

## ผลกระทบของเหล็กปลอมต่อกำลัง ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล<sup>1</sup> ไกรวุฒิ เกียรติโกมล<sup>2</sup>  
สมชาย ชูชีพสกุล<sup>3</sup> และ เอนก ศิริพานิชกร<sup>4</sup>  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

### บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ เป็นการศึกษาผลกระทบของเหล็กปลอมต่อการรับน้ำหนักของเสา  
สั้นคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้การรับน้ำหนักตรงศูนย์กลางและน้ำหนักเยื้องศูนย์กลาง เมื่อทำการเสริม  
ที่ระยะห่างต่างๆ กัน โดยทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 48 ต้น แต่ละต้นมีขนาด  
หน้าตัด 20×30 ซม. สูง 120 ซม. เสริมเหล็กยื่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. จำนวน  
6 เส้น แบ่งตัวอย่างเสาออกเป็น 4 กลุ่มแต่ละกลุ่มมีตัวอย่างเสา 12 ต้น คือ กลุ่มที่ไม่เสริม  
เหล็กปลอม, กลุ่มที่เสริมเหล็กปลอมที่ระยะห่างกัน 5 ซม., 10 ซม., และ 20 ซม. ตามลำดับ  
เหล็กปลอมที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. แต่ละกลุ่มแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 กรณี  
คือ กรณีที่น้ำหนักกดตรงศูนย์กลางเสา, กรณีที่น้ำหนักกดเยื้องศูนย์กลางเสา 3 ซม., 6 ซม.,  
และ 9 ซม. ตามลำดับ โดยแต่ละกรณีใช้เสาจำนวน 3 ต้น

ผลการทดสอบพบว่า การเสริมเหล็กปลอมทำให้เสารับน้ำหนักได้สูงขึ้นมากกว่า  
กรณีที่ไม่เสริมเหล็กปลอม ในกรณีที่เสารับน้ำหนักเยื้องศูนย์กลางพบว่า เสาที่เสริมเหล็กปลอม  
มากกว่าจะรับน้ำหนักกดประลัยได้สูงกว่า นอกจากนี้ยังมีความเหนียวสูงกว่า คือมีระยะโค้ง  
ที่มากกว่าเมื่อเสารับน้ำหนักที่จุดวิบัติ การวิบัติของเสาที่ไม่เสริมเหล็กปลอมจะเกิดขึ้นใน  
ลักษณะทันทีทันใด ขณะที่เสาที่เสริมเหล็กปลอมจะมีการแตกร้าวที่ผิวเสาให้เห็นก่อนที่เสาค  
่อยๆ วิบัติ

<sup>1</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

<sup>2</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

<sup>3</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

<sup>4</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

## Effect of Confinement on Strength of Reinforced Concrete Columns

Chai Jaturapitakkul<sup>1</sup> Kraiwood Kiattikomol<sup>2</sup>

Somchai Chucheeesakul<sup>3</sup> and Anek Siripanichgorn<sup>4</sup>

King Mongkut's Institute of Technology Thonburi

---

### Abstract

The objective of this study is to investigate the effect of confinement on the strength of concrete columns subjected to eccentric load when using different spacing of tied reinforcement. A total number of 48 reinforced concrete columns was tested. Each column has a cross sectional area of 20×30 cm with a height of 120 cm and is reinforced with 6 main bars with a diameter of 12 mm. The samples of columns were divided into 4 groups and each group had 12 columns. The first group was the columns without any confinement, the rests were the columns with confinement provided by tied bars having a diameter of 6 mm. The second, third, and fourth groups were the columns with a spacing of tied bars of 5 cm, 10 cm, and 20 cm, respectively. Each group was tested in 4 cases, having load eccentricity of 0, 3, 6, and 9 cm, respectively, from the centroid of the column. Three columns were tested for each case.

The results showed that the columns with tied bar resisted higher load than the one without any tied bar. It was found that the columns with heavy confinement gave higher compressive loads and larger lateral deflections as compared with the columns of less confinement. For columns without any confinement, the failure occurred suddenly when the columns reached their ultimate loads. In contrary to the columns with confinement, cracks were observed at the covering of the columns, then spalling occurred, after that the columns failed slowly.

---

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Civil Engineering

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Civil Engineering

<sup>4</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering

## บทนำ

เสา คือองค์อาคารที่มีสัดส่วนค่าความสูงต่อส่วนแคบที่สุดของหน้าตัดมากกว่าหรือเท่ากับสาม และองค์อาคารนี้ออกแบบเพื่อรับแรงอัดตามแนวแกนเป็นหลัก [1] โดยทั่วไป เสาจะมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือรูปทรงกลม เสาจะรับแรงตามแนวแกนซึ่งถ่ายมาจากพื้นและคาน หรือรับแรงตามแนวแกนและโมเมนต์กระทำพร้อมกันจากนั้น ถ่ายลงสู่ฐานราก ดังนั้น เสาจึงเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อความแข็งแรงและเสถียรภาพของอาคาร การออกแบบเสารูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส หน้าตัดและปริมาณเหล็ก ยึดได้มาจากการวิเคราะห์หน้าหนักที่กระทำต่อเสา ส่วนการเสริมเหล็กปลอกไม่ได้มาจากการวิเคราะห์หน้าหนักที่กระทำต่อเสา เพราะระยะห่างของการเสริมเหล็กปลอกเป็นเพียงนำข้อกำหนดของ ว.ส.ท. [1] หรือ ACI 318-89 [2] มาใช้เท่านั้น กล่าวคือระยะเสริมเหล็กปลอกเท่ากับ 16 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กยึด หรือ 48 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กปลอก หรือมิติที่น้อยที่สุดของหน้าตัดเสาโดยเลือกใช้ค่าที่น้อยที่สุดมาทำการเสริมเหล็กปลอก

เสาคอนกรีตเมื่อมีน้ำหนักกระทำ จะเกิดการหดตัวในแนวน้ำหนักที่กระทำและในขณะเดียวกันจะเกิดการขยายตัวในแนวตั้งฉากกับแนวน้ำหนักที่กระทำนั้นด้วย การขยายตัวในแนวตั้งฉากกับแนวน้ำหนักที่กระทำนี้จะทำให้เกิดแรงภายในขึ้นซึ่งทำมุมตั้งฉากกับแนวน้ำหนักที่กระทำ การเสริมเหล็กปลอกในเสาเพื่อรับแรงที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นการเพิ่มการรับแรงของเสาให้สูงขึ้นและเพิ่มความเหนียว (Ductility) ให้กับเสาด้วย มีนักวิจัยหลายท่านที่ทำการศึกษารื่องของเหล็กปลอกต่อพฤติกรรมของเสาภายใต้แรงกระทำซึ่งพอสรุปได้ดังนี้

Iyengar และคณะ [3] ได้ทดสอบคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. และคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 15 ซม. ภายใต้แรงอัดพบว่าเหล็กปลอกจะเพิ่มการรับกำลังอัดและความเหนียวของคอนกรีต และเหล็กปลอกเกลียวจะให้ค่าประสิทธิภาพในการเพิ่มสูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าหากระยะเรียงของเหล็กปลอกมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าขนาดที่แคบที่สุดของตัวอย่าง เหล็กปลอกที่เสริมเข้าไปจะไม่ช่วยเพิ่มการรับกำลังอัดของเสาคอนกรีต Soliman และ Yu [4] ได้ทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 16 ตัวอย่าง พบว่า การเสริมเหล็กปลอกที่ถี่ขึ้นสามารถเพิ่มกำลังอัดประลัยและความเหนียวของเสาขึ้นอย่างมาก การใช้เหล็กปลอกที่ใหญ่ขึ้นจะเพิ่มค่ากำลังอัดประลัยไม่มากนักแต่เพิ่มความเหนียวของเสาได้มาก นอกจากนี้การใช้เหล็กปลอกที่ผูกธรรมดาหรือเชื่อมให้ผลที่ใกล้เคียงกัน

ผลกระทบของเหล็กปลอกต่อคอนกรีตกำลังสูงขนาด 83.6 ถึง 93.5 MPa. ได้มีการศึกษาโดย Yong และคณะ [5] ซึ่งทดสอบเสารับแรงตรงศูนย์กลางทั้งหมด พบว่าเสาคอนกรีตที่ไม่เสริมเหล็กจะเกิดการวิบัติอย่างทันทีทันใดโดยระเบิดแตกกระจายเมื่อให้แรงถึงค่าสูงสุดและลักษณะการวิบัติเป็นการแตกแบบแรงเฉือนทำมุมประมาณ 61.5-68 องศากับแนวราบ การเสริมเหล็กปลอกจะทำให้เสามีความเหนียวสูงขึ้นและแก้ปัญหาการวิบัติแบบทันทีทันใดได้ นอกจากนี้เสาที่มีปริมาณเหล็กเสริมยึดที่มากกว่าจะมีความเหนียวมากกว่าเสา

ที่มีปริมาณเหล็กเสริมยื่นที่น้อยกว่า Dilger และคณะ [6] ทำการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและไม่เสริมเหล็กขนาด 152×152×610 มม. โดยการใช้อัตราการกดที่แตกต่างกัน 3 ค่า คืออัตราการให้น้ำหนักกดที่เร็วมาก, ปานกลาง, และอัตราที่ช้ามาก พบว่าอัตราการให้น้ำหนักมีผลอย่างมากต่อการรับน้ำหนักของเสา กล่าวคือ เสาคอนกรีตที่ไม่เสริมเหล็กเมื่อถึงจุดวิบัติ จะพังแบบระเบิดเมื่อใช้อัตราการกดที่เร็วมากและมีค่ากำลังที่จุดวิบัติสูงกว่าเสาคอนกรีตที่ทดสอบด้วยอัตราปานกลางถึงร้อยละ 35 ในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กพบว่าการใช้เหล็กปลอกสามารถเพิ่มการรับน้ำหนักของเสาให้สูงกว่ากรณีของเสาที่ไม่เสริมเหล็กและยังเพิ่มความเหนียวของเสาให้สูงขึ้นมากไม่ว่าจะใช้อัตราเร็วในการทดสอบขนาดใด

นอกจากนี้ Sargin และคณะ [7] และ Gangadharam และ Reddy [8] ได้ทำการศึกษาถึงเรื่องของเหล็กปลอกที่มีผลต่อความเหนียวและการรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของเสา และให้ผลที่คล้ายคลึงกันคือ การเสริมเหล็กปลอกจะเพิ่มความเหนียวและการรับน้ำหนักของเสาให้มากขึ้น แต่งานวิจัยเหล่านี้จะพิจารณาแต่เสาที่รับน้ำหนักตรงศูนย์กลางเท่านั้น [3,5,6,8] หรือศึกษาถึงผลกระทบของเหล็กปลอกต่อเสาเมื่อรับน้ำหนักเยื้องศูนย์กลางเพียงค่าใดค่าหนึ่ง [4,7] ดังนั้นจึงควรมีการวิจัยเพื่อทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกระยะห่างต่างๆ กัน และรับน้ำหนักกดที่มีระยะเยื้องศูนย์กลางต่างๆ กันเพื่อให้ครอบคลุมพฤติกรรมของเสาได้ครบถ้วนมากขึ้น

## วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้เพื่อศึกษาความสามารถการรับน้ำหนักของเสาเส้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกที่ระยะห่างต่างๆ กันและทดสอบการรับน้ำหนักเยื้องศูนย์กลางที่ระยะห่างต่างๆ กัน นอกจากนี้ยังศึกษาถึงลักษณะการแตกร้าวของเสาที่เสริมเหล็กปลอกที่ระยะห่างต่างๆ กันภายใต้การรับน้ำหนักเยื้องศูนย์กลาง เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณตามทฤษฎีของ ACI 318-89 [2] และสุดท้ายนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบเสาอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

## การเตรียมตัวอย่างและการทดลอง

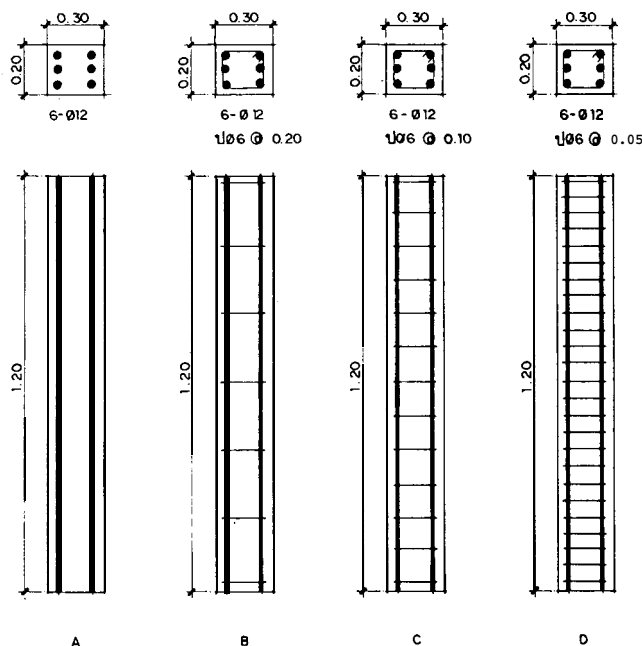
การศึกษานี้ใช้เสาคอนกรีตหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 20 ซม. × 30 ซม. สูง 120 ซม. จำนวน 48 ต้น เสริมเหล็กยืนขนาด 6-Ø 12 มม. และเสริมเหล็กปลอกขนาด Ø 6 มม. ที่ระยะห่าง 5 ซม., 10 ซม., 20 ซม., และไม่เสริมเหล็กปลอก ทดสอบการรับน้ำหนักของเสาคอนกรีตเหล่านี้ที่อายุ 28 วัน โดยมีระยะเยื้องศูนย์กลางของน้ำหนักที่กระทำต่อเสาคอนกรีตเท่ากับ 0, 3, 6, และ 9 ซม. จากจุดศูนย์กลางหน้าตัดเสา เสาดังกล่าวมีค่าอัตราส่วนความชะลูดของดันทดสอบเท่ากับ 13.85 ซึ่งถือว่าเป็นเสาสั้น [2] แต่ระยะห่างของเหล็กปลอกหรือระยะเยื้องศูนย์กลางของเสาจะใช้เสาในการทดสอบ 3 ต้น

### การเตรียมตัวอย่างเสาคอนกรีต

อัตราส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้จะคงที่ตลอด คือ ปูนซีเมนต์:ทราย: หิน เท่ากับ 1:2:4 โดยน้ำหนัก มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.70 ภายหลังจากผสมคอนกรีตแล้วจะเทลงในแบบหล่อเสาและทำการกระทุ้งด้วยเหล็กขนาด  $\varnothing 16$  มม. เพื่อให้เนื้อคอนกรีตไหลเข้าแบบให้แน่นทั้งนี้เพื่อลดฟองอากาศและรูพรุนในเนื้อคอนกรีต ภายหลังก่อเสาคอนกรีต 24 ชั่วโมงจึงถอดแบบ จากนั้นทำการบ่มเสาคอนกรีต โดยใช้กระสอบป่านคลุมเสาทุกต้น ราดน้ำจนเปียกชุ่มและรักษาสภาพชื้นนี้ไว้จนเสาคอนกรีตมีอายุ 28 วันจึงนำไปทดสอบ ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของเสาคอนกรีตที่ทำการทดสอบ ส่วนรูปที่ 1 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กยืนและเหล็กปลอกของเสาที่ทำการทดสอบ นอกจากนี้ยังหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอกจำนวน 19 ตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM C-39 [9] ซึ่งเป็นคอนกรีตที่หล่อพร้อมๆ กับเสาคอนกรีต คอนกรีตนี้นำไปบ่มเช่นเดียวกับวิธีการที่ใช้ในการบ่มเสา คือใช้กระสอบป่านคลุมและรดน้ำจนเปียกชื้นเป็นระยะเวลา 28 วันจึงนำไปทดสอบหากำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 1 รายละเอียดและจำนวนตัวอย่างเสาคอนกรีตที่ทำการทดสอบ

Column Size (cmxcm)	Height (cm)	Main Bar (mm)	Tie Spacing	No. of Columns
20x30	120	6- $\varnothing 12$	--	12
20x30	120	6- $\varnothing 12$	$\varnothing 6 @ 0.05$ m	12
20x30	120	6- $\varnothing 12$	$\varnothing 6 @ 0.10$ m	12
20x30	120	6- $\varnothing 12$	$\varnothing 6 @ 0.20$ m	12



รูปที่ 1 การเสริมเหล็กยืนและเหล็กปลอกของเสาคอนกรีต

**การทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีต**

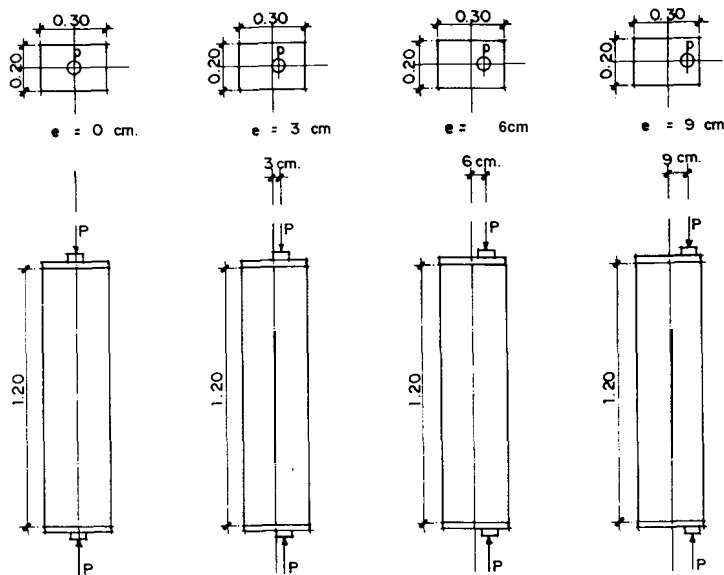
การทดสอบเสาคอนกรีตมีลำดับขั้นตอนดังนี้คือ

- วางเสาคอนกรีตให้อยู่บนเครื่อง Universal Testing Machine โดยจัดให้ปลายที่รองรับทั้งสองของเสาวางอยู่บนแผ่นเหล็กหนา 1 นิ้ว และบนแผ่นเหล็กนี้จะเชื่อมแผ่นเหล็กอีกชั้นหนึ่งซึ่งมีความหนา 1 นิ้วและมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. ซึ่งจะใช้เป็นตัวส่งถ่ายแรงผ่านไปยังเสาอีกชั้นหนึ่ง รูปที่ 2 แสดงการจัดวางเสาเพื่อทำการทดสอบที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่างๆ

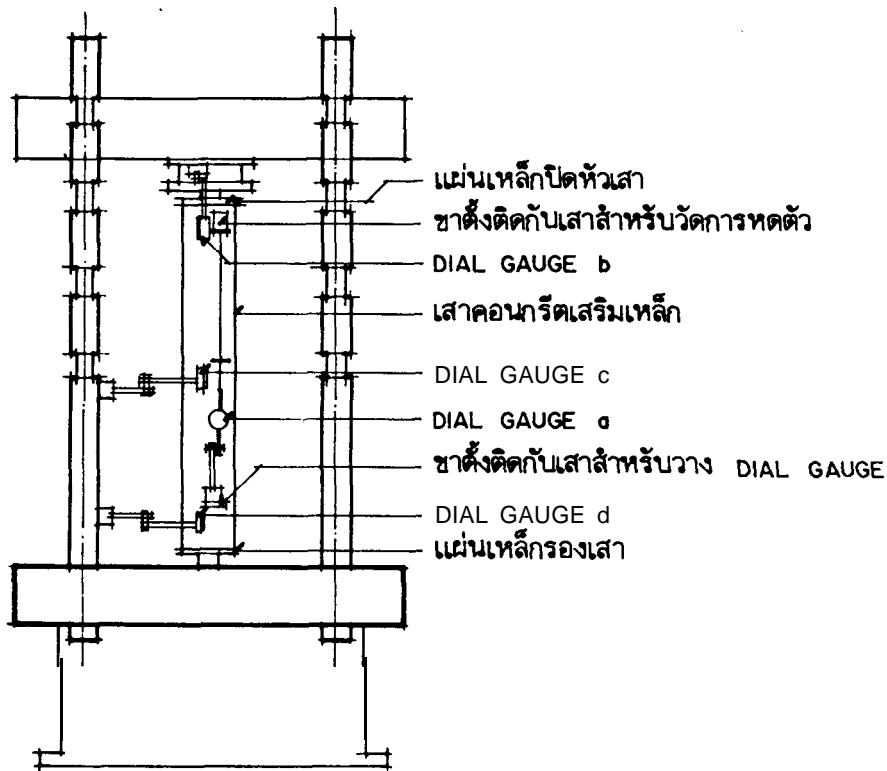
- ติดตั้ง Dial Gauge เพื่อวัดระยะการหดตัวของเสาเนื่องจากการรับน้ำหนักกดโดยใช้ความยาวพิงก์ (Gauge Length) เท่ากับ 1 เมตร โดยใช้ Gauge a เป็นอุปกรณ์วัดสำหรับระยะโค้งที่กึ่งกลางเนื่องจากโมเมนต์ที่เกิดจากการให้น้ำหนักเยื้องศูนย์กลางจะใช้ Dial Gauge ติดตั้งที่ระยะ 10 ซม. (Gauge b) ระยะ 60 ซม. (Gauge c) และระยะ 110 ซม. (Gauge d) จากหัวเสาลงมาตามลำดับ ติดตั้งเพื่อวัดระยะหดตัวและระยะโค้งตัวของเสาดังแสดงในรูปที่ 3

- ให้น้ำหนักกดแก่ตัวอย่างเสาด้วยอัตราค่าที่ประมาณ 4000 กก./นาที ทำการบันทึกค่าระยะหดตัวและระยะโค้ง ทุกๆ น้ำหนักกระทำที่เพิ่มขึ้น 5000 กก. จนกระทั่งเสาแตกร้าวและวิบัติในที่สุด บันทึกค่าน้ำหนักกดสูงสุดพร้อมทั้งสังเกตลักษณะการวิบัติของเสา

- เสาตัวอย่าง A, B, C, และ D หมายถึงเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่เสริมเหล็กปลอก, เสริมเหล็กปลอกที่ระยะ 20 ซม., 10 ซม., และ 5 ซม. ตามลำดับ ตัวอย่างเสา A0, A3, A6, และ A9 หมายถึงตัวอย่างเสาคอนกรีตกลุ่ม A ที่รับน้ำหนักเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ 0 ซม., 3 ซม., 6 ซม., และ 9 ซม. ตามลำดับ โดยตัวเลขที่ต่อท้ายตัวอักษรในแต่ละกรณีแสดงถึงระยะเยื้องศูนย์กลางที่ใช้ในการทดสอบเสา



รูปที่ 2 การจัดวางเสาเพื่อทำการทดสอบที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่างๆ



รูปที่ 8 การติดตั้งเพื่อวัดระยะหดและระยะโก่ง ของเสาคอนกรีต

## ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 48 ต้นภายใต้การรับน้ำหนักตรง ศูนย์และน้ำหนักเฉียงศูนย์ ผลของการศึกษามีดังต่อไปนี้

### การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอก

ผลทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน 19 ตัวอย่าง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 101.2 กก./ซม.<sup>2</sup> มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 85.4 กก./ซม.<sup>2</sup> และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 121.6 กก./ซม.<sup>2</sup>

### การทดสอบหน่วยแรง-ความเครียดของเหล็กปลอกและเหล็กยื่น

ผลการทดสอบหน่วยแรง-ความเครียดของเหล็กปลอก พบว่ามีค่าหน่วยแรงคราก เท่ากับ 2888 กก./ซม.<sup>2</sup> และโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ  $2.132 \times 10^6$  กก./ซม.<sup>2</sup> สำหรับเหล็กยื่นมีหน่วยแรงครากเท่ากับ 2884 กก./ซม.<sup>2</sup> และโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ  $2.177 \times 10^6$  กก./ซม.<sup>2</sup>

## ผลกระทบของเหล็กปลอมต่อการรับน้ำหนักของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะปลอมต่างๆ กัน และทดสอบภายใต้น้ำหนักที่มีระยะเยื้องศูนย์ต่างๆ กัน พบว่าการเสริมเหล็กปลอมมากขึ้น ทำให้การรับน้ำหนักของเสาเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อทำการทดสอบเสาในสภาวะอย่างเดียวกันทั้งกรณีรับน้ำหนักตรงศูนย์ และกรณีรับน้ำหนักเยื้องศูนย์ นอกจากนี้ เสาที่มีระยะเสริมเหล็กปลอมที่เท่ากันจะรับน้ำหนักได้น้อยลงเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มระยะเยื้องศูนย์ ที่ทำการให้น้ำหนักแก่เสามากขึ้น เพราะเสาจะวิบัติด้วยแรงดัดที่กระทำร่วมกับแรงอัด

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการรับน้ำหนักของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้น้ำหนักเยื้องศูนย์

เสา	ระยะเหล็กปลอม (ซม.)	ระยะเยื้องศูนย์ (ซม.)	Pu ทดลอง (ตัน)	น้ำหนักที่เสารับเพิ่มขึ้นจากเสาที่ไม่เสริมเหล็กปลอม (ร้อยละ)	น้ำหนักที่เสารับเพิ่มขึ้นจากเสาที่เสริมเหล็กปลอมระยะ 20 ซม. (ร้อยละ)	ระยะโก่งประลัย (มม.)
A0	-	0	64.78	-	-11.78	1.78
B0	20	0	73.44	13.36	-	2.97
C0	10	0	78.32	20.90	6.65	5.08
D0	5	0	82.73	27.69	12.64	4.72
A3	-	3	55.30	-	-14.29	1.95
B3	20	3	64.52	16.67	-	2.01
C3	10	3	74.20	34.17	15.00	2.08
D3	5	3	80.75	46.02	25.16	2.85
A6	-	6	47.70	-	-20.84	0.94
B6	20	6	60.27	26.33	-	1.52
C6	10	6	66.48	39.35	10.31	2.46
D6	5	6	70.76	48.31	17.40	3.57
A9	-	9	43.17	-	-24.28	1.01
B9	20	9	57.01	32.07	-	1.52
C9	10	9	62.54	44.86	9.68	2.21
D9	5	9	63.61	47.34	11.56	2.61

ในกรณีที่เสารับน้ำหนักตรงศูนย์ พบว่าการรับน้ำหนักเฉลี่ยของเสาที่ไม่เสริมเหล็กปลอมจะเพิ่มขึ้นจาก 64.78 ตัน เป็น 73.44 ตัน, 78.32 ตัน, และ 82.73 ตัน เมื่อเสริมเหล็กปลอมระยะห่าง 20 ซม., 10 ซม., และ 5 ซม. ตามลำดับ หรือการเพิ่มการรับกำลังของเสาเท่ากับร้อยละ 13.36, 20.90, และ 27.69 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเสาที่ไม่ได้เสริมเหล็กปลอม หากพิจารณาตามมาตรฐานของ วสท. [1] เสาที่ทดสอบในการวิจัยครั้งนี้จะต้องเสริมเหล็กปลอมด้วยระยะห่างอย่างน้อยเท่ากับ 20 ซม. และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับเสาที่เสริมด้วยเหล็กปลอมระยะห่างเท่ากับ 20 ซม. พบว่าการรับน้ำหนักของเสาที่ไม่เสริม



เหล็กปลอกจะน้อยกว่าเสาที่เสริมเหล็กปลอกระยะห่าง 20 ซม. ร้อยละ 11.78 และเสาที่เสริมเหล็กปลอกด้วยระยะ 10 ซม. กับ 5 ซม. จะรับน้ำหนักได้สูงกว่าเสาที่เสริมเหล็กปลอกระยะห่าง 20 ซม. อยู่ร้อยละ 6.50 และ 12.64 ตามลำดับ

ในกรณีที่เสารับน้ำหนักเอียงศูนย์ การเพิ่มการรับน้ำหนักของเสาที่เสริมเหล็กปลอกดีกว่ายิ่งปรากฏได้เด่นชัดขึ้น กล่าวคือเสารับน้ำหนักเอียงศูนย์ 3 ซม. ไม่เสริมเหล็กปลอกมีค่าเท่ากับ 55.3 ตัน และเพิ่มขึ้นเป็น 64.52 ตัน, 74.2 ตัน, และ 80.75 ตัน ตามลำดับ เมื่อมีระยะห่างของเหล็กปลอกเท่ากับ 20 ซม., 10 ซม., และ 5 ซม. ซึ่งคิดเป็นร้อยละของการเพิ่มจากเสาที่ไม่เสริมเหล็กปลอกเท่ากับ 16.67, 34.17, และ 46.02 ตามลำดับ ร้อยละของการเพิ่มนี้มีค่ามากกว่าร้อยละของการเพิ่มในกรณีที่เสารับน้ำหนักตรงศูนย์ และมีแนวโน้มว่าเสาที่รับน้ำหนักเอียงศูนย์มากยิ่งขึ้น การใส่เหล็กปลอกที่ระยะถี่ขึ้นจะทำให้ร้อยละของการรับน้ำหนักเพิ่มของเสาสูงมากขึ้น

### การเปรียบเทียบการรับน้ำหนักของเสาที่ได้จากการทดสอบและที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี

การคำนวณการรับน้ำหนักสูงสุดของเสาสั้นที่มีหรือไม่มีระยะเอียงศูนย์ สามารถหาได้จากหนังสืออ้างอิง [10] สำหรับตัวอย่างการคำนวณสามารถดูได้จากเอกสารอ้างอิง [11] ตารางที่ 3 แสดงการรับน้ำหนักสูงสุดที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการคำนวณ จะเห็นว่าค่าที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณสำหรับเสาที่ไม่เสริมเหล็กปลอก (ตัวอย่างเสา A) เมื่อรับน้ำหนักจนถึงจุดวิบัติจะมีค่าใกล้เคียงกันพอสมควร

ตารางที่ 3 กำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการคำนวณ

เสา	ระยะเหล็กปลอก (ซม.)	ระยะเอียงศูนย์ (ซม.)	Pu ทดลอง (ตัน)	Pu คำนวณ (ตัน)	การรับน้ำหนักเพิ่มของเสาเปรียบเทียบกับ Pu ทดลอง (ตัน)	ร้อยละของการเพิ่ม
A0	-	0	64.78	70.60	-5.82	-8.24
A3	-	3	55.30	57.40	-2.10	-3.66
A6	-	6	47.70	47.13	+0.57	+1.21
A9	-	9	43.17	39.11	+4.06	+10.38
B0	20	0	73.43	70.60	+2.83	+4.01
B3	20	3	64.52	57.40	+7.12	+12.40
B6	20	6	60.27	47.13	+13.14	+27.88
B9	20	9	57.01	39.11	+17.90	+45.77
C0	10	0	78.32	70.60	+7.72	+10.93
C3	10	3	74.20	57.40	+16.80	+29.27
C6	10	6	66.48	47.13	+19.35	+41.06

ตารางที่ 3 (da)

เสา	ระยะเหล็ก ปลอก (ซม.)	ระยะ เยื้องศูนย์ (ซม.)	Pu ทดลอง (ตัน)	Pu คำนวณ (ตัน)	การรับน้ำหนักเพิ่ม ของเสาเปรียบเทียบกับ Pu ทดลอง (ตัน)	ร้อยละของ การเพิ่ม
C9	10	9	62.54	39.11	+23.43	+59.91
DO	5	0	82.73	70.60	+12.13	+17.18
D3	5	3	80.75	57.40	+23.35	+40.68
D6	5	6	70.76	47.13	+23.63	+50.14
D9	5	9	63.61	39.11	+24.50	+62.64

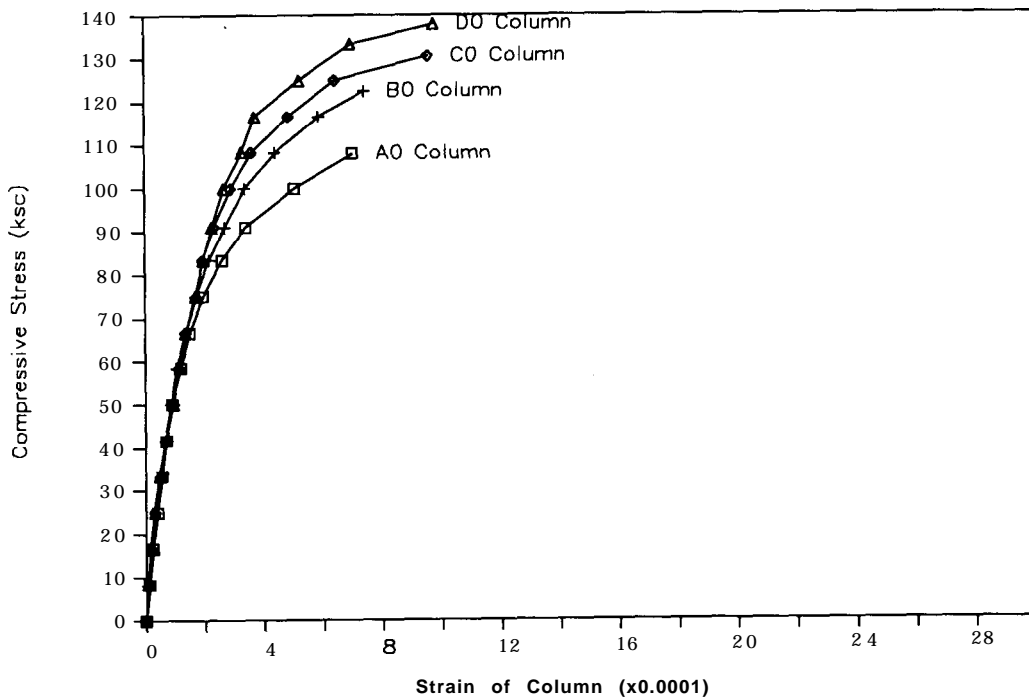
ในกรณีที่เสารับน้ำหนักเยื้องศูนย์ การใส่เหล็กปลอกทำให้เสาสามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มมากขึ้นกว่ากรณีที่เสาไม่ใส่เหล็กปลอกอย่างมาก ยิ่งเสารับน้ำหนักเยื้องศูนย์มากขึ้น ยิ่งทำให้ร้อยละของการรับน้ำหนักเพิ่มของเสาเนื่องจากการเสริมเหล็กปลอกยิ่งมากขึ้นตามไปด้วย เช่น เสารับแรงเยื้องศูนย์ 9 ซม. เสริมเหล็กปลอกระยะ 20 ซม., 10 ซม., และ 5 ซม. จะทำให้เสาสามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มอีกร้อยละ 45.77, 59.91, และ 62.64 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับการรับน้ำหนักของเสาที่ได้จากการคำนวณกรณีที่ไม่มีเสริมเหล็กปลอก

#### ความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักเยื้องศูนย์กับความเครียดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะเสริมเหล็กปลอกต่าง ๆ กัน

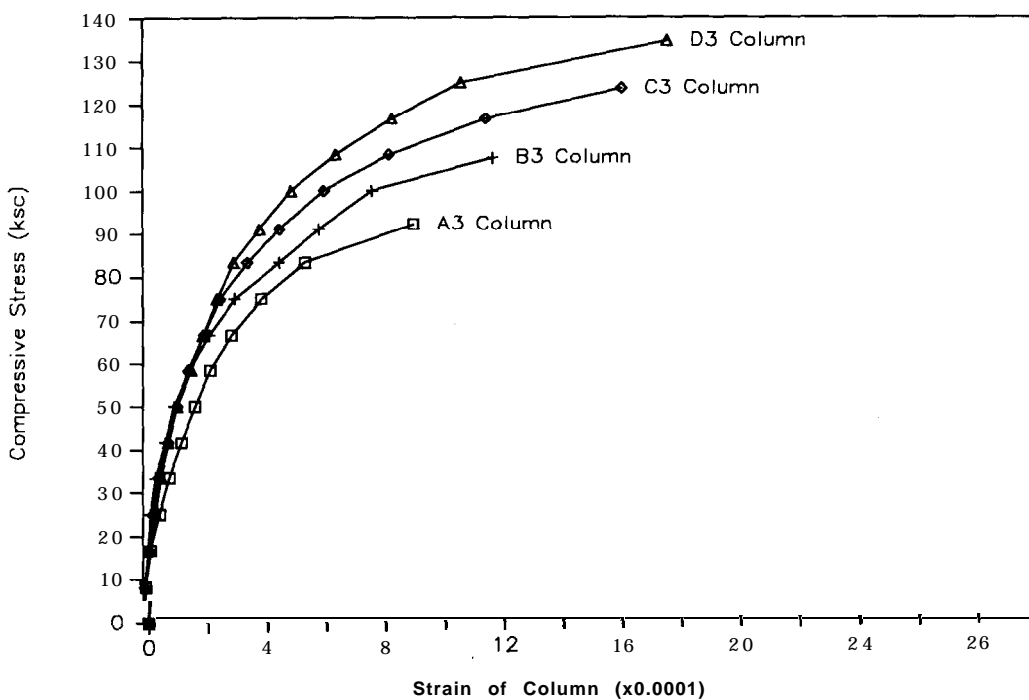
การทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักเยื้องศูนย์กับความเครียดของเสาโดยใช้ความยาวพิคัดเท่ากับ 100 ซม. แสดงไว้ในรูปที่ 4 จนถึงรูปที่ 7

เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะห่างของเหล็กปลอกดีกว่าจะรับน้ำหนักได้สูงกว่าเสาที่มีระยะเสริมเหล็กปลอกที่ห่างกว่าเมื่อทดสอบโดยการรับน้ำหนักเยื้องศูนย์ที่เท่ากัน และเมื่อพิจารณาเสาที่มีน้ำหนักกดเท่ากันพบว่า เสาที่มีระยะเสริมปลอกที่ดีกว่าจะมีความเครียดน้อยกว่าด้วย ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า เมื่อเสารับแรงกดจะทำให้เกิดแรงดันทางด้านข้างต่อเสา เหล็กปลอกจะรับแรงดันด้านข้างนี้โดยรัดแกนคอนกรีตไว้ ทำให้ระยะหดตัวของเสาน้อยกว่าในกรณีที่ระยะเสริมเหล็กปลอกห่างขึ้นหรือในกรณีที่ไม่มีเสริมเหล็กปลอก ซึ่งในรูปที่ 4 ถึงรูปที่ 7 จะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อรับน้ำหนักที่เท่ากันตัวอย่าง A ทุก ๆ ตัวอย่าง (ไม่เสริมเหล็กปลอก) จะมีค่าความเครียดสูงกว่าตัวอย่าง B, C, และ D โดยตัวอย่าง D (เสริมเหล็กปลอกระยะห่าง 5 ซม.) จะมีความเครียดต่ำที่สุด

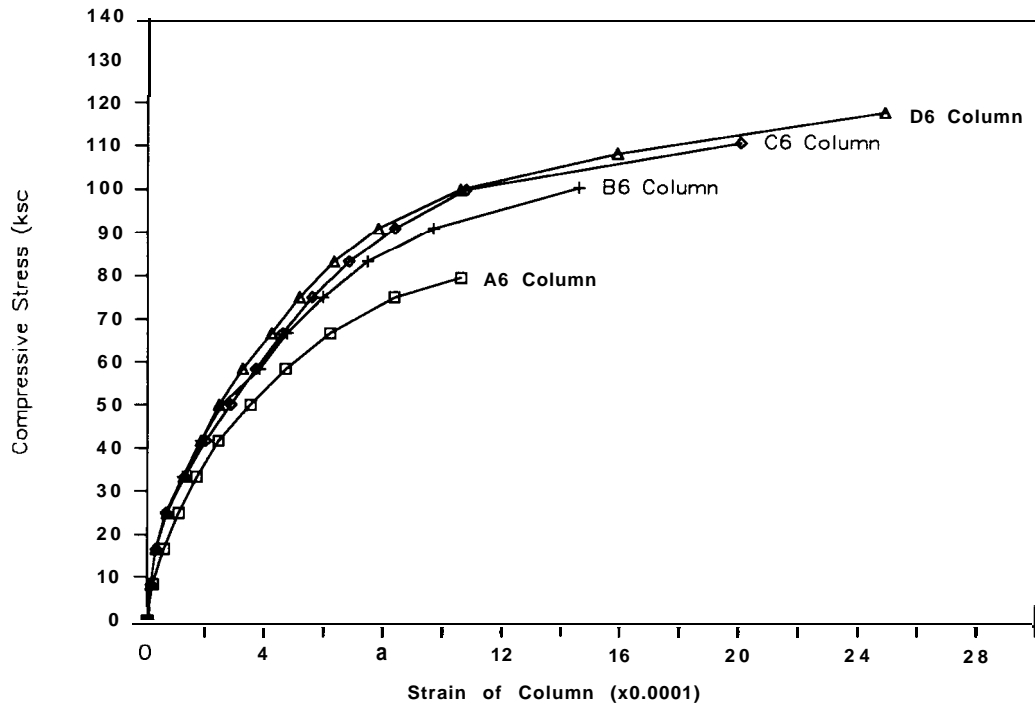
ข้อสังเกตของการทดสอบครั้งนี้ พบว่าค่าความเครียดที่จุดประลัยของเสาที่รับแรงตรงศูนย์มีค่าต่ำกว่าที่ควรจะเป็น เพราะโดยปกติแล้วค่าความเครียดประลัยของคอนกรีตที่ไม่มีเสริมเหล็กจะมีค่าประมาณ 0.002-0.004 แต่เสาที่ทดสอบในครั้งนี้มีค่าความเครียดประลัยประมาณ 0.001 เท่านั้น สาเหตุอาจเนื่องมาจาก การวิบัติของเสาที่ทดสอบเป็นแบบการแตกแยกผ่าซีกเป็นแนวยาว (ดูรูปที่ 12) มากกว่าจะวิบัติแบบแรงอัด จึงทำให้ค่าความเครียดประลัยของเสาที่ทดสอบมีค่าต่ำกว่ากรณีที่คอนกรีตวิบัติภายใต้แรงอัด



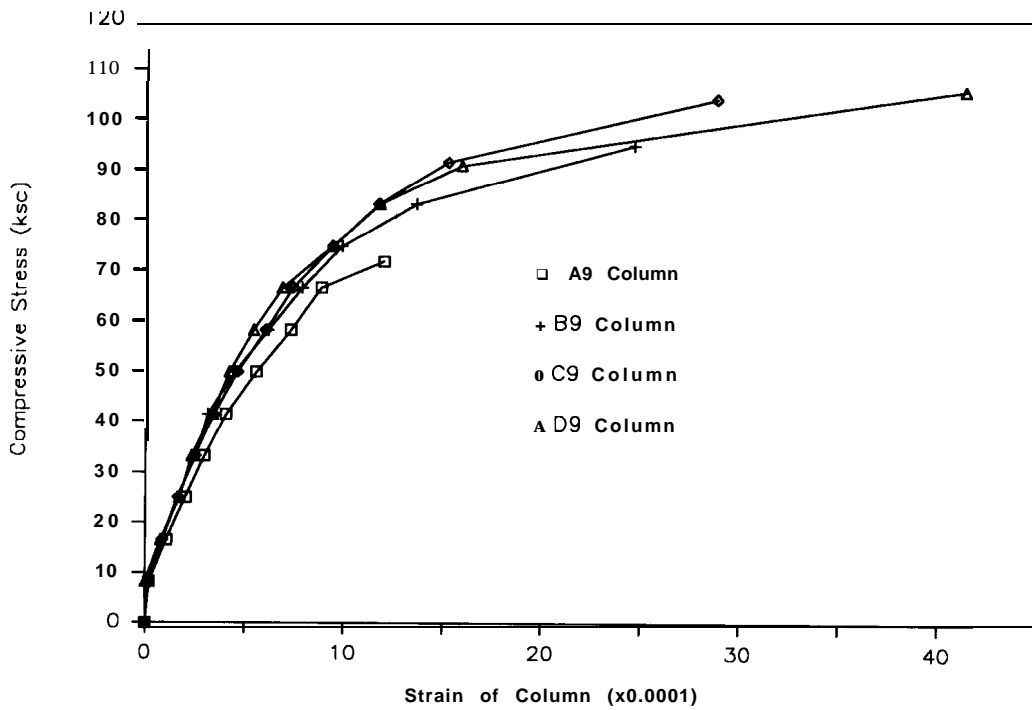
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักกับความเครียดของเสาคอนกรีตที่มีระยะเสริมเหล็กปลอกต่าง ๆ กันเมื่อรับน้ำหนักตรงศูนย์



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักกับความเครียดของเสาคอนกรีตที่มีระยะเสริมเหล็กปลอกต่าง ๆ กันเมื่อรับน้ำหนักเฉียงศูนย์เท่ากับ 3 ซม.



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักกับความเครียดของเสาคอนกรีตที่มีระยะเสริมเหล็กปลอกต่าง ๆ กันเมื่อรับน้ำหนักเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ 6 ซม.



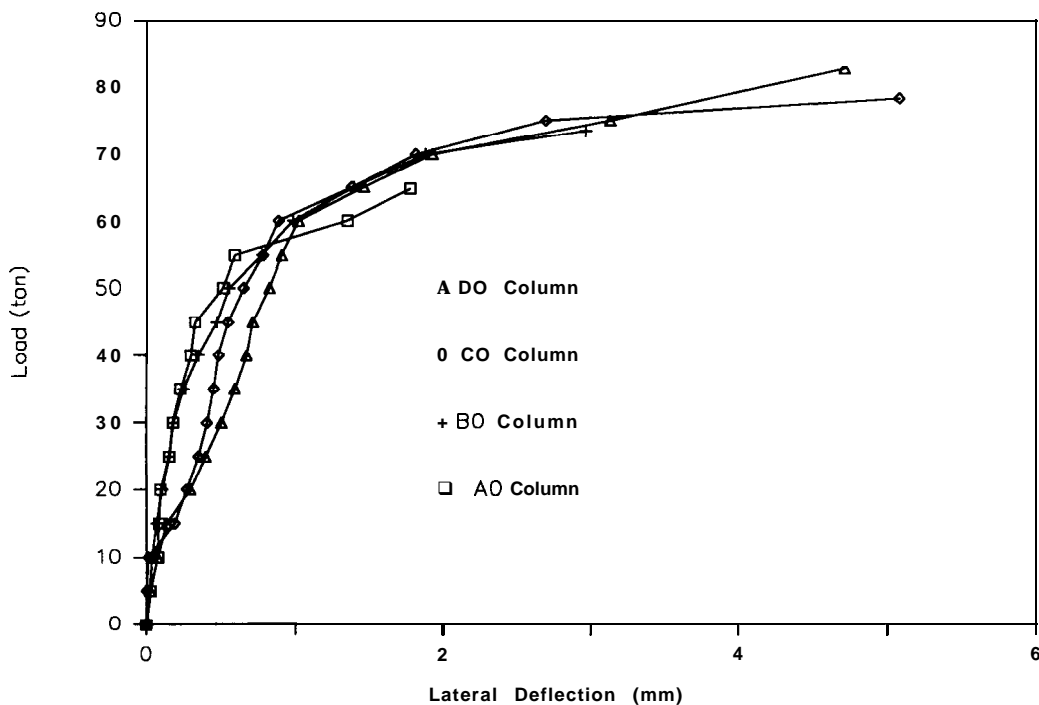
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักกับความเครียดของเสาคอนกรีตที่มีระยะเสริมเหล็กปลอกต่าง ๆ กันเมื่อรับน้ำหนักเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ 9 ซม.

**ความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักเยื้องศูนย์กลางกับระยะโก่งที่กึ่งกลางของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะเสริมเหล็กปลอกต่าง ๆ กัน**

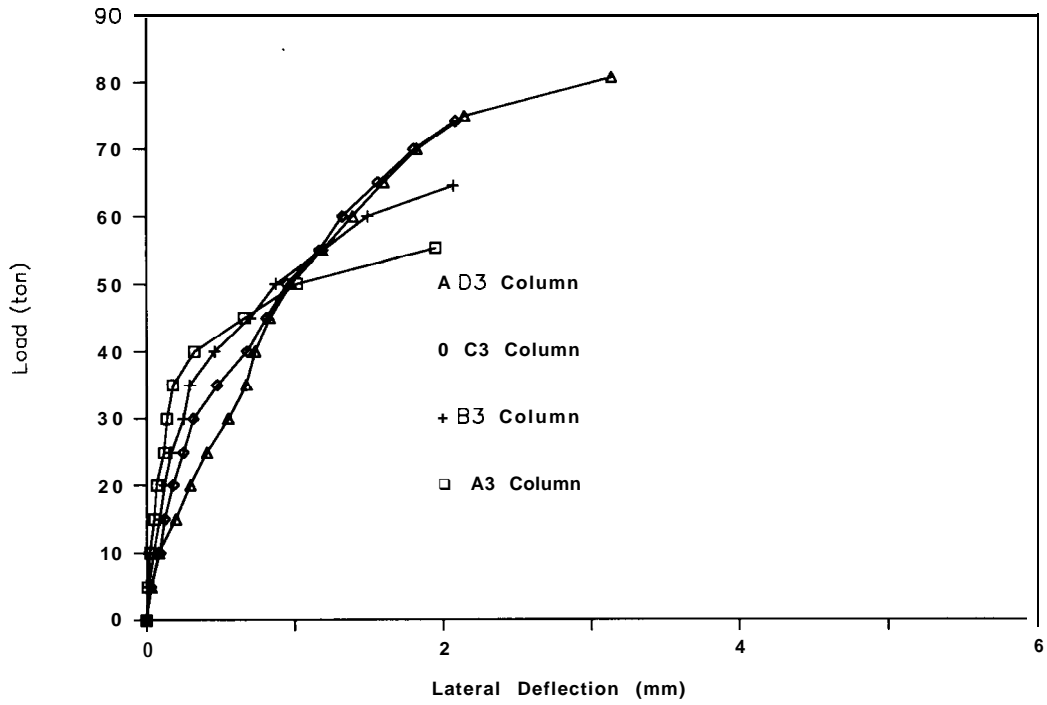
ความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักเยื้องศูนย์กลางกับระยะโก่งที่กึ่งกลางของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะเสริมเหล็กปลอกต่าง ๆ กันแสดงในรูปที่ 8 ถึงรูปที่ 11

เมื่อให้น้ำหนักที่กระทำต่อเสาและรับน้ำหนักเยื้องศูนย์กลางที่เท่ากัน เสาคอนกรีตที่เสริมเหล็กปลอกดีกว่าจะเกิดการโก่งตัวมากกว่าเสาที่ไม่เสริมเหล็กปลอกหรือเสริมเหล็กปลอกที่น้อยกว่า ถึงแม้ว่าการเสริมเหล็กปลอกที่ดีขึ้นจะทำให้เกิดการโก่งตัวที่กึ่งกลางของเสามากขึ้นก็ตาม แต่การรับน้ำหนักประลัยของเสายังสูงกว่ากรณีของเสาที่เสริมเหล็กปลอกที่น้อยกว่าเสมอ

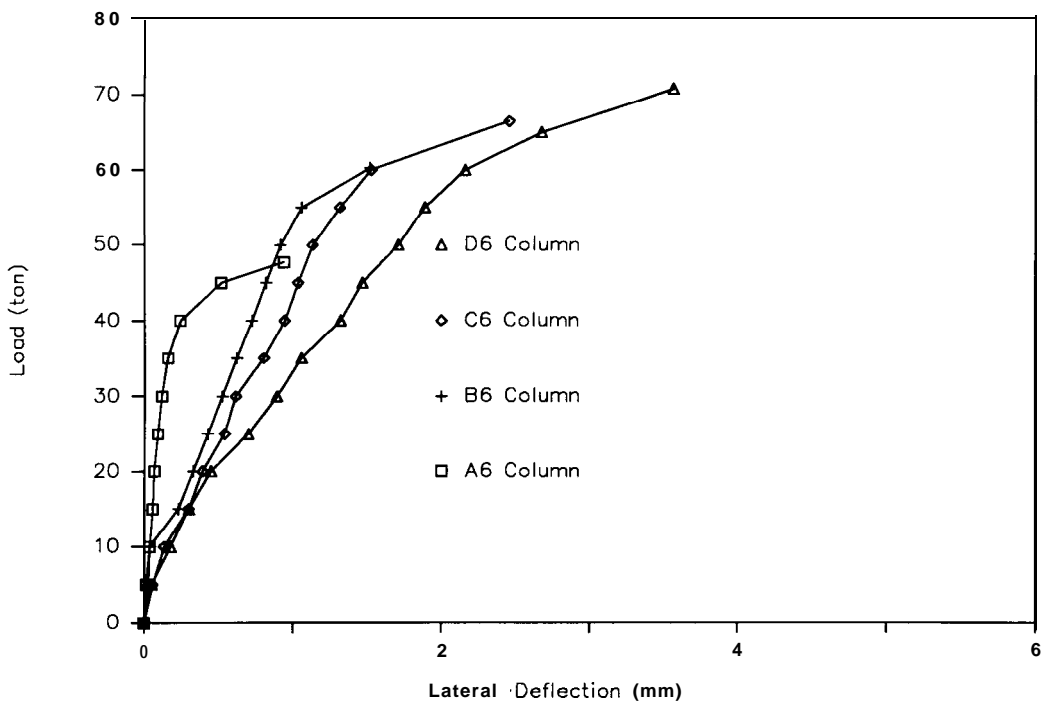
รูปที่ 11 เป็นเสาที่รับน้ำหนักโดยมีระยะเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ 9 ซม. พิจารณาตัวอย่าง A9 (ไม่เสริมเหล็กปลอก) เมื่อรับน้ำหนักเท่ากับ 40 ตันจะเกิดระยะโก่งเท่ากับ 0.54 มม. ขณะที่ตัวอย่าง D9 (ระยะห่างของเหล็กปลอกเท่ากับ 5 ซม.) รับน้ำหนักที่ 40 ตันเช่นเดียวกัน เกิดการโก่งตัวเท่ากับ 1.55 มม. หรือสูงกว่าประมาณ 3 เท่า เมื่อเพิ่มน้ำหนักกดแก่ตัวอย่างต่อไป พบว่าตัวอย่าง A9 รับน้ำหนักสูงสุดเท่ากับ 43.17 ตันโดยมีระยะโก่งตัวก่อนการวิบัติเท่ากับ 1.013 มม. ขณะที่ตัวอย่าง D9 สามารถรับน้ำหนักได้สูงถึง 63.61 ตันโดยมีระยะโก่งก่อนการวิบัติเท่ากับ 2.613 มม. ดังนั้นจึงเห็นได้ว่า การเสริมเหล็กปลอกเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักประลัยและเพิ่มความเหนียวของเสาให้มากขึ้น



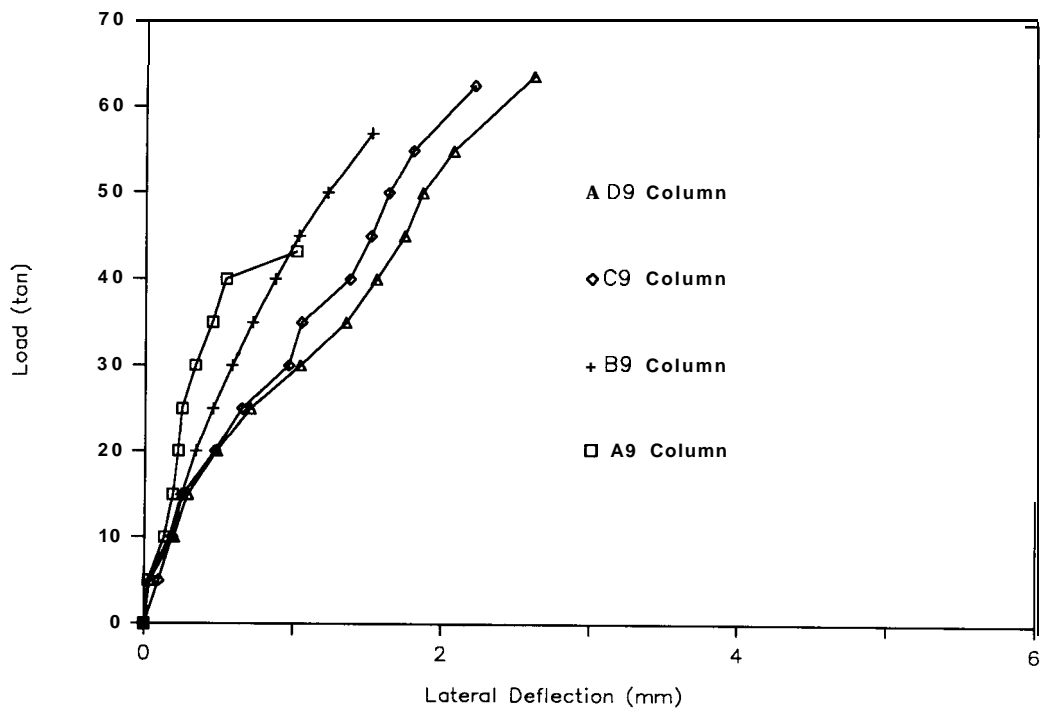
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักกับระยะโก่งที่กึ่งกลางของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกที่ระยะห่างต่าง ๆ กัน เมื่อรับน้ำหนักตรงศูนย์กลาง



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักกับระยะโก่งที่กึ่งกลางของเสาคอนกรีตที่เสริมเหล็กปลอกที่ระยะห่างต่างๆ กัน เมื่อรับน้ำหนักเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ 3 ซม.



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักกับระยะโก่งที่กึ่งกลางของเสาคอนกรีตที่เสริมเหล็กปลอกที่ระยะห่างต่างๆ กัน เมื่อรับน้ำหนักเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ 6 ซม.



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักกับระยะโก่งที่กึ่งกลางของเสาคอนกรีตที่เสริมเหล็กปลอกที่ระยะห่างต่างๆ กัน เมื่อรับน้ำหนักเฉียงศูนย์เท่ากับ 9 ซม.

### ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มความสามารถในการรับกำลังของเสากับระยะการเสริมเหล็กปลอก

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่ายิ่งเสริมเหล็กปลอกมากขึ้นยิ่งเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาคอนกรีต แม้ว่าการเสริมเหล็กปลอกมากขึ้นจะทำให้เสาสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้นก็ตาม แต่การวิจัยนี้พบว่าการใส่เหล็กปลอกที่มีระยะถี่มาก ๆ (จากระยะ 10 ซม. เป็น 5 ซม.) จะไม่ทำให้ความสามารถของเสาในการรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นมากนัก กล่าวคือสามารถรับได้เพิ่มจากร้อยละ 20.90 เป็น 27.69 ในกรณีที่เสารับน้ำหนักตรงศูนย์ หรือเพิ่มจากร้อยละ 44.86 เป็นร้อยละ 47.34 เมื่อรับน้ำหนักเฉียงศูนย์เท่ากับ 9 ซม. ซึ่งทำให้เห็นว่าการใส่เหล็กปลอกในปริมาณที่มากขนาดนั้น (ระยะห่าง 5 ซม.) อาจไม่คุ้มค่า เพราะสามารถเพิ่มการรับน้ำหนักขึ้นอีกประมาณร้อยละ 5-7 เท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบกับเสาที่เสริมเหล็กปลอกด้วยระยะห่าง 10 ซม. (ปริมาณเหล็กปลอกมากเป็น 2 เท่า)

### ลักษณะการวิบัติของเสา

การวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมและไม่เสริมเหล็กปลอกมีความแตกต่างกันมาก กล่าวคือ เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่เสริมเหล็กปลอกจะเกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด ลักษณะการแตกของเสาเป็นรอยแตกทางยาวจากบนลงล่างเมื่อเสารับน้ำหนักได้สูงสุด

(ดังรูปที่ 12) สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากเสาเมื่อรับน้ำหนักจนถึงจุดวิบัติจะไม่สามารถรักษารูปทรงไว้ได้ จึงทำให้เกิดการแตกแยกอย่างทันทีทันใด ส่วนเสาที่เสริมเหล็กปลอกเมื่อรับน้ำหนักสูงๆ จนไม่สามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มอีกต่อไป จะเกิดการวิบัติให้เห็นโดยคอนกรีตที่หุ้มเหล็กปลอกจะแตกหลุดล่อนออกมาก่อนดังรูปที่ 13 และเมื่อให้น้ำหนักกดเสาต่อไปเสาก็จะวิบัติอย่างช้าๆ ที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อเสารับน้ำหนักจะเกิดแรงทางด้านข้างขึ้น เหล็กปลอกจะพยายามรักษารูปทรงของเสาไว้โดยรับแรงทางด้านข้างไว้ไม่ยอมให้เกิดการเสียรูปทรงภายในบริเวณแกนคอนกรีต ดังนั้นเมื่อเกิดแรงดันสูงจนเหล็กปลอกไม่สามารถจะรับได้ผิวคอนกรีตบริเวณที่หุ้มเหล็กปลอกจะค่อยๆ แตกและหลุดร่อนออกมาก่อน ซึ่งจะเป็นการเตือนให้ทราบว่าเสาดันดังกล่าวรับน้ำหนักจนถึงค่าสูงสุดแล้ว



รูปที่ 12 การวิบัติของเสาคอนกรีตไม่มีเหล็กปลอกและรับแรงตรงศูนย์



รูปที่ 13 การวิบัติของเสาคอนกรีตที่เสริมเหล็กที่มีเหล็กปลอกระยะห่างเท่ากับ 20 ซม. รับแรงตรงศูนย์



## สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาครั้งนี้ ได้ทดสอบกำลังของเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอัตราส่วนความชะลุดเท่ากับ 13.85 เสริมเหล็กปลอกที่ระยะห่าง 5 ซม., 10 ซม., 20 ซม., และไม่เสริมเหล็กปลอก รับน้ำหนักดัดเยื้องศูนย์เท่ากับ 0, 3, 6, และ 9 ซม. จำนวนตัวอย่างที่ทดสอบทั้งสิ้น 48 ต้น สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. เสาที่เสริมเหล็กปลอกมาก (ระยะห่างของเหล็กปลอกน้อย) จะรับน้ำหนักดัดได้มากกว่าเสาที่เสริมเหล็กปลอกน้อย (ระยะห่างของเหล็กปลอกมาก) ความสามารถของเหล็กปลอกในการรับน้ำหนักของเสาจะดียิ่งขึ้นเมื่อเสารับน้ำหนักเยื้องศูนย์มาก ๆ
2. การเสริมเหล็กปลอกถี่ขึ้นทำให้เสามีความเหนียวมากขึ้น จึงทำให้เสาที่เสริมเหล็กปลอกมากสามารถโก่งตัวได้มากกว่าเสาที่เสริมเหล็กปลอกน้อย เมื่อรับน้ำหนักเยื้องศูนย์ที่เท่ากัน
3. การเสริมเหล็กปลอกที่ถี่มาก ยิ่งเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาให้มากยิ่งขึ้น แต่อัตราการเพิ่มการรับน้ำหนักจะลดลง สำหรับในการวิจัยครั้งนี้พบว่า การเสริมเหล็กปลอกจาก 10 ซม. เป็น 5 ซม. แล้ว การรับน้ำหนักของเสาจะเพิ่มขึ้นอีกไม่เกินร้อยละ 7
4. เสาที่เสริมเหล็กปลอกจะช่วยรักษารูปทรงของเสาไว้ ดังนั้นเมื่อให้น้ำหนักดัดจนถึงค่าสูงสุดที่เสาจะรับได้ เสาจะเกิดการวิบัติอย่างช้า ๆ คือเกิดรอยร้าวขึ้นที่คอนกรีตหุ้มก่อนและจะค่อย ๆ พัง ส่วนเสาที่ไม่เสริมเหล็กปลอกนั้นจะเกิดการวิบัติทันทีทันใดเมื่อน้ำหนักที่กระทำต่อเสาถึงค่าประลัยซึ่งถือว่ามีอันตรายอย่างยิ่งในงานคอนกรีตเสริมเหล็ก

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะได้รับความอนุเคราะห์จากภาควิชาชีพวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในการอนุญาตให้ใช้เครื่องมือทดลองจนอุปกรณ์ที่จำเป็นในการทดสอบต่างๆ คณะผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ นายบุญชัย เชี่ยวชาญวิลาศ นายสรวรรักษ์ ศรีแดง นายสุรศักดิ์ ต่อม และ นายสุรศักดิ์ หน่ยมี ที่ได้ช่วยเหลือในการเตรียมและทดสอบตัวอย่างด้วยความรอบคอบอย่างดียิ่ง

สุดท้ายนี้คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สภาวิจัยแห่งชาติที่ได้ให้การสนับสนุนงบประมาณการวิจัยในหมวดอุดหนุนการวิจัย ประจำปี 2533-2534

## เอกสารอ้างอิง

1. มาตรฐาน ว.ส.ท. 1007-34, 2534, มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน, แก้ไขปรับปรุงครั้งที่ 2 พิมพ์ครั้งที่ 1, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์
2. ACI 318- 89, 199 2, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete," *ACI Manual of Concrete Practice* Part 3-1992, American Concrete Institute.
3. Iyengar K. T. S. R., Desayi, P., and Reddy K.N., 1970, "Stress-Strain Characteristics of Concrete Confined in Steel Binders," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 22, No. 72, pp. 173-184.
4. Soliman, M. T. M. and Yu, C.W., 1967, "The Flexural Stress-Strain Relationship of Concrete Confined by Rectangular Transverse Reinforcement," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 19, No. 61, pp. 223-238.
5. Yong, Y. K., Nour, M. G., and Navy, E. G., 1988, "Behavior of Laterally Confined High-Strength Concrete Under Axial Loads," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 114, No. 2, pp. 332-351.
6. Dilger, W.H., Koch, R., and Kowalczyk, R., 1984, "Ductility of Plain and Confined Concrete Under Different Strain Rates," *Journal of American Concrete Institute*, Vol. 81, No. 1, pp. 73-8.
7. Sargin, M., Ghosh, S.K., Handa, V.K., 1971, "Effects of Lateral Reinforcement Upon the Strength and Deformation Properties of Concrete," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 23, No. 75-76, pp. 99-110.
8. Gangadharam, D. and Reddy K.N., 1980, "Effect of Cover Upon the Stress-Strain Properties of Concrete Confined in Steel Binders," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 32, No. 112, pp. 147-155.
9. ASTM C 39, 1990, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," *Annual Book of ASTM Standards*, Volume 04.02.
10. Winter, G. and Nilson, A.H., 1979, *Design of Concrete Structures*, 9th Ed., McGraw-Hill, Kogakusha Ltd.
11. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล ไกรวุฒิ เกียรติโกมล สมชาย ชูชีพสกุล และ เอนก ศิริพานิชกร, 2540, รายงานวิจัยเรื่อง ผลกระทบของเหล็กปลอกต่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เสนอสภาวิจัยแห่งชาติ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี