

ตัวแปรที่สำคัญต่อกำลังของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีตร้าว

Key Parameters to Strength of an Adhesive Anchoring System in Uncracked and Cracked Concrete

ภาคิน ลอยเจริญ¹, เกียรติศักดิ์ แก้วกุลชัย^{2*}, กิตติศักดิ์ ชันติยวิชัย³

Phakin Loyjaroen¹, Griengsak Kaewkulchai^{2*}, Kittisak Kuntiyawichai³

Received: 12 March 2019 ; Revised: 10 May 2019 ; Accepted: 29 May 2019

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้ได้สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในระบบสามมิติของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยว เพื่อศึกษาตัวแปรที่สำคัญต่อกำลังยึดเหนี่ยวของสารยึดเหนี่ยว ความยาวระยะฝังยึด และกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ที่ส่งผลต่อกำลังต้านทานแรงดึงถอน ทั้งในคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีตร้าว ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อกำลังต้านทานแรงดึงถอนของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวเรียงตามลำดับความสำคัญได้แก่ ความยาวระยะฝังยึด กำลังอัดประลัยของคอนกรีต และกำลังยึดเหนี่ยวของสารยึดเหนี่ยว ตามลำดับ การกระจายของหน่วยแรงหลักที่ไม่สม่ำเสมอในคอนกรีตร้าวเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้กำลังของระบบลดลง ผลของรอยร้าวในคอนกรีตจะมีมากขึ้นตามค่าที่เพิ่มขึ้นของตัวแปรที่ศึกษา ซึ่งเป็นผลมาจากการขยายตัวของรอยร้าวและการสูญเสียกำลังยึดเหนี่ยวที่ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยึดเหนี่ยวเป็นส่วนใหญ่

คำสำคัญ: ระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยว แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ตัวแปรที่สำคัญ คอนกรีตร้าว

Abstract

This study developed a 3D finite element model of an adhesive anchoring system to study key parameters including bond strength of adhesive, embedment depth and concrete strength, that affecting pull-out strength in uncracked and cracked concrete. The results showed that the key parameters affecting pull-out strength of the adhesive anchor were embedment depth, concrete strength and bond strength. The distribution of non-uniform maximum principle stress in cracked concrete is a main reason for reducing strength of the system. The effect of cracks in concrete will be more, according to the increased value of the study parameters, which is mostly the result of the expansion of cracks and the loss of bond strength on concrete/adhesive interface.

Keywords: Adhesive anchoring system, Finite element model, Key parameters, Cracked concrete

¹ นักศึกษาปริญญาเอก, ² ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ³ รองศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

¹ Ph.D. Candidate, ² Assist. Prof. Dr., ³ Assoc. Prof. Dr., Faculty of Engineering, Ubonratchathani University, Amphur Warin Chamrap, Ubonratchathani 34190

* Corresponding author; Griengsak Kaewkulchai, Tel : 083-729-6636, E-mail: griengsak@gmail.com

บทนำ

ระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยว (Adhesive anchoring system) เป็นอุปกรณ์ฝังยึดที่นิยมใช้ในงานต่อเติมโครงสร้างเหล็กจากโครงสร้างคอนกรีตเดิมและงานเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีต โดยส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้งานร่วมกับคอนกรีตที่มีอายุและผ่านการใช้งานในระบบโครงสร้างตามที่ถูกออกแบบไว้แล้ว ดังนั้นจึงเสี่ยงไม่ได้ที่คอนกรีตจะมีโอกาสเกิดการแตกร้าวขึ้นในเนื้อคอนกรีตก่อนที่จะติดตั้งระบบฝังยึด นอกจากนี้การแตกร้าวในคอนกรีตอาจเกิดขึ้นจากการยึดหดตัวของคอนกรีตจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิหรือการเสริมเหล็กกันร้าวไม่เพียงพอ การใช้งานระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าวมีโอกาสเกิดขึ้นได้ในกรณีที่มีข้อจำกัดด้านตำแหน่งในการติดตั้งสมอยึดที่มีการแตกร้าวเกิดขึ้นในคอนกรีตอยู่ก่อนแล้ว หรือเป็นกรณีที่เกิดการแตกร้าวขึ้นขณะทำการเจาะรูในคอนกรีตเพื่อติดตั้งสมอยึด ที่อาจเกิดความผิดพลาดจากการเจาะหรือคอนกรีตเดิมมีการแตกร้าวอยู่ก่อนแล้วเกิดการขยายตัวจากขั้นตอนการติดตั้ง เป็นต้น การทำนายกำลังของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตไม่ร้าวสามารถหาได้จากการทดสอบตัวอย่างจริง จากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และการคำนวณโดยใช้สมการที่เสนอโดยนักวิจัยในอดีต แต่สำหรับในคอนกรีตร้าว การทดสอบตัวอย่างจริงสามารถทำได้ยากเนื่องจากมีข้อจำกัดหลายอย่าง ดังนั้นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวที่พัฒนาโดยผู้วิจัย¹ จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาในครั้งนี้

แบบจำลองระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในงานวิจัยนี้เป็นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่พัฒนาโดยผู้วิจัยและได้ผ่านการสอบเทียบกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการในอดีตแล้ว^{2,3} โดยมีองค์ประกอบของแบบจำลองประกอบด้วย แบบจำลองสมอยึดแบบจำลองสารยึดเหนี่ยวแบบจำลองคอนกรีต และแบบจำลองผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยึดเหนี่ยว ซึ่งเป็นอาณาบริเวณที่พบการวิบัติจากการยึดเหนี่ยวเป็นส่วนใหญ่⁴

ตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อกำลังต้านทานแรงดึงถอนของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตจากการศึกษาของนักวิจัยในอดีต^{5,6} ประกอบด้วยความยาวระยะฝังยึดกำลังยึดเหนี่ยวของสารยึดเหนี่ยว กำลังอัดประลัยของคอนกรีต ความสะอาดของผิวรูเจาะ ความชื้นที่ผิวรูเจาะ อุณหภูมิ และขนาดของมวลรวมหยาบ เป็นต้น โดยส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาในคอนกรีตไม่ร้าว การศึกษาตัวแปรที่สำคัญต่อกำลังของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าวในอดีตยังปรากฏไม่มากนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ

สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่ส่งผลต่อกำลังและพฤติกรรมของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยว ทั้งในคอนกรีตไม่ร้าวและในคอนกรีตร้าว โดยตัวแปรที่สำคัญที่จะศึกษาในครั้งนี้ประกอบด้วยตัวแปรด้านกำลังยึดเหนี่ยวของสารยึดเหนี่ยว ความยาวระยะฝังยึด และกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ซึ่งเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อกำลังของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีต และสามารถสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาได้

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อกำลังและพฤติกรรมของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวทั้งในคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีตร้าว โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะดำเนินการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในระบบสามมิติของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวเพื่อศึกษาพฤติกรรมและกำลังต้านทานแรงดึงถอนของสมอยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยว ในคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีตร้าวแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยผู้วิจัยและได้ผ่านการสอบเทียบแล้วจะถูกนำมาใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ โดยจะทำการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรที่ต้องการศึกษาในแต่ละกรณีซึ่งรายละเอียดของแบบจำลองและการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุแต่ละประเภทจะได้อธิบายในหัวข้อต่อไป

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวภายใต้แรงดึงถอนในงานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้โปรแกรม ABAQUS 2017 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีความแม่นยำในการประมวลผลข้อมูลเพื่อวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบจำลองของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวจะประกอบด้วย แบบจำลองแท่งเหล็กสมอยึด (Figure 1a) แบบจำลองสารยึดเหนี่ยว (Figure 1b) แบบจำลองผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวและคอนกรีต (Figure 1c) และแบบจำลองคอนกรีต (Figure 1d) แบบจำลองผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวและคอนกรีตได้สร้างขึ้นมาเพื่อเน้นศึกษาถึงลักษณะการกระจายของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการวิบัติในบริเวณดังกล่าว เนื่องจากการวิบัติจากการยึดเหนี่ยวไม่เพียงพอของสมอยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวส่วนใหญ่จะเกิดการลื่นหลุดที่ผิวสัมผัสของสารยึดเหนี่ยวและคอนกรีต¹

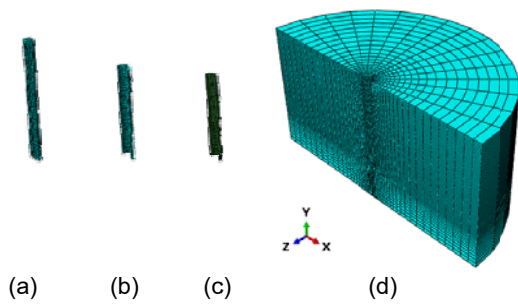


Figure 1 Typical of adhesive anchor model

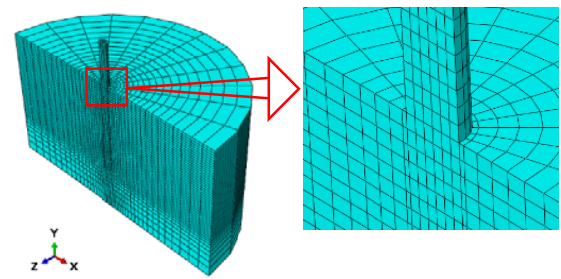
- (a) anchor
- (b) adhesive
- (c) concrete/adhesive interface
- (d) concrete

เอลิเมนต์ส่วนใหญ่ที่ใช้ในแบบจำลองจะเป็นเอลิเมนต์ประเภท C3D8R ที่เป็นเอลิเมนต์ในตระกูล 3D-stress ที่เหมาะในการใช้ส่งถ่ายแรงในเอลิเมนต์ของแข็ง (Solid element) โดยจะใช้ในแบบจำลองสมอยึด สารยึดเหนี่ยว และคอนกรีต สำหรับเอลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมตอบสนองของผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวและคอนกรีต จะใช้เอลิเมนต์ประเภท COH3D8 ที่มีความหนาเป็นศูนย์ ดังแสดงใน (Figure 1c)

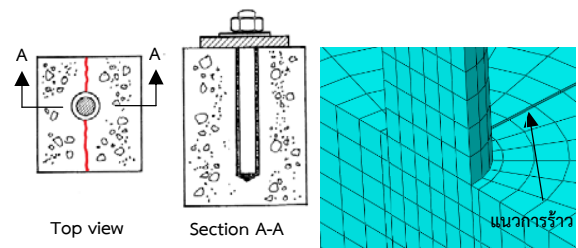
แบบจำลองของระบบจะถูกสร้างเพียงครึ่งส่วนที่สมมาตรในระบบสามมิติ เพื่อลดระยะเวลาในการประมวลผลของโปรแกรม เป็นแบบจำลองการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงถอนของสมอยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีต มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแบบจำลองคอนกรีต 300 มิลลิเมตร ซึ่งครอบคลุมการกระจายของหน่วยแรงในเอลิเมนต์คอนกรีต และใช้ระยะเวลาในการประมวลผลที่เหมาะสม มีระยะจากปลายรูเจาะถึงขอบล่างของแบบจำลองคอนกรีต 50 มิลลิเมตร เอลิเมนต์ที่เล็กที่สุดกำหนดให้มีขนาด 3 มิลลิเมตร ที่เอลิเมนต์ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยึดเหนี่ยว ขนาดของเอลิเมนต์จะใหญ่ขึ้นจนถึงขอบนอกของเอลิเมนต์คอนกรีตกำหนดให้มีขนาด 15 มิลลิเมตร (Figure 2a) แบบจำลองวัสดุแต่ละส่วนจะถูกนำมายึดติดกันโดยใช้หลักการ Surface to surface-Tied constraint

แบบจำลองทั้งระบบได้ถูกกำหนดเงื่อนไขขอบเขตโดยการยึดรั้งแท่งคอนกรีตที่ฐานล่างในแนวแกน x, y และ z และ ยึดรั้งขอบนอกด้านบนในแนวแกน y เพื่อป้องกันการโอบรัด (Confinement) ในเนื้อคอนกรีต มีการยึดรั้งเอลิเมนต์คอนกรีตและสมอยึดในระนาบสมมาตรในแนวแกน z และกำหนดการให้แรงในแท่งสมอยึดโดยการกำหนดให้ปลายของสมอยึดเคลื่อนที่ขึ้นในแนวตั้ง (Displacement control) เพื่อให้สอดคล้องกับวิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการใช้งาน

จริง การจำลองรอยร้าวในคอนกรีตกรณีศึกษาในคอนกรีตร้าวที่มีลักษณะการร้าวแบบแตกปริ (Splitting crack) ใช้วิธีตัดแปลงแบบจำลองคอนกรีตในกรณีคอนกรีตไม่ร้าวโดยการเพิ่มช่องว่างในแนวระนาบที่เป็นตัวแทนของแนวการร้าวในคอนกรีต ให้มีความกว้างของช่องว่างเท่ากับขนาดความกว้างของรอยร้าว มีระนาบการร้าววิ่งขนบของรูเจาะที่ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยึดเหนี่ยว (Figure 2b) โดยรอยร้าวลักษณะนี้เปรียบเสมือนการร้าวแบบแตกปริที่เกิดขึ้นก่อนติดตั้งสมอยึด (Pre-crack) โดยกำหนดให้มีความกว้างของรอยร้าว 0.3 มิลลิเมตร ในเอลิเมนต์คอนกรีต และมีความลึกของระนาบการร้าวเท่ากับระยะฝังยึดของสมอยึด



(a) uncracked concrete model



(b) cracked concrete model

Figure 2 Finite element model of adhesive anchor in uncracked and cracked concrete

คุณสมบัติวัสดุ

ในแบบจำลองคอนกรีตได้กำหนดคุณสมบัติเป็นคอนกรีตล้วน (Plain concrete) ที่สามารถแสดงพฤติกรรมตอบสนองได้ทั้งในช่วงเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น แบบจำลองความเสียหายเชิงพลาสติกของคอนกรีต (Concrete damage plasticity, CDP) จึงถูกนำมาใช้กำหนดพฤติกรรมของแบบจำลองคอนกรีตภายใต้การกระทำของแรงอัดและแรงดึง พฤติกรรมในช่วงยืดหยุ่นกำหนดให้มีความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดเป็นไปตามกฎของฮุก (Hooke's law) ซึ่งความสัมพันธ์จะมีลักษณะเชิงเส้น ที่มีค่าความเค้นยืดหยุ่นสูงสุดในช่วงนี้เป็นไปตามคำแนะนำของ ACI318-11⁷ หรือ ส่วนในช่วงไม่ยืดหยุ่นเลือกใช้แบบจำลองของ Carreira, D.J. และ

Chu, K.H.^{8,9} กำหนดความสัมพันธ์ในช่วงที่ไม่เชิงเส้นทั้งก่อนและหลังจุดที่ความเค้นมีค่าสูงสุด ซึ่งตามวิธีของความเสียหายเชิงพลาสติกที่เลือกไว้จะสามารถแสดงผลในส่วนของความเสียหายหรือการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์คอนกรีตได้ในรูปของการเสื่อมสภาพความแกร่ง (Stiffness degradation) ซึ่งเกิดขึ้นได้ทั้งผลจากการกระทำของแรงอัดและแรงดึง

แบบจำลองสารยึดเหนี่ยวกำหนดให้มีความหนา 1 มิลลิเมตร ตามคำแนะนำของผู้ผลิต Hilti Co, Ltd¹⁰ มีรูปทรงโค้งตามผิวของรูเจาะคอนกรีต ผลตอบสนองต่อสภาวะการให้แรงกระทำของเอลิเมนต์ที่กำหนดแทนสารยึดเหนี่ยวกำหนดให้มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นภายใต้แรงเฉือน และกำหนดให้มีความเสียหายเชิงพลาสติกในช่วงหลังจุดคราก ดังนั้นรูปแบบการวิบัติจะกำหนดโดยใช้หลักการความเสียหายจากแรงเฉือน (Shear damage) ส่วนการพัฒนาความเสียหาย (Damage evolution) ในขั้นตอนการวิบัติจากการเฉือนจะกำหนดให้มีความเสียหายเชิงเส้นภายใต้เงื่อนไขของค่าการเคลื่อนที่ซึ่งจะมีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดสอดคล้องกับค่าการยืดตัวสูงสุด (Elongation at break) ของสารยึดเหนี่ยว

การจำลองผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวของสารยึดเหนี่ยวและคอนกรีตในบริเวณนี้ ซึ่งตามจริงแล้วจะไม่มีมิติด้านความหนา ดังนั้นแบบจำลองในส่วนนี้จึงจะกำหนดให้มีคุณสมบัติเป็นเอลิเมนต์เชื่อมยึด (Cohesive elements) ที่มีความหนาเป็นศูนย์ มีขนาดเอลิเมนต์เท่ากับขนาดเอลิเมนต์ของสารยึดเหนี่ยวและคอนกรีตด้านที่อยู่ติดกัน ครอบคลุมพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวและคอนกรีต พฤติกรรมตอบสนองกำหนดให้มีความเสียหายตามหลักการของแรงฉุด-การแยก (Traction-separation behavior) ในรูปแบบที่ 2 (Mode II) ซึ่งเป็นพฤติกรรมของแรงฉุดเฉือนและการแยกเฉือน และรูปแบบความสัมพันธ์ของแรงฉุด-การแยก จะเป็นลักษณะของกราฟ Bilinear

พฤติกรรมตอบสนองของเอลิเมนต์ที่เป็นตัวแทนของสมอียึดจะกำหนดให้มีความเสียหายเหมือนเหล็กกล้ากำลังสูงทั่วไป ที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นในช่วงที่ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดเป็นเส้นตรง และมีคุณสมบัติเชิงพลาสติกในช่วงที่ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดไม่เป็นเส้นตรงพฤติกรรมการวิบัติจะกำหนดให้มีรูปแบบการวิบัติโดยใช้หลักการความเสียหายจากการยืดตัว (Ductile damage)

แบบจำลองระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตไม่ร้าวจะถูกสร้างให้มีขนาดและองค์ประกอบพื้นฐานตามคำแนะนำของผู้ผลิต โดยอ้างอิงคุณสมบัติของสารยึดเหนี่ยว Hilti HIT-RE500 V3 ที่ใช้งานร่วมกับสมอียึด HIT-C

ซึ่งเป็นสมอียึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวสูตรใหม่ของ Hilti¹⁰ มีคุณสมบัติพื้นฐานในการใช้งานได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสมอียึด 16 มิลลิเมตร ความยาวระยะฝังยึด 125 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ 18 มิลลิเมตร กำลังยึดเหนี่ยวของสารยึดเหนี่ยว 11.7 เมกะปาสคาล (ที่ระยะเวลาในการบ่มตัว 14 วัน) โมดูลัสยืดหยุ่นของสารยึดเหนี่ยว 2600 เมกะปาสคาล และค่าการยืดตัวสูงสุด (Elongation at break) 1.1% สมอียึดมีโมดูลัสยืดหยุ่น 2.0×10^5 เมกะปาสคาล อัตราส่วนปัวซอง 0.30 กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตแบบไม่โอบริด (Unconfined compressive strength) กำหนดค่าให้สอดคล้องกับคุณสมบัติของคอนกรีตจากการศึกษาของ Krishnamurthy, K.² ซึ่งเป็นคุณสมบัติของคอนกรีตที่กำหนดในแบบจำลองจากการศึกษาของผู้วิจัยที่ผ่านมา เพื่อสอบเทียบกับผลการศึกษาในอดีตดังกล่าว โดยมีค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต 39 เมกะปาสคาลกำลังรับแรงดึงประลัย 2.93 เมกะปาสคาล โมดูลัสยืดหยุ่น 2.83×10^4 เมกะปาสคาล อัตราส่วนปัวซอง 0.18 โดยพฤติกรรมของคอนกรีตจะถูกกำหนดให้มีความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดทั้งในช่วงเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น ตามสมการของ Carreira, D.J. และ Chu, K.H.^{8,9} ภายใต้แรงอัดและแรงดึง ตามลำดับ

ในแบบจำลองผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยึดเหนี่ยวจะกำหนดให้มีความเสียหายในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสเท่ากับกำลังรับแรงดึงประลัยของคอนกรีต 2.93 เมกะปาสคาลและมีพฤติกรรมตามแนวขนานกับระนาบผิวสัมผัสเท่ากับกำลังยึดเหนี่ยวของสารยึดเหนี่ยวคือ 11.7 เมกะปาสคาลส่วนในแบบจำลองระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าว จะทำการสร้างแบบจำลองที่มีเงื่อนไขต่าง ๆ ทั้งด้านมิติ ความยาวระยะฝังยึด และการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุให้กับเอลิเมนต์วัสดุแต่ละชนิด จะเหมือนกับกรณีคอนกรีตไม่ร้าวจะแตกต่างกันตรงที่ในกรณีคอนกรีตร้าวจะมีการเว้นช่องว่างในเอลิเมนต์คอนกรีตเพื่อเป็นการจำลองระนาบการแตกร้าวเพิ่มขึ้นในแต่ละรูปแบบ

ตัวแปรที่สำคัญ

ตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานแรงดึงถอนของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวทั้งในคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีตร้าวที่จะศึกษาในงานวิจัยนี้มี 3 ตัวแปร ได้แก่ ตัวแปรด้านกำลังยึดเหนี่ยวของสารยึดเหนี่ยว ความยาวระยะฝังยึด และกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ดังแสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาในแบบจำลองดังตาราง (Table 1) โดยค่ากำลังยึดเหนี่ยวของสารยึดเหนี่ยวจะใช้ค่า 8, 12 และ 16 เมกะปาสคาล ซึ่งเป็นค่ากำลังยึด

หน่วงของสารยึดเหนี่ยวในช่วงต่ำ ปานกลาง และสูง ตามลำดับ ส่วนความยาวระยะฝังยึดจะกำหนดที่ระยะ 4·d, 8·d และ 12·d เมื่อ d เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสมอยึด จะได้ค่าเป็น 64, 128 และ 192 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะฝังที่อยู่ในช่วงต้น ปานกลาง และลึก ตามลำดับ โดยค่าระยะฝังยึดระยะปานกลาง จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าแนะนำจากผู้ผลิตคือ 125 มิลลิเมตร

Table 1 Parameters to parametric studies

Parameters	Values		
	Low	Middle	High
Bond strength (MPa)	8	12	16
Embedment depth (mm)	64	128	192
Concrete strength (MPa)	19.61	34.32	49.03

ส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตจะกำหนดที่ค่ากำลังอัดต่ำ กลาง และสูง ของคอนกรีตในประเทศ คือ 200, 350 และ 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งจะได้ค่าตาม (Table 1) ในหน่วยเมกะปาสคาล ตามลำดับ

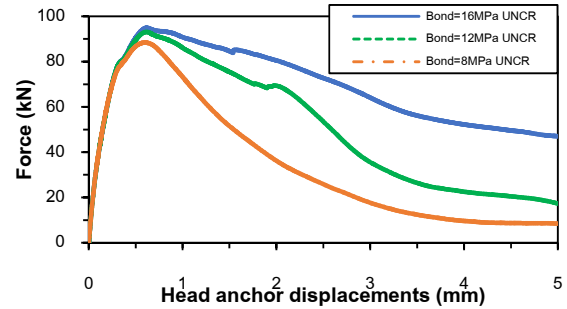
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการศึกษาผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์-เอลิเมนต์ของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวทั้งในคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีตร้าวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยยะสำคัญของตัวแปรด้านกำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยว ความยาวระยะฝังยึด และกำลังอัดประลัยของคอนกรีต สามารถแสดงผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

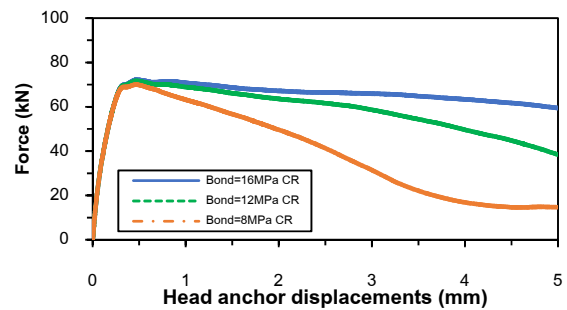
ผลการศึกษาตัวแปรด้านกำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยว

ผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแรงดึงถอนและการเคลื่อนที่ที่ปลายสมอยึดเมื่อกำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยวมีค่าแตกต่างกันแสดงใน (Figure 3) โดยเมื่อพิจารณาจากภาพจะพบว่า เมื่อกำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยวมีค่ามากขึ้น ความสามารถในการต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งในคอนกรีตไม่ร้าว (Figure 3a) และคอนกรีตร้าว (Figure 3b) ในคอนกรีตไม่ร้าวอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดึงถอนสูงสุดเมื่อกำลังยึดหน่วงเพิ่มขึ้นจาก 8, 12 และ 16 เมกะปาสคาล มีค่าเป็น 1, 1.05 และ 1.07 ตามลำดับ ส่วนในคอนกรีตร้าวอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดึงถอนสูงสุดจะเป็น 1, 1.02 และ 1.03 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงแรกที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงมีความแกร่ง (Stiffness) คงที่และมีค่าความชันในช่วงดังกล่าวใกล้เคียงกันทั้งในกรณีคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีต

ร้าว สำหรับในช่วงการแข็งตัวลด (Softening) จะมีแนวโน้มการลดลงของแรงดึงถอนในรูปแบบเดียวกัน โดยอัตราการลดลงของแรงดึงถอนในกรณีกำลังยึดหน่วงมีค่ามากจะลดลงช้ากว่ากรณีกำลังยึดหน่วงมีค่าน้อยทั้งในกรณีคอนกรีตไม่ร้าวและกรณีคอนกรีตร้าว



(a) Uncracked concrete



(b) Cracked concrete

Figure 3 Load-Displacement curve of 16 mm adhesive anchor in uncracked and cracked concrete for various bond strength

หากเปรียบเทียบกันระหว่างกรณีคอนกรีตไม่ร้าวกับกรณีคอนกรีตร้าว ที่มีกำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยวเท่ากัน จะพบว่าค่าความแกร่งในช่วงแรกจะใกล้เคียงกันโดยกรณีคอนกรีตร้าวจะมีค่าลดลงเล็กน้อย (ความชันลดลง) ส่วนในช่วงการแข็งตัวลดในกรณีคอนกรีตไม่ร้าวจะมีอัตราการลดลงของแรงดึงถอนมากกว่ากรณีคอนกรีตร้าวในทุกค่าของกำลังยึดหน่วงที่เปลี่ยนแปลงไป

ส่วนผลกระทบของรอยร้าวต่อกำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดจะพบว่าเมื่อกำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยวมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 8, 12 และ 16 เมกะปาสคาล อัตราส่วนของค่าแรงดึงถอนสูงสุดในคอนกรีตร้าวกับคอนกรีตไม่ร้าวจะเป็น 0.79, 0.77 และ 0.76 ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ดังแสดงใน (Figure 4)

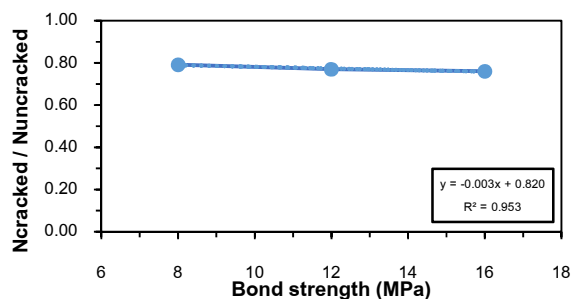


Figure 4 Ratio of Peak load in cracked to uncracked concrete of 16 mm diameter adhesive anchors for various bond strength

การเพิ่มขึ้นของกำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยวส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดทั้งในคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีตร้าวเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม สารยึดเหนี่ยวที่มีกำลังยึดหน่วงมีค่าสูงจะมีอัตราการคลายแรงในช่วงเชิงตัวลดต่ำกว่าสารยึดเหนี่ยวที่มีกำลังยึดหน่วงต่ำกว่า นอกจากนี้ยังพบว่า ลักษณะการกระจายของหน่วยแรงหลักสูงสุด (Maximum principle stress) ในกรณีคอนกรีตไม่ร้าวจะมีการกระจายแบบสม่ำเสมอโดยรอบในระนาบตั้งฉากกับแนวแรงดึงถอน ส่วนในกรณีคอนกรีตร้าวจะมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ (Figure 5) โดยจะมีความเข้มข้นของหน่วยแรงหลักสูงในระนาบไม่ร้าว และลดลงเมื่อเข้าไปใกล้ระนาบร้าว ความเข้มข้นของหน่วยแรงหลักบริเวณหน้าตัดร้าวกับหน้าตัดไม่ร้าวจะใกล้เคียงกันบริเวณช่วงกลางถึงช่วงปลายระยะฝังยึด และจะลดลงในระนาบร้าวเมื่อเข้าไปใกล้ผิวบนของแบบจำลองคอนกรีต ความไม่สม่ำเสมอของหน่วยแรงหลักในคอนกรีตส่งผลให้ประสิทธิภาพการต้านทานแรงดึงถอนของคอนกรีตลดลงในคอนกรีตร้าว

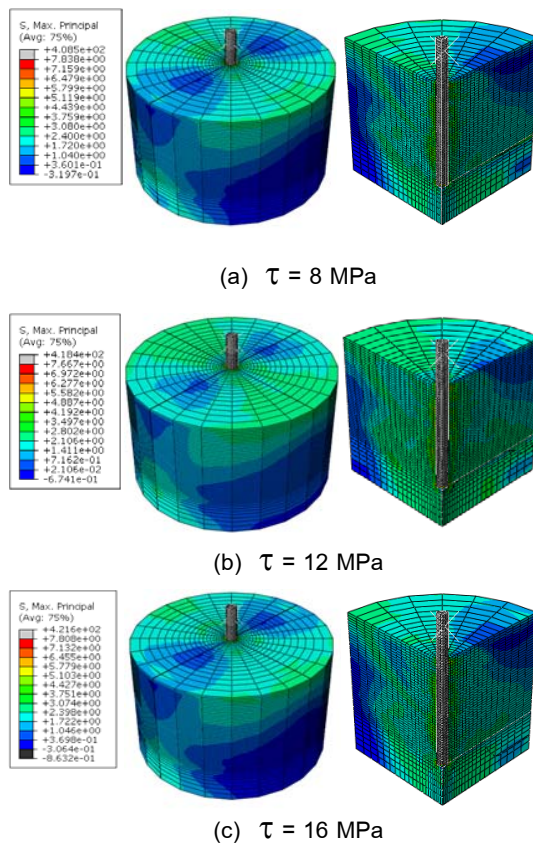


Figure 5 Maximum principle stress at peak load for various bond strength

นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อกำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น ลักษณะการกระจายของหน่วยแรงหลักมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดในคอนกรีตร้าวที่เปลี่ยนแปลงน้อยเช่นกัน

ลักษณะการวิบัติของเอลิเมนต์เชื่อมยึดใน (Figure 6) จะพบว่าเริ่มเกิดการสูญเสียความแข็งแรงเมื่อแรงดึงถอนมีค่าถึงจุดสูงสุด และความแข็งแรงในเอลิเมนต์เชื่อมยึดจะลดลงจนเมื่อเอลิเมนต์เชื่อมยึดแสดงแถบสีแดง แสดงว่าเกิดการสูญเสียความแข็งแรงเกือบสมบูรณ์ ($0.95 < SDEG < 1$) แสดงถึงการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวของผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยึดเหนี่ยวในบริเวณดังกล่าว จนค่าการแยก (Separation) ถึงพิกัดค่าการยึดตัวที่จุดสูงสุดของสารยึดเหนี่ยวที่กำหนดไว้ให้เอลิเมนต์ลบตัวเอง (Deletion) แสดงว่าเกิดการสูญเสียความแข็งแรงโดยสมบูรณ์ ($SDEG = 1$) ซึ่งบริเวณดังกล่าวจะต่อเนื่องกับบริเวณที่เอลิเมนต์คอนกรีตเกิดการสูญเสียความแข็งแรงโดยสมบูรณ์เช่นกัน แสดงให้เห็นว่าบริเวณที่เอลิเมนต์เกิดการลบตัวเป็นบริเวณเดียวกับที่เกิดการแตกร้าวของคอนกรีตที่ผิวรูลูเจาะ

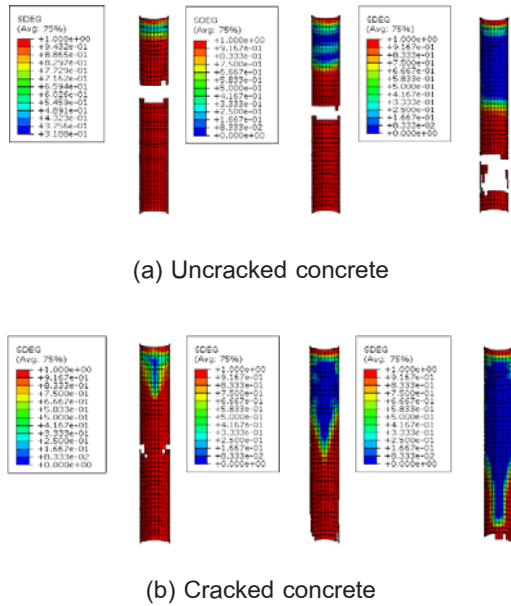


Figure 6 Stiffness degradation on cohesive elements for various bond strength

จะเห็นได้ว่าเอลิเมนต์ที่ถูกลบของเอลิเมนต์ที่เชื่อมยึดในคอนกรีตไม่ร้าวจะมีตำแหน่งลึกลงและบริเวณที่สูญเสียแรงยึดเหนี่ยวน้อยลงเมื่อกำลังยึดเหนี่ยวมีค่ามากขึ้น แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการยึดเหนี่ยวของสารยึดเหนี่ยวต่อผิวสัมผัสของคอนกรีตที่ดีขึ้น ทำให้เกิดรูปแบบการวิบัติร่วมระหว่างการวิบัติของคอนกรีตเป็นรูปกรวยกับการวิบัติจากการยึดเหนี่ยวที่ผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวกับคอนกรีต โดยกรวยคอนกรีตจะมีขนาดใหญ่มากขึ้นเมื่อกำลังยึดเหนี่ยวมีค่ามากขึ้น สังเกตได้จากตำแหน่งเอลิเมนต์ที่ถูกลบใน (Figure 6a) ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับเอลิเมนต์คอนกรีตที่เกิดการแตกร้าวที่ผิวของรูเจาะ

ส่วนในคอนกรีตร้าวจะพบว่าการสูญเสียความแข็งแรงจะลดลงเมื่อกำลังยึดเหนี่ยวมีค่ามากขึ้น (Figure 6b) เอลิเมนต์ที่ถูกลบจะเกิดขึ้นน้อยกว่าในคอนกรีตไม่ร้าวและมีตำแหน่งลึกลงตามกำลังยึดเหนี่ยวที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นหากเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตไม่ร้าวกับคอนกรีตร้าวจะพบว่า การวิบัติที่ผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตลดลงในคอนกรีตร้าว พบการแตกร้าวที่ผิวรูจะเกิดขึ้นเล็กน้อยที่บริเวณช่วงกลางและช่วงปลายระยะฝังยึด เมื่อกำลังยึดเหนี่ยวมีค่าเพิ่มขึ้น

โดยเมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายของหน่วยแรงที่ไม่สม่ำเสมอในกรณีคอนกรีตร้าว ทั้งในระนาบตั้งฉากกับแนวแรงดึงถอนและระนาบขนานกับแนวแรงดึงถอน จะพบว่าผลกระทบที่ทำให้เกิดการกระจายของหน่วยแรงหลักในลักษณะดังกล่าวเกิดจากการขยายตัวของความกว้างรอยร้าว ซึ่งความ

กว้างของรอยร้าวจะเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังยึดเหนี่ยวของสารยึดเหนี่ยวมีค่ามากขึ้น และจะมีความกว้างมากที่สุดที่ผิวบนของแท่งคอนกรีต และจะลดลงตามระยะฝังยึดที่เพิ่มขึ้นดังใน (Figure 7)

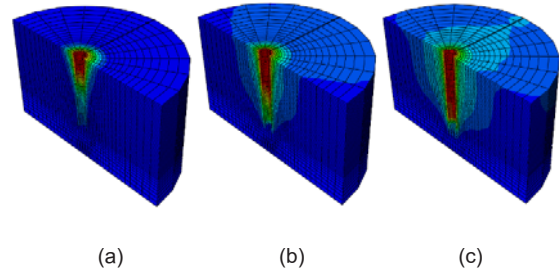


Figure 7 Expansion of the cracked width
(a) $\tau=8$ MPa (b) $\tau=12$ MPa (c) $\tau=16$ MPa

ดังนั้นการขยายตัวของรอยร้าวจึงเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงดึงถอนของสมอยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าวลดลง เนื่องจากการขยายตัวของรอยร้าวทำให้เกิดการคลายความเครียดขึ้นในคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความเค้นลดลง นำไปสู่กำลังต้านทานแรงดึงถอนของระบบลดลงด้วย แต่การลดลงของแรงดึงถอนจะไม่เกิดแบบฉับพลันเพราะการลดลงของกำลังเกิดจากการคลายความเครียดในคอนกรีต ดังนั้นจึงทำให้กราฟความสัมพันธ์ในช่วงเชิงตัวลดในกรณีคอนกรีตร้าว มีอัตราการลดลงช้ากว่ากรณีคอนกรีตไม่ร้าว ที่เกิดการวิบัติจากการยึดเหนี่ยวและการวิบัติของคอนกรีตรูปกรวยเป็นส่วนใหญ่

ผลการศึกษาตัวแปรด้านความยาวระยะฝังยึด

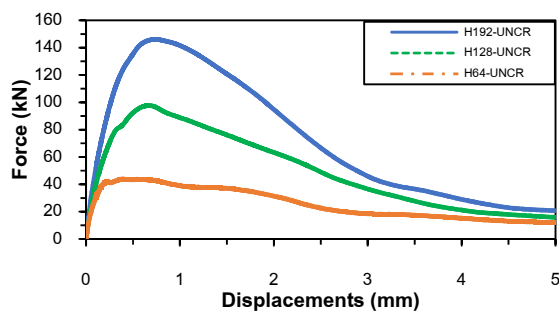
ความสัมพันธ์ของแรงดึงถอนและการเคลื่อนที่ที่ปลายสมอยึดเมื่อความยาวระยะฝังยึดมีค่าแตกต่างกันแสดงใน (Figure 8a) ในกรณีคอนกรีตไม่ร้าว และใน (Figure 8b) ในกรณีคอนกรีตร้าว

ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความยาวระยะฝังยึดมีค่ามากขึ้น กำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวจะมากขึ้นทั้งในคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีตร้าว โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่สูงกว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอื่น

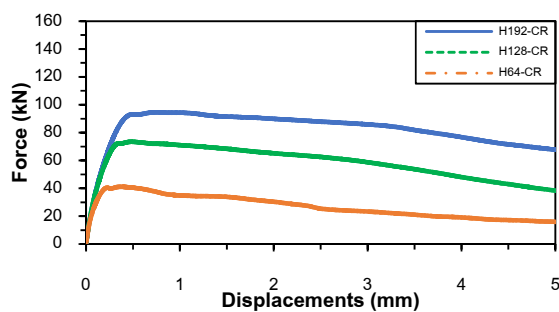
หากเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแรงดึงถอนและการเคลื่อนที่ที่ปลายสมอยึดระหว่างกรณีคอนกรีตไม่ร้าวกับกรณีคอนกรีตร้าวที่มีความยาวระยะฝังยึดเท่ากัน จะพบว่าความแข็งแรงของระบบจะใกล้เคียงกันเมื่อระยะฝังยึดมีค่าน้อย แต่ความแข็งแรงในกรณีคอนกรีตร้าวจะลดลงเมื่อระยะฝังยึดมีค่ามากขึ้น ส่วนในช่วงการเชิงตัวลดจะมีอัตราการคลายแรงใกล้เคียงกันเมื่อความยาวระยะฝังยึดมีค่าน้อย แต่เมื่อความยาว

ระยะฝังยัดมีค่ามากขึ้นอัตราการคลายแรงจะมากขึ้นในกรณีคอนกรีตไม่ร้าว

ผลกระทบของรอยร้าวต่อกำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดเมื่อความยาวระยะฝังยัดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 64, 128 และ 192 มิลลิเมตร พบว่าอัตราส่วนของค่าแรงดึงถอนสูงสุดในคอนกรีตร้าวกับคอนกรีตไม่ร้าวจะมีสัดส่วนเป็น 0.94, 0.75 และ 0.65 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าผลกระทบของการแตกร้าวในคอนกรีตจะส่งผลมากขึ้นเมื่อระยะฝังยัดมีค่ามากขึ้น



(a) Uncracked concrete



(b) Cracked concrete

Figure 8 Load-Displacement curve of 16 mm adhesive anchor in uncracked and cracked concrete for various embedment depth

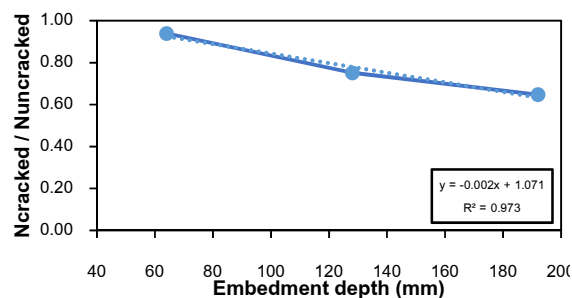
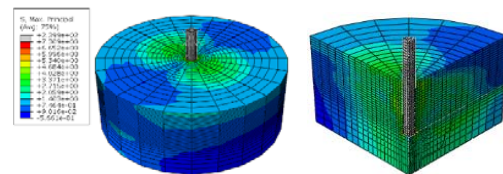


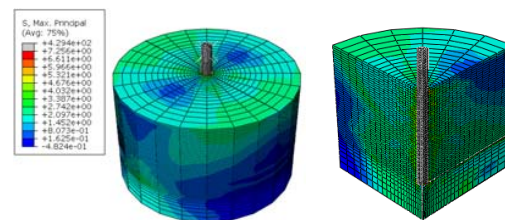
Figure 9 Ratio of Peak load in cracked to uncracked concrete of 16 mm diameter adhesive anchors for various embedment depth

ใน (Figure 9) ได้แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างค่าแรงดึงถอนสูงสุดในคอนกรีตร้าวกับคอนกรีตไม่ร้าว และความยาวระยะฝังยัด ซึ่งจะเห็นว่ากราฟมีแนวโน้มลดลงมากกว่าการศึกษาในตัวแปรกำลังยึดหน่วง แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของรอยร้าวที่เพิ่มขึ้นมากกว่า เมื่อความยาวระยะฝังยัดมีค่ามากขึ้น

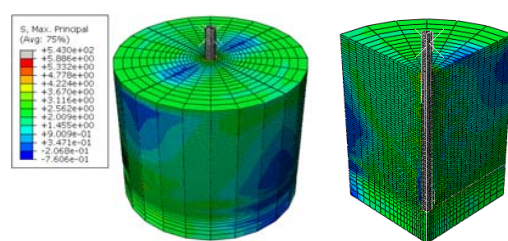
เมื่อพิจารณาการกระจายของหน่วยแรงหลักในเอลิเมนต์คอนกรีตจะพบว่า ในกรณีคอนกรีตไม่ร้าว ลักษณะการกระจายตัวของหน่วยแรงหลักจะมีความสม่ำเสมอโดยรอบ ในระนาบตั้งฉากกับแนวแรงดึงถอน ในทุกความยาวระยะฝังยัด ส่วนในกรณีคอนกรีตร้าวจะพบว่า การกระจายของหน่วยแรงหลักขณะที่แรงดึงถอนมีค่าสูงสุดจะไม่สม่ำเสมอแสดงใน (Figure 10)



(a) H = 64 mm



(b) H = 128 mm



(c) H = 192 mm

Figure 10 Maximum principle stress at peak load for various embedment depth

เมื่อความยาวระยะฝังยัดเพิ่มขึ้น การกระจายของหน่วยแรงหลักในเอลิเมนต์คอนกรีตร้าวจะกว้างขึ้น ดังนั้นความไม่ต่อเนื่องของคอนกรีตที่เกิดจากการแตกร้าวทำให้การส่งถ่ายแรงในเอลิเมนต์คอนกรีตไม่สมบูรณ์ กำลังต้านทานแรงดึงถอนของคอนกรีตร้าวจึงลดลง โดยยิ่งระยะการร้าวมีพื้นที่มากขึ้นตามระยะฝังยัดที่เพิ่มขึ้นยิ่งส่งผลต่อกำลังต้านทานแรงดึงถอนของระบบมากขึ้น

เมื่อพิจารณาการกระจายของหน่วยแรงหลักใน (Figure 10a-c) จะเห็นได้ว่า ความเข้มของหน่วยแรงหลักจะสูงบริเวณหน้าตัดไม้ร้าวและจะลดลงเมื่อเข้าใกล้หน้าตัดร้าว โดยในระนาบตั้งฉากกับแนวแรงดึงถอนความเข้มของหน่วยแรงหลักจะลดลงเมื่อเข้าใกล้ระนาบร้าว และในระนาบขนานกับแนวแรงดึงถอนจะลดลงเมื่อเข้าใกล้ขอบบนสุดริมนอกของคอนกรีต ในทุกระยะฝังยึด

นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่า บริเวณที่ความเข้มของหน่วยแรงลดลงในระนาบร้าวจะมีความลึกใกล้เคียงกันในทุกความยาวระยะฝังยึด แสดงให้เห็นว่าการแตกร้าวบริเวณใกล้ผิวด้านบนคอนกรีตจะส่งผลกระทบต่อกำลังต้านทานแรงดึงถอนมากกว่าการแตกร้าวบริเวณปลายล่างระยะฝังยึด

เมื่อแรงดึงถอนมีค่าสูงสุด ความแกร่งในเอลิเมนต์เชื่อมยึดจะลดลง จนค่าการแยกถึงพิกัดสูงสุดของการยึดตัวสูงสุดของสารยึดเหนี่ยว ที่กำหนดไว้ให้เอลิเมนต์เชื่อมยึดลบตัวเอง ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับที่เกิดการแตกร้าวที่ผิวรูเจาะในกรณีคอนกรีตไม้ร้าวเอลิเมนต์ที่ถูกกลบจะมีตำแหน่งห่างจากปลายล่างมากขึ้นเมื่อความยาวระยะฝังยึดเพิ่มขึ้น ใน (Figure 11a) แสดงให้เห็นถึงรูปแบบการวิบัติที่เปลี่ยนจากการวิบัติของคอนกรีตรูปกรวยเมื่อระยะฝังยึดมีค่า 4·d เป็นการวิบัติร่วมจากการยึดหน่วงกับการวิบัติของคอนกรีตรูปกรวยเมื่อระยะฝังยึดมีค่ามากขึ้นเป็น 8·d และ 12·d ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Eligehausen, R., Cook, R.A. and Appl, J. (2006)¹¹ ส่วนในกรณีคอนกรีตร้าว เอลิเมนต์ที่ถูกกลบจะเกิดขึ้นน้อยกว่าในคอนกรีตไม้ร้าวและเกิดขึ้นบริเวณปลายล่างสุดของระยะฝังยึดใน (Figure 11b) แสดงให้เห็นว่าผลของการร้าวในคอนกรีตทำให้รูปแบบการวิบัติเปลี่ยนแปลงไป

ดังนั้น หากเปรียบเทียบระหว่างกรณีคอนกรีตไม้ร้าวกับกรณีคอนกรีตร้าวจะพบว่า การวิบัติที่ผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตเกิดขึ้นน้อยลงในกรณีคอนกรีตร้าว รูปแบบการวิบัติจะแตกต่างจากกรณีคอนกรีตไม้ร้าวโดยสิ้นเชิง จะพบการแตกร้าวเกิดขึ้นในคอนกรีตที่บริเวณปลายระยะฝังยึดใกล้ผิวรูเจาะ

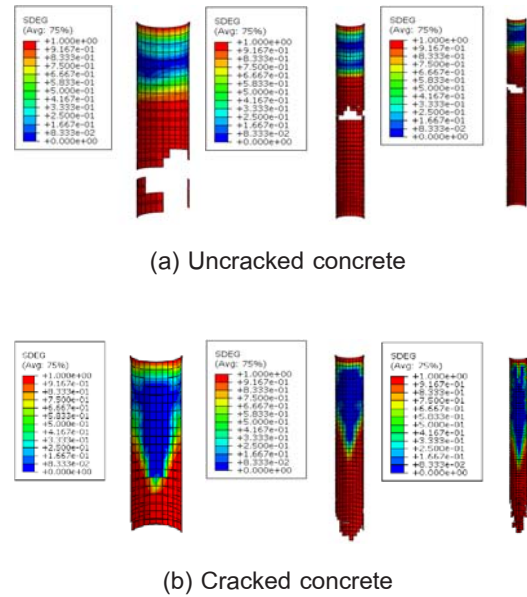


Figure 11 Stiffness degradation on cohesive elements for various embedment depth

นอกจากนี้ยังพบว่ามีการขยายตัวเพิ่มขึ้นของรอยร้าว เมื่อความยาวระยะฝังยึดมีค่ามากขึ้น (Figure 12) โดยความกว้างของรอยร้าวจะขยายตัวมากที่สุดที่ผิวบนของแท่งคอนกรีตและจะลดลงตามความลึกที่มากขึ้น และจะสังเกตเห็นว่าการขยายตัวของรอยร้าวมีน้อยมากในแบบจำลองที่มีความยาวระยะฝังยึดมีค่าน้อย ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดแตกต่างจากกรณีคอนกรีตไม้ร้าวไม่มากนัก แต่ในแบบจำลองที่มีความยาวระยะฝังยึดมีค่ามาก การขยายตัวของรอยร้าวจะปรากฏเด่นชัด และส่งผลให้กำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดแตกต่างจากกรณีคอนกรีตไม้ร้าวมาก

ดังนั้นการขยายตัวของรอยร้าวจึงเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงดึงถอนของสมอยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าวลดลง เนื่องจากการขยายตัวของรอยร้าวทำให้เกิดการคลายความเครียดขึ้นในคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความเค้นลดลง นำไปสู่กำลังต้านทานแรงดึงถอนของระบบลดลงด้วย

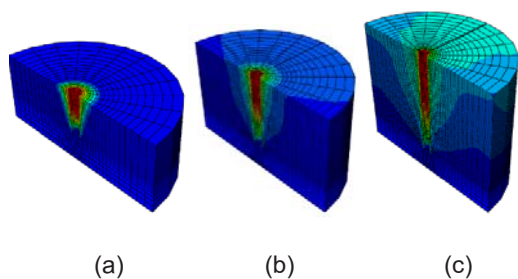


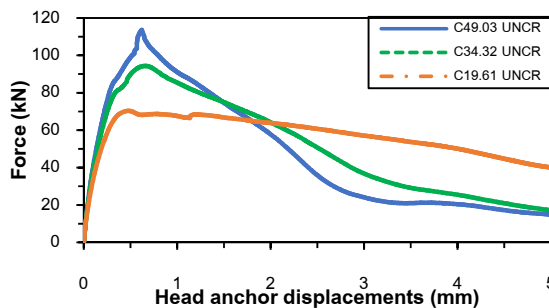
Figure 12 Expansion of the cracked width
 (a) H=64 mm (b) H=128 mm (c) H=192 mm

ผลการศึกษาตัวแปรด้านกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

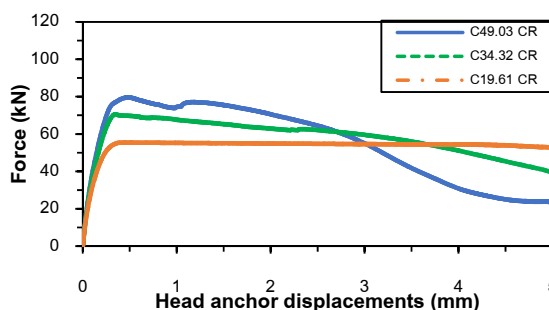
กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการวิบัติของคอนกรีตรูปกรวย และการวิบัติร่วมจากการยึดหน่วงกับการวิบัติของคอนกรีตรูปกรวย ความสัมพันธ์ของแรงดึงถอนและการเคลื่อนที่ที่ปลายสมอยึดเมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าแตกต่างกันแสดงใน (Figure 13a) ในกรณีคอนกรีตไม่ร้าว และใน (Figure 13b) ในกรณีคอนกรีตร้าว

จากการศึกษาแบบจำลองพบว่า เมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเพิ่มขึ้น กำลังยึดหน่วงของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวจะเพิ่มขึ้นทั้งในคอนกรีตไม่ร้าวและในคอนกรีตร้าว โดยเมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตในกรณีคอนกรีตไม่ร้าวมีค่า 19.61, 34.32 และ 49.03 เมกะปาสคาล แรงดึงถอนสูงสุดจะมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นเป็น 1, 1.34 และ 1.61 เท่าของกำลังอัดประลัยค่าต่ำสุด ตามลำดับ

ส่วนในกรณีคอนกรีตร้าว แรงดึงถอนสูงสุดจะมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นเป็น 1, 1.27 และ 1.43 เท่าของกำลังอัดประลัยค่าต่ำสุด ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าเมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานแรงดึงถอนในกรณีคอนกรีตร้าวจะลดลงเมื่อเทียบกับกรณีคอนกรีตไม่ร้าว นอกจากนี้ยังพบว่า หากพิจารณาความชันของกราฟในช่วงก่อนจุดสูงสุดของแรงดึงถอนจะพบว่า ความแกร่งของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่ามากขึ้น ทั้งในคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีตร้าว



(a) Uncracked concrete



(b) Cracked concrete

Figure 13 Load-Displacement curve of 16 mm adhesive anchor in uncracked and cracked concrete for various concrete strength

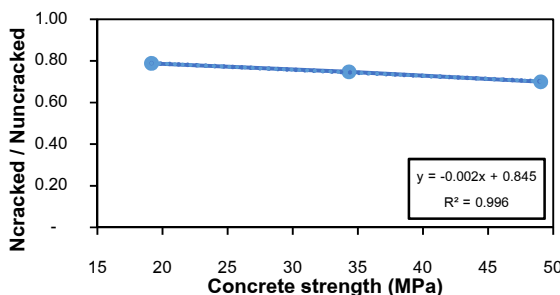
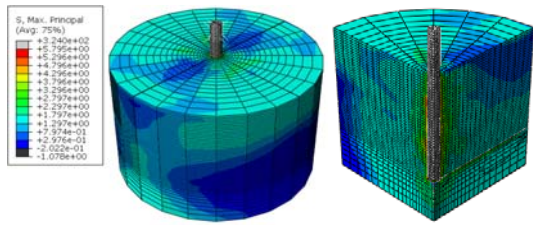


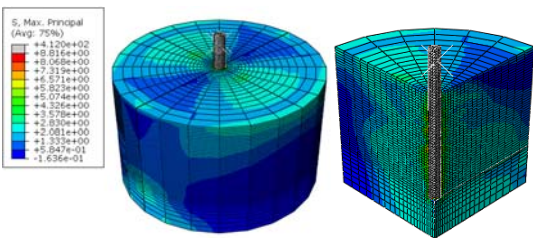
Figure 14 Ratio of Peak load in cracked to uncracked concrete of 16 mm diameter adhesive anchors for various concrete strength

เมื่อพิจารณา (Figure 14) จะพบว่าเมื่อกำลังอัด
ประลัยของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามค่า 19.61, 34.32 และ 49.03
เมกะปาสกาล อัตราส่วนแรงดึงถอนสูงสุดในคอนกรีตรัวกับ
คอนกรีตไม่รัวมีค่าเป็น 0.79, 0.75 และ 0.70 ตามลำดับ
ซึ่งมีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่าการแตกรัวในคอนกรีตส่ง
ผลกระทบต่อมากขึ้นเมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น

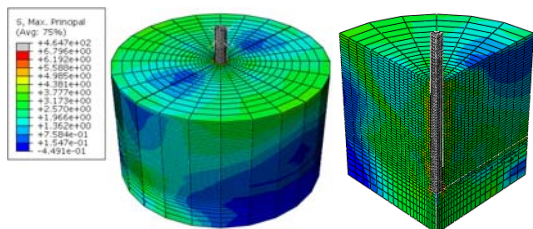
เมื่อพิจารณาการกระจายของหน่วยแรงหลักใน
เอลิเมนต์คอนกรีตในขณะที่แรงดึงถอนมีค่าสูงสุดจะพบว่า
การกระจายตัวของหน่วยแรงหลักในคอนกรีตไม่รัวจะสม่ำเสมอ
ในระนาบตั้งฉากกับแนวแรงดึงถอน ส่วนในกรณีคอนกรีตรัว
จะพบว่าการกระจายตัวของหน่วยแรงหลักในคอนกรีตไม่
สม่ำเสมอในทุกกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงไป ดัง
แสดงใน (Figure 15)



(a) $f'_c = 19.61$ MPa



(b) $f'_c = 34.32$ MPa

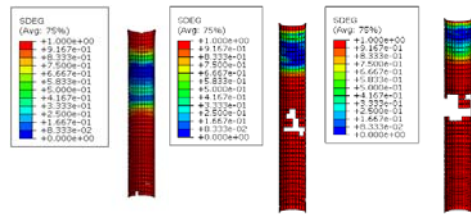


(c) $f'_c = 49.03$ MPa

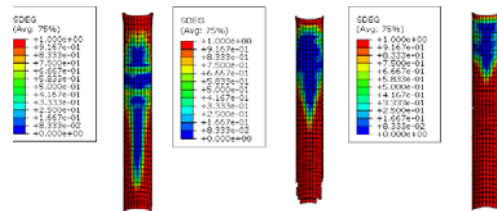
Figure 15 Maximum principle stress at peak load for various concrete strength

นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อกำลังประลัยของคอนกรีตมี
ค่ามากขึ้น การกระจายตัวของหน่วยแรงหลักในเอลิเมนต์
คอนกรีตจะกว้างขึ้น อีกทั้งยังพบว่าความเข้มของหน่วยแรง
หลักจะสูงบริเวณหน้าตัดไม่รัวและจะลดลงเมื่อเข้าใกล้หน้า
ตัดรัว และในระนาบตั้งฉากกับแนวแรงดึงถอนความเข้มของ
หน่วยแรงหลักจะลดลงเมื่อเข้าใกล้ระนาบรัว และในระนาบ
ขนานกับแนวแรงดึงถอนจะลดลงเมื่อเข้าใกล้ขอบบนสุดริม
นอกของคอนกรีต โดยมีรูปแบบเหมือนกันในทุกกำลังอัด
ประลัยของคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงไป

เมื่อพิจารณาการสูญเสียความแข็งแรงในเอลิเมนต์เชื่อม
ยึดในกรณีคอนกรีตไม่รัวใน (Figure 16a) พบว่า เอลิเมนต์ที่
สูญเสียความแข็งแรงโดยสมบูรณ์ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ที่ถูกกลบ จะมี
ตำแหน่งสูงขึ้นเมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมากขึ้น และ
เป็นตำแหน่งเดียวกับเอลิเมนต์คอนกรีตที่เกิดการแตกรัวที่
ผิวรูเจาะ



(a) Uncracked concrete



(b) Cracked concrete

Figure 16 Stiffness degradation on cohesive elements for various concrete strength

แสดงให้เห็นว่ารูปแบบการวิบัติของระบบฝังยึดแบบ
ใช้สารยึดเหนี่ยวของคอนกรีตไม่รัวในช่วงคอนกรีตกำลังต่ำ
จะมีลักษณะวิบัติของคอนกรีตรูปกรวย แต่เมื่อกำลังอัดประลัย
ของคอนกรีตอยู่ในช่วงปานกลางถึงสูง จะมีลักษณะการวิบัติ
เป็นแบบการวิบัติร่วมจากการยึดหน่วงและการวิบัติของ
คอนกรีตรูปกรวย

ส่วนในกรณีคอนกรีตรัวจะไม่ปรากฏเอลิเมนต์ที่ถูก
กลบในคอนกรีตกำลังต่ำและสูง แต่จะมีเอลิเมนต์ที่ถูกกลบบริเวณ
ปลายล่างสุดของระยะฝังยึดในคอนกรีตกำลังปานกลางถึงใน

(Figure 16b) แสดงให้เห็นว่าบริเวณดังกล่าวเกิดการแตกร้าวขึ้นเล็กน้อยที่ปลายระยะฝังยึดในเอลิเมนต์คอนกรีต ซึ่งเมื่อพิจารณาภาพรวมจะพบว่า เมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเพิ่มขึ้น การแตกร้าวในคอนกรีตจะส่งผลต่อรูปแบบการวิบัติและกำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดมากขึ้น

ดังนั้น หากเปรียบเทียบระหว่างกรณีคอนกรีตไม่ร้าวกับกรณีคอนกรีตร้าวจะพบว่า การวิบัติที่ผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตเกิดขึ้นน้อยลงในกรณีคอนกรีตร้าว โดยบริเวณที่เกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวจะเพิ่มขึ้นตามค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่ามากขึ้น การขยายตัวของความกว้างรอยร้าวจะลดลงดังแสดงใน (Figure 17) โดยความกว้างของรอยร้าวจะขยายตัวมากที่สุดที่ผิวบนของแท่งคอนกรีตและจะลดลงตามความลึกที่มากขึ้น

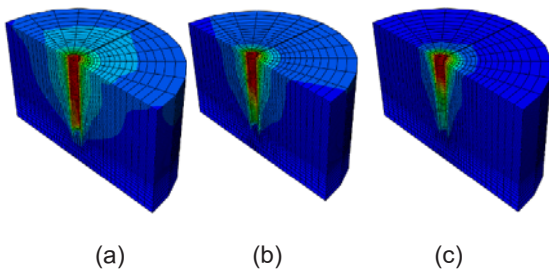


Figure 17 Expansion of the cracked width

(a) $f'_c = 19.61$ MPa (b) $f'_c = 34.32$ MPa
(c) $f'_c = 49.03$ MPa

แสดงให้เห็นว่าเมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าต่ำ การวิบัติจะเกิดจากการขยายตัวของรอยร้าวเป็นส่วนใหญ่ แต่เมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น รูปแบบการวิบัติจะเปลี่ยนเป็นการวิบัติจากการยึดเหนี่ยวที่ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยึดเหนี่ยวเป็นส่วนใหญ่ และพบการแตกร้าวในคอนกรีตเกิดขึ้นน้อยลง แสดงให้เห็นว่าการขยายตัวของความกว้างรอยร้าวมีโซ่ปัจจัยหลักที่ทำให้กำลังต้านทานแรงดึงถอนของระบบฝังยึดลดลงเมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่ามากขึ้น ดังนั้นสาเหตุที่ผลกระทบของรอยร้าวในคอนกรีตมีมากขึ้นเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดประลัยสูงขึ้น เกิดจากการสูญเสียการยึดเหนี่ยวที่ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยึดเหนี่ยวที่เพิ่มขึ้น

สรุปผล

ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกำลังและพฤติกรรมของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวทั้งในคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีตร้าว

จะพบว่า

ตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อกำลังต้านทานแรงดึงถอนของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวเรียงตามลำดับความสำคัญได้แก่ ความยาวระยะฝังยึด กำลังอัดของคอนกรีต และกำลังยึดเหนี่ยวของสารยึดเหนี่ยว ตามลำดับ ทั้งในคอนกรีตไม่ร้าวและในคอนกรีตร้าว

ผลของรอยร้าวในคอนกรีตทำให้กำลังต้านทานแรงดึงถอนของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวลดลงจากกรณีคอนกรีตไม่ร้าวในสัดส่วน 0.79-0.76 เมื่อกำลังยึดเหนี่ยวของสารยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้นในช่วง 8-16 เมกะปาสคาล ผลกระทบจากรอยร้าวในคอนกรีตมีมากขึ้นเล็กน้อยเมื่อกำลังยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการขยายตัวของรอยร้าวในคอนกรีตเป็นส่วนใหญ่

เมื่อความยาวระยะฝังยึดเพิ่มขึ้น กำลังต้านทานแรงดึงถอนของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าวจะลดลงจากกรณีคอนกรีตไม่ร้าวในสัดส่วน 0.94, 0.75 และ 0.65 เมื่อความยาวระยะฝังยึดเพิ่มขึ้นเป็น 64, 128 และ 192 มิลลิเมตร ตามลำดับผลกระทบของการแตกร้าวในคอนกรีตจะมากขึ้นเมื่อความยาวระยะฝังยึดมีค่ามากขึ้น พบการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวที่ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยึดเหนี่ยวน้อยลงแต่ความกว้างรอยร้าวมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นตามระยะฝังยึดที่มากขึ้น

เมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเพิ่มขึ้น กำลังต้านทานแรงดึงถอนของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าวจะลดลงจากกรณีคอนกรีตไม่ร้าวในสัดส่วน 0.79, 0.75 และ 0.70 เมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเป็น 19.61, 34.32 และ 49.03 เมกะปาสคาล ตามลำดับ โดยการแตกร้าวในคอนกรีตจะส่งผลกระทบมากขึ้นเมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น สาเหตุจากการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวที่ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยึดเหนี่ยวเป็นส่วนใหญ่

เอกสารอ้างอิง

1. ภาคิน ลอยเจริญ, เกียรติศักดิ์ แก้วกุลชัย และ กิตติศักดิ์ ชันติยวิชัย. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการประเมินกำลังและพฤติกรรมการวิบัติของสมอยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าวและไม่ร้าว. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี; 2019. (Under review)
2. 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.
3. Meszaros, J. Tragverhalten von Einzelverbunddübeln unter zentrischer Kurzzeitbelastung. Dissertation in Vorbereitung, Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart; 2002.
 4. Eligehausen, R., Mallee, R. and Silva, J. Anchorage in Concrete Construction. First edition. Ernst & Sohn GmbH & Co. KG. Published; 2006.
 5. Cook, R.A. and Konz, R.C. Factors Influencing Bond Strength of Adhesive Anchors. *ACI Structural Journal*. 2001;98(1): 76-86.
 6. Todd Marshall Davis. Sustained Load Performance of Adhesive Anchor System in Concrete. Doctor's Thesis: University of Florida; 2012.
 7. ACI Committee 318-11. Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary. American Concrete Institute, Detroit, MI, USA. 2011: 417-463.
 8. Carreira D.J. and Chu, K.H. Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Compression. *ACI Journal*. 1985; 82-72: 797-804.
 9. Carreira D.J. and Chu, K.H. Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Tension. *ACI Journal*. 1986; 83-3: 21-28.
 10. Hilti Co, Ltd. Hilti Anchor Systems. <http://www.hilti.co.th>. Accessed 14 February 2017. (in Thai)
 11. Eligehausen, R., Cook, R.A. and Appl, J. Behavior and Design of Adhesive Bonded Anchors. *ACI Structural Journal*. 2006;103-S83: 822-831.