การหาแบบตัดที่เหมาะสมของโครงสร้างเปลือกบาง

นาย วสันต์ ทองพูล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

OPTIMUM CUTTING PATTERN GENERATION OF MEMBRANE STRUCTURES

Mr. Wasan Tongpool

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

491683

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาแบบตัดที่เหมาะสมของโครงสร้างเปลือกบาง
โดย	นายวสันต์ ทองพูล
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธัญวัฒน์ โพธิศิริ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธีรพงศ์ เสนจันทร์ฒิไชย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธัญวัฒน์ โพธิศิริ)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นเรศ ลิมสัมพันธ์เจริญ)

วสันต์ ทองพูล : การหาแบบตัดที่เหมาะสมของโครงสร้างเปลือกบาง (OPTIMUM CUTTING PATTERN GENERATION OF MEMBRANE STRUCTURES) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ธัญวัฒน์ โพธิศิริ, 125 หน้า.

โดยทั่วไปการหาแบบตัดของโครงสร้างเปลือกบางอาศัยการแบ่งพื้นผิวในสามมิติออกเป็นแถบย่อยในระนาบสองมิติโดยใช้เส้นจีโอเดสิกหรือเทคนิคการลดรูปสู่แนวราบ แบบตัดที่ได้จากวิธีดังกล่าวไม่สามารถกำหนดค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจริงได้ซึ่งอาจส่งผลทำให้เกิดรอยยับขึ้นบนพื้นผิวภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน บทความนี้นำเสนอวิธีการหาแบบตัดที่เหมาะสมซึ่งพิจารณาค่าหน่วยแรงที่ออกแบบสำหรับพื้นผิวของโครงสร้างชนิดเปลือกบาง โดยอาศัยตัวแปรหลักคือค่าการกระจัดของพื้นผิวโครงสร้างในสามมิติ วิธีการที่นำเสนออาศัยเทคนิคการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นบนพื้นฐานของเทนเซอร์ของหน่วยแรงไพโอลาเคอร์ชอฟลำดับที่สอง เทนเซอร์ของความเครียดกรีน และวัสดุแบบไฮเปอร์อิลาสติกเซนต์วีแนนท์-เคอร์ชอฟ การแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุดอาศัยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2549.....

4670483621 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: CUTTING PATTERN / MEMBRANE STRUCTURES / FINITE ELEMENT METHOD

WASAN TONGPOOL : OPTIMUM CUTTING PATTERN GENERATION OF MEMBRANE STRUCTURES. THESIS ADVISOR : ASST.PROF. THANYAWAT POTHISIRI, 125 pp.

In general, the cutting pattern for membrane structures is determined by dividing the 3-D surface into 2-D plane strips by using the geodesic line method or flattening technique. The cutting pattern obtained in these procedures does not allow the actual stresses in the structures to be specified which may cause surface wrinkles under service loading. In this paper, a method for determining an optimum cutting pattern which accounts for the designed stresses of the membrane structures is presented, using the displacements of the 3-D surface as the key variables. The method proposed utilizes a nonlinear analysis technique based upon the second Piola-Kirchhoff stress tensor, Green strain tensor and Saint Venant-Kirchhoff hyperelastic material. The genetic algorithm is adopted to solve the optimization problem.

Department.....CIVIL ENGINEERING.....

Field of study.....CIVIL ENGINEERING.....

Academic year .....2006.....

Student's Wasan T.

Advisor's Thanyawat Pothisiri

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธัญวัฒน์ โพธิศิริ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างมาก ตลอดระยะเวลาการเขียนวิทยานิพนธ์นี้ และกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. ธีรพงศ์ เสนจันทร์ฒิไชย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี อ. ดร. จรูญ รุ่งอมรรัตน์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นเรศ ลิมสัมพันธ์เจริญ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการเขียนวิทยานิพนธ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญภาพ ..... ฏ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 4

1.3 ขอบเขตการวิจัย 5

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 คำนำ 6

2.2 กลศาสตร์ต่อเนื่องแบบไม่เชิงเส้น 7

2.2.1 เกรเดียนต์การเสียรูป 7

2.2.2 ความเครียด 8

2.2.3 หน่วยแรง สมดุล และงานเสมือน 10

2.2.3.1 หน่วยแรงโคชี 11

2.2.3.2 สมดุลของวัตถุ 13

2.2.3.3 งานเสมือน 14

2.2.3.4 หน่วยแรงไพโอลาเคอร์ซอฟลำดับที่สอง 16

2.2.4 แบบจำลองวัสดุ 16

2.2.4.1 คุณสมบัติของวัสดุแบบเท่ากันทุกทิศทาง 18

2.2.4.2 คุณสมบัติของวัสดุเชิงตั้งฉาก 19

2.3 เรขาคณิตเชิงอนุพันธ์ของพื้นผิว 20

2.4 สมการพลังงานของพื้นผิว 22

หน้า

2.5 การแก้ปัญหาโดยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ 24
2.5.1 ชิ้นส่วนย่อยรูปสามเหลี่ยม 24
2.5.2 สมการเชิงเส้นของการกระจัด 26
2.5.3 เมตริกซ์สติฟเนสของชิ้นส่วนย่อยรูปสามเหลี่ยม 27
2.5.4 เมตริกซ์แปลงพิกัด 29
2.5.5 การแก้ปัญหาระบบสมการไม่เชิงเส้น 33

บทที่ 3 การหารูปแบบ และการหาแบบตัดที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างเปลือกบาง
3.1 คำนำ 36
3.2 การหารูปแบบโครงสร้างเปลือกบาง 36
3.2.1 วิธีกริด 37
3.2.2 วิธีปรับพิกัดอ้างอิง 38
3.3 เทคนิคการลดรูปสู่ระนาบ 39
3.4 การหาแบบตัดที่ทำให้เกิดหน่วยแรงเป้าหมาย 40
3.5 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด 41
3.5.1 วิธีเกรเดียนต์ 41
3.5.2 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม 42
3.6 กระบวนการหาแบบตัดที่เหมาะสมที่สุด 45

บทที่ 4 ตัวอย่างการคำนวณเชิงตัวเลข
4.1 คำนำ 47
4.2 ตัวอย่างการคำนวณเชิงตัวเลข 47
ตัวอย่างที่ 1 47
ตัวอย่างที่ 2 49
ตัวอย่างที่ 3 55

บทที่ 5 บทสรุป
5.1 บทสรุป 62

หน้า

รายการอ้างอิง 63
ภาคผนวก 64
ภาคผนวก ก. 67
ภาคผนวก ข. 79
ภาคผนวก ค. 82
ภาคผนวก ง. 91
ภาคผนวก จ. 102
ภาคผนวก ฉ. 105
ภาคผนวก ช. 108
ภาคผนวก ซ. 119
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 125

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 3.1	การเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเมื่อจำนวนรุ่นเท่ากับ 1000 รุ่น ...	44
ตารางที่ 3.2	การเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเมื่อจำนวนสายพันธุ์เท่ากับ 20 สายพันธุ์	45
ตารางที่ 4.1	ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับแบบจำลองโครงสร้างในตัวอย่างที่ 1	48
ตารางที่ 4.2	การเปรียบเทียบค่าการกระจัด	48
ตารางที่ 4.3	การเปรียบเทียบหน่วยแรงโคชี	49
ตารางที่ 4.4	ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับแบบจำลองโครงสร้างตัวอย่างที่ 2	50
ตารางที่ 4.5	คุณสมบัติวัสดุสำหรับการหาแบบตัดที่เหมาะสม	50
ตารางที่ 4.6	การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยของหน่วยแรงโคชีที่เกิดขึ้นจริงเทียบกับหน่วยแรงเป้าหมายสำหรับตัวอย่างที่ 2	52
ตารางที่ 4.7	ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับแบบจำลองโครงสร้างตัวอย่างที่3	56
ตารางที่ 4.8	คุณสมบัติวัสดุสำหรับการหาแบบตัดที่เหมาะสม	56
ตารางที่ 4.9	การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยของหน่วยแรงโคชีที่เกิดขึ้นจริงเทียบกับหน่วยแรงเป้าหมายสำหรับตัวอย่างที่ 3	58
ตารางที่ ฉ1	พิกัดโครงสร้างเริ่มต้นของตัวอย่างที่ 1	105
ตารางที่ ฉ2	สภาพเชื่อมโยงของชิ้นส่วนย่อยรูปสามเหลี่ยมของตัวอย่างที่ 1	105
ตารางที่ ช1	พิกัดโครงสร้างเริ่มต้นของตัวอย่างที่ 2	108
ตารางที่ ช2	สภาพเชื่อมโยงของชิ้นส่วนย่อยรูปสามเหลี่ยมของตัวอย่างที่ 2	111
ตารางที่ ซ1	พิกัดโครงสร้างเริ่มต้นของตัวอย่างที่ 1	119
ตารางที่ ซ2	สภาพเชื่อมโยงของชิ้นส่วนย่อยรูปสามเหลี่ยมของตัวอย่างที่ 1	120

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 การกระจัดและการเสียรูปของโครงสร้างเปลือกบาง 7

รูปที่ 2.2 การเคลื่อนที่ของวัตถุในสถานะต่างๆ 10

รูปที่ 2.3 สมาชิกของหน่วยแรงโคชี 11

รูปที่ 2.4 เวกเตอร์หน่วยแรงบนระนาบต่างๆ 12

รูปที่ 2.5 สมดุลของโครงสร้าง 13

รูปที่ 2.6 สมดุลของหน่วยแรงในพื้นผิวของโครงสร้างเปลือกบาง 14

รูปที่ 2.7 พิกัดของพื้นผิวโครงสร้างเปลือกบาง 20

รูปที่ 2.8 คุณสมบัติตั้งฉากของเวกเตอร์ฐานโคแวเรียนต์และ
เวกเตอร์ฐานคอนทราแวเรียนต์ 21

รูปที่ 2.9 การเสียรูปของพื้นผิว 21

รูปที่ 2.10 สมดุลของพื้นผิวภายใต้หน่วยแรงสัมผัส 23

รูปที่ 2.11 ปริมาณสเกลาร์แทนด้วยชิ้นส่วนย่อยรูปสามเหลี่ยม 24

รูปที่ 2.12 ฟังก์ชันประมาณค่าบริเวณจุดต่อของชิ้นส่วนรูปสามเหลี่ยมในพิกัดเริ่มต้น
และพิกัดปัจจุบัน 25

รูปที่ 2.13 (ก) พิกัดเฉพาะที่
(ข) โคไซน์ทิศทางสำหรับชิ้นส่วนย่อยรูปสามเหลี่ยม 30

รูปที่ 2.14 ทิศทางของเส้นถักในโครงสร้างเปลือกบาง 31

รูปที่ 2.15 การหมุนแกนรอบแกน X_1 และ $X_{2\theta}$ 31

รูปที่ 2.16 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน 35

รูปที่ 3.1 การคำนวณพิกัดพื้นผิวโครงสร้างเปลือกบางโดยวิธีกริด 37

รูปที่ 3.2 การหารูปแบบโครงสร้างโดยวิธีปรับพิกัดอ้างอิง 39

รูปที่ 3.3 ประเภทพื้นผิวโครงสร้าง 39

รูปที่ 3.4 รูปแบบการสร้างสายพันธุ์รุ่นใหม่ 43

รูปที่ 3.5 การไขว้สายพันธุ์แบบสุ่มกระจาย 44

รูปที่ 3.6 การสิ้นสุดรุ่นของสายพันธุ์ (ก) การลู่เข้าสู่คำตอบในช่วงรุ่น 0 ถึง 300
(ข) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรง (เปลี่ยนแปลงน้อยมาก)
ตั้งแต่รุ่นที่ 300 45

รูปที่ 3.7 แผนภูมิสายงานขั้นตอนการหาแบบตัดที่เหมาะสมที่สุด 46

หน้า

รูปที่ 4.1 โครงสร้างเปลือกบางรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสในระนาบสองมิติ $(X_1 - X_2)$ 48

รูปที่ 4.2 การจัดเรียงชิ้นส่วนย่อยในระนาบสองมิติสำหรับตัวอย่างที่ 2 50

รูปที่ 4.3 แบบจำลองโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงพาราโบลาเชิงไฮเพอร์โบลา 51

รูปที่ 4.4 การกำหนดเส้นตัดบนพื้นผิวสามมิติ 51

รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบแบบตัดที่ถูกลดขนาดเพื่อให้เกิดหน่วยแรงที่ต้องการ 52

รูปที่ 4.6 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในพื้นผิวโครงสร้างเปลือกบางตัวอย่างที่ 2 53

รูปที่ 4.7 การกระจายค่าหน่วยแรงในทิศทางเส้นถักรอง σ_{11} (กก./ตร.ซม.) ภายหลังการลดรูปพื้นผิวสู่ระนาบสองมิติ 54

รูปที่ 4.8 การกระจายค่าหน่วยแรงในทิศทางเส้นถักรอง σ_{11} (กก./ตร.ซม.) ภายหลังการลดรูปพื้นผิวสู่ระนาบ สองมิติ กรณีแบ่งแถบย่อยเป็นสองแถบ 55

รูปที่ 4.9 การจัดเรียงชิ้นส่วนย่อยสำหรับตัวอย่างที่ 3 56

รูปที่ 4.10 แบบจำลองโครงสร้างเปลือกบางรูปกรวย 57

รูปที่ 4.11 การกำหนดเส้นตัดบนพื้นผิวสามมิติ 57

รูปที่ 4.12 แบบตัดที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดค่าหน่วยแรงเป้าหมาย 58

รูปที่ 4.13 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวโครงสร้างเปลือกบาง 59

รูปที่ 4.14 การกระจายค่าหน่วยแรงของแถบย่อย a b และ c 60