

**แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการประเมินกำลังและพฤติกรรมการวิบัติ
ของสมอยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าวและไม่ร้าว**
**Finite Element Model for Evaluation of Strength and Failure Behavior
of Adhesive Anchor in Cracked and Uncracked Concrete**

ภาคิณ ลอยเจริญ^{1*} เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย² และกิตติศักดิ์ ชันติวิชัย²
Phakin Loyjaroen^{1*} Griengsak Kaewkulchai² and Kittisak Kuntiyawichai²

¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร 47000

¹Faculty of Industrial Technology, Sakon Nakhon Rajabhat University, Mueang District, Sakon Naknon, 47000

²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

²Faculty of Engineering, Ubonratchathani University, Warinchamrap District, Ubon Ratchathani, 34190

*Email: phakinjob@gmail.com

Received: 20 Feb 19

Revised: 4 Nov 19

Accepted: 10 Nov 19

บทคัดย่อ

ระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวเป็นที่นิยมใช้ในงานต่อเติมและเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน การทำนายกำลังและพฤติกรรมของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในคอนกรีตร้าวที่มีความยุ่งยากในการศึกษาพฤติกรรมเชิงลึกจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ในงานวิจัยนี้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในระบบสามมิติของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวทั้งในคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีตร้าวจะถูกสร้างและถูกสอบเทียบกับผลทดสอบตัวอย่างจริงจากงานวิจัยในอดีต ผลการสอบเทียบพฤติกรรมการวิบัติและค่าแรงดึงถอนสูงสุดพบว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ รูปแบบความสัมพันธ์ของแรงดึงถอนและการเคลื่อนที่ที่ปลายสมอยึดทั้งในช่วงก่อนและหลังจุดที่แรงดึงถอนมีค่าสูงสุดมีรูปแบบคล้ายคลึงกัน อีกทั้งยังพบว่าสมการ Uniform bond model สามารถทำนายค่าแรงดึงถอนสูงสุดในการฉีกถอนคอนกรีตไม่ร้าวได้ใกล้เคียงค่าที่ได้จากแบบจำลองมากที่สุด ส่วนในกรณีคอนกรีตร้าวที่มีระนาบการร้าววิ่งชนผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวกับคอนกรีต พบว่าอัตราส่วนของค่าแรงดึงถอนสูงสุดในการฉีกถอนคอนกรีตร้าวเทียบกับกรณีคอนกรีตไม่ร้าวมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวระยะฝังยึดมีค่ามากขึ้น

คำสำคัญ: ระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยว แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ คอนกรีตร้าว กำลังรับแรงดึงถอน

Abstract

An adhesive anchoring system is commonly used in the retrofit and strengthening of concrete structures. Prediction for strengths and behaviors of adhesive anchors in concrete is important especially in cracked concrete, which is very difficult to study the complex behavior under laboratory testing. Three-dimensional finite element (FE) models of adhesive anchoring system were used in both uncracked concrete and cracked concrete. First of all, model calibration was carried out by comparing FE results with experimental results from previous studies. The results of the calibration of failing behaviors and maximum pull-out forces were found to be consistent. The relationship patterns of anchor pull-out force and head anchor displacements both before and after the peak points were similar. Furthermore, the results also indicated that the equation for the uniform bond model can predict the maximum pull-out force in case of uncracked concrete. In the case of cracked concrete with a cracked plane closed to adhesive/concrete interface, it was found that the ratio of maximum pull-out force in cracked concrete compared to the case of uncracked concrete was reduced when embedment depth increased.

Keywords: Adhesive anchoring system, Finite element model, Cracked concrete, Pull-out strength

1. บทนำ

ระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยว (Adhesive anchoring system) ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานก่อสร้าง งานต่อเติมและงานเสริมกำลังของโครงสร้างคอนกรีต โดยเฉพาะระบบโครงสร้างสมัยใหม่ในปัจจุบันที่มีการใช้โครงสร้างเหล็กเชื่อมต่อกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในหลากหลายรูปแบบ ระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวประกอบด้วยสมอยึด สลักเกลียว หรือเหล็กเส้น ฝังลงในรูเจาะในคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว โดยมีการเติมสารยึดเหนี่ยวลงในรูเจาะก่อนตอกสมอยึดลงไปให้สารยึดเหนี่ยวเคลือบผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตและสมอยึดในรูเจาะ จากการที่ระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวมีวิธีการติดตั้งที่ง่าย ประหยัดค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง และมีประสิทธิภาพในการใช้งานที่สูงในปัจจุบัน ทำให้มีการนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย

การประเมินค่ากำลังต้านทานแรงดึงถอนและพฤติกรรมการวิบัติของสมอยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวนิยมใช้การทดสอบกำลังรับแรงดึงถอน (Pull-out test) ทั้งโดยการทดสอบตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการหรือการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการส่งถ่ายแรงหรือพฤติกรรมการวิบัติที่เกิดขึ้นในระบอบอนุภาคที่ส่งผลต่อกำลังโดยรวมของระบบฝังยึด ซึ่งการทดสอบตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการสามารถทำได้แต่ค่อนข้างยุ่งยากและอาจมีค่าใช้จ่ายที่สูง จึงจำเป็นต้องใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) เพื่อศึกษาปัญหาดังกล่าว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวภายใต้แรงดึงในคอนกรีตไม่ร้าว (Uncracked concrete) และคอนกรีตร้าว (Cracked concrete) โดยจะใช้ข้อมูลผลการศึกษาในอดีตในการสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง

พฤติกรรมของระบบฝังยึดในคอนกรีตภายใต้การให้แรงดึงในสมอยึด ในคอนกรีตที่ไม่มีการแตกร้าวภายในเนื้อคอนกรีตล่วงหน้าก่อนฝังยึดอุปกรณ์ มีพฤติกรรมการวิบัติที่สามารถสังเกตได้ 5 รูปแบบ ได้แก่ การวิบัติของคอนกรีตรูปกรวย การวิบัติแบบผสมระหว่างการวิบัติของคอนกรีตรูปกรวยกับการวิบัติจากการยึดเหนี่ยวที่ผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวกับคอนกรีต การวิบัติแบบผสมระหว่างการวิบัติของคอนกรีตรูปกรวยกับการวิบัติจากการยึดเหนี่ยวที่ผิวสัมผัสระหว่างแท่งเหล็กสมอยึดกับสารยึดเหนี่ยว การวิบัติแบบผสมจากสารยึดเหนี่ยววิบัติ และการวิบัติจากแท่งเหล็กสมอยึดวิบัติ โดยส่วนใหญ่การวิบัติแบบผสมมักจะเกิดการวิบัติแบบคอนกรีตรูปร่างขึ้นเกิดขึ้นที่ผิวบนติดกับแท่งสมอยึดไปด้วยเสมอ [1], [2] โดยแบบจำลองที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้จะเน้นศึกษารูปแบบการวิบัติในกรณีการวิบัติแบบผสมระหว่างการวิบัติของคอนกรีตรูปกรวยกับการวิบัติจากการยึดเหนี่ยวที่

ผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวกับคอนกรีต ซึ่งมักเกิดขึ้นในกรณีวิบัติจากการยึดเหนี่ยว (Bond failure) [3] ในคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด (Unconfined concrete) [4]

แรงดึงถอนประลัยที่ทำให้เกิดการวิบัติของคอนกรีตรูปกรวย เสนอโดย Eligehausen, R., Mallee, R. และ Rehm, G. [5] ตามสมการ (1) ซึ่งได้จากการทดสอบกำลังรับแรงดึงถอนของสมอยึดเดี่ยวฝังในคอนกรีตที่มีกำลังแตกต่างกันหลายชุด การทดสอบ โดยมีได้คำนึงถึงรูปแบบการวิบัติแบบอื่น ๆ และให้ค่าที่ใกล้เคียงผลทดสอบเมื่ออัตราส่วนระหว่างความยาวระยะฝังยึดประลัยผลและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสมอยึดเท่ากับ 9

$$N_u = 0.92 \cdot h_{ef}^2 \cdot \sqrt{f_c} \quad (1)$$

เมื่อ N_u คือแรงดึงถอนประลัย (นิวตัน); h_{ef} คือความยาวระยะฝังยึดประลัยผล (มิลลิเมตร) และ f_c คือกำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐาน (เมกะปาสคาล)

แบบจำลองการยึดเหนี่ยวประกอบด้วยแบบจำลองการยึดเหนี่ยวแบบสม่ำเสมอ (Uniform bond model) ดังสมการ (2) และแบบจำลองการยึดเหนี่ยวแบบยืดหยุ่น (Elastic bond model) ดังสมการ (3) [6] โดยความแตกต่างของทั้งสองสมการคือ สมการจำลองการยึดเหนี่ยวแบบสม่ำเสมอจะใช้ค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวแบบสม่ำเสมอ (τ_0) ในการคำนวณหาค่าแรงดึงถอนสูงสุด ส่วนสมการจำลองการยึดเหนี่ยวแบบยืดหยุ่นจะใช้ค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (τ_{max}) ในการคำนวณหาค่าแรงดึงถอนสูงสุด ซึ่งการกระจายของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวแบบยืดหยุ่นจะมีค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงบริเวณใกล้ผิวด้านบนของแท่นคอนกรีต [7] โดยทั่วไปค่าในวงเล็บในสมการ (3) จะมีค่าใกล้เคียงกับค่า h_{ef} ในสมการ (2) แต่สำหรับกรณีที่ความยาวระยะฝังยึดมีค่ามาก ค่าในวงเล็บในสมการ (3) จะน้อยกว่าค่า h_{ef} ในสมการ (2) แสดงให้เห็นว่า กำลังของระบบฝังยึดไม่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวระยะฝังยึดสำหรับสมอยึดที่มีระยะฝังยึดมีค่ามาก

$$N_u = \tau_0 \cdot \pi \cdot d_0 \cdot h_{ef} \quad (2)$$

$$N_u = \tau_{max} \cdot \pi \cdot d_0 \cdot \left(\frac{\sqrt{d_0}}{\lambda} \cdot \tanh \frac{\lambda \cdot h_{ef}}{\sqrt{d_0}} \right) \quad (3)$$

เมื่อ τ_0 คือหน่วยแรงเฉือนแบบสม่ำเสมอในชั้นของสารยึดเหนี่ยว (เมกะปาสคาล); d_0 คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ (มิลลิเมตร); λ คือค่าความแกร่งของสมอยึดที่ประกอบไปด้วยผลกระทบของโมดูลัสการเฉือนของ

ชั้นสารยึดเหนี่ยวและความแกร่งตามแนวแกนของสมอยึด;
 $\tau_{\max}$ คือค่าหน่วยแรงยึดหน่วงสูงสุดในชั้นสารยึดเหนี่ยว
 (เมกกะปาสกาล)

การวิเคราะห์รวมจากการยึดหน่วงกับการวิบัติของคอนกรีตรูปกรวย กำลังต้านทานแรงดึงถอนโดยรวมจะขึ้นอยู่กับกำลังต้านทานแรงดึงถอนของการยึดหน่วงที่ผิวสัมผัสของสารยึดเหนี่ยวและคอนกรีตที่ต้านทานการวิบัติแบบเส้นหลุดจากการยึดหน่วงไม่เพียงพอ และกำลังต้านทานแรงดึงถอนของคอนกรีตที่ต้านทานการเกิดการวิบัติรูปกรวย ซึ่งหากพิจารณาผลจากสมการของการวิบัติรูปกรวยคอนกรีตรวมกับสมการต้านทานการยึดหน่วงจากการจำลองการกระจายหน่วยแรงยึดหน่วงแบบสม่ำเสมอ ที่ได้มีการปรับปรุงสมการ Cone model เดิมโดย Eligehausen, R. [5] จะได้กำลังต้านทานการวิบัติรวมจากการยึดหน่วงไม่เพียงพอและการวิบัติรูปกรวยคอนกรีต (N_{uw}) ดังสมการ (4) และหากพิจารณาผลจากสมการของการวิบัติรูปกรวยคอนกรีตรวมกับสมการต้านทานการยึดหน่วงจากการจำลองการกระจายหน่วยแรงยึดหน่วงแบบยึดหยุ่น จะได้กำลังต้านทานการวิบัติรวมจากการยึดหน่วงกับการวิบัติรูปกรวยคอนกรีต (N_{ue}) ดังสมการ (5) [6]

$$N_{uw} = 15.93 \cdot h_{\text{cone}}^{1.5} \cdot \sqrt{f_c} + \tau_{\max} \cdot \pi \cdot d_0 \cdot (h_{\text{ef}} - h_{\text{cone}}) \quad (4)$$

$$N_{ue} = 0.92 \cdot h_{\text{cone}}^2 \cdot \sqrt{f_c} + \tau_{\max} \cdot \pi \cdot d_0 \cdot \left(\frac{d_0}{\lambda} \cdot \tan \frac{\lambda \cdot (h_{\text{ef}} - h_{\text{cone}})}{\sqrt{d_0}} \right) \quad (5)$$

แบบจำลองการยึดหน่วงแบบยึดหยุ่นเหมาะสำหรับกรณีสมอยึดอยู่ภายใต้แรงกระทำไม่สูงมาก ขณะที่แบบจำลองการยึดหน่วงแบบสม่ำเสมอเหมาะสำหรับกรณีระบบฝังยึดกำลังเกิดการวิบัติ และจากการศึกษาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นในอดีต จะได้ความสัมพันธ์ของการกระจายหน่วยแรงยึดหน่วงตลอดความยาวระยะฝังยึดและพบว่าการกระจายของหน่วยแรงยึดหน่วงในช่วงที่มีแรงกระทำไม่สูงมากจะสอดคล้องกับความสัมพันธ์ในสมการ (5) และช่วงวิบัติจะสอดคล้องกับความสัมพันธ์ในสมการ (4)

ลักษณะการวิบัติที่สังเกตได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับที่สังเกตได้จากการทดสอบตัวอย่างจริงในอดีตพบว่ามีการวิบัติของคอนกรีตรูปกรวยที่แตกต่างกันตามความยาวระยะฝังยึด ดังแสดงใน Table 1 และผลการศึกษาดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ในการสอบเทียบกับแบบจำลองที่ระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตไม่ร้าวในงานวิจัยนี้

Table 1 Measured and predicted concrete failure cone dimensions from Krishnamurthy, K. [8]

h_{ef} (mm)	r_1^* (mm)	r_2^* (mm)	h_1^* (mm)	h_2^* (mm)	$h_{\text{avg}}/h_{\text{ef}}$ measured	$h_{\text{avg}}/h_{\text{ef}}$ num.
76	124/124	164/164	76/76	76/76	100%	96%
102	73/67	177/123	40/32	72/62	55%	61%
127	59/88	133/133	37/37	56/64	37%	49%
152	87/87	140/132	41/41	76/88	38%	58%

* = The ratios are experimental to numerical values,

h_{ef} = Effective embedment depth,

h_{avg} = The average depth of concrete cone failure,

r_1, r_2 = The radius of concrete cone failure ($r_2 > r_1$),

h_1, h_2 = The depth of concrete cone failure ($h_2 > h_1$)

การศึกษาพฤติกรรมของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าวในอดีตที่ผ่านมาเป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการโดย Eligehausen, R. [3], Meszaros, J. [9] และ Lehr, B. [10] ที่ได้มีการทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบของคอนกรีตร้าวที่มีลักษณะการแตกร้าวแบบปริ (Splitting crack) ที่มีระนาบการร้าววิ่งผ่านผิวสัมผัสของคอนกรีตและสารยึดเหนี่ยวครึ่งส่วน ซึ่งมีลักษณะเป็นการแตกร้าวที่เกิดขึ้นหลังจากติดตั้งสมอยึดแล้ว โดยมีรูปแบบความสัมพันธ์ของแรงดึงถอนและการเคลื่อนที่ของสมอยึดของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความยาวระยะฝังยึด 110 มิลลิเมตร ดังกราฟใน Figure 1 ซึ่งจะพบว่า แรงดึงถอนสูงสุดที่เกิดขึ้นในกรณีคอนกรีตร้าวจะลดลงเหลือ 40.27%

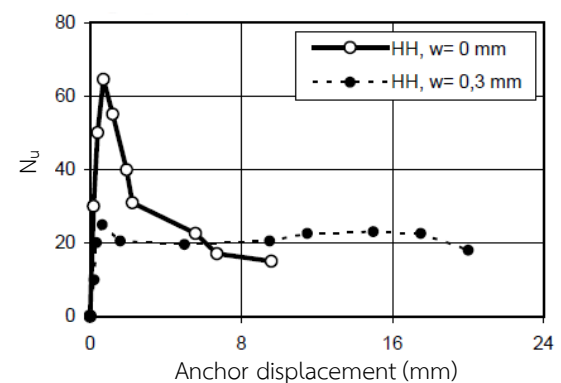


Figure 1 Load-displacement curve of bonded anchors in uncracked and cracked concrete from experimental [9]

ค่าแรงดึงถอนสูงสุดของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าวที่ได้จาก Figure 1 สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Eligehausen, R. [3] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแรงดึงถอนสูงสุดของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าวจะลดลงอยู่ในช่วง 25-80% เมื่อความกว้างของรอยร้าวอยู่ในช่วง 0.3-0.4 มิลลิเมตร หรือโดยเฉลี่ยจะลดลง 50% เมื่อเทียบกับกรณีคอนกรีตไม่ร้าว

อย่างไรก็ตาม การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าวในอดีต

ยังไม่เป็นที่ปรากฏแน่ชัด โดยส่วนใหญ่จะเป็นการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาในกรณีคอนกรีตไม่ร้าวในระบบสองมิติ ซึ่งค่อนข้างมีข้อจำกัดหากจะพัฒนาให้เป็นแบบจำลองในกรณีคอนกรีตร้าว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในระบบสามมิติเพื่อศึกษาระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตไม่ร้าว และจะพัฒนาแบบจำลองดังกล่าวที่ได้ผ่านการสอบเทียบแล้วเป็นแบบจำลองในกรณีคอนกรีตร้าวต่อไป โดยการสร้างแบบจำลองคอนกรีตร้าวในระบบสามมิติสามารถทำได้และให้ผลที่น่าเชื่อถือกว่าแบบจำลองในระบบสองมิติ

2. วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะดำเนินการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในระบบสามมิติของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวทั้งในคอนกรีตไม่ร้าวและในคอนกรีตร้าว เพื่อศึกษาพฤติกรรมและกำลังต้านทานแรงดึงถอนของสมอยึด ในกรณีคอนกรีตไม่ร้าวแบบจำลองจะถูกสร้างเพื่อสอบเทียบผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของ Krishnamurthy, K. [8] ส่วนในคอนกรีตร้าวจะสร้างเพื่อสอบเทียบผลกับผลทดสอบตัวอย่างจริงของ Meszaros, J. [9] โดยรายละเอียดของแบบจำลองและการกำหนดคุณสมบัติของแบบจำลองวัสดุแต่ละประเภทจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไปนี้

2.1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวภายใต้แรงดึงในงานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้โปรแกรม ABAQUS 2017 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีความแม่นยำในการประมวลผลข้อมูลเพื่อวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบจำลองของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวจะประกอบด้วย แบบจำลองแท่งเหล็กสมอยึด Figure 2a แบบจำลองสารยึดเหนี่ยว Figure 2b แบบจำลองผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวและคอนกรีต Figure 2c และแบบจำลองคอนกรีต Figure 2d

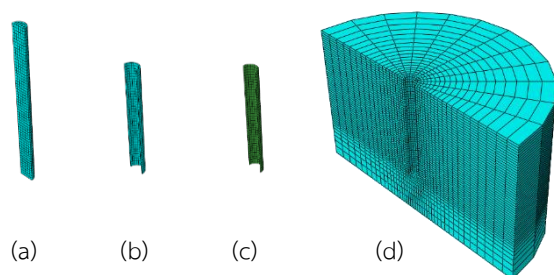


Figure 2 Typical of adhesive anchor model (a) anchor (b) adhesive (c) concrete/adhesive interface (d) concrete

แบบจำลองผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวและคอนกรีตได้สร้างขึ้นมาเพื่อเน้นศึกษาถึงลักษณะการกระจายของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการวิบัติในบริเวณดังกล่าว เนื่องจากการวิบัติจากการยึดเหนี่ยวไม่เพียงพอของสมอยึด

แบบใช้สารยึดเหนี่ยวส่วนใหญ่จะเกิดการลื่นหลุดที่ผิวสัมผัสของสารยึดเหนี่ยวและคอนกรีต [3]

เอลิเมนต์ส่วนใหญ่ที่ใช้ในแบบจำลองจะเป็นเอลิเมนต์ประเภท C3D8R ที่เป็นเอลิเมนต์ในตระกูล 3D-stress ที่เหมาะในการใช้ส่งถ่ายแรงในเอลิเมนต์ของแข็ง (Solid element) โดยจะใช้ในแบบจำลองสมอยึด สารยึดเหนี่ยว และคอนกรีต สำหรับเอลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมตอบสนองของผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวและคอนกรีตจะใช้เอลิเมนต์ประเภท COH3D8 ที่มีความหนาเป็นศูนย์กลางภาพ Figure 2c ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ในตระกูล Cohesive element ที่เหมาะในการใช้จำลองวัสดุที่มีพฤติกรรมตอบสนองแบบเชื่อมยึด (Cohesive behavior) และเหมาะสำหรับการกำหนดพฤติกรรมตอบสนองตามหลักการของ Traction-separation law ซึ่งเป็นที่นิยมใช้อธิบายพฤติกรรมของวัสดุประเภทกาวที่มีชั้นความหนามาก

แบบจำลองของระบบจะถูกสร้างเพียงครึ่งส่วนที่สมมาตรในระบบสามมิติ เพื่อลดระยะเวลาในการประมวลผลของโปรแกรม เป็นแบบจำลองการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงถอนของสมอยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีต มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแบบจำลองคอนกรีต 300 มิลลิเมตร ซึ่งครอบคลุมการกระจายของหน่วยแรงในเอลิเมนต์คอนกรีตและใช้ระยะเวลาในการประมวลผลที่เหมาะสม มีระยะจากปลายรูเจาะถึงขอบล่างของแบบจำลองคอนกรีต 50 มิลลิเมตร เอลิเมนต์ที่เล็กที่สุดกำหนดให้มีขนาด 3 มิลลิเมตร ที่เอลิเมนต์ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยึดเหนี่ยว ขนาดของเอลิเมนต์จะใหญ่ขึ้นจนถึงขอบนอกของเอลิเมนต์คอนกรีตกำหนดให้มีขนาด 15 มิลลิเมตร Figure 3a แบบจำลองวัสดุแต่ละส่วนจะถูกนำมายึดติดกันโดยใช้หลักการ Surface to surface-Tied constraint

แบบจำลองทั้งระบบได้ถูกกำหนดเงื่อนไขขอบเขตโดยการยึดรั้งแท่งคอนกรีตที่ฐานล่างในแนวแกน x, y และ z และ ยึดรั้งขอบนอกด้านบนในแนวแกน y เพื่อป้องกันการโอบรัด (Confinement) ในเนื้อคอนกรีต มีการยึดรั้งเอลิเมนต์คอนกรีตและสมอยึดในระนาบสมมาตรในแนวแกน z และกำหนดการให้แรงในแท่งสมอยึดโดยการกำหนดให้ปลายของสมอยึดเคลื่อนที่ขึ้นในแนวตั้ง (Displacement control) เพื่อให้สอดคล้องกับวิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการใช้งานจริง การจำลองรอยร้าวในคอนกรีตกรณีศึกษาในคอนกรีตร้าวที่มีลักษณะการร้าวแบบแตกปริ ใช้วิธีตัดแปลงแบบจำลองคอนกรีตในกรณีคอนกรีตไม่ร้าวโดยการเพิ่มช่องว่างในแนวระนาบที่เป็นตัวแทนของแนวการร้าวในคอนกรีต ให้มีความกว้างของช่องว่างเท่ากับขนาดความกว้างของรอยร้าว โดยการจำลองรอยร้าวจะจำลองใน 2 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 เป็นรอยร้าวที่มีระนาบการร้าวผ่านผิวสัมผัสการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับสารยึดเหนี่ยวครึ่งซีก Figure 3b และรอยร้าวในรูปแบบที่ 2 เป็นรอยร้าวที่มีระนาบการร้าว

วังชนขอบของรูเจาะ Figure 3c โดยระนาบการร้าวไม่ผ่านผิวสัมผัสการยึดหน่วงเหมือนกรณีที่ 1 โดยรอยร้าวลักษณะนี้เปรียบเสมือนการร้าวแบบแตกปริที่เกิดขึ้นก่อนติดตั้งสมอยึด (Pre-crack) โดยกำหนดให้มีความกว้างของรอยร้าว 0.3 มิลลิเมตร ในเอลิเมนต์คอนกรีต และมีความลึกของระนาบการร้าวเท่ากับระยะฝังยึดของสมอยึด

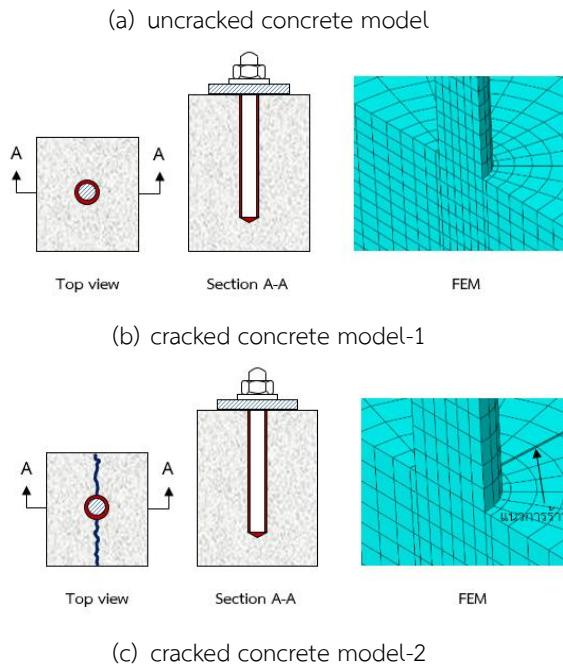


Figure 3 Finite element model of adhesive anchor in uncracked and cracked concrete

2.2 คุณสมบัติวัสดุ

ในแบบจำลองคอนกรีตได้กำหนดคุณสมบัติเป็นคอนกรีตล้วน ที่สามารถแสดงพฤติกรรมตอบสนองได้ทั้งในช่วงเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น แบบจำลองความเสียหายเชิงพลาสติกของคอนกรีต (Concrete damage plasticity, CDP) จึงถูกนำมาใช้กำหนดพฤติกรรมของแบบจำลองคอนกรีตภายใต้การกระทำของแรงอัดและแรงดึง พฤติกรรมในช่วงยืดหยุ่นกำหนดให้มีความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดเป็นไปตามกฎของฮุก (Hooke's law) ซึ่งความสัมพันธ์จะมีลักษณะเชิงเส้น ที่มีค่าความเค้นยืดหยุ่นสูงสุดในช่วงนี้เป็นไปตามคำแนะนำของ ACI318-11 [11] หรือ $0.45 \cdot f_c$ ส่วนในช่วงไม่ยืดหยุ่นเลือกใช้แบบจำลองของ Carreira, D.J. และ Chu, K.H. [12], [13] กำหนดความสัมพันธ์ในช่วงที่ไม่เชิงเส้นทั้งก่อนและหลังจุดที่ความเค้นมีค่าสูงสุด ซึ่งตามวิธีของความเสียหายเชิงพลาสติกที่เลือกใช้จะสามารถแสดงผลในส่วนของความเสียหายหรือการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์คอนกรีตได้ ในรูปของการเสื่อมสภาพความแกร่ง (Stiffness degradation) ซึ่งเกิดขึ้นได้ทั้งผลจากการกระทำของแรงอัดและแรงดึง

แบบจำลองสารยึดเหนี่ยวกำหนดให้มีความหนา 1 มิลลิเมตร ตามคำแนะนำของผู้ผลิต Hilti Co, Ltd [14] มีรูปทรงโค้งตามผิวของรูเจาะคอนกรีต ผลตอบสนองต่อสภาวะการให้แรงกระทำของเอลิเมนต์ที่ทำหน้าที่แทนสารยึดเหนี่ยวกำหนดให้มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นภายใต้แรงเฉือน และกำหนดให้มีพฤติกรรมเชิงพลาสติกในช่วงหลังจุดคราก ดังนั้นรูปแบบการวิบัติจะกำหนดโดยใช้หลักการความเสียหายจากแรงเฉือน (Shear damage) ส่วนความเสียหายสะสม (Damage evolution) ในขั้นตอนการวิบัติจากการเฉือนจะกำหนดให้มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นภายใต้เงื่อนไขของการเคลื่อนที่ ซึ่งจะมีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดสอดคล้องกับค่าการยืดตัวสูงสุด (Elongation at break) ของสารยึดเหนี่ยว

การจำลองผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยวและคอนกรีตในบริเวณนี้ ซึ่งตามจริงแล้วจะไม่มีมิติด้านความหนา ดังนั้นแบบจำลองในส่วนนี้จึงจะกำหนดให้มีคุณสมบัติเป็นเอลิเมนต์เชื่อมยึด (Cohesive elements) ที่มีความหนาเป็นศูนย์ มีขนาดเอลิเมนต์เท่ากับขนาดเอลิเมนต์ของสารยึดเหนี่ยวและคอนกรีตด้านที่อยู่ติดกัน ครอบคลุมพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวและคอนกรีต พฤติกรรมตอบสนองกำหนดให้มีพฤติกรรมตามหลักการของแรงฉุด-การแยก (Traction-separation behavior) ในรูปแบบที่ 2 (Mode II) โดยรูปแบบความสัมพันธ์จะเป็นลักษณะของกราฟ Bilinear

พฤติกรรมตอบสนองของเอลิเมนต์ที่เป็นตัวแทนของสมอยึดจะกำหนดให้มีพฤติกรรมเหมือนเหล็กกล้ากำลังสูงทั่วไปที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นในช่วงที่ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดเป็นเส้นตรง และมีคุณสมบัติเชิงพลาสติกในช่วงที่ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดไม่เป็นเส้นตรง พฤติกรรมการวิบัติจะกำหนดให้มีรูปแบบการวิบัติโดยใช้หลักการความเสียหายจากการยืดตัว (Ductile damage)

แบบจำลองระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตไม่ร้าวจะถูกสร้างให้สอดคล้องกับรูปแบบการศึกษาของ Krishnamurthy, K. [8] ที่มีความยาวระยะฝังยึด 76, 102, 127 และ 152 มิลลิเมตร สมอยึดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร โมดูลัสยืดหยุ่น 2.0×10^5 เมกกะ-ปาสคาล อัตราส่วนปัวซอง 0.30 สารยึดเหนี่ยวประเภทอีพ็อกซีมีกำลังยึดหน่วง 10.34 เมกกะปาสคาล คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดประลัยแบบไม่โอบริด (Unconfined compressive strength) 39.0 เมกกะ-ปาสคาล กำลังรับแรงดึงประลัย 2.93 เมกกะปาสคาล โมดูลัสยืดหยุ่น 2.83×10^4 เมกกะปาสคาล อัตราส่วนปัวซอง 0.18 ในแบบจำลองผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยึดเหนี่ยวจะกำหนดให้มีพฤติกรรมในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสเท่ากับกำลังรับแรงดึงประลัยของคอนกรีต 2.93 เมกกะปาสคาล และมีพฤติกรรมตามแนวขนานกับระนาบผิวสัมผัสเท่ากับกำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยวคือ

10.34 เมกะปาสกาล โมดูลัสเริ่มต้น (Initial modulus) ในระยะตั้งฉากกับผิวสัมผัสและระยะขนานกับผิวสัมผัสเป็น 1,493 และ 553 เมกะปาสกาล ตามลำดับ และมีค่าความเสียหายสะสม (Damage evolution) 10 นิวตันต่อมิลลิเมตร

ส่วนในแบบจำลองระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าวแบบที่ 1 จะกำหนดมิติและคุณสมบัติของวัสดุให้สอดคล้องกับรูปแบบการศึกษาของ Meszaros, J. [9] ในหัวข้อที่ 1 และในแบบจำลองคอนกรีตร้าวแบบที่ 2 จะทำการสร้างแบบจำลองที่มีเงื่อนไขต่าง ๆ ทั้งด้านมิติ ความยาวระยะฝังยึด และการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุให้กับเอลิเมนต์วัสดุแต่ละชนิด เหมือนกับกรณีคอนกรีตไม่ร้าว จะแตกต่างกันตรงที่ในกรณีคอนกรีตร้าวจะมีการเว้นช่องว่างในเอลิเมนต์คอนกรีตเพื่อเป็นการจำลองระยะการแตกร้าวเพิ่มขึ้นในแต่ละรูปแบบ

3. ผลการวิจัย

ผลที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตไม่ร้าว จะนำมาสอบเทียบกับผลการศึกษาที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างจริงของ Krishnamurthy, K. [8] เพื่อพิสูจน์ความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง ซึ่งจะเปรียบเทียบได้เฉพาะค่ากำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุด (N_u) และลักษณะการวิบัติที่สังเกตได้ เช่น ความลึกของกรวยคอนกรีตวิบัติ รัศมีของกรวยคอนกรีตวิบัติ ส่วนค่าการเคลื่อนที่ที่ปลายสมอยึดจะพิจารณาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ Meszaros, J. [9] และ Lehr, B. [10] ที่มีเงื่อนไขต่าง ๆ ใกล้เคียงกัน ส่วนในกรณีคอนกรีตร้าวแบบที่ 1 ผลที่ได้จากแบบจำลองจะนำมาสอบเทียบกับผลการศึกษาของ Meszaros, J. [9] โดยจะทำการเปรียบเทียบกำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดและความสัมพันธ์ของแรงดึงถอนและการเคลื่อนที่ของสมอยึด ทั้งในช่วงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น หรือช่วงที่ความสัมพันธ์ของค่าแรงดึงถอนและการเคลื่อนที่ของสมอยึดเป็นเส้นตรงและไม่เป็นเส้นตรง เพื่อทราบกำลังและพฤติกรรมทั้งในช่วงยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่น ตามลำดับ

3.1 แบบจำลองระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตไม่ร้าว

แบบจำลองระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตไม่ร้าวจะมีพฤติกรรมการวิบัติภายใต้แรงดึงถอนที่สามารถแสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงถอนและการเคลื่อนที่ที่ปลายสมอยึด Figure 4 จากการศึกษาแบบจำลองสมอยึดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร และมีความยาวระยะฝังยึด 76, 102, 127 และ 152 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับระยะฝังยึดจากการศึกษาของ Krishnamurthy, K. [8]

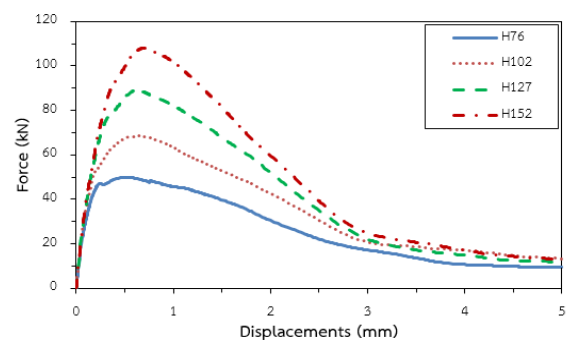


Figure 4 Load-displacement curve of adhesive anchors in uncracked concrete for various embedment depth

จาก Figure 4 จะเห็นว่ากำลังต้านทานแรงดึงถอนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวระยะฝังยึด ส่วนระยะการเคลื่อนที่ของสมอยึดที่จุดที่แรงมีค่าสูงสุดมีค่าอยู่ในช่วง 0.5-1.0 มิลลิเมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Meszaros, J. [9] และ Lehr, B. [10] พฤติกรรมการวิบัติที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการของ Krishnamurthy, K. [8] จะแสดงได้ดังภาพ Figure 5

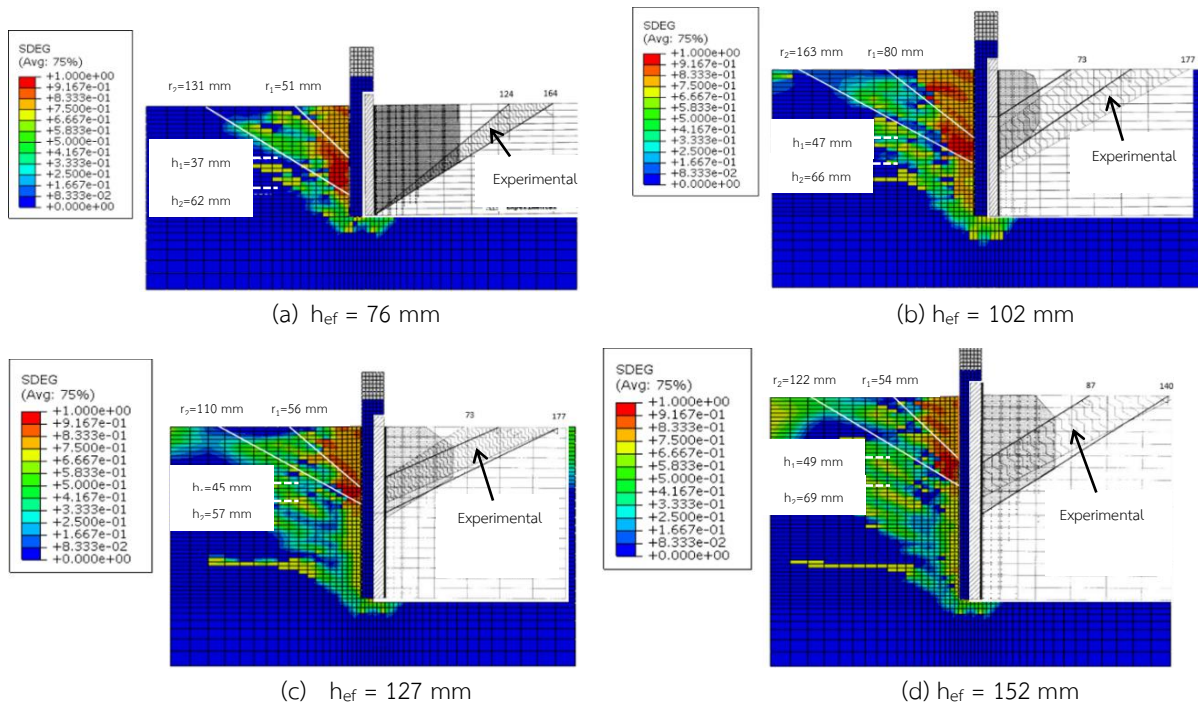


Figure 5 Numerical simulation of failure compare with experimental [8]

โดยจากภาพได้แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบแผนภาพการวิบัติที่ได้จากแบบจำลองจัดวางเทียบในสเกลเดียวกันกับภาพการวิบัติที่ได้จากผลการศึกษาของ Krishnamurthy, K. [8] ของสมอยึดขนาด 16 มิลลิเมตรฝังยึดในคอนกรีตที่มีความยาวระยะฝังยึดแตกต่างกัน

ใน Figure 5 ได้มีการระบุตำแหน่งของความลึกของกรวยคอนกรีตวิบัติและรัศมีการวิบัติของกรวยคอนกรีตไว้ด้วย โดยตำแหน่งของรอยร้าวที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตสามารถพิจารณาได้จากเอลิเมนต์ที่แสดงภาพเป็นสีแดง ซึ่งแสดงถึงการสูญเสียค่าความแกร่งของเอลิเมนต์คอนกรีต (Scalar stiffness degradation at integration points, SDEG) ซึ่งเมื่อค่าดังกล่าวมีค่าเป็น 1 แสดงถึงเอลิเมนต์ดังกล่าวเกิดการสูญเสียความแกร่งโดยสมบูรณ์ หรือมีการแตกร้าวเกิดขึ้นในตำแหน่งดังกล่าว

เมื่อพิจารณาทิศทางและตำแหน่งของการแตกร้าวจะพบว่าลักษณะเป็นการแตกร้าวของคอนกรีตรูปกรวย ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของรูปแบบการวิบัติแบบผสมระหว่างการวิบัติจากการยึดหน่วงกับการวิบัติของคอนกรีตรูปกรวย และพบว่าเกิดขึ้นในทุกระยะฝังยึดของตัวอย่างทดสอบจากแบบจำลอง เมื่อเปรียบเทียบระยะความลึกและระยะรัศมีการกรวยคอนกรีตวิบัติของแบบจำลอง (ฝังซ้าย) เปรียบเทียบกับผลทดสอบตัวอย่างจริง (ฝังขวา) สามารถแสดงผลเปรียบเทียบได้ดังตาราง Table 2

Table 2 Measured and predicted concrete failure cone dimensions.

h_{ef} (mm)	r_1^* (mm)	r_2^* (mm)	h_1^* (mm)	h_2^* (mm)	h_{avg}/h_{ef} measured	h_{avg}/h_{ef} num.
76	124/51	164/131	76/37	76/62	100%	65%
102	73/80	177/163	40/47	72/66	55%	55%
127	59/56	133/110	37/45	56/57	37%	40%
152	87/54	140/122	41/49	76/69	38%	39%

* = The ratios are experimental to numerical values. [8]

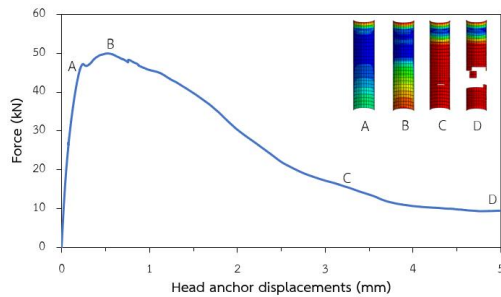
h_{ef} = Effective embedment depth,

h_{avg} = The average depth of concrete cone failure,

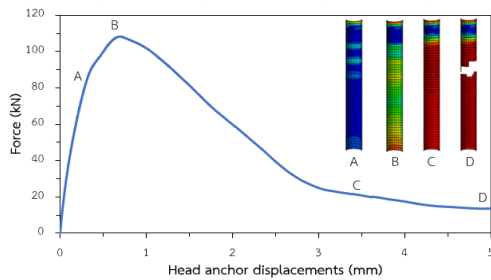
r_1, r_2 = The radius of concrete cone failure ($r_2 > r_1$),

h_1, h_2 = The depth of concrete cone failure ($h_2 > h_1$)

เมื่อพิจารณาการวิบัติที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์เชื่อมยึดซึ่งเป็นตัวแทนของผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตและสกรียึดเหนี่ยว โดยพิจารณาตามช่วงของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงถอนและการเคลื่อนที่ที่ปลายสมอยึดจะพบจุดที่มียะยะสำคัญอยู่ 4 ช่วง ได้แก่ จุด A ซึ่งเป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความชันในช่วงแรก จุด B เป็นจุดที่ค่าแรงดึงถอนมีค่าสูงสุด จุด C เป็นจุดที่เอลิเมนต์เชื่อมยึดเริ่มมีการถูกลบจากการที่เอลิเมนต์ดังกล่าวมีค่าการแยกตัวสูงสุด (Maximum separation) ตามหลักการแรงฉุด-การแยก และจุด D เป็นจุดที่มีค่าการเคลื่อนที่ที่ปลายสมอยึดมากที่สุด และเป็นจุดที่เอลิเมนต์เชื่อมยึดถูกลบมากที่สุด ดังแสดงตัวอย่างใน Figure 6a สำหรับกรณีความยาวระยะฝังยึด 76 มิลลิเมตร และ Figure 6b สำหรับกรณีระยะฝังยึดมีค่า 152 มิลลิเมตร ตามลำดับ



(a) $h_{ef} = 76$ mm



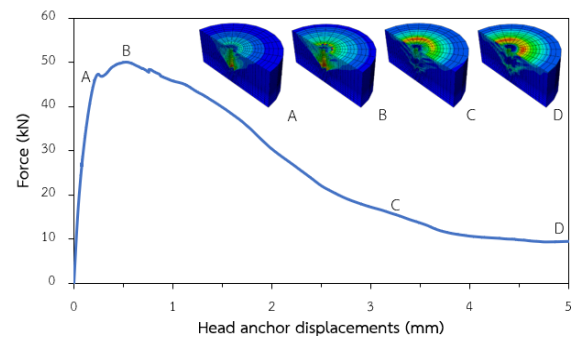
(b) $h_{ef} = 152$ mm

Figure 6 Failure of cohesive layers of 16 mm diameter anchor in uncracked concrete

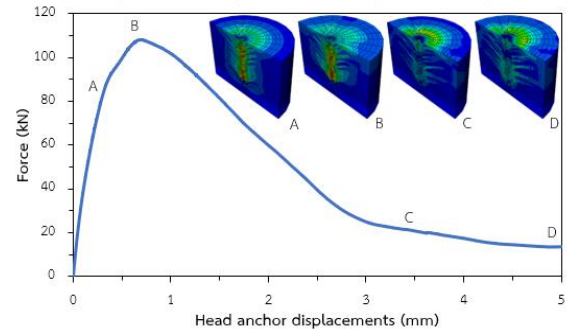
เมื่อพิจารณาการวิบัติในเอลิเมนต์เชื่อมยึดใน Figure 6 จะพบว่าบริเวณที่เอลิเมนต์เกิดการลบล้างจะเป็นบริเวณที่ติดกับเอลิเมนต์ของคอนกรีตที่ผิวรูเจาะที่สูญเสียค่าความแข็งแรงโดยสมบูรณ์ (SDEG=1) แสดงว่าการลบล้างของเอลิเมนต์เชื่อมยึดเกิดจากการแยกตัวของเอลิเมนต์ดังกล่าวเกินกว่าค่าการแยกตัวสูงสุดที่ได้กำหนดไว้ และหากพิจารณา Mises stress ที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์คอนกรีตที่จุดเดียวกันดังภาพ Figure 7a สำหรับกรณีความยาวระยะฝังยึด 76 มิลลิเมตร และ Figure 7b สำหรับกรณีความยาวระยะฝังยึด 152 มิลลิเมตร ตามลำดับ จะพบว่าความเข้มของหน่วยแรงในช่วงที่คอนกรีตเกิดการแตกร้าวบริเวณรูเจาะ (ช่วง C-D) จะลดลงจนไม่แสดงให้เห็นภาพสีของความเข้มของหน่วยแรง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าบริเวณดังกล่าวมีการแตกร้าวของคอนกรีตเกิดขึ้น

3.2 แบบจำลองระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าว

แบบจำลองระบบฝังยึดในคอนกรีตร้าว ได้ศึกษากรณีการร้าวในคอนกรีต 2 รูปแบบ เปรียบเทียบกับกรณีคอนกรีตไม่ร้าว ตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1 ผลการประมวลผลแบบจำลองสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ของแรงดึงถอนและการเคลื่อนที่ที่ปลายของสมอยึดของแบบจำลองสมอยึดในคอนกรีตไม่ร้าว (H110-UNCR) ในคอนกรีตร้าวที่มีระนาบการร้าวผ่านผิวสัมผัสการยึดเหนี่ยว (H110-CR1) และในคอนกรีตร้าวที่มีระนาบการร้าวไม่ผ่านผิวสัมผัสการยึดเหนี่ยว (H110-CR2) ใน Figure 8



(a) $h_{ef} = 76$ mm



(b) $h_{ef} = 152$ mm

Figure 7 Mises stress of concrete elements of 16 mm diameter anchor in uncracked concrete

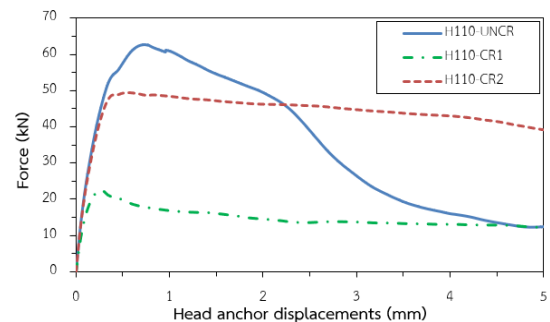


Figure 8 Load-displacement curve of bonded anchors in uncracked and cracked concrete from numerical model

ในกรณีแบบจำลองการร้าวที่มีระนาบการร้าวผ่านผิวสัมผัสการยึดเหนี่ยว (H110-CR1) เมื่อเปรียบเทียบกับผลทดสอบตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการโดย Meszaros, J. (2002) ตามข้อมูลความสัมพันธ์ใน Figure 1 ภายได้เงื่อนไขเดียวกัน กล่าวคือ ใช้สมอยึดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความยาวระยะฝังยึด 110 มิลลิเมตร ฝังในคอนกรีตร้าวที่มีระนาบการร้าวผ่านผิวสัมผัสการยึดเหนี่ยว เปรียบเทียบกับผลการศึกษาในกรณีฝังยึดในคอนกรีตไม่ร้าว ผลที่ได้เปรียบเทียบกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงถอนและการเคลื่อนที่ที่ปลายสมอยึดได้ดังภาพ Figure 9 ซึ่งจะพบว่ากราฟความสัมพันธ์ในกรณีคอนกรีตไม่ร้าวจากแบบจำลองและจากผลทดสอบมีลักษณะคล้ายคลึงกัน ค่าแรงดึงถอนสูงสุดมี

ค่าใกล้เคียงกัน ส่วนในกรณีคอนกรีตร้าวผ่านผิวสัมผัสการยึดเหนี่ยว ลักษณะกราฟที่ได้จากแบบจำลองและผลทดสอบจะพบว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกัน อีกทั้งค่าแรงดึงถอนสูงสุดยังใกล้เคียงกันอีกด้วย แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในกรณีคอนกรีตไม่ร้าวกับคอนกรีตร้าวผ่านผิวสัมผัสการยึดเหนี่ยวมีความน่าเชื่อถืออยู่ในระดับที่ยอมรับได้

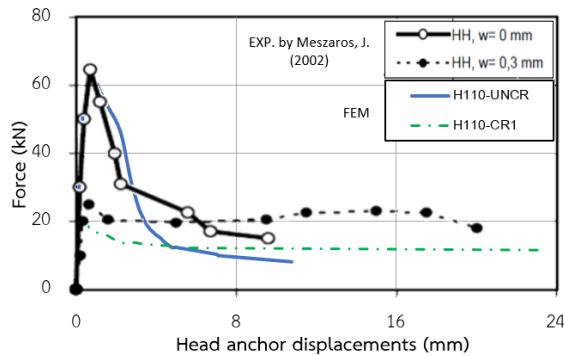


Figure 9 Load-displacement curve compare between numerical model and experimental. [8]

ดังนั้นผลที่ได้จากการศึกษาแบบจำลองในคอนกรีตร้าวที่มีระนาบการร้าวไม่ผ่านผิวสัมผัสการยึดเหนี่ยว จะถูกรับรองความถูกต้องจากกรณีการร้าวที่มีระนาบการร้าวผ่านผิวสัมผัสการยึดเหนี่ยว ที่ได้มีการกำหนดตัวแปรให้แก่แบบจำลองวัสดุแบบเดียวกัน แบบจำลองการร้าวที่มีระนาบการร้าวไม่ผ่านผิวสัมผัสการยึดเหนี่ยว จะเป็นต้นแบบในการสร้างแบบจำลองระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าว ที่เป็นการร้าวที่เกิดขึ้นก่อนติดตั้งสมอยึด เพื่อเปรียบเทียบผลกับกรณีคอนกรีตไม่ร้าวในหัวข้อ 3.1 ซึ่งความสัมพันธ์ของแรงดึงถอนและการเคลื่อนที่ที่ปลายสมอยึดในกรณีคอนกรีตร้าวที่มีระนาบการร้าวไม่ผ่านผิวสัมผัสการยึดเหนี่ยว และมีระยะฝังยึดแตกต่างกัน แสดงใน Figure 10 เมื่อใช้สมอยึดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร และมีคุณสมบัติต่าง ๆ เหมือนกับแบบจำลองกรณีคอนกรีตไม่ร้าวในหัวข้อ 3.1 และมีขนาดความกว้างของรอยร้าว 0.3 มิลลิเมตร

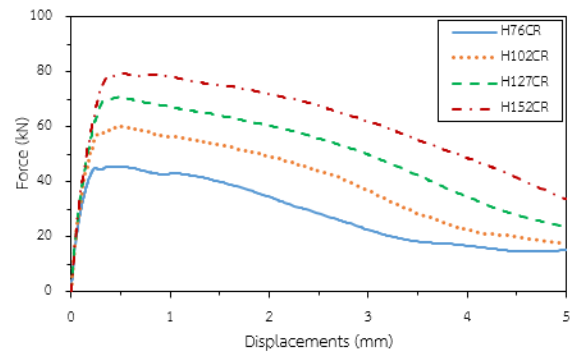


Figure 10 Load-displacement curve of adhesive anchors in cracked concrete for various embedment depth

4. อภิปรายผลการวิจัย

ค่ากำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตไม่ร้าว สามารถนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และค่าที่ได้จากสมการทำนายกำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดใน Table 3 ค่าแรงดึงถอนสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองใน Table 3 column 5 ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของกราฟใน Figure 4 ของสมอยึดที่มีความยาวระยะฝังยึด 76, 102, 127 และ 152 มิลลิเมตร ตามลำดับ จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างจริงของ Krishnamurthy, K. [8] ใน Table 3 column 6 สมการทำนายแรงยึดเหนี่ยวจากการจำลองการกระจายหน่วยแรงยึดเหนี่ยวแบบสม่ำเสมอใน Table 3 column 7 สมการทำนายแรงยึดเหนี่ยวจากการจำลองการกระจายหน่วยแรงยึดเหนี่ยวแบบยึดหยุ่นใน Table 3 column 8 และสมการทำนายแรงยึดเหนี่ยวจากการจำลองการกระจายหน่วยแรงยึดเหนี่ยวแบบสม่ำเสมออย่างง่ายใน Table 3 column 8 โดยค่าหน่วยแรงเฉือนเฉลี่ย (τ_0) ใน Table 3 column 2 ได้จากผลการคำนวณของโปรแกรมในช่วง Increment ที่เกิดแรงดึงถอนสูงสุดเฉลี่ยจากทุกเอลิเมนต์ในชั้นของผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยึดเหนี่ยวที่เป็นเอลิเมนต์เชื่อมยึด และค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุด (τ_{max}) ใน Table 3 column 3 ได้จากการคำนวณของโปรแกรมในช่วง Increment ที่เกิดแรงดึงถอนสูงสุดในเอลิเมนต์ที่มีค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุด จากตารางจะพบว่าค่าแรงดึงถอนสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างจริงของ Krishnamurthy, K. [8] โดยมีค่าร้อยละของความแตกต่างสูงสุดคือ 6% ดังแสดงใน Table 3 column 10 จากผลการศึกษา 4 ตัวอย่าง ที่มีความยาวระยะฝังยึดแตกต่างกัน และจะพบว่าสมการทำนายแรงยึดเหนี่ยวจากการจำลองการกระจายหน่วยแรงยึดเหนี่ยวแบบสม่ำเสมออย่างง่ายให้ผลการทำนายค่าแรงดึงถอนสูงสุดได้ใกล้เคียงค่าที่ได้จากการทดสอบมากที่สุด โดยมีค่าร้อยละของความแตกต่างสูงสุด 5% ดังแสดงใน Table 3 column 13

Table 3 Numerical, Experimental and Predicted Adhesive Anchor Pullout Forces for Different Embedment Depths.

h_{ef}	τ_0	τ_{max}	λ'	Numerical	Experimental	Experimental UBM	Experimental EBM	Uniform bond model	N_{NUM}/N_{EXP}	N_{NUM}/N_{UBM}	N_{NUM}/N_{EBM}	N_{NUM}/N_{UM}
(mm)	(MPa)	(MPa)		(N)	(N)	(N)	(N)	(N)	(5)/(6)	(5)/(7)	(5)/(8)	(5)/(9)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
76	11.67	18.68	0.02	50,001	50,000	65,913	33,185	51,604	1.00	0.76	1.51	0.97
102	11.88	16.51	0.02	68,461	72,000	72,605	197,493	69,258	0.95	0.94	0.35	0.99
127	12.41	18.32	0.02	88,986	84,000	88,060	350,317	86,232	1.06	1.01	0.25	1.03
152	12.61	18.26	0.02	108,103	105,000	111,212	404,813	103,207	1.03	0.97	0.27	1.05
(2) Obtained from numerical model				(6) Experimental by Krishnamurthy [8]								
(3) Obtained from numerical model				(7) Combined cone-bond model using new cone model [5]								
(4) Obtained from Cook [2]				(8) Combined cone-bond model using Elastic bond-stress model by [2]								
(5) Obtained from numerical model				(9) $\tau_{avg} \cdot \pi \cdot d_0 \cdot h_{ef}$ and τ_{avg} obtained from average bond strength value from experimental results								

ค่าความลึกเฉลี่ยของกรวยคอนกรีตวิบัติที่ได้จากการศึกษาแบบจำลองพบว่าใกล้เคียงกับผลทดสอบยกเว้นกรณีความยาวระยะฝังยึด 76 มิลลิเมตร ที่ต่างกันเล็กน้อย และพบว่าเมื่อความยาวระยะฝังยึดมีค่ามากขึ้น สัดส่วนความลึกของกรวยคอนกรีตวิบัติเทียบกับความยาวระยะฝังยึดของสมอยึดจะลดลง ดังใน Table 2 ค่าความลึกเฉลี่ยของกรวยคอนกรีตวิบัติจากผลการศึกษาทั้งหมด อยู่ในช่วง 50-100 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นช่วงความลึกของกรวยคอนกรีตวิบัติที่แนะนำโดย Cook, R.A., Doerr, G.T. และ Klingner, R.E. [2]

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ทั้งพฤติกรรมการวิบัติและแรงดึงถอนสูงสุดที่คำนวณได้จากแบบจำลองระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตไม่ร้าว มีความสอดคล้องใกล้เคียงกับผลการทดสอบตัวอย่างจริงของ Krishnamurthy, K. [8] และมีความแตกต่างอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ยังสามารถแสดงแผนภาพการกระจายของหน่วยแรงในเอเลเมนต์เชื่อมยึดซึ่งเป็นตัวแทนของผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยึดเหนี่ยว และเป็นอาณาบริเวณที่มักเกิดการวิบัติจากการยึดหน่วง โดยมีรูปแบบการกระจายของหน่วยแรงเฉือนสอดคล้องกับผลการศึกษาแบบจำลองในอดีต [7], [8]

ในแบบจำลองระบบฝังยึดในคอนกรีตร้าว เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของแรงดึงถอนกับการเคลื่อนที่ของสมอยึด ซึ่งเป็นผลที่ได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการในอดีต ดังแสดงใน Figure 9 จะพบว่า ค่าแรงดึงถอนสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองในกรณีคอนกรีตไม่ร้าว ($N_{ucr,num}$) กับค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ($N_{ucr,exp}$) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีสัดส่วนความแตกต่างของค่าแรงดึงถอนสูงสุด 2% ($N_{ucr,num}/N_{ucr,exp} = 62,713/64,300 = 0.98$) อีกทั้งยังมีรูปแบบความสัมพันธ์คล้ายคลึงกัน แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองในกรณีคอนกรีตไม่ร้าว สามารถแสดงค่าความสัมพันธ์ของแรงดึงถอนและการเคลื่อนที่ของสมอยึดได้ใกล้เคียงกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ อีกทั้งยังมีค่ากำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดใกล้เคียงกันและอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

ในกรณีคอนกรีตร้าวมีระนาบการร้าวผ่านผิวสัมผัสการยึดหน่วง กราฟความสัมพันธ์ของผลที่ได้จากแบบจำลองกับผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการมีรูปแบบคล้ายคลึงกัน โดยมีความสัมพันธ์ของกราฟในช่วงก่อนถึงจุดที่แรงดึงถอนมีค่าสูงสุดเป็นเส้นตรงที่มีความชันน้อยกว่ากรณีคอนกรีตไม่ร้าวเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงของระบบลดลงเล็กน้อยในกรณีคอนกรีตร้าว เมื่อเปรียบเทียบค่าแรงดึงถอนสูงสุดพบว่าค่าแรงดึงถอนสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองลดลง 14% ($N_{cr,num}/N_{cr,exp} = 22,209/25,900 = 0.86$) เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการศึกษาในห้องปฏิบัติการในอดีต แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีคอนกรีตไม่ร้าวที่ได้จากแบบจำลอง จะพบว่าแรงดึงถอนสูงสุดลดลงเหลือ 35% ของกรณีคอนกรีตไม่ร้าว Table 4 ซึ่งเป็นค่าการลดลงของแรงดึงถอนสูงสุดที่อยู่ในช่วง 25-80% ที่แนะนำ [2] สำหรับกรณีความกว้างรอยร้าว 0.3 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาความชันของกราฟในช่วงไม่เชิงเส้นหลังจุดที่แรงดึงถอนมีค่าสูงสุดของกราฟในกรณีคอนกรีตร้าวที่มีระนาบการร้าวผ่านผิวสัมผัสการยึดหน่วง จะมีความชันน้อยกว่าในกรณีคอนกรีตไม่ร้าวค่อนข้างมาก แสดงให้เห็นถึงอัตราที่ลดลงของแรงในช่วงนี้ของกรณีคอนกรีตร้าวต่ำกว่าในกรณีคอนกรีตไม่ร้าว ซึ่งเป็นผลมาจากการแตกร้าวของคอนกรีต

ส่วนผลการศึกษาแบบจำลองในกรณีสมอยึดฝังในคอนกรีตร้าวที่มีระนาบการร้าวไม่ผ่านผิวสัมผัสการยึดหน่วงหรือระนาบการร้าวแบบปริที่วิ่งชนผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยึดเหนี่ยว จะพบว่าความสัมพันธ์ของแรงดึงถอนกับการเคลื่อนที่ที่ปลายของสมอยึด มีรูปแบบความสัมพันธ์คล้ายกรณีการร้าวผ่านผิวสัมผัสการยึดหน่วง แต่ค่าแรงดึงถอนสูงสุดมีค่ามากกว่า โดยเมื่อเทียบกับกรณีคอนกรีตไม่ร้าวพบว่ามีค่าแรงดึงถอนสูงสุดลดลงเหลือ 79% ซึ่งลดลงน้อยกว่ากรณีการร้าวผ่านผิวสัมผัสการยึดหน่วงประมาณ 2 เท่า

Table 4 Peak load of bond anchors in uncracked and cracked concrete and load reduction ratio

Model	Peak load (N)	Load reduction ratio
H110-uncracked	62,713	1.00
H110-cracked-1	22,209	0.35
H110-cracked-2	49,259	0.79

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการวิบัติของกรณิกอนกรีตร้าวที่มีระนาบการร้าวไม่ผ่านผิวสัมผัสการยึดเหนี่ยวปรากฏว่าการวิบัติที่เอนกยึดและเอนกยึดคอนกรีตเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มของหน่วยแรงหลักในเอนกยึดคอนกรีตบริเวณรอยร้าวจะลดลงเมื่อเทียบกับบริเวณอื่น ซึ่งแตกต่างจากการณิกอนกรีตไม่ร้าวที่มีการกระจายของหน่วยแรงหลักสม่ำเสมอในระนาบตั้งฉากกับรัศมีของสมอยึด ดังแสดงใน Figure 11

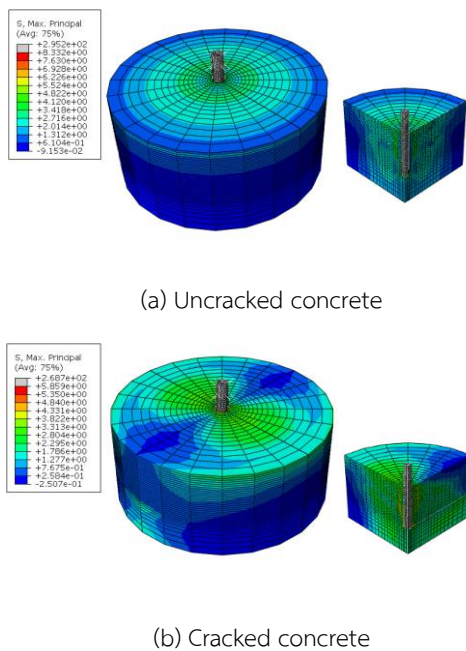


Figure 11 Maximum principle stress at peak load of adhesive anchor in uncracked and uncracked concrete

อีกทั้งยังพบว่าขนาดความกว้างของรอยร้าวเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเคลื่อนที่ของสมอยึด แสดงให้เห็นว่าในคอนกรีตร้าวที่มีระนาบการร้าวไม่ผ่านผิวสัมผัสการยึดเหนี่ยวนี้ กำลังต้านทานการยึดเหนี่ยวของระบบส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับความสามารถต้านทานแรงดึงของคอนกรีตร้าว โดยที่คอนกรีตร้าวจะมีกำลังต้านทานแรงดึงอ่อนไม่สมบูรณ์เท่าคอนกรีตไม่ร้าว เนื่องจากความเค้นในเนื้อคอนกรีตไม่สามารถส่งต่อไปทั่วถึงถึงหน้าตัดของคอนกรีตได้เพราะเกิด

ความไม่ต่อเนื่องบริเวณรอยร้าวดังกล่าว ทำให้กำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีตร้าวลดลง

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า แบบจำลองระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าวที่มีระนาบการร้าวผ่านผิวสัมผัสการยึดเหนี่ยว มีความสัมพันธ์ของค่าแรงดึงถอนและการเคลื่อนที่ที่ปลายสมอยึด สอดคล้องกับผลการศึกษาในอดีต ทำให้แบบจำลองมีความน่าเชื่อถืออยู่ในระดับที่ยอมรับได้

เมื่อเทียบค่าแรงดึงถอนสูงสุดจากการณิกอนกรีตไม่ร้าวใน Figure 4 กับกรณิกอนกรีตร้าวใน Figure 10 ของสมอยึดที่มีความยาวระยะฝังยึดเท่ากัน จะสามารถแสดงอัตราการลดลงของแรงดึงถอนสูงสุดของสมอยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ที่มีระยะฝังยึดแตกต่างกันดังแสดงในตาราง Table 5

Table 5 Ratio of Peak load of adhesive anchors in cracked and uncracked concrete for various embedment depth

Embedment depth (mm)	$N_{cracked} / N_{uncracked}$
76	0.91
102	0.88
127	0.80
152	0.73

จาก Table 5 จะพบว่าสัดส่วนการลดลงของแรงดึงถอนสูงสุดของสมอยึดที่มีความยาวระยะฝังยึด 76, 102, 127 และ 152 มิลลิเมตร ลดลงเหลือ 91%, 88%, 80% และ 73% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อความยาวระยะฝังยึดมีค่าเพิ่มขึ้น ผลกระทบของรอยร้าวในคอนกรีตจะส่งผลต่อกำลังของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวมากขึ้น โดยใน Figure 12 ได้แสดงให้เห็นแนวโน้มการลดลงของอัตราส่วนของแรงดึงถอนสูงสุดในคอนกรีตร้าวเทียบกับคอนกรีตไม่ร้าว เมื่อความยาวระยะฝังยึดเพิ่มขึ้น

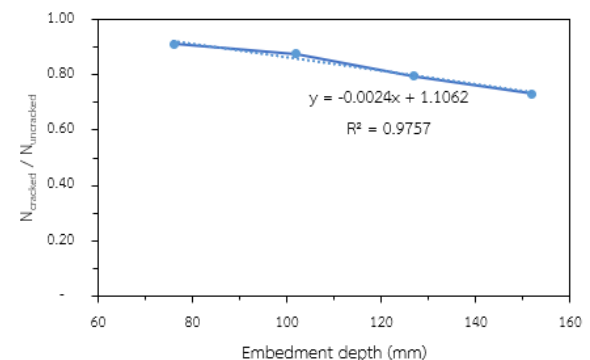


Figure 12 Ratio of Peak load in cracked to uncracked concrete for various embedment depth

เมื่อพิจารณาแนวโน้มการลดลงแบบเชิงเส้นของอัตราส่วนระหว่างค่าแรงดึงถอนสูงสุดในการทดสอบกับคอนกรีตไม่ร้าวใน Figure 12 จะได้สมการทำนายกำลังรับแรงดึงถอนสูงสุดของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าวสำหรับสมอยึดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ดังสมการ (6)

$$N_{cracked} = N_{uncracked} \cdot (1.1062 - 0.0024 \cdot h_{ef}) \quad (6)$$

เมื่อ $N_{cracked}$ คือ แรงดึงถอนสูงสุดของสมอยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ในคอนกรีตร้าว (นิวตัน), $N_{uncracked}$ คือ แรงดึงถอนสูงสุดของสมอยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ในคอนกรีตไม่ร้าว (นิวตัน), และ h_{ef} คือ ระยะฝังยึด (มิลลิเมตร)

การลดลงของอัตราส่วนของแรงดึงถอนสูงสุดในการทดสอบคอนกรีตร้าวกับคอนกรีตไม่ร้าว เมื่อความยาวระยะฝังยึดมีค่ามากขึ้น เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ส่วนที่เป็นระนาบการร้าวในคอนกรีต ส่งผลให้การกระจายของหน่วยแรงหลักในคอนกรีตผ่านหน้าตัดร้าวลดลงมากขึ้น โดยเฉพาะบริเวณใกล้ผิวบนของแท่งคอนกรีตที่มีส่วนในการต้านทานการวิบัติแบบคอนกรีตรูปกรวยในการทดสอบคอนกรีตไม่ร้าว ดังนั้นเมื่อเกิดรอยร้าวขึ้นในบริเวณดังกล่าว ความสามารถต้านทานแรงดึงถอนของคอนกรีตในบริเวณดังกล่าวจึงลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า การกระจายของหน่วยแรงหลักในระนาบร้าวมีความไม่สม่ำเสมอทั้งในระนาบตั้งฉากกับแนวแรงดึงถอนและระนาบขนานกับแนวแรงดึงถอน Figure 11b ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของความยาวระยะฝังยึดจะส่งผลต่อการกระจายของหน่วยแรงในระนาบขนานกับแนวแรงดึงถอนโดยตรง นอกจากนี้ยังพบว่าการกระจายของหน่วยแรงหลักจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดในระนาบร้าวโดยเฉพาะในแนวขนานกับแนวแรงดึงถอน เมื่อความยาวระยะฝังยึดมีค่ามากขึ้น แสดงให้เห็นว่าผลกระทบของรอยร้าวในคอนกรีตจะมีแนวโน้มมากขึ้นตามความยาวระยะฝังยึดที่เพิ่มขึ้น

5. สรุปและเสนอแนะ

1. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในระบบสามมิติในงานวิจัยนี้สามารถแสดงพฤติกรรมทั้งในช่วงเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวทั้งในคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีตร้าวได้สอดคล้องกับผลการศึกษาในอดีต

2. กลไกการวิบัติที่สังเกตได้จากแบบจำลองระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตไม่ร้าว ในแบบจำลองสมอยึดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ฝังยึดในคอนกรีต 76, 102, 127 และ 152 มิลลิเมตร พบว่าทั้งหมดมีรูปแบบการวิบัติแบบผสมระหว่างวิบัติของคอนกรีตรูปกรวยและการวิบัติจากการยึดเหนี่ยว โดยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบตัวอย่างจริง[8] จะพบว่ามีความตรงกันของการเกิด

กรวยคอนกรีตวิบัติใกล้เคียงกัน อีกทั้งยังพบว่าค่าแรงดึงถอนสูงสุดจากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยมีความแตกต่างอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ยังพบว่าสมการ Uniform bond model สามารถทำนายค่าแรงดึงถอนสูงสุดได้ใกล้เคียงแบบจำลองมากที่สุด

3. แบบจำลองระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าวที่มีระนาบการร้าวผ่านผิวสัมผัสการยึดเหนี่ยวครึ่งส่วน ให้ผลการศึกษาสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบ [9] ทั้งพฤติกรรมในช่วงเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น และค่าแรงดึงถอนสูงสุดลดลงเหลือ 35% เมื่อเทียบกับกรณีคอนกรีตไม่ร้าว

4. ในกรณีฝังยึดในคอนกรีตร้าวที่มีระนาบการร้าวไม่ผ่านผิวสัมผัสการยึดเหนี่ยว ค่าแรงดึงถอนสูงสุดจะลดลงเหลือ 79% เมื่อเทียบกับกรณีคอนกรีตไม่ร้าว โดยมีรูปแบบความสัมพันธ์ของแรงดึงถอนและการเคลื่อนที่ที่ปลายสมอยึดคล้ายคลึงกับกรณีการฝังยึดในคอนกรีตร้าวที่มีระนาบการร้าวผ่านผิวสัมผัสการยึดเหนี่ยวครึ่งส่วน ทั้งในช่วงเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น นอกจากนี้ยังพบว่า ผลกระทบของรอยร้าวในคอนกรีตจะมีแนวโน้มมากขึ้นตามความยาวระยะฝังยึดที่เพิ่มขึ้น และค่าแรงดึงถอนสูงสุดของสมอยึดในคอนกรีตร้าวที่มีระนาบการร้าวไม่ผ่านผิวสัมผัสการยึดเหนี่ยว สามารถทำนายค่าได้จากสมการ (6) สำหรับสมอยึดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ สามารถนำมาใช้ในการประเมินกำลังและพฤติกรรมของระบบ ฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีตร้าวได้เป็นอย่างดี โดยมีค่าแรงดึงถอนสูงสุดใกล้เคียงกับผลการทดสอบในอดีตและใกล้เคียงผลที่ได้จากสมการ Uniform bond model ในการทดสอบคอนกรีตไม่ร้าว ส่วนในการทดสอบคอนกรีตร้าวที่มีระนาบการร้าวไม่ผ่านผิวสัมผัสการยึดเหนี่ยวจะสามารถทำนายค่ากำลังรับแรงดึงถอนสูงสุดได้โดยใช้สมการ (6) ซึ่งใช้ได้เฉพาะสมอยึดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร เท่านั้น ดังนั้นในการศึกษาในครั้งต่อไป ควรจะศึกษาแนวโน้มของอัตราการลดลงระหว่างค่าแรงดึงถอนสูงสุดในการทดสอบคอนกรีตร้าวกับคอนกรีตไม่ร้าวสำหรับสมอยึดขนาดอื่น ๆ เพื่อให้การทำนายค่ากำลังรับแรงดึงถอนสูงสุดในการทดสอบมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น และเพื่อให้เกิดความมั่นใจในประสิทธิภาพของแบบจำลอง อาจจะต้องใช้แบบจำลองในการศึกษาตัวแปรอื่นที่มีผลต่อกำลังของระบบฝังยึด เช่น กำลังอัดประลัยของคอนกรีต กำลังยึดเหนี่ยวของสารยึดเหนี่ยวขนาดความกว้างของรอยร้าว เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ที่ได้อนุเคราะห์ทุนสนับสนุนการวิจัย และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้สนับสนุนอุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัย

7. Reference

- [1] Cook, R.A. 1993. "Behaviour of Chemically Bonded Anchors." **Journal of Structural Engineering**, American Society of Civil Engineers. 119(9): 2744–2762.
- [2] Cook, R.A., Doerr, G.T. and Klingner R.E. 1993. "Bond Stress Model for Design of Adhesive Anchors" **ACI Structural Journal**. 90(5): 514–524.
- [3] Eligehausen, R., Mallee, R. and Silva, J. 2006. **Anchorage in Concrete Construction. First edition.** Ernst & Sohn GmbH & Co. KG. Published.
- [4] Sakla, SSS. and Ashour, A.F. 2005. "Prediction of tensile capacity of single adhesive anchors using neural networks." **Computers and Structures**. 83: 1792–1803.
- [5] Eligehausen, R., Mallee, R., and Rehm, G. 1984. "Befestigungen mit Verbundankern (Fastenings with bonded anchors), "**Betonwerk + FertigteilTechnik**. No. 10: 682-692.
- [6] Cook, R. A. 1993. "Behavior of chemically bonded anchors." **Journal of Structural Engineering**. 119(9): 2744-2762.
- [7] McVay, M.C., Cook, R.A. and Krishnamurthy, K. 1996. "Pullout Simulation of Postinstalled Chemically Bonded Anchors." **Journal of Structure Engineering**. 122(9): 1016-1024.
- [8] Krishnamurthy, K. 1996. **Development of a Viscoplastic Consistent Tangent FEM Model with Applications to Adhesive Bonded Anchors.** PhD Dissertation, Department of Civil Engineering, The University of Florida.
- [9] Meszaros, J. 2002. **Tragverhalten von Einzelverbunddübeln unter zentrischer Kurzzeitbelastung.** Dissertation in Vorbereitung, Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart.
- [10] Lehr, B. 2003. **Tragverhalten von Verbunddübeln unter zentrischer Belastung im ungerissenen Beton – Gruppenbefestigungen und Befestigungen am Bauteilrand.** Dissertation in Vorbereitung, Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart.
- [11] ACI Committee 318-11. 2011. **Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary.** American Concrete Institute, Detroit, MI, USA: 417-463.
- [12] Carreira D.J. and Chu, K.H. 1985. "Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Compression". **ACI Journal**. 82(6): 797-804.
- [13] Carreira D.J. and Chu, K.H. 1986. "Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Tension." **ACI Journal**. 83(1): 21-28.
- [14] Hilti Co, Ltd. 2017. **Hilti Anchor Systems.** <http://www.hilti.co.th>. Accessed 14 February 2017. (in Thai)