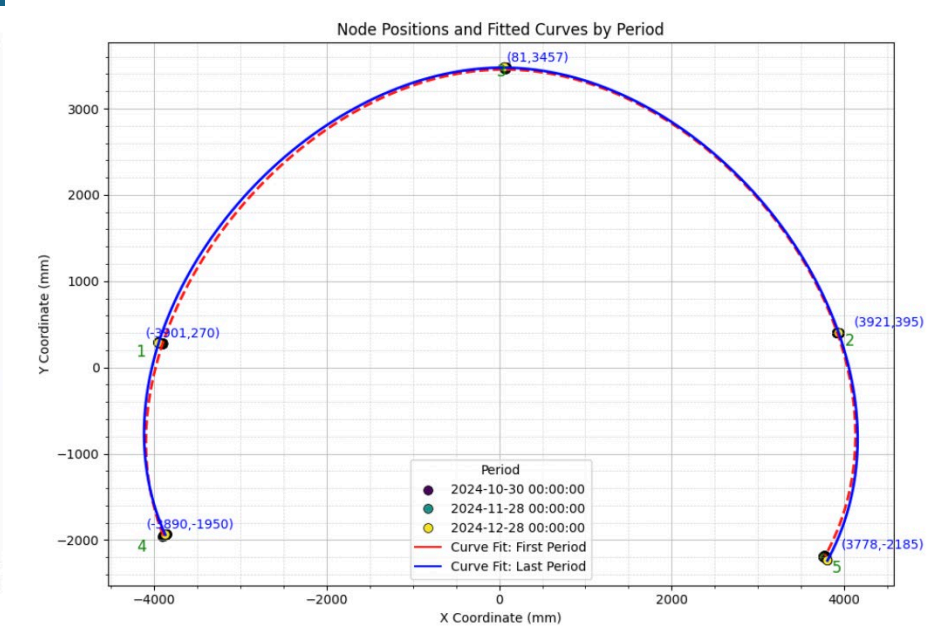
Tunnel Closure measure strain level of surround rock mass which directly relates to stability of tunnel support. (Hoek, 1998).



Total Station Survey /
Extensometer



Mobile Laser



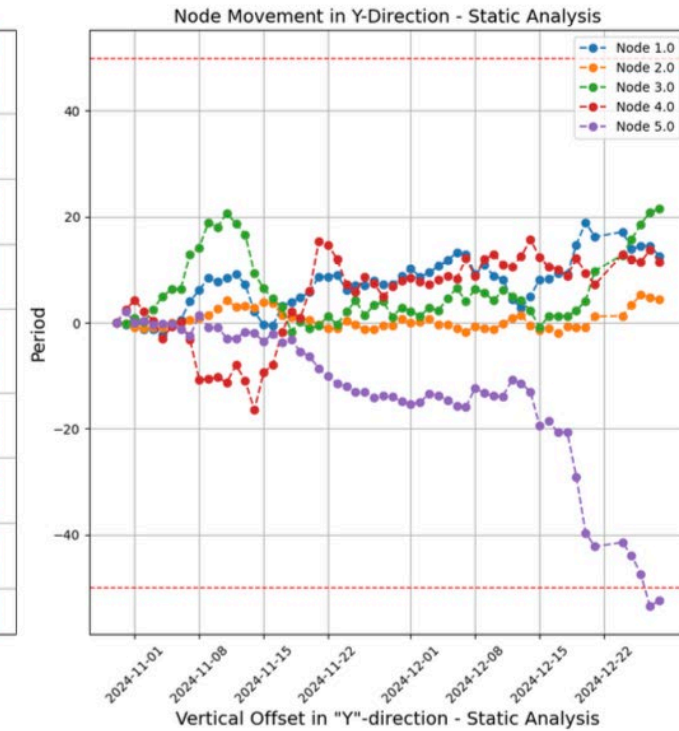
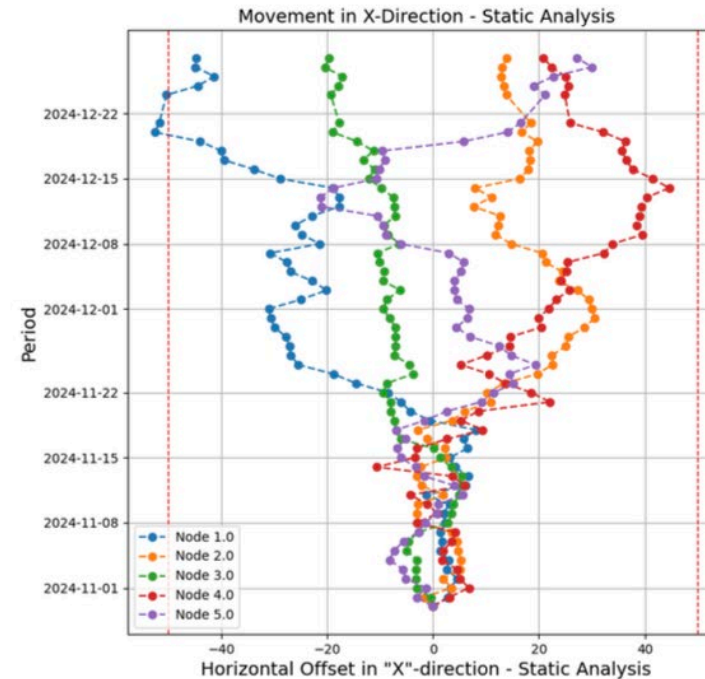
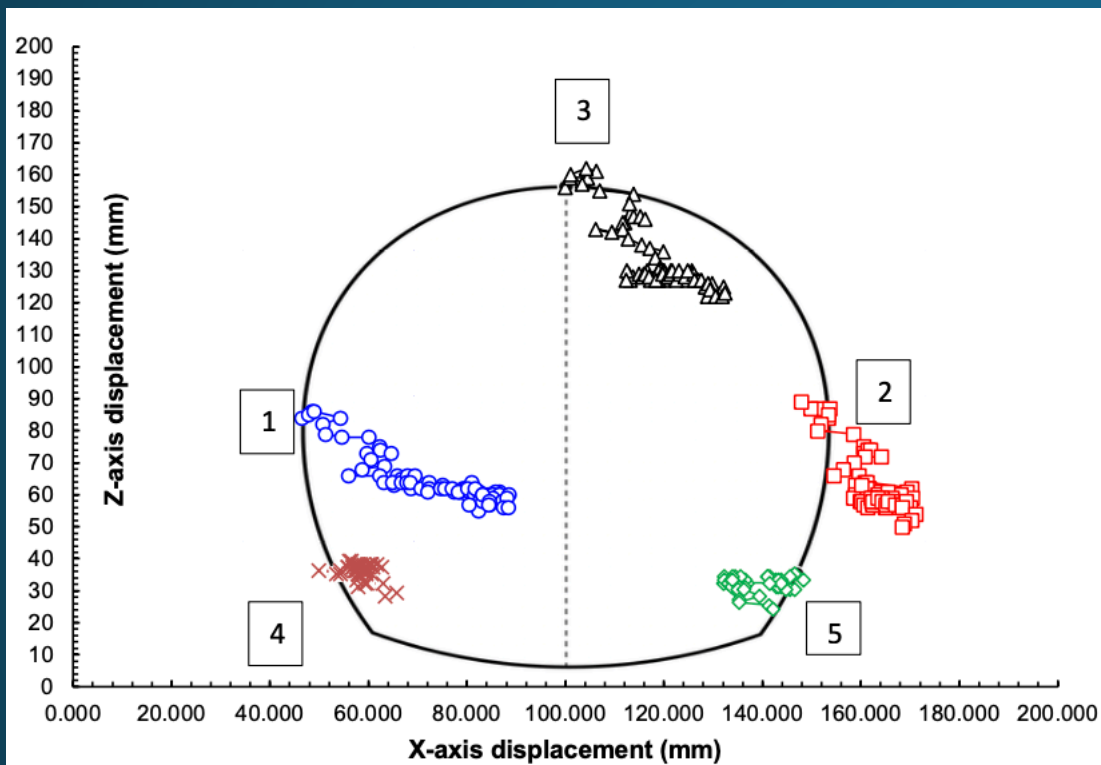
Computer Vision

Data Representation

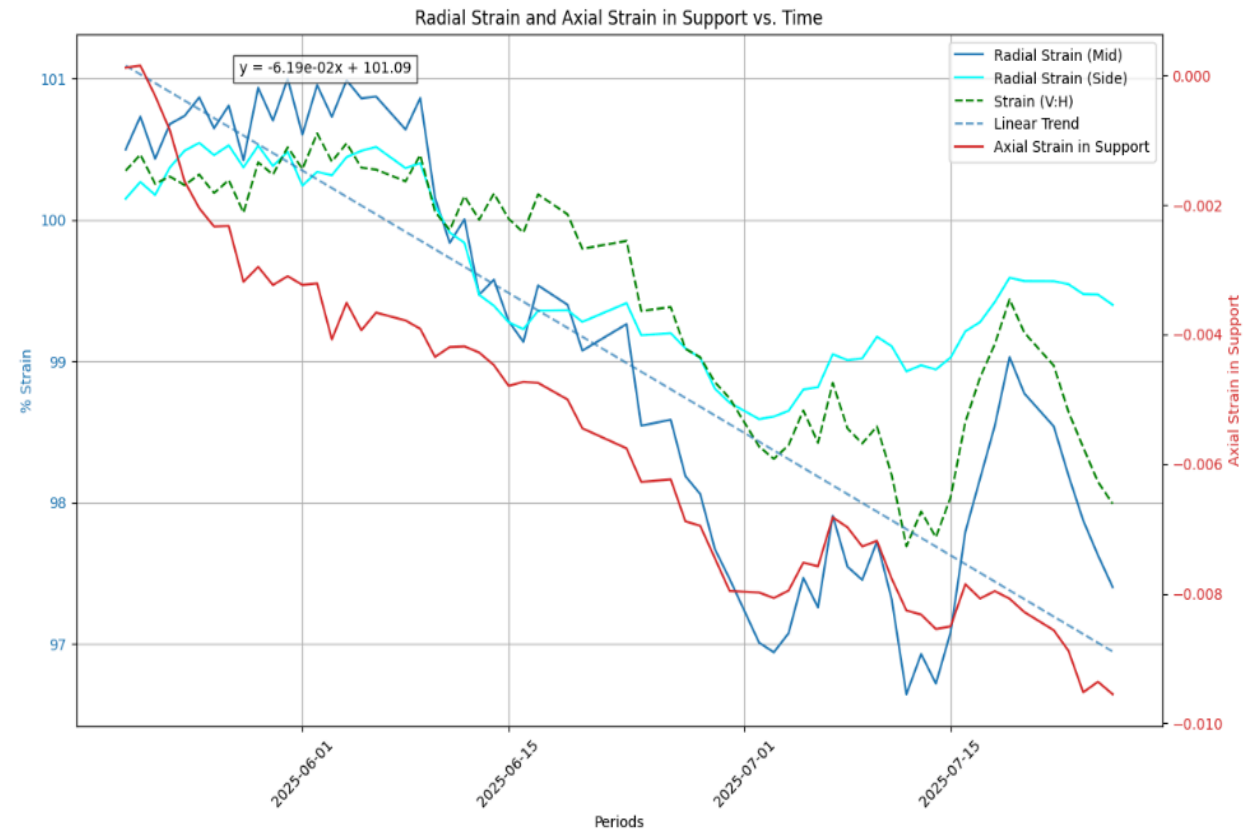
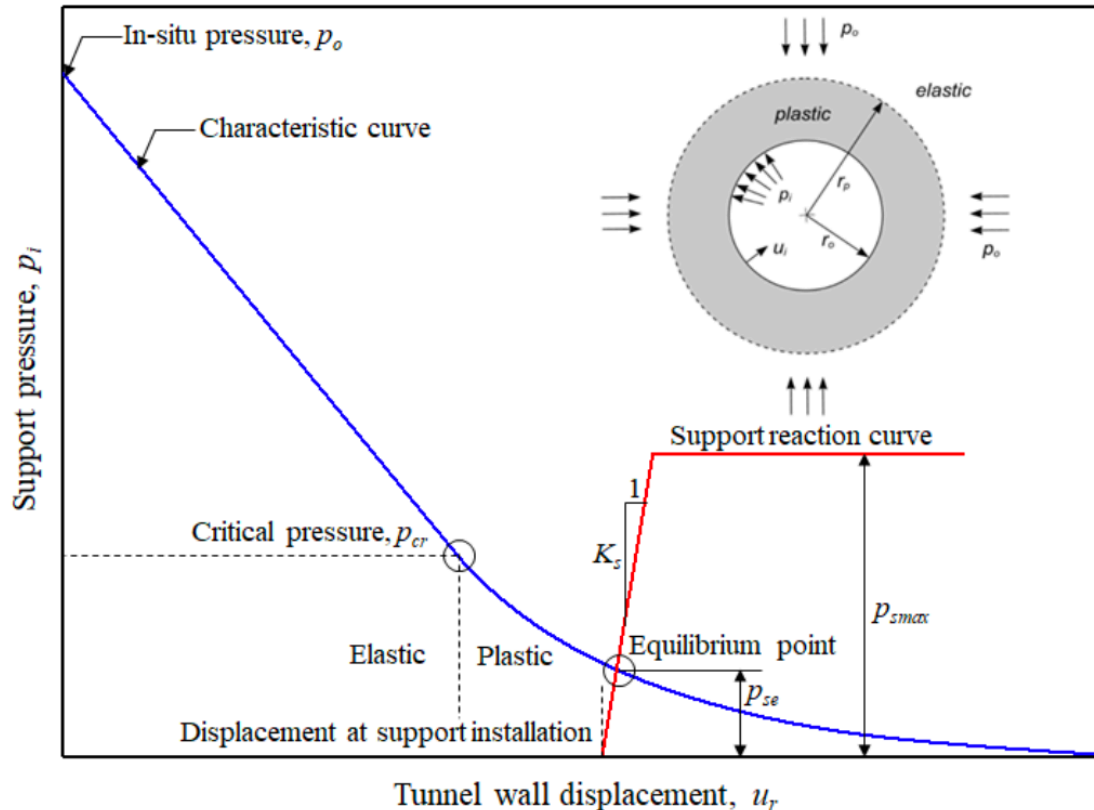
Tunnel Construction requirements on Tunnel convergence monitoring

AI DRIVEN CONVERGENCE MONITORING

The vector movement plot and vertical-horizontal offset are commonly found in convergence monitoring representation. The maximum movement was defined by the engineer if it beyond design limit using tunnel closure – soil strength relationship (Hoek, 1998).

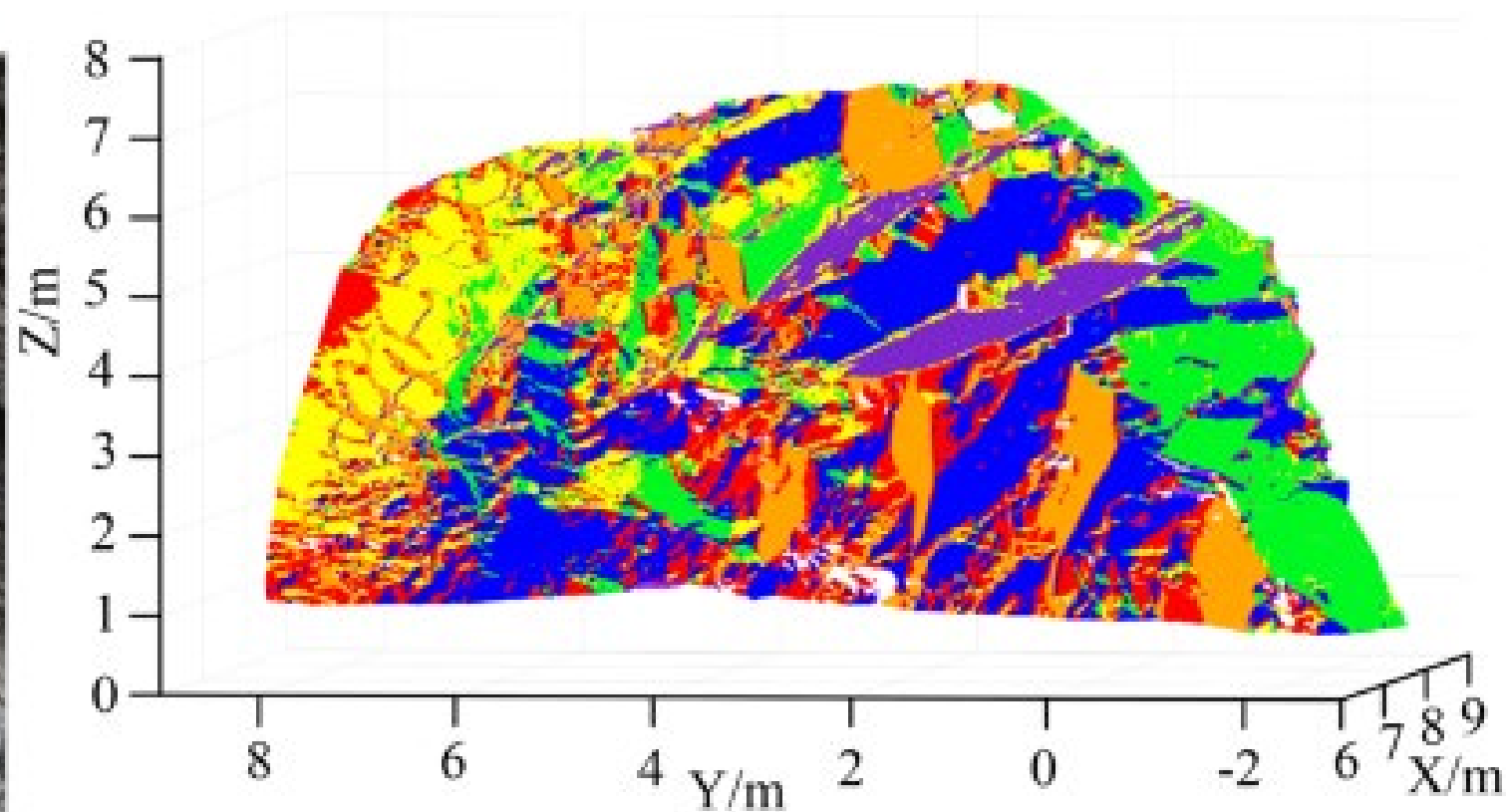


The new proposed method could also provide more insightful information in relation to previous works (Hoek, 1998) in determining adequacy of tunnel support, helping in evaluate sufficiency of primary lining and optimization of secondary lining design.





(a) Selection of research area for tunnel face analysis



(b) 3D visualization of tunnel face structural plane recognition results



beMap

My projects



Full tunnel



Viewer 3D



Orthoimages



Files



Info



tools



settings

☐ 31_Scan_Raw

☒ 33_Photogrammetry_Clean

☐ 33_Photogrammetry_Raw

☒ 33_Scan_Vault

☐ 33_Scan_Raw

☒ 38_Photogrammetry_Clean

☐ 38_Photogrammetry_Raw

☒ 38_Scan_Vault

☐ 38_Scan_Raw

Points colored by

RGB

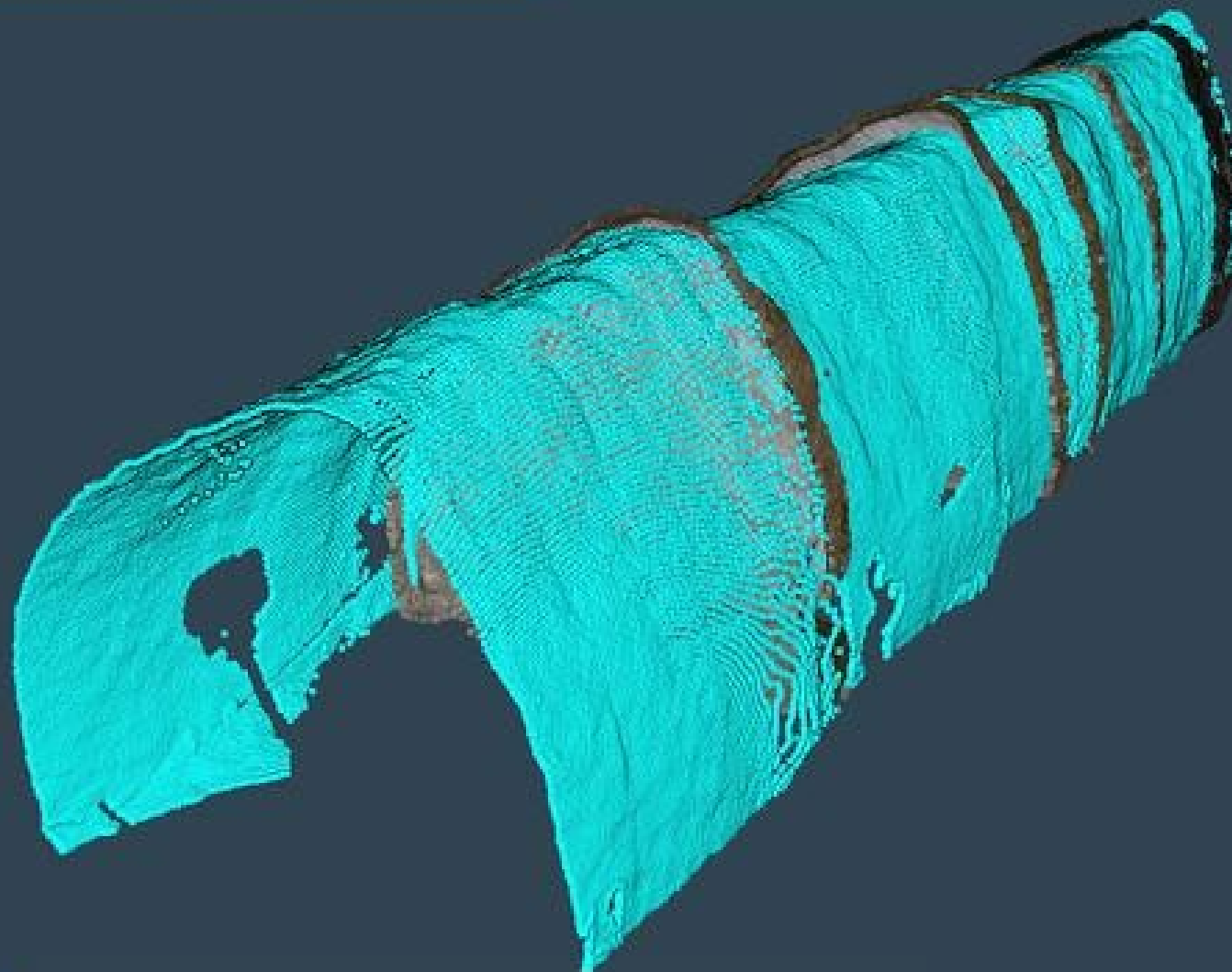
Display

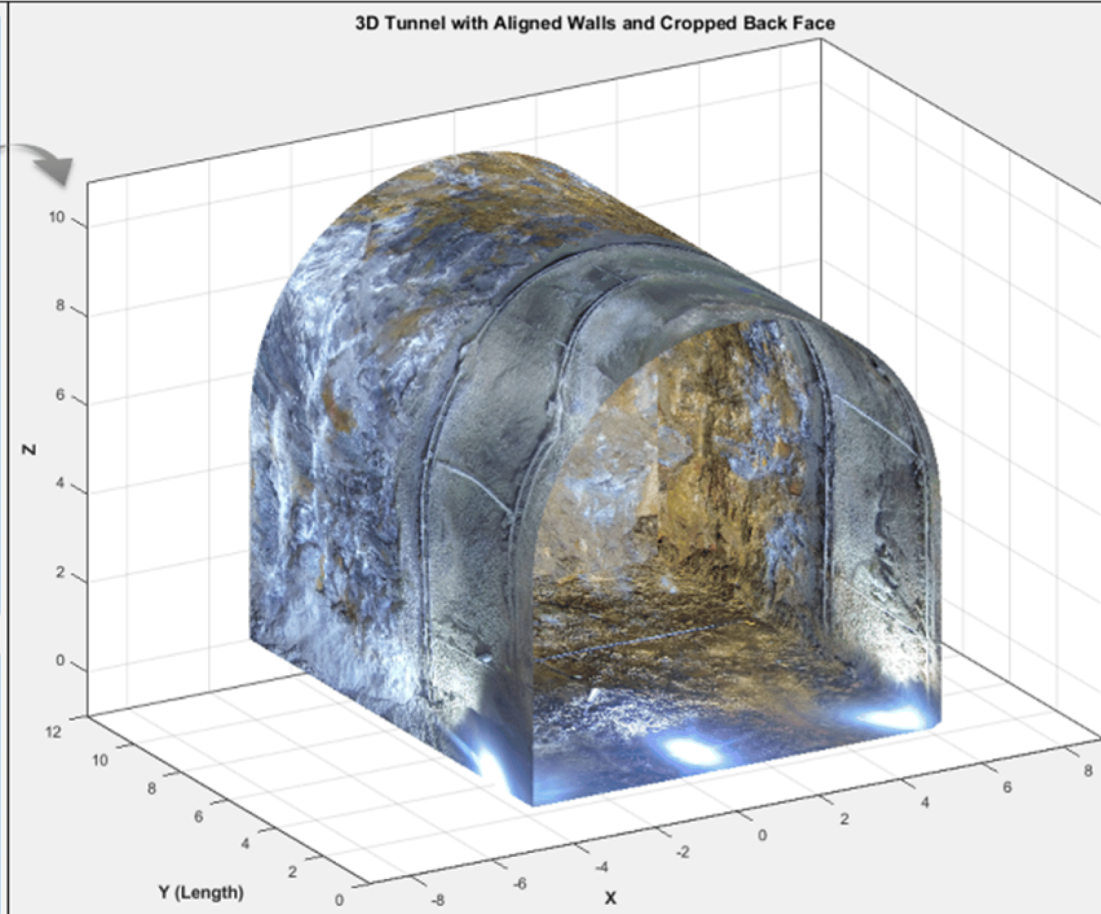
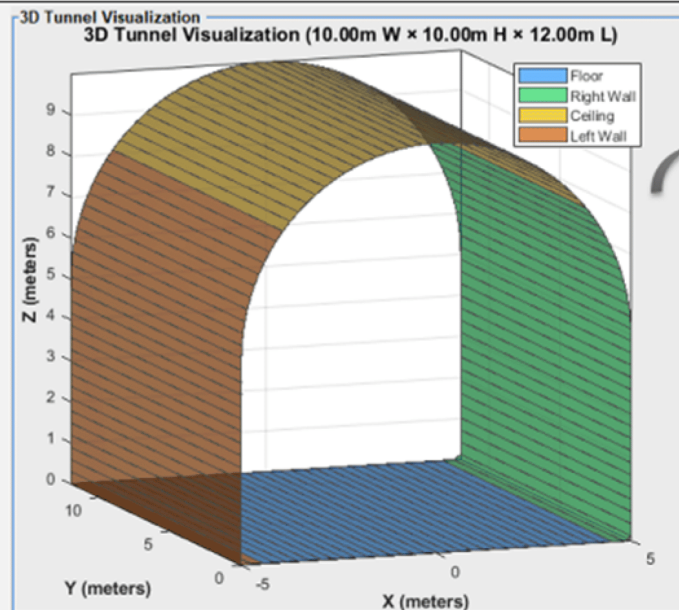
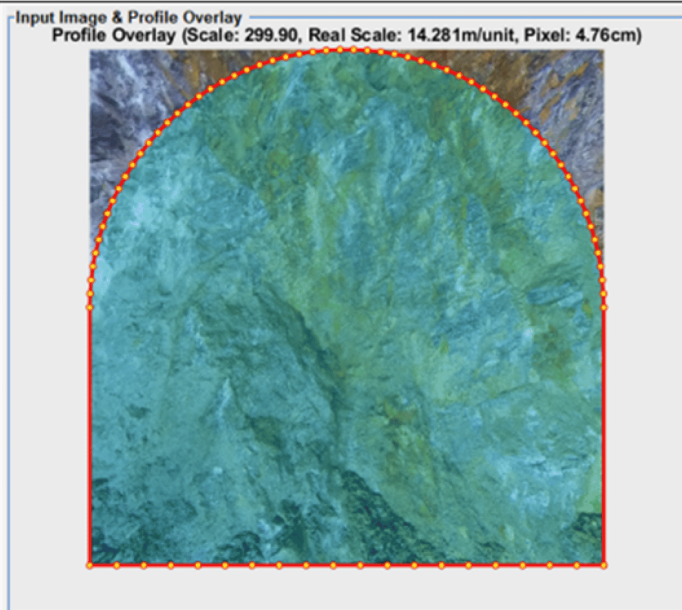
Points size

Level of details

☒ Eye dome lighting

Side by side





Tunnel Parameters & Controls

Profile Import & Scaling

Import Profile

Scale Fctr.: 299.9

X Offset: 1500.0

Y Offset: 3000

Reset Transform

Tunnel Parameters

Segments (n): 120

Length (L): 12

Face Group Rotation

Rotate C.CW

Rotate CW

View Controls

Azimuth: -20°

Elevation: 10°

Texture Mapping

Map Texture Images

Map Traces

Trace/Texture Overlay

3D Trace Mapping

Trace Segmentation

Segment Linking

3D Trace Network

Export

ptCloud

ptRes: 1,2,4

4

PLY

OBJ