



กระทรวงคมนาคม

สถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีระบบราง (องค์การมหาชน)
Rail Technology Research and Development Agency (Public Organization)



สทส. HSR-CT-4012:2568

(ร่าง) มาตรฐานงานตรวจวัดและติดตามในการก่อสร้างอุโมงค์
สำหรับโครงการรถไฟความเร็วสูง

- กลุ่มวิจัยและมาตรฐาน
- ทีมมาตรฐาน

สารบัญ

1. ขอบข่าย	5
2. มาตรฐานอ้างอิง	5
3. นิยามความหมาย	6
3.1 นิยาม	6
3.2 สัญลักษณ์	8
4. การสังเกตการณ์	8
4.1 ข้อกำหนดทั่วไปสำหรับการสังเกตการณ์	9
5. การตรวจวัดสำหรับก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าความเร็วสูง	9
5.1 การตรวจวัดการทรุดตัว	9
5.2 การตรวจวัดการเปลี่ยนตำแหน่ง	12
5.3 ข้อกำหนดเครื่องมือและการควบคุมสำหรับการติดตามและตรวจวัด	15
6. การจัดการข้อมูลและการวัดผลการตรวจวัด	18
6.1 ข้อกำหนดทั่วไปสำหรับการจัดการข้อมูลและการวัดผลการตรวจวัด	18
6.2 การนำเสนอข้อมูลการตรวจวัด	20
6.3 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด	27
เอกสารอ้างอิง	32
ภาคผนวก ก.	33
ภาคผนวก ข.	36
ภาคผนวก ค.	40

สารบัญรูป

รูปที่ 1 การจัดวางระยะห่างจุดตรวจวัดการทรุดตัวของผิวดิน (ที่มา “Q/CR 9604-2015”)	10
รูปที่ 2 การจัดวางจุดตรวจวัดการทรุดตัวของผิวดินในแนวขวาง (ที่มา “Q/CR 9218-2024”)	11
รูปที่ 3 ตัวอย่างการวางแผนการตรวจวัดสำหรับวิธีการขุดแบบเต็มหน้าตัด (ที่มา “Q/CR 9604-2015”)	12
รูปที่ 4 ตัวอย่างการวางแผนการตรวจวัดสำหรับวิธีขุดแบบชั้นบันได (ที่มา “Q/CR 9604-2015”)	13
รูปที่ 5 ตัวอย่างการวางแผนการตรวจวัดสำหรับวิธีขุดแบบชั้นบันไดสามชั้น (ที่มา “Q/CR 9604-2015”)	13
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับการเปลี่ยนตำแหน่ง สำหรับอัตราการขุดเจาะที่คงที่ (ที่มา “Galler et al., 2009”)	21
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับการเปลี่ยนตำแหน่ง สำหรับการขุดเจาะแบบไม่ต่อเนื่อง (ที่มา “Galler et al., 2009”)	22
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างกับการเปลี่ยนตำแหน่ง (ที่มา “Galler et al., 2009”)	23
รูปที่ 9 เส้นโค้งการโก่งตัวสำหรับตำแหน่งหลังคาอุโมงค์แสดงการประมาณค่าของ "การเปลี่ยนตำแหน่งก่อนการขุด" (Pre-displacements) และเส้นแนวโน้ม (Trend Line) (ที่มา “Galler et al., 2009”)	23
รูปที่ 10 แนวโน้มการเบี่ยงเบนของเวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่ง L/S เมื่อขุดอุโมงค์ผ่านดินแข็ง-ดินอ่อน-ดินแข็ง (ที่มา “Galler et al., 2009”)	25
รูปที่ 11 ตัวอย่างแผนภาพเวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่งในชั้นดินที่มีสมบัติเป็นเนื้อเดียวกัน (ที่มา “Galler et al., 2009”)	25
รูปที่ 12 ตัวอย่างการกระจายระดับของแรงในผนังคอนกรีตพ่นในช่วงเวลาหนึ่ง (Galler et al., 2009”)	26
รูปที่ 13 ตัวอย่างแผนภาพการทรุดตัวของผิวดินตามแนวเส้นคอนทัวร์ที่เกิดจากการขุดอุโมงค์ใต้ดินในพื้นที่ที่อยู่อาศัย (Galler et al., 2009”)	27
รูปที่ 14 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับการเปลี่ยนตำแหน่งที่แสดงระหว่าง การเปลี่ยนตำแหน่งที่วัดได้และการเปลี่ยนตำแหน่งที่คาดการณ์ (ที่มา “Galler et al., 2009”)	28
รูปที่ 15 เวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่งกับอิทธิพลของรอยเลื่อนที่อยู่นอกหน้าตัดที่ขุดเจาะ	29
รูปที่ 16 เส้นโค้งการเบี่ยงเบนของการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวตั้งของหลังคาอุโมงค์ (รูปด้านบน) และแนวโน้มของอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวอุโมงค์และการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวตั้ง (รูปด้านล่าง) (ที่มา “Galler et al., 2009”)	30
รูปที่ 17 เส้นโค้งการเบี่ยงเบนที่แสดงการเปลี่ยนตำแหน่งที่เพิ่มขึ้นในเขตที่มีรอยเลื่อนซึ่งพบที่ตำแหน่งตามแนวอุโมงค์ประมาณ 1160 m (ที่มา “Galler et al., 2009”)	30
รูปที่ 18 แนวทางการเลือกใช้วิธีการประเมินผลที่เหมาะสมตามวัตถุประสงค์เฉพาะด้าน	31

รูปที่ ก. 1 แผนภาพของการติดตาม การตรวจวัดและการรายงานผล (ที่มา “Q/CR 9218-2024”).....	34
รูปที่ ก. 2 แผนภาพการประเมินความปลอดภัยในการทำงาน (ที่มา “Q/CR 9218-2024”).....	35

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 การเว้นระยะห่างของจุดตรวจวัดการทรุดตัวของผิวดิน (ที่มา “Q/CR 9218-2024”).....	10
ตารางที่ 2 ข้อกำหนดระยะห่างของจุดตรวจวัดบนหน้าตัดขวางของอุโมงค์ (ที่มา “Q/CR 9218-2024”).....	12
ตารางที่ 3 ความถี่ในการตรวจวัดที่กำหนดตามระยะห่างจากผิวหน้าชุดหน้าอุโมงค์ (ที่มา “Q/CR 9218-2024”).....	14
ตารางที่ 4 ความถี่ในการตรวจวัดที่กำหนดตามอัตราการเปลี่ยนตำแหน่งของตาตุ่ม (ที่มา “Q/CR 9218-2024”).....	14
ตารางที่ 5 ความแม่นยำในการวัดของรายการที่ต้องตรวจวัด (ที่มา “Q/CR 9604-2015”).....	15
ตารางที่ 6 ความแม่นยำในการวัดของรายการตรวจวัดอื่น ๆ (ที่มา “Q/CR 9604-2015”).....	15
ตารางที่ 7 ข้อกำหนดการควบคุมค่าการเปลี่ยนตำแหน่ง (ที่มา “Q/CR 9604-2015”).....	16
ตารางที่ 8 ข้อกำหนดค่าสันสะท้อนจากการระเบิดที่ยอมรับได้ตามความปลอดภัย (ที่มา “Q/CR 9604-2015”).....	17
ตารางที่ 9 การประเมินความปลอดภัยของงานและมาตรการทางวิศวกรรม (ที่มา “Q/CR 9604-2015”).....	19
ตารางที่ ข. 1 การเลือกเครื่องมือสำหรับรายการตรวจวัดต่าง ๆ (ที่มา “Q/CR 9604-2015”).....	37
ตารางที่ ข. 2 ความถี่สำหรับรายการตรวจวัดเสริม (ที่มา “Q/CR 9218-2024”).....	38
ตารางที่ ข. 3 ความถี่การตรวจวัดตามอัตราความเร็วการเคลื่อนที่สำหรับอุโมงค์หินอ่อนความดันสูง (ที่มา “Q/CR 9218-2024”).....	39

สทร. HSR-CT-4012:2568

(ร่าง) มาตรฐานงานตรวจวัดและติดตามในการก่อสร้างอุโมงค์สำหรับโครงการรถไฟความเร็วสูง (Draft) Standard for Measurement and Monitoring Works in Tunnel Construction of the High-Speed Railway Project

1. ขอบข่าย

- 1.1 มาตรฐานฉบับนี้ครอบคลุมถึงแนวทาง ข้อกำหนดการตรวจวัด กระบวนการตรวจสอบ และตำแหน่งติดตั้งจุดตรวจวัด สำหรับงานก่อสร้างอุโมงค์รถไฟความเร็วสูง ทั้งระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างและภายหลังงานแล้วเสร็จ
- 1.2 มาตรฐานฉบับนี้ใช้สำหรับควบคุมการก่อสร้างอุโมงค์ในโครงการรถไฟความเร็วสูง ทั้งนี้ สำหรับระบบขนส่งทางรางอื่น ๆ เช่น รถไฟฟ้าระหว่างเมือง สามารถนำมาตรฐานฉบับนี้ไปปรับใช้ได้ตามความเหมาะสม
- 1.3 มาตรฐานฉบับนี้ครอบคลุมเฉพาะการก่อสร้างอุโมงค์ด้วย การเจาะและระเบิด (drill and blast) การใช้วิธีทางกลหรือทางเคมีโดยไม่ใช้การเจาะและระเบิดสำหรับการก่อสร้าง (non-blast)
- 1.4 มาตรฐานฉบับนี้ไม่ครอบคลุมถึงการก่อสร้างอุโมงค์ด้วย หัวเจาะอุโมงค์ (tunnel boring machine : TBM)
- 1.5 มาตรฐานฉบับนี้ใช้หน่วยตามระบบเอสไอ (SI units) เป็นหลัก
- 1.6 การปฏิบัติมาตรฐานฉบับนี้ให้เป็นไปตามแบบแปลน ข้อกำหนดในรายการประกอบแบบ เฉพาะงานสัญญาผู้ว่าจ้าง หากเอกสารดังกล่าวไม่ได้ระบุในเรื่องใดไว้ก็สามารถใช้มาตรฐานฉบับนี้อ้างอิงได้
- 1.7 มาตรฐานฉบับนี้ไม่ครอบคลุมเรื่องการตรวจวัดงานที่เกี่ยวข้องทางด้านสิ่งแวดล้อม มาตรฐานการตรวจวัดจะครอบคลุมเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมงานก่อสร้างทางด้านโยธา

2. มาตรฐานอ้างอิง

- 2.1 สทร. HSR-CT-1001:2568 (ร่าง) มาตรฐานงานสำรวจวิศวกรรมในการก่อสร้างอุโมงค์โครงการรถไฟความเร็วสูง
- 2.2 สทร. HSR-CT-1002:2568 (ร่าง) มาตรฐานการป้องกันและระบบระบายน้ำในการก่อสร้างอุโมงค์โครงการรถไฟความเร็วสูง
- 2.3 สทร. HSR-CT-3001:2568 (ร่าง) มาตรฐานงานเจาะและงานระเบิดในการก่อสร้างอุโมงค์โครงการรถไฟความเร็วสูง

2.4 สทร. HSR-CT-5001:2568 (ร่าง) มาตรฐานงานค้ำยันในการก่อสร้างอุโมงค์โครงการรถไฟความเร็วสูง

3. นิยามความหมาย

3.1 นิยาม

“กระบวนการเข้าสู่สภาวะเสถียรภาพ” (stabilization process) หมายถึง การปรับตัวของดิน หิน หรือโครงสร้างรอบอุโมงค์จนเข้าสู่สภาวะสมดุลและการเคลื่อนตัวหยุดนิ่ง

“กล้องวัดมุม” (theodolite) หมายถึง เครื่องมือสำรวจสำหรับวัดมุมตั้งและมุมราบได้ มีความละเอียดในการวัดตามประเภทของกล้อง

“กล้องสำรวจแบบประมวลผลรวม” (total station) หมายถึง กล้องสำรวจที่มีขีดความสามารถรวมกันหลายอย่างในเครื่องเดียวในการวัด บันทึกลง ประมวลผล และรับส่งข้อมูลที่ได้จากการรังวัด

“กล้องสำรวจแบบประมวลผลรวมอัตโนมัติ” (automatic total station) หมายถึง กล้องสำรวจแบบประมวลผลรวมที่มีระบบที่ช่วยในการปรับระดับและการวัดค่าต่าง ๆ โดยอัตโนมัติ

“การดันตัวของพื้นอุโมงค์” (tunnel floor upheave) หมายถึง การโก่งหรือดันตัวขึ้นเหนือระดับที่ออกแบบไว้ของพื้นอุโมงค์ เกิดจากแรงดันของน้ำใต้ดินหรือแรงดันดินที่กระทำจากด้านล่างขึ้นด้านบน

“การเปลี่ยนตำแหน่ง” หรือ (displacement) หมายถึง การเคลื่อนที่ของดินเนื่องจากแรงกระทำจากภายนอก เช่น การแทนที่ในแนวราบจากการตอกเสาเข็ม หรือกองดินทำให้ดินโดยรอบเคลื่อนตัว

“การบีบตัวของอุโมงค์” (convergence) หมายถึง การเคลื่อนตัวเข้าหากันหลังจากการขุดเจาะอุโมงค์ เกิดจากแรงดันของชั้นดินหรือหินโดยรอบ มักใช้เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวเพื่อติดตามและวิเคราะห์เสถียรภาพของอุโมงค์

“การระดับความเที่ยงสูง” (precise leveling) หมายถึง การระดับที่มีความถูกต้องและความเที่ยงสูง ไม่ต่ำกว่าการระดับชั้นหนึ่ง (first order levelling)

“เกจความเครียด” (strain gauge) หมายถึง เกจที่ประกอบด้วยอุปกรณ์วัดการยืดหดที่มีการกำหนดความยาวที่แน่นอน ผลของการยืดหดต่อความยาวดังกล่าวจะเป็นค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในวัสดุที่รับแรง

“คอนกรีตพ่น” (shotcrete) หมายถึง คอนกรีตที่ใช้งานโดยการพ่นด้วยเครื่องอัดลมความดันสูงไปยังแบบหล่อ หรือผนัง เพื่อให้ได้คอนกรีตที่แน่นและมีกำลังสูง มักใช้ซ่อมแซมโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น แผ่นพื้น ผนังภายในท่อขนาดใหญ่หรืออุโมงค์ สิ่งก่อสร้างที่มีรูปร่างยากต่อการเทคอนกรีต

“คอนกรีตหยาบ” (mass concrete) หมายถึง คอนกรีตที่มีปริมาตรมากและมีขนาดใหญ่จนต้องมีมาตรการรองรับความร้อน ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ เพื่อป้องกันหรือลดการแตกร้าวให้เหลือน้อยที่สุด

“เครื่องตรวจวัดเหล็กเส้น” (rebar meter) หมายถึง อุปกรณ์ตรวจสอบตำแหน่ง ขนาด และจำนวน เหล็กเสริมในคอนกรีตโดยไม่ต้องเจาะหรือรื้อถอน

“เครื่องวัดการยืดตัว” (extensometer) หมายถึง อุปกรณ์ใช้วัดระยะยืดของวัสดุขณะรับแรงดึง โดยมี ความยาวเกจที่เหมาะสมเพื่อนำไปคำนวณหาความเครียด

“โครงสร้างค้ำยันขั้นต้น” (primary support) หมายถึง ระบบค้ำยันขั้นแรกที่ใช้หลังขุดทันที เช่น คอนกรีตพ่น (shotcrete) สลักยึดหิน (rock bolt) โครงเหล็ก (steel rib) เพื่อเสริมความมั่นคง ของอุโมงค์ขั้นต้น

“ดาตอุโมงค์” (tunnel lining หรือ secondary lining) ผนังโครงสร้างที่สร้างขึ้นเพื่อต้านทาน แรงดันดินที่กระทำต่ออุโมงค์ ในกรณีอุโมงค์ในดินเหนียวหรือดินทราย จะใช้ดาตอุโมงค์ที่เป็นคอนกรีต เสริมเหล็กซึ่งหล่อเป็นชิ้นแล้วนำมาประกอบกันภายในอุโมงค์ หรือใช้ผนังเหล็ก แล้วเกรต หรือใช้งาน แบบหล่อ (formwork) ในการหล่อผนังคอนกรีต ถ้าเป็นอุโมงค์ในหินแข็งจะใช้คอนกรีตพ่นเป็นดาต อุโมงค์

“ฐานอุโมงค์” (invert) หมายถึง ตำแหน่งต่ำสุดภายในของท่อ ท่อ ระบายน้ำ อุโมงค์ เป็นต้น แบ่งออก ได้เป็น 3 ชั้น 1.อินเวิร์ทในส่วนของระดับคอนกรีตหยาบ 2.อินเวิร์ทในส่วน of โครงสร้างผนังงานดาต คอนกรีตผิวอุโมงค์ 3.อินเวิร์ทในส่วน of ฐานรางรถไฟ

“เท้าช้าง” (arch foot) หมายถึง ชิ้นส่วนล่างหรือปลายล่างของโครงสร้างรูปโค้งที่เป็นองค์ประกอบ ของหลังคาอุโมงค์ที่มีลักษณะยื่นออกไปด้านข้าง เพื่อใช้ในการรับแรงจากชั้นดินหรือชั้นหินบริเวณรอบ อุโมงค์

“แท่งอินวาร์” (invar rod) หมายถึง แท่งโลหะผสมระหว่างนิเคิลและเหล็กมีค่าการขยายตัวต่ำใช้ใน งานระดับหรือควบคุมระยะทางที่ต้องการความแม่นยำ

“ผิวหน้าขุดหน้าอุโมงค์” (excavation face) หมายถึง พื้นผิวของหน้าตัดชั้นดินหรือชั้นหินบริเวณ พื้นที่ที่มีการขุดอุโมงค์

“ฝายสามเหลี่ยม” (triangular weir) หมายถึง ฝายวัดน้ำที่มีช่องเปิดให้น้ำผ่านเป็นรูปอักษรวีซึ่งปกติ ทำมุม 90 องศา

“ผู้ออกแบบและคำนวณ” (designer) หมายถึง ผู้รับผิดชอบออกแบบหรือคำนวณออกแบบ

“พีโซมิเตอร์” (piezometer) หมายถึง เครื่องมือสำหรับวัดความดันของของไหล เช่น ความดันของน้ำ หรือแก๊สในท่อ ความดันของน้ำใต้ดิน

“ไฟเบอร์เกรตติงเซนเซอร์” (fiber grating sensor) หมายถึง เซนเซอร์ชนิดหนึ่งที่ใช้หลักการ เปลี่ยนแปลงสมบัติของแสงที่ส่งผ่านใยแก้วนำแสงที่สะท้อนกลับเพื่อวัดค่าต่าง ๆ

“แรงดันน้ำในดิน” (pore water pressure) หมายถึง แรงดันน้ำในช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน

“วิธีการขุดแบบเต็มหน้าตัด” (full face method) หมายถึง วิธีการขุดเจาะอุโมงค์ที่ทำการขุดผิวหน้า ขุดหน้าอุโมงค์ทั้งหมดในคราวเดียวกัน

“วิธีการวัดแบบไม่สัมผัส” (non-contact measurement method) หมายถึง วิธีวัดโดยไม่ต้องสัมผัสวัตถุ เช่น กล้องสำรวจแบบประมวลผลรวม กล้องวัดมุม ฯลฯ

“วิธีการวัดแบบสัมผัส” (contact measurement method) หมายถึง วิธีวัดที่ต้องสัมผัสวัตถุ โดยตรง เช่น การใช้เกจวัดการเคลื่อนตัว หรือเกจวัดแรง

“วิธีขุดแบบชั้นบันได” (bench cut method) หมายถึง วิธีการขุดอุโมงค์แบบแบ่งส่วน โดยจะทำการขุดในส่วนบนของหน้าตัดอุโมงค์ออกก่อนแล้วทำการขุดส่วนล่างตามในภายหลัง เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของอุโมงค์ระหว่างการขุด

“หลังคาอุโมงค์” (crown) หมายถึง ส่วนบนสุดของผิวหน้าตัดอุโมงค์เป็นตำแหน่งที่รับแรงจากหินหรือดินด้านบนมากที่สุด

“โหลดเซลล์” (load cell) หมายถึง อุปกรณ์วัดแรงหรือน้ำหนักกระทำ เช่น แรงจากระบบค้ำยันหรือแรงจากพื้นดิน

3.2 สัญลักษณ์

B	=	ความกว้างสูงสุดของการขุดอุโมงค์ มีหน่วยเป็น m
D	=	ความกว้างของการขุดเจาะอุโมงค์ มีหน่วยเป็น m
H_o	=	ความลึกจากผิวดินถึงหลังคาอุโมงค์ มีหน่วยเป็น m
H	=	ความสูงของการขุดอุโมงค์จากเท้าช้างถึงหลังคาอุโมงค์ มีหน่วยเป็น m
L/S	=	อัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนตำแหน่งตามแนวยาว (L) และการทรุดตัว (S)
U_o	=	ค่าการการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุด มีหน่วยเป็น mm
U_{1B}, U_{2B}	=	ค่ามาตรฐานของการควบคุมการเปลี่ยนตำแหน่ง มีหน่วยเป็น mm
h	=	ระยะห่างการขุด มีหน่วยเป็น m

4. การสังเกตการณ์

การสังเกตการณ์อย่างเป็นระบบและต่อเนื่องเป็นองค์ประกอบสำคัญในการก่อสร้างอุโมงค์ เพื่อใช้ในการประเมินพฤติกรรมของ ชั้นดิน ชั้นหิน โครงสร้างอุโมงค์ และสิ่งแวดล้อมโดยรอบ นำไปสู่การประเมินสถานการณ์เพื่อปรับแผนการก่อสร้างให้สอดคล้องกับสภาพจริงของพื้นที่ อันจะช่วยให้การดำเนินงานมีประสิทธิภาพ

4.1 ข้อกำหนดทั่วไปสำหรับการสังเกตการณ์

ในการก่อสร้างอุโมงค์ต้องดำเนินการสังเกตการณ์ทั้งภายในอุโมงค์และภายนอกอุโมงค์ โดยการสังเกตการณ์ภายในอุโมงค์แบ่งได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ การสังเกตบริเวณผิวหน้าขุดหน้าอุโมงค์และส่วนที่ขุดแล้วเสร็จ สำหรับการสังเกตการณ์ภายนอกอุโมงค์ต้องมุ่งเน้นในส่วนบริเวณทางเข้าอุโมงค์ (portal) และพื้นที่ดินเหนือนอกอุโมงค์ในระดับต้น

4.1.1 การสังเกตการณ์ ต้องครอบคลุมรายละเอียดตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- 4.1.1.1 ประเมินเสถียรภาพของชั้นดินหรือชั้นหินบริเวณผิวหน้าขุดอุโมงค์ โดยจัดทำภาพร่างทางธรณีเทคนิค (geological face mapping)
- 4.1.1.2 สังเกตความมั่นคงของโครงสร้างค้ำยันชั้นดินและตาอุโมงค์ (tunnel lining หรือ secondary lining)
- 4.1.1.3 สังเกตลักษณะรอยแตกร้าวของผิวดิน การเปลี่ยนรูปของผิวดิน ความมั่นคงของลาดด้านข้างและลาดด้านหน้า การซึมของน้ำบริเวณผิวดิน ลักษณะของพื้นผิวน้ำโครงสร้าง การทรุดตัวภายในอุโมงค์และภายนอกอุโมงค์
- 4.1.1.4 จัดทำบันทึกการสังเกตการณ์อย่างเป็นระบบ และเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการสำรวจทางธรณีวิทยา

การสังเกตการณ์ที่ครอบคลุมและเป็นระบบ ถือเป็นขั้นตอนเบื้องต้นในการเฝ้าระวังและประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างอุโมงค์ ซึ่งจำเป็นต่อการบริหารจัดการงานก่อสร้างอุโมงค์ให้มีความปลอดภัย

5. การตรวจวัดสำหรับก่อสร้างอุโมงค์รถไฟความเร็วสูง

การตรวจวัดในการก่อสร้างอุโมงค์ เป็นกระบวนการเก็บข้อมูลเชิงปริมาณที่สำคัญสำหรับการประเมินพฤติกรรมของ โครงสร้าง ชั้นดิน และชั้นหินโดยรอบระหว่างการก่อสร้าง ข้อมูลดังกล่าวใช้ในการควบคุมคุณภาพ ติดตามการเปลี่ยนแปลง และประกอบการดำเนินงาน โดยต้องกำหนด ตำแหน่ง ความถี่ เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัด และเกณฑ์ควบคุม ตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้การก่อสร้างเป็นไปตามข้อกำหนด

5.1 การตรวจวัดการทรุดตัว

การตรวจวัดการทรุดตัวเป็นขั้นตอนสำหรับการติดตามสภาวะการเปลี่ยนแปลงของ โครงสร้าง และสภาพธรณี ในช่วงการก่อสร้าง ต้องดำเนินการให้สอดคล้องกับแนวทางการก่อสร้างและข้อกำหนดของโครงการ

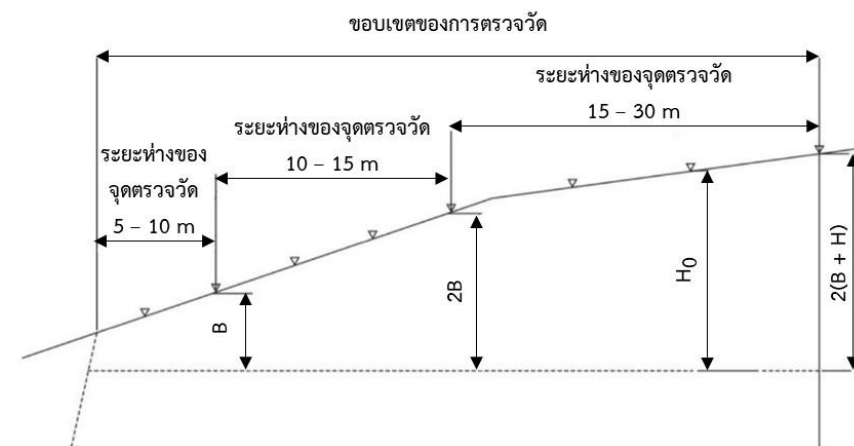
5.1.1 การตรวจวัดการทรุดตัวของผิวดิน

5.1.1.1 การวางจุดตรวจวัดการทรุดตัวของผิวดิน สำหรับอุโมงค์ที่มีอัตราส่วนความลึกจากผิวดินเทียบกับความกว้างของอุโมงค์น้อยกว่า 2 หรือ อุโมงค์ตื้น (shallow tunnel) รวมถึงอุโมงค์ที่พาดผ่านใต้อาคารหรือสิ่งปลูกสร้าง ต้องวางจุดตรวจวัดการทรุดตัวของผิวดินก่อนเริ่มการขุดเจาะ โดยจุดตรวจวัดต้องอยู่ในแนวเดียวกับแนวเส้นทางการก่อสร้างอุโมงค์ ระยะห่างตามแนวยาวของจุดตรวจวัดการทรุดตัว ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดใน ตารางที่ 1 และแผนผังการจัดวางจุดตรวจวัดแสดงใน รูปที่ 1

ตารางที่ 1 การเว้นระยะห่างของจุดตรวจวัดการทรุดตัวของผิวดิน (ที่มา “Q/CR 9218-2024”)

ความลึกและความกว้างของการขุด	ระยะห่างของจุดตรวจวัด (m)
$2B < H_o \leq 2(B+H)$	15 - 30
$B < H_o \leq 2B$	10 - 15
$H_o \leq B$	5 - 10

หมายเหตุ: H_o หมายถึง ความลึกจากผิวดินถึงหลังคาอุโมงค์ H หมายถึง ความสูงสูงสุดของการขุดอุโมงค์จากเท้าข้างถึงหลังคาอุโมงค์ และ B หมายถึง ความกว้างสูงสุดของการขุดอุโมงค์

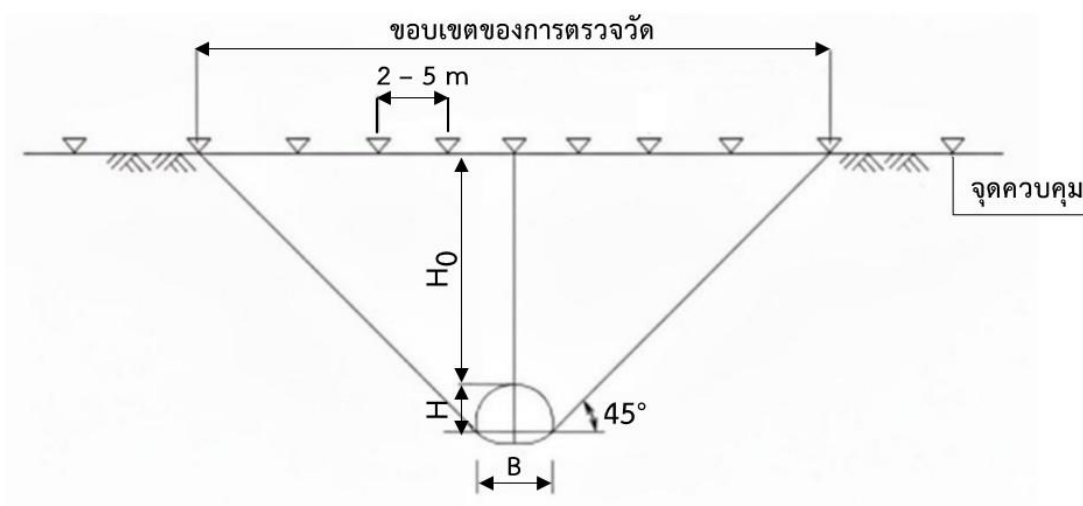


รูปที่ 1 การจัดวางระยะห่างจุดตรวจวัดการทรุดตัวของผิวดิน (ที่มา “Q/CR 9604-2015”)

5.1.1.2 ระยะห่างในแนวขวางของจุดวัดการทรุดตัวของผิวดินต้องอยู่ในช่วง 2 m ถึง 5 m สำหรับจุดวัดที่อยู่ใกล้แนวแกนกลางอุโมงค์ ต้องเพิ่มความถี่ในการติดตั้งจุดตรวจวัดให้เหมาะสม ซึ่งขอบเขตของการตรวจวัดต้องวัดจากแนวแกนกลางอุโมงค์ออกไปทั้งสองด้าน โดยต้องไม่ต่ำกว่าสองเท่าของค่าความลึกจากผิวดินถึงหลังคาอุโมงค์และความสูงสูงสุดของการขุดอุโมงค์จากเท้าช้างถึงหลังคาอุโมงค์รวมกับค่าความกว้างสูงสุดของการขุดอุโมงค์ $2(H_0+H)+B$ ในกรณีที่มีสิ่งปลูกสร้างอยู่บริเวณเหนือแนวอุโมงค์ ให้เพิ่มขอบเขตของการตรวจวัดให้กว้างขึ้นอย่างเหมาะสม ทั้งนี้ ต้องได้รับการพิจารณาและอนุมัติจากผู้ออกแบบและคำนวณและ/หรือที่ปรึกษา ก่อนดำเนินการ แผนผังการวางจุดตรวจวัดการทรุดตัว ต้องเป็นไปตามที่แสดงในรูปที่ 2

5.1.2 การตรวจวัดการทรุดตัวภายในอุโมงค์

5.1.2.1 การติดตั้งจุดตรวจวัดการทรุดตัวบริเวณหลังคาอุโมงค์ภายในอุโมงค์ ต้องจัดวางในแนวเดียวกับจุดตรวจวัดการบีบตัวของอุโมงค์และต้องติดตั้งภายใน 12 ชั่วโมง หลังการขุดเจาะ การวางจุดตรวจวัดบนหน้าตัดขวางของอุโมงค์ ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในตารางที่ 2 โดยจุดตรวจวัดการทรุดตัวบริเวณหลังคาอุโมงค์ ต้องติดตั้งใกล้กับแนวแกนของหลังคาอุโมงค์ สำหรับบริเวณอุโมงค์ตันหรือบริเวณที่มีแรงดันด้านข้างไม่สมดุล ต้องเพิ่มความถี่ของจุดตรวจวัดให้เหมาะสม



รูปที่ 2 การจัดวางจุดตรวจวัดการทรุดตัวของผิวดินในแนวขวาง (ที่มา “Q/CR 9218-2024”)

ตารางที่ 2 ข้อกำหนดระยะห่างของจุดตรวจวัดบนหน้าตัดขวางของอุโมงค์ (ที่มา “Q/CR 9218-2024”)

คุณภาพชั้นหินล้อมรอบ	ระยะห่างของจุดตรวจวัดตามหน้าตัดขวาง (m)
V - VI	5 - 10
IV	10 - 30
III	30 - 50

หมายเหตุ:

1. สำหรับคุณภาพชั้นหินชั้น II ระยะห่างของจุดตรวจวัดต้องกำหนดตามเงื่อนไขที่ได้รับการพิจารณาและอนุมัติจากผู้ออกแบบและคำนวณ
2. คุณภาพของชั้นหินบ่งบอกถึงรายละเอียดของแต่ละชั้นหินดังนี้ I (หินดีมาก) II (หินดี) III (หินปานกลาง) IV (หินแย่มาก) V และ VI (หินแย่มาก)

5.2 การตรวจวัดการเปลี่ยนตำแหน่ง

5.2.1 การวางแผนตรวจวัดการเปลี่ยนตำแหน่งในแต่ละหน้าตัด สามารถดำเนินการตามลักษณะและวิธีการขุดเจาะ โดยต้องจัดให้มีแนวตรวจวัดอย่างน้อยหนึ่งแนวในแนวนอนและหนึ่งแนวในแนวตั้ง หรือหนึ่งแนวในแนวนอนและสองแนวในแนวเอียงของแต่ละส่วนของหน้าตัดการขุดเจาะ ซึ่งสามารถเพิ่มจำนวนการวางแผนตรวจวัดทั้งแนวนอนและแนวเอียงตามความเหมาะสม ทั้งนี้ ต้องได้รับการพิจารณาและอนุมัติจากผู้ออกแบบและคำนวณและ/หรือที่ปรึกษา ก่อนดำเนินการ รูปที่ 3 ถึง รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างการวางแผนตรวจวัด

5.2.2 การวางแผนจุดตรวจวัดบนหน้าตัดอุโมงค์และจุดตรวจวัดในรายการตรวจวัดอื่น ๆ ต้องพิจารณาตามข้อกำหนดของงานออกแบบและงานก่อสร้าง โดยจุดตรวจวัดในแต่ละหน้าตัดต้องจัดวางในตำแหน่งเดียวกัน และจัดวางในลักษณะที่สมมาตร



รูปที่ 3 ตัวอย่างการวางแผนการตรวจวัดสำหรับวิธีการขุดแบบเต็มหน้าตัด (ที่มา “Q/CR 9604-2015”)



รูปที่ 4 ตัวอย่างการวางแผนการตรวจวัดสำหรับวิธีขุดแบบชั้นบันได (ที่มา “Q/CR 9604-2015”)



รูปที่ 5 ตัวอย่างการวางแผนการตรวจวัดสำหรับวิธีขุดแบบชั้นบันไดสามชั้น (ที่มา “Q/CR 9604-2015”)

- 5.2.3 จุดตรวจวัดของแต่ละรายการตรวจวัด ต้องติดตั้งในตำแหน่งที่ถูกต้อง มั่นคงและสามารถระบุตำแหน่งได้ง่าย ทั้งนี้ ต้องมีการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นต่อจุดตรวจวัด การติดตั้งจุดตรวจวัดต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้
 - 5.2.3.1 การวัดค่าการเปลี่ยนตำแหน่งด้วยวิธีการวัดแบบสัมผัส จุดตรวจวัดต้องฝังยึดโดยการเชื่อม (Welding) หรือการเจาะรู (Drilling) ทั้งนี้ ตะขอของจุดตรวจวัดต้องทำเป็นรูปสามเหลี่ยมปิด เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและป้องกันการเสียรูป
 - 5.2.3.2 การวัดค่าการเปลี่ยนตำแหน่งด้วยวิธีการวัดแบบไม่สัมผัส ให้ใช้อุปกรณ์สะท้อนแสง (retro reflector) ประเภทไดอะแฟรม (diaphragm) เป็นเป้าของจุดตรวจวัด โดยต้องติดตั้งให้ยึดติดกับชิ้นส่วนที่ฝังอยู่กับโครงสร้าง
 - 5.2.3.3 เซนเซอร์ต้องติดตั้งโดยการเชื่อม การติด หรือการฝังยึดกับโครงเหล็กหรือคอนกรีต ในตำแหน่งที่ต้องการตรวจวัด

5.2.3.4 เครื่องวัดแรงดันน้ำ (water pressure meter) ต้องติดตั้งในตำแหน่งที่กำหนด พร้อมมาตรวัด และต้องสัมผัสกับน้ำโดยตรง

5.2.4 การอ่านค่าครั้งแรกของจุดตรวจวัดสำหรับรายการที่ต้องตรวจวัด ต้องดำเนินการภายใน 12 ชั่วโมง หลังจากติดตั้งจุดตรวจวัดและก่อนการขุดเจาะในรอบถัดไป ความถี่ในการตรวจวัด ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในตารางที่ 3 และตารางที่ 4 โดยพิจารณาจากระยะห่างระหว่างจุดตรวจวัดถึงผิวหน้าขุดหน้าอุโมงค์ และอัตราการเปลี่ยนตำแหน่งของดาตอโมงค์ สำหรับการอ่านค่าครั้งแรกของรายการตรวจวัดเพิ่มเติมและความถี่ในการตรวจวัดต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของการออกแบบ

ตารางที่ 3 ความถี่ในการตรวจวัดที่กำหนดตามระยะห่างจากผิวหน้าขุดหน้าอุโมงค์ (ที่มา “Q/CR 9218-2024”)

ระยะห่างจากจุดตรวจวัดถึงผิวหน้าขุดหน้าอุโมงค์ (m)	ความถี่ในการตรวจวัด
$h \leq B$	2 ครั้ง ต่อ วัน
$B - 2B$	1 ครั้ง ต่อ วัน
$2B - 5B$	1 ครั้ง ต่อ 2-3 วัน
$h > 5B$	1 ครั้ง ต่อ 7 วัน

หมายเหตุ:

1. B หมายถึง ความกว้างสูงสุดในการขุดอุโมงค์ มีหน่วยเป็น m
2. h หมายถึง ระยะห่างการขุด มีหน่วยเป็น m
3. หากสภาพทางธรณีวิทยา มีความผิดปกติ พบชั้นดินหรือหินที่ไม่เสถียรหรือมีความเสี่ยงต่อการพังทลายต้องเพิ่มความถี่ในการตรวจวัด โดยให้พิจารณาความเหมาะสมตามข้อกำหนดด้านเทคนิคที่ระบุในแผนวิธีการก่อสร้าง
4. ความถี่ในการตรวจวัดพิจารณาจากอัตราการเปลี่ยนตำแหน่งของดาตอโมงค์และระยะห่างจากจุดตรวจวัดถึงผิวหน้าขุดหน้าอุโมงค์ โดยเลือกใช้ค่าความถี่ในการตรวจวัดที่มากกว่า

ตารางที่ 4 ความถี่ในการตรวจวัดที่กำหนดตามอัตราการเปลี่ยนตำแหน่งของดาตอโมงค์ (ที่มา “Q/CR 9218-2024”)

ความเร็วในการเปลี่ยนตำแหน่ง (มิลลิเมตรต่อวัน)	ความถี่ในการตรวจวัด
≥ 5	2 ครั้ง ต่อ วัน
1 - 5	1 ครั้ง ต่อ วัน
0.2 - 1	1 ครั้ง ต่อ 2-3 วัน
< 0.2	1 ครั้ง ต่อ 7 วัน

5.3 ข้อกำหนดเครื่องมือและการควบคุมสำหรับการติดตามและตรวจวัด

5.3.1 วิธีการและเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดและการติดตามผล ต้องเลือกให้เหมาะสมกับรายการตรวจวัดและความแม่นยำของการตรวจวัด และต้องเป็นไปตามที่ระบุในภาคผนวก ข ตารางที่ ข.1 เว้นแต่จะระบุเป็นอย่างอื่นในแบบ ทั้งนี้ เครื่องมือในการตรวจวัดต้องผ่านการตรวจสอบและสอบเทียบตามข้อกำหนดที่เกี่ยวข้อง

5.3.2 ความละเอียดของเครื่องมือวัด ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในตารางที่ 5 และตารางที่ 6 เครื่องมือตรวจวัดต้องสามารถต้านทานการสั่นสะเทือน การกัดกร่อน และต้องมีสมบัติกันน้ำ

ตารางที่ 5 ความแม่นยำในการวัดของรายการที่ต้องตรวจวัด (ที่มา “Q/CR 9604-2015”)

ลำดับที่	รายการการตรวจวัด	ความแม่นยำในการวัด (mm)
1	การหลุดตัวของหลังคาอุโมงค์และเท้าช้าง	0.5 – 1.0
2	การบีบตัวของช่องว่างในอุโมงค์	0.5 – 1.0
3	การหลุดตัวของพื้นผิวดิน	0.5 – 1.0

ตารางที่ 6 ความแม่นยำในการวัดของรายการตรวจวัดอื่น ๆ (ที่มา “Q/CR 9604-2015”)

ลำดับที่	รายการอื่น ๆ ของการตรวจวัด	ความแม่นยำในการวัด
1	ความดันระหว่างชั้นหินโดยรอบและโครงสร้างค้ำยันชั้นดิน	$\leq 0.5\%$ F.S.
2	ความเครียดของคอนกรีตพื้น	$\pm 0.1\%$ F.S.
3	ความเค้นในโครงเหล็ก	แรงดึง $< 0.5\%$ F.S. และ แรงกด 1.0% F.S.
4	ความดันระหว่างโครงสร้างค้ำยันชั้นดินและคานาอุโมงค์	$\leq 0.5\%$ F.S.
5	ความเค้นภายในที่เกิดขึ้นในคานาอุโมงค์	$\pm 0.1\%$ F.S.
6	การเคลื่อนที่ภายในของชั้นหินโดยรอบ	0.1 mm
7	การดันตัวของพื้นอุโมงค์	0.5 - 1 mm
8	ความเร็วของการสั่นสะเทือนจากการระเบิด	1 mm/s

หมายเหตุ: F.S. หมายถึง ค่าสูงสุดที่เครื่องมือสามารถตรวจวัดได้ (full scale of instrument)

- 5.3.3 การควบคุม การติดตามและการตรวจวัด ต้องครอบคลุมถึงการเปลี่ยนตำแหน่งภายในอุโมงค์ การทรุดตัวของผิวดิน แรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดและอื่น ๆ โดยต้องพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เช่น สภาพทางธรณีวิทยา ความปลอดภัยในการก่อสร้างอุโมงค์ ความมั่นคงของโครงสร้างอุโมงค์ในระยะยาว รวมถึงลักษณะและความสำคัญของอาคารโดยรอบ
- 5.3.4 การควบคุมค่าการเปลี่ยนตำแหน่ง ต้องพิจารณาตามระยะห่างจากจุดตรวจวัดถึงผิวหน้าขุดอุโมงค์ และต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในตารางที่ 7 สำหรับค่าการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดที่ยอมรับได้ ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในการออกแบบ หากไม่มีการระบุไว้ในแบบ ต้องได้รับการพิจารณาและอนุมัติจากผู้ออกแบบและคำนวณและ/หรือที่ปรึกษา ก่อนดำเนินการ

ตารางที่ 7 ข้อกำหนดการควบคุมค่าการเปลี่ยนตำแหน่ง (ที่มา “Q/CR 9604-2015”)

ข้อกำหนด	เมื่อระยะทางถึงผิวหน้าขุดหน้าอุโมงค์เป็น 1B (U_{1B})	เมื่อระยะทางถึงผิวหน้าขุดหน้าอุโมงค์เป็น 2B (U_{2B})	ระยะห่างไกลจากผิวหน้าขุดหน้าอุโมงค์
ค่าที่ยอมรับได้	65% U_o	90% U_o	100% U_o

หมายเหตุ: B หมายถึง ความกว้างของการขุดอุโมงค์ U_o หมายถึง ค่าการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุด

- 5.3.5 การควบคุมการทรุดตัวของผิวดิน ต้องคำนวณโดยพิจารณาจากเสถียรภาพของชั้นดิน และข้อกำหนดด้านความปลอดภัยของสิ่งปลูกสร้างโดยรอบ โดยให้เลือกใช้ค่าที่น้อยกว่าเป็นเกณฑ์ในการควบคุม
- 5.3.6 การควบคุมการสั่นสะเทือนจากการระเบิด สำหรับโครงสร้างใกล้เคียงที่ต้องได้รับการป้องกันความเสียหายจากโครงการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟความเร็วสูง ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในตารางที่ 8 และต้องเป็นไปตามข้อกำหนดต่อไปนี้
- 5.3.6.1 ค่าความเร็วของการสั่นสะเทือนสูงสุดที่ยอมรับได้สำหรับอาคาร ต้องพิจารณาถึงความสำคัญของอาคาร คุณภาพของการก่อสร้าง อายุของโครงสร้าง ความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือน สภาพฐานราก และปัจจัยอื่น ๆ อย่างรอบด้าน
- 5.3.6.2 สำหรับอาคารประวัติศาสตร์และโบราณสถานที่ได้รับการคุ้มครองในระดับจังหวัดหรือสูงกว่า ค่าความเร็วของการสั่นสะเทือนที่ยอมรับได้ ต้องผ่านการพิจารณาโดยผู้เชี่ยวชาญและต้องได้รับการอนุมัติจากกรมศิลปากร ซึ่งรับผิดชอบในการอนุรักษ์โบราณสถานและโบราณวัตถุในประเทศไทย

- 5.3.6.3 ค่าความเร็วของการสั่นสะเทือนสูงสุดที่ยอมรับได้ของอุโมงค์และทางเดินใต้ดิน ต้องพิจารณาถึงความสำคัญของโครงสร้าง สภาพชั้นดินหรือชั้นหินโดยรอบ ขนาดหน้าตัดขวาง ความลึกของชั้นดิน ทิศทางของการระเบิด ความถี่ของแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว และปัจจัยอื่น ๆ อย่างรอบด้าน
- 5.3.6.4 ค่าความเร็วของการสั่นสะเทือนสูงสุดที่ยอมรับได้สำหรับคอนกรีตหลาที่เพิ่งเท และไม่ได้ใช้เป็นโครงสร้างเก็บกักน้ำ ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ข้อกำหนดค่าสั่นสะเทือนจากการระเบิดที่ยอมรับได้ตามความปลอดภัย (ที่มา “Q/CR 9604-2015”)

ลำดับที่	ประเภทของโครงสร้างที่ต้องได้รับการป้องกัน ความเสียหาย	ความเร็วของการสั่นสะเทือนที่ยอมรับได้ตาม ความปลอดภัย (Safety allowable vibration velocity) (cm/s)		
		< 10 เฮิร์ตซ์	10 ถึง 50 เฮิร์ตซ์	50 ถึง 100 เฮิร์ตซ์
1	โครงสร้างจากวัสดุในธรรมชาติที่ไม่เป็นไปตามหลัก วิศวกรรม เช่น ถ้ำดิน บ้านดิน บ้านหินทราย	0.5-1.0	0.7-1.2	1.1-1.5
2	บ้านอิฐทั่วไป อาคารหินหรืออิฐขนาดใหญ่ที่ไม่ ทนทานต่อการสั่นสะเทือน	2.0-2.5	2.3-2.8	2.7-3.0
3	อาคารที่มีโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	0-4.0	3.5-4.5	4.2-5.0
4	อาคารและสถานที่ทางประวัติศาสตร์ทั่วไป	0.1-0.3	0.2-0.4	0.3-0.5
5	อุโมงค์ส่งน้ำ	7-15		
6	อุโมงค์การจราจร	10-20		
7	อุโมงค์เหมือง	15-30		
8	อุปกรณ์ในห้องควบคุมกลางของสถานีไฟฟ้าและ โรงไฟฟ้า	0.5		
9	คอนกรีตหลาที่เพิ่งเท			
	เริ่มต้นของที่ 3 วัน	2.0 – 3.0		
	อายุ 3 ถึง 7 วัน	3.0 - 7.0		
	อายุ 7 ถึง 28 วัน	7.0 - 12		

หมายเหตุ:

1. ค่าความถี่ที่ระบุไว้ในตารางข้างต้น หมายถึง ความถี่ของคลื่นที่มีแอมพลิจูดสูงสุด
2. ขอบเขตของความถี่ ต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดในแบบ หากไม่มีการกำหนดไว้ สามารถใช้ค่าที่อ้างอิงจากงานที่มีลักษณะคล้ายกันหรือจากการวัดค่าคลื่นสั่นสะเทือนที่ได้จากหน้างาน โดยการเลือกค่าความถี่สามารถพิจารณาจากข้อมูลดังนี้ สำหรับการระเบิดในโพรงใต้ดิน (chamber blasting) มีค่าความถี่ต่ำกว่า 20 เฮิรตซ์ สำหรับการระเบิดหลุมลึก (deep hole blasting) มีค่าความถี่ระหว่าง 10 - 60 เฮิรตซ์ และสำหรับการระเบิดหลุมตื้น (shallow hole blasting) มีค่าความถี่ระหว่าง 40 - 100 เฮิรตซ์
3. หากมีข้อกำหนดพิเศษ ความถี่ที่ใช้ต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของสถานที่นั้น ๆ ทั้งนี้ ต้องได้รับการพิจารณาและอนุมัติจากผู้ออกแบบและคำนวณและ/หรือที่ปรึกษา ก่อนดำเนินการ

6. การจัดการข้อมูลและการวัดผลการตรวจวัด

การจัดการและการประเมินผลข้อมูลจากการตรวจวัด เป็นขั้นตอนสำคัญในการควบคุมและติดตามความก้าวหน้าของงานก่อสร้าง ข้อมูลเชิงปริมาณที่ได้จากการตรวจวัดต้องได้รับการจัดเก็บ วิเคราะห์ และนำเสนออย่างเป็นระบบ เพื่อใช้ประกอบการดำเนินการก่อสร้างให้สอดคล้องกับข้อกำหนดและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

6.1 ข้อกำหนดทั่วไปสำหรับการจัดการข้อมูลและการวัดผลการตรวจวัด

- 6.1.1 ต้องดำเนินการวิเคราะห์ทันทีหลังการขุดเจาะรวมถึงการตรวจสอบ และการจัดเรียงข้อมูลต้องดำเนินการทันทีหลังจากที่ได้รับข้อมูลจากการติดตามและตรวจวัด
- 6.1.2 การวิเคราะห์ต้องดำเนินการทุกสัปดาห์และทุกเดือน เพื่อคาดการณ์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของข้อมูล ประเมินสภาพการก่อสร้าง จัดทำรายงานการวิเคราะห์ผล และเป็นแนวทางสำหรับงานก่อสร้างในขั้นตอนถัดไป
- 6.1.3 การวิเคราะห์ข้อมูลการติดตามและตรวจวัด ต้องเป็นไปตามขั้นตอนดังต่อไปนี้
 - 6.1.3.1 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและผลการตรวจวัด
 - 6.1.3.2 เลือกเส้นโค้งการถดถอย (regression curve) เพื่อคาดการณ์ค่าสุดท้ายของข้อมูลและเปรียบเทียบกับค่าควบคุมตามเกณฑ์มาตรฐาน
 - 6.1.3.3 ประเมินโครงสร้างค้ำยันขั้นต้น สภาพชั้นดินหรือชั้นหินโดยรอบวิธีการก่อสร้างและลำดับขั้นตอนของการก่อสร้าง
 - 6.1.3.4 จัดทำรายงานผลการประเมินและข้อเสนอแนะในการดำเนินงาน หากพบค่าที่เกินเกณฑ์ที่กำหนด ต้องจัดทำมาตรการรับมือสำหรับงานก่อสร้างที่เกี่ยวข้อง ข้อมูลที่ได้รับจากการติดตามและตรวจวัด ต้องดำเนินงานตามผังงานในภาคผนวก ก รูปที่ ก.1

6.1.4 การประเมินความปลอดภัยในการทำงานสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระดับตามข้อกำหนดของการเปลี่ยนตำแหน่งที่ระบุไว้ในแบบ ต้องการดำเนินงานตามขั้นตอนการประเมินความปลอดภัยของงานก่อสร้างแสดงไว้ในภาคผนวก ก รูปที่ ก.2 และการประเมินความปลอดภัยในการทำงานและมาตรการรับมือที่เกี่ยวข้อง ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในตารางที่ 9 กรณีพบค่าการเปลี่ยนตำแหน่งเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้ต้องมีแนวทางการแก้ไขที่ชัดเจน โดยอ้างอิงตามข้อกำหนดของมาตรฐาน และต้องได้รับการอนุมัติจากวิศวกรสนาม

ตารางที่ 9 การประเมินความปลอดภัยของงานและมาตรการทางวิศวกรรม (ที่มา “Q/CR 9604-2015”)

ระดับการประเมิน	ระยะห่างจากผิวหน้าการขุด 1B	ระยะห่างจากผิวหน้าการขุด 2B	มาตรการทางวิศวกรรม
III	$U < \frac{1}{3} U_{1B}$	$U < \frac{1}{3} U_{2B}$	หลังการวิเคราะห์ข้อมูลการตรวจสอบและการตรวจวัดหัวหน้าขุดงานตรวจวัดต้องรายงานต่อวิศวกรสนามและแจ้งให้หน่วยงานดำเนินการก่อสร้าง พร้อมทั้งส่งผลวิเคราะห์ให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง
II	$\frac{1}{3} U_{1B} \leq U \leq \frac{2}{3} U_{1B}$	$\frac{1}{3} U_{2B} \leq U \leq \frac{2}{3} U_{2B}$	หัวหน้าขุดงานตรวจวัดต้องรายงานผลให้วิศวกรสนามเพื่อตรวจสอบและแจ้งต่อหน่วยงานที่เกี่ยวข้องโดยทันที ผู้ควบคุมงานต้องประเมินสถานการณ์ร่วมกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องและเสนอแนวทางแก้ไขทางวิศวกรรม หากจำเป็นให้เพิ่มความถี่ในการตรวจวัด และดำเนินมาตรการทางวิศวกรรมที่เหมาะสมทันที
I	$U > \frac{2}{3} U_{1B}$	$U > \frac{2}{3} U_{2B}$	หัวหน้าขุดงานตรวจวัดต้องรายงานผลต่อวิศวกรสนามทันที เมื่อได้รับการยืนยันค่าการเปลี่ยนตำแหน่ง โดยให้ดำเนินมาตรการฉุกเฉิน เช่น การหยุดการขุดชั่วคราว การค้ำยันฉุกเฉิน หรือการอพยพ พร้อมเพิ่มความเข้มงวดในการสังเกตการณ์ภาคสนาม และรายงานผลต่อหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ผู้ว่าจ้างต้องเรียกฝ่ายที่เกี่ยวข้องเข้าประเมินสถานการณ์และจัดทำแผนแก้ไขอย่างเหมาะสมทันที

หมายเหตุ: B หมายถึง ความกว้างสูงสุดของการขุดอุโมงค์ U หมายถึง การเคลื่อนที่ที่วัดได้ และ U_{1B}, U_{2B} หมายถึง ค่ามาตรฐานของการควบคุมการเปลี่ยนตำแหน่ง

6.2 การนำเสนอข้อมูลการตรวจวัด

หลังจากการจัดเก็บและประมวลผลข้อมูล ต้องมีการ นำเสนอผลการตรวจวัด เพื่อสร้างความเข้าใจร่วมกันระหว่างฝ่ายที่เกี่ยวข้อง ข้อมูลที่นำเสนอจะต้องมีรูปแบบที่ชัดเจน ถูกต้อง ครบถ้วน และเป็นปัจจุบัน รวมถึงต้องสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของโครงสร้างและชั้นดินโดยรอบ ทั้งนี้ เพื่อประโยชน์ในการควบคุมงาน การวิเคราะห์แนวโน้ม และการวางแผนการดำเนินงานต่อไป

6.2.1 การตรวจวัดการเปลี่ยนตำแหน่งในลักษณะสามมิติ เป็นแนวทางปฏิบัติที่ใช้กันโดยทั่วไป เนื่องจากสามารถให้ข้อมูลที่ครอบคลุมและปริมาณมาก ส่งผลให้เทคนิคการตรวจวัด รูปแบบอื่นและอุปกรณ์ตรวจวัดอื่น ๆ เช่น เครื่องวัดการยืดตัว (extensometers) โหลดเซลล์ (load cells) เกจความเครียด (strain gauges) ฯลฯ ถูกติดตั้งเฉพาะในกรณีพิเศษ สำหรับการนำเสนอข้อมูลจากการติดตามการเปลี่ยนตำแหน่งแบบสามมิติ โดยข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด ต้องถูกนำเสนอข้อมูลในรูปแบบมาตรฐานดังต่อไปนี้

6.2.1.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับการเปลี่ยนตำแหน่ง (time-displacement diagram) ตัวอย่างแสดงในรูปที่ 6 และรูปที่ 7

6.2.1.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างกับการเปลี่ยนตำแหน่ง (distance-displacement diagram) ตัวอย่างแสดงในรูปที่ 8

6.2.1.3 แผนภาพเส้นโค้งการโก่งตัวพร้อมเส้นแนวโน้ม (deflection curve diagram with trend line) ตัวอย่างแสดงในรูปที่ 9

6.2.1.4 แผนภาพเวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่ง (displacement vector diagram) ตัวอย่างแสดงในรูปที่ 11

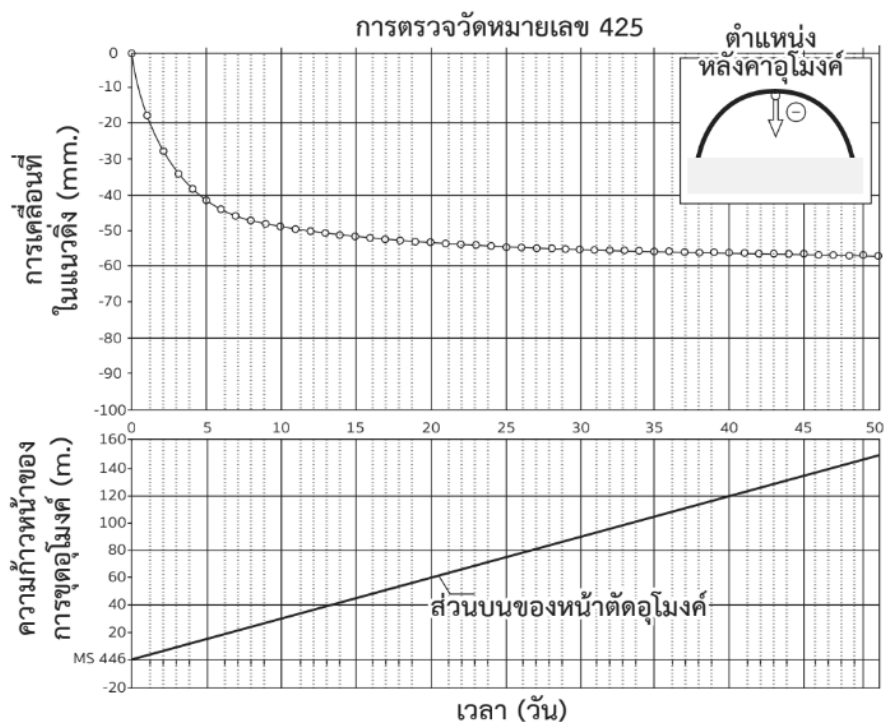
6.2.1.5 แผนภาพคอนทัวร์แสดงระดับของแรงกระทำในดาตอโมงค์ (contour plot of the level of loading in the lining) ตัวอย่างแสดงในรูปที่ 12

6.2.1.6 แผนภาพคอนทัวร์แสดงการทรุดตัวของผิวดิน (contour plot of surface settlements) ตัวอย่างแสดงในรูปที่ 13

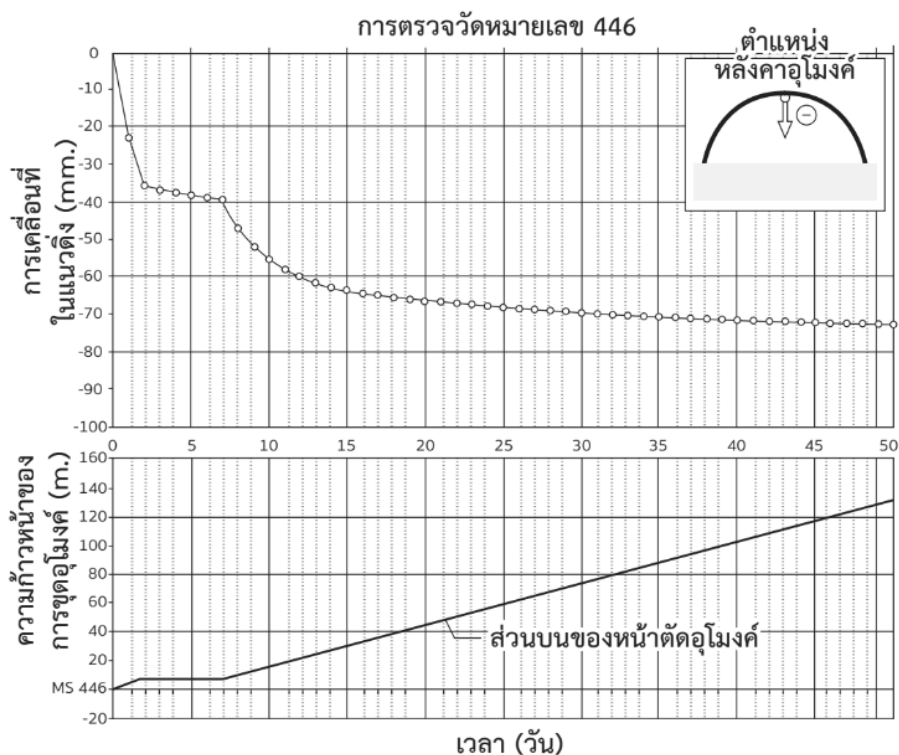
6.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับการเปลี่ยนตำแหน่ง (time-displacement diagram)

เป็นรูปแบบการนำเสนอข้อมูลที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของการเคลื่อนที่ในแนวตั้งแนวนอน และแนวแกนเทียบกับเวลา โดยผลการตรวจวัดการเปลี่ยนตำแหน่งของจุดตรวจวัดทั้งหมดในหน้าตัดเดียวกันจะถูกรวบรวมไว้ในแผนภาพเดียว รวมถึงข้อมูลการดำเนินงานและขั้นตอนการก่อสร้าง เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างกับการเปลี่ยนตำแหน่งได้ ประวัติของการเปลี่ยนตำแหน่งที่เกิดขึ้นถูกนำมาใช้เพื่อประเมิน

กระบวนการเข้าสู่สภาวะเสถียรภาพ (Stabilization Process) ของโครงสร้าง รูปที่ 6 ตัวอย่างของความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับการเปลี่ยนตำแหน่ง และรูปที่ 7 ตัวอย่างของความสัมพันธระหว่างเวลากับการเปลี่ยนตำแหน่งเมื่อการขุดเจาะหน้าตัดอุโมงค์ถูกระงับชั่วคราว หลังจากนั้นการขุดเจาะดำเนินการต่อด้วยอัตราการขุดเจาะที่คงที่



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับการเปลี่ยนตำแหน่ง สำหรับอัตราการขุดเจาะที่คงที่ (ที่มา “Galler et al., 2009”)



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับการเปลี่ยนตำแหน่ง สำหรับการขุดเจาะแบบไม่ต่อเนื่อง (ที่มา “Galler et al., 2009”)

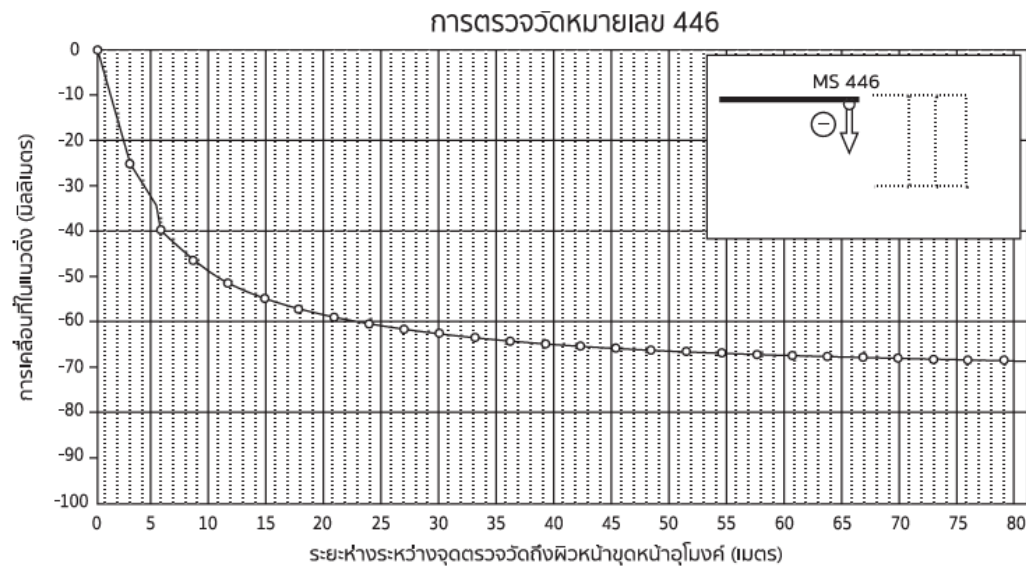
6.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างกับการเปลี่ยนตำแหน่ง (distance-displacement diagram)

เป็นรูปแบบการนำเสนอข้อมูลที่แสดงการเปลี่ยนตำแหน่งของอุโมงค์ การเปลี่ยนตำแหน่งของอุโมงค์ในช่วงที่การขุดเจาะถูกระงับแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งมีลักษณะสอดคล้องกับพฤติกรรมของการเปลี่ยนตำแหน่งในรูปที่ 7 พบว่าเวลามีผลต่อการเปลี่ยนตำแหน่งเมื่อมีการหยุดดำเนินการขุดเจาะ

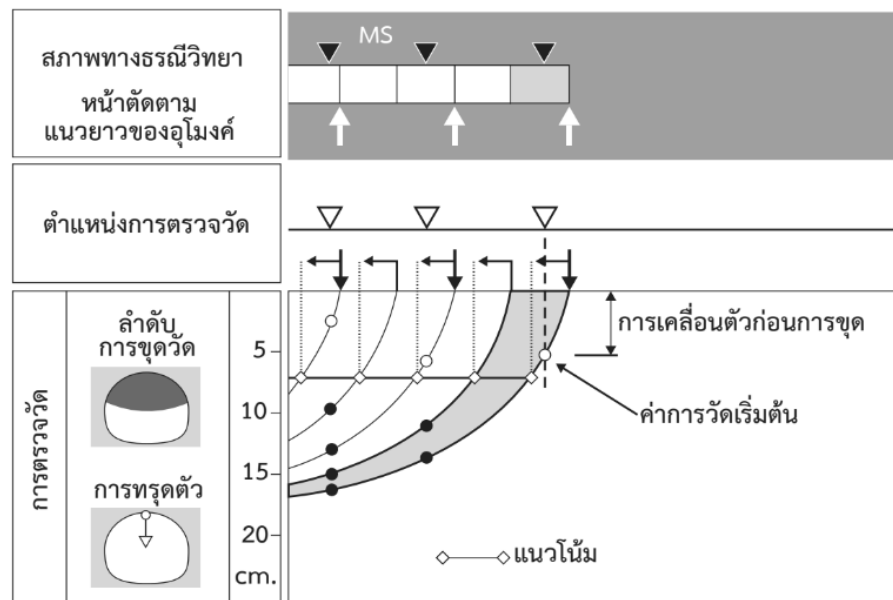
6.2.4 เส้นโค้งการโก่งตัวพร้อมเส้นแนวโน้ม (deflection curve diagram with trend line)

เป็นรูปแบบการนำเสนอข้อมูลสำหรับการสังเกตกระบวนการเปลี่ยนแปลงของความเครียดภายในและการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของอุโมงค์ ช่วยให้สามารถระบุการเปลี่ยนแปลงของสภาพชั้นดิน เช่น การพบรอยเลื่อน เป็นต้น เส้นโค้งการโก่งตัวแสดงถึงลักษณะการเปลี่ยนตำแหน่ง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนหน้าตัดอุโมงค์ โดยเส้นโค้งการโก่งตัวจากการตรวจวัดในช่วงเวลาใด ๆ ถูกแสดงรวมกันในแผนภาพเดียวโดยแสดงอยู่ในรูปแบบของ

เวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่ง รูปที่ 9 แสดงตัวอย่างอิทธิพลของแต่ละขั้นตอนการขุดเจาะต่อ ส่วนของอุโมงค์ที่ขุดเสร็จและโครงสร้างค้ำยันที่ติดตั้งไว้ก่อนหน้านี้



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างกับการเปลี่ยนตำแหน่ง (ที่มา “Galler et al., 2009”)



รูปที่ 9 เส้นโค้งการโก่งตัวสำหรับตำแหน่งหลังคาอุโมงค์แสดงการประมาณค่าของ "การเปลี่ยนตำแหน่งก่อนการขุด" (Pre-displacements) และเส้นแนวโน้ม (Trend Line) (ที่มา “Galler et al., 2009”)

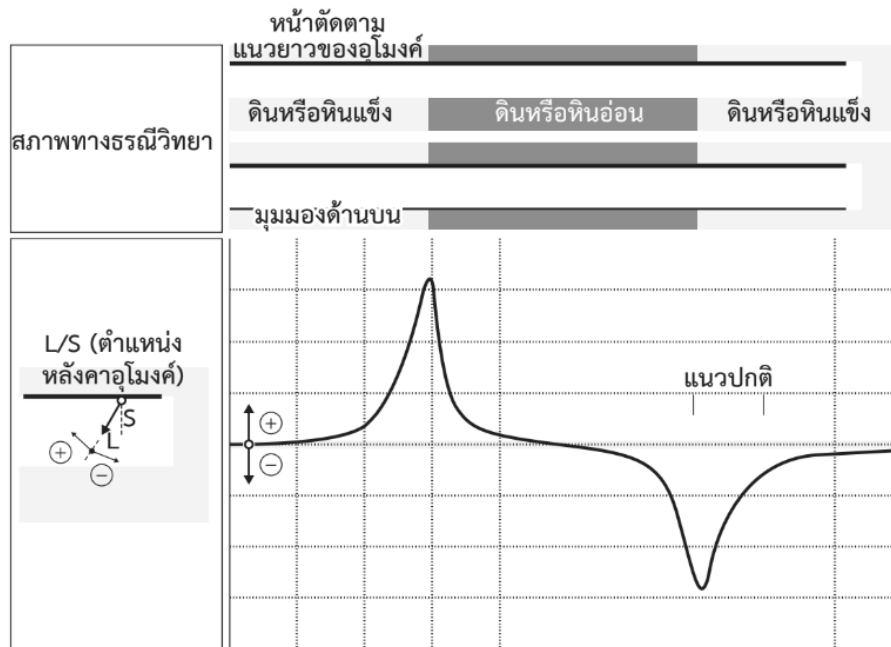
การเปลี่ยนตำแหน่งก่อนการขุด (pre-displacement) หมายถึง การเปลี่ยนตำแหน่งของชั้นดินหรือชั้นหินที่เกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าขุดหน้าอุโมงค์ ในช่วงเวลาที่มีการอ่านค่าครั้งแรกของจุดตรวจวัด (zero reading) ซึ่งจุดตรวจวัดจุดแรกไม่สามารถวัดได้โดยตรง จึงต้องประมาณค่าโดยวิธีการคาดคะเนนอกช่วงของข้อมูล (extrapolation method) และนำไปเปรียบเทียบกับค่าการตรวจวัดในภายหลัง เส้นโค้งการโก่งตัวมักใช้ร่วมกับเส้นแนวโน้ม โดยการสร้างเส้นแนวโน้มจะเชื่อมค่าจากเส้นโค้งการโก่งตัว ณ ระยะห่างคงที่จากผิวหน้าขุดเจาะ (รูปที่ 9)

6.2.5 แนวการวางตัวของเวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่ง (displacement vector orientation)

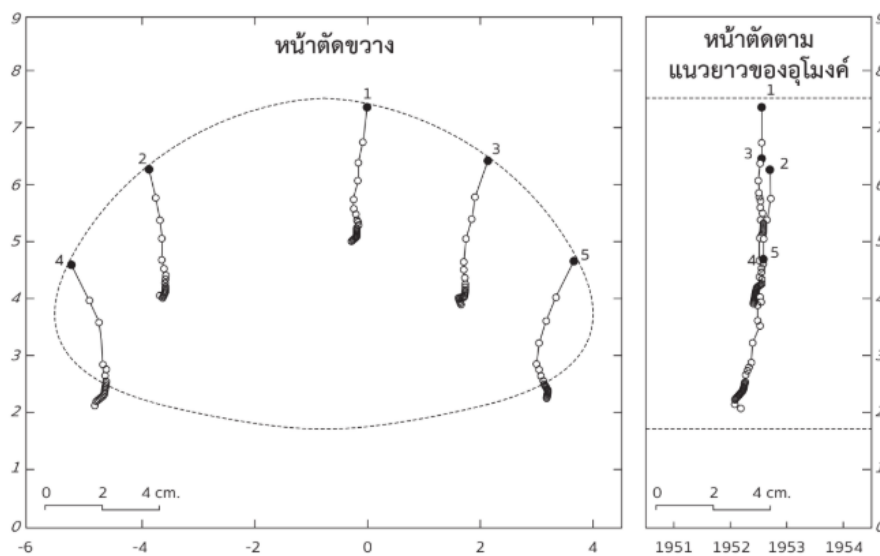
การวางตัวของเวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่ง (L/S) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนตำแหน่งตามแนวยาว (longitudinal, L) และการทรุดตัว (settlement, S) แสดงถึงการเบี่ยงเบนเชิงมุมของเวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่งจากแนวตั้ง การประเมินแนวโน้มของค่า L/S เป็นวิธีที่เหมาะสมในการระบุการเปลี่ยนแปลงของสภาพชั้นดินหรือชั้นหินบริเวณขุดเจาะเวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่งที่มีแนวโน้มเบี่ยงเบนจากทิศทางการขุดเจาะ บ่งชี้ว่ามีชั้นดินหรือชั้นหินอ่อนอยู่ด้านหน้าของแนวขุดเจาะอุโมงค์ หากเวกเตอร์เบนไปในทิศเดียวกับการขุด บ่งชี้ถึงชั้นดินหรือชั้นหินที่แข็งแรงกว่าในบริเวณด้านหน้าอุโมงค์ รูปที่ 10 ตัวอย่างแนวโน้มการเบี่ยงเบนของเวกเตอร์ L/S เมื่อขุดอุโมงค์ผ่านชั้นดินหรือชั้นหินอ่อน แนวโน้มของเวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่ง (ในกรณีนี้คือ ตำแหน่งหลังคาอุโมงค์) จะเบี่ยงเบนจาก "แนวปกติ" (normal orientation) ซึ่งเวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่งใน "แนวปกติ" ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของชั้นดินหรือชั้นหินและความเค้นในพื้นที่ และต้องมีการกำหนดเฉพาะสำหรับแต่ละพื้นที่ เมื่อเข้าใกล้ชั้นดินหรือชั้นหินแข็งจะเกิดแนวโน้มตรงกันข้ามโดยเบี่ยงเบนไปในทิศทางการขุดเจาะ และมีค่ามากที่สุดที่บริเวณรอยต่อของชั้นดินหลังจากเข้าสู่เขตชั้นดินหรือชั้นหินแข็งเวกเตอร์จะกลับสู่แนวปกติ

6.2.6 เวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่ง (displacement vector diagram)

เป็นรูปแบบการนำเสนอข้อมูลที่ช่วยวิเคราะห์อิทธิพลของโครงสร้างชั้นดินหรือชั้นหิน (เช่น แนวระนาบทิศทางการรอยแตก) ที่มีต่อพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปของโครงสร้าง เวกเตอร์ที่ประเมินจากภาพตัดขวางของการตรวจวัดถูกใช้เพื่อแสดงทิศทางการเปลี่ยนแปลงของการเปลี่ยนตำแหน่งตามเวลาดังรูปที่ 11



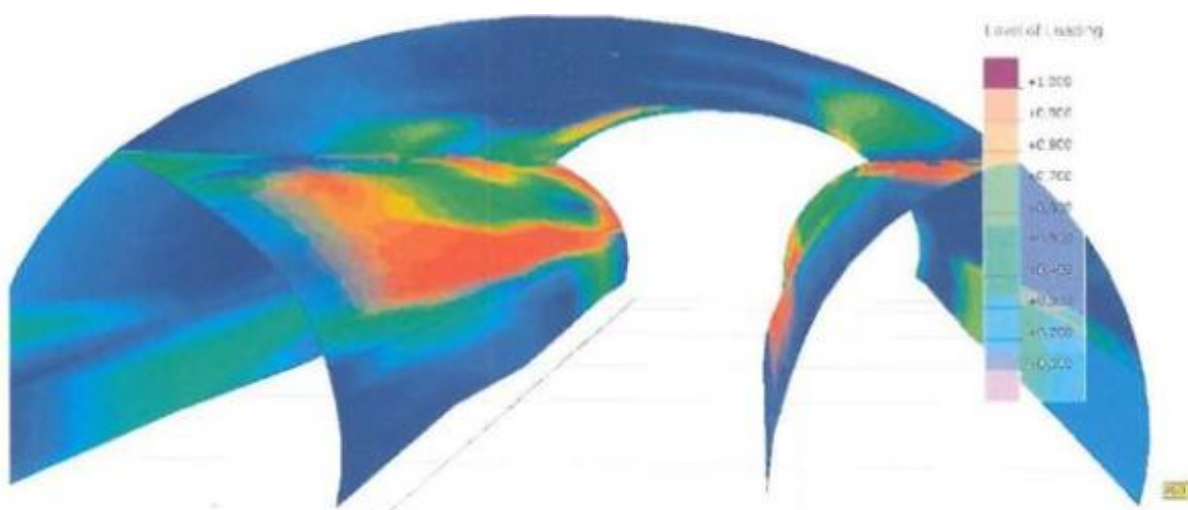
รูปที่ 10 แนวโน้มการเบี่ยงเบนของเวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่ง L/S เมื่อชุดอุโมงค์ผ่านดินแข็ง-ดินอ่อน-ดินแข็ง (ที่มา “Galler et al., 2009”)



รูปที่ 11 ตัวอย่างแผนภาพเวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่งในชั้นดินที่มีสมบัติเป็นเนื้อเดียวกัน (ที่มา “Galler et al., 2009”)

6.2.7 คอนทัวร์แสดงระดับของแรงกระทำในตาดอุโมงค์

ค่าการเปลี่ยนตำแหน่งที่วัดได้ สามารถใช้ในการประเมินค่าความเครียดในผนังคอนกรีตพื้น ในการคำนวณความเครียดในผนังคอนกรีต สามารถคำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงสมบัติของคอนกรีตพื้นตามช่วงเวลา ระดับของแรงกระทำหมายถึงอัตราส่วนระหว่างความเครียด (stress) ต่อกำลังรับแรงสูงสุดของคอนกรีตพื้น (ultimate strength) นิยมแสดงในรูปแผนภาพการเปลี่ยนตำแหน่งตามแนวเส้นคอนทัวร์ (contour plot) รูปที่ 12 ตัวอย่างข้อมูลจากอุโมงค์ต้นในพื้นที่เมือง แผนภาพคอนทัวร์ที่แสดงให้เห็นภาพรวมของการใช้งานคอนกรีตพื้นสำหรับผิวอุโมงค์

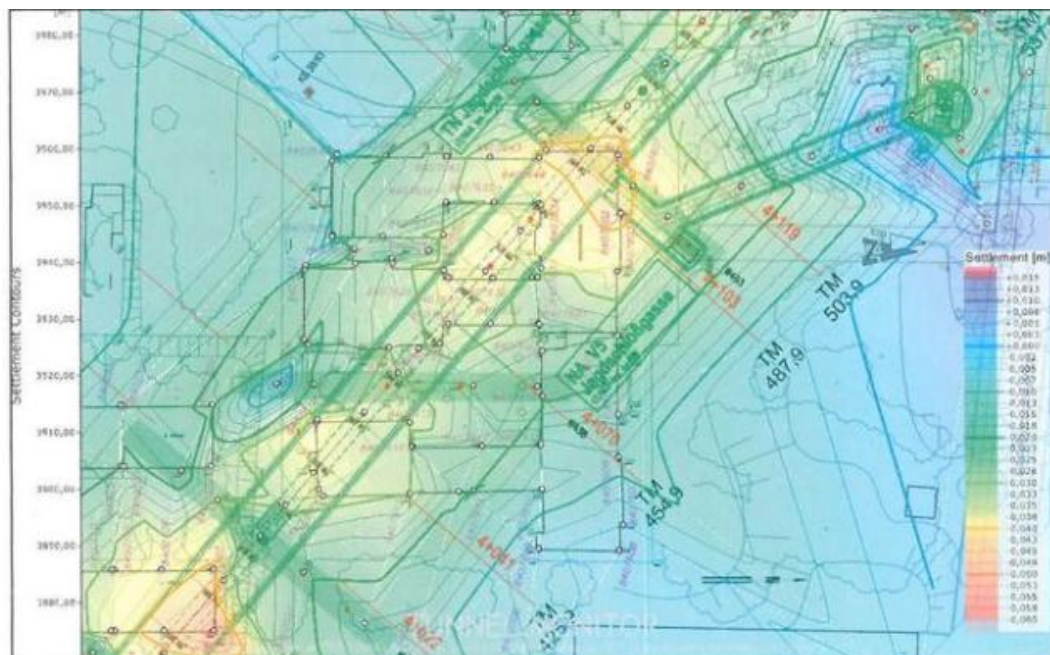


หมายเหตุ: สีแดงแสดงระดับแรงที่สูงและสีน้ำเงินแสดงระดับแรงที่ต่ำ

รูปที่ 12 ตัวอย่างการกระจายระดับของแรงในผนังคอนกรีตพื้นในช่วงเวลาหนึ่ง (Galler et al., 2009)

6.2.8 การทรุดตัวของผิวดิน

ค่าการทรุดตัวของผิวดินสามารถสรุปผลในรูปแบบของแผนภาพการทรุดตัวตามแนวเส้นคอนทัวร์ รูปที่ 13 ตัวอย่างแผนภาพการทรุดตัวของผิวดินที่ผ่านการประเมิน ซึ่งแสดงถึงอิทธิพลของการก่อสร้างต่อการกระจายตัวและขนาดของการเปลี่ยนตำแหน่ง รวมถึงแสดงค่าสูงสุดของการทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน (differential settlements) ที่เกิดกับสิ่งปลูกสร้าง ทางรถไฟหรือท่อส่ง สามารถใช้ในการระบุพื้นที่ที่มีการทรุดตัวเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้



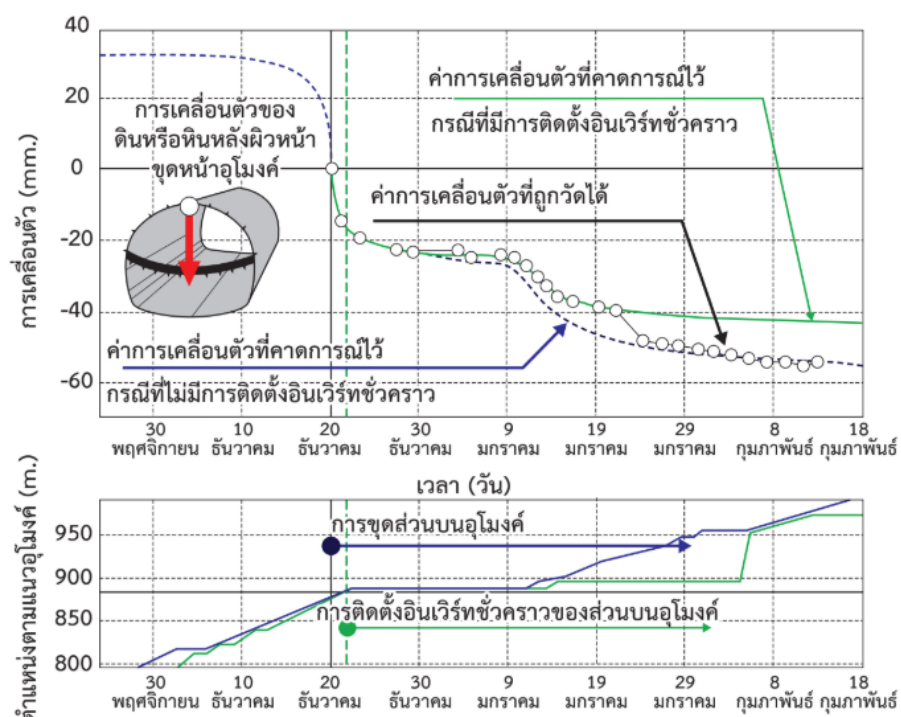
รูปที่ 13 ตัวอย่างแผนภาพการทรุดตัวของผิวดินตามแนวเส้นคอนทัวร์ที่เกิดจากการขุดอุโมงค์ใต้ดินในพื้นที่ที่อยู่อาศัย (Galler et al., 2009)

ทั้งนี้ การประเมินผลเพิ่มเติมทำได้โดยการประยุกต์การประเมินผลการตรวจวัด เช่น เส้นแนวนอนของอัตราส่วนการเปลี่ยนตำแหน่งใช้ประเมินอัตราส่วนระหว่างการทรุดตัวที่หลังคาอุโมงค์กับผนังด้านข้าง และการกำหนดแนวการวางตัวของเวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่งโดยใช้เส้นโครงแผนที่แบบสเตอริโอกราฟ (stereographic projection) เป็นต้น

6.3 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด

6.3.1 การเปลี่ยนแปลงของการเปลี่ยนตำแหน่งตามเวลา

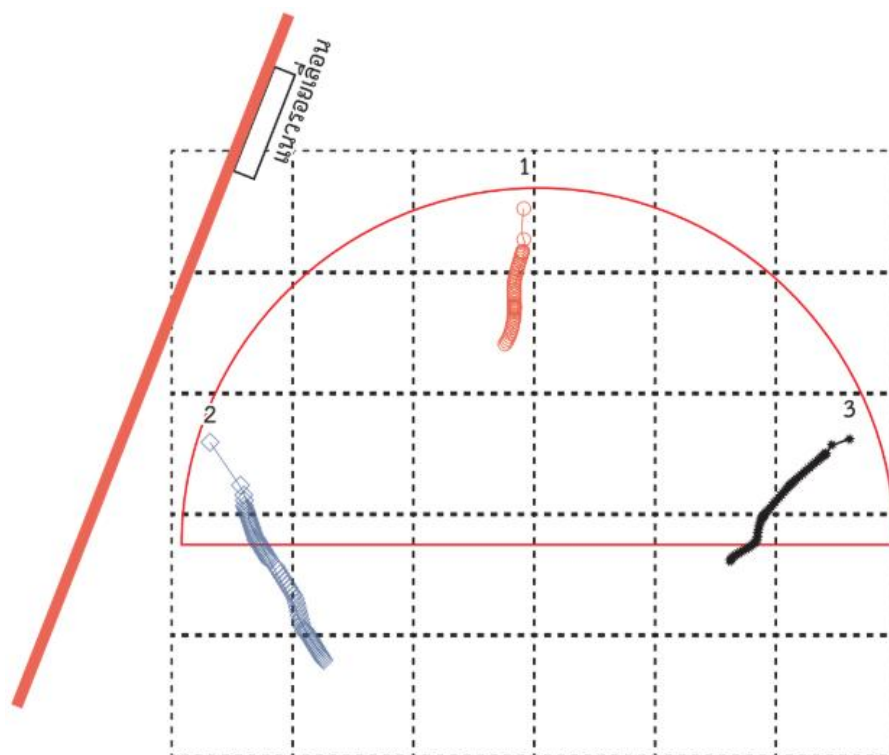
การขุดเจาะที่มีอัตราคงที่และขอบเขตที่สม่ำเสมอทำให้สามารถประเมินอัตราการเปลี่ยนตำแหน่งของอุโมงค์ในการขุดเจาะขั้นตอนถัดไปได้ง่าย การขุดเจาะที่มีอัตราการขุดเจาะไม่คงที่ส่งผลโดยตรงต่ออัตราการเปลี่ยนตำแหน่งทำให้การประเมินผลเป็นไปได้ยาก รูปที่ 14 ตัวอย่างการทรุดตัวบริเวณหลังคาอุโมงค์ เมื่อขุดส่วนหัวอุโมงค์กรณีมีฐานอุโมงค์ชั่วคราวของส่วนบนอุโมงค์ (temporary top heading invert) ซึ่งค่าการเปลี่ยนตำแหน่งที่คาดการณ์ไว้ในกรณีที่มีการติดตั้งฐานอุโมงค์ชั่วคราว (เส้นสีเขียว) และกรณีที่ไม่มีการติดตั้ง (เส้นประสีน้ำเงิน) ถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจริง



รูปที่ 14 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับการเปลี่ยนตำแหน่งที่แสดงระหว่างการเปลี่ยนตำแหน่งที่วัดได้ และการเปลี่ยนตำแหน่งที่คาดการณ์ (ที่มา “Galler et al., 2009”)

6.3.2 แผนภาพเวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่ง

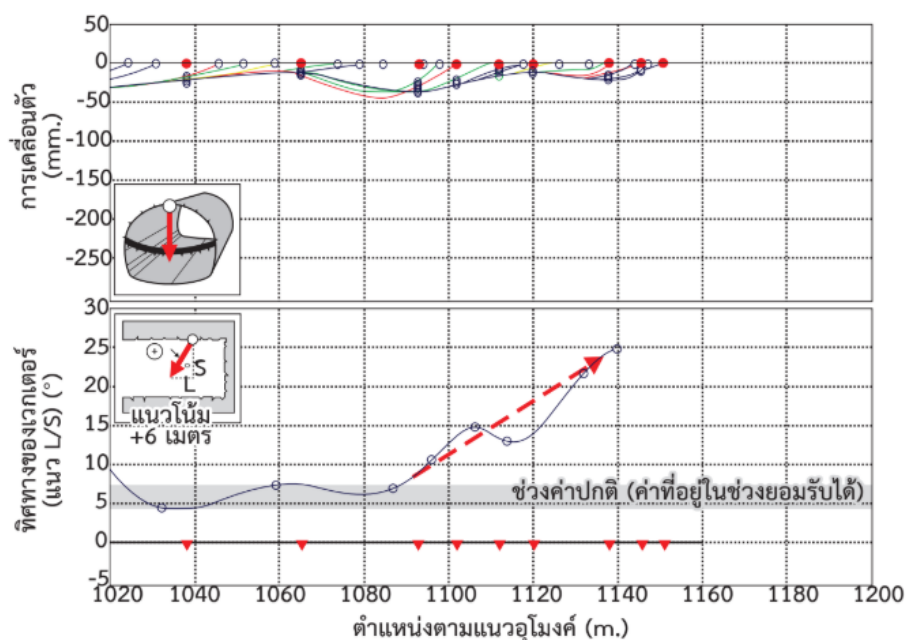
การสร้างแผนภาพเวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่งช่วยให้สามารถสังเกตเห็นถึงการเบี่ยงเบนจากพฤติกรรมปกติของอุโมงค์ ที่เกิดจากลักษณะภายนอกหน้าตัดที่ขุดเจาะ รูปที่ 15 ตัวอย่างอิทธิพลจากแนวรอยเลื่อนที่มีมุมเอียงสูงซึ่งวางตัวเกือบขนานกับแนวแกนอุโมงค์ โดยความเครียดที่เกิดขึ้นระหว่างผนังด้านข้างกับแนวรอยเลื่อนทำให้เกิดการเปลี่ยนตำแหน่งเพิ่มขึ้น



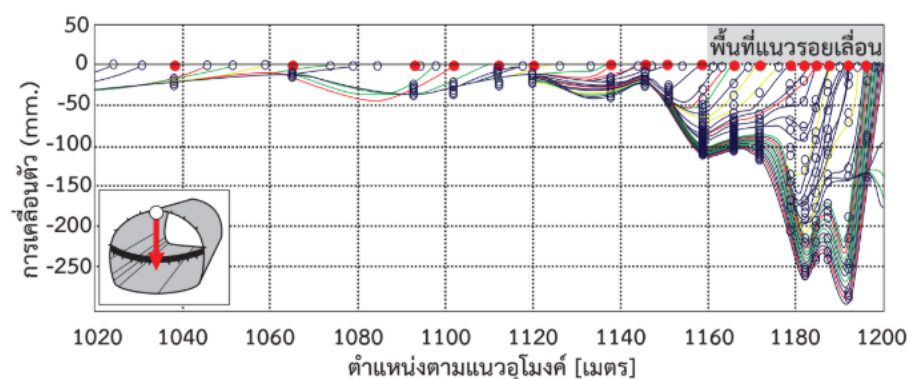
รูปที่ 15 เวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่งกับอิทธิพลของรอยเลื่อนที่อยู่นอกหน้าตัดที่ขุดเจาะ
(ที่มา “Galler et al., 2009”)

6.3.3 แผนภาพเส้นโค้งการโก่งตัวและแนวโน้มทิศทางของเวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่ง

แผนภาพด้านบนแสดงการพัฒนาของค่าการทรุดตัวบริเวณหลังคาอุโมงค์ของผิวหน้าอุโมงค์ แผนภาพด้านล่างแสดงเส้นแนวโน้มของอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนตำแหน่งตามแนวอุโมงค์ ในรูปที่ 16 และค่าการทรุดตัว (L/S หมายถึง ทิศทางของเวกเตอร์การเคลื่อนที่ในรูปของมุม) เส้นโค้งการทรุดตัวแสดงการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างคงที่ ขณะที่เส้นแนวโน้มทิศทางของเวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่งแสดงความเบี่ยงเบนที่ชัดเจนจาก “แนวปกติ” เมื่อเทียบกับทิศทางการขุดเจาะ แนวโน้มนี้แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของสภาพชั้นดินหรือชั้นหิน โดยคาดว่าจะพบดินหรือหินอ่อนที่อยู่ด้านหน้าของแนวขุดเจาะ ในกรณีนี้ ทิศทางเวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่งที่อยู่ในแนวปกติจะมีค่าระหว่าง 4° ถึง 8° เมื่อเทียบกับทิศทางการขุดเจาะ ทั้งนี้ค่าทิศทางตาม “แนวปกติ” ของเวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างดินและสภาพความเค้น ซึ่งต้องกำหนดเป็นกรณีเฉพาะ



รูปที่ 16 เส้นโค้งการเบี่ยงเบนของการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวตั้งของหลังคาอุโมงค์ (รูปด้านบน) และแนวโน้มของอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวอุโมงค์และการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวตั้ง (รูปด้านล่าง) (ที่มา “Galler et al., 2009”)



รูปที่ 17 เส้นโค้งการเบี่ยงเบนที่แสดงการเปลี่ยนตำแหน่งที่เพิ่มขึ้นในเขตที่มีรอยเลื่อนซึ่งพบที่ตำแหน่งตามแนวอุโมงค์ประมาณ 1160 m (ที่มา “Galler et al., 2009”)

6.3.4 ความเหมาะสมของวิธีการประเมินผล

แนวทางการเลือกใช้วิธีการประเมินที่เหมาะสมสำหรับแต่ละวัตถุประสงค์ ตัวอย่างเช่น แผนภาพประวัติการเปลี่ยนตำแหน่ง (displacement history plot) เป็นเครื่องมือที่เหมาะสม สำหรับการประเมินและวิเคราะห์กระบวนการเข้าสู่ภาวะเสถียร ขณะที่เส้นการ

เบี่ยงเบนและเส้นแนวโน้ม มีข้อจำกัดในการนำมาใช้ เพื่อวัตถุประสงค์ดังกล่าว สำหรับการปรับทิศทางของเวกเตอร์การเปลี่ยนตำแหน่งในทิศทางยาว รวมถึงการวางตัวโดยรวมของเวกเตอร์ เป็นวิธีที่เหมาะสมในการคาดการณ์สภาพชั้นดินด้านหน้าของอุโมงค์ รูปที่ 18 นี้ ช่วยให้สามารถเลือกวิธีการประเมินผลได้อย่างเหมาะสมกับวัตถุประสงค์เฉพาะแต่ละกรณี

■ เหมาะสม □ มีข้อจำกัด ■ ไม่เหมาะสม	การประเมินการบวมการเข้าสู่เสถียรภาพของอุโมงค์	การคาดการณ์ค่าการเคลื่อนตัวของสุดท้าย	การกระจายตัวของความเค้นตามแนวยาว	การตรวจสอบเขตชั้นดินหรือหินอ่อนนอกแนวหน้าตัดพร้อมทั้งวิเคราะห์พฤติกรรม การเคลื่อนตัวของมวลดิน	การคาดการณ์ในแนวการขุด	การประเมินความเข้มของ ความเค้นในผิวผนังด้านอุโมงค์
ประวัติการเคลื่อนตัว	■	■	■	□	■	■
เส้นโค้งการโก่งตัว, เส้นแนวโน้ม	□	■	■	□	□	■
แนวโน้มของค่าการเคลื่อนตัว	■	■	■	■	■	■
เวกเตอร์ในแนวหน้าตัดขวาง	■	■	■	■	■	■
เวกเตอร์ในแนวยาวตามแนวอุโมงค์	■	■	■	□	■	■
ทิศทางของเวกเตอร์	■	■	■	■	■	■

(ประยุกต์มาจาก W.Schubert,02)

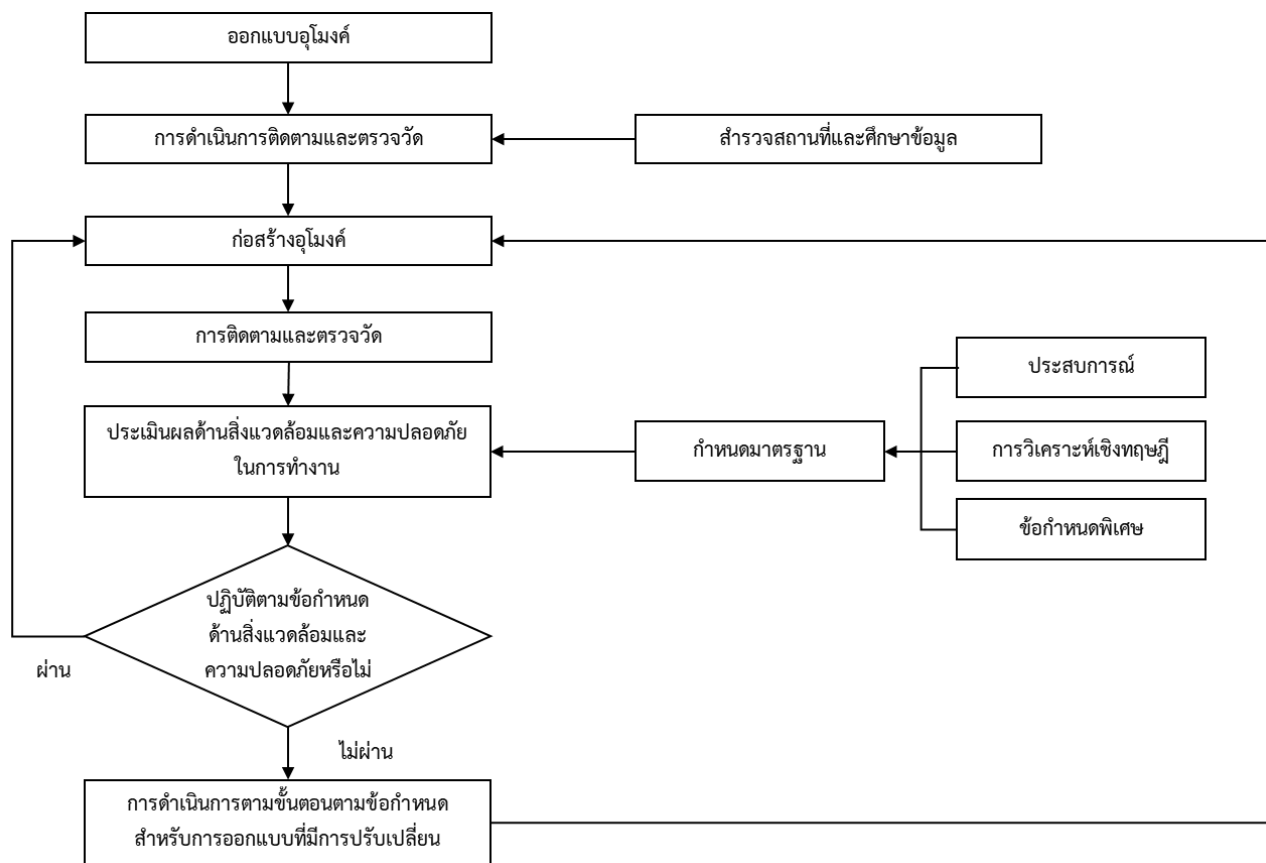
รูปที่ 18 แนวทางการเลือกใช้วิธีการประเมินผลที่เหมาะสมตามวัตถุประสงค์เฉพาะด้าน (ที่มา “Galler et al., 2009”)

เอกสารอ้างอิง

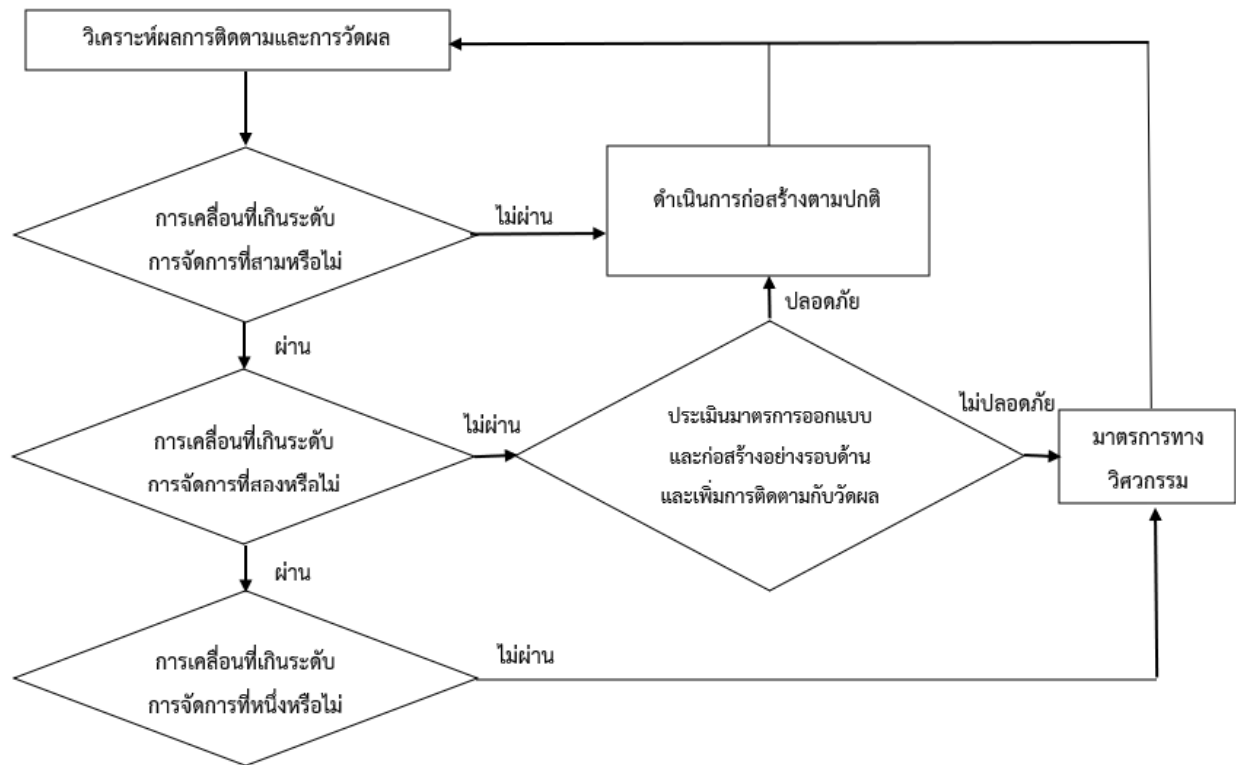
- Austrian Society for Geomechanics. (2010). *The Austrian practice of conventional tunnelling* (R. Galler, Ed.). Medienfabrik Graz GmbH. ISBN 978-3-200-01989-8.
- British Tunnelling Society. (2023). *Specification for tunnelling* (4th ed.). London: Institution of Civil Engineers.
- China Ministry of Railways. (2009). TB 10601-2009: Code for engineering survey of high-speed railway.
- China Railway Corporation. (2015). Technical specification for construction of high-speed railway tunnel (Q/CR 9604-2015).
- China Railway Corporation. (2024). Technical specification for construction of high-speed railway tunnel (Q/CR 9218-2024).
- Japan Society of Civil Engineers. (2016). *Standard specifications for tunneling – Mountain tunnels*. Tokyo: JSCE.

ภาคผนวก ก.

แผนภาพลำดับการก่อสร้างสำหรับมาตรฐานงานตรวจวัด (Monitoring) ในการก่อสร้างอุโมงค์โครงการรถไฟฟ้าความเร็วสูง



รูปที่ ก. 1 แผนภาพของการติดตาม การตรวจวัดและการรายงานผล (ที่มา “Q/CR 9218-2024”)



รูปที่ ก. 2 แผนภาพการประเมินความปลอดภัยในการทำงาน (ที่มา “Q/CR 9218-2024”)

ภาคผนวก ข.

ตารางเพิ่มเติมจากการก่อสร้างสำหรับ มาตรฐานงานตรวจวัด (Monitoring)
ในการก่อสร้างอุโมงค์โครงการรถไฟฟ้าความเร็วสูง

ตารางที่ ข. 1 การเลือกเครื่องมือสำหรับรายการตรวจวัดต่าง ๆ (ที่มา “Q/CR 9604-2015”)

ลำดับที่	รายการวัด	อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบและบันทึกข้อมูล
1	การทรุดตัวของหลังคาอุโมงค์ (crown settlement) และบริเวณเท้าช้าง (arch foot) การวัดการบีบตัวของโครงสร้าง (convergence) และการทรุดตัวของผิวดินด้านบน	วิธีการวัดแบบไม่สัมผัส เช่น กล้องสำรวจแบบประมวลผลรวม (total station) กล้องสำรวจแบบประมวลผลรวมอัตโนมัติ (automatic total station) กล้องวัดมุม (theodolite) และอื่น ๆ
		วิธีการวัดแบบสัมผัส เช่น เครื่องวัดการบีบตัวของโครงสร้าง (convergence meter) การระดับความเที่ยงสูง (precise leveling) แท่งอินวาร์ (invar rod) และอื่น ๆ
2	การดันตัวของพื้นอุโมงค์ (tunnel floor upheave)	เครื่องวัดการบีบตัวของโครงสร้าง (convergence meter) การระดับความเที่ยงสูง (precise leveling) และแท่งอินวาร์ (invar rod)
3	แรงตามแนวแกนของเหล็กยึด (anchor bolt)	เครื่องตรวจวัดเหล็กเส้น (rebar meter)
4	แรงภายในของโครงเหล็ก (steel rib)	เครื่องตรวจวัดเหล็กเส้น (rebar meter) และเซนเซอร์วัดแบบสายลั่น (vibration wire sensor)
5	แรงภายในของคอนกรีตและคอนกรีตพื้น	เซนเซอร์วัดแบบสายลั่น (vibration wire sensor) และไฟเบอร์เกรตติงเซนเซอร์ (fiber grating sensor)
6	แรงดันสัมผัสระหว่างชั้นหินโดยรอบกับระบบค้ำยันชั้นต้น (primary support) แรงดันสัมผัสระหว่างระบบค้ำยันชั้นต้นกับคานาอุโมงค์และแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิด	เซนเซอร์วัดแบบสายลั่น (vibration wire sensor)
7	แรงดันน้ำในดิน (pore water pressure)	พีโซมิเตอร์ (piezometers)
8	การไหลของน้ำเข้าสู่พื้นที่	ฝายสามเหลี่ยม (triangular weir) และเครื่องวัดอัตราการไหล

หมายเหตุ: เครื่องมือในการตรวจวัดต้องผ่านการตรวจสอบและสอบเทียบตามข้อกำหนดที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ ข. 2 ความถี่สำหรับรายการตรวจวัดเสริม (ที่มา “Q/CR 9218-2024”)

ลำดับ ที่	รายการตรวจวัดเสริม	ความถี่การตรวจวัด			
		หลังเปิดหน้า ชุด 1-7 วัน	หลังเปิดหน้า ชุด 7 วัน -1 เดือน	หลังเปิดหน้า ชุด 1-3 เดือน	หลังเปิดหน้า ชุด 3 เดือนขึ้นไป
1	ความดันดิน/หินโดยรอบ	1 ครั้ง/วัน	1 ครั้ง/2 วัน	1 ครั้ง/สัปดาห์	1 ครั้ง/เดือน
2	แรงดันสัมผัส (ระหว่าง โครงรองรับสองชั้น)	1 ครั้ง/วัน	1 ครั้ง/2 วัน	1 ครั้ง/สัปดาห์	1 ครั้ง/เดือน
3	ความเค้นโครงเหล็ก	1 ครั้ง/วัน	1 ครั้ง/2 วัน	1 ครั้ง/สัปดาห์	1 ครั้ง/เดือน
4	แรงแกนสลักเกลียว	1 ครั้ง/วัน	1 ครั้ง/2 วัน	1 ครั้ง/สัปดาห์	1 ครั้ง/เดือน
5	ความเค้นคอนกรีต	1 ครั้ง/วัน	1 ครั้ง/2 วัน	1 ครั้ง/สัปดาห์	1 ครั้ง/เดือน
6	ความเค้นเหล็กเสริม	1 ครั้ง/วัน	1 ครั้ง/2 วัน	1 ครั้ง/สัปดาห์	1 ครั้ง/เดือน
7	การเคลื่อนที่ภายในชั้น หินโดยรอบ	1 ครั้ง/วัน	1 ครั้ง/2 วัน	1 ครั้ง/สัปดาห์	1 ครั้ง/เดือน
8	การยกตัวของพื้นอุโมงค์	1 ครั้ง/วัน	1 ครั้ง/2 วัน	1 ครั้ง/สัปดาห์	1 ครั้ง/เดือน
9	แรงดันน้ำบาดาล/รูพรุน	1 ครั้ง/วัน	1 ครั้ง/2 วัน	1 ครั้ง/สัปดาห์	1 ครั้ง/เดือน
10	การสันสีเทือนจากการ ระเบิด	ทำการวัดขณะระเบิด			
11	ปริมาณน้ำ	ปกติ 1 ครั้ง/สัปดาห์ ควรปรับตามสถานการณ์จริง			
12	การเคลื่อนที่ในแนวเฉียง/ การเคลื่อนที่ที่พื้นผิวหน้า อุโมงค์	1 ครั้ง/วัน	1 ครั้ง/2 วัน	1 ครั้ง/สัปดาห์	1 ครั้ง/เดือน
13	รอยแตก	1 ครั้ง/วัน	1 ครั้ง/2 วัน	1 ครั้ง/สัปดาห์	1 ครั้ง/เดือน

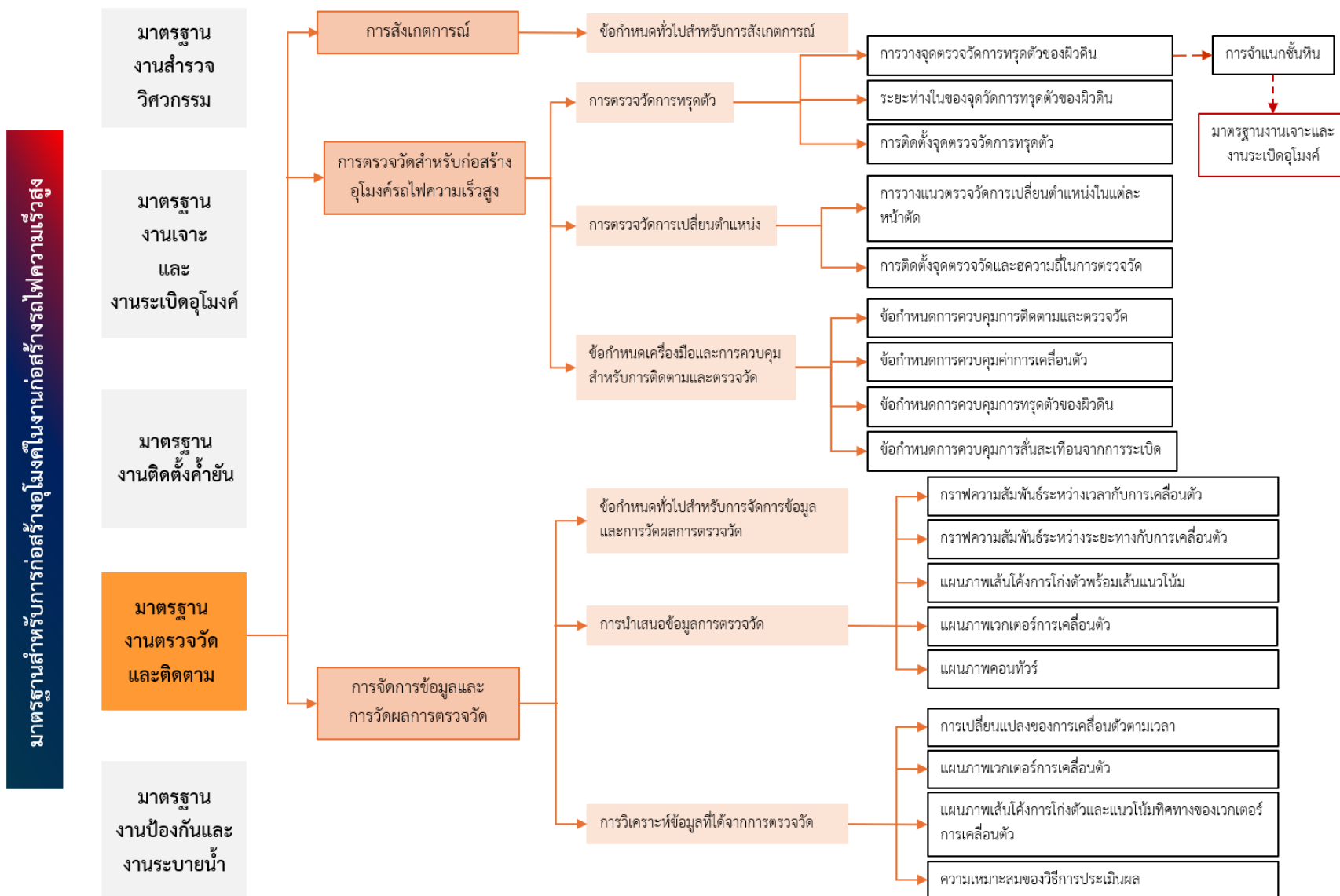
ตารางที่ ข. 3 ความถี่การตรวจวัดตามอัตราความเร็วการเคลื่อนที่สำหรับอุโมงค์หินอ่อนความดันสูง (ที่มา “Q/CR 9218-2024”)

ความเร็วการเคลื่อนที่ (mm/d)	ความถี่การตรวจวัด
≥ 50	4 ครั้ง/วัน
30 - 50	3 - 4 ครั้ง/วัน
10 - 30	2 - 3 ครั้ง/วัน
5 - 10	2 ครั้ง/วัน
1 - 5	1 ครั้ง/วัน
< 1	1 ครั้ง/(3-7)วัน

ภาคผนวก ค.

แผนภาพแสดงภาพรวมของเล่มมาตรฐาน

มาตรฐานงานตรวจวัดและติดตามในการก่อสร้างอุโมงค์สำหรับโครงการรถไฟฟ้าความเร็วสูง



หมายเหตุ: เส้นทึบ (—) แสดงถึง รายละเอียดเนื้อหาในเล่มร่าง และ เส้นประ (---) แสดงถึง การอ้างอิงมาตรฐานเล่มอื่น

รูปที่ ค. 1 มาตรฐานงานตรวจวัดและติดตามในการก่อสร้างอุโมงค์สำหรับโครงการรถไฟฟ้าความเร็วสูง



สถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีระบบราง (องค์การมหาชน)
Rail Technology Research and Development Agency (Public Organization)

 www.rtrda.or.th  info@rtrda.or.th  [rtrda.thailand](https://www.facebook.com/rtrda.thailand)  [@RTRDA_Th](https://twitter.com/RTRDA_Th)
 [@rtrdathailand](https://www.youtube.com/@rtrdathailand)  [rtrda.thailand](https://www.tiktok.com/rtrda.thailand)  [Rail Technology Research and Development Agency](https://www.linkedin.com/company/Rail%20Technology%20Research%20and%20Development%20Agency)