

การทดลองและการวิเคราะห์สะพานแบบบ็อกซ์ เกอร์เตอร์ปลายเฉียง



นาย โทเม่น ดันต์มานะธรรม

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

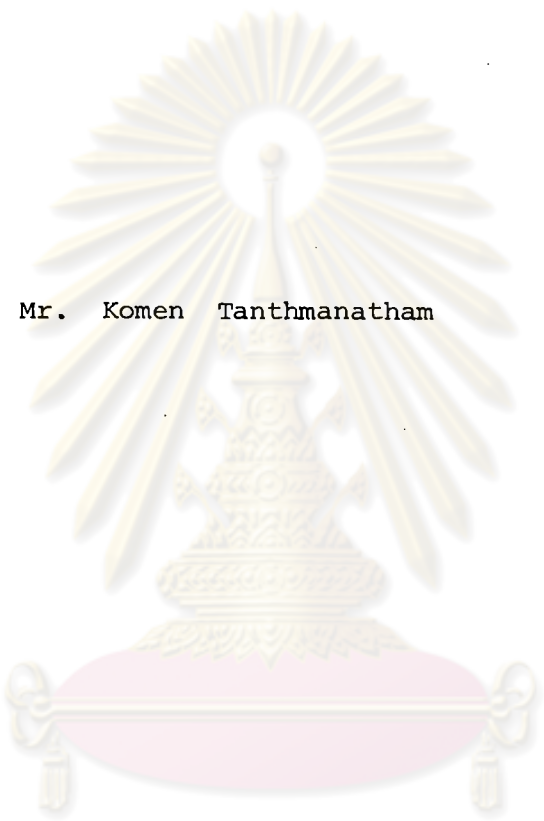
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2526

ISBN 974-563-055-1

013180

EXPERIMENT AND ANALYSIS OF A SKEW BOX-GIRDER BRIDGE



Mr. Komen Tanthmanatham

A Thesis Submitted in Partail Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Civil Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1983

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การทดลองและการวิเคราะห์สะพานแบบบ็อกซ์เกอร์เคอร์ปลายเฉียง
โดย นายโกเมน ตันท์มานะธรรม
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี



บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... *สุประดิษฐ์ บุญนาค* คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุประดิษฐ์ บุญนาค)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... *ปดิธาน ลักคุณะประสิทธิ์* ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ปดิธาน ลักคุณะประสิทธิ์)

..... *เอกสิทธิ์ ล้อมสุวรรณ* กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ล้อมสุวรรณ)

..... *การุญ จันทรางศุ* กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. การุญ จันทรางศุ)

..... *ทักษิณ เทพชาตรี* กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การทดลองและการวิเคราะห์สะพานแบบบ็อกซ์เกอร์เตอร์ปลายเฉียง
ชื่อ นิลิต นายโกเมน ตันต์มานะธรรม
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาติศรี
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา 2526



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเอาคอมพิวเตอร်โปรแกรม SHELL ซึ่งวิเคราะห์โครงสร้างเปลือกบางด้วยวิธีไฟไนท์เอเลเมนต์อันมีค่าตริกรความอิสระที่แต่ละจุดขั้วเป็นจำนวน 5 ค่ามาดัดแปลงเพิ่มเติมให้มีค่าตริกรความอิสระที่แต่ละจุดขั้วเป็นจำนวน 6 ค่า ตามวิธีการของ Zeinkiewicz เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการกำหนดคสภภาพขอบเขตของโครงสร้าง ผลจากการวิจัยแสดงให้เห็นว่า เมื่อกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของสตีฟเนสที่สอดคล้องกับตริกรความอิสระตัวที่ 6 ให้น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.001 ผลลัพธ์ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีอื่น เช่น ทฤษฎีเปลือกบาง ทฤษฎีแผ่นหับ เป็นต้น ต่อจากนั้นได้นำเอาคอมพิวเตอร်โปรแกรมที่ปรับปรุงนี้แล้วมาใช้ในการวิเคราะห์หาพฤติกรรมของสะพานแบบบ็อกซ์เกอร์เตอร์ปลายเฉียง ชนิดสามเซลล์ สองช่วงความยาว มืองสาของมุมเฉียง (๑) เท่ากับ 0, 15, 30, 45 และ 60 ตามลำดับ พร้อมทั้งมีแผ่นไดอะแฟรมที่บริเวณจุดรองรับยึดหมุนภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำ 2 กรณี จะได้ว่า ในกรณีที่ 1 น้ำหนักบรรทุกกระทำเป็นจุดที่ผิวบนของคานตัวริมสุด ในแนวระนาบตั้งเดียวกันกับหน้าตัดกึ่งกลางช่วงความยาวของโครงสร้าง ปรากฏว่า ค่าระยะการโก่งตัวในแนวตั้งและค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยลงเมื่อองศาของมุมเฉียงเพิ่มมากขึ้น สำหรับในกรณีที่ 2 น้ำหนักบรรทุกกระทำเป็นจุดที่ผิวบนของคานตัวริมสุด ในแนวระนาบตั้งเดียวกันกับหน้าตัดกึ่งกลางช่วงความยาวของคานนั้น ปรากฏว่า ค่าระยะการโก่งตัวในแนวตั้งและค่าหน่วยแรงตามยาวของคานนั้น จะมีค่ามากที่สุดเมื่อองศาของมุมเฉียงเท่ากับ 45

หลังจากนั้นได้ทำการทดลองเปรียบเทียบโดยใช้แผ่นเหล็กประกอบเป็นลักษณะแบบบ็อกซ์เกอร์เตอร์ปลายเฉียง 45 องศา ชนิดสามเซลล์ หนึ่งช่วงความยาว ชนิดยึดหมุน มีแผ่นเหล็กไดอะแฟรมตลอดแนวของจุดรองรับ ปรากฏว่า ค่าระยะการโก่งตัวในแนวตั้งที่วัดได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ และค่าหน่วยแรงตามยาวที่หาได้จากการทดลองและการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกัน จากผลการวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์โครงสร้างประเภทนี้ด้วยคอมพิวเตอร်โปรแกรมที่ปรับปรุงนี้ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

Thesis Title Experiment and Analysis of a Skew Box-Girder Bridge
Name Mr. Komen Tanthmanatham
Thesis Advisor Associate Professor Thaksin Thepchatri, Ph.D.
Department Civil Engineering
Academic Year 1983

ABSTRACT

This research has adopted a finite element computer program SHELL for analysis of thin shell structures. The original element which considers 5 degrees of freedom per node has been modified to include 6 degrees of freedom per node according to Zeinkiewicz's procedure to effectively prescribe boundary conditions. It was shown that when the value of coefficient of rotational stiffness was prescribed to be not larger than 0.001, the results would approach the values from other theories such as shallow shell or folded plate theories. The modified program was subsequently used to analyse several continuous 2-span, 3-cell skew box girder bridges with skew angles varying from 0°, 15°, 30°, 45° and 60° respectively, in order to evaluate the flexural behaviour. Two load cases were considered. In load case 1 there were two point loads each on the edge of one exterior girder in the same plane of middle section of structural spans. It was observed that the values of vertical deflections, stresses, and stress resultants decreased when the degree of skew angle increased. For load case 2 there were two point loads each on the edge of the same exterior girder at mid spans of that girder. In this case it was shown that the values of vertical deflection and longitudinal stress of the girder would be maximum at the 45 degree of skew angle.

A simply supported, three-cell 45° skew box girder steel model with end diaphragms was load tested and the results compared to the finite

element solution. The experiment indicated that the value of the vertical deflection was larger than the value from the analysis. However, the values of longitudinal stresses from both experiment and analysis agree with each other. It may be concluded that this modified finite element program can be used to analyse the skew bridge structure with satisfactory results.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



กิติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง "การทดลองและการวิเคราะห์สะพานแบบบ็อกซ์ เกอร์เตอร์ ปลายเฉียง" ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำความรู้ทั้งทางทฤษฎีและภาคปฏิบัติพร้อมทั้งสนับสนุนในด้านเงินทุนวิจัย ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนจบ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์ รองศาสตราจารย์ ดร. การุญ จันทรางศู รองศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ สัมสุวรรณ ที่กรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จเรียบร้อย โดยเฉพาะรองศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ สัมสุวรรณ ที่กรุณาให้คำแนะนำเพื่อเป็นแนวทางในการทำการทดลองเปรียบเทียบ

ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณของบิดา มารดา ครู และอาจารย์ที่เคยสอนมาในอดีต ท่านผู้มีพระคุณเหล่านี้ได้มีส่วนช่วยส่งเสริมให้ผู้เขียนประสบความสำเร็จในการศึกษามาจนถึงปัจจุบัน

ผู้เขียนขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันคอมพิวเตอร์ศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตลอดจนเจ้าหน้าที่ของสถาบันที่ได้อำนวยความสะดวกและให้ความร่วมมือ เอื้อเพื่อในการใช้บริการของสถาบันเป็นอย่างดี และที่วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดีเพราะได้รับความกรุณาจากมูลนิธิสิริศักดิ์เกล้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้มอบทุนการศึกษาในปีการศึกษา 2524

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณกนิษฐ ลือตระกูล คุณยุทธนา ธนาเพิ่มพูนผล คุณทวีวุฒิ ปทุมมาศ คุณ วิรัชต์ ทองรวย คุณ ปรีชา ภาวสุทธีวงศ์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำการทดลองเปรียบเทียบ ขอขอบคุณ คุณมลิวลย์ สว่างแก้ว ที่ได้มีความมานะ พยายาม อดทนพิมพ์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ช
สารบัญ	ช
รายการตารางประกอบ	ฅ
รายการรูปประกอบ	ฉ
สัญลักษณ์	ด
นิยามของคำต่าง ๆ ที่ใช้ในภาษาเทคนิค	ด
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บททั่วไปและความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 บทบาทงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย	5
2. การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	6
2.1 บทนำ	6
2.2 สมมติฐาน	7
2.3 ขั้นตอนในการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	8
2.4 การจำลองรูปร่าง	11
2.5 การจำลองการเคลื่อนที่	11
2.6 การหาค่าสตีฟเนสในระนาบของชิ้นส่วนย่อยชนิด CST	11
2.7 การหาค่าสตีฟเนสในระนาบของชิ้นส่วนย่อยชนิด QM5	16
2.8 การหาค่าสตีฟเนสนอกระนาบของชิ้นส่วนย่อยชนิด HCT	21
2.9 การหาค่าสตีฟเนสที่สอดคล้องกับการหมุนรอบแกน Z	25

บทที่

3. การเปรียบเทียบผลลัพท์ที่ได้จากคอมพิวเตอร์โปรแกรมกับการวิเคราะห์ โดยวิธีอื่น	32
3.1 ลักษณะและการแบ่งชิ้นส่วนของโครงสร้าง	32
3.2 การเปรียบเทียบผลลัพท์	32
3.2.1 การโค้งตัวในแนวตั้ง	33
3.2.2 หน่วยแรงตามยาว	33
3.2.3 โมเมนต์ตัดตามขวาง	34
4. ผลการวิเคราะห์และการทดลองเปรียบเทียบ	52
4.1 ลักษณะและการแบ่งชิ้นส่วนย่อย	52
4.2 พฤติกรรมที่ได้จากกรณีน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำแบบที่ 1	53
4.2.1 ลักษณะการกระจายของระยะการโค้งตัวในแนวตั้ง	53
4.2.2 ลักษณะการกระจายโมเมนต์ตัดตามขวาง	53
4.2.3 ลักษณะการกระจายของหน่วยแรงตามยาว	54
4.2.4 โมเมนต์ตัดตามยาวรวมทั้งหน้าตัดน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ	54
4.2.5 ลักษณะหน่วยแรงหลัก	54
4.3 พฤติกรรมที่ได้จากกรณีน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำแบบที่ 2	54
4.3.1 ระยะการโค้งตัวในแนวตั้ง	54
4.3.2 การกระจายของหน่วยแรงตามยาวของคาน R2	55
4.4 การทดลอง	55
4.4.1 ลักษณะตัวอย่างที่ทำการทดลอง	55
4.4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	56
4.4.3 ผลการทดลองเปรียบเทียบ	56
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	118
5.1 สรุปผลการวิจัย	118
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยขั้นต่อไป	119

เอกสารอ้างอิง	120
ภาคผนวก ก. แผนภูมิแสดงขั้นตอนการคำนวณของคอมพิวเตอร์โปรแกรม	123
ประวัติผู้เขียน	130



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการตารางประกอบ

ตารางที่	หน้า
3.1.1	ค่าระยะการโก่งตัวในแนวตั้งตามผิวบนของคาน R2 และคาน R1 .. 39
3.1.2	ค่าระยะการโก่งตัวในแนวตั้งตามผิวบนของคาน L1 และคาน L2 .. 40
3.2.1	ค่าแสดงการกระจายของหน่วยแรงตามยาว F_y ตามผิวบนของคาน R2 42
3.2.2	ค่าแสดงการกระจายของหน่วยแรงตามยาว F_y บนผิวบนขวาของแผ่นพื้นบนใกล้คาน R2 44
3.2.3	ค่าแสดงการกระจายของหน่วยแรงตามยาว F_y บนผิวล่างขวาของแผ่นพื้นล่างใกล้คาน R2 46
3.3.1	ค่าแสดงการกระจายของโมเมนต์คัตตามขวาง M_y ที่หน้าคัตกึ่งกลางช่วงความยาวตัวสะพานของแผ่นพื้นบนและแผ่นพื้นล่าง 48
3.3.2	ค่าแสดงการกระจายของโมเมนต์คัตตามขวาง M_y ที่หน้าคัตกึ่งกลางช่วงความยาวตัวสะพานของคาน L2 และคาน L1 48
3.3.3	ค่าแสดงการกระจายของโมเมนต์คัตตามขวาง M_y ที่หน้าคัตกึ่งกลางช่วงความยาวตัวสะพานของคาน R1 และคาน R2 48
4.1.1	ค่าระยะการโก่งตัวในแนวตั้งตามผิวบนของคาน R2 และคาน R1 .. 60
4.1.2	ค่าระยะการโก่งตัวในแนวตั้งตามผิวบนของคาน L1 และคาน L2 .. 65
4.2.1	ค่าระยะการโก่งตัวในแนวตั้งที่หน้าคัต A-A 70
4.2.2	ค่าระยะการโก่งตัวในแนวตั้งที่หน้าคัต B-B 70
4.3.1	ค่าแสดงการกระจายของโมเมนต์คัตตามขวาง M_y ที่หน้าคัต A-A .. 73
4.3.2	ค่าแสดงการกระจายของโมเมนต์คัตตามขวาง M_y ที่หน้าคัต B-B .. 77
4.4.1	ค่าแสดงการกระจายของหน่วยแรงตามยาว N_y ที่หน้าคัต A-A 81
4.4.2	ค่าแสดงการกระจายของหน่วยแรงตามยาว N_y ที่หน้าคัต B-B 85
4.5	แสดงค่าโมเมนต์คัตตามยาวที่หน้าคัตน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ 89
4.6	ค่าระยะการโก่งตัวในแนวตั้งตามผิวบนของคาน R2 97

ตารางที่

4.7 ค่าแสดงการกระจายของหน่วยแรงตามยาว N_y บนผิวบนของคาน R2 .. 101

4.8 ค่าแสดงการกระจายของหน่วยแรงตามยาว N_y บนผิวล่างของคาน R2.. 104

4.9 แสดงค่าน้ำหนักหน่วยแรงตามยาว F_y และระยะการโก่งตัวในแนวตั้ง
 ที่ได้จากการทดลอง 112



ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการแบ่งชิ้นส่วนย่อยและการเลือกแกนพิกัดจากระดับโครงสร้าง ที่เหมาะสม	27
2.2 ชิ้นส่วนย่อยพื้นฐานรูปสามเหลี่ยมชนิด CST	27
2.3 ชิ้นส่วนย่อยพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมชนิด QM5	28
2.4 ชิ้นส่วนย่อยพื้นฐานรูปสามเหลี่ยมชนิด HCT	28
2.5 แสดงค่าดักริความอิสระตัวที่ 6	29
2.6 แสดงโครงสร้างเปลือกบาง (Thin Cylindrical Shell) และการ แบ่งชิ้นส่วนย่อย	30
2.7 แสดงผลกระทบของสตีฟ เนสที่สอดคล้องกับดักริความอิสระตัวที่ 6 ซึ่งมีต่อ โครงสร้าง เปลือกบาง	31
3.1 สะพานแบบบ็อกซ์ เกอร์ เดอร์	35
3.2 แสดงรายละเอียดการแบ่งชิ้นส่วนย่อยแบบที่ 1	36
3.3 แสดงรายละเอียดการแบ่งชิ้นส่วนย่อยแบบที่ 2	37
3.4 แสดงรายละเอียดการแบ่งชิ้นส่วนย่อยแบบที่ 3	38
3.5 แสดงการเปรียบเทียบการโก่งตัวในแนวตั้งตามผิวบนของคาน	41
3.6 แสดงการ เปรียบเทียบการกระจายของหน่วยแรงตามยาว F_y ตามผิวบน ของคาน R2	43
3.7 แสดงการ เปรียบเทียบการกระจายของหน่วยแรงตามยาว F_y บนผิวบน ขวาของแผ่นพื้นบน	45
3.8 แสดงการ เปรียบเทียบการกระจายของหน่วยแรงตามยาว F_y บนผิวล่าง ขวาของแผ่นพื้นล่าง	47
3.9 แสดงการ เปรียบเทียบการกระจายของโมเมนต์ตัดตามขวาง M_y ที่หน้า ตัดกึ่งกลางช่วงความยาวตัวสะพานของแผ่นพื้นบน	49
3.10 แสดงการ เปรียบเทียบการกระจายของโมเมนต์ตัดตามขวาง M_y ที่หน้าตัด กึ่งกลางช่วงความยาวตัวสะพานของแผ่นพื้นล่าง	50

รูปที่

3.11	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของโมเมนต์ตัดตามขวาง M_y ที่หน้าตัด กึ่งกลางช่วงความยาวตัวสะพานของคาน	51
4.1	สะพานแบบม็อกซ์เกอร์ เดอร์ปลายเฉียง	58
4.2	แสดงรายละเอียดการแบ่งชิ้นส่วนย่อยของสะพานแบบม็อกซ์เกอร์ เดอร์ ปลายเฉียง	59
4.3	แสดงการเปรียบเทียบการโก่งตัวในแนวตั้งตามผิวบนของคาน R2	61
4.4	แสดงการเปรียบเทียบการโก่งตัวในแนวตั้งตามผิวบนของคาน R1	63
4.5	แสดงการเปรียบเทียบการโก่งตัวในแนวตั้งตามผิวบนของคาน L1	66
4.6	แสดงการเปรียบเทียบการโก่งตัวในแนวตั้งตามผิวบนของคาน L2	68
4.7	แสดงการเปรียบเทียบการโก่งตัวในแนวตั้งที่หน้าตัด A-A	71
4.8	แสดงการเปรียบเทียบการโก่งตัวในแนวตั้งที่หน้าตัด B-B	72
4.9	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของโมเมนต์ตัดตามขวาง M_y ที่หน้าตัด A-A ของแผ่นพื้นบน	74
4.10	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของโมเมนต์ตัดตามขวาง M_y ที่หน้าตัด A-A ของแผ่นพื้นล่าง	75
4.11	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของโมเมนต์ตัดตามขวาง M_y ที่หน้าตัด A-A ของคาน	76
4.12	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของโมเมนต์ตัดตามขวาง M_y ที่หน้าตัด B-B ของแผ่นพื้นบน	78
4.13	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของโมเมนต์ตัดตามขวาง M_y ที่หน้าตัด B-B ของแผ่นพื้นล่าง	79
4.14	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของโมเมนต์ตัดตามขวาง M_y ที่หน้าตัด B-B ของคาน	80
4.15	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของหน่วยแรงตามยาว N_y ที่หน้าตัด A-A ของแผ่นพื้นบน	80

รูปที่

4.16	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของหน่วยแรงตามยาว N_Y ที่หน้าตัด A-A ของแผ่นพื้นล่าง	83
4.17	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของหน่วยแรงตามยาว N_Y ที่หน้าตัด A-A ของคาน	84
4.18	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของหน่วยแรงตามยาว N_Y ที่หน้าตัด B-B ของแผ่นพื้นบน	86
4.19	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของหน่วยแรงตามยาว N_Y ที่หน้าตัด B-B ของแผ่นพื้นล่าง	87
4.20	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของหน่วยแรงตามยาว N_Y ที่หน้าตัด B-B ของคาน	88
4.21	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์คัตตามขวางและองศาของมุมเฉียง	90
4.22	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการโก่งตัวในแนวตั้งและองศาของมุมเฉียง	91
4.23	ลักษณะของหน่วยแรงหลักที่มีองศาของมุมเฉียง เท่ากับ 0	92
4.24	ลักษณะของหน่วยแรงหลักที่มีองศาของมุมเฉียง เท่ากับ 15	93
4.25	ลักษณะของหน่วยแรงหลักที่มีองศาของมุมเฉียง เท่ากับ 30	94
4.26	ลักษณะของหน่วยแรงหลักที่มีองศาของมุมเฉียง เท่ากับ 45	95
4.27	ลักษณะของหน่วยแรงหลักที่มีองศาของมุมเฉียง เท่ากับ 60	96
4.28	แสดงการเปรียบเทียบการโก่งตัวในแนวตั้งตามผิวบนของคาน R2	98
4.29	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวในแนวตั้งและองศาของมุมเฉียง	100
4.30	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของหน่วยแรงตามยาว N_Y บนผิวบนของคาน R2	102
4.31	แสดงการเปรียบเทียบการกระจายของหน่วยแรงตามยาว N_Y บนผิวล่างของคาน R2	105
4.32	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงตามยาวของคาน R2 และองศาของมุมเฉียง	107

รูปที่

4.33	ลักษณะของตัวอย่างที่ทำการทดลอง	108
4.34	การแบ่งชิ้นส่วนย่อยของตัวอย่างที่ทำการทดลอง	109
4.35	แสดงลักษณะทั่ว ๆ ไปของตัวอย่างที่ทำการทดลอง	110
4.36	แสดงลักษณะตัวอย่างและเครื่องมือขณะทำการทดลอง	111
4.37	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรจุกระทำและระยะการโก่งตัวใน แนวตั้ง	114
4.38	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรจุกระทำและหน่วยแรงตามยาว ..	115
4.39	แสดงการเปรียบเทียบการโก่งตัวในแนวตั้งตามผิวล่างของคาน R2 ระหว่างค่าที่ได้จากคอมพิวเตอร์โปรแกรมและการทดลอง	116
4.40	แสดงการเปรียบเทียบการโก่งตัวในแนวตั้งตามหน้าตัดขวางที่จุดน้ำหนัก บรรจุกระทำระหว่างค่าที่ได้จากคอมพิวเตอร์โปรแกรม และการทดลอง	117

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สัญลักษณ์

$'x, \ddot{x}$:	อนุพันธ์เทียบกับ x
α	:	สัมประสิทธิ์ตัวแปร
$\{\alpha\}$:	เมทริกซ์แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันแทนการเคลื่อนที่
Δ	:	พื้นที่ของชิ้นส่วนย่อยรูปสามเหลี่ยม
$\delta(s,t), \delta(x,y), \bar{\delta}(x,y)$:	การเคลื่อนที่ที่จุดใด ๆ ในชิ้นส่วนย่อย
$\epsilon(x,y)$:	หน่วยความเครียดที่จุดใด ๆ ในชิ้นส่วนย่อย
θ	:	องศาของมุมเฉียง
ν	:	Poisson's Ratio
$\sigma(x,y)$:	หน่วยแรงที่จุดใด ๆ ในชิ้นส่วนย่อย
σ_p	:	หน่วยแรงหลัก
A	:	พื้นที่ของชิ้นส่วนย่อย
$[B]$:	เมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยความเครียดและการเคลื่อนที่ที่จุดขั้ว
CST	:	Constant Strain Triangle
$[D]$:	Constitutive Relation Matrix
E	:	Young's Modulus
$f(x,y)$:	ฟังก์ชันแทนการเคลื่อนที่ที่จุดใด ๆ ในชิ้นส่วนย่อย
F_y	:	หน่วยแรงตามยาวมีทิศทางตามแนวแกน Y
HCT	:	After Hsieh, Clough, and Tocher
J	:	Jacobian Determinant
K	:	สติฟเนส
K_e	:	สติฟเนสของชิ้นส่วนย่อย
M_y	:	โมเมนต์ดัดตามขวางมีทิศทางตามแนวแกน Y
QM5	:	Quadrilateral Element with 5 Nodes
$\{r_e\}$:	เมทริกซ์แสดงค่าการเคลื่อนที่ที่จุดขั้วของชิ้นส่วนย่อย
$[T]$:	เมทริกซ์แปรเปลี่ยน

นิยามของคำต่าง ๆ ที่ใช้ในภาษาเทคนิค

การจำลองการเคลื่อนที่	:	Displacement Idealization
การจำลองรูปร่าง	:	Geometric Idealization
การประกอบ	:	Fabrication
การประมาณเชิงเส้น	:	Linear Interpolation
การเปลี่ยนรูป	:	Deformation
การเรียงลำดับข้อ	:	Nodal Numbering
โครงสร้างเปลือกบาง	:	Shell-Type Structure
จุดข้อ	:	Node
ชิ้นส่วนย่อยแผ่นบาง	:	Flat Plate Element
ช่วงความยาวประสิทธิผล	:	Effective Span
ดีกรีความอิสระนอกระนาบ	:	Flexural Degree of Freedom
ดีกรีความอิสระในระนาบ	:	Extensional Degree of Freedom
ทฤษฎีคาน	:	Beam Theory
ทฤษฎีแผ่นเฉียงบาง	:	Theory of Skew Plate
น้ำหนักบรรทุกทุกสถิต	:	Static Load
ฟังก์ชันโพลิโนเมียล	:	Polynomial Function
มุมเฉียง	:	Skew Angle
มุมวิกฤต	:	Critical Angle
โมเมนต์ตัดตามขวาง	:	Transverse Moment
โมเมนต์ตัดตามยาว	:	Longitudinal Moment
ระยะการโก่งตัวในแนวตั้ง	:	Vertical Deflection
ไร้เชิงเส้น	:	Non-linear
วิธีกริดสมมูลย์	:	Equivalent Grid Method
วิธีคานวางบนพื้นรองรับอีลาสติก	:	Beam-On-Elastic-Foundation Method
วิธีคานสมมูลย์	:	Equivalent Beam Method
วิธีแผ่นพับ	:	Folded Plate Method



ศูนย์วิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีไฟไนต์สทริป	:	Finite Strip Method
วิธีไฟไนต์เอเลเมนต์	:	Finite Element Method
วิธีสติฟเนส	:	Stiffness Method
สะพานโค้ง	:	Curved Bridge
สะพานแบบบ็อกซ์เกอร์เดอ์ปลายเฉียง	:	Skew Box Girder Bridge
สภาพการประสานเข้ากันได้	:	Compatibility Condition
สภาพขอบเขต	:	Boundary Condition
สภาพอุดมคติ	:	Ideal Condition
หน่วยความเครียด	:	Strain
หน่วยแรง	:	Stress
หน่วยแรงตามยาว	:	Longitudinal Stress
หน่วยแรงหลัก	:	Principal Stress
หุ่นจำลอง	:	Model
องศาของมุมเฉียง	:	Degree of Skew Angle
อัตราส่วนความยาวด้าน	:	Aspect Ratio
อีลาสติคเชิงเส้น	:	Linear Elastic

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย