



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

ในช่วง 10 ปีก่อนนี้ งานก่อสร้างอุโมงค์และขุดใต้ดินในบ้านเราเกิดขึ้นมากมาย และคาดว่าจะเพิ่มขึ้นอีกมากในอนาคตอันใกล้ แต่เป็นความจริงที่ว่า ก่อนหน้านี้เรามีบุคลากรที่รู้ซึ่งในเรื่องดังกล่าวนี้ อย่มาก วิศวกรไทยจึงมักมี บทบาทเป็นเพียงตัวประกอบในโครงการเท่านั้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็น ที่เราจะต้องช่วยกันส่งเสริมการเรียนรู้ และเพิ่มความสามารถให้บุคลากรในบ้านเราให้ทัดเทียมต่างชาติ กลุ่มงานอุโมงค์นี้ เริ่มก่อตั้งขึ้นเมื่อเริ่มแรก จากการที่ประเทศไทยได้เข้าร่วมเป็นประเทศก่อตั้งสมาคมนานาชาติงานอุโมงค์ (ITA) เมื่อเกือบ 30 ปีก่อน โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ซึ่งขณะนั้นเป็นหน่วยงานหลักที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้างอุโมงค์เป็นตัวแทนประเทศไทย ต่อมาในปี 2536 กฟผ. เห็นว่างานอุโมงค์ในบ้านเรามี การขยายเพิ่มขึ้นมากในหลายหน่วยงาน กฟผ. จึงได้โอนความเป็นตัวแทนมาอยู่ที่ ว.ส.ท. ภายใต้ คณะอนุกรรมการวิศวกรรมปฐพี ซึ่งเมื่อได้โอนมาแล้ว กลุ่มส่งเสริมฯ จึงเกิดขึ้นและมีการดำเนินการกิจกรรม ในรูปการจัดการบรรยาย อบรมและเผยแพร่ ข่าวสาร แต่ไม่ก้าวหน้านัก เพราะติดขัดทางด้านบุคลากรที่มีความรู้และข้อขัดข้องอื่น ๆ แต่ ปัจจุบันมีผู้จบการศึกษา ด้านอุโมงค์ ทั้งในและต่างประเทศ และผู้มีประสบการณ์จากการก่อสร้างในโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นหลายท่าน ซึ่งเล็งเห็นความสำคัญของศาสตร์ด้านนี้ จึงได้รวมตัวกันขึ้น เพื่อดำเนินการส่งเสริมในเรื่องดังกล่าวให้มีประสิทธิผลต่อไป คณะอนุกรรมการวิศวกรรมปฐพี ได้จัดอบรมในเรื่องการออกแบบ และเทคนิคการก่อสร้างอุโมงค์ และงานก่อสร้างใต้ดินอื่น การจัดดูงานก่อสร้าง การเผยแพร่ ข่าวสารและเทคโนโลยีใหม่ ๆ ที่น่าสนใจ การดำเนินกิจกรรมของกลุ่มฯ นอกจากจะได้รับความร่วมมือจากผู้เกี่ยวข้องในบ้านเราแล้วเราจะอาศัยการสนับสนุนจาก ITA ซึ่งเราเป็นสมาชิก อีกด้านหนึ่งด้วย ทั้งนี้ เพราะในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีงานก่อสร้างใต้ดินและอุโมงค์ ในโลกก้าวหน้าไปมากอย่างรวดเร็วและมีการแข่งขันกันสูง

การเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ (Shield Tunnelling) เกิดขึ้นเป็นลำเป็นสันในกรุงเทพฯ ครั้งแรก ในโครงการอุโมงค์ส่งน้ำประปาเพื่อประชาชนในปี พ.ศ.2518 โดยมีแนวเส้นทางก่อสร้างอุโมงค์ จากบางเขน - หัวลำโพง - ลุมพินี และลอดข้ามแม่น้ำเจ้าพระยาที่สี่พระยาไปท่าพระ แนวอุโมงค์ส่วนใหญ่

อยู่ในชั้น Stiff Clay การก่อสร้างในขณะนั้น ใช้หัวขุดเจาะแบบเก่า โดยมีระบบตัดดินชนิดหน้างาน หรือบั้งก็ Backhoe การก่อสร้างโดยหัวขุดชนิดนี้จำเป็นต้องมีระบบอัดอากาศ เพื่อป้องกันการพังทลายของดินและน้ำใต้ดินที่หน้าหัวขุดเจาะ นอกจากหัวเจาะแบบธรรมดาแล้ว ยังมีการนำหัวเจาะแบบ Slurry Shield ซึ่งใช้น้ำโคลนยันกันดินทั้งที่หน้าอุโมงค์ มาช่วยการเจาะอุโมงค์บริเวณแยกพงษ์เพชร ซึ่งมีปัญหาหน้าอุโมงค์ในชั้นทรายพัง ส่งผลให้ดินทรุดตัวถึงผิวถนนประชาชนชั้นด้านบน ซึ่งในตอนแรกเจาะด้วยหัวเจาะแบบธรรมดา และอีกครั้งหนึ่ง ในบริเวณลอดแม่น้ำเจ้าพระยา ที่สี่พระยา โครงการอุโมงค์ส่งน้ำระยะแรกของการประปานครหลวง ทำการก่อสร้างตั้งแต่ปี พ.ศ. 2519 สิ้นสุดในปี พ.ศ.2522 ทำการก่อสร้างด้วยกลุ่มบริษัท I.O.N. เป็นกลุ่มแรกที่เข้ามาดำเนินการก่อสร้าง โดยใช้หัวขุดเจาะอุโมงค์ประเภท Semi Mechanical Shield (Open Type Shield) รวมระยะทางทั้งสิ้น 24.45 กม. อุโมงค์มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.00 ม.ถึง 3.40 ม. ดาดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก อุโมงค์ชุดแรกนี้ มีปัญหาเกิดการรั่วซึมของน้ำในบางจุด จึงไม่สามารถส่งน้ำด้วยความดันที่เต็มที่ได้

โครงการในระยะที่ 2 เป็นส่วนต่อขยาย จากลุมพินีถึงสุขุมวิท 40 และจากประดิพัทธ์ถึง โรงสูบน้ำชลโยธินที่สุทธิสาร วิธีการก่อสร้างคล้ายกับการก่อสร้างอุโมงค์ในระยะแรก แตกต่างกันที่มีการใช้หัวขุดเจาะแบบคนขุดแทนการใช้เครื่องกัดหน้าดิน และมีการสอดท่อเหล็กเป็นดาดอุโมงค์ถาวร (Secondary Lining) ป้องกันปัญหาน้ำรั่วซึม แทนการใช้ดาดคอนกรีตเสริมเหล็ก งานก่อสร้างนี้สร้างเสร็จในปี พ.ศ.2526 อุโมงค์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 – 2.5 เมตร

ต่อมาการประปานครหลวงได้เปลี่ยนแปลงนโยบายการก่อสร้างจากระบบอุโมงค์ เป็นการวางท่อเหล็กขนาดใหญ่เป็นอุโมงค์ ด้วยวิธีการขุดเปิดหน้าดินและกันดินถล่มด้วย Sheet Piles แทน ถึงแม้ว่าราคาค่าก่อสร้างจะถูก แต่ต้องประสบปัญหาถนนและอาคารข้างเคียงในบางพื้นที่ทรุดเสียหายเป็นจำนวนมาก การประปานครหลวงจึงวางนโยบาย ใช้เฉพาะการขุดเจาะอุโมงค์ในพื้นที่ชุมชน ในโครงการต่อจากนั้นมา

การก่อสร้างอุโมงค์ในระยะที่ 3 เป็นอุโมงค์ จากแยกราชดาสุทธิสาร ถึงโรงสูบน้ำชลโยธิน เพื่อบรรจบอุโมงค์ ระบบท่อส่งน้ำกับอุโมงค์ส่งน้ำในระยะแรก วัตถุประสงค์เพื่อจ่ายน้ำผ่านทางอุโมงค์ระบบท่อเข้าโรงสูบน้ำชลโยธินแทนอุโมงค์ในระยะที่ 1 เพื่อสามารถปิดซ่อมอุโมงค์ส่งน้ำระยะที่ 1 โดยการสอดท่อเหล็ก งานก่อสร้างยังคงใช้หัวขุดชนิด Backhoe พร้อมกับระบบอัดอากาศ ก่อสร้างเสร็จในปี 2534 อุโมงค์ มีขนาด 2.0 ม. ยาว 2.2 กม. ในโครงการ มี การติดตั้ง Inclinomater และ Extensometer รวมทั้ง Settlement Array วัดการเคลื่อนตัวของดินในงานอุโมงค์เป็นครั้งแรก

ในโครงการต่อมา เป็นโครงการก่อสร้างอุโมงค์ส่งน้ำ เชื่อมระหว่างถนนศรีนครินทร์ถึงถนนร่มเกล้า เลียบทางรถไฟ มีความยาว 11 กม. อุโมงค์ขนาด 2.0 เมตร มีการใช้หัวขุดเจาะแบบ EPB เป็นครั้งแรก หัวขุดเจาะ EPB ที่ใช้เป็นแบบ Dual Mode คือ สามารถเลือกใช้แบบ open face หรือ

EPB ได้ แล้วแต่สภาพดิน แนวอุโมงค์ส่วนใหญ่ อยู่ในชั้น Stiff Clay ส่วนใหญ่จึงเจาะแบบ open face ก่อสร้างระหว่างปี 2538 ถึงปี 2541 ในโครงการมีการทำ Full Instrumentation Section ศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนตัวของดินแบบครบทั้งระบบเป็นครั้งแรก ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ส่งน้ำเชื่อมระหว่างโรงสูบบางเขน ไปมินบุรีซึ่งเพิ่งสร้างแล้วเสร็จ มีงานเจาะอุโมงค์ ความยาวรวม 23.5 กม. อุโมงค์มีขนาด 2.0 – 3.4 เมตร งานเจาะใช้ หัวเจาะแบบ EPB ทั้งหมด 6 ตัว

การใช้ประโยชน์ของอุโมงค์มีประวัติความเป็นมายาวนานกว่า 60,000 ปีแล้ว สิ่งที่ควบคู่ไปกับการดำเนินการก่อสร้างอุโมงค์คือ ลักษณะทางธรณีวิทยาของบริเวณนั้น ความรู้ทางธรณีวิทยาและธรณีเทคนิค สำหรับประเทศไทยมีโครงการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินเพิ่มขึ้น ปัญหาจากการก่อสร้างอุโมงค์การใช้พื้นที่ใต้ดินย่อมตามมามากมายในอนาคต เราจึงควรเร่งศึกษาเทคนิคและวิธีการก่อสร้างใหม่ ๆ ให้สามารถทัดเทียมกับอารยประเทศ

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1. ประวัติความเป็นมาเกี่ยวกับงานอุโมงค์ในต่างประเทศ

การพัฒนาอารยธรรมของอารยชนต่างๆ ซึ่งในสมัยก่อนมนุษย์เราได้อาศัยถ้ำเป็นที่อยู่อาศัยจากหลักฐานประวัติศาสตร์ที่ประเทศออสเตรีย มีอายุ 40,000 ปี ก่อนคริสต์ศักราช ภายในอุโมงค์เก่าแก่ บางแห่งใช้เป็นแหล่งอ้างอิงทางประวัติศาสตร์ได้ดี เพราะมาภาพเขียน และลายลักษณ์อักษรโบราณต่อมามนุษย์มีความต้องการวัตถุหิน เช่น เหล็ก ทองแดง เพื่อพัฒนาประเทศ ได้มีการขุดอุโมงค์เพื่อการทำเหมืองแร่ขึ้นเมื่อ 3,000 ปี ก่อนการพัฒนาเทคนิคความรู้ในการก่อสร้างอุโมงค์ส่วนหนึ่ง ได้รับแรงผลักดันมาจากความต้องการ ในงานด้านอุตสาหกรรมที่พัฒนาขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกี่ยวกับการขนส่งเพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรมมีการพัฒนาขุดเจาะอุโมงค์อย่างต่อเนื่อง ในช่วงของการปฏิวัติอุตสาหกรรม ในประเทศอังกฤษ (คริสต์ศตวรรษที่ 18-19) อุโมงค์ได้ถูกสร้างขึ้นมาอย่างมาก สำหรับการคมนาคม ในรูปของอุโมงค์รถไฟเพื่อแก้ปัญหาด้านวิศวกรรมเมื่อทางรถไฟต้องวิ่งผ่านสิ่งกีดขวาง เช่น ภูเขาสูง การก่อสร้างอุโมงค์ลอดใต้ภูเขา จึงเกิดขึ้นเพื่อลดทั้งอันตรายและเวลาเดินทาง อุโมงค์ระบายน้ำขนาดใหญ่ ชื่อ The Soughs ที่ Hill Carn, Derbyshire ประเทศอังกฤษสร้างขึ้น ปี ค.ศ. 1766-1787 มีความยาวถึง 7 กิโลเมตรความรู้ความเข้าใจจากประสบการณ์ครั้งนั้นได้นำไปใช้ ในการพัฒนาอุโมงค์ส่งน้ำยาวถึง 70 กิโลเมตร ที่เมือง Worsley. ในยุคนั้นการทำเหมืองแร่ที่มีแหล่งแร่ลึกมากๆ ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ คือ การเจาะอุโมงค์หรือระบบของอุโมงค์เข้ามาใช้ในการผลิตแร่ และ ระบบค้ำยันที่นำมาใช้ให้สอดคล้องกับสภาพทางโดยสร้างธรณีวิทยาของหินนั้นในอเมริกาได้มีการทำเหมืองแร่โดยการเจาะอุโมงค์ได้ลึกถึง

4 กิโลเมตร นับเป็นอุโมงค์ที่ลึกที่สุดในโลกในขณะนี้ สำหรับอุโมงค์สำหรับการคมนาคมได้มีการก่อสร้างลอดแม่น้ำ ทะเลสาบ และทะเล ในการก่อสร้างอุโมงค์ ได้พิสูจน์ให้เห็นถึงความสำคัญ ตารางที่ 2.1 แสดงประวัติของการเจาะด้วยเครื่องมือง่ายๆ เช่น หิน ไม้ เหล็ก ไปจนถึงการใช้วัตถุระเบิดและเครื่องจักรกลที่ทันสมัย ประสบการณ์และทักษะของมนุษย์ได้ถูกพัฒนา และถ่ายทอดจากคนรุ่นหนึ่งไปสู่คนรุ่นหนึ่งอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน

จากนี้ที่มนุษย์สามารถเจาะอุโมงค์ในหินที่แข็งมากได้ ไม่ได้หมายความว่าในชั้นดินอ่อนนั้น มนุษย์ไม่มีการพัฒนาเต็มรูปแบบ สำหรับชั้นดินที่อ่อนและมีน้ำใต้ดิน มนุษย์ได้เริ่มมีการพัฒนาเต็มรูปแบบ สำหรับชั้นดินที่อ่อนและมีน้ำใต้ดิน มนุษย์ได้เริ่มพัฒนาเครื่องเจาะอุโมงค์ในช่วง 50 ปี ที่ผ่านมา มีเครื่องเจาะอุโมงค์ในดินอ่อน หลายชนิดพร้อมเทคนิคต่าง ๆ ของเครื่องเจาะอุโมงค์ในชั้นดินอ่อน

ตารางที่ 2.1 แสดงประวัติของการเจาะอุโมงค์ในอดีตที่ผ่านมา

ระยะเวลา	การพัฒนาอุโมงค์	ความยาวของอุโมงค์	ขนาดของอุโมงค์
ช่วงที่ 1 (BC) ก่อนคริสตกาล			
40000	การทำเหมืองแร่เฮมาไทต์ในสมัยดึกดำบรรพ์ เพื่อใช้เป็นเครื่องประดับที่ประเทศสวิตเซอร์แลนด์	หลายขนาด	-
15000-10000	การทำเหมืองแร่ใต้ดินที่ Grimes Graves, East Anglina	> 10 m.	-
3000-1000	อุโมงค์หินเกี่ยวกับเหมืองแร่, หลุมศพ และวัดที่ประเทศอียิปต์	หลายขนาด	-
2000-20th C	อุโมงค์เหมืองแร่เหล็กที่ประเทศกรีซ	หลายขนาด	-
2000	อุโมงค์ลอดแม่น้ำยูเคติสและอุโมงค์ลอดแม่น้ำบาบิโลน	1 km.	3.6 x 4.5 m.
700	อุโมงค์ shilloah	540 m.	-
700	อุโมงค์ส่งน้ำในเยรูซาเลม	200 m.	7 x 7 m.
600	อุโมงค์ส่งน้ำที่เกาะ Samos, ประเทศกรีซ	1.5 km.	1.8 x 1.8 m.

ระยะเวลา	การพัฒนาอุโมงค์	ความยาวของอุโมงค์	ขนาดของอุโมงค์
ช่วงที่ 2 AD (คริสตกาล)			
50	อุโมงค์ถนนลอด Posilopo ที่กรุงโรม	900 m.	กว้าง 7.5 m.
500-1500	อุโมงค์เพื่อการทหาร	หลายขนาด	-
700-20th C	เหมืองแร่โลหะใต้ดินขนาดใหญ่ในยุโรป	5.6 km.	-
1627	การขุดเจาะอุโมงค์เหมืองแร่โดยใช้ดินปืนที่ประเทศอังกฤษ	หลายขนาด	-
1679	อุโมงค์เดินเรือโดยใช้การระเบิดหินด้วยดินปืนประเทศฝรั่งเศส	หลายขนาด	-
1826-1829	อุโมงค์รถไฟขับเคลื่อนไอน้ำ สาย LIVERPOOL-MANCHESTER ประเทศอังกฤษ	หลายขนาด	-
1842	อุโมงค์ลอดแม่น้ำเทมส์	150 m.	6.7 x 11.3 m.
1857-1871	อุโมงค์รถไฟเชื่อมฝรั่งเศสถึงอิตาลี มีการใช้เครื่องเจาะระบบไฮดรอลิกเจาะหินเป็นครั้งแรก	12.7 km.	8 x 7.5 m.
1872-1881	อุโมงค์ St.Gotthard	15 km.	8 x 7.4 m.
1895-1921	อุโมงค์ Simplon	19.7 km.	5 x 5.4 m.
1906-1912	อุโมงค์ Loetschberg การทำอุโมงค์รถไฟตัดภูเขาประสบปัญหาการไหลของน้ำอย่างรุนแรง	16 km.	8 x 6.1 m.
1918-1934	อุโมงค์ Tanna ที่ญี่ปุ่นมีปัญหาใหญ่ของทรุดของเพดานอุโมงค์สูงถึง 60 m. และการทะลักไหลของน้ำเข้าอุโมงค์ มีความดันน้ำถึง 200 m. และอุณหภูมิของน้ำสูงกว่า 30 องศา ใช้คอนกรีต หนาถึง 2 m. สำหรับ lining เพดาน	7.8 km.	8.4 x 5.8 m.
1925-1934	อุโมงค์ Mersey Liverpool เป็นอุโมงค์ถนนลอดใต้น้ำ 4 ช่องทางจราจร	3.4 km.	φ 14 m.
1959-1965	อุโมงค์ Mont Blanc เป็นอุโมงค์ทางหลวงที่ยาวที่สุด	12.7 km.	9 x 12.5 m.
1964-1988	อุโมงค์ SeiKan ที่ญี่ปุ่นทำอุโมงค์โดยใช้การเจาะและวัตถุระเบิด และการทะลักไหลของน้ำเข้าอุโมงค์ 11 ลิตร/นาที่	53.8 km.	5 x 4.2 m.
1968-1974	อุโมงค์ Orange Fish ที่แอฟริกาใต้ มีปัญหาน้ำท่วมและเกิดติดไฟของแก๊สมีเทนในอุโมงค์	82.5 km.	φ 5.4 m.
1986-1992	อุโมงค์รถไฟเชื่อมฝรั่งเศสถึงอังกฤษใช้เครื่องเจาะระบบ TBM	50.5 km.	φ 7.6 m.

2.2.2. ประวัติความเป็นมาเกี่ยวกับงานอุโมงค์ในประเทศไทย

อุโมงค์เป็นโครงสร้างที่อยู่ใต้ดิน มนุษย์ได้สร้างขึ้นมาเพื่อให้การคมนาคมและการขนส่ง สะดวก รวดเร็วปลอดภัยขึ้น ไม่ว่าจะสภาพภูมิอากาศจะเป็นอย่างไร เช่น การสร้างอุโมงค์ลอดภูเขา แม่น้ำ ทะเลสาบ และเมืองใหญ่ที่มีปัญหาการจราจรผิวดินมนุษย์รู้จักนำทรัพยากรธรณี เช่น แร่เหล็ก ทอง ทองแดง เงิน และแร่อื่นขึ้นมาใช้ประโยชน์โดยการเจาะอุโมงค์ เป็นเส้นทางนำแร่ออกมาจากแหล่งแร่ต่างๆ ตารางที่ 2.2 ที่ให้เห็นถึงชนิดของอุโมงค์และการใช้ประโยชน์

ตารางที่ 2.2 ชนิดของอุโมงค์และการใช้ประโยชน์

ชนิดของอุโมงค์	การใช้ประโยชน์
1. อุโมงค์เพื่อการคมนาคม	1. อุโมงค์ทางรถไฟ 2. อุโมงค์ทางหลวงหรือทางเชื่อมระหว่างถนน 3. อุโมงค์ขนส่งรถไฟฟ้าใต้ดิน
2. อุโมงค์เพื่อการขนส่ง	1. อุโมงค์ส่งน้ำประปา 2. อุโมงค์น้ำเสีย 3. อุโมงค์ที่ใช้ขนส่งลำเลียงในโรงงานอุตสาหกรรม
3. อุโมงค์เพื่อการทำเหมืองแร่	1. อุโมงค์ระบายอากาศ 2. อุโมงค์ระบายอากาศ 3. อุโมงค์สำหรับสำรวจแร่และหิน 4. อุโมงค์ระบายน้ำออกจากบ่อเหมือง
4. อุโมงค์เพื่อประโยชน์อื่นๆ	1. อุโมงค์ส่งน้ำและทำเป็นสถานีกำเนิดไฟฟ้า 2. อุโมงค์สำหรับวางสายไฟฟ้า สายโทรเลข และโทรศัพท์ 3. อุโมงค์หนัภัย 4. อุโมงค์เพื่อการทดลอง วิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์

ความรู้ทางธรณีวิทยาเป็นพื้นฐานความเข้าใจพฤติกรรมของ ดิน หิน และน้ำใต้ดินที่มีอิทธิพลต่อการเจาะอุโมงค์ การเลือกใช้เครื่องจักร การเลือกใช้ระบบค้ำยันการรักษาความปลอดภัยภายในอุโมงค์ได้ใช้ลักษณะทางธรณีวิทยาของบริเวณที่ เจาะอุโมงค์เป็นตัวกำหนด ดังนั้น การสำรวจทางธรณีวิทยาที่ถูกต้อง จึงเป็นสิ่งแรกที่เราจะต้องกระทำ และข้อมูลที่ได้ต้องถูกต้อง หากได้ข้อมูลที่คาดเคลื่อน ผลการออกแบบคำนวณจะผิดพลาดก่อให้เกิดความเสียหายได้ ดังนั้นดังนั้นควรจะศึกษาแนวการขุดเจาะของอุโมงค์ให้ดีที่สุดเพื่อให้เราสามารถวางแผนแก้ไขปัญหาที่จะเกิดขึ้นล่วงหน้าได้

ในปัจจุบันอุโมงค์ ได้เข้ามามีบทบาทเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของเรามากขึ้น การเจริญเติบโตของเมืองใหญ่ บางครั้ง ทำให้การก่อสร้างบนดินไม่สามารถทำได้สะดวก หรือไม่เหมาะสม การก่อสร้างใต้ดินจึงเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งสำหรับการก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเขตกรุงเทพมหานคร การก่อสร้างใต้ดินเป็นงานที่ได้รับการกล่าวถึงมากกว่ามีความเหมาะสม ดังจะเห็นว่า มีโครงการก่อสร้างใต้ดินมากมาย เช่น โครงการก่อสร้างอุโมงค์ที่รับน้ำเสียใต้ดิน ของสำนักงานระบายน้ำกรุงเทพมหานคร รวมถึง 6 โครงการโครงการก่อสร้างอุโมงค์ ส่งน้ำประปาของ กปน. โครงการอุโมงค์สำหรับวางสายไฟฟ้า สายโทรเลข และ สายโทรศัพท์ อุโมงค์ทางลอดตามสี่แยกที่มีการจราจรแออัด เช่น สี่แยกบางพลัด สามแยกดินแดง วงเวียนอนุสาวรีย์หลักสี่ อุโมงค์กัลปพฤกษ์แยกมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สี่แยกมไหสวรรค์ สี่แยกท่าพระ และ โครงการก่อสร้างระบบขนส่งมวลชนขนาดใหญ่ อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินของ รฟม. ซึ่งได้เริ่มดำเนินการไปแล้ว โครงการก่อสร้างอุโมงค์ตามต่างจังหวัด เช่น อุโมงค์ที่ทำเป็นสถานีกำเนิดไฟฟ้าระบบสูบกลับของ กฟผ. ที่ลำตะคอง จ. นครราชสีมาและอุโมงค์การทำเหมืองแร่โปแตชของบริษัท โปแตชแห่งอาเซียน ที่ อ.บำเน็จณรงค์ จ. ชัยภูมิ

ในปัจจุบันมีโครงการก่อสร้างอุโมงค์ที่กำลังดำเนินการก่อสร้าง ดังต่อไปนี้

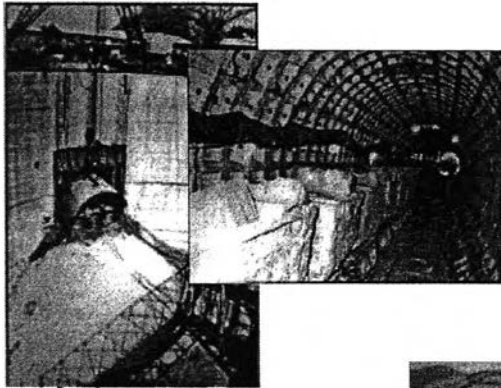
- อุโมงค์ส่งน้ำเข้าโรงไฟฟ้าคลองทุ่งเพล จันทบุรี ขนาดกว้าง 3 เมตร ยาว 6 กิโลเมตร
- อุโมงค์ส่งน้ำการประปานครหลวง ทับช้าง-บางพลี ยาว 17 กิโลเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เมตร
- อุโมงค์ส่งน้ำการประปานครหลวง คลองราชมนตรี-ถนนพระราม 2-ราษฎร์บูรณะ ยาว 6 กิโลเมตร
- อุโมงค์ระบายน้ำคลองลาดพร้าว-พระโขนง ยาว 5.2 กิโลเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เมตร
- อุโมงค์ลอดทางแยกในเขต กทม. จำนวน 4 แห่ง
- อุโมงค์ลอดทางแยกถนนวงแหวนเชียงใหม่ 7 แห่ง



อุโมงค์รถไฟขุนทด ลำพูน



อุโมงค์รอนด์ อ่ามอเบตง



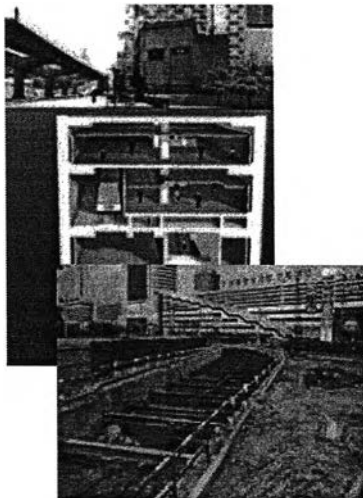
อุโมงค์ระบายน้ำ กทม. พระราม 4
(งานแรกของกรุงเทพฯ)



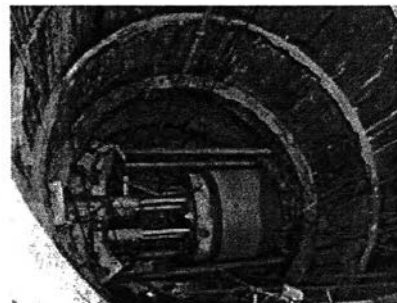
อุโมงค์ระบายน้ำสันเขื่อนสิริกิติ์



โรงไฟฟ้าใต้ดินและอุโมงค์ที่ลำตะคอง



สถานีและอุโมงค์รถไฟท่า รทม. ด้วย วิธี Cut-Cover

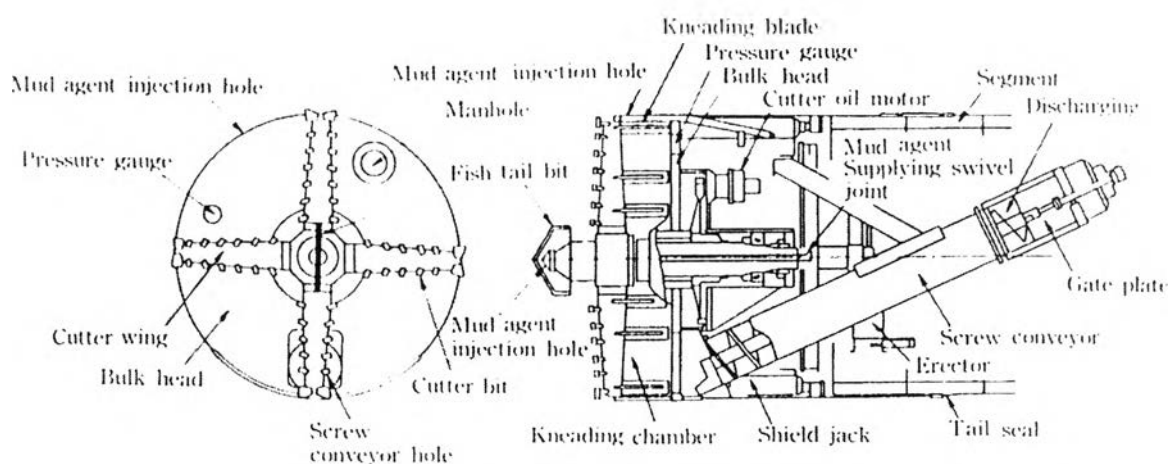


งานต้นท่อกุโมงค์โครงการจัดการน้ำเสี่ย กทม.

รูปที่ 2.1 ภาพแสดงประวัติการพัฒนางานก่อสร้างอุโมงค์ในประเทศไทย

2.2.3. ประวัติและการขุดเจาะโดย Earth Pressure Balance Shield

Earth Pressure Balance Shield ถูกนำมาใช้ครั้งแรกในงานก่อสร้างอุโมงค์น้ำเสียในเมืองโตเกียว โดยบริษัท Sato Kogyo Company ในประเทศญี่ปุ่น เมื่อปี ค.ศ.1974 โดยเทคนิคดังกล่าวนี้เหมาะสมกับดินเหนียวหรือดินที่มีแรงยึดเหนี่ยว มี Plasticity พอสมควร และ Permeability ต่ำ ในกรณีที่คุณสมบัติของดินก่อให้เกิดอุปสรรคในการให้ทำหน้าที่เป็นส่วนค้ำยัน จะเติม Betonies หรือ foam หรือ polymer หรือ Super plasticizer (เช่น Paper Micro Fiber, PMF เป็นส่วนผสมของกระดาษเก่าผสมซีเมนต์ลอย) หรือ additives เพิ่มเข้าไป แต่อาจจะก่อให้เกิดปัญหาด้านค่าใช้จ่ายที่เพิ่มมากขึ้น ระบบ Earth Pressure Balance ใช้พื้นที่ในการทำงานน้อยกว่า Slurry Shield มาก ด้วยเหตุนี้จึงเหมาะกับการใช้ขุดเจาะอุโมงค์ในบริเวณที่มีสถานที่แคบ หรือในบริเวณชุมชนหนาแน่นในตัวเมือง ดังรูปที่ 2.2



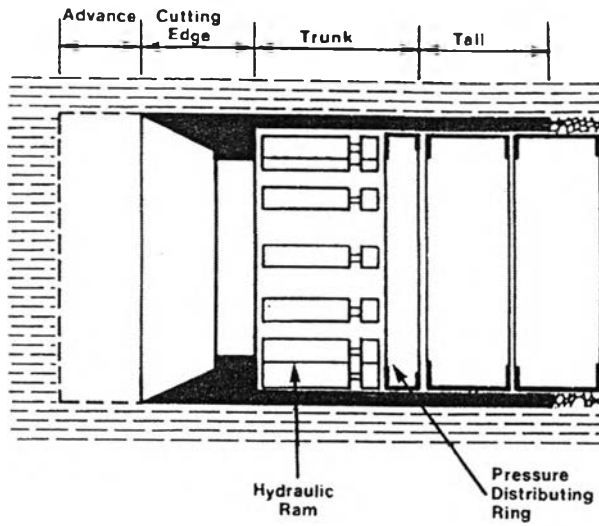
รูปที่ 2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการขุดเจาะอุโมงค์ระบบ Earth Pressure Balance Shield

หลักการทำงานของเครื่องขุดเจาะประเภทแรงดันดินสมดุลคือ ปล่อยให้ดินที่ถูกตัดโดย cutter ผ่านเข้าสู่ Chamber ดินที่ถูกขุดเจาะจะไม่ตกลงใน Excavation Chamber แต่จะถูกผสมด้วย Plastic earth slurry ในสภาพที่มีความดันเพื่อให้ทำหน้าที่ค้ำยันดินหน้าอุโมงค์ ความดันของดินหน้าอุโมงค์ถูกควบคุมด้วยอัตราของการขุดเจาะดินหรือการเคลื่อนตัวของ Shield และอัตราของดินที่ถูกขับออกมาด้วย Screw Conveyor แรงผลักดันมาจากแรงผลักรอง Shield Jack กระจายผ่าน Bulk Head เข้าสู่มวลดินใน Chamber โดยทั่วไปแรงผลักดันที่เกิดขึ้นกับดินใน Chamber จะเรียกว่า Face Pressure นอกเหนือไปจากนั้น ดินบริเวณด้านหน้าอุโมงค์ที่ถูกอัดและลำเลียงออกมาด้วย Screw Conveyor จะถูกตรวจสอบความดันด้วย Earth Pressure Cell ตลอดทุกขั้นตอน แรงดันที่เกิดขึ้น จะต้องเพียงพอเพื่อทำการค้ำยันดินด้านหน้าอุโมงค์ได้อย่างปลอดภัย เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าความดันของดินจะไม่มากเกินไป จนอาจทำให้เกิด Soil heave หรือน้อยเกินไปจนทำให้เกิด

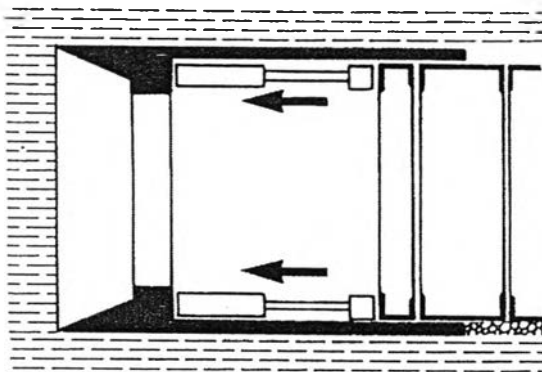
Ground Settlement อีกทั้งยังต้องการมีการตรวจสอบปริมาณของดินที่ถูกขับออกมาจาก Screw Conveyor ให้มีปริมาณที่เหมาะสมและสอดคล้องกันกับ Advance Rate ของหัวเจาะอุโมงค์

ในการรักษาเสถียรภาพด้านหน้าอุโมงค์โดยอาศัยแรงดันจาก Face Pressure ให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ จะต้องทำการรักษาแรงดันนี้ตลอดเวลาขณะที่หัวเจาะเคลื่อนมีชุดเจาะดิน ด้วยการปรับอัตรายึดตัวของ Hydraulic Jacks (Shield /Jacks Speed) และอัตราการลำเลียงดินออกจาก Chamber (Discharging Rate of Screw Conveyor) การเคลื่อนตัวของดินบริเวณหน้าอุโมงค์ผ่าน Chamber และลำเลียงออกโดยอาศัย Screw Conveyor จะต้องมีความราบรื่นเป็นไปอย่างต่อเนื่อง

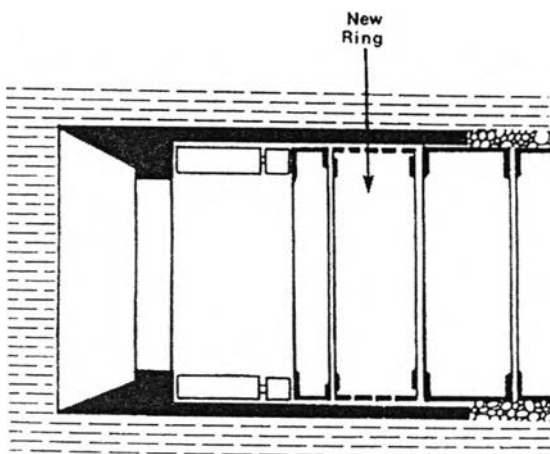
เมื่อดำเนินการชุดเจาะจนมีพื้นที่ด้านหลังหัวเจาะ เพียงพอสำหรับติดตั้งชิ้นส่วนผนังอุโมงค์แล้ว จะเริ่มทำการติดตั้ง Segment ดังรูปที่ 2.3 Segment Crane จะยก Segment ซึ่งเป็นคอนกรีตมาทำการประกอบที่ละชิ้น จากด้านล่างไปสู่ด้านบน จากนั้นจะทำการประกอบ Key Segment เมื่อประกอบครบเป็นวงแล้วจะทำการยึดชิ้นส่วน Segment ด้วยสลักเกลียวรูปตัวยู (Curve Bolt) จากนั้นทำการฉีดน้ำปูน (Grouting) บริเวณด้านบนของผนังอุโมงค์ เพื่ออุดช่องว่างที่เกิดจากการ Tail Void จากนั้นหัวเจาะจะถีบตัวออกไปข้างหน้าโดยอาศัย Segment เป็นตัวรับแรงถีบ เมื่อหัวเจาะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า Segment จะเป็นตัวรับแรงภายนอกที่กระทำต่ออุโมงค์



(i) Ground excavation in preparation for shield advance



(ii) Shield advanced by rams pushing against tunnel lining via a pressure distribution ring



(iii) Retraction of pushing rams and erection of next ring of segmental support

รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการติดตั้ง Segment (Sketchy, 1979)

2.2.4 ผนังอุโมงค์ (Lining)

ผนังอุโมงค์โดยปกติจะแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ Primary Lining กับ Secondary Lining เป็นโครงสร้างค้ำยันรับแรงโดยตรงจากแรงภายนอกที่อยู่โดยรอบ การออกแบบและการก่อสร้างจะต้องให้ความสำคัญเป็นพิเศษเพื่อให้มีความแข็งแรงและคงทน

Hamamoto (1992) ได้เสนอแนะว่า แรงภายนอกที่กระทำกับอุโมงค์เกิดจากแรงดันและแรงดันน้ำ โดยแรงดังกล่าวจะกระทำกับ Primary Lining ในลักษณะโดยรอบ และจะมีการกระจายน้ำหนักเกิดแรงขึ้นระหว่าง Primary และ Secondary Lining

2.2.4.1 Primary lining จะก่อสร้างขึ้นบริเวณ ส่วนท้ายของหัวเจาะ Shield โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นชิ้นส่วน (Segment) ปลาย ๆ ขึ้นตั้งแต่ 5 ถึง 7 ชิ้นใน 1 วง (Ring) มีความกว้าง 0.5 m. ถึง 1.2 m. ชิ้นส่วนผนังอุโมงค์จะทำขึ้นจากโรงงาน หลังจากนั้นจะทดสอบให้ได้มาตรฐาน และลำเลียงมายังสถานที่ก่อสร้าง การประกอบจะยึดชิ้นส่วนต่างๆ เข้ากันด้วย Bolt โดย Primary Lining ชนิดต่าง ๆ ได้แก่

a) Reinforce Concrete Segments เป็นรูปแบบที่ใช้กันมานาน โดยปกติจะใช้ในอุโมงค์ขนาดใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 4-5 m.) จะประหยัดเมื่อขนาดของอุโมงค์มีขนาดใหญ่ขึ้น มีอายุการใช้งานนาน สามารถต้านทานการสึกกร่อน และทนความร้อนได้ดี แต่เนื่องจากน้ำหนักค่อนข้างมากรวมถึงรอยต่อค่อนข้างไม่แข็งแรง จึงมีแนวโน้มเกิดการเสียรูปค่อนข้างมาก

b) Steel Segments โดยทั่วไป จะใช้กับอุโมงค์ที่มีขนาดเล็กจนถึงขนาดกลาง ชิ้นส่วนต่างๆ จะถูกยึดเข้าด้วยกันด้วยการเชื่อมและยึดอีกครั้งด้วยแผ่นเหล็ก เนื่องจาก Steel Segments มีน้ำหนักค่อนข้างเบาจึงง่ายต่อการประกอบและขนย้าย เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น อาจทำให้มีราคาสูงกว่า Concrete Segments การต้านทานการสึกกร่อนไม่ดีเท่าที่ควร และมีปัญหา Strain และ Residual Stress จากการเชื่อม

c) Composite Segments ดาดอุโมงค์ชนิดนี้จะเป็นการประกอบขึ้นจากการนำแผ่นเหล็ก (Steel Plate) ประกบทั้งสองด้านของ Reinforce Concrete Segments และยึดเข้าด้วยกัน เมื่อเปรียบเทียบกับ Concrete Segments แล้วจะมีความแข็งแรงกว่าและทำให้ความหนาของอุโมงค์ลดลง แต่จะมีปัญหาจากการสึกกร่อน และรอยต่อไม่ค่อยแข็งแรงนัก

2.2.4.2 Secondary Lining เป็นโครงสร้างที่เสริมเข้าไป โดยจะอยู่ด้านในของ Primary Lining โครงสร้างของผนังอุโมงค์จะมีได้ทั้งที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก หรือท่อเหล็ก ประโยชน์คือทำให้ผิวด้านในของอุโมงค์เรียบขึ้น ป้องกันน้ำและการสึกกร่อน และต้านทานแรง เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่เกิดขึ้นกับอุโมงค์ ความหนาขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการออกแบบ ความสามารถ

ทำงานได้ (Workability) ถ้าเป็นคอนกรีตจะหนาประมาณ 15 ถึง 30 เซนติม. ในกรณีที่เป็นท่อสำเร็จ การติดตั้งจะทำการดันให้เลื่อนเข้าไปในอุโมงค์

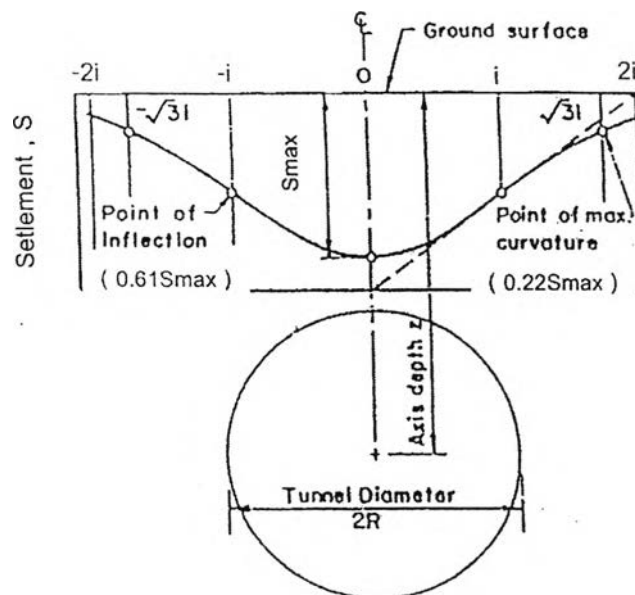
2.2.5. การคาดคะเนค่าการทรุดตัวของดินในงานจุดเจาะอุโมงค์

2.2.5.1 คาดคะเนการทรุดตัวที่ผิวดินเหนืออุโมงค์

Peck (1969) พบว่าการทรุดตัวของดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์นั้น จะมีลักษณะคล้ายกับรูปประฆังหงาย เหมือนรูปร่างของ โค้งการแจกแจงความถี่แบบปกติ (normal probability) โดยสามารถหาการทรุดตัวที่ผิวดิน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ดังสมการที่ 2.1

$$S = S_{\max} \exp\left[-\frac{x^2}{2i^2}\right] \quad (2.1)$$

- เมื่อ S คือ ปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินที่ระยะ x ใด ๆ นับจากจุดศูนย์กลางของแนวอุโมงค์
 S_{\max} คือ ปริมาณการทรุดตัวมากที่สุดที่จุดศูนย์กลางของอุโมงค์
 x คือ ระยะทางตามขวางในแนวราบจากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์
 i คือ ระยะจากแนวกึ่งกลางของอุโมงค์ถึงจุดเปลี่ยนโค้ง (Point of inflection)



Ratio i/R function of $z/2R$ and soil conditions

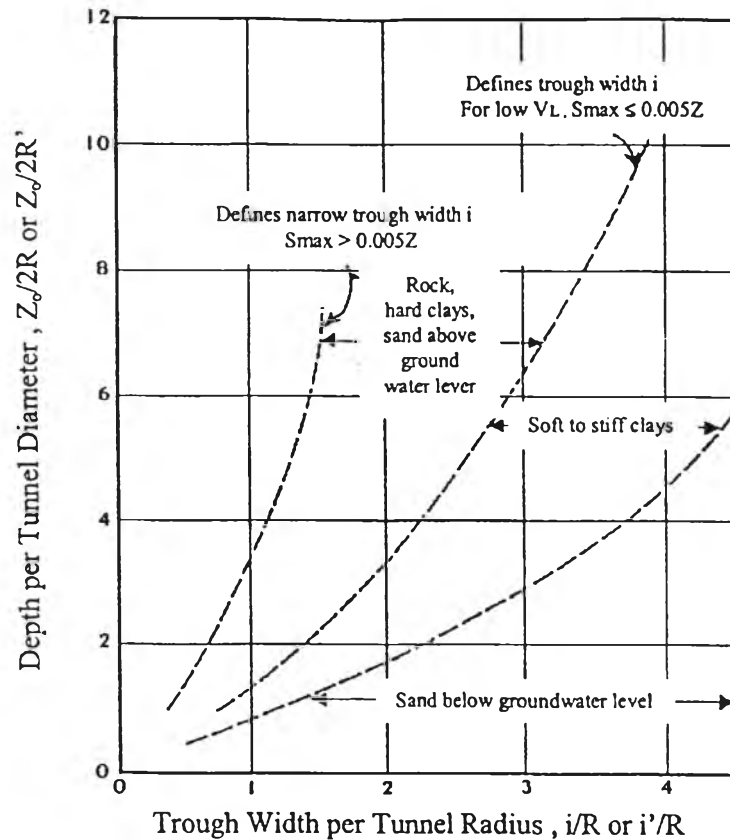
Volume of trough = $2.5i S_{\max}$.

รูปที่ 2.4 แสดงการทรุดตัวที่ผิวดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ (Peck, 1969)

จากสมการที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าที่ระยะ x เท่ากับศูนย์ หรือที่จุดกึ่งกลางของแนวอุโมงค์จะเกิดการทรุดตัวมากที่สุด ดังรูปที่ 2.1 เมื่อต้องการทราบปริมาณการทรุดตัวที่ตำแหน่งใด ๆ ก็สามารถหาค่าที่ต้องการได้ โดยการแทนค่าลงในสมการที่ 2.1 โดยใช้ค่า i ในหัวข้อต่อไป

a) การประมาณหาค่า i โดย Peck (1969)

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลที่วัดได้ในสนาม Peck ได้เสนอกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความกว้างของแนวการทรุดตัว (i/R) กับอัตราส่วนความลึกจากผิวดินถึงจุดศูนย์กลางของอุโมงค์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ ($Z_0/2R$) ดังแสดงในรูปที่ 2.5

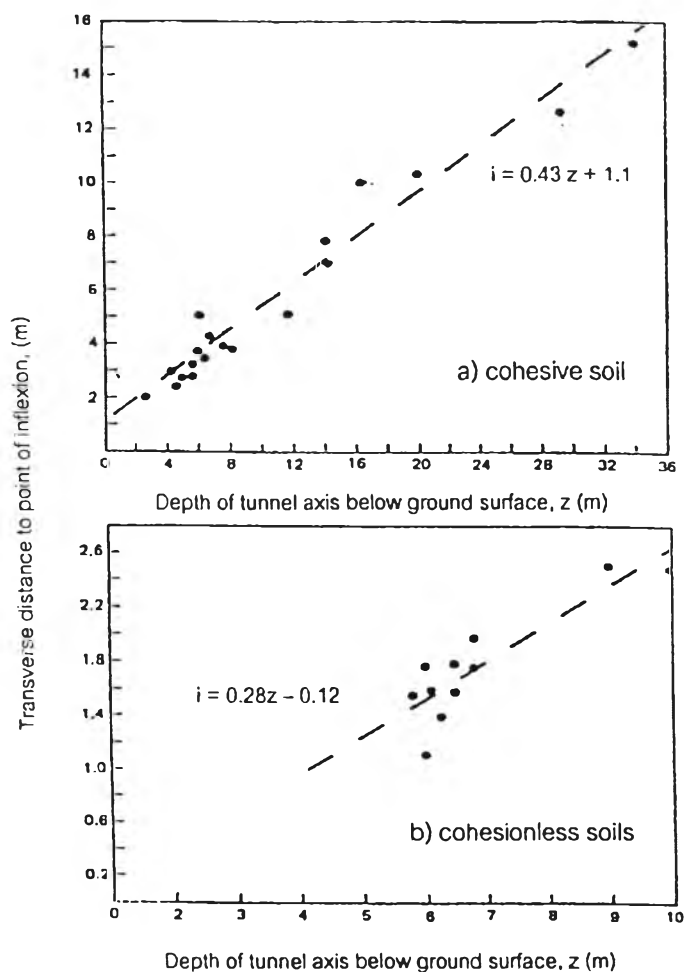


รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความกว้างของแนวการทรุดตัว (i/R) กับอัตราส่วนความลึกจากผิวดินถึงจุดศูนย์กลางของอุโมงค์ต่อความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ ($Z_0/2R$) (Peck, 1969)

b) การประมาณหาค่า i โดย O'reilly & New (1982)

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลที่วัดได้ในสนามนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า i กับค่าความลึกจากผิวดินถึงแนวกึ่งกลางอุโมงค์ โดยแบ่งลักษณะการวิเคราะห์เป็น 2 กรณีด้วยกันคือ

กรณีที่ 1 เป็นการขุดเจาะอุโมงค์ในดินเหนียว และกรณีที่ 2 เป็นการขุดเจาะอุโมงค์ในชั้นทราย พบว่ากราฟความสัมพันธ์ที่ได้มีลักษณะความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า i กับค่าความลึก z (O'Reilly and New, 1982)

O'Reilly & New ได้เสนอว่าเราสามารถประเมินค่า i ได้จากสมการที่ 2.2 โดยค่า K เป็นค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับชนิดของดินที่ทำการขุดเจาะอุโมงค์

$$i = KZ_0 \quad (2.2)$$

โดยค่า $K = 0.5$ สำหรับการขุดเจาะอุโมงค์ในดินเหนียว (Cohesive Soil)

$K = 0.25$ สำหรับการขุดเจาะอุโมงค์ในดินเม็ดหยาบ (Granular Soil)

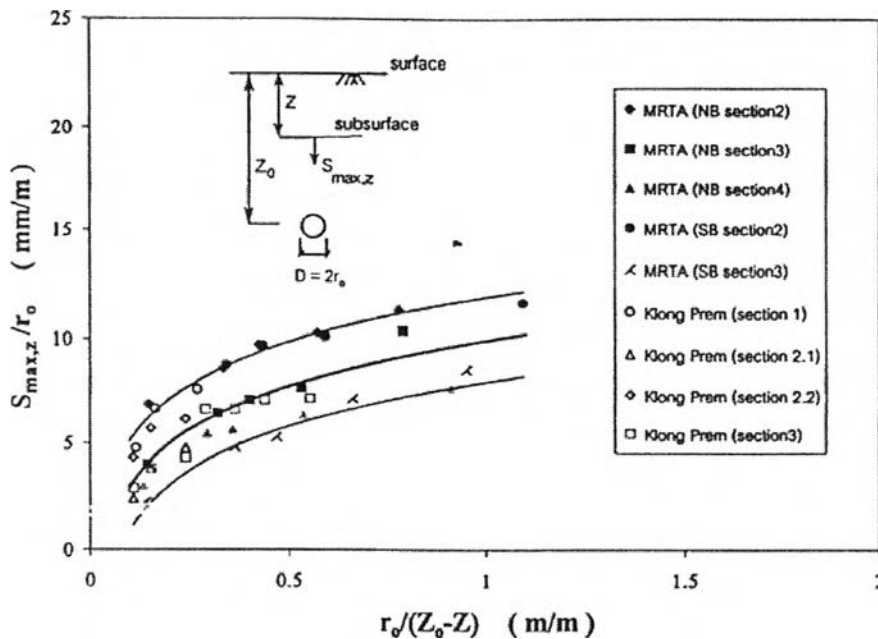
Z_0 คือ ระยะความลึกจากผิวดินถึงจุดศูนย์กลางของอุโมงค์

i คือ ระยะจากแนวกึ่งกลางของอุโมงค์ถึงจุดเปลี่ยนโค้ง (Point of inflection)

วิรัช, 2544 พบว่าจากผลการศึกษาการทรุดตัวของผิวดิน เนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์คั่นน้ำ คลองเปรมประชากรพบว่า พารามิเตอร์ i ตามทฤษฎีของ Peck มีค่า อยู่ระหว่าง 8 – 12 m. และค่า K ตามทฤษฎี O'reilly & New (1982) จะมีค่าประมาณ 0.34 – 0.50 และ การทรุดตัวที่มากที่สุดที่เกิดขึ้นที่ระดับความลึกใด ๆ $S_{max,z}$ มีความสัมพันธ์ขึ้นกับรัศมีอุโมงค์ (r_0) สามารถประมาณค่าการทรุดตัวที่ระดับความลึกใด ๆ ได้จากสมการ แสดงได้ดังรูปที่ 2.7

$$\frac{S_{max,z}}{r_0} = 3.04 \ln \left(\frac{r_0}{Z_0 - Z} \right) + 9.93$$

Subsurface settlement above tunnel center line in stiff Bangkok Clay



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวที่มากที่สุดที่ระดับความลึกต่าง ๆ กับขนาดของอุโมงค์ที่ทำการขุดเจาะ

2.2.6 การหาค่าปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดิน V_s

สามารถหาค่าปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินได้จากการคำนวณ โดยใช้ค่าการทรุดตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางแนวอุโมงค์ (Maximum Settlement, S_{\max}) โดยพิจารณาจากสมการอินทิเกรตดังนี้

$$\begin{aligned} V_s &= \int_{-\alpha}^{\alpha} S \, dy = \int_{-\alpha}^{\alpha} S_{\max} \exp\left(-\frac{y^2}{2i^2}\right) dy \\ &= \sqrt{2\pi} i S_{\max} \\ &= 2.5 i S_{\max} \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\therefore S_{\max} = \frac{V_s}{2.5i} \quad (2.4)$$

เมื่อ V_s คือ ปริมาณการทรุดตัวของดินต่อหนึ่งหน่วยความยาวของอุโมงค์
 y คือ ระยะตามขวางในแนวราบจากกึ่งกลางของแนวอุโมงค์

สมการสำหรับหาค่าทรุดตัวที่ผิวดิน ที่ระยะ y ใด ๆ

$$S = \frac{V_s}{i\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2i^2}\right) \quad (2.5)$$

สมการสำหรับหาค่าความชันของการทรุดตัวที่ผิวดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์

$$\frac{dS}{dy} = \frac{V_s y}{i^3 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2i^2}\right) \quad (2.6)$$

สมการสำหรับหาค่าความโค้งของการทรุดตัวที่ผิวดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์

$$\frac{d^2S}{dy^2} = \frac{V_s}{i^3 \sqrt{2\pi}} \left[\frac{y^2}{i} - 1 \right] \exp\left(-\frac{y^2}{2i^2}\right) \quad (2.7)$$

2.2.7. การหาค่า Ground loss (V_L) จากการขุดเจาะอุโมงค์

Mair, 1993 การทรุดตัวเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ (Ground Loss) หรือที่เรียกอีกอย่างว่า Volume Loss สามารถแสดงสมการการหาปริมาณการทรุดตัวของดินโดยเท่ากับอัตราส่วนระหว่างปริมาตรการทรุดตัวที่ผิวดินกับปริมาตรของดินที่ถูกขุดออกจากอุโมงค์ แสดงได้ดังนี้

$$(\%) \text{ Ground Loss, } V_L = \frac{V_s}{V_{ex}} \times 100 \quad (2.8)$$

เมื่อ V_s คือ ปริมาตรการทรุดตัวของดินที่ผิวดินต่อหนึ่งหน่วยความยาวของอุโมงค์

V_{ex} คือ ปริมาตรของดินที่ถูกขุดออกต่อหนึ่งหน่วยความยาวของอุโมงค์

ซึ่งเราสามารถหาค่า V_s ได้จากสมการ

$$V_s = i\sqrt{2\pi}S_{max} \quad (2.9)$$

เมื่อ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ในดินเหนียว

$$V_L = \frac{4V_s}{\pi D^2} \quad (2.10)$$

รวมสมการที่ (2.9) และ (2.10) เข้าด้วยกันสามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$S_{max} = \frac{0.313V_L D^2}{i} \quad (2.11a)$$

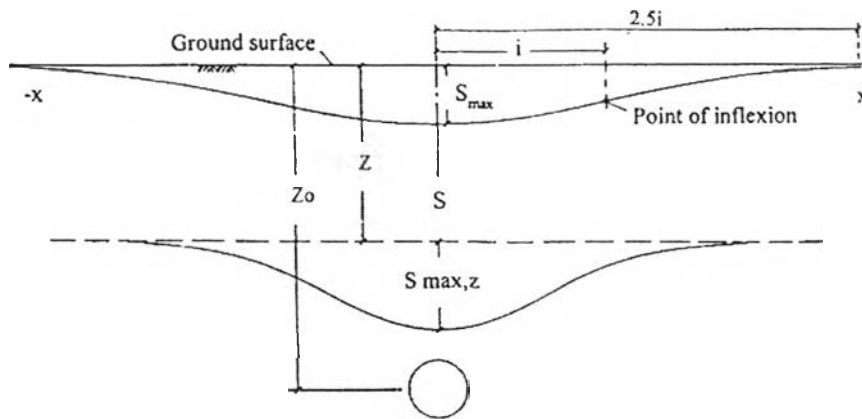
โดยค่า i ในสมการนั้นโดยส่วนใหญ่จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ KZ_0 ดังนั้นสมการที่ 2.11a จึงสามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$S_{max} = \frac{0.313V_L D^2}{KZ_0} \quad (2.11b)$$

จากสมการที่ 2.11 ค่าการทรุดตัวสูงสุดนั้นขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ หลายประการ โดยจะแปรผันตามค่า Volume loss และเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ (D) แต่จะแปรผกผันกับค่าคงที่ K และค่าความลึกของอุโมงค์ที่ทำการขุดเจาะ (Z_0) จะเห็นได้ว่าถ้าอุโมงค์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ ค่าการทรุดตัวจะมากกว่าอุโมงค์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก และอุโมงค์ที่ขุดลึกจะมีค่าการทรุดตัวที่ผิวดินน้อยกว่าอุโมงค์ที่ขุดในระดับตื้น

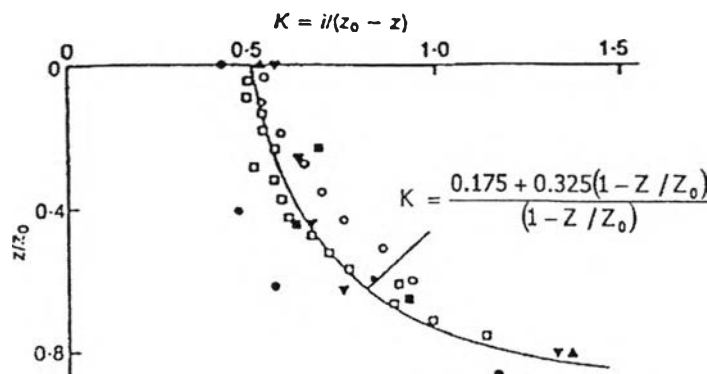
2.2.8. การคาดคะเนการทรุดตัวที่ระดับความลึกต่าง ๆ

Mair, 1993 ได้ทำการรวบรวมข้อมูลการทรุดตัวของดินจากการขุดเจาะอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวพบว่าที่ระดับความลึกใด ๆ ในชั้นดิน ลักษณะการทรุดตัวที่เกิดขึ้นมีรูปร่างคล้ายการทรุดตัวที่ผิวดิน เพียงแต่ระยะขอบเขตความกว้างของการทรุดตัว จะมีค่าลดลงตามความลึกแต่การทรุดตัวสูงสุดที่เกิด ณ กึ่งกลางอุโมงค์จะมีค่าการทรุดตัวมากกว่าที่ผิวดิน ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงการทรุดตัวที่ผิวดินและการทรุดตัวที่ระดับความลึกต่าง ๆ ในการขุดเจาะอุโมงค์ (Mair, 1993)

จากการวัดในสนามพบว่า ค่า K นั้นไม่ได้เป็นค่าคงที่ดังเช่นสมการการทรุดตัวที่ผิวดินแต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ค่า K ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความลึกการเจาะอุโมงค์ในดินเหนียว (Mair, 1993)

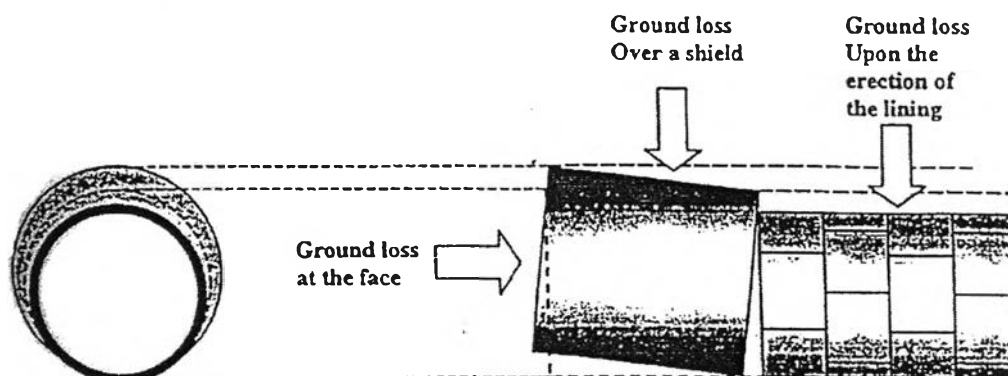
ดังนั้น สามารถหาค่าการทรุดตัวมากที่สุดที่ระดับความลึกต่าง ๆ ได้ จากสมการที่ 2.12

$$S_{\max \text{ at any } Z} = \frac{0.313V_L D^2}{K(Z_0 - Z)} \quad (2.12)$$

- เมื่อ V_L คือ ปริมาตรการทรุดตัวของดินที่ผิวดิน
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ในดินเหนียว
 Z คือ ระยะจากผิวดินถึงระดับความลึกใด ๆ ที่ต้องการหาค่าการทรุดตัว
 Z_0 คือ ระยะความลึกจากผิวดินถึงจุดศูนย์กลางของอุโมงค์

2.2.9 การพิจารณา Ground Loss ในงานอุโมงค์

Ground Loss ที่เกิดขึ้นในงานอุโมงค์ที่ขุดเจาะด้วยระบบ Earth Pressure Balance Shield นั้นแบ่งได้ 3 ประเภทด้วยกันดังรูปที่ 2.10 คือ



รูปที่ 2.10 แสดงชนิดของ Ground Loss ที่เกิดขึ้น (Lee et al, 1992)

2.2.9.1 Ground Loss ด้านหน้า Tunnel Faces

การทรุดตัวประเภทนี้จะเกิดขึ้นทันที เมื่อมีการเคลื่อนตัวของหัวเจาะ เนื่องจากมวลดินที่อยู่ด้านหน้าหัวเจาะ ถูกเปลี่ยนสภาพเป็น Plastic เพิ่มมากขึ้นทำให้ดินที่อยู่ด้านหน้าหัวเจาะ สามารถอยู่บน Screw Conveyor ได้ทำให้ In situ Stress ของดินที่ด้านหน้าหัวเจาะ เปลี่ยนแปลงไปสามารถประมาณค่า Stress ที่ด้านหน้าหัวเจาะได้ดังสมการที่ 2.13

$$P_0 = (K'_0 \sigma'_v + P_w) - P_i \quad (2.13)$$

- เมื่อ P_0 = Total Stress ที่ด้านหน้าหัวเจาะ
 K'_0 = Effective Coefficient of Earth Pressure at rest
 σ'_v = Vertical Effective Stress
 P_w = Pore Pressure at tunnel spring line
 P_i = แรงดันที่ด้านหน้าหัวเจาะ

2.2.9.2 Ground Loss เนื้อหัวเจาะอุโมงค์

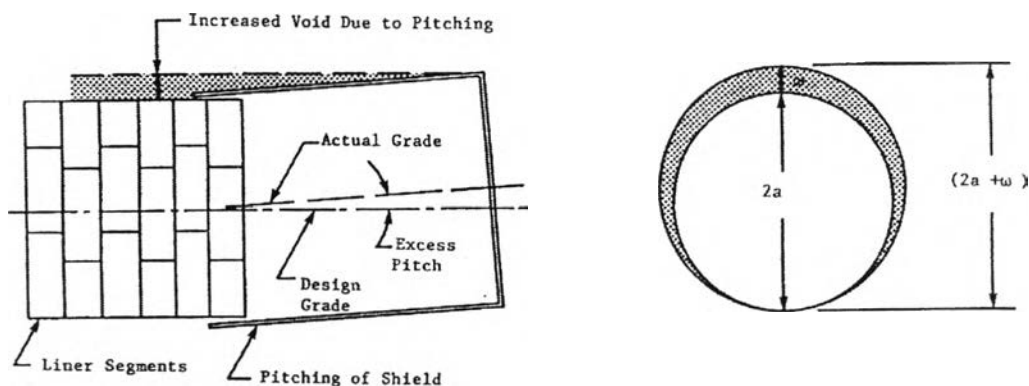
การสูญเสียมวลดินนี้เกิดขึ้นบริเวณเนื้อหัวเจาะ เนื่องจากหัวเจาะเคลื่อนตัวไปข้างหน้าออกไปจากแนวเส้นทางเดิมที่กำหนดไว้ (Alignment) เมื่อหัวเจาะถูกบังคับให้กลับเข้าสู่แนวเดิม จะมีช่องว่างเกิดขึ้นเนื้อหัวเจาะ และอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการสูญเสียมวลดินชนิดนี้คือการควบคุมเครื่องขุดเจาะ โดยผู้ควบคุมเครื่องจะควบคุมเครื่องให้ทำมุมเงยเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับแนวอุโมงค์ที่ออกแบบ เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงไม่ให้อหัวเจาะจมลงเนื่องจากน้ำหนักของหัวเจาะเอง ในขณะที่มีการเลี้ยวโค้งของหัวเจาะ มุมที่เพิ่มขึ้น (Excess Pitch) เนื่องมาจากการขุดเจาะ จะทำให้เกิด Over cutting ของดินที่บริเวณตำแหน่งด้านบนของอุโมงค์ (Tunnel Crown)

Lee et al, 1992 สามารถประมาณค่า Ground Loss ที่เกิดขึ้นในการการขุดเจาะอุโมงค์เนื่องจาก Over cutting ได้ดังสมการที่ 2.14

$$\begin{aligned}
 V_{\text{shield}} &= \frac{2\pi al}{2} \times (\text{excess pitch}) \\
 &= \pi \left[\left(a + \frac{\omega}{2} \right)^2 - a^2 \right] \quad (2.14)
 \end{aligned}$$

- เมื่อ V_{shield} = ปริมาตรของ Over excavation ต่อหนึ่งหน่วยความยาว
 a = รัศมีของอุโมงค์ที่ทำการขุดเจาะ
 L = ความยาวของหัวเจาะ
 ω = workmanship parameter = $L \times (\text{excess pitch})$

สามารถนำสมการนี้ไปใช้ประเมินปริมาณ Ground Loss ที่เกิดจาก Overcutting ได้โดยการคำนวณจากมุม excess pitch ที่เพิ่มขึ้นดังแสดงได้ในรูปที่ 2.11

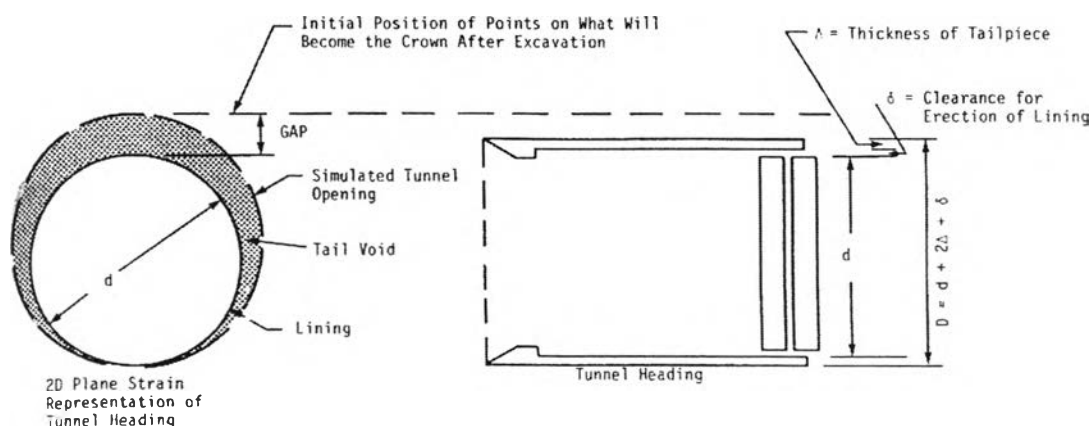


รูปที่ 2.11 แสดง Ground Loss เนื่องหัวเจาะอุโมงค์เนื่องจาก Overcutting (Lee et al, 1992)

2.2.9.3 Ground Loss เนื่องจากการติดตั้งผนังอุโมงค์

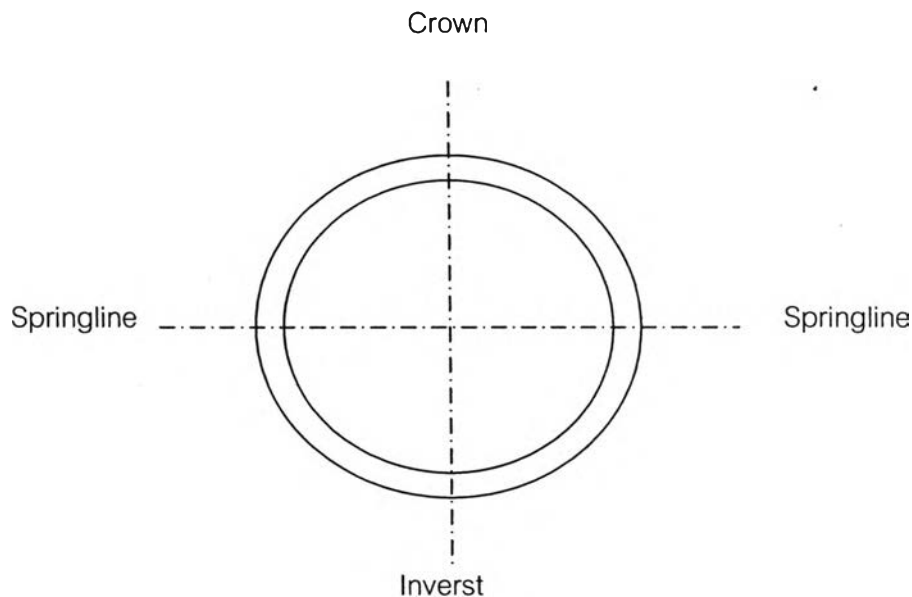
เมื่อทำการติดตั้งผนังอุโมงค์เสร็จจะเกิดค่า Ground Loss ขึ้น เนื่องจากผนังอุโมงค์ที่ทำการติดตั้งนั้นจะมีระยะห่าง (Clearance) จากผิวด้านในของหัวเจาะเพื่อให้สามารถติดตั้ง Segment ได้ ดังรูปที่ 2.12 เมื่อทำการติดตั้งเสร็จ หัวเจาะจะเคลื่อนตัวไปด้านหน้า ดินเดิมที่เคยอยู่บนหัวเจาะจะเคลื่อนตัวลงมาอยู่ในช่องว่าง (Tail Void) บริเวณด้านท้ายหัวเจาะโดยความหนาของ Tail Void นี้มีค่าเท่ากับความหนาของผิหัวเจาะ (Thickness of Tailpiece, Δ) บวกกับระยะห่างจากผิวด้านในของหัวเจาะถึง Segment ที่ทำการติดตั้งเสร็จแล้ว (Clearance for Erection of Lining, δ) ดังนั้นขนาดของ Tail Void จึงเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการทรุดตัวทั้งหมด

ค่า Ground Loss ที่เกิดขึ้นนี้สามารถทำให้ลดลงได้โดยการ Grout น้ำปูนลงในช่องว่างก่อนที่ดินด้านบนจะไหลเข้าไปแทนที่ใน Tail Void



รูปที่ 2.12 แสดง Ground Loss เนื่องจากการติดตั้งผนังอุโมงค์ (Lee et al, 1992)

แรงดันดินที่กระทำต่ออุโมงค์นั้นจะไม่เท่ากันทุกทิศทาง ทำให้อุโมงค์เกิดการเสียรูป หรือเกิดรอย Crack ได้ จึงจำเป็นต้องวัดการแอ่นตัวของผนังอุโมงค์ที่ตำแหน่ง บนสุด (Crown) และ ด้านข้างของอุโมงค์ (Spring line) ดังรูปที่ 2.13 แต่ Ground Loss ประเภทนี้ถือว่ามีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับทั้ง 3 ประเภทที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 2.13 แสดงตำแหน่งของอุโมงค์

2.2.10. การอุดช่องว่างรอบผนังอุโมงค์ (Backfill Grouting)

Backfill Grouting เป็นวิธีการเติมวัสดุเข้าไปในช่องว่างรอบผนังอุโมงค์หลังหัวเจาะ (Tail Void) ที่เกิดขึ้นระหว่าง Segments กับดินที่อยู่โดยรอบ ซึ่งเป็นการป้องกันการเกิด Loosening ของดินและลดการทรุดตัวของดิน นอกจากนี้ยังเป็นการป้องกันการไหลซึมของน้ำเข้าสู่อุโมงค์ได้อีกด้วย วัสดุที่นำมาใช้ในงานมีข้อกำหนดหลายอย่าง เช่น ไม่เกิดการแยกตัว, มีความสามารถทำงานได้ดี, เกิดการหดตัวน้อย, กำลังเพิ่มขึ้นเร็วและมีค่ามากกว่าดินและเป็นวัสดุที่บดน้ำป้องกันการไหลของน้ำได้

รูปแบบการทำงานมี 2 แบบ คือแบบไม่ต่อเนื่อง (Separate Grouting Method) และแบบต่อเนื่อง (Simultaneous Grouting Method) ตามการเคลื่อนที่ของหัวเจาะ แบบแรกเป็นการอัดวัสดุด้วยแรงดันไปตามท่อผ่านรูที่เตรียมไว้ใน Segment (Grout Hole) ของ Ring ท้ายสุดที่เคลื่อนที่ออกจากหัวเจาะ สำหรับแบบต่อเนื่องวัสดุจะถูกยิงออกจากอุปกรณ์ที่อยู่ในส่วนท้ายของ Shield

ตลอดเวลาที่มีการเคลื่อนที่ โดยพบว่า แบบต่อเนื่องสามารถทำให้ค่าการทรุดตัวที่ผิวดินลดได้เป็นอย่างมากเนื่องมาจากค่าการสูญเสียมวลดิน (Ground Loss) ลดลง

โดยปกติแรงดันที่ใช้มีค่าประมาณ 1 ถึง 3 kg-f/cm² (ที่ Grout Hole) แรงดันนี้จะทำการพิจารณาตามความเหมาะสมกับแรงดันน้ำที่อยู่โดยรอบ, แรงดันของ Slurry (กรณีที่ใช้การเจาะแบบ Slurry) กำลังของ Segment และอื่นๆ อัตราการเติมเต็ม (Grout filling Ratio) ประมาณ 150 ถึง 200% ถ้าอัตราส่วนนี้มีค่ามากเกินไป จะทำให้เกิดการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำมากเกินไปในดินเหนียวอ่อน ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมเป็นอย่างดี

2.2.11. การทรุดตัวของดินตามแนวการจุดเจาะอุโมงค์

Mitsutaka Sukimoto และอภิชาติ สระมูล, 2000 ได้ทำการแบ่งการทรุดตัวตามแนวเส้นทางการขุดเจาะออกเป็น 4 ช่วง ดังรูปที่ 2.14

a) Initial Settlement

คือ การทรุดตัวในช่วงแรก ซึ่งจะเกิดก่อนหัวเจาะเคลื่อนที่เข้าหา โดยการทรุดตัวนี้จะเกิดขึ้นหน้าหัวเจาะ มี 2 ลักษณะด้วยกันขึ้นอยู่กับชนิดและประเภทของดินที่ทำการเจาะผ่าน คือ เกิดการทรุดตัวลงหรือเกิด heave

b) Shield Passing Settlement

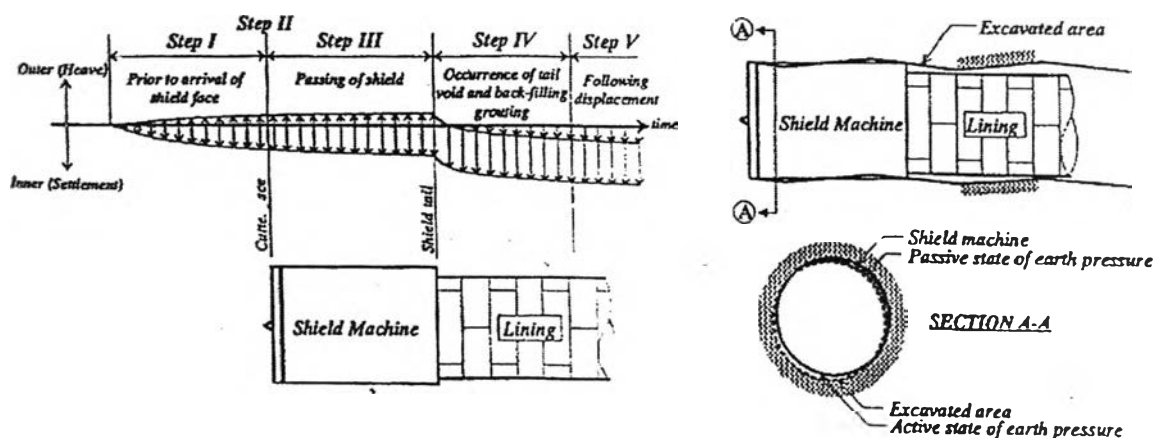
คือการทรุดตัวในช่วงที่ 2 เกิดขึ้นในขณะที่หัวเจาะกำลังเคลื่อนที่ไปด้านหน้า ผ่านจากตำแหน่งด้านหน้าหัวเจาะ ไปด้านท้ายหัวเจาะ การทรุดตัวที่เกิดขึ้นในช่วงนี้มีสาเหตุมาจากโครงสร้างดินถูกรบกวนระหว่างที่หัวเจาะเคลื่อนที่ไปด้านหน้า ทำให้ดินมีค่าโมดูลัสและกำลังรับแรงเฉือนลดลง

c) Tail Settlement

คือ การทรุดตัวที่เกิดขึ้นบริเวณด้านท้ายหัวเจาะ โดยจะเริ่มตั้งแต่มีช่องว่างที่ด้านท้ายของหัวเจาะจนถึง grout น้ำปูนเสร็จ

d) Long Term Settlement

คือการทรุดตัวที่เกิดขึ้นหลังจาก grout น้ำปูนเสร็จ ดินบริเวณด้านท้ายหัวเจาะจะเกิดภาวะ Relaxation และจะเกิดการทรุดตัวลงเรื่อย ๆ ดินจะมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างใหม่เนื่องจากดินถูกรบกวนในขณะที่หัวเจาะผ่านไป ซึ่งต่อมาดินจะเกิด consolidation และ creep เป็นระยะเวลานาน



รูปที่ 2.14 การทรุดตัวของดินตามแนวขุดเจาะอุโมงค์ (Mitsutaka Sukimoto และอภิชาติ สระมูล, 1999)

วิรัช, 2544 ได้ทำการศึกษาจากผลการศึกษาการทรุดตัวที่ผิวดิน เนื่องจากโครงการก่อสร้างอุโมงค์ผันน้ำคลองเปรมประชากรพบว่า สามารถแบ่งการทรุดตัวตามแนวเส้นทางการขุดเจาะออกเป็น 3 ช่วง โดยในช่วงแรก

I: Flow In shield จะมีค่าการทรุดตัวน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการทรุดตัวในช่วงอื่น ๆ โดยมีค่าประมาณ 15 – 20 % ของค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นทั้งหมด

II: In Side Shield จะมีค่าประมาณ 25 – 30 %

III: Tail Voids ซึ่งเป็นค่าการทรุดตัวที่เกิดจากผลของ Tail Voids นั้นจะเป็นส่วนที่มีค่าการทรุดตัวมากที่สุด คือประมาณ 50 – 55% ของค่าการทรุดตัวทั้งหมด

2.2.12. สาเหตุของการทรุดตัวของดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์

ชูเกียรติ โพธยานุวัตร, 2000 ขณะทำการขุดเจาะอุโมงค์ อาจเกิดการทรุดตัวของพื้นดิน จากสาเหตุดังต่อไปนี้

a) การทะลักเข้าของดินหน้าหัวเจาะ เนื่องจากเครื่องขุดเจาะอุโมงค์แบบปรับแรงดันดินสมดุลย์นี้ ปริมาณดินที่ขุดเจาะจะต้องสัมพันธ์กับแรงดันดินหน้าเครื่องขุดเจาะ ซึ่งอาศัยการปรับความเร็วของการขนถ่ายดิน ฉะนั้นหากปริมาณการขนถ่ายดินสูงเกินไป จะก่อให้เกิดปัญหาการทะลักเข้าของดิน นำไปสู่การทรุดตัวของพื้นดิน

b) การจุดเจาะดินเกินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Over cut) ซึ่งปกติขนาดของหัวขุดเจาะ (Cutting Head) จะใหญ่กว่าขนาดของตัวเครื่องเจาะประมาณ 2 เซนติเมตร. ช่วยให้การขับเคลื่อนเครื่องขุดเจาะเป็นไปได้อย่างขึ้นมือ อีกทั้งขณะเลี้ยวจำเป็นต้องขุดเจาะเกินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพอสมควรเพื่อสะดวกในการเลี้ยว ดังนั้นช่องว่างระหว่างดินกับตัวเครื่องจะเป็นปัญหาก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินได้โดยรอบ

c) ตำแหน่งของเครื่องขุดเจาะในขณะที่ทำงานก็มีความสำคัญ หากพิคัดหรือระดับของส่วนหน้าและส่วนท้ายแตกต่างกันอาจจะก่อให้เกิดช่องว่างระหว่างเครื่องขุดเจาะกับดินได้ ซึ่งจะก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวของดิน

d) ช่องว่างระหว่างเครื่องขุดเจาะกับผนังอุโมงค์ โดยจะมีระยะประมาณ 7 เซนติเมตร. เพื่อการติดตั้งผนังอุโมงค์ โดยปกติจะต้องทำการ grouting เพื่อเปิดช่องว่าง อย่างไรก็ตาม ยังเกิดปัญหาการเคลื่อนตัวของดินได้

e) การแอ่นตัวของผนังอุโมงค์หลังจากติดตั้ง ซึ่งจะมีปริมาณเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ได้กล่าวมาแล้ว

2.2.13 การควบคุมการเคลื่อนตัวของดินในการขุดเจาะอุโมงค์ (Controlling Ground Movements in Tunnel)

การควบคุมการเคลื่อนตัวของดิน จะพิจารณาตามสาเหตุการสูญเสียมวลดิน และการจะเลือกวิธีการนำมาใช้ จะต้องมีการพิจารณาถึงลักษณะของชั้นดินด้วย วิธีการที่มีประสิทธิภาพในการลดการสูญเสียมวลดินมีดังนี้

a) ควบคุมเสถียรภาพด้านหน้าอุโมงค์ตลอดเวลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งขณะที่หัวเจาะกำลังเคลื่อนที่

b) เลือกใช้เครื่องขุดเจาะที่มีขนาดเหมาะสม (อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง) เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมทิศทางและลดผลของ Pitching และ Yawing ในกรณีที่เครื่องขุดเจาะที่มีลักษณะยาวอาจต้องมี Articulation Joint เพื่อให้สามารถโค้งงอตัวได้

c) ควบคุมการประกอบผนังอุโมงค์เพื่อควบคุมขนาดของ Tail Void และ ควบคุมการทำ Grouting ให้มีประสิทธิภาพด้วยการควบคุมแรงดันและปริมาณอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดโดยต้องใช้เวลาให้น้อยที่สุด และจัดให้มีระบบ Tail Seal ที่ได้มาตรฐาน

2.2.14 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของหัวเจาะ

2.2.14.1 สภาพชั้นดิน (Ground Condition)

Fugichi (1995) ได้กล่าวไว้ว่าหัวเจาะระบบแรงดันดินสมดุล (EPB Shield) มีความเหมาะสมในการขุดเจาะในชั้นดินที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive Soil) เมื่อขุดเจาะในชั้นทรายหรือดินที่ไหลตัวยาก จะทำให้การทำงานของ Screw Conveyor เกิดปัญหาขึ้นง่ายต่อการเกิดความผิดพลาดทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง ในการแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการเติม Additive เข้าสู่ Chamber ซึ่งจะทำให้ดินใน Chamber มีความเหลวเพียงพอ และง่ายต่อการเคลื่อนตัวไปตาม Screw Conveyor ได้อย่างราบรื่น ประสิทธิภาพในการทำงานจึงเพิ่มขึ้นด้วย

Nishitake (1987) ได้กล่าวไว้ว่าในกรณีที่มีก้อนหินที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ หรือร้อยละ 20 ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องเจาะ เพื่อให้การขุดเจาะสามารถดำเนินงานต่อไปได้ ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ในการบดอัดไว้ในบริเวณ Cutter Face เพื่อให้ก้อนหินแตกเป็นชิ้นเล็กก่อนที่จะผ่านเข้าสู่ Chamber และพอที่จะผ่าน Screw Conveyor ออกไปได้

2.2.14.2 ความสามารถของเครื่องขุดเจาะ (Machine Capacity)

a) ส่วนการติดตั้งผนังอุโมงค์ (Provision of Support) การติดตั้งผนังอุโมงค์ (Erection of Lining) ในการติดตั้งชิ้นส่วน (Segments) เพื่อประกอบเป็น ผนังอุโมงค์ จำเป็นจะต้องอาศัยเครื่องประกอบชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ (Segment Erector) ที่มีประสิทธิภาพในการทำงาน เพื่อลดเวลาในการติดตั้งและเพิ่มอัตราการทำงาน ระบบที่มีประสิทธิภาพสูงจะทำงานด้วยเครื่องจักรทั้งหมด นับตั้งแต่การจับยกขึ้นไปติดตั้งและการยึดด้วยสลักเกลียว (Bolts) Parker et al (1971) ได้กล่าวว่าอัตราการทำงานของการขุดเจาะอุโมงค์ในดินอ่อนจะขึ้นอยู่กับอัตราการติดตั้งผนังอุโมงค์ โดยถ้าสามารถลดจำนวนต่อวงลงจาก 8 ชั้น เป็น 6 ชั้นหรือ 4 ชั้น ได้จะทำให้ลดเวลาในการติดตั้งผนังอุโมงค์ลง อัตราการทำงานจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นสามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว

b) การอุดช่องว่างรอบผนังอุโมงค์ (Backfill Grouting) เป็นวิธีการป้องกันการทรุดตัวของชั้นดิน ไม่ให้มีค่าสูง ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานจะต้องอาศัยระบบการทำงานที่มีลักษณะพิเศษ เช่น สามารถที่จะ Grout ได้อย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง (Simultaneous Grouting) แรงดันที่ใช้โดยทั่วไปจะสูงกว่าแรงดันใน Chamber (Face Pressure) เล็กน้อย และปริมาณที่ใช้จะมีค่าระหว่าง 150-200 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรช่องว่างรอบผนังอุโมงค์ (Tail Void)

c) การป้องกันการซึมเข้าสู่เครื่องเจาะ (Tail Seal) Tail Seal เป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งของเครื่องขุดเจาะประเภทต่างๆ เนื่องจากสามารถป้องกันการซึมของน้ำใต้ดิน และการไหลทะลักของดินเข้าสู่หัวเจาะผ่านช่องว่าง (Clearance) ระหว่างผิวด้านนอกของผนังอุโมงค์ที่เพิ่งประกอบเสร็จกับผิวด้านในของ Shield บริเวณส่วนท้ายของหัวเจาะ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ Tail Seal เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุโมงค์ที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินมาก ๆ

2.2.15. ปัญหาอุปสรรคและวิธีการแก้ไขในขณะดำเนินงานขุดเจาะอุโมงค์

2.2.15.1 เมื่อหัวเจาะเคลื่อนออกไปจากแนวที่กำหนด ส่วนใหญ่เกิดจากขาดความรู้และความเข้าใจของวิศวกรและผู้ควบคุมในการควบคุมหัวเจาะ อีกทั้งเกิดจากความผิดพลาดในการสำรวจและการคำนวณ หรือผู้ควบคุมหัวเจาะขาดความชำนาญและประสบการณ์ ในการควบคุมและประกอบชิ้นส่วนอุโมงค์

2.2.15.2 การแก้ไขโดยใช้เทคนิคการควบคุมหัวเจาะ เมื่อพบชั้นทราย, ชั้นดินปนทรายหรือน้ำใต้ดิน ในขณะที่ขุดเจาะลักษณะของหัวขุดแบบ Earth Pressure Balance นั้นสามารถขุดได้ในทุกสภาพชั้นดิน (ยกเว้นชั้นที่เป็นหิน) วิธีการแก้ไขปัญหานี้ที่พบชั้นดินแต่ละประเภท ทำดังนี้

- ชั้นดินแข็ง (Stiff Clay) ความจริงหัวขุดประเภทนี้เหมาะสำหรับขุดในชั้นดินอ่อน หากเจอสภาพดินแข็ง จำเป็นต้องฉีดน้ำเข้าไปเพื่อย่อยสลายดินให้อ่อนตัว มิฉะนั้นดินก้อนใหญ่จะก่อปัญหาให้ Screw Conveyor อุดตันได้
- ชั้นดินเหนียว (Medium Clay) เป็นชั้นดินที่เหมาะสมกับหัวขุดประเภทนี้ปัญหามีน้อย ดินที่ออกมาจะเป็นแท่งอย่างต่อเนื่อง จะต้องตักดินให้ขาด
- ชั้นทราย (Sand) หรือชั้นดินปนทราย (Sandy clay or clayey sand) หากเป็นทรายล้วนจะต้องฉีด Bentonite เข้าไปผสมเพื่อกันไม่ให้หน้าดินบริเวณหน้าหัวขุดพัง การขุดจะต้องมีแรงดันดินหน้าหัวขุดเพื่อกันดินพัง
- น้ำใต้ดิน น้ำใต้ดินโดยเฉพาะในระดับ 20 ม. มีน้อยหากพบก็จะพบในลักษณะที่ซึมเข้ามาตามสภาพชั้นดินยังคงปกติ ถ้าเป็นกรณีที่สภาพดินอ่อนตัวมากวิธีแก้ปัญหาคือ การฉีดน้ำยาประเภท Quick setting compound หรือการทำ Ground treatment

2.2.15.3 เมื่อพบอุปสรรคขวางหน้า (Obstruction) ในกรณีที่พบอุปสรรคขวางแนวขุดเจาะอุโมงค์ หากทราบล่วงหน้า (Known obstruction) เช่น เสาค้ำ ถ้ารู้ว่าจำเป็นจะต้องตัดเสาค้ำจะต้องทำ Ground Treatment ไม่ว่าจะกรณีที่อยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนหรือดินเหนียวแข็ง จำเป็นต้องเสริมความแข็งแรงของเสาค้ำ โดยการทำการซ่อมแซมและปรับปรุงฐานราก (Underpinning) ให้กับฐานรากและเสาค้ำเดิม โดยทำการเพิ่ม Bearing load แทน Friction load ของเข็มในส่วนที่ถูกตัดออก เมื่อหัวขุดฯ ไปถึงตำแหน่งเสาค้ำก็จะเปิดประตู Soil chamber เพื่อให้คนเข้าไปสกัดนำเอาเสาค้ำออก

สืบศักดิ์ พรหมบุญ, กล่าวว่า การเสริมฐานราก หมายถึง การปรับปรุงฐานรากเก่าให้รับน้ำหนักบรรทุกได้มากขึ้น อาจจะเป็นเพิ่มขนาด หรือความลึกของฐานราก และหรือปรับปรุงดินใต้ฐานราก ให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากขึ้น ถ้าการปรับปรุงโดยขยายขนาดของฐานราก และหรือปรับปรุงดินใต้ฐานราก เพื่อให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากขึ้น เรียกว่า Remedial Underpinning (การเสริมฐานราก เพื่อแก้การเสียหาย) และถ้าการปรับปรุงโดยเพิ่มความลึกของฐานราก เรียกว่า Precautionary Underpinning (การเสริมฐานราก เพื่อป้องกันการเสียหาย) การเสริมฐานราก มีความจำเป็นดังต่อไปนี้

- เพื่อชลดหยุดยั้งหรือควบคุมการทรุดตัวของโครงสร้างที่ผิดปกติ
- เพื่อป้องกันโครงสร้างทรุดตัว เนื่องจากมีการเคลื่อนตัวของดินบริเวณข้างเคียง
- เพื่อเสริมฐานรากที่เสียหายให้แข็งแรงดังเดิมหรือสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้น

ดร.สุทธิพร วิวัฒน์ทีปะ, 2001 งานการแก้ไขปัญหาริเวณแนวอุโมงค์ที่ตัดผ่านเสาค้ำโครงสร้างต่าง ๆ การทำงานลักษณะนี้นั้นจะต้องมีความละเอียดรอบคอบ งานที่ทำนั้นจะผิดพลาดไม่ได้ เพราะจะส่งผลกระทบต่อส่วนรวม โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

- a) ประสานงานกับหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อขอข้อมูลรายละเอียดโครงสร้างที่จะต้องทำการตัดแนวอุโมงค์ผ่าน
- b) รวบรวมข้อมูลจากหน่วยงานต่าง ๆ มาพิจารณาว่าต้องการข้อมูลอื่น ๆ เพิ่มเติมหรือไม่ และทำการตรวจสอบข้อมูลต่าง ๆ ที่หน้างานจริง
- c) ทำการวิเคราะห์ตรวจสอบความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้าง
- d) กำหนดรูปแบบการทำ Underpinning โครงสร้างหลาย ๆ วิธีแล้วทำการประเมินผลดีผลเสียในแต่ละวิธี

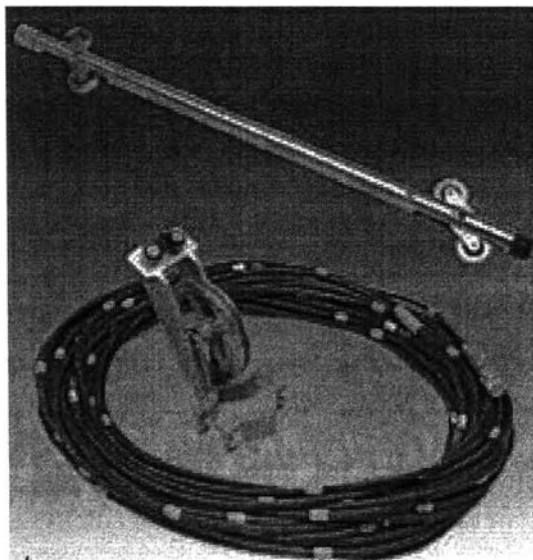
e) กำหนดขั้นตอนการทำงานโดยละเอียด

f) ตรวจสอบและวัดการเคลื่อนตัวของโครงสร้างโดยละเอียดโดยติดตั้งเครื่องมือวัดทางธรณีเทคนิค

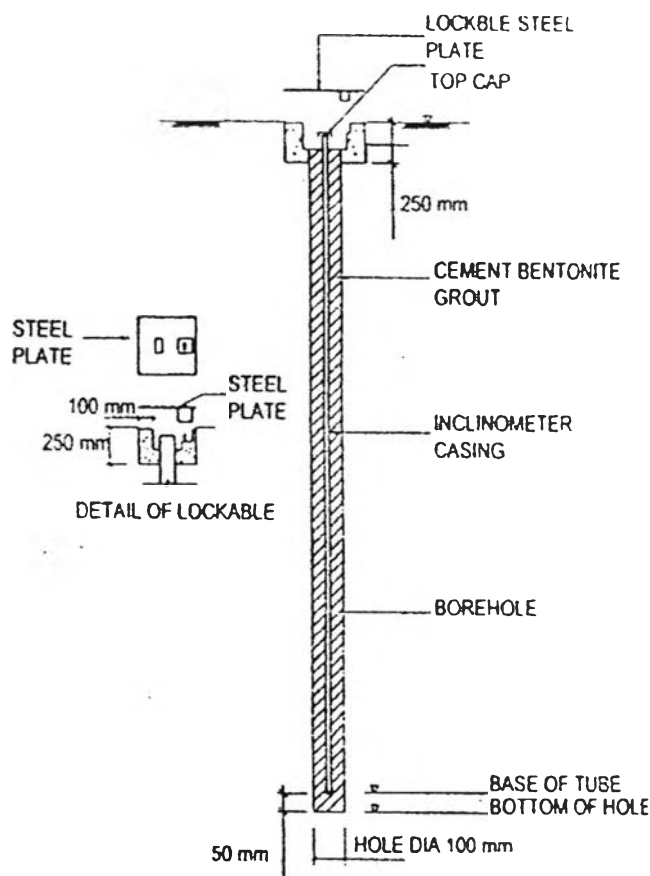
2.2.16. ตรวจสอบการทรุดตัวของสิ่งก่อสร้างรอบแนวชุดเจาะอุโมงค์

โดยปกติก่อนการดำเนินการชุดเจาะอุโมงค์ จะมีการสำรวจระดับของผิวดิน หรือผิวจราจรล่วงหน้าก่อนหัวชุดเจาะอุโมงค์จะขุดไปถึง และมีการสำรวจระดับของผิวดิน หรือผิวจราจรหลังจากที่หัวชุดเจาะอุโมงค์ได้ขุดผ่าน โดยแบ่งระยะเวลาในการตรวจสอบ 1, 3, 5 และ 7 วัน ตามลำดับ การตรวจสอบโดยทั่วไปใช้กล้องระดับ ในกรณีที่มีสิ่งก่อสร้างอาคารอยู่ด้านข้างการชุดเจาะอุโมงค์ จะต้องมีการบันทึกสภาพอาคาร และสิ่งก่อสร้างดังกล่าว ก่อนการดำเนินการก่อสร้าง รวมถึงค่าระดับตัวอาคารและสิ่งก่อสร้าง เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของผิวดินและโครงสร้างมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น

2.2.16.1 Inclinometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบของชั้นดินที่ระดับความลึกต่าง ๆ ที่มีความแม่นยำสูง โดยจะพิจารณาการเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากและแนวขนานกับอุโมงค์ จุดที่ทำการติดตั้งเครื่องมือชนิดนี้ จะต้องเป็นจุดที่ทราบค่าระดับที่แน่นอน ปลายท่อจะฝังลงในดินแน่นการติดตั้งจะต้องทำได้ใกล้เคียงกับแนวตั้งมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และรูปที่ 2.16

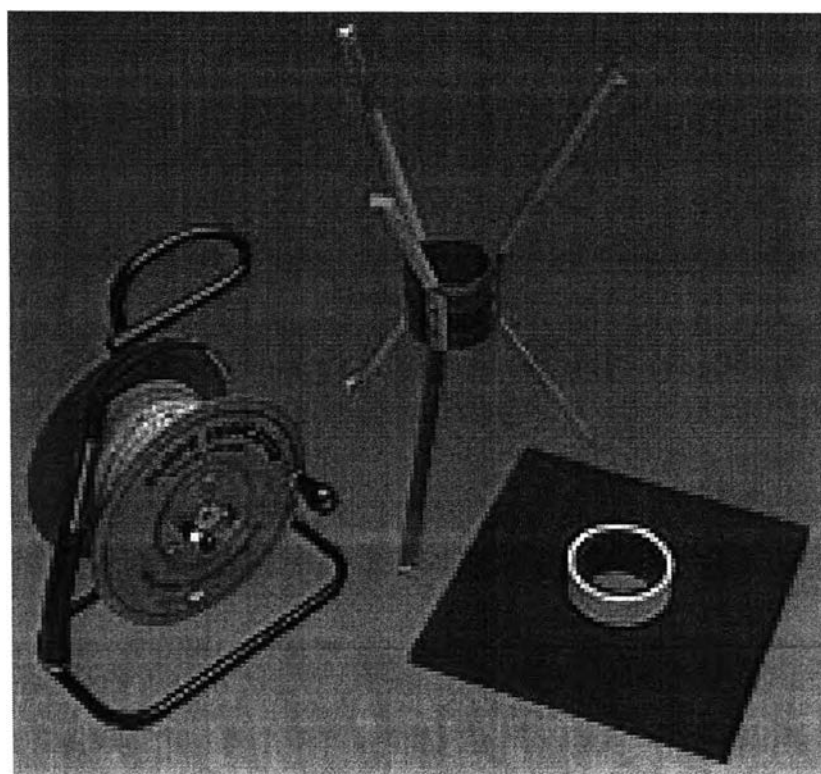


รูปที่ 2.15 เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดิน Inclinometer

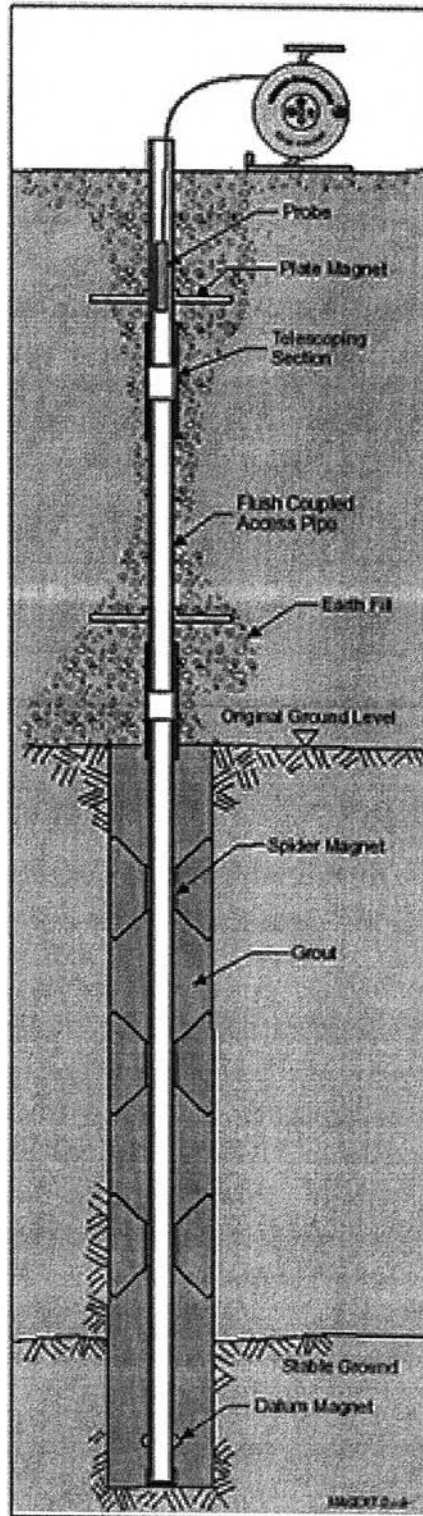


รูปที่ 2.16 แสดงภาพตัดขวางของการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของดิน Inclinometer

2.2.16.2 Extensometer เป็นเครื่องมือวัดการทรุดตัวของชั้นดินที่ระดับความลึกต่าง ๆ โดยใช้สมอแม่เหล็กรูปแมงมุม (Spider Magnetic) 3 ขา การติดตั้งจะทำการเจาะหลุมแล้วใส่ Cement Bentonite Grout ในอัตราส่วนที่เหมาะสม หลังจากนั้นจะสอดท่อลงในหลุม โดยจะมี Casing สวมรอบท่อแล้วดันลงไปตามท่อและ Casing เมื่อสมอแม่เหล็กถูกดันพ้น Casing ที่ตำแหน่งที่ต้องการแล้ว สปริงบนสมอจะติดตัวจิกผิวดินจากนั้นให้ดึง Casing ไปตำแหน่งถัดไป การตรวจวัดการเคลื่อนตัวของชั้นดินในระดับต่าง ๆ จะอาศัยการวัดการเคลื่อนตัวของสมอแม่เหล็ก โดยการใช้ Probe หย่อนลงไปตามท่อ เมื่อ Probe เข้าใกล้สมอแม่เหล็ก Oscillator ใน Probe จะถูกกระตุ้นและส่งสัญญาณไปตามสายสัญญาณไปยังเครื่องรับสัญญาณบนผิวดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.17 และรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.17 เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดิน Extensometer



รูปที่ 2.18 แสดงภาพตัดขวางของการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของดิน Extensometer