



วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.

UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

ผลของรูปแบบการร้าวในคอนกรีตต่อพฤติกรรมของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยว

Effect of Cracked Patterns in Concrete to Behaviors of Adhesive Anchoring System

ภาคิณ ลอยเจริญ¹ เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย^{1*} กิตติศักดิ์ ชันติยวิชัย¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

Phakin Loyjaroen¹ Griengsak Kaewkulchai^{1*} Kittisak Kuntiyawichai¹

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani 34190

*Corresponding author.

E-mail: griengsak.k@ubu.ac.th; Telephone: 08 3729 6636.

วันที่รับบทความ 15 มีนาคม 2562; วันแก้ไขบทความครั้งที่ 1 13 พฤษภาคม 2562; วันแก้ไขบทความครั้งที่ 2 22 พฤษภาคม 2562; วันที่ตอบรับบทความ 28 พฤษภาคม 2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของคอนกรีตร้าวที่ส่งผลต่อระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยว โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์-เอลิเมนต์ในระบบสามมิติ จำลองระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวภายใต้แรงดึงถอน ในคอนกรีตร้าวที่มีตำแหน่งของรอยร้าวในแนวตั้งแตกต่างกัน พฤติกรรมตอบสนองของแบบจำลองสมอยึด สารยึดเหนี่ยว และคอนกรีต กำหนดให้มีพฤติกรรมการวิบัติตามหลักการความเสียหายจากการยึดตัว จากการเฉือนและแบบจำลองความเสียหายเชิงพลาสติกของคอนกรีต ตามลำดับ ส่วนแบบจำลองผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตใช้เอลิเมนต์เชื่อมยึดที่มีความหนาเป็นศูนย์และกำหนดพฤติกรรมตอบสนองแบบ traction-separation behavior ผลการศึกษาพบว่าเมื่อตำแหน่งของการร้าวในคอนกรีตลึกลง พฤติกรรมและกำลังต้านทานแรงดึงถอนของระบบฝังยึดจะเข้าใกล้กรณีฝังยึดในคอนกรีตไม่ร้าวมากขึ้น โดยผลกระทบของตำแหน่งรอยร้าวจะมากขึ้นเมื่อรอยร้าวมีตำแหน่งเข้าใกล้ผิวบนสุดของแท่งคอนกรีต ส่วนรอยร้าวที่อยู่ใต้ระยะฝังยึดจะไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมและกำลังของระบบ นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มขึ้นของระยะการร้าว 1 และ 2 ระยะบ่ง ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดลดลงร้อยละ 25 และ 39 ตามลำดับ

คำสำคัญ

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยว คอนกรีตร้าว

Abstract

This research aims to study the effects of cracked concrete that affects the adhesive anchoring system using a three-dimensional finite element model. Adhesive anchoring system under the pull-out force was modeled under cracked condition with different vertical cracks zone. The failure response of anchor model, adhesive model and concrete model are defined failure response types Ductile Damage, Shear Damage and Concrete Damage Plasticity Model respectively. For the model of adhesive/concrete interface are used cohesive elements and defined failure response type Traction-Separation Behavior. The results showed that when the position of cracked in concrete is deep, their behavior and the pull-out strength of the adhesive anchor was closed to the case of adhesive anchor in the uncracked concrete. The effect

of the crack zone was increased when the cracks were closed to the top surface of the concrete. The cracks under the embedding phase do not affect the behavior and strength of the system. It also found that increasing of the cracked plane of one-plane and two-plane would result in the reduction of maximum pull-out strength by 25% and 39% respectively.

Keywords

finite element model; adhesive anchoring system; cracked concrete.

1. บทนำ

ระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้งานร่วมกับคอนกรีตที่มีอายุและผ่านการใช้งานในระบบโครงสร้างตามที่ออกแบบไว้ซึ่งอาจมีการแตกร้าวจากการรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติมที่ในสภาวะใช้งาน ดังนั้นจึงเสี่ยงไม่ได้ที่คอนกรีตจะมีโอกาสเกิดการแตกร้าวขึ้นก่อนติดตั้งระบบฝังยึดทั้งรอยร้าวที่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรือรอยร้าวที่อยู่ในเนื้อคอนกรีตซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ ผลการศึกษาในอดีตส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาาระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตไม่ร้าว (uncracked concrete) ทั้งจากการทดสอบตัวอย่างจริง [1–3] และการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษา [4–6] แต่สำหรับในคอนกรีตร้าว (cracked concrete) การศึกษาในอดีตยังอยู่ในวงจำกัด เพราะการศึกษาในห้องปฏิบัติการสามารถทำได้ยากเนื่องจากมีข้อจำกัดหลายอย่าง ส่วนการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาระบบฝังยึดในคอนกรีตร้าวยังมีไม่มากนัก การสร้างแบบจำลองในระบบสามมิติที่จะสามารถอธิบายพฤติกรรมในคอนกรีตร้าวได้ดีกว่าในระบบสองมิติมีข้อจำกัดด้านการประมวลผลของโปรแกรมในอดีต

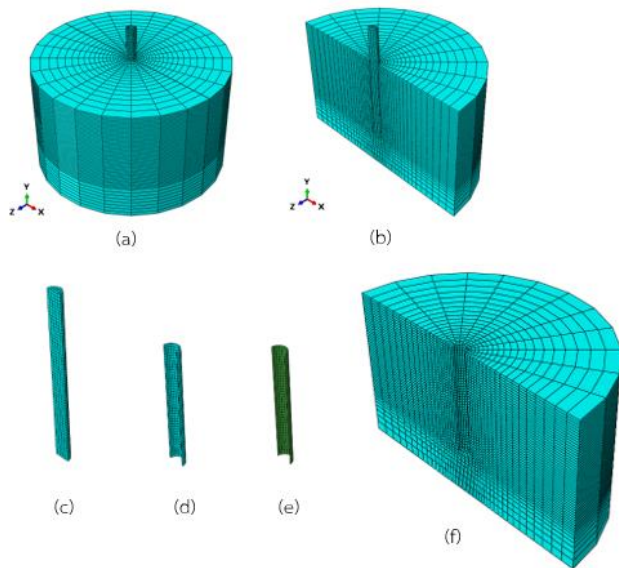
พฤติกรรมของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวค่อนข้างซับซ้อน โดยเฉพาะกรณีติดตั้งในคอนกรีตร้าว ดังนั้นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในระบบสามมิติจะถูกนำมาใช้ในการจำลองระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในงานวิจัยนี้เพื่ออธิบายผลของรูปแบบการร้าวในคอนกรีตต่อพฤติกรรมของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยว ที่มีตำแหน่งของการแตกร้าวและระนาบการร้าวในคอนกรีตแตกต่างกัน

2. วิธีการและระเบียบวิธีวิจัย

แบบจำลองระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในงานวิจัยนี้เป็นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่พัฒนาต่อเนื่องจากแบบจำลองระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีตร้าว [7] ที่ได้ผ่านการสอบเทียบกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการในอดีตแล้ว [8,9] โดยการสร้างรอยร้าวในแบบจำลองคอนกรีตที่มีขนาดและตำแหน่งแตกต่างจากแบบจำลองที่ผ่านการสอบเทียบแล้ว แต่องค์ประกอบและคุณสมบัติต่าง ๆ ของเอลิเมนต์ในแบบจำลองไม่แตกต่างกัน องค์ประกอบของแบบจำลองประกอบด้วย แบบจำลองสมอยึดแบบจำลองสารยึดเหนี่ยว แบบจำลองคอนกรีต และแบบจำลองผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยึดเหนี่ยวซึ่งเป็นอาณาบริเวณที่พบการวิบัติจากการยึดเหนี่ยวเป็นส่วนใหญ่ [10] โดยขั้นตอนการดำเนินการประกอบด้วยการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และการกำหนดคุณสมบัติวัสดุ และผลตอบแทนให้กับแบบจำลองวัสดุแต่ละชนิด

2.1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าว

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวภายใต้แรงดึงถอนในงานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้โปรแกรม ABAQUS 2017 ในการประมวลผลข้อมูลเพื่อวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบจำลองของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวถูกสร้างขึ้นเพียงครึ่งส่วน (รูปที่ 1b) จากแบบจำลองเต็มส่วน (รูปที่ 1a) เพื่อลดระยะเวลาในการประมวลผลของโปรแกรม ส่วนประกอบของแบบจำลอง



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของแบบจำลองระบบฝังยัดแบบใช้สารยัดเหนียว

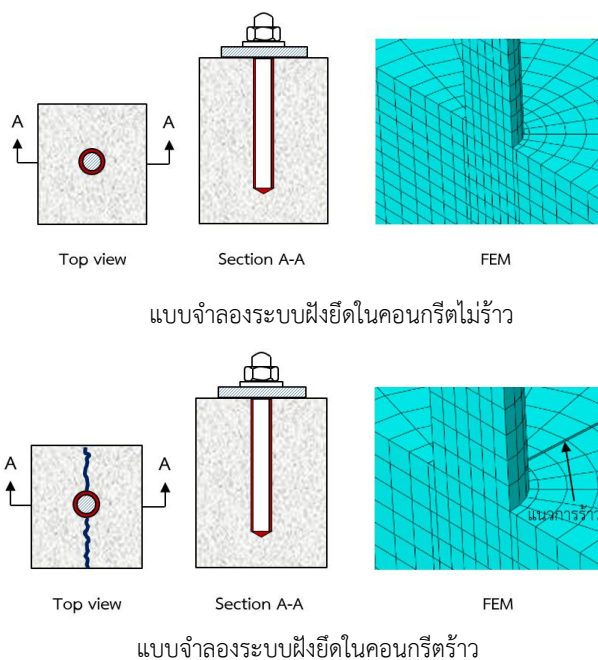
ประกอบด้วย แบบจำลองแท่งเหล็กสมอียด (รูปที่ 1c) แบบจำลองสารยัดเหนียว (รูปที่ 1d) แบบจำลองผิวสัมผัสระหว่างสารยัดเหนียวและคอนกรีต (รูปที่ 1e) และแบบจำลองคอนกรีต (รูปที่ 1f) แบบจำลองผิวสัมผัสระหว่างสารยัดเหนียวและคอนกรีตได้สร้างขึ้นมาเพื่อเน้นศึกษาถึงลักษณะการกระจายของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการวิบัติในบริเวณดังกล่าว เนื่องจากการวิบัติจากการยึดเหนี่ยวไม่เพียงพอของสมอียดแบบใช้สารยัดเหนียวส่วนใหญ่จะเกิดการลื่นหลุดที่ผิวสัมผัสของสารยัดเหนียวและคอนกรีต

เอลิเมนต์ส่วนใหญ่ที่ใช้ในแบบจำลองจะเป็นเอลิเมนต์ประเภท C3D8R ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ต่อเนื่อง (continuum element) ประเภท hexahedral element ที่มี 8-node ในระบบสามมิติ และมีการประมวลผลแบบ reduced integration โดยเอลิเมนต์ดังกล่าวเป็นเอลิเมนต์ในตระกูล 3D-stress ที่เหมาะในการใช้ส่งถ่ายแรงในเอลิเมนต์ของแข็ง (solid element) โดยจะใช้ในแบบจำลองสมอียด สารยัดเหนียว และคอนกรีต สำหรับเอลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมตอบสนองของผิวสัมผัสระหว่างสารยัดเหนียวและคอนกรีต จะใช้เอลิเมนต์ประเภท COH3D8 ซึ่งเป็นเอลิเมนต์เชื่อมยัด

(cohesive element) ที่มี 8-node และมีความหนาเป็นศูนย์ [11] ดังแสดงใน (รูปที่ 1e)

แบบจำลองของระบบจะถูกสร้างเพียงครึ่งส่วนที่สมมาตรในระบบสามมิติ เพื่อลดระยะเวลาในการประมวลผลของโปรแกรม เป็นแบบจำลองการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงถอนของสมอียดแบบใช้สารยัดเหนียวในคอนกรีต มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแบบจำลองคอนกรีต 300 มิลลิเมตร ซึ่งครอบคลุมการกระจายของหน่วยแรงในเอลิเมนต์คอนกรีตและใช้ระยะเวลาในการประมวลผลที่เหมาะสม มีระยะจากปลายรูเจาะถึงขอบล่างของแบบจำลองคอนกรีต 50 มิลลิเมตร เอลิเมนต์ที่เล็กที่สุดกำหนดให้มีขนาด 3 มิลลิเมตร ที่เอลิเมนต์ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยัดเหนียว ขนาดของเอลิเมนต์จะใหญ่ขึ้นจนถึงขอบนอกของเอลิเมนต์คอนกรีต กำหนดให้มีขนาด 15 มิลลิเมตร (รูปที่ 1a, 1b) แบบจำลองวัสดุแต่ละส่วนจะถูกนำมายึดติดกันโดยใช้หลักการ surface to surface-tied constraint

แบบจำลองทั้งระบบได้ถูกกำหนดเงื่อนไขขอบเขตโดยการยึดรั้งแท่งคอนกรีตที่ฐานล่างในแนวแกน x y และ z และยึดรั้งขอบนอกด้านบนในแนวแกน y ที่เป็นการทดสอบแรงดึงถอนในคอนกรีตแบบไม้อบรัด (confinement) มีการยึดรั้งเอลิเมนต์คอนกรีตและสมอียดในระนาบสมมาตรในแนวแกน z และกำหนดการให้แรงในแท่งสมอียดโดยการกำหนดให้ปลายของสมอียดเคลื่อนที่ขึ้นในแนวตั้ง (displacement control) เพื่อให้สอดคล้องกับวิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการใช้งานจริง การจำลองรอยร้าวในคอนกรีตจะจำลองการร้าวแบบแตกปริ (splitting crack) ที่ใช้วิธีดัดแปลงแบบจำลองคอนกรีตในกรณีคอนกรีตไม่ร้าวโดยการเพิ่มช่องว่างในแนวระนาบที่เป็นตัวแทนของแนวการร้าวในคอนกรีต ให้มีความกว้างของช่องว่างเท่ากับขนาดความกว้างของรอยร้าว มีระนาบการร้าววิ่งขนานของรูเจาะที่ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยัดเหนียว (รูปที่ 2b) โดยรอยร้าวลักษณะนี้เปรียบเสมือนการร้าว



รูปที่ 2 แบบจำลองระบบฝังยึดในคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีตร้าว

แบบแตกปริที่เกิดขึ้นก่อนติดตั้งสมอยึด (pre-crack) โดยกำหนดให้มีความกว้างของรอยร้าว 0.3 มิลลิเมตร ในเอลิเมนต์คอนกรีต โดยมีความลึกของระยะการร้าวแตกต่างกัน

ในการศึกษาตำแหน่งรอยร้าว (crack zone) แบบจำลองจะถูกสร้างขึ้นโดยกำหนดให้มีรอยร้าวเกิดขึ้นในคอนกรีต 9 รูปแบบ โดยรอยร้าวทั้งหมดจะกำหนดให้เป็นการแตกร้าวในแนวตั้งและมีระยะการร้าววิ่งเข้าหาตำแหน่งติดตั้งสมอยึดแต่ไม่ผ่านระยะการหน่วงโดยใช้ความกว้างรอยร้าวคงที่คือ 0.3 มิลลิเมตร แบบจำลองใช้สมอยึดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ความยาวระยะฝังยึด 125 มิลลิเมตร คุณสมบัติของวัสดุที่กำหนดให้แบบจำลองวัสดุแต่ละส่วนจะกำหนดให้เหมือนกันในทุกแบบจำลองซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดในหัวข้อต่อไป ตำแหน่งการร้าวที่ศึกษาประกอบด้วยระยะการร้าวในแนวตั้งที่แตกต่างกัน 9 ตำแหน่ง ดังแสดงในตารางที่ 1

ตำแหน่งรอยร้าวในตารางที่ 1 ประกอบด้วยแบบจำลองระบบฝังยึดในคอนกรีตไม่ร้าว แบบจำลองในคอนกรีตร้าวที่มีระยะการร้าวลึก $h_{ef}/3$ และอยู่ในช่วงความลึกจากบนลงล่างตามตำแหน่งที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ (เมื่อ h_{ef} คือ ความยาว

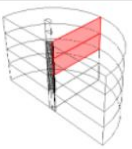
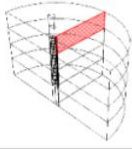
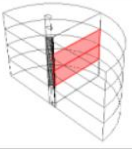
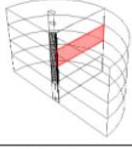
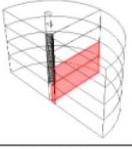
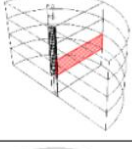
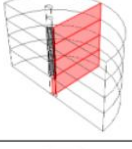
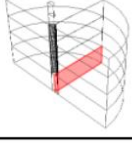
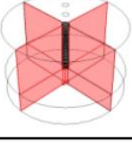
ระยะฝังยึด) และรอยร้าวที่เกิดขึ้นที่ได้ระยะการฝังยึดซึ่งมีระยะความลึก 50 มิลลิเมตร (รอยร้าวตำแหน่งที่ 4 ในตารางที่ 1) แบบจำลองในคอนกรีตร้าวที่มีระยะการร้าวลึก $2 \cdot h_{ef}/3$ และอยู่ในช่วงความลึกจากบนลงล่างตามตำแหน่งที่ 5 6 และ 7 ตามลำดับ และในรอยร้าวตำแหน่งที่ 8 และ 9 จะเป็นรอยร้าวที่มีระยะการร้าวลึกตลอดความหนาของแท่งคอนกรีตหนึ่งระยะและสองระยะนับตั้งฉากกัน

2.2 คุณสมบัติวัสดุ

ในแบบจำลองคอนกรีตได้กำหนดคุณสมบัติเป็นคอนกรีตล้วน (plain concrete) ที่สามารถแสดงพฤติกรรมตอบสนองได้ทั้งในช่วงเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น แบบจำลองความเสียหายเชิงพลาสติกของคอนกรีต (concrete damage plasticity, CDP) จึงถูกนำมาใช้กำหนดพฤติกรรมของแบบจำลองคอนกรีตภายใต้การกระทำของแรงอัดและแรงดึง พฤติกรรมในช่วงยืดหยุ่นกำหนดให้มีความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดเป็นไปตามกฎของฮุก (Hooke's law) ซึ่งความสัมพันธ์จะมีลักษณะเชิงเส้น ที่มีค่าความเค้นยืดหยุ่นสูงสุดในช่วงนี้เป็นไปตามคำแนะนำของ ACI318-11 [12] หรือ $0.45 \cdot f_c'$ ส่วนในช่วงไม่ยืดหยุ่นเลือกใช้แบบจำลองของ Carreira D.J. และ Chu K.H. [13,14] กำหนดความสัมพันธ์ในช่วงที่ไม่เชิงเส้นทั้งก่อนและหลังจุดที่ความเค้นมีค่าสูงสุด ซึ่งตามวิธีของความเสียหายเชิงพลาสติกที่เลือกใช้จะสามารถแสดงผลในส่วนของความเสียหายหรือการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์คอนกรีตได้ในรูปของการเสื่อมสภาพความแกร่ง (stiffness degradation) ซึ่งเกิดขึ้นได้ทั้งผลจากการกระทำของแรงอัดและแรงดึง

แบบจำลองสารยึดเหนี่ยวกำหนดให้มีความหนา 1 มิลลิเมตร ตามคำแนะนำของผู้ผลิต Hilti Co, Ltd [14] มีรูปทรงโค้งตามผิวของรูเจาะคอนกรีต ผลตอบสนองต่อสถานะการให้แรงกระทำของเอลิเมนต์ที่ทำหน้าที่แทนสารยึดเหนี่ยวกำหนดให้มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นภายใต้แรงเฉือน และกำหนดให้มีพฤติกรรมเชิงพลาสติกในช่วงหลังจุดคราก ดังนั้น

ตารางที่ 1 ตำแหน่งรอยร้าวในแบบจำลอง

ชื่อตำแหน่ง รอยร้าว	ตำแหน่ง รอยร้าว	ชื่อตำแหน่ง รอยร้าว	ตำแหน่ง รอยร้าว
คอนกรีต ไม่ร้าว		รอยร้าว ตำแหน่ง ที่ 5	
รอยร้าว ตำแหน่ง ที่ 1		รอยร้าว ตำแหน่ง ที่ 6	
รอยร้าว ตำแหน่ง ที่ 2		รอยร้าว ตำแหน่ง ที่ 7	
รอยร้าว ตำแหน่ง ที่ 3		รอยร้าว ตำแหน่ง ที่ 8	
รอยร้าว ตำแหน่ง ที่ 4		รอยร้าว ตำแหน่ง ที่ 9	

รูปแบบการวิบัติจะกำหนดโดยใช้หลักการความเสียหายจากแรงเฉือน (shear damage) ส่วนความเสียหายสะสม (damage evolution) ในขั้นตอนการวิบัติจากการเฉือนจะกำหนดให้มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นภายใต้เงื่อนไขของการเคลื่อนที่ ซึ่งจะมีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดสอดคล้องกับค่าการยืดตัวสูงสุด (elongation at break) ของสารยึดเหนี่ยว

การจำลองผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวของสารยึดเหนี่ยวและคอนกรีตในบริเวณนี้ ซึ่งตามจริงแล้วจะไม่มีมิติด้านความหนา ดังนั้นแบบจำลองในส่วนนี้จึงจะกำหนดให้มีคุณสมบัติเป็นเอลิเมนต์เชื่อมยึดที่มีความหนาเป็นศูนย์ มีขนาดเอลิเมนต์เท่ากับขนาดเอลิเมนต์ของสารยึดเหนี่ยวและคอนกรีตด้านที่อยู่ติดกัน ครอบคลุมพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวและคอนกรีต พฤติกรรมตอบสนองกำหนดให้มีพฤติกรรมตามหลักการของแรงฉุด-การแยก (traction-separation

behavior) ในรูปแบบที่ 2 (Mode II) ซึ่งเป็นพฤติกรรมของแรงฉุดเฉือนและการแยกเฉือน และรูปแบบความสัมพันธ์ของแรงฉุด-การแยก จะเป็นลักษณะของกราฟ bilinear

พฤติกรรมตอบสนองของเอลิเมนต์ที่เป็นตัวแทนของสมอยึดจะกำหนดให้มีพฤติกรรมเหมือนเหล็กกล้ากำลังสูงทั่วไป ที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นในช่วงที่ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดเป็นเส้นตรง และมีคุณสมบัติเชิงพลาสติกในช่วงที่ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดไม่เป็นเส้นตรง พฤติกรรมการวิบัติจะกำหนดให้มีรูปแบบการวิบัติโดยใช้หลักการความเสียหายจากการยืดตัว (ductile damage)

แบบจำลองระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตไม่ร้าวจะถูกสร้างให้มีขนาดและองค์ประกอบพื้นฐานตามคำแนะนำของผู้ผลิต โดยอ้างอิงคุณสมบัติของสารยึดเหนี่ยว Hilti HIT-RE500 V3 [15] ที่ใช้งานร่วมกับสมอยึด HIT-C ซึ่งเป็นสมอยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวสูตรใหม่ ของ Hilti มีคุณสมบัติพื้นฐานในการใช้งานได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสมอยึด 16 มิลลิเมตร ความยาวระยะฝังยึด 125 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ 18 มิลลิเมตร กำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยว 11.7 เมกกะปาสกาล โมดูลัสยืดหยุ่นของสารยึดเหนี่ยว 2,600 เมกกะปาสกาล และค่าการยืดตัวสูงสุด (elongation at break) ร้อยละ 1.1 สมอยึดมีโมดูลัสยืดหยุ่น 2.0×10^5 เมกกะปาสกาล อัตราส่วนปัวซอง 0.30 กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตแบบไม่โอบรัด (unconfined compressive strength) กำหนดค่าให้สอดคล้องกับคุณสมบัติของคอนกรีตจากการศึกษาของ Krishnamurthy K. [8] ซึ่งเป็นคุณสมบัติของคอนกรีตที่กำหนดในแบบจำลองที่ได้ผ่านการสอบเทียบแล้ว โดยมีค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต 39 เมกกะปาสกาล กำลังรับแรงดึงประลัย 2.93 เมกกะปาสกาล โมดูลัสยืดหยุ่น 2.83×10^4 เมกกะปาสกาล อัตราส่วนปัวซอง 0.18 โดยพฤติกรรมของคอนกรีตจะถูกกำหนดให้มีความสัมพันธ์ของความเค้น-

ความเครียดทั้งในช่วงเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น ตามสมการของ Carreira D.J. และ Chu K.H [13,14] ภายใต้แรงอัดและแรงดึง ตามลำดับ

ในแบบจำลองผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยึดเหนี่ยว จะกำหนดให้มีพฤติกรรมในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสเท่ากับ กำลังรับแรงดึงประลัยของคอนกรีต 2.93 เมกะปาสคาล และมีพฤติกรรมตามแนวขนานกับระนาบผิวสัมผัสเท่ากับกำลังยึดเหนี่ยวของสารยึดเหนี่ยวคือ 11.7 เมกะปาสคาล ส่วนในแบบจำลองระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าว จะทำการสร้างแบบจำลองที่มีเงื่อนไขต่าง ๆ ทั้งด้านมิติและคุณสมบัติของวัสดุให้กับเอลิเมนต์วัสดุแต่ละชนิดเหมือนกับกรณีคอนกรีตไม่ร้าว จะแตกต่างกันตรงที่ในกรณีคอนกรีตร้าว จะมีการเว้นช่องว่างในเอลิเมนต์คอนกรีตเพื่อเป็นการจำลองระนาบการแตกร้าวเพิ่มขึ้นในแต่ละรูปแบบ โดยคุณสมบัติของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองวัสดุแต่ละชนิดในระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยว สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2

2.3 การทดสอบสมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพ

ในการวิจัยนี้แบ่งการทดสอบสมบัติออกเป็นสองส่วนคือ สมบัติทางกล ได้แก่ การทดสอบความแข็งแรงแบบชอร์ ดี (shore

D) ตามมาตรฐาน ASTM D2240 น้ำหนักกด 10 lbf การทดสอบความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอด (izod impact strength) ตามมาตรฐาน ASTM D256 ด้วยพลังงานกระแทก 2.7J การทดสอบสมบัติแรงดึง (tensile properties) อ้างอิงมาตรฐาน ASTM D638 (Type I) ความเร็วการดึงเคลื่อนที่ 50 มิลลิเมตร/นาที บันทึกผลค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%elongation) การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การทดสอบค่าดัชนีการหลอมไหล (melt flow index หรือ MFI) มาตรฐาน ASTM D 1238 ที่อุณหภูมิ 190 °C น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม และวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของรอยแตกหักจากชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

2.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

หลังจากทดสอบสมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพ แล้วจะนำข้อมูลเชิงปริมาณที่ได้มาประมวลผลทางสถิติ เริ่มจากการหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากแต่ละตัวแบบทดลองเพื่อนำไปแสดงผลในรูปแบบของกราฟ จากนั้นทำการทดสอบความแปรปรวนแบบสองทาง (two way

ตารางที่ 2 Properties of elements

Properties of Elements	Part instant			
	Anchor	Adhesive	Adhesive/Concrete Interface	Concrete
Element type	C3D8R	C3D8R	COH3D8	C3D8R
Element family	3D stress	3D stress	Cohesive	3D stress
Element size	2-3 mm	2-3 mm	2-3 mm	3-15 mm
Number of elements	1,450	504	504	11,347
Materials behavior	Elastic+Plastic behavior	Elastic+Plastic behavior	Elastic+Plastic behavior	Concrete Damage Plasticity (CDP)
Damage response	Ductile Damage	Shear Damage	Traction Separation Law (TSL)	Concrete Damage Plasticity (CDP)
Interaction	Surface to surface Tie constraint	Share node	Surface to surface Tie constraint	
Load	Displacement control			

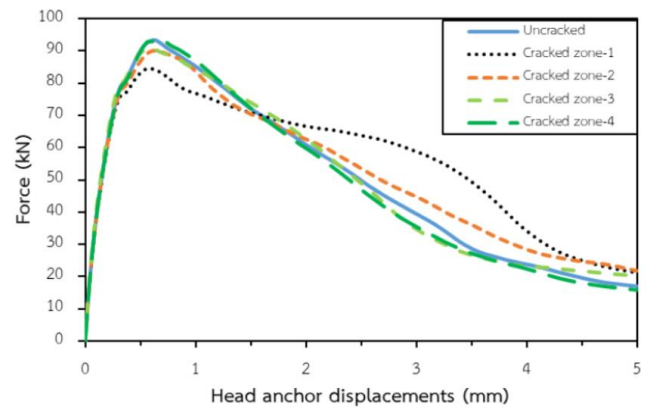
ANOVA) ที่ค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และสร้างแบบจำลองทางเพื่อให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของพอลิออกซิเมทิลีนที่ผ่านกระบวนการเชื่อมโยงสายโซ่ตลอดจนนำภาพหลักฐานวิทยาของรอยแตกหัก มาประกอบการวิเคราะห์ผลการวิจัย

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ผลการศึกษาที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองจะแบ่งออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ แบบจำลองรอยร้าวตำแหน่งที่ 1 2 3 และ 4 แบบจำลองรอยร้าวตำแหน่งที่ 5 6 และ 7 และในรอยร้าวตำแหน่งที่ 8 และ 9 โดยแต่ละกรณีจะเปรียบเทียบผลการศึกษากับกรณีคอนกรีตไม่ร้าว โดยมีรายละเอียดผลการศึกษาของแต่ละกรณีดังต่อไปนี้

3.1 กรณีที่รอยร้าวมีความลึกหนึ่งในสามส่วนของความยาวระยะฝังยึด

ผลจากการประมวลผลแบบจำลอง เมื่อรอยร้าวอยู่ในตำแหน่งที่ 1 2 3 และ 4 ดังในตารางที่ 1 จะถูกพิจารณาเปรียบเทียบผลกับกรณีคอนกรีตไม่ร้าว ที่ได้มีการกำหนดคุณสมบัติค่าตัวแปรต่าง ๆ เหมือนกัน พฤติกรรมของแรงดึงถอนและการเคลื่อนที่ที่ปลายสมอยึดจากทุกแบบจำลองดังกล่าว สามารถแสดงได้ในรูปที่ 3 ซึ่งจะพบว่า เมื่อรอยร้าวมีตำแหน่งการร้าวลึกลง กำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดจะเพิ่มมากขึ้น และพบว่ารอยร้าวที่เกิดขึ้นได้ความยาวระยะฝังยึดมีกำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดใกล้เคียงกรณีคอนกรีตไม่ร้าว เมื่อพิจารณาความชันของกราฟในช่วงแรกจะพบว่าในทุกกรณีจะมีความชันใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นถึงความแกร่งของระบบที่ใกล้เคียงกัน และกราฟจะมีการเปลี่ยนแปลงความชันเล็กน้อยในช่วงก่อนที่แรงดึงถอนจะมีค่าสูงสุด กราฟในช่วงหลังจุดที่แรงดึงถอนมีค่าสูงสุดจะมีอัตราการลดลงของแรงดึงถอนใกล้เคียงกันในทุกกรณี ยกเว้นกรณีที่รอยร้าวอยู่ในตำแหน่งบนสุดของระยะฝังยึด จะพบว่าอัตราการลดลงของแรงดึงถอนช้าลงเล็กน้อย



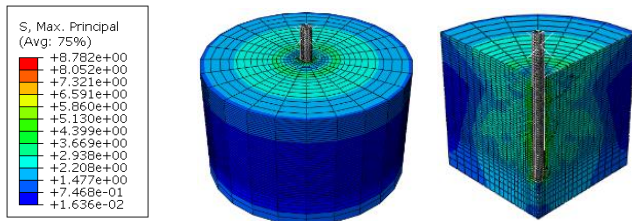
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของแรงดึงถอนและการเคลื่อนที่ที่ปลายสมอยึดในคอนกรีตร้าว ที่มีตำแหน่งรอยร้าวแตกต่างกัน เมื่อร่นาบร้ามีขนาดความลึก $h_{ef}/3$

ตารางที่ 3 อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดึงถอนสูงสุดเมื่อตำแหน่งรอยร้าวแตกต่างกัน ($h_{ef}/3$)

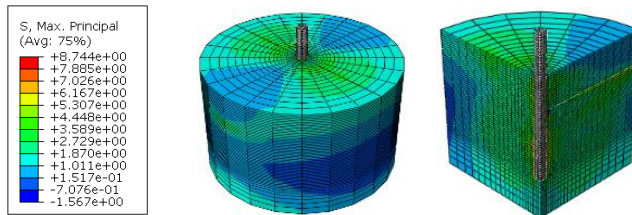
Model	Peak Value (N)	Reduction ratio
Uncracked concrete	93,406	1.00
Cracked concrete zone-1	84,587	0.91
Cracked concrete zone-2	90,114	0.96
Cracked concrete zone-3	90,872	0.97
Cracked concrete zone-4	93,044	1.00

เมื่อเปรียบเทียบค่าแรงดึงถอนสูงสุดในแต่ละกรณีกับค่าแรงดึงถอนสูงสุดในกรณีคอนกรีตไม่ร้าว จะแสดงสัดส่วนการลดลงของแรงดึงถอนสูงสุดได้ดังตารางที่ 3

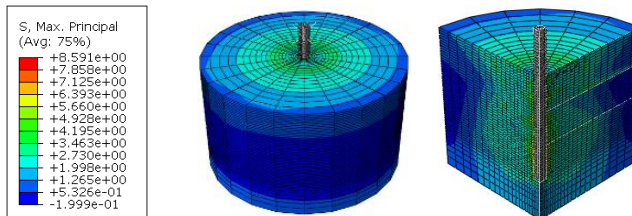
จากตารางที่ 3 จะพบว่า เมื่อรอยร้าวมีตำแหน่งการร้าวลึกลง กำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดจะมีสัดส่วนเพิ่มขึ้น สังเกตได้จากค่าอัตราการลดลงของแรงดึงถอนสูงสุดของคอนกรีตร้าวตำแหน่งที่ 1 2 และ 3 มีค่าเป็น 0.91 0.96 และ 0.97 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งรอยร้าวที่ลึกลง จะส่งผลกระทบต่อกำลังต้านทานแรงดึงถอนของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวน้อยลง ส่วนในกรณีที่ตำแหน่งการร้าวอยู่ใต้ระยะการฝังยึดจะพบว่าค่าแรงดึงถอนสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกับกรณีคอนกรีตไม่ร้าวมากจนแทบไม่มีผลกระทบด้านกำลัง



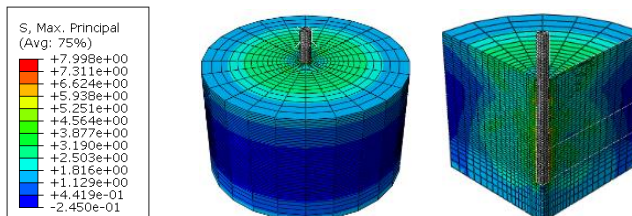
(a) คอนกรีตไม่ร้าว



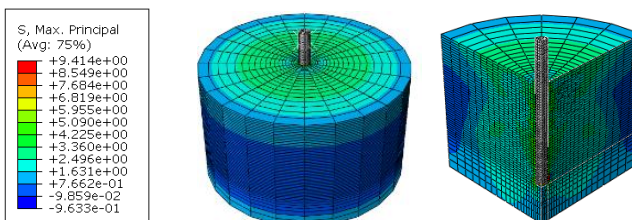
(b) คอนกรีตร้าวตำแหน่งที่ 1



(c) คอนกรีตร้าวตำแหน่งที่ 2



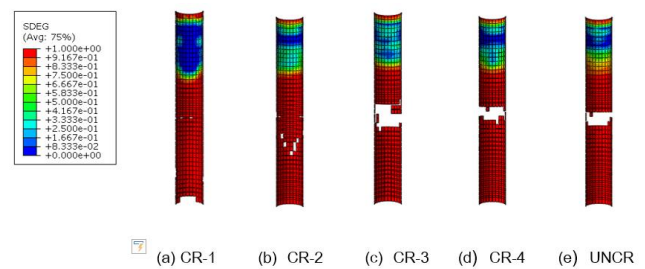
(d) คอนกรีตร้าวตำแหน่งที่ 3



(e) คอนกรีตร้าวตำแหน่งที่ 4

รูปที่ 4 การกระจายของหน่วยแรงหลักในเอลิเมนต์คอนกรีตเมื่อระนาบการร้าวมีขนาดความลึก $h_{ef}/3$

เมื่อพิจารณาภาพการกระจายตัวของหน่วยแรงหลักในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเครียดในรูปที่ 4 จะพบว่า



รูปที่ 5 การสูญเสียความแข็งแรงในเอลิเมนต์เชื่อมยึดของแบบจำลองการร้าวตำแหน่งที่ 1 2 3 4 และในคอนกรีตไม่ร้าว

กระจายของหน่วยแรงหลักในเอลิเมนต์คอนกรีตร้าวจะมีการกระจายตัวทั้งในระนาบตั้งฉากกับแนวแรงและในระนาบขนานกับแนวแรง ใกล้เคียงกับกรณีคอนกรีตไม่ร้าว ยกเว้นในกรณีรอยร้าวอยู่ในตำแหน่งที่ 1 ที่มีตำแหน่งรอยร้าวอยู่ช่วงบนสุดของระยะฝังยึด จะพบการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอเหมือนกรณีฝังยึดในคอนกรีตร้าวจากการศึกษาแบบจำลองในหัวข้อที่ผ่านมา

และเมื่อพิจารณาการวิบัติที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์เชื่อมยึดดังแสดงในรูปที่ 5 จะพบว่า ลักษณะการวิบัติในเอลิเมนต์เชื่อมยึดจะใกล้เคียงกรณีคอนกรีตไม่ร้าวมากขึ้น เมื่อรอยร้าวมีตำแหน่งลึกลง เอลิเมนต์ที่แสดงแถบสีแดงจะเป็นเอลิเมนต์ที่มีการสูญเสียความแข็งแรงเกือบจะสมบูรณ์ แต่เอลิเมนต์ที่เกิดการหลุดตัวจะเป็นเอลิเมนต์ที่เกิดการสูญเสียความแข็งแรงโดยสมบูรณ์และสอดคล้องกับตำแหน่งการสูญเสียความแข็งแรงในเอลิเมนต์คอนกรีตโดยสมบูรณ์หรือเกิดการแตกร้าวขึ้นในคอนกรีต

จากรูปที่ 5 จะสังเกตได้ว่าเมื่อรอยร้าวมีตำแหน่งลึกลงรูปแบบการวิบัติในเอลิเมนต์เชื่อมยึดจะใกล้เคียงกรณีคอนกรีตไม่ร้าวมากขึ้น แสดงให้เห็นว่า รูปแบบการวิบัติของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าวกรณีนี้ส่วนใหญ่เป็นการวิบัติจากการยึดหน่วงที่ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตและสารยึดเหนี่ยว โดยจะเปลี่ยนเป็นการวิบัติร่วมจากการยึดหน่วงและการวิบัติของคอนกรีตรูปกรวยเหมือนในกรณีคอนกรีตไม่ร้าวมากขึ้น เมื่อรอยร้าวมีตำแหน่งลึกลง

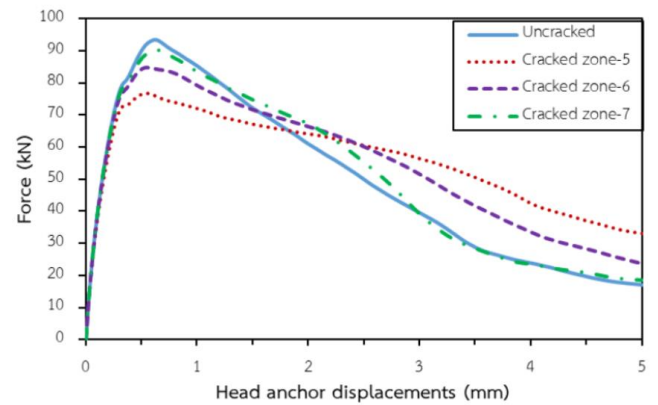
3.2 กรณีที่รอยร้าวมีความลึกสองในสามส่วนของความยาวระยะฝังยึด

เมื่อรอยร้าวที่เกิดขึ้นในคอนกรีตอยู่ในตำแหน่งที่ 5 6 และ 7 ในตารางที่ 1 และทั้งหมดจะถูกพิจารณาเปรียบเทียบผลกับกรณีคอนกรีตไม่ร้าว พฤติกรรมของแรงดึงถอนและการเคลื่อนที่ที่ปลายสมอยึดจากทุกแบบจำลองดังกล่าว สามารถแสดงได้ในรูปที่ 6 โดยจะพบว่าเมื่อรอยร้าวมีตำแหน่งการร้าวลึกลง กำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดจะเพิ่มมากขึ้น และมีรูปแบบของกราฟเข้าใกล้กราฟของกรณีคอนกรีตไม่ร้าวมากขึ้น โดยเมื่อพิจารณาความชันของกราฟในช่วงแรกจะพบว่า ในทุกกรณีจะมีความชันใกล้เคียงกัน แต่กราฟในช่วงหลังจุดที่แรงดึงถอนมีค่าสูงสุดจะสังเกตเห็นว่า เมื่อตำแหน่งของรอยร้าวลึกลง อัตราการลดลงของแรงดึงถอนจะลดลงเร็วขึ้นและมีความชันเข้าใกล้กรณีคอนกรีตไม่ร้าวมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบค่าแรงดึงถอนสูงสุดในแต่ละกรณีกับค่าแรงดึงถอนสูงสุดในกรณีคอนกรีตไม่ร้าว จะแสดงสัดส่วนการลดลงของแรงดึงถอนสูงสุดได้ดังตารางที่ 4 โดยจะพบว่า อัตราการลดลงของแรงดึงถอนสูงสุดของคอนกรีตร้าวตำแหน่งที่ 5 6 และ 7 มีค่าเป็น 0.82 0.91 และ 0.97 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ตำแหน่งรอยร้าวที่ลึกลง จะส่งผลกระทบต่อกำลังต้านทานแรงดึงถอนของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวน้อยลง

ภาพการกระจายตัวของหน่วยแรงหลักของการร้าวในกรณีนี้แสดงในรูปที่ 7 ซึ่งจะพบว่าการกระจายของหน่วยแรงหลักในหน้าตัดร้าวจะมีความสม่ำเสมอและมีความเข้มของหน่วยแรงใกล้เคียงกับหน้าตัดไม่ร้าวมากขึ้นเมื่อตำแหน่งการร้าวลึกลง โดยรอยร้าวที่มีตำแหน่งอยู่ช่วงบนสุดของระยะฝังยึด จะพบการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอในหน้าตัดร้าว ทั้งในระนาบตั้งฉากกับแนวแรงและในระนาบขนานกับแนวแรง

เมื่อพิจารณาการวิบัติที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์เชื่อมยึดแสดงในรูปที่ 8 จะพบว่า ลักษณะการวิบัติในเอลิเมนต์เชื่อมยึด



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของแรงดึงถอนและการเคลื่อนที่ที่ปลายสมอยึดในคอนกรีตร้าวที่มีตำแหน่งรอยร้าวแตกต่างกัน เมื่อรอยร้าวมีขนาดความลึก $2 \cdot h_{ef}/3$

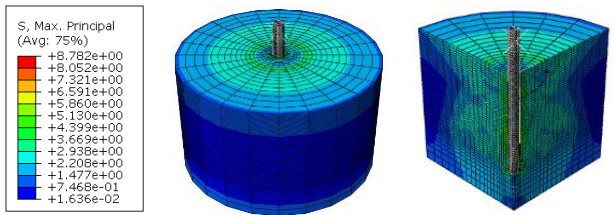
ตารางที่ 4 อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดึงถอนสูงสุดเมื่อตำแหน่งรอยร้าวแตกต่างกัน ($2 \cdot h_{ef}/3$)

Model	Peak Value (N)	Reduction ratio
Uncracked concrete	93,406	1.00
Cracked concrete zone-5	76,674	0.82
Cracked concrete zone-6	84,887	0.91
Cracked concrete zone-7	90,208	0.97

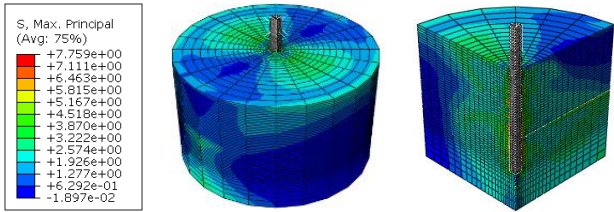
จะใกล้เคียงกรณีคอนกรีตไม่ร้าวมากขึ้น เมื่อรอยร้าวมีตำแหน่งลึกลง เอลิเมนต์ที่มีการสูญเสียความแข็งแรงเกือบจะสมบูรณ์มีมากขึ้นตามตำแหน่งการร้าวที่ลึกลง แต่เอลิเมนต์ที่เกิดการสูญเสียความแข็งแรงโดยสมบูรณ์ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในผิวรูเจาะคอนกรีต จะมีตำแหน่งใกล้เคียงกรณีคอนกรีตไม่ร้าวมากขึ้น

แสดงให้เห็นว่า รูปแบบการวิบัติของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าวกรณีนี้ ส่วนใหญ่เป็นการวิบัติร่วมจากการยึดหน่วงและการวิบัติของคอนกรีตรูปกรวยเหมือนในกรณีคอนกรีตไม่ร้าวมากขึ้น เมื่อรอยร้าวมีตำแหน่งลึกลง

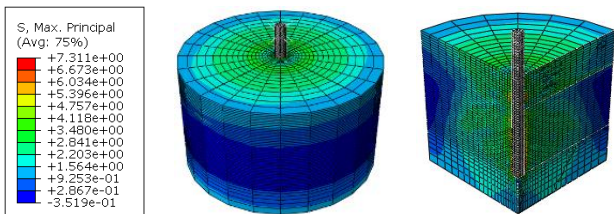
ระนาบการร้าวที่มีความลึกมากขึ้น จะส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมและกำลังของระบบฝังยึดในคอนกรีตร้าวมากขึ้น โดยรอยร้าวที่มีตำแหน่งอยู่ใกล้ผิวบนสุดของแท่งคอนกรีต จะส่งผลกระทบต่อ



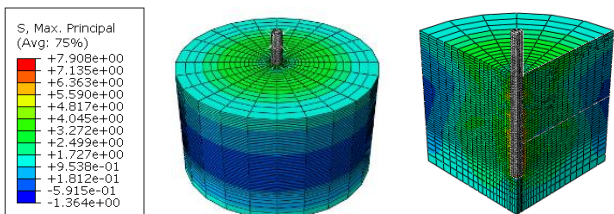
(a) คอนกรีตไม่ร้าว



(b) คอนกรีตร้าวตำแหน่งที่ 5

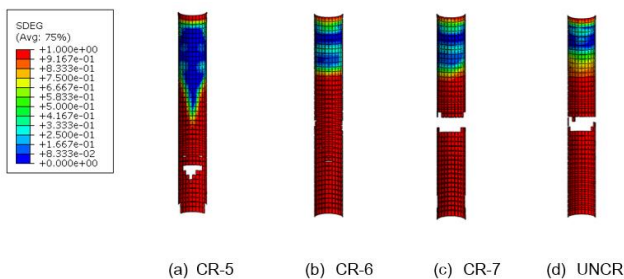


(c) คอนกรีตร้าวตำแหน่งที่ 6



(d) คอนกรีตร้าวตำแหน่งที่ 7

รูปที่ 7 การกระจายของหน่วยแรงหลักในเอลิเมนต์คอนกรีต เมื่อ ระบายการร้าวมีขนาดความลึก $2 \cdot h_{ef}/3$



(a) CR-5

(b) CR-6

(c) CR-7

(d) UNCR

รูปที่ 8 การสูญเสียความแกร่งในเอลิเมนต์เชื่อมยึดของแบบจำลองการร้าวตำแหน่งที่ 5, 6, 7 และในคอนกรีตไม่ร้าว ตามลำดับ

ต่อพฤติกรรมและกำลังของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวมากที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า กำลังต้านทานแรงดึงถอนและ

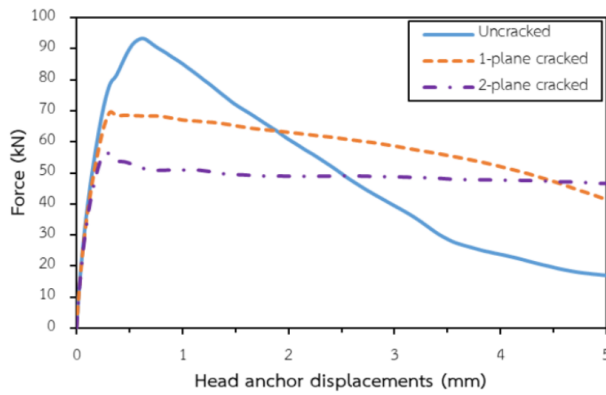
พฤติกรรมการวิบัติจะใกล้เคียงกรณีฝังยึดในคอนกรีตไม่ร้าวมากขึ้น เมื่อรอยร้าวมีตำแหน่งลึกลง

3.3 กรณีที่รอยร้าวมีระนาบการร้าวเพิ่มขึ้น

ในกรณีที่รอยร้าวที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมีระนาบการร้าวมากกว่า 1 ระนาบ ในแนวดิ่ง ความสัมพันธ์ของแรงดึงถอนและการเคลื่อนที่ที่ปลายของสมอยึดที่ได้จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองที่มีระนาบการร้าว 1 ระนาบ และระนาบการร้าว 2 ระนาบ เปรียบเทียบกับกรณีคอนกรีตไม่ร้าว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9

เมื่อเปรียบเทียบค่าแรงดึงถอนสูงสุดในแต่ละกรณีกับค่าแรงดึงถอนสูงสุดในกรณีคอนกรีตไม่ร้าว จะแสดงสัดส่วนการลดลงของแรงดึงถอนสูงสุดได้ดังตารางที่ 5 โดยจะพบว่าเมื่อระนาบการร้าวในคอนกรีตมีมากขึ้น กำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวจะลดลง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบรูปแบบความสัมพันธ์ของกราฟทั้งสามกรณีจะพบว่า ความชันของกราฟในช่วงแรกจะใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นถึงความแกร่งของระบบที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาพฤติกรรมหลังจุดที่แรงดึงถอนมีค่าสูงสุดจะพบว่าเมื่อระนาบการร้าวมีมากขึ้น อัตราการลดลงของแรงดึงถอนจะช้าลง ค่าแรงดึงถอนสูงสุดในกรณีคอนกรีตไม่ร้าว คอนกรีตร้าวระนาบเดียว และคอนกรีตร้าวสองระนาบ จะอยู่ในช่วงที่สมอยึดมีค่าการเคลื่อนที่เป็น 0.62 0.33 และ 0.28 มิลลิเมตรตามลำดับ

จากตารางที่ 5 จะพบว่า เมื่อระนาบการร้าวเพิ่มขึ้นจากกรณีคอนกรีตไม่ร้าว คอนกรีตร้าวระนาบเดียว และคอนกรีตร้าวสองระนาบ กำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดจะมีสัดส่วนลดลงเป็น 1 0.75 และ 0.61 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของระนาบการร้าว 1 และ 2 ระนาบ ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดลดลงร้อยละ 25 และ 39 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาการกระจายของหน่วยแรงหลักในเอลิเมนต์คอนกรีตในรูปที่ 10 จะพบว่า เมื่อระนาบการร้าวเพิ่มขึ้น การ



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของแรงดึงถอนและการเคลื่อนที่ที่ปลายสมอยึดในคอนกรีตร้าวที่มีรอยร้าวระนาบเดียวและรอยร้าวสองระนาบเปรียบเทียบกับกรณีคอนกรีตไม่ร้าว

ตารางที่ 5 อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดึงถอนสูงสุดเมื่อระนาบการร้าวเพิ่มขึ้น

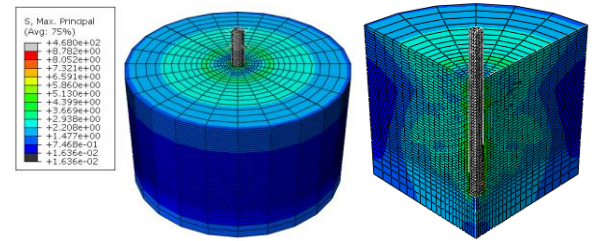
Model	Peak Value (N)	Reduction ratio
Uncracked concrete	93,406	1.00
1-Plane cracked	69,766	0.75
2-Plane cracked	56,534	0.61

กระจายของหน่วยแรงในระนาบตั้งฉากกับแนวแรงดึงถอนจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดในบริเวณผิวบนของแท่งคอนกรีต และการกระจายตัวมีความไม่สม่ำเสมอมากขึ้น

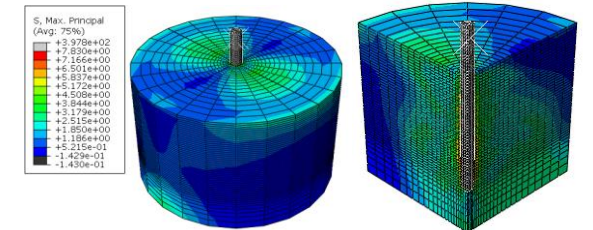
ส่วนในระนาบขนานกับแนวแรงดึงถอนจะพบว่าการกระจายของหน่วยแรงหลักบริเวณใกล้ผิวบนของแท่งคอนกรีตที่ปกติจะลดลงในระนาบร้าว แต่เมื่อมีระนาบร้าวเพิ่มมากขึ้น การกระจายของหน่วยแรงบริเวณผิวบนของแท่งคอนกรีตจะยิ่งลดลงมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการต้านทานแรงดึงถอนของระบบฝังยึดในคอนกรีตร้าวลดลง

เมื่อพิจารณาการสูญเสียความแกร่งในเอลิเมนต์เชื่อมยึดในรูปที่ 11 จะพบว่า เมื่อระนาบการร้าวเพิ่มขึ้น เอลิเมนต์ที่เกิดการสูญเสียความแกร่งเกือบสมบูรณ์ และเอลิเมนต์ที่เกิดการสูญเสียความแกร่งโดยสมบูรณ์จะลดลง

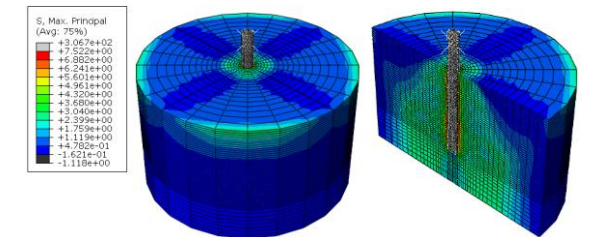
ในกรณีที่คอนกรีตร้าวสองระนาบจะไม่พบเอลิเมนต์ที่เกิดการสูญเสียความแกร่งโดยสมบูรณ์เลย แสดงให้เห็นว่าการ



(a) กรณีคอนกรีตไม่ร้าว



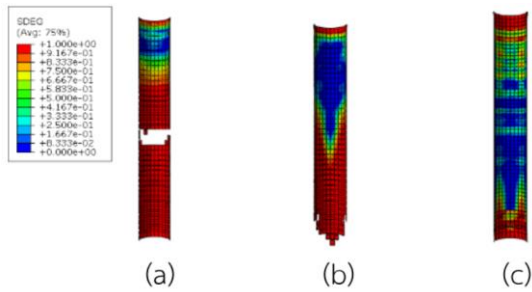
(b) กรณีคอนกรีตร้าวระนาบเดียว



(c) กรณีคอนกรีตร้าวสองระนาบ

รูปที่ 10 การกระจายของหน่วยแรงหลักในคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีตร้าว เมื่อระนาบการร้าวเพิ่มขึ้น

แตกร้าวของคอนกรีตจะไม่เกิดขึ้นในกรณีนี้ ดังนั้นสาเหตุของการลดลงของกำลังต้านทานแรงดึงถอนในกรณีคอนกรีตร้าวสองระนาบส่วนใหญ่เกิดจากการขยายตัวของความกว้างรอยร้าว โดยเมื่อเปรียบเทียบการขยายตัวของรอยร้าวในกรณีคอนกรีตร้าวระนาบเดียวกับคอนกรีตร้าวสองระนาบในรูปที่ 12 จะเห็นได้ชัดว่า การขยายตัวของรอยร้าวในกรณีคอนกรีตร้าวสองระนาบจะปรากฏอย่างเด่นชัด ทั้งในระนาบตั้งฉากกับแนวแรงและระนาบขนานกับแนวแรง ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงดึงถอนลดลง เนื่องจากการขยายตัวของรอยร้าวทำให้เกิดการคลายความเครียดขึ้นในคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความเค้นลดลง นำไปสู่กำลังต้านทานแรงดึงถอนของระบบลดลงด้วย แต่การลดลงของแรงดึงถอนจะไม่เกิดแบบฉับพลันเพราะการลดลงของกำลังเกิดจากการคลาย



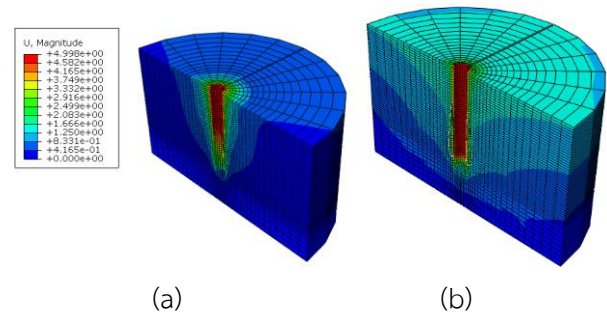
รูปที่ 11 การสูญเสียความแข็งแรงในเอลิเมนต์เชื่อมยึดของแบบจำลองการร้าวใน (a) คอนกรีตไม่ร้าว (b) คอนกรีตร้าวหนึ่งระนาบ และ (c) คอนกรีตร้าวสองระนาบ

ความเครียดในคอนกรีต ดังนั้นจึงทำให้กราฟความสัมพันธ์ในช่วงเชิงตัวลดในกรณีคอนกรีตร้าวสองระนาบ มีอัตราการลดลงช้ากว่ากรณีคอนกรีตร้าวระนาบเดียว และกรณีคอนกรีตไม่ร้าว ตามลำดับ

4. สรุป

จากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าวที่มีตำแหน่งของรอยร้าวในแนวตั้งแตกต่างกัน ได้ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

- 1) เมื่อรอยร้าวที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมีตำแหน่งการร้าวลึกลง พฤติกรรมและกำลังต้านทานแรงดึงถอนของระบบฝังยึดจะเข้าใกล้กรณีฝังยึดในคอนกรีตไม่ร้าวมากขึ้น
- 2) ผลกระทบของตำแหน่งรอยร้าวต่อพฤติกรรมและกำลังของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวจะมากขึ้นเมื่อรอยร้าวมีตำแหน่งเข้าใกล้ผิวบนสุดของแท่งคอนกรีต ส่วนรอยร้าวที่อยู่ใต้ระยะฝังยึดจะไม่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมและกำลังของระบบ และระนาบการร้าวที่มีความลึกมากขึ้นจะส่งผลต่อพฤติกรรมและกำลังของระบบฝังยึดในคอนกรีตร้าวมากขึ้น
- 3) การเพิ่มขึ้นของระนาบการร้าว ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดลดลง พบการขยายตัวของความกว้างรอยร้าวมากขึ้น ทำให้การกระจายของ



รูปที่ 12 การขยายตัวของรอยร้าวในเอลิเมนต์คอนกรีตร้าว (a) ระนาบเดียว และ (b) สองระนาบ

หน่วยแรงหลักบริเวณผิวบนของแท่งคอนกรีตลดลงนำไปสู่การลดลงของกำลังต้านทานแรงดึงถอนของระบบ

ผลที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปใช้ในการประเมินกำลังของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยว เมื่อติดตั้งในคอนกรีตที่มีการแตกร้าว โดยเมื่อแบ่งช่วงความลึกของระยะฝังยึดออกเป็นสามส่วน รอยร้าวที่มีขนาดความลึกในแนวตั้งหนึ่งในสามส่วนของระยะฝังยึดและอยู่ในช่วงความลึกจากผิวบนในตำแหน่งบนกลาง และล่าง ตามความยาวระยะฝังยึด จะส่งผลให้กำลังของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวลดลงร้อยละ 9 4 และ 3 ตามลำดับ จากกรณีฝังยึดในคอนกรีตไม่ร้าว เมื่อรอยร้าวมีขนาดความลึกในแนวตั้งเพิ่มขึ้นเป็นสองในสามส่วนของระยะฝังยึดและอยู่ในช่วงความลึกจากผิวบนในตำแหน่งบนกลาง และล่าง ตามความหนาของแท่งคอนกรีต จะส่งผลให้กำลังของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวลดลงร้อยละ 18 9 และ 3 ตามลำดับ จากกรณีฝังยึดในคอนกรีตไม่ร้าว และหากฝังยึดในคอนกรีตที่มีระนาบการร้าวในแนวตั้งตลอดความหนาของแท่งคอนกรีตหนึ่งระนาบและสองระนาบ จะทำให้กำลังของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวลดลงร้อยละ 25 และ 39 ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ที่ได้สนับสนุนทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ทำให้งานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Cook RA. Behavior of Chemically Bonded Anchors: American Society of Civil Engineers. *Journal of Structural Engineering*. 1993;119(9): 2744–2762.
- [2] Cook RA, Kunz J, Fuchs W, Konz R. Behavior and Design of Single Adhesive Anchors under Tensile Load in Uncracked Concrete. *ACI Structural Journal*. 1998; 95-S2: 9–26.
- [3] Todd MD. Sustained Load Performance of Adhesive Anchor System in Concrete. *Doctor's Thesis: University of Florida*. 2012.
- [4] Eligehausen R. Appl J. Behavior and Design of Fastening with Bonded Anchors: Numerical Analysis and Experimental Verification. In: Alberto Carpinteri, Pietro G. Gambarova, Giuseppe Ferro, Giovanni A. Plizzari.(ed.) *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures Volume 2: Design*. In: *Assessment and Retrofitting of RC Structures, Catania*. London: Taylor & Francis Group; 2007. p. 643–654.
- [5] Sakla SS, Ashour AF. Prediction of tensile capacity of single adhesive anchors using neural networks: *Computers and Structures*. 2005; 83: 1792–1803.
- [6] McVay MC, Cook RA, Krishnamurthy K. Pullout Simulation of Postinstalled Chemically Bonded Anchors. *Journal of Structure Engineering*. 1996;122: 1016–1024.
- [7] ภาคิณ ลอยเจริญ, เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย, กิตติศักดิ์ ชันติยวิชัย. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการประเมินกำลังและพฤติกรรมการวิบัติของสมอยึดแบบใช้
- สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าวและไม่ร้าว. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*. 2019.
- [8] Krishnamurthy K. Development of a Viscoplastic Consistent Tangent FEM Model with Applications to Adhesive Bonded Anchors. *PhD Dissertation, Department of Civil Engineering, The University of Florida*. 1996.
- [9] Meszaros, J. Tragverhalten von Einzelverbunddübeln unter zentrischer Kurzzeitbelastung. *Dissertation in Vorbereitung, Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart*. 2002.
- [10] Eligehausen R, Mallée R, Silva J. *Anchorage in Concrete Construction. First edition*. Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Published; 2006.
- [11] Dassault Systèmes Simulia Corp. *ABAQUS Analysis User's manual*. USA: RI; 2016.
- [12] ACI Committee 318 - 11. Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary. *American Concrete Institute*. Detroit: MI; 2011. P. 417–463.
- [13] Carreira DJ, Chu KH. Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Compression. *ACI Journal*. 1985. 82–72: 797–804.
- [14] Carreira DJ, Chu KH. Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Tension. *ACI Journal*. 1986. 83–3: 21–28.
- [15] Hilti Co, Ltd. Hilti Anchor Systems. Available from: <http://www.hilti.co.th>. [Accessed 14th February 2017].