บทที่ 4

เทคนิคการก่อสร้างอุโมงค์โดยวิธีสมดุลแรงดันดิน

4.1 การก่อสร้างอุโมงค์โดยวิธีสมดุลแรงดันดิน

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการก่อสร้างอุโมงค์โดยวิธีสมดุลแรงดันดิน ตลอดจนการตรวจสอบและการควบคุมคุณภาพในระหว่างการก่อสร้าง รวมทั้งวิธีการก่อสร้างปล่องอุโมงค์ (Shaft) เพื่อใช้สำหรับเตรียมการติดตั้งหัวขุดเจาะต่อไป

4.1.1 งานก่อสร้างอุโมงค์

งานก่อสร้างอุโมงค์จะดำเนินการตลอด 24 ชั่วโมง โดยแบ่งเป็น 2 กะ (Shift) กะละ 12 ชั่วโมง ซึ่งตามปกติจะทำงานทุกวัน แต่มีบ้างในบางกรณีที่หยุดดำเนินการ เพื่อซ่อมบำรุงอุปกรณ์ของหัวเจาะอุโมงค์ (Tunnel Boring Machine - TBM) รวมถึงการตรวจสอบระบบต่างๆ อาทิเช่น ระบบระบายอากาศ ระบบความปลอดภัยภายในอุโมงค์ รวมถึงการทำงานสำรวจเพื่อตรวจสอบและควบคุมแนวทิศทาง ค่าระดับของตัวอุโมงค์ ซึ่งในการดำเนินงานก่อสร้างอุโมงค์จะกำหนดมาตรการในการทำงานตามลำดับความสำคัญดังนี้

- ความปลอดภัยในงานอุโมงค์
- ความมั่นคงและเชื่อถือได้ของระบบควบคุมงานอุโมงค์
- คุณภาพและประสิทธิภาพสูงสุดในการทำงาน

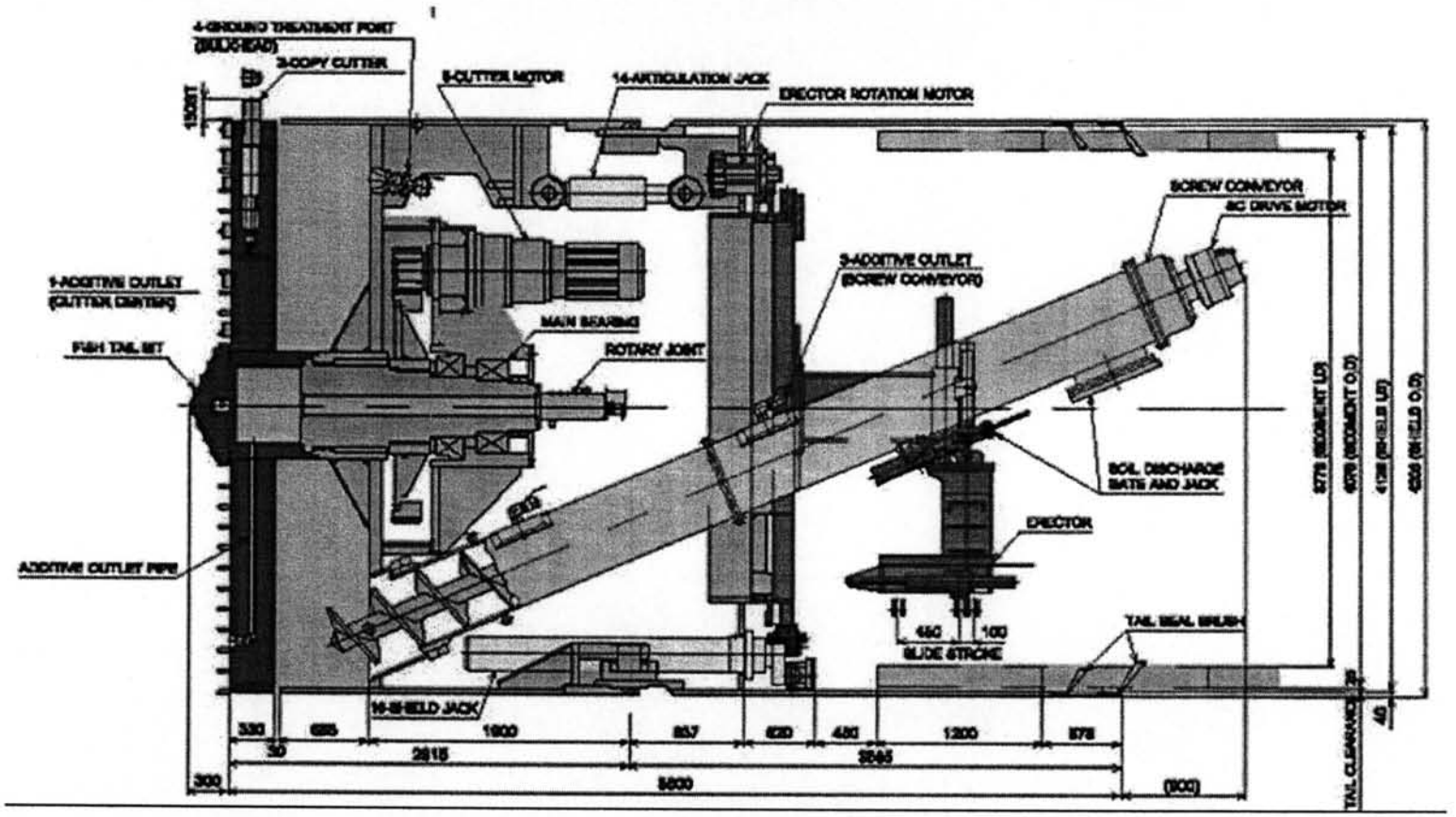
4.1.2 เครื่องจักรและอุปกรณ์สำหรับงานขุดเจาะอุโมงค์

การขุดเจาะอุโมงค์ จะดำเนินการโดยใช้เครื่องจักรขุดเจาะอุโมงค์ชนิดสมดุลแรงดันดินแบบขุดเจาะเต็มหน้า (Full Face Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machine - EPB TBM) แสดงดังรูปที่ 4.1

เครื่องจักร EPB TBM ประกอบด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

1) Shield เป็นปลอกเหล็กทรงกระบอกทำหน้าที่เป็นค้ำยันชั่วคราวขณะทำการขุดเจาะดิน ก่อนที่จะมีการติดตั้งผนังอุโมงค์

2) Cutting Wheel (Cutter Disc) เป็นส่วนที่ใช้ตัดดิน โดยมี Cutter Bit ติดตั้งเป็นแถวตามแนวรัศมี ซึ่งดินที่ถูกตัดจะลอดผ่านช่องเข้าไปยังห้องพักดินต่อไป



รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบของหัวเจาะอุโมงค์ชนิดสมดุลแรงดันดิน แบบขุดเจาะเต็มหน้า (Full Face Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machine -EPB) (มานิต ปานเอม, 2549)

3) Copy Cutter ใช้ตัดดินเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการขุดเจาะในแนวโค้ง ความยาวเมื่อยืดตัวสูงสุด 100 มิลลิเมตร

4) Soil Chamber เป็นห้องพักสำหรับดินที่ถูกขุดจาก Cutter Head ซึ่งได้ติดตั้ง Earth Pressure Measuring Cell ไว้บริเวณ Pressure Bulkhead เพื่อทำการตรวจวัดความดันภายในห้องพักดิน

5) Thrust Jack (Push Cylinder) เป็นส่วนสำคัญในการขับดันหัวเจาะอุโมงค์ ซึ่งติดตั้งเป็นคู่โดยรอบ และสามารถบังคับทิศทางการขุดเจาะด้วยการเลือกตำแหน่งทำงานจาก Hydraulic Jack 20 คู่ ความยาวยืดประมาณ 1.6 เมตร (ค่าสูงสุด 1.7 เมตร) ช่วงการดันแต่ละครั้ง (Stroke) ประมาณ 1.2 เมตร ซึ่งจะเท่ากับความกว้างของผนังอุโมงค์ (Lining) มีกำลังขับคู่ละ 2,000 kN แรงขับสูงสุดที่ทำได้ (Total Thrust) 40,000 kN และความเร็วการขับเคลื่อนสูงสุด 80 มิลลิเมตร/นาที

6) Articulate Jack ใช้เพื่อเพิ่มความโค้งของหัวเจาะอุโมงค์ขณะขุดเจาะในแนวโค้ง

7) Drive Unit เป็นส่วนส่งถ่ายกำลังให้กับ Cutting Wheel เพื่อทำการหมุนตัดดิน

8) Segment Erector เป็นตัวช่วยในการติดตั้งชิ้นส่วนผนังอุโมงค์

9) Screw Conveyor เป็นอุปกรณ์ในการลำเลียงดินจาก Soil Chamber ตรงบริเวณส่วนหน้าของหัวเจาะอุโมงค์ไปยังส่วนท้ายของหัวเจาะอุโมงค์ โดยมีประตู (Gate) เปิด-ปิดด้วยระบบไฮโดรลิก ช่วยควบคุมปริมาณการเคลื่อนที่ของดินตามความเร็วของ Screw

10) Belt Conveyor หรือสายพานลำเลียงดินซึ่งทำหน้าที่ลำเลียงดินไปถ่ายลงรถขนดิน (Muck Car) เพื่อนำดินออกจากอุโมงค์

11) Tail Seal เป็นอุปกรณ์ป้องกันการรั่วซึมของน้ำและน้ำปูนเกร๊าต์เข้าสู่หัวเจาะอุโมงค์ มีลักษณะเป็นแปรงลวดเหล็ก (Wire Brush) จำนวน 3 แถว เรียงไว้โดยรอบผิวด้านในบริเวณส่วนท้ายของหัวเจาะอุโมงค์

12) Air-Lock System เป็นระบบเพื่อสร้างสภาพการทำงานให้เป็นปกติ จากภายใต้แรงอัดอากาศ (Compressed Air)

13) Back Up System ประกอบด้วยระบบชุดอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อช่วยสนับสนุนการทำงานของหัวเจาะอุโมงค์

การขนส่งภายในอุโมงค์ (Tunnel Transportations)

การขนส่งภายในอุโมงค์ ดำเนินการโดยใช้พลังงานจากแบตเตอรี่เป็นหลัก ซึ่งขบวนลำเลียงประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้ แสดงดังรูปที่ 4.2 - 4.4 ซึ่งได้บันทึกภาพจากโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองลาดพร้าวและคลองแสนแสบลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา

- หัวรถจักรรถไฟฟ้า (Battery Locomotive, 12 ton)
- รถขนดิน (Muck Skip Bogies)
- รถขนส่งผนังอุโมงค์ (Segment Transport Bogies)
- รถขนน้ำปูนพร้อมระบบปั๊มอัดน้ำปูน (Grout Car)
- รถโดยสาร (Passengers Car)

ในแต่ละช่วงความยาวของอุโมงค์ ประกอบไปด้วยระบบรางคู่ ซึ่งใช้สำหรับเป็นที่รอสับหลีกขบวนรถไฟ เพื่อลดระยะเวลาในการขนส่งในแต่ละช่วงของงานอุโมงค์ ทั้งนี้จำนวนขบวนรถไฟฟ้าและรางสับหลีก จะแปรผันตามความยาวของงานอุโมงค์ที่กำลังก่อสร้าง เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งการคำนวณและจัดระบบการขนส่งภายในอุโมงค์ จึงเป็นเรื่องสำคัญยิ่งต่อความก้าวหน้าของงานก่อสร้างอุโมงค์ จำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่นิยมใช้คือประมาณ 6 -8 ขบวนจึงจะเหมาะสม รวมถึงระบบอะไหล่รถไฟฟ้า แบตเตอรี่สำรอง ระบบประจุกระแสไฟฟ้า และอื่นๆ ที่ต้องมีสำรองไว้ตลอดเวลาการทำงาน

4.1.3 **การขุดเจาะอุโมงค์** (Tunneling)

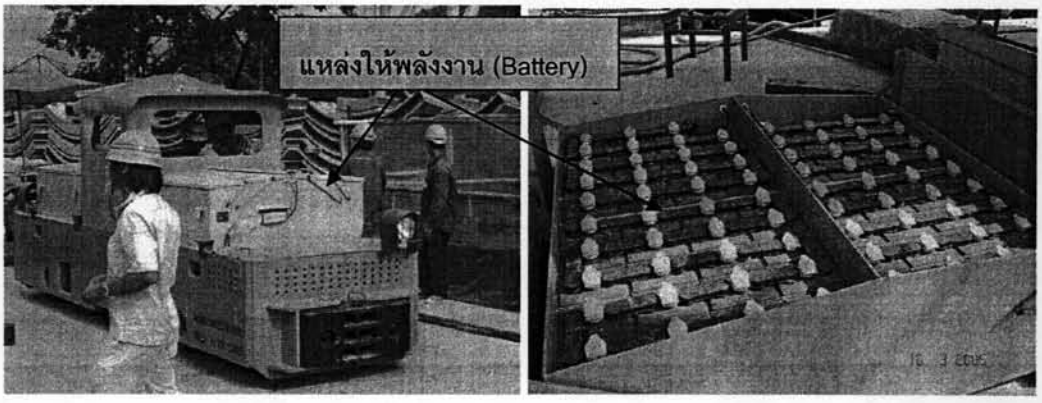
การขุดเจาะอุโมงค์จะเริ่มดำเนินการด้วยขั้นตอนการทำงานหลักๆ ดังต่อไปนี้

- ขั้นตอนการติดตั้งหัวเครื่องจักรและเริ่มขุดเจาะอุโมงค์ (Launching Process)
- การขุดเจาะอุโมงค์ในช่วงเริ่มต้น (Initial Drive)
- การขุดเจาะอุโมงค์ในช่วงปกติ (Main Drive)

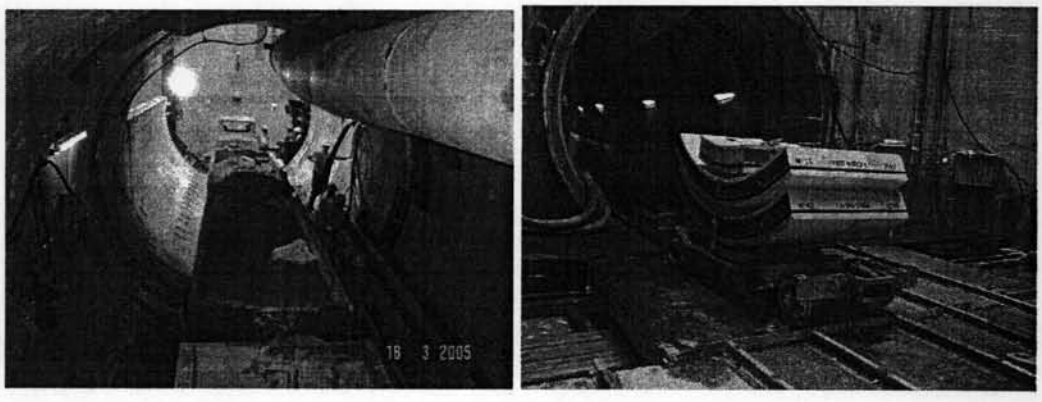
ขั้นตอนการติดตั้งและเริ่มขุดเจาะอุโมงค์ (Launching Process)

หัวเจาะอุโมงค์ จะถูกยกลงในปล่องอุโมงค์ (Shaft) และติดตั้งบนแท่นรองรับ (Launching Cradle) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยใช้รถยก (Mobile Crane) ขนาด 400 ตัน จากนั้นจะทำการปรับตำแหน่งหัวเจาะอุโมงค์ ให้ได้แนวและระดับตามที่ออกแบบไว้ จากนั้นจึงทำการเชื่อมต่อกับ

ระบบไฮดรอลิก (Hydraulic System) และระบบไฟฟ้าชั่วคราวที่อยู่ด้านบนปล่อง เพื่อให้สามารถดำเนินการขับเคลื่อนหัวเจาะอุโมงค์ออกจากปล่องอุโมงค์ได้



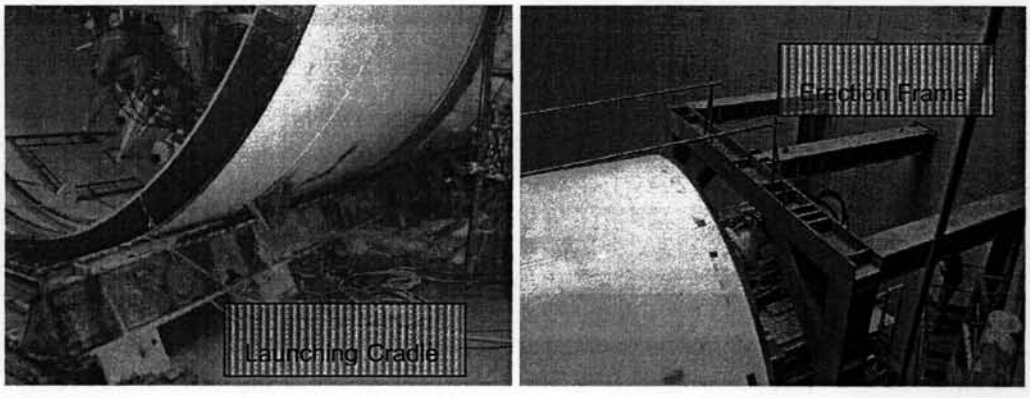
รูปที่ 4.2 หัวรถลากและแบตเตอรี่สำหรับหัวรถลาก (โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองลาดพร้าวฯ)



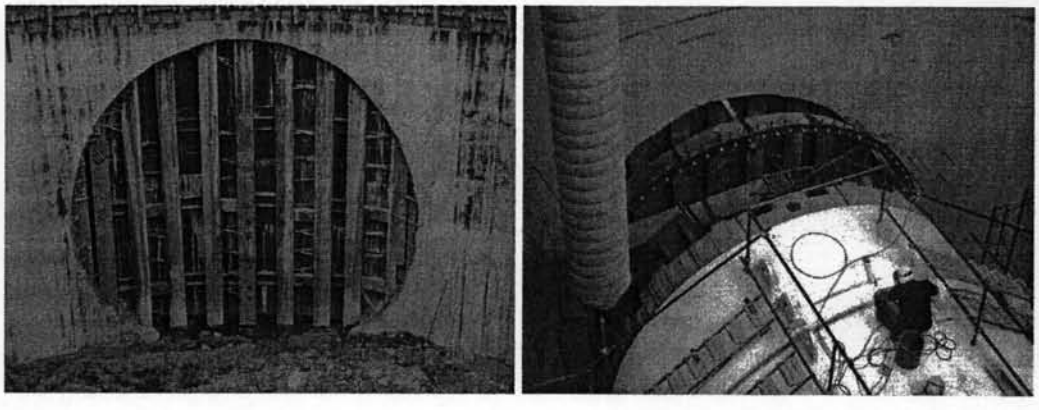
รูปที่ 4.3 รถบรรทุกดิน (Muck Car) และรถขนส่งผนังอุโมงค์ (Segment Car) (โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองลาดพร้าวฯ)

หัวเจาะอุโมงค์จะเจาะผ่านทางช่องเปิด (Soft Eye) ที่ได้ก่อสร้างเตรียมไว้ล่วงหน้าตั้งแต่ขั้นตอนก่อสร้างปล่องอุโมงค์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 รวมถึงการฉีดน้ำปูน (Jet Grouting) บริเวณหน้าช่องเปิด ซึ่งได้ทำการฉีดไว้ล่วงหน้าแล้วเช่นกัน ทั้งนี้เพื่อทำให้ดินภายนอก โดยรอบของช่องเปิดแข็งตัว และป้องกันน้ำรวมถึงดินทรายจากภายนอกปล่องทะลักเข้าสู่ปล่องระหว่างที่หัวเจาะอุโมงค์กำลังเคลื่อนตัวออกจากปล่องอุโมงค์ นอกจากนี้บริเวณรอบช่องเปิดยังติดตั้ง Exit Seal Ring เพื่อป้องกันไม่ให้ดินทรายจากภายนอกไหลทะลักเข้ามาอีกชั้นหนึ่งด้วย

รูปที่ 4.4 รถขนส่งน้ำปูนเกร๊าต์ ขณะกำลังเติมน้ำปูนเกร๊าต์ผ่านท่อจากโม่ผสมด้านบน (โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองลาดพร้าวฯ)

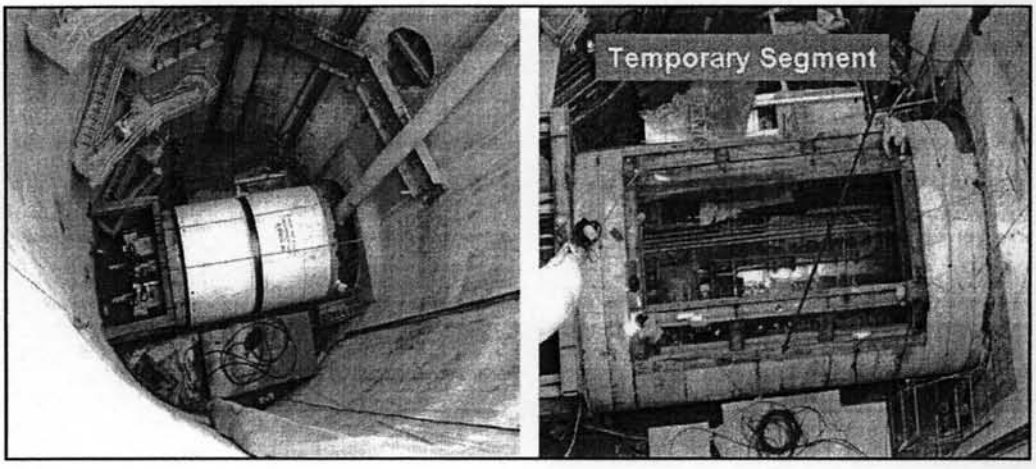


รูปที่ 4.5 การติดตั้ง Launching Cradle และ Reaction Frame (โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองลาดพร้าวฯ)



รูปที่ 4.6 ช่องเจาะทะลุ (Soft eye) โดยหัวเจาะอุโมงค์จะเจาะผ่านบริเวณนี้ (โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองลาดพร้าวฯ)

หัวเจาะอุโมงค์จะเคลื่อนตัวไปข้างหน้า โดยอาศัยการดันจากโครงเหล็กชั่วคราว (Reaction Frame) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งได้ติดตั้งไว้หลังหัวเจาะอุโมงค์ และถ่ายแรงเข้าสู่ผนังปล่องอุโมงค์อีกทีหนึ่ง เพื่อดันหัวเจาะอุโมงค์ไปยังทิศทางที่ต้องการ โดยมีจานตัดดิน (Cutting Disc) ซึ่งอยู่บริเวณด้านหน้าของหัวเจาะอุโมงค์ จะหมุนและคอยกัดผนังคอนกรีตของช่องเปิด (Soft Eye) ที่ได้เตรียมไว้ออกไป โดยในบริเวณช่องเปิด (Soft Eye) จะทำการเสริม Fiber Glass แทนเหล็กเสริม เพื่อให้หัวเจาะอุโมงค์สามารถตัดผ่านผนังปล่องอุโมงค์ได้ จากนั้นจะเริ่มขั้นตอนการประกอบชิ้นงานผนังอุโมงค์ชั่วคราว (Temporary Segmental Ring) จากภายในปล่องออกไป ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และจะเริ่มขบวนการขุดเจาะอุโมงค์ช่วงแรกหรือช่วงเริ่มต้น (Initial Drive) เมื่อหัวขุดเจาะพ้นออกไปจากปล่องอุโมงค์แล้ว



รูปที่ 4.7 การเริ่มขุดเจาะอุโมงค์ และการติดตั้งผนังอุโมงค์ชั่วคราว (โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองลาดพร้าวฯ)

การขุดเจาะอุโมงค์ในช่วงเริ่มต้น (Initial Drive)

เมื่อหัวขุดเจาะ พ้นออกจากปล่องอุโมงค์แล้ว การเจาะผ่านชั้นดินจะอาศัยการผลักดันของไฮดรอลิกแจ็ค (Hydraulic Jack) 20 คู่ พร้อมกับการหมุนตัดดินของ Cutting Wheel ในลักษณะเต็มหน้าตัด ในสภาพที่การขุดเจาะปกติ ห้องพักดิน (Soil Chamber) จะถูกเติมด้วยดินตลอดเวลา แรงดันค้ำยันด้านหน้า (Face Pressure) จะเกิดจากการส่งถ่ายแรงจากไฮดรอลิกผ่านส่วนกั้นแรงดัน (Pressure Bulkhead) ไปยังดินในห้องพักดิน ผนวกกับการกดอัดจากดินที่อยู่ด้านหน้าหัวเจาะอุโมงค์ ซึ่งการตรวจวัดแรงดันค้ำยันด้านหน้า สามารถทำได้ตลอดเวลาด้วยมาตรวัดความดัน (Pressure Gauge) ที่ติดตั้งอยู่บริเวณส่วนกั้นแรงดัน (Pressure Bulkhead)

ดินขุดจะได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติให้มีสภาพเป็น Plastic Fluidity ด้วยการเติมสารผสมเพิ่ม (Additive) เข้าไปผสมกับดินในห้องพักดิน โดยจะทำการกวนให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยใบมีดที่บรรจุอยู่ภายใน เพื่อให้ดินมีความทึบน้ำและเพิ่มประสิทธิภาพเมื่อดินถูกลำเลียงผ่าน Screw Conveyor

ในขณะดำเนินการขุดเจาะอุโมงค์ ถ้าพบชั้นดินเหนียว ชั้นทราย ชั้นดินเหนียวปนทราย หรือน้ำใต้ดิน หัวเจาะอุโมงค์ชนิดแรงดันดินสมดุล (Earth Pressure Balance Type) จะทำการฉีดน้ำหรือสารเคมี เพื่อช่วยให้สกรูลำเลียงดิน (Screw Conveyor) สามารถลำเลียงดินออกมาด้านนอกได้สะดวก ซึ่งชนิดของสารเคมีจะขึ้นอยู่กับลักษณะของชั้นดินที่พบ ดังนี้

1) ในชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff Clay) : จะทำการฉีดน้ำเข้าไปเพื่อย่อยสลายดินให้อ่อนตัวก่อน มิฉะนั้นดินก้อนใหญ่จะทำให้สกรูลำเลียงดินอุดตันได้และทำให้การขนถ่ายดินต้องล่าช้าออกไป (เพราะรถขนดินใน 1 ขบวน ไม่สามารถขนย้ายดินได้หมดในการขุดเจาะอุโมงค์ 1 วง)
2) ในชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium Clay) เป็นชั้นดินที่เหมาะสมกับหัวขุดเจาะประเภทนี้ จึงพบปัญหาค่อนข้างน้อย ดินที่ออกมาจะมีลักษณะเป็นแท่ง
3) ในชั้นทรายปนดินเหนียว (Sandy Clay) หากเป็นทรายร่วนจะต้องฉีดเบนโทไนท์ (Bentonite) หรือโพลิเมอร์ (Polymer) เข้าไปผสมเพื่อป้องกันไม่ให้ดินบริเวณหน้าหัวเจาะอุโมงค์พังทลาย การขุดเจาะจะต้องมีการรักษาสมดุลแรงดันดินหน้าหัวเจาะอุโมงค์ เพื่อป้องกันดินพังเข้ามาในหัวเจาะอุโมงค์
4) กรณีพบน้ำใต้ดิน จะพบในลักษณะที่ซึมเข้ามาตามสภาพชั้นดินตามปกติ ซึ่งหากน้ำใต้ดินทำให้สภาพดินอ่อนตัวมาก ก็จะแก้ปัญหาโดยการฉีดน้ำยาประเภท Quick setting compound Polymer หรือใช้วิธีการปรับปรุงคุณภาพดิน เป็นต้น

ในระหว่างที่หัวเจาะอุโมงค์ทำการขุดเจาะ แรงดันค้ำยันด้านหน้า (Face Pressure) จะถูกตรวจวัดและถูกควบคุมอย่างอัตโนมัติ ด้วยการปรับความเร็วของ Shield Jack และความเร็วรอบของ Screw Conveyor นอกจากนี้ยังต้องควบคุมปริมาณดินที่ขุดเจาะเข้ามาในห้องพักดิน (Soil Chamber) ให้สมดุลกับปริมาณดินที่ลำเลียงออกจาก Screw Conveyor

การขุดเจาะอุโมงค์จะดำเนินต่อไปข้างหน้าอย่างช้าๆ และประกอบชิ้นงานผนังอุโมงค์ไปพร้อมกัน จนได้ระยะทางภายในอุโมงค์ที่เพียงพอต่อการติดตั้งชุดอุปกรณ์ช่วยระบบขุดเจาะ (ประมาณ 150 เมตร) ก็จะหยุด เพื่อทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์ดังกล่าว การติดตั้งชุดอุปกรณ์ช่วยระบบขุดเจาะอุโมงค์ (Back Up System) จะประกอบไปด้วยระบบต่างๆ ดังนี้

- ระบบขับเคลื่อนไฮโดรลิก (Hydraulic Power Unit)
- ระบบรอกยกชิ้นงานผนังอุโมงค์ (Segment Gantry)
- ระบบสายพานลำเลียงดิน (Belt Conveyor System)
- ระบบไฟฟ้า (Electrical System)
- ระบบความปลอดภัยและระบบดับเพลิง (Safety System)
- ระบบฉีดน้ำปูน (Back Grouting System)

ระบบทั้งหมดจะติดตั้งบนรางด้านหลังของหัวขุดเจาะและจะเคลื่อนที่ไปพร้อมๆ กับหัวเจาะอุโมงค์ตลอดการขุดเจาะอุโมงค์ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยพ่วงด้วยการต่อเชื่อมระบบและดึงด้วยลวดสลิงที่ยึดติดกับส่วนท้ายของหัวเจาะอุโมงค์

ภายหลังจากที่ได้ติดตั้งระบบ Back up System แล้วเสร็จ แท่นสำหรับประกอบติดตั้งหัวเครื่องจักร (Launching Cradle) ภายในปล่องอุโมงค์ จะถูกรื้อถอนออกพร้อมกับติดตั้งระบบพื้นเหล็ก สำหรับใช้เป็นระบบสับหลีกรางรถไฟ (Car Shifter Platform) ทันที ทั้งนี้เพื่อให้เริ่มเข้าสู่การขุดเจาะอุโมงค์ในช่วงปกติ (Main Drive) ต่อไป

รูปที่ 4.8 ระบบชุดอุปกรณ์ที่ช่วยสนับสนุนในการขุดเจาะ (Back up Systems) (โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองลาดพร้าวฯ)

การขุดเจาะอุโมงค์ในช่วงปกติ (Main Drive)

ภายหลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนการขุดเจาะอุโมงค์ในช่วงเริ่มต้น (Initial Drive) ซึ่งจะมีระยะทางประมาณ 150 ม.แล้วนั้น ก็จะเข้าสู่ขั้นตอนการขุดเจาะอุโมงค์ในช่วงปกติ (Main Drive) โดยจะดำเนินการขุดเจาะอุโมงค์ในลักษณะเดียวกันนี้ไปจนเสร็จสิ้นงาน ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

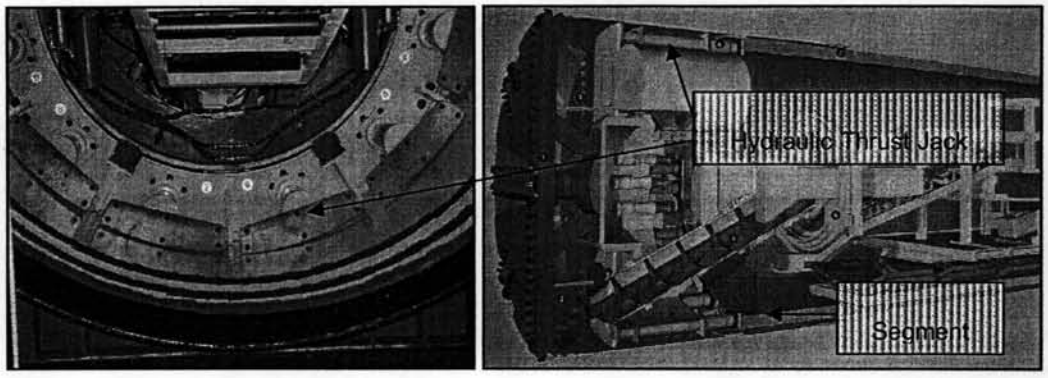
1) การขุดเจาะ (Excavation)

การขุดเจาะดินจะเกิดขึ้นสลับกันไปกับการหยุดเพื่อติดตั้งผนังอุโมงค์ หัวเจาะอุโมงค์จะดำเนินการควบคุมค้ำยันด้านหน้าด้วยการสมดุลของแรงดันดิน โดยจะรักษาสมดุลระหว่างแรงดันค้ำยัน (Face Pressure) กับแรงดันดินที่อยู่ด้านหน้าหัวเจาะอุโมงค์ การเคลื่อนที่ตัวของหัวเจาะอุโมงค์จะอาศัยการผลักดันของ Thrust Jack ดังแสดงในรูปที่ 4.9 พร้อมกับการหมุนตัดดินของ Cutter Wheel ที่อยู่ส่วนหน้าของหัวเจาะอุโมงค์ ดินขุดจะเคลื่อนตัวเข้าสู่ห้องพักดิน (Soil Chamber) และถูกลำเลียงออกสู่ด้านหลังโดย Screw Conveyor

ก่อนหัวเจาะอุโมงค์จะเคลื่อนตัวเพื่อทำการขุดเจาะ ผู้ควบคุมจะทำการกำหนดค่า Target Face Pressure, Target Shield Jack/Speed และ Target Revolution Speed ไว้ล่วงหน้า โดยในระหว่างการขุดเจาะ การควบคุมแรงดันค้ำยัน (Face Pressure) จะอาศัยมาตรวัดแรงดันดิน (Earth Pressure Gauge) ที่ติดตั้งอยู่บริเวณผนังกั้นแรงดัน (Pressure Bulkhead) เพื่อตรวจวัดแรงดันดินที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งแรงดันที่ตรวจวัดได้นี้จะนำไปตรวจสอบกับค่าที่ได้ตั้งไว้ (Target Face Pressure)

ถ้าหากค่าดังกล่าวไม่ตรงกัน ระบบอัตโนมัติจะทำการปรับความเร็วรอบของ Screw Conveyor (Screw Conveyor Speed) เพื่อให้ Face Pressure ที่เกิดขึ้นจริงอยู่ในช่วง ± 20 kN/m^2 ของ Target Face Pressure ถ้าการปรับ Screw Conveyor Speed ไม่สามารถที่จะช่วยให้ Face Pressure ที่เกิดขึ้นมาอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดได้ (เกินขอบเขตที่จะปรับได้) ระบบก็จะทำการปรับอัตราการยืดตัวของ Hydraulic Jack อีกครั้งหนึ่ง จนกว่าแรงดันจะอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ทั้งนี้ขณะที่หัวเจาะอุโมงค์หยุดเจาะ เพื่อทำการดาดอุโมงค์ หรือการติดตั้งผนังอุโมงค์ จะต้องทำการคงแรงดันไว้เพื่อเป็นการรักษาเสถียรภาพด้านหน้าหัวเจาะอุโมงค์ และป้องกันการทรุดตัวของดิน ไปจนถึงการพังทลายของดินด้านหน้าหัวเจาะอุโมงค์ นอกจากนี้การกำหนดค่าการควบคุมดินขุดสามารถทำได้

โดยการกำหนดอัตราส่วนดินที่ขุดเจาะ (Excavation Soil Ratio) ระหว่างดินที่เข้ามาใน Soil Chamber ให้สมดุลกับดินที่ขนถ่ายออกจาก Screw Conveyor ให้มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด หรือ Excavation Soil Ratio มีค่าใกล้เคียง 100% ซึ่งการควบคุมอัตราส่วนดินขุดนี้ถือเป็นหลักการพื้นฐานที่สำคัญของเทคนิค EPB



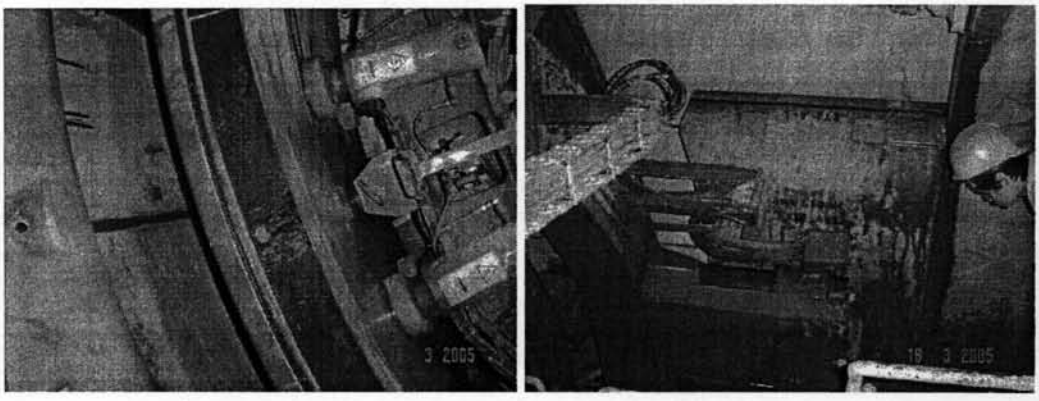
รูปที่ 4.9 การเคลื่อนตัวไปข้างหน้าของหัวเจาะอุโมงค์โดยใช้ Hydraulic Thrust Jack ยันกับผนังอุโมงค์ที่ประกอบแล้วเสร็จ (โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองลาดพร้าวฯ)

2) การดาดอุโมงค์ (Lining Erection)

ชิ้นส่วนผนังอุโมงค์จะถูกลำเลียงโดยขบวนรถบรรทุกผนังอุโมงค์ (Segment Car) มายังหัวเจาะอุโมงค์ และจะถูกยกไปยังที่เก็บเพื่อรอการติดตั้ง ในแต่ละรอบของการขุดเจาะจะทำการหยุดเครื่องเพื่อทำการดาดผนังอุโมงค์ โดยเครื่องติดตั้งผนังอุโมงค์ (Segment Erector) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งจะรับชิ้นส่วนผนังอุโมงค์จากเครื่องป้อนชิ้นส่วน (Segment Feeder) และยกไปติดตั้งในตำแหน่งที่ถูกต้องและสอดคล้องกับแนวการขุดเจาะ (Tunnel Alignment) โดย Thrust Jack จะทำการหดตัวเฉพาะในตำแหน่งที่จะติดตั้งตรงส่วนนั้น ส่วนตำแหน่งอื่นที่ยังไม่ได้ติดตั้ง ยังคงยืดตัวเพื่อค้ำยันกับผนังอุโมงค์วงรอบขุดก่อนเอาไว้ เพื่อให้หัวเจาะอุโมงค์ยึดแน่นต้านแรงดินด้านหน้าหัวเจาะอุโมงค์

การประกอบจะทำในลักษณะทีละชิ้น จากด้านล่างสู่ด้านบนและให้ชิ้นส่วน Key (TK) สลับกันไปมาในแต่ละวง ซึ่งแต่ละชิ้นส่วนจะยึดเข้าหากันด้วยสลักเกลียวรูปตัวยู (Curve Bolt) บริเวณรอยต่อของแต่ละวงจะทำการ Seal ด้วยแผ่นยางรูปวงแหวน (Rubber Gasket) เพื่อป้องกันการซึมของน้ำและวัสดุเกร๊าต์ รวมถึงยังช่วยป้องกันการกระแทก ซึ่งระหว่างการติดตั้งจะระมัดระวังความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้กับผนังอุโมงค์ (Segment)

และจะต้องควบคุมตรวจสอบความสมบูรณ์ของการติดตั้งผนังอุโมงค์ทุกชิ้นในระหว่างติดตั้ง



รูปที่ 4.10 การติดตั้งผนังอุโมงค์ด้วย Segment Erector (โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองลาดพร้าวฯ)

4.1.4 ระบบฉีดน้ำปูน (Back Grouting)

การฉีดน้ำปูนเพื่ออุดช่องว่างระหว่างหัวเจาะอุโมงค์กับผนังอุโมงค์ (Segment) เกิดขึ้นหลังจากที่หัวเจาะอุโมงค์เคลื่อนที่ไปข้างหน้าจนกระทั่งผนังอุโมงค์ที่ประกอบแล้วเสร็จ (Segment Ring) หลุดจากด้านท้ายของหัวเจาะอุโมงค์ การฉีดน้ำปูนจะฉีดผ่านรูเกร๊าต์ของผนังชิ้นส่วนอุโมงค์ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ

การฉีดน้ำปูนในช่วงแรก (Primary Grouting)

การฉีดน้ำปูนในช่วงแรก (Primary Grouting) จะกระทำทันทีหลังจากที่หัวเจาะอุโมงค์เคลื่อนที่ไปข้างหน้าจนกระทั่งผนังอุโมงค์วงที่ประกอบแล้วเสร็จ (Segment Ring) หลุดจากด้านท้ายของหัวเจาะอุโมงค์ (ปกติจะอยู่ในลำดับที่ 3 ถัดจากวงรอบที่เพิ่งประกอบเสร็จ) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันการทรุดตัวของดิน อันเนื่องมาจากความแตกต่างระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (Outer Diameter) ของหัวเจาะอุโมงค์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของวงรอบอุโมงค์ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าจึงทำให้เกิดช่องว่างขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงต้องทำการอุดช่องว่างดังกล่าวด้วยการฉีดน้ำปูน (Back Grouting) ในทันที

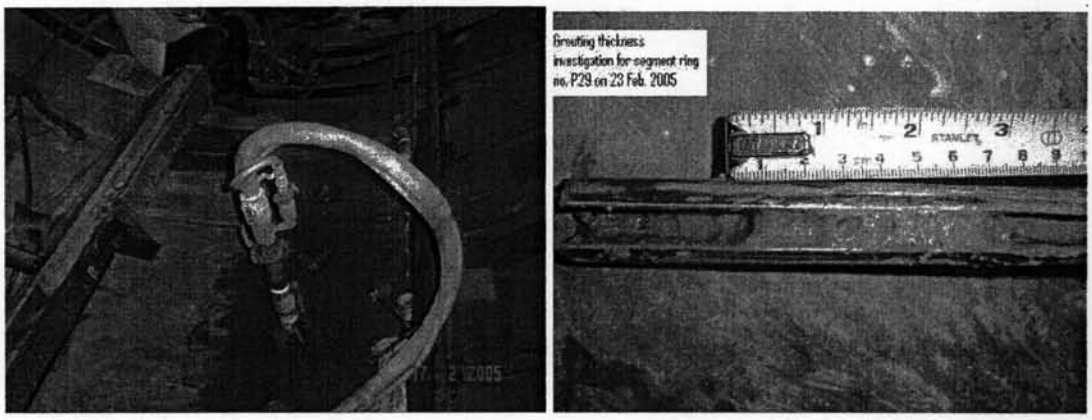
สำหรับการควบคุมปริมาณน้ำปูนที่ฉีดออกไป จะอาศัยการตรวจวัดด้วยมาตรวัดความดัน ซึ่งโดยทั่วไปใช้ความดันประมาณ 2 บาร์ (Bar) ส่วนผสมของน้ำปูนที่ใช้ในการเกร๊าต์ ได้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมสำหรับน้ำปูนเกร๊าต์ (โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำจากบึงมักกะสันลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา, 2548)

ชนิดสารละลาย	น้ำหนัก / ลบ.ม.	ปริมาตร / ลบ.ม.
Solution A		
Cement	240 kg	76 Ltr.
Bentonite	30 kg	12.5 Ltr.
Stabilizer	2.4 kg	2.0 Ltr.
Water	830 kg	830 Ltr.
Solution B		
Sodium Silicate	104 kg	80 Ltr.
Total	1,208 kg	1,000 Ltr. ~ 1 cu.m.

การฉีดน้ำปูนจะกระทำโดยระบบปั๊ม (Pumping) ซึ่งติดตั้งไว้ที่หัวขุดเจาะ ซึ่งสามารถวัดปริมาณและระดับความดันของน้ำปูน รวมถึงบันทึกค่าโดยอัตโนมัติ ปกติจะต้องฉีดน้ำปูนทุกครั้งที่หัวเจาะอุโมงค์มีการเคลื่อนตัว นั่นคือจะกระทำไปพร้อมกับการขุดเจาะและต่อเนื่องไปจนถึงขั้นตอนการดาดอุโมงค์ โดยจะฉีดจนกว่าน้ำปูนจะเต็มช่องว่างภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 4.11

การต่อหัวท่อเกร๊าต์จะต่อเข้ากับรูเกร๊าต์ที่ผนังอุโมงค์เริ่มจากจุดล่างก่อน แล้วจึงเลื่อนมาที่ตำแหน่งสูงขึ้น ใช้ความดันในท่อถึงค่าที่กำหนด (2 Bar) โดยที่หัวท่อเกร๊าต์จะแยกสาร ระหว่างสารละลาย A (Solution A) และสารละลาย B (Solution B) โดยสารละลายทั้งสองนี้จะไปผสมกันนอกผนังอุโมงค์ตรงบริเวณช่องว่าง ซึ่งสารละลาย B ชนิดโซเดียมซิลิเกต (Solution B - Sodium Silicate) จะทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาให้ส่วนผสมน้ำปูน (สารละลาย A) แข็งตัวเร็วขึ้น และใช้เวลาเพียง 8 -10 วินาที สำหรับปริมาณในการฉีดแต่ละครั้ง จะให้ได้ความหนาของชั้นน้ำปูนประมาณ 70 มิลลิเมตร ในส่วนการฉีดน้ำปูนในช่วงแรกนี้ จะต้องกระทำทุกรูเกร๊าต์ของผนังอุโมงค์ทุกชิ้น เริ่มจากล่างขึ้นบน และต้องล้างทำความสะอาดรูเกร๊าต์ให้สะอาด เพื่อสามารถเปิดตรวจสอบ และทำการฉีดน้ำปูนในช่วงที่สอง (Secondary Grouting) ต่อไปได้



รูปที่ 4.11 การฉีดน้ำปูนเกร๊าต์และการตรวจสอบความหนาของชั้นน้ำปูนเกร๊าต์ (โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองลาดพร้าวฯ)

การฉีดน้ำปูนในช่วงที่สอง (Secondary Grouting)

หลังจากการฉีดน้ำปูนในช่วงแรก (Primary Grouting) เสร็จสิ้น และปล่อยให้น้ำปูนที่ฉีดไปแล้วแข็งตัว อาจจะเกิดการหดตัว หรือเกิดช่องว่างที่ไม่เต็มในการฉีดน้ำปูนครั้งแรกได้ จึงต้องมีการฉีดน้ำปูนในช่วงที่สอง (Secondary Grouting) อีกครั้ง โดยปกติของงานอุโมงค์ จะฉีดน้ำปูนในช่วงที่สอง ที่ท้ายขบวนของระบบสำรอง (Back up Trailer) ซึ่งมีระยะห่างจากหน้าหัวขุดเจาะประมาณ 70 เมตร ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการทำงาน และจะฉีดออกไปเฉพาะสารละลาย A (Solution A) เท่านั้น ซึ่งความดันที่ใช้จะมีค่าไม่เกิน 2.5 Bar

สำหรับการป้องกันการรั่วซึมบริเวณส่วนหางของหัวเจาะอุโมงค์ (Tail Seal) จะอาศัยแปรงลวดเหล็ก (Wire Brush Tail Seal) จำนวน 3 แถว ติดตั้งเรียงไว้โดยรอบผิวด้านในส่วนท้ายของหัวเจาะอุโมงค์ (Tail Skin) เพื่อทำการป้องกันการไหลซึมเข้ามาของน้ำ และการทะลักเข้ามาของน้ำปูนเกร๊าต์ตรงบริเวณรอยต่อระหว่างหัวเจาะอุโมงค์กับผนังอุโมงค์

ในระหว่างการเคลื่อนที่ของหัวเจาะอุโมงค์ โพรงหรือช่องว่างจะถูกเติมด้วยจารบี (Grease) ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันการรั่วซึม และสามารถป้องกันการแข็งตัวและการเกาะติดของน้ำปูนเกร๊าต์ และการพร่องของจารบีอันเนื่องมาจากเกาะติดไปกับผิวคอนกรีตของผนังอุโมงค์ จะถูกเติมเต็มด้วยระบบฉีดอัตโนมัติ (Automatic Injection System) ที่อยู่ภายใน Tail Skin

4.1.5 ระบบระบายอากาศ (Ventilation System)

ประกอบด้วยพัดลมระบายอากาศแบบหลายใบพัด (Multi Stages Blower System) เพื่อเป่าอากาศเย็นจากด้านบนของบ่อก่อสร้าง (Working Shaft) ผ่านลงไปอุโมงค์ โดยผ่านท่อลมขนาดใหญ่ (Air Duct) ไปยังบริเวณส่วนหัวเครื่องจักรขุดเจาะ แล้วผ่านระบบปรับอากาศ (Air condition) เพื่อเปลี่ยนเป็นลมเย็น (Cooled Air) โดยจะระบายความร้อนของระบบขุดเจาะอุโมงค์และช่วยให้อากาศหมุนเวียนถ่ายเทตลอดแนวอุโมงค์ ซึ่งลมเย็นที่ถูกเป่าออกมาจะเข้าแทนที่และไล่อากาศร้อน ให้ไหลออกจากส่วนหัวเครื่องจักรขุดเจาะกลับออกไปยังบ่อก่อสร้าง จากนั้นอากาศร้อนจะถูกดูดออกจากบ่อด้วยชุดพัดลมดูดอากาศที่ติดตั้งเหนือบ่อคอนกรีต ทำให้อากาศภายในอุโมงค์เกิดการถ่ายเทหมุนเวียนตลอดเวลาของการทำงาน ทั้งนี้ระบบระบายอากาศ จะทำการถ่ายเทอากาศในอัตรา 6-12 ลบ.ม./นาที/คน

4.1.6 ระบบควบคุมหัวเจาะอุโมงค์ (TBM Alignment Control System)

การควบคุมหัวเครื่องจักรให้อยู่ในระดับและทิศทางตามที่ออกแบบไว้ กระทำได้ 2 วิธี ดังนี้

- วิธีควบคุมด้วยกล้องสำรวจ (Physical Survey Method)
- วิธีควบคุมด้วยระบบนำร่องอัตโนมัติ (Robotec Survey System – Guidance System)

วิธีควบคุมด้วยกล้องสำรวจ (Physical Survey Method)

การควบคุมด้วยกล้องสำรวจ ใช้เพื่อกำหนดตำแหน่งพิกัดตามระบบโครงข่ายสำรวจ โดยใช้ระบบโครงข่ายบนพื้นดินระบุตำแหน่งของสิ่งก่อสร้าง อาทิเช่น อาคารรับน้ำ ปล่องอุโมงค์ (Shaft) แนวอุโมงค์ อาคารสถานีสูบน้ำ และบ่อสูบน้ำ เป็นต้น ซึ่งงานควบคุมด้วยกล้องสำรวจสำหรับงานก่อสร้างภายในอุโมงค์ จะแบ่งออกเป็น

- การควบคุมในแนวราบ ด้วยวิธีโครงข่ายแบบเปิดและระบบพิกัด (Horizontal Control by Traverse & Coordinate System)
- การควบคุมในแนวดิ่ง (Vertical Control)

การควบคุมแนวการขุดเจาะและระดับภายในอุโมงค์ (Main Control in Tunnel) มีดังนี้

1) การถ่ายตำแหน่งพิกัดลงสู่อุโมงค์ด้วยวิธี Wire Drop Survey Method โดยใช้ 2 ดิ่งในปล่องเดียว ด้วยระบบ Coordinate N,E

2) การถ่ายค่าพิกัดโดยใช้ 2 ปล่องอุโมงค์ (2 Vertical Shafts)

3) การถ่ายค่าระดับลงสู่ปล่องอุโมงค์โดยชั้นเทปพิเศษ

การสำรวจและวางแนวอุโมงค์ในแนวราบ จะใช้การสำรวจจากกล้องสำรวจแบบ Total Station เพื่อใช้เปรียบเทียบและแก้ไขข้อมูลกับระบบนำร่องอัตโนมัติของหัวเจาะอุโมงค์ แล้วทำการปรับแก้ไขข้อมูล เพื่อให้มีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น ซึ่งการสำรวจและตรวจสอบค่าต่างๆ มีดังนี้

- การควบคุมแนวอุโมงค์ (Line Control)
- การควบคุมแนวระดับ (Level Control)
- การควบคุมความฉากของอุโมงค์ (Square Control)
- การควบคุมแนวดิ่งของอุโมงค์ (Plumb Control)
- การควบคุมการหมุนของอุโมงค์ (Rolling Control)

การสำรวจด้วยกล้องสำรวจ (Physical Survey) นี้ จะกระทำทุกวันๆละ 2 ครั้ง เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปปรับแก้ กับระบบควบคุมของหัวเครื่องจักรต่อไป

วิธีควบคุมด้วยระบบนำร่องอัตโนมัติ (Robotec Survey - Guidance System)

ระบบนำร่องอัตโนมัติ (Robotec Survey - Guidance System) เป็นระบบควบคุมตำแหน่ง (Position) ทิศทาง (Azimuth or Bearing) และระดับ (Level) โดยอาศัยการทำงานของระบบค่าพิกัดของกล้องและเป้ารับด้านหน้า ระบบจะถูกป้อนข้อมูลเบื้องต้นตามค่าและระดับอุโมงค์ที่ใช้ในการออกแบบรวมถึงข้อมูลในแนววิถีโค้ง (Curve Data) ซึ่งข้อมูลที่ป้อนให้แก่ระบบนำทางอัตโนมัติ มีดังนี้

- ข้อมูลเกี่ยวกับมุมและทิศทางของอุโมงค์ (Tunnel Azimuth or Bearing)
- ข้อมูลเกี่ยวกับระยะทางหรือความยาวของอุโมงค์ (Tunnel Distance)
- ข้อมูลเกี่ยวกับแนววิถีโค้งของอุโมงค์ (Tunnel Curve Data)

- ข้อมูลเกี่ยวกับค่าระดับของอุโมงค์ (Tunnel Level)

ข้อมูลทั้งหมดของแนวทิศทางและค่าระดับอุโมงค์ จะถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยระบบนำร่องอัตโนมัติ (Robotec Survey - Guidance System) และจะถูกใช้ในการเปรียบเทียบกับชุดข้อมูลสำรวจ (Survey Data) ที่ได้จากการสำรวจด้วยวิธี Physical Survey เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องของแนวอุโมงค์ในขณะก่อสร้าง ระบบนี้จะทำการบันทึกและแสดงผลอย่างละเอียดทุกๆ 1 เซนติเมตร ที่หัวเครื่องจักรเคลื่อนที่ไป ทำให้ผู้ควบคุมหัวเจาะอุโมงค์ สามารถทราบข้อมูลและปรับบังคับหัวเจาะอุโมงค์ ให้เจาะอุโมงค์ไปในทิศทางที่ออกแบบไว้ได้ตลอดเวลา โดยอ่านข้อมูลจากจอควบคุมของระบบ (Monitor Robotec Survey System)

4.2 การก่อสร้างปล่องอุโมงค์ (Shaft Construction)

ในการก่อสร้างอุโมงค์ส่งน้ำหรืออุโมงค์ประเภทต่างๆ โดยทั่วไปแล้วขั้นตอนในการก่อสร้างขั้นแรกสุดก็คือการก่อสร้างปล่องอุโมงค์ (Working Shaft or Concrete Shaft) ซึ่งเป็นปล่องขนาดใหญ่ที่มีระดับความลึกมากกว่าแนวระดับการขุดเจาะของอุโมงค์ เพื่อใช้เป็นที่สำหรับเตรียมการติดตั้งหัวเจาะอุโมงค์ เพื่อขุดเจาะอุโมงค์ออกไปตามแนวและระดับความลึกที่ต้องการ

นอกจากนี้ในการก่อสร้างอุโมงค์ในช่วงระยะความยาว 2-3 กิโลเมตร อาจมีการนำหัวขุดเจาะขึ้นมาบำรุงรักษา หรือเมื่อเสร็จสิ้นงานก่อสร้างอุโมงค์แล้วจะต้องนำหัวเจาะอุโมงค์ขึ้นมาเพื่อดำเนินการในขั้นตอนอื่นต่อไป ด้วยเหตุนี้การที่จะนำหัวเจาะอุโมงค์ขึ้นมาได้ จึงจำเป็นต้องก่อสร้างปล่องรับ ไว้ที่ปลายทางอีก 1 ปล่อง เพื่อใช้ในการยกหัวเจาะอุโมงค์ขึ้นมาด้านบน การก่อสร้างปล่องดังกล่าวจะมีลักษณะรูปแบบและการก่อสร้างในลักษณะเดียวกันทั้งหมด ต่างกันที่ขนาดของปล่องรับอาจจะมีขนาดเล็กกว่าเท่านั้น การขุดเจาะอุโมงค์จึงต้องขุดเจาะออกจากปล่องส่ง (Launching Shaft) ไปยังปล่องรับ (Receiving Shaft) เสมอ แต่รูปแบบของปล่องอาจจะมีรูปร่างและขนาดที่แตกต่างกันออกไป โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นทรงกลม สี่เหลี่ยม หรือวงรี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพพื้นที่และจุดประสงค์ในการใช้งาน สำหรับวิธีการก่อสร้างปล่องอุโมงค์ (Shaft) ที่ใช้กันโดยทั่วไปสำหรับงานก่อสร้างอุโมงค์ในประเทศไทย มีรูปแบบการก่อสร้างแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด ดังนี้

- ปล่องอุโมงค์ชนิดใช้เข็มพืด (Sheet Pile)
- ปล่องอุโมงค์ชนิดใช้เสาเข็มเจาะเรียงชิดกัน (Secant or Contiguous Pile)
- ปล่องอุโมงค์ชนิดกำแพงใต้ดิน (Diaphragm Wall)

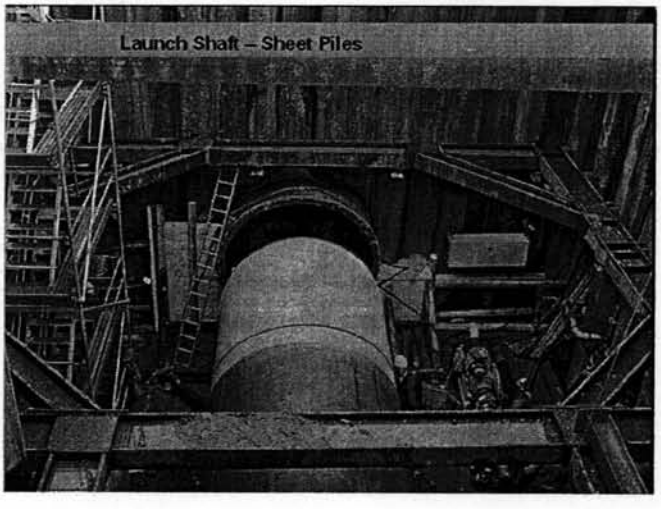
- ปล่องอุโมงค์ชนิดใช้คอนกรีตหล่อในที่ (Open Caisson)

บางครั้งพบว่าการก่อสร้างปล่องอุโมงค์อาจจำเป็นต้องนำวิธีการดังกล่าวมาใช้ร่วมกัน เช่น ในกรณีที่มีระดับน้ำใต้ดินสูง หรือกรณีที่สภาพชั้นดินเปลี่ยนแปลงไปจากที่ออกแบบไว้มาก หรือกรณีที่ต้องก่อสร้างปล่องอุโมงค์ในแม่น้ำลำคลอง เป็นต้น

4.2.1 ปล่องอุโมงค์ชนิดใช้เข็มพืด (Sheet Pile Type)

การก่อสร้างปล่องอุโมงค์โดยใช้เข็มพืด (Sheet Pile) เป็นผนังด้านข้างจะใช้ในการขุดเจาะอุโมงค์ในที่ระดับความลึกไม่มากนัก และใช้กันมากในงานวางท่อที่มีลักษณะเป็นงานดันท่อลอด (Pipe Jacking) เนื่องจากก่อสร้างได้ง่าย สะดวกและรวดเร็ว จึงใช้เป็นปล่องชั่วคราวทดแทนการสร้างปล่องชนิดคอนกรีตที่เป็นลักษณะของปล่องถาวร ดังแสดงในรูปที่ 4.12

เมื่องานก่อสร้างแล้วเสร็จก็จะถอนเข็มพืดออกและทำการถมทรายกลับคืน การทำปล่องอุโมงค์รูปแบบนี้มีความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงคุณภาพดินในชั้นล่างก่อน เพื่อใช้สำหรับก่อสร้างพื้นคอนกรีต และช่วยในการป้องกันการเกิดดินไหลเข้ามาในปล่อง การก่อสร้างปล่องอุโมงค์โดยใช้เข็มพืดในพื้นที่ที่มีระดับความลึกมากๆ มักประสบปัญหาที่ตามมาคือ จะต้องทำโครงสร้างค้ำยันผนังปล่องไว้ตลอดเวลา ทำให้สูญเสียพื้นที่ในการทำงานไปบางส่วน ดังนั้นปล่องอุโมงค์ประเภทนี้จึงต้องมีขนาดใหญ่กว่าปล่องชนิดคอนกรีตแต่ก็มีลักษณะที่เป็นข้อได้เปรียบกว่าปล่องชนิดคอนกรีตคือสามารถกำหนดตำแหน่งและก่อสร้างช่องเปิด (Soft Eye) ได้สะดวกกว่า เพราะสามารถกำหนดตำแหน่งและทำการปรับปรุงหรือออกแบบโครงสร้างได้ หลังจากที่ปล่องอุโมงค์ได้ก่อสร้างเสร็จแล้ว



รูปที่ 4.12 การก่อสร้างปล่องอุโมงค์ชนิดใช้เข็มพืด (Sheet Pile Type) (มานิต ปานเอม, 2549)

4.2.2 **ปล่องอุโมงค์ชนิดใช้เสาเข็มเจาะเรียงชิดกัน** (Secant or Contiguous Pile Type)

การก่อสร้างปล่องในลักษณะนี้จะสะดวกและกระทำได้ง่าย พร้อมทั้งสามารถก่อสร้างในระดับที่มีความลึกมากๆ การก่อสร้างจะใช้ลักษณะการทำเสาเข็มเจาะให้ได้ระดับความลึกที่ต้องการ และทำเสาเข็มเจาะให้เรียงชิดติดกันไปตลอด คล้ายกับเป็นแนวกำแพง จึงทำให้สามารถก่อสร้างปล่องอุโมงค์ได้ลึกมากถึงระดับ 30 เมตร โดยทั่วไปนิยมก่อสร้างปล่องเป็นรูปทรงกลม เพื่อให้เกิดแรงค้ำยันด้านข้างที่น้อยกว่าในรูปทรงสี่เหลี่ยม สำหรับการเตรียมจุดที่จะทำช่องเปิด (Soft Eye) ออกจากปล่องก็สามารถกระทำได้หลังจากก่อสร้างปล่องแล้วเสร็จได้เช่นกัน การก่อสร้างปล่องอุโมงค์ในรูปแบบนี้มักใช้ในงานก่อสร้างที่ต้องการความรวดเร็ว เพราะสามารถขุดดินออกจากปล่องได้สะดวกตลอดแนวความลึก อีกทั้งสามารถควบคุมแนวการเอียงตัวของปล่องได้ง่ายขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะการทำเสาเข็มเจาะจะสามารถควบคุมแนวดิ่งได้ดีกว่า

4.2.3 **ปล่องอุโมงค์ชนิดกำแพงใต้ดิน** (Diaphragm Wall Type)

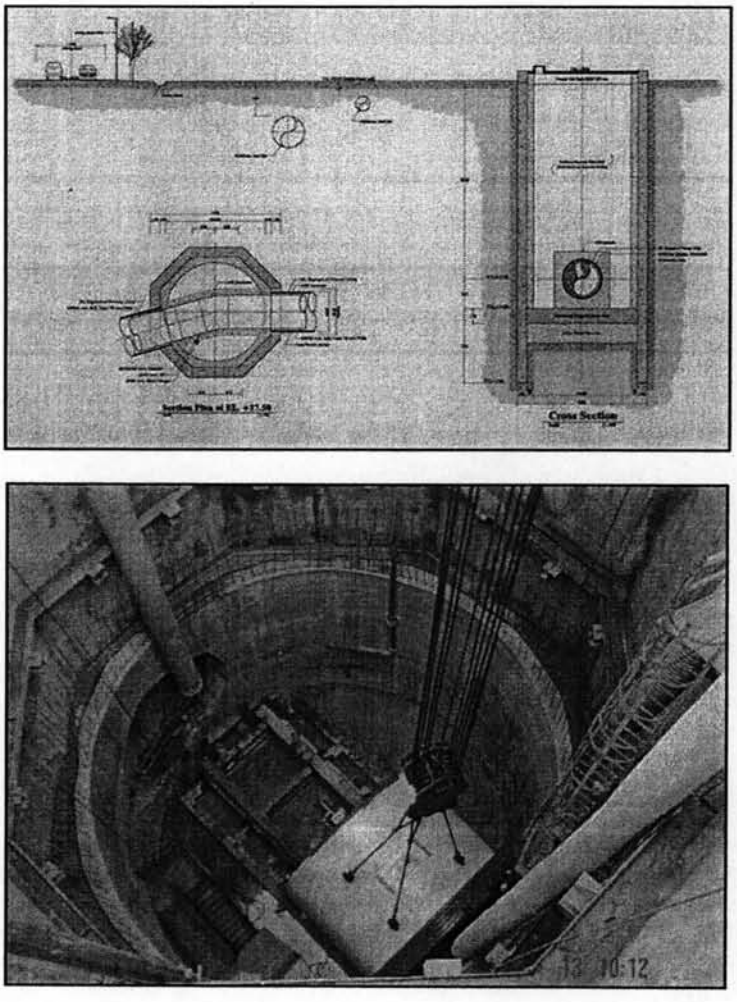
ในต่างประเทศมีการใช้ Diaphragm Wall มาเป็นโครงสร้างของปล่องอุโมงค์มาเป็นระยะเวลานาน แต่สำหรับในประเทศไทยได้เริ่มมีการนำมาใช้ แต่ยังไม่แพร่หลายนัก ซึ่งในปัจจุบันโครงการที่มีการนำมาใช้ ได้แก่ โครงการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน, โครงการก่อสร้างอุโมงค์ส่งน้ำของการประปานครหลวง และโครงการบำบัดน้ำเสียของกทม. สำหรับขั้นตอนวิธีการก่อสร้างก็มีรูปแบบขั้นตอนในลักษณะเดียวกันกับการก่อสร้างกำแพงใต้ดินทั่วไป แต่ที่นิยมกันมากมักจะก่อสร้างในลักษณะของรูปหลายเหลี่ยม โดยมีผนังด้านข้างอย่างต่ำ 8 เหลี่ยม เพื่อให้มีลักษณะใกล้เคียงกับทรงกลมมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ซึ่งตามปกติมักก่อสร้างปล่องที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในมากกว่า 10 เมตร และมีความลึกเฉลี่ยประมาณ 30 เมตร จากระดับพื้นดิน

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการก่อสร้างได้พัฒนาไปมากและมีการผลิตวัสดุทางวิศวกรรมใหม่ๆ ขึ้นมาใช้ โดยล่าสุดได้มีการนำวัสดุเสริมแรงประเภท Fiber reinforced polymer reinforcement มาใช้แทนเหล็กเสริมคอนกรีต ซึ่งจะช่วยลดขั้นตอนในการสกัดคอนกรีตเพื่อตัดเหล็กเสริมออกไป แต่ทั้งนี้วัสดุเสริมแรงดังกล่าวยังมีราคาที่ค่อนข้างสูง จึงส่งผลให้ราคาค่าก่อสร้างปล่องอุโมงค์สูงตามไปด้วย

4.2.4 **ปล่องอุโมงค์ชนิดใช้คอนกรีตหล่อในที่** (Open Caisson Type)

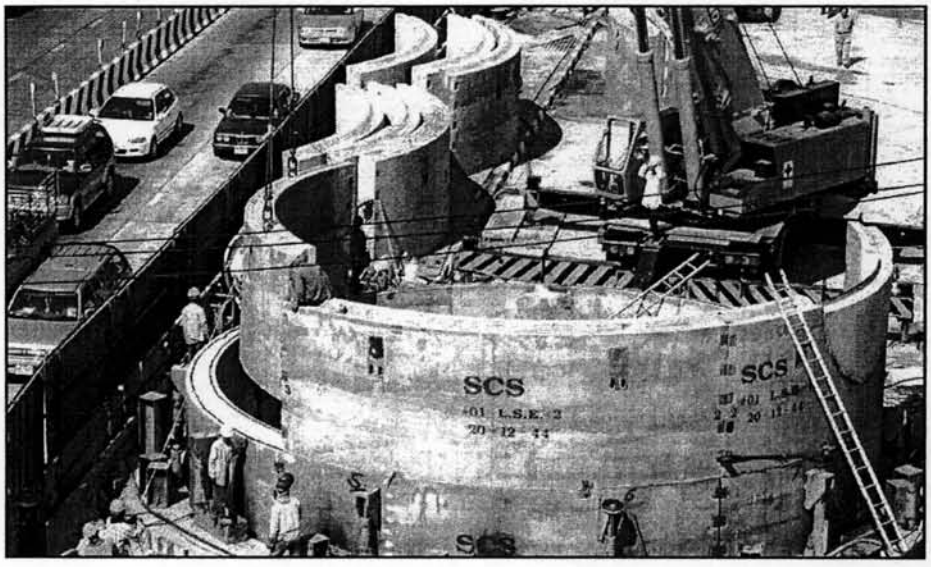
การก่อสร้างปล่องอุโมงค์รูปแบบนี้ มักก่อสร้างเป็นปล่องคอนกรีตและให้ตัวปล่องคอนกรีตจมลงด้วยน้ำหนักของตัวเองจนถึงระดับที่ต้องการ โดยในการที่จะทำให้ตัวปล่องจมลง

ด้วยน้ำหนักของตัวเองนั้น จะต้องมีการคำนวณน้ำหนักของปล่องคอนกรีตและแรงเสียดทานจากดินทั้งด้านนอกและด้านในให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ซึ่งบางครั้งในการก่อสร้างที่ดินมีความแข็งมากจำเป็นต้องมีการใช้น้ำหนักถ่วง (Counter Weight) มาช่วยกดทับด้านบนหรือใช้แม่แรงไฮโดรลิก (Hydraulic Jack) กดด้านบนตัวผนังของปล่องคอนกรีตให้จมลง และใช้การขุดดินด้านในของปล่องออก เพื่อช่วยลดแรงเสียดทาน แต่ทั้งนี้ต้องมีการหล่อลื่นที่ผนังของปล่องคอนกรีตด้านนอก โดยการฉีดสารเบนโทไนท์ (Bentonite) รอบๆ ซึ่งการก่อสร้างในปัจจุบันพบว่าผนังปล่องคอนกรีตนิยมใช้เป็นแบบคอนกรีตหล่อสำเร็จ (Precast Concrete Wall) ดังแสดงในรูปที่ 4.14 หรือใช้รูปแบบของแบบหล่อชนิดปรับเลื่อนได้ (Slip Form) ดังแสดงในรูปที่ 4.15 เพราะก่อสร้างได้รวดเร็วกว่าการเทคอนกรีตในที่และสามารถก่อสร้างได้หลายรูปแบบเช่น รูปแคปซูล รูปสี่เหลี่ยม หรือวงกลม ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพแต่ละพื้นที่



รูปที่ 4.13 การก่อสร้างปล่องอุโมงค์ชนิดกำแพงใต้ดิน (Diaphragm Wall) (มานิต ปานเอม, 2549)

สำหรับการควบคุมการจมของปล่องอุโมงค์ จะต้องมีการควบคุมให้อยู่ในแนวดิ่งมากที่สุด ซึ่งการก่อสร้างในขั้นตอนแรกจะต้องหล่อคานคอนกรีตภายนอก (Concrete Ring Beam) โดยรอบปล่องเสียก่อน เพื่อใช้เป็นตัวควบคุมในการจม ซึ่งคานดังกล่าวทำหน้าที่เสมือนเป็นกำแพงนำร่อง (Guide wall) ในการจมด้วยน้ำหนักของปล่องเอง นอกจากนี้ยังใช้รับน้ำหนักผนังปล่องขณะที่ยังจมไปยังไม่ได้ระดับตามที่ต้องการอีกด้วย

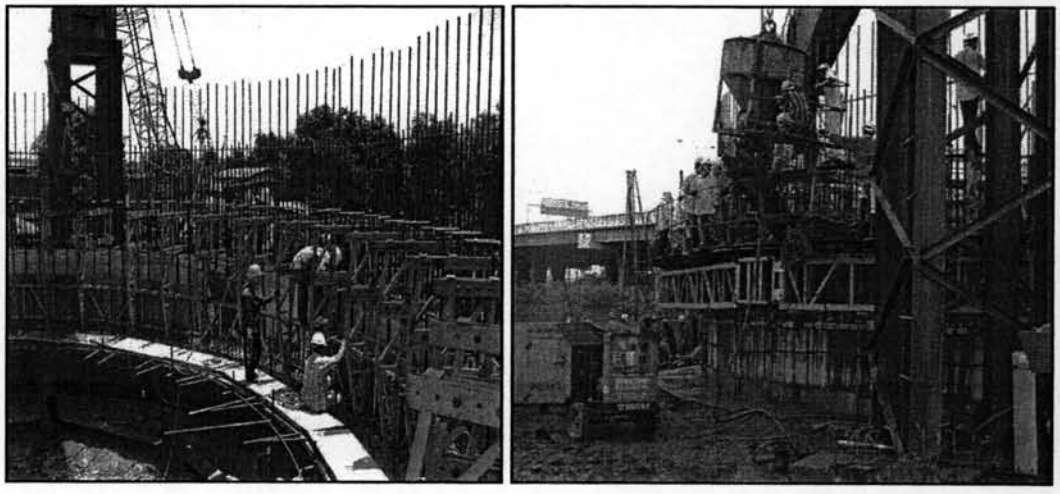


รูปที่ 4.14 การก่อสร้างปล่องอุโมงค์โดยใช้รูปแบบคอนกรีตหล่อสำเร็จ (Precast Concrete Wall) (มานิต ปานเอม, 2549)

ก่อนเริ่มทำการก่อสร้างปล่องอุโมงค์จะทำการสำรวจกำหนดเขตพื้นที่ทำงาน ตลอดจนกำหนดตำแหน่งศูนย์กลาง และขนาดพื้นที่ของบ่อที่จะทำการก่อสร้าง โดยการเตรียมพื้นที่ทำงาน อุปกรณ์ เครื่องจักร เครื่องมือ และวัสดุต่างๆให้พร้อม และกำหนดแผนงานการทำงานที่ชัดเจน หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการขุดเปิดหน้าดินลึกประมาณ 5-10 เมตร และปรับพื้นที่ภายในด้วยทรายบดอัดแน่นจากนั้นจึงเทคอนกรีตหยาบเพื่อปรับพื้นให้ได้ระดับ ซึ่งง่ายต่อการทำงานขั้นตอนอื่นต่อไป

การตอกเข็มพืดก็เป็นอีกงานหนึ่งที่ทำขึ้นเพื่อจะใช้เป็นตัวรองรับเสมือนเป็นเสาเข็มของคานคอนกรีต (Concrete Ring Beam) หลังจากเทคอนกรีตแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการก่อสร้างผนังบ่อ โดยเริ่มผูกเหล็กและเทคอนกรีตในส่วนของ Cutting Shoe หรือส่วนปลายแหลมที่ใช้เป็นตัวกดนำเข้าไปในดิน หลังจากนั้นจึงทำการก่อสร้างกำแพงของปล่องอุโมงค์ โดยเริ่มจากการผูกเหล็กติดตั้งแบบแล้วเทคอนกรีต จนได้ระดับความสูงตามที่ได้มีการคำนวณน้ำหนักไว้ในแต่ละชั้น

จากนั้นจึงทำการจมปล่องอุโมงค์ โดยใช้วิธีค่อยๆขุดดินภายในบ่อออก จนกระทั่งปล่องจมลงไปเหลือความสูงจากพื้นดินประมาณ 1.50 เมตร แล้วจึงหยุดการขุดดิน และเริ่มทำการเทกำแพงคอนกรีตวงต่อไป สำหรับช่วงรอยต่อของคอนกรีตแต่ละวงจะติดตั้งยางกันน้ำเอาไว้ เพื่อป้องกันน้ำซึมเข้าไปในปล่อง และเมื่อทำการก่อสร้างและจมใกล้ถึงระดับที่ออกแบบ จะมีการฝังคานเหล็กรับน้ำหนักปล่องอุโมงค์ (Stopper Beam) ไว้ที่วงสุดท้าย เพื่อเป็นตัวรั้งไม่ให้การจมปล่องเลยต่ำกว่าระดับที่กำหนด และขั้นตอนต่อไปจะมีการเทปิดก้นปล่องด้วยคอนกรีตเพื่อป้องกันน้ำใต้ดิน (Concrete Plug) จากนั้นจึงผูกเหล็กบนชั้นของ Concrete Plug เพื่อเทเป็นพื้นปล่อง (Base Slab) อีกชั้นหนึ่ง



รูปที่ 4.15 แสดงการก่อสร้างปล่องอุโมงค์โดยใช้แบบหล่อชนิดปรับเลื่อนได้ (Slip Form) (โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองลาดพร้าวฯ)

สำหรับการควบคุมการจมปล่องอุโมงค์ที่นิยมทำกันในปัจจุบันจะติดตั้งแม่แรงไฮโดรลิก (Hydraulic Jack) รอบๆ ผนังของปล่องโดยรอบ และมีการควบคุมการจมในแต่ละด้านด้วยการคลายการรับน้ำหนักของแม่แรงไฮโดรลิค (Hydraulic Jack) จนปล่องสามารถจมลงในแต่ละด้านที่เท่าๆกันโดยรอบ และการขุดดินภายในปล่องเพื่อลดแรงเสียดทานด้านในนิยมใช้เครื่องมือขุดที่เรียกว่า Clamshell หรือในบางครั้งในกรณีที่ไม่มีน้ำใต้ดินไหลเข้ามาก็จะมีการใช้รถ Backhoe ขนาดเล็กลงไปขุดดินอยู่ด้านใน ซึ่งจะทำให้สามารถขุดดินได้รอบๆ ผนังปล่องได้ดีกว่าการใช้ Clam Shell

โดยทั่วไปในการก่อสร้างปล่องอุโมงค์มีข้อควรระวังและปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นได้ ดังนี้

1) การเจาะสำรวจชั้นดินจะต้องมีความถูกต้อง และได้รายละเอียดของชั้นดินครบถ้วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่จะก่อสร้างปล่องอุโมงค์ ทั้งนี้เพื่อลดความผิดพลาดจากการคำนวณการรับน้ำหนักของชั้นดิน แรงเสียดทานจากดิน รวมถึงผลกระทบจากระดับน้ำใต้ดิน เป็นต้น

2) การจมปล่องอุโมงค์ในช่วงเริ่มต้น ควรควบคุมให้ปล่องจมลงในแนวดิ่งมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ดังนั้นบุคคลากรจึงต้องมีเทคนิค และประสบการณ์ที่จะควบคุมการจมตัวของปล่องอุโมงค์ ซึ่งสิ่งสำคัญที่ขาดไม่ได้ คือทีมงานสำรวจจะต้องมีความถูกต้องแม่นยำและคอยตรวจสอบตลอดเวลา เนื่องจากถ้าปล่องเอียงตั้งแต่ช่วงแรกและไม่ได้รับการแก้ไข เมื่อปล่องจมลึกลงไปโอกาสที่จะแก้ไขให้กลับมาได้ดิ่งอีกครั้งกระทำได้ยาก

3) ในการจมปล่องอุโมงค์แต่ละครั้งไม่ควรจมปล่องทีละหลายๆ ชั้นพร้อมกัน เนื่องจากเมื่อมีการทิ้งให้ปล่องคงตัวอยู่เป็นเวลานาน ดินบริเวณรอบๆ ตัวบ่อจะยึดเกาะกับผิวผนังด้านนอก ทำให้การจมปล่องในครั้งต่อไปกระทำได้ยาก และการควบคุมการจมตัวก็ค่อนข้างทำได้ลำบาก เนื่องจากตัวปล่องมีน้ำหนักมากขึ้น กล่าวคือเมื่อปล่องเริ่มขยับตัวแรงเสียดทานภายนอกจะเหลือน้อยลง ในขณะที่น้ำหนักปล่องมีมากทำให้ปล่องเกิดการจมลงอย่างรวดเร็วมากกว่าที่ควรจะเป็น ส่งผลให้การควบคุมในแนวดิ่งกระทำได้ยากยิ่งขึ้น และอาจทำให้ปล่องจมต่ำกว่าระดับที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 4.16

4) การขุดดินออกจากปล่องอุโมงค์เพื่อลดแรงเสียดทานภายใน จะต้องมีการคำนวณปริมาณดินขุดจากปริมาตรของปล่องที่จมลงเทียบกับอัตราการทรุดตัว ซึ่งปริมาณดินขุดที่ได้ควรจะต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับปริมาตรของปล่องที่จมลง ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิดดินไหลเข้ามาในปล่องหรือการสูญเสียมวลดิน (Ground Loss) และต้องทำการเก็บตัวอย่างข้อมูลดินในแต่ละชั้น รวมถึงระดับของน้ำใต้ดินตลอดเวลา เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับขั้นตอนการขุดเจาะต่อไป เพราะในกรณีที่ตำแหน่งสำหรับเริ่มขุดเจาะอุโมงค์เป็นชั้นดินทราย หรือมีแรงดันน้ำใต้ดินสูง ซึ่งก่อนจะนำหัวเจาะอุโมงค์เข้าหรือออกจากปล่องจะต้องมีการปรับปรุงคุณภาพดิน (Soil Improvement) เสียก่อน ทั้งนี้

เพื่อป้องกันน้ำใต้ดินและดินด้านหน้าไหลทะลักเข้ามาในตัวปล่องซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียมวลดินและเป็นอุปสรรคต่อการขุดเจาะอย่างยิ่ง

5) ในขณะทำการจมปล่องควรตรวจสอบแนวการเคลื่อนตัว และค่าการทรุดตัวของชั้นดินจากอุปกรณ์เครื่องมือวัดทางธรณีเทคนิคทั้ง Inclinometer และ Extensometer อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งหากเกิดความผิดพลาด ควรหาทางแก้ไขก่อนการจมครั้งต่อไป

6) การขุดดินภายในขณะจมปล่องอุโมงค์ ไม่ควรขุดในลักษณะ Over cut หรือขุดดินเลย Steel Shoe ลงไป ดังแสดงในรูปที่ 4.17 เนื่องจากจะทำให้เกิดการจมตัวของปล่องในอัตราที่รวดเร็วและควบคุมได้ลำบากจนเกิดความเสียหายได้ อีกทั้งยังเสี่ยงต่อการเกิดดินไหลเข้ามาในปล่อง ถ้าในกรณีที่ปล่องไม่สามารถจมตัวลงด้วยน้ำหนักของตัวเอง การใช้น้ำหนักถ่วง (Counter Weight) เพื่อเพิ่มน้ำหนักปล่องจะช่วยให้ปล่องจมลงในอัตราที่เร็วขึ้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ถ้าระหว่างการก่อสร้างเกิดดินภายนอกไหลทะลักเข้ามาและปูดขึ้นจากภายในปล่อง จะต้องรีบถมดินกลับเข้าไปภายในหรือเติมน้ำลงในปล่องเพื่อเพิ่มน้ำหนักกดทับให้กับดินด้านในปล่อง

7) ถ้าการจมปล่องอุโมงค์ต้องการให้ลึกลงถึงระดับชั้นทราย การขุดดินอาจทำให้ชั้นทรายจากด้านนอกปล่องไหลเข้ามาภายในปล่องได้ จึงต้องควบคุมอัตราการจมตัวลงอย่างช้าๆ และควรเติมน้ำลงในปล่อง หรือไม่ควรสูบน้ำใต้ดินออกในกรณีที่มีแรงดันน้ำใต้ดินสูงเพื่อป้องกันมิให้เกิดปรากฏการณ์ทรายไหล (Liquefaction)

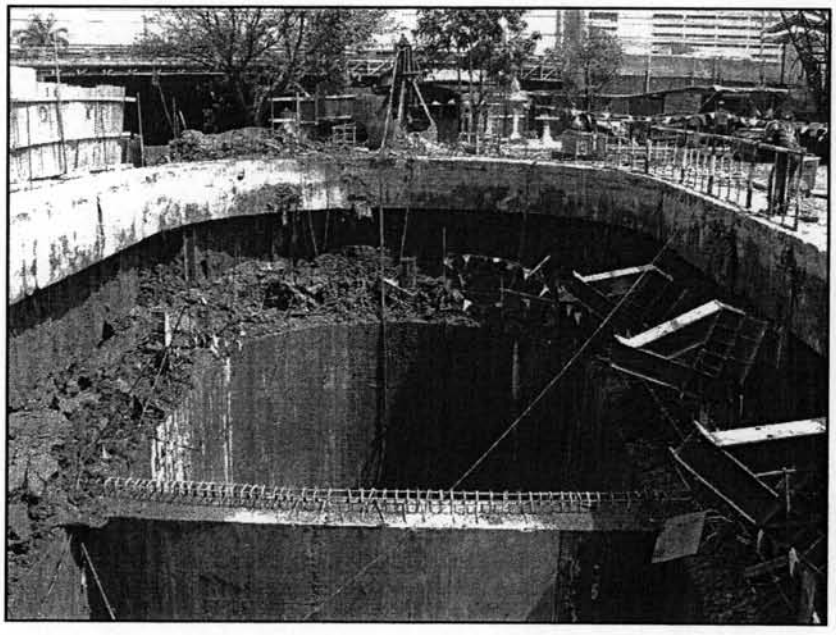
8) เมื่อจมปล่องได้ถึงระดับที่ต้องการ จะต้องมีการคำนวณและติดตั้งคานรับน้ำหนักปล่อง (Stopper Beam) ให้มีจำนวนที่เพียงพอเพื่อรับน้ำหนักทั้งปล่องไว้ก่อนที่จะมีการเทคอนกรีตที่พื้นปล่อง (Base Slab)

9) ในการปล่องโดยทั่วไป ค่าผิดพลาดที่ยอมให้สำหรับค่าระดับ มีค่าไม่เกิน ± 15 ซม. ทั้งนี้เพื่อมิต้องแก้ไขระดับของช่องเปิด (Soft Eye) ซึ่งมีความยุ่งยากและเสียค่าใช้จ่ายสูงมาก

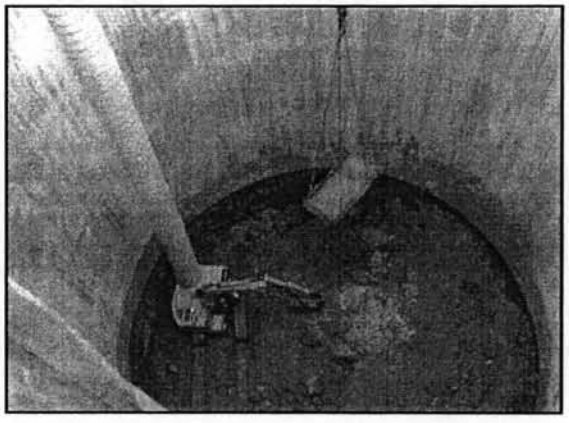
10) ก่อนที่จะมีการเทคอนกรีตใต้น้ำ (Under Water Concrete) เพื่อป้องกันน้ำไม่ให้เข้ามาในตัวปล่องก่อนการเทพื้นคอนกรีต ควรจะต้องมีการตรวจสอบระดับน้ำใต้ดินที่ไหลเข้ามาภายในปล่องจนกระทั่งน้ำใต้ดินอยู่ในระดับที่นิ่งแล้วจึงจะทำการเท

คอนกรีตใต้น้ำ และต้องมีการคำนวณแรงดันจากน้ำใต้ดินที่ถูกต้องเนื่องจากการเทคอนกรีตใต้น้ำจะต้องมีน้ำหนักและการรับแรงอัดที่มากพอที่จะกดทับไม่ให้แรงดันน้ำใต้ดินดันทะลุคอนกรีตที่เทลงไปได้ ในการเทคอนกรีตในลักษณะที่เป็นคอนกรีตใต้น้ำจะต้องใช้การเทในลักษณะของ Tremie Pipe ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และต้องมีปริมาณท่อมากพอที่จะให้คอนกรีตไหลได้ไปจนเต็มพื้นที่ภายในบ่อจึงจะยกท่อ Tremie ขึ้นเพื่อเทคอนกรีตในชั้นถัดไป ในการเทแต่ละชั้นควรรักษาระดับความหนาของคอนกรีตไว้ประมาณ 40-50 เซนติเมตร และต้องให้ปลายท่อ Tremie จมอยู่ในคอนกรีตตลอดเวลา การควบคุมการเทต้องมีการควบคุมอย่างใกล้ชิดและมีประสิทธิภาพมากที่สุดเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดีรับกำลังได้ตามที่ออกแบบไว้

11) ก่อนทำการสูบน้ำภายในบ่อออก เพื่อที่จะดำเนินการเทพื้นคอนกรีต (Base Slab) ในขั้นตอนต่อไปนั้น ควรทดสอบกำลังการรับน้ำหนักของคอนกรีตใต้น้ำ ว่าสามารถต้านทานต่อแรงดันของน้ำใต้ดินได้หรือไม่

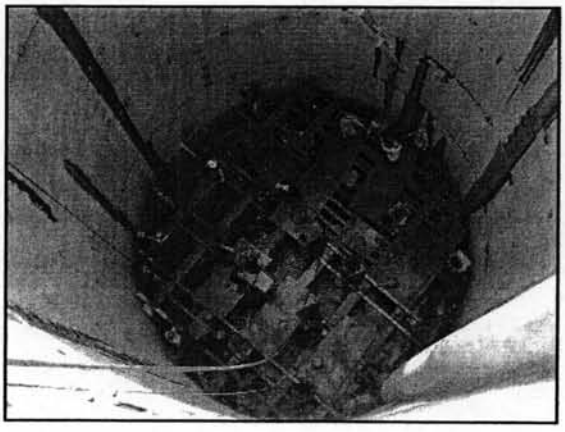


รูปที่ 4.16 ความเสียหายเนื่องจากปล่องอุโมงค์จมลงในอัตราที่เร็วเกินไป ทำให้แรงเสียดทานด้านข้างมีน้อย จึงไม่สามารถช่วยพยุงตัวปล่องไว้ได้ (มานิต ปานเอม, 2549)



รูปที่ 4.17 การควบคุมการขุดดินภายในปล่องต้องไม่ทำในลักษณะ Over cut (มานิต ปานเอม, 2549)

รูปที่ 4.18 การควบคุมการจมปล่องโดยการใช้น้ำหนักถ่วง (Counterweight) (มานิต ปานเอม, 2549)



รูปที่ 4.19 การเทคอนกรีตใต้น้ำโดยใช้ท่อ Tremie Pipe (มานิต ปานเอม, 2549)

4.3 สรุปท้ายบท

การขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะอุโมงค์ชนิดสมดุลแรงดันดินแบบขุดเจาะเต็มหน้า จะใช้หลักการสมดุลกันระหว่างแรงดันค้ำยันด้านหน้า (Face Pressure) กับแรงดันดินที่อยู่ให้ห้องเก็บดิน (Soil Chamber) ซึ่งควรมีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยดินที่ขุดได้จากในห้องเก็บดินจะลำเลียงผ่านทางสกรูคอนเวเยอร์ ผ่านสายพานลำเลียง จากนั้นขบวนรถลำเลียงจะทำหน้าที่ขนดินจากบริเวณหน้าหัวเจาะอุโมงค์ ออกไปยังปล่องอุโมงค์เพื่อนำดินไปทิ้ง ซึ่งหลังจากที่หัวเจาะอุโมงค์ขุดเจาะดินจนได้ระยะเท่ากับความกว้างของผนังอุโมงค์แล้ว จะหยุดขุดเจาะชั่วคราวเพื่อทำการดาดอุโมงค์ และเมื่อดาดอุโมงค์ได้ประมาณ 3 วง จึงทำการฉีดน้ำปูนที่รูของผนังอุโมงค์ เพื่อเป็นการอุดช่องว่างระหว่างดินกับผนังภายนอกอุโมงค์ และกระทำเช่นนี้เรื่อยไปจนสิ้นสุดความยาวอุโมงค์ โดยในระหว่างการขุดเจาะ จำเป็นต้องติดตั้งเครื่องมือวัดทางธรณีเทคนิคเพื่อตรวจวัดค่าต่างๆ อาทิเช่น ค่าการทรุดตัว ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดิน เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้กระทบต่อโครงสร้างของสาธารณูปโภคอื่นๆ อีกทั้งการก่อสร้างปล่องอุโมงค์ก็มีความสำคัญเช่นเดียวกัน โดยจักต้องก่อสร้างให้ปล่องอุโมงค์จมอยู่ในระดับที่ต้องการและวางตัวอยู่ในแนวดิ่ง โดยประเภทของปล่องอุโมงค์ที่นิยมก่อสร้างกัน ได้แก่ ปล่องอุโมงค์ชนิดใช้เข็มพืด ปล่องอุโมงค์ชนิดใช้เสาเข็มเจาะเรียงชิดกัน ปล่องอุโมงค์ชนิดกำแพงใต้ดิน และปล่องอุโมงค์ชนิดใช้คอนกรีตหล่อในที่