



กระทรวงคมนาคม

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



สทส. HSR-CT-1001:2568

(ร่าง) มาตรฐานงานสำรวจวิศวกรรมในการก่อสร้างอุโมงค์
สำหรับโครงการรถไฟความเร็วสูง

- กลุ่มวิจัยและมาตรฐาน
- ทีมมาตรฐาน

สารบัญ

1. ขอบข่าย	5
2. มาตรฐานอ้างอิง.....	5
3. นิยามความหมายและสัญลักษณ์	6
3.1 นิยาม	6
3.2 สัญลักษณ์	9
4. การรังวัดระหว่างการก่อสร้าง	10
4.1 ข้อกำหนดทั่วไปการรังวัดระหว่างการก่อสร้าง.....	10
4.2 การรังวัดควบคุมทางราบ.....	11
4.3 การรังวัดควบคุมทางตั้ง.....	30
4.4 การรังวัดเส้นทาง.....	40
4.5 การรังวัดการก่อสร้างอุโมงค์.....	55
เอกสารอ้างอิง	71
ภาคผนวก ก.	72
ภาคผนวก ข.....	75
ภาคผนวก ค.	79
ภาคผนวก ง.....	90
ภาคผนวก จ.....	92
ภาคผนวก ฉ.....	96

สารบัญรูป

รูปที่ ค.1 หมุดแบบโลหะ (หน่วย mm) (ที่มา “TB 10601-2009”).....	80
รูปที่ ค.2 หมุดแบบเหล็กไร้สนิม (หน่วย mm) (ที่มา “TB 10601-2009”).....	80
รูปที่ ค.3 การติดตั้งหมุดควบคุม CP 0 และหมุดควบคุมแนวราบชั้นงานที่ 1 บนสิ่งปลูกสร้าง (หน่วย mm) (ที่มา “TB 10601-2009”).....	81
รูปที่ ค.4 การติดตั้งหมุดควบคุมแนวราบ CP I และ CP II บนสิ่งปลูกสร้าง (หน่วย mm) (ที่มา “TB 10601- 2009”).....	81
รูปที่ ค.5 การฝังหมุดควบคุม CP 0 และหมุดควบคุมชั้นงานที่ 1 (หน่วย mm) (ที่มา “TB 10601-2009”).	82
รูปที่ ค.6 การฝังหมุดควบคุม CP I หมุดควบคุมแนวราบชั้นงานที่ 2 และหมุดระดับชั้นงานที่ 2 (หน่วย mm) (ที่มา “TB 10601-2009”).....	83
รูปที่ ค.7 การฝังหมุดควบคุม CP II หมุดควบคุมแนวราบชั้นงานที่ 3 และหมุดระดับชั้นงานที่ 3 (หน่วย mm) (ที่มา “TB 10601-2009”).....	84
รูปที่ ค.8 การฝังหมุดควบคุมแนวราบชั้นงานที่ 4 (หน่วย mm) (ที่มา “TB 10601-2009”).....	85
รูปที่ ค.9 การฝังหมุดควบคุมแนวราบชั้นงานที่ 5 หรือต่ำกว่า (หน่วย mm) (ที่มา “TB 10601-2009”).....	86
รูปที่ ค.10 การฝังหมุดระดับชั้นงานที่ 4 (หน่วย mm) (ที่มา “TB 10601-2009”).....	87
รูปที่ ค.11 การฝังหมุดระดับบริเวณฐานของกำแพง (หน่วย mm) (ที่มา “TB 10601-2009”).....	88
รูปที่ ค.12 การฝังหมุดระดับบนชั้นหินดานและหมุดระดับที่ต้องฝังลึก (ที่มา “TB 10601-2009”).....	88
รูปที่ ค.13 การทำเครื่องหมายระบุหมุดควบคุม (ที่มา “TB 10601-2009”).....	89
รูปที่ ค.14 การทำเครื่องหมายระบุหมุดภายในอุโมงค์ (หน่วย mm) (ที่มา “TB 10601-2009”).....	89
รูปที่ ฉ.1 แผนภาพแสดงภาพรวมของเล่ม (ร่าง) มาตรฐานงานสำรวจวิศวกรรมในการก่อสร้างอุโมงค์สำหรับ โครงการรถไฟฟ้าความเร็วสูง.....	97

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1	ข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับโครงข่ายควบคุมทางราบ (ที่มา “TB 10601-2009”).....	12
ตารางที่ 2	ข้อกำหนดค่าความถูกต้องของการรังวัด GNSS สำหรับโครงข่าย CP 0 CP I และ CP II (ที่มา “TB 10601-2009”).....	12
ตารางที่ 3	ข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับการรังวัดวงรอบของ CP II (ที่มา “TB 10601-2009”).....	12
ตารางที่ 4	ตัวชี้วัดทางเทคนิคสำหรับโครงข่ายหมุดควบคุมจากการรังวัดด้วยระบบดาวเทียมนำหนของ มาตรฐานงานสำรวจต่าง ๆ (ที่มา “TB 10601-2009”).....	14
ตารางที่ 5	ข้อกำหนดทางเทคนิคพื้นฐานสำหรับการรังวัดด้วย GNSS ของมาตรฐานงานสำรวจต่าง ๆ (ที่มา “TB 10601-2009”).....	15
ตารางที่ 6	ข้อกำหนดทางเทคนิคหลักสำหรับการทำวงรอบ (ที่มา “TB 10601-2009”).....	16
ตารางที่ 7	ข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับการรังวัดมุมทางราบที่ดำเนินการโดยใช้วิธีการรังวัดทิศทาง (ที่มา “TB 10601-2009”).....	16
ตารางที่ 8	ข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับการวัดความยาวเส้นฐาน (ที่มา “TB 10601-2009”).....	17
ตารางที่ 9	ข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับการรังวัดโครงข่ายสามเหลี่ยม (ที่มา “TB 10601-2009”).....	18
ตารางที่ 10	ค่าดัชนีทางเทคนิคสำหรับการรังวัด CP 0 (ที่มา “TB 10601-2009”).....	20
ตารางที่ 11	ข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับการทำวงรอบ CP II ภายในอุโมงค์ (ที่มา “TB 10601-2009”).....	28
ตารางที่ 12	ข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับโครงข่ายควบคุมทางตั้ง (ที่มา “TB 10601-2009”).....	30
ตารางที่ 13	ข้อกำหนดสำหรับมาตรฐานงานสำรวจควบคุมทางตั้งและการวางตำแหน่งหมุดควบคุม (ที่มา “TB 10601-2009”).....	31
ตารางที่ 14	ข้อกำหนดความคลาดเคลื่อนของการทำระดับ (mm) (ที่มา “TB 10601-2009”).....	32
ตารางที่ 15	เทคนิคสำคัญที่ต้องการสำหรับการทำระดับ (m) (ที่มา “TB 10601-2009”).....	33
ตารางที่ 16	วิธีการรังวัดในการทำระดับ (ที่มา “TB 10601-2009”).....	34
ตารางที่ 17	ข้อกำหนดความคลาดเคลื่อนของการรังวัดการทำระดับที่สถานี (mm) (ที่มา “TB 10601-2009”).....	34
ตารางที่ 18	ข้อกำหนดความคลาดเคลื่อนของการทำระดับทางตรีโกณมิติด้วย EDM (mm) (ที่มา “TB 10601-2009”).....	35
ตารางที่ 19	ข้อกำหนดทางเทคนิคหลักสำหรับการทำระดับทางตรีโกณมิติด้วย EDM (ที่มา “TB 10601-2009”).....	36
ตารางที่ 20	ข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับการทำระดับทางตรีโกณมิติด้วย EDM ที่แม่นยำ (ที่มา “TB 10601-2009”).....	38
ตารางที่ 21	การจำแนกลักษณะภูมิประเทศ (ที่มา “TB 10601-2009”).....	42
ตารางที่ 22	ระยะห่างของเส้นชั้นสูงหลักบนแผนที่ภูมิประเทศ (ที่มา “TB 10601-2009”).....	42
ตารางที่ 23	ข้อผิดพลาดมาตรฐานของตำแหน่งจุด (ที่มา “TB 10601-2009”).....	42
ตารางที่ 24	ข้อผิดพลาดมาตรฐานของจุดความสูงและเส้นชั้นสูง (m) (ที่มา “TB 10601-2009”).....	43
ตารางที่ 25	ระยะรังวัดสูงสุดของการทำแผนที่ด้วยกล้องสำรวจแบบประมวลผลรวม (ที่มา “TB 10601-2009”).....	44

ตารางที่ 26 ความคลาดเคลื่อนของพิกัดระหว่างการรังวัดซ้ำและการรังวัดเดิมของหมุดควบคุม CP I และ CP II (ที่มา “TB 10601-2009”).....	50
ตารางที่ 27 ค่าความถูกต้องสัมพัทธ์ของความคลาดเคลื่อนของการวัดซ้ำจากจุดเริ่มต้นและการรังวัดซ้ำในความคลาดเคลื่อนของพิกัดระหว่างจุดที่อยู่ติดกันในการรังวัดด้วย GNSS (ที่มา “TB 10601-2009”).....	51
ตารางที่ 28 ความคลาดเคลื่อนของความคลาดเคลื่อนของการวัดซ้ำจากจุดเริ่มต้นในการทำวงรอบ (ที่มา “TB 10601-2009”).....	51
ตารางที่ 29 ข้อกำหนดสำหรับความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่ยอมรับได้หลังจากการเจาะทะลุ (ที่มา “TB 10601-2009”).....	56
ตารางที่ 30 องค์ประกอบการออกแบบของการรังวัดควบคุมทางราบ (ที่มา “TB 10601-2009”).....	59
ตารางที่ 31 องค์ประกอบการออกแบบของการรังวัดควบคุมทางตั้ง (ที่มา “TB 10601-2009”).....	59
ตารางที่ 32 ค่าความคลาดเคลื่อนบรรจบของความแตกต่างของความสูงที่ยอมรับได้ (ที่มา “TB 10601-2009”).....	63
ตารางที่ 33 ข้อกำหนดค่าความถูกต้องสำหรับการเดินระดับภายในอุโมงค์ (ที่มา “TB 10601-2009”).....	63
ตารางที่ 34 ข้อกำหนดค่าความถูกต้องสำหรับการรังวัดทางตั้งภายในอุโมงค์ (ที่มา “TB 10601-2009”).....	65
ตารางที่ ก.1 ข้อกำหนดในการปิดเศษของข้อมูลสำหรับการรังวัดควบคุมทางราบในมาตรฐานงานสำรวจ (ที่มา “TB 10601-2009”).....	73
ตารางที่ ก. 2 ข้อกำหนดสำหรับการปิดค่าการอ่านของเครื่องวัดความดันบรรยากาศและเครื่องวัดอุณหภูมิ (ที่มา “TB 10601-2009”).....	73
ตารางที่ ก. 3 ข้อกำหนดการปิดเศษข้อมูลการรังวัดระดับ (ที่มา “TB 10601-2009”).....	74

สทร. HSR-CT-1001:2568

(ร่าง) มาตรฐานงานสำรวจวิศวกรรมในการก่อสร้างอุโมงค์สำหรับโครงการรถไฟความเร็วสูง
(Draft) Standard for Engineering Survey Works in Tunnel Construction of the
High-Speed Railway Project

1. ขอบข่าย

- 1.1 มาตรฐานฉบับนี้ใช้สำหรับควบคุมการก่อสร้างงานสำรวจวิศวกรรมในการก่อสร้างอุโมงค์ ในโครงการรถไฟความเร็วสูง ทั้งนี้ สำหรับระบบขนส่งทางรางอื่น ๆ เช่น รถไฟฟ้าระหว่างเมือง สามารถนำมาตรฐานฉบับนี้ไปปรับใช้ได้ตามความเหมาะสม
- 1.2 การปฏิบัติตามมาตรฐานนี้ไม่ได้เป็นการรับรองความปลอดภัย ความปลอดภัยจากการใช้มาตรฐานนี้เป็นความรับผิดชอบของผู้ใช้มาตรฐาน
- 1.3 มาตรฐานเล่มนี้ครอบคลุม ควบคุมการรังวัดทางราบ การรังวัดทางตั้ง และการรังวัดภายในอุโมงค์ สำหรับการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟความเร็วสูง
- 1.4 มาตรฐานเล่มนี้สามารถนำมาใช้ควบคุมการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟความเร็วสูง ให้เกิดการใช้ข้อกำหนดทางเทคนิคที่เป็นมาตรฐานเดียวกัน การเสริมสร้างการบริหารงานก่อสร้าง และการควบคุมคุณภาพการก่อสร้าง
- 1.5 มาตรฐานฉบับนี้ใช้หน่วยตามระบบเอสไอ (SI units) เป็นหลัก

2. มาตรฐานอ้างอิง

มาตรฐานฉบับนี้อ้างอิงมาตรฐานและเอกสารทางวิศวกรรมทั้งในระดับสากลและระดับชาติ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการตรวจสอบ การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุสำหรับงานสำรวจ สำหรับโครงสร้างอุโมงค์ในงานก่อสร้างรถไฟความเร็วสูง โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 2.1 สทร. HSR-CT-3001:2568 (ร่าง) มาตรฐานงานเจาะและงานระเบิดในการก่อสร้างอุโมงค์สำหรับโครงการรถไฟความเร็วสูง
- 2.2 สทร. HSR-CT-5001:2568 (ร่าง) มาตรฐานงานค้ำยันในการก่อสร้างสำหรับอุโมงค์โครงการรถไฟความเร็วสูง
- 2.3 สทร. HSR-CT-4012:2568 (ร่าง) มาตรฐานงานตรวจวัดและติดตามในการก่อสร้างอุโมงค์สำหรับโครงการรถไฟความเร็วสูง
- 2.4 สทร. HSR-CT-1002:2568 (ร่าง) มาตรฐานการป้องกันน้ำและงานระบายน้ำในการก่อสร้างอุโมงค์สำหรับโครงการรถไฟความเร็วสูง

3. นิยามความหมายและสัญลักษณ์

3.1 นิยาม

“การรังวัดด้วยระบบดาวเทียมนำหน หรือ จีเอ็นเอสเอส” (global navigation satellite system หรือ GNSS) หมายถึง ระบบดาวเทียมที่ใช้หาพิกัดตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ของจุดที่สามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมนำหน (navigation satellite) ซึ่งในระบบหนึ่ง ๆ จะมีดาวเทียมหลายสิบดวงโคจรอยู่ในอวกาศที่ความสูงประมาณ 20,000 กิโลเมตร ปัจจุบันมีระบบดาวเทียมนำหนที่ใช้งานอยู่แล้ว จำนวน 6 ระบบ ดังนี้ 1. ระบบดาวเทียมนำหนจีพีเอส (จีพีเอส) 2. ระบบดาวเทียมนำหนโกลนาส 3. ระบบดาวเทียมนำหนกาลิเลโอ 4. ระบบดาวเทียมนำหนไบเดา 5. ระบบดาวเทียมนำหนนาวิก 6. ระบบดาวเทียมนำหนญี่ปุ่น (คิวแซตเอสเอส)

“การรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (real time kinematics หรือ RTK)” หมายถึง การรับสัญญาณดาวเทียมแบบจลน์ ได้ค่าพิกัดทันที ณ เวลาทำการรังวัดจากระบบโครงข่ายการรังวัด ด้วยดาวเทียมแบบจลน์

“การรังวัดโครงข่ายหมุดควบคุมทางราบงานสามเหลี่ยม” (triangulation) หมายถึง เทคนิคการหาตำแหน่งของจุดบนพื้นดิน โดยใช้การวัดมุมและการวัดระยะทางในการคำนวณ

“การวัดระดับอย่างแม่นยำ” (precise leveling) หมายถึง กระบวนการหาค่าระดับของจุดต่าง ๆ บนพื้นโลกด้วยค่าความถูกต้องสูง

“การวัดสองทิศทาง” (reciprocal observation) หมายถึง เทคนิคการรังวัดหรือวัดจากสองจุดในทิศทางตรงกันข้าม โดยต้องเป็นการวัดมุมหรือระดับจากจุด A ไปยังจุด B และจากจุด B กลับมาที่จุด A เพื่อลดความคลาดเคลื่อน

“กล้องระดับแบบออปติคอล” (optical leveling) หมายถึง อุปกรณ์ในกระบวนการหาค่าระดับบนพื้นดินโดยใช้ร่วมกับไม้ระดับ

“โครงข่ายหมุดควบคุมจากการรังวัดด้วยระบบดาวเทียมนำหน” (GNSS control network หรือ CP 0) หมายถึง หมุดควบคุมที่ใช้เชื่อมโยงกับโครงข่ายหมุดควบคุมแห่งชาติหรือโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่อง (GNSS continuously operating reference station หรือ GNSS CORS) ในประเทศไทย เพื่อกำหนดรอบค่าพิกัดทางราบและทางตั้งที่ให้ความละเอียดแม่นยำสูง

“โครงข่ายหมุดควบคุมทางราบ” (horizontal control network หรือ CP I) หมายถึง โครงข่ายหมุดควบคุมทางราบที่ถูกยึดโยงจากโครงข่าย CP 0 สำหรับการสำรวจ ออกแบบ ก่อสร้าง และบำรุงรักษา

“โครงข่ายควบคุมทางราบเส้นทาง” (route horizontal control network หรือ CP II) หมายถึง โครงข่ายควบคุมทางราบเส้นทาง ใช้สำหรับการรังวัดและควบคุมตำแหน่งภายในพื้นที่ก่อสร้าง เช่น ภายในอุโมงค์หรือแนวก่อสร้างย่อย โดยถูกยึดโยงจากโครงข่าย CP I

“โครงข่ายสามเหลี่ยม” (triangular network) หมายถึง โครงข่ายของหมุดควบคุมทางการรังวัด ซึ่งเชื่อมโยงกันด้วยเส้นตรงที่ก่อให้เกิดรูปสามเหลี่ยม เพื่อใช้สำหรับการหาค่าพิกัดของจุดต่าง ๆ ในโครงข่าย

“จุดวางกล้องอิสระ” (free station) หมายถึง การกำหนดพิกัดของจุดวางกล้องสำรวจที่ยังไม่ทราบตำแหน่งล่วงหน้า โดยการวัดระยะทางและมุมไปยังหมุดควบคุมที่ทราบพิกัดแล้วอย่างน้อยสองจุดขึ้นไป เพื่อคำนวณหาพิกัดของตำแหน่งของกล้อง

“ชั้นงาน” (order) หมายถึง ระดับของค่าความถูกต้องในการรังวัดหรือการควบคุมคุณภาพของงานสำรวจ

“แนวกึ่งกลางอิสระ” (independent centerline) หมายถึง แนวกึ่งกลางหลักที่ถูกกำหนดขึ้นอย่างอิสระจากหมุดควบคุมหลักเดิม เพื่อใช้เป็นเส้นอ้างอิงสำหรับงานสำรวจ วางแนว หรือการก่อสร้าง

“แนวเส้นฐานของส่วนโค้งของอุโมงค์” (spring line) หมายถึง แนวเส้นหรือตำแหน่งเริ่มต้นของส่วนโค้ง (arch) ของอุโมงค์ โดยเป็นจุดที่โครงสร้างเปลี่ยนจากส่วนผนังตรง (side wall) เข้าสู่ส่วนโค้งของเพดาน (crown) หรือหลังคาอุโมงค์

“หมุด” (staked) หมายถึง หมุดสำหรับตอกกำหนดจุดต่าง ๆ โดยต้องตอกไว้ในดินพร้อมกับทาเครื่องหมายเอาไว้ให้เห็นเด่นชัด

“เป้าสะท้อน” (prism) หมายถึง อุปกรณ์สะท้อนแสงหรือสัญญาณเลเซอร์ ซึ่งใช้ร่วมกับกล้องสำรวจ เพื่อช่วยในการวัดระยะทางแบบอัตโนมัติ

“มาตราส่วนแผนที่” (map scale) หมายถึง อัตราส่วนเปรียบเทียบระหว่างระยะทางระหว่างจุด 2 จุดใด ๆ ในแผนที่กับระยะทางระหว่างจุด 2 จุดนั้นในภูมิประเทศจริง โดยถือว่าระยะทางในแผนที่เป็น 1 หน่วย

“ไม้ระดับ” (leveling staff) หมายถึง เป็นอุปกรณ์ที่ทำด้วยไม้ โลหะหรือโฟเบอร์ มีช่องขีดมีหน่วยเป็น m และเดซิเมตรสลับด้วยสีแดง ดำและขาว เพื่อใช้ร่วมกับการรังวัดกล้องระดับโดยการอ่านค่าตัวเลขที่ปรากฏบนไม้ระดับ

“วงรอบ” (transverse) หมายถึง เส้นเชื่อมที่ติดต่อกันซึ่งประกอบไปด้วยความยาวและทิศทางที่ได้จากการรังวัดในสนาม

“วิธีการเยื้องหน้าตัด” (section offset method) หมายถึง วิธีการรังวัดที่ใช้ในการกำหนดหรือวัดระยะห่างจากเส้นหลัก (เช่น เส้นแนวถนนหรือแนวอุโมงค์) ไปยังจุดที่ต้องการภายในแผนที่หรือการรังวัด โดยการใช้การเบี่ยงเบนในทิศทางขวางกับเส้นหลัก

“วิธีการวัดด้วยไมโครมิเตอร์แบบอปติคอล” (optical micrometer method) หมายถึง วิธีการวัดขนาดหรือระยะทางที่ใช้หลักการทางแสง โดยการใช้เครื่องมือไมโครมิเตอร์ที่มีเลนส์หรือระบบแสงในการช่วยในการวัดขนาดหรือระยะทางที่มีความละเอียดสูง

“วิธีพิกัดเชิงขั้ว” (polar coordinate method) หมายถึง วิธีการวัดและกำหนดตำแหน่งของจุดในระบบพิกัดเชิงมุม โดยการใช้ระยะทางจากจุดอ้างอิงและมุมที่วัดจากทิศทางอ้างอิงเพื่อหาพิกัดของจุดที่ต้องการในการรังวัดหรือการสร้างแผนที่

“วิธีวัดระดับแบบอ่านสายกลาง” (center wire method) หมายถึง วิธีการรังวัดที่ใช้สายเคเบิลหรือเส้นลวดที่จัดตั้งตรงกลางเพื่อกำหนดพิกัดของจุดต่าง ๆ ในงานสำรวจ โดยใช้สายลวดที่ตั้งเพื่อทำหน้าที่เป็นแนวอ้างอิงสำหรับการวัดระยะทางและการกำหนดตำแหน่งของจุดในพื้นที่สำรวจ

“เส้นสังเกตตัดไขว้” (crisscrossing observation line) หมายถึง วิธีการรังวัดที่ใช้เส้นการรังวัดหรือการวัดที่มีทิศทางไขว้กัน เพื่อตรวจสอบหรือยืนยันตำแหน่ง

“เส้นสัมผัส” (tangent line) หมายถึง เส้นตรงที่แตะหรือสัมผัสกับเส้นโค้งหรือรูปทรงหนึ่งที่จุดเดียว

“เสาอากาศ” (antenna) หมายถึง อุปกรณ์ที่ใช้ในการรับหรือส่งสัญญาณวิทยุหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในเทคโนโลยีการรังวัดด้วย GNSS

“หลักเล็ง” (centering pole) หมายถึง อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเล็งแนวรังวัดระยะให้เป็นเส้นตรงหรือใช้สำหรับปักเป็นเป้าเล็งแนวได้

“อัตราการไม่ผ่านเกณฑ์” (rejection rate) หมายถึง อัตราส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ของข้อมูลหรือผลลัพธ์ที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดหรือถูกปฏิเสธในการรังวัดหรือการทดสอบ

“แอสิมัท” (azimuth) หมายถึง ทิศทางราบวัดตามเข็มนาฬิกาจากระนาบตั้งของแนวเมริเดียนวัดเป็นหน่วยองศา

3.2 สัญลักษณ์

a	= ความคลาดเคลื่อนคงที่
b	= ค่าสัมประสิทธิ์ความคลาดเคลื่อน
σ	= ค่าความผิดพลาดมาตรฐานของความยาวเส้นฐาน (baseline length)
$DS05, DS1, DS3$	= ประเภทของระดับ
C	= ค่าความผิดพลาดในการเล็งแนว
D	= ความยาวของด้านที่วัดได้
m_D	= ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการวัดระยะทาง
m_β	= ค่าความผิดพลาดมาตรฐานของการวัดมุม
m_α	= ค่าความผิดพลาดมาตรฐานของการวัดมุมแอซิมัท (azimuth)
W	= ความคลาดเคลื่อนจากการรวมมุมภายในของสามเหลี่ยม
f_β	= ค่าความผิดพลาดเชิงมุมของวงรอบปิด
V	= ค่าการแก้ไข
n	= ค่าจำนวนเต็ม
L	= ความยาวของเส้นทางหรือเส้นทางปรับระดับ
M_Δ	= ค่าความผิดพลาดสุ่มต่อ 1000 m ในการปรับระดับ
M_W	= ค่าความผิดพลาดรวมต่อ 1000 m ในการปรับระดับ
N	= จำนวนของเส้นทางเชื่อมต่อหรือเส้นทางปรับระดับ
R	= รัศมีของความโค้งเฉลี่ยของโลก
R_c	= นิยามการทำซ้ำสำหรับการคำนวณเส้นฐาน GNSS
S	= ความยาวระหว่างกล้องถึงเป้าสะท้อน หรือระยะทางลาด
H_m	= ความสูงเฉลี่ย
M	= ค่าความผิดพลาดของการเจาะทะลุหรือค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ของการตั้งค่านบนสะพาน
m_s	= ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในระนาบ
m_x, m_y	= ค่าความผิดพลาดมาตรฐานขององค์ประกอบ x และ y ตามลำดับ
Δ	= ความคลาดเคลื่อน

4. การรังวัดระหว่างการก่อสร้าง

การรังวัดระหว่างการก่อสร้างจัดทำเพื่อกำหนดแนวทางปฏิบัติและข้อกำหนดด้านวิศวกรรมที่จำเป็นในการดำเนินงานสำรวจระหว่างการก่อสร้าง โดยให้ความสำคัญในความถูกต้อง ความปลอดภัย และประสิทธิภาพของการดำเนินงานสำรวจในทุกขั้นตอนของโครงการ เนื้อหาในหัวข้อนี้แบ่งออกเป็น การรังวัดควบคุมทางราบ การรังวัดควบคุมทางตั้ง การรังวัดเส้นทาง และการรังวัดอุโมงค์

4.1 ข้อกำหนดทั่วไปการรังวัดระหว่างการก่อสร้าง

- 4.1.1 ต้องใช้ระบบพิกัดทางวิศวกรรม โดยระนาบของหน้าตัดอุโมงค์ (projection plan) ต้องเลือกให้ตรงกับตำแหน่งที่สูงที่สุดของราง และอัตราความคลาดเคลื่อนของระยะทางต้องไม่เกิน 10 mm ต่อ km
- 4.1.2 หมดหลักฐานแห่งชาติต้องถูกนำมาใช้เป็นหมดควบคุมทางราบและทางตั้งสำหรับทางรถไฟความเร็วสูง หากจุดเหล่านี้มีคุณสมบัติตรงตามข้อกำหนดสำหรับการควบคุม
- 4.1.3 เพื่อให้สอดคล้องกับการคำนวณปรับแก้เพื่อยึดตริังโครงข่ายด้วย GNSS แบบสามแกนเข้ากับโครงข่ายหมดควบคุมจากการรังวัดด้วยระบบดาวเทียมนำหน ต้องจัดตั้งโครงข่าย CP 0 ก่อนเริ่มการควบคุมทางราบ
- 4.1.4 ต้องใช้โครงข่ายหมดควบคุมจากการรังวัดด้วยระบบดาวเทียมนำหน (CP 0) ในการตั้งโครงข่ายควบคุม โดยต้องมีการตั้งโครงข่ายควบคุมสองระดับ ระดับแรกคือโครงข่ายควบคุมทางราบ (CP I) ซึ่งเป็นพื้นฐานสำหรับการรังวัด ออกแบบ ก่อสร้าง การใช้งาน และบำรุงรักษา ระดับที่สองคือโครงข่ายควบคุมทางราบเส้นทาง (CP II) ซึ่งเป็นพื้นฐานสำหรับการรังวัด ออกแบบ และก่อสร้างภายในอุโมงค์
- 4.1.5 ในการจัดตั้งโครงข่ายควบคุมต้องมีการอ้างอิงค่าพิกัดจากหมดควบคุมที่อยู่ในโครงข่ายควบคุมที่มีลำดับชั้นสูงกว่ามาสู่โครงข่ายที่มีลำดับชั้นที่ต่ำกว่า เช่น การอ้างอิงค่าพิกัดจากโครงข่ายหมดควบคุมจากการรังวัดด้วยระบบดาวเทียมนำหน (CP 0) สู่หมดในโครงข่ายควบคุมทางราบ (CP I) เป็นต้น
- 4.1.6 โครงข่ายการควบคุมทางราบและทางตั้งสำหรับการรังวัดทางวิศวกรรมของทางรถไฟความเร็วสูงแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ โครงข่ายควบคุมการรังวัดและออกแบบ โครงข่ายควบคุมการก่อสร้าง และโครงข่ายควบคุมการใช้งานและบำรุงรักษา
- 4.1.7 โครงข่ายควบคุมทางราบ (CP I) ต้องเป็นโครงข่ายพื้นฐานสำหรับการควบคุมทางราบ และโครงข่ายควบคุมทางราบเส้นทาง (CP II) ในการควบคุมทางตั้งให้จัดตั้งโครงข่ายทำระดับมาตรฐานงานชั้นที่กำหนด
- 4.1.8 โครงข่ายควบคุมทางตั้งใช้ โครงข่ายควบคุมทางราบเส้นทาง (CP II) ซึ่งให้การควบคุมทางตั้งสำหรับการรังวัด ออกแบบ
- 4.1.9 หมดควบคุมในแต่ละโครงข่าย ต้องมีค่าพิกัดทางราบและค่าพิกัดทางตั้ง ซึ่งเกิดจากการอ้างอิงค่าพิกัดจากหมดควบคุมแห่งชาติ

- 4.1.10 ก่อนเริ่มต้นการรังวัด การเริ่มการรังวัดและออกแบบต้องดำเนินการออกแบบทั่วไปเกี่ยวกับระบบพิกัดและฐานข้อมูลที่ใช้ รูปแบบโครงข่าย ค่าความถูกต้อง และตารางเวลาสำรวจ โดยพิจารณาจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ทิศทางของเส้นทาง ลักษณะภูมิประเทศ และคุณลักษณะทางธรณีวิทยา เจ้าหน้าที่ในการก่อสร้างต้องประเมินผลลัพธ์หลังจากเสร็จสิ้นการควบคุมทางราบและทางดิ่งในแต่ละขั้นตอน
- 4.1.11 ค่าความถูกต้องของการรังวัดต้องวัดโดยใช้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) ซึ่งเป็นข้อผิดพลาดที่มากที่สุดที่ยอมรับได้ กำหนดเป็นสองเท่าของค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน
- 4.1.12 บันทึกภาคสนาม ผลการคำนวณ ตาราง และภาพประกอบ ต้องจัดทำอย่างเรียบร้อย ตรวจสอบซ้ำ และเก็บรักษาตามข้อบังคับที่เกี่ยวข้อง
- 4.1.13 การรังวัดต้องดำเนินการอย่างรอบคอบโดยยึดตามนโยบายด้านความปลอดภัย การวางแผนและมาตรการความปลอดภัยต้องพิจารณาลักษณะเฉพาะของแต่ละขั้นตอน การปฏิบัติงานและสภาพแวดล้อม
- 4.1.14 ต้องดำเนินการบำรุงรักษาและซ่อมแซมเครื่องมือและอุปกรณ์สำรวจอย่างสม่ำเสมอ พร้อมทั้งตรวจสอบและปรับแก้ตามระยะเวลา

4.2 การรังวัดควบคุมทางราบ

การรังวัดควบคุมทางราบ (horizontal control survey) ถือเป็นขั้นตอนพื้นฐานที่มีความสำคัญยิ่งต่อการกำหนดกรอบพิกัดของโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าความเร็วสูง โดยเฉพาะงานอุโมงค์ ซึ่งต้องการค่าพิกัดที่แม่นยำสูงเพื่อความสอดคล้องกันของโครงสร้างจากปลายทางทั้งสองด้าน การจัดตั้งโครงข่ายควบคุมทางราบในมาตรฐานฉบับนี้ได้กำหนดไว้เป็นลำดับชั้น โครงข่ายหมดควบคุมจากการรังวัดด้วยระบบดาวเทียมนำหน (CP 0) โครงข่ายควบคุมทางราบ (CP I) และโครงข่ายควบคุมทางราบเส้นทาง (CP II)

- 4.2.1 ข้อกำหนดทั่วไปการรังวัดควบคุมทางราบ
 - 4.2.1.1 โครงข่ายควบคุมทางราบสำหรับรถไฟฟ้าความเร็วสูงต้องถูกแบ่งออกเป็น 3 โครงข่าย คือโครงข่ายหมดควบคุมจากการรังวัดด้วยระบบดาวเทียมนำหน (CP 0) โครงข่ายควบคุมทางราบ (CP I) และโครงข่ายควบคุมทางราบเส้นทาง (CP II) โดยต้องมีการอ้างอิงค่าพิกัดทางราบจากหมดควบคุมที่มีลำดับชั้นที่มีความถูกต้องแม่นยำของหมดควบคุมมากกว่า
 - 4.2.1.2 ข้อกำหนดทางเทคนิคในการรังวัดควบคุมทางราบดังแสดงในตารางที่ 1
 - 4.2.1.3 ข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับโครงข่ายควบคุมทางราบของโครงข่ายต่าง ๆ ต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้
 - (1) ค่าความถูกต้องของการรังวัด GNSS สำหรับโครงข่าย CP 0 CP I และ CP II ต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดที่แสดงในตารางที่ 2
 - (2) ข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับการรังวัดวงรอบของ CP II ต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดที่แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับโครงข่ายควบคุมทางราบ (ที่มา “TB 10601-2009”)

โครงข่ายควบคุม	วิธีการรังวัด	มาตรฐานงานสำรวจ	ระยะห่างระหว่างหมุด	ความคลาดเคลื่อนตำแหน่งสัมพัทธ์ของจุดที่อยู่ใกล้เคียง (mm)	หมายเหตุ
CP 0	GNSS	—	50 km	20	
CP I	GNSS	ชั้นงานที่ 2	≤ 4 km (แต่ละคู่)	10	ระยะห่างระหว่างหมุด ≥ 800 m
CP II	GNSS	ชั้นงานที่ 3	600 ถึง 800 m	8	
	การทำวงรอบ	ชั้นงานที่ 3	400 ถึง 800 m	8	โครงข่ายวงรอบแบบเชื่อมต่อ

หมายเหตุ:

- 1 หากใช้วิธีการสำรวจด้วยการรังวัด GNSS สำหรับ CP I และ CP II สามารถตั้งหมุดควบคุมทุก ๆ 4 km
- 2 ความคลาดเคลื่อนตำแหน่งสัมพัทธ์ของจุดที่อยู่ใกล้เคียงต้องวัดในหน่วยของความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าพิกัดทางราบ x และ y
3. มาตรฐานงานสำรวจสำหรับวิธีการรังวัดด้วยการรังวัด GNSS ต้องเป็นไปตามหัวข้อที่ 4.2.1 ข้อที่ 4.2.1.7
4. มาตรฐานงานสำรวจด้วยการทำวงรอบ ต้องเป็นไปตามหัวข้อที่ 4.2.1 ข้อที่ 4.2.1.8

ตารางที่ 2 ข้อกำหนดค่าความถูกต้องของการรังวัด GNSS สำหรับโครงข่าย CP 0 CP I และ CP II (ที่มา “TB 10601-2009”)

โครงข่ายควบคุม	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของมุมแนวเส้นฐานแอซิมัท (")	ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์สูงสุดของระยะห่างความยาวระหว่างกล้องถึงเป้าสะท้อน (side length)
CP 0	—	1/2000000
CP I	≤ 1.3	1/180000
CP II	≤ 1.7	1/100000

ตารางที่ 3 ข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับการรังวัดวงรอบของ CP II (ที่มา “TB 10601-2009”)

โครงข่ายควบคุม	ความยาววงรอบ (km)	ระยะห่างของเส้นฐาน (m)	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของระยะทางที่วัดได้ (mm)	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของมุมที่รังวัด (")	ความคลาดเคลื่อนตำแหน่งสัมพัทธ์ของจุดที่อยู่ใกล้เคียง (mm)	ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ที่ยอมรับได้ของความยาววงรอบทั้งหมด	ความคลาดเคลื่อนมุมที่ยอมรับได้ของมุมแอซิมัท (")	มาตรฐานงานวงรอบ
CP II	≤ 5	400 ถึง 800	5	1.8	8	1/55000	$\pm 3.6\sqrt{n}$	ชั้นงานที่ 3

4.2.1.4 เมื่อจำนวนของเส้นโครงข่ายรังวัดแบบปิด (loop) ในพื้นที่สำรวจมีมากกว่า 20 มุมที่รังวัดต้องคำนวณโดยใช้สมการที่ 1

$$m_{\beta} = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\frac{f_{\beta}^2}{n} \right]} \quad (1)$$

โดยที่

m_{β} คือ ค่าความผิดพลาดมาตรฐานของการวัดมุม

f_{β} คือ ความคลาดเคลื่อนบรรจบเชิงมุมของวงรอบ

n คือ จำนวนมุมที่รังวัดในวงรอบ

N คือ จำนวนวงรอบ

4.2.1.5 การคำนวณปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนของโครงข่ายควบคุมทางราบของระดับต่าง ๆ ต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) สำหรับโครงข่าย CP 0 ต้องเชื่อมโยงกับโครงข่ายหมุดควบคุมแห่งชาติหรือโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่อง (GNSS continuously operating reference station หรือ GNSS CORS) ในประเทศไทย โดยต้องใช้เป็นหมุดยึดตรึงในการปรับแก้โครงข่ายควบคุมแบบ 3D
- (2) โครงข่าย CP I ต้องเชื่อมโยงกับจุด CP 0 โดยที่พิกัดของจุด CP 0 ต้องถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ในการปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนของโครงข่าย CP I
- (3) โครงข่าย CP II ต้องเชื่อมโยงกับจุด CP I โดยที่พิกัดของจุด CP I ต้องถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ในการปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนของโครงข่าย CP II

4.2.1.6 หากต้องการรังวัดหมุดควบคุมเพิ่มเติมในโครงข่ายควบคุม ต้องดำเนินการโดยมีความถูกต้องแม่นยำเดียวกันกับการรังวัดควบคุมเดิม

4.2.1.7 การรังวัดด้วย GNSS ต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) ตัวชี้วัดทางเทคนิคสำหรับโครงข่ายหมุดควบคุมจากการรังวัดด้วยระบบดาวเทียมนำหนของมาตรฐานงานสำรวจต่าง ๆ ต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดที่แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตัวชี้วัดทางเทคนิคสำหรับโครงข่ายหมุดควบคุมจากการรังวัดด้วยระบบดาวเทียมนำหนของ
มาตรฐานงานสำรวจต่าง ๆ (ที่มา “TB 10601-2009”)

ชั้น งาน ที่	ความคลาด เคลื่อนคงที่ (mm) a	ตัวคูณความ คลาดเคลื่อน (mm/km) b	ความคลาดเคลื่อน มาตรฐานของมุม แนวเส้นฐานแอซิมัท (") c	ความคลาด เคลื่อนสัมพัทธ์ ของระยะห่าง ระหว่างหมุดยึด ตรึงถึงหมุดใด ๆ d	ความคลาดเคลื่อน สัมพัทธ์สูงสุดของ ระยะห่างระหว่างหมุด การปรับแก้แบบมี ข้อจำกัด e
1	≤ 5	≤ 1	0.9	1/500000	1/250000
2	≤ 5	≤ 1	1.3	1/250000	1/180000
3	≤ 5	≤ 1	1.7	1/180000	1/100000
4	≤ 5	≤ 2	2	1/100000	1/70000
5	≤ 10	≤ 2	3	1/70000	1/40000

หมายเหตุ:

หากความยาวของเส้นวงรอบมีความยาวน้อยกว่า 500 m

1. ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของระยะห่างระหว่างหมุดต้องน้อยกว่า 5 mm สำหรับชั้นงานที่ 1, 2 และ 3
2. ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของระยะห่างระหว่างหมุดต้องน้อยกว่า 7.5 mm สำหรับชั้นงานที่ 4
3. ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของระยะห่างระหว่างหมุดต้องน้อยกว่า 10 mm สำหรับชั้นงานที่ 5

- (2) ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของความยาวเส้นฐานของโครงข่าย
ควบคุมตามลำดับชั้นงานต่าง ๆ ต้องคำนวณโดยใช้สมการที่ 2

$$\sigma = \pm \sqrt{a^2 + (b \cdot d)^2} \quad (2)$$

โดยที่

σ คือ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของความยาวเส้นตรงของเส้นฐาน (mm)

a คือ ความคลาดเคลื่อนคงที่ (mm)

b คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความคลาดเคลื่อน (mm/km)

d คือ ความยาวเฉลี่ยของเส้นฐานหรือวงรอบ (km)

- (3) ข้อกำหนดทางเทคนิคพื้นฐานสำหรับการรังวัดด้วย GNSS
ของมาตรฐานงานสำรวจต่าง ๆ ต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดที่
แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ข้อกำหนดทางเทคนิคพื้นฐานสำหรับการรังวัดด้วย GNSS ของมาตรฐานงานสำรวจต่าง ๆ
(ที่มา “TB 10601-2009”)

รายการ		ชั้นงานที่ 1	ชั้นงานที่ 2	ชั้นงานที่ 3	ชั้นงานที่ 4	ชั้นงานที่ 5
การรังวัดแบบสถิติ	มุมกันท้องฟ้า (°)	≥ 15	≥ 15	≥ 15	≥ 15	≥ 15
	จำนวนดาวเทียมที่รังวัดพร้อมกัน	≥ 4	≥ 4	≥ 4	≥ 4	≥ 4
	ระยะเวลาในการรังวัดที่มีประสิทธิภาพ (min)	≥ 120	≥ 90	≥ 60	≥ 45	≥ 40
	จำนวนครั้งในการรังวัด	≥ 2	≥ 2	1 ถึง 2	1 ถึง 2	1
	อัตราการรับและบันทึกข้อมูลดาวเทียม (s)	10 ถึง 60	10 ถึง 60	10 ถึง 60	10 ถึง 30	10 ถึง 30
	ประเภทตัวรับสัญญาณ	Dual band	Dual band	Dual band	Single/dual band	Single/dual band
	PDOP หรือ GDOP	< 6	< 6	< 8	≤ 10	≤ 10
การรังวัดแบบสถิติอย่างรวดเร็ว	มุมการตัดของดาวเทียม (°)	—	—	—	≥ 15	≥ 15
	จำนวนดาวเทียมที่สามารถมองเห็นได้	—	—	—	≥ 5	≥ 5
	ระยะเวลาในการรังวัด (min)	—	—	—	5 ถึง 20	5 ถึง 20
	ค่าเฉลี่ยของการรับสัญญาณซ้ำ	—	—	—	≥ 1.5	≥ 1.5
	อัตราการรับและบันทึกข้อมูลดาวเทียม (s)	—	—	—	5 ถึง 20	5 ถึง 20
	PDOP (GDOP)	—	—	—	≤ 7 (8)	≤ 7 (8)

หมายเหตุ:

ค่าเฉลี่ยของการรับสัญญาณซ้ำไม่น้อยกว่า 1.5 หมายความว่าอย่างน้อย 50% ของหมดต้องมีการรับสัญญาณสองครั้ง

4.2.1.8 โครงข่ายควบคุมการทำวงรอบสามารถนำไปใช้ได้ทั้งการทำวงรอบแบบเชื่อมต่อ การทำวงรอบแบบวงจรปิด หรือโครงข่ายการทำวงรอบ โดยการทำการวงรอบของมาตรฐานงานสำรวจและคลาส (class) ต่าง ๆ ต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) ข้อกำหนดทางเทคนิคหลักสำหรับการทำการวงรอบต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดที่แสดงในตารางที่ 6
- (2) เครื่องมือที่ใช้ในการทำการวงรอบต้องผ่านการรับรองและสอบเทียบ
- (3) ก่อนที่ต้องเริ่มต้นการรังวัดด้วยการใช้งานเครื่องวัดระยะทางอิเล็กทรอนิกส์และกล้องสำรวจแบบประมวลผลรวม (total station) ต้องทำการทดสอบและปรับเทียบเครื่องมือให้เรียบร้อย
- (4) การรังวัดมุมในแนวระนาบต้องดำเนินการโดยใช้วิธีการรังวัดทิศทาง และต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดที่ระบุในตารางที่ 7
- (5) ข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับการวัดความยาวระหว่างกล้องถึงเป้าสะท้อน ต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดที่ระบุในตารางที่ 8

ตารางที่ 6 ข้อกำหนดทางเทคนิคหลักสำหรับการทำวงรอบ (ที่มา “TB 10601-2009”)

ชั้นงานที่	ความคลาดเคลื่อนของมุมที่รังวัด (")	ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของระยะทางที่วัดได้	ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของบรรจบเชิงมุมของแอสิมัท (")	ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของความยาวรวมของการทำวงรอบ	จำนวนรอบการรังวัด			
					ความละเอียดของเครื่องมือ 0.5"	ความละเอียดของเครื่องมือ 1"	ความละเอียดของเครื่องมือ 2"	ความละเอียดของเครื่องมือ 6"
ชั้นงานที่ 2	1	1/250,000	$2\sqrt{n}$	1/100,000	6	9	—	—
ชั้นงานที่ 2 บริเวณปากอุโมงค์	1.3	1/250,000	$2.6\sqrt{n}$	1/100,000	6	9	—	—
ชั้นงานที่ 3	1.8	1/150,000	$3.6\sqrt{n}$	1/55,000	4	6	10	—
ชั้นงานที่ 4	2.5	1/80,000	$5\sqrt{n}$	1/40,000	3	4	6	—
ชั้นงานที่ 4 คลาส I	4	1/40,000	$8\sqrt{n}$	1/20,000	—	2	2	—
ชั้นงานที่ 4 คลาส II	7.5	1/20,000	$15\sqrt{n}$	1/12,000	—	—	1	3

ตารางที่ 7 ข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับการรังวัดมุมทางราบที่ดำเนินการโดยใช้วิธีการรังวัดทิศทาง (ที่มา “TB 10601-2009”)

ชั้นงานที่และคลาส	ความละเอียดของเครื่องมือ	ความคลาดเคลื่อนของสายใยราบในครึ่งรอบ (")	ความคลาดเคลื่อนของสายใยราบ ในหนึ่งรอบ (")	ความคลาดเคลื่อนทิศทางระหว่างรอบทั้งหมด (")
มาตรฐานงานสำรวจชั้น 4 หรือสูงกว่า	0.5"	4	8	4
	1"	6	9	6
	2"	8	13	9
คลาส II หรือต่ำกว่า	2"	12	18	12
	6"	18	—	24

หมายเหตุ: หากมุมทางตั้งในทิศทางการรังวัดมีค่ามากกว่า $\pm 3^\circ$ ความคลาดเคลื่อนของสายใยราบ ในทิศทางนั้นสามารถเปรียบเทียบกับรอบการรังวัดอื่น ๆ และต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดเดียวกับความคลาดเคลื่อนของสายใยราบ ในรอบเดียวที่กำหนดในตารางนี้

ตารางที่ 8 ข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับการวัดความยาวเส้นฐาน (ที่มา “TB 10601-2009”)

มาตรฐานงานสำรวจและ คลาส	ประเภทของเครื่องมือ	จำนวนรอบต่อต้าน		ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้สำหรับการอ่านระหว่างครึ่งรอบ (mm)	ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้สำหรับการอ่านระหว่างรอบ (mm)	ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้สำหรับค่าเฉลี่ยของการวัดสองทิศทาง
		สองไปด้านหน้า	สองไปด้านหลัง			
ชั้นงานที่ 2	I	4	4	2	3	2 m _D
	II			5	7	
ชั้นงานที่ 3	I	2	2	2	3	2 m _D
	II	4	4	5	7	
ชั้นงานที่ 4	I	2	2	2	3	2 m _D
	II			5	7	
	III	4	4	10	15	
คลาส I หรือต่ำกว่า	I	2	2	2	3	2 m _D
	II			5	7	
	III			10	15	
	IV	4	4	20	30	

หมายเหตุ:

- รอบ คือ กระบวนการที่มุมทางราบได้รับการวัดครึ่งหนึ่งกล้องหน้าซ้ายและครึ่งหนึ่งกล้องหน้าขวาเมื่อใช้กล้องสำรวจแบบประมวลผลรวม
- ค่าความถูกต้องในการวัดของเครื่องมือวัดระยะทางถูกแบ่งออกตามประเภทของเครื่องมือดังนี้

ประเภท I $m_D \leq 2 \text{ mm}$

ประเภท II $2 \text{ mm} < m_D \leq 5 \text{ mm}$

ประเภท III $5 \text{ mm} < m_D \leq 10 \text{ mm}$

ประเภท IV $10 \text{ mm} < m_D \leq 20 \text{ mm}$

โดยที่

m_D คือ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการวัดระยะทางต่อกิโลเมตร ซึ่งได้มาจากการปรับขนาดค่าความถูกต้องของเครื่องมือให้เท่ากับ 1 km
- สมการการคำนวณความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการวัดระยะทางในสมการที่ 3

$$m_D = a + b \times D \quad (3)$$

โดยที่

m_D คือ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการวัดระยะทางต่อกิโลเมตร (mm)

a คือ ความคลาดเคลื่อนคงที่ของเครื่องมือ (mm)

b คือ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการวัดระยะทางต่อกิโลเมตร (mm/km)

D คือ ระยะทางที่วัดได้ (km)

- (6) การวัดระยะทางตามแนวลาดเอียงต้องปรับแก้ด้วยค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าความดันบรรยากาศและค่าคงที่ของเครื่องมือ
- (7) การอ่านค่าความดันบรรยากาศและอุณหภูมิต้องถูกปิดเศษตามข้อกำหนดที่ระบุในภาคผนวก ก ตารางที่ ก. 2
- (8) ในการวัดค่าความดันบรรยากาศและอุณหภูมิต้องดำเนินการทั้งที่ตำแหน่งเครื่องมือและที่ตำแหน่งเป้าสะท้อนแสงในกรณีของการรังวัดด้วยเครื่องมือระดับที่ 3 หรือระดับที่สูงกว่า
- (9) ในการรังวัดด้วยเครื่องมือระดับที่ 4 หรือระดับที่ต่ำกว่า การวัดค่าความดันบรรยากาศและอุณหภูมิ สามารถดำเนินการที่ตำแหน่งเครื่องมือเพียงจุดเดียว แต่เมื่อมีความแตกต่างของค่าความดันบรรยากาศและอุณหภูมิระหว่างทั้งสองเครื่องมือ ต้องทำการวัดค่าที่ทั้งสองตำแหน่งและใช้ค่าเฉลี่ยสำหรับการปรับแก้
- (10) ในกรณีที่การรังวัดดำเนินการในพื้นที่ราบซึ่งมีความแตกต่างของความดันบรรยากาศและการอุณหภูมิน้อย ค่าเฉลี่ยของความดันบรรยากาศและการวัดอุณหภูมิในช่วงเช้าและบ่าย สามารถนำมาใช้สำหรับการปรับแก้ในการรังวัดด้วยเครื่องมือระดับที่ 4 และระดับที่ต่ำกว่าได้

4.2.1.9 การรังวัดโครงข่ายสามเหลี่ยมของมาตรฐานงานสำรวจต่าง ๆ ต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) ข้อกำหนดทางเทคนิคหลักสำหรับการรังวัดโครงข่ายสามเหลี่ยมของมาตรฐานงานสำรวจต่าง ๆ ต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดที่แสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับการรังวัดโครงข่ายสามเหลี่ยม (ที่มา “TB 10601-2009”)

ชั้นงานที่	ความคลาดเคลื่อนของมุมที่รังวัด (")	ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้สูงสุดจากการรวมมุมภายในของสามเหลี่ยม (")	ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานสัมพัทธ์ของความยาวระหว่างกล้องถึงเป้าสะท้อนที่มีค่าความถูกต้องน้อยที่สุด	ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานสัมพัทธ์ของความยาวระหว่างกล้องถึงเป้าสะท้อนที่มีค่าความถูกต้องน้อยที่สุด	จำนวนรอบการรังวัด		
					ความละเอียดของเครื่องมือ 0.5"	ความละเอียดของเครื่องมือ 1"	ความละเอียดของเครื่องมือ 2"
ชั้นงานที่ 2	1.0	3.5	1/250,000	1/120,000	6	9	—
ชั้นงานที่ 3	1.8	7.0	1/150,000	1/70,000	4	6	9
ชั้นงานที่ 4	2.5	9.0	1/100,000	1/40,000	2	4	6

- (2) การวัดมุมทางราบและความยาวสำหรับโครงข่ายสามเหลี่ยมต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดหัวข้อที่ 4.2.1 ข้อที่ 4.2.1.8
- (3) หากจำนวนของสามเหลี่ยมเกิน 20 ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของมุมที่รังวัดสำหรับโครงข่ายสามเหลี่ยมต้องคำนวณโดยใช้สมการที่ 4

$$m_\beta = \sqrt{\frac{[W^2]}{3n}} \quad (4)$$

โดยที่

m_β คือ ความคลาดเคลื่อนของมุมที่รังวัด (")

W คือ ความคลาดเคลื่อนจากการรวมมุมภายในของสามเหลี่ยม (")

n คือ จำนวนของสามเหลี่ยม

- 4.2.2 การจัดตั้งโครงข่ายหมุดควบคุมจากการรังวัดด้วยระบบดาวเทียมนำหน (CP 0)
 - 4.2.2.1 ต้องใช้วิธี GNSS ในการจัดตั้ง CP 0 ก่อนทำการรังวัด โดยโครงข่ายต้องถูกวางไว้ให้ครอบคลุมเส้นทางในการก่อสร้างทั้งหมด
 - 4.2.2.2 การรังวัดต้องดำเนินการอย่างสม่ำเสมอ และการคำนวณการปรับแก้ต้องดำเนินการในรูปแบบการคำนวณทั้งโครงข่าย
 - 4.2.2.3 หมุดควบคุมของ CP 0 ต้องถูกตั้งไว้ทุก ๆ 50 km ตลอดเส้นทาง โดยต้องมีหมุดควบคุม CP 0 อย่างน้อย 1 จุดที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของเส้นทาง
 - 4.2.2.4 หากหมุดควบคุมแห่งชาติอยู่บนเส้นทางที่ตรงตามข้อกำหนดความแม่นยำ สามารถนำมาใช้เป็นหมุดควบคุม CP 0 ได้
 - 4.2.2.5 ตำแหน่งและการจัดตั้งหมุดถาวร (monumentation) ของหมุดควบคุม CP 0 ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังนี้
 - (1) หมุดควบคุมต้องอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการรังวัด GNSS ต้องไม่มีแหล่งรบกวนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากำลังสูงหรือแหล่งสะท้อนคลื่นในระยะ 200 m รอบหมุดควบคุม
 - (2) ระยะจากหมุดควบคุมถึงแนวเส้นทางก่อสร้างต้องไม่เกิน 10 km
 - (3) หมุดถาวรของหมุดควบคุมต้องตั้งอยู่ในพื้นที่ที่ดินแน่น มั่นคง และต้องหลีกเลี่ยงการถูกทำลายจากการก่อสร้างหรือกิจกรรมอื่น ๆ
 - (4) หลังการจัดตั้งหมุดถาวร ต้องกรอกแบบฟอร์มสำหรับการหมุดควบคุมในสถานที่ และวาดร่างแผนที่ระบุตำแหน่งหมุดถาวร โดยต้องระบุระยะทางจากหมุดถาวร ไปยังวัตถุเด่นบนพื้นดินที่อยู่ใกล้เคียงในแผนที่
 - (5) ต้องจัดทำหนังสือรับรองการดูแลรักษาหมุดสำรวจ โดยผู้ดูแลหมุดถาวรและทีมสำรวจ

4.2.2.6 การรังวัดเชื่อมโยงถึงจุด CP 0 สำหรับการสร้างโครงข่ายต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดดังนี้

- (1) โครงข่ายควบคุมของ CP 0 ต้องเชื่อมโยงกับโครงข่ายหมุดควบคุมแห่งชาติหรือโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่อง (GNSS continuously operating reference station หรือ GNSS CORS) ในประเทศไทย โดยจำนวนจุดที่เชื่อมโยงกับโครงข่าย CP 0 ทั้งหมดต้องไม่น้อยกว่า 2 แห่ง และต้องกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในโครงข่าย
- (2) หากต้องการขยายโครงข่าย CP 0 จำนวนการเชื่อมโยงจากแต่ละจุด CP 0 ไปยังจุด CP 0 ที่อยู่ใกล้เคียงต้องไม่น้อยกว่า 3 จุด จำนวนการเชื่อมโยงกับโครงข่ายหมุดควบคุมแห่งชาติหรือโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่อง (GNSS continuously operating reference station หรือ GNSS CORS) ในประเทศไทยไปยังหมุดควบคุม CP 0 ที่อยู่ใกล้เคียงต้องไม่น้อยกว่า 2 จุด

4.2.2.7 การรังวัด CP 0 ต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดดังนี้

- (1) ต้องใช้เครื่องรับสัญญาณ GNSS แบบสองย่านความถี่ (dual-band) ที่มีค่าความถูกต้องมากกว่า 5 mm + 1 ppm โดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ในการรังวัดพร้อมกันต้องมีจำนวนไม่น้อยกว่า 4 เครื่อง
- (2) ดัชนีทางเทคนิคต้องเป็นไปตามข้อกำหนดใน ตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ค่าดัชนีทางเทคนิคสำหรับการรังวัด CP 0 (ที่มา “TB 10601-2009”)

มุมกันท้องฟ้า (satellites cutoff elevation angle)	อัตราการรับ และบันทึก ข้อมูล ดาวเทียม (sampling time interval)	จำนวนดาวเทียมที่ รังวัดได้พร้อมกัน (number of satellites simultaneously observed)	ระยะเวลาในการ รังวัดดาวเทียมอย่าง ต่อเนื่อง (minimum continuous observation time for effective satellite)	จำนวนครั้งใน การรังวัด (number of observation sessions)	ระยะเวลา รังวัดทั้งหมด (effective session duration)
15 °	30 s	≥ 4	≥ 15 min	≥ 4	≥ 300 min

- (3) จำนวนรอบการรังวัดต้องกระจายอย่างเท่ากันระหว่างกลางวันและกลางคืน โดยจำนวนรอบการรังวัดในเวลากลางวันต้องไม่น้อยกว่าหนึ่งครั้ง
- (4) รอบการรังวัดหนึ่งรอบต้องไม่เลยเวลา 7:00 น. ตามเวลาในกรุงเทพ (เวลาสากล UTC 00:00)

- (5) เสืออากาศต้องตั้งตรงและอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลาง ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกลางเสืออากาศต้องไม่เกิน 1 mm ความสูงของเสืออากาศต้องถูกวัดก่อนและหลังการรังวัด (เช่น ก่อนเปิดเครื่องและหลังปิดเครื่อง) การวัดต้องทำที่ตำแหน่งเดียวกันแต่ในสามทิศทางที่แตกต่างกัน (ห่างกัน 120 °) อุปกรณ์เฉพาะสำหรับการวัดความสูงของเสืออากาศสามารถนำมาใช้ได้
- (6) หากความแตกต่างระหว่างการวัดสามจุดของความสูงในชุดเดียวกันมีค่าน้อยกว่า ± 2 mm ค่าเฉลี่ยของการวัดสามารถนำมาใช้คำนวณได้
- (7) หากความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างการรังวัดก่อนและหลังการรังวัดไม่เกิน ± 3 mm นำค่าเฉลี่ยมาเป็นความสูงสุดท้ายของเสืออากาศ
- (8) ในระหว่างการรังวัดเครื่องมือต้องไม่ถูกเปิดและปิดซ้ำ ๆ พารามิเตอร์ที่ใช้ตั้งค่าต่าง ๆ ต้องไม่ถูกเปลี่ยนแปลง และเสืออากาศต้องไม่มีการหมุน
- (9) หากเกิดพายุฝนฟ้าคะนอง ฝนตกหนัก หรือมีลมแรง การรังวัดต้องหยุดทันที

4.2.2.8 ซอฟต์แวร์การประมวลผลข้อมูล CP 0 ต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) ซอฟต์แวร์ GNSS ค่าความถูกต้องสูงที่เหมาะสมสำหรับการประมวลผลเส้นฐานที่มีความยาว ต้องถูกเลือกใช้ในการแก้ไขเวกเตอร์ของเส้นฐาน

4.2.2.9 การแก้ไขเส้นฐาน CP 0 ต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) ต้องใช้ข้อมูลดาวเทียมที่มีค่าความถูกต้องสูงในการแก้ไขเส้นฐาน
- (2) อัตราการไม่ผ่านเกณฑ์ของการรังวัดในแต่ละช่วงต้องน้อยกว่า 10%
- (3) ผลลัพธ์การคำนวณต้องรวมถึงส่วนประกอบพิกัดของเวกเตอร์เส้นฐานโคเวอเรียนซ์เมทริกซ์ (covariance matrix) และผลลัพธ์อื่น ๆ ที่จำเป็นสำหรับการปรับแก้ในภายหลัง
- (4) หมดที่มีค่าพิกัดที่นำมาใช้ในการแก้ไขเส้นฐานต้องอยู่ในกรอบพิกัดอ้างอิงสากล (ITRF) กรอบนี้ต้องสอดคล้องกับข้อมูลดาวเทียมที่มีค่าความถูกต้องสูงที่ใช้ หมดที่มีค่าพิกัดที่เลือกจากจุดอ้างอิงหมดควบคุมแห่งชาติสำหรับการรังวัดเชื่อมโยงต้องมีค่าความถูกต้องในการระบุตำแหน่งที่มีความละเอียดมากกว่า 0.1 m

4.2.2.10 คุณภาพของการแก้ไขเส้นฐานสำหรับโครงข่าย CP 0 หลังจากเสร็จสิ้นการแก้ไขเส้นฐาน ต้องได้รับการประเมินตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) ความแตกต่างของส่วนประกอบและความยาวของเส้นฐานที่รังวัดในช่วงต่าง ๆ ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดที่ให้ไว้ในสมการที่ 5 และสมการที่ 6 และค่า R คำนวณได้ด้วยสมการที่ 7

$$\begin{aligned} d_{\Delta X} &\leq 3\sqrt{2}R_{\Delta x} \\ d_{\Delta Y} &\leq 3\sqrt{2}R_{\Delta Y} \\ d_{\Delta Z} &\leq 3\sqrt{2}R_{\Delta Z} \end{aligned} \quad (5)$$

$$d_s \leq 3\sqrt{2}R_s \quad (6)$$

$$R_C = \left(\frac{n}{n-1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(C_i - C_m)^2}{\sigma_{C_i}^2}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\sigma_{C_i}^2} \right)} \right)^{1/2} \quad (7)$$

โดยที่

d_{Δ} คือความแตกต่างของส่วนประกอบความยาวเส้นฐาน

n คือจำนวนรอบการรังวัด

i คือจำนวนเส้นของเส้นฐานในแต่ละรอบการรังวัด

C_i คือส่วนประกอบของเส้นฐานหรือความยาวของเส้นฐานในช่วงที่ i

C_m คือค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของส่วนประกอบของเส้นฐานหรือความยาวของเส้นฐานจากช่วงที่แตกต่างกัน

$\sigma_{C_i}^2$ คือความแปรปรวนของส่วนประกอบของเส้นฐานหรือความยาวของเส้นฐานในช่วงที่ i

R_C คือนิยามการทำซ้ำสำหรับการคำนวณเส้นฐาน GNSS

- (2) ความคลาดเคลื่อนบรรจบ (W_x, W_y, W_z) ของแต่ละส่วนประกอบของเส้นฐานอิสระ (asynchronous) วงรอบของเส้นฐานหรือเส้นทางเชื่อมต่อของเส้นฐานต้องเป็นไปตามข้อกำหนดที่ให้ไว้ในสมการที่ 8

$$\begin{aligned} W_x &\leq 2\sigma W_x \\ W_y &\leq 2\sigma W_y \\ W_z &\leq 2\sigma W_z \end{aligned} \quad (8)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \sigma_{W_x} &= \left(\sum_{j=1}^r \sigma_{\Delta x(j)}^2 \right)^{1/2} \\ \sigma_{W_y} &= \left(\sum_{j=1}^r \sigma_{\Delta y(j)}^2 \right)^{1/2} \\ \sigma_{W_z} &= \left(\sum_{j=1}^r \sigma_{\Delta z(j)}^2 \right)^{1/2} \end{aligned} \quad (9)$$

โดยที่

j คือ เส้นฐานในวงรอบหรือเส้นทาง

r คือ จำนวนของเส้นฐานในวงรอบ

$\sigma_{C_i}^2$ คือ ความแปรปรวนของส่วนประกอบ C ($C=\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) ของเส้นฐานที่ j
ความคลาดเคลื่อนบรรจบรวม W ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดที่ให้ไว้ในสมการที่ 10

$$W \leq 3\sigma_w \quad (10)$$

โดยที่

$$\sigma_w = \left(\sum_{j=1}^r W D_j W^T \right)^{1/2} \quad (11)$$

$$W = \begin{bmatrix} \frac{W_x}{W_s} & \frac{W_y}{W_s} & \frac{W_z}{W_s} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$W_s = \sqrt{W_x^2 + W_y^2 + W_z^2} \quad (13)$$

โดยที่

D_j คือ เมทริกซ์ความแปรปรวนสำหรับเส้นฐานที่ j

W คือ ความคลาดเคลื่อนบรรจบรวม

4.2.2.11 การปรับโครงข่าย CP 0 ต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดที่ระบุไว้ดังต่อไปนี้

- (1) ค่าสัมบูรณ์ของการปรับแก้สำหรับแต่ละส่วนประกอบของเส้นฐานในการปรับแก้แบบไม่มีข้อจำกัดต้องเป็นไปตามข้อกำหนดที่ให้ไว้ในสมการที่ 14

$$\begin{aligned} V_{\Delta x} &\leq 3\sigma \\ V_{\Delta y} &\leq 3\sigma \\ V_{\Delta z} &\leq 3\sigma \end{aligned} \quad (14)$$

โดยที่

V_{Δ} คือค่าสัมบูรณ์ของการปรับแก้สำหรับแต่ละส่วนประกอบของเส้นฐาน

σ คือ ค่าวนได้จากสมการที่ 2 ซึ่งใช้ค่า $a = 5 \text{ mm}$ และ $b = 0.2 \text{ mm/km}$

- (2) คุณภาพของข้อมูลต้องได้รับการตรวจสอบก่อนการปรับแก้ โดยค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ระหว่างพิกัดที่ทราบของสถานีเชื่อมโยงกับผลลัพธ์การปรับแก้ต้องน้อยกว่า 0.2 m ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของความยาวเส้นฐานที่ได้จากการคำนวณต้องน้อยกว่า $0.3 \times D \times 10^{-6}$ ซึ่งค่า D ได้มาจากค่าระยะทางที่วัดได้ของเส้นฐาน
- (3) หมดที่ใช้ในการปรับแก้แบบค่าคงที่ ต้องเป็นค่าพิกัดอ้างอิงของหมุดควบคุมแห่งชาติ
- (4) ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ของการปรับแก้ส่วนประกอบเส้นฐานที่ได้จากการปรับแก้แบบมีค่าคงที่และการปรับแก้แบบไม่มีค่าคงที่ เงื่อนไขต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในสมการที่ 15

$$\begin{aligned} dV_{\Delta x} &\leq 2\sigma \\ dV_{\Delta y} &\leq 2\sigma \\ dV_{\Delta z} &\leq 2\sigma \end{aligned} \quad (15)$$

- (5) ผลลัพธ์จากการปรับแก้แบบไม่มีค่าคงที่ ได้แก่พิกัด 3 มิติของแต่ละจุดในกรอบพิกัดอ้างอิงสากล (ITRF) หรือเชื่อมโยงกับโครงข่ายสถานีฐานอ้างอิงรับสัญญาณ GNSS แบบต่อเนื่องในประเทศไทย ค่าที่ปรับของแต่ละเวกเตอร์เส้นฐาน ส่วนประกอบของพิกัด ค่าปรับแก้ และค่าความถูกต้องของการแก้ไข

4.2.2.12 วิธีการรังวัดซ้ำของ CP 0 และในส่วนข้อกำหนดเกี่ยวกับค่าความถูกต้องต้องเหมือนกับการรังวัดก่อนหน้านี้ ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ระหว่างส่วนประกอบพิกัดระนาบที่แปลงแล้วจากการรังวัดซ้ำและค่าของการรังวัดต้นฉบับต้องไม่เกิน 20 mm หากความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ผลลัพธ์ต้นฉบับต้องถูกนำมาใช้

4.2.3 การรังวัดโครงข่ายควบคุมทางราบ (CP I)

4.2.3.1 การจัดตั้งโครงข่ายควบคุมทางราบ (CP I) ก่อนการจัดตั้งโครงข่ายควบคุมทางราบเส้นทาง (CP II) สำหรับเส้นทางทั้งหมดหรือส่วนของเส้นทาง ต้องดำเนินการจัดตั้งโครงข่ายในครั้งเดียว การรังวัดต้องดำเนินการอย่างสม่ำเสมอ และการคำนวณปรับแก้ค่าของโครงข่ายต้องดำเนินการในรูปแบบการคำนวณรวมทั้งหมดในคราวเดียว

- 4.2.3.2 การจัดตั้ง CP I ต้องเป็นไปตามเส้นทางที่กำหนดในตารางที่ 1 และเชื่อมต่อกับ CP 0 โดยเลือกตำแหน่งหมุดควบคุมให้อยู่ห่างจากแนวเส้นทางระหว่าง 50 – 1,000 m
- 4.2.3.3 หมุดต้องตั้งอยู่ในตำแหน่งที่มั่นคง ไม่ถูกกระทบจากงานก่อสร้าง และสะดวกต่อการรังวัด
- 4.2.3.4 การเลือกจุดต้องพิจารณาข้อกำหนดของโครงข่ายควบคุมสำหรับอุโมงค์ การทำเครื่องหมายต้องเป็นไปตามข้อกำหนด และต้องกรอกแบบฟอร์มคำอธิบายจุดในภาคสนาม พร้อมวัดและบันทึกค่าระยะจากจุดอ้างอิงไปยังวัตถุเด่นใกล้เคียง
- 4.2.3.5 การเชื่อมต่อของโครงข่าย (side connection mode) ต้องถูกใช้สำหรับ CP I ซึ่งต้องทำให้เกิดโครงข่ายแถบยาว (stripe network) ที่ประกอบด้วย การรังวัดแบบสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมทางจีโอเดติก (geodetic quadrangles) ในจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของเส้นทางและในพื้นที่เชื่อมต่อของโครงข่ายควบคุมทางราบ ต้องมีหมุดควบคุม CP I อย่างน้อยสองจุด
- 4.2.3.6 การเชื่อมต่อ CP I ต้องเชื่อมกับหมุดควบคุมทางราบที่มีชั้นงานที่สามขึ้นไป โดยต้องเชื่อมต่อหมุดควบคุมทางราบหนึ่งจุดทุก ๆ 50 km
- 4.2.3.7 จำนวนทั้งหมดของหมุดควบคุม CP I ที่เชื่อมต่อต้องไม่น้อยกว่า 3 จุด ของหมุดควบคุม CP II และต้องกระจายจุดเหล่านั้นให้เท่าๆ กันในโครงข่าย
- 4.2.3.8 จำนวนทั้งหมดของหมุดควบคุม CP I ที่เชื่อมต่อกับหมุดควบคุม CP II มีเพียง 2 จุดที่เชื่อมต่อ ต้องกระจายจุดทั้งสองที่ปลายทั้งสองของโครงข่ายหมุดควบคุม CP II และแยกให้ห่างกันมากที่สุด
- 4.2.3.9 การแก้ไขเส้นฐานของ CP I ต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดดังต่อไปนี้
 - (1) อัตราร้อยละความผิดพลาดของข้อมูลในแต่ละช่วงต้องน้อยกว่า 10%
 - (2) ความคลาดเคลื่อนของเส้นฐานระหว่างส่วนต่าง ๆ ต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดในสมการที่ 16

$$d \leq 2\sqrt{2}\sigma \quad (16)$$

โดยที่

σ คือ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของความยาวเชือกของเส้นฐาน

ความคลาดเคลื่อนบรรจบของส่วนประกอบพิกัด (W_x , W_y , W_z) ของเส้นฐานอิสระ (baseline loop) หรือเส้นทางเชื่อมโยง และความคลาดเคลื่อนในวงบรรจบรวม W ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในสมการที่ 17

$$\begin{aligned} W &\leq 3\sqrt{n\sigma} \\ W_x &\leq 3\sqrt{n\sigma} \\ W_y &\leq 3\sqrt{n\sigma} \\ W_z &\leq 3\sqrt{3n\sigma} \end{aligned} \quad (17)$$

โดยที่

n คือ จำนวนของเส้นฐานในวงรอบ

4.2.3.10 การคำนวณการปรับแก้และการแปลงพิกัดของโครงข่าย CP I ต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) ค่าสัมบูรณ์ของการปรับแก้ส่วนประกอบของเวกเตอร์เส้นฐานในการปรับแก้แบบไม่มีข้อจำกัดต้องเป็นไปตามข้อกำหนดสมการที่ 14 โดยที่ σ คำนวณจากสมการที่ 2 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ใช้ค่าจากการรังวัดชั้นงานที่ 2 ที่ระบุใน ตารางที่ 4 ต้องมีผลรวมความสูงเหนือทรงรีอ้างอิง WGS84 ของจุดต่าง ๆ เวกเตอร์เส้นฐานและการปรับแก้รวมถึงข้อมูลค่าความถูกต้องที่เกี่ยวข้องในกระบวนการปรับแก้
- (2) ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของความยาวระหว่างหมุดควบคุมที่ใช้ในการปรับแก้แบบมีข้อจำกัดของโครงข่าย CP I ต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดในตารางที่ 4 ของมาตรฐานนี้
- (3) ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ของการปรับแก้ส่วนประกอบเส้นฐานที่ได้จากการปรับแก้แบบมีค่าคงที่และการปรับแก้แบบไม่มีค่าคงที่ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดสมการที่ 15
- (4) ต้องทำการฉายพิกัดของโครงข่ายควบคุมระดับ CP I ตามการแบ่งโซนของระบบฉายแผนที่ (map projection zoning) เพื่อให้ได้พิกัดวิศวกรรมของจุดควบคุม CP I
- (5) การแปลงพิกัดของโครงข่ายควบคุมระดับ CP I ไปสู่ระบบพิกัดระนาบแห่งชาติหรือระบบพิกัดระนาบของเมือง ต้องกำหนดจุดเชื่อมโยงของโครงข่ายควบคุมพิกัดระนาบแห่งชาติหรือของเมืองเป็นจุดตรงในการปรับแก้ และคำนวณหาพิกัดของจุดควบคุม CP I ในระบบพิกัดระนาบแห่งชาติหรือของเมืองได้

4.2.4 การรังวัดโครงข่ายควบคุมทางราบเส้นทาง (CP II)

4.2.4.1 โครงข่าย CP II ต้องเสร็จสิ้นในขั้นตอนการรังวัดการวางแผนโดยใช้วิธีการรังวัดด้วย GNSS หรือการทำวงรอบ ข้อกำหนดทางเทคนิคหลักต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดที่ระบุไว้ในตารางที่ 2

4.2.4.2 โครงข่าย CP II ต้องต้องถูกจัดตั้งตามเส้นทางตามข้อกำหนดที่ระบุในตารางที่ 1 ของมาตรฐานนี้และเชื่อมต่อกับโครงข่าย CP I หมุดควบคุม CP II ต้องถูกตั้งอยู่ในสถานที่ที่มั่นคงและสะดวกสำหรับการทำงานภาคสนาม โดยมีระยะห่าง 50 ถึง 200 m จากแนวเส้นทาง หลังจากการทำ

เครื่องหมายจุดแล้ว แบบฟอร์มคำอธิบายจุดต้องถูกรอกข้อมูลในสถานที่
ระยะทางจากหมุดไปยังวัตถุเด่นบนพื้นดินใกล้เคียงต้องถูกวัดและจดบันทึก

4.2.4.3 ข้อกำหนดดังต่อไปนี้ต้องปฏิบัติตามเมื่อใช้วิธีการรังวัดด้วย GNSS สำหรับ CP II

- (1) ต้องใช้การเชื่อมต่อโครงข่ายด้านข้าง (side connection) ในการวางโครงข่ายสำหรับ CP II เพื่อให้เกิดโครงข่ายแถบยาว (stripe network) ที่ประกอบด้วยสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมทางจีโอเดติก และจะต้องทำการสำรวจเชื่อมโยงเพื่อเชื่อมต่อโครงข่ายดังกล่าวกับจุดควบคุม CP I
- (2) การรังวัดโครงข่าย CP II ต้องดำเนินการตามข้อกำหนดสำหรับการรังวัดด้วย GNSS ชั้นงานที่ 3 ตามหัวข้อที่ 4.2.1.7
- (3) ค่าสัมบูรณ์ของการปรับแก้ของส่วนประกอบแต่ละตัวของเวกเตอร์เส้นฐานในการปรับแก้แบบไม่มีข้อจำกัดต้องเป็นไปตามข้อกำหนดซึ่งพารามิเตอร์ต่าง ๆ ใช้ค่าจากการรังวัดชั้นงานที่ 3 ที่ระบุในตารางที่ 4 ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของระยะทางระหว่างหมุดควบคุมที่ใช้ในการปรับแก้แบบมีข้อจำกัดของ CP II ต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดที่ระบุในตารางที่ 4
- (4) เพื่อทำการแปลงพิกัดของ CP II การปรับแก้แบบไม่มีข้อจำกัด 3 มิติของโครงข่ายเส้นฐาน GNSS ต้องดำเนินการก่อน การปรับแก้แบบมีข้อจำกัดต้องดำเนินการโดยใช้หมุดควบคุม CP I จากการรังวัดการเชื่อมโยงเป็นหมุดควบคุม ระยะห่างจากหมุดควบคุม CP I สามารถคำนวณได้ จากนั้นค่าความคลาดเคลื่อนของการแก้ไขส่วนประกอบเวกเตอร์เส้นฐานในกระบวนการปรับแก้แบบมีข้อจำกัดและแบบไม่มีข้อจำกัดต้องเป็นไปตามข้อกำหนด พิกัดเชิงระนาบในระบบพิกัดที่ใช้ พิกัดระนาบสองมิติ เวกเตอร์เส้นฐานและการปรับแก้ รวมถึงข้อมูลค่าความถูกต้องต้องได้รับการจัดเตรียมหลังจากการปรับแก้แบบมีข้อจำกัด

4.2.4.4 การทำวงรอบต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) การทำวงรอบต้องเริ่มต้นและสิ้นสุดที่หมุดควบคุม CP I และต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดที่ระบุไว้ในตารางที่ 3
- (2) หากความยาวของการทำวงรอบยาวเกิน 2 km การทำวงรอบต้องถูกจัดโครงสร้างในรูปแบบของโครงข่ายวงรอบ ซึ่งการทำวงรอบแต่ละรอบต้องประกอบด้วย 4 ถึง 6 ด้าน
- (3) การรังวัดมุมทางราบต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับการทำวงรอบชั้นงานที่ 3 ที่ระบุไว้ในตารางที่ 6 และตารางที่ 7

- (4) การวัดระยะทางความยาวระหว่างกล้องถึงเป้าสะท้อนต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดสำหรับการทำวงรอบชั้นงานที่ 3 ที่ระบุไว้ในตารางที่ 8
- (5) ความคลาดเคลื่อนของแอสิมัทและความคลาดเคลื่อนของความยาวรวมของการทำวงรอบต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดที่ระบุในมาตรฐานนี้ การทำวงรอบต้องอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ วิธีริกอร์สแอตจัสต์เมนต์ (rigorous adjustment) ต้องถูกนำมาใช้สำหรับการปรับแก้ในการคำนวณการรังวัดการทำวงรอบ

4.2.4.5 เมื่อเกิดการเจาะทะลุ ต้องนำการทำวงรอบมาใช้เพื่อให้โครงข่าย CP II สมบูรณ์ภายในอุโมงค์ การทำวงรอบของ CP II ภายในอุโมงค์ต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) ข้อกำหนดทางเทคนิคหลักสำหรับการทำวงรอบของ CP II ภายในอุโมงค์มีระบุไว้ในตารางที่ 11
- (2) ต้องใช้หมุด (stakes) ที่มีอยู่เป็นจุดในวงรอบสำหรับการควบคุมทางราบของการก่อสร้างภายในอุโมงค์ สำหรับจุดในวงรอบที่จัดตั้งเอง ต้องเลือกตำแหน่งที่มีการรบกวนจากการก่อสร้างน้อยที่สุด ปลอดภัยและมั่นคง สะดวกต่อการตั้งตำแหน่ง และสะดวกสำหรับการป้องกันหมุดควบคุม เส้นทางการมองเห็นระหว่างจุดต้องสูงจากสิ่งอำนวยความสะดวกในอุโมงค์ไม่น้อยกว่า 0.2 m

ตารางที่ 11 ข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับการทำวงรอบ CP II ภายในอุโมงค์ (ที่มา “TB 10601-2009”)

ชั้นโครงข่ายควบคุม	ความยาวของวงรอบ (km)	ความยาวระหว่างกล้องถึงเป้าสะท้อน (m)	ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของระยะทางที่วัด (mm)	ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของมุมที่วัด (")	ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของตำแหน่งจุดที่อยู่ติดกัน (mm)	ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ที่ยอมรับได้ของความยาวรวมของวงรอบ	ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ที่ยอมรับได้ของแอสิมัท (")	มาตรฐานงานสำรวจของการเดินสำรวจ	หมายเหตุ
CP II	$L \leq 2$	300 ถึง 600	3	1.8	7.5	1/55000	$\pm 3.6\sqrt{n}$	ชั้นงานที่ 3	วงรอบเดี่ยว
CP II	$2 < L \leq 7$	300 ถึง 600	3	1.8	7.5	1/55000	$\pm 3.6\sqrt{n}$	ชั้นงานที่ 3	โครงข่ายวงรอบ
CP II	$L > 7$	300 ถึง 600	3	1.3	5	1/100000	$\pm 2.6\sqrt{n}$	ชั้นงานที่ 2 สำหรับอุโมงค์	โครงข่ายวงรอบ

หมายเหตุ: จำนวนด้านที่เหมาะสมที่สุดของวงรอบอิสระในโครงข่ายการรังวัดแนวเส้นตรงต้องอยู่ระหว่าง 4 ถึง 6 ด้าน

- (3) การทำวงรอบ CP II ภายในอุโมงค์ต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้
 - (3.1) กล้องสำรวจแบบประมวลผลรวมที่ใช้ต้องมีความละเอียดมากกว่า 1" สำหรับการวัดทิศทางและ ต้องมีความละเอียดสำหรับการวัดระยะทาง 2 mm + 2 ppm จำนวนรอบและความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้สำหรับการรังวัดมุมทางราบต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดที่ระบุในตารางที่ 6 และตารางที่ 7
 - (3.2) เครื่องมือต้องได้รับการปรับตัวกับสภาพอากาศโดยรอบของพื้นที่ประมาณ 20 นาที ก่อนการรังวัด
 - (3.3) ในกรณีที่ทำการรังวัดด้วยมือที่จุดมุ่งหมายที่ปริซึม แสงสว่างต้องเพียงพอ แสงที่ได้รับต้องสม่ำเสมอ จุดมุ่งหมายต้องมองเห็นได้อย่างชัดเจน และแสงจากด้านข้างของจุดมุ่งหมายต้องหลีกเลี่ยง ในกรณีของการรังวัดอัตโนมัติ แหล่งแสงที่รบกวนต้องน้อยลง

4.2.5 การรวบรวมผลลัพธ์

- 4.2.5.1 ในการทำการรังวัดและผลการคำนวณ ผลการบันทึกต้องมีความถูกต้อง บันทึกต้องมีการกำหนดรายละเอียดอย่างชัดเจนและมีรูปแบบที่สม่ำเสมอ โดยบันทึกเป็นหนังสือและมีการเก็บรักษาอย่างดี
- 4.2.5.2 การรังวัดอย่างง่ายต้องถูกบันทึกอย่างเป็นระเบียบและชัดเจนในสถานที่ห้ามมีการการลบและการบันทึกจากความทรงจำ หน้าหนังสือในสมุดบันทึกภาคสนามต้องถูกกำหนดหมายเลขตามมาตรฐานงานสำรวจ วันและวันที่ของการรังวัด, สภาพอากาศ, ประเภทและหมายเลขประจำเครื่องมือที่ใช้, และเหตุการณ์พิเศษใด ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานภาคสนามต้องบันทึกอย่างละเอียดและลงชื่อโดยผู้ปฏิบัติงานภาคสนาม
- 4.2.5.3 การจัดข้อมูลที่สำคัญสำหรับการรังวัดควบคุมทางราบในมาตรฐานงานสำรวจต่างๆ ต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดที่ระบุในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.1 เมื่อการรังวัดควบคุมทางราบเสร็จสิ้นแล้ว เอกสารที่ต้องส่งมอบต้องมีดังต่อไปนี้
 - (1) เอกสารออกแบบทางเทคนิค
 - (2) สมุดบันทึกการรังวัดภาคสนาม
 - (3) ตารางการคำนวณการปรับแก้
 - (4) คำอธิบายจุดของโครงข่าย CP 0, CP I และ CP II
 - (5) ตารางผลลัพธ์ของหมุดควบคุม
 - (6) ภาพประกอบการรังวัดที่เชื่อมต่อของโครงข่ายควบคุม
 - (7) รายงานสรุปทางเทคนิค

4.3 การรังวัดควบคุมทางดิ่ง

การรังวัดควบคุมทางดิ่ง (vertical control survey) เป็นขั้นตอนที่สำคัญในการกำหนดค่าระดับความสูงที่แม่นยำเพื่อรองรับงานออกแบบและก่อสร้างระบบโครงสร้างพื้นฐาน โดยเฉพาะในโครงการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟความเร็วสูงซึ่งต้องควบคุมความต่อเนื่องของระดับทางดิ่งอย่างเข้มงวด โดยมีการกำหนดความคลาดเคลื่อน และมาตรฐานการทำระดับ

4.3.1 ข้อกำหนดทั่วไปการรังวัดควบคุมทางดิ่ง

4.3.1.1 การจำแนกประเภทการรังวัดควบคุมทางดิ่งต้องถูกจัดให้เป็นมาตรฐานงานสำรวจต่าง ๆ ได้แก่ ชั้นงานที่ 2 การทำระดับที่แม่นยำ ชั้นงานที่ 3 ชั้นงานที่ 4 และชั้นงานที่ 5 ข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับมาตรฐานงานสำรวจต่าง ๆ ต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดที่ระบุในตารางที่ 12

4.3.1.2 การเลือกใช้มาตรฐานงานสำรวจควบคุมทางดิ่งและการกำหนดจุดของโครงข่ายการทำระดับเส้นทางต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดที่ระบุในตารางที่ 13 สำหรับการก่อสร้างสะพานขนาดใหญ่ อุโมงค์ และโครงสร้างชั้นใต้ดินพิเศษ ข้อกำหนดมาตรฐานงานสำรวจและการกำหนดจุดต้องพิจารณาให้สอดคล้องกับข้อกำหนดเฉพาะที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 12 ข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับโครงข่ายควบคุมทางดิ่ง (ที่มา “TB 10601-2009”)

มาตรฐานงานสำรวจ	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานสุ่มของความสูงต่อกิโลเมตร M_a (mm)	ความคลาดเคลื่อนรวมของความสูงต่อกิโลเมตร M_w (mm)	ความยาวของวงรอบแบบเชื่อมต่อหรือวงรอบแบบปิด (km)	
			วงรอบแบบเชื่อมต่อ	วงรอบแบบปิด
ชั้นงานที่ 2	≤ 1	≤ 2	≤ 400	≤ 750
ระดับที่แม่นยำ	≤ 2	≤ 4	≤ 3	—
ชั้นงานที่ 3	≤ 3	≤ 6	≤ 150	≤ 200
ชั้นงานที่ 4	≤ 5	≤ 10	≤ 80	≤ 100
ชั้นงานที่ 5	≤ 7.5	≤ 15	≤ 30	≤ 30

ค่าของ M_a และ M_w ในตารางข้างต้นคำนวณโดยใช้สมการที่ 18 และสมการที่ 19

$$M_a = \sqrt{\frac{1}{4n} \left[\frac{\Delta\Delta}{L} \right]} \quad (18)$$

$$M_w = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\frac{WW}{L} \right]} \quad (19)$$

โดยที่

Δ คือ ความคลาดเคลื่อนของความสูงระหว่างการวัดสองทิศทาง (mm)

L คือ ความยาวของความยาวของวงรอบแบบเชื่อมต่อหรือวงรอบแบบปิด (km)

n คือ จำนวนรอบการสำรวจ

W คือ ความคลาดเคลื่อนของวงรอบแบบเชื่อมต่อหรือวงรอบแบบปิด (mm)

N คือ จำนวนของลูบในเส้นทางการทำระดับ

ตารางที่ 13 ข้อกำหนดสำหรับมาตรฐานงานสำรวจควบคุมทางดิ่งและการวางตำแหน่งหมุดควบคุม (ที่มา “TB 10601-2009”)

คลาสโครงข่ายควบคุม	มาตรฐานงานสำรวจ	ระยะห่างจุด
การทำระดับเส้นทาง	ชั้นงานที่ 2	≤ 2 km

4.3.1.3 การทำระดับต้องใช้สำหรับการรังวัดควบคุมทางดิ่งทุกมาตรฐานงานสำรวจในพื้นที่ภูเขา พื้นที่ชายทะเล หรือโครงข่ายทางน้ำ (waterway networks) ที่ยากต่อการเข้าถึงพื้นที่เพื่อทำระดับ สามารถใช้วิธีการทำระดับด้วยการวัดระยะทางด้วยเครื่องวัดระยะทางด้วยเครื่องวัดระยะทาง อิเล็กทรอนิกส์ สำหรับการรังวัดชั้นงานที่ 3 และชั้นงานที่ต่ำกว่า และการทำระดับที่แม่นยำด้วย EDM (electro-optical distance measurement) สามารถใช้สำหรับการรังวัดชั้นงานที่ 2

4.3.1.4 หากความแตกต่างของความสูงระหว่างการรังวัดไปข้างหน้าและการรังวัดย้อนกลับเกินขอบเขตที่ยอมรับได้ การรังวัดที่มีความน่าเชื่อถือต่ำกว่าต้องมีการรังวัดซ้ำก่อน ซึ่งผลลัพธ์ต้องได้รับการยอมรับหรือปฏิเสธตามหลักเกณฑ์ต่อไปนี้

- (1) หากความแตกต่างระหว่างการรังวัดซ้ำและการรังวัดต้นฉบับในทิศทางเดียวกันเกินขอบเขตของการรังวัดสองครั้ง แต่ความแตกต่างระหว่างการรังวัดซ้ำและการรังวัดอีกตัวหนึ่งอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ ผลลัพธ์จากการรังวัดซ้ำอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้
- (2) หากความแตกต่างระหว่างการรังวัดซ้ำและการรังวัดต้นฉบับในทิศทางเดียวกันอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ และความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของความสูงสองค่ากับความแตกต่างของการรังวัดอีกตัวหนึ่งอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ ก็ต้องนำค่าเฉลี่ยนั้นมาเป็นความแตกต่างของความสูงของการรังวัดนั้น

- (3) หากหลังจากการรังวัดซ้ำสองครั้งหรือมากกว่า ผลลัพธ์ของทิศทางเดียวกันใกล้เคียงกันและมีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่ความแตกต่างระหว่างการรังวัดในทิศทางตรงข้ามเกินกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ สามารถใช้ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างความสูงในการรังวัดสองครั้งต้นฉบับเป็นผลลัพธ์ของการรังวัดไปข้างหน้า (foresight) และค่าเฉลี่ยของความแตกต่างความสูงในการรังวัดสองครั้งซ้ำเป็นผลลัพธ์ของการรังวัดย้อนกลับ (backsight)

4.3.2 การทำระดับ

- 4.3.2.1 ความคลาดเคลื่อนของการทำระดับในมาตรฐานงานสำรวจต่าง ๆ ต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดที่ระบุในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ข้อกำหนดความคลาดเคลื่อนของการทำระดับ (mm) (ที่มา “TB 10601-2009”)

มาตรฐานงานสำรวจ	ความแตกต่างของความสูงในการรังวัดสองครั้งของเส้นทางรังวัด		ความแตกต่างของความสูงระหว่าง การวัดสองทิศทาง	ความคลาดเคลื่อนบรรจบของเส้นทาง		ความแตกต่างของความสูงระหว่างการรังวัดซ้ำและการรังวัดต้นฉบับ
	พื้นที่ราบ	พื้นที่ภูเขา		พื้นที่ราบ	พื้นที่ภูเขา	
ชั้นงานที่ 2	$\pm 4\sqrt{K}$	$\pm 0.8\sqrt{n}$	—	$\pm 4\sqrt{L}$		$\pm 6\sqrt{R_i}$
การทำระดับที่แม่นยำ	$\pm 8\sqrt{K}$		$\pm 6\sqrt{K}$	$\pm 8\sqrt{L}$		$\pm 8\sqrt{R_i}$
ชั้นงานที่ 3	$\pm 12\sqrt{K}$	$\pm 2.4\sqrt{n}$	$\pm 8\sqrt{K}$	$\pm 12\sqrt{L}$	$\pm 15\sqrt{L}$	$\pm 20\sqrt{R_i}$
ชั้นงานที่ 4	$\pm 20\sqrt{K}$	$\pm 4\sqrt{n}$	$\pm 14\sqrt{K}$	$\pm 20\sqrt{L}$	$\pm 25\sqrt{L}$	$\pm 30\sqrt{R_i}$
ชั้นงานที่ 5	$\pm 30\sqrt{K}$		$\pm 20\sqrt{K}$	$\pm 30\sqrt{L}$		$\pm 40\sqrt{R_i}$

หมายเหตุ:

K คือ ความยาวของเส้นทางการทำระดับของช่วงหน้าตัดการรังวัด (survey section) (km)

L คือ ความยาวของเส้นทางการทำระดับหรือเส้นทางวงรอบ (km)

R_i คือ ความยาวของช่วงหน้าตัดการรังวัดซ้ำสำหรับการตรวจสอบ (km)

n คือ จำนวนสถานีในช่วงหน้าตัดการรังวัด

หาก $n \geq 25$ ต่อ กิโลเมตรในพื้นที่ภูเขา ข้อกำหนดความคลาดเคลื่อนต้องคำนวณโดยใช้ n

- 4.3.2.2 การทำระดับในชั้นงานลำดับต่าง ๆ ต้องดำเนินการตามข้อกำหนดในมาตรฐานที่ระบุในตารางที่ 15
- 4.3.2.3 กล้องระดับและไม้ระดับต้องได้รับการทดสอบและปรับเทียบก่อนที่ต้องเริ่มการทำงานภาคสนาม
- 4.3.2.4 การรังวัดการทำระดับในชั้นงานลำดับต่าง ๆ ต้องดำเนินการตามข้อกำหนดในตารางที่ 16
- 4.3.2.5 ข้อกำหนดความคลาดเคลื่อนของการรังวัดการทำระดับที่สถานีมีรายละเอียดดังตารางที่ 17

ตารางที่ 15 เทคนิคสำคัญที่ต้องการสำหรับการทำระดับ (m) (ที่มา “TB 10601-2009”)

มาตรฐานงาน สำรวจ	ระดับ ต่ำสุดของ เครื่องมือ วัดระดับ	ชนิดของไม้ ระดับ	ระยะการมอง		ความแตกต่างของระยะการ มองระหว่างจุดไม้หน้าและจุด ไม้หลัง		ผลรวมความแตกต่างของระยะการ มองระหว่างจุดไม้หน้าและจุดไม้หลัง ในหนึ่งช่วงหน้าตัดการรังวัด		ความสูงของเส้นมอง		จำนวนการวัด ซ้ำเมื่อใช้กล้อง ระดับดิจิทัล
			กล้องระดับ แบบ ออปติคอล	กล้องระดับ แบบ ดิจิตอล	กล้องระดับ แบบ ออปติคอล	กล้องระดับ แบบ ดิจิตอล	กล้องระดับแบบ ออปติคอล	กล้องระดับ แบบ ดิจิตอล	กล้องระดับ แบบ ออปติคอล	กล้องระดับแบบ ดิจิตอล	
ชั้นงานที่ 2	DS1	Invar	≤ 50	≥ 3 และ ≤ 50	≤ 1.0	≤ 1.5	≤ 3.0	≤ 6.0	≥ 0.3	≥ 0.55 และ ≤ 2.8	≥ 2
การวัดละเอียด	DS1	Invar	≤ 60	≥ 3 และ ≤ 60	≤ 1.5	≤ 2.0	≤ 3.0	≤ 6.0	≥ 0.3	≥ 0.45 และ ≤ 2.8	≥ 2
ชั้นงานที่ 3	DS1	Invar	≤ 100	≤ 75	≤ 2.0	≤ 3.0	≤ 5.0	≤ 6.0	อ่านสาม สายใย	≥ 0.35	≥ 2
	DS2	ไม้ระดับแบบ สองหน้าโดย หนึ่งด้านเป็น แบบบาร์โค้ด	≤ 75	≤ 75							
ชั้นงานที่ 4	DS1	ไม้ระดับแบบ สองหน้าโดย หนึ่งด้านเป็น แบบบาร์โค้ด	≤ 150	≤ 100	≤ 3.0	≤ 5.0	≤ 10.0	≤ 10.0	อ่านสาม สายใย	≥ 0.35	≥ 1
	DS3	ไม้ระดับแบบ สองหน้าโดย หนึ่งด้านเป็น แบบบาร์โค้ด	≤ 100	≤ 100							
ชั้นงานที่ 5	DS3	ไม้ระดับแบบ สองหน้าโดย หนึ่งด้านเป็น แบบบาร์โค้ด	≤ 100	≤ 100	เท่ากันโดยประมาณ				อ่านสาม สายใย กลาง	≥ 0.35	≥ 1

ตารางที่ 16 วิธีการรังวัดในการทำระดับ (ที่มา “TB 10601-2009”)

มาตรฐานงาน สำรวจ	โหมดการรังวัด		ลำดับการรังวัด
	เชื่อมกับจุดที่รู้ระดับ	รูป	
ชั้นงานที่ 2	รังวัดสองรอบ	รังวัดสองรอบ	มีตำแหน่งสถานีเป็นจำนวนคี่ BS-FS-FS-BS
			มีตำแหน่งสถานีเป็นจำนวนคู่ FS-BB-BB-FS
การวัดระดับอย่างแม่นยำ	รังวัดสองรอบ	รังวัดสองรอบหรือทำ 1 วงรอบ	มีตำแหน่งสถานีเป็นจำนวนคี่ BS-FS-FS-BS
			มีตำแหน่งสถานีเป็นจำนวนคู่ FS-BB-BB-FS
ชั้นงานที่ 3	รังวัดสองรอบ หรือ ทำแนวตั้งสองข้าง	รังวัดสองรอบ หรือทำแนวตั้งสองข้าง	BS-FS-FS-BS
ชั้นงานที่ 4	รังวัดสองรอบ หรือ ทำแนวตั้งสองข้าง	รังวัดสองรอบ หรือทำแนวตั้งสองข้าง	BS-BB-FS-FS หรือ BS-FS-FS-BS
ชั้นงานที่ 5	รังวัดครั้งเดียว	รังวัดครั้งเดียว	BS-FS

ตารางที่ 17 ข้อกำหนดความคลาดเคลื่อนของการรังวัดการทำระดับที่สถานี (mm)
(ที่มา “TB 10601-2009”)

รายการ ชั้นงาน		ความแตกต่างในการอ่านระหว่างการทำระดับพื้นฐานและการทำระดับเสริม	ความแตกต่างของความสูงที่ได้จากการทำระดับพื้นฐานและการทำระดับเสริม	ความแตกต่างของความสูงระหว่างจุดตรวจที่ไม่สม่ำเสมอ	ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของการอ่านสายใยบนและสายใยล่างและการอ่านของสายใยกลาง
ชั้นงานที่ 2		0.5	0.7	1	3
การวัดระดับอย่างแม่นยำ		0.5	0.7	1	3
ชั้นงานที่ 3	วิธีการวัดด้วยไมโครมิเตอร์แบบออปติคัล	1	1.5	3	—
	วิธีวัดระดับแบบอ่านสายกลาง	2	3		
ชั้นงานที่ 4		3	5	5	—
ชั้นงานที่ 5		4	7	—	—

4.3.3 การทำระดับทางตรีโกณมิติด้วย EDM

4.3.3.1 ข้อกำหนดความคลาดเคลื่อนของการทำระดับทางตรีโกณมิติด้วย EDM ระบุไว้ในตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ข้อกำหนดความคลาดเคลื่อนของการทำระดับทางตรีโกณมิติด้วย EDM (mm)
(ที่มา “TB 10601-2009”)

มาตรฐาน งานสำรวจ	ความแตกต่างของความสูง ระหว่างการรังวัดแบบ สองทิศทาง	ความคลาดเคลื่อนบรรจบของ ความสูง	ความแตกต่างของความสูงระหว่าง การรังวัดซ้ำและการรังวัดต้นฉบับ
ชั้นงานที่ 3	$\pm 25\sqrt{D}$	$\pm 12\sqrt{\sum D}$	$\pm 20\sqrt{L_i}$
ชั้นงานที่ 4	$\pm 40\sqrt{D}$	$\pm 20\sqrt{\sum D}$	$\pm 30\sqrt{L_i}$
ชั้นงานที่ 5	$\pm 60\sqrt{D}$	$\pm 30\sqrt{\sum D}$	$\pm 40\sqrt{L_i}$

หมายเหตุ: D คือ ระยะห่างระหว่างกล้องถึงเป้าสะท้อนถึงเป้าสะท้อน (km) และ L คือ ความยาวรวมของเส้นทางการรังวัด (km)

4.3.3.2 หากวิธีการทำระดับทางตรีโกณมิติด้วย EDM ถูกนำมาใช้ จุดต้องถูกจัดตั้งในลักษณะของโครงข่ายการรังวัดแบบสามเหลี่ยม หรือการรังวัดทางตั้ง ความสูงของเส้นทางการมองเห็นและระยะห่างจากอุปสรรคต้องไม่น้อยกว่า 1.2 m ความยาวปิดของการรังวัดทางตั้งต้องไม่เกินความยาวสูงสุดที่อนุญาตของเส้นทางการทำระดับของมาตรฐานงานสำรวจที่เหมาะสม

4.3.3.3 ข้อกำหนดทางเทคนิคหลักสำหรับการทำระดับทางตรีโกณมิติด้วย EDM ได้ระบุไว้ในตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ข้อกำหนดทางเทคนิคหลักสำหรับการทำระดับทางตรีโกณมิติด้วย EDM
(ที่มา “TB 10601-2009”)

มาตรฐาน งานสำรวจ	ความ ละเอียด ของ เครื่องมือ	ระยะห่าง ระหว่าง กล้องถึง เป้าสะท้อน (m)	วิธีการรังวัด	จำนวนรอบ สำหรับการ วัดความ ยาวระหว่าง กล้องถึงเป้า สะท้อน	จำนวน รอบ สำหรับ การวัดมุม ในทางตั้ง	ดัชนี ความคลาด เคลื่อน (")	ความคลาด เคลื่อนของมุม ตั้งในแต่ละ รอบ (")
ชั้นงานที่ 3	1"	≤ 600	รังวัดสองชุด โดยการวัด สองทิศทาง	2	4	5	5
ชั้นงานที่ 4	2"	≤ 800	การวัด สองทิศทาง	2	3	7	7
ชั้นงานที่ 5	2"	≤ 1,000	การวัด สองทิศทาง	1	2	10	10

4.3.3.4 วิธีการรังวัดสองชุดโดยการวัดสองทิศทางในรอบเดียว หรือวิธีการรังวัดแบบ
การย้อนกลับชุดเดียวในสองรอบสามารถใช้ได้ในการรังวัดการทำระดับทาง
ตรีโกณมิติด้วย EDM ชั้นงานที่ 3 ความแตกต่างของความสูงระหว่างข้อมูล
สองชุดต้องไม่เกิน $\pm 12\sqrt{D}$ mm

4.3.3.5 เครื่องมือที่ใช้ต้องได้รับการทดสอบและปรับเทียบก่อนการทำงานภาคสนาม

4.3.3.6 การทำระดับทางตรีโกณมิติด้วย EDM ต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดต่อไปนี้

- (1) การทำระดับทางตรีโกณมิติด้วย EDM สามารถทำพร้อมกับการ
รังวัดแนวระนาบได้
- (2) ความสูงของเครื่องมือและตัวสะท้อนต้องได้รับการวัดหนึ่งครั้งก่อน
และหลังการรังวัด ความแตกต่างระหว่างการวัดทั้งสองต้องไม่เกิน
2 mm
- (3) เครื่องมือวัดระยะทางที่มีค่าความถูกต้องดีกว่าชั้นงานที่ 2 ต้องใช้
สำหรับการรังวัดระยะทางและการอ่านเป็นหน่วยมิลลิเมตร
ข้อกำหนดความคลาดเคลื่อนของการรังวัดระยะทางต้องสอดคล้อง
กับข้อกำหนดที่ระบุในตารางที่ 8
- (4) จุดที่ใช้ถ่ายระดับต้องเป็นหมุดในวงรอบ ระยะทางและมุมทางตั้ง
ระหว่างจุดถ่ายระดับต้องรังวัดแบบสองทิศทางและอยู่ภายใต้
สภาพอากาศเดียวกัน ผลกระทบจากความโค้งของโลกต้องนำมา
พิจารณาในการคำนวณความแตกต่างของความสูง ค่าเฉลี่ยของ
ความแตกต่างของความสูงในการรังวัดสองทิศทางต้องใช้ความ
แตกต่างของความสูงระหว่างสองจุด
- (5) อุณหภูมิและความดันบรรยากาศต้องถูกวัดเมื่อทำการวัดระยะทาง
เครื่องมือวัดอุณหภูมิต้องมีความละเอียด ± 0.5 °C และเครื่องวัด

ความดันบรรยากาศต้องมีความละเอียด ± 100 Pa สำหรับการวัดความดันบรรยากาศ การแก้ไขจากสภาพอากาศต้องถูกนำมาพิจารณารวมกับระยะทางลาด

- (6) วิธีการอ่านค่าสายใยกลางต้องใช้ในการวัดมุมทางตั้ง การรังวัดย้อนกลับต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดที่ระบุในตารางที่ 18 และตารางที่ 19
- (7) ต้องหลีกเลี่ยงการรังวัดระยะทางยาวในขณะที่พระอาทิตย์ขึ้นหรือตก เมื่อการแปรผันของดัชนีการหักเหทางทางตั้งของบรรยากาศมีค่อนข้างมาก

4.3.3.7 ในชุดการรังวัด หากความแตกต่างของความสูงระหว่างการวัดสองทิศทางเกินขอบเขตที่ยอมรับได้ การวัดสองทิศทางต้องทำใหม่ หากความแตกต่างของความสูงระหว่างการวัดสองทิศทางยังอยู่นอกขอบเขตที่ยอมรับได้ แต่ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของความสูงจากการวัดสองทิศทางและการวัดแบบปกติน้อยกว่าขอบเขตที่อนุญาตสำหรับลำดับการทำระดับที่สอดคล้องกัน ค่าเฉลี่ยของการวัดสองทิศทางต้องถูกนำมาใช้เป็นผลลัพธ์สุดท้าย

4.3.4 การวัดระดับทางตรีโกณมิติด้วย EDM ให้มีค่าความถูกต้อง

4.3.4.1 การทำระดับทางตรีโกณมิติด้วย EDM ให้มีค่าความถูกต้องต้องถูกใช้ในพื้นที่ภูเขาที่เข้าถึงได้ยากเพื่อทดแทนการทำระดับชั้นงานที่ 2 เครื่องมือที่ใช้ต้องมีความสามารถในการระบุตำแหน่งอัตโนมัติ ค่าความถูกต้องของเครื่องมือมาตรฐานต้องดีกว่า 0.5 " และ 1 mm + 1 ppm

4.3.4.2 เป้าสะท้อนและหลักเล็งต้องมีความผิดพลาดในการจัดตั้งเป้าสะท้อนต้องไม่เกิน 0.1 mm มาตรฐานการวางจุดอ้างอิงต้องออกแบบให้มีการจัดตำแหน่งหลักเล็งที่บังคับ

4.3.4.3 สำหรับการทำระดับทางตรีโกณมิติด้วย EDM ที่แม่นยำ ต้องใช้กล้องสำรวจแบบประมวลผลรวมสองตัวพร้อมกันในการวัดสองทิศทาง การตั้งค่าต้องทำในจำนวนที่เป็นคู่ ในการวัดระยะทางการรังวัดต้องน้อยกว่า 500 m และต้องไม่เกิน 1,000 m มุมทางตั้งต้องไม่มากกว่า 10° ต้องใช้กล้องสำรวจแบบประมวลผลรวมและเป้าสะท้อนชุดเดียวกันที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของช่วงการรังวัด และระยะทางการรังวัดในแต่ละจุดต้องจำกัดให้อยู่ภายใน 20 m และมีความใกล้เคียงกัน

4.3.4.4 ข้อกำหนดทางเทคนิคหลักสำหรับการทำระดับทางตรีโกณมิติด้วย EDM ที่แม่นยำ ต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดในตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับการทำระดับทางตรีโกณมิติด้วย EDM ที่แม่นยำ
(ที่มา “TB 10601-2009”)

มาตรฐานงานสำรวจ	ระยะห่างความยาวระหว่างกล้องถึงเป้าสะท้อน (m)	จำนวนรอบ	ดัชนีความคลาดเคลื่อน (")	ความแตกต่างของมุมทางตั้งระหว่างรอบ (")	ความแตกต่างของระยะทางระหว่างรอบ (mm)	ความแตกต่างของความสูงระหว่างรอบ (mm)
ชั้นงานที่ 2	≤ 100	2	5	5	3	$\pm 4\sqrt{S}$
	100 – 500	4				
	500 – 800	6				
	800 – 1,000	8				

หมายเหตุ: S คือ ความยาวของเส้นทางการมองเห็น (km)

4.3.4.5 ตัวชี้วัดค่าความถูกต้องอื่น ๆ ของการทำระดับทางตรีโกณมิติด้วย EDM ที่แม่นยำต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดในตารางที่ 12 และตารางที่ 14

4.3.5 การทำระดับจุดอ้างอิงของเส้นทาง

4.3.5.1 จุดอ้างอิงของเส้นทางต้องถูกจัดตั้งตามเส้นทางในรูปแบบเส้นทางเชื่อมโยงหรือวงกลม ต้องมีจุดอ้างอิงหนึ่งจุดทุก ๆ 2 km จุดอ้างอิงเพิ่มเติมต้องถูกจัดตั้งตามความจำเป็นสำหรับโครงการสำคัญ เช่น สะพานขนาดใหญ่ อุโมงค์ยาว หรือโครงสร้างพื้นฐานพิเศษ เป็นต้น จุดต้องอยู่ในระยะห่างระหว่าง 50 ถึง 300 m จากกึ่งกลางแนวของเส้นทาง

4.3.5.2 การจัดตั้งจุดอ้างอิงต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) หมดถาวรของจุดอ้างอิงต้องถูกตั้งอยู่ในสถานที่ที่ปลอดภัยและห่างไกล ซึ่งดินมีความแข็งแรง การรบกวนสามารถทำได้สะดวก และการรักษาสภาพจุดอ้างอิงสามารถทำได้ง่าย
- (2) หมดถาวรของจุดอ้างอิงสามารถเป็นเสาปรับทิศทางสำเร็จรูปหรือหล่อคอนกรีตบนพื้นที่จุดนั้น
- (3) หมดถาวรของจุดอ้างอิงสามารถใช้เป็นหมุดควบคุมทางราบด้วยเช่นกัน การฝังหมุดถาวรเหล่านี้สำหรับการใช้งานร่วมกันต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดสำหรับการฝังจุดอ้างอิง
- (4) หลังการจัดตั้งหมดถาวร ต้องทำการกรอกแบบฟอร์มอธิบายหมุดควบคุมในสถานที่ โดยแบบฟอร์มดังกล่าวต้องรวมถึงรายละเอียดที่สำคัญ เช่น ระยะทางจากหมุดควบคุมถึงวัตถุเด่นบนพื้นดิน และร่างแผนที่ตำแหน่งหมุดควบคุมอย่างชัดเจน เพื่ออำนวยความสะดวกในการค้นหาจุดในอนาคต

4.3.5.3 ในพื้นที่ที่พบการทรุดตัวของผิวดินไม่สม่ำเสมอและสภาพทางธรณีวิทยาที่ไม่ดี ต้องฝังจุดอ้างอิงที่ฝังลึกทุก ๆ 10 km และจุดอ้างอิงบนชั้นหินทุก ๆ 50 km ต้องใช้จุดอ้างอิงบนชั้นหินที่มั่นคงของประเทศ

4.3.5.4 การตั้งจุดอ้างอิงต้องดำเนินการตามข้อกำหนดสำหรับการทำชั้นงานที่ 2 การทำระดับเชื่อมโยงกับจุดอ้างอิงชั้นงานที่ 1 หรือชั้นงานที่ 2 ของชาติต้องดำเนินการโดยทั่วไปที่ระยะห่าง 150 km และระยะห่างต้องไม่เกิน 400 km

4.3.6 การคำนวณในสำนักงานและการรวบรวมผลลัพธ์

4.3.6.1 เมื่อเสร็จสิ้นการทำงานในสนามสำหรับโครงข่ายควบคุมทางดิ่ง คุณภาพของข้อมูลการรังวัดต้องได้รับการตรวจสอบเนื้อหาของการตรวจสอบต้องรวมถึงข้อมูลสถานีการรังวัด ข้อมูลเส้นทางการทำระดับ และความคลาดเคลื่อนของความแตกต่างของความสูงในเส้นทางเชื่อมต่อและวงรอบ การคำนวณการปรับแก้สามารถดำเนินการได้หลังจากข้อมูลการรังวัดได้รับการรับรองแล้ว

4.3.6.2 การประมวลผลข้อมูลสำหรับการรังวัดทางดิ่งต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) เมื่อเสร็จสิ้นการรังวัดทางดิ่งในระดับที่ 4 ขึ้นไป ต้องคำนวณค่าความผิดพลาดมาตรฐานแบบสุ่มของความต่างระดับความสูงต่อกิโลเมตร ซึ่งพิจารณาค่าความแตกต่างของความสูงระหว่างการรังวัดสองทิศทางในแต่ละช่วงการรังวัด
- (2) หากจำนวนเส้นทางเชื่อมต่อหรือวงรอบ ในโครงข่ายควบคุมทางดิ่งมีมากกว่า 20 เส้น ค่าความผิดพลาดรวมของความสูงต่อกิโลเมตร ซึ่งพิจารณาจากความแตกต่างในเส้นทางเชื่อมต่อหรือวงรอบ
- (3) ความแตกต่างของความสูงที่ใช้ในการคำนวณการปรับแก้ของงานระดับตามชั้นงานที่ 2 สามารถปรับแก้ตามปัจจัยต่าง ๆ เช่น ไม้ระดับไม่ได้มาตรฐาน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไม้ระดับ ความสูงจีออยด์ ความผิดปกติของแรงโน้มถ่วง (gravity anomalies) และความคลาดเคลื่อนบรรจบของวงรอบ
- (4) สำหรับโครงข่ายการควบคุมระดับในชั้นงานที่ 4 และสูงกว่า ต้องใช้วิธีการปรับแก้ที่เข้มงวด (rigorous method) สำหรับการปรับแก้ให้สมบูรณ์ สำหรับจุดความสูงของแต่ละจุด

4.3.6.3 การพิเศษของข้อมูลการรังวัดระดับของโครงข่ายการควบคุมระดับในมาตรฐานงานสำรวจต่าง ๆ ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในภาคผนวก ก ตารางที่ ก. 3

4.3.6.4 เมื่อเสร็จสิ้นการรังวัดการควบคุมระดับทางทางดิ่ง เอกสารที่ต้องส่งมอบมีดังนี้

- (1) เอกสารออกแบบทางวิศวกรรม
- (2) สมุดบันทึกการรังวัดภาคสนามและใบรับรองการสอบเทียบเครื่องมือ
- (3) ข้อมูลการคำนวณสำหรับรายการการแก้ไขความสูงต่าง ๆ
- (4) ตารางการคำนวณสำหรับการปรับแก้การรังวัด
- (5) ตารางความสูงของผลลัพธ์
- (6) คำอธิบายจุดของหลักฐานการควบคุม
- (7) ร่างแผนผังของการรังวัดการตั้งระดับวงรอบ
- (8) รายงานสรุปทางเทคนิค

4.4 การรังวัดเส้นทาง

การรังวัดเส้นทาง (route surveying) เป็นกระบวนการหลักในการกำหนดตำแหน่งและลักษณะภูมิประเทศตลอดแนวทางรถไฟความเร็วสูง เพื่อรองรับการออกแบบโครงสร้างพื้นฐานทั้งทางราบและทางดิ่ง มาตรฐานนี้ได้กำหนดแนวทางการดำเนินงานที่ครอบคลุมตั้งแต่การควบคุมโครงข่ายหมุดควบคุม (CP 0, CP I และ CP II) การทำแผนที่ภูมิประเทศ การตั้งแนวเส้นทาง การรังวัดขั้นฐานราก ไปจนถึงการปักหมุดซ้ำ

4.4.1 ข้อกำหนดทั่วไปการรังวัดเส้นทาง

4.4.1.1 การรังวัดโครงข่ายการควบคุมแนวเส้นทางต้องดำเนินการตามข้อกำหนดสำหรับการรังวัด CP 0 CP I และ CP II หากโครงข่ายการควบคุม CP I หรือโครงข่ายการควบคุม CP II ไม่ได้ถูกวางหมุดในช่วงเริ่มต้นของการรังวัดสามารถวางได้ตามข้อกำหนดสำหรับการรังวัดเบื้องต้นและออกแบบตามความจำเป็น

4.4.1.2 ข้อกำหนดที่ระบุสำหรับการทำระดับชั้นงานที่ 2 ต้องถูกนำไปใช้กับการรังวัดการควบคุมทางดิ่งของเส้นทาง ในระหว่างการรังวัดและการออกแบบ หากไม่สามารถปฏิบัติตามข้อกำหนดสำหรับการทำระดับชั้นงานที่ 2 ได้ ระบบการควบคุมทางดิ่งสามารถจัดตั้งได้ตามข้อกำหนดสำหรับการรังวัดเบื้องต้นและการออกแบบ

4.4.2 การรังวัดควบคุมสำหรับการสำรวจเบื้องต้น

4.4.2.1 โครงข่ายการควบคุมทางราบ CP I หากไม่สามารถจัดตั้งในช่วงการรังวัดเริ่มต้น ต้องจัดตั้งโครงข่ายการควบคุมทางราบตามเส้นทางแทน โดยอ้างอิงจากโครงข่าย CP 0 โดยต้องใช้หมุดควบคุม GNSS หนึ่งคู่ทุก ๆ 8 km โดยต้องวางคนละฝั่งตามแนวเส้นทาง โดยระยะห่างระหว่างหมุดทั้งสองต้องอยู่ในระยะ 500 ถึง 800 m การรังวัดต้องดำเนินการตามข้อกำหนดสำหรับโครงข่าย GNSS ชั้นงานที่ 4

4.4.2.2 การใช้วิธีการทำวงรอบสามารถใช้สำหรับการรังวัดเริ่มต้นได้โดยผู้เชี่ยวชาญ หากจำเป็น การทำวงรอบต้องเริ่มต้นและสิ้นสุดที่จุดของโครงข่ายการควบคุม CP I หรือโครงข่ายการควบคุมแนวเส้นทางเริ่มต้น และต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) ต้องมีหมุดควบคุม หากจำเป็นสามารถใช้หมุดคอนกรีตได้
- (2) สามารถใช้การทำวงรอบที่ใช้ GNSS หรือ กล้องสำรวจแบบประมวลผลรวมได้ หากใช้ GNSS ในการรังวัดต้องดำเนินการตามข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับโครงข่าย GNSS ชั้นงานที่ 5 หากใช้กล้องสำรวจแบบประมวลผลรวมต้องดำเนินการตามข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับการทำวงรอบชั้นงานที่ 2 ความยาวของวงรอบที่เชื่อมโยงกันต้องไม่เกิน 10 km
- (3) การควบคุมทางดิ่งสำหรับการรังวัดเบื้องต้นต้องดำเนินการตามข้อกำหนดด้านค่าความถูกต้องสำหรับการวัดระดับชั้นงานที่ 5 โดยสามารถใช้วิธีการวัดระดับ การวัดระดับด้วยวิธีตรีโกณมิติที่ใช้ EDM และการวัดระดับด้วย GNSS ต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดที่ระบุไว้ดังต่อไปนี้
 - (3.1) หากใช้การทำระดับหรือการใช้เทคนิคการวัดระดับด้วยวิธีตรีโกณมิติที่ใช้ EDM ต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดที่ระบุไว้ในข้อที่ 4.3.4
 - (3.2) หากใช้ GNSS ในการวัดระดับ ระยะห่างระหว่างหมุดที่รู้ในโครงข่ายสำหรับการจัดตั้งต้องไม่เกิน 50 km จำนวนจุดที่รู้ที่ใช้ในการจัดตั้งต้องไม่ต่ำกว่าสี่จุดในแต่ละส่วนของโครงข่าย ต้องตรวจสอบและเปรียบเทียบรูปแบบการปรับแก้หลายวิธี เพื่อให้ได้การปรับแก้ที่เหมาะสม และประเมินคุณภาพของการปรับแก้โดยใช้จุดอ้างอิงที่รู้เป็นจุดตรวจสอบ ซึ่งความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าความสูงที่จัดตั้งและค่าความสูงที่รู้ค่าต้องไม่เกิน 100 mm

4.4.2.3 การรังวัดเส้นทางต้องมีการใช้โครงข่ายการควบคุมทางราบของ CP I หรือ CP II โดยตรง หากความหนาแน่นของจุด CP I หรือ CP II ไม่เพียงพอ ต้องเพิ่มหมุดควบคุมเพิ่มเติมที่มีค่าความถูกต้องของการรังวัดเป็นไปตามข้อกำหนดสำหรับการรังวัดด้วย GNSS ชั้นงานที่ 5 หรือการทำวงรอบมาตรฐานงาน คลาส I

4.4.2.4 หมุดควบคุมเส้นทางต้องใช้โดยตรงสำหรับการควบคุมทางดิ่งของการรังวัดการจัดตำแหน่ง หากโครงข่ายหมุดควบคุมเส้นทางยังไม่ได้รับการจัดตั้งหรือไม่เพียงพอต่อการรังวัดตำแหน่งการรังวัดการวางแนวในทางดิ่งสามารถดำเนินการได้ตามข้อกำหนดสำหรับการทำระดับชั้นงานที่ 4 โดยใช้การวัดระดับหรือการวัดระดับด้วยการวัดระดับด้วยวิธีตรีโกณมิติที่ใช้ EDM

4.4.3 การทำแผนที่ภูมิประเทศ

4.4.3.1 แผนที่ภูมิประเทศต้องสร้างมาจากการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศ ดัชนีและความถูกต้องต้องเป็นไปตามข้อกำหนดที่ระบุไว้ในหน่วยกรมแผนที่ทหาร (Royal Thai Survey Department) หากการทำแผนที่ดิจิทัล ด้วยกล้องประมวลผลรวมหรือการรังวัดด้วย GNSS RTK หรือวิธีอื่น ๆ ถูกนำมาใช้ต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องที่ระบุในหัวข้อที่ 4.3

4.4.3.2 การจำแนกประเภทภูมิประเทศต้องเป็นไปตามข้อกำหนดที่ระบุไว้ในตารางที่ 21

ตารางที่ 21 การจำแนกลักษณะภูมิประเทศ (ที่มา “TB 10601-2009”)

ลักษณะของภูมิประเทศ	I (ที่ราบ)	II (ภูเขา)	III (ภูเขาสูง)	IV (ภูเขาสูงมาก)
ความลาดชันของพื้นที่ (°)	< 3	3 ถึง 10	10 ถึง 25	25 และมากกว่า
ความสูงของพื้นที่ (m)	< 25	25 ถึง 150	150 ถึง 350	350 และมากกว่า

หมายเหตุ: ค่าที่ระบุในตารางที่ 21 แสดงถึงความลาดชันหรือความสูงของพื้นที่ที่เด่นในบริเวณแผนที่ในส่วนการรังวัดเฉพาะ หากมีความขัดแย้งเกิดขึ้น ความลาดชันต้องมีความสำคัญมากกว่าความสูง

4.4.3.3 ระยะห่างของเส้นชั้นความสูงหลักบนแผนที่ภูมิประเทศต้องเป็นไปตามข้อกำหนดที่ระบุไว้ในตารางที่ 22

ตารางที่ 22 ระยะห่างของเส้นชั้นความสูงหลักบนแผนที่ภูมิประเทศ (ที่มา “TB 10601-2009”)

มาตราส่วนแผนที่ภูมิประเทศ	1:500	1:1000	1:2000	1:5000	1:10000
ระยะห่างของเส้นชั้นความสูงหลัก (m)	0.5;1	1;2	1;2	2;5;10	5;10

หมายเหตุ: สำหรับแผนที่ภูมิประเทศที่ใช้มาตราส่วนเดียวกันและในส่วนการรังวัดเดียวกันต้องใช้ระยะห่างของเส้นชั้นความสูงหลักเดียวกัน

4.4.3.4 ข้อผิดพลาดมาตรฐานของตำแหน่งของจุดวัดถุนบนแผนที่ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในตารางที่ 23

ตารางที่ 23 ข้อผิดพลาดมาตรฐานของตำแหน่งจุด (ที่มา “TB 10601-2009”)

ขนาดมาตราส่วนของแผนที่ภูมิประเทศ	ข้อผิดพลาดมาตรฐานของตำแหน่งจุด (mm)
1:500 และ 1:1000	1.6
1:2000	สำหรับลักษณะของภูมิประเทศแบบ I และ II ใช้ 1.0 สำหรับลักษณะของภูมิประเทศแบบ III และ IV ใช้ 1.2 สำหรับพื้นที่ยาก ใช้ 1.6
1:5000 และ 1:10000	สำหรับลักษณะของภูมิประเทศแบบ I และ II ใช้ 0.5 สำหรับลักษณะของภูมิประเทศแบบ III และ IV ใช้ 0.8 สำหรับพื้นที่ยาก ใช้ 1.2

4.4.3.5 ข้อผิดพลาดมาตรฐานของจุดความสูงและเส้นชั้นความสูงต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในตารางที่ 24

ตารางที่ 24 ข้อผิดพลาดมาตรฐานของจุดความสูงและเส้นชั้นสูง (m) (ที่มา “TB 10601-2009”)

การจัดประเภทของ ภูมิประเทศ	I		II		III		IV	
ขนาด มาตราส่วน	จุดความ สูง	เส้น ชั้นสูง	จุดความ สูง	เส้น ชั้นสูง	จุดความ สูง	เส้น ชั้นสูง	จุดความ สูง	เส้น ชั้นสูง
1:500	0.20	0.25	0.40	0.50	0.60	0.75	0.80	1.00
1:1000	0.40	0.50	0.60	0.75	0.80	1.00	1.20	1.50
1:2000	0.60	0.75	0.96	1.20	1.60	2.00	2.00	2.50
1:5000	0.90	1.00	1.20	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50
1:10000	1.20	1.50	2.00	2.50	3.20	4.00	4.80	6.00

หมายเหตุ: ในพื้นที่ที่เข้าถึงยาก ข้อผิดพลาดมาตรฐานสามารถผ่อนผันได้ 1.5 เท่าของค่าที่แสดงในตาราง

- 4.4.3.6 การกระจายและความหนาแน่นของจุดความสูงภูมิประเทศต้องสามารถอธิบายลักษณะภูมิประเทศได้ และต้องตรงกับความต้องการของการประมาณค่าเส้นชั้นความสูงอย่างแม่นยำ สำหรับแผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1:2000 1:5000 และ 1:10000 จุดความสูงต้องแสดงค่าความละเอียดที่สุดเท่ากับ 0.1 m สำหรับแผนที่มาตราส่วนภูมิประเทศขนาด 1:500 และ 1:1000 จุดความสูงต้องแสดงค่าความละเอียดที่สุดเท่ากับ 0.01 m
- 4.4.3.7 วิธีการรังวัดวงรอบ การรังวัดโครงข่ายแบบกิ่งแยก (spur traversing) และการรังวัดด้วย GNSS RTK สามารถนำมาใช้ในการรังวัดหมุดควบคุมแผนที่ การรังวัดหมุดควบคุมแผนที่ที่ต้องเริ่มต้นและสิ้นสุดที่จุดวงรอบหรือหมุดควบคุม GNSS ของการรังวัดของการสำรวจเบื้องต้น ข้อผิดพลาดมาตรฐานสัมพัทธ์ของหมุดควบคุมแผนที่เมื่อเปรียบเทียบกับหมุดควบคุมที่อยู่ติดกันต้องไม่เกิน 0.1 mm บนแผนที่ และข้อผิดพลาดด้านความสูงต้องไม่เกิน 1/10 ของระยะห่างหลักของเส้นชั้นความสูง
- 4.4.3.8 ก่อนเริ่มการเก็บข้อมูลระยะทางและความสูงของจุดส่องย้อนกลับต้องได้รับการตรวจสอบ และบางจุดของวัตถุที่เด่นในพื้นที่หรือจุดอื่น ๆ ที่รังวัดจากสถานีที่ผ่านมา ต้องได้รับการตรวจสอบใหม่เพื่อการยืนยัน จุดส่องย้อนกลับต้องได้รับการตรวจสอบเป็นระยะ ก่อนที่ต้องย้ายไปยังสถานีอื่น
- 4.4.3.9 การทำแผนที่ดิจิทัลด้วยกล้องสำรวจแบบประมวลผลรวมต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้
- (1) ข้อผิดพลาดในการตั้งกล้องให้อยู่บนจุดควบคุมต้องไม่เกิน 5 mm ความสูงของเครื่องมือและเป้าสะท้อนต้องวัดทั้งสองครั้งได้ต่างกันไม่เกิน 0.01 m
 - (2) ระยะทางและความสูงของจุดส่องย้อนกลับต้องได้รับการตรวจสอบก่อนและหลังการเก็บข้อมูล ความคลาดเคลื่อนของระยะทางต้องไม่เกิน 0.1 mm บนแผนที่ และความคลาดเคลื่อนของความสูงต้อง

- ไม่เกิน 1/6 ของเส้นชั้นความสูงหลัก หากผลการตรวจสอบเกินค่ามาตรฐาน ข้อมูลที่ได้จากจุดนี้ต้องทำการรังวัดใหม่
- (3) ขอบเขตการรังวัดต้องเป็นไปตามข้อกำหนดที่ให้ไว้ในตารางที่ 25

ตารางที่ 25 ระยะรังวัดสูงสุดของการทำแผนที่ด้วยกล้องสำรวจแบบประมวลผลรวม
(ที่มา “TB 10601-2009”)

มาตราส่วนแผนที่	1:500	1:1000	1:2000	1:5000	1:10000
ระยะรังวัด (m)	240	360	600	900	1200

- (4) ข้อมูลที่เก็บรวบรวมต้องใช้รหัสแผนที่พร้อมรหัสข้อมูล หากจำเป็นต้องวาดภาพร่างแสดงความสัมพันธ์ทางพื้นที่ระหว่างจุดต่าง ๆ
- 4.4.3.10 การทำแผนที่ดิจิทัลด้วย GNSS RTK ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้
- (1) หมดควบคุมที่มีความละเอียดสูงต้องกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณแผนที่ และจำนวนหมดควบคุมเหล่านี้ต้องไม่น้อยกว่าสี่จุด
 - (2) ก่อนเริ่มการเก็บข้อมูล ต้องรังวัดจุดที่รู้หนึ่งจุดหรือมากกว่าซึ่งมีความถูกต้องไม่น้อยกว่าหมดควบคุมแผนที่ที่ใช้ในการทดสอบความคลาดเคลื่อนในทางราบต้องไม่เกิน 0.2 mm บนแผนที่ และความคลาดเคลื่อนในความสูงต้องไม่เกิน 1/5 ของระยะชั้นความสูงหลัก
 - (3) ค่าความถูกต้องของอุปกรณ์ GNSS ต้องตั้งค่าให้สอดคล้องกับข้อกำหนดค่าความถูกต้องของแผนที่ เท่านั้น เมื่อค่าความถูกต้องอยู่ในขอบเขตที่อนุญาต จึงสามารถบันทึกผลการรังวัดได้
 - (4) หมายเลขจุดและรหัสของจุดที่รังวัดต้องถูกป้อนเมื่อบันทึกข้อมูล หากจำเป็นสามารถวาดภาพร่างเพื่อแสดงการเชื่อมต่อของจุด
- 4.4.3.11 เนื้อหาหลักและข้อกำหนดสำหรับการทำแผนที่ภูมิประเทศมีดังนี้
- (1) ตำแหน่งของหมดควบคุมสามเหลี่ยม จุด GNSS จุดการรังวัด และเครื่องหมายจุดต้องได้รับการวัดหมายเลขจุดและความสูงต้องมีการระบุ
 - (2) ต้องทำการสำรวจและทำแผนที่อาคารแต่ละประเภทแยกจากกัน ในกรณีที่อาคารตั้งอยู่ห่างจากแนวเส้นทาง และไม่มีการวางแผนให้แนวเส้นทางผ่านบริเวณดังกล่าว สามารถทำแผนที่เฉพาะขอบเขตโดยรวม โดยแสดงเฉพาะแนวถนนและทางสัญจรได้
 - (3) ทำแผนที่แสดงขอบเขตของจังหวัด อำเภอ และหมู่บ้านในพื้นที่ก่อสร้างอุโมงค์
 - (4) ขอบเขตของการจำแนกการใช้ที่ดินต้องทำแผนที่ รวมถึงพื้นที่ป่าไม้ พุ่มไม้ ต้นไม้ พื้นที่สวน ป่าเศรษฐกิจ และที่ดินการเกษตร
 - (5) ทางรถไฟ ต้องทำแผนที่ พร้อมกับทิศทางของทางของการเดินรถไฟ

- (6) สายไฟฟ้า สายสื่อสาร ท่อประปา สายส่งน้ำมัน ท่อไต้ดินและบ่อพัก ต้องมีการทำแผนที่
- (7) สระน้ำ ท่อระบายน้ำ แม่น้ำ บ่อบาดาล อ่างเก็บน้ำ บึง สะพาน ท่อระบายน้ำ สถานีสูบน้ำ ต้องทำแผนที่ โดยแม่น้ำต้องระบุชื่อ
- (8) ขอบเขตของพื้นที่ที่มีสภาพธรณีวิทยาเยื้องต้องทำแผนที่
- (9) เมืองและหมู่บ้าน ชื่อสถานที่ ถนนหลัก องค์กรสำคัญ สถานที่ทางประวัติศาสตร์และวัฒนธรรม รวมถึงพื้นที่ที่ได้รับการคุ้มครองจากรัฐบาลและเขตสงวนธรรมชาติต้องมีการบันทึกในแผนที่
- (10) ภูมิประเทศและวัตถุทางธรรมชาติที่ไม่สามารถทำแผนที่ได้ตามสภาพจริงต้องสามารถแสดงในแผนที่ตามที่กำหนด
- (11) หากใช้การถ่ายภาพทางอากาศในการทำแผนที่ภูมิประเทศมีความละเอียดไม่เพียงพอ ต้องมีการสำรวจภาคสนามในการเก็บรายละเอียดเพิ่มเติมเพื่อให้แผนที่มีความละเอียดมากขึ้น

4.4.3.12 การตรวจสอบและประเมินค่าความถูกต้องในทางราบและทางตั้งของแผนที่ภูมิประเทศต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของตำแหน่งจุดวัตถุทางภูมิประเทศบนแผนที่ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในตารางที่ 23
 - (2) ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของตำแหน่งจุดในการตรวจสอบต้องคำนวณโดยใช้สมการที่ 20 และสมการที่ 21
- หากใช้วิธีค่าความถูกต้องสูงในการตรวจสอบตามสมการที่ 20

$$m_s = \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta_s^2}{n}} \quad (20)$$

- หากใช้วิธีค่าความถูกต้องเทียบเท่าในการตรวจสอบตามสมการที่ 21

$$m_s = \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta_{1s}^2}{2n}} \quad (21)$$

โดยที่

m_s คือความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของตำแหน่งจุดในการตรวจสอบ (mm)

Δ_s คือความคลาดเคลื่อนระหว่างตำแหน่งของจุดตรวจสอบที่มีค่าความถูกต้องสูงกับตำแหน่งของจุดเดียวกันบนแผนที่ (mm)

Δ_{1s} คือความคลาดเคลื่อนระหว่างตำแหน่งของจุดตรวจสอบที่มีค่าความถูกต้องเทียบเท่ากับตำแหน่งของจุดเดียวกันบนแผนที่ (mm)

n คือจำนวนจุดตรวจสอบ

- (3) ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของความสูงของเส้นชั้นความสูงต้องเป็นไปตามข้อกำหนดใน ตารางที่ 24
 - (4) ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของความสูงในการตรวจสอบต้องคำนวณโดยใช้สมการ
- หากใช้วิธีค่าความถูกต้องสูงในการตรวจสอบตามสมการที่ 22

$$m_h = \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta_h^2}{n}} \quad (22)$$

- หากใช้วิธีค่าความถูกต้องสูงในการตรวจสอบตามสมการที่ 23

$$m_h = \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta_{1h}^2}{2n}} \quad (23)$$

โดยที่

m_h คือความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของความสูงในการตรวจสอบ (m)

Δ_h คือความคลาดเคลื่อนระหว่างความสูงของจุดตรวจสอบที่มีค่าความถูกต้องสูงกับความสูงที่คำนวณจากแผนที่ (m)

Δ_{1h} คือความคลาดเคลื่อนระหว่างความสูงของจุดตรวจสอบที่มีค่าความถูกต้องเทียบกับความสูงที่คำนวณจากแผนที่ (m)

n คือจำนวนจุดตรวจสอบ

4.4.4 การรังวัดแนวกึ่งกลางของเส้นทาง

4.4.4.1 การรังวัดแนวกึ่งกลางของเส้นทางต้องดำเนินการโดยอิงจากโครงข่ายควบคุมทางราบของการรังวัดการวางตำแหน่งและจุดอ้างอิงของเส้นทางหรือโครงข่ายควบคุมทางตั้งชั้นงานที่ 4 หากความหนาแน่นของหมุดควบคุมไม่เพียงพอในการรังวัดแนวกึ่งกลางได้ โครงข่ายควบคุมทางราบต้องมีการปรับปรุงตามข้อกำหนดของโครงข่าย GNSS ชั้นงานที่ 5 หรือการทำรอบคลาส I ซึ่งความยาวของการรังวัดต้องไม่เกิน 5 km โครงข่ายควบคุมทางตั้งต้องมีการเพิ่มความหนาแน่นของหมุดควบคุมตามข้อกำหนดของการทำระดับชั้นงานที่ 5

4.4.4.2 การรังวัดแนวกึ่งกลางต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) วิธีพิกัดเชิงขั้ว (polar coordinate method) ด้วยกล้องประมวลผลรวมหรือ GNSS RTK สามารถใช้ในการตั้งตำแหน่งแนวกึ่งกลาง
- (2) ความสัมพันธ์ของระยะทางตามหมุดกิโลเมตรระหว่างทางรถไฟเดิมและทางรถไฟใหม่ต้องถูกระบุที่สถานีเชื่อมต่อทางรถไฟ (track connection station)

- (3) ป้ายกิโลเมตรและหมุดต้องถูกปักที่แนวกึ่งกลาง การเว้นระยะระหว่างหมุดแนวกึ่งกลางต้องไม่เกิน 50 m สำหรับส่วนที่เป็นเส้นตรง และ 20 m สำหรับส่วนที่มีโค้ง ในกรณีของส่วนที่มีโค้งสามารถเว้นระยะหมุดได้ 40 m หากสภาพภูมิประเทศเป็นที่ราบหมุดเพิ่มเติมต้องถูกเพิ่มในจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงของภูมิประเทศตามแบบที่ได้ออกแบบไว้
- (4) การวัดความสูงโดยใช้การวัดแบบ EDM การทำระดับ หรือการรังวัดด้วย GNSS RTK สามารถนำมาใช้ในการวัดความสูงของจุดแนวเส้นกึ่งกลาง โดยความสูงต้องวัดสองครั้งและความแตกต่างระหว่างทั้งสองครั้งต้องไม่เกิน 0.1 m

4.4.4.3 การรังวัดแนวกึ่งกลางด้วยกล้องสำรวจแบบประมวลผลรวมต้องเป็นไปตามข้อกำหนดต่อไปนี้

- (1) กล้องสำรวจแบบประมวลผลรวมต้องตั้งอยู่ที่หมุดควบคุมของโครงข่ายการวางแนว และสามารถเพิ่มเส้นทางสำรวจเชื่อมต่อหรือเส้นทางสำรวจข้างเคียงจากโครงข่ายการควบคุมการวางแนวได้ การรังวัดเส้นทางเชื่อมต่อต้องดำเนินการตามข้อกำหนดสำหรับการรังวัดวงรอบคลาส I
- (2) ระยะทางการวางแนวต้องไม่เกิน 400 m หากใช้วิธีพิกัดเชิงขั้ว (polar coordinate method)

4.4.4.4 การรังวัดเส้นกึ่งกลางด้วย GNSS RTK ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดต่อไปนี้

- (1) สถานีอ้างอิงต้องตั้งอยู่ที่หมุดควบคุมที่ทราบค่าพิกัดทั้งทางราบและทางตั้ง
- (2) ในการหาค่าพารามิเตอร์การแปลงข้อมูลเชิงพิกัด ค่าทางราบของจุดรวมต้องไม่เกิน 15 mm ค่าทางตั้งต้องไม่เกิน 30 mm
- (3) ก่อนการตั้งจุด จุดที่ทราบต้องตั้งอยู่เพื่อการตรวจสอบจากสถานีเคลื่อนที่และข้อมูลต้องได้รับการบันทึก ความแตกต่างของระยะทางทางราบต้องไม่เกิน 20 mm และความแตกต่างของความสูงต้องไม่เกิน 40 mm
- (4) หากสถานีอ้างอิงถูกเปลี่ยนใหม่ เสาสองต้นสุดท้ายของเส้นกึ่งกลางต้องตั้งใหม่เพื่อการตรวจสอบและบันทึกผล ความแตกต่างของระยะทางทางราบต้องไม่เกิน 25 mm และความแตกต่างของความสูงต้องไม่เกิน 50 mm
- (5) ความคลาดเคลื่อนของพิกัดสำหรับการกำหนดตำแหน่งและพิกัดการออกแบบต้องไม่เกิน 50 mm
- (6) เมื่อเสร็จสิ้นการรังวัดเส้นกึ่งกลางต้องมีผลลัพธ์ต่อไปนี้
 - (6.1) พิกัดทางราบและความสูงของหมุดแนวเส้นกึ่งกลาง
 - (6.2) ค่าความถูกต้องของพิกัดทางราบและความสูงของหมุดแนวเส้นกึ่งกลาง

(6.3) ความคลาดเคลื่อนระหว่างพิกัดการตั้งของหมุดแนวเส้น
กึ่งกลางและพิกัดการออกแบบ

4.4.5 การประเมินสำหรับการรังวัดแบบพิเศษ

4.4.5.1 การตรวจสอบรายละเอียดต้องดำเนินการสำหรับแนวท่อ ท่อของน้ำประปา การระบายน้ำ แก๊ส การขนส่ง ไฟฟ้า และการสื่อสารในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการก่อสร้าง การวัดตำแหน่งทางราบ ความลึก หรือความสูงจากพื้นต้องดำเนินการที่หน้างาน

4.4.5.2 ข้อกำหนดสำหรับการรังวัดสิ่งก่อสร้างที่ข้ามหรือขยายข้ามเส้นทางรถไฟ

- (1) หากเส้นทางรถไฟตัดกับถนน ซี่ถนน ประเภท มาตรฐานทางเทคนิค และลักษณะของโครงสร้างผิวถนน รวมถึงระยะทางและสภาพของงานก่อสร้างต้องได้รับการรังวัดที่จุดตัดของถนน ข้อกำหนดที่จุดตัดการลาดเอียงของถนน ความกว้างของรางและความหนาของถนนต้องได้รับการวัด
- (2) หากเส้นทางรถไฟตัดผ่านท่อ ระบบท่อต้องได้รับการรังวัดเพื่อหาข้อมูลเกี่ยวกับประเภท มาตรฐานทางเทคนิค ข้อกำหนด และรายละเอียดอื่น ๆ รวมถึงการวัดตำแหน่งการข้าม มุมของท่อ ความลึกหรือความสูงจากพื้นของท่อและความยาว
- (3) สำหรับการข้ามทางขนาดใหญ่หรือมีความซับซ้อน ต้องสร้างแผนที่แสดงรายละเอียดของพื้นที่ที่ข้ามโดยใช้มาตราส่วน 1:500 ถึง 1:2000 ตามความเหมาะสม

4.4.5.3 ในกรณีที่แนวคลอง แนวแม่น้ำ หรือแนวทางหลวงตัดผ่านแนวเส้นทางของอุโมงค์หรือแนวรางรถไฟ ให้ดำเนินการรังวัดทำระดับตามขวาง (profile cross section) โดยยึดโยงกับแนวเส้นทางหลักของอุโมงค์หรือแนวรางรถไฟ ทั้งนี้ ต้องกำหนดจุดเริ่มต้นของแนวการทำระดับตามขวางให้ชัดเจน และจัดทำแผนที่ในมาตราส่วนระหว่าง 1:500 ถึง 1:2000 ตามความเหมาะสมของพื้นที่

4.4.5.4 การประเมิน สำรวจ และทำแผนที่ของพื้นที่เกษตรกรรมที่ถูกใช้สำหรับบ่อ ยืม พื้นที่ทิ้งเศษวัสดุ ทางเข้าก่อสร้าง และงานสนับสนุนอื่น ๆ ต้อง โดยต้องระบุและบันทึกประเภทการใช้ที่ดินและกรรมสิทธิ์ในที่ดินอย่างชัดเจน

4.4.5.5 การรังวัดและการรังวัดเพื่อการคุ้มครองสิ่งแวดล้อมตามเส้นทางต้องรวมถึงเนื้อหาดังต่อไปนี้

- (1) สถานการณ์ปัจจุบัน ขอบเขต และสภาพการวางแผนที่เกี่ยวข้องของพื้นที่คุ้มครองทางนิเวศวิทยาของชาติ พื้นที่คุ้มครองสัตว์ป่า และพื้นที่พิทักษ์
- (2) ขอบเขตและสภาพของพื้นที่คุ้มครองแหล่งน้ำและพื้นที่ชุ่มน้ำ
- (3) ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสถานที่ที่ไวต่อเสียง เช่น โรงเรียน โรงพยาบาล และพื้นที่ที่อยู่อาศัย

- (4) ขอบเขตและสภาพของพื้นที่คุ้มครองทางประวัติศาสตร์และวัฒนธรรม
- 4.4.5.6 ค่าความถูกต้องของการรังวัดสำหรับการสืบสวนเฉพาะต้องได้รับการตัดสินใจตามข้อกำหนดของการออกแบบเฉพาะ ข้อมูลการรังวัดต้องถูกแสดงบนแผนที่ทางราบของเส้นทาง และภาพตัดยาว
- 4.4.6 การปิกหมุดของหมุดควบคุมและการรังวัดซ้ำ
 - 4.4.6.1 ก่อนเริ่มงานก่อสร้าง ผู้ออกแบบต้องส่งมอบผลที่ได้จากการรังวัดหมุดควบคุมและมอบหมายการปิกหมุดให้กับฝ่ายจัดการก่อสร้าง ขั้นตอนการมอบหมายการปิกหมุดต้องมีตัวแทนจากฝ่ายการก่อสร้างและที่ปรึกษา
 - 4.4.6.2 ผลลัพธ์จากการรังวัดหมุดควบคุมและการมอบหมายการปิกหมุด ต้องประกอบด้วย
 - (1) ผลลัพธ์ของหมุดควบคุม CP 0, CP I, CP II และรายละเอียดของจุด
 - (2) ข้อมูลการคำนวณการปรับปรุงของ CP I และ CP II
 - (3) ผลลัพธ์จากการรังวัดจุดฐานของเส้นทางและรายละเอียดของจุด
 - (4) ข้อมูลการคำนวณการหาระดับ
 - (5) รายงานทางเทคนิคของการรังวัด รวมถึงภาพประกอบการรังวัด การเชื่อมต่อของโครงข่ายควบคุมระดับทางราบและทางตั้ง
 - (6) การมอบหมายในการปิกหมุด ของ CP 0, CP I และ CP II และหมุด ของเส้นฐานของเส้นทาง
 - 4.4.6.3 ในระหว่างการก่อสร้างทางรถไฟความเร็วสูง งานบำรุงรักษาในรูปแบบของการรังวัดซ้ำต้องทำสำหรับโครงข่ายควบคุม CP 0, CP I, CP II และโครงข่ายควบคุมจุดฐานของเส้นทาง การบำรุงรักษาการรังวัดซ้ำของโครงข่ายควบคุมต้องถูกแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ การบำรุงรักษารายการที่เกิดขึ้นตามระยะเวลาที่กำหนดและการบำรุงรักษาที่ไม่เป็นระยะเวลาตามกำหนด การบำรุงรักษาระยะเวลาต้องได้รับการจัดการโดยฝ่ายการก่อสร้าง หากมีการบำรุงรักษาที่ไม่เป็นระยะเวลาต้องได้รับการจัดการโดยองค์กรที่กำกับดูแล
 - 4.4.6.4 ต้องมีการรังวัดสภาพโครงสร้างอุโมงค์ซ้ำตามช่วงเวลาที่กำหนดอย่างสม่ำเสมอ(periodic maintenance repetition survey) ซึ่งเป็นการรังวัดซ้ำโครงข่ายควบคุมระดับทางราบและทางตั้งของทางรถไฟความเร็วสูงอย่างละเอียด การรังวัดซ้ำต้องครอบคลุมโครงข่ายของ CP 0, CP I, CP II และโครงข่ายจุดฐานของเส้นทางตลอดทั้งเส้นทาง โดยมีข้อกำหนดสำหรับความถี่ในการทำการรังวัดซ้ำดังนี้
 - (1) เมื่อรับทราบการมอบหมายการปิกหมุด จากฝ่ายการก่อสร้างแล้ว ให้ดำเนินการรังวัดซ้ำสำหรับโครงข่าย CP I, CP II และจุดฐานของเส้นทาง

- (2) ก่อนการรับรองโครงการในสถานะคงที่ (static state) ให้ดำเนินการรังวัดซ้ำสำหรับโครงข่าย CP 0, CP I, CP II และจุดฐานของเส้นทาง

4.4.6.5 ฝ่ายการก่อสร้างต้องดำเนินการรังวัดสภาพโครงสร้างอุโมงค์ซ้ำเป็นกรณี (non-periodic maintenance repetition survey) ตามความต้องการของการก่อสร้าง วงรอบของการรังวัดซ้ำต้องไม่เกิน 6 เดือน การรังวัดซ้ำต้องครอบคลุมโครงข่าย CP I, CP II และความแน่นอนของหมุดควบคุมรวมถึงจุดฐานของเส้นทาง และต้องตรวจสอบการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของหมุดควบคุม หากการเบี่ยงเบนระหว่างการรังวัดเดิมและการรังวัดซ้ำเกินค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ สาเหตุต้องได้รับการระบุและยืนยันโดยที่ปรึกษาและผู้ที่เกี่ยวข้องในการรังวัด

4.4.6.6 การรังวัดซ้ำของโครงข่ายควบคุมต้องปฏิบัติตามหลักการดังต่อไปนี้

- (1) ต้องมีการเตรียมแผนงานทางเทคนิคสำหรับการรังวัดซ้ำ
- (2) วิธีการและค่าความถูกต้องของการรังวัดซ้ำต้องตรงกับการรังวัดเดิม
- (3) ความสมบูรณ์ของจุดตั้งต้องได้รับการตรวจสอบก่อนการรังวัดซ้ำ หากจุดตั้งหายไปหรือเสียหาย ต้องมีการปรับแก้ด้วยวิธีการขยายขอบเขตให้เหมาะสมกับระดับค่าความถูกต้อง

4.4.6.7 การรังวัดซ้ำสำหรับ CP 0 ต้องดำเนินการตามข้อกำหนดที่ระบุไว้ในหัวข้อที่ 4.2.2.12

4.4.6.8 ค่าความถูกต้องและข้อกำหนดทางเทคนิคอื่น ๆ สำหรับการรังวัดซ้ำของหมุดควบคุม CP I และจุดฐานของเส้นทางต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดที่ระบุไว้ในข้อกำหนดทั่วไปการรังวัดควบคุมในหัวข้อที่ 4.2.1 การรังวัดโครงข่ายควบคุมทางราบ (CP I) ในหัวข้อที่ 4.2.3 หัวข้อที่ 4.2.4 และการทำระดับจุดอ้างอิงของเส้นทางในหัวข้อที่ 4.3.5 ความคลาดเคลื่อนในผลลัพธ์ระหว่างการรังวัดเดิมและการรังวัดซ้ำต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดดังนี้

- (1) หากวิธีการรังวัดด้วย GNSS ถูกนำมาใช้ในการรังวัดซ้ำของ CP I และหมุดควบคุม CP I ความคลาดเคลื่อนระหว่างการรังวัดเดิมและการรังวัดซ้ำต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดในตารางที่ 26 และตารางที่ 27

ตารางที่ 26 ความคลาดเคลื่อนของพิกัดระหว่างการรังวัดซ้ำและการรังวัดเดิมของหมุดควบคุม CP I และ CP II (ที่มา “TB 10601-2009”)

ประเภทของหมุดควบคุม	ความคลาดเคลื่อนของพิกัด (mm)
CP I	20
CP II	15

หมายเหตุ: ความคลาดเคลื่อนของพิกัดในตารางนี้หมายถึงความคลาดเคลื่อนในส่วนอง X และ Y

ตารางที่ 27 ค่าความถูกต้องสัมพัทธ์ของความคลาดเคลื่อนของการวัดซ้ำจากจุดเริ่มต้นและการรังวัดซ้ำใน
ความคลาดเคลื่อนของพิกัดระหว่างจุดที่อยู่ติดกันในการรังวัดด้วย GNSS (ที่มา “TB 10601-2009”)

มาตรฐานงานสำรวจ โครงการควบคุม	ค่าความถูกต้องสัมพัทธ์ของความคลาดเคลื่อนของการวัดซ้ำจากจุดเริ่มต้นและการรังวัดซ้ำใน ความคลาดเคลื่อนของพิกัดระหว่างจุดที่อยู่ติดกัน
CP I	1/130000
CP II	1/80000

หมายเหตุ: ค่าความถูกต้องสัมพัทธ์ของความคลาดเคลื่อนของการวัดซ้ำจากจุดเริ่มต้นและการรังวัดซ้ำในความคลาดเคลื่อน
ของพิกัดระหว่างจุดที่อยู่ติดกันในตารางนี้ให้ตามภาคผนวก ข สมการที่ ข.1

- (2) หากใช้วิธีการทำวงรอบสำหรับการรังวัดซ้ำของหมุดควบคุม CP II
ความคลาดเคลื่อนของมุมทางราบ ความยาวระหว่างกล้องถึงเป้า
สะท้อน และพิกัดต้องเป็นไปตามข้อกำหนดที่ระบุในตารางที่ 28

ตารางที่ 28 ความคลาดเคลื่อนของความคลาดเคลื่อนของการวัดซ้ำจากจุดเริ่มต้นในการทำวงรอบ
(ที่มา “TB 10601-2009”)

โครงการ ควบคุม	มาตรฐานงาน สำรวจ	การคลาดเคลื่อนของมุม ทางราบ (")	การคลาดเคลื่อนของ ความยาวระหว่างกล้องถึง เป้าสะท้อน (mm)	การคลาดเคลื่อนของ พิกัด (mm)
CP II	ชั้นงานที่ 3	3.6	2m _D	15
CP II	ชั้นงานที่ 2 สำหรับอุโมงค์	2.6	2m _D	15

หมายเหตุ: m_D หมายถึง ค่าความถูกต้องที่เป็นมาตรฐานของเครื่องมือ

- (3) หากความยาวของการทำวงรอบที่เชื่อมต่อ CP II ภายในอุโมงค์เกิน
7 km ระเบียบการทำวงรอบต้องเป็นระเบียบชั้นงานที่ 2 สำหรับ
อุโมงค์
- (4) ความคลาดเคลื่อนของความคลาดเคลื่อนของการวัดซ้ำจาก
จุดเริ่มต้นและการรังวัดซ้ำของจุดเกณฑ์ต้องเป็นไปตามข้อกำหนด
ที่ระบุในตารางที่ 14
- (5) ความคลาดเคลื่อนของการวัดซ้ำจากจุดเริ่มต้นและการรังวัดซ้ำต้อง
เป็นไปตามข้อกำหนด ผลลัพธ์เริ่มต้นต้องได้รับการยอมรับ หาก
ความคลาดเคลื่อนอยู่นอกขอบเขตที่ยอมรับได้ ต้องทำการรังวัดซ้ำ
ครั้งที่สองเพื่อหาสาเหตุ ผลลัพธ์ที่ได้ต้องได้รับการปรับปรุงโดยใช้
วิธีการวิเคราะห์ร่วมกับระดับค่าความถูกต้องที่เทียบเท่ากัน
ผลลัพธ์ใหม่ต้องถูกส่งให้แก่หน่วยงานที่ดูแลและผู้ออกแบบเพื่อการ
ยืนยัน

4.4.6.9 เมื่อเสร็จสิ้นการรังวัดซ้ำแล้ว ผลลัพธ์ต้องได้รับการวิเคราะห์และจัดทำ
รายงานผลการรังวัดซ้ำ รายงานผลการรังวัดซ้ำต้องรวมข้อมูลดังต่อไปนี้

- (1) หลักการของงานและมาตรฐานทางเทคนิค

- (2) วันที่ทำการรังวัด วิธีการรังวัด และข้อมูลเกี่ยวกับบุคลากรและอุปกรณ์
 - (3) สถานะและจำนวนหมุดควบคุมในการรังวัดซ้ำ การบันทึกข้อมูลการทำงานในสนาม และวิธีการประมวลผลข้อมูล
 - (4) การวิเคราะห์ทางสถิติค่าความถูกต้องในการรังวัดซ้ำ
 - (4.1) สถิติของความคลาดเคลื่อนของวงรอบที่อิสระและเส้นฐานที่ทำซ้ำ
 - (4.2) ความผิดพลาดมาตรฐานของมุมจากแกนและความผิดพลาดสัมพัทธ์ของความยาวระหว่างกล้องถึงเป้าสะท้อนที่มีค่าความถูกต้องน้อยที่สุดหลังจากการปรับแบบอิสระและการปรับแบบบังคับของโครงข่าย GNSS
 - (4.3) สถิติของความผิดพลาดในมุมและความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของความยาวทั้งหมด และความผิดพลาดมาตรฐานของการรังวัด
 - (4.4) สถิติของการผิดพลาดจากการรังวัดสองครั้งการรังวัดระดับของแนวเส้นทางและความผิดพลาดของความแตกต่างของระดับที่เชื่อมต่อเส้นทางระดับ และความผิดพลาดมาตรฐานของความแตกต่างของระดับต่อกิโลเมตรในการรังวัดระดับของแนวเส้นทาง
 - (5) การวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างการรังวัดเริ่มต้นและการรังวัดซ้ำ
 - (5.1) ความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์พิกัดระหว่างการรังวัดเริ่มต้นและการรังวัดซ้ำในโครงข่ายควบคุมทางราบ
 - (5.2) การเปรียบเทียบค่าความถูกต้องสัมพัทธ์ของพิกัดระหว่างการรังวัดเริ่มต้นและการรังวัดซ้ำในโครงข่าย GNSS
 - (5.3) ความคลาดเคลื่อนในมุมทางราบและความยาวระหว่างกล้องถึงเป้าสะท้อนระหว่างการรังวัดซ้ำและการรังวัดเริ่มต้น
 - (5.4) ความคลาดเคลื่อนซ้ำซ้อนในระดับของความแตกต่างในระดับระหว่างจุดที่อยู่ติดกัน
 - (5.5) คำอธิบายที่จำเป็นเกี่ยวกับปัญหาอื่น ๆ และข้อสรุปจากการรังวัดซ้ำ
- 4.4.7 การเพิ่มจำนวนหมุดของโครงข่ายควบคุมงานก่อสร้าง
- 4.4.7.1 การเพิ่มความหนาแน่นของโครงข่ายควบคุมงานก่อสร้างสามารถทำได้ด้วยวิธีการที่มีมาตรฐานงานสำรวจเดียวกันหรือใช้มาตรฐานงานสำรวจต่ำกว่าของค่าความถูกต้องตามข้อกำหนดการก่อสร้าง ก่อนการเพิ่มความหนาแน่นต้องมีการออกแบบทางเทคนิคตามสถานการณ์จริง
 - 4.4.7.2 วิธีการรังวัดแบบวงรอบหรือ GNSS สามารถใช้สำหรับการเพิ่มความหนาแน่นของโครงข่ายควบคุมการก่อสร้าง การรังวัดการเพิ่มความหนาแน่นต้อง

เชื่อมโยงกับหมุดควบคุม CP I หรือ CP II ที่ใกล้เคียง และการปรับใช้ข้อมูล
ที่รู้เป็นค่าคงที่

4.4.7.3 หมุดควบคุมการเพิ่มความหนาแน่นต้องตั้งอยู่บนพื้นดินที่มั่นคงและมีความ
สะดวกในการทำงานการตั้งค่าที่ต้องได้รับการตั้งอยู่ในสถานที่ที่ไม่เสี่ยงต่อ
ความเสียหาย

4.4.7.4 หากใช้การรังวัดแบบวงรอบสำหรับการเพิ่มความหนาแน่น ความยาวของ
การทำวงรอบต้องอยู่ในช่วง 200 ถึง 400 m การรังวัดต้องดำเนินการตาม
ข้อกำหนดของค่าความถูกต้องของการทำวงรอบชั้นงานที่ 4

4.4.7.5 หากใช้การรังวัดด้วย GNSS สำหรับการเพิ่มความหนาแน่น การรังวัดต้อง
ดำเนินการตามข้อกำหนดค่าความถูกต้องสำหรับการรังวัดด้วย GNSS ชั้น
งานที่ 4 เส้นฐาน GNSS ต้องไม่น้อยกว่า 300 m

4.4.7.6 การรังวัดสำหรับการเพิ่มความหนาแน่นของโครงข่ายควบคุมทางดิ่งต้อง
เริ่มต้นและสิ้นสุดที่จุดอ้างอิงการเดินทาง การรังวัดต้องดำเนินการโดยใช้
วิธีการขยายที่มีมาตรฐานงานสำรวจค่าความถูกต้องที่สอดคล้องและตาม
ข้อกำหนดการทำการระดับชั้นงานที่ 2

4.4.7.7 เมื่อเสร็จสิ้นการเพิ่มความหนาแน่นของโครงข่ายควบคุมการก่อสร้าง
รายการที่ต้องส่งมอบต้องรวมถึง

- (1) เอกสารการออกแบบทางเทคนิค
- (2) ผลลัพธ์ของการรังวัดการเพิ่มความหนาแน่น
- (3) ข้อมูลการรังวัดในสนาม
- (4) ข้อมูลการคำนวณการปรับแก้
- (5) รายงานทางเทคนิคเกี่ยวกับการรังวัดการหนาแน่น

4.4.8 การรังวัดความต่อเนื่องของแนวเส้นทาง

4.4.8.1 เมื่อการจัดทำรางเสร็จสิ้น และก่อนการก่อสร้างราง ต้องทำการรังวัดความ
ต่อเนื่องของแนวกึ่งกลางเส้นทาง เพื่อให้แน่ใจว่าได้ตรวจสอบสภาพตัดตาม
ขวางและทางดิ่งของการจัดทำราง เพื่อให้มั่นใจว่าเป็นไปตามที่ได้ออกแบบ
ไว้ การรังวัดนี้ต้องครอบคลุมการรังวัดความต่อเนื่องของจุดอ้างอิงเส้นทาง
และการรังวัดการยอมรับของแนวกึ่งกลางเส้นทางและการรังวัดหน้า
ตัดขวาง (transverse sectioning)

4.4.8.2 การรังวัดความต่อเนื่องของจุดอ้างอิงเส้นทางต้องดำเนินการสำหรับเส้นทาง
ทั้งหมด ตามข้อกำหนดการตั้งระดับชั้นงานที่ 2

4.4.8.3 การรังวัดความต่อเนื่องของแนวกึ่งกลางเส้นทางต้องดำเนินการโดยใช้
เส้นทางด้านซ้ายเป็นการอ้างอิง และต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) การรังวัดความต่อเนื่องของแนวกึ่งกลางเส้นทางต้องปฏิบัติตาม
ข้อกำหนดสำหรับการประเมินสภาพการวางราง หลักกิโลเมตรและ
เครื่องหมายร้อยเมตรต้องถูกตั้งไว้ที่แนวกึ่งกลางเส้นทาง ระยะห่าง
ของหมุดแนวกึ่งกลางเส้นทางในส่วนที่ตรงต้องไม่เกิน 50 m และ
ในส่วนที่โค้งต้องไม่เกิน 20 m ต้องตั้งหมุดเพิ่มเติมที่จุดเริ่มต้นและ

- จุดสิ้นสุดของโค้ง จุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความชัน จุดเริ่มต้นและสิ้นสุดของโค้งทางดิ่ง จุดกึ่งกลางของรางเชื่อมต่อระหว่างทางคู่ (crossover center) จุดที่แนวกึ่งกลางท่อระบายน้ำ จุดที่แนวกึ่งกลางสะพานจุดที่แนวกึ่งกลางอุโมงค์ จุดสับราง และที่จุดเริ่มต้นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่และจุดสิ้นสุดของโครงสร้างกันดิน
- (2) ความสูงของหมุดควบคุมต้องดำเนินการโดยใช้การวัดการรังวัดที่ถูกต้องตามข้อกำหนดที่ระบุไว้เป็นจุดอ้างอิง ความคลาดเคลื่อนของความสูงมีค่าความคลาดเคลื่อน ± 10 mm

4.4.8.4 การรังวัดการยอมรับหน้าตัดขวางตามแนวเส้นทาง การรังวัดการยอมรับหน้าตัดขวางตามแนวเส้นทางต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดที่ระบุไว้ดังนี้

- (1) หมุดแนวกึ่งกลางที่ตั้งไว้ในทางรังวัดการเชื่อมต่อของเส้นทางแนวกึ่งกลางต้องใช้ในการรังวัดวงรอบของชั้นดิน สะพาน และอุโมงค์ ตำแหน่งและความหนาแน่นของส่วนวงรอบต้องเหมือนกับที่ตั้งของหมุดแนวกึ่งกลางของเส้นทาง
- (2) เครื่องมือการรังวัด เช่น กล้องระดับ หรือกล้องสำรวจแบบประมวลผลรวมต้องใช้ในการรังวัดวงรอบของชั้นดิน การรังวัดส่วนวงรอบของชั้นดินต้องรวมถึงจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความสูงของพื้นผิวชั้นดิน และจุดที่ไหลของพื้นที่ การรังวัดในทางราบและทางดิ่งของพื้นที่สำรวจทั้งหมดต้องไม่มีข้อผิดพลาดมากกว่า ± 10 mm
- (3) วิธีการและข้อกำหนดค่าความถูกต้องของการรังวัดการยอมรับสำหรับส่วนวงรอบของชั้นดินต้องใช้ข้อกำหนดเดียวกันกับการรังวัดพื้นผิวสะพาน จุดสำรวจของพื้นผิวสะพานต้องรวมถึงแนวเส้นทางของรางทั้งขวาและซ้าย แนวสะพาน และจุดสูงสุดและต่ำสุดของรั้วสะพาน
- (4) กล้องสำรวจแบบประมวลผลรวมหรือเครื่องมือสำรวจที่มีค่าความถูกต้องในการวัดระยะทางไม่เกิน 5 mm + 2 ppm ต้องใช้ในการรังวัดการยอมรับของส่วนวงรอบอุโมงค์ ข้อผิดพลาดของจุดสำรวจส่วนวงรอบต้องไม่เกิน 10 mm ส่วนวงรอบของอุโมงค์ต้องรวมถึงแนวของรางทั้งด้านขวาและด้านซ้าย แนวอุโมงค์ ร่องสายไฟฟ้า ปล่องด้านใน สปริงไลน์ และจุดที่สูง 1 m, 3 m และ 5.8 m เหนือราง

4.4.8.5 ผลลัพธ์จากการรังวัดการยอมรับของเส้นทางแนวกึ่งกลางและส่วนวงรอบต้องใช้ในการประเมินการปฏิบัติตามข้อกำหนดขีดจำกัดขอบเขตสำหรับชั้นดิน สะพาน และอุโมงค์ การออกแบบภาพตัดในทางราบและทางดิ่งต้องมีการปรับปรุงหากจำเป็นเพื่อให้สอดคล้องกับการวางรางในงานก่อสร้างงานราง

4.5 การรังวัดการก่อสร้างอุโมงค์

การรังวัดอุโมงค์ถือเป็นกระบวนการสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อความถูกต้อง ความปลอดภัย และความสำเร็จของโครงการก่อสร้างทางรถไฟความเร็วสูง โดยกำหนดแนวทางอย่างเป็นระบบตั้งแต่การวางแผน การรังวัดเบื้องต้น การรังวัดแนวเส้นทาง การควบคุมทั้งภายนอกและภายในอุโมงค์ การตั้งแนวสำหรับก่อสร้าง การตรวจสอบข้อผิดพลาดในการเจาะทะลุ และการรังวัดเพื่อรับรองคุณภาพหลังการก่อสร้าง

4.5.1 ข้อกำหนดทั่วไปการรังวัดอุโมงค์

4.5.1.1 การเลือกวิธีการรังวัดทางราบสำหรับการควบคุมอุโมงค์ต้องพิจารณาปัจจัยดังต่อไปนี้ ความยาวของอุโมงค์ รูปร่างอุโมงค์ ตำแหน่งของอุโมงค์เสริมสภาพภูมิประเทศในพื้นที่ที่อุโมงค์ผ่าน และเงื่อนไขด้านสิ่งแวดล้อม วิธีที่สามารถใช้ได้ เช่น การรังวัดด้วย GNSS การรังวัดโดยการเดินเส้นทาง และการรังวัดโครงข่ายสามเหลี่ยม หรือการผสมผสานของวิธีเหล่านี้สามารถใช้ได้ สำหรับการรังวัดทางตั้ง สามารถใช้การวัดระดับหรือการวัดความสูงโดยใช้การทำระดับทางตรีโกณมิติด้วย EDM

4.5.1.2 ระบบพิกัดวิศกรรม (universal transverse mercator หรือ UTM) สำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ ความสูงเฉลี่ยของอุโมงค์ต้องถือเป็นความสูงในระนาบของหน้าตัดอุโมงค์และความยาวของแนวกึ่งกลางอุโมงค์ต้องถือเป็นเส้นเมริเดียนแนวกึ่งกลางของการฉาย เส้นทแยงยาวของอุโมงค์หรือทแยงมุมของอุโมงค์โค้งต้องถือเป็นแกนของระบบพิกัดวิศกรรม แกนพิกัดต้องตั้งให้ตรงกับการก่อสร้างอุโมงค์และระบบพิกัดทางตั้งของการก่อสร้างอุโมงค์ต้องเหมือนกับเส้นทางของราง

4.5.1.3 การควบคุมพื้นที่นอกอุโมงค์ต้องเสร็จสิ้นก่อนที่ต้องเริ่มงานขุดเจาะ

4.5.1.4 หากการขุดอุโมงค์ดำเนินการจากทั้งสองปลาย ข้อผิดพลาดทางทางราบและทางตั้งของการควบคุมแนวทางของตัวอุโมงค์และการก่อสร้างหลังจากการเจาะทะลุต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในตารางที่ 29

4.5.1.5 หากความยาวของอุโมงค์มากกว่าหรือเท่ากับ 1,500 m ระบบควบคุมทางราบต้องออกแบบตามข้อผิดพลาดการเจาะทะลุอุโมงค์ ผลกระทบจากการรังวัดอุโมงค์ภายนอกต่อข้อผิดพลาดการเจาะทะลุต้องถูกประมาณเพื่อใช้ในการออกแบบการรังวัดควบคุมภายในอุโมงค์ หากความยาวของเส้นทางการทำงานระดับยาวเกิน 5,000 m ระบบควบคุมทางตั้งต้องออกแบบตามข้อผิดพลาดการเจาะทะลุทางตั้ง

4.5.1.6 การเชื่อมโยงของระบบควบคุมทางราบจากภายนอกอุโมงค์ไปยังระบบควบคุมแนวทางของเส้นทางต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังนี้

- (1) หากค่าความถูกต้องของระบบควบคุมทางราบของเส้นทาง เช่น CP I และ CP II เป็นต้น ตรงตามข้อกำหนดสำหรับการรังวัดระบบควบคุมทางราบของอุโมงค์ ระบบควบคุมทางราบของอุโมงค์ต้อง

- จัดตั้งผ่านการขยายและเพิ่มความหนาแน่นของระบบควบคุมทางราบของเส้นทาง
- (2) หากค่าความถูกต้องของระบบควบคุมทางราบของเส้นทางไม่ตรงตามข้อกำหนดสำหรับการรังวัดระบบควบคุมทางราบของอุโมงค์ ต้องจัดตั้งระบบควบคุมทางราบอิสระสำหรับอุโมงค์ ซึ่งต้องเชื่อมโยงกับระบบควบคุมทางราบของเส้นทาง
- (3) ระบบสำรวจทางราบภายนอกอุโมงค์ต้องเริ่มจากหมุดควบคุมเส้นทางที่จุดเริ่มต้นของอุโมงค์และสิ้นสุดที่หมุดควบคุมเส้นทางที่จุดสิ้นสุด

4.5.1.7 หากจุด CP I หรือ CP II ที่ปลายทั้งสองของอุโมงค์ไม่อยู่ในเขตเดียวกันของแผนผังการก่อสร้างอุโมงค์ สามารถจัดตั้งระบบควบคุมอิสระสำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ได้

ตารางที่ 29 ข้อกำหนดสำหรับความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่ยอมรับได้หลังจากการเจาะทะลุ
(ที่มา “TB 10601-2009”)

รายการ	ข้อผิดพลาดในการทำรอบหลังจากการเจาะทะลุ							ความคลาดเคลื่อน ในทางตั้ง หลังการ เจาะทะลุ
ความยาวในการขุด (km)	L<4	4≤L<7	7≤L<10	10≤L<13	13≤L<16	16≤L<19	19≤L<20	
ความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่ยอมรับได้หลังจากเจาะทะลุของหมุดภายนอกอุโมงค์ (mm)	30	40	45	55	65	75	80	18
ความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่ยอมรับได้หลังจากเจาะทะลุของหมุดภายในอุโมงค์ (mm)	40	50	65	80	105	135	160	17
ความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่ยอมรับได้หลังจากเจาะทะลุ โดยพิจารณาคลาดเคลื่อนของหมุดภายในและภายนอกอุโมงค์ร่วมกัน (mm)	50	65	80	100	125	160	180	25
ความคลาดเคลื่อนระหว่างการเจาะเทียบกับกรอบแบบ (mm)	100	130	100	200	250	320	360	50

หมายเหตุ:

1. ตารางนี้ไม่สามารถใช้กับการเจาะทางอุโมงค์ในทางตั้งได้
2. หากความยาวการขุดเกิน 20 km ต้องออกแบบพิเศษ

4.5.2 การวางแผนการสำรวจ

4.5.2.1 ในระยะแรกของการรังวัด การรังวัดและการทำแผนที่ต้องดำเนินการสำหรับอุโมงค์สำคัญ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญต่อแนวเส้นทาง ตามข้อกำหนดการออกแบบเฉพาะ

4.5.2.2 การรังวัดเบื้องต้นของอุโมงค์สำคัญต้องดำเนินการตามข้อกำหนดของหมวดควบคุมทางราบและทางดิ่งของการรังวัดเบื้องต้นของเส้นทาง หากหมวดควบคุมดังกล่าวไม่เป็นไปตามข้อกำหนดสำหรับการรังวัดเบื้องต้นของอุโมงค์ ต้องมีการจัดตั้งหมวดควบคุมทางราบและทางดิ่งเพิ่มเติมที่ทางเข้าหรือทางออกของอุโมงค์ และที่บริเวณปล่องตามข้อกำหนด หมวดควบคุมเพิ่มเติมเหล่านี้ต้องกลายเป็นส่วนหนึ่งของโครงข่ายหมวดควบคุมทางราบและทางดิ่งของเส้นทาง

4.5.2.3 การรังวัดอุโมงค์สำคัญต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) แนวกึ่งกลางเส้นทางใกล้ปากอุโมงค์ต้องตั้งออกไป และต้องทำแผนที่ภาพตัดทางดิ่งใกล้ปากอุโมงค์ ข้อกำหนดค่าความถูกต้องของการรังวัดแนวกึ่งกลางเส้นทางต้องปรับใช้ในการรังวัด
- (2) ส่วนตัดระนาบของอุโมงค์ต้องถูกวัดและทำแผนที่ตามข้อกำหนดของการออกแบบเฉพาะ ส่วนตัดระนาบต้องหันหน้าไปในทิศทางที่เหมาะสมที่ทางเข้าอุโมงค์
- (3) แผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1:500 บริเวณทางเข้าและทางออกของอุโมงค์ รวมถึงแผนที่สำหรับงานปรับเปลี่ยน เช่น คูน้ำ ทางหลวง และถนน เป็นต้น และงานอื่น ๆ เช่น การถมและบำบัดของเสีย ต้องดำเนินการโดยใช้วิธีการถ่ายภาพทางอากาศ การทำแผนที่ดิจิทัลด้วยกล้องสำรวจแบบประมวลผลรวมและการทำแผนที่ด้วยระบบ GNSS RTK โดยเนื้อหาของการรังวัดและค่าความถูกต้องที่ต้องการต้องเป็นไปตามข้อกำหนด

4.5.3 การรังวัดแนวเส้นทาง

4.5.3.1 แนวกึ่งกลางและภาพตัดทางดิ่งของบริเวณทางเข้าและทางออกของอุโมงค์ต้องถูกตั้งค่าหรือตรวจวัดพร้อมกับการตั้งแนวกึ่งกลางของเส้นทาง และต้องเป็นไปตามแผนการออกแบบเส้นทาง โดยการปักหมุดต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) ระยะห่างของหมุดแนวกึ่งกลางในพื้นที่เปิดของอุโมงค์ต้องไม่เกิน 5 m ช่วงระยะปักหมุดต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดของการออกแบบทางเข้าอุโมงค์ โดยทั่วไปต้องอยู่ในช่วงตั้งแต่ 30 m ด้านหน้าของทางเข้าอุโมงค์ถึงประมาณ 10 ถึง 20 m ด้านนอกของรางน้ำด้านบนของทางลาดด้านหน้า โดยต้องเพิ่มหมุดในบริเวณส่วนบนสุดของอุโมงค์เพื่อให้เพียงพอการตรวจสอบเฉพาะทาง

- (2) ค่าความถูกต้องของการตั้งค่าหมุดแนวกึ่งกลางที่บริเวณทางเข้าอุโมงค์ต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดของค่าความถูกต้องในการรังวัดแนวกึ่งกลาง

4.5.3.2 ภาพตัดขวางของบริเวณทางเข้าอุโมงค์ต้องถูกวัดและเขียนแผนที่ตามความต้องการในการออกแบบอุโมงค์ โดยการตัดระนาบต้องหันเข้าหาทางเข้าอุโมงค์ โดยมีภาพตัดขวางทุก ๆ ระยะ 5 m และต้องถูกวัดรวมถึงการเขียนแผนที่ สำหรับความกว้างของการรังวัดโดยทั่วไปต้องครอบคลุมถึงยอดของลาดข้าง หรือ 10 ถึง 15 m ด้านนอกของจุดปลายลาดด้านข้าง ค่าความถูกต้องต้องเป็นไปตามข้อกำหนดสำหรับการตัดระนาบตามที่ระบุไว้

4.5.3.3 มาตรฐานของภาพตัดในทางดิ่งตามแนวเส้นทางของอุโมงค์ต้องกำหนดให้เป็นไปตามข้อกำหนดการออกแบบ โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 1:200 ถึง 1:5000 ช่วงระยะของภาพตัดในทางดิ่งตามแนวเส้นทางต้องครอบคลุมระยะทาง 500 m ก่อนถึงทางเข้าอุโมงค์ การทำแผนที่สามารถดำเนินการได้ด้วยการรังวัดภาคสนามหรือการเขียนแผนที่โดยใช้แผนที่มาตราส่วนไม่เกิน 1:2000

4.5.3.4 สำหรับอุโมงค์บนภูเขาที่มีน้ำหนักรกดทับจากชั้นดินน้อย หรืออุโมงค์ตื้น การรังวัดภาพตัดทางดิ่งของอุโมงค์และภาพตัดขวางของตัวอุโมงค์ต้องดำเนินการในภาคสนามตามความต้องการของการออกแบบ

4.5.3.5 หากต้องใช้แผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1:500 จากการรังวัดเบื้องต้น ต้องมีการดำเนินการตรวจสอบในภาคสนาม รวมถึงการแก้ไขที่จำเป็นและการรังวัดเพิ่มเติมหากจำเป็น หากยังไม่มีโครงสร้างแผนที่ภูมิประเทศจากการรังวัดเบื้องต้น แผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1:500 ต้องจัดทำขึ้นสำหรับบริเวณทางเข้าและทางออกของอุโมงค์ บริเวณเปิดของอุโมงค์เสริม และบริเวณช่องเปิดสำหรับระบายอากาศ ค่าความถูกต้องของการรังวัดภูมิประเทศต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดสำหรับการรังวัดภูมิประเทศที่ระบุไว้หัวข้อที่ 4.4

4.5.4 การรังวัดควบคุมภายนอกอุโมงค์

4.5.4.1 การออกแบบโครงข่ายควบคุมต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) ในการออกแบบโครงข่ายควบคุมทางราบ การประมาณค่าความถูกต้องที่ต้องการต้องคำนึงถึงทั้งผลกระทบต่อข้อผิดพลาดในการเจาะทะลุแนวระนาบและสภาพจริงของการวางโครงข่าย
- (2) ในการออกแบบโครงข่ายควบคุมทางดิ่ง การประมาณค่าความถูกต้องที่ต้องการต้องคำนึงถึงความยาวของเส้นทางทำระดับทั้งภายนอกและภายในอุโมงค์ และผลกระทบต่อข้อผิดพลาดในการเจาะทะลุทางดิ่ง องค์ประกอบของการออกแบบของการรังวัดควบคุมภายนอกอุโมงค์ต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดที่ระบุไว้ในตารางที่ 30 และ ตารางที่ 31

ตารางที่ 30 องค์ประกอบการออกแบบของการรังวัดควบคุมทางราบ (ที่มา “TB 10601-2009”)

การรังวัด	วิธีการรังวัด	มาตรฐานงานสำรวจ	ระยะทางที่ใช้ในการรังวัด (km)	ข้อผิดพลาดมาตรฐานของทิศทาง (จุดเชื่อมต่อใกล้ทางเข้าอุโมงค์)	ข้อผิดพลาดมาตรฐานของมุมที่รังวัด (")	ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานสัมพัทธ์ของความยาวด้าน
ภายนอกอุโมงค์	การรังวัดด้วย GNSS	ชั้นงานที่ 1	6 ถึง 20	1.0		1/250000
		ชั้นงานที่ 2	4 ถึง 6	1.3		1/180000
		ชั้นงานที่ 3	< 4	1.7		1/100000
	การทำวงรอบ	ชั้นงานที่ 2	8 ถึง 20		1.0	1/200000
			6 ถึง 8			1/100000
		ชั้นงานที่ 3	4 ถึง 6		1.8	1/80000
	การรังวัดโครงข่ายสามเหลี่ยม	ชั้นงานที่ 4	1.5 ถึง 4		2.5	1/50000
		ชั้นงานที่ 2	8 ถึง 20		1.0	1/200000
			6 ถึง 8			1/150000
		ชั้นงานที่ 3	4 ถึง 6		1.8	1/100000
		ชั้นงานที่ 4	1.5 ถึง 4		2.5	1/50000
ภายในอุโมงค์	การทำวงรอบ	ชั้นงานที่ 2	9 ถึง 20		1.0	1/100000
		ชั้นงานที่ 2	6 ถึง 9		1.3	1/100000
		ชั้นงานที่ 3	3 ถึง 6		1.8	1/50000
		ชั้นงานที่ 4	1.5 ถึง 3		2.5	1/50000
		คลาส I	< 1.5		4.0	1/20000

ตารางที่ 31 องค์ประกอบการออกแบบของการรังวัดควบคุมทางตั้ง (ที่มา “TB 10601-2009”)

ส่วนของการรังวัด	มาตรฐานงานสำรวจ	ความยาวของเส้นทางทำระดับระหว่างปลายการขุดทั้งสองด้านของอุโมงค์ (km)	ข้อผิดพลาดมาตรฐานสัมพัทธ์ต่อกิโลเมตรของการรังวัดทางตั้ง (m)
ภายนอกอุโมงค์	ชั้นงานที่ 2	> 36	≤ 1.0
	ชั้นงานที่ 3	13 ถึง 36	≤ 3.0
	ชั้นงานที่ 4	5 ถึง 13	≤ 5.0
	ชั้นงานที่ 5	< 5	≤ 7.5
ภายในอุโมงค์	ชั้นงานที่ 2	> 32	≤ 1.0
	ชั้นงานที่ 3	11 ถึง 32	≤ 3.0
	ชั้นงานที่ 4	5 ถึง 11	≤ 5.0
	ชั้นงานที่ 5	< 5	≤ 7.5

4.5.4.2 ข้อผิดพลาดในการเจาะทะลุแนวระนาบที่เกิดจากอิทธิพลของข้อผิดพลาดจากการรังวัดควบคุมด้วย GNSS สามารถประมาณได้ด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

- (1) ก่อนเริ่มการรังวัดควบคุม การประมาณข้อผิดพลาดแนวระนาบล่วงหน้าของการออกแบบสำรวจต้องสามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่แสดงในภาคผนวก ข สมการที่ ข.2

4.5.4.3 ข้อผิดพลาดในการเจาะทะลุแนวระนาบที่เกิดจากอิทธิพลของข้อผิดพลาดจากการรังวัดการเดินระดับหรือการรังวัดโครงข่ายสามเหลี่ยมสามารถประมาณได้โดยใช้วิธีการดังต่อไปนี้

- (1) ก่อนเริ่มการรังวัดควบคุม การประมาณข้อผิดพลาดแนวระนาบล่องหน้าของการออกแบบสำรวจสามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่แสดงในภาคผนวก ข สมการที่ ข.2
- (2) เมื่อการรังวัดควบคุมเสร็จสิ้น ข้อผิดพลาดแนวระนาบหลังการรังวัดต้องได้จากการคำนวณจากสมการที่แสดงในภาคผนวก ข สมการที่ ข.3 และต้องเป็นไปตามข้อกำหนดที่ระบุไว้ในตารางที่ 29

4.5.4.4 ค่าความคลาดเคลื่อนในการทำรอบสำหรับการเจาะทะลุอุโมงค์ที่เกิดจากความผิดพลาดจากการทำวงรอบหรือการรังวัดด้วยโครงข่ายสามเหลี่ยมสามารถประมาณค่าด้วยวิธีดังนี้

- (1) ก่อนเริ่มการรังวัดค่าความคลาดเคลื่อนในการทำรอบในการออกแบบสำหรับการเจาะทะลุ สามารถประมาณด้วยสมการที่แสดงในภาคผนวก ข สมการที่ ข.4
- (2) เมื่อการรังวัดแล้วเสร็จ ความคลาดเคลื่อนวงรอบในการเจาะทะลุสามารถประมาณค่าด้วยสมการที่แสดงในภาคผนวก ข สมการที่ ข.3

4.5.4.5 หากใช้โครงข่ายสามเหลี่ยมและการปรับแก้ทำในลักษณะมีเงื่อนไขข้อผิดพลาดแนวระนาบหลังการรังวัดที่เกิดจากอิทธิพลของข้อผิดพลาดในการรังวัดควบคุมต้องสามารถคำนวณได้โดยสมการที่แสดงในภาคผนวก ข สมการที่ ข.7

4.5.4.6 ข้อผิดพลาดแนวทะลุในทางดิ่งที่เกิดจากข้อผิดพลาดของการรังวัดควบคุมทางดิ่งภายในหรือภายนอกอุโมงค์สามารถคำนวณได้โดยสมการที่แสดงในภาคผนวก ข สมการที่ ข.11

4.5.4.7 การวางโครงข่ายควบคุมภายนอกอุโมงค์ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) โครงข่ายควบคุมทางราบภายนอกอุโมงค์ต้องตามทิศทางของอุโมงค์และสร้างเป็นโครงสร้างแบบรูปหลายเหลี่ยมเพื่อให้สามารถตรวจสอบการปิดวงรอบ
- (2) หมดควบคุมต้องตั้งอยู่ในตำแหน่งที่มีทัศนวิสัยกว้าง มีการมองเห็นที่ดี ดินมีความมั่นคง และมีความเสี่ยงต่อความเสียหายต่อหมุดน้อยที่สุด
- (3) แนวสายตาต้องอยู่ห่างจากสิ่งกีดขวางในแนวระนาบอย่างน้อย 1 m และระดับความสูงของแนวสายตาต้องเพิ่มขึ้น
- (4) หมดควบคุมแนวกึ่งกลางและจุด CP I และ CP II ที่ทางเข้าและทางออกของอุโมงค์ต้องรวมอยู่ในโครงข่ายควบคุมของอุโมงค์

4.5.4.8 การจัดตั้งและจัดวางหมุดควบคุมที่ทางเข้าอุโมงค์ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) ที่แต่ละทางเข้าอุโมงค์ ต้องมีหมุดควบคุมทางราบไม่น้อยกว่าสามจุด และต้องมีหมุดฐานงานระดับ ไม่น้อยกว่า 2 จุด
- (2) ความยาวของเส้นเชื่อมระหว่างภายนอกอุโมงค์และภายในอุโมงค์ สำหรับการถ่ายโอนพิกัดต้องไม่น้อยกว่า 500 m
- (3) หมุดควบคุมทางราบที่ทางเข้าอุโมงค์ต้องจัดวางในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อให้การเดินระดับสามารถถ่ายเข้าไปในอุโมงค์ได้ง่าย
- (4) มุมเอียงสูงสุดหรือมุมลาดของด้านที่เชื่อมระหว่างภายนอกและภายในอุโมงค์ต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดในกรณีของโครงข่ายควบคุมภายนอกด้วย GNSS มุมเอียงหรือมุมลดลงของด้านที่เชื่อมต่อภายในโครงข่ายควบคุมต้องไม่เกิน 5° และในกรณีของการรังวัดเดินระดับและโครงข่ายสามเหลี่ยมภายนอก มุมดังกล่าวต้องไม่เกิน 15°
- (5) หมุดควบคุม GNSS ที่บริเวณทางเข้าอุโมงค์ต้องจัดตั้งเพื่ออำนวยความสะดวกในการใช้วิธีการทั่วไปสำหรับการตรวจสอบ เพิ่มความหนาแน่น และการปรับแก้หมุดควบคุม รวมถึงการนำทางการรังวัดเข้าสู่อุโมงค์ การมองเห็นระหว่างหมุดควบคุมในโครงข่ายย่อยที่ทางเข้าอุโมงค์ต้องถูกเพิ่มให้สูงสุด
- (6) หมุดฐานงานระดับ ใกล้ทางเข้าอุโมงค์ต้องมีระดับเดียวกับระดับพื้นดินของทางเข้าอุโมงค์ ความแตกต่างของความสูงระหว่างหมุดฐานงานระดับสองจุดต้องอยู่ในช่วงที่ครอบคลุมได้โดยต้องทำระดับ 1 ถึง 2 รอบ

4.5.4.9 หากมีการเพิ่มหมุดควบคุมใหม่บนพื้นฐานของหมุดควบคุมเดิม ต้องดำเนินการรังวัดเพื่อตรวจสอบหมุดควบคุมเดิม ค่าความถูกต้องของการรังวัดตรวจสอบต้องไม่ต่ำกว่าค่าความถูกต้องของการรังวัดเดิม ความคลาดเคลื่อนระหว่างการรังวัดตรวจสอบและการรังวัดเดิมต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดที่ระบุไว้ดังนี้

- (1) ค่าความคลาดเคลื่อนของมุมและความยาวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ภาคผนวก ข สมการที่ ข.12
- (2) หากมีการเพิ่มหมุดฐานงานระดับใหม่บนหมุดฐานงานระดับเดิม ต้องตรวจสอบความแตกต่างของความสูงระหว่างส่วนของการรังวัดที่อยู่ติดกัน หรือความแตกต่างของความสูงระหว่างหมุดฐานงานระดับที่อยู่ติดกัน ค่าความคลาดเคลื่อนของการตรวจสอบต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดที่ระบุไว้ในตารางที่ 14
- (3) ผลลัพธ์จากการรังวัดเดิมต้องถูกใช้หากความแตกต่างยังอยู่ในค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ หากความแตกต่างเกินค่าความคลาดเคลื่อน ต้องระบุสาเหตุ หากสาเหตุมาจากการเคลื่อนตัวต้อง

ตรวจสอบหมดควบคุมแบบระดับต่อระดับจนกว่าพบหมดควบคุมที่เสถียร

4.5.4.10 การรังวัดด้วย GNSS สำหรับการควบคุมทางราบภายนอกอุโมงค์ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) โครงข่ายควบคุม GNSS ต้องประกอบด้วยโครงข่ายย่อยที่บริเวณทางเข้าอุโมงค์ และโครงข่ายหลักที่เชื่อมต่อโครงข่ายย่อย โครงข่ายย่อยที่บริเวณทางเข้าอุโมงค์ต้องจัดตั้งในลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมทางจีโอเดติก โดยด้านเชื่อมโยงเข้าสู่อุโมงค์ต้องเป็นด้านที่รังวัดการณ์โดยตรง การรังวัดโครงข่ายเชื่อมต่อต้องดำเนินการในช่วงเวลาที่แตกต่างกันของวัน หากการรังวัดด้วย GNSS ในโครงข่ายย่อยที่ทางเข้าอุโมงค์ทำได้ยาก ด้านอ้างอิงหนึ่งด้านต้องถูกรังวัดด้วย GNSS และหมดควบคุมอื่น ๆ ในโครงข่ายย่อยสามารถวัดได้ด้วยกล้องสำรวจแบบประมวลผลรวม
- (2) ตำแหน่งต้นกำเนิดและจุดอ้างอิงแกน X ของระบบพิกัดวิศวกรรมต้องถูกรวมเข้ากับโครงข่าย GNSS โดยตรงเมื่อดำเนินการจัดตั้งโครงข่าย

4.5.4.11 การควบคุมด้วยการรังวัดเดินระดับภายนอกอุโมงค์ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดที่ระบุไว้

- (1) โครงข่ายเดินระดับต้องถูกออกแบบเป็นวงรอบหลายเหลี่ยม โดยแต่ละวงรอบต้องประกอบด้วย 4 ถึง 6 ด้าน
- (2) ในการกำหนดความยาวระหว่างกล้องถึงเป้าสะท้อนของวงรอบต้องพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความยาวของอุโมงค์ จำนวนและการกระจายของอุโมงค์เสริม สภาพภูมิประเทศ และระยะวัดของเครื่องมือ ต้องให้ความสำคัญกับด้านที่ยาวกว่า
- (3) โครงข่ายควบคุมต้องถูกรังวัดการณ์เมื่อการถ่ายภาพชัดเจนและเสถียร ในพื้นที่ที่สภาพภูมิประเทศและพื้นผิวซับซ้อน และการรังวัดอาจได้รับผลกระทบจากการหักเหแสงในแนวข้าง ต้องเลือกช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการรังวัด

4.5.4.12 การรังวัดโครงข่ายสามเหลี่ยมต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) โครงข่ายสามเหลี่ยมต้องถูกออกแบบเป็นโครงข่ายสามเหลี่ยมเชิงเส้นหรือสี่เหลี่ยมทางภูมิศาสตร์ โดยต้องใช้วิธีการรังวัดโครงข่ายหมดควบคุมทางราบงานสามเหลี่ยมสำหรับการรังวัด
- (2) ข้อกำหนดทางเทคนิคสำหรับการรังวัดโครงข่ายควบคุมต้องเป็นไปตามข้อกำหนดที่กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1.9

4.5.4.13 มาตรฐานงานสำรวจค่าความถูกต้องของการรังวัดควบคุมทางดิ่งภายนอกอุโมงค์ต้องถูกกำหนดตามข้อกำหนดที่ระบุไว้ในตารางที่ 31

4.5.4.14 ค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับการทำระดับในระดับต่าง ๆ ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในตารางที่ 14

4.5.4.15 ในพื้นที่ภูเขา หากจำนวนสถานีเฉลี่ยต่อกิโลเมตรเกิน 25 จุด ความแตกต่างของความสูงระหว่างการวัดครั้งแรกและครั้งที่สองต้องเป็นไปตามข้อกำหนดที่ระบุไว้ในตารางที่ 32

ตารางที่ 32 ค่าความคลาดเคลื่อนบรรจบของความแตกต่างของความสูงที่ยอมรับได้
(ที่มา “TB 10601-2009”)

มาตรฐานงานสำรวจและการทำระดับ	ค่าความคลาดเคลื่อนบรรจบของความแตกต่างความสูง (mm)
ชั้นงานที่ 2	$0.8\sqrt{n}$
ชั้นงานที่ 3	$2.4\sqrt{n}$
ชั้นงานที่ 4	$4.0\sqrt{n}$
ชั้นงานที่ 5	$6.0\sqrt{n}$

หมายเหตุ: n หมายถึงจำนวนสถานีเฉลี่ยในระหว่างสองหมุดฐานงานระดับสำหรับการวัดครั้งเดียว

4.5.4.16 เมื่อการรังวัดควบคุมภายนอกอุโมงค์เสร็จสมบูรณ์ ข้อผิดพลาดแนวทะลุเนื่องจากอิทธิพลของฝนต้องถูกประมาณตามข้อกำหนดที่ระบุไว้ในหัวข้อที่ 4.5.4.2 ถึงหัวข้อที่ 4.5.4.6 ในการประมาณค่าต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในตารางที่ 29

4.5.5 การรังวัดควบคุมภายในอุโมงค์

4.5.5.1 การทำวงรอบต้องใช้ในการรังวัดควบคุมทางราบภายในอุโมงค์ การควบคุมต้องนำทางเข้าสู่อุโมงค์จากเส้นเชื่อมภายนอกอุโมงค์ตามที่กำหนดตามการออกแบบการรังวัด โครงข่ายควบคุมภายในและภายนอกอุโมงค์ต้องเชื่อมต่อกันโดยใช้การเชื่อมโยงด้านข้าง (side connection)

4.5.5.2 ค่าความถูกต้องของการเดินระดับภายในอุโมงค์ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดที่ระบุไว้ในตารางที่ 33

ตารางที่ 33 ข้อกำหนดค่าความถูกต้องสำหรับการเดินระดับภายในอุโมงค์ (ที่มา “TB 10601-2009”)

มาตรฐานงานสำรวจและประเภท	ระยะที่ใช้ในการรังวัด (km)	ข้อผิดพลาดมาตรฐานของมุมที่รังวัด (")	ข้อผิดพลาดมาตรฐานสัมพัทธ์ของความยาวด้านข้าง
ชั้นงานที่ 2	9 ถึง 20	1.0	1/100000
ชั้นงานที่ 2 สำหรับอุโมงค์	6 ถึง 9	1.3	1/100000
ชั้นงานที่ 3	3 ถึง 5	1.8	1/50000
ชั้นงานที่ 4	1.5 ถึง 4	2.5	1/50000
ชั้นที่ 1	< 1.5	4.0	1/20000

4.5.5.3 การตั้งโครงข่ายเดินระดับภายในอุโมงค์ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) ความยาวระหว่างกล้องถึงเป้าสะท้อนของการเดินระดับต้องกำหนดตามการออกแบบสำรวจ

- (2) จุดเดินระดับต้องตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ลดการรบกวนจากการก่อสร้างพื้นที่มีเสถียรภาพและสะดวกต่อการตั้งสถานี และแนวสายตาระหว่างจุดต้องอยู่ห่างจากสิ่งอำนวยความสะดวกภายในอุโมงค์อย่างน้อย 0.2 m
 - (3) การเดินระดับภายในอุโมงค์ต้องถูกจัดให้เป็นวงรอบหลายเหลี่ยม โดยแต่ละวงรอบต้องประกอบด้วยด้าน 4 ถึง 6 ด้าน สำหรับอุโมงค์ยาว จุดเดินระดับต้องถูกจัดวางในรูปแบบสองแถวที่เชื่อมต่อกันด้วยเส้นสังเกตตัดไขว้ (crisscrossing observation lines) เพื่อเพิ่มเงื่อนไขการตรวจสอบภายในและเพิ่มความน่าเชื่อถือของโครงข่าย
- 4.5.5.4 การรังวัดตรวจสอบสำหรับหมุดควบคุมเดิมต้องดำเนินการก่อนการเดินระดับ ความคลาดเคลื่อนของการรังวัดตรวจสอบเมื่อเทียบกับหมุดควบคุมเดิมต้องสอดคล้องกับข้อกำหนด
- 4.5.5.5 ค่าความถูกต้องของการเดินระดับภายในอุโมงค์ต้องไม่น้อยกว่าที่ระบุไว้ในการออกแบบสำรวจ
- 4.5.5.6 การรังวัดมุมทางราบของการเดินระดับต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดในตารางที่ 6 และตารางที่ 8 และต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังนี้
- (1) ก่อนการรังวัดภายในอุโมงค์ กล้องเครื่องมือต้องถูกวางในสภาพแวดล้อมของอุโมงค์ประมาณ 20 นาที เพื่อให้เครื่องมือปรับตัวเข้ากับอุณหภูมิของอุโมงค์
 - (2) ต้องมีการจัดแสงที่เพียงพอสำหรับเป้าหมาย แสงที่ได้รับต้องเป็นแสงสม่ำเสมอ และเป้าหมายต้องมองเห็นได้ชัดเจน หลีกเลี่ยงแสงที่ส่องมายังเป้าหมายจากด้านข้าง
 - (3) เมื่อเสร็จสิ้นครึ่งหนึ่งของรอบการรังวัดที่กำหนดไว้ เครื่องมือและเป้าสะท้อนต้องหมุน 180 ° และทำการทำระดับและการจัดศูนย์ใหม่ก่อนดำเนินการต่อในรอบการรังวัดที่เหลือ
- 4.5.5.7 นอกเหนือจากการสอดคล้องกับข้อกำหนดที่ระบุไว้ในตารางที่ 6 และภาคผนวก ก ตารางที่ ก. 2 การวัดความยาวระหว่างกล้องถึงเป้าสะท้อนของการเดินระดับต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้
- (1) สถานที่ทำงานต้องมีการระบายอากาศที่ดี ก่อนการรังวัดเพื่อกำจัดหมอกและฝุ่น
 - (2) ตัวสะท้อนแสงต้องได้รับแสงสว่างที่เพียงพอ
 - (3) ต้องไม่มีไอน้ำบนพื้นผิวเลนส์ของเครื่องมือและบนพื้นผิวของตัวสะท้อนแสง
- 4.5.5.8 การเดินระดับภายในอุโมงค์ต้องตั้งค่าขึ้นในระยะต่าง ๆ ให้สอดคล้องกับความคืบหน้าของการก่อสร้าง ก่อนการตั้งค่าเดินระดับในระยะใหม่ หมุดควบคุมที่มีอยู่เดิมต้องได้รับการตรวจสอบตามข้อกำหนด

- 4.5.5.9 หากการขุดจากปลายด้านหนึ่งมีระยะถึง 5 km และ 10 km การตรวจสอบด้านอ้างอิงต้องดำเนินการด้วยไจโรสโคป (gyroscope) โดยมีค่าความถูกต้องที่มากกว่า 5"
- 4.5.5.10 การคำนวณการปรับแก้ของการเดินระดับภายในอุโมงค์ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้
- (1) พิกัดและแอสิมัทที่ทราบของการเดินระดับเริ่มต้นภายในอุโมงค์ต้องเป็นพิกัดและแอสิมัทของเส้นเชื่อมที่นำเข้าสู่การควบคุมในอุโมงค์ตามที่กำหนดโดยการออกแบบสำรวจ
 - (2) พิกัดและแอสิมัทที่ทราบของการขยายการเดินระดับภายในอุโมงค์ต้องได้รับการตรวจสอบผลจากระยะการรังวัดก่อนหน้า
 - (3) สำหรับการเดินระดับของชั้นงานที่ 4 และชั้นงานที่สูงกว่า การปรับแก้อย่างเข้มงวดต้องถูกนำมาใช้ สำหรับการเดินระดับชั้นที่หนึ่ง การปรับแก้โดยประมาณสามารถนำมาปรับใช้
- 4.5.5.11 เมื่อเสร็จสิ้นการเดินระดับภายในอุโมงค์ จุดแนวกึ่งกลางชั่วคราวใกล้บริเวณหน้าขุดต้องถูกตั้งค่าที่หน้างาน และแนวกึ่งกลางสำหรับการก่อสร้างต้องได้รับการแก้ไขทันที ค่าความถูกต้องของการรังวัดทางดิ่งภายในอุโมงค์ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในตารางที่ 34

ตารางที่ 34 ข้อกำหนดค่าความถูกต้องสำหรับการรังวัดทางดิ่งภายในอุโมงค์ (ที่มา “TB 10601-2009”)

มาตรฐานงานสำรวจ	ความยาวเส้นทางทำระดับระหว่างปลายการขุดทั้งสองด้าน (km)	ข้อผิดพลาดสุ่มของความแตกต่างความสูงต่อกิโลเมตร (mm)
ชั้นงานที่ 2	> 32	≤ 1.0
ชั้นงานที่ 3	11 ถึง 32	≤ 3.0
ชั้นงานที่ 4	5 ถึง 11	≤ 5.0
ชั้นงานที่ 5	< 5	≤ 7.5

- 4.5.5.12 การรังวัดทางดิ่งภายในอุโมงค์ต้องใช้วิธีการทำระดับแบบคู่และต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดดังต่อไปนี้
- (1) คู่ของหมุดควบคุมทางดิ่งต้องถูกตั้งระยะห่างทุก 200 ถึง 500 m
 - (2) ข้อกำหนดทางเทคนิคหลักสำหรับการรังวัดควบคุมทางดิ่งและค่าความคลาดเคลื่อนของการรังวัดต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดในตารางที่ 14 และตารางที่ 15
 - (3) ค่าความถูกต้องของการรังวัดควบคุมทางดิ่งต้องประมาณตามภาคผนวก ข สมการที่ ข.11
- 4.5.5.13 สภาพทางธรณีวิทยา วิธีการก่อสร้าง และตารางเวลาก่อสร้างต้องถูกนำมาพิจารณาในการกำหนดตารางการรังวัดซ้ำเป็นประจำสำหรับหมุดควบคุมทางดิ่ง ก่อนการตั้งหมุดควบคุมทางดิ่งในระยะใหม่ จุดที่ทราบแล้วต้องได้รับ

การตรวจสอบ และความแตกต่างของความสูงในการรังวัดตรวจสอบเมื่อเทียบกับจุดที่ทราบต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดที่ระบุไว้ในตารางที่ 14

4.5.5.14 หมุดควบคุมภายในอุโมงค์ต้องได้รับการป้องกันอย่างระมัดระวัง เมื่อการก่อสร้างอุโมงค์เสร็จสิ้น จุดเหล่านี้ต้องถูกเชื่อมโยงกับจุด CP II และหมุดฐานงานระดับภายในอุโมงค์

4.5.6 การรังวัดสำหรับการก่อสร้าง

4.5.6.1 การตั้งค่าจุดแนวกึ่งกลางสำหรับการก่อสร้างภายในอุโมงค์ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) หากใช้วิธีการเดินวงรอบ สำหรับการตั้งค่าจุดแนวกึ่งกลาง จำนวนจุดแนวกึ่งกลางในแต่ละครั้งต้องไม่น้อยกว่าสามจุด และต้องมีการตรวจสอบข้ามระหว่างจุด
- (2) หากใช้แนวกึ่งกลางกลางอิสระสำหรับการตั้งค่าจุดแนวกึ่งกลาง เส้นสัมผัสต้องถูกขยายด้วยวิธี หน้าชุดด้านซ้าย และ หน้าชุดด้านขวา และเส้นโค้ง สามารถตั้งค่าได้ด้วยวิธีมุมหักเห
- (3) แนวกึ่งกลางชั่วคราวสำหรับการก่อสร้างผนังใช้งานอุโมงค์ต้องได้รับการวางแผนในทุกระยะ 10 m โดยเส้นสัมผัสต้องถูกขยายด้วยวิธี กล้องหน้าซ้าย และ กล้องหน้าขวา และเส้นโค้งสามารถตั้งค่าได้ด้วยมุมเบี่ยงเบน
- (4) ในกรณีที่มีการขุดแบบเต็มหน้าตัด แนวกึ่งกลางสำหรับการก่อสร้างสามารถใช้เลเซอร์นำทางได้ก่อน จากนั้นจึงตั้งค่าด้วยกล้องสำรวจแบบประมวลผลรวม และ EDM
- (5) หากอุโมงค์ถูกขุดวิธีชั้นบันไดแบบสองชั้น หมุดแนวกึ่งกลางของระดับบนต้องเชื่อมโยงกับระดับล่างในแต่ละครั้งที่ระดับบนมีความคืบหน้าในการขุด 90 ถึง 120 m แนวกึ่งกลางของระดับบนต้องได้รับการตรวจสอบและแก้ไข

4.5.6.2 แนวกึ่งกลางภายในอุโมงค์ต้องได้รับการปิดด้วยหมุดคอนกรีต ห้ามิใช้แผ่นไม้ แผ่นเหล็ก หรือรูที่เจาะลงในคอนกรีต จุดแนวกึ่งกลางชั่วคราวบนส่วนโค้งของอุโมงค์สามารถปิดด้วยแท่งเหล็กหรือแท่งทองแดงในช่องยึดในโครงสร้างคอนกรีตได้

4.5.6.3 หากมีการสร้างอุโมงค์นำร่องในอุโมงค์ที่เป็นเส้นโค้ง ตำแหน่งจุดแนวกึ่งกลางของอุโมงค์นำร่องสามารถคำนวณได้จากแนวกึ่งกลางของอุโมงค์หลักและระยะการเลื่อนของอุโมงค์นำร่อง จากนั้นแนวกึ่งกลางของอุโมงค์นำร่องสามารถตั้งค่าเพื่อใช้เป็นแนวทางในการขุดอุโมงค์นำร่องได้

4.5.6.4 การรังวัดทางดิ่งภายในอุโมงค์ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) หมุดควบคุมทางดิ่งต้องเพิ่มความหนาแน่นบนพื้นฐานของจุดที่มีอยู่เดิม โดยจุดที่เพิ่มเข้ามาสามารถใช้เป็นหมุดแนวกึ่งกลางถาวรเพื่อการใช้งานร่วมกัน

- (2) หากใช้การทำระดับเชิงตรีโกณด้วย EDM สำหรับการรังวัดทางตั้ง ความสูงของเป้าสะท้อนแสงต้องถูกเปลี่ยนสองครั้ง หรือจุดที่ทำเพิ่มความหนาแน่นสามารถใช้เป็นจุดถ่ายระดับ (turning point) เพื่อเชื่อมต่อกับจุดที่ทราบได้

4.5.6.5 การรังวัดสำหรับการขุดอุโมงค์ต้องดำเนินการตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) ก่อนการระเบิดแต่ละครั้ง แนวกึ่งกลางอุโมงค์ ความสูงของราง ด้านบน และส่วนขุดต้องถูกทำเครื่องหมายบนหน้าขุด
- (2) สำหรับพื้นที่ที่ถูกขุด ส่วนขุดต้องได้รับการรังวัดและทำแผนที่พื้นที่ โดยช่วงระยะของส่วนขุดต้องไม่เกิน 20 m
- (3) วิธีการเช่นการใช้เครื่องมือวัดแบบอัตโนมัติ การวัดด้วยวิธีพิกัดเชิงขั้ว (polar coordinate method) ใช้กล้องสำรวจแบบประมวลผลรวม และวิธีการเยื้องหน้าตัด (section offset method) สามารถใช้สำหรับการกำหนดส่วนได้
- (4) หากใช้วิธีการเบี่ยงเบนส่วน การวัดระยะจากแนวกึ่งกลางทั้งด้านซ้ายและด้านขวาต้องครอบคลุมความสูงจากแนวกึ่งกลางถึงยอดอุโมงค์ และจุดยอดของผนังทางตั้งที่ระยะห่าง 0.5 m สำหรับส่วนโค้งและผนังโค้ง และ 1.0 m สำหรับผนังทางตั้ง ในลักษณะจากบนลงล่าง ปัจจัยต่าง ๆ เช่น การเคลื่อนที่เข้าด้านในของแนวกึ่งกลาง ค่าเผื่อการออกแบบ และค่าความคลาดเคลื่อนจากการก่อสร้างต้องนำมาพิจารณา
- (5) สำหรับการวัดส่วนอินเวิร์ท (inverted arch sections) ความแตกต่างความสูงจากรางด้านบนถึงส่วนอินเวิร์ทต้องถูกวัดที่ระยะห่างทางราบ 0.5 m จากแนวกึ่งกลางไปยังผนังด้านข้าง

4.5.6.6 การรังวัดสำหรับการก่อสร้างผนังใช้งานอุโมงค์ต้องดำเนินการตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) ก่อนการจัดตั้งแบบหล่อ ต้องตรวจสอบตำแหน่งและความสูงของจุดแนวกึ่งกลางแบบถาวรหรือชั่วคราว ความคลาดเคลื่อนในการตรวจสอบต้องไม่เกิน 5 mm
- (2) หลังจากผ่านการตรวจสอบแล้ว ต้องตั้งค่าจุดแนวกึ่งกลางอย่างน้อยสามจุดและเส้นระนาบที่เกี่ยวข้องซึ่งแสดงแนวการตัดส่วนในพื้นที่จัดตั้งแบบหล่อ ความสูงของยอดอุโมงค์ แนวเส้นฐานของส่วนโค้งของอุโมงค์ (springing line) และส่วนล่างของผนังด้านข้างต้องถูกทำเครื่องหมาย
- (3) หลังจากจัดตั้งแบบหล่อแล้ว แบบหล่อต้องได้รับการตรวจสอบซ้ำและแก้ไขตามความเหมาะสม

4.5.6.7 การรังวัดการเชื่อมต่อปล่องทางตั้งต้องประกอบด้วยการรังวัดเดินระดับใกล้เคียงที่บริเวณด้านบนและด้านล่างของปล่อง การรังวัดการวางแนวของปล่องทางตั้ง การรังวัดการถ่ายโอนความสูง และการทำระดับใกล้เคียงที่

บริเวณด้านบนและด้านล่างของปล่อง การวางแผนของปล่องทางดิ่งสามารถใช้วิธีการรวมระหว่างลูกดิ่งและกล้องสำรวจแบบประมวลผลรวมวิธีการผ่านสามเหลี่ยมเชื่อมต่อ วิธีการผ่านการฉายจุดสำหรับรูเจาะ และอื่น ๆ การถ่ายโอนความสูงสามารถใช้วิธีการที่ใช้ตลับเมตรเหล็กหรือวิธีการที่ใช้เครื่องวัดระยะทางอิเล็กทรอนิกส์

4.5.7 การรังวัดและการปรับแก้ข้อผิดพลาดในการเจาะทะลุของอุโมงค์

4.5.7.1 เมื่ออุโมงค์เจาะทะลุ การดำเนินการดังต่อไปนี้ต้องถูกใช้เพื่อกำหนดข้อผิดพลาดในการเจาะทะลุแนวที่แท้จริง

- (1) ในกรณีที่วิธีแนวกึ่งกลางอิสระ สำหรับการรังวัดอุโมงค์ แนวกึ่งกลางจากทั้งสองด้านของการขุดต้องถูกยึดออกไปยังหน้าการเจาะทะลุเพื่อกำหนดจุดเจาะทะลุแนวที่แท้จริงตามลำดับระยะทางตามยาวและตามระนาบระหว่างจุดทะลุแนวที่แท้จริงทั้งสองคือข้อผิดพลาดตามยาวและตามระนาบของการเจาะทะลุแนว
- (2) ในกรณีที่วิธีเดินวงรอบสำหรับการรังวัดอุโมงค์ จุดชั่วคราวต้องถูกตั้งใกล้กับจุดตัดของหน้าเจาะทะลุแนวและแนวกึ่งกลาง พิกัดของจุดนี้ต้องวัดจากเส้นเดินที่เริ่มต้นจากทั้งสองด้าน ความคลาดเคลื่อนของพิกัดต้องถูกฉายไปในทิศทางของแนวกึ่งกลางเส้นทางและทิศทางตั้งฉาก การฉายความคลาดเคลื่อนเหล่านี้คือข้อผิดพลาดตามยาวและตามระนาบ ข้อผิดพลาดในการเจาะทะลุแนวในทิศทางสามารถกำหนดได้ในลักษณะเดียวกัน
- (3) ข้อผิดพลาดในการเจาะทะลุแนวในทางดิ่งต้องเป็นความแตกต่างของความสูงจุดชั่วคราวที่ได้จากปลายการขุดทั้งสองด้าน

4.5.7.2 ข้อผิดพลาดในการเจาะทะลุแนวที่แท้จริงต้องได้รับการปรับในส่วนที่งาน บุผนังยังไม่ได้เริ่มดำเนินการ แนวกึ่งกลางและความสูงที่ปรับแก้แล้วต้องถูกใช้สำหรับการตั้งค่าครั้งใหม่สำหรับงานขุดและงานบุผนังในส่วนปรับแนวเส้นทาง

4.5.7.3 ผลลัพธ์ที่ปรับแก้แล้วต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดในการออกแบบและข้อกำหนดสำหรับงานบุผนังและการสร้างเส้นทางของอุโมงค์

4.5.7.4 การปรับแนวเส้นทางเพื่อกำจัดข้อผิดพลาดในการเจาะทะลุแนวในทางราบต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) หากข้อผิดพลาดในการเจาะทะลุแนวน้อยกว่าหรือเท่ากับ 50 mm และมีเงื่อนไขว่าการปฏิบัติตามข้อกำหนดสำหรับข้อจำกัดขอบเขตของอุโมงค์ได้รับการรับรอง แนวกึ่งกลางเส้นทางอาจไม่จำเป็นต้องปรับ และรางสามารถวางได้ตามเส้นทางที่ออกแบบไว้
- (2) หากข้อผิดพลาดในการเจาะทะลุแนวมีค่ามากกว่า 50 mm แนวกึ่งกลางจริงของอุโมงค์ต้องถูกวัดโดยอ้างอิงกับหมุดควบคุมเส้นทางของรางรถไฟในการปรับเส้นทางต้องถูกใช้สำหรับการปรับแก้

- (3) เส้นทางที่ปรับแก้แล้วต้องเป็นไปตามมาตรฐานความเรียบของราง และข้อกำหนดสำหรับขอบเขตของอุโมงค์

4.5.7.5 ข้อผิดพลาดในการเจาะทะลุแนวในทางดิ่งต้องได้รับการปรับแก้ตามวิธีการดังต่อไปนี้

- (1) ค่าเฉลี่ยของความสูงที่วัดได้จากทั้งสองปลายของอุโมงค์ต้องถูกนำมาใช้เป็นค่าความสูงที่ปรับแก้แล้วของจุดทะลุแนว
- (2) ข้อผิดพลาดทางดิ่งที่เกิดขึ้นสามารถเฉลี่ยและกระจายให้กับส่วนที่ยังไม่ได้บุผนังที่ปลายทั้งสองของอุโมงค์ ข้อผิดพลาดต้องถูกจัดสรรให้กับมาตรฐานงานระดับที่เกี่ยวข้องตามสัดส่วนของความยาวส่วนของเส้นทางที่เกี่ยวข้อง
- (3) การตั้งค่าระดับทางดิ่งในส่วนที่ยังไม่ได้บุผนังต้องอิงจากความสูงที่ปรับแก้แล้วของมาตรฐานงานระดับ
- (4) เส้นทางที่ปรับแก้แล้วต้องเป็นไปตามข้อกำหนดการออกแบบเส้นทางและข้อกำหนดการยอมรับ

4.5.8 การรังวัดเพื่อการตรวจรับ

4.5.8.1 เนื้อหาของการรังวัดเพื่อรับรองในอุโมงค์ต้องรวมถึงสิ่งต่อไปนี้

- (1) การรังวัด CP II ภายในอุโมงค์
- (2) การทำระดับชั้นงานที่ 2 ในอุโมงค์เพื่อปรับความต่อเนื่อง
- (3) การรังวัดความต่อเนื่องของเส้นทางภายในอุโมงค์
- (4) การรังวัดหน้าตัดในแนวระนาบของอุโมงค์

4.5.8.2 หลังจากการก่อสร้างอุโมงค์ที่มีความยาวมากกว่า 800 m เสร็จสมบูรณ์ การรังวัดโครงข่ายควบคุม CP II ภายในอุโมงค์ต้องดำเนินการตามข้อกำหนดที่ระบุไว้ในหัวข้อที่ 4.2.4.5

4.5.8.3 การทำระดับชั้นงานที่ 2 ในอุโมงค์เพื่อปรับความต่อเนื่องต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังนี้

- (1) ต้องมีมาตรฐานงานระดับทุก 1 km ภายในอุโมงค์ เส้นทางการทำงานระดับต้องเริ่มต้นและสิ้นสุดที่มาตรฐานงานระดับที่ทางเข้าและทางออกของอุโมงค์ การทำระดับต้องดำเนินการตามข้อกำหนดของการทำระดับชั้นงานที่ 2 หากความยาวของอุโมงค์น้อยกว่า 1 km ต้องมีมาตรฐานงานระดับอย่างน้อยหนึ่งจุดที่ถูกตั้งค่าและทำเครื่องหมายไว้บนผนังด้านข้าง เครื่องหมายต้องสอดคล้องกับข้อกำหนด
- (2) หากค่าความคลาดเคลื่อนในการทำระดับของการเชื่อมต่อภายในอุโมงค์น้อยกว่าหรือเท่ากับ $6\sqrt{L}$ มาตรฐานงานระดับชั้นงานที่ 2 ที่ปลายทั้งสองของอุโมงค์ต้องถูกใช้เป็นจุดคงที่ในการคำนวณการปรับแก้ความสูง หากค่าความคลาดเคลื่อนเกิน $6\sqrt{L}$ มาตรฐานในการปรับระดับต้องถูกเพิ่มที่ปลายทั้งสองจนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนต้องลดลงจนตรงตามข้อกำหนด จากนั้นความสูงของจุดปลายของ

เส้นทางปรับระดับที่ขยายต้องถูกนำมาใช้เป็นค่าคงที่ในการคำนวณการปรับระดับ ความสูงของหมุดฐานงานระดับชั้นงานที่ 2 ในส่วนนี้ต้องได้รับการปรับเพื่อกำจัดความไม่ต่อเนื่องในทางดังภายในอุโมงค์

4.5.8.4 การรังวัดในการเชื่อมต่อเส้นทางภายในอุโมงค์ต้องอิงตามหมุดควบคุม CP II และต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

- (1) การตั้งค่าหมุดแนวกึ่งกลางต้องตรงตามความต้องการสำหรับการเตรียมเอกสารรับรอง
- (2) หมุดกิโลเมตรต้องปักอยู่บนแนวกึ่งกลาง และต้องปักหมุดสำหรับระยะ 100 m ด้วย
- (3) หมุดเพิ่มเติมต้องถูกตั้งค่าไว้ที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของเส้นโค้ง จุดเปลี่ยนความลาดชัน จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของเส้นโค้งทางโค้งทางเข้าและทางออกของอุโมงค์ และจุดเปลี่ยนส่วนภายในอุโมงค์

4.5.8.5 ต้องดำเนินการรังวัดเพื่อแบ่งส่วนพื้นที่ในอุโมงค์ โดยใช้แนวกึ่งกลางเส้นทางของการรังวัดเพื่อรับรองเป็นข้อมูลอ้างอิง ค่าความถูกต้องของการวัดระยะด้วยกล้องสำรวจแบบประมวลผลรวมหรือเครื่องมือแบ่งส่วนที่ใช้ต้องดีกว่า $5 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$ ข้อผิดพลาดมาตรฐานของจุดในแต่ละส่วนต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 mm ข้อกำหนดสำหรับการแบ่งส่วนมีดังนี้

- (1) ส่วนพื้นที่ในอุโมงค์ต้องถูกวัดในระยะห่างของหนึ่งจุดต่อ 50 m ในส่วนที่เป็นเส้นตรง และหนึ่งจุดต่อ 20 m ในส่วนที่เป็นเส้นโค้ง นอกจากนี้ยังต้องทำการวัดในตำแหน่งอื่นที่จำเป็น
- (2) ความสูงของยอดอุโมงค์ภายใน ความกว้างของสปริงไลน์ (spring line) และความกว้างที่ระดับความสูง 1.1 m, 3 m และ 5.8 m จากด้านบนของรางต้องถูกวัดเพื่อกำหนดเป็นพื้นที่ว่าง

เอกสารอ้างอิง

British Tunnelling Society. (2023). Specification for tunnelling (4th ed.). London: Institution of Civil Engineers.

China Railway Corporation. (2015). Technical specification for construction of high-speed railway tunnel (Q/CR 9604-2015).

Japan Society of Civil Engineers. (2016). Standard specifications for tunneling – Mountain tunnels. Tokyo: JSCE.

ภาคผนวก ก.
ตารางเพิ่มเติมจากการรังวัดระหว่างก่อสร้าง

ตารางที่ ก.1 ข้อกำหนดในการปิดเศษของข้อมูลสำหรับการรังวัดควบคุมทางราบในมาตรฐานงานสำรวจ
(ที่มา “TB 10601-2009”)

ชื่อ โครงข่าย ควบคุม	ส่วนประกอบ ของเวกเตอร์ เส้นฐาน GNSS (mm)	การรังวัด ทิศทางทาง ราบ (")	การรังวัด ระยะทาง ทางราบ (mm)	การแก้ไข ทิศทาง (")	การแก้ไข ระยะทาง (mm)	ความคลาด เคลื่อน มาตรฐาน ของ ตำแหน่งจุด (mm)	พิกัดของจุด (mm)
CP 0 CP I	0.1	—	—	—	—	0.1	0.1
โครงข่าย CP II GNSS	0.1	—	—	—	—	0.1	0.1
โครงข่าย งานวงรอบ CP II	—	0.1	0.1	0.01	0.01	0.1	0.1

ตารางที่ ก. 2 ข้อกำหนดสำหรับการปิดค่าการอ่านของเครื่องวัดความดันบรรยากาศและเครื่องวัดอุณหภูมิ
(ที่มา “TB 10601-2009”)

มาตรฐานงานสำรวจและชนิด	เครื่องวัดอุณหภูมิแบบเปียกและแห้ง (°C)	เครื่องวัดความกดอากาศ (Barometer) (Pa)
ชั้นงานที่ 2	0.2	50
ชั้นงานที่ 3	0.2	50
ชั้นงานที่ 4	0.5	100
ชั้นงานที่ 1 และต่ำกว่า	1	200

ตารางที่ ก. 3 ข้อกำหนดการปิดเศษข้อมูลการรังวัดระดับ (ที่มา “TB 10601-2009”)

มาตรฐานงาน สำรวจ	การรวมระยะ ทางการรังวัด ไปข้างหน้า หรือถอยหลัง (km)	ความหมาย ของระยะ ทางการรังวัด ไปข้างหน้า หรือถอยหลัง (km)	ความสูงของ สถานี (mm)	การรวมความ สูงของการ รังวัด สองทิศทาง (mm)	ความหมาย ของความสูง ของการรังวัด ไปข้างหน้า หรือถอยหลัง (mm)	ความสูง (mm)
ชั้นงานที่ 2 (การวัดระดับ อย่างแม่นยำ)	0.01	0.1	0.01	0.01	0.1	0.1
ชั้นงานที่ 3 และชั้นงานที่ 4	0.01	0.1	0.1	0.1	0.1	1
ชั้นงานที่ 5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	1

ภาคผนวก ข.
สมการเพิ่มเติมจากการรังวัดระหว่างก่อสร้าง

$$\frac{d_s}{s} = \frac{\sqrt{\Delta X_{ij}^2 + \Delta Y_{ij}^2 + \Delta Z_{ij}^2}}{s} \quad (\text{ข.1})$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \Delta X_{ij} &= (X_j - X_i)_{RS} - (X_j - X_i)_{OS} \\ \Delta Y_{ij} &= (Y_j - Y_i)_{RS} - (Y_j - Y_i)_{OS} \\ \Delta Z_{ij} &= (Z_j - Z_i)_{RS} - (Z_j - Z_i)_{OS} \end{aligned}$$

S คือระยะทางทางราบสองมิติ หรือระยะทางในสามมิติของจุดที่อยู่ติดกัน (m)
 $\Delta X_{ij}, \Delta Y_{ij}$ คือความคลาดเคลื่อนของการวัดซ้ำจากจุดเริ่มต้นและการรังวัดซ้ำในความแตกต่างของพิกัด X และ Y ระหว่างจุดที่อยู่ติดกัน i และ j (m)
 ΔZ_{ij} คือ ความคลาดเคลื่อนของการวัดซ้ำจากจุดเริ่มต้นและการรังวัดซ้ำในความแตกต่างของพิกัด Z ระหว่างจุดที่อยู่ติดกัน i และ j (m) ค่านี้ต้องเป็นศูนย์หากพิจารณาแค่พิกัดสองมิติเท่านั้น

หมายเหตุ: RS และ OS หมายถึงการรังวัดซ้ำและการรังวัดเดิมตามลำดับ

$$M^2 = m_j^2 + m_c^2 + \left(\frac{L_j \cos \theta \times m_{aj}}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{L_c \cos \varphi \times m_{ac}}{\rho} \right)^2 \quad (\text{ข.2})$$

โดยที่

m_j, m_c คือข้อผิดพลาดของพิกัดแกน y ที่หมดควบคุม GNSS บริเวณทางเข้าและทางออกอุโมงค์

L_j, L_c คือความยาวจากจุดทะเลาะแนวไปยังหมดควบคุม GNSS ที่บริเวณทางเข้าและทางออกอุโมงค์

m_{aj}, m_{ac} คือข้อผิดพลาดมาตรฐานของทิศทางของจุดเชื่อม GNSS ที่บริเวณทางเข้าและทางออก

θ, φ คือมุมรวมระหว่างเส้นสัมผัสของแนวเส้นทางที่จุดทะเลาะและเส้นที่เชื่อมระหว่างจุดทะเลาะและหมดควบคุมที่ทางเข้าและทางออกอุโมงค์

ρ คือค่าคงที่ของพาร์เซก (parsec) เท่ากับ 206,265 (")

หมายเหตุ: J และ C หมายถึงจุดเริ่มต้นอุโมงค์และปลายอุโมงค์ทางออก

$$M^2 = \sigma_{\Delta x}^2 \cos^2 \alpha_f + \sigma_{\Delta y}^2 \sin^2 \alpha_f + \sigma_{\Delta x \Delta y} \sin 2\alpha_f \quad (\text{ข.3})$$

โดยที่

$\sigma_{\Delta x}, \sigma_{\Delta y}, \sigma_{\Delta x \Delta y}$ คือค่าความแปรปรวนและการร่วมแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนระหว่างพิกัด x และ y ของจุดทะเลาะแนวที่ได้จากทางเข้าและทางออกตามลำดับ

α_f คือแอสิมัทของแนวหน้าการเจาะทะเลาะแนว

$$M = \sqrt{m_{y\beta}^2 + m_{yl}^2} \quad (\text{ข.4})$$

$m_{y\beta}$ สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ ข.5

$$m_{y\beta} = \frac{m_\beta}{\rho} \sqrt{\sum R_x^2} \quad (\text{ข.5})$$

m_{yl} สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ ข.6

$$m_{yl} = \frac{m_l}{l} \sqrt{\sum d_y^2} \quad (\text{ข.6})$$

โดยที่

$m_{y\beta}$ คือข้อผิดพลาดแนวระนาบที่เกิดจากอิทธิพลของข้อผิดพลาดในการวัดมุม (mm)

m_{yl} คือข้อผิดพลาดแนวระนาบที่เกิดจากอิทธิพลของข้อผิดพลาดในการวัดความยาว (mm)

m_β คือข้อผิดพลาดมาตรฐานเชิงมุมของโครงข่ายควบคุมที่ออกแบบ (")

R_x คือระยะตั้งฉากทางราบจากแต่ละหมุดควบคุมถึงหน้าการเจาะทะลุแนว (m)

$\frac{m_l}{l}$ คือข้อผิดพลาดมาตรฐานสัมพัทธ์ของความยาวระหว่างกล้องถึงเป้าสะท้อนในโครงข่ายควบคุมที่ออกแบบ

d_y คือความยาวของแต่ละด้านในโครงข่ายควบคุมที่ฉายไปยังหน้าการเจาะทะลุแนว (m)

ρ คือค่าคงที่ของพาร์เซก (parsec) เท่ากับ 206,265 (")

$$M = \sqrt{M_r^2 + M_b^2} \quad (\text{ข.7})$$

โดยที่

M_r คือข้อผิดพลาดแนวระนาบที่เกิดจากอิทธิพลของข้อผิดพลาดในการวัดทิศทาง (mm)

M_b คือข้อผิดพลาดแนวระนาบที่เกิดจากอิทธิพลของข้อผิดพลาดของด้านที่ทราบทิศทาง (mm)

M_r สามารถคำนวณได้จากสมการที่ ข.8

$$M_r = \frac{m_r}{p} \sqrt{\frac{1}{P_\phi}} \quad (\text{ข.8})$$

โดยที่

m_r คือข้อผิดพลาดมาตรฐานของการวัดทิศทาง (นิ้ว) ซึ่งคำนวณได้จากการปรับแก้

ρ คือค่าคงที่ของพาร์เซก (parsec) เท่ากับ 206,265 (")

$\frac{1}{P_\phi}$ คือค่าสัมผัสน้ำหนักที่สะท้อนอิทธิพลของข้อผิดพลาดในการวัดทิศทางต่อข้อผิดพลาดแนวระนาบ ซึ่งคำนวณได้จากการปรับแก้

m_b ตามข้อกำหนดการปรับและการค่าด้านที่ทราบ (known side) ของโครงข่ายควบคุมกรณีที่โครงข่ายควบคุมมีเพียงด้านที่ทราบด้านเดียว

$$M_b = (y_c - y_j) \frac{m_b}{b} \quad (\text{ข.9})$$

โดยที่

y_c, y_j คือพิกัดแนวระนาบของหมุดควบคุมสองจุด ได้แก่ C และ J ในโครงข่ายสามเหลี่ยมที่บริเวณทางออกและทางเข้าตามลำดับ (mm)

$\frac{m_b}{b}$ คือข้อผิดพลาดมาตรฐานสัมพัทธ์ของความยาวระหว่างกล้องถึงเป้าสะท้อนที่ทราบ

หมายเหตุ: J และ C หมายถึงจุดเริ่มต้นอุโมงค์และปลายอุโมงค์ทางออก

กรณีที่โครงข่ายควบคุมมีด้านที่ทราบสองด้าน

$$M_b = \sqrt{F_{b1}^2 m_{b1}^2 + F_{b2}^2 m_{b2}^2} \quad (\text{ข.10})$$

โดยที่

m_{b1}, m_{b2} คือข้อผิดพลาดมาตรฐานของความยาวระหว่างกล้องถึงเป้าสะท้อนที่ทราบ (mm)

F_{b1}, F_{b2} คือปัจจัยที่สะท้อนผลกระทบของความยาวระหว่างกล้องถึงเป้าสะท้อนที่ทราบทั้งสองต่อข้อผิดพลาดแนวทะลุ ซึ่งสามารถหาได้จากตารางการปรับแก้แบบมีเงื่อนไข

$$M_{\Delta h} = M_{\Delta} \sqrt{L} \quad (\text{ข.11})$$

โดยที่

M_{Δ} คือข้อผิดพลาดสุ่มของการทำระดับต่อกิโลเมตร (mm)

L คือความยาวของเส้นทางทำระดับทั้งภายนอกหรือภายในอุโมงค์ (km)

$$f_{TOL} = 2 \sqrt{m_1^2 + m_2^2} \quad (\text{ข.12})$$

โดยที่

m_1, m_2 คือข้อผิดพลาดมาตรฐานของความยาวระหว่างกล้องถึงเป้าสะท้อนหรือมุมในการรังวัดเดิมและการรังวัดตรวจสอบตามลำดับ

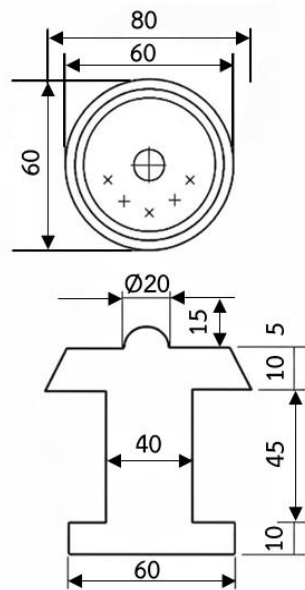
ภาคผนวก ค.
การทำหมุดสำหรับจุดควบคุม (control point) และการทำเครื่องหมายบน
หมุด (marking)

ข้อกำหนดในภาคผนวกนี้ใช้สำหรับการฝังหมุดทั่วไปซึ่งทำจากคอนกรีตสำเร็จรูป หรือคอนกรีตหล่อในที่สำหรับหมุดระดับและหมุดควบคุมแนวราบในชั้นงานต่าง ๆ สำหรับการฝังหมุดหลักฐานในพื้นที่พิเศษซึ่งแนวเส้นทางตัดผ่าน ต้องพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เช่น คุณสมบัติของดิน โครงสร้างทางธรณีวิทยา และการทรุดตัวของผิวดิน เพื่อกำหนดวิธีการฝังหมุดควบคุมแบบพิเศษเช่น หมุดบนชั้นหินฐานราก และหมุดฝังลึกเป็นพิเศษ เป็นต้น ส่วนล่างสุดของหมุดหลักฐานต้องถูกฝังไว้ลึกอย่างน้อย 0.3 เมตรใต้ผิวดิน

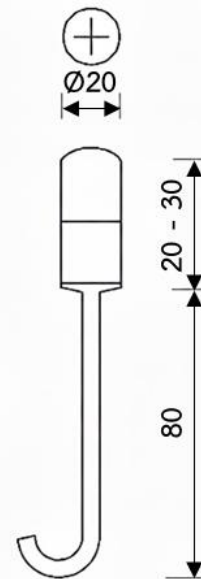
1. หมุดควบคุม

1.1 วัสดุที่ใช้ในการทำหมุดแบบโลหะให้ใช้เหล็กหล่อหรือโลหะชนิดอื่น ๆ ข้อกำหนดด้านรูปแบบและขนาดต้องเป็นไปตามรายละเอียดที่แสดงในรูปที่ ค.1 โดยสัญลักษณ์ “x x x x” ที่แสดงในรูปใช้สำหรับระบุชื่อหน่วยงานที่ทำการสำรวจ

1.2 หมุดที่ทำจากเหล็กไร้สนิม ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 12 ถึง 20 mm และมีความยาวระหว่าง 20 ถึง 30 mm ส่วนฐานของหมุดสามารถขึ้นรูปได้ด้วยการเชื่อมเหล็กเส้นเข้ากับส่วนหัวของเหล็กไร้สนิมด้านบน ข้อกำหนดของหมุดต้องเป็นไปตามรายละเอียดที่แสดงใน รูปที่ ค.2



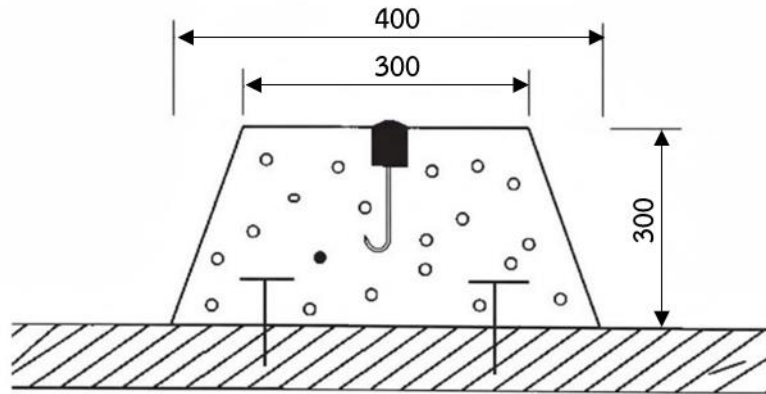
รูปที่ ค.1 หมุดแบบโลหะ (หน่วย mm)
(ที่มา “TB 10601-2009”)



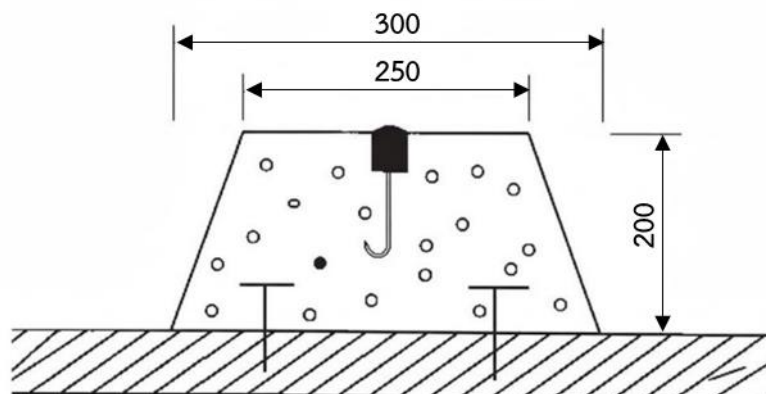
รูปที่ ค.2 หมุดแบบเหล็กไร้สนิม (หน่วย mm)
(ที่มา “TB 10601-2009”)

2. การฝังหมุดควบคุมแนวราบและหมุดระดับ

2.1 ในการติดตั้งหมุดควบคุมบนสิ่งปลูกสร้างให้ยึดหมุดเข้ากับสิ่งปลูกสร้างอย่างมั่นคงและถาวร
ข้อกำหนดในการติดตั้งหมุดควบคุมแนวราบในบนสิ่งปลูกสร้างต้องเป็นไปตามรายละเอียดที่แสดงในรูปที่ ค.3
และ รูปที่ ค.4

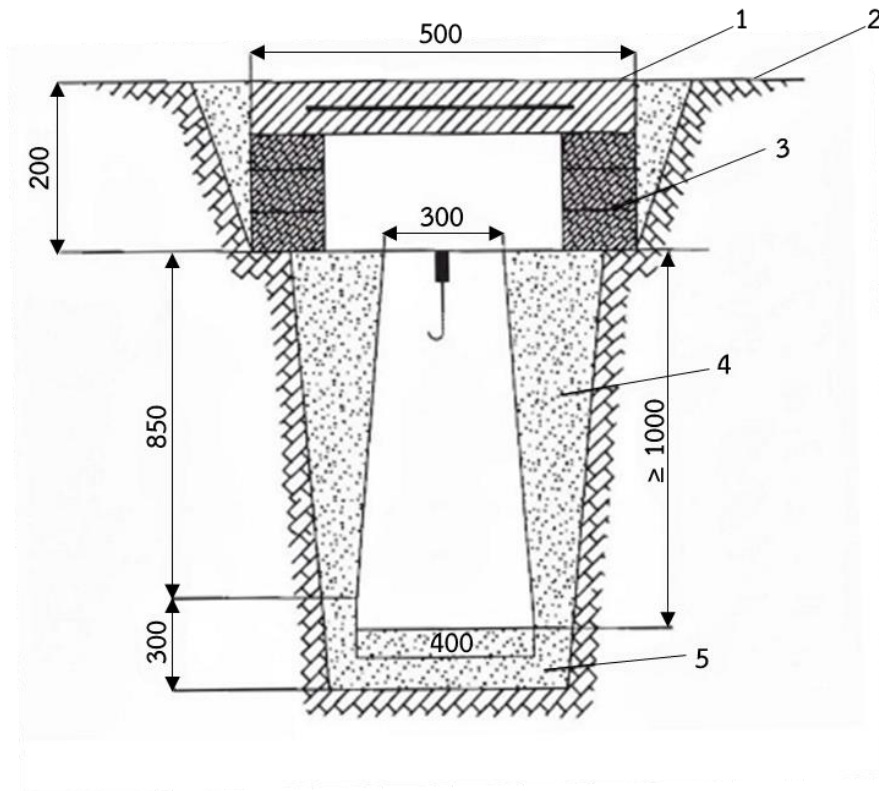


รูปที่ ค.3 การติดตั้งหมุดควบคุม CP 0 และหมุดควบคุมแนวราบชั้นงานที่ 1 บนสิ่งปลูกสร้าง
(หน่วย mm) (ที่มา “TB 10601-2009”)



รูปที่ ค.4 การติดตั้งหมุดควบคุมแนวราบ CP I และ CP II บนสิ่งปลูกสร้าง (หน่วย mm)
(ที่มา “TB 10601-2009”)

2.2 ข้อกำหนดในการฝังหมุดของหมุดควบคุม CP 0 และ หมุดควบคุมแนวราบชั้นงานที่ 1 ต้องเป็นไปตามรายละเอียดที่แสดงในรูปที่ ค.5

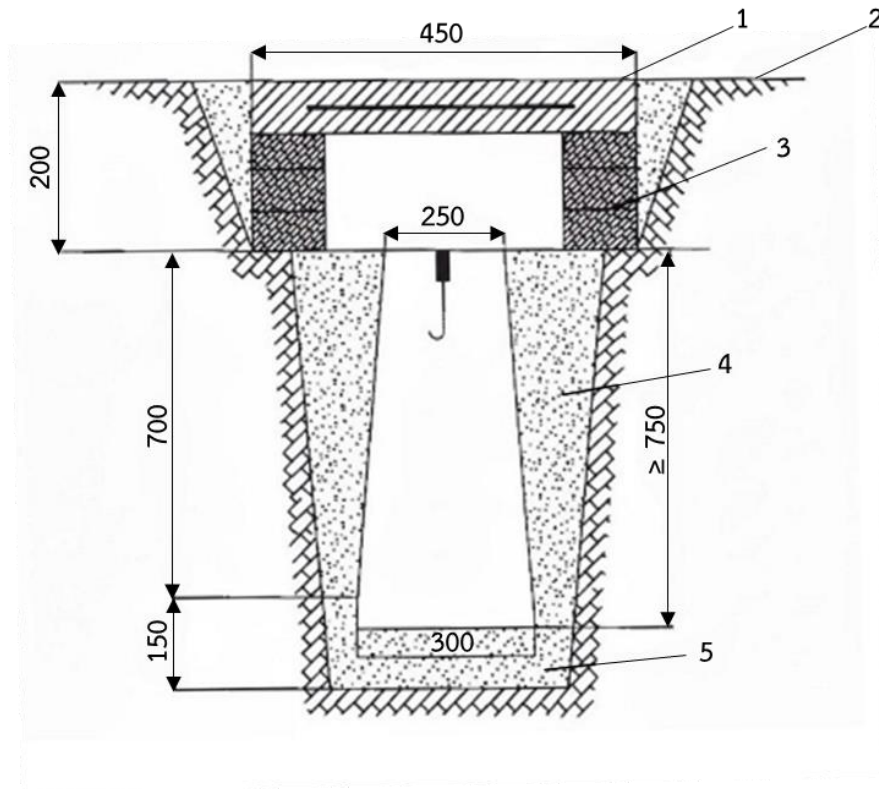


รูปที่ ค.5 การฝังหมุดควบคุม CP 0 และหมุดควบคุมชั้นงานที่ 1 (หน่วย mm)
(ที่มา “TB 10601-2009”)

คำอธิบายรูป

1. แผ่นครอบ
2. ผิวดิน
3. บ่อป้องกันหมุด
4. ดินถม
5. คอนกรีต

2.3 ข้อกำหนดในการฝังหมุดของหมุดควบคุม CP I หมุดควบคุมแนวราบชั้นงานที่ 2 และหมุดระดับชั้นงานที่ 2 ต้องเป็นไปตามรายละเอียดที่แสดงในรูปที่ ค.6

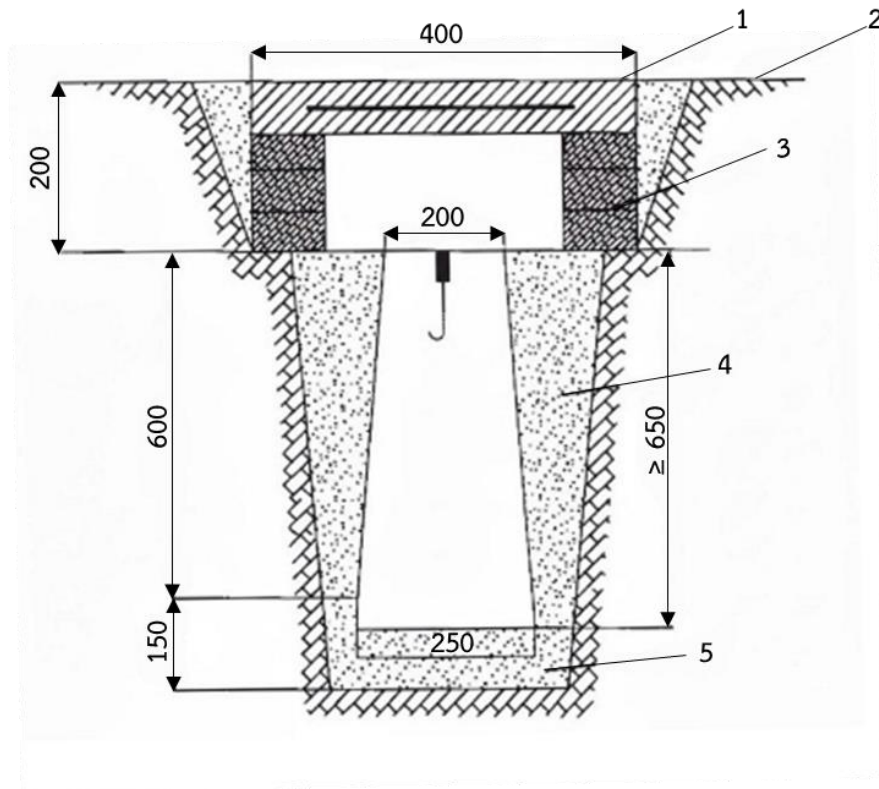


รูปที่ ค.6 การฝังหมุดควบคุม CP I หมุดควบคุมแนวราบชั้นงานที่ 2 และหมุดระดับชั้นงานที่ 2 (หน่วย mm) (ที่มา “TB 10601-2009”)

คำอธิบายรูป

1. แผ่นครอบ
2. ผิวดิน
3. บ่อป้องกันหมุด
4. ดินถม
5. คอนกรีต

2.4 ข้อกำหนดในการฝังหมุดของหมุดควบคุม CP II หมุดควบคุมแนวราบชั้นงานที่ 3 และหมุดระดับชั้นงานที่ 3 ต้องเป็นไปตามรายละเอียดที่แสดงในรูปที่ ค.7

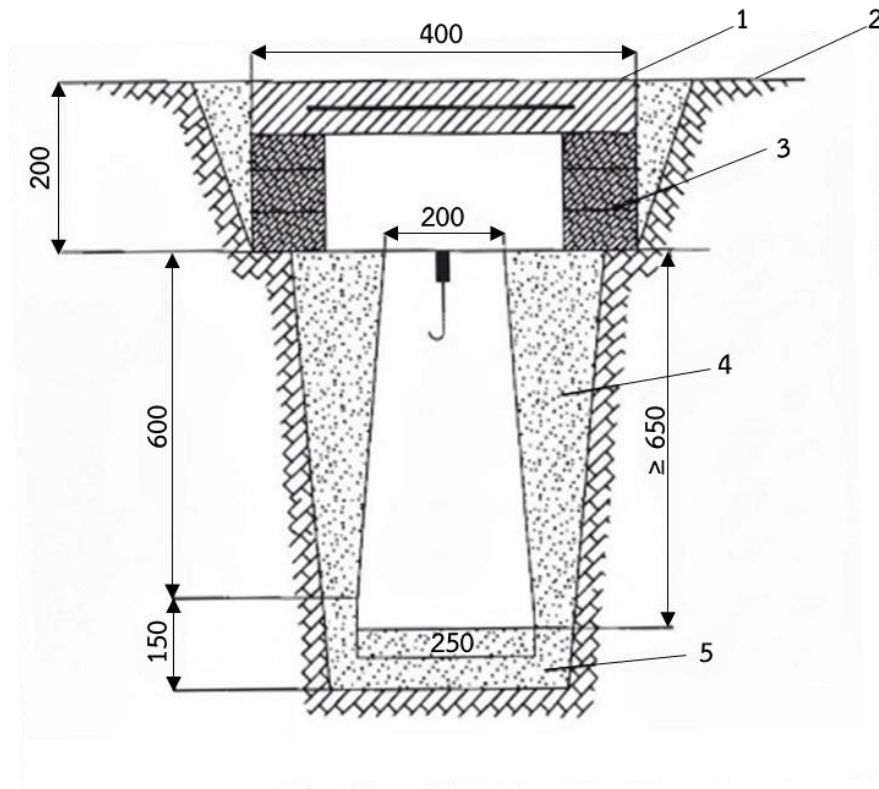


รูปที่ ค.7 การฝังหมุดควบคุม CP II หมุดควบคุมแนวราบชั้นงานที่ 3 และหมุดระดับชั้นงานที่ 3 (หน่วย mm) (ที่มา “TB 10601-2009”)

คำอธิบายรูป

1. แผ่นครอบ
2. ผิวดิน
3. บ่อป้องกันหมุด
4. ดินถม
5. คอนกรีต

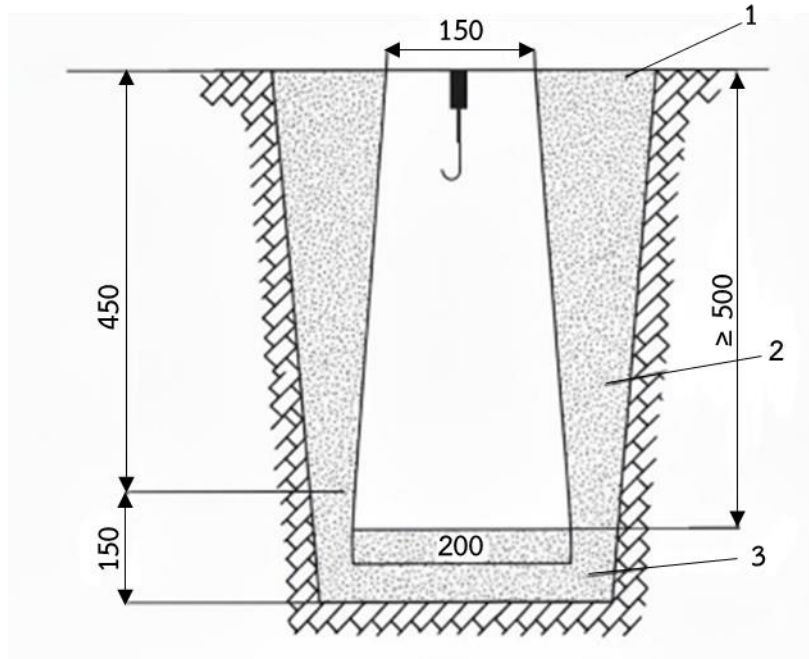
2.5 ข้อกำหนดในการฝังหมุดควบคุมแนวราบชั้นงานที่ 4 ต้องเป็นไปตามรายละเอียดที่แสดงในรูปที่ ค.8



รูปที่ ค.8 การฝังหมุดควบคุมแนวราบชั้นงานที่ 4 (หน่วย mm) (ที่มา “TB 10601-2009”) คำอธิบายรูป

1. แผ่นครอบ
2. ผิวดิน
3. บ่อป้องกันหมุด
4. ดินถม
5. คอนกรีต

2.6 ข้อกำหนดในการฝังหมุดควบคุมแนวราบชั้นงานที่ 5 หรือต่ำกว่าต้องเป็นไปตามรายละเอียดที่แสดงในรูปที่ ค.9

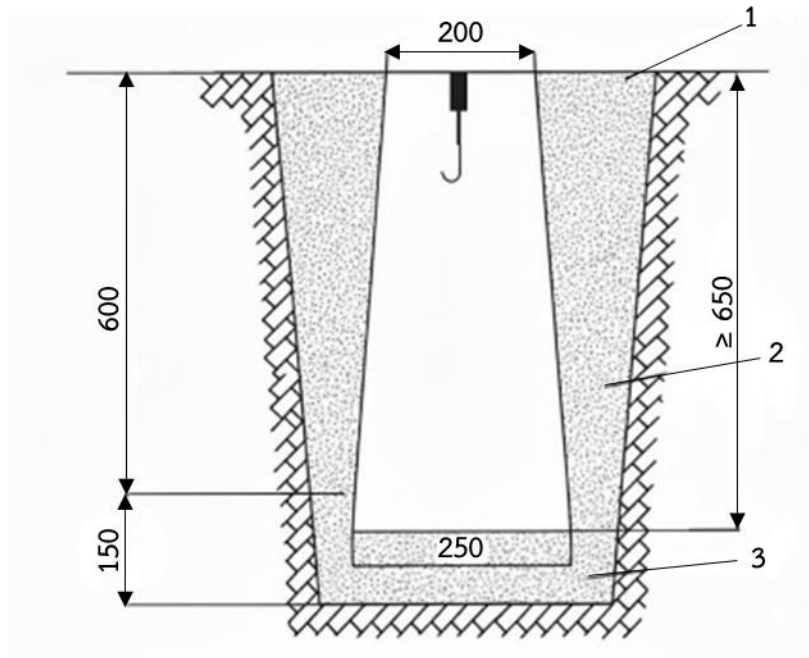


รูปที่ ค.9 การฝังหมุดควบคุมแนวราบชั้นงานที่ 5 หรือต่ำกว่า (หน่วย mm)
(ที่มา “TB 10601-2009”)

คำอธิบายรูป

1. ผิวดิน
2. ดินถม
3. คอนกรีต

2.7 ข้อกำหนดในการฝังหมุดระดับชั้นงานที่ 4 ต้องเป็นไปตามรายละเอียดที่แสดงในรูปที่ ค.10

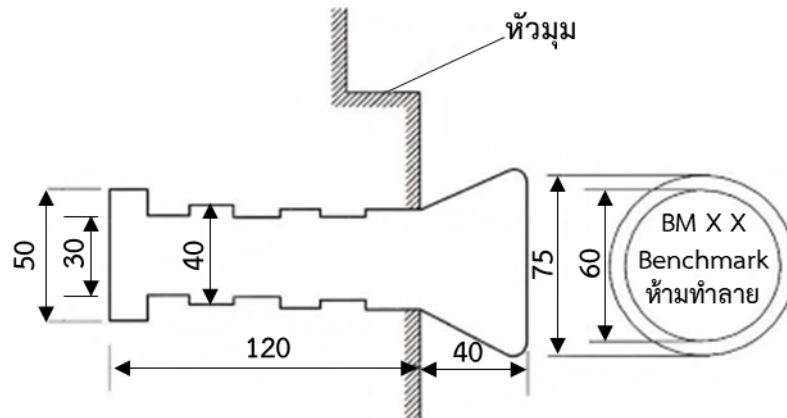


รูปที่ ค.10 การฝังหมุดระดับชั้นงานที่ 4 (หน่วย mm) (ที่มา “TB 10601-2009”)

คำอธิบายรูป

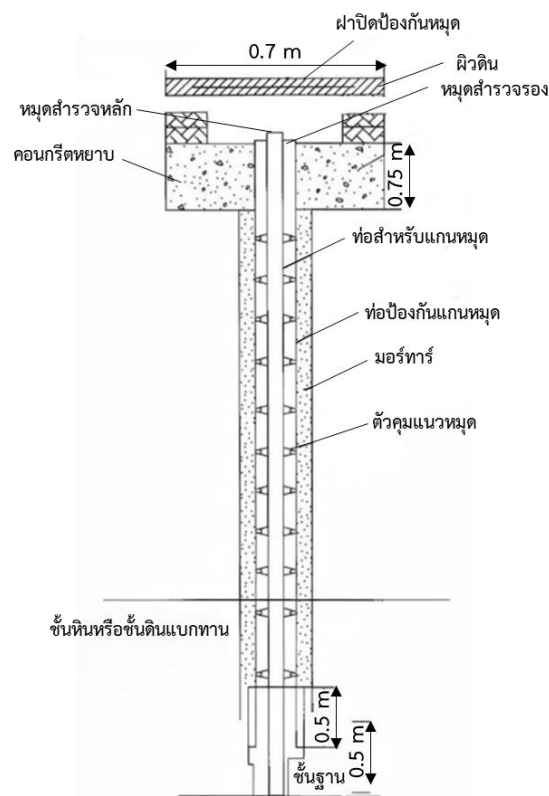
1. ผิวดิน
2. ดินถม
3. คอนกรีต

2.8 ข้อกำหนดในการฝังหมุดระดับบริเวณฐานของกำแพง ต้องเป็นไปตามรายละเอียดที่แสดงในรูปที่ ค.11



รูปที่ ค.11 การฝังหมุดระดับบริเวณฐานของกำแพง (หน่วย mm) (ที่มา “TB 10601-2009”)

2.9 ข้อกำหนดในการฝังหมุดระดับบนชั้นหินดานและหมุดระดับที่ต้องฝังลึกต้องเป็นไปตามรายละเอียดที่แสดงในรูปที่ ค.12



รูปที่ ค.12 การฝังหมุดระดับบนชั้นหินดานและหมุดระดับที่ต้องฝังลึก (ที่มา “TB 10601-2009”)

3 ขนาดของเครื่องหมายบนหมุด และขนาดหมุดที่ใช้ในงานกำหนดแนวสำรวจ

3.1 ขนาดของหัวหมุดรูปสี่เหลี่ยมต้องมีขนาด 40 mm x 40 mm และสำหรับหมุดหัวกลมต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm ความยาวของหมุดต้องอยู่ระหว่าง 300 ถึง 350 mm

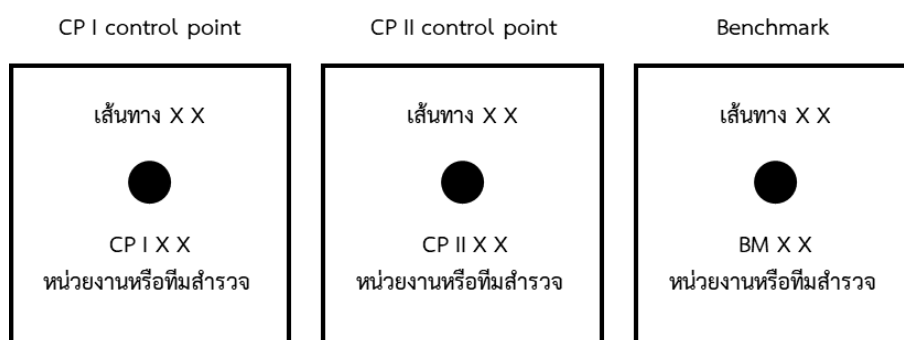
3.2 ขนาดของหมุดสำหรับทำเครื่องหมาย ตำแหน่งและขอบเขตงาน ต้องมีความกว้างระหว่าง 50 ถึง 80 mm มีความหนา 20 mm และมีความยาวระหว่าง 350 ถึง 400 mm

3.3 ขนาดของหมุดแบบแผ่นต้องมีความกว้างระหว่าง 40 ถึง 50 mm มีความหนา 10 ถึง 15 mm และต้องมีความยาวระหว่าง 300 ถึง 350 mm

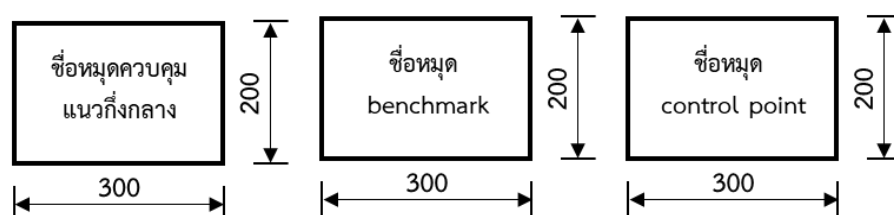
4 การทำเครื่องหมายระบุหมุดควบคุม

4.1 การทำเครื่องหมายระบุหมุดควบคุม CP I, CP II และหมุดระดับ ที่เป็นหมุดคอนกรีตต้องเป็นไปตามรายละเอียดที่แสดงในรูปที่ ค.13 บนผิวหน้าของหมุดคอนกรีตต้องระบุข้อความ ได้แก่ ชื่อแนวเส้นทาง ชื่อหมุดควบคุม ข้อมูลอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง หากหมุดระดับติดตั้งอยู่บนชั้นหินให้ทำสับริเวณหมุดทั้งหมดเป็นสีแดง และกำกับข้อความชื่อแนวเส้นทางและชื่อหมุดควบคุมบนหิน

4.2 การทำเครื่องหมายระบุแนวกึ่งกลาง หมุดระดับ และหมุดควบคุม บริเวณภายในอุโมงค์ต้องทำบนผนังด้านในบริเวณข้างหมุด ดังแสดงในรูปที่ ค.14 ให้ทำสีพื้นหลังภายในกรอบเครื่องหมายด้วยสีขาว และให้เขียน ตัวอักษรและตัวเลข ด้วย สีแดง



รูปที่ ค.13 การทำเครื่องหมายระบุหมุดควบคุม (ที่มา “TB 10601-2009”)



รูปที่ ค.14 การทำเครื่องหมายระบุหมุดภายในอุโมงค์ (หน่วย mm) (ที่มา “TB 10601-2009”)

ภาคผนวก ง.
การบันทึกรายละเอียดหมดควบคุม

X X X รายละเอียดหมวดควบคุม

ชื่อโครงการ

หน้า จำนวนหน้าทั้งหมด

ชื่อหมวด		ชั้นงาน	
แผนที่แสดงตำแหน่งหมวดโดยละเอียด	การฝังหมวด		
	หน่วย : mm		
รายละเอียดตำแหน่ง หมวด			
เส้นทางสำหรับการ เข้าถึงหมวด			
ค่าพิกัดโดยประมาณ	B =		
	L =		
สถานที่ตั้งหมวด			
ประเภทหมวดหลักฐาน			
วัสดุที่ใช้ของหมวด หลักฐาน			
หน่วยงานผู้คัดเลือก ตำแหน่งหมวด		หน่วยงาน ผู้ดำเนินการฝังหมวด	
ผู้คัดเลือกตำแหน่งหมวด		ผู้ทำการฝังหมวด	
วันที่คัดเลือกตำแหน่ง หมวด		วันที่ฝังหมวด	
หมายเหตุ			

ภาคผนวก จ.
บันทึกการส่งมอบสมุดควบคุมงานสำรวจที่จัดทำในพื้นที่ก่อสร้างโครงการ
รถไฟฟ้าความเร็วสูง

โครงการรถไฟฟ้าความเร็วสูง สาย _____ ตอน _____

บันทึกการส่งมอบหมวดควบคุมงานสำรวจที่ได้จัดทำในพื้นที่ก่อสร้าง

ช่วงงานสัญญา _____

(DK _____ + _____ ถึง DK _____ + _____)

วันที่ : (วัน/เดือน/ปี)

ระหว่างวันที่ _____ (วัน/เดือน/ปี) ถึงวันที่ _____ (วัน/เดือน/ปี) โดยการจัดของ หน่วยงาน
ก่อสร้าง ร่วมกับหน่วยงานต่อไปนี้ สถาบันสำรวจ องค์กรควบคุมงาน และองค์กรผู้ก่อสร้าง ได้ดำเนินการส่ง
มอบสมุดควบคุมงานสำรวจที่จัดตั้งไว้ในพื้นที่ก่อสร้างเรียบร้อยแล้วโดยผู้แทนของสถาบันสำรวจได้ส่งมอบสมุด
ควบคุมให้แก่ผู้แทนของหน่วยงานผู้รับมอบ รายละเอียดสรุปดังต่อไปนี้

1. ขอบเขตของการส่งมอบสมุดควบคุม

ช่วงงานสัญญา DK _____ + _____ ถึง DK _____ + _____ ตอน _____

2. หน่วยงานและบุคลากรที่เข้าร่วม

หน่วยงานก่อสร้าง :

(รายชื่อผู้เข้าร่วม)

สถาบันสำรวจ :

(รายชื่อผู้เข้าร่วม)

หน่วยงานควบคุมงาน :

(รายชื่อผู้เข้าร่วม)

องค์กรผู้ก่อสร้าง :

(รายชื่อผู้เข้าร่วม)

3. ตารางรายการสมุดควบคุมที่ส่งมอบ (ดูรายละเอียดในเอกสารแนบ)

4. ชื่อ-ตำแหน่ง-ลายเซ็น และตราประทับของหน่วยงานที่เข้าร่วม และหน่วยงานผู้เป็นพยาน

หน่วยงานผู้ส่งมอบ : ตราหน่วยงาน : ผู้ส่งมอบสมุดควบคุม :

วันที่ : _____

หน่วยงานผู้รับมอบ : ตราหน่วยงาน : ผู้รับมอบสมุดควบคุม :

วันที่ : _____

พยานจากหน่วยงานควบคุมงาน : ตราหน่วยงาน : ผู้เป็นพยาน :

วันที่ : _____

แบบฟอร์มแนบ

ทางรถไฟสาย _____ ตอน _____ (DK _____ + _____ ถึง DK _____ + _____)

แบบบันทึกผลการส่งมอบหมวดควบคุมงานสำรวจที่จัดทำในพื้นที่

[illegible]

ผู้ส่งมอบทั้งหมด

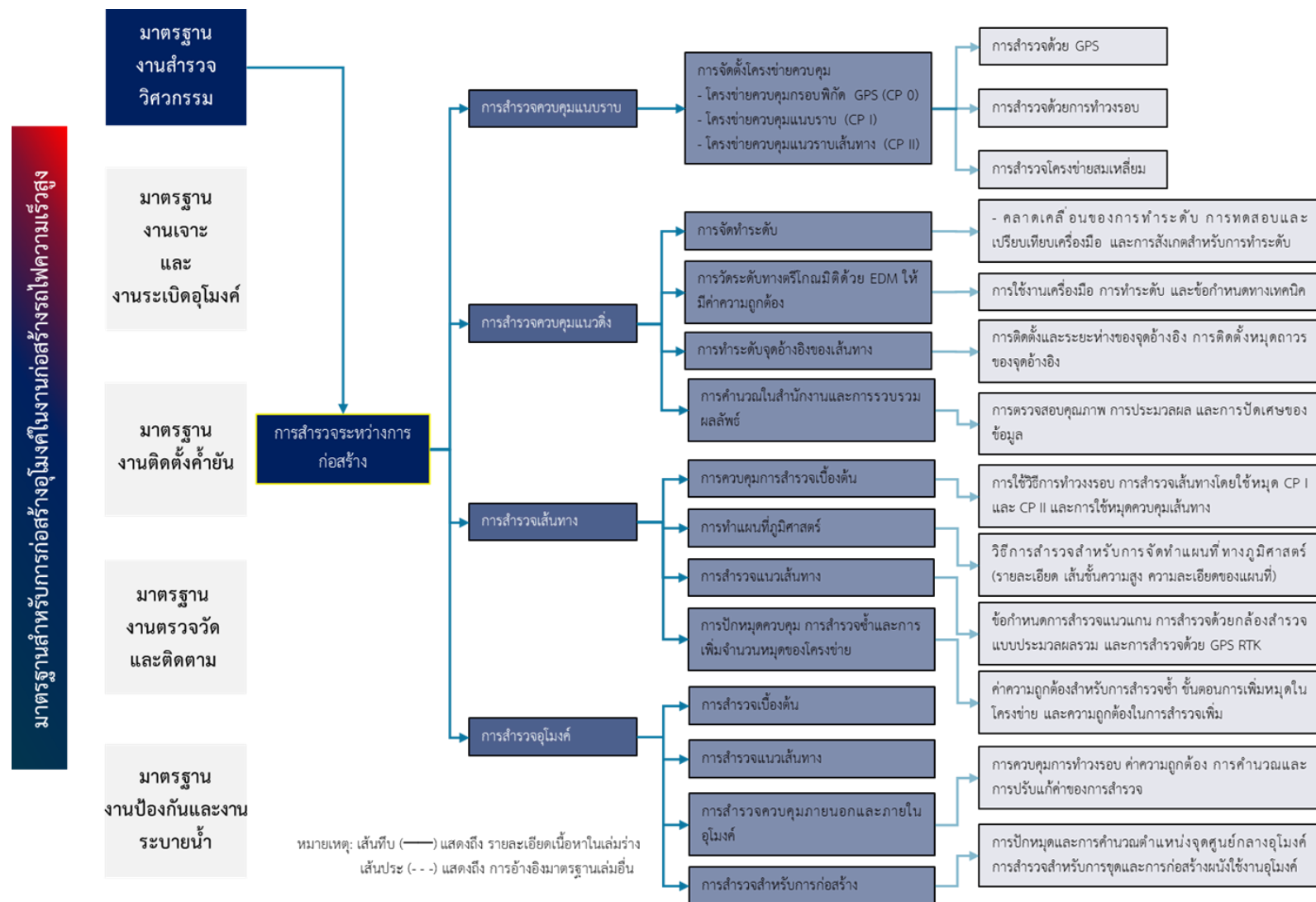
วันที่

ผู้รับมอบหมาย

วันที่

ภาคผนวก ฉ.

แผนภาพแสดงภาพรวมของเล่ม (ร่าง) มาตรฐานงานสำรวจวิศวกรรมในการ
ก่อสร้างอุโมงค์สำหรับโครงการรถไฟฟ้าความเร็วสูง



รูปที่ ๑.1 แผนภาพแสดงภาพรวมของเล่ม (ร่าง) มาตรฐานงานสำรวจวิศวกรรมในการก่อสร้างอุโมงค์สำหรับโครงการรถไฟฟ้าความเร็วสูง



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-Technology-Research-and-Development-Agency)