ตัวแปรที่สำคัญต่อกำลังของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีตร้าว

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

ภาคิณ ลอยเจริญ[1], เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย[2*], กิตติศักดิ์ ขันติยวิชัย[3]

Phakin Loyjaroen[1], Griengsak Kaewkulchai[2*], Kittisak Kuntiyawichai[2]

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

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้ได้สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในระบบสามมิติของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยว เพื่อศึกษาตัวแปรที่สำคัญด้านกำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยว ความยาวระยะฝังยึด และกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ที่ส่งผลต่อกำลังต้านทานแรงดึงถอน ทั้งในคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีตร้าว ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อกำลังต้านทานแรงดึงถอนของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวเรียงตามลำดับความสำคัญได้แก่ ความยาวระยะฝังยึด กำลังอัดประลัยของคอนกรีต และกำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยว ตามลำดับ การกระจายของหน่วยแรงหลักที่ไม่สม่ำเสมอในคอนกรีตร้าวเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้กำลังของระบบลดลง ผลของรอยร้าวในคอนกรีตจะมีมากขึ้นตามค่าที่เพิ่มขึ้นของตัวแปรที่ศึกษา ซึ่งเป็นผลมาจากการขยายตัวของรอยร้าวและการสูญเสียกำลังยึดหน่วงที่ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยึดเหนี่ยวเป็นส่วนใหญ่

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 anchorwere embedment depth, concrete strength and bond strength. The distribution ofnon-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 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีอ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190*

[1] Ph.D. Candidate, [2]Assist. Prof.Dr., [3]Assoc. Prof. Dr., Faculty of Engineering, Ubonratchathani University, Amphur Warinchamrap, Ubonratchathani 34190*

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

บทนำ

ระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยว (Adhesive anchoring system) เป็นอุปกรณ์ฝังยึดที่นิยมใช้ในงานต่อเติมโครงสร้างเหล็กจากโครงสร้างคอนกรีตเดิมและงานเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีต โดยส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้งานร่วมกับคอนกรีตที่มีอายุและผ่านการใช้งานในระบบโครงสร้างตามที่ถูกออกแบบไว้แล้ว ดังนั้นจึงเลี่ยงไม่ได้ที่คอนกรีตจะมีโอกาสเกิดการแตกร้าวขึ้นในเนื้อคอนกรีตก่อนที่จะติดตั้งระบบฝังยึด นอกจากนี้การแตกร้าวในคอนกรีตอาจเกิดขึ้นจากการยึดหดตัวของคอนกรีตจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิหรือการเสริมเหล็กกันร้าวไม่เพียงพอ การใช้งานระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าวมีโอกาสเกิดขึ้นได้ในกรณีที่มีข้อจำกัดด้านตำแหน่งในการติดตั้งสมอยึดที่มีการแตกร้าวเกิดขึ้นในคอนกรีตอยู่ก่อนแล้ว หรือเป็นกรณีที่เกิดการแตกร้าวขึ้นขณะทำการเจาะรูในคอนกรีตเพื่อติดตั้งสมอยึด ที่อาจเกิดความผิดพลาดจากการเจาะหรือคอนกรีตเดิมมีการแตกร้าวอยู่ก่อนแล้วเกิดการขยายตัวจากขั้นตอนการติดตั้ง เป็นต้น การทำนายกำลังของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตไม่ร้าวสามารถหาได้จากการทดสอบตัวอย่างจริง จากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และการคำนวณโดยใช้สมการที่ถูกเสนอโดยนักวิจัยในอดีต แต่สำหรับในคอนกรีตร้าว การทดสอบตัวอย่างจริงสามารถทำได้ยากเนื่องจากมีข้อจำกัดหลายอย่าง ดังนั้นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวที่พัฒนาโดยผู้วิจัย[1] จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาในครั้งนี้

แบบจำลองระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในงานวิจัยนี้ เป็นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่พัฒนาโดยผู้วิจัยและได้ผ่านการสอบเทียบกับผลทดสอบในห้องปฏิบัติการในอดีตแล้ว[2,3] โดยมีองค์ประกอบของแบบจำลองประกอบด้วย แบบจำลองสมอยึดแบบจำลองสารยึดเหนี่ยวแบบจำลองคอนกรีต และแบบจำลองผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยึดเหนี่ยว ซึ่งเป็นอาณาบริเวณที่พบการวิบัติจากการยึดหน่วงเป็นส่วนใหญ่[4]

ตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อกำลังต้านทานแรงดึงถอนของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตจากการศึกษาของนักวิจัยในอดีต[5, 6] ประกอบด้วยความยาวระยะฝังยึด กำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยว กำลังอัดประลัยของคอนกรีต ความสะอาดของผิวรูเจาะ ความชื้นที่ผิวรูเจาะ อุณหภูมิ และขนาดของมวลรวมหยาบ เป็นต้น โดยส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาในคอนกรีตไม่ร้าว การศึกษาตัวแปรที่สำคัญต่อกำลังของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าวในอดีตยังปรากฏไม่มากนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่ส่งผลต่อกำลังและพฤติกรรมของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยว ทั้งในคอนกรีตไม่ร้าวและในคอนกรีตร้าว โดยตัวแปรที่สำคัญที่จะศึกษาในครั้งนี้ประกอบด้วยตัวแปรด้านกำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยว ความยาวระยะฝังยึด และกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ซึ่งเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อกำลังของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีต และสามารถสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาได้

วัตถุประสงค์

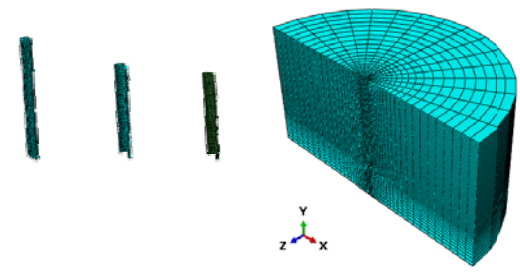
เพื่อศึกษาตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อกำลังและพฤติกรรมของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวทั้งในคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีตร้าว โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะดำเนินการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในระบบสามมิติของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวเพื่อศึกษาพฤติกรรมและกำลังต้านทานแรงดึงถอนของสมอยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยว ในคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีตร้าว แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยผู้วิจัยและได้ผ่านการสอบเทียบแล้วจะถูกนำมาใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ โดยจะทำการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรที่ต้องการศึกษาในแต่ละกรณี ซึ่งรายละเอียดของแบบจำลองและการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุแต่ละประเภทจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไปนี้

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวภายใต้แรงดึงถอนในงานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้โปรแกรม ABAQUS 2017ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีความแม่นยำในการประมวลผลข้อมูลเพื่อวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบจำลองของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวจะประกอบด้วย แบบจำลองแท่งเหล็กสมอยึด (Figure 1a) แบบจำลองสารยึดเหนี่ยว (Figure 1b) แบบจำลองผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวและคอนกรีต (Figure 1c) และแบบจำลองคอนกรีต (Figure 1d) แบบจำลองผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวและคอนกรีตได้สร้างขึ้นมาเพื่อเน้นศึกษาถึงลักษณะการกระจายของหน่วยแรงยึดหน่วงและการวิบัติในบริเวณดังกล่าว เนื่องจากการวิบัติจากการยึดหน่วงไม่เพียงพอของสมอยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวส่วนใหญ่จะเกิดการลื่นหลุดที่ผิวสัมผัสของสารยึดเหนี่ยวและคอนกรีต[4]



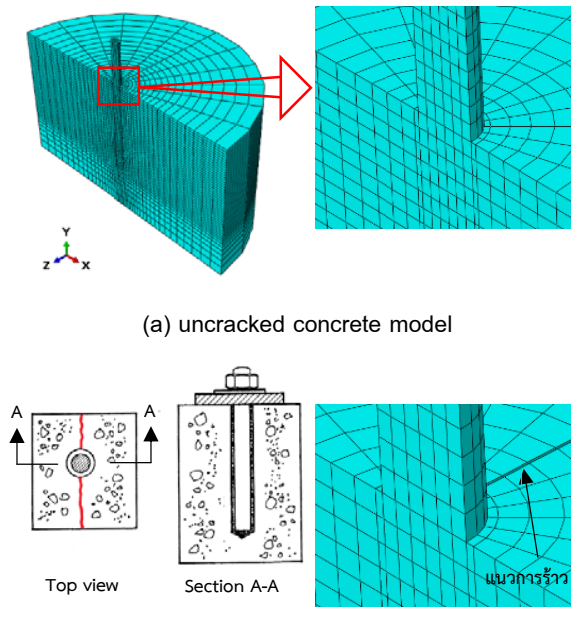
(a) (b) (c) (d)

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 (Figure1c)

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

แบบจำลองทั้งระบบได้ถูกกำหนดเงื่อนไขขอบเขตโดยการยึดรั้งแท่งคอนกรีตที่ฐานล่างในแนวแกน x, yและ zและ ยึดรั้งขอบนอกด้านบนในแนวแกน y เพื่อป้องกันการโอบรัด (Confinement) ในเนื้อคอนกรีต มีการยึดรั้งเอลิเมนต์คอนกรีตและสมอยึดในระนาบสมมาตรในแนวแกน z และกำหนดการให้แรงในแท่งสมอยึดโดยการกำหนดให้ปลายของสมอยึดเคลื่อนที่ขึ้นในแนวดิ่ง (Displacement control) เพื่อให้สอดคล้องกับวิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการใช้งานจริง การจำลองรอยร้าวในคอนกรีตกรณีศึกษาในคอนกรีตร้าวที่มีลักษณะการร้าวแบบแตกปริ (Splitting crack) ใช้วิธีดัดแปลงแบบจำลองคอนกรีตในกรณีคอนกรีตไม่ร้าวโดยการเพิ่มช่องว่างในแนวระนาบที่เป็นตัวแทนของแนวการร้าวในคอนกรีต ให้มีความกว้างของช่องว่างเท่ากับขนาดความกว้างของรอยร้าว มีระนาบการร้าววิ่งชนขอบของรูเจาะที่ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยึดเหนี่ยว (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-ความเครียดเป็นไปตามกฎของฮุค (Hooke's law) ซึ่งความสัมพันธ์จะมีลักษณะเชิงเส้น ที่มีค่าความเค้นยืดหยุ่นสูงสุดในช่วงนี้เป็นไปตามคำแนะนำของ ACI318-11[7] หรือ ส่วนในช่วงไม่ยืดหยุ่นเลือกใช้แบบจำลองของ Carreira, D.J. และ

Chu, K.H.[8, 9] กำหนดความสัมพันธ์ในช่วงที่ไม่เชิงเส้นทั้งก่อนและหลังจุดที่ความเค้นมีค่าสูงสุด ซึ่งตามวิธีของความเสียหายเชิงพลาสติกที่เลือกใช้จะสามารถแสดงผลในส่วนของความเสียหายหรือการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์คอนกรีตได้ในรูปของการเสื่อมสภาพความแกร่ง (Stiffness degradation)ซึ่งเกิดขึ้นได้ทั้งผลจากการกระทำของแรงอัดและแรงดึง

แบบจำลองสารยึดเหนี่ยวกำหนดให้มีความหนา 1 มิลลิเมตร ตามคำแนะนำของผู้ผลิต Hilti Co, Ltd[10] มีรูปทรงโค้งตามผิวของรูเจาะคอนกรีต ผลตอบสนองต่อสภาวะการให้แรงกระทำของเอลิเมนต์ที่ทำหน้าที่แทนสารยึดเหนี่ยวกำหนดให้มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นภายใต้แรงเฉือน และกำหนดให้มีพฤติกรรมเชิงพลาสติกในช่วงหลังจุดคราก ดังนั้นรูปแบบการวิบัติจะกำหนดโดยใช้หลักการความเสียหายจากแรงเฉือน (Shear damage) ส่วนการพัฒนาความเสียหาย (Damage evolution)ในขั้นตอนการวิบัติจากการเฉือนจะกำหนดให้มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นภายใต้เงื่อนไขของค่าการเคลื่อนที่ซึ่งจะมีค่าการเคลื่อนที่สูงสุดสอดคล้องกับค่าการยืดตัวสูงสุด (Elongation at break) ของสารยึดเหนี่ยว

การจำลองผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยวและคอนกรีตในบริเวณนี้ ซึ่งตามจริงแล้วจะไม่มีมิติด้านความหนา ดังนั้นแบบจำลองในส่วนนี้จึงจะกำหนดให้มีคุณสมบัติเป็นเอลิเมนต์เชื่อมยึด (Cohesive elements) ที่มีความหนาเป็นศูนย์ มีขนาดเอลิเมนต์เท่ากับขนาดเอลิเมนต์ของสารยึดเหนี่ยวและคอนกรีตด้านที่อยู่ติดกัน ครอบคลุมพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวและคอนกรีต พฤติกรรมตอบสนองกำหนดให้มีพฤติกรรมตามหลักการของแรงฉุด-การแยก (Traction-separation behavior) ในรูปแบบที่2 (Mode II) ซึ่งเป็นพฤติกรรมของแรงฉุดเฉือนและการแยกเฉือน และรูปแบบความสัมพันธ์ของแรงฉุด-การแยก จะเป็นลักษณะของกราฟ Bilinear

พฤติกรรมตอบสนองของเอลิเมนต์ที่เป็นตัวแทนของสมอยึดจะกำหนดให้มีพฤติกรรมเสมือนเหล็กกล้ากำลังสูงทั่วไป ที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นในช่วงที่ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดเป็นเส้นตรง และมีคุณสมบัติเชิงพลาสติกในช่วงที่ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดไม่เป็นเส้นตรงพฤติกรรมการวิบัติจะกำหนดให้มีรูปแบบการวิบัติโดยใช้หลักการความเสียหายจากการยืดตัว (Ductile damage)

แบบจำลองระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตไม่ร้าวจะถูกสร้างให้มีขนาดและองค์ประกอบพื้นฐานตามคำแนะนำของผู้ผลิต โดยอ้างอิงคุณสมบัติของสารยึดเหนี่ยว Hilti HIT-RE500 V3 ที่ใช้งานร่วมกับสมอยึด HIT-C ซึ่งเป็นสมอยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวสูตรใหม่ของ Hilti[10] มีคุณสมบัติพื้นฐานในการใช้งานได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสมอยึด 16 มิลลิเมตร ความยาวระยะฝังยึด 125 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ 18 มิลลิเมตร กำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยว 11.7 เมกกะปาสคาล (ที่ระยะเวลาในการบ่มตัว 14 วัน) โมดูลัสยืดหยุ่นของสารยึดเหนี่ยว 2600 เมกกะปาสคาล และค่าการยืดตัวสูงสุด (Elongation at break) 1.1% สมอยึดมีโมดูลัสยืดหยุ่น 2.0×10^5 เมกกะปาสคาล อัตราส่วนปัวซอง 0.30 กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตแบบไม่โอบรัด (Unconfined compressive strength) กำหนดค่าให้สอดคล้องกับคุณสมบัติของคอนกรีตจากการศึกษาของ Krishnamurthy, K.[2] ซึ่งเป็นคุณสมบัติของคอนกรีตที่กำหนดในแบบจำลองจากการศึกษาของผู้วิจัยที่ผ่านมา เพื่อสอบเทียบกับผลการศึกษาในอดีตดังกล่าวโดยมีค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต 39 เมกกะปาสคาลกำลังรับแรงดึงประลัย 2.93 เมกกะปาสคาล โมดูลัสยืดหยุ่น 2.83×10^4 เมกกะปาสคาล อัตราส่วนปัวซอง 0.18 โดยพฤติกรรมของคอนกรีตจะถูกกำหนดให้มีความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดทั้งในช่วงเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น ตามสมการของ Carreira, D.J. และ Chu, K.H[8, 9] ภายใต้แรงอัดและแรงดึง ตามลำดับ

ในแบบจำลองผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยึดเหนี่ยวจะกำหนดให้มีพฤติกรรมในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสเท่ากับกำลังรับแรงดึงประลัยของคอนกรีต 2.93 เมกกะปาสคาลและมีพฤติกรรมตามแนวขนานกับระนาบผิวสัมผัสเท่ากับกำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยวคือ 11.7 เมกกะปาสคาลส่วนในแบบจำลองระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าวจะทำการสร้างแบบจำลองที่มีเงื่อนไขต่าง ๆ ทั้งด้านมิติ ความยาวระยะฝังยึด และการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุให้กับเอลิเมนต์วัสดุแต่ละชนิด จะเหมือนกับกรณีคอนกรีตไม่ร้าว จะแตกต่างกันตรงที่ในกรณีคอนกรีตร้าวจะมีการเว้นช่องว่างในเอลิเมนต์คอนกรีตเพื่อเป็นการจำลองระนาบการแตกร้าวเพิ่มขึ้นในแต่ละรูปแบบ

ตัวแปรที่สำคัญ

ตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการต้านทานแรงดึงถอนของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวทั้งในคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีตร้าวที่จะศึกษาในงานวิจัยนี้มี 3 ตัวแปร ได้แก่ ตัวแปรด้านกำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยว ความยาวระยะฝังยึด และกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ดังแสดงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาในแบบจำลองดังตาราง (Table 1) โดยค่ากำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยวจะใช้ค่า 8, 12 และ 16 เมกกะปาสคาล ซึ่งเป็นค่ากำลังยึด

หน่วงของสารยึดเหนี่ยวในช่วงต่ำ ปานกลาง และสูง ตามลำดับ ส่วนความยาวระยะฝังยึดจะกำหนดที่ระยะ 4·d, 8·d และ 12·d เมื่อ d เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสมอยึด จะได้ค่าเป็น 64, 128 และ 192 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะฝังที่อยู่ในช่วงตื้น ปานกลาง และลึก ตามลำดับ โดยค่าระยะฝังยึดระยะปานกลางจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าแนะนำจากผู้ผลิตคือ 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

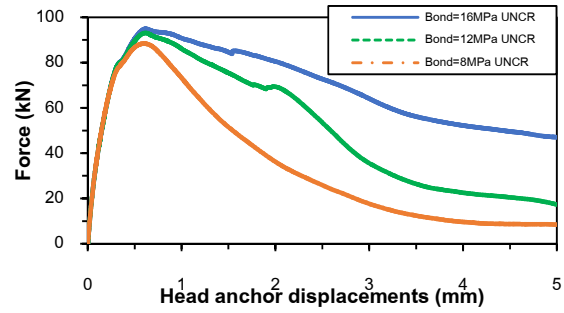
ส่วนกำลังอัดประลัยของคอนกรีตจะกำหนดที่ค่ากำลังอัดต่ำ กลาง และสูง ของคอนกรีตในประเทศ คือ 200, 350 และ 500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งจะได้ค่าตาม (Table 1) ในหน่วยเมกกะปาสคาล ตามลำดับ

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

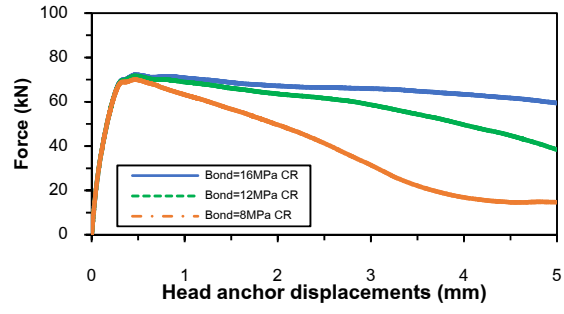
จากการศึกษาผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์-เอลิเมนต์ของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวทั้งในคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีตร้าวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยยะสำคัญของตัวแปรด้านกำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยว ความยาวระยะฝังยึด และกำลังอัดประลัยของคอนกรีต สามารถแสดงผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

ผลการศึกษาตัวแปรด้านกำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยว

ผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแรงดึงถอนและการเคลื่อนที่ที่ปลายสมอยึดเมื่อกำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยวมีค่าแตกต่างกันแสดงใน (Figure 3) โดยเมื่อพิจารณาจากภาพจะพบว่า เมื่อกำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยวมีค่ามากขึ้น ความสามารถในการต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งในคอนกรีตไม่ร้าว (Figure 3a) และคอนกรีตร้าว (Figure 3b) ในคอนกรีตไม่ร้าวอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดึงถอนสูงสุดเมื่อกำลังยึดหน่วงเพิ่มขึ้นจาก 8, 12 และ 16 เมกกะปาสคาล มีค่าเป็น 1, 1.05 และ 1.07 ตามลำดับ ส่วนในคอนกรีตร้าวอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดึงถอนสูงสุดจะเป็น 1, 1.02 และ 1.03 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงแรกที่ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงมีความแกร่ง (Stiffness) คงที่และมีค่าความชันในช่วงดังกล่าวใกล้เคียงกันทั้งในกรณีคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีตร้าว 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 ที่มีกำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยวเท่ากันจะพบว่าค่าความแกร่งในช่วงแรกจะใกล้เคียงกันโดยกรณีคอนกรีตร้าวจะมีค่าลดลงเล็กน้อย (ความชันลดลง) ส่วนในช่วงการแข็งตัวลดในกรณีคอนกรีตไม่ร้าวจะมีอัตราการลดลงของแรงดึงถอนมากกว่ากรณีคอนกรีตร้าวในทุกค่าของกำลังยึดหน่วงที่เปลี่ยนแปลงไป

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

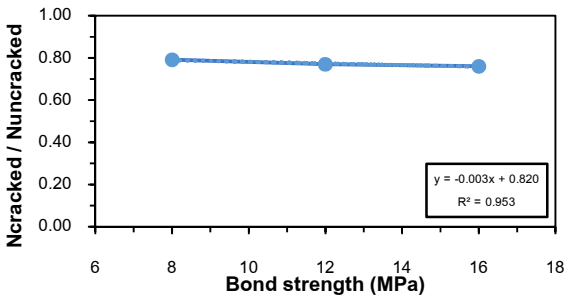
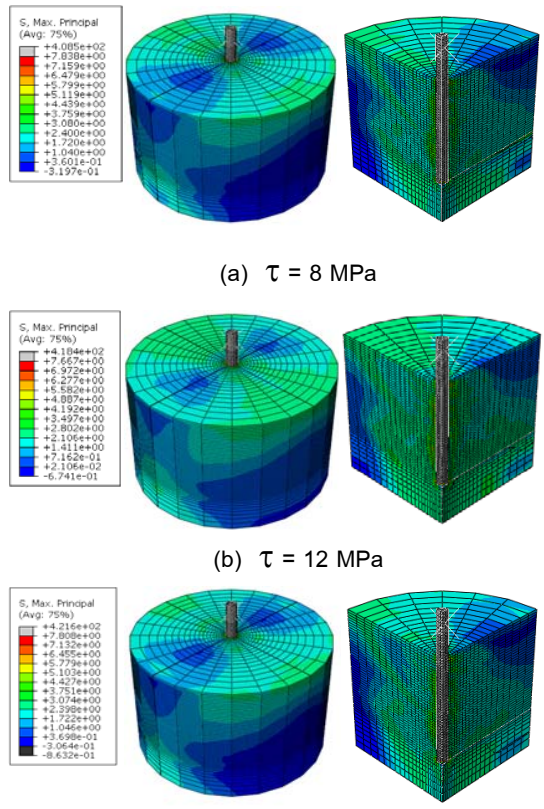


Figure 4 Ratio of Peak load in cracked to uncracked concrete of 16 mm diameter adhesive anchors for various bond strength

การเพิ่มขึ้นของกำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยวส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดทั้งในคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีตร้าวเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม สารยึดเหนี่ยวที่มีกำลังยึดหน่วงมีค่าสูงจะมีอัตราการคลายแรงในช่วงแข็งตัวลดต่ำกว่าสารยึดเหนี่ยวที่มีกำลังยึดหน่วงต่ำกว่า นอกจากนี้ยังพบว่า ลักษณะการกระจายของหน่วยแรงหลักสูงสุด (Maximum principle stress) ในกรณีคอนกรีตไม่ร้าวจะมีการกระจายแบบสม่ำเสมอโดยรอบในระนาบตั้งฉากกับแนวแรงดึงถอน ส่วนในกรณีคอนกรีตร้าวจะมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ (Figure 5) โดยจะมีความเข้มของหน่วยแรงหลักสูงในระนาบไม่ร้าว และลดลงเมื่อเข้าใกล้ระนาบร้าว ความเข้มของหน่วยแรงหลักบริเวณหน้าตัดร้าวกับหน้าตัดไม่ร้าวจะใกล้เคียงกันบริเวณช่วงกลางถึงช่วงปลายระยะฝังยึด และจะลดลงในระนาบร้าวเมื่อเข้าใกล้ผิวบนของแบบจำลองคอนกรีต ความไม่สม่ำเสมอของหน่วยแรงหลักในคอนกรีตส่งผลให้ประสิทธิภาพการต้านทานแรงดึงถอนของคอนกรีตลดลงในคอนกรีตร้าว



(a) τ = 8 MPa

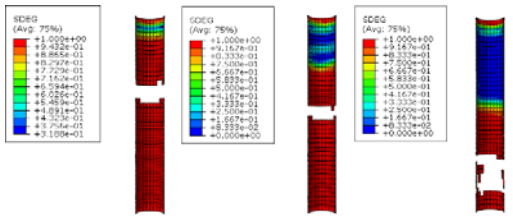
(b) τ = 12 MPa

(c) τ = 16 MPa

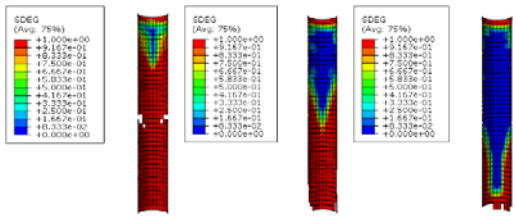
Figure 5 Maximum principle stress at peak load for various bond strength

นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อกำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น ลักษณะการกระจายของหน่วยแรงหลักมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดในคอนกรีตร้าวที่เปลี่ยนแปลงน้อยเช่นกัน

ลักษณะการวิบัติของเอลิเมนต์เชื่อมยึดใน (Figure 6) จะพบว่าเริ่มเกิดการสูญเสียความแกร่งเมื่อแรงดึงถอนมีค่าถึงจุดสูงสุด และความแกร่งในเอลิเมนต์เชื่อมยึดจะลดลงจนเมื่อเอลิเมนต์เชื่อมยึดแสดงแถบสีแดง แสดงว่าเกิดการสูญเสียความแกร่งเกือบสมบูรณ์ (0.95 < SDEG < 1) แสดงถึงการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวของผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยึดเหนี่ยวในบริเวณดังกล่าว จนค่าการแยก (Separation) ถึงพิกัดค่าการยืดตัวที่จุดสูงสุดของสารยึดเหนี่ยวที่กำหนดไว้ให้เอลิเมนต์ลบตัวเอง (Deletion) แสดงว่าเกิดการสูญเสียความแกร่งโดยสมบูรณ์ (SDEG = 1) ซึ่งบริเวณดังกล่าวจะต่อเนื่องกับบริเวณที่เอลิเมนต์คอนกรีตเกิดการสูญเสียความแกร่งโดยสมบูรณ์เช่นกัน แสดงให้เห็นว่าบริเวณที่เอลิเมนต์เกิดการลบตัวเป็นบริเวณเดียวกับที่เกิดการแตกร้าวของคอนกรีตที่ผิวรูเจาะ



(a) Uncracked concrete



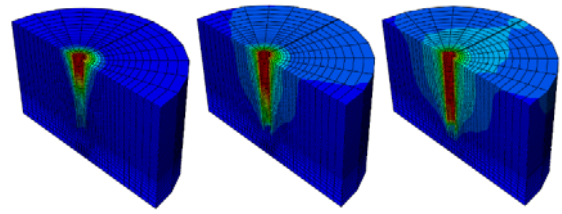
(b) Cracked concrete

Figure 6 Stiffness degradation on cohesive elements for various bond strength

จะเห็นได้ว่าเอลิเมนต์ที่ถูกลบของเอลิเมนต์เชื่อมยึดในคอนกรีตไม่ร้าวจะมีตำแหน่งลึกลงและบริเวณที่สูญเสียแรงยึดเหนี่ยวน้อยลงเมื่อกำลังยึดหน่วงมีค่ามากขึ้น แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยวต่อผิวสัมผัสของคอนกรีตที่ดีขึ้น ทำให้เกิดรูปแบบการวิบัติร่วมระหว่างการวิบัติของคอนกรีตเป็นรูปกรวยกับการวิบัติจากการยึดหน่วงที่ผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวกับคอนกรีต โดยกรวยคอนกรีตจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อกำลังยึดหน่วงมีค่ามากขึ้น สังเกตุได้จากตำแหน่งเอลิเมนต์ที่ถูกลบใน (Figure 6a) ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับเอลิเมนต์คอนกรีตที่เกิดการแตกร้าวที่ผิวของรูเจาะ

ส่วนในคอนกรีตร้าวจะพบว่าการสูญเสียความแกร่งจะลดลงเมื่อกำลังยึดหน่วงมีค่ามากขึ้น (Figure 6b) เอลิเมนต์ที่ถูกลบจะเกิดขึ้นน้อยกว่าในคอนกรีตไม่ร้าวและมีตำแหน่งลึกลงตามกำลังยึดหน่วงที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นหากเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตไม่ร้าวกับคอนกรีตร้าวจะพบว่า การวิบัติที่ผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตลดลงในคอนกรีตร้าว พบการแตกร้าวที่ผิวรูเจาะเกิดขึ้นเล็กน้อยที่บริเวณช่วงกลางและช่วงปลายระยะฝังยึด เมื่อกำลังยึดหน่วงมีค่าเพิ่มขึ้น

โดยเมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายของหน่วยแรงที่ไม่สม่ำเสมอในกรณีคอนกรีตร้าว ทั้งในระนาบตั้งฉากกับแนวแรงดึงถอนและระนาบขนานกับแนวแรงดึงถอน จะพบว่าผล|กระทบที่ทำให้เกิดการกระจายของหน่วยแรงหลักในลักษณะดังกล่าวเกิดจากการขยายตัวของความกว้างรอยร้าว ซึ่งความกว้างของรอยกร้าวจะเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยวมีค่ามากขึ้น และจะมีความกว้างมากที่สุดที่ผิวบนของแท่งคอนกรีต และจะลดลงตามระยะฝังยึดที่เพิ่มขึ้นดังใน (Figure 7)



(a) (b) (c)

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

ดังนั้นการขยายตัวของรอยร้าวจึงเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงดึงถอนของสมอยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าวลดลง เนื่องจากการขยายตัวของรอยร้าวทำให้เกิดการคลายความเครียดขึ้นในคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความเค้นลดลง นำไปสู่กำลังต้านทานแรงดึงถอนของระบบลดลงด้วย แต่การลดลงของแรงดึงถอนจะไม่เกิดแบบฉับพลันเพราะการลดลงของกำลังเกิดจากการคลายความเครียดในคอนกรีต ดังนั้นจึงทำให้กราฟความสัมพันธ์ในช่วงแข็งตัวลดในกรณีคอนกรีตร้าว มีอัตราการลดลงช้ากว่ากรณีคอนกรีตไม่ร้าว ที่เกิดการวิบัติจากการยึดหน่วงและการวิบัติของคอนกรีตรูปกรวยเป็นส่วนใหญ่

ผลการศึกษาตัวแปรด้านความยาวระยะฝังยึด

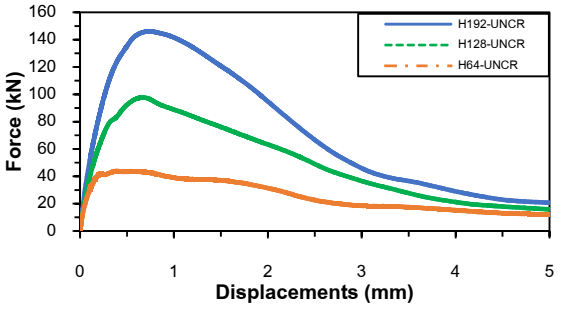
ความสัมพันธ์ของแรงดึงถอนและการเคลื่อนที่ที่ปลายสมอยึดเมื่อความยาวระยะฝังยึดมีค่าแตกต่างกันแสดงใน (Figure 8a) ในกรณีคอนกรีตไม่ร้าว และใน (Figure 8b) ในกรณีคอนกรีตร้าว

ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความยาวระยะฝังยึดมีค่ามากขึ้นกำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวจะมากขึ้นทั้งในคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีตร้าว โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่สูงกว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอื่น

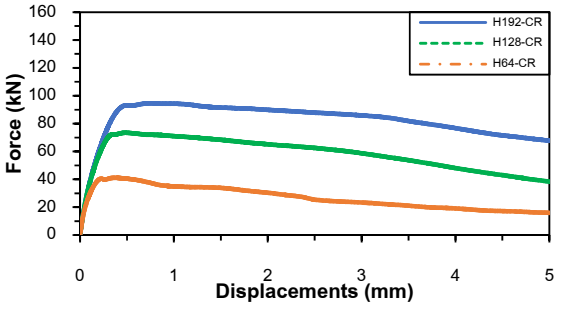
หากเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแรงดึงถอนและการเคลื่อนที่ที่ปลายสมอยึดระหว่างกรณีคอนกรีตไม่ร้าวกับกรณีคอนกรีตร้าวที่มีความยาวระยะฝังยึดเท่ากัน จะพบว่าความแกร่งของระบบจะใกล้เคียงกันเมื่อระยะฝังยึดมีค่าน้อย แต่ความแกร่งในกรณีคอนกรีตร้าวจะลดลงเมื่อระยะฝังยึดมีค่ามากขึ้น ส่วนในช่วงการแข็งตัวลดจะมีอัตราการคลายแรงใกล้เคียงกันเมื่อความยาวระยะฝังยึดมีค่าน้อย แต่เมื่อความยาว

ระยะฝังยึดมีค่ามากขึ้นอัตราการคลายแรงจะมากขึ้นในกรณีคอนกรีตไม่ร้าว

ผลกระทบของรอยร้าวต่อกำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดเมื่อความยาวระยะฝังยึดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 64, 128 และ 192 มิลลิเมตร พบว่าอัตราส่วนของค่าแรงดึงถอนสูงสุดในคอนกรีตร้าวกับคอนกรีตไม่ร้าวจะมีสัดส่วนเป็น 0.94, 0.75 และ 0.65 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าผลกระทบของการแตกร้าวในคอนกรีตจะส่งผลมากขึ้นเมื่อระยะฝังยึดมีค่ามากขึ้น



(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

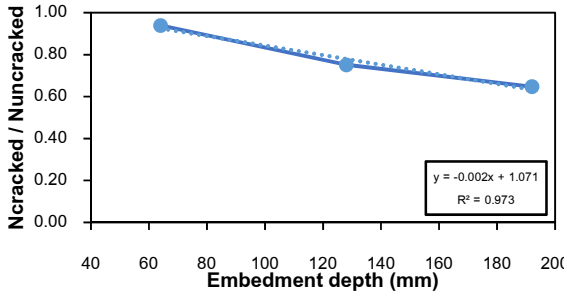
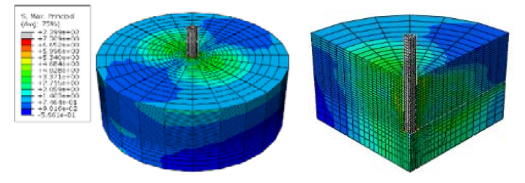


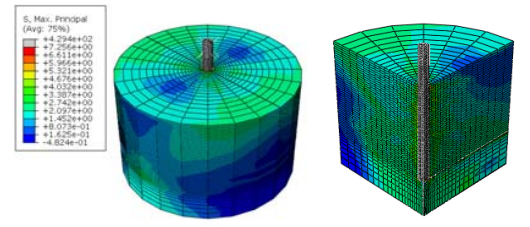
Figure 9 Ratio of Peak load in cracked to uncracked concrete of 16 mm diameter adhesive anchors for various embedment depth

ใน (Figure 9) ได้แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างค่าแรงดึงถอนสูงสุดในคอนกรีตร้าวกับคอนกรีตไม่ร้าวและความยาวระยะฝังยึด ซึ่งจะเห็นว่ากราฟมีแนวโน้มลดลงมากกว่ากรณีศึกษาในตัวแปรกำลังยึดหน่วง แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของรอยร้าวที่เพิ่มขึ้นมากกว่า เมื่อความยาวระยะฝังยึดมีค่ามากขึ้น

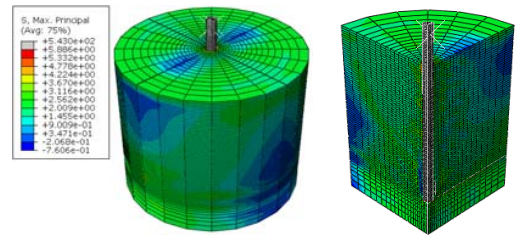
เมื่อพิจารณาการกระจายของหน่วยแรงหลักในเอลิเมนต์คอนกรีตจะพบว่า ในกรณีคอนกรีตไม่ร้าว ลักษณะการกระจายตัวของหน่วยแรงหลักจะมีความสม่ำเสมอโดยรอบ ในระนาบตั้งฉากกับแนวแรงดึงถอน ในทุกความยาวระยะฝังยึด ส่วนในกรณีคอนกรีตร้าวจะพบว่าการกระจายของหน่วยแรงหลักขณะที่แรงดึงถอนมีค่าสูงสุดจะไม่สม่ำเสมอดังแสดงใน (Figure 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

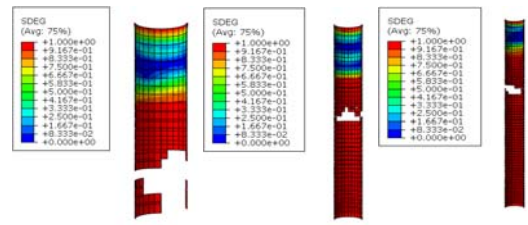
เมื่อความยาวระยะฝังยึดเพิ่มขึ้น การกระจายของหน่วยแรงหลักในเอลิเมนต์คอนกรีตร้าวจะกว้างขึ้น ดังนั้นความไม่ต่อเนื่องของคอนกรีตที่เกิดจากการแตกร้าวทำให้การส่งถ่ายแรงในเอลิเมนต์คอนกรีตไม่สมบูรณ์ กำลังต้านทานแรงดึงถอนของคอนกรีตร้าวจึงลดลง โดยยิ่งระนาบการร้าวมีพื้นที่มากขึ้นตามระยะฝังยึดที่เพิ่มขึ้นยิ่งส่งผลต่อกำลังต้านทานแรงดึงถอนของระบบมากขึ้น

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

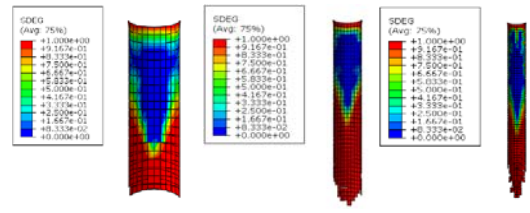
นอกจากนี้จะสังเกตุเห็นว่า บริเวณที่ความเข้มของหน่วยแรงลดลงในระนาบร้าวจะมีความลึกใกล้เคียงกันในทุกความยาวระยะฝังยึด แสดงให้เห็นว่าการแตกร้าวบริเวณใกล้ผิวด้านบนคอนกรีตจะส่งผลกระทบต่อกำลังต้านทานแรงดึงถอนมากกว่าการแตกร้าวบริเวณปลายล่างระยะฝังยึด

เมื่อแรงดึงถอนมีค่าสูงสุด ความแกร่งในเอลิเมนต์เชื่อมยึดจะลดลง จนค่าการแยกถึงพิกัดสูงสุดของการยืดตัวสูงสุดของสารยึดเหนี่ยว ที่กำหนดไว้ให้เอลิเมนต์เชื่อมยึดลบตัวเอง ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับที่เกิดการแตกร้าวที่ผิวรูเจาะ ในกรณีคอนกรีตไม่ร้าวเอลิเมนต์ที่ถูกลบจะมีตำแหน่งห่างจากปลายล่างมากขึ้นเมื่อความยาวระยะฝังยึดเพิ่มขึ้น 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 เอลิเมนต์ที่ถูกลบจะเกิดขึ้นน้อยกว่าในคอนกรีตไม่ร้าวและเกิดขึ้นบริเวณปลายล่างสุดของระยะฝังยึดใน (Figure 11b) แสดงให้เห็นว่าผลของการร้าวในคอนกรีตทำให้รูปแบบการวิบัติเปลี่ยนแปลงไป

ดังนั้น หากเปรียบเทียบระหว่างกรณีคอนกรีตไม่ร้าวกับกรณีคอนกรีตร้าวจะพบว่า การวิบัติที่ผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตเกิดขึ้นน้อยลงในกรณีคอนกรีตร้าว รูปแบบการวิบัติจะแตกต่างจากกรณีคอนกรีตไม่ร้าวโดยสิ้นเชิง จะพบการแตกร้าวเกิดขึ้นในคอนกรีตที่บริเวณปลายระยะฝังยึดใกล้ผิวรูเจาะ



(a) Uncracked concrete

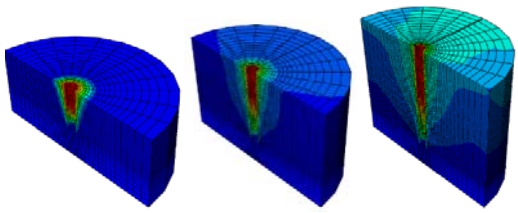


(b) Cracked concrete

Figure 11 Stiffness degradation on cohesive elements for various embedment depth

นอกจากนี้ยังพบว่ามีการขยายตัวเพิ่มขึ้นของรอยร้าว เมื่อความยาวระยะฝังยึดมีค่ามากขึ้น (Figure 12) โดยความกว้างของรอยร้าวจะขยายตัวมากสุดที่ผิวบนของแท่งคอนกรีตและจะลดลงตามความลึกที่มากขึ้น และจะสังเกตุได้ว่าการขยายตัวของรอยร้าวมีน้อยมากในแบบจำลองที่มีความยาวระยะฝังยึดมีค่าน้อย ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดแตกต่างจากกรณีคอนกรีตไม่ร้าวไม่มากนัก แต่ในแบบจำลองที่มีความยาวระยะฝังยึดมีค่ามาก การขยายตัวของรอยร้าวจะปรากฏเด่นชัด และส่งผลให้กำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดแตกต่างจากกรณีคอนกรีตไม่ร้าวมาก

ดังนั้นการขยายตัวของรอยร้าวจึงเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงดึงถอนของสมอยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าวลดลง เนื่องจากการขยายตัวของรอยร้าวทำให้เกิดการคลายความเครียดขึ้นในคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความเค้นลดลง นำไปสู่กำลังต้านทานแรงดึงถอนของระบบลดลงด้วย



(a) (b) (c)

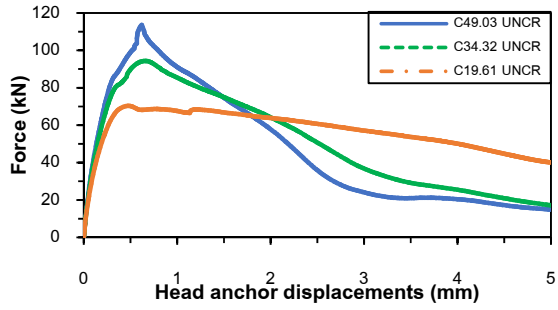
Figure 12 Expansion of the cracked width
(a) H=64 mm (b) H=128 mm (c) H=192 mm

ผลการศึกษาตัวแปรด้านกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

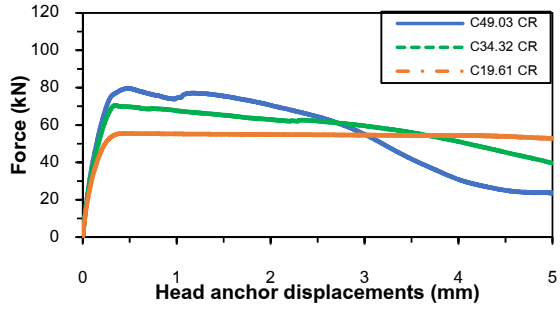
กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการวิบัติของคอนกรีตรูปกรวย และการวิบัติร่วมจากการยึดหน่วงกับการวิบัติของคอนกรีตรูปกรวย ความสัมพันธ์ของแรงดึงถอนและการเคลื่อนที่ที่ปลายสมอยึดเมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าแตกต่างกันแสดงใน (Figure 13a) ในกรณีคอนกรีตไม่ร้าว และใน (Figure 13b) ในกรณีคอนกรีตร้าว

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

ส่วนในกรณีคอนกรีตร้าวแรงดึงถอนสูงสุดจะมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นเป็น 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

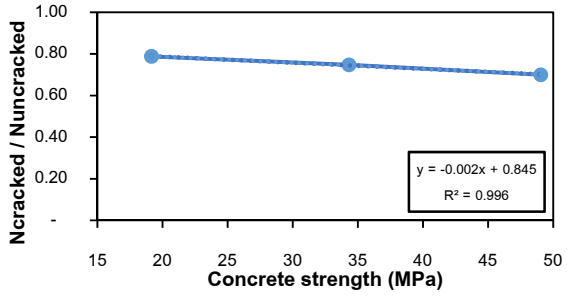
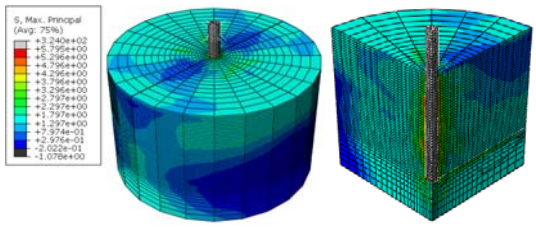


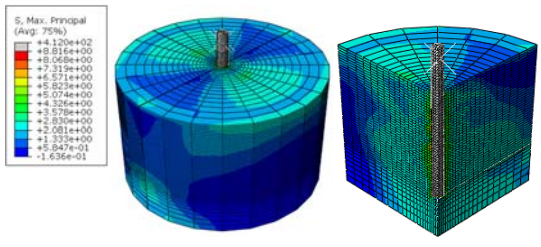
Figure 14 Ratio of Peak load in cracked to uncracked concrete of 16 mm diameter adhesive anchors for various concrete strength

เมื่อพิจารณา (Figure 14) จะพบว่าเมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามค่า 19.61, 34.32 และ 49.03 เมกกะปาสคาล อัตราส่วนแรงดึงถอนสูงสุดในคอนกรีตร้าวกับคอนกรีตไม่ร้าวมีค่าเป็น 0.79, 0.75 และ 0.70 ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่าการแตกร้าวในคอนกรีตส่งผลกระทบมากขึ้นเมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น

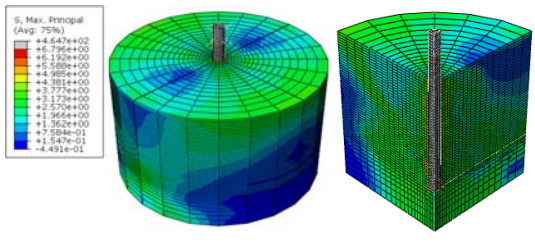
เมื่อพิจารณาการกระจายของหน่วยแรงหลักในเอลิเมนต์คอนกรีตในขณะที่แรงดึงถอนมีค่าสูงสุดจะพบว่าการกระจายตัวของหน่วยแรงหลักในคอนกรีตไม่ร้าวจะสม่ำเสมอในระนาบตั้งฉากกับแนวแรงดึงถอน ส่วนในกรณีคอนกรีตร้าวจะพบว่ามีการกระจายตัวของหน่วยแรงหลักในคอนกรีตไม่สม่ำเสมอในทุกกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เปลี่ยนไป ดังแสดงใน (Figure 15)



(a) $f_c^{'}$ = 19.61 MPa



(b) $f_c^{'}$ = 34.32 MPa

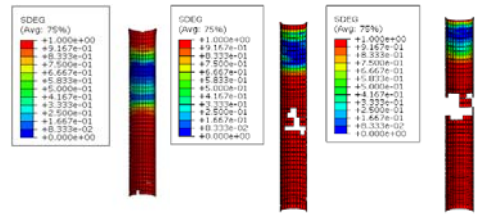


(c) $f_c^{'}$ = 49.03 MPa

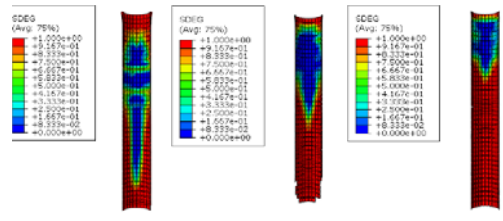
Figure 15 Maximum principle stress at peak load for various concrete strength

นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อกำลังประลัยของคอนกรีตมีค่ามากขึ้น การกระจายตัวของหน่วยแรงหลักในเอลิเมนต์คอนกรีตจะกว้างขึ้น อีกทั้งยังพบว่าความเข้มของหน่วยแรงหลักจะสูงบริเวณหน้าตัดไม่ร้าวและจะลดลงเมื่อเข้าใกล้หน้าตัดร้าว และในระนาบตั้งฉากกับแนวแรงดึงถอนความเข้มของหน่วยแรงหลักจะลดลงเมื่อเข้าใกล้ระนาบร้าว และในระนาบขนานกับแนวแรงดึงถอนจะลดลงเมื่อเข้าใกล้ขอบบนสุดริมนอกของคอนกรีต โดยมีรูปแบบเหมือนกันในทุกกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงไป

เมื่อพิจารณาการสูญเสียความแกร่งในเอลิเมนต์เชื่อมยึดในกรณีคอนกรีตไม่ร้าวใน (Figure 16a) พบว่า เอลิเมนต์ที่สูญเสียความแกร่งโดยสมบูรณ์ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ที่ถูกลบ จะมีตำแหน่งสูงขึ้นเมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมากขึ้น และเป็นตำแหน่งเดียวกับเอลิเมนต์คอนกรีตที่เกิดการแตกร้าวที่ผิวรูเจาะ



(a) Uncracked concrete



(b) Cracked concrete

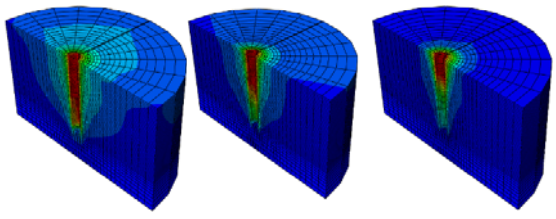
Figure 16 Stiffness degradation on cohesive elements for various concrete strength

แสดงให้เห็นว่ารูปแบบการวิบัติของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวของคอนกรีตไม่ร้าวในช่วงคอนกรีตกำลังต่ำจะมีลักษณะวิบัติของคอนกรีตรูปกรวย แต่เมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตอยู่ในช่วงปานกลางถึงสูง จะมีลักษณะการวิบัติเป็นแบบการวิบัติร่วมจากการยึดหน่วงและการวิบัติของคอนกรีตรูปกรวย

ส่วนในกรณีคอนกรีตร้าวจะไม่ปรากฏเอลิเมนต์ที่ถูกลบในคอนกรีตกำลังต่ำและสูง แต่จะมีเอลิเมนต์ที่ถูกลบบริเวณปลายล่างสุดของระยะฝังยึดในคอนกรีตกำลังปานกลางดังใน

(Figure16b) แสดงให้เห็นว่าบริเวณดังกล่าวเกิดการแตกร้าวขึ้นเล็กน้อยที่ปลายระยะฝังยึดในเอลิเมนต์คอนกรีต ซึ่งเมื่อพิจารณาภาพรวมจะพบว่า เมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเพิ่มขึ้น การแตกร้าวในคอนกรีตจะส่งผลต่อรูปแบบการวิบัติและกำลังต้านทานแรงดึงถอนสูงสุดมากขึ้น

ดังนั้น หากเปรียบเทียบระหว่างกรณีคอนกรีตไม่ร้าวกับกรณีคอนกรีตร้าวจะพบว่า การวิบัติที่ผิวสัมผัสระหว่างสารยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตเกิดขึ้นน้อยลงในกรณีคอนกรีตร้าว โดยบริเวณที่เกิดการสูญเสียแรงยึดหน่วงจะเพิ่มขึ้นตามค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่ามากขึ้น การขยายตัวของความกว้างรอยร้าวจะลดลงดังแสดงใน (Figure 17) โดยความกว้างของรอยร้าวจะขยายตัวมากสุดที่ผิวบนของแท่งคอนกรีตและจะลดลงตามความลึกที่มากขึ้น



(a) (b) (c)

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 รูปแบบการวิบัติจะเปลี่ยนเป็นการวิบัติจากการยึดหน่วงที่ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยึดเหนี่ยวเป็นส่วนใหญ่ และพบการแตกร้าวในคอนกรีตเกิดขึ้นน้อยลง แสดงให้เห็นว่าการขยายตัวของความกว้างรอยร้าวมิใช่ปัจจัยหลักที่ทำให้กำลังต้านทานแรงดึงถอนของระบบฝังยึดลดลงเมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่ามากขึ้น ดังนั้นสาเหตุที่ผลกระทบของรอยร้าวในคอนกรีตมีมากขึ้นเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดประลัยสูงขึ้น เกิดจากการสูญเสียการยึดหน่วงที่ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยึดเหนี่ยวที่เพิ่มขึ้น

สรุปผล

ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกำลังและพฤติกรรมของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวทั้งในคอนกรีตไม่ร้าวและคอนกรีตร้าว จะพบว่า

ตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อกำลังต้านทานแรงดึงถอนของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวเรียงตามลำดับความสำคัญได้แก่ ความยาวระยะฝังยึด กำลังอัดของคอนกรีต และกำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยว ตามลำดับ ทั้งในคอนกรีตไม่ร้าวและในคอนกรีตร้าว

ผลของรอยร้าวในคอนกรีตทำให้กำลังต้านทานแรงดึงถอนของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวลดลงจากกรณีคอนกรีตไม่ร้าวในสัดส่วน 0.79-0.76 เมื่อกำลังยึดหน่วงของสารยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้นในช่วง 8-16 เมกกะปาสคาล ผลกระทบจากรอยร้าวในคอนกรีตมีมากขึ้นเล็กน้อยเมื่อกำลังยึดหน่วงเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการขยายตัวของรอยร้าวในคอนกรีตเป็นส่วนใหญ่

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

เมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเพิ่มขึ้น กำลังต้านทานแรงดึงถอนของระบบฝังยึดแบบใช้สารยึดเหนี่ยวในคอนกรีตร้าวจะลดลงจากกรณีคอนกรีตไม่ร้าวในสัดส่วน 0.79, 0.75 และ 0.70 เมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเป็น 19.61, 34.32 และ 49.03 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ โดยการแตกร้าวในคอนกรีตจะส่งผลกระทบมากขึ้นเมื่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น สาเหตุจากการสูญเสียแรงยึดหน่วงที่ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับสารยึดเหนี่ยวเป็นส่วนใหญ่

เอกสารอ้างอิง

1. ภาคิณ ลอยเจริญ, เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย และ กิตติศักดิ์ ขันติยวิชัย. 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., Mallée, 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.