

การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบลิมิตสำหรับเสถียรภาพอุโมงค์ โดยพิจารณาผลของแผ่นดินไหว Finite element limit analysis for stability of tunnels considering the effect of seismic force.

ชมพูนุท สืบสินสังจวงศ์^{1,*} และ ผศ.ดร.สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์²

^{1,2} สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: pocky.chompoonuch@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาเสถียรภาพของอุโมงค์หน้าตัดกลมในดินเหนียวที่ได้รับผลกระทบจากแรงแผ่นดินไหว เพื่อตรวจสอบความเสถียรภาพของอุโมงค์ในระบบสองมิติด้วยซอฟต์แวร์ OptumG2 ซึ่งใช้วิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบลิมิต ในการหาผลเฉลยค่าขอบเขตบนของอุโมงค์หน้าตัดกลม เนื่องจากวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ให้ความแม่นยำสูงและสามารถวิเคราะห์ปัญหาที่มีความซับซ้อนได้ สำหรับปัญหาที่จะศึกษาเป็นปัญหาของดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนที่ประกอบด้วย C และ ϕ โดยใช้แบบจำลอง Mohr-coulomb โดยแต่ละการทดสอบจะเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความลึกจากผิวดินถึงคาตอุโมงค์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์ และค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวในแนวราบ ผลเฉลยที่ได้จากการวิจัยนี้ แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวในแนวราบมากขึ้น จะส่งผลให้แรงดันภายในอุโมงค์หน้าตัดกลมเพิ่มขึ้น เพื่อรักษาเสถียรภาพของอุโมงค์ในขณะที่เกิดแผ่นดินไหว

คำสำคัญ: เสถียรภาพ, อุโมงค์หน้าตัดกลม, แผ่นดินไหว, ไฟไนต์เอลิเมนต์, แรงดัน

Abstract

This article presents a study on the stability of a circular tunnel in clay by considering the effect of pseudo-static seismic body force, were the finite element limit analysis software, namely OptumG2, is used to analyze the tunnel stability in a two-dimensional system. This finite element limit analysis can provide a great accuracy and can handle complicated problems. The shear strength soil including C and ϕ are considered by using the Mohr-coulomb model. The considered parameters are the cover-depth ratio and horizontal seismic coefficient. The findings of this investigation demonstrates that a higher horizontal seismic coefficient can cause an increase in the pressure inside the circular tunnel.

Keywords: Stability, Circular tunnel, Earthquake, Finite element, Pressure

1. คำนำ

ในประเทศไทยมีการเปลี่ยนแปลงระบบขนส่งมวลชนจากอดีตจนถึงปัจจุบันอย่างมาก ทั้งทางด้านความต้องการเดินทางของผู้คนที่อยู่ในกทม. โดยในเชิงปริมาณ และระยะทาง มีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการจราจรแออัด การก่อสร้างระบบขนส่งในชั้นใต้ดินเพิ่มจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ช่วยลดการแออัดของการจราจรได้

โดยการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินต้องใช้วิธีการออกแบบและก่อสร้าง ที่ควรคำนึงถึงการเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว หรือเกิดการสั่นไหวในพื้นที่ใต้ดิน ทั้งนี้การศึกษาเสถียรภาพของอุโมงค์ใต้ดินในกรณีที่เกิดเหตุแผ่นดินไหว จึงเป็นสิ่งสำคัญในขั้นตอนการออกแบบและก่อสร้างระบบขนส่งในชั้นใต้ดิน หากไม่มีการศึกษาเสถียรภาพของอุโมงค์ใต้ดินอย่างละเอียด อาจทำให้เกิดความเสี่ยงต่อความปลอดภัยของผู้ใช้ระบบขนส่งในชั้นใต้ดินและ ความเสี่ยงจากการพังทลายภายในอุโมงค์ใต้ดินที่อาจเกิดขึ้นได้

ในอดีตได้มีบทความที่ศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์หาเสถียรภาพของอุโมงค์ในดิน ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบการวิเคราะห์ลิมิต โดยมีเงื่อนไขที่แตกต่างกัน เช่น Sahoo and Kumar[1] ศึกษาหาหน่วยน้ำหนักของดินที่ทำให้อุโมงค์วงกลมยาวพัง ภายใต้แรงแผ่นดินไหว พิจารณาผลเฉลยแบบขอบเขตบน, Sahoo and Kumar[2] ศึกษาหาแรงดันภายในอุโมงค์วงกลมยาว ภายใต้แรงแผ่นดินไหว โดยกำหนดให้หน่วยน้ำหนักของดินคงที่ พิจารณาผลเฉลยแบบขอบเขตบน, Chakraborty and Kumar[3] ศึกษาหาหน่วยน้ำหนักของดินที่ทำให้อุโมงค์วงกลมยาวพัง ภายใต้แรงแผ่นดินไหว พิจารณาผลเฉลยแบบขอบเขตล่าง, Shiau and Al-Asadi[4] ศึกษาอุโมงค์วงกลมที่มีแรงดันภายในอุโมงค์แบบไม่ระบายน้ำ พิจารณาผลเฉลยทั้งขอบเขตบนและขอบเขตล่าง, ธนชนม์[5] ศึกษาอุโมงค์สี่เหลี่ยมที่มีแรงดันภายในอุโมงค์แบบระบายน้ำและไม่ระบายน้ำ พิจารณาผลเฉลยทั้งขอบเขตบนและขอบเขตล่าง เป็นต้น จากบทความที่กล่าวมาข้างต้น ได้นำมาประยุกต์ใช้กับบทความนี้ ทั้งด้านการจำลองหน้าตัด และวิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบการวิเคราะห์ลิมิต

2. วิธีการวิเคราะห์และแบบจำลองของอุโมงค์หน้าตัดกลม

ในการวิเคราะห์แบบจำลองนี้ จะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบการวิเคราะห์ลิมิต (Finite Element Limit Analysis) โดยวิธีนี้เป็นการใช้เทคนิคทางการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาด้านวิศวกรรมเทคนิคธรณี บทความนี้อาศัยหลักการของ ทฤษฎีลิมิตพลาสติก และทฤษฎี Pseudostatic Analysis

ทฤษฎีลิมิตพลาสติกแบ่งออกเป็น 2 ทฤษฎีบท คือ ทฤษฎีบทขอบเขตบน (Upper bound theorem) และ ทฤษฎีบทขอบเขตล่าง (Lower bound theorem) เป็นทฤษฎีที่สามารถจำกัดขอบเขตของผลเฉลยให้อยู่ในช่วงๆหนึ่ง และสามารถปรับปรุงแก้ไขการคำนวณหาผลเฉลยได้จนกระทั่งผลเฉลยเข้าใกล้กันมาก จึงทำให้ได้ผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยที่แท้จริงมากที่สุด โดยผลจากทฤษฎีทั้งสองนี้เองที่จะให้ผลเฉลยแบบขอบเขตบน (Upper bound) และขอบเขตล่าง (Lower bound)

ทฤษฎี Pseudostatic Analysis เป็นการวิเคราะห์ต่อการตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหว ที่กำหนดให้มวลดินต้องรับแรง body force จากแรงแผ่นดินไหว จะอยู่ในรูปของค่าความเร่งในแนวราบ (a_h) ซึ่งบทความนี้พิจารณาแค่ค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวในแนวราบ (k_h) หาได้จากค่าความเร่งในแนวราบ (a_h) ทหารกับค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (g) ดังแสดงในสมการที่ (1)

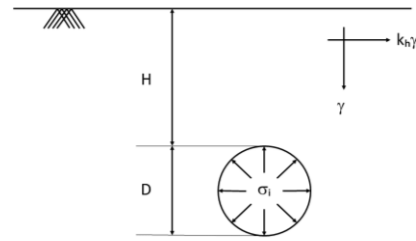
$$(a_h)/g = k_h \quad (1)$$

และค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวในแนวราบ (k_h) ยังมีค่าเท่ากับ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉื่อยในแนวราบ (α_h) ดังแสดงในสมการที่ (2) อีกด้วย

$$k_h = \alpha_h \quad (2)$$

การวิเคราะห์แบบจำลองอุโมงค์หน้าตัดกลม จะวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม OptumG2 เพื่อหาค่าแรงดันที่คอยรักษาเสถียรภาพของอุโมงค์ (σ_i) ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบการวิเคราะห์ลิมิตเฉพาะขอบเขตบน ร่วมกับการนำค่า k_h ที่เป็นสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวในแนวราบมาวิเคราะห์ด้วย

แบบจำลองของอุโมงค์หน้าตัดกลมในกรณีศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 1 จะใส่เงื่อนไขขอบเขตด้วยเครื่องมือแบบ Standard Fixity ใน OptumG2 โดยกำหนดให้ขอบเขตซ้ายสุดและขวาสุด เป็น Roller Supports ให้ขอบเขตล่างสุดเป็น Fixed Supports จากนั้นกำหนดจุดตรงกลาง เป็น Fixed Body และ แรงภายในวงกลม เป็น Multiplier Distributed ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 แบบจำลองของอุโมงค์หน้าตัดกลมในกรณีศึกษา



รูปที่ 2 แบบจำลองของอุโมงค์หน้าตัดกลม ในโปรแกรม OptumG2

กำหนดให้ Materials ในโปรแกรมเป็น Mohr-coulomb , Element Type เป็น Upper bound และให้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 1 ซึ่งผลเฉลยที่ได้จากโปรแกรม คือ แรงดันต่อแรงยึดเหนี่ยวของดิน (σ_i/c)

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ในโปรแกรม OptumG2

Parameters	Values
H/D	2, 3, 4, 5
D	1
ϕ	20°, 25°, 30°, 35°
k_h	0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4
γ	0, 1, 2, 3
c	1

H/D คือ อัตราส่วนความลึกจากผิวดินถึงดาดอุโมงค์ ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม

ϕ คือ มุมเสียดทานภายในของดิน

k_h คือ ค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวในแนวราบ

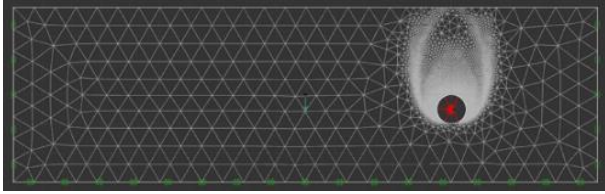
γ คือ หน่วยน้ำหนักของดิน

c คือ ค่าแรงยึดเหนี่ยวของดิน

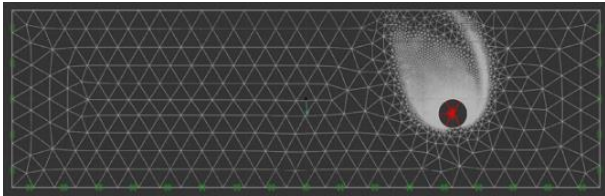
σ_i คือ แรงดันภายในอุโมงค์

3. ผลการวิเคราะห์

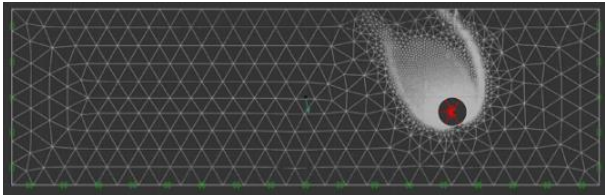
3.1 การพัฒนาโครงข่าย (Adaptive Mesh)



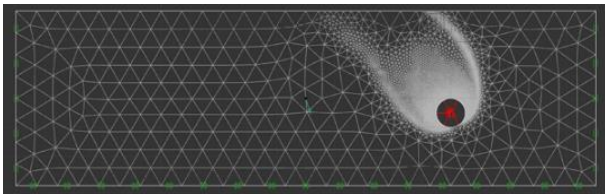
รูปที่ 3.1 $H/D = 3, \varnothing = 20^\circ, \gamma D/c = 3, k_h = 0$



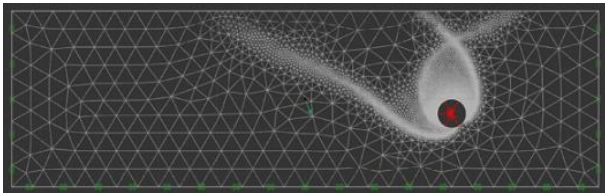
รูปที่ 3.2 $H/D = 3, \varnothing = 20^\circ, \gamma D/c = 3, k_h = 0.1$



รูปที่ 3.3 $H/D = 3, \varnothing = 20^\circ, \gamma D/c = 3, k_h = 0.2$



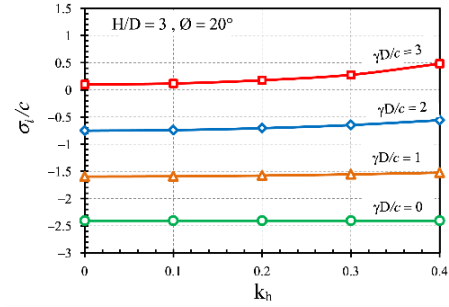
รูปที่ 3.4 $H/D = 3, \varnothing = 20^\circ, \gamma D/c = 3, k_h = 0.3$



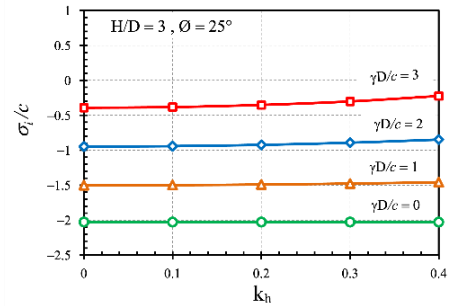
รูปที่ 3.5 $H/D = 3, \varnothing = 20^\circ, \gamma D/c = 3, k_h = 0.4$

การวิเคราะห์รูปที่ 3.1 - 3.5 ผลการพัฒนาโครงข่าย (Adaptive Mesh) ที่ได้จากโปรแกรม OptumG2 ในกรณีที่มี $H/D = 3, \varnothing = 20^\circ$ และค่า $\gamma D/c = 3$ เท่ากัน แตกต่างกันเพียงค่า k_h จะถูกนำมาเปรียบเทียบกันในการเปรียบเทียบรูปที่ 3.1 - 3.5 พบว่า เอลิเมนต์บริเวณปลายด้านซ้ายจะขยายตัวออก ตามลำดับของค่า k_h ที่เพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวในแนวราบ (k_h) เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ขอบเขตของการวิบัติขยายตัวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

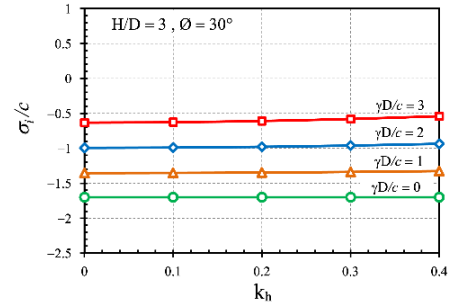
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง σ_i/c และ k_h



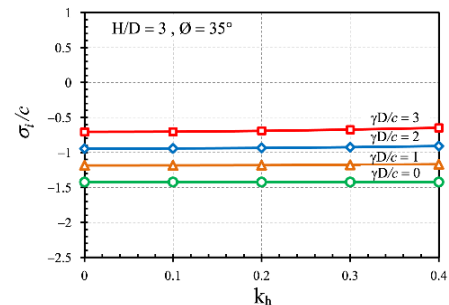
รูปที่ 4.1 $H/D = 3, \varnothing = 20^\circ$



รูปที่ 4.2 $H/D = 3, \varnothing = 25^\circ$



รูปที่ 4.3 $H/D = 3, \varnothing = 30^\circ$



รูปที่ 4.4 $H/D = 3, \varnothing = 35^\circ$

3.2.1 รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง σ_i/c และ k_h ในกรณีที่มี $H/D = 3$ และ $\varnothing = 20^\circ$

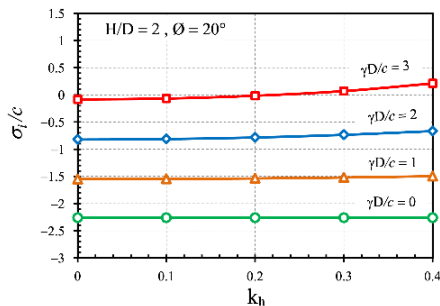
เมื่อพิจารณากรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า $\gamma D/c$ จากค่า 0 - 3 พบว่าค่า σ_i/c จะแปรผันตามค่า $\gamma D/c$ ที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ เมื่อค่า $\gamma D/c$ เพิ่มขึ้น

ค่า σ_r/c จะเพิ่มขึ้นตาม เป็นผลมาจาก ค่า γ ที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีแรงดันกดทับอุโมงค์เพิ่มขึ้น จึงต้องทำให้ค่า σ_r มากขึ้นเพื่อรักษาเสถียรภาพของอุโมงค์ไว้

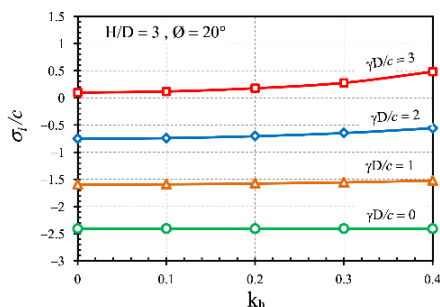
เมื่อพิจารณากรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า k_h จากค่า 0 - 4 พบว่า ค่า σ_r/c จะแปรผันตามค่า k_h ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความรุนแรงของการเกิดแผ่นดินไหว จึงต้องทำให้ค่า σ_r เพิ่มขึ้นตามค่า k_h เพื่อรักษาเสถียรภาพของอุโมงค์ไว้

3.2.2 รูปที่ 4.1 - 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง σ_r/c และ k_h ในกรณีที่มี $H/D = 3$ และ $\theta = 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ และ 35° ตามลำดับ

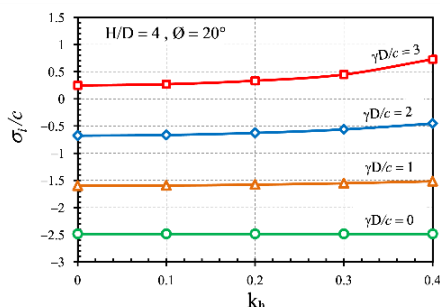
จากการพิจารณาพบความแนวโน้มค่า σ_r/c จะแปรผันตามค่า k_h และ $\gamma D/c$ สำหรับทุกค่า θ สำหรับกรณี $\gamma D/c = 0$ และ 1 ค่า σ_r/c จะคงที่เมื่อค่า θ เพิ่มขึ้น ในขณะที่ $\gamma D/c = 2$ และ 3 ค่า σ_r/c จะลดลง เมื่อค่า θ เพิ่มขึ้น กล่าวคือ ค่ามุมเสียดทานภายในเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันที่ใช้ในการรักษาเสถียรภาพอุโมงค์จะลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความสามารถในการรับแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวของดินที่เพิ่มขึ้นตามค่ามุมเสียดทานภายใน



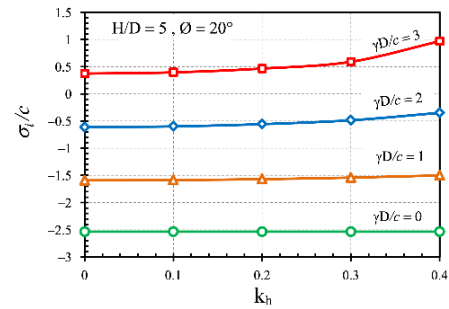
รูปที่ 4.5 $H/D = 2, \theta = 20^\circ$



รูปที่ 4.6 $H/D = 3, \theta = 20^\circ$



รูปที่ 4.7 $H/D = 4, \theta = 20^\circ$



รูปที่ 4.8 $H/D = 5, \theta = 20^\circ$

3.2.3 รูปที่ 4.5 - 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง σ_r/c และ k_h ในกรณีที่มี $\theta = 20^\circ$ และ $H/D = 2, 3, 4$ และ 5 ตามลำดับ

จากการพิจารณาพบว่า แนวโน้มค่า σ_r/c จะแปรผันตามค่า k_h และ $\gamma D/c$ สำหรับทุกค่า H/D สำหรับกรณี $\gamma D/c = 0$ และ 1 ค่า σ_r/c จะคงที่เมื่อค่า H/D เพิ่มขึ้น ในขณะที่ $\gamma D/c = 2$ และ 3 ค่า σ_r/c จะเพิ่มขึ้น เมื่อค่า H/D เพิ่มขึ้น กล่าวคือ ค่าความลึกแปรผันกับน้ำหนักรวมของดิน เมื่อความลึกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุโมงค์ต้องรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ทำให้แรงดันภายในอุโมงค์ต้องเพิ่มเพื่อรักษาเสถียรภาพของอุโมงค์

4. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอการหาเสถียรภาพของอุโมงค์หน้าตัดกลมภายในดินเหนียว เมื่อเกิดแรงแผ่นดินไหว มีการวิเคราะห์และจำลองด้วยโปรแกรม OptumG2 โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบการวิเคราะห์ลิเมิตด้วยขอบเขตบน ในแบบจำลองจะกำหนดให้ค่าวัสดุแบบ Mohr-Coulomb อัตราส่วนความลึกจากผิวดินถึงตาดอุโมงค์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม (H/D) = 2, 3, 4 และ 5 เส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม (D) = 1 มุมเสียดทานภายในของดิน (θ) = $20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ และ 35° ค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวในแนวราบ (k_h) = 0, 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 หน่วยน้ำหนักของดิน (γ) = 0, 1, 2 และ 3 ค่าแรงยึดเหนี่ยวของดิน (c) = 1 ผลเฉลยจะแสดงในค่าแรงดันต่อแรงยึดเหนี่ยวของดิน (σ_r/c) ซึ่งผลเฉลยที่ได้ ได้นำเสนอในรูปแบบผลการพัฒนาโครงข่าย และรูปแบบกราฟ

จากการวิเคราะห์ผลเฉลยในรูปแบบการพัฒนาโครงข่าย (Adaptive Mesh) ที่กำหนดให้ $H/D = 3, \theta = 20^\circ, \gamma D/c = 3$ เปรียบเทียบกับค่า $k_h = 0, 0.1, 0.2, 0.3$ และ 0.4 สรุปได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แผ่นดินไหวในแนวราบ (k_h) เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขอบเขตของการวิบัติขยายตัวเพิ่มขึ้นเช่นกัน

จากการวิเคราะห์ผลเฉลยในรูปแบบกราฟ ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง σ_r/c และ k_h ได้ทำการเปรียบเทียบผลเฉลย ซึ่งกำหนดให้ตัวแปร 3 ตัวที่จะมีค่าเพิ่มขึ้น คือ 1. หน่วยน้ำหนักของดิน (γ) 2. มุมเสียดทานภายในของดิน (θ) และ 3. ความลึกจากผิวดินถึงตาดอุโมงค์ (H) สรุปได้ว่า ค่ามุมเสียดทานภายใน แปรผกผันกับค่าแรงดันภายในอุโมงค์ เป็นผลมาจากความสามารถในการรับแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวของดินที่เพิ่มขึ้นตามค่ามุมเสียดทานภายใน ทำให้แรงดันภายในอุโมงค์มีค่าลดลง

ซึ่งแตกต่างกับค่าหน่วยน้ำหนักของดิน และค่าความลึก ที่แปรผันตรงกับแรงดันภายในอุโมงค์ เนื่องจากอุโมงค์ต้องรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ทำให้แรงดันภายในอุโมงค์ต้องเพิ่มเพื่อรักษาเสถียรภาพของอุโมงค์

5. บทสรุป

- [1] Jagdish Prasad Sahoo and Jyant Kumar (2012). *Seismic stability of a long unsupported circular tunnel*. Computers and Geotechnics, 1 May 2012.
- [2] Jagdish Prasad Sahoo and Jyant Kumar (2014). *Stability of a circular tunnel in presence of pseudostatic seismic body forces*. Tunnelling and Underground Space Technology, 15 April 2014.
- [3] Debarghya Chakraborty and Jyant Kumar (2013). *Stability of a long unsupported circular tunnel in soils with seismic forces*. Nat Hazards (2013) 68:419-431, 18 March 2013.
- [4] Jim Shiau and Fadhil Al-Asadi (2021). *Revisiting Circular Tunnel Stability Using Broms and Bennermarks' Original Stability Number*. Int J. Geomech., 2021, 21(5): 06021009.
- [5] ธนชนม์ พรหมวิชัย (2021). *การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบลิมิตสำหรับเสถียรภาพของอุโมงค์สี่เหลี่ยม, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 20 กรกฎาคม 2564.*