

การทดสอบเปรียบเทียบกำลังรับโมเมนต์ดัดของคานและพื้นทางเดียว
ที่เสริมด้วยเหล็กเส้นที่ได้มาตรฐานและไม่ได้มาตรฐาน

AN EXPERIMENTAL COMPARISON OF BENDING MOMENT STRENGTH OF BEAMS
AND ONE-WAY SLABS REINFORCED WITH STANDARD
AND NON-STANDARD REBARS

ดร. ฉัตร สุจินดา (Chatr Suchinda)¹

¹มหาวิทยาลัยศรีปทุม chatr.su@spu.ac.th

บทคัดย่อ : ปัจจุบันในท้องตลาดขายปลีกวัสดุก่อสร้างไทย มีเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตหลายขนาดให้เลือก ซึ่งในแต่ละขนาด ผู้ซื้อสามารถเลือกที่จะใช้เหล็กเต็มเส้น ที่มีตรา มอก. หรือจะเลือกเหล็กที่ไม่มี ตรา มอก. ซึ่งเหล็กเส้นที่ไม่มีตรา เหล่านี้มีมวลต่อความยาวต่ำกว่าที่ระบุไว้ในมาตรฐาน แน่แน่นอนว่าหากผู้รับเหมาซื้อเหล็กเส้นดังกล่าวไปใช้ ชิ้นส่วน โครงสร้างที่เสริมด้วยเหล็กเส้นที่ไม่ได้มาตรฐานนี้ ก็ย่อมจะมีกำลังรับน้ำหนักที่ต่ำกว่าโครงสร้างที่เสริมด้วยเหล็กที่ได้มาตรฐาน บทความนี้ได้นำเสนอถึงการทดสอบเพื่อหาลำดับการรับโมเมนต์ดัดของคานและพื้นทางเดียวที่เสริมด้วยเหล็กเส้นที่ได้มาตรฐานและไม่ได้มาตรฐาน จากการทดสอบคานสองตัวอย่างที่เสริมด้วยเหล็กเส้นข้ออ้อย DB12 พบว่าคานตัวอย่างที่เสริมด้วยเหล็กเส้น B12 ที่ได้มาตรฐานมีกำลังรับโมเมนต์ดัดเป็น 198% ของค่าที่คำนวณได้จากสูตรที่ใช้ในการออกแบบ ในขณะที่คานตัวอย่างที่เสริมด้วยเหล็กเส้น DB12 ที่ไม่ได้มาตรฐานมีกำลังรับโมเมนต์ดัดเป็น 118% ของค่าที่คำนวณได้ จากการทดสอบแผ่นพื้นสี่ตัวอย่างที่เสริมด้วยเหล็กเส้นกลม พบว่ากำลังการรับโมเมนต์ดัดของพื้นตัวอย่างที่เสริมด้วยเหล็กเส้น RB6 ที่ได้มาตรฐานและไม่ได้มาตรฐานเป็นสัดส่วน 101% และ 78% ของค่าที่คำนวณได้ตามลำดับ ในขณะที่กำลังการรับโมเมนต์ดัดของพื้นตัวอย่างที่เสริมด้วยเหล็กเส้น RB9 ที่ได้มาตรฐานและไม่ได้มาตรฐานเป็นสัดส่วน 121% และ 73% ของค่าที่คำนวณได้ตามลำดับ

ABSTRACT : Nowadays, among construction material retail stores in Thailand, there are many sizes of rebars available. For a specific size, the buyer can choose between the products that carry the standard seal or the ones that not conform with any standards. These non-standard rebars have lower mass per length than the values specified by the standard. If the contractor uses these non-standard rebars, the structural members certainly will have less load capacities than the ones that reinforced with the standard rebars. This article presents the experimental investigation to determine the bending moment strengths of beam and one-way slab specimens. From the tests of two beam specimens, it was found that the beam reinforced with the standard DB12 rebars can carry 198% bending moment of the one calculated from the design formula while the one reinforced with the non-standard DB12 rebars can carry 118% bending moment of the calculated one. From the tests of four one-way slab specimens, the one-way slabs reinforced with the standard and non-standard RB6 rebars have the bending capacities of 101% and 78% comparing with the calculated design value respectively while the one-way slabs reinforced with the standard and non-standard RB9 rebars have the bending capacities of 121% and 73% comparing with the calculated design value respectively.

KEYWORDS : Non-standard rebars, Bending test, Pullout test

1. ความนำ

การแพร่กระจายของเหล็กเสริมที่ไม่ได้มาตรฐาน (มอก 20-2543[1] และ 24-2548[2]) ในงานก่อสร้างจริงได้ถูกศึกษาไว้ในโครงการวิศวกรรมโยธาระดับปริญญาตรี [3] ซึ่งในการศึกษานี้ได้มีการเก็บตัวอย่างเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตขนาด RB6 RB9 DB12 และ DB16 จากสถานที่ก่อสร้างบ้านพักอาศัยในเขต กทม และปริมณฑล ซึ่งพบว่า ตัวอย่างเหล็กเส้นที่เก็บมาได้ถึงร้อยละ 27.3 (RB6) 27.0 (RB9) 20.4 (DB12) และ 86.2 (DB16) ไม่ผ่านเกณฑ์มวลต่อความยาว (ข้อ 4.2 ใน มอก. 20-2543 หรือ มอก. 24-2548) และร้อยละ 0.0(RB6) 7.1(RB9) 3.0(DB12) และ 1.6(DB16) ที่มีแรงดึงที่จุดครากต่ำกว่าค่าที่ใช้ในการคำนวณออกแบบ (ค่า $A_s f_y$ ในมาตรฐาน ACI318-05[4] และ วสท. 3008-38[5]) ซึ่งผู้แต่งได้นำข้อมูลการกระจายทางสถิติดังกล่าวมาวิเคราะห์ความเชื่อมั่นของโครงสร้าง (Structural Reliability) และได้เลือกตัวคูณลดกำลัง (Strength Reduction Factor) ที่เหมาะสมสำหรับมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย [6],[7],[8] จากการศึกษาเหล่านี้พบว่า ลักษณะการกระจายของคุณสมบัติทางกลของเหล็กเส้นที่ใช้สำหรับการก่อสร้างประเภทบ้านพักอาศัย มีค่าเฉลี่ยและความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความสามารถในการรับแรงดึงที่จุดคราก $A_s f_y$ ต่างไปจากค่าทางสถิติที่มาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กของประเทศสหรัฐอเมริกาใช้อยู่มาก [9] การแก้ปัญหาโดยการปรับเปลี่ยนตัวคูณลดกำลังหรือส่วนเผื่อในขั้นตอนการออกแบบนั้น เป็นการแก้ปัญหาที่ปลายเหตุ เนื่องจากถึงแม้ว่าจะมีข้อมูลทางสถิติของการกระจายของคุณสมบัติทางกลของเหล็กเส้นที่ใช้จริงในอดีตก็ตาม แต่เนื่องจากการกระจายดังกล่าวมีผลมาจากการแพร่กระจายของเหล็กเส้นที่ไม่ได้มาตรฐาน ซึ่งมีสาเหตุมาจากการง้อของผู้ผลิตเพื่อตอบสนองความต้องการของตลาด ดังนั้นค่าเฉลี่ยและความเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ศึกษามาได้จึงไม่เหมาะที่จะใช้ทำนายถึงลักษณะการกระจายที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคตได้อย่างมั่นใจ (ผิดกับการศึกษาถึงการกระจายทางสถิติของเหล็กเส้นในสหรัฐอเมริกาซึ่งความเบี่ยงเบนส่วนใหญ่มีสาเหตุเนื่องมาจากขั้นตอนในการผลิต) หากมีการนำเหล็กเส้นที่ได้มาตรฐานและไม่ได้มาตรฐานเหล่านี้มาทดลองเสริมในโครงสร้างตัวอย่าง และได้มีการทดสอบเปรียบเทียบเพื่อให้เห็นถึงผลกระทบอย่างแท้จริง ก็น่าจะเป็นหลักฐานที่

สำคัญในการชักชวนให้ผู้ที่อยู่ในวงการก่อสร้าง หันมาหลีกเลี่ยงการใช้เหล็กเส้นที่ไม่ได้มาตรฐานกันมากขึ้น อันเป็นการแก้ปัญหาที่ต้นเหตุ

2. ความสำคัญของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นการชี้ให้เห็นถึงตัวอย่างหนึ่งของผลกระทบของการใช้เหล็กเส้นที่ไม่ได้มาตรฐานในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยการทดสอบเปรียบเทียบชิ้นส่วนโครงสร้างตัวอย่างที่สร้างขึ้นจริง เพื่อหาค่าการรับแรงในห้องปฏิบัติการ มิใช่เป็นเพียงการคำนวณให้เห็นถึงผลกระทบ (ซึ่งผู้ที่เกี่ยวข้องในวงการก่อสร้างบางส่วนอาจไม่เข้าใจหรือไม่เชื่อถือในหลักการของการคำนวณเท่ากับการทดสอบให้เห็นจริง) และคาดว่าท่านผู้เกี่ยวข้องในวงการก่อสร้างไทยจะได้ตระหนักถึงความสำคัญของปัญหาดังกล่าว และหลีกเลี่ยงไม่ใช้เหล็กเส้นที่ไม่ได้มาตรฐานในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตนเองรับผิดชอบ และหวังว่าในอนาคตการแพร่กระจายของเหล็กเส้นที่ไม่ได้มาตรฐานจะมีปริมาณน้อยลง ทำให้ไม่ต้องใช้ส่วนเผื่อในขั้นตอนการออกแบบ ให้มากจนเกินความจำเป็น

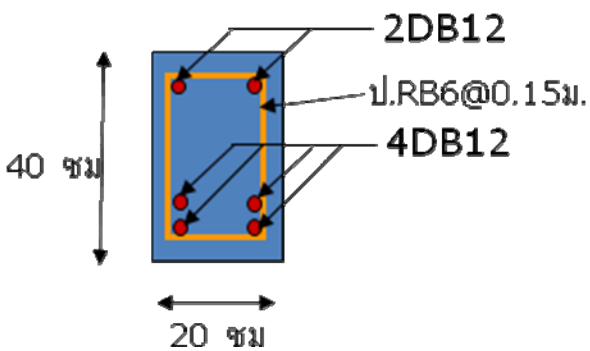
3. การวางแผนการทดลอง

ตารางที่ 1 แสดงถึงขนาดและประเภท (มีและไม่มีตรา มอก.) ของเหล็กเส้นที่ใช้เสริมในชิ้นส่วนโครงสร้างตัวอย่างที่นำมาทดสอบ

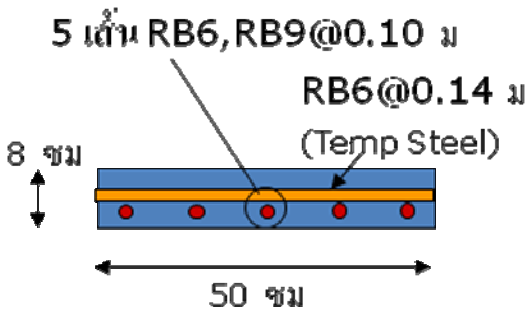
การออกแบบและกำหนดรายละเอียดหน้าตัดคานและพื้นทางเดียวตัวอย่างให้เป็นไปตามมาตรฐาน วสท. 1008-38 (ใช้ระยะหุ้มในคาน 3 cm แทนที่จะเป็น 4 cm ตามมาตรฐานใหม่ ACI318-05 เพื่อเป็นการจำลองสถานการณ์จริงในการออกแบบสำหรับประเทศไทย) รายละเอียดหน้าตัดของคานตัวอย่างที่ใช้เหล็กเสริม DB12 ได้แสดงไว้ในภาพที่ 1 ส่วนหน้าตัดของพื้นตัวอย่างที่ใช้เหล็กเสริม RB6 และ RB9 ได้แสดงไว้ในภาพที่ 2

ตารางที่ 1 ชั้นส่วนของโครงสร้างที่นำมาทดสอบ

ประเภทของตัวอย่างที่ทดสอบ	ขนาดเหล็กเสริม	ประเภทของเหล็กเสริม
คาน (2 ตัวอย่าง)	DB12	มีตรา มอก.
		ไม่มีตรา มอก.
พื้นทางเดียว (4 ตัวอย่าง)	RB6	มีตรา มอก.
		ไม่มีตรา มอก.
	RB9	มีตรา มอก.
		ไม่มีตรา มอก.



ภาพที่ 1 รายละเอียดของหน้าตัดคานตัวอย่างที่ใช้เหล็กเสริม DB12

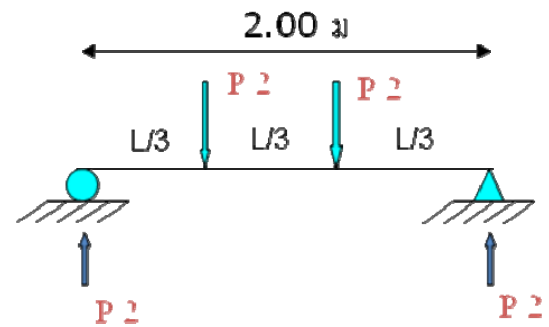
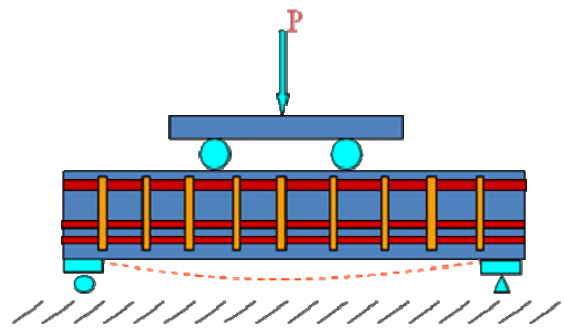


ภาพที่ 2 รายละเอียดของหน้าตัดพื้นทางเดียวตัวอย่างที่ใช้เหล็กเสริม RB6 และ RB9

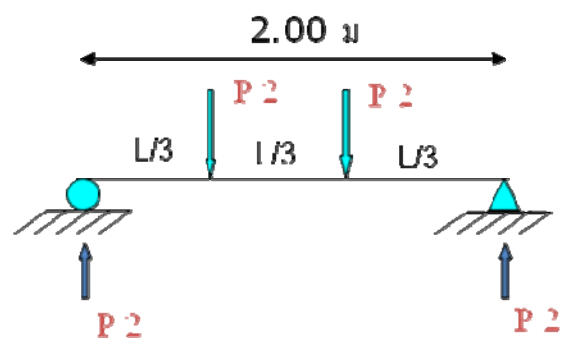
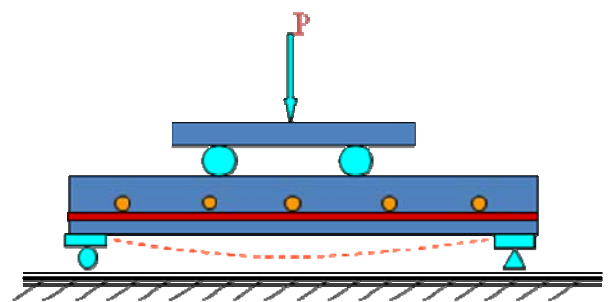
สำหรับชิ้นส่วนตัวอย่างทั้งหมด ได้ออกแบบให้มีความสามารถในการรับแรงเฉือนมากเพียงพอ ที่ทำให้ชิ้นส่วนตัวอย่างไม่เกิดการพังเนื่องจากแรงเฉือน และเมื่อเกิดการพังเนื่องจากโมเมนต์ดัด ให้เหล็กเสริมรับแรงดึง (เหล็กล่าง) ถึงจุดครากก่อนคอนกรีตพัง เพื่อเป็นการจำลองให้เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน วสท 1008-38 ข้อ 4303ค ซึ่งจำกัดอัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริม ρ ให้ไม่เกินกว่า 75% ของอัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมที่จุดสมดุล ρ_b เพื่อควบคุมให้เกิด Tension Failure ซึ่งมีลักษณะการพังแบบเหนียว (Ductile)

สำหรับการทดสอบเพื่อหาความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดครั้งนี้ได้ออกแบบให้ชิ้นส่วนตัวอย่างรับน้ำหนักกระทำแบบ

จุดที่ตำแหน่ง 1/3 และ 2/3 ของความยาวช่วง (Span) เพื่อควบคุมให้เกิดโมเมนต์สูงสุดคงที่ตลอดความยาวที่อยู่ระหว่างแรงกระทำ จุดทั้งสองนี้ ทำให้สามารถทราบค่าของโมเมนต์สูงสุด ณ ตำแหน่งที่เกิดการพังของชิ้นส่วนได้อย่างแม่นยำ (ในการทดสอบจริง ตำแหน่งที่เกิดการพังจะเกิดขึ้นไม่แน่นอน แต่จะอยู่ระหว่างแรงกระทำจุดทั้งสอง) และมีไม่มีแรงเฉือนเกิดขึ้นตรงบริเวณที่ชิ้นส่วนจะพังเนื่องจากโมเมนต์ดัดนั้นด้วย รายละเอียดของการติดตั้งได้แสดงไว้ในภาพที่ 3 และ ภาพที่ 4 สำหรับการทดสอบชิ้นส่วนคานและพื้นทางเดียวตัวอย่างตามลำดับ



ภาพที่ 3 รายละเอียดการทดสอบสำหรับคานตัวอย่าง



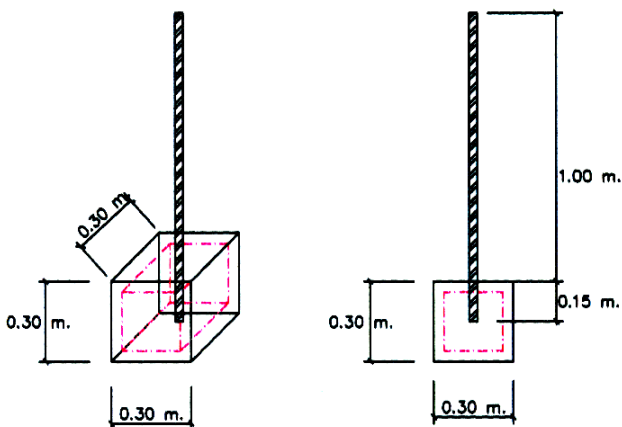
ภาพที่ 4 รายละเอียดการทดสอบสำหรับพื้นตัวอย่าง

จากการวัดส่วนสูงของบั้งข้อย่อยตามขวางระหว่างเหล็กเส้น DB12 ได้มาตรฐานและไม่ได้มาตรฐานพบว่ามีความแตกต่างกันมาก เนื่องจากว่าหากผู้ผลิตเหล็กเส้นที่ไม่ได้มาตรฐาน ต้องการจะลดมวลต่อความยาวลง ทางหนึ่งก็คือการลดขนาดของบั้งลง ส่วนสูงเฉลี่ยของความบั้งตามขวางที่วัดได้ของเหล็กเส้นทั้งสองประเภทได้แสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยของส่วนสูงของบั้งตามขวางของเหล็กเส้น DB12 ที่เสริมในคานตัวอย่าง ที่ใช้ทดสอบ

ขนาดและชนิดเหล็กเส้น	ค่าเฉลี่ยของส่วนสูงของบั้งตามขวางที่วัดได้ (mm)	ส่วนสูงของบั้งตามข้อ 4.3 ใน มอก. 24-2548 [2] (mm)	
		ต่ำสุด	สูงสุด
DB12 ที่ได้มาตรฐาน	1.40	0.5	1.0
DB12 ที่ไม่ได้มาตรฐาน	0.73		

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าเหล็กเส้น DB12 ที่ได้มาตรฐาน มีค่าเฉลี่ยของส่วนสูงของบั้งตามขวางเกือบเป็นสองเท่าของเหล็กเส้น DB12 ที่ไม่ได้มาตรฐาน ซึ่งแน่นอนว่าความแตกต่างนี้จะย่อมมีผลต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมอย่างแน่นอน ผู้แต่งจึงได้ทำการทดสอบแบบ Pullout [10] ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในภาพที่ 5 โดยใช้ระยะฝัง 15 cm



ภาพที่ 5 รายละเอียดของชิ้นตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแบบ Pullout

ได้มีการสร้างตัวอย่างสำหรับการทดสอบดังกล่าว Pullout ทั้งหมด 4 ชิ้น ซึ่งแบ่งเป็นตัวอย่างที่ใช้เหล็ก DB12 ที่ได้

มาตรฐานสองชิ้น และที่ไม่ได้มาตรฐานอีกสองชิ้น คอนกรีตที่ใช้หล่อตัวอย่างทั้ง 4 ชิ้นเป็นคอนกรีตที่ผสมครั้งเดียวกันทั้งหมด

4. คุณสมบัติของวัสดุคอนกรีตและเหล็กเส้นที่นำมาใช้สร้างชิ้นส่วนตัวอย่าง

ในการหล่อชิ้นส่วนตัวอย่างครั้งนี้ เนื่องจากการทดสอบเปรียบเทียบกำลังการรับแรงระหว่างชิ้นส่วนที่เสริมด้วยเหล็กเส้นที่ได้มาตรฐานและไม่ได้มาตรฐาน ดังนั้นจึงต้องควบคุมตัวแปรที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ ให้คงที่มากที่สุด อันได้แก่ คุณสมบัติของคอนกรีตและเหล็กเส้นที่นำมาทำเป็นเหล็กปลอก ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการผสมคอนกรีตสองครั้งคือ ครั้งแรกใช้หล่อชิ้นส่วนคานตัวอย่างที่เสริมด้วยเหล็กเส้น DB12 ที่ได้มาตรฐานและไม่ได้มาตรฐาน และได้นำคอนกรีตดังกล่าวไปหล่อแท่งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแบบ Pullout ทั้ง 4 ชิ้น (เพื่อใช้หาแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตกับเหล็กเสริม) กับการผสมคอนกรีตครั้งที่สอง ซึ่งใช้หล่อชิ้นส่วนพื้นทางเดียวตัวอย่างที่เสริมด้วยเหล็กเส้น RB6 และ RB9 ที่ได้มาตรฐานและไม่ได้มาตรฐาน รวมชิ้นส่วนตัวอย่างพื้นทางเดียวทั้งหมด 4 ชิ้น

หน่วยแรงอัดสูงสุดเฉลี่ยของแท่งคอนกรีตตัวอย่างรูปทรงกระบอก f'_c ตามมาตรฐาน ASTM C-39 [11] ที่ผสมครั้งแรกทดสอบแท่งตัวอย่าง ณ วันที่ทดสอบชิ้นส่วนคานตัวอย่างทั้งสอง และคอนกรีตที่ผสมครั้งสองทดสอบแท่งตัวอย่าง ณ วันที่ทดสอบชิ้นส่วนพื้นตัวอย่างทั้ง 4 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 (เริ่มทดสอบชิ้นส่วนเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตได้ตามเกณฑ์)

เหล็กเส้นในล็อตเดียวกับที่ใช้ในชิ้นตัวอย่างทั้งหมดได้ถูกนำไปชั่งเพื่อหามวลต่อความยาว และดึงเพื่อหาแรงดึงที่จุดคราก $F_y = A_s f_y$ จากนั้นจึงคำนวณหาพื้นที่หน้าตัด A_s และหน่วยแรงดึงที่จุดคราก f_y ซึ่งค่าดังกล่าวทั้งหมดได้แสดงไว้ในตารางที่ 4

จากตารางที่ 4 เมื่อพิจารณาเกณฑ์มวลต่อความยาว (พื้นที่หน้าตัดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับมวลต่อความยาว) และเกณฑ์หน่วยแรงดึงที่จุดคราก จะเห็นได้ว่าเหล็กเส้นที่ได้มาตรฐานทั้ง 3 ขนาดคือ DB12 RB6 และ RB9 ผ่านเกณฑ์มวลต่อความยาว (ถ้าพอมให้ถือว่ามวลต่อความยาวที่ขาดไป 0.1% อาจเกิดจากความผิดพลาดในการวัด) ส่วนเหล็กเส้นที่ไม่ได้มาตรฐานทั้ง 3 ขนาดนั้น ไม่ผ่านเกณฑ์มวลต่อความยาวอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาเกณฑ์หน่วยแรงดึงที่จุดคราก f_y เหล็กเกือบทุกเส้น

ตารางที่ 3 หน่วยแรงอัดสูงสุดเฉลี่ยของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้หล่อชิ้นส่วนตัวอย่างต่าง ๆ กัน ทดสอบแท่งตัวอย่าง ณ วันที่ทดสอบชิ้นส่วนตัวอย่างนั้น ๆ

ผสมคอนกรีตครั้งที่	ชิ้นส่วนตัวอย่างที่ใช้	หน่วยแรงอัดสูงสุดเฉลี่ย f'_c kg/cm^2
1	คาน ที่เสริมด้วยเหล็กเส้น DB12 ที่ได้มาตรฐาน	261
	คาน ที่เสริมด้วยเหล็กเส้น DB12 ที่ได้ไม่มาตรฐาน	
	ตัวอย่างสำหรับการทดสอบแบบ Pullout ทั้ง 4 ชิ้น	
2	พื้นทางเดียว ที่เสริมด้วยเหล็ก RB6 ที่ได้มาตรฐาน	284
	พื้นทางเดียว ที่เสริมด้วยเหล็ก RB6 ที่ไม่ได้มาตรฐาน	
	พื้นทางเดียว ที่เสริมด้วยเหล็ก RB9 ที่ได้มาตรฐาน	
	พื้นทางเดียว ที่เสริมด้วยเหล็ก RB9 ที่ไม่ได้มาตรฐาน	

ผ่านเกณฑ์ดังกล่าว ยกเว้นแต่เหล็ก DB12 ที่ไม่ได้มาตรฐาน ไม่ผ่านเกณฑ์ไปเพียง 1.9% เป็นที่น่าสังเกตได้ว่าการลดปริมาณเนื้อเหล็ก (มวลต่อความยาว) ให้ต่ำกว่าค่าที่ระบุ จะส่งผลต่อราคาต้นทุนการผลิตเป็นสัดส่วนโดยตรง (ราคาเหล็กซื้อขายกันตามมวล) ในขณะที่การเพิ่มหน่วยแรงดึงที่จุดคราก f_y ส่งผลต่อราคาต้นทุนการผลิตไม่มากนัก (ราคาต่อมวลของเหล็กเส้นมาตรฐาน SD-30 และ SD-40 ต่างกันไม่เกิน 1%[12]) ดังนั้นจึงเป็นไปได้มากที่มีผู้ผลิตเหล็กเส้นที่ ไม่ได้มาตรฐาน เลือกที่จะลดต้นทุนการผลิตโดยการลดมวลต่อความยาวลงแต่ไปเพิ่มหน่วยแรงดึงที่จุดคราก f_y ให้มากเพียงพอเพื่อรักษาระดับแรงดึงที่จุดคราก $F_y = A_s f_y$ เอาไว้ เช่นในกรณีเหล็กเส้น DB12 และ RB9 ที่ไม่ได้มาตรฐานที่นำมาใช้ทดสอบในครั้งนี้ แต่เหล็กเส้น RB6 ที่ไม่ได้มาตรฐานที่นำมาใช้ทดสอบในครั้งนี้ ถึงแม้จะมีหน่วยแรงดึงที่จุดครากเกินกว่าที่มาตรฐานระบุไว้ แต่เหล็กเส้นดังกล่าวมีมวลต่อความยาวต่ำกว่าที่มาตรฐานระบุไปมาก ทำให้แรงดึงที่จุดครากต่ำกว่าที่ควรจะเป็น (หากต้องการทราบถึงข้อมูลการกระจายทางสถิติของมวลต่อความยาวและแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเส้นขนาด RB6 RB9 และ DB12 ให้ค้นคว้าเพิ่มเติมได้จากบทความที่ถูกนำเสนอไว้แล้วโดยผู้แต่ง [7],[8])

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยของแรงดึงที่จุดคราก $F_y = A_s f_y$ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมที่คำนวณได้จากมวลต่อความยาว A_s และหน่วยแรงดึงที่จุดคราก f_y ของเหล็กเส้นประเภทต่าง ๆ ที่ใช้เสริมในชิ้นส่วนคานและพื้นทางเดียวตัวอย่าง รวมถึงเปอร์เซ็นต์ที่เกินหรือขาด (+/-) จากค่าที่ระบุตามมาตรฐานฯ และการผ่านหรือไม่ผ่านตามเกณฑ์ต่าง ๆ

ชิ้นส่วนตัวอย่าง	ประเภทของเหล็กเสริม	$F_y = A_s f_y$ kg (± %)	A_s cm^2 (± %) เกณฑ์ข้อ 4.2.2 ใน มอก. 20-2543 หรือ มอก. 24-2548	f_y kg/cm^2 (± %) เกณฑ์ข้อ 6.3.1 ใน มอก. 20-2543 หรือ 6.2.1.2 ใน มอก. 24-2548
คาน DB12	มีตรา มอก.	5,350 (+57.7%)	1.091 (-6.1%) เกือบผ่าน*	4,905 (+63.5%) ผ่าน
	ไม่มีตรา มอก.	2,270 (-33.1%)	0.771 (-25.7%) ไม่ผ่าน	2,943 (-1.9%) ไม่ผ่าน
พื้นทางเดียว RB6	มีตรา มอก.	1,090 (+60.5%)	0.278 (-2.7%) ผ่าน	3,915 (+63.1%) ผ่าน
	ไม่มีตรา มอก.	700 (+3.1%)	0.210 (-52.6%) ไม่ผ่าน	3,328 (+38.7%) ผ่าน
พื้นทางเดียว RB9	มีตรา มอก.	2,200 (+45.4%)	0.619 (-3.6%) ผ่าน	3,587 (+49.4%) ผ่าน
	ไม่มีตรา มอก.	1,210 (-20.7%)	0.302 (-31.8%) ไม่ผ่าน	4,013 (+67.2%) ผ่าน

* เกือบผ่านเกณฑ์ต่อเส้นข้อ 4.2.2 ใน มอก. 20-2543 หรือ มอก. 24-2548 ซึ่งขาดไปเพียง 0.1% (เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนมวลต่อความยาวของเหล็กเส้นขนาด DB12 RB6 และ RB9 ต่อเส้นคือ ±6%)

5. ผลการทดสอบหาความสามารถในการรับโมเมนต์ดัด

ตารางที่ 5 ได้สรุปความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดจากการทดสอบของชิ้นส่วนคานและพื้นทางเดียวตัวอย่างทั้งหมด 6 ชิ้น ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกับความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดที่คำนวณได้จากสูตรที่ใช้ออกแบบ (ตัดผลของความแปรผันกำลังอัดของคอนกรีตออกไป โดยใช้ค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงอัดสูงสุดของแท่งคอนกรีตตัวอย่างจริงในสูตรคำนวณ)

เมื่อนำข้อมูลที่เก็บได้ระหว่างการทดสอบการรับแรงดัด มา

เขียนกราฟระหว่าง น้ำหนักกดกับระยะการโก่งตัวที่ตรงกึ่งกลางช่วงในแนวดิ่งได้ ดังแสดงในภาพที่ 5 6 และ 7 สำหรับชิ้นส่วนคานตัวอย่างที่เสริมด้วยเหล็ก DB12 ที่ได้มาตรฐานและไม่ได้

ตารางที่ 5 สรุปความสามารถในการรับโมเมนต์คดของชิ้นส่วนคานและพื้นทางเดียวตัวอย่างทั้งหมด 6 ชิ้น

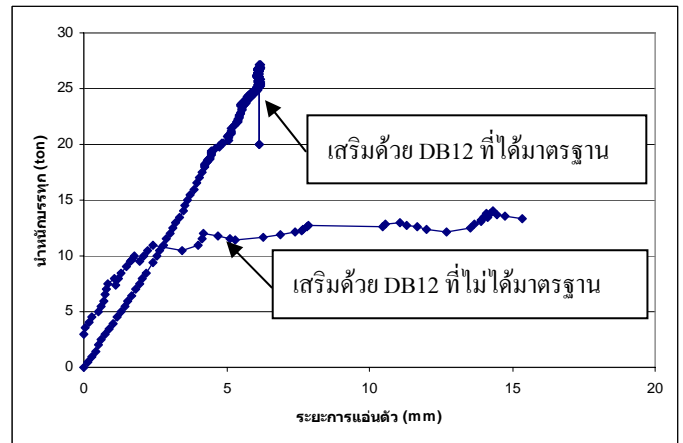
ชิ้นส่วนตัวอย่าง	น้ำหนักกดที่รับได้สูงสุด P (ton)	โมเมนต์คดที่รับได้สูงสุด $M_{exp} = \frac{PL}{6}$ (kg.m)	โมเมนต์คดที่คำนวณได้จากสูตร** M_{design} (kg.m)	ร้อยละของอัตราส่วน $\frac{M_{exp}}{M_{design}}$ (%)
คานเสริมด้วย DB12 ที่ได้มาตรฐาน	27.54	8,698	4,397	198
คานเสริมด้วย DB12 ที่ไม่ได้มาตรฐาน	16.30	5,175		118
พื้นทางเดียวเสริมด้วย RB6 ที่ได้มาตรฐาน	0.60	190	188	101
พื้นทางเดียวเสริมด้วย RB6 ที่ไม่ได้มาตรฐาน	0.46	146		78
พื้นทางเดียวเสริมด้วย RB9 ที่ได้มาตรฐาน	15.20	481	399	121
พื้นทางเดียวเสริมด้วย RB9 ที่ไม่ได้มาตรฐาน	9.20	291		73

** สูตรออกแบบ คำนวณโดยใช้แรงดึงที่จุดคราก $F_y = A_s f_y$ ตามที่คาดไว้จากที่ระบุไว้ในมาตรฐานฯ แต่ตัดความแปรผันของหน่วยแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต f'_c โดยการใช้ค่าจริงแทนลงในสูตรคำนวณซึ่งรายการคำนวณดังกล่าวได้แสดงไว้ในภาคผนวกในท้ายบทความนี้

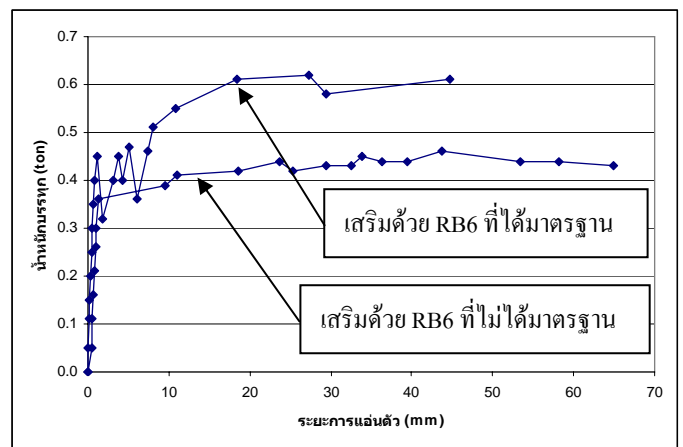
มาตรฐาน ชิ้นส่วนพื้นทางเดียวตัวอย่างที่เสริมด้วยเหล็ก RB6 ที่ได้มาตรฐานและไม่ได้มาตรฐาน และที่เสริมด้วยเหล็ก RB9 ที่ได้มาตรฐานและไม่ได้มาตรฐานตามลำดับ

รูปลักษณะการแตกของคานตัวอย่างที่เสริมด้วยเหล็ก DB12

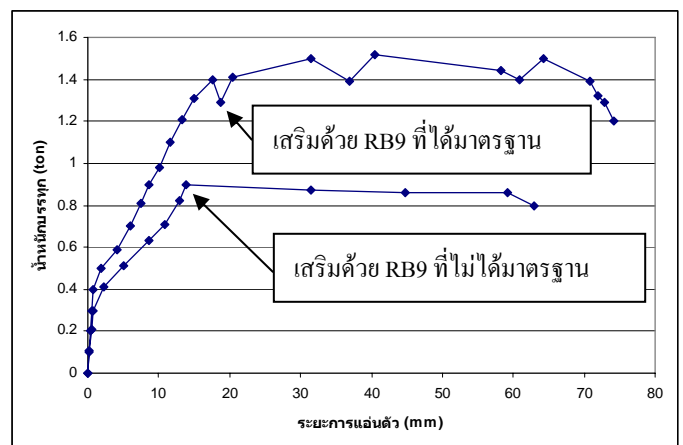
ที่ได้มาตรฐานและไม่ได้มาตรฐานนี้ ได้แสดงไว้ในภาพที่ 8 และ 9 ตามลำดับ ส่วนรูปลักษณะการแตกของพื้นทางเดียวตัวอย่างที่เสริมด้วยเหล็ก RB6 และ RB9 ที่ได้มาตรฐานและไม่ได้



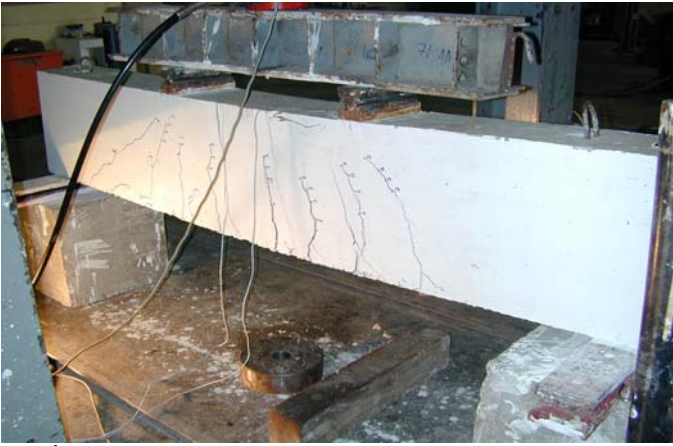
ภาพที่ 5 กราฟพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของคานตัวอย่างที่เสริมด้วยเหล็ก DB12 ทั้งที่ได้มาตรฐานและไม่ได้มาตรฐาน



ภาพที่ 6 กราฟพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของพื้นทางเดียวตัวอย่างที่เสริมด้วยเหล็ก RB6 ทั้งที่ได้มาตรฐานและไม่ได้มาตรฐาน



ภาพที่ 7 กราฟพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของพื้นทางเดียวตัวอย่างที่เสริมด้วยเหล็ก RB9 ทั้งที่ได้มาตรฐานและไม่ได้มาตรฐาน มาตรฐานได้แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 10 ถึง 13 ตามลำดับ



ภาพที่ 8 กานตัวอย่างที่เสริมด้วยเหล็ก DB12 ที่ได้มาตรฐาน



ภาพที่ 11 ตัวอย่างพื้นที่เสริมด้วยเหล็ก RB6 ที่ไม่ได้มาตรฐาน



ภาพที่ 9 กานตัวอย่างที่เสริมด้วยเหล็ก DB12 ที่ไม่ได้มาตรฐาน



ภาพที่ 12 ตัวอย่างพื้นที่เสริมด้วยเหล็ก RB9 ที่ได้มาตรฐาน



ภาพที่ 10 ตัวอย่างพื้นที่เสริมด้วยเหล็ก RB6 ที่ได้มาตรฐาน



ภาพที่ 13 ตัวอย่างพื้นที่เสริมด้วยเหล็ก RB9 ที่ไม่ได้มาตรฐาน

6. ผลการทดสอบแบบ Pullout เพื่อหาแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม

ค่าแรงดึงสูงสุดและลักษณะการพังของชิ้นตัวอย่างทดสอบแบบ Pullout ได้แสดงไว้ในตารางที่ 6

ภาพลักษณะการพังของชิ้นตัวอย่างทดสอบแบบ Pullout ได้แสดงไว้ในภาพที่ 14

7. สรุป

จากการศึกษาผลกระทบของการใช้เหล็กเส้นเสริมคอนกรีตที่ไม่ได้มาตรฐาน ที่มีต่อกำลังการรับโมเมนต์คัต โดยวิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่ากานตัวอย่างที่เสริมเหล็กเส้นที่ได้มาตรฐาน มีกำลังการรับโมเมนต์คัตสูงกว่าค่าที่คำนวณได้จาก



ภาพที่ 14 ลักษณะการพังของชิ้นตัวอย่างทดสอบแบบ Pullout

ตารางที่ 6 ค่าแรงดึงสูงสุดและลักษณะการพังของชิ้นตัวอย่างที่ทดสอบแบบ Pullout

ตัวอย่าง	แรงดึงสูงสุด (kg)	แรงดึงที่จุดคราก (kg) (จากตารางที่ 4)	ลักษณะการพัง
DB12 ที่ได้มาตรฐาน ชั้นที่ 1	6,300	5,350	ขาดที่เหล็กเส้น
DB12 ที่ได้มาตรฐาน ชั้นที่ 2	6,260		ขาดที่เหล็กเส้น
DB12 ที่ไม่ได้มาตรฐาน ชั้นที่ 1	3,270	2,270	เหล็กหลุดออกจากคอนกรีต
DB12 ที่ไม่ได้มาตรฐาน ชั้นที่ 2	3,000		เหล็กหลุดออกจากคอนกรีต

สูตรที่ใช้ออกแบบ ส่วนคานตัวอย่างที่เสริมเหล็กเส้นที่ไม่ได้มาตรฐาน มีกำลังการรับโมเมนต์คดสูงกว่าค่าที่คำนวณได้จากสูตรที่ใช้ออกแบบเช่นกันแต่ในปริมาณที่น้อยกว่า สำหรับการทดสอบพื้นทางเดียวตัวอย่างพบว่าพื้นที่เสริมด้วยเหล็กเส้นที่ได้มาตรฐานทั้งหมด (2 ตัวอย่าง) มีกำลังการรับโมเมนต์คดสูงกว่าค่าที่คำนวณได้จากสูตรที่ใช้ออกแบบ ในขณะที่พื้นที่เสริมด้วยเหล็กเส้นที่ไม่ได้มาตรฐานทั้งหมด (2 ตัวอย่าง) มีกำลังการรับโมเมนต์คดต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้จากสูตรที่ใช้ออกแบบ

เนื่องจากการใช้เหล็กเส้นเสริมคอนกรีตที่ไม่ได้มาตรฐาน มีผลโดยตรงกับกำลังการรับโมเมนต์ของชิ้นส่วนโครงสร้าง และเนื่องจากผู้ออกแบบไม่อาจคาดเดาถึงคุณสมบัติของเหล็กเส้นที่ไม่ได้มาตรฐานที่ผู้รับเหมาจะนำมาใช้ได้ ดังนั้นจึงเป็นความเสี่ยง

อย่างยิ่งที่จะใช้เหล็กเส้นที่ไม่ได้มาตรฐานในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กใด ๆ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้พิสูจน์ให้เห็นอย่างเห็นอย่างชัดเจนจากข้อมูลของการทดสอบจริง

จากการทดสอบเพื่อหาแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมแบบ Pullout ที่ระยะฝัง 15 cm พบว่าแรงดึงสูงสุดของเหล็กเส้น DB12 ที่ได้มาตรฐานมีค่าสูงกว่าแรงดึงสูงสุดของเหล็กเส้น DB12 ที่ไม่ได้มาตรฐานเกือบสองเท่า ซึ่งเหตุอันเนื่องมาจากส่วนสูงของบั้งตามขวางของเหล็กเส้น DB12 ที่ได้มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบมีค่ามากกว่าเหล็กเส้น DB12 ที่ไม่ได้มาตรฐาน แต่อย่างไรก็ตามอาจเนื่องมาจากส่วนสูงของบั้งตามขวางของเหล็กเส้น DB12 ที่ไม่ได้มาตรฐานยังอยู่ในเกณฑ์ของ มอก. อยู่ (ดูได้จากตารางที่ 2) ดังนั้นแรงดึงสูงสุดที่ได้จากการทดสอบแบบ Pullout จึงมีค่าเกินกว่าแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเส้นในล๊อตเดียวกัน ซึ่งไม่คาดว่าจะก่อให้เกิดปัญหาต่อโครงสร้าง (ในแง่ของแรงยึดเหนี่ยวฯ) แต่อย่างไร

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2543. มาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 20-2543 เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต: เหล็กเส้นกลม. กทม: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.
- [2] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2548. มาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 24-2548 เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต: เหล็กข้ออ้อย. กทม: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.
- [3] อภิเดช ต้นไพศาล และคณะ, 2548. ผลกระทบของเหล็กเสริมไม่ได้มาตรฐานที่มีผลต่อพฤติกรรมขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงคด. โครงการระดับปริญญาตรี มหาวิทยาลัยศรีปทุม.
- [4] ACI Committee 318, 2005. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-05) and Commentary (ACI318R-05). Farmington Hill, Michigan : American Concrete Institute.
- [5] คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา ประจำปี 2537-2538, 2538. มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง ว.ส.ท. 1008-38. กทม : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.
- [6] ฉัตร สุจินดา, 2548. การเลือกตัวคูณลดกำลังเพื่อใช้ในการออกแบบโมเมนต์คดในคานและพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยพิจารณาถึงการกระจายของมวลต่อความยาวของเหล็กเส้น สำหรับบ้านพักอาศัย ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล. การประชุมวิชาการคอนกรีต ประจำปีครั้งที่ 1, ระยองริชอาร์ท, ระยอง.
- [7] ฉัตร สุจินดา, 2549. การเลือกตัวคูณลดกำลังสำหรับการออกแบบเหล็กปลอกรับแรงเฉือนในคาน โดยพิจารณาถึงการกระจายของกำลังครากของเหล็กเส้นจากบ้านพักอาศัย ในเขตกรุงเทพมหานคร. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 11, เมอร์ลิน บีช ริชอาร์ท, ภูเก็ต.

- [8] ฉัตร สุจินดา, 2549. การเลือกตัวคูณลดกำลังสำหรับการออกแบบเสา
รับแรงอัดตามแนวแกน โดยพิจารณาถึงข้อมูลทางสถิติของ
มาตรฐานงานก่อสร้างและวัสดุในเขต กทม. การประชุมวิชาการ
คอนกรีตประจำปีครั้งที่ 2, โรงแรมเจริญศรี แกรนด์ รอยัล, อุตรธานี.
- [9] Nowak, A. S. and Szerszen, M. M., 2003. Calibration of Design Code
for Building (ACI318): Part 1 – Statistical Models for Resistance.
ACI Structural Journal, V. 100(3) : 377-382.
- [10] ASTM Subcommittee C09.64. 2006. C900-06 Standard Test Method
for Pullout Strength of Hardened Concrete. West Conshohocken, PA
: ASTM.
- [11] ASTM Subcommittee C09.61, 2005. Standard Test Method for
Compressive Strength of Cylindrical Specimens (ASTM C39/C39M-
05). ASTM International.
- [12] หนังสือพิมพ์เคลนิวิสต์, 31 สค. 2547. ราคาเหล็กเส้น-ข้ออ้อย วันที่ 1-
15 พ.ย. สูงขึ้นเล็กน้อย. บริษัทมิลเลนเนียม สตีล จำกัด (มหาชน) <
URL: <http://www.millenniumsteel.com/th/news/s-20041031-01.php> >

9. ภาคผนวก

9.1. รายการคำนวณเพื่อหาค่ากำลังการรับ โมเมนต์คดของคานที่เสริมด้วย
เหล็กเส้น DB12

f'_c เฉลี่ยจากแท่งตัวอย่างคอนกรีต = 261.61ksc

A_s ตามที่ระบุ มอก. 24-2548 = $4 \times 1.13cm^2$, $A'_s = 2 \times 1.13cm^2$

f_y ตามที่ระบุ มอก. 24-2548 (SD-30) = 3,000ksc

ระยะนี้ = max(ระยะหุ้มของเหล็กเสริมตามยาว, ระยะหุ้มของเหล็กปลอก +
ขนาดปลอก) = max(3.0, 3.0 + 0.6) = 3.6cm (กรณีคานอยู่ในร่ม)

$$d = 40 - (3.6 + 1.2 + \frac{2.5}{2}) = 33.95cm$$

$$d' = 3.6 + \frac{1.2}{2} = 4.2cm$$

$$(\rho - \rho') = \frac{A_s - A'_s}{bd} = \frac{(4 - 2) \times 1.13}{20 \times 33.95} = 3.328 \times 10^{-3}$$

$$\frac{0.85 f'_c \beta_1}{f_y} \left[\frac{6120}{6120 + f_y} \right] =$$

$$\frac{0.85 \times 261.61 \times 0.85}{3,000} \left[\frac{6120}{6120 + 3,000} \right] = 4.228 \times 10^{-2}$$

$$\rho \leq \frac{0.85 f'_c \beta_1}{f_y} \left[\frac{6120}{6120 + f_y} \right] \Rightarrow \text{เหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดครากก่อนคอนกรีต}$$

พึง

$$\frac{0.85 f'_c \beta_1}{f_y} \left(\frac{d'}{d} \right) \left[\frac{6120}{6120 - f_y} \right] =$$

$$\frac{0.85 \times 261.61 \times 0.85}{3,000} \left(\frac{4.2}{33.95} \right) \left[\frac{6120}{6120 - 3,000} \right] = 1.529 \times 10^{-2}$$

$$\rho < \frac{0.85 f'_c \beta_1}{f_y} \left(\frac{d'}{d} \right) \left[\frac{6120}{6120 - f_y} \right] \Rightarrow \text{เหล็กเสริมรับแรงอัดไม่ถึงจุดครากก่อน}$$

คอนกรีตพึง

$$A_s f_y = 0.85 f'_c b \beta_1 c + A'_s E_s 0.003 \left(\frac{c - d'}{c} \right)$$

$$(4 \times 1.13) \times 3,000 = 0.85 \times 261.61 \times 20 \times 0.85c$$

$$+ (2 \times 1.13) \times (2.04 \times 10^6) \times 0.003 \times \left(\frac{c - 4.2}{c} \right)$$

แก้สมการหาค่า $c = -3.57cm, 3.51cm$ ใช้ค่าบวก $c = 3.51cm < d' = 4.2cm$

แสดงว่าเหล็กบนอยู่ในพื้นที่รับแรงดึง ดังนั้นจึงวิเคราะห์เหมือนหน้าตัดที่
ไม่มีเหล็กเสริมรับแรงอัด

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{(4 \times 1.13) \times 3,000}{0.85 \times 261.61 \times 20} = 3.05cm$$

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = (4 \times 1.13) \times 3,000 \times \left(33.95 - \frac{3.05}{2} \right) = 4397kg \cdot m$$

9.2. รายการคำนวณเพื่อหาค่ากำลังการรับ โมเมนต์คดของพื้นทางเดียวที่เสริม
ด้วยเหล็กเส้น RB6

f'_c เฉลี่ยจากแท่งตัวอย่างคอนกรีต = 259.83ksc

A_s ตามที่ระบุ มอก. 20-2548 = $5 \times 0.283cm^2$

f_y ตามที่ระบุ มอก. 20-2543 (SR-24) = 2,400ksc

$$d = 8 - (2 + \frac{0.6}{2}) = 5.70cm$$

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{(5 \times 0.283) \times 2,400}{0.85 \times 259.83 \times 50} = 0.308cm$$

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = (5 \times 0.283) \times 2,400 \times \left(5.7 - \frac{0.308}{2} \right) = 188kg \cdot m$$

9.3. รายการคำนวณเพื่อหาค่ากำลังการรับ โมเมนต์คดของพื้นทางเดียวที่เสริม
ด้วยเหล็กเส้น RB9

f'_c เฉลี่ยจากแท่งตัวอย่างคอนกรีต = 284.08ksc

A_s ตามที่ระบุ มอก. 20-2548 = $5 \times 0.636cm^2$

f_y ตามที่ระบุ มอก. 20-2543 (SR-24) = 2,400ksc

$$d = 8 - (2 + \frac{0.9}{2}) = 5.55cm$$

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{(5 \times 0.636) \times 2,400}{0.85 \times 284.08 \times 50} = 0.632cm$$

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = (5 \times 0.636) \times 2,400 \times \left(5.55 - \frac{0.632}{2} \right) = 399kg \cdot m$$

เกี่ยวกับผู้เขียน



ดร. นัตถ์ สุจินดา

เป็นอาจารย์ประจำ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

สอนวิชาการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก

งานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความเชื่อมั่นของ

โครงสร้าง และปัญหาต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับการ

มาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก