

การพัฒนาเขตผลกระทบของอุโมงค์ส่งน้ำจากการขุดลึกข้างเคียง

Development of Influence zone of Water Supply Tunnel due to Nearby Deep Excavation

รักษศิริ สุขรักษ์¹ พรเกษม จงประดิษฐ์^{1,*} ทศพร แหม่มกล้า² สุรเดช เหมรัมย์กุล²

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

²การประปานครหลวง

Raksiri Sukkaruk¹ Pornkasem Jongpradist^{1,*} Tossaporn Yamklam² Suradech Haerumpakul²

¹Department of Civil Engineering Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology Thonburi

²Metropolitan Waterworks Authority

*Corresponding author E-mail: pornkasem.jon@kmutt.ac.th

Received: March 5, 2020 Revised: April 22, 2020 Accepted: April 30, 2020

บทคัดย่อ

การก่อสร้างอุโมงค์เกิดมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของประชากรในเขตเมืองใหญ่ ขณะเดียวกันการก่อสร้างพื้นที่ใต้ดินก็เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งการขุดดินลึกที่ใกล้เคียงกับอุโมงค์อาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของอุโมงค์ได้ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อที่จะพัฒนาเขตผลกระทบของอุโมงค์เนื่องจากการขุดลึกข้างเคียงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่ออุโมงค์ ได้แก่ ขนาดอุโมงค์, ระดับความลึกของการขุดและระยะห่างของงานขุดต่ออุโมงค์ ผลการศึกษาพบว่า ระดับความลึกของการขุดและระยะห่างของงานขุดต่ออุโมงค์ส่งผลสำคัญต่อ ค่าการเคลื่อนตัวและค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของอุโมงค์ งานวิจัยยังได้นำเสนอค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวและค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของอุโมงค์ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาเขตผลกระทบของอุโมงค์ส่งน้ำจากการขุดลึกข้างเคียงสำหรับเพื่อใช้ในการประเมินผลกระทบต่ออุโมงค์

คำสำคัญ: เขตผลกระทบ อุโมงค์ส่งน้ำ ไฟไนต์เอลิเมนต์ การศึกษาเชิงการแปรเปลี่ยนพารามิเตอร์ งานขุดดินลึก

Abstract

A number of tunnels are being and have been constructed in the major cities due to the demand from an increasing population. Meanwhile, the increased need for building in congested urban areas often requires the basement floor. Deep excavation in close vicinity to the existing tunnels has a potential to worsen the stability or serviceability of the tunnel. The objective of this study is to develop the influence zone for tunnels due to the nearby deep excavation. Series of finite element parametric study on tunnel behavior induced by nearby deep excavation is carried out. Several factors affecting the tunnel response including tunnel diameter, excavation depth and relative distance are considered in the analyses. The results reveal that the excavation depth and relative distance have a significant impact on the movement and safety factor of the tunnels. Finally, based on the relationship between tunnel movement and safety factor, this study suggests the influence zone of tunnels due to the nearby deep excavation which may be useful for tunnel owner to establish a guideline for permission of nearby construction of basement floor of a building.

Keywords: Influence zone, Water supply tunnels, Finite element, Parametric study, Deep excavation.

1. บทนำ

ปัจจุบันเครือข่ายอุโมงค์ส่งน้ำและท่อส่งน้ำในความดูแลของการประปานครหลวง (กปน.) ได้เพิ่มตามความเจริญของเมืองที่มากขึ้น โดยมากอุโมงค์ส่งน้ำ และท่อส่งน้ำได้สร้างในพื้นที่สาธารณะ เช่น ใต้ถนนหรือในพื้นที่เขตทาง ในขณะที่เดียวกันโครงสร้างพื้นฐานของหน่วยงานอื่นๆ ได้ขยายตัวใกล้สิ่งก่อสร้างของ กปน. ด้วย โดยที่เขตทางหรือพื้นที่สาธารณะในเมืองมีอยู่อย่างจำกัด จึงหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่การก่อสร้างใหม่ดังกล่าวจะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงหรือแม้แต่ติดกับอุโมงค์ส่งน้ำและท่อส่งน้ำของ กปน. ซึ่งอาจเกิดผลกระทบต่อการใช้งานและก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นกับอุโมงค์ส่งน้ำและท่อส่งน้ำได้

งานขุดดินลึก ถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ความสามารถในการใช้งานของอุโมงค์ด้อยลงหรือแม้แต่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุโมงค์ของ กปน. ซึ่งงานขุดดินลึกในเขตกรุงเทพฯ มีแนวโน้มที่มากขึ้นและลึกขึ้น [1-3] เนื่องจากพื้นที่ในเขตเมืองมีอยู่จำกัด งานขุดดินลึกที่ใกล้เคียงกับอุโมงค์เดิมทำให้เกิดผลกระทบโดยตรงในแง่การใช้งานหรือความปลอดภัยต่ออุโมงค์อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ จึงทำให้มีความสำคัญที่จะต้องประเมินประเด็นดังกล่าวเพื่อให้เจ้าของอุโมงค์มีแนวทางที่จะประสานงานกับเจ้าของโครงการที่กำลังก่อสร้างเพื่อมั่นใจว่าจะไม่มีผลกระทบต่ออุโมงค์หรือลดผลกระทบให้ไม่อยู่ในระดับที่มิอันตราย ซึ่งมีการศึกษาผลกระทบของงานขุดลึกต่ออุโมงค์ในอดีตจำนวนหนึ่ง เช่น การศึกษาพฤติกรรมจากกรณีศึกษาจริง [4], เครื่องทดสอบแบบหมุนเหวี่ยง [5], วิธีการเชิงวิเคราะห์ และการวิเคราะห์เชิงตัวเลข [6] จากการศึกษาดังกล่าว พบว่ามีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องทำการวิเคราะห์ผลกระทบจากงานขุดดินลึกในชั้นดินเหนียวอ่อนที่ใกล้กับอุโมงค์ รวมถึงต้องมีมาตรการในการลดค่าการเสียรูปของอุโมงค์ ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับค่าความแข็งแรงของชั้นผนังของอุโมงค์ อันส่งผลต่อการเสียรูปและบิดตัว

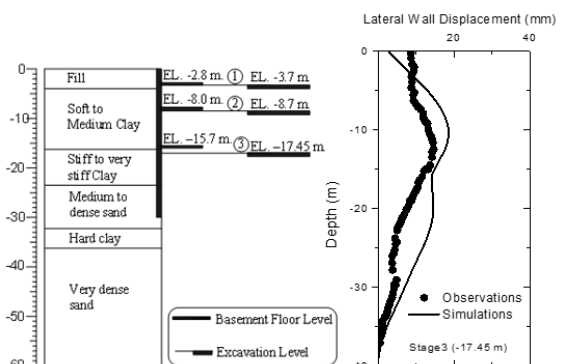
นอกจากนั้น การศึกษาเรื่องผลกระทบของงานขุดลึกต่ออุโมงค์ยังมีการศึกษาการแปรเปลี่ยนของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ (parametric study) [8]-[9] ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจากผลการศึกษา พบว่า ความยาวของการขุด (L),

ความกว้างของการขุด (B), ความลึกของการขุด (H_c), ขนาดอุโมงค์ (D_p), ตำแหน่งในแนวดิ่งและแนวราบของอุโมงค์ (C) ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการเคลื่อนตัวและแรงภายในผนังอุโมงค์ อย่างไรก็ตาม ข้อสรุปจากการศึกษาก่อนหน้านี้ยังคงเป็นในเชิงแนวโน้ม และเป็นความเข้าใจพื้นฐานถึงกลไกและปัจจัยอิทธิพลเป็นหลัก เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในทางวิศวกรรมจึงมีแนวคิดการพัฒนาเป็นแผนภาพอย่างง่ายหรือข้อเสนอแนะระยะปลอดภัย เช่น การพัฒนาเขตปลอดภัยกรณีเสาเข็มกระทบอุโมงค์ [10] ที่จะสามารถทำความเข้าใจและใช้งานสำหรับการประเมินเบื้องต้นที่สะดวกขึ้น

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบจากการก่อสร้างงานขุดดินลึกต่ออุโมงค์ส่งน้ำของ กปน. ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเริ่มจากการเปรียบเทียบความถูกต้องของการจำลองงานขุดดินลึก จากนั้นวิเคราะห์การแปรเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่พิจารณา และนำไปสู่การพัฒนาเขตผลกระทบของอุโมงค์ส่งน้ำจากการขุดลึกข้างเคียง

2. การเปรียบเทียบความถูกต้องของงานขุดดินลึก

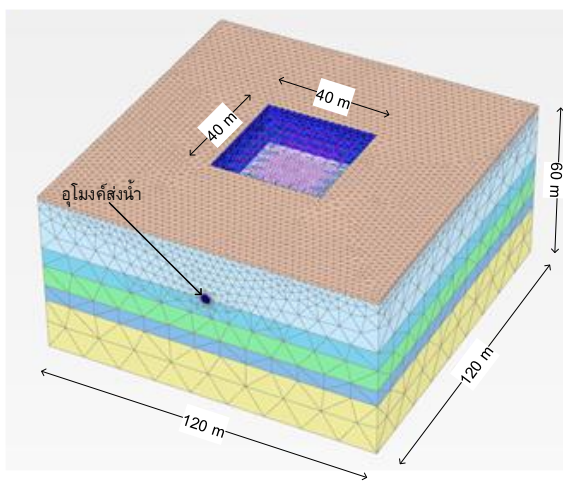
รูปที่ 1 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการตรวจวัดจริงในสนามการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าวัดดินบางซื่อ (Bang Sue MRTA Station Project) จากรูปที่ 1 พบว่าค่าการเคลื่อนตัวเคลื่อนตัวมีความใกล้เคียงกับผลตรวจวัดทั้งค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดและแนวโน้มการเคลื่อนตัวรวม โดยค่าคุณสมบัติของระบบโครงสร้างป้องกันดิน อุโมงค์ วิเคราะห์ รวมถึงชั้นดินที่พิจารณาและคุณสมบัติจะแสดงในหัวข้อที่ 3



รูปที่ 1 รายละเอียดการขุดดินลึกสถานีรถไฟฟ้าวัดดินบางซื่อ และผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวด้านข้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) กับผลการตรวจวัดจริงในสนาม

3. กรณีวิเคราะห์และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ศึกษา

การวิเคราะห์งานขุดดินลึกที่ส่งผลกระทบต่อแนวอุโมงค์ส่งน้ำประปาของ กปน. ในโครงการนี้จะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ (3D-FEM) ด้วยโปรแกรม Plaxis 3D เวอร์ชัน 2016 รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา ด้านกว้าง 120 เมตร ด้านยาว 120 เมตร และลึก 60 เมตร กรณีมีขนาดงานขุด 40x40 เมตร อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ฯ ซึ่งการกำหนดชั้นดินและค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองวัสดุอ้างอิงตามการศึกษาก่อนหน้านี้ [10-11] โดยกำหนดให้รูปแบบของแบบจำลองของดินถมและชั้นทรายเป็นแบบ Mohr coulomb (MC) และแบบจำลอง Hardening Soil Model with Small Strain (HSS) สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อน, ชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 2 ไฟไนต์เอลิเมนต์เมช (finite element mesh) ของแบบจำลอง

เนื่องจากอุโมงค์ส่งน้ำของ กปน. ที่ใช้ในปัจจุบันมีอยู่หลายขนาด เพื่อให้ครอบคลุมถึงการนำไปใช้ประโยชน์สูงสุดสำหรับ กปน. งานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกขนาดอุโมงค์เพื่อเป็นตัวแทน โดยพิจารณาจากทั้งขนาดและความยาวรวมที่ใช้ทั้งหมดจนถึงปัจจุบัน ดังนี้ 1) อุโมงค์ขนาดใหญ่ มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (D_T) = 4.45 เมตร 2) อุโมงค์ขนาดกลาง D_T = 3.20 เมตร 3) อุโมงค์ขนาดเล็ก D_T = 2.00 เมตร ตารางที่ 2 และ 3 แสดงค่าคุณสมบัติและค่าพารามิเตอร์สำหรับอุโมงค์ส่งน้ำประปา และรายละเอียดส่วนประกอบของอุโมงค์ส่งน้ำประปาทั้ง 3 ขนาด

ตารางที่ 1 ค่าคุณสมบัติและค่าพารามิเตอร์สำหรับชั้นดิน

Soil layer	Wea. crust	Soft clay	1 st Stiff clay	1 st Sand	2 nd Stiff clay	2 nd Sand
Depth	-1.5	-20	-27	-35	-41	-60
Material model	MC	HSS	HSS	MC	HSS	MC
E_{oed}^{ref} (MPa)	6	5	60	80	60	80
E_{50}^{ref} (MPa)	-	5	60	-	60	-
E_{ur}^{ref} (MPa)	-	15	180	-	180	-
γ_{sat} (kN/m ³)	17	16	18	20	18	20
ν'	0.32	0.33	0.33	0.3	0.33	0.3
ϕ' (°)	22	22	22	36	22	36
c (kPa)	8	5	18	0	18	0
m	-	1	1	-	1	-
p^{ref} (kPa)	-	100	65	-	95	-
G_0^{ref} (MPa)	-	10	170	-	350	-
$\gamma_{0.7}$	-	0.0001	0.0003	-	0.0003	-

*reference secant, oedometer, and unloading-reloading

moduli (E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} , E_{ur}^{ref}), power parameter (m)

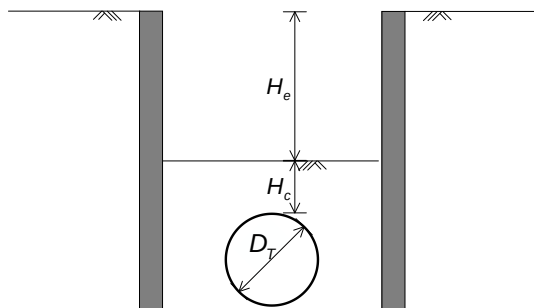
*saturated unit weight (γ_{sat}), Poisson's ratio (ν')

*cohesion (c), effective friction angle (ϕ')

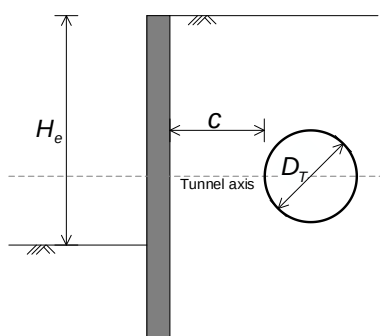
*initial shear modulus (G_0^{ref}) reference shear strain ($\gamma_{0.7}$)

การศึกษาผลกระทบจากการก่อสร้างงานขุดดินลึกจะแบ่งลักษณะปัญหาที่เกิดขึ้นออกเป็น 2 ลักษณะ คือ กรณีที่มีงานขุดดินลึกอยู่เหนืออุโมงค์ (excavation above tunnel) และกรณีมีงานขุดอยู่ด้านข้าง (excavation adjacent to tunnel) ดังแสดงในรูปที่ 3 การวิเคราะห์จะพิจารณากรณีอุโมงค์เปล่าไม่เติมน้ำ เพื่อพิจารณากรณีวิกฤติที่สุด เพราะการมีอยู่ของแรงดันน้ำภายในจะช่วยเสริมเสถียรภาพของ

คาดอุโมงค์ กรณีการศึกษาทั้งหมดแสดงในตารางที่ 4 โดยพิจารณาที่ตำแหน่งเมื่ออุโมงค์อยู่ใต้งานขุดดังแสดงตามรูปที่ 3 สำหรับอุโมงค์ส่งน้ำประปา 3 ขนาด และจะแสดงผลการวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าการเคลื่อนตัวและค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (SF) ที่คำนวณจากอัตราส่วนระหว่างกำลังที่พิจารณาทั้งกำลังรับแรงอัด และดึง ($14,800$ กับ $3,570 \text{ kN/m}^2$) ของผนังอุโมงค์ต่อความเค้นสูงสุดในแต่ละสภาพ



(ก) กรณีงานขุดเหนืออุโมงค์



(ข) กรณีงานขุดข้างอุโมงค์

รูปที่ 3 กรณีวิเคราะห์ในการศึกษานี้

งานขุดลึกในเขตกรุงเทพฯ มีความจำเป็นที่จะต้องใช้ระบบกำแพงกันดินที่มีความแข็งแรง เช่น ผนังรับแรง (Diaphragm wall) เนื่องจากมีแรงกระทำด้านข้างที่สูง โดยกำหนดให้ความยาวของผนังรับแรงเท่ากับ 35 เมตร ในทุกกรณีวิเคราะห์ ในการวิเคราะห์พิจารณากำแพงกันดินเป็นระบบ Braced cuts ซึ่งจะต้องมีการคำนวณค่าอัดแรงในค้ำยัน (Pre-loading) โดยปี 1969 Peck [12] ได้สรุปค่าแรงดันดินจากการขุด และแนะนำเส้นขอบเขตความดันดิน (Design pressure envelopes) สำหรับดินเหนียวอ่อนดังแสดงในสมการที่ 1

$$p = \gamma H \left(1 - \frac{4c}{\gamma H} \right); \text{for } \frac{4c}{\gamma H} > 1 \quad (1)$$

ตารางที่ 2 ค่าคุณสมบัติและค่าพารามิเตอร์สำหรับอุโมงค์ส่งน้ำประปา

Structure Type	Material Model	Unit weight (kN/m^3)	Elastic Modulus (kPa)	Poisson's ratio
Primary Lining	Linear Elastic	24	1.9×10^7	0.2
Secondary Lining	Linear Elastic	24	3.1×10^7	0.2
Steel Pipe	Linear Elastic	78.5	200×10^6	0.2
Diaphragm wall	Linear Elastic	24	3.1×10^7	0.2
Strut	Linear Elastic	78.5	2.1×10^8	0.2
Wailing	Linear Elastic	78.5	2.1×10^8	0.2

ตารางที่ 3 รายละเอียดส่วนประกอบของอุโมงค์ส่งน้ำประปา

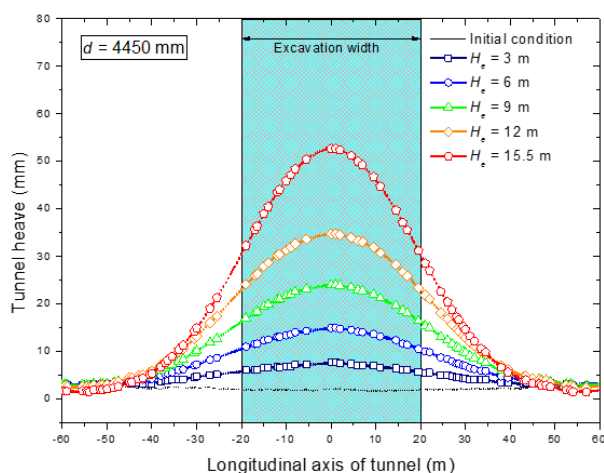
ขนาด อุโมงค์ O.D. (mm)	ความ หนา ท่อ เหล็ก (mm)	Concrete Segment Primary Lining (mm)	Infill Concrete Secondary Lining (mm)	Depth Surface – center (m)
2000	8	150	-	15
3200	14	150	185	17
4450	14	150	375	20

4. ผลการวิเคราะห์

รูปที่ 4 แสดงค่า heave (การดูดตัว) ของอุโมงค์ขนาดใหญ่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของอุโมงค์ ซึ่งค่า heave เกิดสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของงานขุดและมีค่ามากขึ้นตามระดับการขุดที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุด 42, 47 และ 51 มม. สำหรับอุโมงค์ขนาดเล็ก, กลางและใหญ่ตามลำดับ รูปที่ 5 แสดงลักษณะการเคลื่อนตัวของอุโมงค์ จากรูปพบว่าอุโมงค์จะเคลื่อนตัวในแนวตั้งขึ้นสู่ผิวดินโดยไม่มีการเคลื่อนตัวในแนวด้านข้าง

ตารางที่ 4 สรุปการวิเคราะห์และพัฒนาเขตพื้นที่ผลกระทบ
จากงานขุดดินลึก

กรณีอุโมงค์อยู่ใต้งานขุด	
ขนาดอุโมงค์ (มม.)	2000, 3200, 4450
ความลึกงานขุด, H_e (เมตร)	0 เมตร โดยขุดลึกถึงทุก ๆ 3 เมตร จนถึงระยะ $0.5D_T$ เหนือผนังบนอุโมงค์
กรณีอุโมงค์อยู่ข้างงานขุด	
ขนาดอุโมงค์ (มม.)	2000, 3200, 4450
ความลึกงานขุด, H_e (เมตร)	0 โดยขุดลึกถึงทุก ๆ 3 เมตร ถึง 24 เมตร
ระยะห่างในแนวราบจากงานขุด, C	$0.5D_T$ ถึง $5D_T$

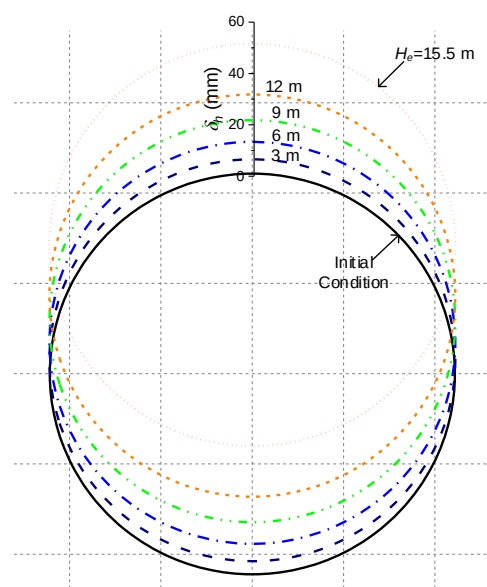


รูปที่ 4 ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง (Heave) ของอุโมงค์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของอุโมงค์ใหญ่

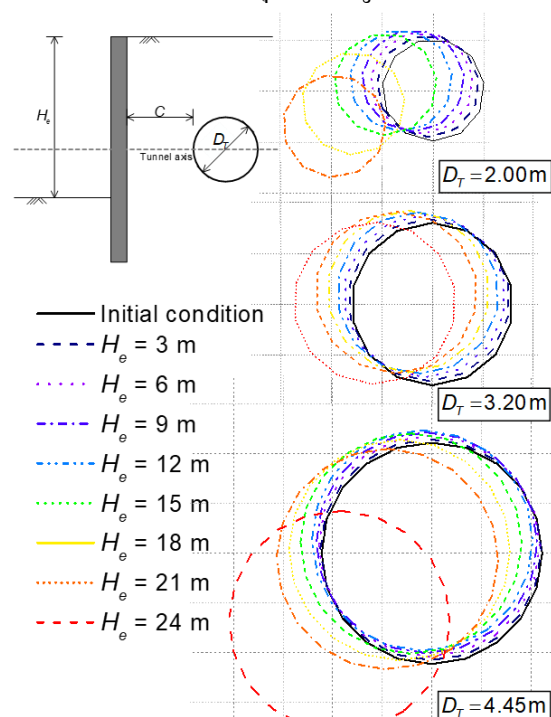
ส่วนการพิจารณาผลกระทบจากงานขุดดินลึกด้านข้าง กำหนดให้อุโมงค์อยู่ที่ระดับความลึก 15, 17 และ 20 เมตร สำหรับอุโมงค์ขนาดเล็ก, กลางและใหญ่ตามลำดับ พิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างในแนวราบจากงานขุด C กำหนดให้ระยะที่น้อยที่สุดเท่ากับ 1 เมตร โดยอุโมงค์ขนาดเล็กจะกำหนดระยะ C จนถึงระยะ $5D_T$ เพื่อให้ได้ระยะห่างที่มากพอที่อุโมงค์จะได้รับผลกระทบจากงานขุดที่ไม่มีนัยยะ

รูปที่ 6 แสดงการเคลื่อนตัวของอุโมงค์ทั้งสามขนาด เมื่อระยะ C เท่ากับ $1D_T$ พบว่า พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของอุโมงค์ทั้งหมดจะมีลักษณะที่เหมือนกัน คือ พฤติกรรมใน

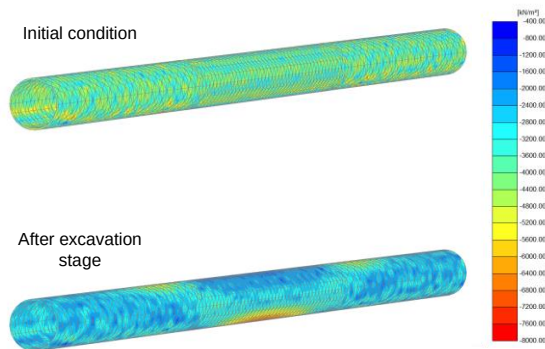
แนวราบนั้น อุโมงค์จะเคลื่อนตัวในแนวราบเข้าหางานขุด ตั้งแต่เริ่มงานขุดจนถึงระยะสุดท้ายของงานขุด สำหรับการเคลื่อนในแนวดิ่งนั้น อุโมงค์จะเคลื่อนตัวในทิศขึ้นสู่ผิวดิน เมื่อระดับงานยังไม่ถึงระดับผนังบนของอุโมงค์ แต่เมื่อระดับงานขุดลึกกว่าระดับความลึกของศูนย์กลางอุโมงค์แล้ว อุโมงค์จะเคลื่อนตัวลงด้วยค่าการเคลื่อนตัวที่สูงมาก



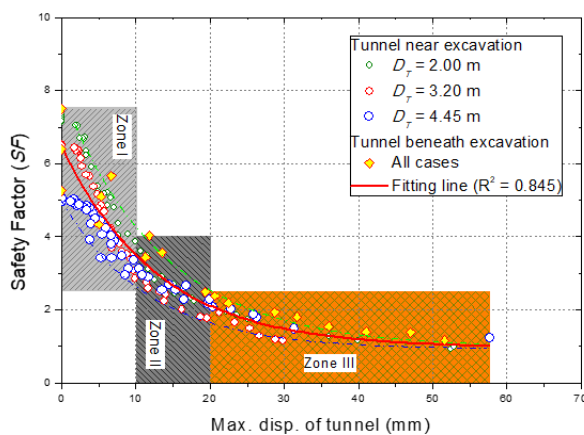
รูปที่ 5 การเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง (Heave) ตามแนวหน้าตัดของอุโมงค์ใหญ่



รูปที่ 6 การเคลื่อนตัวของอุโมงค์ที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากงานขุดด้านข้าง (การเคลื่อนตัว x 30 เท่า)



รูปที่ 7 ค่าการกระจายตัวของความเค้นในอุโมงค์ก่อนและหลังได้รับผลกระทบจากงานขุดลึก



รูปที่ 8 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความปลอดภัยและค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของทุกกรณีวิเคราะห์

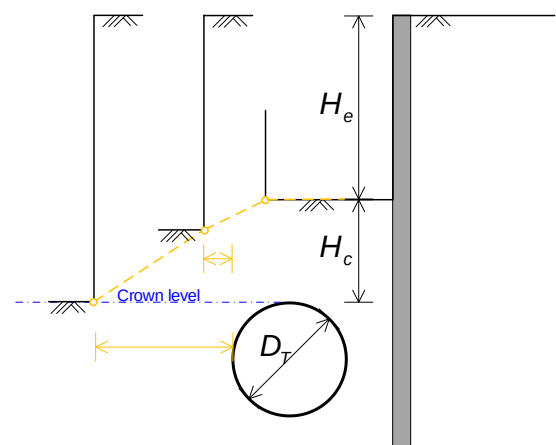
หากพิจารณาค่าแรงภายในที่เกิดขึ้นในผนังอุโมงค์ พบว่าค่า SF ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ H_c ซึ่งการศึกษานี้จะกำหนดค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ยอมรับได้ที่ 2.5 สำหรับอุโมงค์ทุกขนาด ร่วมกับข้อกำหนดการเคลื่อนตัวของอุโมงค์ของ Shanghai Municipal Standard (Shanghai Municipal Standards: Technical code for protection region of urban bridge and tunnels) ที่กำหนดค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ยอมรับได้เท่ากับ 20 มม. [4] ซึ่งปัจจัยที่ทำให้ค่า SF ลดลงชัดเจน คือการเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นอัด จากผลกระทบของงานขุด ดังแสดงในรูปที่ 7 ค่าการกระจายตัวของความเค้นในอุโมงค์ก่อนและหลังได้รับผลกระทบจากงานขุดลึก โดยช่วงก่อนงานขุดค่าความเค้นในอุโมงค์จะมีความใกล้เคียงกันตลอดความยาว ค่า compressive stress จะมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่ง Invert ของอุโมงค์ตามช่วงความกว้างของงานขุด

รูปที่ 8 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความปลอดภัยและค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของทุกกรณีวิเคราะห์พบว่า ข้อมูลมีความสัมพันธ์กัน ที่ค่า R^2 เท่ากับ 0.845 ซึ่งถือว่ายอมรับได้ โดยเมื่อกำหนดค่า SF ที่ยอมรับได้เท่ากับ 2.5 จะเกิดการเคลื่อนตัวตั้งแต่ 10 มม. ถึง 20 มม. ตามแสดงดังเส้นขอบเขตบน (เส้นประสีเขียว) เส้นขอบเขตล่าง (เส้นประสีน้ำเงิน) แนวคิดของการกำหนดระยะปลอดภัยจะพิจารณาถึงระดับผลกระทบ โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

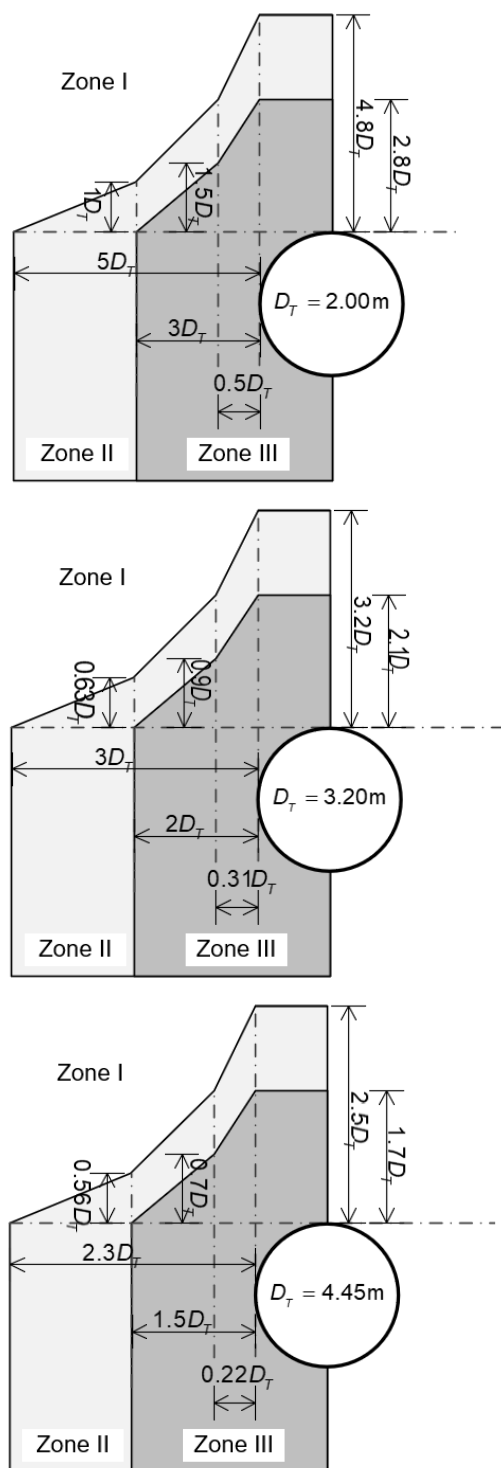
- เขตพื้นที่ 1 คือ เขตที่เล็กน้อยไม่ส่งผลกระทบต่อทั้งความเสียหายและความสามารถในการใช้งาน โดยค่า SF ต้องไม่น้อยกว่า 2.5 และค่าการเคลื่อนตัวน้อยกว่า 10 มม.
- เขตพื้นที่ 2 คือ เขตพื้นที่ ที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายแต่อาจส่งผลกระทบต่อความสามารถของการใช้งาน โดยมีเงื่อนไขเมื่อ ค่า SF น้อยกว่า 2.5 หรือค่าการเคลื่อนตัวมากกว่า 10 มม.
- เขตพื้นที่ 3 คือ เขตพื้นที่ ที่อาจก่อให้เกิดความเสียหาย โดยมีเงื่อนไขเมื่อ ค่าการเคลื่อนตัวมากกว่า 20 มม.

5. แนวคิดการพัฒนาเขตพื้นที่ผลกระทบ

รูปที่ 9 แสดงการกำหนดระยะปลอดภัยสำหรับงานขุดลึกกระทบอุโมงค์ มีแนวคิดลากเส้นเชื่อมระหว่างระยะที่ใกล้ที่สุดกับอุโมงค์ กล่าวคือ กรณีอุโมงค์ใต้งานขุดจะใช้ค่าระดับพื้นงานขุด และกรณีงานขุดข้างอุโมงค์จะใช้ค่าที่ตำแหน่งมุมล่างของงานขุดโดยพิจารณาดำแหน่งที่ขอบ D-wall ผังที่ใกล้กับอุโมงค์เป็นหลัก



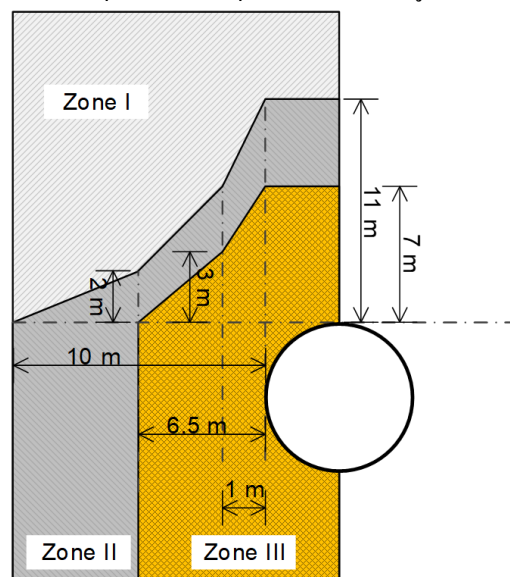
รูปที่ 9 แนวคิดในการการพัฒนาเขตพื้นที่ผลกระทบ



รูปที่ 10 ระยะปลอดภัย (Safe Clearance) สำหรับงานขุดดิน
ลึกลงอุโมงค์ทั้ง 3 ขนาด

และรูปที่ 10 แสดงการกำหนดระยะปลอดภัยสำหรับงานขุดลึกลงอุโมงค์ทั้งสามขนาดของ กปน. สำหรับงานขุดดินลึกลงอุโมงค์ทั้ง 3 ขนาด โดยครอบคลุมทั้งงานขุดเหนือและด้านข้างของอุโมงค์ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยทั้งเหนือและด้านข้างของอุโมงค์ทั้งสามขนาด

พบว่า มีความใกล้เคียงกัน เช่น การกำหนดระยะด้านของเขตพื้นที่ 3 ของอุโมงค์ทั้งสามขนาด มีค่า $3D_T$, $2D_T$ และ $1.5D_T$ สำหรับอุโมงค์เล็ก, กลางและใหญ่ ซึ่งจะมีระยะที่ใกล้เคียงกันที่ 6.5 เมตรโดยประมาณ จึงพอสรุปได้ว่า เขตพื้นที่ผลกระทบไม่ขึ้นกับขนาดของอุโมงค์ ดังนั้นการกำหนดระยะปลอดภัยร่วมกันสำหรับอุโมงค์ทั้งสามขนาดเมื่อพิจารณาจากขุดลึกลงอุโมงค์ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ระยะปลอดภัย (Safe Clearance) สำหรับงานขุดดิน
ลึกลงอุโมงค์ทุกขนาด

6. สรุป

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบจากการก่อสร้างงานขุดดินลึกลงอุโมงค์ส่งน้ำของ กปน. ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อนำไปสู่การพัฒนาเขตผลกระทบของอุโมงค์ส่งน้ำจากการขุดลึกลงข้างเคียง จากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ระดับของการขุดดินลึกลงส่งผลกระทบต่อ การเคลื่อนตัวและแรงภายในผนังอุโมงค์ โดยที่ heave เกิดสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของงานขุดและมีค่ามากขึ้นตามระยะ H_c ที่เพิ่มขึ้น โดยหากเปรียบเทียบค่า heave ต่อระยะเหนือผนังอุโมงค์ (H_c) ทั้งสามขนาดพบว่าที่ระยะ H_c ที่เท่ากัน อุโมงค์ใหญ่มีแนวโน้มให้ค่าการเคลื่อนตัวที่มากที่สุด
- 2) การพิจารณาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (SF) ผลกระทบจากการก่อสร้างงานขุดดินลึกลงข้าง

อุโมงค์ จะมีค่าลดลงตามความลึกของงานขุดและการเพิ่มขึ้นของระยะ C ซึ่งปัจจัยที่ทำให้ค่า SF ลดลง จะเหมือนกับกรณีงานขุดเหนืออุโมงค์ คือ การเพิ่มขึ้น ของค่า compressive และ tensile stresses จากผลกระทบของงานขุด โดยระยะ C ที่เพียงพอต่อค่า SF ที่มากกว่า 2.5 สำหรับอุโมงค์ขนาดเล็ก, กลางและใหญ่ เท่ากับ $3D_T$, $2D_T$ และ $1.5D_T$ ตามลำดับ

- 3) ค่าการเคลื่อนตัวของอุโมงค์และค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกัน
- 4) เขตพื้นที่ผลกระทบที่พัฒนาไม่ขึ้นกับขนาดของอุโมงค์

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณการประสานรหลวที่ได้ให้ทุนสำหรับงานวิจัยนี้ผ่านทุนวิจัยและนวัตกรรม ปี 2559

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Teparaksa and J. Teparaksa, "Displacement of diaphragm wall for very deep basement excavation in soft Bangkok clay," International Journal of GEOMATE, Vol.14(46), pp. 57-62, 2018.
- [2] W. Teparaksa, "Principal and Application of Instrument for the First MRTA Subway Project in Bangkok," The 5th Int. Symposium on Field Measurement in Geomechanics. Singapore, 1999.
- [3] C. Chhenga and S. Likitlersuang, "Underground excavation behaviour in Bangkok using three-dimensional finite element method," Computers and Geotechnics, Vol. 95, pp. 68-81, 2018.
- [4] Z. F. Hu, Z. Q. Yue, J. Zhou and L. G. Tham, "Design and construction of a deep excavation in soft soils adjacent to the Shanghai Metro tunnels," Canadian Geotechnical Journal, vol. 40(5), pp. 933-948, 2003.
- [5] X. Huang, H. Huang and D. Zhang, "Centrifuge modelling of deep excavation over existing tunnels," Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, Vol. 167(1), pp. 3-18, 2014.
- [6] R. Liang, T. Xia, M. Huang and C. Lin, "Simplified analytical method for evaluating the effects of adjacent excavation on shield tunnel considering the shearing effect," Computers and Geotechnics, Vol. 81, pp. 167-187, 2017.
- [7] R. Chen, F. Meng, Z. Li, Y. Ye and J. Ye, "Investigation of response of metro tunnels due to adjacent large excavation and protective measures in soft soils," Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 58, pp. 224-235, 2016.
- [8] X. Huang, HF. Schweiger and H. Huang, "Influence of Deep Excavations on Nearby Existing Tunnels," International Journal of Geomechanics ASCE, Vol. 13(2), pp. 170-180, 2013.
- [9] Z. Gang and W. Shao-wei, "Numerical analyses of influence of overlying pit excavation on existing tunnels," Journal of Central South University of Technology, Vol. 15(s2), pp. 69-75, 2008.
- [10] P. Jongpradist, T. Kaewsri, A. Sawatparnich, S. Suwansawat, S. Youwai, W. Kongkitkul and J. Sunitsakul, "Development of tunneling influence zones for adjacent pile foundation by numerical analyses," Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 34, pp. 96-109, 2013.
- [11] S. Waichita, P. Jongpradist and P. Jamsawang, "Characterization of deep cement mixing wall behavior using wall-toexcavation shape factor," Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 83, pp. 243-253, 2019.
- [12] R. B. Peck, "Deep excavations and tunneling in soft ground. Proceeding of 7th international conference on soil mechanics and foundation engineering," Mexico City: State of the Art Report, 1969.