CORE
Metadata, citation and similar papers at core.ac.uk
Provided by Srinakharinwirot University: SWU e-Journals System

วารสารวิชาการ
อุตสาหกรรมศึกษา

วารสารวิชาการอุตสาหกรรมศึกษา ปีที่ 1 ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน 2550 (67-76)

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กเสริม ระยะหุ้มเหล็กเสริม และปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตในมวลคอนกรีตเสริมเหล็ก กับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธี คอนกรีต เทส แฮมเมอร์

สราวุธ สร้อยเรืองศรี, ไพรัช วงศ์ยุทธไกร, โอภาส สุขหวาน
สาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
114 สุขุมวิท 23 เขตวัฒนา กรุงเทพฯ 10110

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีจุดมุ่งหมาย เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กเสริมในมวลคอนกรีตเสริมเหล็กและระยะหุ้มเหล็กเสริม กับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธี คอนกรีต เทส แฮมเมอร์ และเพื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธี Concrete Hammer Test บนมวลคอนกรีตที่มีลักษณะการเสริมเหล็กต่าง ๆ ในแต่ละปฏิภาคส่วนผสม (Mix design) โดยในการวิจัยนั้นผู้วิจัยได้จัดทำมวลคอนกรีตทดสอบแบ่งตามปฏิภาคส่วนผสมทั้งหมด 3 ค่า คือ 180 ksc. , 240 ksc. และ 320 ksc. โดยในแต่ละปฏิภาคส่วนผสมนั้นจะจัดให้มีปริมาณการเสริมเหล็กตั้งแต่ ร้อยละ 2 จนถึง ร้อยละ 8 เมื่อเทียบกับหน้าตัดคอนกรีตทดสอบ และมีการจัดวางเหล็กเสริมที่ระยะหุ้มเหล็กแตกต่างกันตั้งแต่ 2.5 ซม. , 5.0 ซม. และ 7.5 ซม. จากนั้นทำการทดสอบด้วย Concrete Test Hammer แล้วนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบและหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่เกิดขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ปริมาณเหล็กเสริมในมวลคอนกรีตเสริมเหล็กและระยะหุ้มเหล็กเสริม นั้น มีความสัมพันธ์กับค่ากำลังอัดที่ได้การทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธี คอนกรีต เทส แฮมเมอร์ โดยผู้วิจัยได้สรุปและสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในแต่ละปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต เพื่อใช้เป็นแนวทางและเกณฑ์ในการประเมินผลความมั่นคงแข็งแรงทางด้านวิศวกรรมโครงสร้าง

คำสำคัญ *: คอนกรีตเสริมเหล็ก กำลังรับแรงอัด การทดสอบแบบไม่ทำลาย คอนกรีตเทสต์แฮมเมอร์*

ภูมิหลัง

ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้าง ปัจจัยที่ก่อให้เกิดความสำเร็จนั้น นอกจากเทคนิควิธีการตลอดจนเครื่องมือเครื่องจักรที่พัฒนาขึ้นมากตามลำดับแล้ว อีกส่วนหนึ่งซึ่งนับว่ามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งก็คือวัสดุที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้าง ซึ่งจะทำให้งานก่อสร้างนั้นเกิดขึ้นได้ด้วยค่าใช้จ่ายที่ประหยัดและเหมาะสมที่สุด สำหรับวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งตั้งแต่อดีตจนกระทั่งถึงปัจจุบันก็คือคอนกรีต จะเห็นได้ว่างานก่อสร้างที่มีอยู่ส่วนใหญ่นั้นจะใช้คอนกรีตเป็นวัสดุหลัก ทั้งตัวอาคารหรือตลอดจนงานก่อสร้างระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ เช่น งานก่อสร้างถนน งานก่อสร้างสะพาน งานก่อสร้างสนามบินเป็นต้น ซึ่งสาเหตุหลักที่คอนกรีตได้ถูกใช้เป็นวัสดุหลักในงานก่อสร้างนั้น เนื่องจากสามารถสร้างให้มีรูปร่างลักษณะตามที่ต้องการได้ ไม่ถูก

จำกัดเหมือนวัสดุอื่นๆ อีกทั้งความสามารถในการรับแรงอัดได้สูง และมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าวัสดุที่ต้องการกำลังรับแรงได้เท่ากัน

เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้เป็นวัสดุหลักในงานก่อสร้างนั้น มีความสามารถในการรับกำลังรับแรงอัดได้สูง แต่ในขณะเดียวกันความสามารถในการรับแรงดึงนั้นต่ำมาก ซึ่งหากใช้เพียงคอนกรีตล้วนนั้น จะไม่สามารถทำให้องค์อาคารหรือส่วนประกอบต่างๆนั้นเกิดขึ้นได้ เนื่องจากในแต่ละชิ้นส่วนนั้นจะประกอบไปด้วยแรงอัดและแรงดึงในชิ้นส่วนเดียวกัน ดังนั้นจึงเกิดการพัฒนาให้ใช้ความสามารถของวัสดุ 2 ประเภทเข้าด้วยกัน ซึ่งก็คือใช้คอนกรีตในการรับแรงอัดและจะใช้เหล็กในการรับส่วนที่เป็นแรงดึง ซึ่งรวมเรียกว่า " คอนกรีตเสริมเหล็ก " ซึ่งจะเป็นวัสดุหลักที่ใช้ในการออกแบบและก่อสร้างงานทางด้านวิศวกรรมโครงสร้างตั้งแต่อดีตจนแม้ทุกวันนี้ โดยในปัจจุบันมีการก่อสร้างเกิดขึ้นเพื่อรองรับความต้องการต่างๆอย่างมากมาย ซึ่งสิ่งก่อสร้างประเภทต่างๆที่สร้างขึ้นมานั้นจะเป็นสถานที่มีสาธารณชนเข้าไปใช้ประโยชน์เป็นจำนวนมาก แต่เมื่อเวลาผ่านไป ความชำรุดเสียหายในส่วนต่างๆย่อมเกิดขึ้น ทั้งจากในการเสื่อมสภาพของตัววัสดุ ซึ่งหากไม่มีการตรวจสอบและหาแนวทางแก้ไขแล้วก็จะทำให้เกิดผลเสียหายต่อทั้งชีวิตและทรัพย์สินได้ โดยวิธีการตรวจสอบวัสดุที่เป็นคอนกรีตนั้นมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ที่นิยมและใช้อยู่อย่างแพร่หลายนั้นจะเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive test) ซึ่งเป็นการทดสอบที่ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติวัสดุโดยที่ไม่เกิดความเสียหายหรือแตกหัก หรือหมดสภาพที่จะนำมาใช้งานต่อได้ มีอยู่ 3 วิธีการที่นิยมใช้กันอยู่ได้แก่

1. การตรวจสอบโดยการสังเกต (Visual inspection) เป็นการตรวจสอบด้วยตาเปล่า โดยผู้ตรวจสอบจะต้องมีความชำนาญพิเศษ มีโอกาสที่จะเกิดความไม่แน่นอนสูง

2. การตรวจสอบด้วย Portable Ultrasonic Non Destructive Integrity Tester จะเป็นการใช้หลักการในการส่งผ่านตัวกลางของคลื่นเสียงผ่านมวลทดสอบและแสดงคุณสมบัติของคอนกรีตจากความเร็วคลื่นที่ส่งผ่าน ซึ่งต้องอาศัยผู้ที่ชำนาญการตรวจสอบและแปรผลข้อมูล

3. การตรวจสอบด้วย Concrete Test Hammer

สำหรับการตรวจสอบคุณสมบัติของคอนกรีตทั้ง 3 วิธีนั้น วิธีการที่เป็นที่นิยมและได้ผลที่มีค่าความน่าเชื่อถือก็คือ การตรวจสอบด้วย Concrete Test Hammer เนื่องจากมีขั้นตอนการตรวจสอบที่ไม่ซับซ้อนและสามารถเข้าทำการตรวจสอบได้เพียงคนเดียว ซึ่งในหลักการของวิธีการทดสอบดังกล่าวนั้นจะอาศัยคุณสมบัติการดูดซึมพลังงานจากค่า Stress wave ratio ซึ่งเป็นอัตราส่วนของคลื่นความเค้นอัดที่สะท้อนกลับมาจากเนื้อคอนกรีตกับคลื่นที่ส่งผ่านแท่งกดของเครื่องมือ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซึมพลังงานก็คือความหนาแน่น ความแข็ง ความเรียบของผิว รวมไปถึงโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ

ในการทดสอบด้วย Concrete Test Hammer นั้น วัตถุประสงค์หลักก็คือต้องการที่จะรู้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตล้วนที่ทำการทดสอบนั้น เพื่อนำไปประกอบการคำนวณตามหลักการทางวิศวกรรมประเมินหาค่าการรับน้ำหนักของชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งเป็นวัสดุประเภท Composite material แต่เนื่องจากการทดสอบด้วยวิธีดังกล่าวในความเป็นจริงแล้ว จะเป็นการทดสอบบนพื้นผิวของคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งสิ้น ซึ่งในการเสริมเหล็กนั้น จะทำให้ความหนาแน่นซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งในการดูดซึมพลังงานที่ส่งถ่ายไปยังเครื่องมือทดสอบ Concrete Test Hammer เปลี่ยนไป (อดิเทพ ตรีรัตน์ตระกูล และ มงคล ชัยวัฒนาภา. 2539 : บทคัดย่อ) อันเป็นผลให้การอ่านค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ได้ จะเป็นค่ากำลังรับแรงอัดที่เกิดจากวัสดุผสม (Composite Material) แต่เนื่องจากวิธีการดังกล่าวนี้ ยังไม่มีการทดสอบถึงความสัมพันธ์ของค่ากำลังรับแรงอัดที่อ่านได้จาก Concrete Test Hammer กับลักษณะการเสริมเหล็กที่เปลี่ยนไปในมวลคอนกรีตที่ทำการทดสอบ จึงอาจทำให้ค่าที่ได้นั้นคลาดเคลื่อนไป

ดังนั้นในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว จึงควรจะมีการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับลักษณะการเสริมเหล็กที่เปลี่ยนไป อันได้แก่ ความหนาแน่นของเหล็กเสริมในมวลคอนกรีต และการจัดวางเหล็กที่บริเวณใกล้กับพื้นผิวมวลคอนกรีต ที่จะทำการทดสอบ โดยผู้วิจัยจะทำการหาความสัมพันธ์ดังกล่าวที่ค่าปฏิภาคส่วนผสม (Mixed design) ต่างๆ ซึ่งจะได้เป็นข้อมูลสำหรับการอ่านค่าการทดสอบที่สามารถนำไปวิเคราะห์ผล

เพื่อประเมินความความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างที่เป็น Composite Material ประเภทคอนกรีตเสริมเหล็กได้

ความมุ่งหมายของการวิจัย

เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กเสริมในมวลคอนกรีตเสริมเหล็ก กับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธี Concrete Test Hammer

เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะหุ้มเหล็กเสริมในมวลคอนกรีตเสริมเหล็ก กับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธี Concrete Test Hammer

เพื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธี Concrete Hammer Test บนมวลคอนกรีตที่มีลักษณะการเสริมเหล็กต่าง ๆ ในแต่ละปฏิภาคส่วนผสม (Mixed design)

ความสำคัญของการวิจัย

การวิจัยเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กเสริมและระยะหุ้มเหล็กเสริมในมวลคอนกรีตเสริมเหล็ก กับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลาย ด้วยวิธี Concrete Test Hammer โดยข้อมูลที่ได้นั้นจะอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กเสริมในมวลคอนกรีตเสริมเหล็ก กับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต และความสัมพันธ์ระหว่างระยะหุ้มเหล็กเสริมในมวลคอนกรีตเสริมเหล็ก กับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธี Concrete Test Hammer ที่แต่ละปฏิภาคส่วนผสม (Mixed design) ซึ่งจะสร้างความเชื่อมั่นในการตรวจสอบคุณสมบัติด้านความสามารถในการรับแรงอัดในการทำการทดสอบแบบไม่ทำลาย และเป็นข้อมูลในการนำไปวิเคราะห์ความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ทั้งในงานวิศวกรรมโครงสร้างขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ที่มีลักษณะการเสริมเหล็กที่แตกต่างกันไป

ขอบเขตของการวิจัย

1. การวิจัยเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กเสริมและระยะหุ้มเหล็กเสริมในมวลคอนกรีตเสริมเหล็ก กับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลาย ด้วยวิธี Concrete Test Hammer นั้นจะเป็นการศึกษาโดยการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลาย ด้วยวิธี Concrete Test Hammer Type R บนมวลคอนกรีตตัวอย่างที่จัดทำขึ้นตามมาตรฐาน BS 1881 : PART 3 " Method of making and curing test specimens " แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณและลักษณะการจัดวางเหล็กเสริมในมวลตัวอย่างทดสอบนั้น โดยที่ความสัมพันธ์ที่ต้องการศึกษามีดังนี้

1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเสริมเหล็กที่เปลี่ยนไปตั้งแต่ 0 – 8 % เมื่อเทียบกับพื้นที่หน้าตัดคอนกรีตทดสอบ กับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลาย ด้วยวิธี Concrete Test Hammer ที่ค่ากำลังอัดตาม Mix design ที่ 180, 240 และ 320 ksc.

1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะหุ้มเหล็กเสริมในมวลคอนกรีตเสริมเหล็ก (Covering) ที่เปลี่ยนไปตั้งแต่ 2.5, 5.0 และ 7.5 เซนติเมตร กับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลาย ด้วยวิธี Concrete Test Hammer ที่ค่ากำลังอัดตาม Mix design ที่ 180, 240 และ 320 ksc.

2. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ชิ้นงานทดสอบเป็น มวลคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีลักษณะการเสริมเหล็กที่แตกต่างกัน
โดยทำการทดสอบที่ 3 ค่าของปฏิภาคส่วนผสมเพื่อรับกำลังอัดของมวลคอนกรีต ดังต่อไปนี้

- ปฏิภาคส่วนผสมที่ 1 เพื่อรับกำลังอัดไม่น้อยกว่า 180 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc)
- ปฏิภาคส่วนผสมที่ 2 เพื่อรับกำลังอัดไม่น้อยกว่า 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร(ksc)
- ปฏิภาคส่วนผสมที่ 3 เพื่อรับกำลังอัดไม่น้อยกว่า 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc)

มวลคอนกรีตทดสอบ จะทำการเสริมเหล็กที่มีลักษณะแตกต่างกันไป โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณการเสริมเหล็กตั้งแต่ 0,2,4,6 และ 8% โดยเทียบจากพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมกับพื้นที่หน้าตัดคอนกรีตทดสอบ นอกจากนี้ยังทำการเปลี่ยนแปลงระยะหุ้มเหล็กเสริมตั้งแต่ 2.5, 5.0 และ 7.0 เซนติเมตร ในแต่ละปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตที่ทำการทดสอบ

3. ตัวแปร

ตัวแปรต้น คือ คุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยแบ่งออกเป็น

3.1 ปริมาณการเสริมเหล็กในมวลคอนกรีตเสริมเหล็ก

3.2 ระยะหุ้มเหล็กเสริมในมวลคอนกรีตเสริมเหล็ก

3.3 ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตที่แตกต่างกัน

ตัวแปรตาม คือ การรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธี Concrete Test Hammer

สมมติฐานการวิจัย

ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธี Concrete Test Hammer มีความสัมพันธ์กับปริมาณเหล็กเสริม ระยะหุ้มเหล็กเสริมและปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตในมวลคอนกรีตเสริมเหล็ก

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัย เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเหล็กจากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธี Concrete Test Hammer กับลักษณะการเสริมเหล็กในมวลคอนกรีตทดสอบที่เปลี่ยนไป ได้ใช้รูปแบบการวิจัยเชิงกึ่งทดลอง (Quasi - Experimental Research) โดยมีลำดับขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ดังนี้

1. การกำหนดประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ชิ้นงานทดสอบเป็น มวลคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีลักษณะการเสริมเหล็กที่แตกต่างกัน โดยทำการทดสอบที่ 3 ค่าของปฏิภาคส่วนผสมเพื่อรับกำลังอัดของมวลคอนกรีต ดังต่อไปนี้

- ปฏิภาคส่วนผสมที่ 1 เพื่อรับกำลังอัดไม่น้อยกว่า 180 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc)
- ปฏิภาคส่วนผสมที่ 2 เพื่อรับกำลังอัดไม่น้อยกว่า 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc)
- ปฏิภาคส่วนผสมที่ 3 เพื่อรับกำลังอัดไม่น้อยกว่า 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc)

โดยแต่ละมวลคอนกรีตทดสอบ จะทำการเสริมเหล็กที่มีลักษณะแตกต่างกันไป โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณการเสริมเหล็กตั้งแต่ 0,2,4,6 และ 8% โดยเทียบจากพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมกับพื้นที่หน้าตัดคอนกรีตทดสอบ นอกจากนี้ยังทำการเปลี่ยนแปลงระยะหุ้มเหล็กเสริมตั้งแต่ 2.5, 5.0 และ 7.5 เซนติเมตร ในแต่ละปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตที่ทำการทดสอบ ดังแสดงรายละเอียดดังนี้

มวลคอนกรีตมาตรฐานที่ไม่มีการเสริมเหล็ก จำนวน 3 ตัวอย่าง

มวลคอนกรีตขนาด 15.0x15.0x120.0 ซม. มีเสริมเหล็กร้อยละ 2,4,6และ8 โดยจัดวางเหล็กห่างจากผิวมวลคอนกรีต 2.5 เซนติเมตร จำนวน 2 ตัวอย่าง

มวลคอนกรีตขนาด 15.0x15.0x120.0 ซม. มีเสริมเหล็กร้อยละ 2,4,6และ8 โดยจัดวางเหล็กห่างจากผิวมวลคอนกรีต 5.0 เซนติเมตร จำนวน 2 ตัวอย่าง

มวลคอนกรีตขนาด 15.0x15.0x120.0 ซม. มีเสริมเหล็กร้อยละ 2,4,6และ8 โดยจัดวางเหล็กห่างจากผิวมวลคอนกรีต 7.5 เซนติเมตร จำนวน 2 ตัวอย่าง

2. การกำหนดเครื่องมือในการวิจัย

เครื่องมือทดลอง เป็นเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแบบไม่ทำลาย Concrete Hammer หรือ Schmidt Rebound Hammer ตัวเครื่องมือจะประกอบไปด้วยค้อน (mass) แกนเหล็กแท่งกด (plunger) ตัวสปริงและมาตรสำหรับอ่านค่า (scale) ทำการทดสอบบนพื้นผิวตัวอย่างคอนกรีตทดสอบ ซึ่งสามารถประเมินค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ทำการทดสอบ โดยอาศัยหลักการตามที่อ้างได้จากการศึกษาเชิงทฤษฎีของการทดสอบโครงสร้างแบบไม่ทำลาย ในรวมบทความโครงงานทางวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2539

(อดิเทพ ตรีรัตน์ตระกูล และมงคล ชัยวัฒนาภา. 2539 : 109-114) ซึ่งกล่าวว่า การทดสอบคอนกรีตด้วยรีบาวน์แฮมเมอร์นั้น อาศัยคุณสมบัติการดูดซึมพลังงาน จากค่า stress wave ratio ซึ่งเป็นอัตราส่วนของคลื่นความเค้นอัดที่สะท้อนกลับจากเนื้อคอนกรีตทดสอบ กับคลื่นที่ส่งผ่านแท่งกดของ Concrete Hammer ในระหว่างการกระแทก โดยการวัดพลังงานจะวัดจาก " แอมพลิจูด " (amplitude) ซึ่งแสดงถึงพลังงานของคลื่น โดยคอนกรีตที่มีกำลังสูง จะมีการดูดซึมพลังงานน้อย ทำให้คลื่นที่สะท้อนกลับมีค่ามาก ปรากฏบนมาตรอ่านค่าบนเครื่องมือทดลอง และสามารถนำไปประเมินเป็นค่ากำลังรับแรงของคอนกรีตได้ ทั้งนี้ปัจจัยที่ทำให้คอนกรีตมีการดูดซึมพลังงานนั้น จะประกอบด้วย ความหนาแน่น ความแข็ง ความเรียบของผิว รวมถึงโมดูลัสยืดหยุ่น

การตรวจสอบคุณภาพของ เครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแบบไม่ทำลาย Concrete Hammer หรือ Schmidt Rebound Hammer นั้นจะมีวิธีการสอบเทียบตามมาตรฐานในคู่มือการใช้งาน (Operating Instruction)

เครื่องมือรวบรวมข้อมูล ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธี Concrete Test Hammer ตามการเสริมเหล็กในมวลคอนกรีตที่เปลี่ยนไป มีลักษณะเป็น แบบวิเคราะห์เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของมวลคอนกรีตทดสอบ ด้วยวิธี Concrete Test Hammer แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ดังนี้

รูปแบบที่ 1 ใบบันทึกการทดสอบค่าแรงอัดของคอนกรีตล้วน แบ่งรายละเอียดเป็น 3 ตอนคือ

ตอนที่ 1 มีลักษณะเป็นแบบสังเกต เพื่อบันทึกลักษณะของมวลคอนกรีตทดสอบ เกี่ยวกับ ค่ากำลังอัดที่ใช้ในการออกแบบ วันที่ทำการผสมคอนกรีต และวันที่ทำการทดสอบคอนกรีต

ตอนที่ 2 มีลักษณะเป็นแบบสังเกต เพื่อบันทึกค่าของ Rebound Number (R) ที่อ่านได้จากมาตรวัดบนเครื่องมือ เมื่อทำการกดลงบนมวลคอนกรีตทดสอบตลอดจนทิศทางการกดเครื่องมือทดสอบ ในแต่ละส่วนนั้นจะเป็นการทดสอบบนด้านที่ตั้งฉากกับเหล็กเสริมหลักในมวลคอนกรีตทดสอบ ในแต่ละส่วนนั้นจะประกอบด้วยตารางบันทึกค่า 10 ครั้ง

ตอนที่ 3 มีลักษณะเป็นแบบสังเกต เพื่อบันทึกค่าของ การทดสอบแบบทำลาย

รูปแบบที่ 2 ใบบันทึกการทดสอบค่าแรงอัดของคอนกรีตเสริมเหล็กแบบไม่ทำลาย แบ่งรายละเอียดเป็น 2 ตอนคือ

ตอนที่ 1 มีลักษณะเป็นแบบสังเกต เพื่อบันทึกลักษณะของมวลคอนกรีตทดสอบ เกี่ยวกับ ค่ากำลังอัดที่ใช้ในการออกแบบ ค่าระยะหุ้มเหล็กเสริม วันที่ทำการผสมคอนกรีต และวันที่ทำการทดสอบคอนกรีต

ตอนที่ 2 มีลักษณะเป็นแบบสังเกต เพื่อบันทึกค่าของ Rebound Number (R) ที่อ่านได้จากมาตรวัดบนเครื่องมือ เมื่อทำการกดลงบนมวลคอนกรีตทดสอบตลอดจนทิศทางการกดเครื่องมือทดสอบ ในแต่ละส่วนนั้นจะเป็นการทดสอบบนด้านที่ตั้งฉากกับเหล็กเสริมหลักในมวลคอนกรีตทดสอบ ในแต่ละส่วนนั้นจะประกอบด้วยตารางบันทึกค่า 10 ครั้ง

การสร้างและตรวจสอบคุณภาพของเครื่องมือรวบรวมข้อมูล ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธี Concrete Test Hammer ตามการเสริมเหล็กในมวลคอนกรีตที่เปลี่ยนไป ดำเนินการดังนี้

1. ทำการศึกษาวิธีการทดสอบเพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต แบบไม่ทำลายแบบ ด้วยวิธี Concrete Hammer Test

2. กำหนดโครงสร้างของเครื่องมือรวบรวมข้อมูล ตามที่ได้ศึกษาจากวิธีการทดสอง

3. ทำการร่างเครื่องมือรวบรวมข้อมูลตามโครงสร้างของเครื่องมือที่กำหนดขึ้น

4. นำร่างเครื่องมือรวบรวมข้อมูล ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธี Concrete Test Hammer ตามการเสริมเหล็กในมวลคอนกรีตที่เปลี่ยนไป ให้ผู้ทรงคุณวุฒิด้านต่าง ๆ ทำการตรวจสอบและให้ข้อเสนอแนะในการจัดทำเครื่องมือรวบรวมข้อมูลทดสอบ ดังนี้

4.1 ผู้ทรงคุณวุฒิด้านงานวิจัย 1 คน

4.2 ผู้ทรงคุณวุฒิด้านการทดสอบคอนกรีต 2 คน ซึ่งเป็นวิศวกรระดับสามัญวิศวกรขึ้นไป หรือเป็นวิศวกรผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบคุณภาพของคอนกรีต ไม่ต่ำกว่า 5 ปี

4.3 ผู้ทรงคุณวุฒิด้านการวิเคราะห์งานวิศวกรรมโครงสร้าง 2 คน ซึ่งเป็นวิศวกรระดับสามัญวิศวกรขึ้นไป หรือเป็นวิศวกรผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับงานออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ไม่ต่ำกว่า 5 ปี

5. ทำการปรับปรุงร่างเครื่องมือรวบรวมข้อมูล ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธี Concrete Test Hammer ตามการเสริมเหล็กในมวลคอนกรีตที่เปลี่ยนไป ที่ปรับปรุงตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ

6. ทำการปรับปรุงเครื่องมือรวบรวมข้อมูล ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธี Concrete Test Hammer ตามการเสริมเหล็กในมวลคอนกรีตที่เปลี่ยนไป

วิธีการรวบรวมข้อมูล ทำการรวบรวมข้อมูลตามลำดับขั้นตอนดังนี้

ขอหนังสือแนะนำตัวจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ถึงวิศวกรโครงการหรือหน่วยงาน เพื่อขอความอนุเคราะห์ในการจัดทำมวลตัวอย่างทดสอบ และทำการเก็บรวบรวมข้อมูล

วิธีดำเนินการวิจัย

1.ทำการกำหนดค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่จะทำการทดลอง โดยกำหนดไว้ 3 ค่าการทดสอบ โดยในการวิจัยครั้งนี้ จะกำหนดใช้คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ตามการคำนวณอัตราส่วนผสม (Mixed design) ที่ 180 , 240 และ 320 ksc. ซึ่งเป็นค่ากำลังรับแรงอัดที่นิยมใช้ในงานวิศวกรรมโครงสร้างทั่วไป

2.ทำการคำนวณอัตราส่วนผสมที่ต้องใช้สำหรับทำมวลคอนกรีตทดสอบ ซึ่งในการวิจัยนี้ จะใช้คอนกรีตผสมสำเร็จที่ได้มีการคำนวณอัตราส่วนผสมตามความต้องการแล้ว โดยการขอความอนุเคราะห์วัสดุจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

3. จัดทำมวลคอนกรีตทดสอบ โดยในแต่ละอัตราส่วนผสมมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

มวลคอนกรีตที่จัดทำ จะแบ่งเป็นมวลคอนกรีตชุดควบคุม และมวลคอนกรีตทดสอบที่ให้ค่าตัวแปรต่าง ๆ โดยมวลคอนกรีตควบคุมจะเป็นคอนกรีตล้วนทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาด 15.0 x 15.0 x 15.0 เซนติเมตร จัดทำตามกระบวนการทำก้อนตัวอย่างมาตรฐาน BS 1881: PART 3 ซึ่งคิดเป็นพื้นที่หน้าตัดของมวลคอนกรีตทดสอบแต่ละก้อนเท่ากับ 225 ตารางเซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง

สำหรับมวลคอนกรีตที่ทำการทดลอง ที่กำหนดมีการให้ตัวแปรต่าง ๆ นั้น จัดทำเป็นมวลคอนกรีตทดสอบขนาดพื้นที่หน้าตัด 15.0x15.0 ยาว 120.0 เซนติเมตร โดยมีการเสริมเหล็กเมื่อเทียบกับหน้าตัดเป็นจำนวนร้อยละ 2 , 4 , 6 และ 8 ตามลำดับ ซึ่งในแต่ละอัตราส่วนผสมนั้นจะจัดวางการเสริมเหล็กตามระยะหุ้มของคอนกรีตที่ 2.5 ซม.,5.0 ซม. และ 7.5 ซม. ตามลำดับ

ในมวลตัวอย่างที่ทำการเสริมเหล็กประมาณ 2% ใช้เหล็กเสริมกลม SR24 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. จำนวน 8 เส้น คิดเป็นร้อยละ 2.26

ในมวลตัวอย่างที่ทำการเสริมเหล็กประมาณ 4% ใช้เหล็กเสริมกลม SR24 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. จำนวน 14 เส้น คิดเป็นร้อยละ 3.96

ในมวลตัวอย่างที่ทำการเสริมเหล็กประมาณ 6% ใช้เหล็กเสริมกลม SR24 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. จำนวน 21 เส้น คิดเป็นร้อยละ 5.94

ในมวลตัวอย่างที่ทำการเสริมเหล็กประมาณ 8% ใช้เหล็กเสริมกลม SR24 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มม. จำนวน 28 เส้น คิดเป็นร้อยละ 7.92

เมื่อครบอายุการบ่มที่ 28 วัน จึงทำการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของมวลคอนกรีตทดสอบ แต่ละก้อนด้วย Concrete hammer หรือ Schmidt rebound hammer และบันทึกค่า Rebound Number (R) ที่ปรากฏบนมาตรวัดของเครื่องมือ และบันทึกทิศทางการกดเครื่องมือลงบนมวลคอนกรีตทดสอบ โดยทดสอบเฉพาะด้านที่มีระนาบขนานไป

กับเหล็กเสริมหลักที่เป็นตัวแปร ในแต่ละส่วนทำการกด Concrete hammer ทดสอบค่าทั้งสิ้น 10 ครั้ง และทำการหาค่าเฉลี่ยในแต่ละด้าน ดังนั้น ใน 1 ชุดการทดสอบของแต่ละอัตราส่วนผสมนั้น จะมีค่าทดสอบทั้งสิ้น 270 ค่า

ทำการปรับแก้ค่าตามการสอบเทียบเครื่องมือ และทิศทางการกดเครื่องมือลงบนมวลคอนกรีต ตามตารางที่ระบุไว้ในคู่มือการใช้งานนำมวลคอนกรีตควบคุมที่ไม่มีการเสริมเหล็ก ไปทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยวิธีการทดสอบแบบทำลาย อัตราส่วนผสมละ 3 ก้อน แล้วหาค่าเฉลี่ย เพื่อนำค่าไปเปรียบเทียบกับค่าที่อ่านได้จาก Concrete hammer

สรุปผลการวิจัย

1. ผลการวิจัยของชุดข้อมูลปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตที่ 180 ksc.

จากค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรในชุดทดสอบคอนกรีตปฏิภาคส่วนผสมที่ 180 ksc. นั้น เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม พบว่าปริมาณของเหล็กเสริมในมวลคอนกรีต (Percentage of Rebar) มีความสัมพันธ์กับค่า Rebound Number อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 และระยะหุ้มเหล็ก (Covering) มีความสัมพันธ์กับค่า Rebound Number อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เพื่อเป็น Model ที่ใช้สำหรับการทำนายค่า ซึ่งได้ผลดังนี้

$$R = 29.927-0.301C+0.188P \quad ---(1)$$

เมื่อ R แทน ค่า Rebound Number
C แทน ระยะหุ้มเหล็ก(Covering)
P แทน ปริมาณการเสริมเหล็กในคอนกรีต

2. ผลการวิจัยของชุดข้อมูลปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตที่ 240 ksc.

จากค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรในชุดทดสอบคอนกรีตปฏิภาคส่วนผสมที่ 240 ksc. นั้น เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม พบว่ามีเพียงตัวแปรของระยะหุ้มเหล็ก (Covering) ที่มีความสัมพันธ์กับค่า Rebound Number อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เพื่อเป็น Model ที่ใช้สำหรับการทำนายค่า ซึ่งได้ผลดังนี้

$$R = 34.047- 0.158C+ 0.127P \quad ---(2)$$

3. ผลการวิจัยของชุดข้อมูลปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตที่ 320 ksc.

จากค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรในชุดทดสอบคอนกรีตปฏิภาคส่วนผสมที่ 320 ksc. นั้น เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม พบว่าปริมาณของเหล็กเสริมในมวลคอนกรีต (Percentage of Rebar) มีความสัมพันธ์กับค่า Rebound Number อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01 และระยะหุ้มเหล็ก (Covering) มีความสัมพันธ์กับค่า Rebound Number อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เพื่อเป็น Model ที่ใช้สำหรับการทำนายค่า ซึ่งได้ผลดังนี้

$$R = 40.947 - 0.228C+ 0.243P \quad ---(3)$$

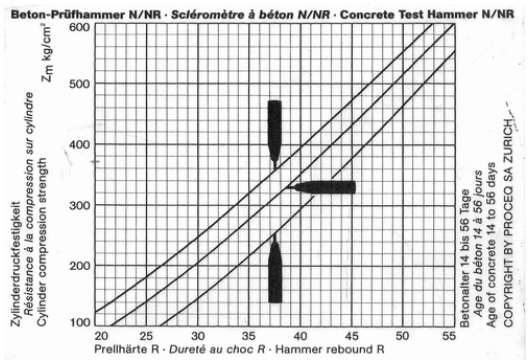
อภิปรายผล

จากผลการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กเสริมและระยะหุ้มเหล็กเสริมในมวลคอนกรีตเสริมเหล็ก กับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลาย ด้วยวิธี Concrete Test Hammer สามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

1. ตัวแปรอิสระ ซึ่งได้แก่ ปริมาณเหล็กเสริม ระยะหุ้มเหล็กเสริม มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับค่า Rebound Number ซึ่งเป็นตัวแปรตาม โดยเป็นผลเนื่องมาจากหลักการของ Concrete Test Hammer ที่ใช้การแปลผลจากพลังงานในการกระแทกมวลคอนกรีตแล้วสะท้อนกลับมายัง Scale ในตัวเครื่องมือ แต่เมื่อในมวล

คอนกรีตมีการเสริมเหล็กที่มีปริมาณแตกต่างกัน และมีระยะการจัดวางจากผิวคอนกรีตที่ไม่เท่ากัน ทำให้ความหนาแน่นในมวลคอนกรีตเปลี่ยนไป เป็นผลให้พลังงานที่สะท้อนกลับสู่ตัวเครื่องมีค่าแปรเปลี่ยนไปด้วย

2. จากผลการรวบรวมข้อมูลนั้น จะพบว่าค่า Rebound Number ที่ได้จากการทดสอบมวลคอนกรีตล้วนทรงลูกบาศก์มาตรฐานนั้น มีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบแบบทำลายซึ่งแสดงให้เห็นว่า วิธีการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ทำลายด้วย Concrete Test Hammer นั้น ให้ค่าการทดสอบที่น่าเชื่อถือได้ โดยพิจารณาค่า Rebound Number เทียบกลับเป็นค่ากำลังอัดของคอนกรีตแบบทำลาย ดังกราฟที่แสดงนี้



กราฟ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Rebound Number และ ค่ากำลังรับแรงอัด ทรงกระบอกมาตรฐาน (ksc.)ที่มา : Operating Instructions Concrete Test Type N and NR . (n.d.). Zurich: PROCEQ SA.

3. เมื่อพิจารณาค่า Rebound Number ทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบในแต่ละปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต พบว่าเมื่อกำหนดค่าระยะหุ้มเหล็กที่ 2.5 ซม. และปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้นนั้น ค่าของ Rebound Number จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวนั้นสูงกว่าการทดสอบบนคอนกรีตล้วน แต่เมื่อกำหนดค่าระยะหุ้มเหล็กที่ 5.0 ซม. และ 7.5 ซม. โดยมีปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้น พบว่าค่าของ Rebound Number จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบบนคอนกรีตล้วน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะหุ้มของคอนกรีตมีค่าน้อย และมีปริมาณเหล็กเสริมมาก ค่า Rebound Number ที่ทดสอบได้จะมีค่ามากกว่าการทดสอบจากคอนกรีตล้วน เนื่องจากพลังงานในการกดกระแทกและสะท้อนกลับมายังเครื่องมือนั้น ได้รับผลกระทบจากความหนาแน่นของเหล็กเสริมที่จัดวางอยู่ใกล้พื้นผิวทดสอบ โดยผลกระทบจากความหนาแน่นของเหล็กเสริมที่มีนั้น จะลดน้อยลงเมื่อการจัดวางเหล็กเสริมมีระยะหุ้มเหล็กตั้งแต่ 5.0 ซม.

4. จาก Model ทั้ง 3 ปฏิภาคของคอนกรีตที่ทำการทดสอบที่ได้นั้นจะพบว่า มีลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ สัมประสิทธิ์ของระยะหุ้มเหล็กเสริมมีค่าติดลบ และสัมประสิทธิ์ของปริมาณเหล็กเสริมมีค่าเป็นบวก แสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะหุ้มเหล็กมากขึ้นจะมีผลให้ค่า Rebound Number ลดลง ในขณะที่เมื่อปริมาณเหล็กเสริมมากขึ้นจะมีผลให้ค่า Rebound Number เพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสัมประสิทธ์ของตัวแปรอิสระและค่าคงที่แล้ว จะพบว่าส่งผลเพียงเล็กน้อย

5. จากผลการวิจัยที่ได้นี้ แสดงให้เห็นว่าผู้ที่ทำหน้าที่ในการตรวจสอบอาคาร หรือวิศวกรผู้ที่ทำหน้าที่ประเมินความมั่นคงแข็งแรงด้านวิศวกรรมโครงสร้าง โดยใช้เครื่องมือทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตแบบไม่ทำลายด้วย Concrete Test Hammer นี้ ควรมีการพิจารณาถึงรายละเอียดของโครงสร้างภายในของคอนกรีตร่วมด้วย เพื่อให้การทดสอบและประเมินผลความมั่นคงแข็งแรงนั้นถูกต้องและใกล้เคียงความจริงมากที่สุด ทั้งนี้ผู้วิจัยได้จัดทำตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Rebound Number กับระยะหุ้มเหล็กและปริมาณเหล็กเสริมในมวลคอนกรีตแยกแต่ละปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตไว้ในภาคผนวก เพื่อสะดวกในการอ่านและกำหนดเป็นเกณฑ์ในการประเมินผลความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้ เมื่อผู้ตรวจสอบโครงสร้างทราบค่าตัวแปรอิสระ ซึ่งได้แก่ ระยะหุ้มเหล็กเสริม และปริมาณการเสริมเหล็ก ซึ่งในการปฏิบัติงานจริงนั้นสามารถพิจารณาได้จากแบบงานวิศวกรรมโครงสร้าง หรือใช้การทดสอบอื่น ๆ ในการตรวจสอบค่าตัวแปรอิสระข้างต้น ควบคู่กันไป

ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์มากขึ้น ผู้วิจัยได้เสนอแนะแนวคิดเพื่อการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติม แก่ผู้สนใจดังนี้

1. ผลการทดลองที่ได้นี้ จะพบว่าโอกาสที่จะมีค่าความคลาดเคลื่อนจากการเตรียมตัวอย่างทดสอบค่อนข้างมาก ทั้งการเตรียมส่วนผสมของคอนกรีต ดังนั้นควรจะต้องมีการทดสอบแบบทำลายควบคู่ไปโดยตลอด นอกจากนี้การเตรียมตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กนั้น ค่าความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้จะมาจากการจัดวางเหล็กเสริม ซึ่งจะทำให้ค่าตัวแปรระยะหุ้มเหล็กคลาดเคลื่อนได้ ซึ่งในส่วนของผู้วิจัยนั้นได้ใช้การเชื่อมยึดทุกด้านกับแบบหล่อคอนกรีตเพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับ Model ที่ต้องการทดสอบมากที่สุด

2. ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตที่ 3 ค่าเท่านั้น ซึ่งเป็นค่าปฏิภาคส่วนผสมที่ใช้กันแพร่หลายและครอบคลุมงานโครงสร้างทั่วไป แต่เนื่องจากในปัจจุบัน การพัฒนาด้านคอนกรีตเทคโนโลยีเป็นไปอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดคอนกรีตที่ใช้งานเฉพาะทางเพิ่มมากขึ้น เช่น คอนกรีตกำลังอัดสูง คอนกรีตทนการกัดกร่อนที่รุนแรง คอนกรีตที่ให้กำลังอัดเร็ว ฯลฯ ซึ่งคอนกรีตเหล่านี้จะมีสารหรือวัสดุเพิ่มพิเศษผสมอยู่ด้วย ทำให้ความหนาแน่นและความสม่ำเสมอในมวลคอนกรีตเปลี่ยนไป ดังนั้น ผู้ที่สนใจในงานวิจัยนี้ จึงควรที่ทำการศึกษาหรือทดลองคอนกรีตพิเศษเหล่านี้ และสร้างเป็น Model เพื่อใช้สำหรับเป็นเกณฑ์ในการประเมินความมั่นคงแข็งแรงทางโครงสร้างต่อไป

บรรณานุกรม

[1.] “การเปรียบเทียบกำลังของคอนกรีตและคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายและการทดสอบแบบทำลาย,” (2539). ใน *รายงานวิจัยประจำปี2539 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต*. หน้า 257-258. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.

[2.] “การศึกษาเชิงทฤษฎีการทดสอบโครงสร้างแบบไม่ทำลาย,” (2539). ใน *รวมบทความ โครงงานทางวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*. หน้า 109-114. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[3.] จักรี ติยะวงศ์สุวรรณิ. (2540). *การศึกษาวิธีการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงโดยอาศัย ปริมาณเพสต์เติมเกิน.* (ออนไลน์). แหล่งที่มา : http:// www.thaibase.com ; หัวข้อ : งานวิจัย.

[4.] ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. (2537). *คอนกรีตเทคโนโลยี*. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: บริษัทผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด.

[5.] ธีรนิจ ประชุมชิต. (2534). *การประเมินกำลังอัดของคอนกรีตโดยวิธีการใช้คลื่นอุลตร้าโซนิค.* (ออนไลน์). แหล่งที่มา : http:// www.thaibase.com ; หัวข้อ : งานวิจัย.

[6.] นรินทร์ เลิศสาธิต. (2541). *การประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยวิธีอุลตร้าโซนิคพัลส์ เวโลซิตี้และวิธีรีบาวน์แฮมเมอน์ร่วมกัน.* (ออนไลน์). แหล่งที่มา : http:// www.thaibase.com ; หัวข้อ : งานวิจัย.

[7.] เมธา จันทร์ชื่น. (2540). ผลกระทบของชนิดมวลรวมหยาบต่อคอนกรีต. (ออนไลน์). แหล่งที่มา : http:// www.thaibase.com ; หัวข้อ : งานวิจัย.

[8.] รายงานผลการทดสอบค่ากำลังวัสดุ การรับน้ำหนักบรรทุกของพื้นและระนาบอาคาร โครงการธนาคารศรีนคร ถนนพัฒนาการ กรุงเทพมหานคร. (2541). กรุงเทพฯ: บริษัทวิศวกรที่ปรึกษา อาร์ เค วี จำกัด.

[9.] วินิต ช่อวิเชียร. (2539). *คอนกรีตเทคโนโลยี*. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[10.] สนั่น เจริญเผ่าและวินิต ช่อวิเชียร. (2537). *คอนกรีตเสริมเหล็ก.* พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[11.] สุดา เถลิงพงษ์. (2537). *ผลกระทบของมวลรวมหยาบต่อคอนกรีตกำลังสูงในประเทศไทย.* (ออนไลน์). แหล่งที่มา : http:// www.thaibase.com ; หัวข้อ : งานวิจัย.

[12.] Giovanni Pascale,Antonio Di Leo & Roberto Carli. (2003). *Evaluation of actual compressive*

strength of high strength concrete by NDT. (online). Available : http:// www.ndt.net /article.

[13.]K.Ramamurthy & N.Narayanan. (1999). *Factors influencing the density and compressive strength of aerated concrete.* (online). Available : http://www.t-telford.co.uk.

[14.]S.M.A. Tajalli & S.R.Rigden. (2000). *Partially and non-destructive testing of 40 concrete bridges.* (online). Available : http://www.t-telford.co.uk.

[15.]*Operating Instructions Concrete Test Type N and NR* . (n.d.). Zurich: PROCEQ SA.