

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและทบทวนผลงานในอดีต

2.1 การคาดคะเนการทรุดตัวของดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์

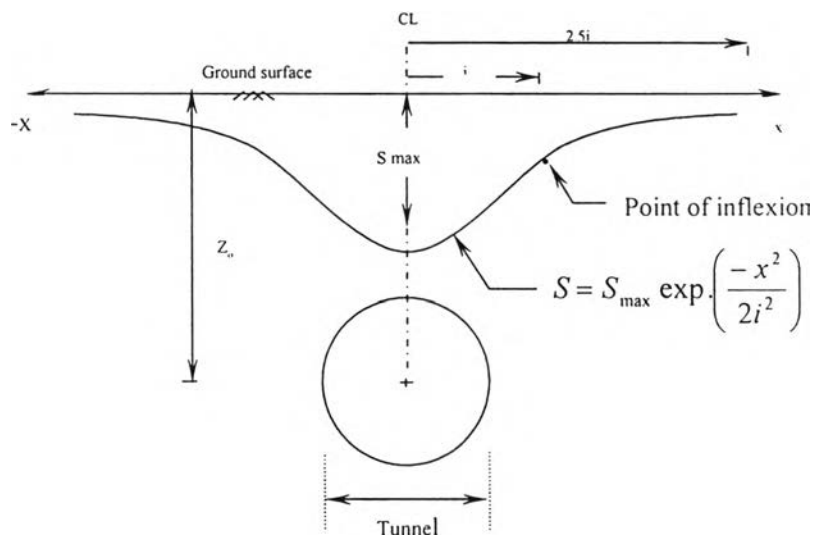
2.1.1 การคาดคะเนการทรุดตัวที่ผิวดิน

จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลภาคสนามในอดีตพบว่า การขุดเจาะอุโมงค์มีผลให้ดินในบริเวณใกล้เคียงแนวอุโมงค์เกิดการเคลื่อนและทรุดตัวเป็นรูปประฆังหงาย โดยมีค่าการทรุดตัวสูงสุดที่บริเวณเหนือศูนย์กลางแนวอุโมงค์ ดังรูปที่ 2.1

Peck(1969) พบว่าข้อมูลการทรุดตัวที่เกิดขึ้นมีการกระจายแบบ inverse gaussian และสามารถอธิบายได้ด้วย error function (probability function) โดยปริมาณการทรุดตัวที่ระยะ x ใดๆมีค่าดังนี้

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

- เมื่อ S ปริมาณการทรุดตัวที่ผิวดิน ณ ระยะ x ใดๆในแนวราบจากแนวกลางของอุโมงค์(m)
 S_{\max} ปริมาณการทรุดตัวมากที่สุดที่ศูนย์กลางอุโมงค์(mm)
 X ระยะในแนวราบจากแนวศูนย์กลางของอุโมงค์(m)
 I ระยะจากกึ่งกลางแนวอุโมงค์ถึงจุดเปลี่ยนเว้า(inflexion point,m)

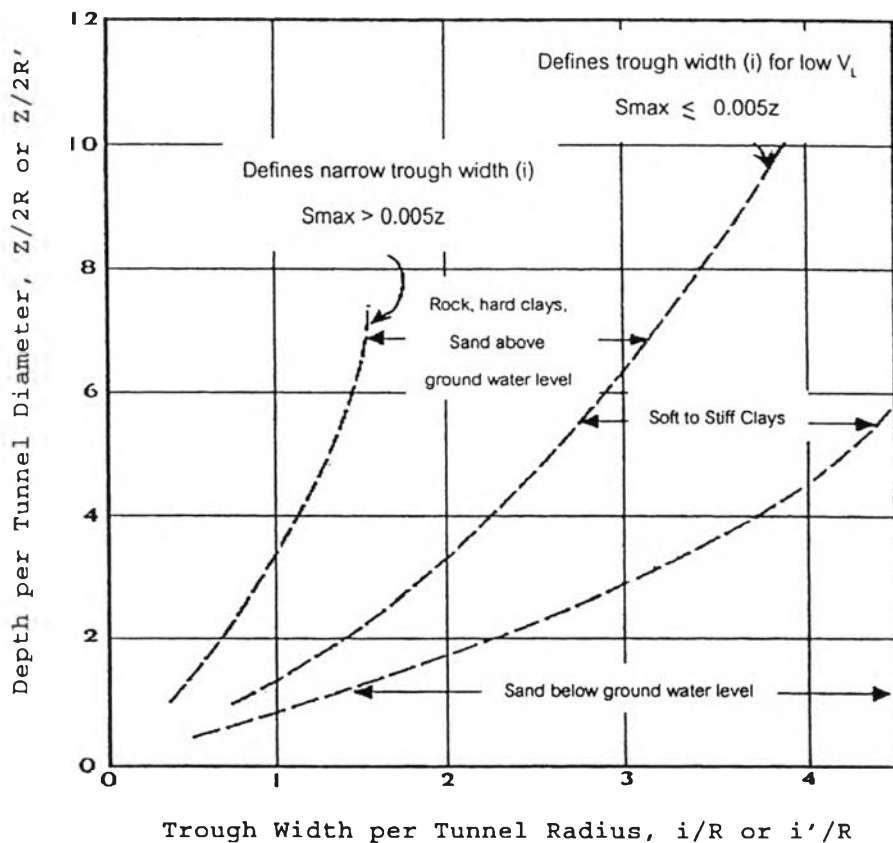


รูปที่ 2.1 ลักษณะการทรุดตัวที่ผิวดินเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ (Peck 1969)

2.1.2 การประเมินหาค่า width parameter(i)

2.1.2.1 Peck(1969)

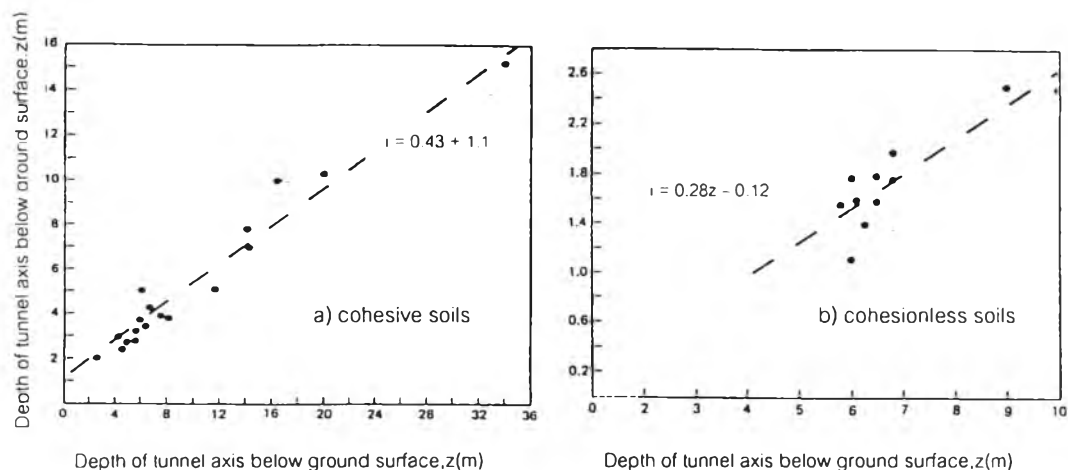
Peck ได้รวบรวมข้อมูลที่วัดได้จริงจากในสนามและนำเสนอกราฟความสัมพันธ์อัตราส่วนระหว่างความลึกจากผิวดินถึงศูนย์กลางอุโมงค์ต่อขนาดของอุโมงค์($Z_0/2R$) และ ความกว้างของแนวการทรุดตัว(i/R) สำหรับดินชนิดต่างๆ เพื่อใช้ในการประมาณหาค่า i ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กราฟสำหรับประมาณค่า i (เสนอโดย Peck 1969)

2.1.2.2 O'Reilly & New(1982)

O'Reilly & New(1982) ได้ทำการศึกษาข้อมูลการทรุดตัวของการขุดเจาะอุโมงค์และพบว่า ความลึกของอุโมงค์(แนวศูนย์กลางอุโมงค์) กับระยะถึงจุดเปลี่ยนเว้าของการทรุดตัว(i) มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง และได้นำเสนอความสัมพันธ์ทั้งกรณีการขุดเจาะอุโมงค์ในดินเหนียว(cohesive soil) และการขุดเจาะอุโมงค์ในดินทราย(granular soil) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของอุโมงค์(Z_0) กับระยะถึงจุดตัดกลับ(i) ของหน้าตัดทรุดตัว (O'Reilly and New, 1982)

อย่างไรก็ดี O'Reilly & New(1982,1983) ได้แนะนำว่าสำหรับการใช้งานโดยทั่วไป ความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะถึงจุดตัดกลับ(i) และความลึกถึงแนวอุโมงค์(Z_0) สามารถใช้ความสัมพันธ์อย่างง่ายได้ว่า

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

โดยค่าของ K ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน และมีค่าระหว่าง 0.4 - 0.7 (ดินเหนียวแข็ง - ดินเหนียวอ่อน) สำหรับดินทรายจะมีผลความของลึกของแนวกลางและความไม่ปกติต่างๆ อย่างไรก็ดีสำหรับอุโมงค์ในดินทรายที่ลึกไม่เกิน 10 เมตร ค่า K จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2 - 0.3

Kimura & Mair(1981) ได้ทำการศึกษแบบ Centrifuge สำหรับอุโมงค์ในดินเหนียว พบว่าด้วยสมการ(2) ที่ค่า $K = 0.5$ ความกว้างของแนวการทรุดตัวไม่ขึ้นกับระดับของการค้ำยันภายในอุโมงค์ ในขณะที่เดียวกันก็ไม่ขึ้นกับวิธีการก่อสร้าง(construction technique)ด้วย

จากงานวิจัยต่างๆในอดีตอาทิ Rankin(1988), O'Reilly & New(1982), Yeates(1985) ซึ่งได้ทำการรวบรวมข้อมูลการทรุดตัวที่วัดได้จากทั้งในอังกฤษและทั่วโลก ได้ให้ค่า K โดยประมาณสำหรับดินชนิดต่างๆดังนี้

K มีค่าประมาณ 0.4 - 0.7 สำหรับดินเหนียว (นิยมใช้ $K = 0.5$)

K มีค่าประมาณ 0.2 - 0.3 สำหรับดินที่เป็นทรายหรือกรวด (นิยมใช้ $K = 0.25$)

ค่า K ข้างต้นมีความเหมาะสมในการใช้งานพอสมควร อย่างไรก็ดีเราพบว่า นอกจากชนิดของดินแล้ว ค่า K ยังขึ้นกับความลึกของอุโมงค์อีกด้วย

สำหรับการขุดเจาะอุโมงค์ในชั้นดินกรุงเทพฯ ชินวุฒิ(2543) ได้ทำการศึกษาการขุดเจาะอุโมงค์ในดินกรุงเทพฯสำหรับโครงการรถไฟใต้ดิน พบว่า

สำหรับอุโมงค์เดี่ยว $K = 0.45-0.55$ สำหรับการขุดเจาะในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรก

$K = 0.35-0.40$ สำหรับการขุดเจาะในชั้นทรายชั้นแรก

สำหรับอุโมงค์คู่ที่ความลึกระดับเดียวกัน

$K = 0.70-0.80$ (ขุดเจาะในดินเหนียวแข็งชั้นแรก)

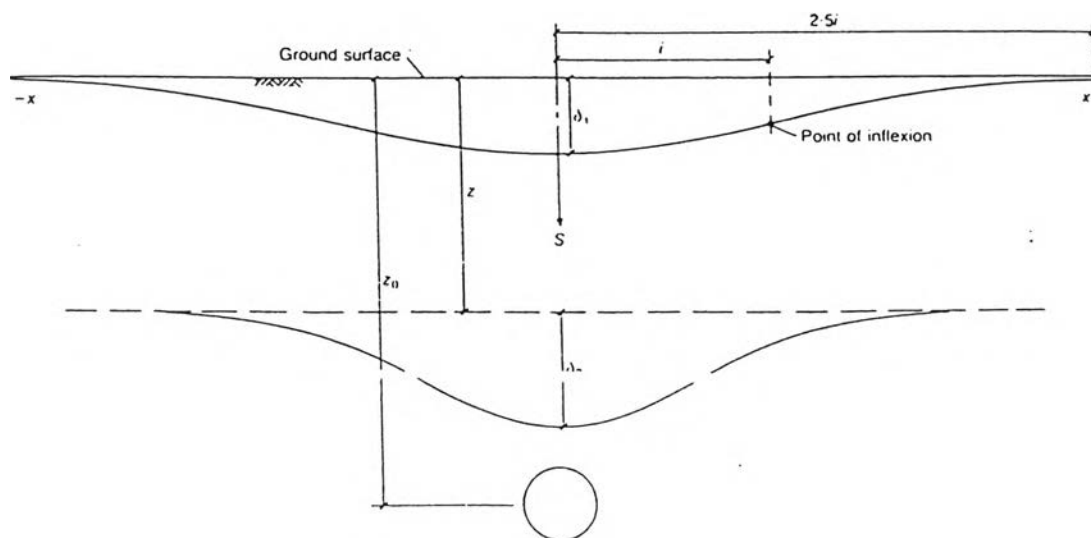
สำหรับอุโมงค์คู่ที่ความลึกต่างกัน

$K = 0.42-0.48$ (อุโมงค์ตัวแรกขุดเจาะในชั้นทรายแรก และอุโมงค์ตัวที่สองในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรก)

วิรัช(2544) ทำการศึกษาการขุดเจาะอุโมงค์สำหรับโครงการอุโมงค์ผันน้ำคลองเปรมประชากร ซึ่งทำการก่อสร้างในชั้นดินเหนียวแข็งชั้นแรก พบว่าค่า K สำหรับการขุดเจาะอุโมงค์มีค่า $0.34-0.50$

2.1.3 การคาดคะเนการทรุดตัวใต้ผิวดิน

จากการวัดและเก็บข้อมูลการทรุดตัวใต้ผิวดินในสนาม เพื่อให้ได้ความกว้างและแนวของการทรุดตัว(settlement troughs) เรานิยมถือว่า ลักษณะการทรุดตัวที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายการกระจายแบบเกาส์ (gaussian distribution) คล้ายกับที่เกิดขึ้นที่ผิวดิน



รูปที่ 2.4 แสดงหน้าตัดการทรุดตัวที่ความลึกต่างๆจากการขุดเจาะอุโมงค์ (Mair 1993)

ในการหาการทรุดตัวที่ระดับความลึกต่างๆใต้ผิวดิน (subsurface settlement) เนื่องจากเรานิยมตั้งสมมติฐานว่า การทรุดตัวที่ระดับความลึกต่างๆใต้ผิวดินนี้ มีรูปร่างคล้ายกับการทรุดตัวที่ผิวดิน

คือมีการกระจายตัวแบบเกาส์ (Gaussian distribution) ดังนั้นหากเราต้องการทราบค่าการทรุดตัวสูงสุดที่ระดับความลึก Z ใดๆจากผิวดิน จึงทำได้โดยการแทนค่า Z_0 ด้วย $Z_0 - Z$

Mair(1993) เก็บข้อมูลการทรุดตัวใต้ผิวดินโดย รูปร่างของแนวหน้าตัดการทรุดตัวใต้ผิวดินได้จากการติดตั้ง Extensometer หลายตัวต่อ 1 หน้าตัด และพบว่าค่า K มีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึก มีผลให้แนวหน้าตัดของการทรุดตัวใต้ผิวดิน(subsurface settlement profiles)ที่ได้ มีลักษณะแคบและมีค่าการทรุดตัวสูงสุดสูงกว่าการทรุดตัวที่ผิวดิน

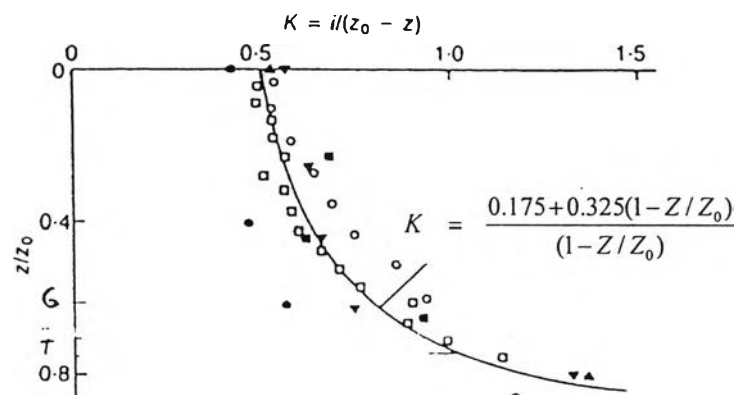
Mair (1993) ได้รวบรวมข้อมูลการทรุดตัวทั้งที่ผิวดินและการทรุดตัวใต้ผิวดินที่ความลึกต่างๆ จากงานของ Attewell & Farmer (1974), Barratt & Tyler (1976), Glossop (1978), Mair (1979) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 2.5 และได้เสนอสมการเชิงเส้นที่เป็นตัวแทนของข้อมูลดังนี้

$$i/Z_0 = \frac{0.175 + 0.325(1 - Z/Z_0)}{1 - Z/Z_0} \quad (2.3)$$

ซึ่งเมื่อรวมกับความสัมพันธ์ $i = K(Z_0 - Z)$ แล้ว จะได้ว่า

$$K = \frac{0.175 + 0.325(1 - Z/Z_0)}{(1 - Z/Z_0)} \quad (2.4)$$

ซึ่งเมื่อนำสมการ (2.4) ไปเขียนเป็นกราฟ จะได้ว่า แนวโน้มค่า K มีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึก ซึ่งแสดงด้วยรูปที่ 2.5



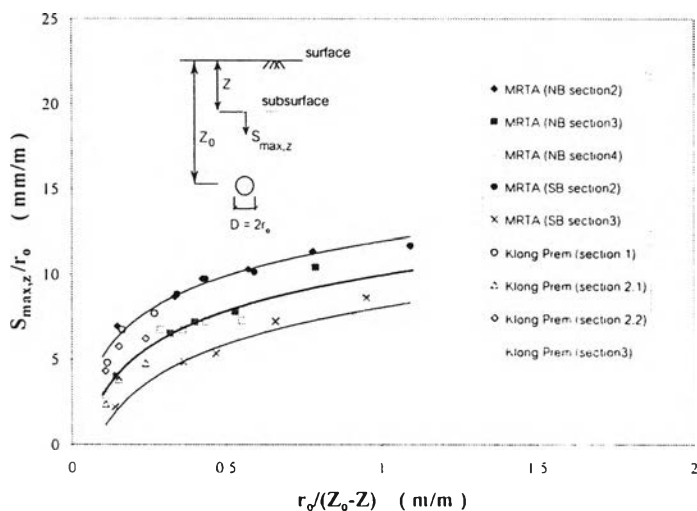
รูปที่ 2.5 ผลของความลึกที่มีต่อแนวโน้มค่า K (Mair, 1993)

วีรัช(2544) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการก่อสร้างอุโมงค์และการเคลื่อนตัวของดินบริเวณข้างเคียงในชั้นดินกรุงเทพฯจากการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยระบบแรงดันดินสมดุล ที่มีขนาดอุโมงค์ระหว่าง 4 - 6.5 เมตร และมีค่าการสูญเสียมวลดินที่ผิวดินประมาณ 1 - 3 % พบว่าค่า K ของ Mair ไม่เหมาะสม

สำหรับดินกรุงเทพฯและได้เสนอความสัมพันธ์สำหรับประมาณค่าการทรุดตัวมากที่สุดที่ระดับความลึกต่างๆดังนี้

$$\frac{S_{\max, z}}{r_o} = 3.04 \ln\left(\frac{r_o}{Z_o - Z}\right) + 9.93 \tag{2.5}$$

Subsurface settlement above tunnel center line in stiff Bangkok Clay



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวมากที่สุดที่ระดับความลึกต่างๆกับขนาดของอุโมงค์, วิรัช (2544)

2.2 การสูญเสียมวลดินในการขุดเจาะ

2.2.1 การสูญเสียมวลดินและค่าการทรุดตัวมากที่สุดที่ผิวดิน

ในการก่อสร้างอุโมงค์ จะมีมวลดินส่วนหนึ่งที่สูญหายไปเนื่องจากการขุดเจาะ ซึ่งถูกพิจารณาในรูปของมวลดินที่สูญเสีย (Ground Loss หรือ Volume Loss, V_L) ซึ่งถูกนิยามดังนี้

$$V_L = V_S V_{ex} \tag{2.6}$$

เมื่อ V_S คือปริมาตรการทรุดตัวที่ผิวดินต่อหน่วยความยาว และ V_{ex} คือปริมาตรดินที่ถูกขุดออกจากอุโมงค์ต่อหนึ่งหน่วยความยาว โดยเราสามารถหา V_S ได้จาก

$$V_S = \int_{-x}^x S dx = \int_{-x}^x S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2l^2}\right) dx$$

$$V_S = \sqrt{2\pi} S_{\max} \approx 2.5 S_{\max}$$

และสำหรับอุโมงค์หน้าตัดกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง D ค่า V_L เขียนได้ดังนี้

$$V_L = \frac{4V_s}{\pi D^2}$$

ซึ่งเมื่อแทนค่า V_s และทำการจัดรูปใหม่ จะได้ความสัมพันธ์ในรูปของค่าการทรุดตัวสูงสุดที่ผิวดิน

$$S_{\max} = \frac{0.313 V_L D^2}{i}$$

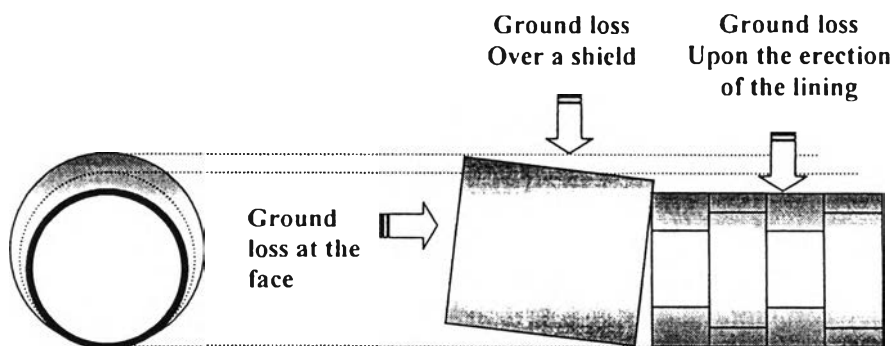
$$S_{\max} = \frac{0.313 V_L D^2}{KZ_0} \quad (2.7)$$

จะเห็นว่าค่า V_L , i , K นั้น เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ไม่ว่าจะเป็นประสิทธิภาพในการทำงาน ชนิดของหัวเจาะและเครื่องจักรที่ใช้ในการก่อสร้าง ลักษณะชั้นดินบริเวณที่ทำการก่อสร้าง จากการรวบรวมข้อมูลการขุดเจาะอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวหรือดินอ่อน O'Reilly & New(1982) พบว่าโดยทั่วไปค่า Ground Loss(V_L) มักจะมีค่าอยู่ในช่วง 1-4%

2.2.2 สาเหตุการสูญเสียมวลดินในระหว่างการขุดเจาะอุโมงค์

สาเหตุหลักของการทรุดตัวในการขุดเจาะอุโมงค์ มาจากการสูญเสียมวลดินในขั้นตอนการก่อสร้างโดยทั่วไป สาเหตุที่ทำให้เกิดการสูญเสียมวลดิน สามารถแบ่งเป็นสาเหตุต่างๆกันดังนี้

- 1) การสูญเสียมวลดินด้านหน้าหัวเจาะ
- 2) การสูญเสียมวลดินเหนือหัวเจาะ
- 3) การสูญเสียมวลดินเนื่องจากช่องว่างรอบอุโมงค์
- 4) การสูญเสียมวลดินเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอุโมงค์



รูปที่ 2.7 แสดงการสูญเสียมวลดิน เนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้หัวเจาะ

(Lee, K.M. et al.,1992)

2.2.2.1 การสูญเสียมวลดินที่ด้านหน้าหัวเจาะ (Ground Loss into Face)

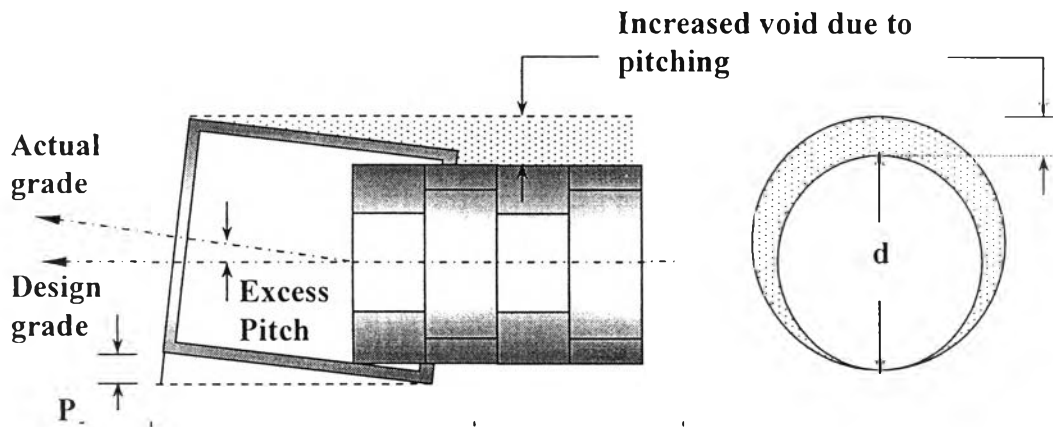
เกิดเนื่องจากดินไหลเข้าด้านหน้าของหัวเจาะเข้าไปในอุโมงค์ Ground Loss นี้จะเกิดขึ้นทันทีขณะที่เริ่มมีการขุดเจาะอุโมงค์ และเป็นการยากที่จะควบคุมการทะลักของดินเข้ามาเนื่องจากดินถูกเปลี่ยนสภาพให้เป็น plastic เพิ่มขึ้น เพื่อให้สามารถลำเลียงผ่าน Screw conveyor ได้ สำหรับ Ground Loss จากสาเหตุนี้สามารถแก้ไขให้ลดน้อยลงได้ โดยการควบคุมปริมาณการทะลักของดินให้น้อยที่สุดซึ่งทำได้โดยการปรับความเร็วของการขนถ่ายดินให้สัมพันธ์กับแรงดันดินหน้าหัวเจาะ และในการพิจารณาแรงดันดินหรือ stress ที่บริเวณด้านหน้าหัวเจาะนั้นทำได้ยากเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของ in situ stress ที่ด้านหัวเจาะซึ่งเป็นผลจากการขุดเอาดินที่ด้านหน้าหัวเจาะออก แต่ก็มีพอที่จะประมาณหาค่าได้จากสมการที่ 2.8 ซึ่งเป็นสมการที่เสนอไว้โดย Lee, K.M. et al., (1992)

$$P_o = (K_o \sigma_v + P_w) - P_f \quad (2.8)$$

- เมื่อ
- P_o = Total stress ที่ด้านหน้าหัวเจาะ
 - K_o = Effective coefficient of earth pressure at rest
 - σ_v = Vertical effective stress
 - P_w = Pore pressure at tunnel spring line
 - P_f = แรงดันที่ด้านหน้าหัวเจาะ (Face Pressure)

2.2.2.2 การสูญเสียมวลดินเหนือหัวเจาะ (Ground Loss Over Shield)

ค่าการสูญเสียมวลดิน (Ground Loss) ประเภทนี้เกิดจากการบังคับหัวเจาะขุดให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าตามเส้นทางที่ออกแบบไว้ โดยในขณะที่ขุด หัวเจาะได้เคลื่อนที่ต่างออกไปจากแนวเส้นทาง (Alignment) ที่ กำหนดไว้ เมื่อนำหัวเจาะกลับเข้าแนวเดิม ก็จะทำให้เกิดช่องว่างขึ้นระหว่างส่วนหน้าหัวเจาะกับด้านท้ายของหัวเจาะซึ่งเป็นเหตุให้เกิดการสูญเสียมวลดินขึ้น (Loss due to Overcutting and Yawing or Pitching) นอกจากนี้สาเหตุอีกประการที่ทำให้เกิดการสูญเสียมวลดินชนิดนี้ก็คือปัญหาทางด้านเทคนิคในการควบคุมหัวเจาะ เนื่องจากในทางปฏิบัตินั้น ผู้ควบคุมหัวเจาะจะควบคุมให้หัวเจาะขุดเจาะทำมุมเงยขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับแนวอุโมงค์ที่ออกแบบ เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงหัวเจาะจมลงเนื่องจากน้ำหนักของหัวเจาะเอง โดยมุมที่เพิ่มขึ้น (Excess pitch) ของการขุดเจาะจะทำให้เกิด Overcutting ของดินที่บริเวณตำแหน่งด้านบนของอุโมงค์ (Tunnel Crown)



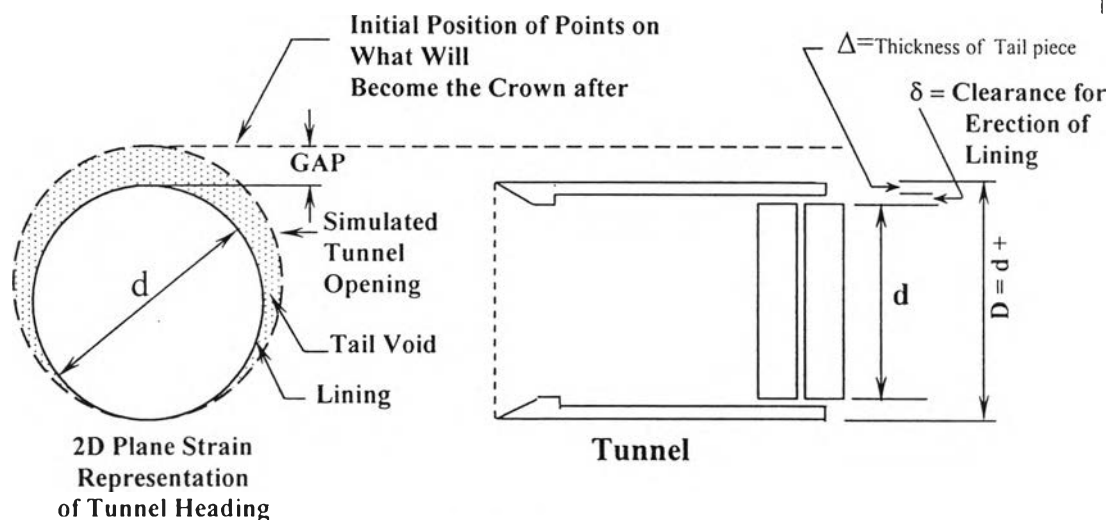
รูปที่ 2.8 แสดง Ground Loss ที่เกิดเหนืออุโมงค์เนื่องจากการ Overcutting และ Pitching

2.2.2.3 การสูญเสียมวลดินเนื่องจากช่องว่างรอบดาตอุโมงค์ (Ground Loss due to Tail Void Encroachment)

การสูญเสียชนิดนี้ จะมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับชนิดอื่นๆ โดยช่องว่างรอบอุโมงค์นั้น เกิดมาจากการที่หัวเจาะ (Shield) มีเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของอุโมงค์ ทำให้ภายหลังจากการติดตั้งชิ้นส่วนของดาตอุโมงค์และเคลื่อนหัวเจาะไปข้างหน้า บริเวณด้านหลังหัวเจาะปรากฏพื้นที่ว่างซึ่งใหญ่กว่าดาตอุโมงค์ขึ้นมวลดินรอบๆจะอยู่ในสภาวะลดแรง (Unloading) และเคลื่อนตัวมาบีบรัดชิ้นส่วนอุโมงค์ที่ติดตั้ง (Contraction) ทำให้เกิดการสูญเสียมวลดินขึ้น การสูญเสียมวลดินจากสาเหตุนี้จะเป็นส่วนที่มากที่สุดของการสูญเสียมวลดินทุกประเภท

ปัจจัยสำคัญที่เป็นสาเหตุของการสูญเสียมวลดินชนิดนี้ คือการที่ผนังอุโมงค์ (Segment) ไม่สามารถแทนที่พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดจากการขุดเจาะที่ด้านท้ายของหัวเจาะได้ในระหว่างการติดตั้งผนังอุโมงค์ เนื่องจากจะต้องมีระยะห่าง (Clearance) ระหว่างผนังด้านนอกของชิ้นส่วนผนังอุโมงค์กับขอบผนังด้านในของหัวเจาะเพื่อให้สามารถติดตั้งผนังอุโมงค์ได้ โดยเรียกช่องว่างหรือปริมาตรที่ไม่พอดีกันนี้ว่า Tail Voids จากการศึกษาวิจัยพบว่าขนาดของ Tail Voids เป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการหลุดตัวทั้งหมด

การลดการสูญเสียมวลดินเนื่องจากสาเหตุนี้ สามารถทำได้โดยการทดแทนปริมาตรที่หายไปของมวลดินด้านหลังหัวเจาะให้เร็วที่สุดโดยการอัดฉีดน้ำปูน (grouting) เพื่อลดการเคลื่อนตัวของมวลดินด้านหลังหัวเจาะ



รูปที่ 2.9 แสดง Ground Loss เนื่องจาก Tail Voids (Lee, K.M. et al., 1992)

2.2.2.4 การสูญเสียมวลดินเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอุโมงค์ (Ground Loss due to Deformation of Tunnel)

การสูญเสียชนิดนี้เกิดจากการที่ผนังอุโมงค์ได้รับแรงดันจากภายนอกซึ่งมาจากแรงดันของดิน (Earth Pressure) รอบๆ อุโมงค์ทำให้ผนังอุโมงค์เกิดการแอ่นตัวหรือเสียรูป(deformed)หลังจากการติดตั้ง ซึ่งทำให้ดินรอบๆ เกิดการเคลื่อนตัวได้ เป็นผลให้เกิดการสูญเสียมวลดิน อย่างไรก็ตามการสูญเสียชนิดนี้จะน้อยมากเมื่อเทียบกับ 3 สาเหตุข้างต้น

2.2.3 การประเมินคุณภาพการขุดเจาะด้วยร้อยละของการสูญเสียมวลดิน

ค่า Ground loss ที่คำนวณได้จากผลการตรวจวัดปริมาณการหลุดตัวของดินบริเวณแนวหน้าตัดทดสอบในระหว่างที่ทำการก่อสร้างอุโมงค์ นอกจากจะเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์การหลุดตัวของดินแล้ว ค่า Ground loss ยังเป็นตัวเลขที่บ่งบอกถึงคุณภาพของการขุดเจาะและก่อสร้างอุโมงค์ด้วย ซึ่งในงานขุดเจาะอุโมงค์โดยส่วนใหญ่จะมีการตรวจวัดการหลุดตัวเพื่อประเมินหาค่า Ground loss กันเป็นระยะๆ และใช้ค่า Ground loss ที่ได้เป็นค่าในการควบคุมคุณภาพของงานก่อสร้างอุโมงค์ โดยค่า Ground loss ที่มีค่ามากจะแสดงให้เห็นว่าการขุดเจาะอุโมงค์นั้นจะทำให้เกิดค่าการหลุดตัวมาก ซึ่งอาจจะเกิดจากประสิทธิภาพในการทำงานหรือวิธีการที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของหัวเจาะ ตลอดจนการก่อสร้างอุโมงค์ในช่วงนั้นอาจจะยังไม่เหมาะสมจำเป็นจะต้องมีการปรับปรุงและแก้ไข เพื่อให้ค่า Ground loss มีค่าน้อยลง โดยทั่วไป O'Reilly & New (1982) ได้แนะนำว่าสำหรับการขุดเจาะอุโมงค์ในชั้นดินเหนียวค่า Ground loss จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1-4 % และได้

แนะนำช่วงตัวเลขของค่า Ground loss ที่จะใช้ประเมินคุณภาพของการก่อสร้างอุโมงค์อย่างคร่าว ๆ ดังตารางที่ 2.1

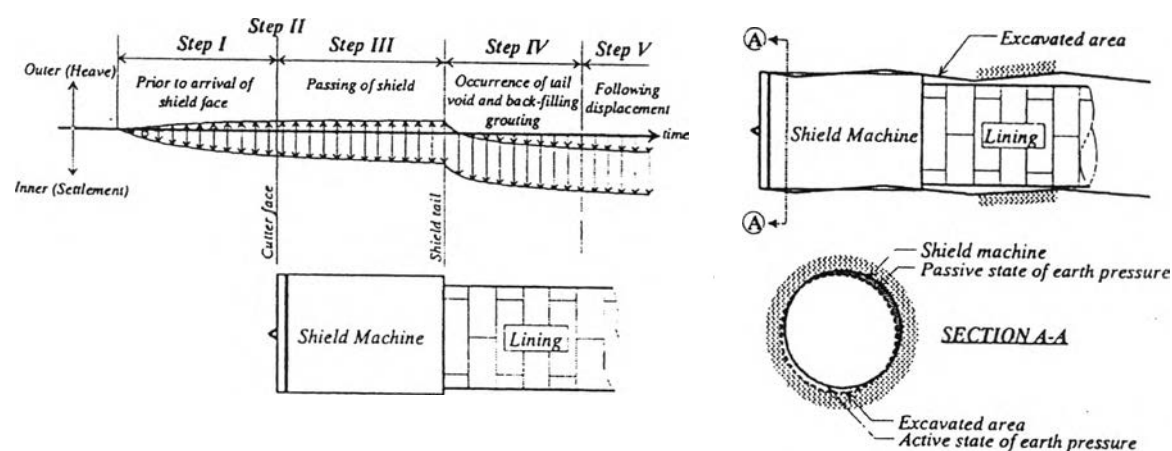
ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Ground Loss กับคุณภาพของการก่อสร้างอุโมงค์

Case	V_L (%)
Good practice in firm ground	0.5
Good practice in medium ground	1.5
Fair practice in Soft ground	2.5
Poor practice in Soft clay	4.0 or more...

สำหรับการศึกษาการสูญเสียมวลดินจากการเจาะอุโมงค์ในดินกรุงเทพฯ ชินวุฒิมิ(2543) พบว่า ค่าการสูญเสียมวลดิน(Groundloss) สำหรับการขุดเจาะอุโมงค์เดี่ยววางตัวในดินเหนียวแข็งชั้นแรกใน กรุงเทพฯ มีค่า 0.60-3.51% และ 2.39-3.57% สำหรับการขุดเจาะในชั้นทรายชั้นแรก ส่วนวิรัช(2544) วิเคราะห์การสูญเสียมวลดินจากโครงการอุโมงค์ผันน้ำคลองเปรมประชากร โดยอุโมงค์วางตัวในดินเหนียวแข็งชั้นแรก พบว่าการสูญเสียมวลดินมีค่าอยู่ในช่วง 1-3%

2.3 การทรุดตัวที่ช่วงเวลาต่างๆเนื่องจากหัวเจาะแบบแรงดันดินสมดุล EPB

Sramoon&Sugimoto(1999) แบ่งการทรุดตัวที่เกิดขึ้นตามช่วงเวลาที่เกิดการทรุดตัวเนื่องจากการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบแรงดันดินสมดุล(EPBS)ออกเป็น 4 ช่วงเวลา ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การทรุดตัวที่ผิวดิน ณ ช่วงเวลาต่างๆของการขุดเจาะอุโมงค์ด้วยหัวเจาะแบบแรงดันดินสมดุล, Sramoon&Sugimoto (1999)

1. Initial Settlement คือค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นก่อนที่หัวเจาะจะเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัด ซึ่งค่าทรุดตัวเริ่มแรกนี้อาจเป็นลักษณะของการทรุดตัวลงของดิน หรือการอูดขึ้น(Heave) ของดินก็ได้ ขึ้นกับคุณสมบัติของชั้นดินและการควบคุมหัวเจาะ

2. Shield Passing Settlement คือค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในขณะที่หัวเจาะกำลังเคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดที่พิจารณา โดยระยะที่เกิดขึ้นคือตั้งแต่เมื่อหัวเจาะเริ่มเคลื่อนผ่านแนวหน้าตัดจนพ้นแนวหน้าตัด หรือมีความยาวเท่ากับความยาวของหัวเจาะนั่นเอง

ค่าการทรุดตัวนี้เกิดจากการที่โครงสร้างดินถูกรบกวนระหว่างที่หัวเจาะเคลื่อนที่ผ่าน ดินรอบๆ หัวเจาะถูกรบกวนทำให้สูญเสียกำลังและโมดูลัสของดินมีค่าลดลง

3. Tail Settlement คือค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากบริเวณส่วนท้ายของหัวเจาะ ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากขั้นตอนการติดตั้งชั้นส่วนอุโมงค์ที่ต้องติดตั้งภายในหัวเจาะ ทำให้เมื่อหัวเจาะเคลื่อนผ่านไป แล้วเกิดช่องว่างระหว่างผนังด้านนอกของอุโมงค์กับมวลดินรอบนอก(Tail Voids) ดังนั้นมวลดินจะเกิดการเคลื่อนตัวมาแทนช่องว่างเป็นเหตุให้เกิดการทรุดตัวขึ้น

การลดการทรุดตัวเนื่องจาก Tail Settlement สามารถทำได้โดยการอัดฉีดน้ำปูนเข้าไปแทนมวลดินที่หายไปในขณะที่ตีหัวเจาะไปยังข้างหน้า

4. Long-term Settlement คือค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นหลังการอัดฉีดน้ำปูนเสร็จสิ้นแล้ว ดินที่ด้านท้ายหัวเจาะจะเกิด Stress Relaxation และเกิดการทรุดตัวลงเนื่องจากผลของโครงสร้างดินถูกรบกวน กำลังลดลง เกิดการทรุดตัวคายน้ำ(Consolidation)และการคืบ(Creep)ต่อมา ซึ่งใช้เวลานาน