

ผลของความยาวระยะฝังเหล็กรางน้ำที่มีต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป

จักษดา ชำรงวุฒิ* และ สิทธิชัย แสงอาทิตย์

Jaksada Thumrongvut and Sittichai Seangatith. (2006). Effect of Embedded Length of Steel Channel Sections on Precast Reinforced Concrete Beams. Suranaree J. Sci. Technol. 13(1):11-19.*

Received: Jul 29, 2005; Revised: Sept 27, 2005; Accepted: Oct 3, 2005

Abstract

This paper presents the effect of embedded length of steel channel sections on precast reinforced concrete beams under transverse point loads. The objectives of this research work were to study the effect of embedded length of steel channel sections on the behavior, shear strength, and mode of failure of the beams. The beams had the cross section of 0.175×0.35 m and the span length of 4 m. The steel channel sections had the dimensions of 100×50 mm and were embedded at the supports with the embedded length of 50, 110, and 140 cm. From the tests, it was found that the beams had a bilinear behavior, in which the beams had the strength at the end of the first linear part up to 80 to 85% of the loads at the deflection of $L/100$. After that, the deflection of the beams was increased rapidly until the failure of the beams. The mode of failure of all the test specimens was in the form of diagonal shear failure. At the deflection of $L/240$, the precast reinforced concrete beams with steel channel section had the load capacity higher than that of the control beams by 10.2 to 37.6% and had the factor of safety in the range of 1.31 to 1.59. In addition, it was found that the shear strength of the beams was increased when the embedded length of steel channel section was increased.

Keywords: Precast reinforced concrete beam, steel channel section

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงผลของความยาวระยะฝังเหล็กรางน้ำที่มีต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป ภายใต้แรงกระทำเป็นจุดตามขวาง เพื่อศึกษาผลของความยาวระยะฝังเหล็กรางน้ำที่มีต่อพฤติกรรม การรับแรง กำลังรับแรงเฉือน และลักษณะการวิบัติของคาน ตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยเป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีหน้าตัดกว้าง 0.175 เมตร ลึก 0.35 เมตร และยาว 4.0 เมตร ใช้เหล็กรางน้ำขนาด 100×50 มิลลิเมตร ฝังในคานที่ระยะ 50, 110 และ 140 เซนติเมตร จากจุดรองรับทั้งสองด้านของคาน

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อําเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
E-mail: jaksada@hotmail.com

* ผู้เขียนที่ให้การติดต่อ

วารสารเทคโนโลยีสุรนารี 13(1):11-19

จากการทดสอบพบว่า คานส่วนใหญ่มีพฤติกรรมแบบ bilinear โดยที่ความสามารถในการรับแรงสูงสุดในช่วงเส้นตรงแรกมีค่าประมาณ 80 - 85 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ $L/100$ จากนั้นการแอ่นตัวของคานจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติในรูปการวิบัติแบบเฉือนทแยง (diagonal shear failure) ที่สภาวะใช้งานที่การแอ่นตัวของคานเท่ากับ $L/240$ คานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กรงน้ำฝั่งที่ส่วนรองรับมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงกว่าคานอ้างอิงประมาณ 10.2 - 37.6 เปอร์เซ็นต์ และมีอัตราส่วนความปลอดภัยอยู่ระหว่าง 1.31 - 1.59 นอกจากนี้แล้วความสามารถในการรับแรงเฉือนของคานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะฝั่งของเหล็กรงน้ำมีค่าเพิ่มมากขึ้น

บทนำ

โดยทั่วไปแล้วรูปแบบของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทยจะมีรูปแบบการก่อสร้างเป็นระบบเสา-คาน ชนิดหล่อในที่ ซึ่งเป็นวิธีการก่อสร้างที่ใช้เวลาค่อนข้างมากและมีราคาสูงเนื่องจากใช้ไม้แบบและแรงงานเป็นจำนวนมาก (Leet and Bernal, 1997; Nawy, 2000) จึงได้มีการพัฒนารูปแบบการก่อสร้างแบบหล่อสำเร็จรูป (precast construction) ขึ้นมาใช้ในการก่อสร้างอาคารเนื่องจากการก่อสร้างโดยใช้ชิ้นส่วนสำเร็จรูปมีข้อดีหลายประการ อาทิเช่น การก่อสร้างทำได้อย่างรวดเร็ว ประหยัดในการใช้ไม้แบบ (Haas, 1983; Elliott, 2002) อีกทั้งยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในด้านแรงงานซึ่งช่วยลดต้นทุนในการก่อสร้างลงได้มาก (Richardson, 1973) นอกจากนี้แล้ว การก่อสร้างโดยใช้ชิ้นส่วนสำเร็จรูปยังสามารถควบคุมปริมาณวัสดุและคุณภาพของงานได้ดีกว่าการก่อสร้างแบบหล่อในที่เป็นอย่างมาก (กรรณ คำลือ และสิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2548; จักษดา ธีรารังวุฒิ และสิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2548) ทำให้ควบคุมต้นทุนด้านวัสดุได้ดีกว่า ความคลาดเคลื่อนหรือข้อผิดพลาดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจึงมีน้อย ผลงานที่ได้จึงมีคุณภาพดี (Yip et al., 1999)

ในประเทศไทยได้มีการก่อสร้างโดยใช้ระบบสำเร็จรูปมานานพอสมควร โดยเฉพาะอย่างยิ่งการก่อสร้างระบบสาธารณูปโภคขนาดใหญ่ เช่น ระบบทางด่วน เป็นต้น ส่วนที่นำมาประยุกต์ใช้กับงานก่อสร้างอาคารก็มักจะเป็นแผ่นพื้น และผนัง

คอนกรีตสำเร็จรูป โดยที่อาคารเหล่านั้นยังใช้ส่วนของโครงสร้างหลัก เช่น ฐานราก เสา และคาน เป็นการก่อสร้างแบบหล่อในที่เช่นเดิม (Sibunruang, 1977) ดังนั้นเพื่อตอบสนองต่อการประยุกต์ใช้และการพัฒนาการก่อสร้างแบบสำเร็จรูป บทความนี้จึงกล่าวถึงการศึกษาคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กรงน้ำฝั่งที่ส่วนรองรับ โดยมีจุดประสงค์หลักคือ เพื่อศึกษาผลของความยาวระยะฝั่งเหล็กรงน้ำที่มีต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป ซึ่งเหล็กรงน้ำดังกล่าวจะช่วยทำให้การติดตั้งคานเข้ากับชิ้นส่วนของโครงสร้างอื่น ๆ ทำได้โดยง่ายขึ้น

วัตถุประสงค์ และวิธีการ

ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยเป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีหน้าตัดกว้าง 0.175 เมตร ลึก 0.35 เมตร และยาว 4.0 เมตร จำนวน 16 ตัวอย่าง ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเหล็กรงน้ำฝั่งที่ส่วนรองรับ จำนวน 12 ตัวอย่าง และคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีเหล็กรงน้ำฝั่งที่ส่วนรองรับซึ่งใช้เป็นคานอ้างอิง (control beams) จำนวน 4 ตัวอย่าง ตัวอย่างคานทั้งหมดออกแบบโดยวิธีกำลัง โดยใช้สมการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท. 1008-38) (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2538) ขณะที่เหล็กข้ออ้อย

ขนาด 16 มิลลิเมตร (DB16-SD30) และเหล็กเส้นกลมขนาด 6 มิลลิเมตร (RB6-SR24) ถูกใช้เป็นเหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ตามลำดับ โดยมีปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงต่ำกว่าอัตราส่วนที่สภาวะสมดุลตามข้อกำหนดที่ 4303(ข) (ว.ส.ท. 1008-38)

สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเหล็กทรงน้ำผึ้งที่ส่วนรองรับ ใช้เหล็กทรงน้ำผึ้งขนาด 100 x 50 มิลลิเมตร น้ำหนัก 9.36 กิโลกรัมต่อเมตร (มอก.1127-2539) ฝังบริเวณปลายทั้งสองด้านของคาน ดังแสดงในรูปที่ 1 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วย ความยาวระยะฝัง (embedded length) หรือ (l_d) ของเหล็กทรงน้ำผึ้ง 3 ค่า ได้แก่ 50, 110 และ 140 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างเหล็กรับแรงเฉือน (spacing) 2 ค่า คือ 30 และ 50 เซนติเมตร การทดสอบตัวอย่างคานจะกระทำแบบ four-points loading test นอกจากนี้ที่บริเวณกึ่งกลางความยาว

ของเหล็กเสริมรับแรงดึง ได้ติดมาตรวัดความเครียด (strain gauge) เพื่อตรวจสอบความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงที่หุ้มโดยคอนกรีตภายใต้แรงกระทำ

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย โดยที่ชื่อตัวอย่างทดสอบ X-YYY-ZZ ใช้หลักการอ่านดังต่อไปนี้ X หมายถึง รูปแบบของคานซึ่งมี 2 รูปแบบได้แก่ R และ P ซึ่งเป็นสัญลักษณ์แทนคานคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงและคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กทรงน้ำผึ้งที่ส่วนรองรับ ตามลำดับ YYY หมายถึง ความยาวระยะฝังของเหล็กทรงน้ำผึ้งในหน่วยเซนติเมตร และสุดท้าย ZZ หมายถึง ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกในหน่วยเซนติเมตร

การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยได้ทดสอบตามมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) ได้แก่ การทดสอบกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีต

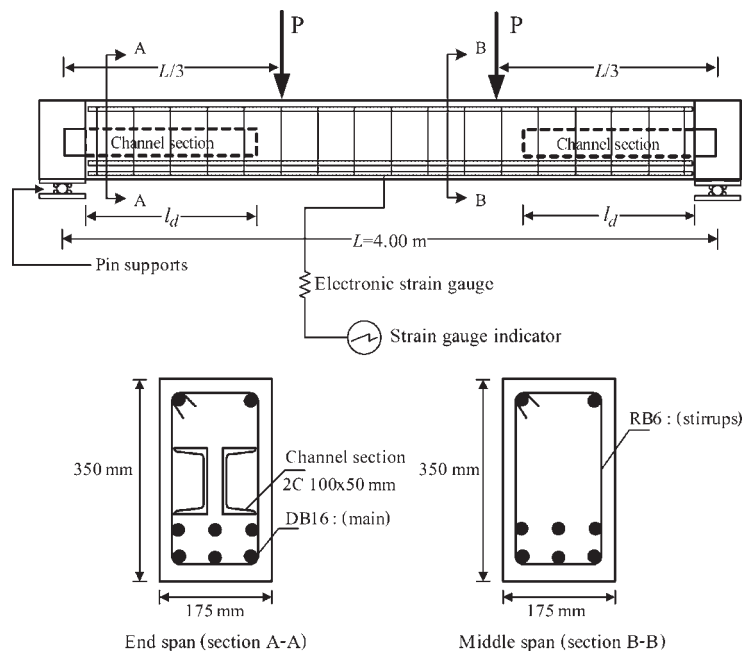


Figure 1. Details of test specimens

ทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM C39-96 และการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมและเหล็กคาน้ำตามมาตรฐาน ASTM E8-98

ส่วนขั้นตอนการทดสอบตัวอย่างคานในงานวิจัยมีดังนี้ 1) ทำการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับ loading frame โดยจุดรองรับของคานทั้งสองด้านเป็นแบบ pin supports การทดสอบตัวอย่างถูกกระทำแบบ four-points loading test โดยใช้เหล็กรูปพรรณรูปตัวไอถ่ายแรงจาก hydraulic ram ลงสู่คานตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2 2) ติดตั้ง dial gauge บนตัวอย่างทดสอบที่ตำแหน่งกึ่งกลางความยาวคาน จำนวน 1 ตัว และที่ระยะเท่ากับ $L/6$ ถัดจาก dial gauge ตัวแรกไป

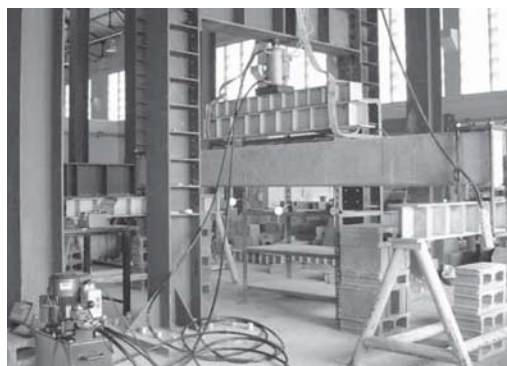


Figure 2. Four-point loading test set-up for the precast reinforced concrete beams

ทางด้านซ้ายและด้านขวา จำนวนด้านละ 1 ตัว เพื่อวัดระยะแอนตัวของตัวอย่างทดสอบ 3) ทำการ pre-loading ตัวอย่างทดสอบ โดยให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบประมาณ 20 กิโลนิวตัน เพื่อตรวจสอบว่า dial gauge ทั้งหมดทำงานได้อย่างสมบูรณ์ 4) ตั้งค่าศูนย์แก่ dial gauge ทั้งหมดอีกครั้ง 5) ทำการต่อสายไฟจากมาตรวัดความเครียดเข้ากับ strain gauge indicator 6) ดำเนินการทดสอบโดยใช้ hydraulic pump อัดน้ำมัน hydraulic ไปยัง hydraulic ram อย่างช้า ๆ บันทึกค่าน้ำหนักบรรทุกและการแอนตัวของตัวอย่างคานจาก dial gauge ทั้ง 3 ตัว รวมทั้งค่าความเครียดจาก strain gauge indicator 7) ทำการทดสอบและบันทึกข้อมูลต่าง ๆ อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งระยะการแอนตัวสูงสุดที่กึ่งกลางความยาวคานมีค่าเท่ากับความยาวประสิทธิผลของคานหารด้วย 100 ($\Delta = L/100$) ซึ่งมีค่าประมาณ 2.4 เท่าของระยะการแอนตัวที่ยอมรับในมาตรฐานการออกแบบ จึงหยุดการบันทึกข้อมูล 8) ถอด dial gauge ออก และทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไปจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติเพื่อสังเกตลักษณะการวิบัติของคาน

ผลการวิจัย

จากผลการทดสอบวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยพบว่า วัสดุต่าง ๆ มีคุณสมบัติทางกล ดังที่แสดงในตารางที่ 2

Table 1. Details of test specimens

Specimens	Reinforcement ratio, ρ (%)	Spacing of stirrups, S (cm)	Embedded length, l_d (cm)	Amount
R-000-30	2.51	30	0	2
P-050-30	2.51	30	50	2
P-110-30	2.51	30	110	2
P-140-30	2.51	30	140	2
R-000-50	2.51	50	0	2
P-050-50	2.51	50	50	2
P-110-50	2.51	50	110	2
P-140-50	2.51	50	140	2

ในการทดสอบกำลังรับแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง และคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กวางน้ำผึ้งที่ส่วนรองรับ ในบทความนี้ได้ให้นิยามให้น้ำหนักบรรทุกสูงสุด ($P_{L/100}$) เป็นกำลังรับแรงสูงสุดของคานที่ระยะการแอ่นตัวมีค่าเท่ากับ $L/100$ จากการศึกษาพบว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (load) และระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน (midspan deflection) ที่ได้จากการทดสอบคานที่มีระยะห่างของเหล็กวางน้ำผึ้งที่ต่างกัน มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3(a) ซึ่งจะเห็นได้ว่า

ลักษณะของกราฟเป็นเส้นตรงสองเส้นแบบ bilinear ที่มีความชันแตกต่างกัน โดยเส้นกราฟในช่วงแรกจะมีความชันสูงกว่าเส้นกราฟในช่วงที่สองมาก ในช่วงแรกคานจะมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear) ซึ่งคอนกรีต เหล็กเสริม และเหล็กวางน้ำผึ้งจะร่วมกันรับแรงกระทำ จนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกของคานมีค่าประมาณ 80 - 85 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ($P_{L/100}$) ณ จุดนี้เหล็กเสริมจะมีค่าความเครียดที่จุดคราก (yield strain) ประมาณ 0.0011 - 0.0012 มิลลิเมตรต่อมิลลิเมตร ดังแสดง

Table 2. Mechanical properties of materials

Materials	Yielding strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)
Concrete	-	45.7	26.9×10^3
Reinforcing RB6	317.0	457.8	193.5×10^3
Reinforcing DB16	411.9	612.6	202.1×10^3
Channel section	343.2	503.0	194.4×10^3

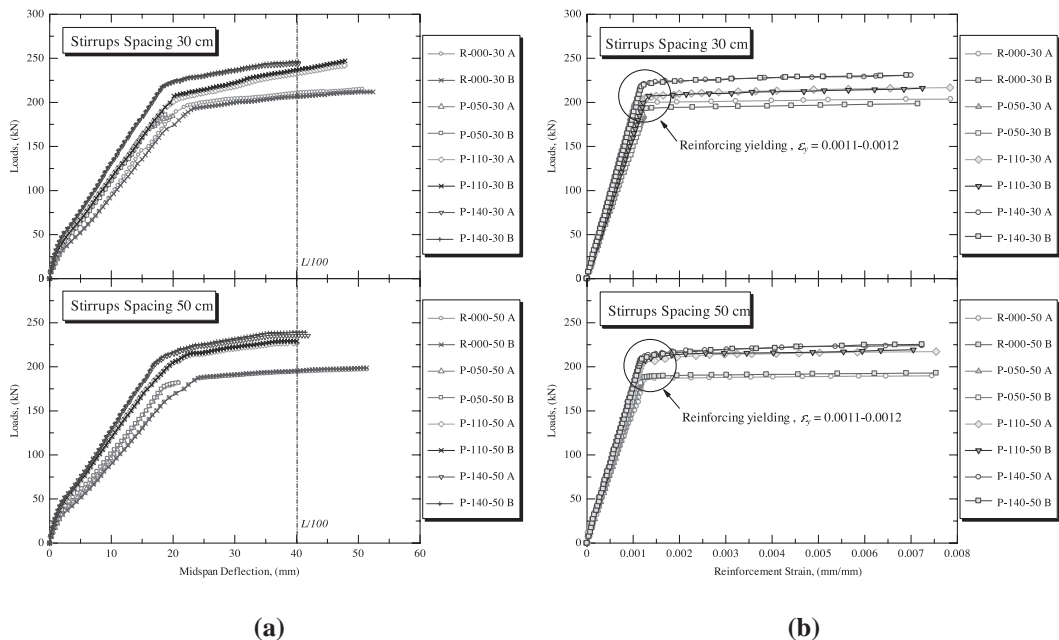


Figure 3. (a) Load versus midspan deflection diagram of the specimens
(b) Load versus reinforcement strain diagram of the specimens

ในรูปที่ 3(b) และมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากการทดสอบแรงดึงของเหล็กเสริม ในช่วงนี้สามารถสังเกตเห็นรอยร้าวเกิดขึ้นใต้ท้องคานบริเวณกึ่งกลางคานและค่อย ๆ ขยายตัวสูงขึ้นในอัตราที่รวดเร็ว จากนั้นพฤติกรรมของคานเริ่มเข้าสู่ช่วงที่สอง การแตกร้าวจะเกิดการขยายตัวมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ขณะที่ค่าการแอ่นตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมากกว่าในช่วงแรก โดยน้ำหนักบรรทุกรวมจะเพิ่มขึ้นอีกไม่มากนัก ประมาณ 15 - 20 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคาน ($P_{L/100}$)

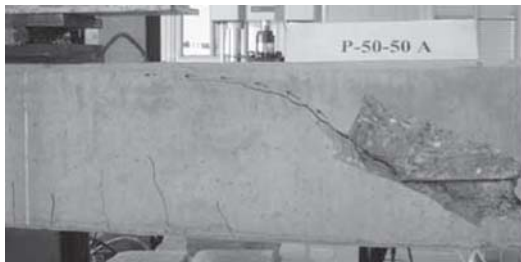
รูปแบบการวิบัติที่เกิดขึ้นสำหรับคานที่มีระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกเท่ากับ 30 และ 50 เซนติเมตร มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคือคานจะมีลักษณะแบบเฉือนทแยง (diagonal shear failure) โดยช่วงแรกรอยร้าวในแนวตั้งจะเกิดขึ้นก่อนบริเวณกึ่งกลางคานเมื่อน้ำหนักบรรทุกมีค่าเพิ่มมากขึ้น รอยร้าวในแนวตั้งนี้จะขยายตัวและขยับตัวสูงขึ้น จนกระทั่งแรงดึงทแยงภายในคานมีค่ามากกว่ากำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีตและเหล็กเสริม ช่วงนี้คานจะเกิดรอยร้าวในแนวทแยง โดยที่รอยร้าวดังกล่าวไม่สามารถขยับตัวผ่านเหล็กรงน้ำที่ฝังอยู่ภายในคานได้ เนื่องจากเหล็กรงน้ำทำหน้าที่รับแรงดึงกล่าวทำให้รอยร้าวเปลี่ยนทิศทางการขยายตัวไปตามความยาวของผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตและเหล็กรงน้ำแทน จนกระทั่งรอยร้าวขยายตัวผ่านรอยต่อระหว่างเหล็กรงน้ำกับคอนกรีต

ที่ปลายเหล็กรงน้ำ การวิบัติแบบเฉือนทแยงจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด (immediate failure) โดยทำมุมประมาณ 40 - 45 องศากับแนวแกน ดังแสดงในรูปที่ 4(a) และ 4(b) ซึ่งแสดงลักษณะการวิบัติของคานที่มีความยาวระยะฝั่งของเหล็กรงน้ำเท่ากับ 50 เซนติเมตร และความยาวระยะฝั่งของเหล็กรงน้ำเท่ากับ 110 และ 140 เซนติเมตร ตามลำดับ

วิจารณ์ผลการทดสอบ

รูปที่ 5 เป็นแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการแอ่นตัวตามแนวแกนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของคานที่มีระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกทั้ง 2 ขนาด โดยแปรผันระยะฝั่งของเหล็กรงน้ำที่ความยาวต่างๆ (50, 110 และ 140 เซนติเมตร) พบว่า ระยะการแอ่นตัวของคานมีค่าลดลง เมื่อความยาวระยะฝั่งของเหล็กรงน้ำมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากคานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามระยะฝั่งของเหล็กรงน้ำ ส่งผลให้คานเกิดการแอ่นตัวลดลง

นอกจากนี้จากการเปรียบเทียบระยะการแอ่นตัวเฉลี่ยที่กึ่งกลางความยาวคาน ภายใต้แรงกระทำที่มีค่าเท่ากัน ($P = 180$ กิโลนิวตัน) ในช่วงสภาวะใช้งาน (service load) ดังแสดงในตารางที่ 3 จากตารางพบว่า คานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กรงน้ำฝั่งที่ส่วนรองรับ มีระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางความยาวคานต่ำกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง 4.4 - 34.2 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากคาน



(a)



(b)

Figure 4. Typical mode of failure of the specimens

คอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปดังกล่าว มีความสามารถในการต้านทานการแอ่นตัวจากแรงกระทำได้เพิ่มมากขึ้น

จากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของคาน ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่า คานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กแรงน้ำฝิ่งที่ส่วนรองรับ มีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่สภาวะใช้งานที่ค่าการแอ่นตัว

เท่ากับ $L/240$ สูงกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงประมาณ 12.8 - 31.2 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังพบว่าระยะฝิ่งของเหล็กแรงน้ำ 50 เซนติเมตร ทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานลดลง เนื่องจากระยะฝิ่งเหล็กแรงน้ำไม่เพียงพอทำให้รอยร้าวในแนวทแยงที่เกิดขึ้นไม่ตัดผ่านเหล็กแรงน้ำ รวมทั้งไม่สามารถชดเชยเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

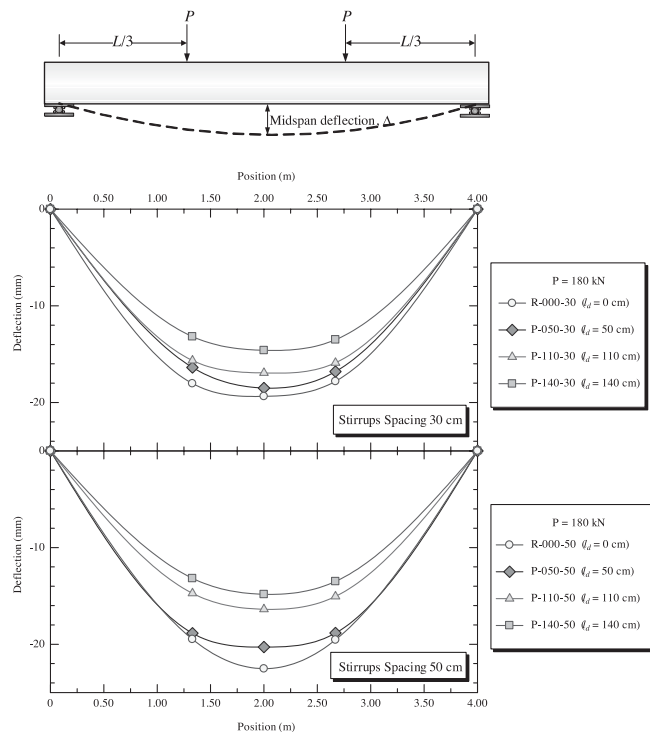


Figure 5. Deflection diagram along the axial of the specimens

Table 3. Midspan deflection of the specimens

Specimens	Embedded length, l_d (cm)	Midspan deflection, Δ (mm)	Deflection decreased (%)
R-000-30	0	19.36	-
P-050-30	50	18.50	4.4
P-110-30	110	16.94	12.5
P-140-30	140	14.60	24.6
R-000-50	0	22.52	-
P-050-50	50	20.29	9.9
P-110-50	110	16.38	27.3
P-140-50	140	14.83	34.2

ที่มีระยะห่างเพิ่มขึ้นได้ จึงทำให้มีค่าการวิบัติที่ต่ำกว่าคานที่มีระยะฝังของเหล็กรงน้ำ 110 และ 140 เซนติเมตร

เมื่อเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุก P_y ที่ได้จากการทดสอบกับสมการออกแบบของ ว.ส.ท. พบว่าค่าน้ำหนักบรรทุกที่ได้จากการทดสอบมีค่ามากกว่าค่าน้ำหนักบรรทุกที่ยอมรับได้จากสมการของ ว.ส.ท. โดยคานที่มีระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกเท่ากับ 30 เซนติเมตร อัตราส่วนความปลอดภัยอยู่ระหว่าง 1.31 - 1.49 และอัตราส่วนความปลอดภัยของคานที่มีระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกเท่ากับ 50 เซนติเมตร อยู่ระหว่าง 1.38 - 1.59 สาเหตุเนื่องมาจากเหล็กรงน้ำที่ฝังอยู่ภายในช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่คาน ทำให้สามารถต้านทานการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่มากกระทำได้เพิ่มมากขึ้น นอกจากนั้นแล้วระยะฝังของเหล็กรงน้ำจะช่วยให้การวิบัติในลักษณะแบบเฉียงทแยงเกิดขึ้นในอัตราที่ช้าลง เนื่องจากแรงเฉือนทแยงไม่สามารถขยายตัวผ่านเหล็กรงน้ำที่ฝังอยู่ภายในคานได้ ทำให้เกิดการถ่ายแรงดังกล่าวไปตามความยาวของผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตและเหล็กรงน้ำ ซึ่งหมายความว่า ถ้าความยาวของระยะฝังเหล็กรงน้ำเพิ่มขึ้น พื้นที่ในการต้านทานแรงเฉือนก็จะมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้คานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นความยาวระยะฝังของเหล็ก

รงน้ำเป็นปัจจัยหนึ่งที่ควบคุมความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคาน

รูปที่ 6 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนและระยะฝังของเหล็กรงน้ำ จากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่อระยะฝังของเหล็กรงน้ำมีความยาวเพิ่มขึ้น ค่าของกำลังรับแรงเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากเหล็กรงน้ำที่ฝังอยู่ภายในทำให้คานมีกำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นแล้ว หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นจะเป็นอัตราส่วน โดยตรงกับระยะฝังของเหล็กรงน้ำที่เพิ่มขึ้น

บทสรุป

จากการศึกษาพบว่า คานส่วนใหญ่มีพฤติกรรมแบบ bilinear โดยที่ความสามารถในการรับแรงสูงสุดในช่วงเส้นตรงแรกมีค่าประมาณ 80 - 85 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ($P_{L/100}$) จากนั้นการแอ่นตัวของคานจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติในรูปการวิบัติแบบเฉือนทแยง (diagonal shear failure) ที่สภาวะใช้งานที่การแอ่นตัวของคานมีค่าเท่ากับ $L/240$ คานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงประมาณ 10.2 - 37.6 เปอร์เซ็นต์ โดยที่อัตราส่วน

Table 4. Testing results of the specimens

Specimens	Load (kN)			[a]/[b]
	$P_{L/240}$	P_y^1 (Test.), [a]	P_y^2 (Cal.), [b]	
R-000-30	153.22	190.51	140.80	1.35
P-050-30	172.80	185.15	140.80	1.31
P-110-30	176.78	198.96	140.80	1.41
P-140-30	200.96	209.18	140.80	1.49
R-000-50	145.36	185.89	127.66	1.45
P-050-50	160.21	175.67	127.66	1.38
P-110-50	181.72	198.13	127.66	1.55
P-140-50	199.99	203.29	127.66	1.59

^{1,2} Yielding load of the specimens obtained from the testing and EIT standard respectively.

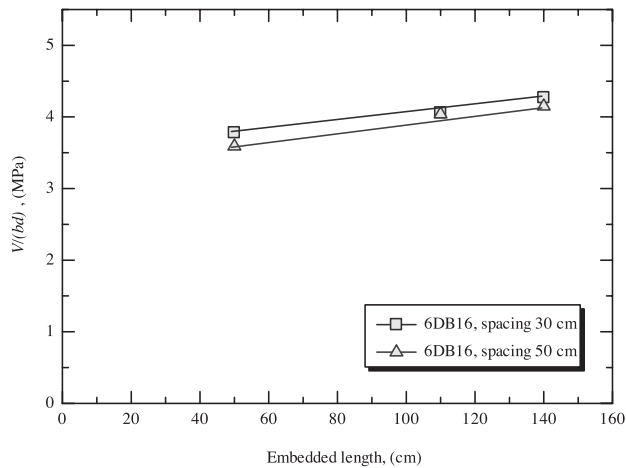


Figure 6. Shear strength versus embedded length diagram of the specimens

ความปลอดภัยอยู่ระหว่าง 1.31 - 1.59 ซึ่งเป็นผลมาจากความยาวระยะฝังของเหล็กวางน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้คานมีความแกร่งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้คานมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกและอัตราส่วนความปลอดภัยสูงขึ้น นอกจากนี้ความยาวระยะฝังของเหล็กวางน้ำจะเป็นปัจจัยหนึ่งที่ควบคุมความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคาน

เอกสารอ้างอิง

กรรม คำลือ และสิทธิชัย แสงอาทิตย์. (2548). พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปแบบอัดแรงบางส่วนภายใต้แรงกระทำตามขวาง. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10; 2-4 พฤษภาคม 2548; ชลบุรี, STR58-63.

จักษดา ชำรงวุฒิ และสิทธิชัย แสงอาทิตย์. (2548). คานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กวางน้ำฝังที่ส่วนรองรับภายใต้แรงกระทำเป็นจุดตามขวาง. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10; 2-4 พฤษภาคม 2548; ชลบุรี, STR1-6.

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. (2538). มาตรฐานสำหรับการอาคาร

คอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง. ครั้งที่ 1. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

Elliott, K.S. (2002). *Precast Concrete Structures*. 1st ed. Butterworth-Heinemann, Great Britain, UK, p. 1-13.

Haas, A.M. (1983). *Precast Concrete Design and Applications*. 1st ed. Applied Science Publishers Ltd., Essex, UK, p. 2-6.

Leet, K.M., and Bernal, D. (1997). *Reinforced Concrete Design*. 3rd ed. McGraw-Hill, Singapore, p. 17-30.

Nawy, E.G. (2000). *Reinforced Concrete a Fundamental Approach*. 4th ed. Prentice-Hall Inc., New Jersey, USA, p. 4-11.

Richardson, J.G. (1973). *Precast Concrete Production*. 1st ed. George Berridge & Co. Ltd., London, UK, p. 141-168.

Sibunruang, T. (1977). Construction methods of public housing in Thailand. *Proceedings of International Conference on Low Income Housing-Technology and Policy*; June, 1977; Bangkok, Thailand, p. 903-917.

Yip, W.K., Teng, S., Ting, S.K., and Hu, H.B. (1999). Behaviour of precast reinforced concrete beams with structural steel I-section embedded at the support sections. *Proceedings of the 7th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction*; August 27-29, 1999; Kochi, Japan, p. 973-978.