

บทที่ 3

การเคลื่อนตัวของดินจากการขุดเจาะอุโมงค์

3.1 กล่าวนำ

บทนี้ได้กล่าวถึงการการเคลื่อนตัวของดินจากการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ โดยจะกล่าวถึงประเภทของการสูญเสียมวลดิน พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินจากการสูญเสียมวลดิน การเคลื่อนตัวของดินจากขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ และชนิดการเคลื่อนตัวของดิน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.2 ประเภทของการสูญเสียมวลดิน

ในงานก่อสร้างอุโมงค์ด้วยการใช้หัวเจาะในปัจจุบันมีการพัฒนาทั้งทางด้านเทคโนโลยีและเทคนิควิธีการก่อสร้างมากขึ้น มีความทันสมัย มีความปลอดภัยมากกว่าในอดีตและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมข้างเคียงน้อยลงจนสามารถขุดเจาะในบริเวณพื้นที่ชุมชนได้ อย่างไรก็ตามการเคลื่อนตัวของดินยังคงเกิดขึ้นและส่งผลกระทบต่อโครงสร้างข้างเคียงทั้งโครงสร้างที่ผิวดินและโครงสร้างใต้ดินอยู่โดยตลอด ซึ่งการเคลื่อนตัวของดินจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัย อาทิเช่น การสูญเสียมวลดิน (Ground loss) ขั้นตอนการก่อสร้าง (Construction phase) เป็นต้น

โดยปกติแล้วการขุดเจาะอุโมงค์ในดินอ่อนจะก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวของดิน 2 ประเภทคือ

- 1) การเคลื่อนตัวของดินที่เกิดขึ้นขณะทำการก่อสร้าง (Short-term deformation)
- 2) การเคลื่อนตัวของดินที่เกิดขึ้นในระยะยาวหรือหลังจากทำการก่อสร้าง (Long-term deformation)

การเคลื่อนตัวของดินประเภทแรกนี้มักเป็นการเคลื่อนตัวที่มีปริมาณมากที่สุดและอันตรายที่สุด ซึ่งเกิดขึ้นขณะทำการก่อสร้างอุโมงค์ การเคลื่อนตัวลักษณะนี้มักมีสาเหตุมาจาก “การสูญเสียมวลดิน (Ground loss)” โดยเกิดขึ้นจากการที่มวลดินรอบอุโมงค์เคลื่อนตัวเข้าสู่ช่องเปิด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความเค้นในดิน (Stress relief) ขณะทำการก่อสร้าง และหากอยู่ใต้ระดับน้ำได้ดิน น้ำก็จะไหลเข้าสู่ช่องเปิดด้วยเช่นกัน ในกรณีของการเคลื่อนตัวของดินที่เกิดขึ้นในระยะยาว จะเกิดจากหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress) ของดินเพิ่มขึ้นจากการก่อสร้างอุโมงค์ ทำให้เกิดการทรุดตัวของดินจากปัญหาการอัดตัวคายน้ำของดิน (Consolidation settlement) การเคลื่อนตัวลักษณะนี้จะเกิดขึ้นทีละน้อยแต่ต่อเนื่องเป็นเวลานานหลังจากการก่อสร้างอุโมงค์ได้เสร็จสิ้นไปแล้ว

3.3 พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของดินจากการสูญเสียมวลดิน (Ground loss)

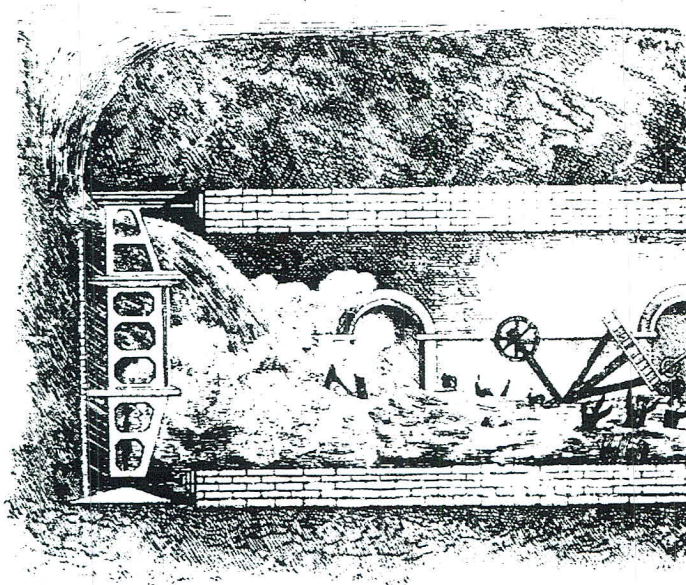
ในอดีตวิธีการขุดเจาะนั้นยังไม่ทันสมัยเหมือนในปัจจุบัน การสูญเสียมวลดินอาจเกิดขึ้นทันทีทันใดและรุนแรงจนไม่สามารถควบคุมได้ เนื่องจากการไหลตัวเข้าอย่างรวดเร็วของดินและน้ำเข้าสู่อุโมงค์ ดังตัวอย่างที่เกิดขึ้นในการก่อสร้างอุโมงค์ลอดใต้อุโมงค์แม่น้ำเทมส์ครั้งแรก โดย มาร์ค บรูเนล ดังรูปที่ 3.1 เป็นผลทำให้อุโมงค์พังทลาย อย่างไรก็ตามปัญหารุนแรงดังกล่าวมีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อยมากในปัจจุบัน ทั้งนี้เนื่องจากเทคโนโลยีการขุดเจาะอุโมงค์ได้พัฒนาระบบป้องกันการพังทลายของดิน โดยใช้แรงดันอากาศ แรงดันของเหลว หรือแรงดันดิน ภายในห้องกักดินด้านแรงดันดินด้านนอกหน้าหัวขุดเจาะ ขณะทำการขุดเจาะ โดยการสูญเสียมวลดินที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ (Shield Machine, SM หรือ Tunnel Boring Machine, TBM) จะแบ่งเป็นลักษณะเบื้องต้นดังต่อไปนี้

1) การสูญเสียมวลดินทางด้านหน้าของหัวเจาะ (Face loss)

การสูญเสียมวลดินทางด้านหน้าหัวเจาะมักจะเกิดขึ้นมากในกรณีที่ใช้หัวเจาะอุโมงค์ที่ไม่มีค้ำยันด้านหน้าแบบหน้าเปิด (Open-faced shield) เนื่องจากไม่มีการป้องกันแรงดันดินจากด้านหน้า ทำให้ดินเคลื่อนตัวเข้าสู่อุโมงค์ได้โดยง่าย อย่างไรก็ตามถึงแม้ในกรณีการใช้หัวเจาะอุโมงค์ที่มีค้ำยันด้านหน้าแบบหน้าปิด (Closed-faced shield) ที่ใช้วิธีการรักษาเสถียรภาพหน้าหัวเจาะด้วย แรงดันอากาศ (Air pressure) แรงดันน้ำ (Hydro- หรือ Slurry pressure) หรือแรงดันดินด้านแรงดันดิน (Earth pressure) ก็ยังคงมีโอกาสที่จะเกิดการสูญเสียมวลดินทางด้านหน้า ดังรูปที่ 3.2 หากแรงดันไม่เพียงพอหรือไม่สมดุลระหว่างภายในและภายนอกของหัวเจาะ อีกทั้งการสูญเสียมวลดินลักษณะนี้ยังพบได้ชัดเจนในกรณีที่ขุดเจาะอุโมงค์ในชั้นทรายมากกว่าในกรณีที่ขุดเจาะในชั้นดินเหนียว เนื่องจากธรรมชาติของดินทรายที่มีระยะเวลาการคงตัว (Stand-up time) ที่น้อยกว่า

2) การสูญเสียมวลดินจากการตัดดินเกินเส้นรอบวงของหัวเจาะ (Over-cutting)

ในการขุดเจาะอุโมงค์ในช่วงทางโค้ง หัวเจาะจำเป็นต้องตัดดินเกินเส้นรอบวงเพื่อเพิ่มพื้นที่สำหรับเลี้ยวให้สะดวกขึ้น โดยการยึดใบตัด (Copy cutter) ซึ่งสามารถยึดได้ถึงประมาณ 100 มม. เพื่อตัดดินส่วนเกินเส้นรอบวงหัวเจาะทำให้เกิดช่องว่างรอบหัวเจาะมากขึ้น ดังนั้นดินโดยรอบจะเคลื่อนตัวเข้าหาช่องว่างที่เกิดขึ้น รูปที่ 3.3 แสดงการสูญเสียมวลดินจากการตัดดินเกินเส้นรอบวงของหัวเจาะ



รูปที่ 3.1 การพังทลายของอุโมงค์ลอดใต้แม่น้ำเทมส์

3) การสูญเสียมวลดินจากการก้มหรือเงยหัวเจาะ (Pitching loss)

ขณะทำการขุดเจาะอุโมงค์ หัวเจาะต้องเคลื่อนตัวไปตามตำแหน่งอุโมงค์ที่ได้ออกแบบไว้ อย่างไรก็ตามเป็นการยากที่จะควบคุมระดับของหัวเจาะให้อยู่ในแนวระดับขนานคงที่ตลอด ทั้งนี้เนื่องจากจุดศูนย์กลางของหัวเจาะอยู่เอียงไปด้านหน้า เนื่องจากน้ำหนักส่วนใหญ่ของหัวเจาะอยู่ทางด้านหน้าทำให้หัวเจาะมักจะถูกแรงโน้มถ่วงดึงให้หัวตกอยู่เสมอรหว่างการทำงาน ดังนั้นผู้ควบคุมจึงมักปรับให้หัวเจาะเงยขึ้นเล็กน้อยขณะทำการขุดเจาะ เพื่อรักษาอุโมงค์ให้อยู่ในแนวตำแหน่งที่ออกแบบไว้ให้มากที่สุด การก้มหรือเงยของหัวเจาะนี้ทำให้พื้นที่การเจาะเพิ่มมากขึ้นกว่าปกติ เป็นผลให้เกิดการสูญเสียมวลดินเข้าสู่อุโมงค์ได้ด้วยเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 3.4

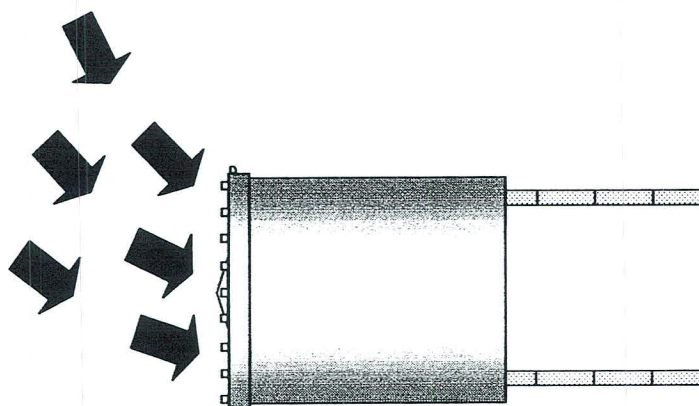
4) การสูญเสียมวลดินที่เกิดจากรบกวนสภาพดิน (Ground disturbance)

การขุดเจาะดินด้วยหัวเจาะจะมีผลกระทบต่อโครงสร้างของดินเดิมหรือรบกวนสภาพดิน เนื่องจากการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของหัวเจาะ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งเป็นผลให้เกิดการทำลายคุณสมบัติของดินและเกิดการเคลื่อนตัวของดินบริเวณรอบหัวเจาะเข้าสู่อุโมงค์ ยิ่งหัวเจาะมีขนาดใหญ่เท่าไรก็ยิ่งรบกวนสภาพดินมากขึ้นเท่านั้น

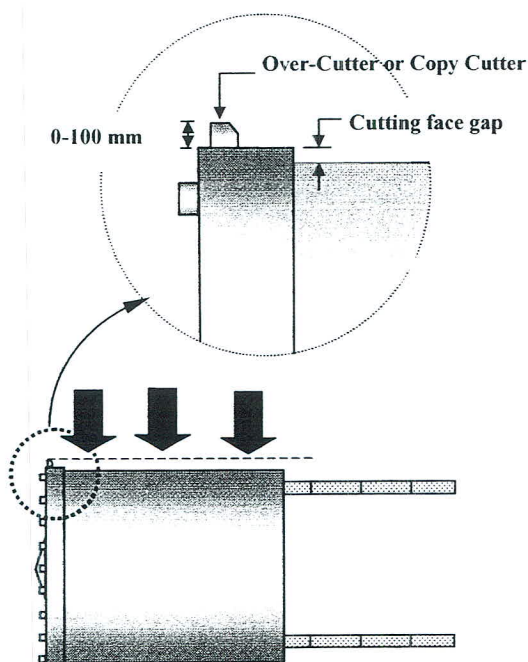
5) การสูญเสียมวลดินที่เกิดจากการเคลื่อนตัวปิดช่องว่างส่วนหางหัวเจาะ (Tail void closure)

การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยหัวขุดเจาะจะเกิดช่องว่างส่วนหางของหัวขุดเจาะเนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจาะต้องมีขนาดใหญ่กว่าตัวอุโมงค์ ทั้งนี้เพื่อให้มีพื้นที่ในการติดตั้งผนังอุโมงค์ภายในหัวเจาะซึ่งช่องว่างดังกล่าวจะมีขนาดประมาณ 7-8 ซม. ดังรูปที่ 3.6 ดังนั้นหากไม่มีวิธี

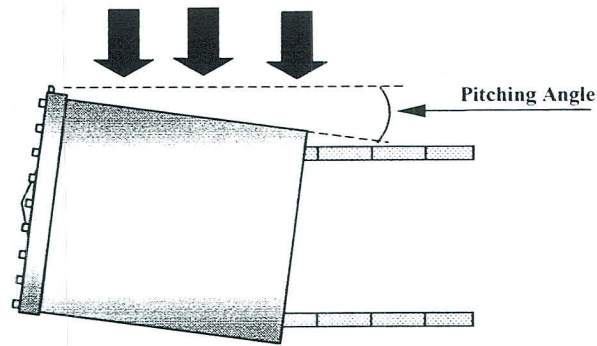
ป้องกันจะทำให้มวลดินโดยรอบอุโมงค์เคลื่อนตัวเพื่อปิดช่องว่าง ในปัจจุบันจะแก้ไขโดยใช้การฉีดอัดน้ำปูน (Tail void grouting) แรงดันสูงเพื่อปิดช่องว่างดังกล่าว หรือ การใช้ผนังอุโมงค์แบบขยายตัว (Expanding lining) อย่างไรก็ตามการสูญเสียมวลดินจากการเคลื่อนตัวปิดช่องว่าง ส่วนของหัวเจาะยังคงเกิดขึ้น



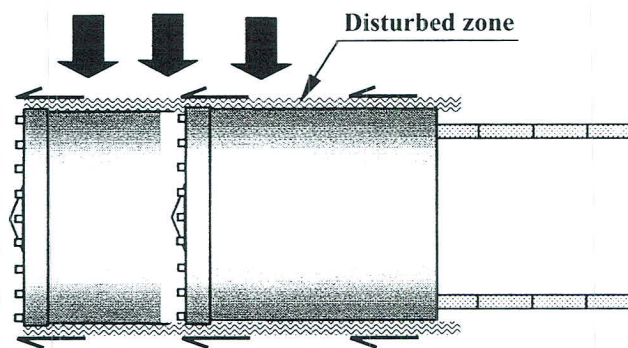
รูปที่ 3.2 การสูญเสียมวลดินที่ด้านหน้าหัวเจาะ



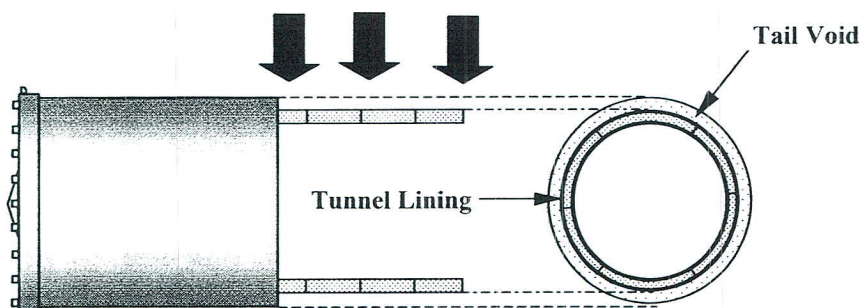
รูปที่ 3.3 การสูญเสียมวลดินจากการตัดดินเกินเส้นรอบวงของหัวเจาะ



รูปที่ 3.4 การสูญเสียมวลดินจากการก้มเงยของหัวเจาะ



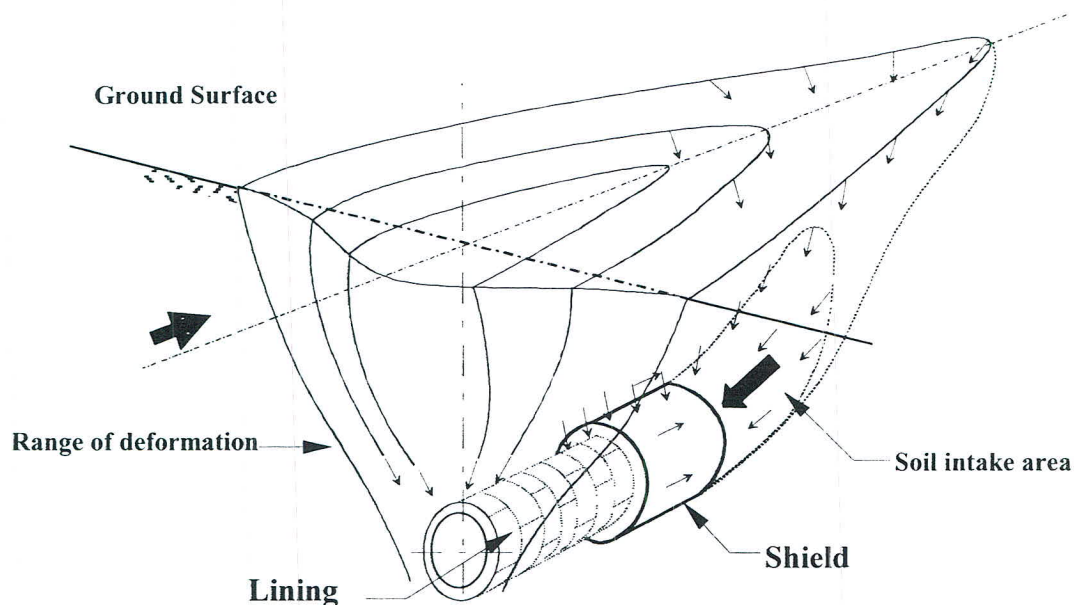
รูปที่ 3.5 การสูญเสียมวลดินจากการรบกวนสภาพดิน



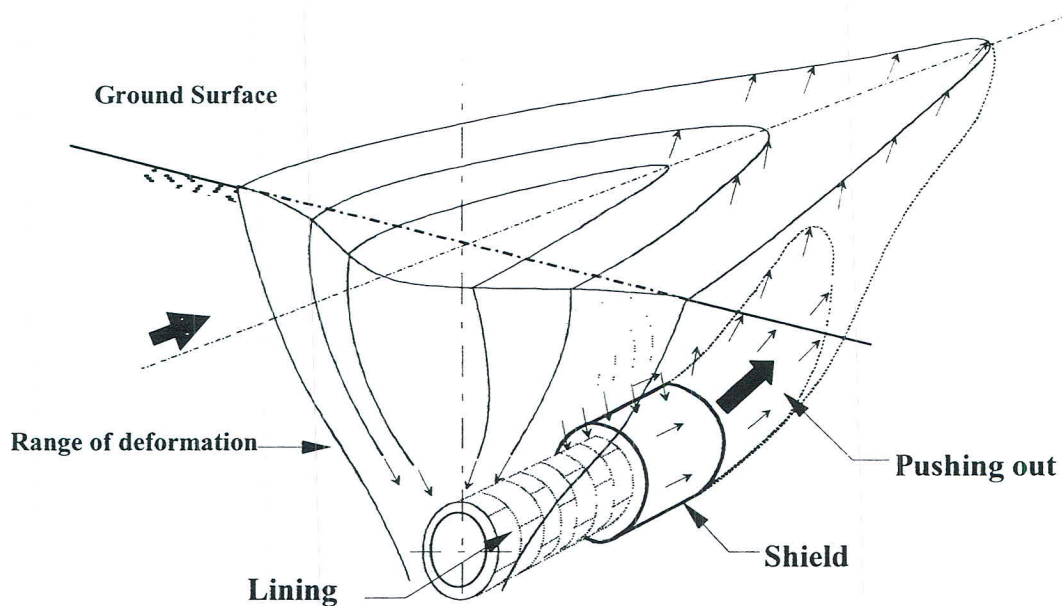
รูปที่ 3.6 การสูญเสียมวลดินจากช่องว่างส่วนท้ายของหัวเจาะ

ขนาดการสูญเสียมวลดินในแต่ละลักษณะจะขึ้นอยู่กับชนิดของดิน วิธีการก่อสร้างอุโมงค์และวิธีการควบคุมหัวเจาะ ซึ่งการควบคุมนี้จะเกี่ยวข้องกับกับแรงดันหน้าหัวเจาะ การบังคับทิศทาง ความเร็ว การถีบตัว และประสิทธิภาพการทำงาน ดังนั้นการสูญเสียมวลดินจะมากหากปล่อยให้ด้านหน้าหัวเจาะขาดการป้องกัน หรือปล่อยช่องว่างส่วนหางไว้โดยไม่มีการฉีดอัดน้ำปูน หรือการ

รบกวนดินอย่างรุนแรงอันเนื่องมาจากการบังคับเคลื่อนที่ไม่ระมัดระวัง หรือการล่าช้าระหว่างการติดตั้งผนังอุโมงค์ของคอนกรีต เป็นต้น



รูปที่ 3.7 การเคลื่อนตัวของดินในลักษณะที่เข้าสู่ตัวอุโมงค์



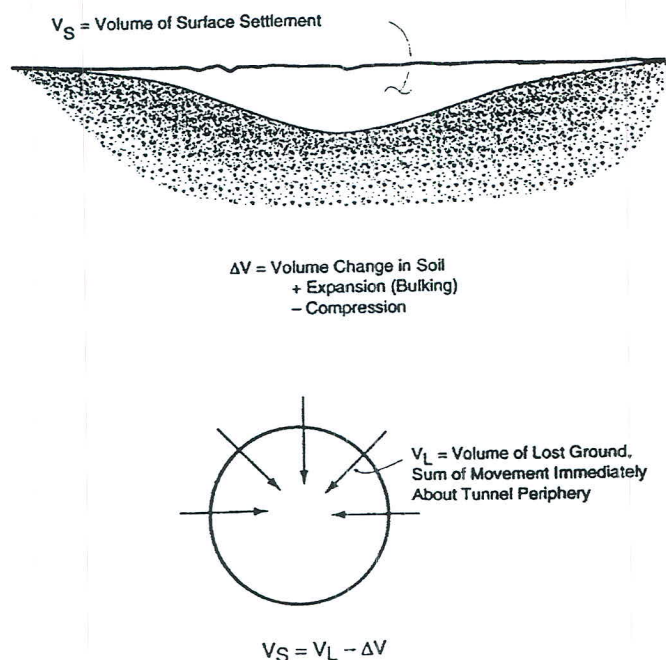
รูปที่ 3.8 การเคลื่อนตัวของดินในลักษณะที่ถูกผลักออกจากตัวอุโมงค์

การสูญเสียมวลดินที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์ จะส่งผลให้เกิดการทรุดตัวของดินเป็นแนวยาว (Longitudinal settlement) และแนวขวาง (Transverse settlement) ของแนวอุโมงค์ซึ่งจะมีลักษณะเป็นหลุมหรือที่เรียกว่า Sink hole ดังแสดงในรูปที่ 3.7 อันเป็นผลมาจากการเคลื่อนตัวของ

ดินเข้าสู่ตัวอุโมงค์ โดยสามารถสร้างความเสียหายต่อผิวถนนและโครงสร้างข้างเคียง อย่างไรก็ตาม ควรตั้งข้อสังเกตว่า การเคลื่อนตัวของดินในทิศทางตรงกันข้าม หรือการผลักดินออกจากตัวอุโมงค์ ก็เกิดขึ้นได้เช่นกัน หากความดันด้านทานดินภายในหัวเจาะมีสูงมากกว่าความดันดินด้านนอกดัง แสดงในรูปที่ 3.8 ในกรณีนี้ก็สามารถสร้างความเสียหายได้ด้วยเช่นกัน โดยทำให้เกิดการบวมตัวของ ผิวดินและอาจสร้างปัญหาต่อฐานรากเสาเข็มที่อยู่ในแนวก่อสร้าง

ดังที่ได้กล่าวไว้ว่าการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยหัวเจาะในปัจจุบันได้มีการพัฒนาขึ้นมาก โดย มีการใช้หัวเจาะที่ทันสมัยและมีวิธีการรักษาเสถียรภาพระหว่างการใช้หัวเจาะเพื่อป้องกันการพังทลาย ของดิน แต่ปัญหาการเคลื่อนตัวของดินยังคงเกิดขึ้นอยู่เสมอและมักจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้าง ข้างเคียง ดังนั้นเพื่อที่จะป้องกันปัญหานี้จึงควรต้องศึกษาหาสาเหตุที่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของดิน โดยพบว่านอกจากปัจจัยทางด้านสภาพดินที่เป็นปัจจัยสำคัญแล้ว ยังมีปัจจัยด้านการควบคุมและ พฤติกรรมของหัวเจาะที่มีความซับซ้อน ดังนั้นการศึกษาและวิจัยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง พฤติกรรมของดินและหัวเจาะจึงมีความจำเป็น เพื่อให้สามารถเข้าใจและประเมินผลกระทบที่ เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง ซึ่งจะนำไปสู่การป้องกันและแก้ไขอย่างมีประสิทธิภาพ

เพื่อให้เข้าใจถึงความหมายของการสูญเสียมวลดินเพิ่มขึ้น จึงได้กล่าวเพิ่มเติมในส่วนของการ สูญเสียมวลดินโดยในอดีตยังไม่มีข้อมูลในเรื่องการเคลื่อนตัวของดินมากนัก หลังจากปีค.ศ. 1970 ได้มีการวิจัยและพัฒนามากขึ้นเช่น การสร้างรถไฟใต้ดินที่ Baltimore Washington D.C. ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 นิยามที่เกี่ยวกับการทรุดตัวและการสูญเสียมวลดิน (Ground loss) ของอุโมงค์ (Tunnel Engineering Handbook, 1996)

โดย

ΔV (Volume Change) = การเปลี่ยนแปลงปริมาณของดินจากการขุดเจาะอุโมงค์

V_s (Volume of Surface Settlement) = ปริมาณของการทรุดตัวที่ผิวดิน

V_L (Volume of Lost Ground) = ปริมาณของการสูญเสียมวลดินทั้งหมดรอบอุโมงค์

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงสามารถประมาณค่าปริมาณการสูญเสียมวลดินที่เกิดขึ้นได้จากการเปลี่ยนแปลงปริมาณของดินจากการขุดเจาะอุโมงค์และปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดิน

โดยปกติสามารถคำนวณการสูญเสียมวลดินจากการคำนวณอย่างง่ายดังนี้

$$\text{Ground Loss (\%)} = \frac{(\text{ปริมาณมวลดินที่ไหลเข้าอุโมงค์ต่อหนึ่งหน่วยเมตร}) \times 100\%}{(\text{ปริมาตรของอุโมงค์ต่อหนึ่งหน่วยเมตร})} \quad (3.1)$$

$$\text{ปริมาตรของอุโมงค์ต่อเมตร (ในกรณีอุโมงค์กลม)} = \frac{\pi D_o^2}{4} \times 1 \text{ เมตร}$$

โดย D_o = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์

นอกจากนี้ยังมีวิธีการประมาณค่าการทรุดตัวที่ผิวดินเพื่อหาค่าการสูญเสียมวลดินโดยได้สรุปสาเหตุของการทรุดตัวไว้เป็น 3 กรณีดังนี้

- 1) Face Losses คือการเคลื่อนตัวของดินในส่วนหน้าก่อนถึงหัวเจาะ โดยเกิดจากลักษณะการเคลื่อนตัวของดินแบบ raveling caving flowing running หรือ squeezing
- 2) Shield Losses คือการเคลื่อนตัวของดินบริเวณหัวเจาะ โดยหัวเจาะเกิดการไถล (plowing) การก้มหรือเียง (pitching) หรือ การหันเหทิศทาง (yawing) เป็นต้น
- 3) Tail Losses คือการเคลื่อนตัวของดินบริเวณส่วนหางหรือส่วนท้ายหัวเจาะในส่วนของระบบค้ำยันส่วนท้าย โดยเกิดจากการขยายตัวของระบบค้ำยันส่วนท้ายหรือการฉีดอัดน้ำปูน (Grouting)

โดยมีวิธีการที่ใช้ในการประมาณค่าการสูญเสียมวลดินแบ่งเป็น 2 วิธีได้แก่ 1) การเก็บข้อมูลบริเวณพื้นที่ที่ทำการขุดเจาะอุโมงค์และประมาณค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ เช่นที่ Washington D.C. จะมีค่าการสูญเสียมวลดินประมาณ 1% ซึ่งในทางปฏิบัตินี้มีค่าประมาณ 1-1.5% ถึง 3% 2) การคำนวณโดยวิศวกรโดยใช้ค่าทางกลศาสตร์ของดินดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งทั้ง 2 วิธีดังกล่าวสมมติให้เครื่องจักรต่างๆ ในการก่อสร้างอุโมงค์ไม่มีข้อผิดพลาด ซึ่งในความเป็นจริงนั้นเป็นไปได้ ดังนั้นในการคำนวณจึงทำการปรับแก้เพื่อเพิ่มความถูกต้องให้มากขึ้น โดยอาจทำการเพิ่มปริมาณการสูญเสียมวลดินอีกประมาณ 1% ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่นหากหัวเจาะเกิดการหันเหทิศทางหรือหัวเจาะบิดตัวก็อาจทำการเพิ่มค่าการสูญเสียมวลดินอีกประมาณ 1-2% เป็นต้น

ปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อการทรุดตัวเช่นเดียวกันแต่ค่อนข้างยากในการประมาณค่า เช่น

- ในช่วงเริ่มต้นของการขุดเจาะ เช่น การสำรวจดิน คนงาน เทคนิค โครงการแต่ละโครงการที่มีความแตกต่างกันซึ่งจำเป็นต้องมีการเรียนรู้เทคโนโลยีใหม่ ๆ เพื่อการควบคุมงานให้มีคุณภาพมากขึ้น
- การพักงานก่อสร้างและการเริ่มต้นการก่อสร้างใหม่ อาจเกิดมาจากหลายสาเหตุ เช่น คนงานประท้วงหยุดงาน เครื่องมือเสียหาย อุบัติเหตุ เป็นต้น ซึ่งอุโมงค์ต้องมีเสถียรภาพเพียงพอ โดยบางครั้งอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ เมื่อมีการเริ่มงานใหม่ต้องสามารถทำงานต่อเนื่องได้ทันที ไม่ควรปฏิบัติเหมือนเริ่มต้นจากศูนย์
- สิ่งกีดขวาง เช่น บ่อน้ำร้าง สภาพตามธรรมชาติต่างๆ เนินดิน สิ่งปนเปื้อน แก๊ส สิ่งเหล่านี้อาจต้องทำให้เกิดการพักงานก่อสร้างชั่วคราวได้
- พื้นที่ที่มีการสัญจรมาก เช่น ในเมืองใหญ่ๆ ทำให้เกิดความไม่สะดวกในการก่อสร้าง เช่น ตามแยกต่างๆของถนน หรือบริเวณจุดที่อุโมงค์ 2 อุโมงค์ตัดผ่านกัน ซึ่งจะทำให้เกิดการทรุดตัวของดินเพิ่มมากขึ้นและอาจทำให้น้ำสามารถไหลเข้ามาในอุโมงค์ได้และค่าการยึดเกาะต่างๆน้อยลง

จึงเห็นได้ชัดว่ามีปัจจัยมากมายที่ทำให้เกิดการทรุดตัว ซึ่งวิศวกรและผู้รับเหมาก่อสร้างต้องรับมือและหาทางป้องกัน ซึ่งต้องการการตัดสินใจที่แม่นยำในการแก้ปัญหาดังกล่าว

หากเกิดความเสียหายที่รุนแรงกว่าปกตินั้นอาจมีผลจากปัจจัยอื่น ได้แก่

- หินก้อนใหญ่ขวางแนวอุโมงค์ทำให้หัวเจาะเกิดการหันเหทิศทาง
- การเคลื่อนตัวของทรายและ silt
- การบีบอัดตัวของ clay และ silt
- การขุดเจาะที่ไม่สมดุล

ดังนั้นการคำนวณปริมาณการสูญเสียมวลดินจึงเป็นศิลปะที่ซับซ้อนสำหรับวิศวกรและผู้รับเหมาที่ต้องใช้องค์ความรู้มากขึ้น

จากที่ได้กล่าวไว้ใน การคำนวณหาค่าการสูญเสียมวลดิน ซึ่งคำนวณได้จากการประมาณค่าการทรุดตัวที่ผิวดิน โดยการประมาณค่าแนวการทรุดตัวได้ถูกเสนอโดย Peck (1969) ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 3.10 โดยสามารถหาค่าแนวการทรุดตัวที่ผิวดิน $S(x,y)$ และค่าการสูญเสียมวลดินจากค่าการทรุดตัวสูงสุด (S_{max}) และค่า Trough width parameter (i) ดังต่อไปนี้

$$S(x, y) = S_{max} \exp(-x^2/2i^2) \quad (3.2)$$

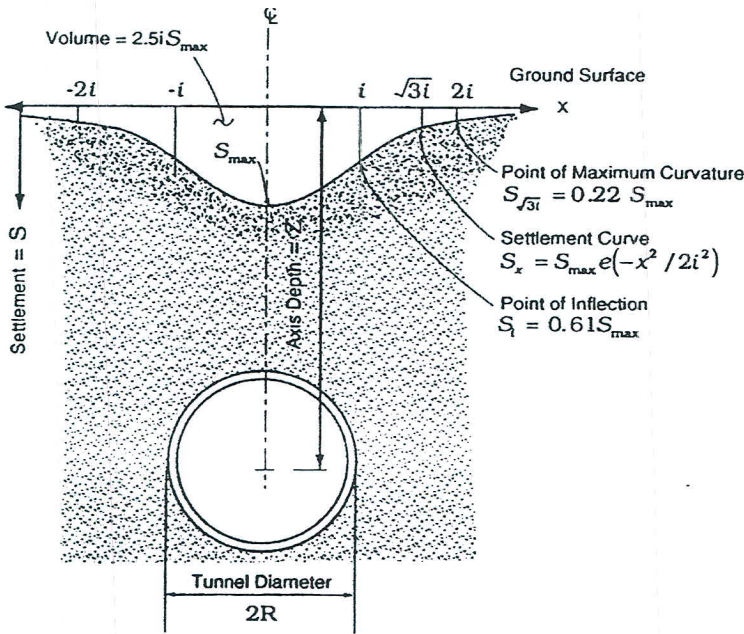
$$V_L = 2.5i S_{max} \quad (3.3)$$

$$\text{Ground loss (\%)} = \frac{V_L}{V_T} \times 100\% \quad (3.4)$$

V_T = ปริมาตรของอุโมงค์ต่อหนึ่งหน่วยเมตร

ตารางที่ 3.1 การประมาณค่าการสูญเสียมวลดินตามคุณภาพการก่อสร้างและลักษณะดิน
(Tunnel Engineering Handbook, 1996)

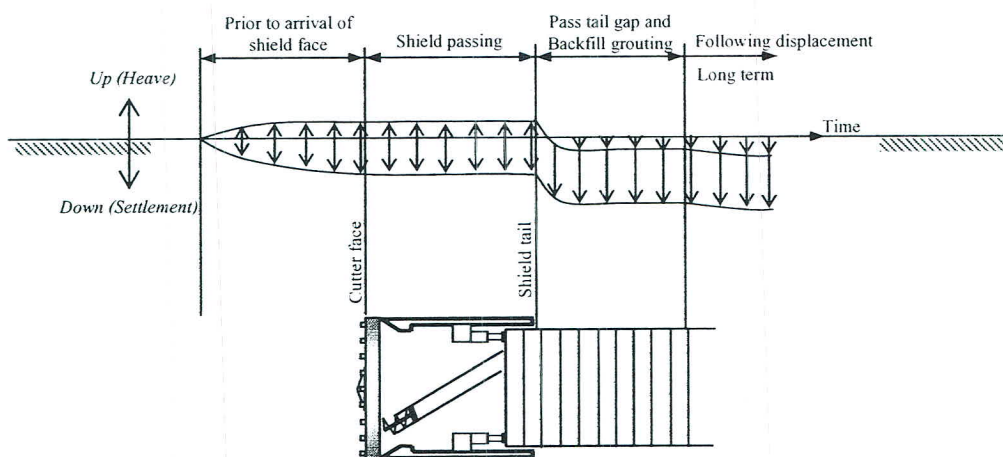
กรณี	V_L (%)
Good practice in firm ground Applies to better soils and excellent ground control	0.5
Good practice in slowly raveling ground Considered good ground	1.5
Fair practice in fast raveling ground More shield and tail loss	2.5
Poor practice in cohesive running ground - Get more shield loss - Tail void mostly unfilled by grouting and/or support expansion of the initial support	4.0 or more



รูปที่ 3. 10 Normal probability curve หรือ Gaussian distribution Curve ประมาณค่าแนวการทรุด
ตัวที่ผิวดินจากการขุดเจาะอุโมงค์ (Peck, 1969)

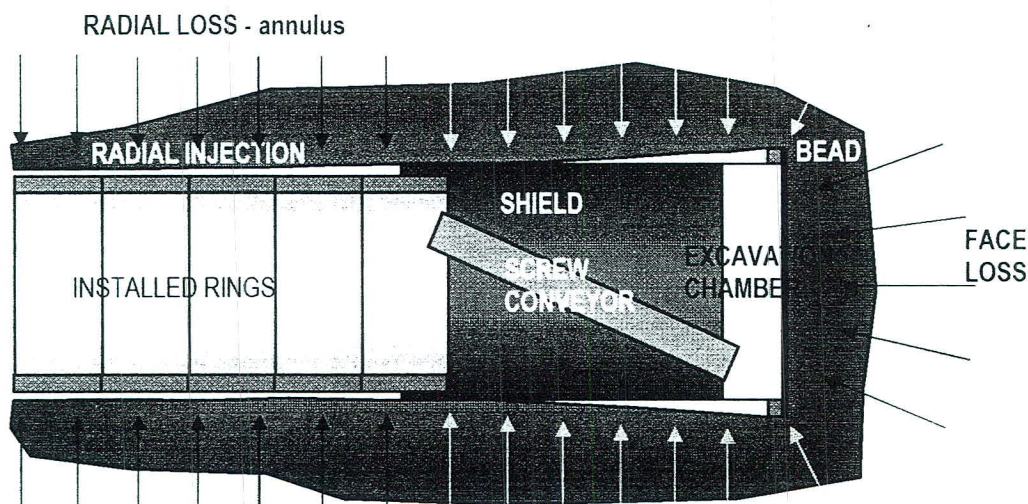
3.4 การเคลื่อนตัวของดินจากขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยหัวเจาะ

จากหัวข้อที่ผ่านมา นอกจากการขุดเจาะอุโมงค์จะก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินจากการสูญเสียมวลดินรอบอุโมงค์แล้ว ขั้นตอนการก่อสร้างในแต่ละช่วงของการขุดเจาะที่มีพฤติกรรมแตกต่างกันยังส่งผลกระทบให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินที่แตกต่างกันอีกด้วย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งช่วงการเคลื่อนตัวของดินตามช่วงของการขุดเจาะได้ดังรูปที่ 3.11 โดยช่วงแรกคือช่วงด้านหน้าของหัวเจาะก่อนที่จะถึงหัวเจาะและการเคลื่อนตัวสามารถเกิดขึ้นได้สองกรณีคือดินเคลื่อนที่เข้าหาหัวเจาะและดินเคลื่อนที่ออกจากหัวเจาะ ช่วงที่สองคือตำแหน่งที่ผิวหน้าหัวเจาะถึงพอดีหรือที่ตำแหน่ง Cutter face การเคลื่อนตัวมีลักษณะเดียวกันกับช่วงแรก ช่วงที่สามคือบริเวณรอบหัวเจาะ การเคลื่อนตัวเป็นเช่นเดียวกับช่วงแรกและช่วงที่สอง ช่วงที่สี่คือบริเวณส่วนหางของหัวเจาะหรือผ่านหัวเจาะไปแล้วเข้าสู่บริเวณรอบผนังอุโมงค์ เกิดการเคลื่อนตัวของดินเข้าหาอุโมงค์เนื่องจากช่องว่างส่วนหางซึ่งจะมีปริมาณน้อยหรือมากขึ้นอยู่กับการฉีดอัดน้ำปูน ช่วงที่ห้าคือเกิดการเคลื่อนตัวของดินขึ้นเพิ่มเติมจากปัจจัยอื่นๆ เช่น การหดตัวของวัสดุที่ใช้ในการฉีดอัดน้ำปูน การทรุดตัวจากการอัดตัวคายน้ำของดิน (Consolidation settlement) ฯลฯ



รูปที่ 3.11 การเคลื่อนตัวของดินจากการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะในแต่ละช่วง

นอกจากนี้อาจพิจารณาในลักษณะของการสูญเสียมวลดินรอบหัวเจาะและอุโมงค์ดังแสดงในรูปที่ 3.12



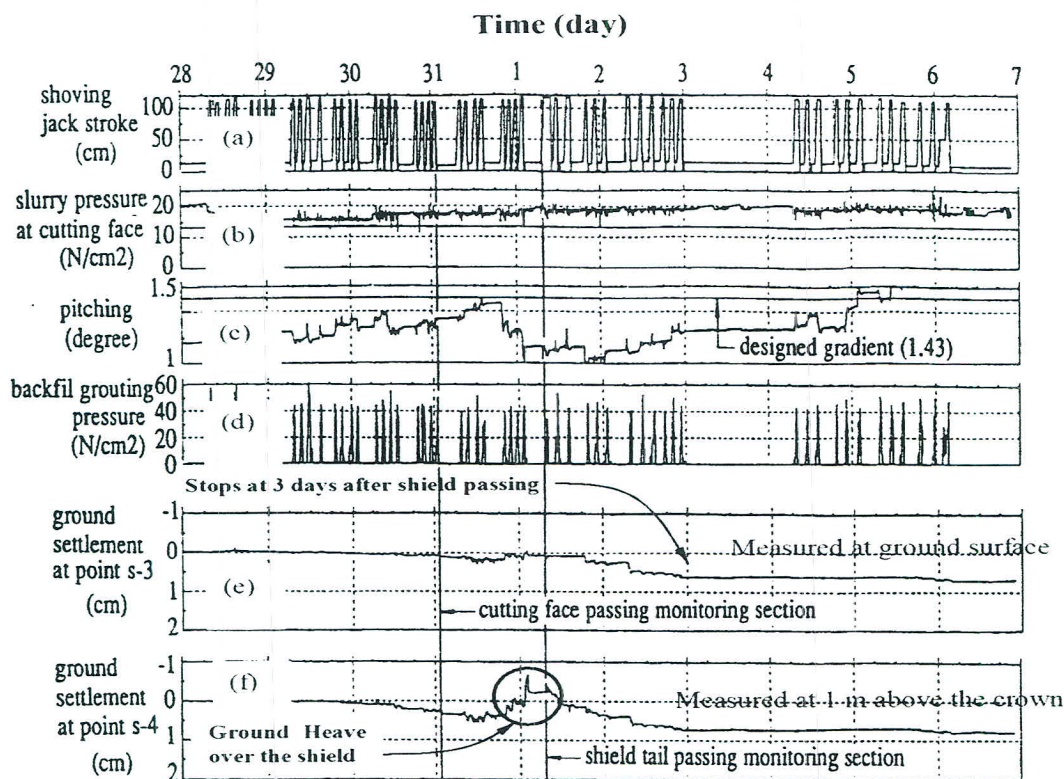
รูปที่ 3.12 การเคลื่อนตัวของดินจากการสูญเสียมวลดินรอบหัวเจาะและอุโมงค์ (Chirioti, 2006)

โดยจากรูปที่ 3.12 มีการเคลื่อนตัวของดินจากการสูญเสียมวลดินรอบหัวเจาะและอุโมงค์ซึ่งเกิดจากการสูญเสียมวลดินที่ด้านหน้าหัวเจาะ การสูญเสียมวลดินรอบหัวเจาะตามแนวรัศมีและการสูญเสียมวลดินรอบอุโมงค์ตามแนวรัศมี

ซึ่งการสูญเสียมวลดินที่ด้านหน้าและรอบหัวเจาะอันก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวของดินหรือการทรุดตัวที่ผิวดินสามารถประมาณปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดินของแต่ละช่วงจากทั้งหมดดังนี้

- 1) 10% – 20% เป็นผลจากการสูญเสียมวลดินที่ด้านหน้าของหัวเจาะ
- 2) 40% - 50% เป็นผลจากช่องว่างรอบหัวเจาะ
- 3) 30% - 50% เป็นผลจากช่องว่างส่วนหางหรือส่วนท้ายของหัวเจาะ

นอกจากนี้ยังมีผู้ทำการศึกษาการเคลื่อนตัวของดินในแต่ละช่วงของการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบแรงดันน้ำโคลน (Slurry shield) โดยแบ่งการศึกษาเป็นสามช่วงเช่นเดียวกัน เช่นการศึกษาของ Matsushita Iwasaki Hashimoto และ Imanishi ได้ศึกษาการทรุดตัวของดินในแต่ละช่วงของการขุดเจาะอุโมงค์ในชั้น decomposed granite soil จากข้อมูลผลการตรวจวัดจากอุปกรณ์ตรวจวัดทางธรณีเทคนิคและข้อมูลการควบคุมหัวเจาะอันได้แก่ ระยะในการถีบของขาถีบไฮดรอลิก (Shoving jack stroke) แรงดันค้ำยันที่ด้านหน้าหัวเจาะ (Slurry pressure) มุมเงยของหัวเจาะ (Pitching) แรงดันในการฉีดอัดน้ำปูน (Backfill grouting pressure) และได้ความสัมพันธ์จากข้อมูลทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ข้อมูลการตรวจวัดเปรียบเทียบกับพฤติกรรมกราดเจาะที่เวลาต่างๆ

โดยจากความสัมพันธ์ที่ได้เปรียบเทียบไปดังกล่าวจึงได้แบ่งการทรุดตัวตามระยะของหัวเจาะเป็นสามช่วงได้แก่

1) การทรุดตัวในช่วงก่อนที่หัวเจาะทำการขุดเจาะผ่าน

ปัจจัยจากพฤติกรรมกราดเจาะที่มีผลต่อการทรุดตัวของดินในช่วงก่อนที่หัวเจาะจะทำการขุดเจาะผ่านคือแรงดันที่ด้านหน้าของหัวเจาะและการสั่นสะเทือนของหัวเจาะ โดยจากข้อมูลการตรวจวัดพบว่าแรงดันที่ด้านหน้าที่มากขึ้นส่งผลให้การทรุดตัวลดลงหรือหากมากเกินไปก็จะเกิดการบวมตัว (Heave) ขึ้น

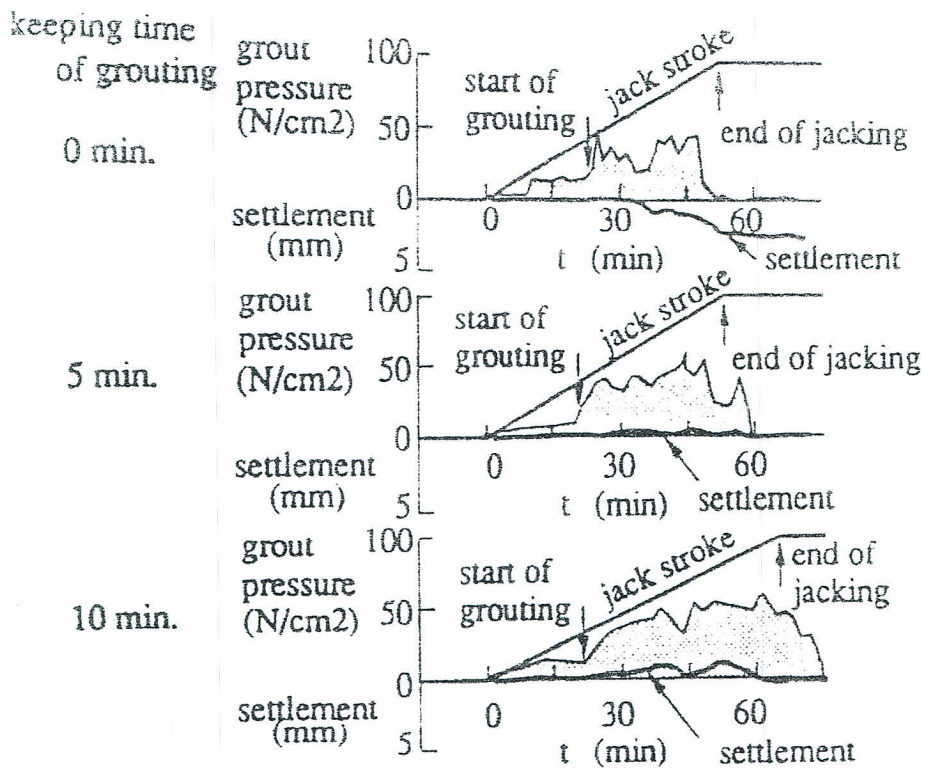
2) การทรุดตัวในช่วงที่หัวเจาะผ่านพอดี

ปัจจัยที่ทำให้เกิดการทรุดตัวในส่วนนี้คือการควบคุมหัวเจาะ เช่น การก้มหรือเงยของหัวเจาะ ซึ่งทำให้เกิดช่องว่างรอบอุโมงค์เพิ่มมากขึ้นและส่งผลให้เกิดการทรุดตัวเพิ่มขึ้น

3) การทรุดตัวหลังจากหัวเจาะขุดเจาะผ่าน

รูปที่ 3.14 ได้แสดงความสัมพันธ์ของการฉีดอัดน้ำปูนกับการทรุดตัว โดยการฉีดอัดน้ำปูนเริ่มหลังจากการถีปตัวไปข้างหน้าของหัวเจาะไปแล้ว 30 เซนติเมตรซึ่งเป็นจุดที่เกิดช่องสำหรับการฉีดอัดน้ำปูนของผนังอุโมงค์ใล่พื้นผนังหัวเจาะส่วนหางพอดี โดยพบว่าหากทำการฉีดอัดน้ำปูนที่มี

ความดันคงที่เป็นเวลามากกว่า 5 นาที จะช่วยลดการทรุดตัวให้น้อยลงหรืออาจไม่เกิดการทรุดตัวเลย



รูปที่ 3.14 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการฉีดอัดน้ำปูนและการทรุดตัว

ทั้งนี้นอกจากพฤติกรรมของหัวเจาะอุโมงค์ในทั้งสามช่วงที่ทำให้เกิดการทรุดตัวแล้ว ยังต้องคำนึงถึงสภาพทางธรณีวิทยา ความลึกและรูปร่างของอุโมงค์ด้วยเช่นกัน

ในประเทศไทยเองก็เช่นกัน ได้มีผู้ศึกษาการเคลื่อนตัวของดินจากการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล โดย Suwansawat (2002) ได้ทำการศึกษาผลกระทบจากการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุลต่อการเคลื่อนตัวของดินจากข้อมูลการตรวจวัดอุปกรณ์ตรวจวัดทางธรณีเทคนิค เช่น แนวหมุดวัดการทรุดตัว (Settlement array) เพื่อตรวจสอบการทรุดตัวของดิน หรือ อุปกรณ์วัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Inclinometer) เพื่อตรวจสอบการเคลื่อนตัวด้านข้าง จากโครงการรถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคลหรือรถไฟฟ้าใต้ดินสายแรกของประเทศไทย จากการศึกษาของ Suwansawat พบว่าการเคลื่อนตัวของดินมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปตามพฤติกรรมของหัวเจาะตามระยะห่างจากหัวเจาะ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นช่วงได้สามช่วงเช่นเดียวกัน

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาในอดีตได้ว่าการเคลื่อนตัวของดินจากพฤติกรรมของหัวเจาะที่เปลี่ยนไปตามขั้นตอนการก่อสร้างแบ่งได้เป็น 3 ช่วงด้วยกันคือ ช่วงก่อนที่

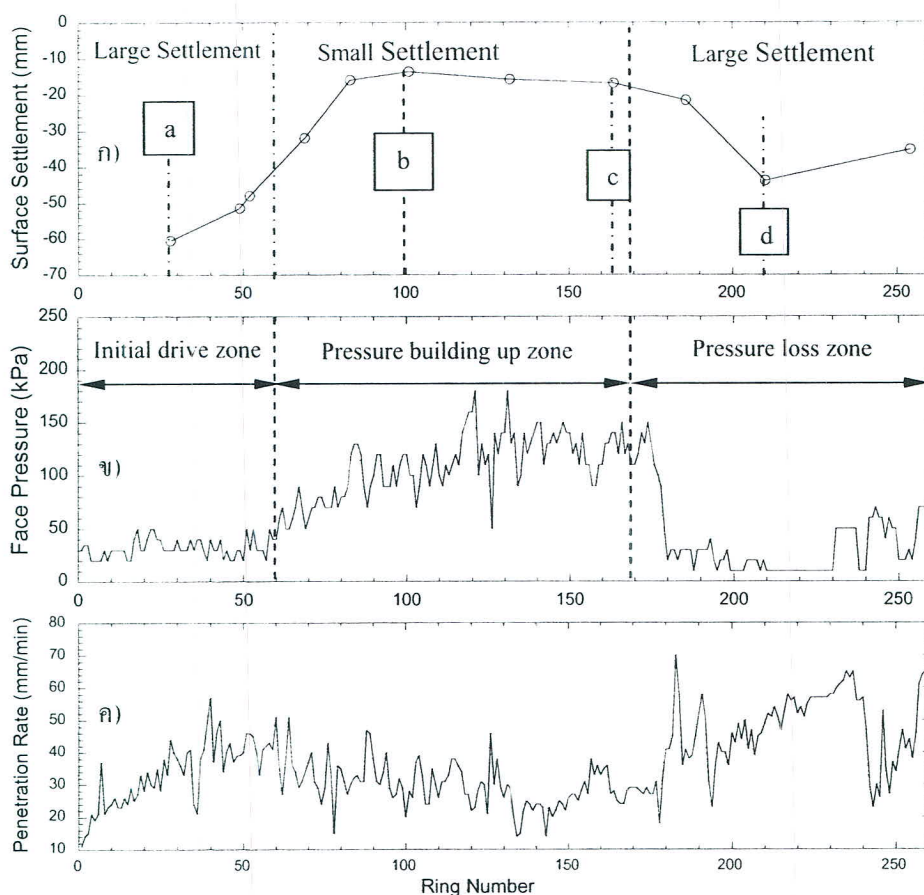
หัวเจาะจะถึงจุดที่พิจารณา ช่วงที่หัวเจาะผ่านพอดีและช่วงที่หัวเจาะผ่านไปแล้ว โดยทั้ง 3 ช่วงเป็นการเคลื่อนตัวแบบทันทีทันใดหรือในช่วงระยะเวลาสั้นๆ (Short Term) ซึ่งมักจะมีค่ามาก

3.5 ชนิดการเคลื่อนตัวของดิน

การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินสามารถแบ่งได้เป็นหลายกรณีประกอบไปด้วย การทรุดตัวของผิวดินตามแนวยาว (Longitudinal surface settlement) การทรุดตัวของผิวดินตามแนวขวาง (Transverse surface settlements) ที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์เดี่ยวและอุโมงค์คู่ และการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์ (Lateral ground deformation) มีรายละเอียดดังนี้

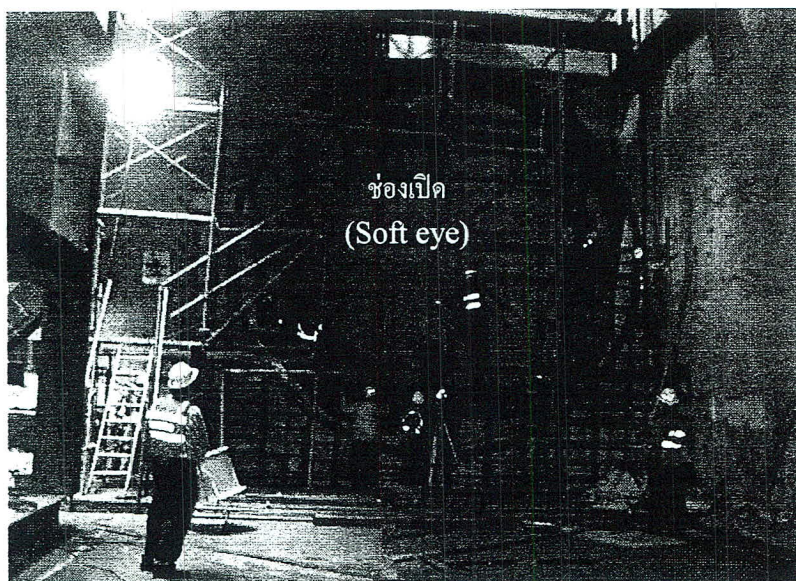
3.5.1 การทรุดตัวของผิวดินตามแนวยาว (Longitudinal surface settlements)

การสูญเสียมวลดินที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์ จะส่งผลให้เกิดการทรุดตัวของผิวดินเป็นแนวยาว (Longitudinal surface settlement) ทั้งนี้ขนาดของการทรุดตัวจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยหัวข้อนี้จะใช้โครงการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลเป็นกรณีศึกษา ทำการวิเคราะห์การทรุดตัวของผิวดินในช่วงระหว่างสถานีศูนย์วัฒนธรรมฯ และสถานีประชากรศาสตร์บำเพ็ญ เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดทางธรณีเทคนิคจำนวนมาก อุโมงค์ส่วนใหญ่ที่ขุดเจาะในส่วนก่อสร้างนี้จะถูกขุดเจาะในชั้นดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) ยกเว้นในช่วงกึ่งกลางระหว่างสถานี โดยส่วนล่างของอุโมงค์จะถูกขุดเจาะในชั้นดินทรายแน่น (Dense sand) การทำงานของหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุลที่รักษาเสถียรภาพของดินหน้าหัวเจาะไว้โดยการควบคุมความดันหน้าหัวเจาะ (Face pressure) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ควบคุมระหว่างการขุดเจาะ ความดันนี้ถูกวัดโดยเซลล์วัดความดัน (Pressure cell) ที่ติดตั้งภายในห้องกักดิน เมื่อวิเคราะห์จากความดันหน้าหัวเจาะระหว่างการขุดเจาะอุโมงค์ในส่วนก่อสร้างนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ 1) ช่วงเริ่มต้นการขุด (Initial drive zone) 2) ช่วงเพิ่มความดันด้านหน้า (Pressure building up zone) และ 3) ช่วงสูญเสียความดันด้านหน้า (Pressure loss zone) ดังแสดงไว้ใน รูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 กราฟแสดงค่าการทรุดตัวของผิวดิน ความดันหน้าหัวเจาะ และความเร็วจุดเจาะ โดยบันทึกระหว่างสถานีศูนย์วัฒนธรรมฯ และสถานีประชากรยวูร์บาเพ็ญ

ในช่วงแรกเริ่มของการขุดเจาะด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุลนั้น หัวเจาะได้ถูกประกอบขึ้นด้านหลังกำแพงพืดด้านเหนือของสถานีศูนย์วัฒนธรรมฯ ก่อนที่หัวเจาะจะเคลื่อนตัวออกจากช่องเปิด (Soft eye) ที่ได้ถูกเตรียมบนกำแพงพืด (Diaphragm wall) กันสำหรับหัวเจาะเพื่อที่จะตัดผ่านดังแสดงไว้ใน รูปที่ 3.16 แนวหัวเจาะทะลวงซึ่งหัวเจาะต้องตัดผ่านจะเสริมด้วยเส้นใยไฟเบอร์ ดังนั้น หัวเจาะจึงสามารถที่จะเจาะผ่านไปได้ นอกจากนี้ โครงเหล็กรับแรงผลัก (Reaction truss) ถูกติดตั้งเพื่อให้หัวเจาะผลักดันดังแสดงไว้ใน รูปที่ 3.17 เนื่องจากพื้นที่ในสถานีปล่อยหัวเจาะ (Launching shaft) ค่อนข้างมีอยู่จำกัด อุปกรณ์ควบคุมหัวเจาะยังต้องติดตั้งไว้บนพื้นดินโดยใช้สายเคเบิลเชื่อมต่อกับหัวเจาะในอุโมงค์ โดยเมื่อการก่อสร้างอุโมงค์เสร็จสิ้นไป 60 วงผนังอุโมงค์ อุปกรณ์ควบคุมจึงจะถูกนำมาติดตั้งในอุโมงค์ ภายหลังจากที่กระบวนการก่อนติดตั้งหัวเจาะได้เสร็จสิ้นลง หัวเจาะจึงได้เริ่มตัดกำแพงพืดอย่างช้าๆ ดังแสดงไว้ใน รูปที่ 3.18



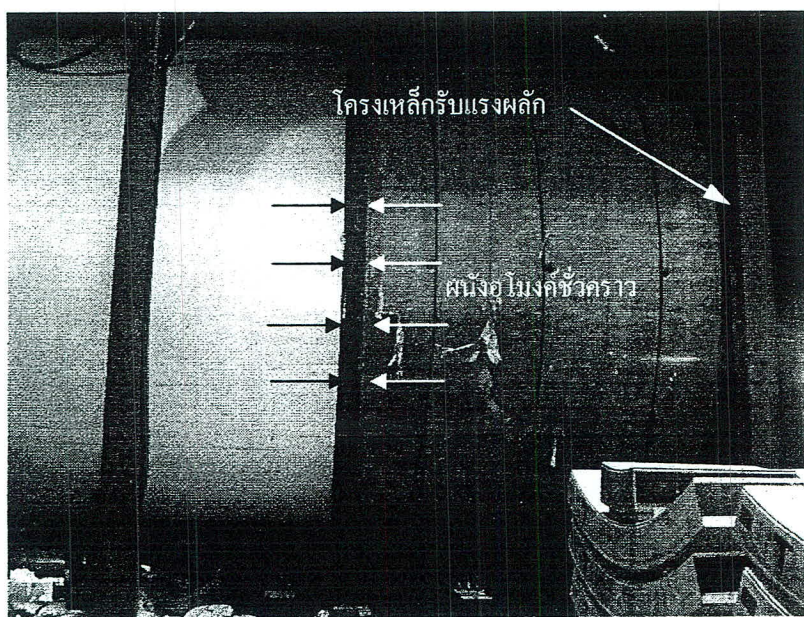
รูปที่ 3.16 การเตรียมช่องเปิดบนกำแพงปิด



รูปที่ 3.17 โครงเหล็กรับแรงผลักที่ติดตั้งในช่วงเริ่มต้นของการขุดเจาะอุโมงค์



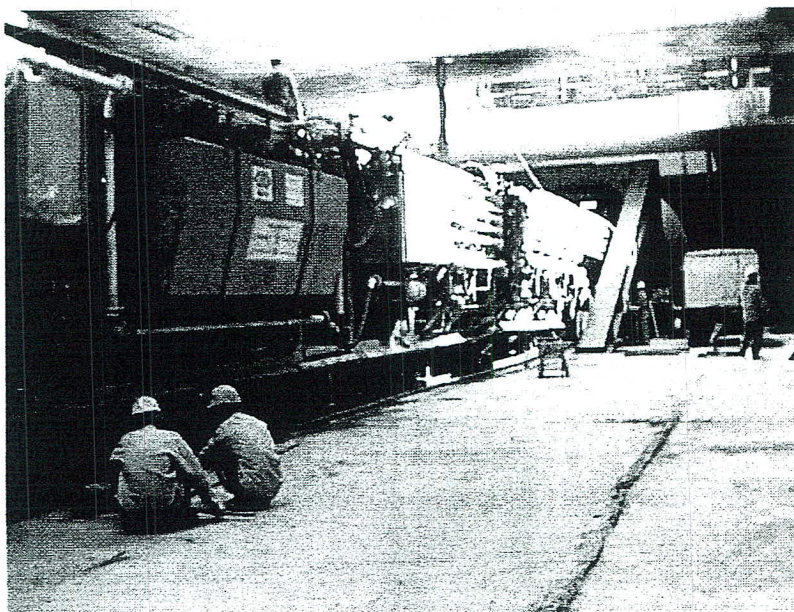
รูปที่ 3.18 หัวเจาะอุโมงค์กำลังเคลื่อนตัวผ่านผนังกำแพงพีคของสถานีศูนย์วัฒนธรรมฯ



รูปที่ 3.19 ผนังอุโมงค์ชั่วคราว

ช่วงเริ่มต้นของการขุดเจาะอุโมงค์ (Initial drive zone) คือ ช่วงระยะการขุดเจาะของหัวเจาะจากส่วนเริ่มต้นซึ่งหัวเจาะต้องการโครงสร้างชั่วคราว เช่น โครงเหล็กปรับแรงผลัก (Reaction truss) แสดงไว้ใน รูปที่ 3.19 ไปจนถึงระยะที่ไม่มีความจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์สนับสนุน และอุปกรณ์ควบคุมสามารถนำมาติดตั้งไว้ภายในอุโมงค์ได้ โดยทั่วไป ช่วงเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์จะมีระยะ

ประมาณ 70 ถึง 120 เมตร (ประมาณ 60 ถึง 100 วงผนังอุโมงค์หรือรอบของการขุดเจาะ) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความยาวของอุปกรณ์สนับสนุนและกระบวนการควบคุมของหัวเจาะ หลังจากหัวเจาะไปถึงจุดสิ้นสุดของช่วงเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์ หัวเจาะจะหยุดการทำงานชั่วคราวเพื่อรีดผนังอุโมงค์ชั่วคราวและโครงเหล็กรับแรงผลักดันออก จากนั้นอุปกรณ์สนับสนุนจะถูกนำมามาติดตั้งภายในอุโมงค์ด้านหลังหัวเจาะ ร่องอุปกรณ์อาจต้องการพื้นที่ยาวถึง 100 ถึง 120 เมตรด้านหลังหัวเจาะดังแสดงไว้ใน รูปที่ 3.20

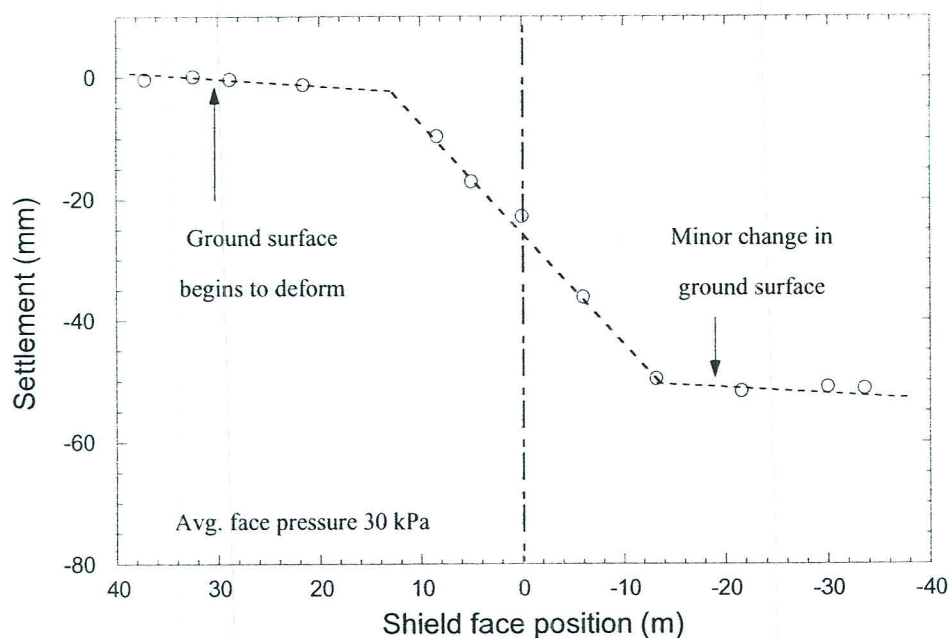


รูปที่ 3.20 อุปกรณ์สนับสนุนหลังหัวเจาะอุโมงค์

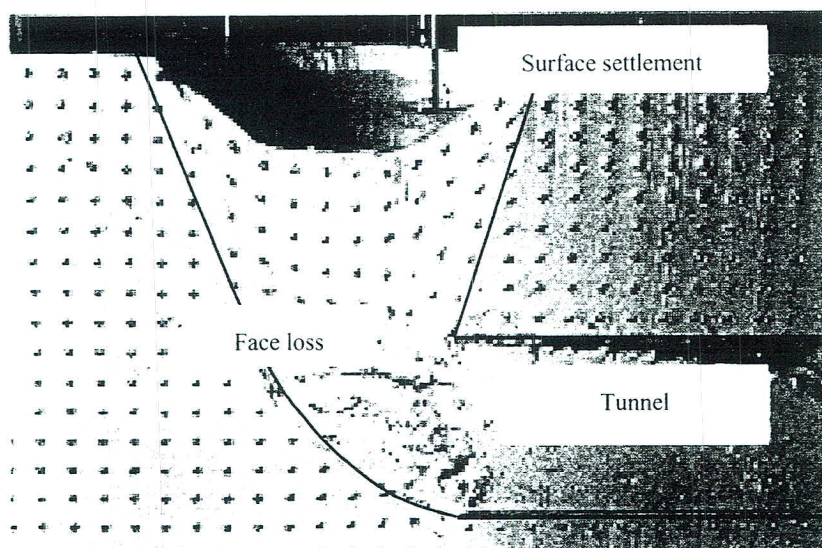
ระหว่างการขุดเจาะ แรงผลักดันจากแม่แรงไฮดรอลิกที่ใช้ผลักดันหัวเจาะให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้ามีแรงสูงถึง 4,000 ตัน ดังนั้น ผนังอุโมงค์จำนวนมากที่ติดตั้งไว้มีความจำเป็นที่จะสามารถต้านทานต่อแรงเฉือนที่เกิดขึ้น ในส่วน A ของโครงการรถไฟใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล ช่วงเริ่มต้นการขุดเจาะจะไปสิ้นสุดที่ผนังอุโมงค์กว้างที่ 60 หรือที่ระยะ 72 เมตรจากสถานีปล่อยหัวเจาะ ในช่วงนี้หัวเจาะอุโมงค์ไม่สามารถใช้แรงผลักดันที่สูงจากแม่แรงไฮดรอลิกได้ เนื่องจากผนังอุโมงค์ชั่วคราวไม่ได้ถูกออกแบบมาให้ทนต่อแรงผลักดันที่สูง ส่งผลกระทบต่อการควบคุมความดันหน้าหัวเจาะในช่วงเริ่มต้นการขุดเจาะ เพราะแรงผลักดันมีความสัมพันธ์กับความดันหน้าหัวเจาะ ดังนั้น ในส่วน A จึงวัดความดันหน้าหัวเจาะได้เพียง 30 ถึง 60 กิโลปาสกาล ด้วยเหตุนี้ ดินโดยรอบจึงสามารถเคลื่อนตัวเข้าสู่ส่วนหน้าของหัวเจาะส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียมวลดินขึ้น

ข้อมูลการทรุดตัวของผิวดินได้ถูกเทียบกับตำแหน่งของหัวเจาะดังแสดงไว้ใน รูปที่ 3.21 ผิวดินจะเริ่มเสียรูปในระยะประมาณ 30 เมตร ก่อนที่หัวเจาะเข้าสู่ตำแหน่งอุโมงค์กว้างที่ 49 เมื่อหัวเจาะ

เคลื่อนเข้าไปใกล้กับตำแหน่งดังกล่าว การทรุดตัวของผิวดินจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อย่างต่อเนื่อง หลังจากนั้นการทรุดตัวของผิวดินจะเริ่มหยุดลงหลังจากที่หัวเจาะผ่านอุโมงค์กว้างที่ 49 ออกไปเป็นระยะ 15 เมตร การทรุดตัวของผิวดินเหนือตำแหน่งอุโมงค์กว้างที่ 49 อยู่ในตำแหน่ง a แสดงไว้ใน รูปที่ 3.15 ก) ความดันหน้าหัวเจาะที่ใช้ในส่วนนี้มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 30 กิโลปาสกาล โดย รูปที่ 3.21 สังกเกตให้เห็นว่า การทรุดตัวของผิวดินจะเกิดขึ้นในปริมาณที่สูงบริเวณระนาบด้านหน้าของหัวเจาะ สอดคล้องกับผลการทดลองของ Kimura and Mair (1981) แสดงไว้ใน รูปที่ 3.22 ซึ่งดินมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนตัวไปทางปากอุโมงค์ จากผลการทดสอบแบบหมุนเหวี่ยง(Centrifuge test) การเคลื่อนตัวของดินในลักษณะนี้ จะเห็นได้ชัดจากผิวดินซึ่งพบการทรุดตัวของผิวดินเป็นบริเวณกว้าง การเคลื่อนตัวของดินมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม หรือที่เรียกว่า แนวอิทธิพลจากการสูญเสียมวลดินหน้าหัวเจาะ (Face loss impact zone) แสดงไว้ใน รูปที่ 3.23



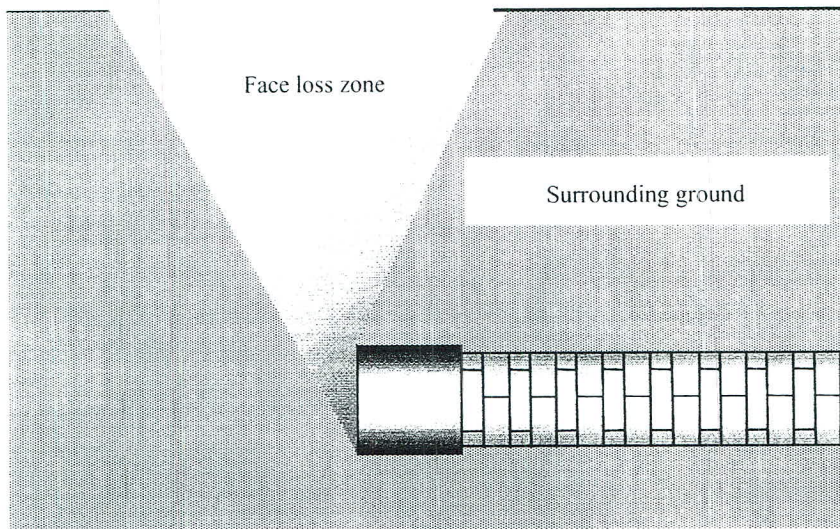
รูปที่ 3.21 การทรุดตัวตามแนวยาวของผิวดินที่วัดในช่วงเริ่มต้นการขุด (ผนังอุโมงค์กว้างที่ 49)



รูปที่ 3.22 พฤติกรรมการพังทลายของดินหน้าอุโมงค์ภายใต้การทดสอบแบบหมุนเหวี่ยง

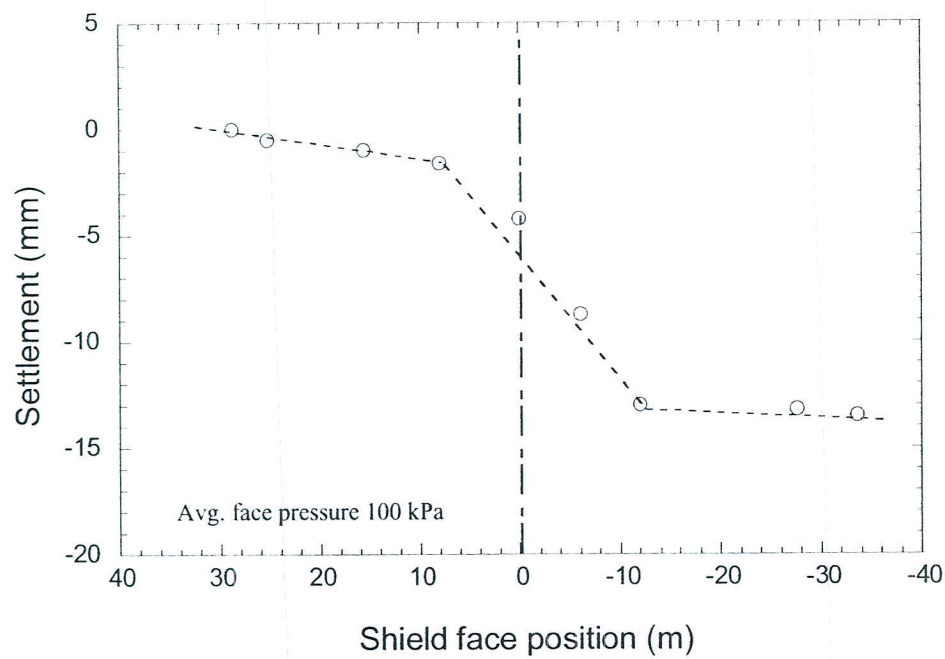
Kimura and Mair (1981)

การทดลองดังกล่าวมีพื้นฐานมาจากการจำลองการใช้หัวเจาะค้ำยันแบบหน้าเปิด ไม่ใช่หัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล ดังที่ใช้ในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้ความดันหน้าหัวเจาะที่ต่ำ หัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุลจะมีพฤติกรรมคล้ายกับหัวเจาะค้ำยันแบบหน้าเปิดซึ่งส่งผลให้ดินมีการเคลื่อนตัวไปทางปากอุโมงค์ นอกจากนี้ จากการสังเกตการทรุดตัวของผิวดินในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลจะมีลักษณะเป็นบริเวณกว้าง และขยายไปจนถึงเหนือหัวเจาะแต่จะหยุดการทรุดตัวที่ระยะประมาณ 15 เมตร (ประมาณ 2 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวเจาะ) จากด้านหน้าหัวเจาะ และจากจุดนี้ไปการทรุดตัวของผิวดินจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

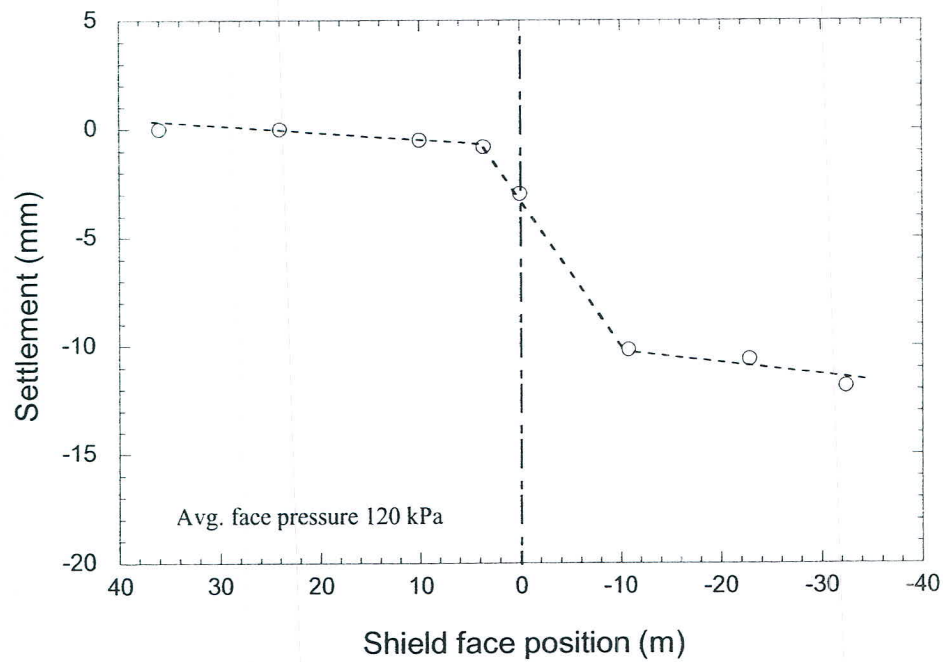


รูปที่ 3.23 รูปแบบการเคลื่อนตัวของดินบริเวณหน้าหัวเจาะ

หลังจากที่หัวเจาะเคลื่อนตัวออกไปเป็นระยะ 72 เมตร จากสถานีปล่อยหัวเจาะ และมีการติดตั้งผนังอุโมงค์ไป 60 วง หัวเจาะจะหยุดทำงาน รอรางสำหรับอุปกรณ์สนับสนุนจะถูกติดตั้งขึ้นภายในอุโมงค์ และโครงสร้างชั่วคราวทั้งหมดถูกรื้อถอนออก ถือว่าเป็นจุดสิ้นสุดของช่วงเริ่มต้นการขุด (Initial drive) และหัวเจาะจะเริ่มกลับมาทำงานอีกครั้ง ตั้งแต่ตำแหน่งนี้ไป หัวเจาะจะสามารถเพิ่มความดันหน้าหัวเจาะได้ถึง 180 กิโลปาสกาล แสดงไว้ใน รูปที่ 3.15 ก) ที่ตำแหน่ง b และ c โดย รูปที่ 3.15 ก) ได้ถูกเลือกขึ้นมาเพื่อที่จะอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวของผิวดินและความดันหน้าหัวเจาะ โดยความดันหน้าหัวเจาะเฉลี่ยระหว่างที่หัวเจาะผ่านเข้ามาอยู่ที่ตำแหน่ง b มีค่าประมาณ 100 กิโลปาสกาล และตำแหน่ง c มีค่าประมาณ 120 กิโลปาสกาล การทำงานจะอยู่ในระบบปรับแรงดันดินสมดุลซึ่งเป็นระบบที่การทรุดตัวของผิวดินจะสามารถมีค่าลดลงได้โดยการปรับความดันหน้าหัวเจาะให้เท่ากับความดันของดินโดยรอบระหว่างการขุดเจาะ การทรุดตัวของผิวดินและตำแหน่งด้านหน้าของหัวเจาะ ณ ตำแหน่ง b และ c แสดงไว้ใน รูปที่ 3.24 และรูปที่ 3.25 ตามลำดับ การทรุดตัวของผิวดินมากที่สุดอยู่ที่ 13 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่ง b และ 11 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่ง c และเห็นได้ชัดเจนว่า ทั้งสองตำแหน่งนี้มีการทรุดตัวของผิวดินน้อยกว่าในตำแหน่ง a (การทรุดตัวของผิวดินประมาณ 50 มิลลิเมตร) ซึ่งเป็นบริเวณที่ใช้ความดันหน้าหัวเจาะที่ต่ำ ดังนั้นความดันหน้าหัวเจาะจึงมีผลกระทบต่อระดับการทรุดตัวของผิวดินอย่างเห็นได้ชัด ผู้ปฏิบัติงานจึงต้องให้ความสำคัญรอบคอบในการควบคุมความดันหน้าหัวเจาะเพื่อลดการทรุดตัวของผิวดิน



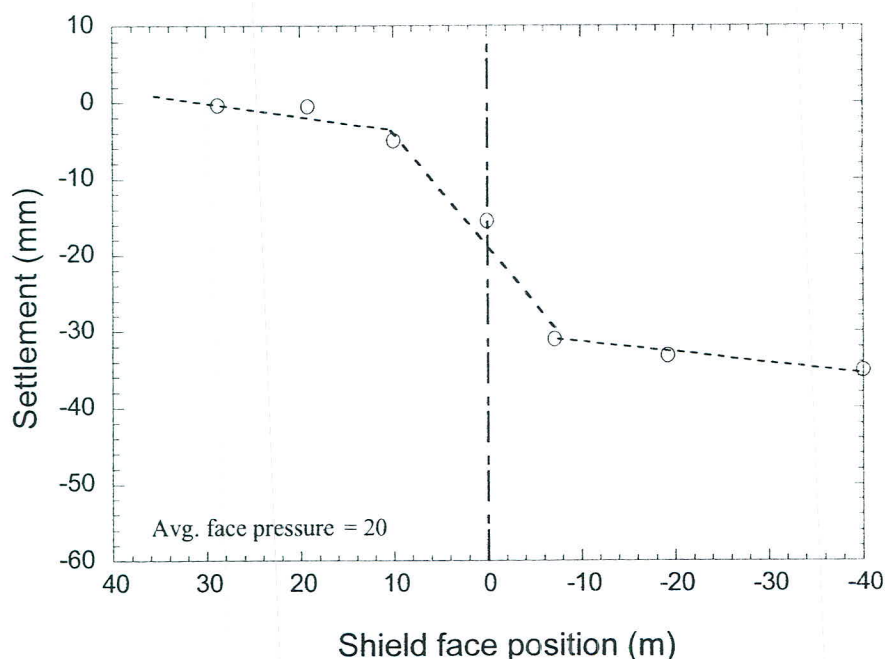
รูปที่ 3.24 การทรุดตัวตามแนวยาวของดินวัด ณ ตำแหน่ง b (ผนังอุโมงค์วงที่ 101)



รูปที่ 3.25 การทรุดตัวตามแนวยาวของดินวัด ณ ตำแหน่ง c (ผนังอุโมงค์วงที่ 164)

ต่อมาหลังจากทำการติดตั้งผนังอุโมงค์วงที่ 177 ได้เสร็จสิ้นลง มอเตอร์หมุนหัวตัดดินได้รับความเสียหาย โดยทำให้หัวตัดดินไม่สามารถหมุนไปได้ที่ความดันที่ต้องการและทำให้ระดับของความดันหน้าหัวจะลดลงอย่างรวดเร็วเรียกว่า “ช่วงสูญเสียความดัน” (Pressure loss zone) แสดงไว้ใน รูปที่ 3.15 ข) ภายในบริเวณนี้จะพบ การหลุดตัวของผิวดินเป็นบริเวณกว้าง

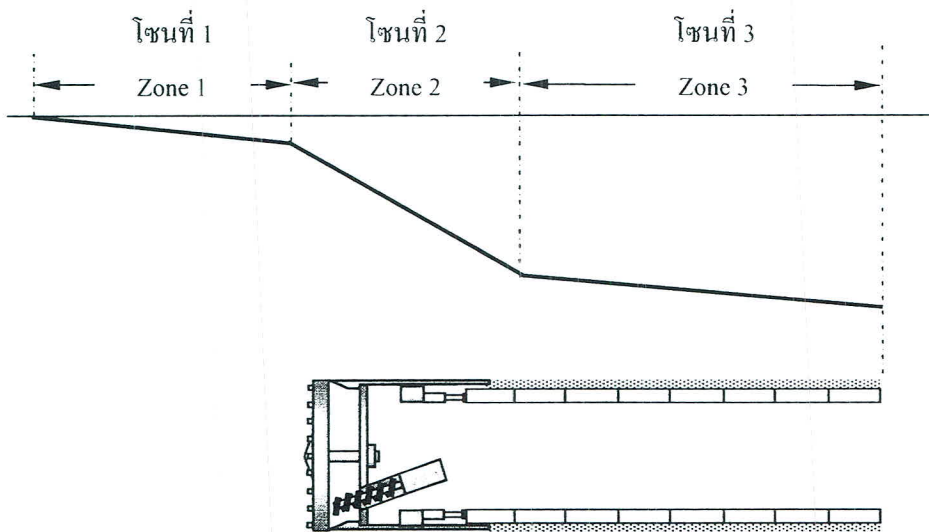
ที่ตำแหน่ง d แสดงไว้ใน รูปที่ 3.15 ก) ซึ่งให้เห็น จุดสังเกตที่ตำแหน่งอุโมงค์วงที่ 208 ในบริเวณ โซนสูญเสียความดัน การหลุดตัวของผิวดินมากที่สุดคือ 35 มิลลิเมตร แสดงไว้ใน รูปที่ 3.26 มากกว่าค่าที่วัดได้ ณ ตำแหน่ง b และ c ที่หัวเจาะทำงานอยู่ในระบบปรับแรงดันดินสมดุล ซึ่งไม่เพียงแต่จะมีการหลุดตัวของผิวดินเป็นบริเวณกว้าง แต่ยังพบการเคลื่อนตัวของดินด้านหน้าของหัวเจาะอีกด้วย พฤติกรรมของดินในลักษณะนี้คล้ายคลึงกับที่สังเกตได้จากตำแหน่ง a รูปที่ 3.15 อย่างไรก็ตาม ในทุกๆ กรณี รูปแบบของการหลุดตัวตามยาวของผิวดินค่อนข้างจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน



รูปที่ 3.26 การหลุดตัวตามแนวยาวของดินวัด ณ ตำแหน่ง d (ผนังอุโมงค์วงที่ 208)

จากข้อสังเกตนี้ การหลุดตัวของผิวดินจากการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 โซนตามระดับของความดันหน้าหัวเจาะ ได้แก่ 1) โซนที่ 1 2) โซนที่ 2 และ 3) โซนที่ 3 แสดงไว้ใน รูปที่ 3.27 โดย “โซนที่ 1” คือ ระยะเริ่มต้น (ตำแหน่งที่ทำการติดตั้งหมุดวัดการหลุดตัวผิวดิน) อยู่ที่ประมาณ 30 เมตรก่อนที่หัวเจาะจะเคลื่อนที่เข้ามา การหลุดตัว

ก็เริ่มที่จะเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งเริ่มต้นดังกล่าว หลังจากนั้นปริมาณการทรุดตัวจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงที่ระยะประมาณ 10 เมตร วัดจากระยะระหว่างตำแหน่งที่มีการติดตั้งหมุดวัดการทรุดตัวที่ผิวดินและส่วนหน้าของหัวเจาะ การทรุดตัวผิวดินจะถูกเร่งให้เกิดขึ้นในปริมาณที่สูงมาก ในช่วงนี้จะเห็นเส้นแนวโน้มของการทรุดตัวที่ผิวดินที่มีความชันเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนใน รูปที่ 3.27 นั้นแสดงให้เห็นว่า เป็นจุดเปลี่ยนของ “โซนที่ 1” เข้าสู่ “โซนที่ 2” หลังจากนั้นเมื่อหัวเจาะเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งที่มีการติดตั้งหมุดวัดการทรุดตัวผิวดินออกไป (ประมาณ 15 เมตรจากส่วนหน้าของหัวเจาะ) การทรุดตัวที่ผิวดินก็มีแนวโน้มลดลงเข้าสู่ “โซนที่ 3” เป็นการทรุดตัวผิวดินในส่วนสุดท้าย และจะหยุดการเกิดการทรุดตัวที่ระยะประมาณ 30 เมตร หลังจากหัวเจาะผ่านไปจากหมุดวัดการทรุดตัวผิวดิน

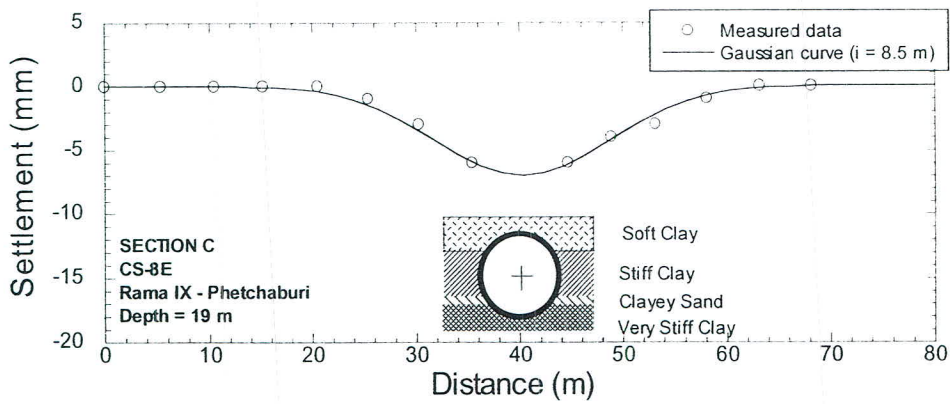


รูปที่ 3.27 แผนภาพแสดงรูปตัดการทรุดตัวที่ผิวดินตามแนวยาวที่เกิดจากการก่อสร้างอุโมงค์

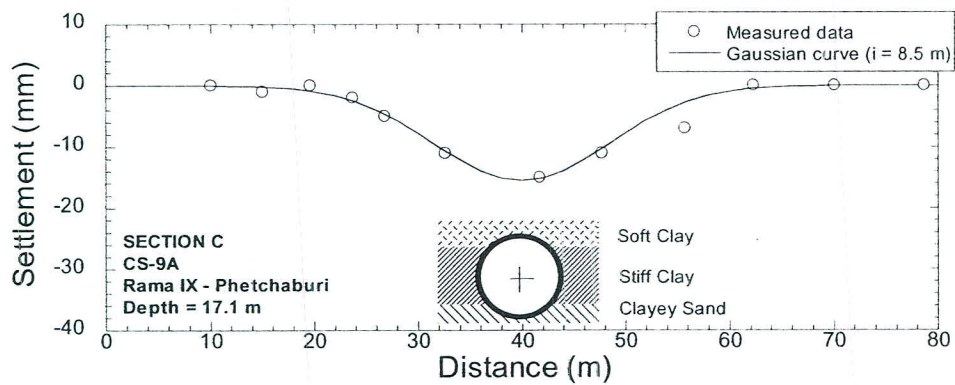
3.5.2 การทรุดตัวของผิวดินตามแนวขวาง (Transverse surface settlements) จากการขุดเจาะอุโมงค์เดี่ยว

การขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะทำให้เกิดการทรุดตัวของผิวดิน ซึ่งระดับการทรุดตัวของผิวดินขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ และค่อนข้างที่จะคาดการณ์ได้ยาก จากหลายกรณีศึกษาและการสังเกตในโครงการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล พบว่า การทรุดตัวของผิวดินไม่เพียงแต่จะเกิดขึ้นตามแนวยาวเท่านั้น แต่ยังเกิดแนวการทรุดตัวตามแนวขวาง (Transverse surface settlements) ซึ่งทำให้การเคลื่อนตัวของดินเป็นร่องตัว (Trough) ออกทางด้านข้าง ในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล การทรุดตัวของดินตามแนวขวางถูกวัดด้วยแนวหมุดวัดการทรุด

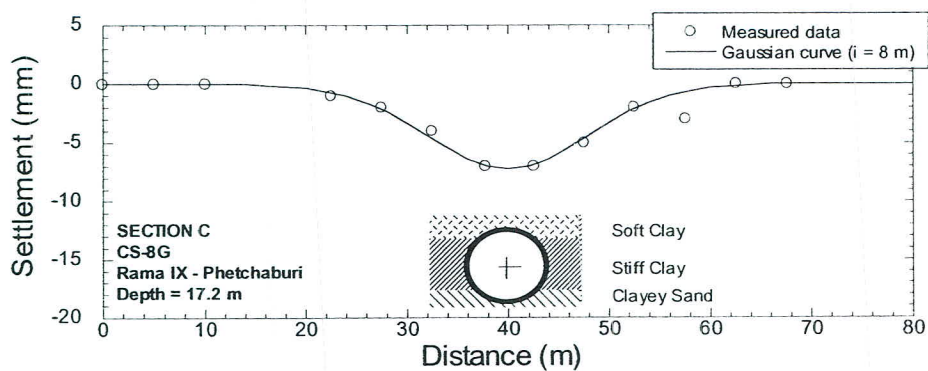
ตัวผิวดิน (Surface settlement array) ที่ติดตั้งเหนือแนวอุโมงค์ ตัวอย่างแนวการทรุดตัวเหนืออุโมงค์
 เดี่ยวแสดงไว้ใน รูปที่ 3.28 ถึงรูปที่ 3.32



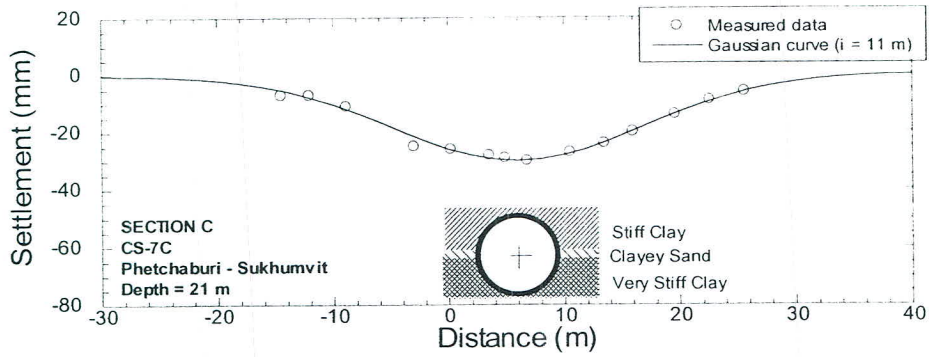
รูปที่ 3.28 แนวการทรุดตัวของผิวดินวัดจากแนวหมุดวัดการทรุดตัวที่ตำแหน่ง CS-8E



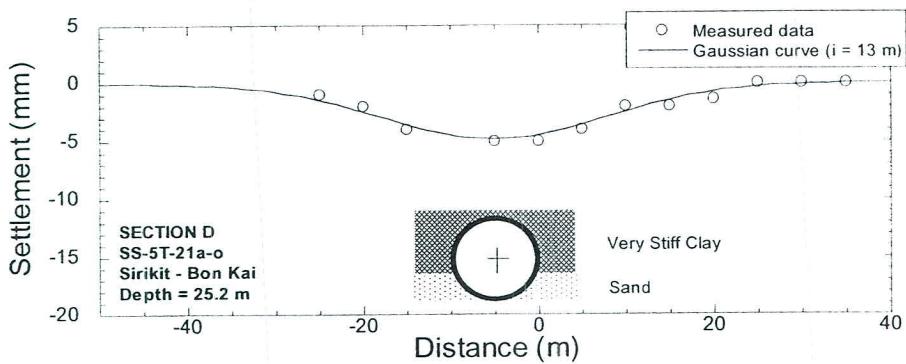
รูปที่ 3.29 แนวการทรุดตัวของผิวดินวัดจากแนวหมุดวัดการทรุดตัวที่ตำแหน่ง CS-9A



รูปที่ 3.30 แนวการทรุดตัวของผิวดินวัดจากแนวหมุดวัดการทรุดตัวที่ตำแหน่ง CS-8G



รูปที่ 3.31 แนวการทรุดตัวของผิวดินวัดจากแนวหมุดวัดการทรุดตัวที่ตำแหน่ง CS-7C



รูปที่ 3.32 แนวการทรุดตัวของผิวดินวัดจากแนวหมุดวัดการทรุดตัวที่ตำแหน่ง SS-5T-21a-o

จากรูปดังกล่าวพบว่า แนวการทรุดตัวของผิวดินเหนืออุโมงค์ส่วนมากค่อนข้างจะสมมาตรกับแนวกึ่งกลางอุโมงค์ ดังนั้น กราฟความน่าจะเป็นหรือ Gaussian curve ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมมากที่สุดในการประมาณรูปร่างการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดขึ้นจากการขุดเจาะอุโมงค์ สามารถนำมาใช้ประมาณแนวการทรุดตัวของผิวดินได้ดังแสดงไว้ใน รูปที่ 3.33 โดยใช้สมการของ Peck (1969) และ O'Reilly and New (1982) จากสมการ (3.5) ถึงสมการ (3.7)

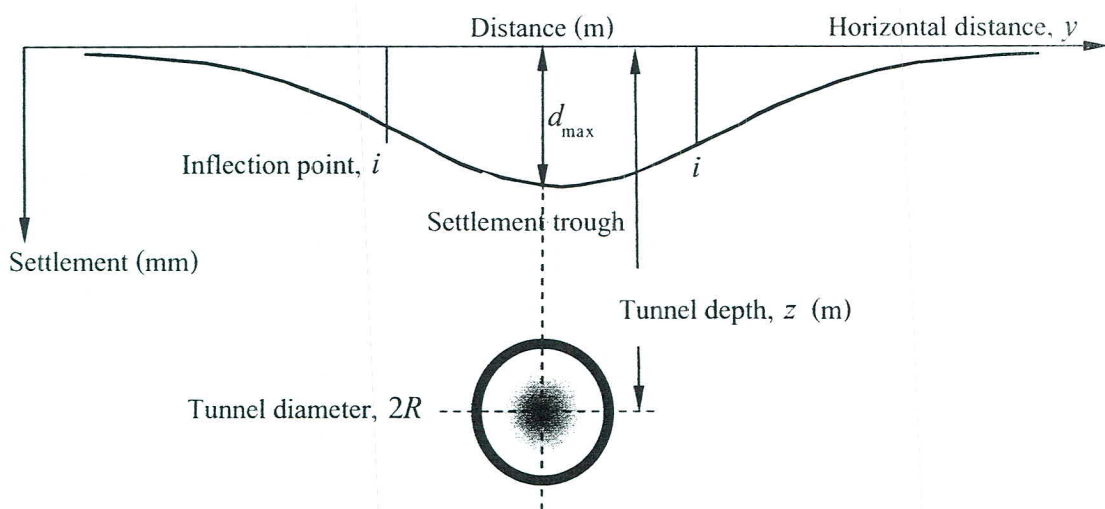
$$V_s = 2.5i \delta_{max} \quad (3.5)$$

$$V_s = \frac{G.L\%}{100} \left(\pi \frac{D^2}{4} \right) \quad (3.6)$$

$$i = Kz \quad (3.7)$$

โดยที่

- V_s คือปริมาตรการทรุดตัวของอุโมงค์ (m^3)
- δ_{max} คือการทรุดตัวที่ผิวดินเหนืออุโมงค์ (m)
- i คือระยะจากจุดศูนย์กลางอุโมงค์ถึงจุดโค้งกลับของแนวการทรุดตัว (Inflection point)
- $G.L\%$ คือเปอร์เซ็นต์การสูญเสียมวลดิน
- D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ (m)
- z คือความลึกถึงจุดกึ่งกลางอุโมงค์จากผิวดิน (m)
- K คือค่าคงที่โดยเท่ากับ 0.5 สำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ในสภาพชั้นดินเหนียวอ่อน-ชั้นดินเหนียวแข็ง และการก่อสร้างอุโมงค์ในสภาพชั้นดินเหนียวแข็ง 0.4 สำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ในสภาพชั้นดินเหนียวแข็ง-ชั้นดินทราย และ 0.3 สำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ในสภาพชั้นดินทราย



รูปที่ 3.33 การใช้กราฟความน่าจะเป็นปกติประมาณแนวการทรุดตัวของผิวดินเหนืออุโมงค์เดี่ยว

จุดโค้งกลับของแนวการทรุดตัว (Inflection point, i) สำหรับการขุดเจาะอุโมงค์ในชั้นดินเหนียว สามารถหาได้โดยการประมาณจากสมการที่เสนอโดย O'Reilly and New (1982) การเก็บรวบรวมข้อมูลการทรุดตัวของผิวดินจากโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลทำการตรวจวัดที่ระยะประมาณ 30 เมตร หลังจากหัวเจาะผ่านไปจากหมวดวัดการทรุดตัวของผิวดิน ซึ่งถือว่าเป็นจุดที่การทรุดตัวของผิวดินมีค่ามากที่สุด (δ_{max}) โดยหลังจากนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ โดยไม่ได้้นำการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำของดิน (Consolidation settlement) ที่เป็นการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดในช่วงระยะยาวมาพิจารณา ซึ่งอาจจะ

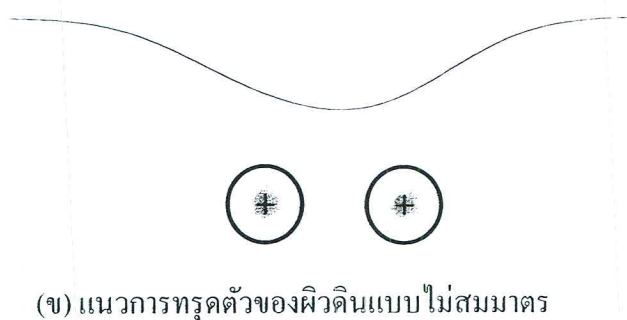
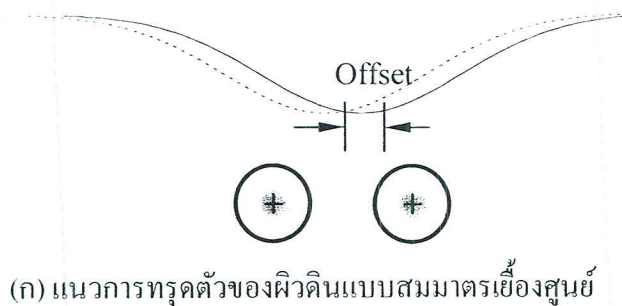
มีผลต่อการทรุดตัวของผิวดินเช่นเดียวกัน ดังที่ได้อธิบายไว้โดย Mair and Taylor (1997) โดยการทรุดตัวของผิวดินจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากการทรุดตัวทันทีทันใด (Immediate settlement) ภายหลังจากการก่อสร้าง

3.5.3 การทรุดตัวของผิวดินตามแนวขวาง (Transverse surface settlements) จากการขุดเจาะอุโมงค์คู่

การทรุดตัวของผิวดินที่เกิดขึ้นจากการก่อสร้างอุโมงค์เป็นปัญหาหลัก ที่วิศวกรพยายามที่จะหาวิธีป้องกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การก่อสร้างอุโมงค์ในเขตเมืองเพื่อใช้เป็นระบบขนส่งมวลชนขนาดใหญ่ ซึ่งการก่อสร้างส่วนใหญ่จะเป็นอุโมงค์คู่ (Twin tunnels) เพื่อให้รถไฟฟ้าใต้ดินสามารถวิ่งไปและกลับได้ตลอดแนวเส้นทางดังเช่น ในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล ซึ่งเป็นโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายแรกของกรุงเทพฯ รูปแบบการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์คู่จะมีความแตกต่างจากการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากอุโมงค์เดี่ยว (Single tunnel) ที่ได้แสดงไว้ใน รูปที่ 3.33 ซึ่งการทรุดตัวของผิวดินจากการขุดเจาะอุโมงค์คู่ จะมีแนวการทรุดตัวของผิวดินที่ขยายกว้าง หรือทำให้บริเวณที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของระบบรถไฟฟ้า (Influence zone) เกิดขึ้นมากกว่าการขุดเจาะอุโมงค์เดี่ยว อีกทั้งการประมาณแนวการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากอุโมงค์คู่ ยังคงเป็นปัญหาที่สำคัญเพราะมักจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้าน เช่น การสูญเสียมวลดิน (Ground loss) ที่แตกต่างกันระหว่างอุโมงค์ตัวแรกและอุโมงค์ตัวที่สอง ดังนั้น หัวข้อนี้จึงได้นำเสนอวิธีการที่สามารถประมาณแนวการทรุดตัวของผิวดินจากอุโมงค์คู่ เพื่อประโยชน์ต่อการออกแบบและควบคุมการก่อสร้างอุโมงค์คู่และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) รูปแบบของแนวการทรุดตัวของผิวดินเหนืออุโมงค์คู่

จากการศึกษาพฤติกรรมของดิน และรูปแบบการทรุดตัวของผิวดินเหนืออุโมงค์คู่ของโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าใต้ดินในเมืองชิคาโก Peck (1969) มีการตั้งข้อสังเกตเกี่ยวกับการสูญเสียมวลดิน (Ground loss) ว่าการสูญเสียมวลดินมักจะเกิดขึ้นขณะทำการก่อสร้างอุโมงค์ตัวที่สองมากกว่าอุโมงค์ตัวแรก และแนวการทรุดตัวของผิวดินจะมีลักษณะสมมาตร โดยมีจุดกึ่งกลางการทรุดตัวของผิวดินเยื้องศูนย์ (Offset) มาทางอุโมงค์ตัวที่สองแสดงไว้ใน รูปที่ 3.34 ก) ทั้งนี้เนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ตัวแรกจะรบกวน (Disturbance) โครงสร้างของดินบริเวณรอบอุโมงค์และส่งผลให้เกิดเป็นบริเวณกว้าง ซึ่งอาจทำให้เกิดการสูญเสียมวลดินมากขึ้นขณะทำการขุดเจาะอุโมงค์ที่สอง และหากอุโมงค์ทั้งสองอยู่ชิดกันมาก จะทำให้แนวการทรุดตัวของผิวดินมีลักษณะสมมาตร โดยมีกึ่งกลางการทรุดตัวอยู่ตรงกลางระหว่างอุโมงค์ทั้งสองพอดี

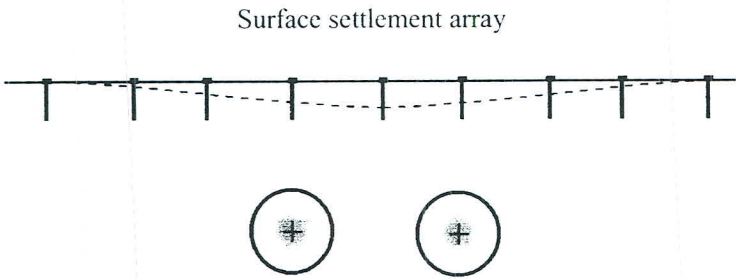


รูปที่ 3.34 รูปแบบแนวการทรุดตัวของผิวดินเหนืออุโมงค์คู่

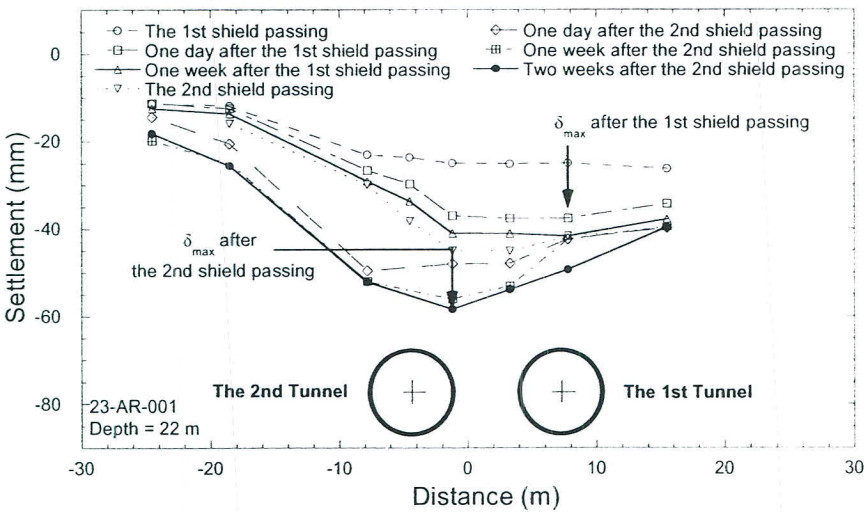
อย่างไรก็ตาม ควรคำนึงว่าการก่อสร้างอุโมงค์คู่จากข้อสังเกตดังกล่าวใช้หัวเจาะค้ำยันแบบหน้าเปิด (Open-face shield) โดยใช้แบบอัดอากาศ (Compressed air) ช่วยป้องกันการพังทลายของดิน ซึ่งการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยวิธีนี้แตกต่างกับวิธีที่ใช้ในปัจจุบันโดยสิ้นเชิง ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้หัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล (Earth pressure balance shield) โดยหัวเจาะอุโมงค์แบบนี้เหมาะสมกับการขุดเจาะอุโมงค์ในดินอ่อน ที่สามารถควบคุมการสูญเสียมวลดินได้ดีกว่า และมีผลกระทบต่อสภาพดินข้างเคียงน้อยกว่าการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะค้ำยันแบบหน้าเปิด ดังที่ได้สังเกตแนวการทรุดตัวของผิวดินเหนืออุโมงค์คู่ที่ถูกขุดเจาะด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล ขณะทำการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินที่ประเทศสิงคโปร์ที่เสนอโดย Shirlaw et al (1988) พบว่า แนวการทรุดตัวของผิวดินจะมีลักษณะไม่สมมาตรตามรูปที่ 3.34 (ข)

2) ผลการวัดการทรุดตัวของผิวดินในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคล

ขณะดำเนินการก่อสร้างโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลได้มีการวัดแนวการทรุดตัวของผิวดินด้วยแนวหมุดวัดการทรุดตัวของผิวดิน (Surface settlement array) ที่ติดตั้งไว้ที่ผิวดินเหนืออุโมงค์แสดงไว้ใน รูปที่ 3.35 ผลการเก็บรวบรวมข้อมูลบางส่วนแสดงไว้ใน รูปที่ 3.36 ถึงรูปที่ 3.38

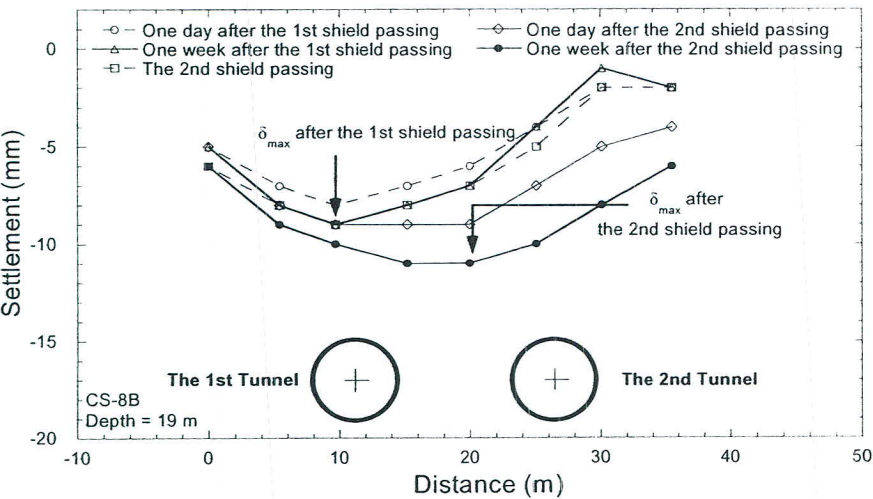


รูปที่ 3.35 ตำแหน่งแนวหมุดวัดการทรุดตัวของผิวดิน (Surface settlement array) เหนืออุโมงค์คู่

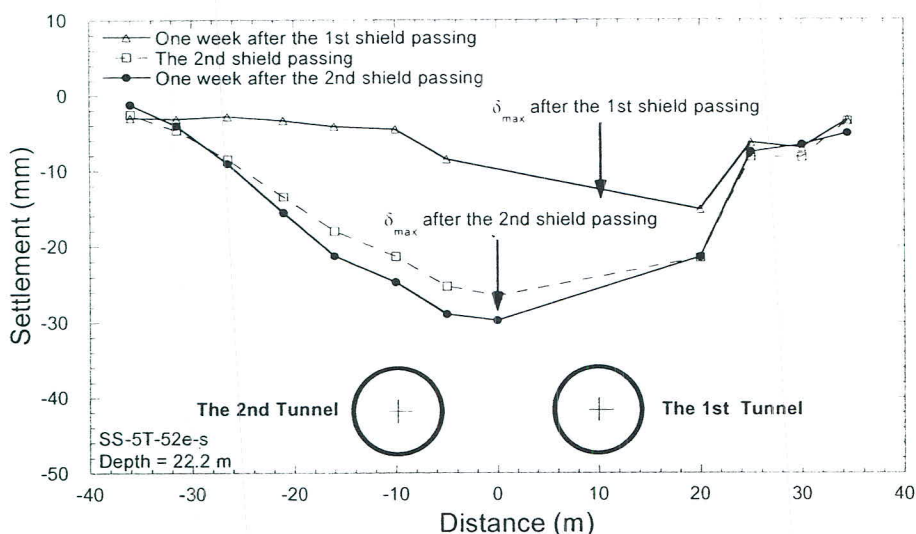


รูปที่ 3.36 การทรุดตัวของผิวดินวัดด้วยแนวหมุดวัดการทรุดตัวที่ตำแหน่ง 23-AR-001

เหนืออุโมงค์คู่



รูปที่ 3.37 การทรุดตัวของผิวดินวัดด้วยแนวหมุดวัดการทรุดตัวที่ตำแหน่ง CS-8B เหนืออุโมงค์คู่



รูปที่ 3.38 การทรุดตัวของผิวดินวัดด้วยแนวหมุดวัดการทรุดตัวที่ตำแหน่ง SS-5T-52e-s

เหนืออุโมงค์คู่

จากผลการตรวจวัดพบว่า ดินเริ่มทรุดตัวขณะที่หัวเจาะตัวแรกผ่านตำแหน่งที่ติดตั้งแนวหมุดวัดการทรุดตัวและจะทรุดตัวลงเรื่อยๆ ถึงประมาณหนึ่งสัปดาห์หลังจากหัวเจาะตัวแรกได้เคลื่อนผ่านพ้นไปแล้ว เมื่อหัวเจาะตัวที่สองเริ่มเข้าใกล้ตำแหน่งแนวหมุดวัดการทรุดตัว ดินจะทรุดตัวลงอีกครั้งหนึ่ง โดยมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับที่หัวเจาะตัวแรกผ่าน การทรุดตัวนี้จะหยุดลงเมื่อหัวเจาะเคลื่อนผ่านไปแล้ว ประมาณหนึ่งสัปดาห์เช่นกัน รูปแบบแนวการทรุดตัวของผิวดินที่เกิดจากการเจาะอุโมงค์คู่ดังตัวอย่างที่แสดงใน รูปที่ 3.36 ถึงรูปที่ 3.38 มีลักษณะค่อนข้างไม่สมมาตรและยังสังเกตได้ว่า จุดที่ทรุดตัวสูงสุดไม่จำเป็นต้องอยู่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างอุโมงค์ตามที่เสนอโดย Peck (1969) และได้ตั้งข้อสังเกตไว้ อีกทั้งการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ตัวที่สอง อาจมีขนาดมากกว่า หรือน้อยกว่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากอุโมงค์ตัวแรก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความควบคุมหัวเจาะ ดังนั้น สมการ Gaussian จึงไม่สามารถนำมาใช้ประมาณแนวการทรุดตัวของผิวดินเหนืออุโมงค์คู่ได้

3.5.4 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินที่เกิดจากการขุดเจาะอุโมงค์ (Lateral ground deformation)

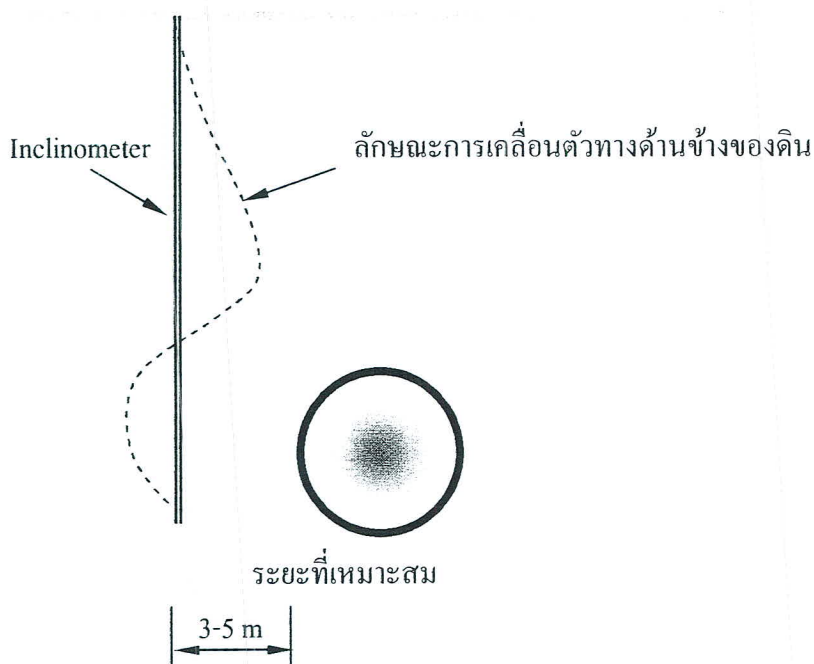
ผลกระทบจากการก่อสร้างอุโมงค์ในดินอ่อนด้วยหัวเจาะอุโมงค์แบบปรับแรงดันดินสมดุลในโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินสายเฉลิมรัชมงคลนั้น ได้มีการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Inclinometer) บริเวณหลายจุดตลอดแนวการก่อสร้างอุโมงค์ ทั้งนี้จะนำมาสู่ความเข้าใจถึงสาเหตุ

ของการเคลื่อนตัวของดิน และวิธีป้องกันในอนาคต Suwansawat (2004) ได้ทำการศึกษาการเคลื่อนตัวของดินจากโครงการดังกล่าว ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดิน

การตรวจวัดการเคลื่อนตัวของดินทำได้โดยการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Inclinometer) ซึ่งจะทำการวัดระยะการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินตลอดแนวการก่อสร้างอุโมงค์ โดยทำการติดตั้งห่างจากผนังอุโมงค์ในระยะตั้งแต่ 3 ถึง 5 เมตร แสดงไว้ใน รูปที่ 3.39

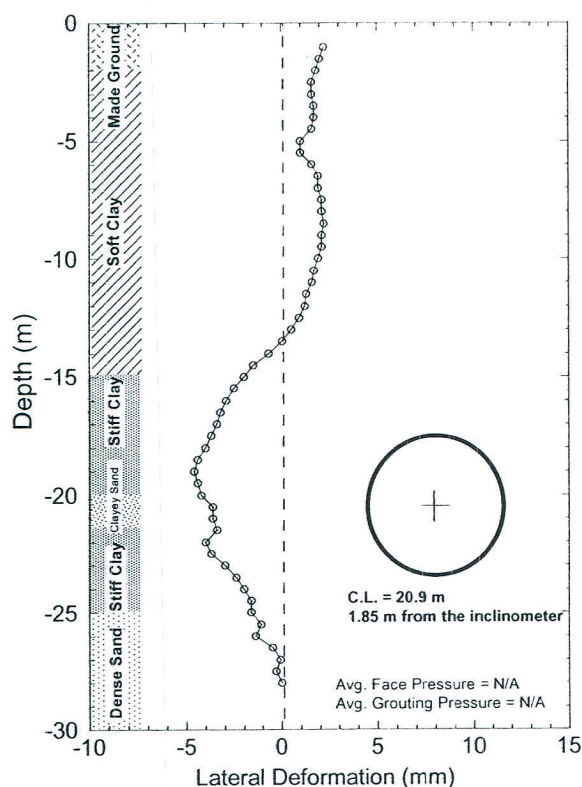
จากผลการตรวจวัดพบว่า ดินบริเวณส่วนยอดของอุโมงค์จะเคลื่อนตัวเข้าหาอุโมงค์ และดินที่อยู่ระดับต่ำกว่าส่วนยอดของอุโมงค์จะเคลื่อนตัวออกจากอุโมงค์แสดงไว้ใน รูปที่ 3.40 และรูปที่ 3.41 รูปแบบการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินลักษณะนี้จะมีความสัมพันธ์กับกระบวนการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุล ซึ่งสามารถอธิบายโดยการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวของดินในรูปที่ 3.42 และตำแหน่งของหัวเจาะอุโมงค์เทียบกับตำแหน่งของเครื่องมือตรวจวัด แสดงไว้ใน รูปที่ 3.43 เมื่อทำการวิเคราะห์โดยละเอียดจะพบว่า ณ ตำแหน่งเหนือยอดอุโมงค์ จะสามารถแบ่งการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินออกเป็น 3 โซน เช่นเดียวกับการทรุดตัวตามแนวยาว ได้แก่ โซนที่ 1 โซนที่ 2 และโซนที่ 3 ตามลำดับ โดยโซนที่ 1 จะเป็นช่วงที่หัวเจาะอุโมงค์เริ่มขุดเจาะเข้าใกล้ตำแหน่งการตรวจวัด ซึ่งจะสังเกตได้ว่า ดินเริ่มมีการเคลื่อนตัวเข้าหาอุโมงค์ เมื่อหัวเจาะอยู่ ณ ตำแหน่งประมาณ 13 เมตร จากเครื่องมือตรวจวัด หรือประมาณสองเท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางอุโมงค์ การเคลื่อนตัวดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อหัวเจาะเคลื่อนตัวเข้าหาตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องมือตรวจวัด



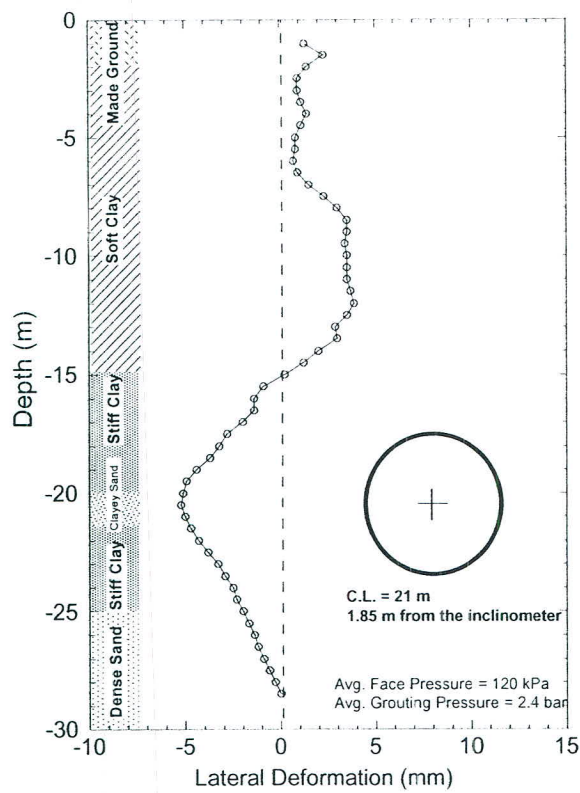
รูปที่ 3.39 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดิน (Inclinometer)

ระหว่างที่หัวเจาะอุโมงค์เคลื่อนผ่านตำแหน่งการตรวจวัด (ตำแหน่ง C ถึงตำแหน่ง F ใน รูปที่ 3.43) ดินจะเคลื่อนตัวมากขึ้นอย่างทันทีทันใดแสดงไว้ใน รูปที่ 3.42 ซึ่งเป็นการเคลื่อนตัวในโซนที่ 2 (Zone 2) การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินเข้าหาอุโมงค์จะมากที่สุดในขั้นนี้ อย่างไรก็ตามหลังจากหัวเจาะอุโมงค์ได้เคลื่อนผ่านจุดนี้ไปแล้ว และมีการอัดฉีดน้ำปูนรอบผนังอุโมงค์เสร็จสมบูรณ์แล้ว การเคลื่อนตัวของดินทางด้านข้างเข้าหาอุโมงค์จะน้อยลง ซึ่งเป็นการเคลื่อนตัวของดินในโซนที่ 3 (Zone 3) จากการวิเคราะห์ดังกล่าวจึงสามารถสรุปได้ว่า การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินเข้าหาอุโมงค์จะเกิดมากที่สุดในช่วงที่หัวเจาะเคลื่อนตัวผ่านตำแหน่งการตรวจวัดหรือในโซนที่ 2 (Zone 2) นั่นเอง

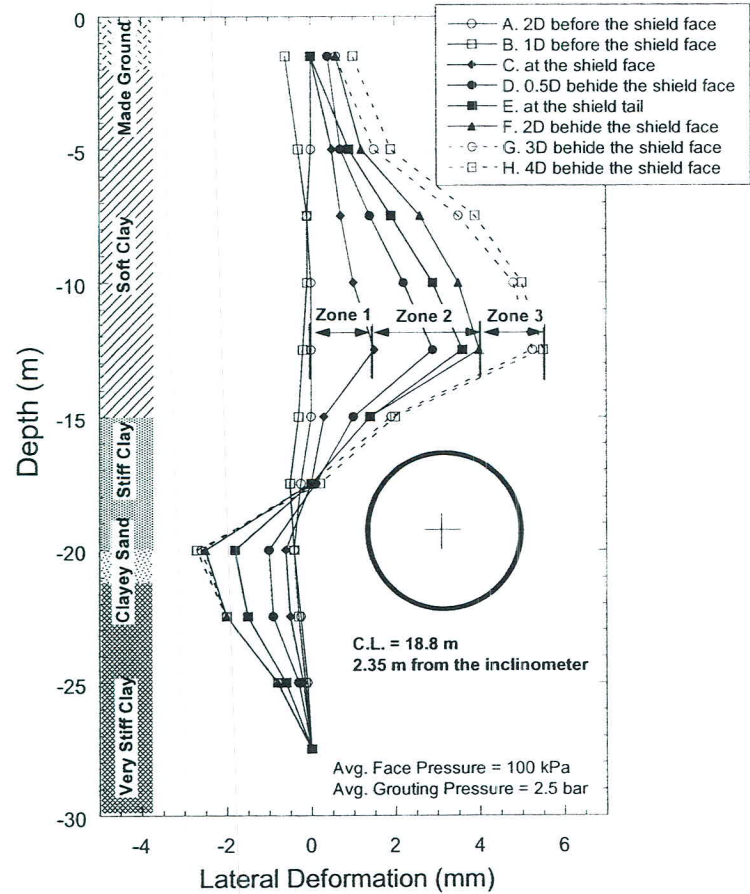
เมื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินในระดับที่ต่ำกว่าส่วนยอดอุโมงค์พบว่า ดินจะเคลื่อนตัวออกจากอุโมงค์เล็กน้อยขณะที่หัวเจาะเคลื่อนเข้าสู่ตำแหน่งตรวจวัด และดินจะเคลื่อนตัวออกเรื่อยๆ เมื่อหัวเจาะอุโมงค์เคลื่อนตัวผ่านตำแหน่ง E ดังรูปที่ 3.43 โดยที่ส่วนท้ายหัวเจาะ (Shield tail) จะเกิดการเคลื่อนตัวออกของดินมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่มีการอัดฉีดน้ำปูนเพื่อปิดช่องว่างส่วนท้ายหัวเจาะ ซึ่งปกติจะใช้ความดันประมาณ 2.5 ถึง 3 บาร์ การเคลื่อนตัวออกของดินจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งหัวเจาะเคลื่อนตัวผ่านไปเป็นระยะอย่างน้อย 13 เมตร หรือประมาณสองเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์แสดงไว้ใน รูปที่ 3.42



รูปที่ 3.40 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินที่ตำแหน่ง IN-T7-03

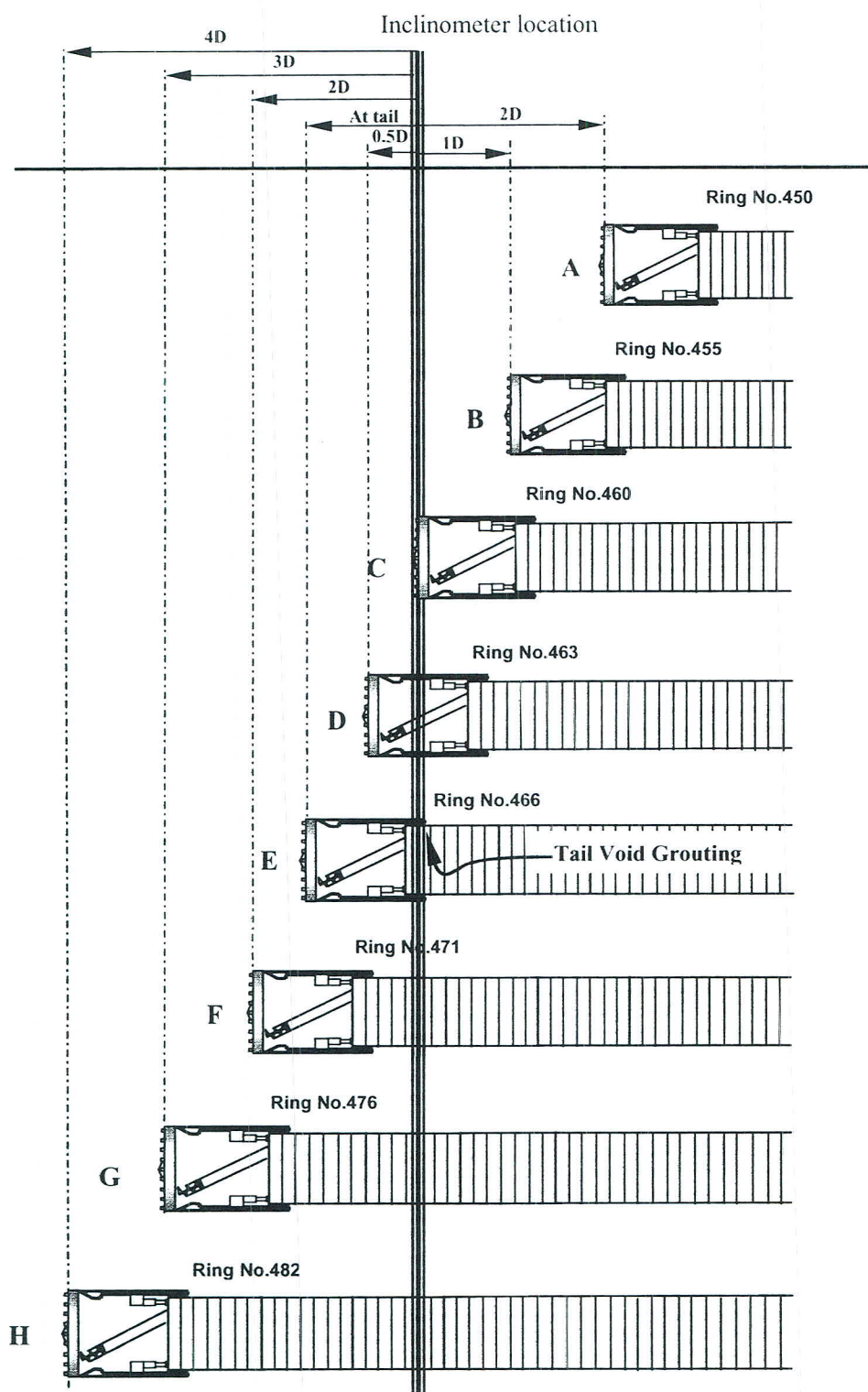


รูปที่ 3.41 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินที่ตำแหน่ง IN-T7-05

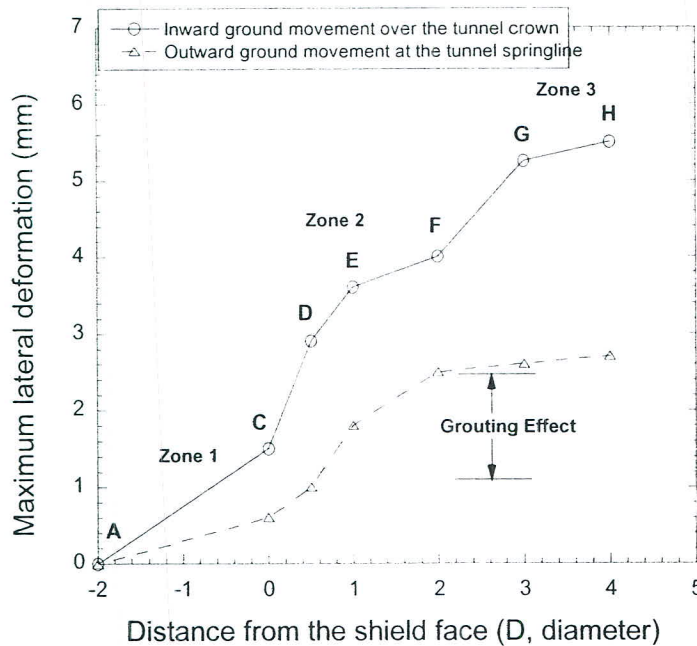


รูปที่ 3.42 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินที่ตำแหน่ง IN-T7-04

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของหัวเจาะอุโมงค์กับการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดิน แสดงไว้ในรูปที่ 3.44 ช่วยให้เราสามารถวิเคราะห์ปัจจัยที่ก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดิน ในแต่ละตำแหน่งที่หัวเจาะแบบปรับแรงดันดินสมดุลเคลื่อนที่ผ่าน โดยอ้างอิงจากตำแหน่งที่ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Inclinometer) ทั้งส่วนที่ดินเคลื่อนเข้าสู่อุโมงค์ (Inward ground movement) บริเวณส่วนยอดของอุโมงค์ และส่วนที่ดินเคลื่อนที่ออกจากอุโมงค์ (Outward ground movement) บริเวณระดับที่ต่ำกว่าส่วนยอดของอุโมงค์ ซึ่งจะมีลักษณะเป็น ขอบเขตที่ชัดเจนในแต่ละโซนที่ได้ทำการแบ่งเอาไว้ ในกรณีการเคลื่อนตัวของดินเข้าสู่อุโมงค์จะ เพิ่มขึ้นสูงสุดในโซนที่ 2 (Zone 2) คือ ขณะที่หัวเจาะกำลังเคลื่อนตัวผ่านตำแหน่งที่มีการติดตั้ง เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง โดยจะพบการเคลื่อนตัวของดินมีแนวโน้มเคลื่อนเข้าสู่ อุโมงค์อย่างเห็นได้ชัดในตำแหน่ง C ไปยังตำแหน่ง D แล้วการเคลื่อนตัวจะค่อยๆ ลดลงใน ตำแหน่ง D ไปยังตำแหน่ง F ต่อมาแนวโน้มการเคลื่อนตัวจะสูงขึ้นอีกครั้งในตำแหน่ง F ไปยัง ตำแหน่ง G แล้วก็จะมีการเคลื่อนตัวของดินเข้าสู่อุโมงค์ที่ลดลงเมื่อหัวเจาะอยู่ห่างจากตำแหน่ง G ออกไป ในกรณีการเคลื่อนตัวของดินออกจากอุโมงค์ จะสังเกตได้ชัดเจนในขณะทำการอัดฉีดน้ำ- ปูนในตำแหน่ง D ไปยังตำแหน่ง F ซึ่งจะพบแนวโน้มของการเคลื่อนตัวออกของดินที่ค่อนข้างสูง โดยการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินจะสิ้นสุดหรือลดลงในโซนที่ 3 (Zone 3) หลังจากที่หัวเจาะ เคลื่อนผ่านออกไปแล้ว



รูปที่ 3.43 ตำแหน่งของหัวเจาะอุโมงค์ขณะเคลื่อนที่ผ่านเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง



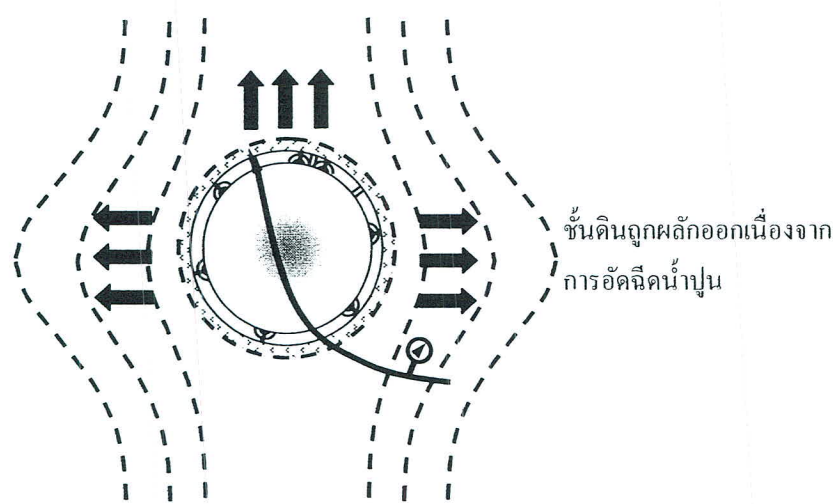
รูปที่ 3.44 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของหัวเจาะอุโมงค์กับการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดิน

2) ผลกระทบจากการอัดฉีดน้ำปูนบริเวณส่วนท้ายหัวเจาะ (Tail void grouting)

แม้ว่าหัวเจาะอุโมงค์แบบปรับแรงดันดินสมดุล ถูกออกแบบมาเพื่อช่วยลดการสูญเสียมวลดินขณะทำการก่อสร้างอุโมงค์ แต่ยังคงยากที่จะหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวได้อย่างสมบูรณ์ โดยเฉพาะในการก่อสร้างอุโมงค์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่พบว่า ดินยังคงเคลื่อนตัวเข้าหาอุโมงค์ทั้งทางส่วนหน้าอุโมงค์ (Tunnel face) และเหนือหัวเจาะอุโมงค์ (Over shield) โดยเฉพาะในกรณีที่หัวเจาะอุโมงค์เคลื่อนตัวผ่านตำแหน่งตรวจวัด นอกจากนี้ ขณะทำการติดตั้งผนังอุโมงค์จะเกิดช่องว่างบริเวณส่วนท้ายหัวเจาะจากความแตกต่างของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวเจาะและอุโมงค์ ช่องว่างดังกล่าวจะมีขนาดประมาณ 7 ถึง 8 เซนติเมตร ซึ่งถ้าหากปล่อยไว้จะเกิดการเคลื่อนตัวของดินเข้าหาอุโมงค์ในปริมาณมาก ก่อให้เกิดปัญหาทั้งการทรุดตัวของผิวดินและการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดิน โดยการเคลื่อนตัวของดินเข้าหาอุโมงค์จะมีลักษณะเป็นลิ้นสามเหลี่ยมเหนือผนังอุโมงค์

ในอดีตการเคลื่อนตัวของดินเข้าหาอุโมงค์จะเกิดขึ้น เนื่องจากช่องว่างบริเวณส่วนท้ายหัวเจาะเป็นหลัก อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันการอัดฉีดน้ำปูนด้วยความดันที่สูงเพื่อส่งน้ำปูนออกไปปิดช่องว่างดังกล่าว ได้ถูกนำมาใช้อย่างได้ผล การเคลื่อนตัวของดินเข้าหาอุโมงค์ในโซนที่ 3 (Zone 3) จึงน้อยลง แม้ว่าการอัดฉีดน้ำปูนจะลดการเคลื่อนตัวของดิน แต่ก็สามารถส่งผลกระทบในทางตรงกันข้ามได้เช่นกัน จากผลของการวัดด้วยเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Inclinometer) สังเกตได้อย่างชัดเจนว่า ความดันของการฉีดน้ำปูนจะผลักดันดินบริเวณโดยรอบอุโมงค์ด้วยความดันที่สูงซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวแสดงไว้ใน รูปที่ 3.45 อิทธิพลจากความดันของการฉีดน้ำปูนนี้จะส่งผลกระทบต่อ การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินเป็นระยะบวกลบประมาณ 6 เมตรจากตำแหน่งที่ทำ

การอัดฉีดน้ำปูน หรือตั้งแต่ในตำแหน่ง D ถึงตำแหน่ง F แสดงไว้ใน รูปที่ 3.43 การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความดันของการฉีดน้ำปูนและขนาดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินออกจากอุโมงค์แสดงไว้ใน ตารางที่ 3.2 โดยได้เปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนของความดันของการฉีดน้ำปูนต่อระยะจากขอบอุโมงค์ที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของดินพบว่า ขนาดของการเคลื่อนตัวของดินจะขึ้นอยู่กับระยะห่างจากขอบอุโมงค์และความดันของการฉีดน้ำปูน



รูปที่ 3.45 อิทธิพลจากการอัดฉีดน้ำปูนที่ส่งผลกระทบต่อการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดิน

ตารางที่ 3.2 ความดันการอัดฉีดน้ำปูนและขนาดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของดินออกจากอุโมงค์

เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง	ความดันของการฉีดน้ำปูน (บาร์)	ระยะจากขอบอุโมงค์ (เมตร)	ความดันในการฉีดน้ำปูน / ระยะจากขอบอุโมงค์ (บาร์/เมตร)	การเคลื่อนตัวทางด้านข้างออกจากอุโมงค์ สูงสุด (มิลลิเมตร)
23-IE-002	2	0.7	2.86	-3.45
23-IE-008	2	5.9	0.34	-0.5
26-IE-002	1.5	0.9	1.67	-3.7
28-IE-005	2.5	2.45	1.02	-3.1
IN-T7-01	2.5	1.85	1.35	-2.4
IN-T7-04	2.5	2.35	1.06	-2.7
IN-T7-05	2.4	1.85	1.30	-5.2