บทที่ 3

แนวทางและขั้นตอนในการวิจัย

จากที่ได้กล่าวมาในบทที่ 2 นั้น เป็นการวิเคราะห์แรงภายในดาดอุโมงค์โดยการคำนวณตามขั้นตอนในแต่ละทฤษฎีซึ่งมีการกล่าวถึงเรื่อง Joint ของอุโมงค์อยู่เล็กน้อยเพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจกับผู้ที่ต้องการศึกษาและสะดวกสำหรับผู้ที่ต้องการใช้ประกอบการคำนวณออกแบบ Joint ของอุโมงค์จึงได้ทำการแสดงการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม STAAD.Pro 2004 และสรุปขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองอุโมงค์ในโปรแกรม

3.1 สมมุติฐานเบื้องต้นในการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ด้วยโปรแกรม STAAD.Pro 2004 ของงานวิจัยนี้ได้มีการตั้งสมมุติฐานเบื้องต้นในการวิเคราะห์ไว้ดังนี้

1. ทำการวิเคราะห์อุโมงค์ที่วางตัวอยู่ในชั้นดินเดียว และกำหนดให้มีลักษณะเป็นแบบ Linear ตลอดความหนาของชั้นดิน
2. วิเคราะห์อุโมงค์หน้าตัดวงกลม
3. พิจารณาอุโมงค์แบบ Plane Strain
4. กำหนดให้ Spring support เป็นตัวแทนของแรงดันดินรอบๆอุโมงค์
5. พิจารณาแรงดันน้ำแบบสถิต(Hydrostatic Level)
6. เปลี่ยนแปลงค่าสติฟเนสของ Joint อุโมงค์โดยการเพิ่มหรือลดค่า Moment of Inertia ของผนังอุโมงค์และ Joint ของอุโมงค์

3.2 ขั้นตอนการวิจัย

ในการวิจัยนี้สามารถแบ่งขั้นตอนการวิจัยออกเป็นหลายส่วน ดังมีรายละเอียดดังนี้

1. ศึกษาวิธีการออกแบบและก่อสร้างอุโมงค์ชนิดประกอบแยกส่วน
2. ศึกษาข้อมูลและวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของ Joint อุโมงค์
3. ศึกษาผลการวิเคราะห์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าสติฟเนสของ Joint อุโมงค์
4. เปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม STAAD.Pro 2004 กับการวิเคราะห์โดยทฤษฎีต่างๆที่ได้กล่าวมาในบทที่ 2
5. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย รวมทั้งข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

3.3 ปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณาเลือกโปรแกรม

เนื่องจากในการวิเคราะห์อุโมงค์ด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์มีโปรแกรมอยู่หลายชนิดที่สามารถจะเลือกใช้สำหรับทำการวิเคราะห์โดยในการวิจัยนี้เลือกใช้โปแกรม STAAD.Pro 2004 ในการวิเคราะห์โดยมีปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณาดังนี้

1. ใช้ฮาร์ดแวร์ที่มีความสามารถไม่สูงมากนัก โดยสามารถที่จะใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล(PC)ได้
2. เป็นโปรแกรมที่มีขนาดเล็ก 265 MB
3. เป็นโปรแกรมออกแบบมาสำหรับกระบวนการวิเคราะห์ที่มีความซับซ้อนโดยเฉพาะ
4. สามารถใช้โปรแกรมวิเคราะห์ให้เห็นถึงพฤติกรรมของ Joint อุโมงค์ได้เป็นอย่างดี

3.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับดินได้แก่

- กำลังรับแรงเฉือนของดิน (Undrain Shear Strength , Su)
- สัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างแบบสถิต (Ko)
- ค่าโมดูลัสแบบไม่ระบายน้ำของดิน (Eu)
- หน่วยน้ำหนักแห้ง (γ_d) และหน่วยน้ำหนักรวม (γ_t)
- ค่า Cohesion , C และ Friction angle ของดิน
- ค่า Poission ratio , ν ของดิน

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับโครงสร้างใต้ดินได้แก่

- น้ำหนักอุโมงค์ , W
- ค่าสติฟเนสของผนังอุโมงค์ , EA และลักษณะทางกายภาพของอุโมงค์
- ค่าความแข็งเชิงดัด (Flexural rigidity , EI)
- ค่า Poission ratio , ν ของคอนกรีต

3.4.1 กำลังรับแรงเฉือนของดิน (Undrain Shear Strength , Su)

กำลังรับแรงเฉือนของดินในสภาพไม่ระบายน้ำ (Su) จะมีผลในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของอุโมงค์ โดยค่า Su ต่ำจะก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวสูง ดังนั้นการเลือกใช้ค่า Su จึงเป็นสิ่งสำคัญในการวิเคราะห์พฤติกรรมของอุโมงค์ Bishop และ Skempton (1954) ได้ให้คำจำกัดความของกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ โดยพิจาณาจากการทดสอบแบบ Undrained Test ว่าดินมีกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดเท่ากับ

$$Su = (\sigma 1 - \sigma 3)_f / 2$$

โดยค่า Su ที่นำมาใช้ในช่วงระดับความลึกไม่เกิน 16 เมตร สามารถหาได้โดยตรงจาก Boring Log แต่ที่ระดับความลึกมากกว่านั้น สามารถแปลงมาจากค่า N_{Field}

การทดสอบทะลุทะลวงแบบมาตรฐาน (Standard Penetration Test , SPT)

เป็นการทดสอบหาค่า Su จากค่า N โดยวิธีประมาณ (Empirical) ในดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) และค่า N จากการทดสอบเพื่อใช้หาค่ามุมต้านทานแรงเฉือน (Friction angle , Ø) ของดินทรายโดยใช้ความสัมพันธ์ของ Peck Hanson และ Thornburn(1973)

โดยในดินเหนียวกรุงเทพชั้นแรก วีระนันท์(2526) ได้หาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง N_{Field} ซึ่งเป็นค่าที่ไม่ต้องปรับแก้กับ Su ดังนี้

$Su = 0.685\ N_{Field}$ สำหรับดินเหนียวชนิด CH

$Su = 0.520\ N_{Field}$ สำหรับดินเหนียวชนิด CL

3.4.2 การหามุมต้านทานแรงเฉือนประสิทธิผลของชั้นทราย

การหามุมต้านทานแรงเฉือนประสิทธิผลของชั้นทราย

การหามุมต้านทานแรงเฉือนประสิทธิผลของชั้นทราย ทำได้โดยหาจากค่า N โดยใช้กราฟความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Peck Hanson และ Thornburn โดยค่า N ที่จะนำไปใช้ต้องทำการปรับแก้เนื่องจากผลของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งธรรมชาติ (σ'_{vo}) ในตำแหน่งที่ทำการทดสอบดังนี้

$$N' = C_N \cdot N_{Field}$$

โดยที่

C_N เป็นตัวปรับแก้ซึ่งได้จากการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ SPT ภายใต้หน่วยแรงกดดันมาตรฐาน $\sigma'_{vo} = 1\ t/m^2$

N_{Field} เป็นค่า N ที่ได้จากสนาม

N' เป็นค่า N ที่ปรับแก้แล้ว

3.4.3 สัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้างแบบสถิต

สำหรับดินเม็ดหยาบการวิเคราะห์ใน Short Term จะใช้ Effective Analysis เนื่องจากสามารถระบายน้ำได้ โดยหาค่า Ko ได้ดังนี้

$$Ko = 1 - \sin\emptyset'$$

โดยที่

Ø' เป็นมุมต้านทานแรงเฉือนประสิทธิผล (Friction Angle) ของดินทราย

ในการวิเคราะห์แบบ Short Term หรือ Total Stress analysis ค่า Ko ที่จะใช้เป็นค่า Ko(Total) คือ อัตราส่วนหน่วยแรงรวมดันข้างต่อหน่วยแรงในแนวดิ่ง ซึ่งไม่จำเป็นต้องทราบค่าแรงดันน้ำในการวิเคราะห์ ค่า Ko ในดินกรุงเทพฯ ค่า Ko ของดินเหนียวอ่อนเท่ากับ 0.65 และของดินเหนียวแข็งเท่ากับ 0.5 ส่วนค่า Ko(Total) ในดินกรุงเทพฯสำหรับดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งเท่ากับ 0.75 และ 0.65 ตามลำดับ

3.4.4 ค่าโมดูลัสของดิน (Soil Modulus)

ในการวิเคราะห์แบบ Short Term โดยใช้ Total Stress analysis จะใช้ค่าโมดูลัสของดินแบบไม่ระบายน้ำ (Eu) โดยที่ค่า Eu จะมีผลต่อค่าโมดูลัสแรงเฉือนของดิน (Shear Modulus , G) ตามทฤษฎี อีลาสติค (Elastic Theory) ดังนี้

$$G = Eu / 2(1+\nu)$$

โดยที่ G คือ โมดูลัสแรงเฉือนของดิน

Eu คือ โมดูลัสของดินแบบไม่ระบายน้ำ

ν คือ อัตราส่วนปัวซองของดินในสภาพไม่ระบายน้ำ $\nu = 0.5$

ในงานก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน ชินวุฒิ (2543) ได้วิเคราะห์การทรุดตัวด้วยโปรแกรมโดยวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์และทำการวิเคราะห์กลับ (Back Analysis) หาค่า Eu / Su ในดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็งชั้นแรกและเสนอค่าดังนี้

ดินเหนียวอ่อน (Soft Clay)	Eu / Su = 240
ดินเหนียวแข็งชั้นแรก (First Stiff Clay)	Eu / Su = 480

3.4.5 น้ำหนักอุโมงค์

การหาน้ำหนักของอุโมงค์จะพิจารณาอุโมงค์อุโมงค์แบบเนื้อเดียวกันทั้งวง(Homogenous Lining) ไม่คิดถึงรอยต่อระหว่างแต่ละชิ้นส่วนและพิจารณาอุมงค์แบบ Plane Strain คิดน้ำหนักต่อเมตร โดยหาค่าได้ดังนี้

$$W_{lining} = \gamma_c . (\pi . (Do^2 - Di^2) / 4 . b)$$

โดยที่

W_{lining} คือ น้ำหนักของอุโมงค์ต่อเมตร (kN)

γ_c คือ หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (kN/m^3)

Do , Di คือ เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกและภายในอุโมงค์(m)

b คือ ความลึกของอุโมงค์ = 1 เมตร

3.4.6 ลักษณะทางกายภาพของอุโมงค์

สมบัติทางกายภาพของอุโมงค์จะมีผลอย่างมากกับความสามารถในการรับแรงพฤติกรรมการเคลื่อนตัวและเสียรูปของอุโมงค์ โดยชิ้นส่วน (Segment) ที่ประกอบเป็นวงจะพิจารณาเป็นโครงสร้างแบบ Beam structure ที่มีพฤติกรรมแบบ Linear Elastic Material เนื่องจากเกิดการเสียรูปน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดอุโมงค์และพิจารณาอุโมงค์แบบ Plane Strain ซึ่งหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ดังนี้

โมดูลัสของคอนกรีต

$$Ec = 15210 (f'_c)^{0.5}$$

Moment of Inertia

$$I = bh^3 / 12$$

พื้นที่หน้าตัด

$$A = b (Do - Di)$$

โดยที่

Ec คือ ค่าโมดูลัสของคอนกรีต

f'_c คือ กำลังอัดของคอนกรีต (ksc)

I คือ Moment of Inertia (m^4)

b คือ ความกว้างของผนังอุโมงค์ (m)

h คือ ความหนาของผนังอุโมงค์ (m)

A คือ พื้นที่หน้าตัด (m^2)

Do คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกอุโมงค์ (m)

Di คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในอุโมงค์ (m)

3.5 แบบจำลองอุโมงค์

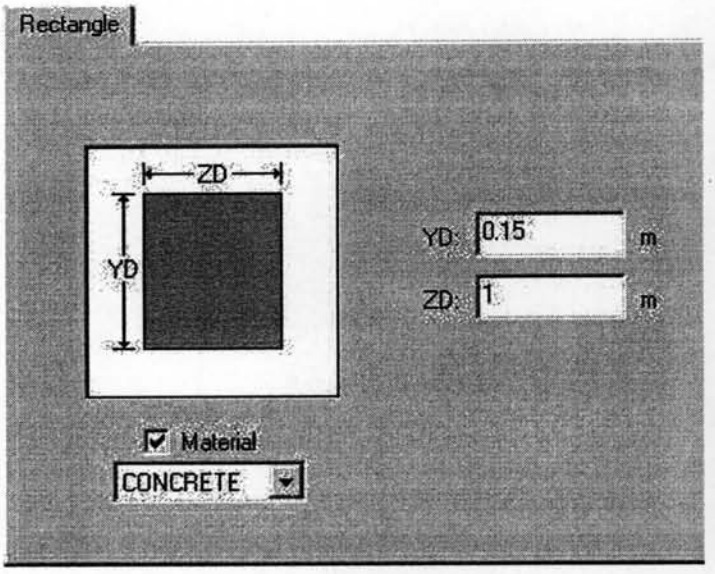
3.5.1 ลักษณะของแบบจำลองอุโมงค์

แบบจำลองของหน้าตัดอุโมงค์ได้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของอุโมงค์โดยเฉพาะบริเวณจุดต่อ(Joint) ของอุโมงค์ ด้วยโปรแกรม STAAD.Pro 2004 จะถูกสร้างขึ้นด้วยการประกอบกันของชิ้นส่วนอุโมงค์คอนกรีตเล็กๆ (Element) จำนวน 99 ชิ้น มีการกำหนดทิศทางของแรงซึ่งกำหนดอยู่ในระนาบแกนหลัก (Global coordinate system) และใช้หน่วยในการคำนวณเป็น SI Units โดยสร้างชิ้นส่วนดาดอุโมงค์เป็นคานคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 0.15 ม. ยาว 1.0 ม. โดยมีค่าคุณสมบัติของคอนกรีตของชิ้นส่วนอุโมงค์ตามตารางที่ 3.1 และลักษณะของหน้าตัดคานดังแสดงในรูปที่ 3.1

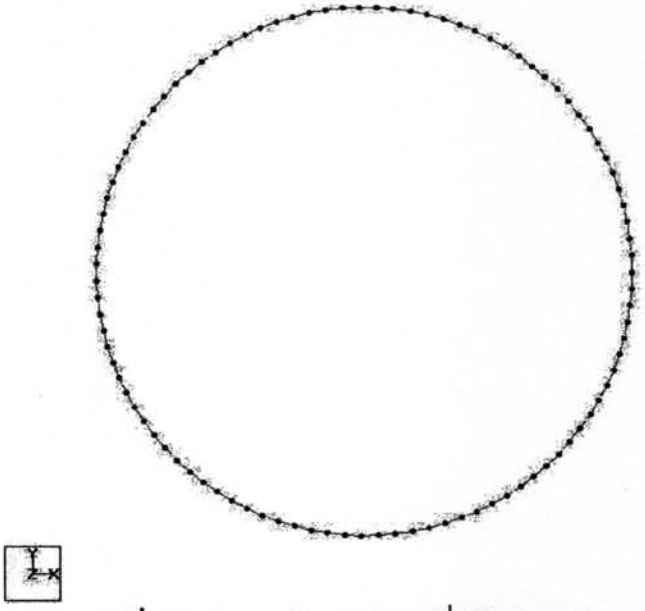
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของคอนกรีตของชิ้นส่วนอุโมงค์

Item	Description	Unit
γ_c	2.4	t/m^2
E_c	2.17×10^7	kN/m^2
I	2.81×10^{-4}	m^4
f_c'	203.5	ksc
ν_c	0.17	-
α	1.0×10^{-5}	-

หมายเหตุ : คุณสมบัติคอนกรีตตามมาตรฐาน ACI



รูปที่ 3.1 หน้าตัดคานที่ใช้เป็นชิ้นส่วนดาดอุโมงค์ในโปรแกรม



รูปที่ 3.2 แสดงหน้าตัดอุโมงค์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.5.2 จุดรองรับของแบบจำลองอุโมงค์

ขั้นตอนต่อไปของการสร้างแบบจำลองคือการกำหนดจุดรองรับ(support) ที่ตำแหน่งของของจุดต่อ(node)ของคานแต่ละชิ้นซึ่งจะกำหนดให้มีคุณสมบัติของจุดรองรับเป็น soil springs โดยมีลักษณะเป็น inclined support ทิศทางหันชี้เข้าไปตามรัศมีหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า radial springsดังแสดงในรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 โดยที่ค่าโมดูลัสแรงปฏิกิริยาของดิน (Modulus of subgrade reaction, ks) ได้มีการประมาณตามชนิดและคุณสมบัติของดินดังแสดงในตารางที่ 3.2 และค่า K (Spring constant) ที่เลือกใช้ในโปรแกรมได้แสดงในตารางที่ 3.3

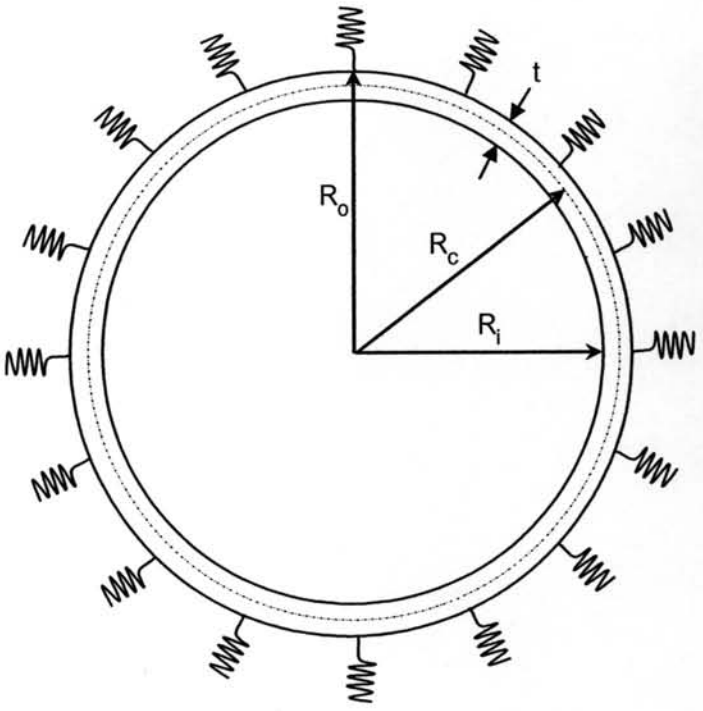
ตารางที่ 3.2 ค่าโมดูลัสแรงปฏิกิริยาของดิน (Modulus of subgrade reaction, ks)(Bowles,1996)

Range of values of modulus of subgrade reaction k_s
Use values as guide and for comparison when using approximate equations

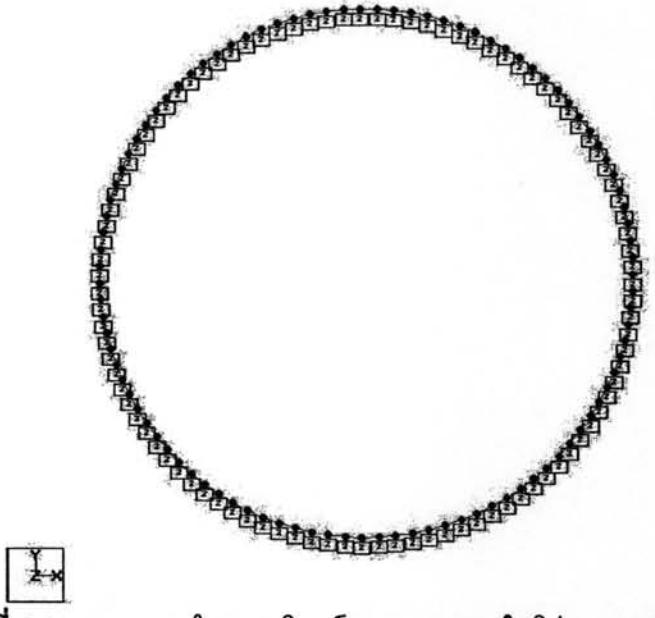
Soil	k_s, kcf	k_s, kN/m³
Loose sand	30–100	4800–16000
Medium dense sand	60–500	9600–80000
Dense sand	400–800	64000–128000
Clayey medium dense sand	200–500	32000–80000
Silty medium dense sand	150–300	24000–48000
Clayey soil:		
$q_u \leq 200$ kPa (4-ksf)	75–150	12000–24000
$200 < q_u \leq 400$ kPa	150–300	24000–48000
$q_u > 800$ kPa	>300	>48000

ตารางที่ 3.3 ค่า K ของ soil springs

K	ชนิดของดิน	Unit
3000	Dense sand	kN/m
1500	Medium clay	kN/m
500	Soft clay	kN/m



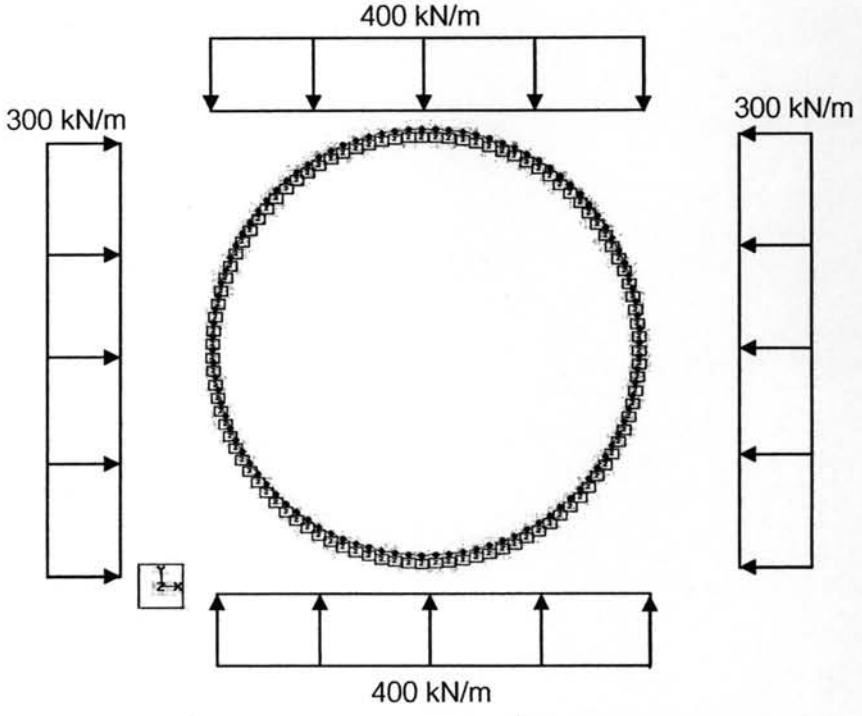
รูปที่ 3.3 แสดงแบบจำลองอุโมงค์และ support เป็น soil springs



รูปที่ 3.4 แสดงแบบจำลองอุโมงค์และ support ในโปรแกรม STAAD.Pro

3.5.3 แรงที่กระทำต่ออุโมงค์

แรงที่กระทำต่ออุโมงค์กำหนดให้เป็น Uniform Load กระทำทั้ง 4 ทิศทางโดยประมาณค่าแรงกระทำจากชั้นดินที่ความลึกประมาณ 15 - 20 เมตร ดังรูปที่ 3.5 เนื่องจากงานวิจัยนี้ให้ความสนใจต่อพฤติกรรมของ Joint ของอุโมงค์เป็นหลักจึงกำหนดค่าของแรงกระทำเป็นค่าเดียวกันตลอดและมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะของแรงที่กระทำต่ออุโมงค์

3.6 การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม STAAD.Pro

การวิเคราะห์โดยใช้โปแกรม STAAD.Pro เพื่อหาค่าโมเมนต์และค่าการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้น จะทำการวิเคราะห์ 3 กรณีโดยการเลือกชิ้นส่วนดาดอุโมงค์จำนวน 5 , 6 และ 7 ชิ้น แบ่งกระจายไปทั่วหน้าตัดอุโมงค์ แล้วทำการลดค่า Moment of Inertia (I) ของชิ้นส่วนเหล่านี้ลงตามตารางที่ 3.4 เมื่อทำการวิเคราะห์จะได้ค่าโมเมนต์และค่าการเคลื่อนตัวที่มุม(Node)ของแต่ละชิ้นส่วน

ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

Radius (m)	จำนวน Joint	K (kN/m)	I (%)
Rc	5	3000	100 ,80 , 60 , 40 ,20 , 10 , 5
		1500	100 ,80 , 60 , 40 ,20 , 10 , 5
		500	100 ,80 , 60 , 40 ,20 , 10 , 5
	6	3000	100 ,80 , 60 , 40 ,20 , 10 , 5
		1500	100 ,80 , 60 , 40 ,20 , 10 , 5
		500	100 ,80 , 60 , 40 ,20 , 10 , 5
	7	3000	100 ,80 , 60 , 40 ,20 , 10 , 5
		1500	100 ,80 , 60 , 40 ,20 , 10 , 5
		500	100 ,80 , 60 , 40 ,20 , 10 , 5

หมายเหตุ : ค่า Rc มีค่าเท่ากับ 1 , 2 และ 3 เมตร

: ค่า Moment of Inertia (I) ที่ 100% มีค่าเท่ากับ 2.81×10^{-4} m^4

: ค่า Ko ที่ใช้ทำการวิเคราะห์มีค่าเท่ากับ 0.5 และ 0.75 โดยทำการวิเคราะห์ที่ Ko = 0.75 เป็นหลัก ส่วน Ko = 0.5 จะทำการวิเคราะห์เพื่อแสดงผลเปรียบเทียบบางกรณี