

## ผลกระทบของรอยต่อต่อผลตอบสนองของอุโมงค์แบบชิ้นส่วนประกอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

### THE EFFECT OF JOINT ON RESPONSE OF TUNNEL SEGMENTAL LINING BY FINITE ELEMENT METHOD

พงศกร พรนิพนธ์วิทยา<sup>1</sup>, พัฒนศักดิ์ ชัยพรธนา<sup>2</sup>, ชนา พุทธนานนท์<sup>1,\*</sup>, พรเกษม จงประดิษฐ์<sup>1</sup> และ โอโชค ต้วงโสน<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, วิทยาเขตสกลนคร, สกลนคร, ประเทศไทย

<sup>3</sup> วิศวกรอุโมงค์, บริษัทวิศวกรรมธรณีและฐานราก จำกัด, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

\*Corresponding author address: chana.put13@gmail.com

#### บทคัดย่อ

เป็นที่ทราบกันว่าการประกอบชิ้นส่วนผนังอุโมงค์เข้าด้วยกันนั้นถูกเชื่อมด้วยสลักเกลียวที่บริเวณรอยต่อของผนังอุโมงค์ ซึ่งพฤติกรรมรอยต่อของผนังอุโมงค์มีความสำคัญอย่างมากต่อสมรรถนะโดยรวมของโครงสร้างผนังอุโมงค์ ในกรณีที่โครงสร้างผนังอุโมงค์ได้รับผลกระทบอาจส่งผลให้เกิดการเปิดอ้าของรอยต่อทำให้โครงสร้างผนังอุโมงค์เกิดความเสียหายได้ เพื่อความเข้าใจสำหรับการป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างผนังอุโมงค์ในอนาคต บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์พฤติกรรมของรอยต่อของอุโมงค์แบบชิ้นส่วนประกอบด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ แม้ว่าจะมีการศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อที่ถูกยึดกันด้วยสลักเกลียวจะได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย แต่มีการศึกษาเพียงเล็กน้อยที่ตรวจสอบผลวิเคราะห์ด้วยการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในสนาม ในกรณีศึกษาที่แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการพัฒนาแบบจำลองรอยต่อของโครงสร้างผนังอุโมงค์โดยใช้แบบจำลองสปริงสำหรับเป็นตัวแทนสลักเกลียวที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของโครงสร้างผนังอุโมงค์ โดยพิจารณาพฤติกรรมของสปริงทั้งรูปแบบฮิสเทรีติกเชิงเส้น และฮิสเทรีติกไม่เชิงเส้น นอกจากนี้แบบจำลองรอยต่อโครงสร้างผนังอุโมงค์ได้รับการตรวจสอบความถูกต้อง โดยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแบบเท่าขนาดจริงในห้องปฏิบัติการของการศึกษาที่ผ่านมา จากผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลองสปริงที่ได้นำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษานี้มีความเหมาะสมสำหรับเป็นตัวแทนของสลักเกลียว นอกจากนี้แบบจำลองสปริงแบบฮิสเทรีติกไม่เชิงเส้นให้พฤติกรรมที่ใกล้เคียงผลการทดสอบมากกว่าแบบจำลองสปริงฮิสเทรีติกเชิงเส้นโดยพิจารณาถึงความเครียดที่เกิดขึ้นที่สลักเกลียว, การเปิดอ้าของรอยต่อของโครงสร้างผนังอุโมงค์, แรงภายในที่เกิดขึ้นที่โครงสร้างผนังอุโมงค์ และพฤติกรรมการเสียรูปของโครงสร้างผนังอุโมงค์

**คำสำคัญ:** โครงสร้างผนังอุโมงค์, รอยต่อของโครงสร้างผนังอุโมงค์, สลักเกลียว, การเปิดอ้าของรอยต่อ, วิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

#### Abstract

It is known that the tunnel lining segments are connected by bolts as the joints to form tunnel lining. The overall performance of the tunnel lining is thus significantly affected by the joints. In the event that the tunnel lining is highly affected, opening of joints can lead to leakage causing damage to the tunnel structure. This article presents an analysis of joint behavior by finite element method (FEM). Although studies of the behavior of segmental joints have received widespread attention, there are only few studies verify their analysis results with the field test results. In this study, the importance of the development of the joint model for the tunnel lining is demonstrated, adopting linear elastic and nonlinear elastic spring models. Joint model by spring model is validated by comparing the obtained results with the full-scale test results. The results indicate the spring model is suitable for representing bolts. In addition, use of non-linear elastic spring can provide close behavior to the full-scale test results than the use of linear elastic spring model for all considered results involving the strain of the bolts, the opening of joint, and the deformation behavior of the tunnel structure.

**Keywords:** Tunnel lining, Joint of tunnel lining, Bolt, opening joint, Finite element analysis

#### 1. บทนำ

ปัจจุบัน โครงสร้างอุโมงค์ใต้ดินสำหรับระบบขนส่งมวลชนเป็นสิ่งที่ต้องการอย่างมากเนื่องด้วยข้อจำกัดของพื้นที่ในเขตชุมชนเมือง โดยที่รูปแบบอุโมงค์ที่นิยมก่อสร้างในชั้นดินอ่อนคืออุโมงค์แบบชิ้นส่วนประกอบ ซึ่งเสถียรภาพของอุโมงค์แบบชิ้นส่วนประกอบนั้นขึ้นอยู่กับความคงทนและแข็งแรงของรอยต่อระหว่างชิ้นส่วนผนัง

อุโมงค์ (Joint) โดยที่ชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ในแต่ละวงแหวนและระหว่างวงแหวนอุโมงค์จะถูกเชื่อมกันกันด้วยสลักเกลียว (Bolt) จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การเคลื่อนตัวของโครงสร้างอุโมงค์สามารถเกิดได้จากหลายปัจจัย [1] อาทิเช่น การอัดตัวคาน้ำของดินบริเวณรอบๆ โครงสร้างอุโมงค์, การก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน (เช่น ฐานรากเสาเข็ม) ข้างเคียงโครงสร้างอุโมงค์ เป็นต้น เมื่อองค์

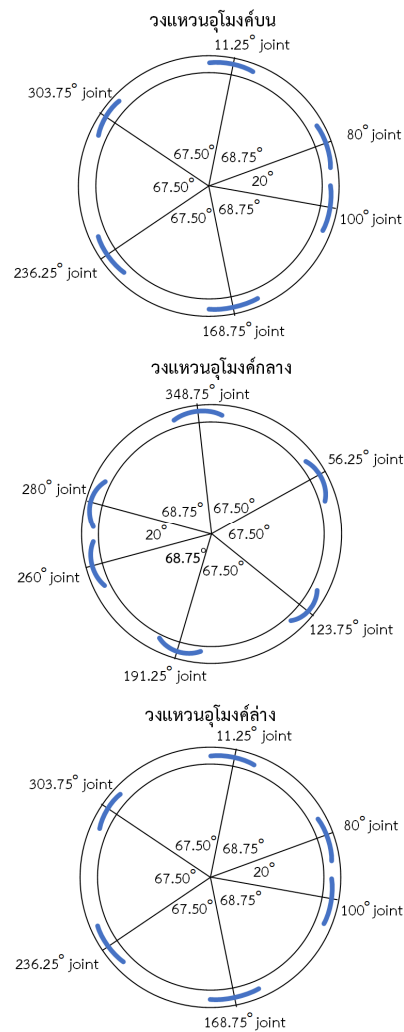
อาคารถ่ายเทน้ำหนักลงสู่เสาเข็มซึ่งอยู่ข้างเคียงโครงสร้างอุโมงค์อาจส่งผลให้ชั้นส่วนผนังอุโมงค์เกิดการบิด (Distortion) [2] มากไปกว่านั้นยังส่งผลให้เกิดการเปิดอ้ารอยต่อระหว่างชั้นส่วนผนังอุโมงค์เนื่องจากการที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นส่วนผนังอุโมงค์มีความแข็ง และความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดที่น้อยกว่าชั้นส่วนผนังอุโมงค์ [3] และอาจเป็นผลให้เกิดการรั่วซึมของน้ำผ่านรอยต่อระหว่างชั้นส่วนผนังอุโมงค์ส่งผลให้โครงสร้างอุโมงค์ได้รับความเสียหายและนำไปสู่การสูญเสียสภาพการให้บริการ (Loss of Serviceability) [4] ดังนั้นเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับโครงสร้างอุโมงค์ ดังนั้นการวิเคราะห์รอยต่อระหว่างชั้นส่วนผนังอุโมงค์จึงมีความสำคัญ โดยที่งานวิจัยในอดีตได้ทำการศึกษาพฤติกรรมรอยต่อระหว่างชั้นส่วนผนังอุโมงค์ด้วยวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยจำลองสลักเกลียวในรูปแบบชิ้นส่วนของแข็ง (Solid Element) [5] - [7] แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดบางประการสำหรับการวิเคราะห์เชิงตัวเลขทำให้มีงานวิจัยบางงานเสนอการจำลองรอยต่อระหว่างชั้นส่วนผนังอุโมงค์โดยใช้แบบจำลองสปริงสำหรับเป็นตัวแทนของสลักเกลียว [8] แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่ได้ดำเนินการสอบเทียบความถูกต้องแบบจำลองสปริงกับผลการตรวจวัดในสนามหรือผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การศึกษานี้เสนอวิธีการจำลองสลักเกลียวด้วยแบบจำลองสปริงสำหรับยึดระหว่างชั้นส่วนผนังอุโมงค์ผนังแต่ละชั้นภายในหนึ่งวงแหวนอุโมงค์ และยึดระหว่างวงแหวนอุโมงค์ โดยพิจารณาพฤติกรรมของสปริงทั้งรูปแบบอีลาสติกเชิงเส้น (Linear Elastic) และอีลาสติกไม่เชิงเส้น (Nonlinear Elastic) นอกจากนี้ยังทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสปริงที่นำเสนอโดยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบโครงสร้างผนังอุโมงค์เท่าขนาดจริงในห้องปฏิบัติการ [9] โดยที่การศึกษานี้จะพิจารณาความถูกต้องของแบบจำลองสปริงผ่านการเปรียบเทียบการเสียรูป (Deformation) ของวงแหวนอุโมงค์, แรงอัด (Axial Force) และโมเมนต์ดัด (Moment) ที่เกิดขึ้นภายในวงแหวนอุโมงค์, การเปิดอ้าระหว่างรอยต่อชั้นส่วนผนังอุโมงค์ (Joint Opening) และความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นภายในสลักเกลียว

## 2. เปรียบวิธีการศึกษา

### 2.1. แบบจำลองโครงสร้างอุโมงค์ทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบโครงสร้างผนังวงแหวนอุโมงค์เท่าขนาดจริง (Full-Scale Model Test) ในห้องปฏิบัติการจากงานวิจัยก่อนหน้า [9] ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสปริงที่นำเสนอในการศึกษารุ่นนี้สำหรับเป็นตัวแทนสลักเกลียว (Bolt) ยึดระหว่างผนัง



รูปที่ 1 ลักษณะแบบจำลองของโครงสร้างผนังอุโมงค์และตำแหน่งของสลักเกลียว [9]

ชั้นส่วนผนังอุโมงค์แต่ละชั้นภายในหนึ่งวงแหวนอุโมงค์ และยึดระหว่างวงแหวนอุโมงค์ ลักษณะของโครงสร้างผนังวงแหวนอุโมงค์ทดสอบในห้องปฏิบัติการประกอบไปด้วยวงแหวนอุโมงค์จำนวน 3 วงแหวน (ดูรูปที่ 1) แต่ละวงแหวนอุโมงค์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 6.2 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5.5 เมตร และมีความหนา 0.35 เมตร โดยที่ความกว้างของวงแหวนอุโมงค์ชั้นส่วนบนและล่างมีขนาด 0.6 เมตร ในขณะที่ความกว้างของวงแหวนอุโมงค์ชั้นส่วนกลางมีขนาด 1.2 เมตร คีย์เช็กเมนต์สำหรับวงแหวนอุโมงค์ชั้นส่วนบนและล่างมีตำแหน่งที่ 90 องศา ในขณะที่คีย์เช็กเมนต์สำหรับอุโมงค์ชั้นส่วนกลางมีตำแหน่งที่ 270 องศา โดยมีตำแหน่งของสลักเกลียว ดังรูปที่ 1 สลักเกลียวเกรด 5.8 M30 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ถูกนำมาใช้เชื่อมต่อชั้นส่วนผนังอุโมงค์สำหรับการทดสอบนี้

สำหรับกระบวนการทดสอบโครงสร้างผนังวงแหวนอุโมงค์ในห้องปฏิบัติการ การให้แรงกระทำต่อผนังวงแหวนอุโมงค์ประกอบไป

ด้วยการให้แรงในแนวราบ (Horizontal Loading) และแรงในแนวตั้ง (Vertical Loading) ซึ่งมีลักษณะการให้แรงกระทำเป็นจุด (Point Load) จำนวนทั้งหมด 24 ตำแหน่ง โดยที่การให้แรงกระทำในแนวราบสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ P1, P2, และ P3 ดังแสดงในรูปที่ 2(ก) ในขณะที่ให้แรงกระทำในแนวตั้งในทุกๆ จุด ด้วยแรง 62.5 กิโลนิวตัน ทั้งนี้กระบวนการให้แรงกระทำต่ออุโมงค์ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2(ข) เพื่อให้ง่ายต่อคำอธิบายแรงที่กระทำต่ออุโมงค์ Relative Load ( $P_r$ ) แสดงดังสมการที่ (1) และ Generalized Load ( $P_g$ ) แสดงดังสมการที่ (2) ถูกนำเสนอสำหรับเป็นตัวแทนของแรงที่กระทำต่อวงแหวนอุโมงค์ โดย  $P_r$  เป็นตัวแทนระดับการถอนแรงเมื่อเปรียบเทียบกับแรงกระทำขณะใช้งาน (Normal Operation Load,  $P_n$ ),  $P_g$  เป็นตัวแทนความแตกต่างของแรงที่กระทำด้านบนและแรงที่กระทำด้านล่างของผนังอุโมงค์ โดยที่  $P_n$  แสดงถึงแรงกระทำขณะใช้งาน ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้  $P_n = P1 - P2 = 233-156 = 77$  kN

$$P_r = (P1 - P2)/P_n \quad (1)$$

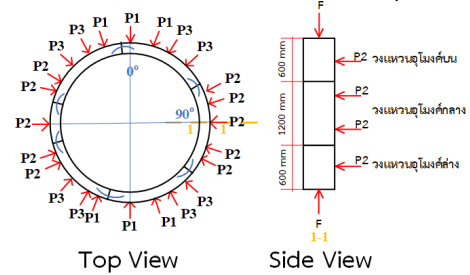
$$P_g = 2 \times (P1 - P2) \quad (2)$$

## 2.2. หลักการและวิธีการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

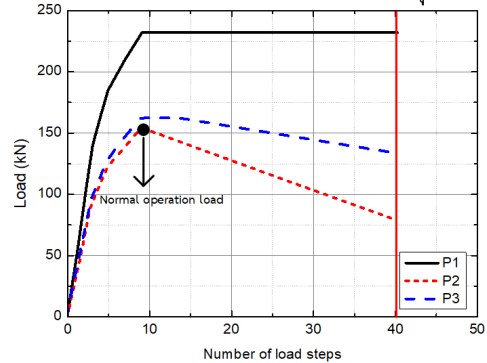
การศึกษานี้ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยหลักการวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยโปรแกรม ABAQUS ในการจำลองการทดสอบโครงสร้างผนังวงแหวนอุโมงค์เท่าขนาดจริงในห้องปฏิบัติการที่ได้นำเสนอข้างต้นในหัวข้อ 2.1 [9] รูปที่ 3(ก) แสดงลักษณะอุโมงค์แบบชิ้นส่วนประกอบ และรูปที่ 3(ข) แสดงโครงตาข่ายสำหรับการวิเคราะห์ในการศึกษานี้ สำหรับแบบจำลองสปริงที่นำเสนอในการศึกษานี้เพื่อเป็นตัวแทนสลักเกลียวยึดระหว่างชิ้นส่วนผนังอุโมงค์มีลักษณะดังรูปที่ 3(ค) โดยทุกตำแหน่งของสลักเกลียวที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการถูกแทนที่ด้วยแบบจำลองสปริง ซึ่งในแต่ละตำแหน่งของสปริงจะประกอบไปด้วยสติฟเนสทั้งหมด 3 แกน คือ สติฟเนสตามแนวแกน (Axial), สติฟเนสตามแนวรัศมี (Radial) และ สติฟเนสตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential) โดยที่ทำการกำหนดพารามิเตอร์สติฟเนสแรงเฉือนตามแนวรัศมี และตามแนวเส้นสัมผัสขณะที่พารามิเตอร์สติฟเนสแรงดึงกำหนดให้ตามแนวแกน

เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนตัวทั้งในแนวระนาบ x, แนวระนาบ y และแนวระนาบ z รอยต่อระหว่างชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ภายในวงแหวนและระหว่างวงแหวนถูกกำหนดให้มีการถ่ายแรงแบบเชื่อมแน่น (Contact) ภายใต้สภาวะแรงอัดซึ่งประกอบไปด้วย 2 ทิศทางคือทิศทางตั้งฉากซึ่งกำหนดให้มีพฤติกรรมแบบเชื่อมแน่นโดยมีการเลื่อนไถลได้แต่ไม่สามารถจมเข้าหากันได้ (Hard Contact) และในแนวสัมผัสกำหนดให้มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.4 [10]

(ก) ตำแหน่งการให้แรงที่กระทำต่อผนังอุโมงค์



(ข) ขั้นตอนการให้แรงที่กระทำต่อผนังอุโมงค์



รูปที่ 2 การให้แรงที่กระทำต่อผนังอุโมงค์

## 2.3. พารามิเตอร์ของวัสดุ

สำหรับค่าพารามิเตอร์ของผนังชิ้นส่วนผนังอุโมงค์อ้างอิงจากงานศึกษาที่ผ่านมา [9] ดังแสดงในตารางที่ 1 และสำหรับค่าพารามิเตอร์ของสลักเกลียวเกรด 5.8 M30 แสดงดังตารางที่ 2 สำหรับพฤติกรรมสปริงแบบอีลาสติกเชิงเส้นและอีลาสติกไม่เชิงเส้นมีพฤติกรรมดังแสดงในรูปที่ 4

## 3. การวิเคราะห์ผลการศึกษา

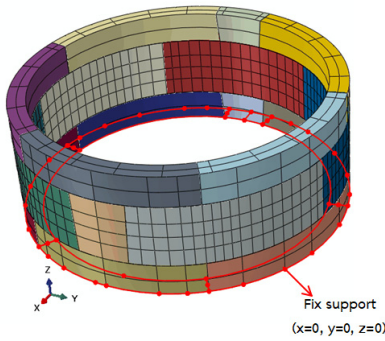
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการทดสอบโครงสร้างผนังวงแหวนอุโมงค์เท่าขนาดจริงในห้องปฏิบัติการจะดำเนินการโดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ [9] พฤติกรรมการเสียรูปของผนังอุโมงค์, แรงอัดและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นภายในวงแหวนอุโมงค์ถูกนำมาสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการศึกษาครั้งนี้ มากไปกว่านั้นการศึกษานี้ยังให้ความสนใจตรวจสอบความถูกต้องของพฤติกรรมการเปิดอ้าระหว่างรอยต่อชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ และความเครียดที่เกิดขึ้นภายในสลักเกลียว

### 3.1. การเสียรูปของวงแหวนผนังอุโมงค์

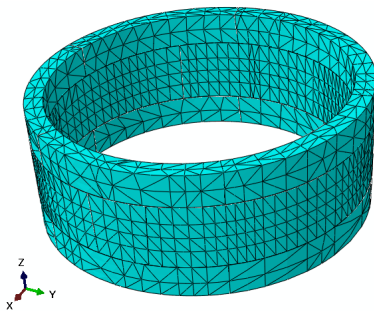
รูปที่ 5(ก), 5(ข) และ 5(ค) แสดงผลการทดสอบการเสียรูปของผนังวงแหวนอุโมงค์จากห้องปฏิบัติการและผลลัพธ์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งพฤติกรรมอีลาสติกเชิงเส้น และอีลาสติกไม่เชิงเส้นของ

แบบจำลองสปริง ภายใต้แรงกระทำที่  $P_r = 1.39$ ,  $P_r = 1.65$

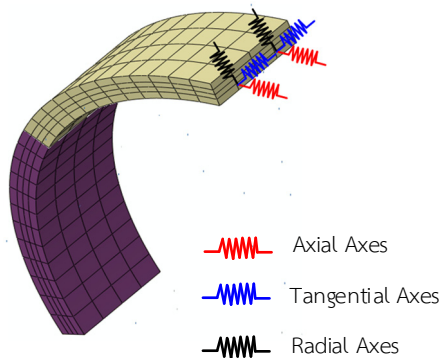
(ก) ลักษณะอุโมงค์แบบชิ้นส่วนประกอบ



(ข) โครงร่างตาข่าย



(ค) แบบจำลองสปริง



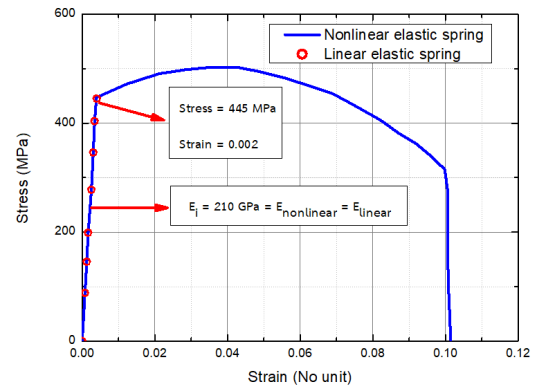
รูปที่ 3 ลักษณะแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ผนังอุโมงค์ (Segmental Lining)

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
ความหนาแน่น	2,430	Kg/m <sup>3</sup>
อีลาสติคโมดูลัส	35.5	GPa
อัตราส่วนปัวซอง	0.2	
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก	6.2	m
เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	5.5	m
ความหนาเชิงเมนต์	0.35	m
ความกว้างวงแหวน	1.2	m

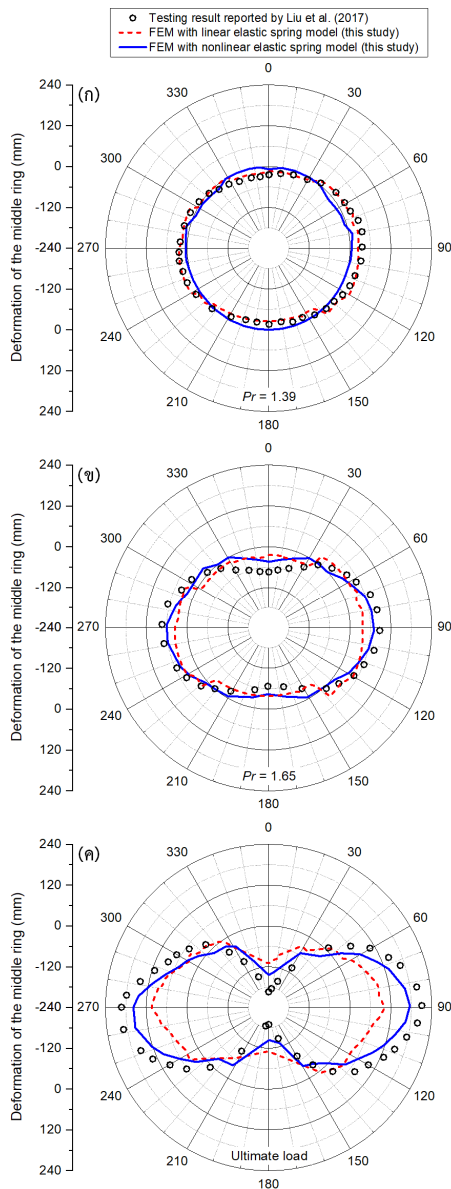
ตารางที่ 2 พารามิเตอร์สลักเกลียว เกรด 5.8 M30

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
อีลาสติคโมดูลัส	210	GPa
กำลังรับแรงดึงสูงสุด	500	MPa
เส้นผ่านศูนย์กลางสลักเกลียว	0.03	m
ความยาวสลักเกลียว	0.4	m
สติเฟนสแรงดึงของสปริง	371,000	kN/m
สติเฟนสแรงเฉือนของสปริง	142,700	kN/m



รูปที่ 4 พฤติกรรมของสปริงแบบอีลาสติคเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น

และสภาวะวิบัติ (Ultimate Load) ตามลำดับ จากผลการศึกษาในรูปที่ 5(ก) เมื่อเปรียบเทียบผลการเสียรูปของผนังวงแหวนอุโมงค์ภายใต้แรงกระทำที่  $P_r = 1.39$  พบว่าการเสียรูปของอุโมงค์จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการและผลลัพธ์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของทั้งสองรูปแบบพฤติกรรมการจำลองสปริง มีผลไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าภายใต้แรงกระทำที่  $P_r = 1.39$  สลักเกลียวยังไม่เกิดการคราก (Yielding) รูปที่ 5(ข) เมื่อผนังวงแหวนอุโมงค์ได้รับแรงกระทำที่  $P_r = 1.65$  พบว่าการเสียรูปของอุโมงค์ทั้งกรณีผลทดสอบและผลวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ตำแหน่ง 0 และ 180 องศา ชั้นส่วนผนังอุโมงค์มีการเสียรูปในลักษณะเคลื่อนตัวเข้าหาศูนย์กลางอุโมงค์ ในขณะที่ตำแหน่ง 90 และ 270 องศา ชั้นส่วนผนังอุโมงค์มีลักษณะการเคลื่อนตัวที่ขยายออกจากจุดศูนย์กลางอุโมงค์ เหตุผลที่เกิดการเสียรูปในลักษณะนี้เกิดขึ้นเนื่องจากภายใต้แรงกระทำที่  $P_r = 1.65$  สลักเกลียวเริ่มเข้าสู่สภาวะการคราก อย่งเห็นได้ชัดในกรณีที่แบบจำลองสปริงมีพฤติกรรมอีลาสติคไม่เชิงเส้น การเสียรูปโดยรวมมีค่าที่น้อยกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผลการทดสอบโครงสร้างผนังวงแหวนอุโมงค์ในห้องปฏิบัติการ แต่อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้แบบจำลองสปริงแบบอีลาสติคไม่เชิงเส้นสามารถให้ผลลัพธ์การจำลองที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมการเสียรูปของโครงสร้างผนังวงแหวนอุโมงค์ในห้องปฏิบัติการมากกว่าการประยุกต์ใช้แบบจำลองสปริงแบบอีลาสติคเชิงเส้น



รูปที่ 5 การเสียรูปของผนังอุโมงค์  
(ก)  $P_r = 1.39$  (ข)  $P_r = 1.65$   
(ค) Ultimate Load

เมื่อเปรียบเทียบผลการเสียรูปของผนังอุโมงค์ภายใต้แรงกระทำที่สภาวะวิบัติดังแสดงในรูปที่ 5(ค) พบว่าทั้งผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและผลลัพธ์ไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงการเสียรูปของผนังวงแหวนอุโมงค์ในลักษณะรูปไข่ตามแนวนอน (Horizontal Oval Shape) การเสียรูปของอุโมงค์ภายใต้แรงกระทำที่สภาวะวิบัติมีแนวโน้มการเสียที่รูปคล้ายคลึงกับกรณีภายใต้แรงกระทำที่  $P_r = 1.65$  แต่การเสียรูปของอุโมงค์ภายใต้แรงกระทำที่สภาวะวิบัติให้ผลการเสียรูปที่มากกว่าอย่างเห็นได้ชัด เหตุที่เป็นเช่นนี้เกิดจาก ณ สภาวะวิบัตินั้น สลักเกลียวเกิดการวิบัติแล้ว ซึ่งสอดคล้องกับ

งานวิจัยก่อนหน้า [11] โดยผลลัพธ์ไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ประยุกต์ใช้แบบจำลองสปริงแบบอีลาสติกไม่เชิงเส้นให้พฤติกรรมการเสียรูปของผนังวงแหวนอุโมงค์ที่ใกล้เคียงกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการมากกว่าการประยุกต์ใช้แบบจำลองสปริงแบบอีลาสติกเชิงเส้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้แบบจำลองสปริงแบบอีลาสติกไม่เชิงเส้นสำหรับจำลองรอยต่อระหว่างชิ้นส่วนผนังอุโมงค์

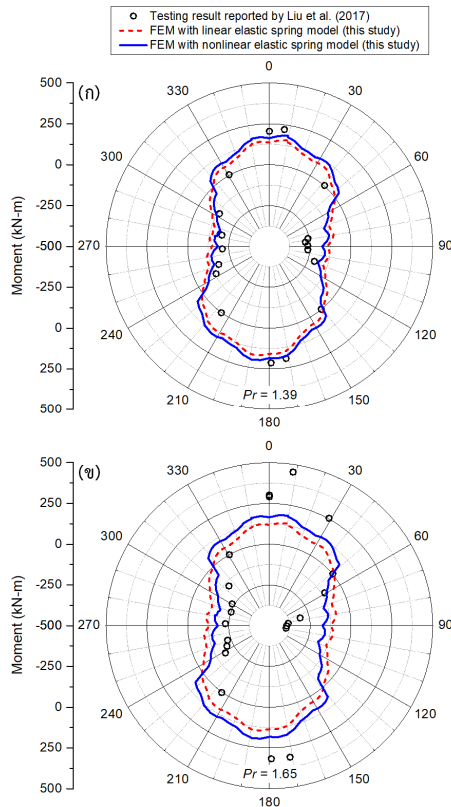
### 3.2. ผลโมเมนต์ดัดของวงแหวนผนังอุโมงค์

รูปที่ 6(ก) และ 6(ข) แสดงผลการทดสอบโมเมนต์ดัดของผนังวงแหวนอุโมงค์และผลลัพธ์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ภายใต้แรงกระทำที่  $P_r = 1.39$  และ  $1.65$  ตามลำดับ โดยผลการทดสอบโมเมนต์ดัดของผนังวงแหวนอุโมงค์ทั้งสภาวะ  $P_r = 1.39$  และ  $1.65$  จะเกิดโมเมนต์บวกสูงสุด ณ ช่วงตำแหน่งประมาณ 0-10 องศา และ 170-180 องศา ในขณะที่โมเมนต์ลบสูงสุดเกิดขึ้น ณ ช่วงตำแหน่งประมาณ 80-100 องศา และ 260-280 องศา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า [11] โดยการเกิดโมเมนต์บวกสี่ถึงที่บริเวณผิวด้านนอกผนังชิ้นส่วนอุโมงค์เกิดแรงอัด ในขณะที่ผิวด้านในเกิดแรงดึง ซึ่งทั้งกรณีของแบบจำลองสปริงแบบอีลาสติกเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น ให้พฤติกรรมโดยรวมที่คล้ายคลึงกับผลการทดสอบวงแหวนอุโมงค์ในห้องปฏิบัติการ กล่าวคือผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งสองกรณีให้ความสอดคล้องในแง่ของลักษณะการกระจายตัวของโมเมนต์ภายในวงแหวนอุโมงค์ เมื่อเปรียบเทียบการผลทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการ โดยที่ผลการวิเคราะห์แสดงค่าโมเมนต์บวกสูงสุดอยู่ในช่วงประมาณ 350-10 องศา และ 170-190 องศา ในขณะที่แสดงค่าโมเมนต์ลบสูงสุดอยู่ในช่วงประมาณ 70-120 องศา และ 250-290 องศา แต่อย่างเห็นได้ชัด ในกรณีประยุกต์ใช้แบบจำลองสปริงแบบอีลาสติกไม่เชิงเส้นให้การทำนายพฤติกรรมโดยรวมของโมเมนต์ดัดใกล้เคียงกับผลการทดสอบโครงสร้างวงแหวนอุโมงค์ในห้องปฏิบัติที่ใกล้เคียงมากกว่าแบบจำลองสปริงแบบอีลาสติกเชิงเส้น

### 3.3. ผลแรงตามแนวแกนของวงแหวนผนังอุโมงค์

รูปที่ 7(ก) และ 7(ข) แสดงผลการทดสอบของแรงตามแนวแกนของผนังวงแหวนอุโมงค์พร้อมกันกับผลลัพธ์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ภายใต้แรงกระทำที่  $P_r = 1.39$  และ  $1.65$  ตามลำดับ โดยที่การประยุกต์ใช้แบบจำลองสปริงที่มีพฤติกรรมแบบอีลาสติกเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบวงแหวนอุโมงค์ในห้องปฏิบัติการ ในทุก ๆ ตำแหน่งของวงแหวนอุโมงค์เกิดค่าแรงตามแนวแกนติดลบซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าโดยรอบอุโมงค์เกิดพฤติกรรมการอัดตัว โดยที่ในกรณีจำลองพฤติกรรมสปริงแบบอีลาสติกไม่เชิงเส้นให้การทำนายพฤติกรรมโดยรวมของแรงตามแนวแกนที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการมากกว่าผล

การทำนายที่ได้จากพฤติกรรมสปริงแบบอีลาสติกเชิงเส้น



รูปที่ 6 โมเมนต์ดัดของผนังอุโมงค์  
(ก)  $P_r = 1.39$  (ข)  $P_r = 1.65$

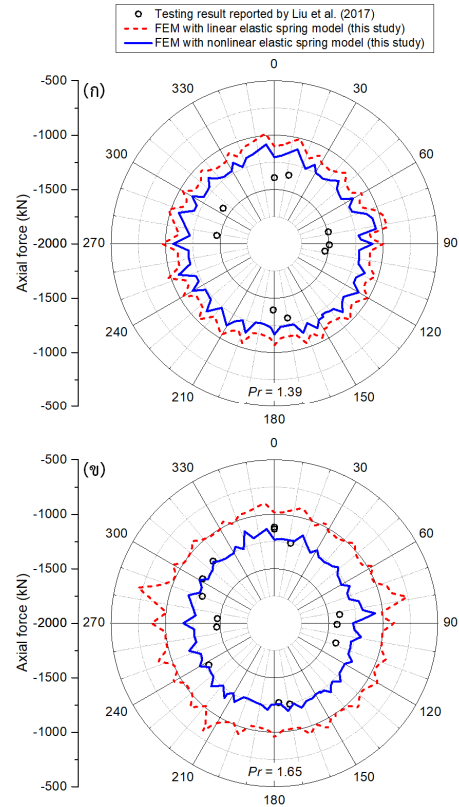
### 3.4. ผลการเปิดอ้าของรอยต่อระหว่างผนังอุโมงค์

รูปที่ 8(ก), 8(ข) และ 8(ค) แสดงผลการทดสอบและผลลัพธ์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของการเปิดอ้าของรอยต่อระหว่างผนังอุโมงค์ ณ ตำแหน่งของรอยต่อที่ 260, 280, 56.25, 123.75, 348.75 และ 191.25 องศา ทั้งผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงการเปิดอ้าของรอยต่อระหว่างชิ้นส่วนผนังอุโมงค์บริเวณผิวด้านนอกของอุโมงค์เพียงเล็กน้อยในช่วงเริ่มต้นของการให้แรงกระทำ ( $P_g = 0-225$  กิโลนิวตัน) จนกระทั่งเมื่อมีแรงกระทำที่มากกว่า  $P_g = 225$  กิโลนิวตัน เป็นต้นไป การเปิดอ้าของรอยต่อเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า  $P_g$  ที่เท่ากัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่  $P_g = 300$  กิโลนิวตัน การจำลองพฤติกรรมสปริงแบบอีลาสติกไม่เชิงเส้นสามารถทำนายพฤติกรรมการเปิดอ้าของรอยต่อระหว่างชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการมากกว่าการจำลองพฤติกรรมสปริงแบบอีลาสติกเชิงเส้น

### 3.5. ผลความเครียดที่เกิดขึ้นสลักเกลียว

รูปที่ 9 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความเครียดที่เกิดขึ้นสลักเกลียว ณ ตำแหน่งต่างๆ รอบวงแหวนอุโมงค์ โดยความเครียดที่

เกิดขึ้นภายในสลักเกลียว ณ ตำแหน่งรอยต่อที่ 191.25 และ 348.75 องศา

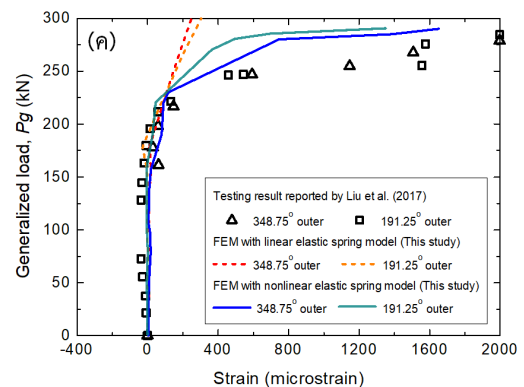
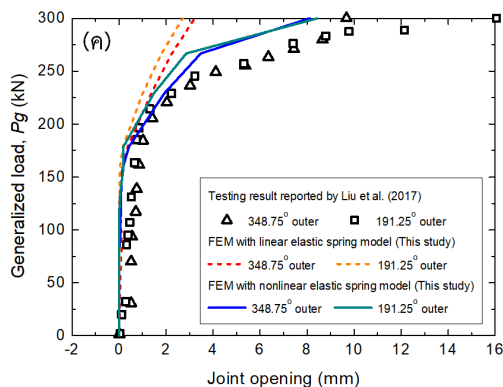
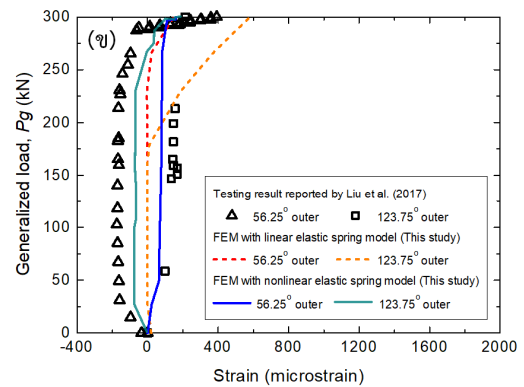
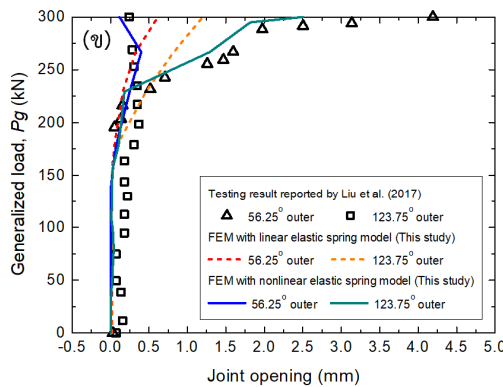
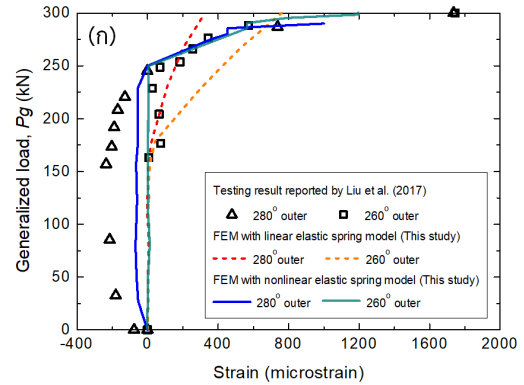
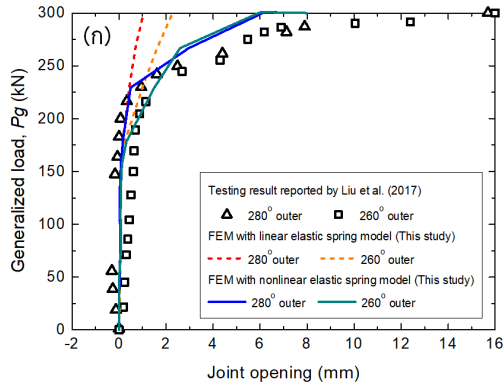


รูปที่ 7 แรงตามแนวแกนของผนังอุโมงค์  
(ก)  $P_r = 1.39$  (ข)  $P_r = 1.65$

ผิวด้านในผนังชิ้นส่วนอุโมงค์เกิดแรงดึง ในขณะที่ผิวด้านนอกเกิดแรงอัด ซึ่งการเกิดพฤติกรรมเช่นนี้ส่งผลให้ ณ ตำแหน่งรอยต่อนั้นเกิดโมเมนต์บวก ในทางตรงกันข้าม ณ ตำแหน่งรอยต่อ 56.25, 123.75, 260 และ 280 องศา ผิวด้านในผนังชิ้นส่วนอุโมงค์เกิดแรงอัด ในขณะที่ผิวด้านนอกเกิดแรงดึง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดโมเมนต์ลบ ณ ตำแหน่งรอยต่อระหว่างชิ้นส่วนผนังอุโมงค์ ซึ่งพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเหล่านี้สอดคล้องกับผลการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ดัดรอบวงแหวนอุโมงค์ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า [11] จากผลการศึกษาในรูปที่ 9(ก) ในช่วงเริ่มต้นของการให้แรงกระทำ ค่าความเครียดของสลักเกลียวจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยจนกระทั่งเมื่อมีแรงกระทำ  $P_g = 245$  กิโลนิวตัน หลังจากนั้นเมื่อให้แรงกระทำที่มากขึ้น ค่าความเครียดเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อพิจารณากรณีที่พฤติกรรมของสปริงเป็นแบบอีลาสติกเชิงเส้น ในช่วงเริ่มต้นของการให้แรงกระทำเกิดค่าความเครียดเล็กน้อยจนกระทั่งถึง  $P_g = 180$  กิโลนิวตัน หลังจากนั้นเมื่อให้แรงกระทำที่มากขึ้น ค่าความเครียดในสลักเกลียวมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่กรณีการพิจารณาพฤติกรรมของสปริงเป็นแบบอีลาสติกไม่เชิงเส้น เมื่อเปรียบเทียบค่าความเครียดในช่วงระหว่าง  $P_g = 0-245$  กิโลนิวตัน

พบว่าผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ค่าความเครียดที่น้อยกว่าผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่อย่างไรก็ตามหลังจาก

เชิงเส้นตลอดการให้แรงกระทำ เช่นเดียวกับกับผลการวิเคราะห์ที่แสดงในรูปที่ 9(ค) การทำนายพฤติกรรมความเครียดที่เกิดขึ้นใน



รูปที่ 8 การเปิดอ้าของรอยต่อผนังโมเมนต์  
(ก) ที่ตำแหน่ง 260°, 280° (ข) ที่ตำแหน่ง 56.25°, 123.75° (ค) ที่ตำแหน่ง 348.75°, 191.25°

รูปที่ 9 ความเครียดสลักเกลียว  
(ก) ที่ตำแหน่ง 260°, 280° (ข) ที่ตำแหน่ง 56.25°, 123.75° (ค) ที่ตำแหน่ง 348.75°, 191.25°

การให้แรงกระทำที่มากกว่า 245 กิโลนิวตัน ผลการทำนายพฤติกรรมด้วยแบบจำลองสปริงออสติกแบบไม่เชิงเส้นมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงอย่างมากกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและให้ผลที่ต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับผลการทำนายด้วยแบบจำลองสปริงออสติกแบบเชิงเส้น

สลักเกลียวของแบบจำลองสปริงด้วยพฤติกรรมออสติกไม่เชิงเส้นให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงของการให้แรงกระทำ  $P_g$  ที่มีค่ามากกว่า 225 กิโลนิวตัน ซึ่งเป็นช่วงพฤติกรรมที่สลักเกลียวเกิดการคราก

จากผลการทดสอบและวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังแสดงในรูปที่ 9(ข) การทำนายพฤติกรรมความเครียดที่เกิดขึ้นในสลักเกลียวของแบบจำลองสปริงด้วยพฤติกรรมออสติกไม่เชิงเส้นให้ผลที่ใกล้เคียงมากกว่าผลการจำลองพฤติกรรมสปริงแบบออสติก

#### 4. สรุป

การศึกษานี้ใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยนำเสนอแบบจำลองสปริงที่มีพฤติกรรมทั้งออสติกเชิงเส้นและออสติกไม่เชิงเส้นเพื่อเป็นตัวแทนสลักเกลียวอีตระหว่างชิ้นส่วนผนัง

อุโมงค์ภายในหนึ่งวงแหวนและระหว่างวงแหวนอุโมงค์ พร้อมทั้งทำการสอบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบโครงสร้างผนังวงแหวนอุโมงค์เท่าขนาดจริงในห้องปฏิบัติการจากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. แบบจำลองสปริงที่นำเสนอในการศึกษาครั้งนี้มีความเหมาะสมในการใช้แทนสลักเกลียวที่ใช้ยึดระหว่างผนังชั้นส่วนผนังอุโมงค์ แต่ละชั้นภายในหนึ่งวงแหวนอุโมงค์ และยึดระหว่างวงแหวนอุโมงค์
2. แบบจำลองสปริงอีลาสติคไม่เชิงเส้นให้ผลการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมที่ใกล้เคียงผลการทดสอบมากกว่าแบบจำลองสปริงอีลาสติคเชิงเส้น ทั้งพฤติกรรมเสียรูปของวงแหวนผนังอุโมงค์ ผลโมเมนต์ดัดของผนังอุโมงค์ แรงตามแนวแกนของผนังอุโมงค์ การเปิดอ้าของรอยต่อระหว่างชั้นส่วนผนังอุโมงค์ และความเครียดที่เกิดขึ้นที่ภายในสลักเกลียว

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่สนับสนุนเอื้อเฟื้อสถานที่, อุปกรณ์ และเครื่องมือสำหรับงานวิจัย

#### 6. การอ้างอิง

- [1] Soga K., Laver R., Li Z. (2017). Long-term tunnel behaviour and ground movements after tunneling in clayey soils. *Underground Space* **2(3)**, 149-167. DOI: 10.1016/j.undsp.2017.08.001
- [2] Shen, S., Wu, H., Cui, Y., Yin, Z. (2014). Long-term settlement behaviour of metro tunnels in the soft deposits of Shanghai. *Tunnelling Underground Space Technology* **40**, 309-323. DOI: 10.1016/j.tust.2013.10.013
- [3] Li, Z., Soga, K., Wang, F., Wright, P., Tsuno, K. (2014). Behaviour of cast-iron tunnel segmental joint from the 3D FE analyses and development of a new bolt-spring model. *Tunnelling and Underground Space Technology* **41**, 176-192. DOI: 10.1016/j.tust.2013.12.012
- [4] Wright P. (2010). Assessment of London underground tube tunnels –Investigation, monitoring and analysis. *Smart Structures and Systems* **6**, 239-262.

DOI: 10.12989/sss.2010.6.3.239

- [5] Wang, Z., Wang, L., Li, L., Wang, J. (2014). Failure mechanism of tunnel lining joints and bolts with uneven longitudinal ground settlement. *Tunnelling and Underground Space Technology* **40**, 300-308. DOI: 10.1016/j.tust.2013.10.007
- [6] Yan, Q., Xu, Y., Zhang, W., Geng, P., Yang, W. (2018). Numerical analysis of the cracking and failure behaviors of segmental lining structure of an underwater shield tunnel subjected to a derailed high-speed train impact. *Tunnelling and Underground Space Technology* **72**, 41-54. DOI: 10.1016/j.tust.2017.11.002
- [7] Yi, H., Qi, T., Qian, W., Lei, B., Pu, B., Yu, Y., Liu, Y., Li, Z. (2019). Influence of long-term dynamic load induced by high-speed trains on the accumulative deformation of shallow buried tunnel linings. *Tunnelling and Underground Space Technology* **84**, 166-176. DOI: 10.1016/j.tust.2018.11.005
- [8] Do, N.A., Dias, D., Oreste, P., Djeran-Maigre, I. (2013). 2D numerical investigation of segmental tunnel lining behavior. *Tunnelling and Underground Space Technology* **37**, 115-127. DOI: 10.1016/j.tust.2013.03.008
- [9] Liu, X., Dong, Z., Bai, Y., Zhu, Y. (2017). Investigation of the structural effect induced by stagger joints in segmental tunnel linings: First results from full-scale ring tests. *Tunnelling Underground Space Technology* **66**, 1-18. DOI: 10.1016/j.tust.2017.03.008
- [10] Blom, C.B.M. (2002). *Design Philosophy of Concrete Linings for Tunnels in Soft Soils*. Ph.D. Dissertation of Delft University of Technology, Netherlands.
- [11] Chen, R.P., Chen, S., Wu, H.N., Liu, Y., Meng, F.Y. (2020). Investigation on deformation behavior and failure mechanism of a segmental ring in shield tunnels based on elaborate numerical simulation. *Engineering Failure Analysis* **117**, DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104960