

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการก่อสร้างอุโมงค์องค์ประกอบทางโครงสร้างที่สำคัญของการก่อสร้าง คือ ดาดอุโมงค์ เนื่องจากดาดอุโมงค์มีหน้าที่ในการรับแรงภายนอกทั้งหมดที่กระทำต่อตัวอุโมงค์ ทั้งขณะก่อสร้าง และระหว่างการใช้งานอีกทั้งยังเป็น Reaction frame ในการผลักดันหัวเจาะให้เคลื่อนไปข้างหน้า ประกอบกับเป็นตัวที่ป้องกันไม่ให้เกิดการรั่วซึม ทั้งจากน้ำใต้ดินหรือน้ำที่มาจากภายในอุโมงค์ การออกแบบดาดอุโมงค์ (Segmental Lining) สามารถออกแบบได้หลายวิธี แต่ละวิธีมีข้อจำกัด ในการออกแบบที่แตกต่างกันเนื่องจากแต่ละวิธีตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ต่างกัน วิธีออกแบบดาดอุโมงค์สรุปได้ 2 วิธีหลักๆในการวิเคราะห์ดังนี้

1. วิธี Empirical

คือการวิเคราะห์โดยอาศัยทฤษฎีอีลาสติก (Elastic Theory) ร่วมกับการเสีรูปร่างของอุโมงค์ ทั้งในแนว Spring line และบริเวณ Crown ของอุโมงค์อันได้แก่กลุ่ม Einstein Method , A.M. Muir Wood Method, Morgan Method และอีกวิธีหนึ่งคือ Approximate Method (Japanese Standard) วิธีนี้เป็นวิธีประมาณซึ่งแยกการกระทำจากแรงภายนอกทั้งในแนวตั้งและแนวราบ ออกเป็น 5 ส่วน ซึ่งง่ายต่อการวิเคราะห์และออกแบบ

2. วิธี Numerical

โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (FEM) โดยจำลองลักษณะของชั้นดินและดาดอุโมงค์ตลอดจนการเจาะอุโมงค์ให้ใกล้เคียงสภาพความเป็นจริงให้ได้มากที่สุด ซึ่งในความเป็นจริงแล้วในการก่อสร้างอุโมงค์มีขั้นตอนที่สำคัญ คือการประกอบชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ (Segment) โดย segment เหล่านี้จะเป็นชิ้นส่วนคอนกรีตหล่อสำเร็จ เมื่อดำเนินการขุดเจาะมีพื้นที่ด้านกลางหัวเจาะเพียงพอสำหรับติดตั้งชิ้นส่วนผนังอุโมงค์แล้ว Segment Crane จะยก segment ที่ละชิ้น จาก Segment Car มาวางบริเวณแล้วอุปกรณ์จับยึด segment ทั่วๆไปเรียกว่า Erector สำหรับจับยึด จะประกอบ segment ที่ละชิ้นจากด้านล่าง (Invert) สู่อด้านบน (Crown) จนเป็นผนังวงกลม แล้วทำการยึดชิ้นส่วนแต่ละชิ้นด้วยสลักเกลียวรูปตัวยู (Curve Bolt) ทั้งในแนวรอบวงและในแนว ยาวตาม เส้นทางอุโมงค์ โดยที่รอยต่อ (Joint) นี้เป็น

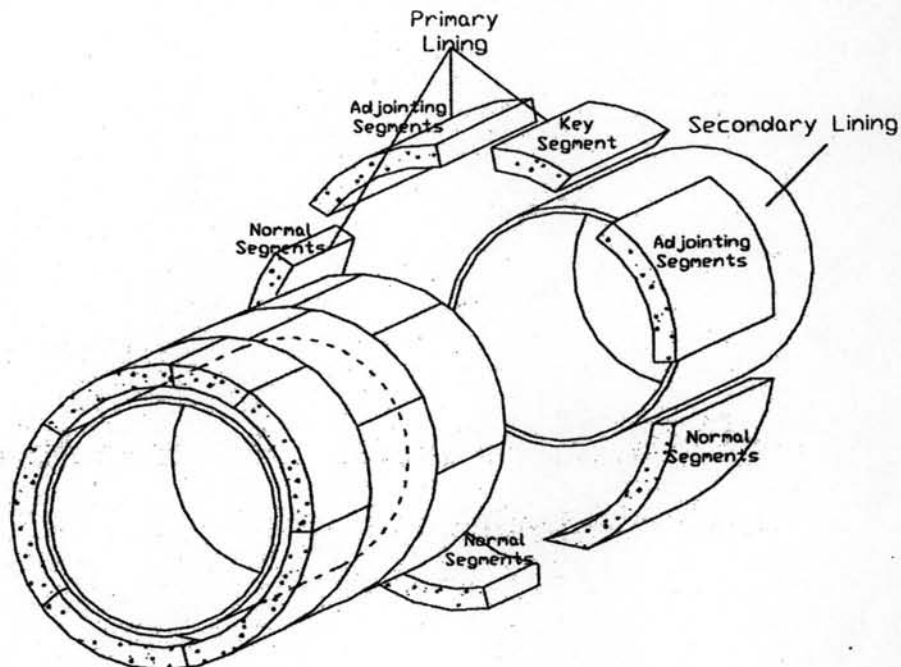
จุดสำคัญจุดหนึ่งที่จะต้องคำนึงถึงทั้งในการออกแบบ และก่อสร้างเนื่องจากเป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนผนังอุโมงค์และระหว่างอุโมงค์แต่ละวง

2.1 ประเภทของตาดอุโมงค์

ตาดอุโมงค์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 2.1 คือ

1. Primary Lining เป็นตาดอุโมงค์ส่วนที่ติดตั้งก่อนที่ส่วนหางของหัวเจาะ (Tail) จะเคลื่อนตัวออกไปมักประกอบด้วยชิ้นส่วนสำเร็จรูปหลายๆชิ้น(segment)นำมาประกอบเข้าด้วยกัน และเมื่อประกอบกันเป็นวงแล้วจะทำหน้าที่เป็น Reaction frame ในการผลักดันหัวเจาะไปด้านหน้าตามทิศทางที่กำหนด ตาดอุโมงค์จะทำหน้าที่รับแรงทั้งหมดที่กระทำต่ออุโมงค์และป้องกันน้ำใต้ดิน

2. Secondary Lining โดยทั่วไปจะเป็นท่อเหล็ก จะติดตั้งหลังจากทำการติดตั้ง Primary Lining เรียบร้อยแล้วมีหน้าที่หลักในการเสริมความแข็งแรงให้กับ Primary Lining และใช้ประโยชน์ในการป้องกันการกัดกร่อน และช่วยให้การป้องกันการรั่วซึมของน้ำมีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น ท่อส่งน้ำ ในทางปฏิบัติจะไม่นำมาประกอบในการคำนวณออกแบบตาดอุโมงค์เนื่องจากการติดตั้ง Secondary Lining จะติดตั้งเมื่อ Primary Lining เสร็จทั้งโครงสร้างแล้ว ซึ่งหมายถึงแรงกระทำจากดินได้เข้าสู่ Primary Lining จนหมดแล้ว



รูปที่ 2.1 Primary Lining และ Secondary Lining

การออกแบบดาดอุโมงค์โดยทั่วไปจึงหมายถึงการออกแบบ Primary Lining ซึ่งประกอบไปด้วย segment หลายๆชิ้นประกอบเข้าด้วยกันในดาดอุโมงค์หนึ่งวงจะประกอบด้วย segment 3 ชนิดด้วยกัน กล่าวคือ

- Normal segment (N) เป็นชิ้นส่วนหลักของตัวดาดอุโมงค์ มีขนาดและรูปร่างเท่ากัน
- Key segment (K) เป็นชิ้นส่วนที่จะทำหน้าที่ดันให้ชิ้นส่วนอื่นๆ ที่ประกอบเป็นดาดอุโมงค์คงรูปอยู่ได้ (มีลักษณะการทำงานคล้ายลิ่ม)
- Adjoining segment (A) เป็นชิ้นส่วนที่มีมุมที่ขอบแตกต่างจากชิ้นส่วนอื่นๆโดยชิ้นส่วนนี้จะวางประกบ Key segment อยู่เพื่อให้การดัน Key segment ทำได้ง่ายและมีประสิทธิภาพ

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



รูปที่ 2.2 หน้าตัดองค์ประกอบของชิ้นส่วนดาดอุโมงค์ใน 1 วง

ความหนาของดาดอุโมงค์ นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้และขนาดของอุโมงค์ขนาด โดยประมาณของ Segment ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความหนาโดยประมาณของตาดอุโมงค์ชนิดต่างๆตามขนาดของอุโมงค์

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

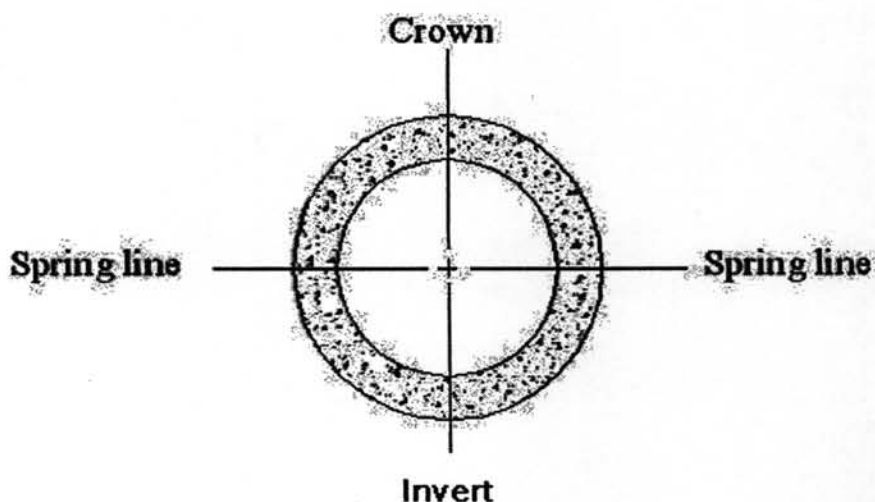
2.2 การกำหนดตำแหน่งรับแรงของอุโมงค์

ในการออกแบบตาดอุโมงค์จะพิจารณาบริเวณที่รับแรงมากที่สุดและบริเวณที่เกิดการเสียรูปมากที่สุดซึ่งตำแหน่งของตาดอุโมงค์จะพิจารณาตำแหน่งที่สำคัญดังนี้

Crown คือบริเวณส่วนบนสุดของอุโมงค์ดังแสดงในรูป 2.3 บริเวณดังกล่าวจะถือว่ารับแรงมากที่สุดจากดินด้านบนและ grouting ซึ่งในตำแหน่งนี้จะเกิด Active pressure และการเสียรูปมากที่สุดจะเกิดในลักษณะการยุบตัว

Spring line คือบริเวณด้านข้างของอุโมงค์ บริเวณดังกล่าวจะเกิด Passive pressure และจะเกิดการเสียรูปมากที่สุดในลักษณะขยายออกด้านข้าง และในการออกแบบโดยใช้ ทฤษฎีอีลาสติกจะถือว่าตำแหน่งนี้จะเกิดแรงภายในมากที่สุดเท่ากับตำแหน่ง crown เนื่องจากเกิดการเสียรูปมากที่สุด

Invert คือบริเวณส่วนล่างสุดของอุโมงค์ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่รับอิทธิพลโดยตรงจากแรงด้านบนสุดของอุโมงค์ (crown) และมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับ crown



รูปที่ 2.3 ตำแหน่งอุโมงค์

2.3 พฤติกรรมของ Flexible Ring

ดาตอูโมงค์ในงานก่อสร้างอูโมงค์จะออกแบบเป็น Elastic Ring ซึ่งสามารถเสียรูปได้ และในการเสียรูปของวงอูโมงค์ จะมีลักษณะแตกต่างกันตามคุณสมบัติของอูโมงค์และลักษณะแรงที่กระทำต่ออูโมงค์ดังนี้

2.3.1 Unconfined Ring

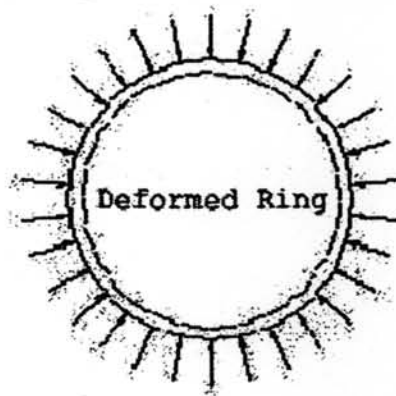
ในกรณีที่มีหน่วยแรงอัดกระทำต่ออูโมงค์คงที่ (Uniform Compression Stress) และความหนาของวงอูโมงค์เพียงพอจะเกิดการเสียรูปของอูโมงค์ในลักษณะ การหดตัวเล็กน้อยตามแนวรัศมี ดังมีแสดงในรูป 2.4 แต่ในกรณีแรงที่กระทำไม่คงที่ (Concentrated Loads) กระทำที่ Crown และ Invert จะทำให้เกิดการเสียรูปในลักษณะที่มีการโป่งออกที่ Spring line ซึ่งการเสียรูปจะมากกว่ากรณีที่เกิดแรงกระทำแบบแรงอัดคงที่ (Uniform Compression Stress) ดังแสดงในรูปที่ 2.5

2.3.2 Partially Confined Ring

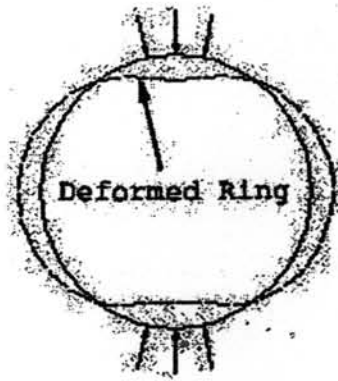
ลักษณะการเสียรูปจะเป็นไปตามรูปที่ 2.6 ซึ่งจะเกิดแรงกระทำที่ Crown และ Invert เป็น Active pressure และ Passive pressure ตามลำดับโดยลักษณะการเสียรูปของอูโมงค์ จะเกิดการโป่งออกของวงที่ Spring lines ซึ่งคล้ายกับ Unconfined Ring ในหัวข้อ 2.3.1 แต่ปริมาณการเสียรูปจะน้อยกว่า

2.3.3 Fully Confined Ring

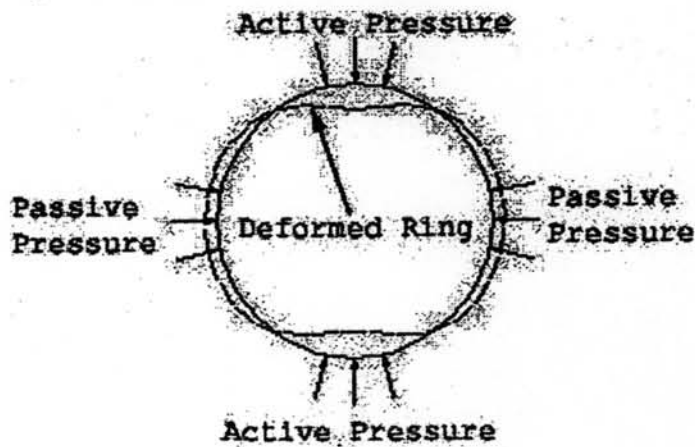
จะเกิด Active pressure ที่ Crown และ Invert และจะทำให้เกิด Passive pressure กระจายเป็นบริเวณกว้างตามรูปที่ 2.7 โดยในกรณีที่ Active pressure ที่กระทำเป็นลักษณะคงที่ หากในกรณีที่ Active pressure ไม่คงที่กระทำกับดาตอูโมงค์ จะมีผลทำให้เกิด Passive pressure ตามรูปที่ 2.8 ลักษณะการเสียรูปในกรณี Fully Confined Ring นี้จะน้อยกว่ากรณีอื่นๆ



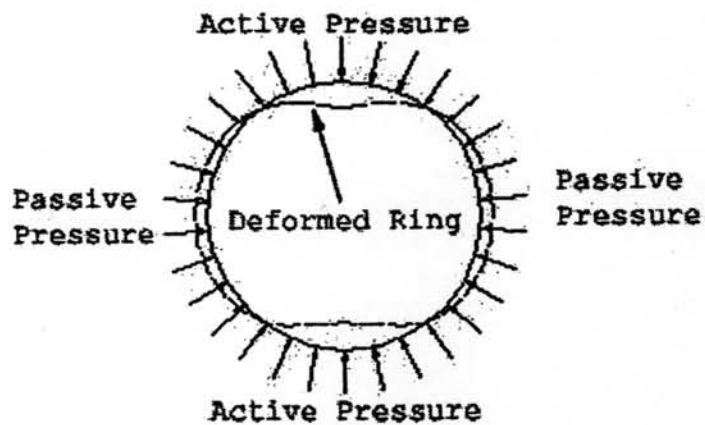
รูปที่ 2.4 การเสียรูปของดาตอูโมงค์ในลักษณะ Unconfined Ring ภายใต้หน่วยแรงกระทำคงที่ (Uniform Load)



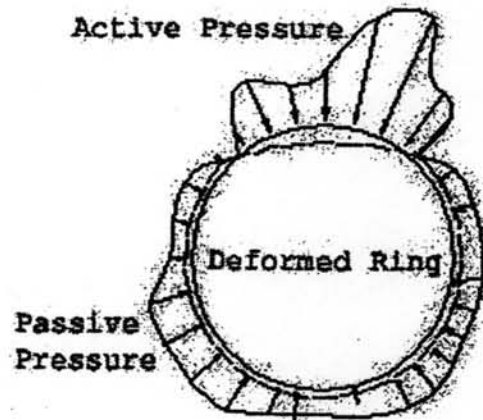
รูปที่ 2.5 การเสียรูปของดาดอุโมงค์ในลักษณะ Unconfined Ring ภายใต้หน่วยแรงกระทำไม่คงที่ (Concentrated Load)



รูปที่ 2.6 การเสียรูปของดาดอุโมงค์ในลักษณะ Partially Confined Ring ภายใต้หน่วยแรงกระทำไม่คงที่ (Concentrated Load)



รูปที่ 2.7 การเสียรูปของดาดอุโมงค์ในลักษณะ Fully confined Ring ภายใต้หน่วยแรงกระทำไม่คงที่ (Concentrated load)



รูปที่ 2.8 การเสียรูปของดาดอุโมงค์ในลักษณะ Fully Confined Ring กรณี Active pressure ไม่คงที่ (Random load)

2.3.4 เกณฑ์การพิจารณาผลจากการเสียรูปของอุโมงค์

Schmidt (1984) ได้กำหนดอัตราส่วนการเสียรูป (Distortion ratio) ระหว่าง ค่าความแตกต่างของรัศมีอุโมงค์ที่เปลี่ยนไปกับค่ารัศมีอุโมงค์เดิมของ Flexible Ring ตามลักษณะชั้นดินที่แตกต่างกันเพื่อการออกแบบ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.2 Distortion Ratios

Soil Type	Δ/R
Stiff to hard clays	0.15-0.40 %
Soft clay or Silt	0.25-0.75 %
Dense or cohesive sand, most residual soils	0.05-0.25 %
Loose sand	0.10-0.35 %

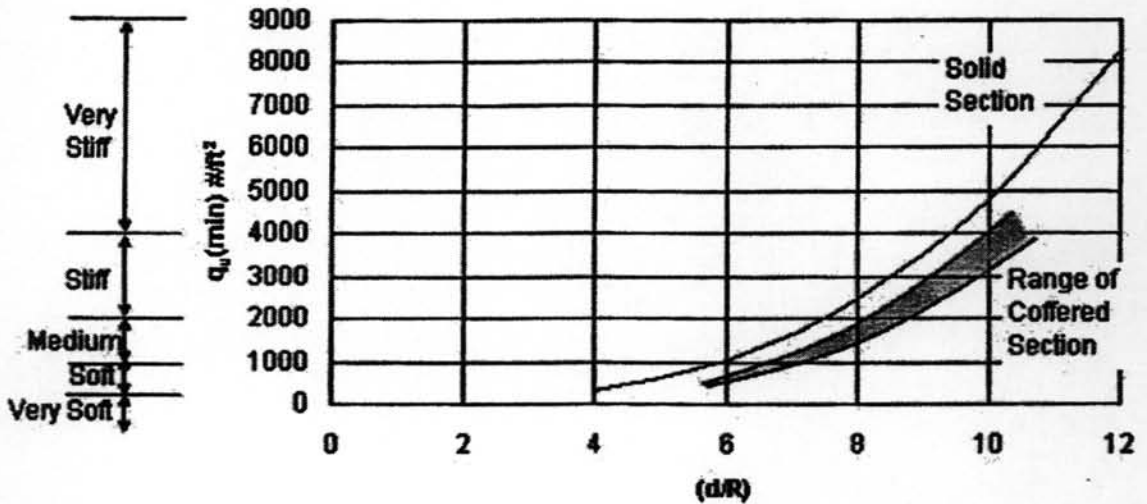
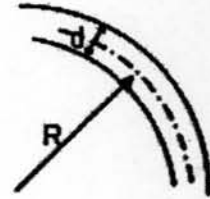
Peck et al., (1972) ได้ปรับปรุงจาก Burns และ Richard (1964) ได้กำหนดเกณฑ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยืดหยุ่น (Flexibility) ของอุโมงค์กับดิน ว่า "อุโมงค์ในดินเหนียวจะถือเป็น Fully Flexible ถ้า EI/R^3 ของอุโมงค์มีค่าน้อยกว่า 5 เท่าของ Unconfined Compressive Strength (q_u) ของดิน"

เนื่องจากวงอุโมงค์เกิดจากการประกอบเข้าด้วยกันในแต่ละชิ้นส่วน ในการพิจารณาอุโมงค์แบบ Flexibility Ring จะมีสมมุติฐานให้อุโมงค์เป็นแบบเนื้อเดียวกันทั้งวง (Monolithic Ring) และพิจารณาค่าโมเมนต์เฉื่อย (Moment of Inertia) เท่ากับ 60 – 80% ของหน้าตัดที่

คำนวณได้จากหน้าตัดแบบที่ทอกลงทั่วไปที่ความหนาเดียวกัน ซึ่งโดยทั่วไปผนังอุโมงค์แบบคอนกรีตจะมีอัตราส่วนระหว่างความหนาต่อรัศมี อยู่ที่ 6 – 12% ดังรูปที่ 2.9

แรงภายในที่เกิดขึ้นในอุโมงค์ จะพิจารณาแบบ Elastic Ring โดยโมเมนต์ที่เกิดภายในตาดอุโมงค์จะสัมพันธ์กับค่า Overburden Pressure ของดินที่เพิ่มขึ้นตามความลึกและอัตราส่วนระหว่างความหนาและรัศมีของอุโมงค์ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และ 2.11 ตามลำดับ

(d/R)	(d/R) ²	q _u (min) #/ft ² = 4.8(d/R) ² * 10 ⁴
4	640000	307
6	2160000	1037
8	5120000	2456
10	10000000	4800
12	17280000	8256



$$\frac{E}{R^3} < 5q_u$$

$$q_u > \frac{E}{5R^3}$$

from $I = \frac{d^3}{12}$ for unit tunnel length

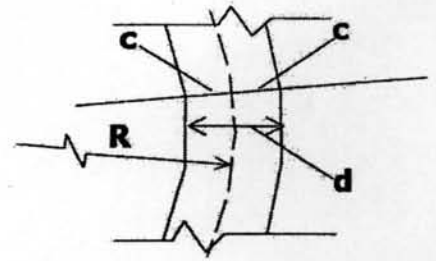
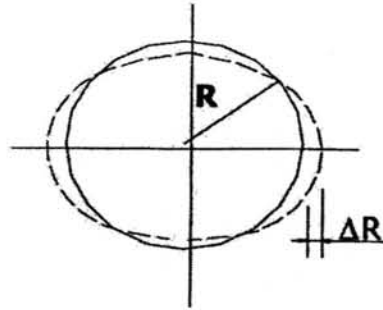
$$q_u > \frac{E (d^3)}{60 (R^3)}$$

from $E = 2 \times 10^6 \text{ #/in}^2$ for monolithic concrete segments

$$q_u > \frac{E (d^3)}{30 (R^3)} \times 10^6 \text{ #/in}^2$$

$$q_u > 4.8E \left(\frac{d}{R}\right)^3 \times 10^6 \text{ #/in}^2$$

รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาของผนังอุโมงค์ แบบ Flexibility Ring กับ ค่า q_u ต่ำสุด



For an Elastic Ring

$$\sigma_b = \pm 3E \cdot \frac{c}{R} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

$$\sigma_r = \pm 1.5E \cdot \frac{d}{R} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

For $E_c = 2,000,000$ psi

$$\sigma_b = \pm 3 \times 10^4 \cdot \frac{d}{R} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

For Monolithic Poured Concrete:

Say $E = 3,000,000$ psi

Allowing for creep and plastic deformation

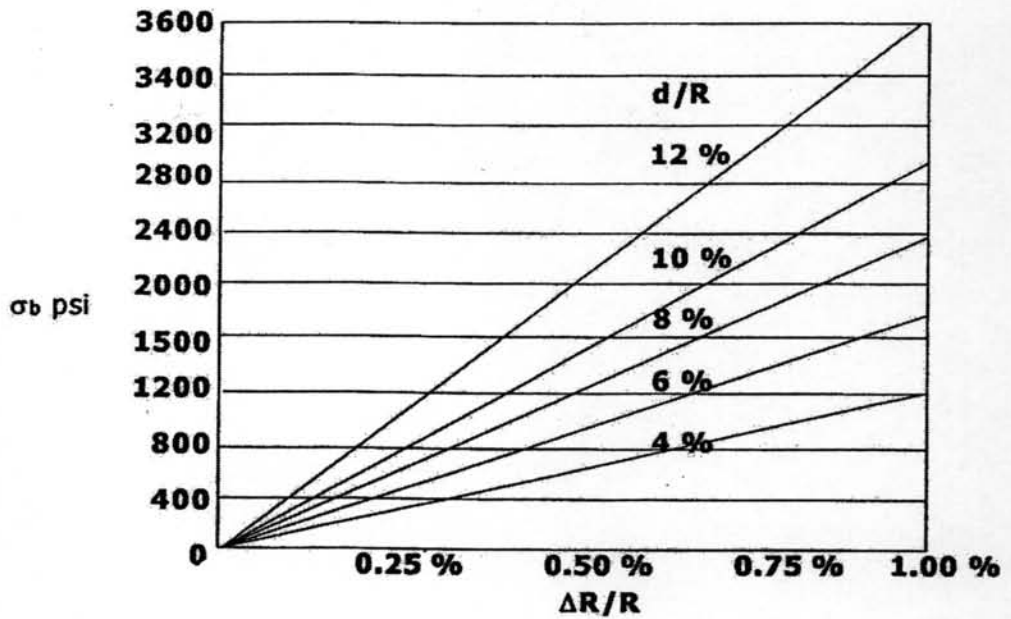
Use $E_c = 2,000,000$ psi

For Precast Concrete Segments:

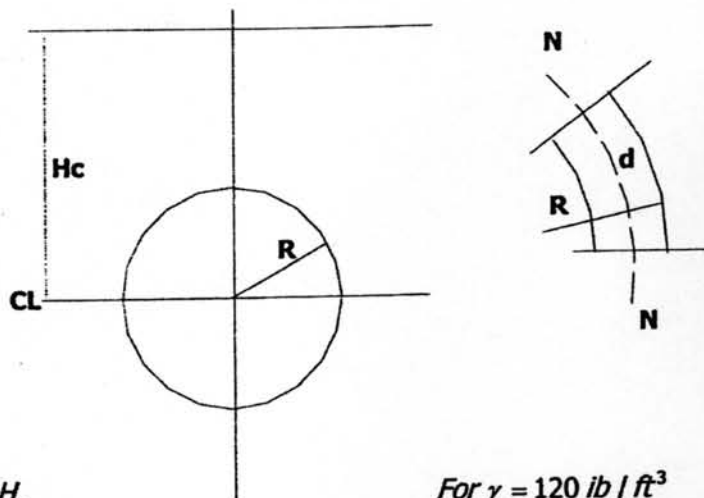
Say $E = 4,000,000$ psi

Allowing for joint flexibility

Use $E_c = 2,000,000$ psi



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ในอุโมงค์กับอัตราส่วนการเสียรูป



$$p_a = \gamma H_c$$

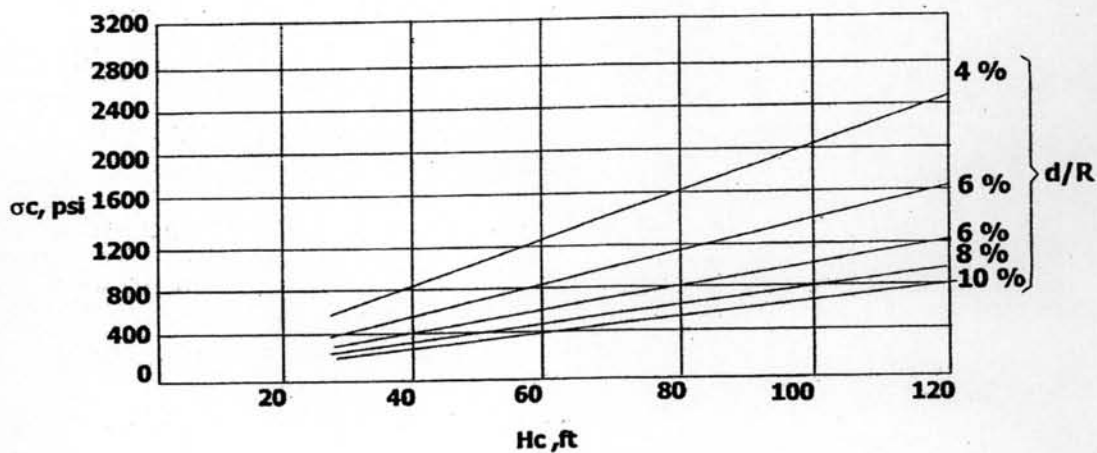
$$N = p_a R = \gamma H_c R$$

$$\sigma_c = \frac{N}{d} = \gamma H_c \frac{R}{d} = \frac{\gamma H_c}{d/R}$$

For $\gamma = 120 \text{ lb / ft}^3$

$$\gamma H_c = 120 H_c \text{ psf}$$

$$= 0.83 H_c \text{ psi}$$

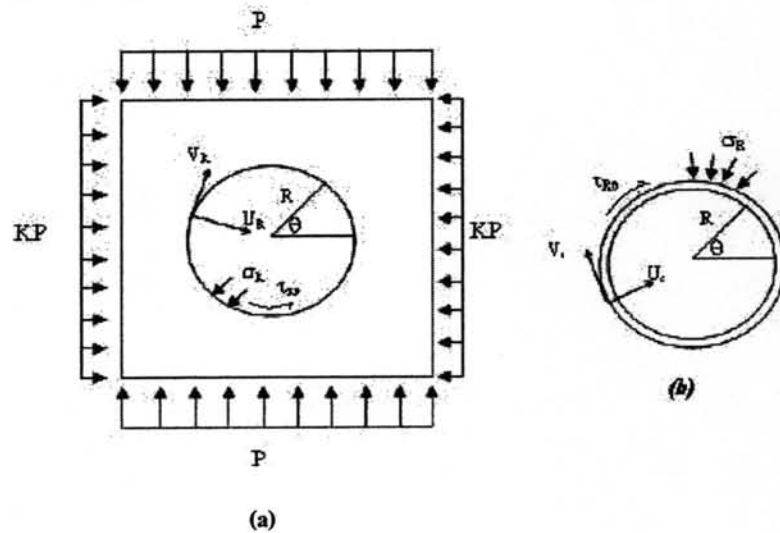


รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกนกับความลึกของอุโมงค์และขนาดอุโมงค์

2.4 การวิเคราะห์แรงภายในที่เกิดขึ้นกับผนังอุโมงค์

2.4.1 Einstein Method

วิธีนี้จะใช้หลักการของ ทฤษฎีอีลาสติก ในการวิเคราะห์สามารถหาค่าแรงที่เกิดขึ้นภายใน ดาดอุโมงค์ได้โดยมีสมมุติฐานให้ดินรอบผนังอุโมงค์มีขอบเขตไม่จำกัด เป็นอีลาสติก(Elastic) เป็นเนื้อเดียวกัน(Homogenous) และมีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) ส่วนสมมุติฐานของ ดาดอุโมงค์ คือ อุโมงค์จะเป็นแบบผนังบาง และมีการเสียรูปได้ เมื่อมีแรงมากระทำ (Flexibility Ring) และพิจารณาแรงในแนวตั้งที่จุดศูนย์กลางของอุโมงค์ (P) และแรงในแนวราบเท่ากับแรงในแนวตั้งคูณกับสัมประสิทธิ์แรงดันสถิตย์(PK), ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงตำแหน่งทิศทางของแรงและการเสียรูปในวิธีของ Einstein

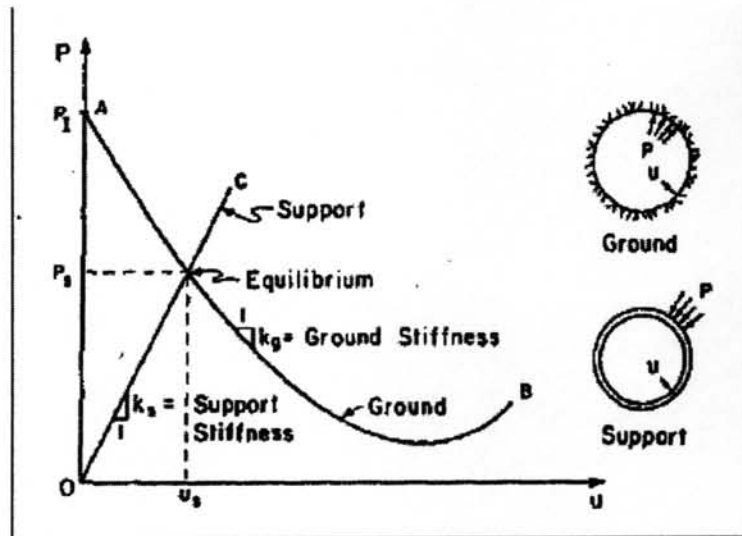
โดยที่ : (a) ดิน ; (b) ดาดอุโมงค์

V_s = การเสียรูปของผนังอุโมงค์ตามแนวเส้นรอบวง

U_s = 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 2.13



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงลักษณะค่า stiffness ของ ground และ support

2.4.1.2 ผลกระทบของ stiffness ต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอุโมงค์พิจารณาได้ 2

รูปแบบ คือ

- พิจารณาจุดรองรับเป็นจุดรองรับยืดหยุ่น (Flexible) จะทำให้แรงในสนามที่เป็นแรงกระจายไม่สม่ำเสมอ(Nonuniform) เปลี่ยนไปเป็นแรงกระจายสม่ำเสมอ (Uniform) กระทำกับจุดรองรับและไม่เกิดโมเมนต์ดัด

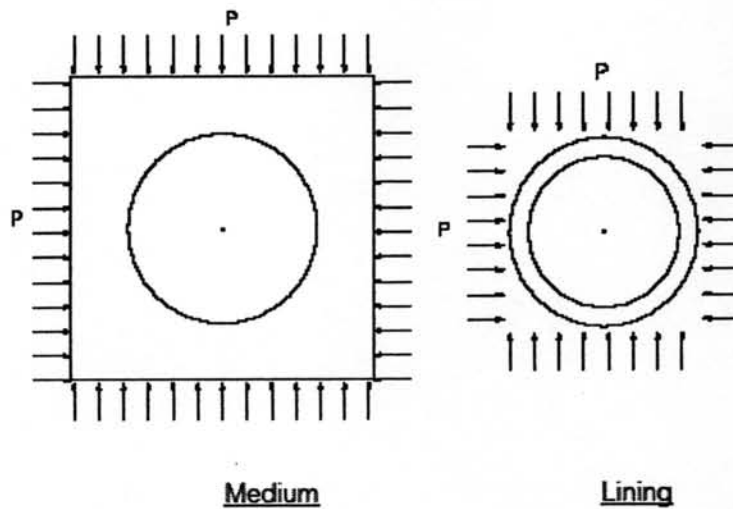
- พิจารณาจุดรองรับเป็นจุดรองรับแข็งเกร็ง (Rigid) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและมีแรงกระทำแบบกระจายไม่สม่ำเสมอกับ (Support) จึงเกิดโมเมนต์ดัดขึ้นสิ่งที่เพิ่มจากผลกระทบของความแข็งสัมพัทธ์ (relative stiffness) ซึ่งมีอิทธิพลสำคัญกับพฤติกรรมของ ground และ support คือการถ่ายผ่านของหน่วยแรงเฉือนบริเวณ ground-support interface ซึ่งแยกออกเป็น 2 เงื่อนไขใหญ่คือ Full-Slip (ไม่มีการถ่ายผ่านของหน่วยแรงเฉือน) และ No-Slip (ไม่มีการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเฉือน)

2.4.1.3 ความแข็ง(Stiffness)ระหว่างดาดอุโมงค์กับดิน และสูตรในการหาแรงภายในดาด

อุโมงค์

- Compressibility Ratio (C) : อัตราส่วนระหว่างความสัมพัทธ์ ระหว่างความแข็งของดิน และดาดอุโมงค์ภายใต้แรงกระทำสม่ำเสมอ โดยมีรูปร่างไม่เปลี่ยนแปลงคือยังเป็นรูปวงกลมไม่บิดเบี้ยว (แรงต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงอัดแต่เพียงอย่างเดียว)

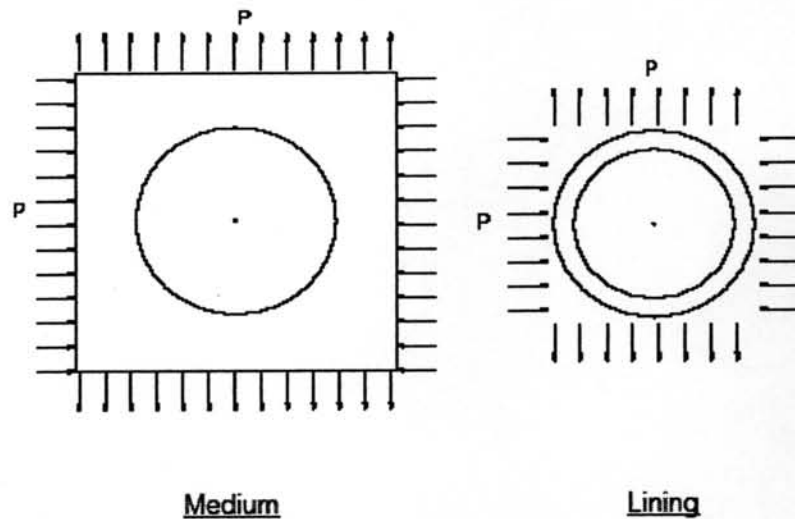
$$C \text{ (Compressibility Ratio)} = \frac{ER_c(1-\nu_s^2)}{E_sA_s(1-\nu^2)}$$



รูปที่ 2.14 แรงกระทำรอบดินและดาดอุโมงค์ที่เท่ากันทุกด้าน(ทิศทางของแรง สมมาตร)

- Flexibility Ratio (F) : อัตราส่วนระหว่างความสัมพัทธ์ระหว่างความแข็งของดินและ ดาดอุโมงค์ภายใต้แรงกระทำไม่สม่ำเสมอ โดยเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นรูปวงรี (แรงต้านทานการ เปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงเฉือนแต่เพียงอย่างเดียว)

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



รูปที่ 2.15 แรงกระทำรอบดินและคาดอุโมงค์ที่เท่ากันทุกด้าน (ทิศทางของแรงไม่สมมาตร)

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

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

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

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

แรงภายในคาดอุโมงค์

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 $a_2 = \beta$

การเสียรูปของอุโมงค์

$$\frac{u_s E}{PR(1+V)} = (1/2)(1+K)a_0 - (1-K)[(5-6V)a_2 - (1-V)]\cos 2\theta$$

$$\frac{V_s E}{PR(1+V)} = (1/2)(1-K)[(5-6V)a_2 - (1-V)]\sin 2\theta$$

โดยที่

T = แรงตามแนวแกนของคานาดูดอุโมงค์

M = โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในคานาดูดอุโมงค์

P = แรงดันดินในแนวตั้งที่ crown (Total overburden pressure at crown)

K = สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้าง

R = รัศมีของผนังอุโมงค์

V_s = การเสียรูปของผนังอุโมงค์ตามแนวเส้นรอบวง

u_s = การเสียรูปของผนังอุโมงค์ตามแนวรัศมี

E_s = โมดูลัสยืดหยุ่นของคานาดูดอุโมงค์

E = โมดูลัสยืดหยุ่นของดิน

V_s = Poisson's ratio ของคานาดูดอุโมงค์

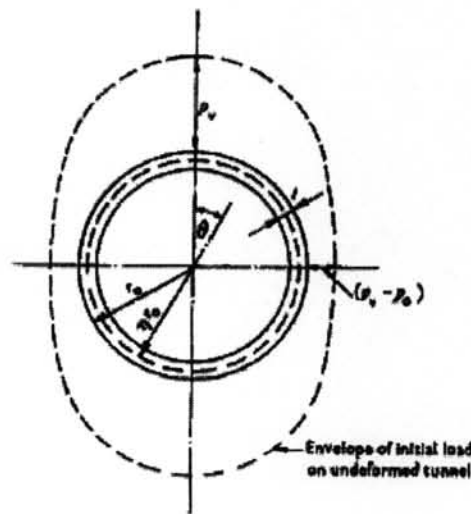
V = Poisson's ratio ของดิน

R_c = รัศมีเฉลี่ยของคานาดูดอุโมงค์ (จากจุดศูนย์กลางของอุโมงค์ ถึงกึ่งกลางความหนาของคานาดูดอุโมงค์)

θ = มุมรอบคานาดูดอุโมงค์ (ทวนเข็มนาฬิกาจาก Spring line, องศา)

2.4.2 A.M. Muir Wood Method

วิธีนี้อาศัยสมมติฐานว่า เป็นอุโมงค์แบบวงกลม (Circular lining) เกิดการเปลี่ยนรูป (Deformation) ของคาคอุโมงค์ เป็นรูปวงรีในดินที่มีสภาพแบบยืดหยุ่น (elastic ground) โดยไม่คำนึงถึงค่า Shear stress ระหว่าง Lining กับดิน สมมติให้อุโมงค์ถูกล้อมรอบด้วย Elastic ground แบบสมบูรณ์ การวิเคราะห์แบบยืดหยุ่น (Elastic analysis) จะใช้ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นของ stress-strain ซึ่งจะมีค่า Factor เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยหลายค่ารวมถึงผลกระทบต่างๆ ที่จะมีขึ้นด้วยอย่างไรก็ตามในการออกแบบคาคอุโมงค์จะต้องพิจารณาถึงผลตอบแทนทางเศรษฐกิจด้วย และนำเอาประโยชน์ในเรื่องระดับการเปลี่ยนรูป แบบพลาสติกของดิน (degree of plastic deformation of the ground) ไปใช้ และมักจะใช้เรื่องของ time-dependent nature มาเป็น concept ร่วมด้วย เช่น อัตราส่วนของค่าความแข็งของดินในการรับแรงอัดต่อค่าแรงกดตามแนวตั้ง (Vertical overburden pressure) อย่างน้อยเป็นสิ่งแสดงเพื่อประเมินในการตั้งสมมติฐานแบบเชิงเส้น ให้อยู่ภายใต้ค่าที่ยอมรับได้ภายในขอบเขตที่กำหนดในการวิเคราะห์ในลักษณะ 2 มิติ



รูปที่ 2.16 แผนภาพแสดงแรงกระทำเริ่มแรกที่กระทำบนอุโมงค์ก่อนการเสียรูป

พิจารณาแรงภายในที่ เกิดขึ้นกับดาดอุโมงค์ตามผลกระทบของความเค้นที่ไม่เท่ากันทุกทิศทาง (Anisotropic stress) , ความเค้นที่เท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic stress) และแรงดันน้ำ (Waterpressure)

1. ผลกระทบของความเค้นที่เกิดขึ้นไม่เท่ากัน (Anisotropic stress)

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

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

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

2. ผลกระทบของความเค้นที่เกิดขึ้นเท่ากัน (Isotropic stress)

$$T_2 = \Delta P r_o$$

3. ผลกระทบของแรงดันน้ำ (Water pressure)

$$T_3 = P_w r_o$$

โดยที่

$$S_t = T_s = \frac{(1+2Q_2)P_o/2}{1+Q_2[(3-2V)/(3-4V)]}$$

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

หมายเหตุ : ค่า S_t เลือกใช้ค่าน้อยคำนวณ

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

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

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

$$P_o = P_v - P_h$$

$$\bar{P} = (P_v + P_h)/2$$

$$\Delta P = \bar{P}/(1+Q)$$

$$T = T_1 + T_2 + T_3$$

เมื่อ

T = แรงรวมตามแนวแกนของตาดอูโมงค์

M = โมเมนต์ดัดที่ตาดอูโมงค์

S = แรงเฉือนที่ตาดอูโมงค์

Q = อัตราส่วนการยุบอัดตัว (Compressibility Ratio)

Q_2 = อัตราส่วนยืดหยุ่น (Flexibility Ratio)

P_o = ค่าแรงดันส่วนเกินในแนวตั้ง/แนวราบเนื่องจาก Effect of anisotropic stress

\bar{P} = แรงดันในแนวตั้งจากระหว่างดินและ lining

ΔP = การเปลี่ยนแปลงแรงดันเนื่องจาก Effect of isotropic stress

P_v = แรงดันในแนวตั้งตามแนวแกนอูโมงค์จากผิวดินถึง crown

S_h = Factor ของแรงแนวแกน , โมเมนต์และแรงเฉือน

S_t = Factor ของแรงแนวแกน , โมเมนต์และแรงเฉือน

2.4.3 JSCE Method

วิธีนี้อาศัยสมมุติฐาน โดยพิจารณาแรงที่กระทำต่อตาดอุโมงค์ตามลักษณะสมดุลย์ ของแรงภายนอกต่างๆ ที่มากระทำ ซึ่งแรงภายนอกที่กระทำต่อตาดอุโมงค์ที่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา

1.การคำนวณหาแรงดันที่กระทำต่อตัวอุโมงค์

1. แรงกระทำในแนวตั้งที่ crown อุโมงค์ :

$$P_{vt} = W + P_{evt} + P_{wt}$$

โดยที่

P_{vt} = แรงรวมในแนวตั้งของดิน (Total vertical load)

W = Surcharge load (Traffic load + Flooding)

P_{evt} = แรงประสิทธิผลในแนวตั้งของดิน(Effective earth pressure)

P_{wt} = แรงดันน้ำ

2. แรงกระทำในแนวนอนที่ crown อุโมงค์ :

$$P_{ht} = P_{wt} + \lambda(P_{cvt} + W)$$

โดยที่

P_{ht} = แรงดันรวมในแนวนอนของดิน

λ = สัมประสิทธิ์แรงกระทำด้านข้าง(ดังแสดงในตารางที่ 2.3)

ตารางที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์แรงกระทำด้านข้าง

ลักษณะชั้นดิน	ค่า λ
ทรายแน่น (Dense sand)	0.45 – 0.55
ดินเหนียวแข็ง (Stiff clay)	
ดินเหนียวแข็งปานกลาง (Medium clay)	
ทรายหลวม (Loose sand)	0.50 – 0.60
ดินเหนียวอ่อน (Soft clay)	0.55 – 0.65
ดินเหนียวอ่อนมาก (Very Soft clay)	0.65 – 0.75

3. แรงกระทำในแนวนอนที่ Invert อุโมงค์ :

$$P_{hb} = P_{wb} + \lambda P_{vb}$$

โดยที่

P_{hb} = แรงดันรวมในแนวนอนของดิน (Total horizontal load)

P_{wb} = แรงดันน้ำ

P_{vb} = แรงดันรวมในแนวตั้งของดิน (Total vertical load)

4. แรงปฏิกิริยาจากน้ำหนักของผนังอุโมงค์ :

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นที่ Invert ของอุโมงค์ เนื่องจากน้ำหนักของตัวควดอุโมงค์ โดยการคำนวณจะคิดต่อ หน่วยความยาว

$$W_g = 0.25\pi(D_o^2 - D_i^2)\gamma_c$$

$$G = W_g / P$$

$$P_g = \pi g$$

โดยที่

P_g = แรงปฏิกิริยาจากน้ำหนักของควดอุโมงค์

G = หน่วยน้ำหนักของ Segment Ring สามารถคำนวณได้จากน้ำหนักของ Segment Ring ต่อหน่วยความยาว

W_g = น้ำหนักต่อเมตรของอุโมงค์

D_o = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของควดอุโมงค์

D_i = เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของควดอุโมงค์

γ_c = หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตควดอุโมงค์

P = เส้นรอบวงที่กึ่งกลางความหนาของควดอุโมงค์

5. Resistance Earth Pressure

เนื่องจากแรงภายนอกที่กระทำต่อผนังอุโมงค์ตัวอุโมงค์ จะเกิดการเคลื่อนที่ทั้งในแนวราบ และแนวตั้งกระทำต่อตัวผนังอุโมงค์(Deformation) ซึ่งจะก่อให้เกิดแรงต้านทานจากมวลดินกระทำต่ออุโมงค์(Subgrade reaction) โดยแยกเป็น 2 ส่วน คือ

- Vertical subgrade reaction

หาได้จากการพิจารณาระบบสมดุลในแนวตั้ง ซึ่งจะได้ค่า Vertical subgrade reaction ดังนี้

$$P_{e2} = (W + P_{evt} + P_{wt}) - (P_g + P_{wb})$$

โดยที่

$$P_{wb} = \text{แรงดันน้ำที่ Invert}$$

*** แต่ในทางปฏิบัติจะคิดค่า P_{e2} เท่ากับ $W + P_{ev}$

- Lateral subgrade reaction

หาได้จากการเคลื่อนตัวในแนวราบของผนังอุโมงค์ ตามรูปที่ 2.8

$$Q = k \cdot \delta$$

$$\delta = \frac{(2P_{vt} - P_{ht} - P_{hb})R_c^4}{24(\eta E_c I + 0.0454 k R_c^4)}$$

โดยที่

$$\delta = \delta_1 - \delta_2$$

δ_1 = การเสียรูปด้านข้างจากแรงดันดินและแรงดันน้ำ

δ_2 = การเสียรูปย้อนกลับจากแรงด้านข้างของดิน

k = subgrade reaction factors (แสดงในตารางที่ 2.3)

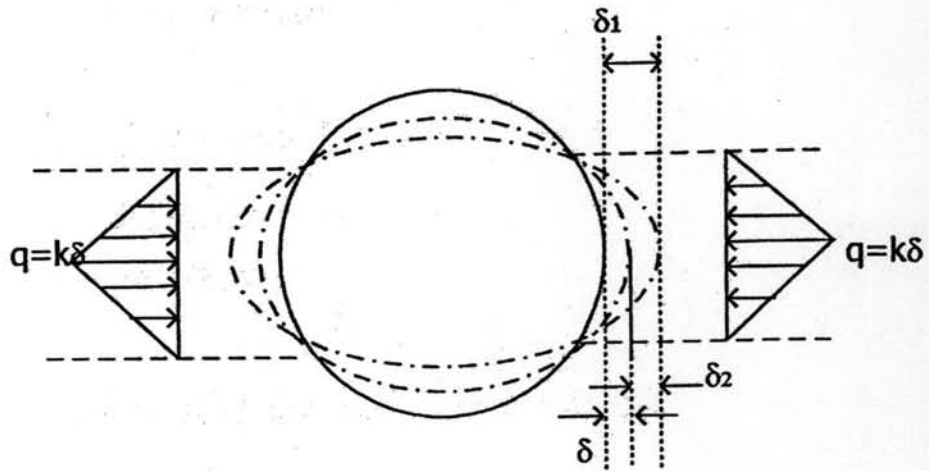
η = สัมประสิทธิ์การเสียรูปของอุโมงค์ใช้ $\eta = 1$

E_c = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต(Young's modulus)

I = โมเมนต์เฉื่อยของคอนกรีต(Moment of inertia)

ตารางที่ 2.4 ค่าสัมประสิทธิ์ k ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน

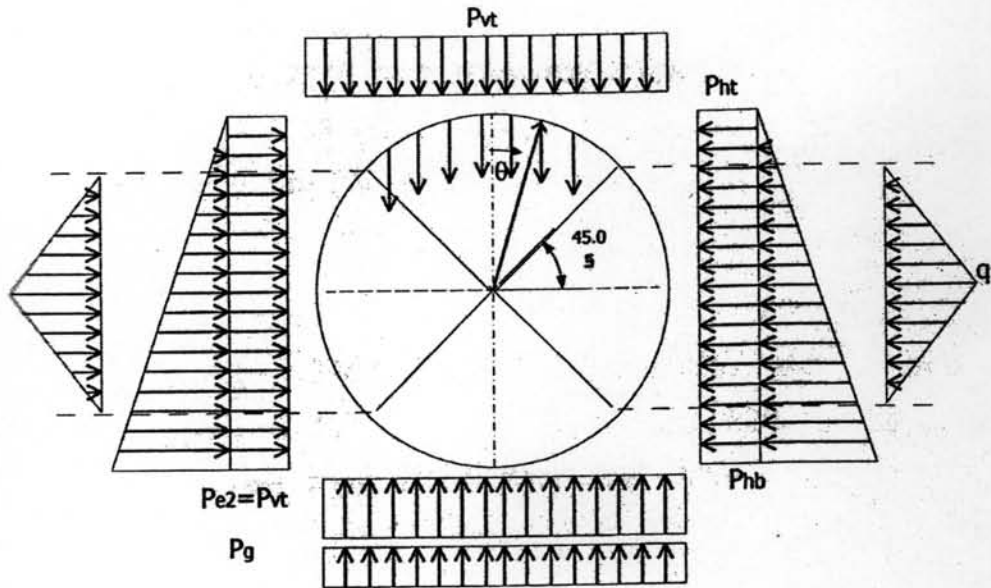
ชนิดของดิน	k (kg/cm ³ /cm)
Very dense sand, Very stiff clay	3.0 – 5.0
Dense sand, Stiff clay	1.0 – 3.0
Medium clay	0.5 – 1.0
Loose sand	0.0 – 1.0
Soft clay	0.0 – 0.5
Very Soft clay	0.0



รูปที่ 2.17 การเคลื่อนตัวในแนวราบของผนังอุโมงค์

2. แรงที่เกิดในคานอุโมงค์จากแรงดันดิน แรงดันน้ำ และน้ำหนักคานอุโมงค์

จากรูปที่ 2.18 แสดงหน่วยแรงภายนอกที่กระทำต่อผนังอุโมงค์ การคำนวณแรงที่เกิดในผนังอุโมงค์อันได้แก่ Moment , แรง Normal force และ Shear force ดังแสดงในรูปที่ 2.19 จะทำการคำนวณแยกเป็นส่วนๆ จำนวน 5 รายการ แล้วทำการรวมแรงทั้งหมดเข้าด้วยกันจะได้แรงทั้งหมดที่กระทำต่ออุโมงค์ ดังนี้



รูปที่ 2.18 Working Load Distribution Diagram

1. แรงภายในจากแรงคงที่ในแนวตั้ง (P_{vt}) :

$$M_{vt} = (1/4) \cdot (1-2\sin^2\theta) P_{vt} R_c^2$$

$$N_{vt} = P_{vt} R_c \sin^2\theta$$

$$Q_{vt} = -P_{vt} R_c \sin\theta \cos\theta$$

2. แรงภายในจากแรงคงที่ในแนวราบ (P_{ht}) :

$$M_{ht} = (1/4) \cdot (1-2\cos^2\theta) P_{ht} R_c^2$$

$$N_{ht} = P_{ht} R_c \cos^2\theta$$

$$Q_{ht} = -P_{ht} R_c \sin\theta \cos\theta$$

3. แรงภายในจากแรงแรงในแนวนอนที่เพิ่มขึ้นตามความลึก($P_{hb} - P_{ht}$) :

$$M_{ho} = (1/48) \cdot (6 - 3\cos\theta - 12\cos^2\theta + 4\cos^3\theta) (P_{hb} - P_{ht}) R_c^2$$

$$N_{ho} = (1/16) \cdot (\cos\theta + 8\cos^2\theta - 4\cos^3\theta) (P_{hb} - P_{ht}) R_c$$

$$Q_{ho} = (1/16) \cdot (\sin\theta + 8\sin\theta\cos\theta - 4\sin\theta\cos^2\theta) (P_{hb} - P_{ht}) R_c$$

4. แรงภายในจากแรงต้านทานของดิน(q) :

$$0 \leq \theta \leq \pi/4:$$

$$M_q = (0.2346 - 0.3536\cos\theta) q R_c^2$$

$$N_q = 0.3536 \cos\theta q R_c$$

$$Q_q = 0.3536 \sin\theta q R_c$$

$$\pi/4 \leq \theta \leq \pi/2:$$

$$M_q = (-0.3487 + 0.5\sin^2\theta + 0.2357\cos^3\theta) q R_c^2$$

$$N_q = (-0.7071\cos\theta + \cos^2\theta + 0.7071\sin^2\theta\cos\theta) q R_c$$

$$Q_q = (\sin\theta \cos\theta - 0.7071 \cos^2\theta\sin\theta) q R_c$$

5. แรงภายในจากน้ำหนักของดาดูโมงค์(P_g) :

$$0 \leq \theta \leq \pi/2:$$

$$M_g = [(3/8)\pi \cdot \theta \sin\theta - (5/6)\cos\theta] P_g R_c^2$$

$$N_g = [\theta \sin\theta - (1/6)\cos\theta] P_g R_c$$

$$Q_g = [\theta \cos\theta - (1/6)\sin\theta] P_g R_c$$

$$\pi/2 \leq \theta \leq \pi:$$

$$M_g = [-(\pi/8) \cdot (\pi - \theta) \sin\theta - (5/6)\cos\theta - (\pi/2)\sin^2\theta] P_g R_c^2$$

$$N_g = [-\pi \sin\theta + \theta \sin\theta + \sin^2\theta - (1/6)\cos\theta] P_g R_c$$

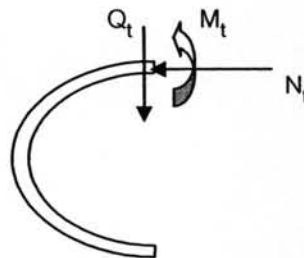
$$Q_g = [(\pi - \theta) \cos\theta - \pi \cos\theta \sin\theta - (1/6)\sin\theta] P_g R_c$$

สามารถหาแรงทั้งหมดที่กระทำต่อดาดูโมงค์ดังนี้

โมเมนต์ดัดทั้งหมด : $M_t = M_{vt} + M_{ht} + M_{ho} + M_q + M_g$

แรงในแนวแกนทั้งหมด : $N_t = N_{vt} + N_{ht} + N_{ho} + N_q + N_g$

แรงเฉือนทั้งหมด : $Q_t = Q_{vt} + Q_{ht} + Q_{ho} + Q_q + Q_g$



รูปที่ 2.19 แสดงทิศทางของโมเมนต์และแรงที่กระทำและแรงที่กระทำต่อผนังอุโมงค์

2.5 การพิจารณาปรับค่าของ Stiffness ของ Segmental Liner

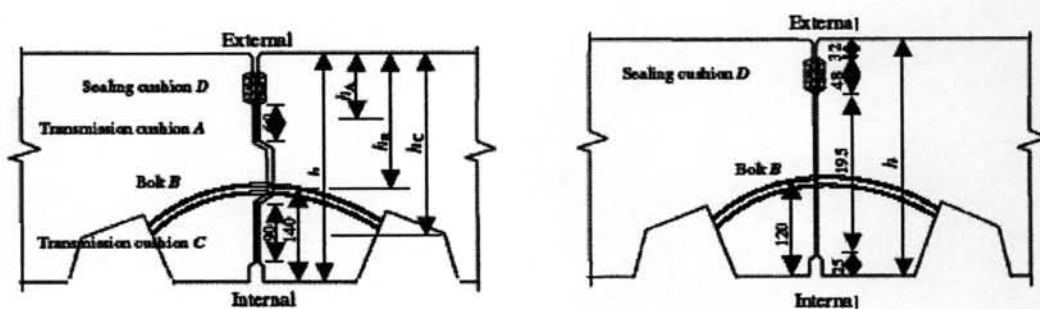
ในการออกแบบอุโมงค์บริเวณจุดต่อ (Joint) ของชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ (Segment) เป็นจุดสำคัญจุดหนึ่งเนื่องจากเป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ในวงเดียวกัน และระหว่างอุโมงค์แต่ละวง ซึ่งหน้าที่หลักของ Joint มีดังนี้

- เป็นส่วนยึดต่อโครงสร้างของชิ้นส่วนอุโมงค์
- เป็นชั้นป้องกันน้ำที่จะซึมเข้าระหว่างชิ้นส่วนอุโมงค์และขยายยาวไปตลอดแนวอุโมงค์
- เป็นส่วนซึ่งเป็นทางผ่านของแรงและโมเมนต์ดัดซึ่งส่งผ่านกันระหว่างชิ้นส่วนของผนังอุโมงค์แต่ละชั้นและอุโมงค์แต่ละวงที่ติดกัน

ซึ่งบริเวณ Joint จะมีค่าสติฟเนสและความสามารถในการรับแรง (Bending) ได้น้อยกว่าส่วนอื่นๆของ Segment

เนื่องจากเป็นรอยต่อของโครงสร้างซึ่งจะมีความแข็งแรงน้อย โดยมีแนวทางการออกแบบบริเวณ Joint อยู่ 2 แนวทาง

- ออกแบบให้ Joint มี Stiffness ที่เทียบเท่ากับส่วนอื่น ซึ่งวิธีนี้มีข้อเสียคือทำได้ยากและเสียค่าใช้จ่ายเรื่อง Bolt สูงมาก
- ออกแบบให้ Joint มี Stiffness น้อยกว่าส่วนอื่นๆ ซึ่งวิธีนี้จะทำให้ Bending ในตัว Segment จะสูงขึ้นค่อนข้างมาก



รูปที่ 2.20 แสดงโครงสร้าง Joint แบบต่างๆของ Lining



รูปที่ 2.21 แสดงชิ้นส่วนอุโมงค์ก่อนทำการประกอบ



รูปที่ 2.22 แสดงลักษณะอุโมงค์เมื่อทำการประกอบเสร็จ

โดยทั่วไปมักเลือกที่จะลดค่า Stiffness ของ Ring ลงเพื่อให้ Bending moment ที่ผ่านเข้าไปยัง Joint ลดลงซึ่งแสดงเป็นสมการดังนี้

$$\text{Main segment : } M_s = M_{i0} = M + \Delta M$$

$$\text{Joint : } M_j = 2M - M_{i0}$$

$$\Delta M = M - M_j$$

โดยที่

M = moment computed using reduced $I (= \eta I_0)$

M_{i0} = moment computed using Full I_0

การประมาณค่าของ Stiffness reduction factor(η) ซึ่งมีในปัจจุบันไม่มีค่าประมาณที่ชัดเจนโดยที่ได้ยกตัวอย่างการประมาณค่ามา 2 วิธี ดังนี้

- A.M. Muir Wood(1975) : $\eta = (4 / N)^2$; $N =$ จำนวนชั้นส่วนของดาด
อุโมงค์ต่อ 1 วง

- Japan : $\eta \approx 0.6 - 0.9$