



KKU Engineering Journal

<http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/>

แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลชีทภายใต้แรงอัดตามแนวแกน

Finite element modeling of axially loaded concrete columns with metal sheet confinement

นิชฌานันท์ ห่องสินหลาก เมธิ บุญพิเชฐวงศ์ และ ถันยดา พรณเชษฐ*

Nitchanun Hongsinlark, Maetee Boonpichetvong and Tanyada Pannachet*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen Thailand, 40002.

Received January 2014

Accepted June 2014

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้เสนอแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลชีท โดยได้เสนอแบบจำลอง 3 มิติ ที่ใช้เงื่อนไขการครากแบบดรักเกอร์-พลักเกอร์และใช้ฟังก์ชันกำลังถดถอย (Softening function) ในการจำลองพฤติกรรมกำลังถดถอย (Softening) ของคอนกรีต ใช้เงื่อนไขการครากแบบฟอน-มีสเสส (Von-mises) สำหรับวัสดุเมทัลชีท และใช้อีลิเมนต์รอยต่อในการจำลองในส่วนของวัสดุยึดเหนี่ยว ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ที่เสนอสามารถจำลองพฤติกรรมของเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลชีท โดยให้ผลไปในทางเดียวกับที่พบในห้องปฏิบัติการ อีกทั้งยังอธิบายกลไกการเกิดพฤติกรรมที่ไม่สามารถมองเห็นได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการอีกด้วย

คำสำคัญ : ไฟไนต์อีลิเมนต์ เสาคอนกรีต การโอบรัด เมทัลชีท

Abstract

This paper proposed a nonlinear finite element model to investigate mechanism and behavior of the concrete columns confined with metal sheet. Three dimensional modeling was chosen. Concrete was modeled using the Drucker-Prager yield criterion and a softening function, whereas the Von-Mises yield criterion was chosen for metal sheet. Between both materials, a set of interface elements was inserted to represent layers of the bonding material. The results showed that the finite element model could model the behaviors that were observed from the laboratory experiments, and could capture the mechanisms that were not noticed in the laboratory experiment as well.

Keywords : Finite element, Concrete column, Confinement, Metal sheet

* Corresponding author.

Email address: tanpan@kku.ac.th

1. บทนำ

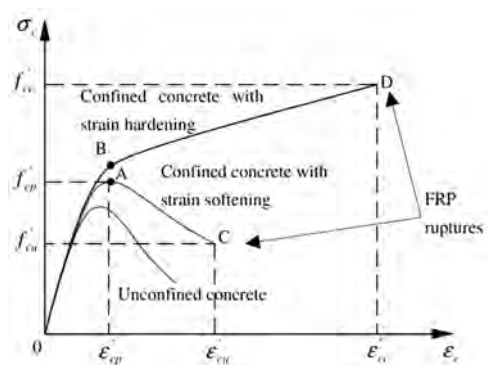
การใช้แผ่นเมทัลชีทในการพันโอบรัดเพื่อเสริมกำลังรับแรงอัดของเสาคอนกรีตเป็นวิธีหนึ่งที่มีความเป็นไปได้และเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เพื่อให้ทดแทนวัสดุโอบรัดประเภทพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (FRP) ซึ่งมีราคาสูง ในการศึกษาของ Khamthong et al [1] พบว่าการโอบรัดเมทัลชีท 3 รอบ ให้กับเสาคอนกรีตขนาดเล็ก หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดของเสาได้ถึง 78% ในขณะที่การศึกษาของ Wu and Wei [2] ได้นำเอาเสาคอนกรีตขนาดเล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสพันด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) จำนวน 2 รอบ ซึ่งสามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดของเสาได้ ประมาณ 71% จะเห็นได้ว่าการใช้เมทัลชีทเป็นวัสดุทางเลือกในการพันโอบรัดเสาที่มีความเป็นไปได้ที่จะใช้ทดแทนการใช้วัสดุประเภทพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

การศึกษาพฤติกรรมเบื้องต้นพบว่า การใช้เมทัลชีทเป็นวัสดุโอบรัดแสดงพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงตามแนวแกนที่แตกต่างไปจากวัสดุประเภท FRP โดยนอกจากเมทัลชีทจะช่วยต้านทานการขยายตัวทางด้านข้างของเสาแล้วยังน่าจะรับแรงตามแนวแกนร่วมกับแกนกลางคอนกรีตด้วย สังเกตได้จากการพบการอยู่เกิดขึ้นในแผ่นเมทัลชีท [1] ดังนั้นความสามารถในการรับแรงของเสาสามารถเพิ่มขึ้นได้จากทั้งสองปัจจัยดังกล่าว แต่ไม่ได้ชี้ชัดในรายละเอียดของการเพิ่มขึ้นของกำลัง

เนื่องจากในปัจจุบันมีการศึกษาในเรื่องของพฤติกรรมและกลไกเชิงลึกในเสาที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลชีทอย่างจำกัด เพื่อที่จะเข้าใจในพฤติกรรมของเสาที่โอบรัดด้วยเมทัลชีทได้ดียิ่งขึ้น การใช้แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์เป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถใช้ในการศึกษา ทำนายพฤติกรรมรวมไปถึงกลไกต่างๆ ที่เกิดขึ้น เนื่องจากมีพฤติกรรมและกลไกที่เกิดขึ้นในเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลชีท ซึ่งไม่สามารถเห็น, ตรวจพบ หรือศึกษาได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ การเข้าใจในพฤติกรรมเชิงลึกให้ดียิ่งขึ้น จะทำให้วิศวกรสามารถพัฒนารูปแบบการเสริมกำลังให้ดีและมีประสิทธิภาพต่อไปได้

2. พฤติกรรมของเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัด

จากการศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตที่เสริมกำลังโดยการโอบรัดด้วยวัสดุ FRP พบว่าการเสริมกำลังโดยวิธีการโอบรัดเสาจะส่งผลให้เสาที่ได้รับการโอบรัดมีกำลังที่สูงขึ้น และมีความเหนียวที่สูงขึ้น โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นแบบเชิงเส้นคู่ (Bi-linear) [3] แบ่งได้เป็น 2 รูปแบบคือพฤติกรรมแบบกำลังก้ำวหน้า (Strain hardening) และแบบกำลังถดถอย (Strain softening) [4] แสดงในรูปที่ 1 โดยการเกิดพฤติกรรมแต่ละรูปแบบจะขึ้นกับประสิทธิภาพของการโอบรัด (Confinement efficiency) [4]



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเสาคอนกรีตที่โอบรัดและไม่ได้โอบรัด [4]

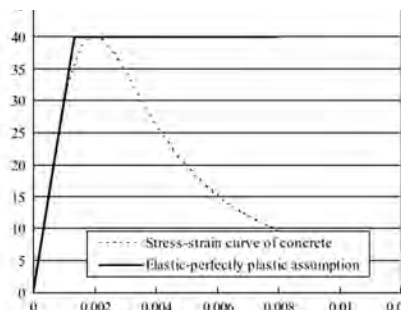
ในช่วงยืดหยุ่นของเสา ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเสาคอนกรีตทั้งในส่วนของเสาที่พันโอบรัดและเสาที่ไม่ได้พันโอบรัด จะมีลักษณะเหมือนกัน และมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากัน [4-7] วัสดุโอบรัดจะเข้ามามีส่วนในการต้านทานการขยายตัวเมื่อค่าของความเค้นเกินกว่าค่ากำลังอัดประลัยของเสาที่ไม่ได้โอบรัด ซึ่งเกิดจากการขยายตัวอย่างมากของแกนกลางคอนกรีต [5-7] ถ้าประสิทธิภาพในการโอบรัดมีค่าน้อย ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในแกนกลางคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่ากำลังของเสาที่ถูกโอบรัด (จุด A) และหน่วยแรงจะลดลงจนกระทั่งเกิดการวิบัติโดยการขาดของแผ่น FRP ซึ่งจะแสดงพฤติกรรมแบบกำลังถดถอย (Strain softening) ในทางกลับกัน ถ้าประสิทธิภาพของการโอบรัดมีค่ามาก จะส่งผลให้

ค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแกนกลางคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเสารับผิดโดยการฉีกขาดของแผ่น FRP ซึ่งจะมีพฤติกรรมแบบกำลังก้าวหน้า (Strain hardening)

3. แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัด

วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เป็นวิธีหนึ่งที่มีความเหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมของเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดแบบสม่ำเสมอและแบบไม่สม่ำเสมอ Mirmiran et al [8] ได้เสนอแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้น ใช้เงื่อนไขการครากแบบดรักเกอร์-พลักเกอร์ โดยใช้ค่าตัวแปรแรงยึดเหนี่ยว (c) และมุมเสียดทานภายใน (ϕ) ของคอนกรีต เป็นค่าคงที่จากสมการของ Rochette and Labossiere [9] ผลจากแบบจำลองเสาน้ำตัดรูปวงกลม พบว่าให้ผลที่ใกล้เคียงเมื่อเทียบกับผลในห้องปฏิบัติการ สำหรับเสาน้ำตัดสี่เหลี่ยม พบว่าแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์จับได้เพียงตำแหน่งของจุดเปลี่ยนโค้ง แต่ไม่ได้แสดงพฤติกรรมแบบกำลังถดถอย (Softening) ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้เงื่อนไขการครากแบบดรักเกอร์-พลักเกอร์ที่ทำให้คอนกรีตมีพฤติกรรมเป็นแบบยืดหยุ่น-พลาสติกสมบูรณ์ (elastic perfectly plastic)

การใช้เงื่อนไขการครากแบบดรักเกอร์-พลักเกอร์ในการสร้างแบบจำลองของคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น-พลาสติกสมบูรณ์ ซึ่งไม่ได้แสดงพฤติกรรมที่แท้จริงของคอนกรีตเมื่อรับแรงอัด (รูปที่ 2) ดังนั้นเงื่อนไขการครากแบบดรักเกอร์-พลักเกอร์ควรรวมผลของพฤติกรรมแบบกำลังถดถอย (Softening) เพื่อจำลองพฤติกรรมที่แท้จริงของคอนกรีต [10]



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตเมื่อรับแรงอัดแกนเดียว [10]

Karabinis et al [11] ได้เสนอแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ 3 มิติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่โอบรัดด้วย FRP โดยในแบบจำลองได้ใช้เงื่อนไขการครากแบบดรักเกอร์-พลักเกอร์ ที่รวมผลของความเค้นเบี่ยงเบนอันดับสาม และใช้ฟังก์ชันกำลังถดถอย (Softening function) เพื่อจำลองในส่วนของพฤติกรรมกำลังถดถอย (Softening) ของคอนกรีต โดยฟังก์ชันกำลังถดถอย (Softening function) มีความสัมพันธ์ตามสมการที่

$$\kappa = (1/\sqrt{3} - \theta)\sigma_c \quad (1)$$

โดยที่ σ_c คือค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในคอนกรีตอ้างอิงตามสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตภายใต้การกดอัดแกนเดียว (Uniaxial compression) และ θ คือค่าพารามิเตอร์ความฝืด (Friction parameter) แบบจำลองที่เสนอโดย Karabinis et al [11] สามารถให้ผลการทำนายพฤติกรรมของเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดแบบสม่ำเสมอ และสามารถจำลองรูปแบบการถดถอยของกำลัง (Softening) ที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี

4. การสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลชีท

4.1 แบบจำลองคอนกรีต

ในบทความนี้แบบจำลองของคอนกรีตจะเป็นแบบจำลองคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดประลัยเท่ากับ 22 เมกะปาสคาล (MPa) และมีอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.2 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลชีทจะถูกนำไปวิเคราะห์โดยใช้ซอฟต์แวร์ MSC.MARC [12] ซึ่งเป็นหนึ่งในซอฟต์แวร์ที่มีประสิทธิภาพในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ไม่เป็นเชิงเส้น แบบจำลองคอนกรีตใช้อีลิเมนต์ไอโซพารามิเทริก 3 มิติแบบ 8 จุดต่อ (8 noded solid brick element) แบบจำลองที่แสดงพฤติกรรมของคอนกรีตภายใต้แรงอัดใช้เงื่อนไขการครากแบบดรักเกอร์-พลักเกอร์ ที่ใช้กฎการไหลแบบสอดคล้องกับกฎการไหล นอกจากนี้แบบจำลองของคอนกรีตยังมีความสามารถเกิดการแตกร้าว (Cracking) ได้เมื่อคอนกรีต

รับแรงดึงโดยอยู่บนพื้นฐานของการแตกร้าแบบกระจาย (Smeared crack)

เงื่อนไขการครากแบบดรักเกอร์-พลักเกอร์สามารถเขียนได้ในรูป

$$F = \sqrt{J_2} + \theta I_1 - \kappa \quad (2)$$

โดยที่ θ คือค่าพารามิเตอร์ความฝืด (Friction parameter) ในบทความนี้จะใช้ค่าเท่ากับ 0.2934 สามารถหาได้โดยใช้สมการทำนายกำลังของคอนกรีตภายใต้การอัดสามแกนที่เสนอโดย Richart et al [13], κ คือฟังก์ชันกำลังถดถอย (Softening function) แสดงในสมการที่ซึ่งบทความนี้จะฟังก์ชันกำลังถดถอย (Softening function) จะคำนวณมาจากส่วนกำลังถดถอย (Softening) ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดภายใต้การอัดแกนเดียวของคอนกรีตที่เสนอโดย Popovics [14] ซึ่งเหมาะกับคอนกรีตที่มีกำลังต่ำจนถึงกำลังปานกลางคือน้อยกว่า 55 เมกะปาสกาล (MPa) แสดงในสมการที่ (3)

$$\frac{f_c}{f'_c} = \frac{n \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)}{(n-1) + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)^n} \quad (3)$$

โดยที่

$$n = 0.4 \times 10^{-3} f'_c (\text{psi}) + 1.0 \quad (4)$$

โดยที่ ϵ_{co} คือ ค่าความเครียดที่ตำแหน่งกำลังรับแรงอัดสูงสุด (f'_c) โดยกำหนดใช้ค่าเท่ากับ 0.002

ในการสร้างแบบจำลองกำลังถดถอย (Softening) ของคอนกรีต ที่ใช้สมการความสัมพันธ์ของคอนกรีตภายใต้การอัดแกนเดียว ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์อาจขึ้นกับขนาดของอีลิเมนต์ที่ใช้ (Mesh dependency) [15] เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวในการสร้างแบบจำลองกำลังถดถอย (Softening) ของคอนกรีตจะใช้หลักการของพลังงานการแตกร้าด้วยแรงอัดของคอนกรีต (Compressive fracture energy) โดยที่ Lertsrisakulrat et al [15] ได้นิยามค่าพลังงานการแตกร้าด้วยแรงอัดของคอนกรีต (G_{Fc}) เป็นพลังงานต่อหน่วยปริมาตร แสดง

ดังสมการที่ (5)

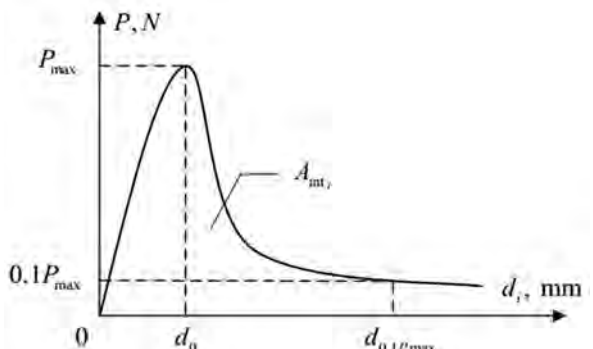
$$G_{Fc} = \frac{A_{ext}}{V_p} \quad (5)$$

โดยที่ A_{ext} คือ พื้นที่ใต้กราฟแรง (P) และการเสียรูป (d) จนถึง d มีค่าเท่ากับ $0.1P_{max}$ แสดงดังรูปที่ 3 และ V_p คือ ปริมาตรแตกร้า (Localized fracture volume) ซึ่งในบทความนี้จะใช้เป็นค่าปริมาตรของอีลิเมนต์

ค่าพลังงานการแตกร้าแบบอัดของคอนกรีต (G_{Fc}) เป็นฟังก์ชันกับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตและไม่ขึ้นกับขนาดและรูปร่างของคอนกรีต มีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.16-0.22 นิวตัน/มม² (N/mm²) สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังต่ำถึงกำลังปานกลาง สามารถคำนวณได้โดย

$$G_{Fc} = 0.86 \times 10^{-1} f'_c{}^{1/4} \quad (6)$$

โดยที่ G_{Fc} และ f'_c มีหน่วยเป็น นิวตัน/มม² (N/mm²)



รูปที่ 3 การหาค่า A_{ext} [15]

เนื่องจากเงื่อนไขการครากแบบดรักเกอร์-พลักเกอร์ให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นแบบยืดหยุ่น-พลาสติกสมบูรณ์ เมื่อรวมเงื่อนไขการครากเข้ากับฟังก์ชันกำลังถดถอย (Softening function) จะมีลักษณะเป็นแบบเส้นตรงในช่วงยืดหยุ่น และเป็นโค้งตามฟังก์ชันกำลังถดถอย (Softening function) ภายหลังการคราก

ในการจำลองพฤติกรรมด้านรับแรงดึงของคอนกรีต จะใช้แบบจำลองการแตกร้าซึ่งมีพฤติกรรมแบบแกนเดียวเป็นแบบกำลังถดถอยเชิงเส้นคู่ (Bi-linear softening) โดยการแตกร้าจะเกิดขึ้นในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทาง

ที่มีความเค้นดึงหลักสูงสุด เมื่อค่าความเค้นดึงหลักต่ำกว่าค่ากำลังรับแรงดึงที่กำหนดไว้ พฤติกรรมกำลังถดถอย (Softening) สามารถระบุได้โดยใช้ค่าพลังงานแตกร้าว (Fracture energy) ซึ่งมีค่าประมาณ 0.1 นิวตัน/มม. (N/mm.) ค่าความเค้นเฉือนที่สามารถต้านทานได้บนรอยแตกร้าวจะถูกวิเคราะห์โดยใช้ค่าโมดูลัสแรงเฉือนลดค่า (Reduced shear modulus) ที่ถูกลดค่าด้วยตัวคูณลดค่าแรงเฉือน (Shear retention factor)

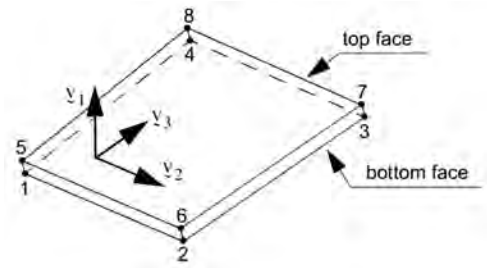
4.2 แบบจำลองเมทัลชีท

แบบจำลองอิเลเมนต์สำหรับเมทัลชีท ในการศึกษานี้ใช้อิเลเมนต์ไฮโซพาราเมตริกซ์แบบ 8 จุดต่อ เช่นเดียวกับคอนกรีต และเนื่องจากเมทัลชีทเป็นแผ่นเหล็กซึ่งมีพฤติกรรมไม่ขึ้นกับแรงดันรอบข้าง จึงเลือกใช้เงื่อนไขการครากแบบฟอน-มีสเสส (Von-Mises) ที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทั้งด้านรับแรงดึงและแรงอัด โดยกำหนดให้มีโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 200 จิกกะปาสคาล (GPa) มีกำลังรับแรงดึงครากเท่ากับ 550 เมกะปาสคาล (MPa) และมีอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.3 โดยมีพฤติกรรมเป็นแบบยืดหยุ่น-พลาสติกสมบูรณ์

4.3 แบบจำลองรอยต่อ

ในการสร้างแบบจำลองของวัสดุประสานระหว่างคอนกรีตและเมทัลชีท เพื่อจำลองการแยกตัว (Delamination) และการลื่นไถล (Slip) ระหว่างผิวคอนกรีตและเมทัลชีท ในการศึกษาจะใช้อิเลเมนต์รอยต่อแบบ 8 จุดต่อใน 3 มิติ (Eight-node three-dimensional interface element) แสดงดังรูปที่ 4 ค่าความเค้นบนอิเลเมนต์ประกอบไปด้วยค่าความเค้นหนึ่งตัวในทิศทางตั้งฉาก และอีกสองตัวในทิศทางของการเฉือน การเสียรูปที่เกิดขึ้นในอิเลเมนต์จะเป็นการเสียรูปแบบสัมพัทธ์ระหว่างระนาบด้านบน (Top face) และด้านล่าง (Bottom face)

คุณสมบัติของรอยต่อจะระบุในรูปแบบของความเค้นบนพื้นผิว (Traction, $\mathbf{t}$) และการเสียรูปสัมพัทธ์ (relative displacements, $\mathbf{v}$) ระหว่างระนาบด้านบนและระนาบด้านล่าง และในการศึกษาจะกำหนดให้พฤติกรรมของรอยต่อเป็นแบบกำลังถดถอยเชิงคู่ (Bi-linear softening) มีคุณสมบัติของวัสดุตามอพิพอกซ์ซึ่งเป็นวัสดุประสานที่ใช้จริงในตัวอย่างเสาที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 4 อิเลเมนต์รอยต่อแบบ 8 จุดต่อใน 3 มิติ (Element type 188) [12]

4.4 แบบจำลองเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลชีท

แบบจำลองของเสาที่ใช้ในการศึกษาจะใช้เสาหน้าตัดวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. โอบรัดด้วยเมทัลชีท 1 ชั้น เนื่องจากความสมมาตรแบบจำลองลักษณะทางกายภาพจะใช้เพียง 1 ใน 8 ของเสา คือ 1 ใน 4 ของหน้าตัดและครึ่งหนึ่งของความสูง (รูปที่ 5) และมีเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ตามเงื่อนไขของความสมมาตร กล่าวคือกำหนดเงื่อนไขขอบเขตไม่ยอมให้เกิดการเคลื่อนที่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบสมมาตรทั้งสามระนาบ และให้แรงกระทำกับเสาในลักษณะของการให้การเสียรูปกระทำอย่างสม่ำเสมอกับระนาบด้านบนของเสา (Displacement control) การแบ่งอิเลเมนต์ในแบบจำลองจะแบ่งให้มีความละเอียดเพียงพอที่จะทำให้ผลจากแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือ อิเลเมนต์ของเสาจะประกอบไปด้วยอิเลเมนต์ของคอนกรีตและอิเลเมนต์ของเมทัลชีทที่ถูกคั่นไว้ด้วยอิเลเมนต์รอยต่อสำหรับจำลองการเลื่อนระหว่างวัสดุทั้งสอง ในกรณีที่ของแบบจำลองเสาที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลชีทมากกว่าหนึ่งชั้น อิเลเมนต์รอยต่อจะถูกนำมาใช้อีกครั้งเพื่อคั่นระหว่างเมทัลชีทชั้นในและเมทัลชีทชั้นนอก สำหรับจำลองการเลื่อนระหว่างเมทัลชีทแต่ละชั้น

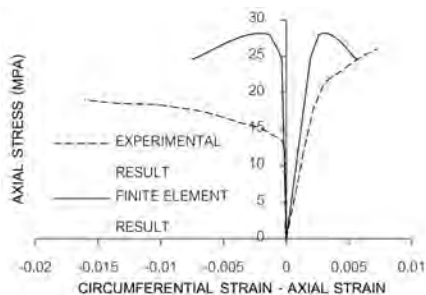


รูปที่ 5 แบบจำลองทางกายภาพ 1 ใน 8 ของตัวอย่างเสา คอนกรีตหน้าตัดวงกลม

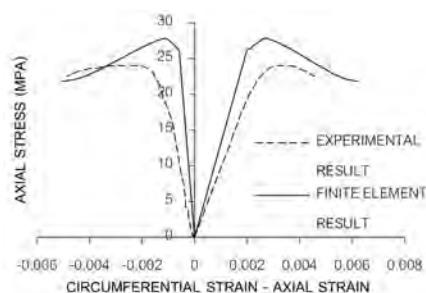
4.5 การเทียบแบบจำลองกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การเทียบแบบจำลองกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง ได้ใช้ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ศึกษาโดยมณูญกิตต์ [1]

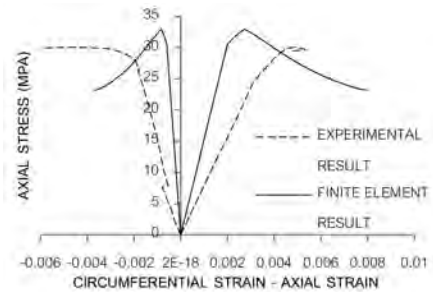
ตัวอย่างการเทียบแบบจำลองกับผลการทดสอบสำหรับเสาหน้าตัดวงกลมโอบรัดด้วยเมทัลชีท 1 ชั้น, เสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่โอบรัดด้วยเมทัลชีท 1 ชั้น และ 2 ชั้น แสดงในรูปที่ 6, รูปที่ 7 และรูปที่ 8 ตามลำดับ โดยกราฟทางด้านขวาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดตามแนวแกนของเสาและทางซ้ายแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นตามแนวแกนและความเครียดในทิศทางตามแนวเส้นรอบรูปของเสา (Circumferential strain) ที่บริเวณกึ่งกลางของความสูงเสา ตามการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยค่าความเครียดที่เป็นบวกแสดงถึงทิศทางการอัด และความเครียดที่เป็นลบแสดงถึงทิศทางการดึง นอกจากนี้ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการยังได้ทำการแก้ไขส่วนของกราฟที่ไม่เหมาะสมอันเนื่องมาจากผลของแรงเสียดทานที่ปลายทั้งสองข้างของตัวอย่าง



รูปที่ 6 การเทียบแบบจำลองเสาหน้าตัดวงกลมที่โอบรัดด้วยเมทัลชีท 1 ชั้นกับผลการทดสอบ



รูปที่ 7 การเทียบแบบจำลองเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่โอบรัดด้วยเมทัลชีท 1 ชั้นกับผลการทดสอบ



รูปที่ 8 การเทียบแบบจำลองเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่โอบรัดด้วยเมทัลชีท 2 ชั้นกับผลการทดสอบ

การเทียบผลจากแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของ Khomthong et al [1] พบว่ามีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยมีพฤติกรรมและความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในรูปที่ 6 เกิดขึ้นจากการวัดค่าความเครียดตามแนววงรอบตามการทดสอบเป็นความเครียดเฉพาะจุดซึ่งวัดโดยใช้เกจวัดความเครียดติดกับแผ่นเมทัลชีท ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ของข้อมูลเช่น เมทัลชีทอาจอยู่ที่บริเวณที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด จึงทำให้ข้อมูลที่วัดได้อาจไม่ใช่ตัวแทนที่เหมาะสม เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนด้านกำลัง พบว่าค่ากำลังของเสาที่ถูกโอบรัดมีความใกล้เคียงกัน โดยมีค่าคลาดเคลื่อนด้านกำลังสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 15% (ดังแสดงในตารางที่ 1) และความคลาดเคลื่อนอีกส่วนหนึ่งมาจากค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ไม่เท่ากันระหว่างคอนกรีตในการทดสอบและคอนกรีตในแบบจำลอง ทำให้ความชันในช่วงยืดหยุ่นมีความแตกต่างกันเล็กน้อย

ตารางที่ 1 ค่ากำลังรับแรงอัดของเสาจากการศึกษา

หน้าตัด/จำนวนชั้น	กำลังรับแรงอัดของเสา (MPa)	
	ผลการวิเคราะห์	ผลการทดสอบ [1]
วงกลม/ 1 ชั้น	28	26
จัตุรัส/ 1 ชั้น	27.5	24
จัตุรัส/ 2 ชั้น	33	30

5. การศึกษาพฤติกรรมและกลไกจากแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยเมทัลชีท

การศึกษาเลือกใช้เสาหน้าตัดวงกลมเนื่องจากเป็นรูปแบบของเสาพื้นฐานที่มีพฤติกรรมแบบสมมาตร

มีการขยายตัวของหน้าตัดสม่ำเสมอ มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวอย่างสำหรับการศึกษาพฤติกรรมและกลไกขั้นพื้นฐาน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้สำหรับเสาหน้าตัดแบบอื่นๆ ต่อไป แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของเสาคอนกรีตหน้าตัดวงกลมที่โอบรัดด้วยเมทัลชีท 1 ชั้น แสดงในรูปที่ 9 แบบจำลองจะประกอบไปด้วยอีลิเมนต์ของคอนกรีตและเมทัลชีทที่คั่นไว้ด้วยอีลิเมนต์รอยต่อซึ่งใช้ในการจำลองพฤติกรรมของรอยต่อระหว่างวัสดุสองชนิด

จากการศึกษาการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในคอนกรีตเมื่อเสาที่ถูกโอบรัดรับแรงอัดตามแนวแกน พบว่าเมื่อเสาได้รับแรงอัดตามแนวแกน องค์ประกอบของแรงหรือความเค้นหลักที่เกิดขึ้นในคอนกรีตอยู่ในทิศทางของการอัดเป็นหลัก จึงไม่มีองค์ประกอบของความเค้นหลักในทิศทางของการดึงที่จะทำให้เสาคอนกรีตเกิดการแตกร้าวขึ้น

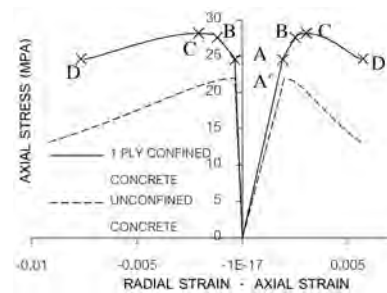


รูปที่ 9 การแบ่งอีลิเมนต์และวัสดุในแบบจำลองเสาหน้าตัดวงกลมที่โอบรัดด้วยเมทัลชีท 1 ชั้น

ในส่วนของพฤติกรรมของรอยต่อ พฤติกรรมที่เกิดขึ้นบนรอยต่อระหว่างคอนกรีตและเมทัลชีท ประกอบไปด้วยทิศทางการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 3 ทิศทาง คือ การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ตามแนวรัศมี (Radial direction), การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ตามแนวตั้ง (Vertical/axial direction) และการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ตามแนววงรอบ (Circumferential direction) จากการศึกษาพบว่าไม่เกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ในทิศทางตามแนวรัศมีและการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ในทิศทางตามแนวตั้ง แต่จะเกิดการเลื่อนในทิศทางตามแนววงรอบพบว่า แต่ค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการแยกตัว

ในการศึกษาพฤติกรรมและกลไกเชิงลึกของเสาหน้าตัดรูปวงกลม มีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแสดงในรูปที่ 10 กลไกของตัวอย่างสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 จุดใหญ่ๆ ซึ่งจุด A คือจุดที่แบบจำลอง

คอนกรีตเริ่มเกิดการร้าวหรือเป็นจุดที่เวกเตอร์ของความเค้นหลักทั้ง 3 ทิศทางในคอนกรีตเท่ากับของเซตการร้าวแบบดรักเกอร์-พลักเกอร์ จุด B คือจุดที่แผ่นเมทัลชีทเกิดการร้าวหรือมีค่าเวกเตอร์ของความเค้นหลักในเมทัลชีททั้ง 3 ทิศทางเท่ากับขอบเขตการร้าวแบบฟอน-มิสเชส จุด C คือจุดที่เสาที่ถูกโอบรัดสามารถเพิ่มกำลังได้สูงสุด และจุด D คือจุดที่สิ้นสุดการคำนวณ



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเสาหน้าตัดวงกลมที่โอบรัดด้วยเมทัลชีท 1 ชั้น

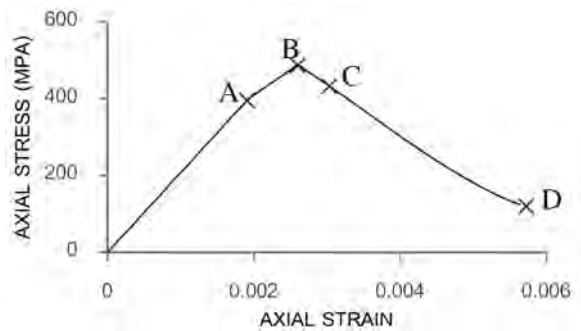
จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดพบว่า การพันโอบรัดเสาด้วยเมทัลชีท 1 ชั้นสามารถเพิ่มกำลังอัดของเสาให้สูงขึ้นได้ประมาณ 28% โดยมีพฤติกรรมหลักๆ ที่พบคือในช่วงยืดหยุ่นของเสาหรือช่วงก่อนที่คอนกรีตจะเกิดการร้าวตามแบบจำลองดรักเกอร์-พลักเกอร์ (ก่อนจุด A) เสาจะมีสติฟเนสสูงขึ้นจากเดิมเนื่องแผ่นเมทัลชีทที่พันโอบรัดมีความสามารถต้านทานการอัดร่วมกับแกนกลางคอนกรีตได้ นอกจากนี้เนื่องจากแกนกลางคอนกรีตในช่วงยืดหยุ่นเมื่อรับแรงอัดจะเกิดขยายตัวด้านข้างเนื่องจากอัตราส่วนปัวซอง และการขยายตัวดังกล่าวถูกโอบรัดและต้านทานด้วยเมทัลชีทเกิดแรงดันรอบข้างที่สูงขึ้น ส่งผลให้เสาคอนกรีตมีจุดร้าวตามแบบจำลองดรักเกอร์-พลักเกอร์ที่สูงขึ้นจากกรณีที่ไม่มียูเอวีซีทีโอบรัด (จุด A') เล็กน้อย

ภายหลังจากการร้าวของคอนกรีต การขยายตัวของแกนกลางจะเปลี่ยนจากการขยายตัวเนื่องจากอัตราส่วนปัวซองไปเป็นการขยายตัวแบบพลาสติกซึ่งมีขนาดการขยายตัวที่สูงกว่า แต่เมทัลชีทที่โอบรัดยังคงมีความสามารถในการต้านทานการขยายตัวพลาสติกของคอนกรีต ส่งผลให้เสายังคงสามารถรับแรงต่อไปได้ในลักษณะของพฤติกรรมแบบกำลังก้าวหน้า (Strain hardening) ก่อนที่เมทัลชีทที่โอบรัดจะเกิดการร้าว

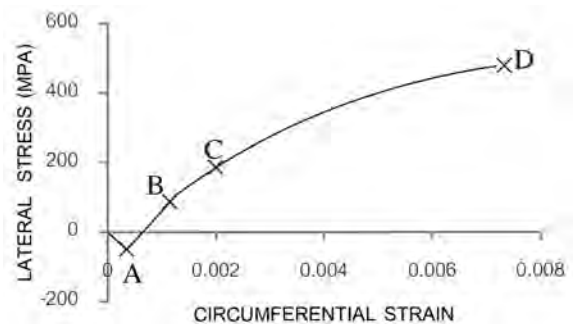
(จุด B) และตามมาด้วยจุด C คือจุดที่เสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดสามารถเพิ่มกำลังได้สูงสุด ก่อนที่ค่าความเค้นจะลดลง ในลักษณะของพฤติกรรมแบบกำลังถดถอย (Strain softening) (ช่วงจุด C ถึงจุด D) โดยหากเปรียบเทียบกับเสาที่ไม่ได้ถูกโอบรัด จะพบว่าเสาที่ถูกโอบรัดจะมีการสูญเสียกำลังในช่วงหลังจุดสูงสุดต่ำกว่า

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดตามแนวแกนและในทิศทางการขยายตัวด้านข้างในแผ่นเมทัลชีทของเสาถูกแสดงในรูปที่ 11 และรูปที่ 12 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในแผ่นเมทัลชีทตามแนวแกน ในช่วงก่อนจุด A แสดงให้เห็นว่าเกิดความเค้นและความเครียดอัดขึ้นในแผ่นเมทัลชีท ซึ่งเกิดจากการรับแรงอัดร่วมของเมทัลชีทกับแกนกลางเสาคอนกรีต และในรูปที่ 12 เนื่องจากเมื่อแกนกลางของคอนกรีตรับแรงอัดจะเกิดการขยายตัวออกทางด้านข้าง ส่งผลให้เกิดค่าความเครียดดึงขึ้นในแผ่นเมทัลชีท แต่จะพบว่าเกิดค่าความเค้นอัดขึ้นซึ่งเกิดจากคอนกรีตและเมทัลชีทรับความเครียดในแนวตั้งเท่ากันจากการกดอัดตามแนวแกนอย่างสม่ำเสมอ แต่สองวัสดุมีอัตราส่วนปัวซองที่ไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดการขยายตัวด้านข้างที่ไม่เท่ากันระหว่างวัสดุสองชนิด ทำให้คอนกรีตซึ่งมีอัตราส่วนปัวซองน้อยกว่า เกิดการขยายตัวน้อยกว่าไปรั้งการขยายตัวของเมทัลชีท จึงทำให้เมทัลชีทเกิดความเค้นอัดภายในขึ้น

หลังจากจุด A ซึ่งเป็นจุดที่คอนกรีตเกิดการครากพบว่าแกนกลางคอนกรีตจะเกิดการขยายตัวอย่างมาก เนื่องจากการขยายตัวแบบพลาสติกของคอนกรีต การขยายตัวที่เกิดขึ้นนี้มีค่ามากกว่าค่าการขยายตัวเนื่องจากอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตและเมทัลชีท ส่งผลให้เมทัลชีทเริ่มรับความเค้นดึงจนเกิดการครากเมื่อความเค้นที่เกิดขึ้นแตะกับขอบเขตการครากแบบวอน-มิชเชส ที่จุด B แต่อย่างไรก็ตามเมื่อให้แรงต่อไปแกนกลางคอนกรีตยังคงขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้แผ่นเมทัลชีทรับความเค้นดึงสูงขึ้นจากเดิม และด้วยเมทัลชีทที่มีคุณสมบัติเป็นแบบยืดหยุ่น-พลาสติกสมบูรณ์ ภายหลังจากจุดครากเมื่อเมทัลชีทรับความเค้นดึงทางด้านข้างสูงขึ้นจากเดิม ส่งผลให้สูญเสียความสามารถในการรับแรงในทิศทางอื่น ความเค้นอัดที่เกิดขึ้นตามแนวแกนจึงมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดตามแนวแกนในแผ่นเมทัลชีท



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางด้านข้างในแผ่นเมทัลชีท

6. สรุปผลการศึกษา

ผลการศึกษาจากแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ชี้ให้เห็นถึงกระบวนการพัฒนากำลังรับแรงตามแนวแกนของเสาคอนกรีตเมื่อมีการเสริมกำลังด้วยเมทัลชีท ผลการวิเคราะห์ยืนยันให้เห็นว่าการใช้เมทัลชีทโอบรัดเสาคอนกรีตมีส่วนช่วยด้านการขยายตัวไปพร้อมๆ กันกับการร่วมรับแรงตามแนวแกนของเสา นอกจากนี้ยังพบประเด็นที่น่าสนใจคือ เมทัลชีทจะเกิดการครากเนื่องจากการรับแรงในทิศทางการตามแนวแกนของเสาเป็นหลัก จึงทำให้บทบาทของเมทัลชีทในการต้านทานการขยายตัวเป็นไปอย่างไม่เต็มประสิทธิภาพ ซึ่งประเด็นที่พบนี้ได้นำไปสู่แนวคิดในการศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการเพิ่มกำลังของเสาคอนกรีตโดยใช้เมทัลชีทในงานวิจัยของผู้ศึกษาที่กำลังดำเนินอยู่ในปัจจุบัน

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Khamthong M, Boonpichetvong M, Pannachet T. Axial Compression Strengthening of Concrete Columns Confined by Metal Sheet. Annual Concrete Conference 7; 2011 Oct 19-21; Rayong. Thailand; 2011. (in Thai).
- [2] Wu YF, Wei YY. Effect of cross-sectional aspect ratio on the strength of CFRP-confined rectangular concrete columns. *Engineering Structures*. 2010;32:32-45.
- [3] Lam L, Teng JG. Design-oriented stress–strain model for FRP-confined concrete. *Construction and Building Materials*. 2003;17:471-89.
- [4] Wu G, Lu ZT, Wu ZS. Strength and ductility of concrete cylinders confined with FRP composites. *Construction and Building Materials*. 2006;20:134-48.
- [5] Wang LM, Wu YF. Effect of corner radius on the performance of CFRP-confined square concrete columns: Test. *Engineering Structures*. 2008;30:493–505.
- [6] Cole C, Belarbi A. Confinement characteristics of rectangular FRP jacketed RC columns. *Proceedings of the fifth international symposium on fiber reinforced polymer for reinforce concrete structures (FRPRCS-5)*; Cambridge. 2001. p. 823-32.
- [7] Thériault M, Neale K, Claude S. Fiber-Reinforced Polymer-Confined Circular Concrete Columns: Investigation of Size and Slenderness Effects. *Journal of Composites for Construction*. 2004;8(4):323-31.
- [8] Mirmiran A, Zagers K, Yuan W. Nonlinear finite element modeling of concrete confined by fiber composites. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2000;35:79-96.
- [9] Rochette P, Labossiere P. A plasticity approach for concrete columns confined with composite materials. In: El-Badry MM, editor. *Proceeding of the Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*; CSCE. 1996. p. 359-66.
- [10] Yu T, Teng JG, Wong YL, Dong SL. Finite element modeling of confined concrete-I: Drucker-Prager type plasticity model. *Engineering Structures*. 2010;32:665-79.
- [11] Karabinis A, Rousakis T, Manolitsi G. 3D Finite-Element Analysis of Substandard RC Columns Strengthened by Fiber-Reinforced Polymer Sheets. *Journal of Composites for Construction* © ASCE. 2008;12:531-40.
- [12] MSC Software Corporation. *Marc 2010 Volume A: Theory and User Information*. 2010.
- [13] Richart FE, Brandtzaeg A, Brown RL. *The Failure of Plain and Spirally Reinforced Concrete in Compression*. Engineering Experimental Station Bull. No. 190. Urbana, Illinois: University of Illinois; 1929.
- [14] Popovics S. A numerical approach to the complete stress strain curve for concrete. *Cement and concrete research*. 1973;3(5): 583-99.
- [15] Lertsrisakulrat T, Watanabe K, Matsuo M, Niwa J. Experimental Study on Parameters in Localization of Concrete Subjected to Compression. *J. Materials, Conc. Struct., Pavements, JSCE*. 2001;50:309-21.