



บทที่ 2

ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ

ในการก่อสร้างอุโมงค์องค์ประกอบทางโครงสร้างที่สำคัญของการก่อสร้าง คือ ดาดอุโมงค์ เนื่องจากดาดอุโมงค์มีหน้าที่ในการรับแรงภายนอกทั้งหมดที่กระทำต่อตัวอุโมงค์ทั้งขณะก่อสร้าง และระหว่างการใช้งานและยังเป็น Reaction frame ในการผลักดันหัวเจาะให้เคลื่อนไปข้างหน้า ประกอบกับเป็นตัวที่ป้องกันไม่ให้เกิดการรั่วซึม ทั้งจากน้ำใต้ดินหรือน้ำที่มาจากภายในอุโมงค์ การออกแบบดาดอุโมงค์ (Segmental Lining) สามารถออกแบบได้หลายวิธี แต่ละวิธีมีข้อจำกัดในการออกแบบที่แตกต่างกันเนื่องจากแต่ละวิธีตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ต่างกัน วิธีออกแบบดาดอุโมงค์สรุปได้ 3 วิธีหลักๆในการวิเคราะห์ดังนี้

1. วิธีอีลาสติก (Elastic Method)

วิธีนี้จะออกแบบโดยอาศัยทฤษฎีอีลาสติก (Elastic Theory) ซึ่งนิยมมากในยุโรปและอเมริกาโดยอาศัยพฤติกรรมการเสียรูปของอุโมงค์ (Deformation) ทั้งในแนว Spring line และ บริเวณ Crown ของอุโมงค์โดยเสนอในรูปแบบของ Empirical Approach เช่น Einstein Method , A.M. Muir Wood Method, Morgan Method เป็นต้น

2. วิธีประมาณ (Approximate Method)

วิธีนี้เป็นวิธีประมาณที่เสนอโดย Japan Sewage Association (2001) ซึ่งแยกการกระทำจากแรงภายนอกทั้งในแนวตั้งและแนวราบ ออกเป็น 5 ส่วน ซึ่งง่ายต่อการวิเคราะห์และออกแบบ

3. วิธีวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

วิธีการนี้เป็นการจำลองรูปแบบของการเจาะอุโมงค์และโครงสร้างโดยรอบอุโมงค์ให้ใกล้เคียงสภาพความเป็นจริงให้ได้มากที่สุด

ในการออกแบบ โปรแกรมนี้จะใช้การวิเคราะห์แบบ วิธีอีลาสติก ของ Einstein Method กับ A.M. Muir Wood Method และ วิธีประมาณของ JSCE Method

2.1 ข้อกำหนดหลักของการออกแบบตาดูโมงค์

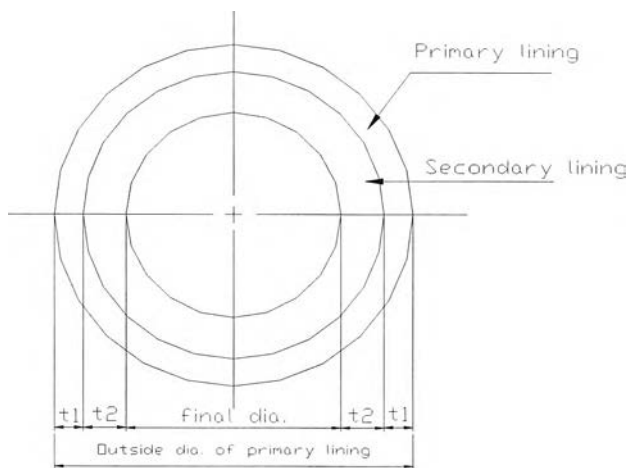
1. ต้องสามารถรับแรงภายนอกทั้งหมด (ทั้งในระหว่างการก่อสร้างและหลังจากการเริ่มใช้งาน ดูโมงค์ตามวัตถุประสงค์) ที่กระทำต่อตัวดูโมงค์ได้ในทันทีที่การติดตั้งสิ้นสุดลง
2. ต้องสามารถรับแรงในแนวแกนอันเกิดจากการผลักดันหัวเจาะไปทางด้านหน้าได้
3. ต้องเป็นวัสดุที่ทนต่อการสึกกร่อน และทนต่อสภาพแวดล้อมใต้ดินได้ดี วัสดุที่นิยมใช้ทำตาดูโมงค์ได้แก่ เหล็กหล่อ (Cast-Iron) และ คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforce concrete)

2.2 ประเภทของตาดูโมงค์

ตาดูโมงค์ที่ใช้กันในงานดูโมงค์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.2

1. Primary Lining เป็นตาดูโมงค์ส่วนที่ติดตั้งก่อนที่ส่วนหางของหัวเจาะ (Tail) จะเคลื่อนตัวออกไปมักประกอบด้วยชิ้นส่วนสำเร็จรูปหลายๆชิ้น (segment) นำมาประกอบเข้าด้วยกันภายในส่วนของหางของหัวเจาะโดยที่ตาดูโมงค์นี้เป็นโครงสร้างหลักในการรับแรงภายนอกที่กระทำต่อตัวดูโมงค์

2. Secondary Lining เป็นตาดูโมงค์ที่ติดตั้งหลังจากการที่การขุด และหัวเจาะได้ผ่านพ้นจุดดังกล่าวไปแล้วระยะหนึ่ง มีหน้าที่หลักในการเสริมความแข็งแรงให้กับ Primary Lining เช่น ช่วยให้การป้องกันการรั่วซึมของน้ำที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นตัวที่ช่วยในการตกแต่งผิวภายในของดูโมงค์ โดยทั่วไปแล้ว Secondary Lining มักไม่นำมาประกอบในการคำนวณออกแบบตาดูโมงค์



รูปที่ 2.1 หน้าตัดตาดูโมงค์

การออกแบบควดคู่อินทรีย์โดยทั่วไปจึงหมายถึงการออกแบบ Primary Lining ซึ่งประกอบไปด้วย segment หลายๆชิ้นประกอบเข้าด้วยกันในควดคู่อินทรีย์หนึ่งวงจะประกอบด้วย segment 3 ชนิดด้วยกัน กล่าวคือ

- Normal segment (N) เป็นชิ้นส่วนหลักของตัวควดคู่อินทรีย์ มีขนาดและรูปร่างเท่ากัน
- Key segment (K) เป็นชิ้นส่วนที่จะทำหน้าที่ค้ำให้ชิ้นส่วนอื่นๆ ที่ประกอบเป็นควดคู่อินทรีย์ คงรูปอยู่ได้(มีลักษณะการทำงานคล้ายลิ้ม)
- Adjoining segment (A) เป็นชิ้นส่วนที่มีมุมที่ขอบแตกต่างจากชิ้นส่วนอื่นๆ โดยชิ้นส่วนนี้จะวางประกบ Key segment อยู่เพื่อให้ง่ายต่อการค้ำ Key segment ทำได้ง่ายและมีประสิทธิภาพ

โดยทั่วไปแล้วในแต่ละวงของควดคู่อินทรีย์จะต้องประกอบด้วย Key segment 1 ชิ้น และ Adjoining segment 2 ชิ้น ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 หน้าตัดควดคู่อินทรีย์ประกอบของชิ้นส่วนควดคู่อินทรีย์ใน 1 วง

ความหนาของควดคู่อินทรีย์นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ และขนาดของควดคู่อินทรีย์ ขนาดโดยประมาณของ Segment ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความหนาโดยประมาณของควดคู่อินทรีย์ชนิดต่างๆตามขนาดของควดคู่อินทรีย์

Segment material	Segment type	$\Phi = 10 \text{ m}$	$\Phi = 7 \text{ m}$	$\Phi = 4 \text{ m}$
Reinforced Concrete segment	Box type	50-60 cm	30-40 cm	-
	Plate type	45-55 cm	30-35 cm	10-20 cm
Cast iron segment	Box type	35-40 cm	25-30 cm	10-20 cm

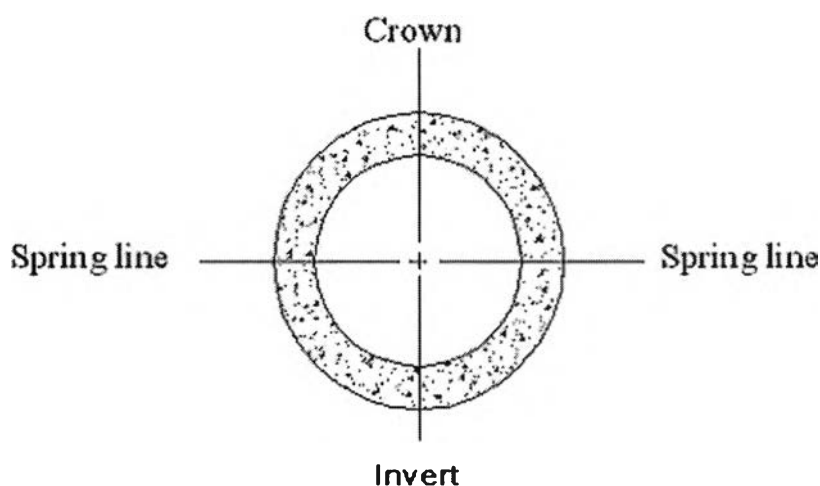
2.3 การกำหนดตำแหน่งรับแรงของอุโมงค์

ในการออกแบบบาดอุโมงค์จะพิจารณาบริเวณที่รับแรงมากที่สุดและบริเวณที่เกิดการเสียรูปมากที่สุด ซึ่งตำแหน่งของบาดอุโมงค์จะพิจารณาดำเนินการที่สำคัญดังนี้

1. Crown คือบริเวณส่วนบนสุดของอุโมงค์ดังแสดงในรูป 2.3 บริเวณดังกล่าวจะถือว่ารับแรงมากที่สุดจากดินด้านบนและ grouting ซึ่งในตำแหน่งนี้จะเกิด Active pressure และการเสียรูปมากที่สุดจะเกิดในลักษณะการยุบตัว

2. Spring line คือบริเวณด้านข้างของอุโมงค์ บริเวณดังกล่าวจะเกิด Passive pressure และจะเกิดการเสียรูปมากที่สุดในลักษณะขยายออกด้านข้าง และในการออกแบบโดยใช้ทฤษฎีอีลาสติกจะถือว่าตำแหน่งนี้จะเกิดแรงภายในมากที่สุดเท่ากับตำแหน่ง crown เนื่องจากเกิดการเสียรูปมากที่สุด

3. INVERT คือบริเวณส่วนล่างสุดของอุโมงค์ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่รับอิทธิพลโดยตรงจากแรงด้านบนสุดของอุโมงค์ (crown) และมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับ crown



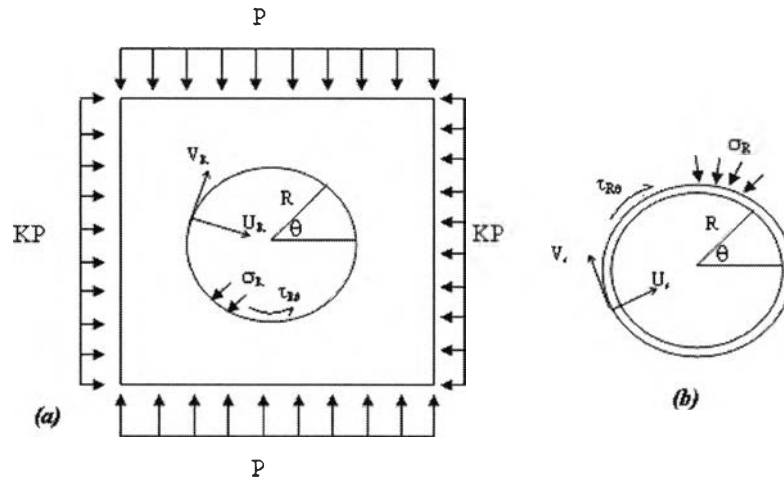
รูปที่ 2.3 ตำแหน่งอุโมงค์

2.4 การวิเคราะห์แรงภายในที่เกิดกับบาดอุโมงค์

2.4.1 Einstein Method

วิธีนี้จะใช้หลักการของ ทฤษฎีอีลาสติก ในการวิเคราะห์สามารถหาค่าแรงที่เกิดขึ้นภายในบาดอุโมงค์ได้โดยมีสมมุติฐานให้ดินรอบผนังอุโมงค์มีขอบเขตไม่จำกัด เป็นอีลาสติก(Elastic) เป็น

เนื้อเดียวกัน(Homogenous) และมีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง(Isotropic) ส่วนสมมุติฐานของ ดาดอุโมงค์ คือ อุโมงค์จะเป็นแบบผนังบาง และมีการเสียรูปได้เมื่อมีแรงมากระทำ (Flexibility Ring) และพิจารณาแรงในแนวตั้งที่จุดศูนย์กลางของอุโมงค์(P)และแรงในแนวราบเท่ากับแรงในแนวตั้งคูณกับส.ป.สแรงดันสถิตย(PK) ,ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงตำแหน่งทิศทางของแรงและการเสียรูปในวิธีของ Einstein

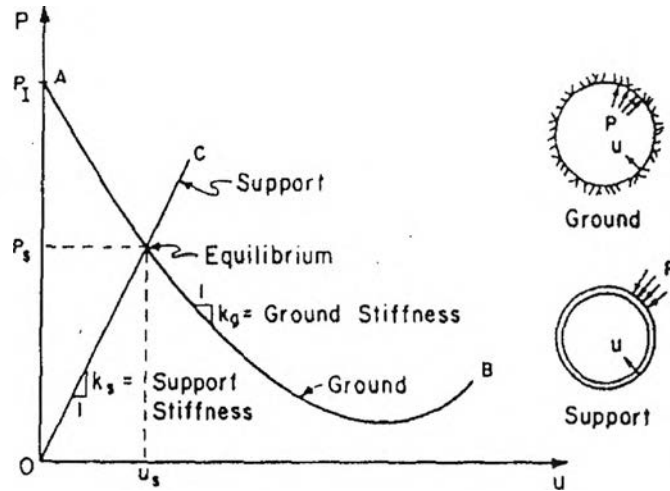
(a) ดิน ; (b) ดาดอุโมงค์

** V_{θ} = การเสียรูปของผนังอุโมงค์ตามแนวเส้นรอบวง

U_r = การเสียรูปของผนังอุโมงค์ตามแนวรัศมี

2.4.1.1 Stiffness ของความสัมพันธ์ระหว่าง ground-support

พฤติกรรมบางอย่างที่เกิดขึ้นกับดาดอุโมงค์ เช่น การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอุโมงค์ เป็นปัญหาจาก ground-support รอบๆดาดอุโมงค์ ซึ่งอิทธิพลของความเค้นในดินนั้น ส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอุโมงค์และการผิดรูปร่างของอุโมงค์ก็จะส่งผลถึงพฤติกรรมของดินโดยรอบด้วยเช่นกัน การหดตัวและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ support นั้นขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่าง stiffness ของ support-ground ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงลักษณะค่า stiffness ของ ground และ support

2.4.1.2 ผลกระทบของ stiffness ต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอุโมงค์พิจารณาได้ 2 รูปแบบ คือ

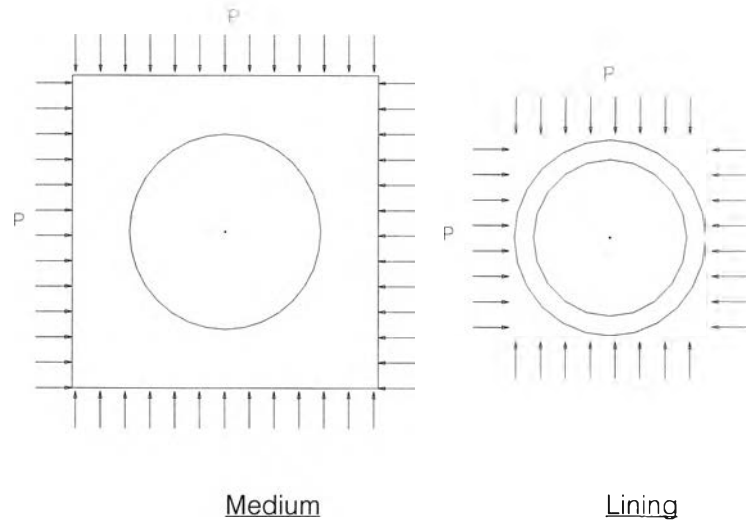
- พิจารณาจุดรองรับเป็นจุดรองรับยืดหยุ่น (Flexible) จะทำให้แรงในสนามที่เป็นแรงกระจายไม่สม่ำเสมอ (Nonuniform) เปลี่ยนไปเป็นแรงกระจายสม่ำเสมอ (Uniform) กระทำกับจุดรองรับและไม่เกิดโมเมนต์ดัด
- พิจารณาจุดรองรับเป็นจุดรองรับแข็งเกร็ง (Rigid) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและมีแรงกระทำแบบกระจายไม่สม่ำเสมอกับ (Support) จึงเกิดโมเมนต์ดัดขึ้น

สิ่งที่เพิ่มจากผลกระทบของความแข็งสัมพัทธ์ (relative stiffness) ซึ่งมีอิทธิพลสำคัญกับพฤติกรรมของ ground และ support คือการถ่ายผ่านของหน่วยแรงเฉือนบริเวณ ground-support interface ซึ่งแยกออกเป็น 2 เงื่อนไขใหญ่คือ Full-Slip (ไม่มีการถ่ายผ่านของหน่วยแรงเฉือน) และ No-Slip (ไม่มีการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเฉือน)

2.4.1.3 ความแข็ง (Stiffness) ระหว่างดาดอุโมงค์กับดินและสูตรในการหาแรงภายในดาดอุโมงค์

- Compressibility Ratio (C) : อัตราส่วนระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของดินและดาดอุโมงค์ภายใต้แรงกระทำสม่ำเสมอ โดยมีรูปร่างไม่เปลี่ยนแปลง คือยังเป็นรูปวงกลมไม่บิดเบี้ยว (แรงต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงอัดแต่เพียงอย่างเดียว)

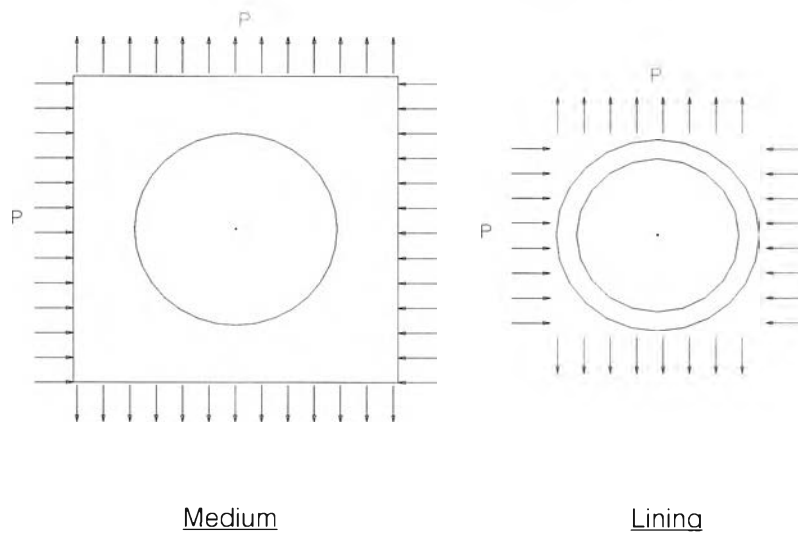
$$C \text{ (Compressibility Ratio)} = \frac{ER_c(1-\nu_s)^2}{E_s A_s(1-\nu)^2}$$



รูปที่ 2.6 แรงกระทำรอบดินและคาดอุโมงค์ที่เท่ากันทุกด้าน(ทิศทางของแรงสมมาตร)

- Flexibility Ratio (F) : อัตราส่วนระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของดินและคาดอุโมงค์ภายใต้แรงกระทำไม่สม่ำเสมอ โดยเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นรูปวงรี (แรงด้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงเฉือนแต่เพียงอย่างเดียว)

$$F \text{ (Flexibility Ratio)} = \frac{ER_c^3(1-\nu_s^2)}{E_s I_s (1-\nu^2)}$$



รูปที่ 2.7 แรงกระทำรอบดินและคาดอุโมงค์ที่เท่ากันทุกด้าน(ทิศทางของแรงไม่สมมาตร)

$$a_0 = \frac{CF(1-\nu)}{C+F+CF(1-\nu)}$$

$$a_2 = \frac{(F+6)(1-\nu)}{2F(1-\nu)+6(5-6\nu)}$$

$$\beta = \frac{(F+6)C(1-\nu)+2F\nu}{3F+3C+2CF(1-\nu)}$$

$$b_2 = \frac{C(1-\nu)}{2(C(1-\nu)+4\nu-6\beta-3\beta C(1-\nu))}$$

แรงภายในตาตุ่ม

1. Full -Slip $T = PR_c/2((1+K)(1-a_0)+(1+K)(1-2a_2)\cos 2\theta)$

$$M = PR_c^2/2(1-K)(1-2a_2)\cos 2\theta$$

2. No- Slip

$$T = PR_c/2((1+K)(1-a_0)+(1-K)(1+2a_2)\cos 2\theta)$$

$$M = PR_c^2/4(1-K)(1-2a_2+2b_2)\cos 2\theta$$

**หมายเหตุ : กรณี No-Slip ค่า $a_2 = \beta$

โดยที่

T = แรงตามแนวแกนของตาตุ่ม

M = โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในตาตุ่ม

P = แรงดันดินในแนวตั้งที่ Spring-line

K = สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง

E_s = โมดูลัสยืดหยุ่นของตาตุ่ม

E = โมดูลัสยืดหยุ่นของดิน

ν_s = Poisson's ratio ของตาตุ่ม

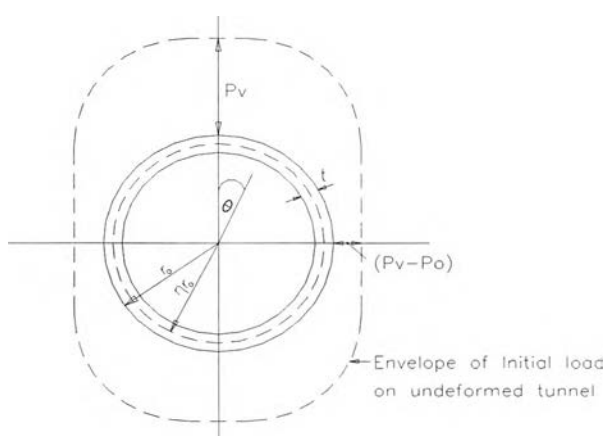
ν = Poisson's ratio ของดิน

R_c = รัศมีเฉลี่ยของตาดูโมงค์ (จากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์ ถึงกึ่งกลางความหนาของตาดูโมงค์)

θ = มุมรอบตาดูโมงค์(ทวนเข็มนาฬิกาจาก Spring line, องศา)

2.4.2 A.M. Muir Wood Method

วิธีนี้อาศัยสมมติฐานว่า เป็นอุโมงค์แบบวงกลม(Circular lining)เกิดการเปลี่ยนรูป (Deformation) ของตาดูโมงค์ เป็นรูปวงรีในดินที่มีสภาพแบบยืดหยุ่น (elastic ground) โดยไม่คำนึงถึงค่า Shear stress ระหว่าง Lining กับดิน สมมติให้อุโมงค์ถูกล้อมรอบด้วย Elastic ground แบบสมบูรณ์ การวิเคราะห์แบบยืดหยุ่น (elastic analysis) จะใช้ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นของ stress-strain ซึ่งจะมีค่า Factor เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยหลายค่า รวมถึงผลกระทบต่างๆ ที่จะมีขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามในการออกแบบตาดูโมงค์จะต้องพิจารณาถึงผลตอบแทนทางเศรษฐกิจด้วย และนำเอาประโยชน์ในเรื่องระดับการเปลี่ยนรูป แบบพลาสติกของดิน (degree of plastic deformation of the ground) ไปใช้ และมักจะใช้เรื่องของ time-dependent nature มาเป็น concept ร่วมด้วย เช่น อัตราส่วนของค่าความแข็งแรงของดินในการรับแรงอัดต่อค่าแรงกดตามแนวตั้ง (Vertical overburden pressure) อย่างน้อยเป็นสิ่งแสดงเพื่อประเมินในการตั้งสมมติฐานแบบเชิงเส้น ให้อยู่ภายใต้ค่าที่ยอมรับได้ภายในขอบเขตที่กำหนด ในการวิเคราะห์นี้ในลักษณะ 2 มิติ



รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงแรงกระทำเริ่มแรกที่กระทำบนอุโมงค์ก่อนการเสียรูป

พิจารณาแรงภายในที่เกิดขึ้นกับดาดอุโมงค์ตามผลกระทบของความเค้นที่ไม่เท่ากันทุกทิศทาง (Anisotropic stress), ความเค้นที่เท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic stress) และแรงดันน้ำ (Water pressure)

1. ผลกระทบของความเค้นที่เกิดขึ้นไม่เท่ากัน (Anisotropic stress)

$$T_1 = -r_0/2 \cdot (S_n + 2S_t)\cos 2\theta$$

$$M = r_0^2/6(2S_n + 2S_t)\cos 2\theta$$

$$S = -r_0/3 \cdot (2S_n + S_t)\sin 2\theta$$

2. ผลกระทบของความเค้นที่เกิดขึ้นเท่ากัน (Isotropic stress)

$$T_2 = \Delta P r_0$$

3. ผลกระทบของแรงดันน้ำ (Water pressure)

$$T_3 = P_w r_0$$

โดยที่

$$S_t = T_s = \frac{(1 + 2Q_2)P_0/2}{1 + Q_2 \frac{(3-2\nu)}{(3-4\nu)}} \quad \left. \vphantom{\frac{(1 + 2Q_2)P_0/2}{1 + Q_2 \frac{(3-2\nu)}{(3-4\nu)}}} \right\} \text{ใช้ค่าน้อยคำนวณ}$$

$$= C + \Delta P \tan \phi$$

$$S_n = \frac{3(3-4\nu)P_0/2 - [2Q_2 + (4-6\nu)]T_s}{4Q_2 + 5 - 6\nu}$$

$$Q_2 = \frac{E r_0^3}{E_s (1 + \nu) 12 I}$$

$$Q = Er_o / E_s(1+\nu)(r_o - r_i)$$

$$P_o = P_v - P_h$$

$$\bar{P} = \frac{P_v + P_h}{2}$$

$$\Delta P = \frac{\bar{P}}{1+Q}$$

$$T = T_1 + T_2 + T_3$$

*** T = แรงรวมตามแนวแกนของดาดอุโมงค์

M = โมเมนต์ดัดที่ดาดอุโมงค์

S = แรงเฉือนที่ดาดอุโมงค์

Q = อัตราส่วนการยุบอัดตัว(Compressibility Ratio)

Q₂ = อัตราส่วนยืดหยุ่น (Flexibility Ratio)

P_o = ค่าแรงดันส่วนเกินในแนวตั้ง/แนวราบเนื่องจาก Effect of anisotropic

stress

\bar{P} = แรงดันในแนวตั้งจากระหว่างดินและlining

ΔP = การเปลี่ยนแปลงแรงดันเนื่องจาก Effect of isotropic stress

P_v = แรงดันในแนวตั้งตามแนวแกนอุโมงค์จากผิวดินถึง crown

S_n = Factor ของแรงแนวแกน ,โมเมนต์และแรงเฉือน

S_t = Factor ของแรงแนวแกน ,โมเมนต์และแรงเฉือน

2.4.3 JSCE Method

วิธีนี้อาศัยสมมุติฐาน โดยพิจารณาแรงที่กระทำต่อตาดอุโมงค์ตามลักษณะสมดุลย์ของแรงภายนอกต่างๆ ที่มากระทำ ซึ่งแรงภายนอกที่กระทำต่อตาดอุโมงค์ที่จำเป็นต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบตาดอุโมงค์นั้นแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. Primary external force
 - 1.1 แรงดันดิน และ Surface surcharge
 - 1.2 แรงดันน้ำ
 - 1.3 น้ำหนักของตัวตาดอุโมงค์
 - 1.4 แรงต้านของมวลดินทั้งในแนวตั้งและแนวนอน (Vertical and lateral subgrade reaction)
2. Secondary external force
 - 2.1 แรงที่เกิดขึ้นจากการใช้งานอุโมงค์
 - 2.2 แรงตามแนวแกนเนื่องจากการผลักดันหัวเจาะ
3. Other external force

เช่น แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว เป็นต้น

โดยวิธีนี้จะนำแรงภายนอกแบบ Primary external force มาคำนวณดังนี้

1. Primary external force
 - 1.1 แรงดันดิน และ Surface surcharge (Q_0)

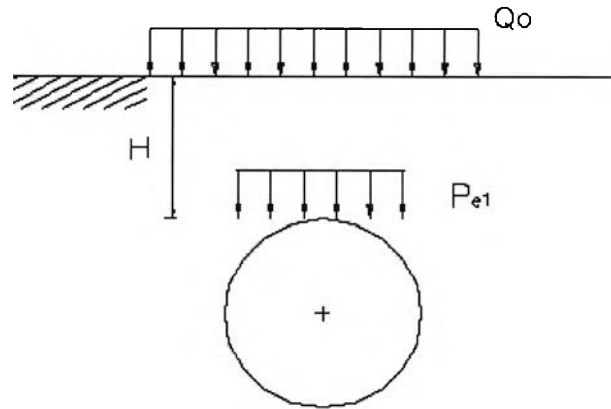
แรงดันดินทั้งในแนวนอนและแนวตั้งสามารถคำนวณได้ 2 วิธี ได้แก่วิธีรวมแรงดันดินและแรงดันน้ำเข้าด้วยกัน และวิธีที่สมมติให้แรงดันดินและแรงดันน้ำแยกกันกระทำ โดยวิธีแรกนั้นเหมาะสำหรับดินที่มีสัมประสิทธิ์การซึมน้ำต่ำ เช่นดินเหนียว โดยการคำนวณให้ใช้ค่าหน่วยน้ำหนักรวมมวลดินในการคำนวณ ในขณะที่วิธีหลังนิยมใช้กับดินทรายซึ่งมีสัมประสิทธิ์การซึมน้ำสูงโดยใช้ Effective unit weight เป็นค่าในการคำนวณ

1.1.1 แรงดันดินตามแนวตั้ง

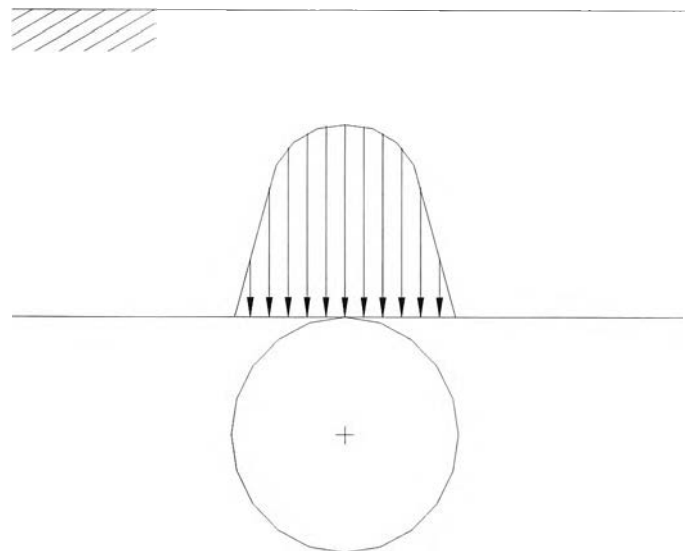
ในอุโมงค์ที่ระดับตื้น (shallow tunnel) มักจะมีน้ำหนักกดทับเหนือ crown ทั้งหมดเป็นค่าหน่วยแรงดันดินตามแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยที่ค่าแรงดันดินตามแนวตั้งสามารถคำนวณได้จาก

$$P_{e1} = \gamma_{av}H + Q_0$$

โดยที่ H คือระดับของ crown จากผิวดิน γ_{av} คือค่าเฉลี่ยของหน่วยน้ำหนักของดิน และ Q_0 คือ Surcharge ที่ผิวดิน



รูปที่ 2.9 แรงดันดินในแนวตั้ง (Vertical soil pressure)



รูปที่ 2.10 Arching effect on the vertical stress

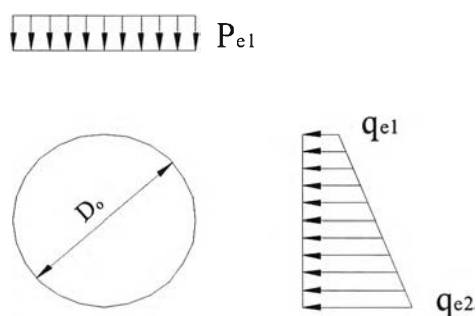
อย่างไรก็ดี ถ้าหากดินในบริเวณที่ทำการก่อสร้างประกอบด้วยดินทรายและระดับของอุโมงค์ค่อนข้างลึกจากผิวดิน แรงดันดินตามแนวตั้งที่กดทับลงบนอุโมงค์ จะเกิดในลักษณะที่เรียกว่า Arching ทำให้แรงดันดินที่อยู่ในบริเวณที่แรงกดเท่านั้นที่จะกดทับลงบนคานอุโมงค์(ดูรูป 2.10 ประกอบ)

1.1.2 แรงดันดินด้านข้าง

ค่าหน่วยแรงดันดินด้านข้างมีค่าเป็นสัดส่วนกับค่าหน่วยแรงดันดินตามแนวตั้ง ในชั้นแรกจำเป็นต้องประมาณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง (K) โดยที่ค่า K นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่นถ้าหากค่า Lateral subgrade reaction ของดินมีค่าสูง ค่า K จะมีค่าใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างแบบ active (K_a) ถ้า Lateral subgrade reaction มีค่าไม่สูงมากนัก K จะมีค่าใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างแบบสถิตย์ (K_0) ค่าโดยประมาณของ K มีดังแสดงในตารางที่ 2.2 ค่าหน่วยแรงดันดินด้านข้างจะมีการกระจายเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูดังรูปที่ 2.11 โดยค่าหน่วยแรงสามารถคำนวณได้จาก $q_{e1} = K p_{e1}$: $q_{e2} = q_{e1} + K \gamma_{av} D_o$ โดยที่ค่า D_o คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของอุโมงค์

ตารางที่ 2.2 ค่าโดยประมาณของ K

Type of soil	K
Dense sand	0.45 – 0.55
Stiff clay	
Medium clay	
Loose sand	0.50 - 0.60
Soft clay	0.55 - 0.65
Very soft clay	0.65 - 0.75

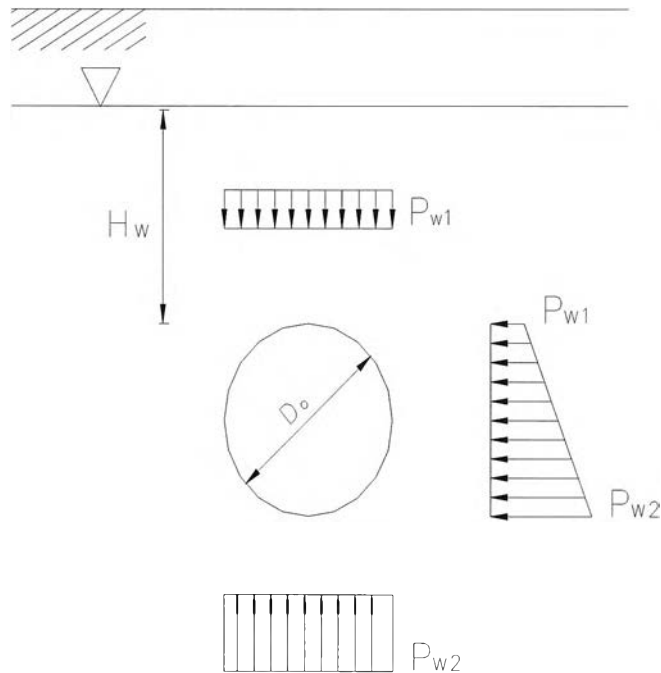


รูปที่ 2.11 แรงดันดินด้านข้าง (Lateral earth pressure)

1.2 แรงดันน้ำ

แรงดันน้ำที่กระทำต่ออุโมงค์นั้นคำนวณโดยอาศัยแรงดันน้ำสถิตย ซึ่งการกระจายของหน่วยแรงดันน้ำนั้นเป็นไปดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยที่ค่าแรงดันน้ำสามารถคำนวณได้จาก

$$p_{w1} = \gamma_w H_w \quad ; \quad p_{w2} = p_{w1} + \gamma_w D_o$$



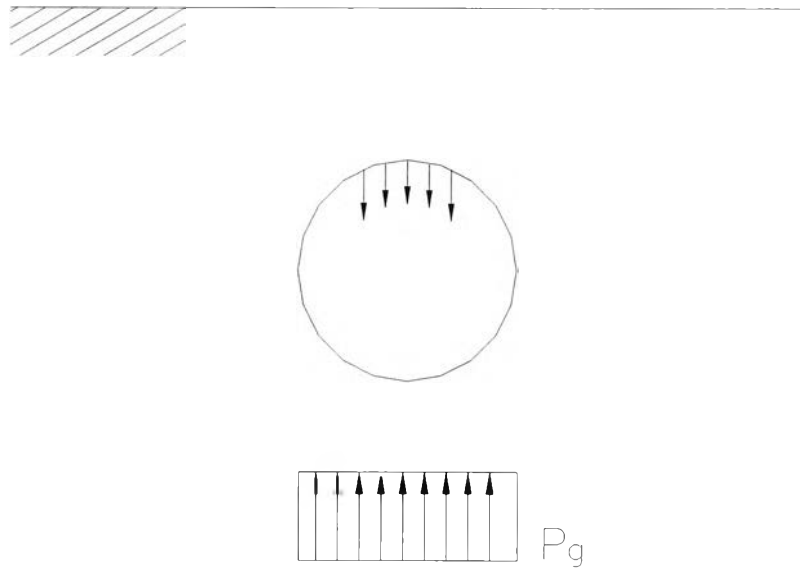
รูปที่ 2.12 การกระจายของแรงดันน้ำ

1.3 แรงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของตัวอุโมงค์

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ Invert ของอุโมงค์เนื่องจากน้ำหนักของตัวอุโมงค์เองแสดงใน รูปที่ 2.13 โดยที่สามารถคำนวณได้จาก

$$P_g = \pi g \quad ; \quad g = W/(\pi D_o)$$

โดยที่ g คือหน่วยน้ำหนักของ segment ring ซึ่งสามารถคำนวณได้จากน้ำหนักของ segment ring ต่อหน่วยความยาว (W ; t/m) ดังแสดงในสูตรข้างต้น



รูปที่ 2.13 การกระจายแรงดันเนื่องจากน้ำหนักดาดูโมงค์

1.4 แรงต้านของมวลดิน (Subgrade reaction)

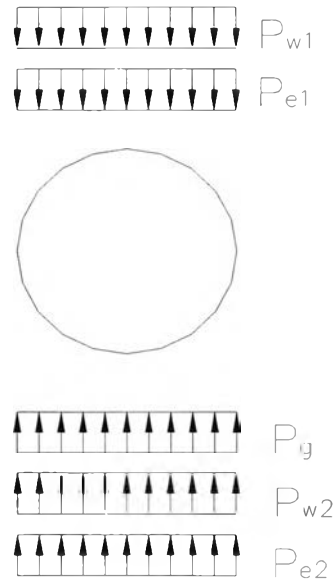
เมื่อแรงภายนอกเริ่มกระทำต่อดาดูโมงค์ ดาดาดูโมงค์จะเกิดการเคลื่อนตัวทั้งในแนวราบและแนวตั้ง Deformation ของดาดาดูโมงค์นี้เองที่ก่อให้เกิดแรงต้านทานจากมวลดินกระทำต่อดาดาดูโมงค์ (Subgrade reaction) โดยจะเห็นได้ว่า Subgrade reaction สามารถจำแนกออกเป็น 2 ส่วน ด้วยกันคือ Vertical and Lateral Subgrade reaction.

1.4.1 แรงต้านมวลดินแนวตั้ง (Vertical Subgrade reaction.)

Vertical Subgrade reaction สามารถคำนวณได้จากสมมูลของหน่วยแรงตามแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ได้ดังนี้

$$P_{e2} = P_{w1} + P_{e1} - P_{w2} - P_g$$

โดยที่ค่า P_{e2} คือ ค่าของหน่วยแรงของ Vertical subgrade reaction แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติมักให้ค่าหน่วยแรง P_{e2} มีค่าเท่ากับค่าหน่วยแรง P_{e1}



รูปที่ 2.14 แรงดันด้านของมวลดินในแนวตั้ง (Vertical subgrade reaction)

1.4 .2 แรงด้านมวลดินแนวราบ (Lateral subgrade reaction)

ค่าการกระจายตัวของหน่วยแรง Lateral subgrade reaction คำนวณโดยอาศัยค่าการเคลื่อนตัวของ Spring line (δ) โดยสมมติให้หน่วยแรงเริ่มมีค่าตั้งแต่ $-(\pi/4) \leq \theta \leq (\pi/4)$ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 การกระจายตัวของหน่วยแรง Lateral subgrade reaction สามารถคำนวณได้โดย

$$q_R = k\delta(1 - (\sin\theta/\sin\beta))$$

โดยที่ k ค่าสัมประสิทธิ์ของ Lateral subgrade reaction ($\text{kg/cm}^3/\text{cm}$) β มีค่าเท่ากับ $\pi/4$ และ δ คือค่าการเคลื่อนตัวของ Spring line ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\delta = P/Q$$

$$P = R^4(2p - q + \pi g)$$

$$Q = 24(\eta EI + 0.0454 k R_c^4)$$

$$p = p_{e1} + p_{w1}$$

$$q = q_{e1} + q_{e2} + q_{w1} + q_{w2}$$

E = Elasticity of segment ring

η = joint stiffness reduction factor

$$= (4/N)^2 ; N \text{ คือ จำนวนชั้นของ segment}$$

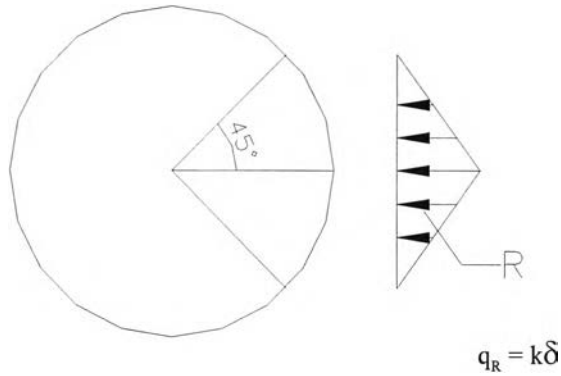
R_c = รัศมีเฉลี่ยของดาตอูโมงค์

$I =$ Mass moment of inertia of segment ring (Full $I = bt^3/12$, $\eta = 1$)

โดยที่:

b คือ ความกว้างของ segment

t คือ ความหนาของ segment



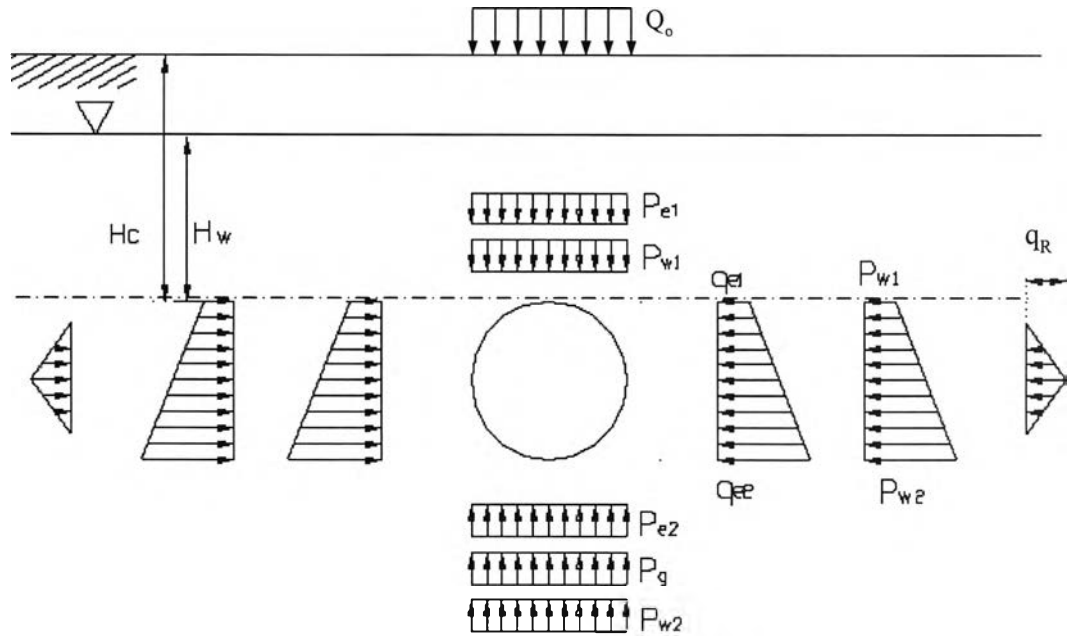
รูปที่ 2.15 แรงดันด้านของมวลดินในแนวราบ(Lateral subgrade reaction)

ค่าสัมประสิทธิ์ k นั้นสามารถคำนวณได้ตามชนิดของดินในบริเวณที่ทำการก่อสร้างดังแสดงในตารางที่ 2.3 ข้อควรสังเกตคือใน Very soft clay ค่าสัมประสิทธิ์ k มีค่าเป็น ศูนย์ กล่าวคือดินไม่สามารถต้านทานการเคลื่อนตัวตามแนวราบของอุโมงค์ได้

ตารางที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ k โดยประมาณ

Type of soil	k (kg/cm ² /cm)
Very dense sand	3.0 – 5.0
Very stiff clay	
Dense sand	1.0 – 3.0
Stiff clay	
Medium clay	0.5 – 1.0
Loose sand	0 – 1.0
Soft clay	0 – 0.5
Very soft clay	0

แรงภายนอกทั้งหมดที่กระทำต่อตัวอุโมงค์สามารถสรุปได้ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แรงภายนอกทั้งหมดที่กระทำต่อตัวอุโมงค์

2.4.3.1 แรงดัด แรงตามแนวแกน และแรงเฉือน ที่ใช้ในการคำนวณหน้าตัดของดาดอุโมงค์

ความยุ่งยากในการคำนวณหน่วยที่เกิดขึ้นบนดาดอุโมงค์นั้นเกิดขึ้นเนื่องจากการกระจายตัวของแรงภายนอกที่มากระทำค่อนข้างยุ่งยากจำเป็นต้องคิดผลของหน่วยแรงภายนอกแต่ละส่วนแล้วจึงนำผลทั้งหมดมารวมกันเป็นแรงภายในทั้งหมดที่เกิดขึ้นในตัวดาดอุโมงค์เนื่องจากแรงภายนอกแต่ละชนิดสามารถคำนวณได้โดยอาศัยค่าประมาณที่ให้ไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงสูตรที่ใช้ในการคำนวณแรงภายในที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงภายนอกโดยวิธี JSCE

Stress	Bending Moment	Axial Force	Shear Force
1. Vertical stress ($p_{e1}+p_{w1}$)	$0 \leq \theta \leq \pi$ $M = \frac{1}{4} (1-2\sin^2\theta)$ $(p_{e1}+p_{w1})R_c^2$	$0 \leq \theta \leq \pi$ $T = (p_{e1}+p_{w1})R_c \sin^2\theta$	$0 \leq \theta \leq \pi$ $S = -(p_{e1}+p_{w1})R_c \sin\theta \cos\theta$
2. Horizontal Stress ($q_{e1}+q_{w1}$)	$0 \leq \theta \leq \pi$ $M = \frac{1}{4} (1-2\cos^2\theta)$ $(q_{e1}+q_{w1})R_c^2$	$0 \leq \theta \leq \pi$ $T = (q_{e1}+q_{w1})R_c \cos^2\theta$	$0 \leq \theta \leq \pi$ $S = (q_{e1}+q_{w1})R_c \sin\theta \cos\theta$
3. Triangular Loading ($q_{e2}+q_{w2}-q_{e1}-q_{w1}$)	$0 \leq \theta \leq \pi$ $M = 1/48 (6-3\cos\theta - 12\cos^2\theta+4\cos^3\theta)(q_{e2}+q_{w2}-q_{e1}-q_{w1})R_c^2$	$0 \leq \theta \leq \pi$ $T = 1/16(\cos\theta+8\cos^2\theta-4\cos^3\theta)(q_{e2}+q_{w2}-q_{e1}-q_{w1})R_c$	$0 \leq \theta \leq \pi$ $S = 1/16 (\sin\theta+8\sin\theta\cos\theta-4\sin\theta\cos^2\theta)(q_{e2}+q_{w2}-q_{e1}-q_{w1})R_c$
4. Subgrade reaction $q_R = k\delta$	$0 \leq \theta \leq \pi/4$ $M = (0.2346 - 0.3536\cos\theta)k\delta R_c^2$ $\pi/4 \leq \theta \leq \pi/2$ $M = (-0.3487+0.5\sin^2\theta+0.2357 \cos^3\theta)k\delta R_c^2$	$0 \leq \theta \leq \pi/4$ $T = 0.3536\cos\theta k\delta R_c$ $\pi/4 \leq \theta \leq \pi/2$ $T = (-0.7071 \cos\theta + \cos^2\theta - 0.7071\sin^2\theta \cos\theta) k\delta R_c$	$0 \leq \theta \leq \pi/4$ $S = 0.3536\cos\theta k\delta R_c$ $\pi/4 \leq \theta \leq \pi/2$ $S = (\sin\theta\cos\theta - 0.07071\cos^2\theta\sin\theta) k\delta R_c$
5. Selt weight $P_g = \pi g$ $g = w / \pi D$	$0 \leq \theta \leq \pi/2$ $M = (3/8\pi - \theta\sin\theta - 5/6 \cos\theta) gR_c^2$ $\pi/2 \leq \theta \leq \pi$ $M = (-1/8 \pi + (\pi-\theta)\sin\theta - 5/6 \cos\theta - 1/2\pi \sin^2\theta) gR_c^2$	$0 \leq \theta \leq \pi/2$ $T = (\theta\sin\theta - 1/6 \cos\theta) gR_c$ $\pi/2 \leq \theta \leq \pi$ $T = (-\pi\sin\theta+\theta\sin\theta - \pi\sin^2\theta-1/6\cos\theta) gR_c$	$0 \leq \theta \leq \pi/2$ $S = -(\theta\cos\theta+1/6\sin\theta) gR_c$ $\pi/2 \leq \theta \leq \pi$ $S = [(\pi-\theta)\cos\theta - \pi\sin\theta\cos\theta - 1/6\sin\theta] gR_c$

2.5 ผลของการเหลื่อมกันของดาดูโมงค์(Effect of staggered of segment)

กรณีดาดูโมงค์ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนหลายชิ้นเข้าด้วยกัน ค่าความแข็งแรงบริเวณรอยต่อจะมีแรงลดลงโดยเฉพาะโมเมนต์ดัดที่เกิดกับดาดูโมงค์จะถูกถ่ายผ่าน Segment Bolt ใน ring เดียวกันและเกิดโมเมนต์ที่เพิ่มขึ้น(ΔM)เนื่องจากการเหลื่อมกันของดาดูโมงค์ของแต่ละ ring ดังภาพที่ 2.17 ดังนั้นต้องคำนวณค่าโมเมนต์ใหม่เพื่อใช้ในการออกแบบดาดูโมงค์ ซึ่งพิจารณาเฉพาะบริเวณที่วิกฤตที่สุด คือเกิดโมเมนต์ดัดมากที่สุด(Max. Bending Moment)

$$M_0 = \text{Max. Bending moment using reduced } I$$

$$M_1 = \text{Max. Bending moment using full } I$$

$$M_2 = \text{โมเมนต์ที่ถ่ายผ่าน Segment Bolt เนื่องจากการทำ Staggered}$$

$$= 2M_0 - M_1$$

$$\Delta M = M_1 - M_2$$

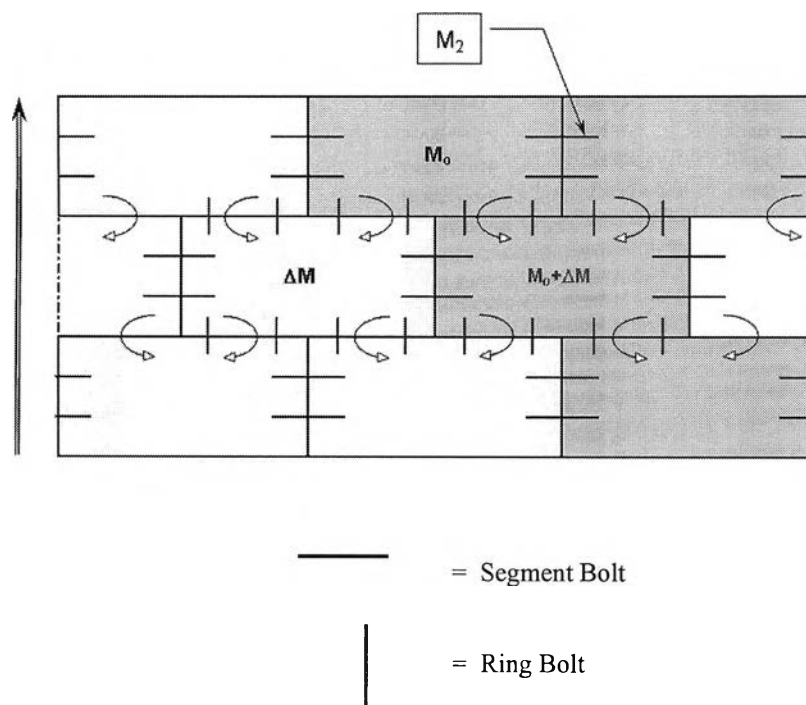
$$M = \text{โมเมนต์ดัดจากการคิดผลของการเหลื่อมกันของดาดูโมงค์}$$

$$= \Delta M + M_0$$

โดยที่ :

$$\text{full } I = I_0 = \text{Moment of inertia (Ring = full-ring , } \eta = 1)$$

$$\text{reduce } I = I = \text{Moment of inertia (Segment = reduce-ring , } \eta < 1)$$



รูปที่ 2.17 โมเมนต์ที่เพิ่มขึ้น(ΔM)เนื่องจากการเสียดกันของดาดอุโมงค์ของแต่ละวง