ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา | วิศวกรรมโยธา

สาขา | **ภาควิชา**

เรื่อง การหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดของคานคอนกรีตอัดแรง

Topology Optimization of Prestressed Concrete Beams

นามผู้วิจัย นายจิระพัฒน์ จิระภาพันธ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

(รองศาสตราจารย์เบญจพล เวทย์วิวรณ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิจพัฒน์ ภู่วรวรรณ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา .....

(รองศาสตราจารย์ก่อโชค จันทวรางกูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดของคานคอนกรีตอัดแรง

Topology Optimization of Prestressed Concrete Beams

โดย

นายจิระพัฒน์ จิระภาพันธ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จิระพัฒน์ จิระภาพันธ์ 2554: การหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดของคานคอนกรีตอัดแรง ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ เบญจพล เวทย์วิวรณ์, Ph.D. 79 หน้า

งานวิจัยนี้นำเสนอการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดของคานคอนกรีตอัดแรงโดยกระบวนการวิวัฒนาการอย่างง่าย โดยคานที่นำมาเป็นกรณีศึกษาคือคานขนาดความยาว 4.00 เมตร รับน้ำหนักกระทำแบบแผ่ 920 กิโลกรัมต่อเมตร และน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กิโลกรัม ทุกระยะ 50 เซนติเมตร ใช้การอัดแรงขนาด 11,000 และ 12,000 ที่ระยะเยื้องศูนย์ 7.5 เซนติเมตร สำหรับคานที่มีความลึก 25 เซนติเมตร และรับน้ำหนักกระทำแบบแผ่ 944 กิโลกรัมต่อเมตร และระยะน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กิโลกรัม ทุกระยะ 50 เซนติเมตร ใช้การอัดแรงขนาด 7,000 และ 8,000 กิโลกรัมที่ระยะเยื้องศูนย์ 10 เซนติเมตร สำหรับคานที่มีความลึก 30 เซนติเมตร รวมเป็น 8 กรณีศึกษา กระบวนการวิเคราะห์กระทำโดยการสร้างแบบจำลองไฟไนเอลิเมนต์ ทำการวิเคราะห์โครงสร้างและกำจัดเนื้อวัสดุที่มีค่าหน่วยแรงต่ำกว่าค่าที่กำหนดอย่างเป็นลำดับขั้นตอน

จากผลการวิเคราะห์พบว่าคานคอนกรีตอัดแรงที่ผ่านกระบวนการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดนั้นมีการลดปริมาณเนื้อวัสดุในส่วนที่เป็นคอนกรีตลงประมาณร้อยละ 20 ถึง 40 ขึ้นอยู่กับลักษณะของแรงกระทำ, ขนาดหน้าตัดของคาน และปริมาณของแรงที่ใช้ในการอัดแรง

_____ _____ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Jirapat Jirapaphan 2011: Topology Optimization of Prestressed Concrete Beams. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Benjapon Wethyavivorn, Ph.D. 79 pages.

This research presented the process of Topology Optimization of prestressed concrete beams by Simple Evolutionary Procedure. The models of 4.00 meters span loaded with 920 kg/m distributed along the length and 460 kg at 50 centimeters spacing with prestressing of 11,000 and 12,000 kg eccentrically from the neutral axis 7.5 centimeters for the 25 centimeters depth beam and span loaded with 944 kg/m distributed along the length and 472 kg at 50 centimeters spacing with prestressing of 7,000 and 8,000 kg eccentrically from the neutral axis 10 centimeters for the 30 centimeters depth beam forming eight different cases. The analysis was performed using finite element method to systematically neutralized element with stress lower than the prescribed set value.

The results showed that the prestressed concrete beams together with topology optimization process can reduce the amount of concrete by about 20 to 40 percentage depending upon type of loading, cross-sectional area and level of prestressing force.

_____ _____ __ / __ / __

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เวทย์วิวรณ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาเป็นอย่างสูงที่ได้ให้ข้อเสนอแนะ ให้แง่คิด ให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือ ทั้งในส่วนของการศึกษา การทำวิทยานิพนธ์ ค่าใช้จ่ายบางส่วนที่เกิดขึ้นในการทำวิจัย รวมถึงวิถีการดำเนินชีวิตอยู่เสมอมา อันเป็นประโยชน์อย่างสูงต่อตัวข้าพเจ้าทั้งในช่วงที่ทำการวิจัยและต่อไปในอนาคต

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.กิจพัฒน์ ภู่วรวรรณ กรรมการที่ปรึกษาที่ได้ให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้ความรู้ และจริยธรรม แก่ข้าพเจ้าอยู่เสมอ

ขอขอบคุณ อาจารย์ศิรเดช สุริต ที่ได้เป็นผู้ให้คำปรึกษาในแนวคิดและกระบวนการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดของโครงสร้าง และยังมีความห่วงใยในสุขภาพกายและจิตใจของผู้จัดทำอยู่เสมอ

ขอขอบคุณ เพื่อน และพี่น้อง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในเรื่องต่างๆจนทำให้งานวิจัยนี้สามารถดำเนินไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ ครอบครัวของข้าพเจ้าที่ได้สนับสนุนด้านการศึกษามาโดยตลอดจนข้าพเจ้าประสบความสำเร็จในที่สุด

จิระพัฒน์ จิระภาพันธ์

พฤษภาคม 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(13)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	24
อุปกรณ์	24
วิธีการ	24
ผลและวิจารณ์	34
ผล	34
วิจารณ์	69
สรุปและข้อเสนอแนะ	75
สรุป	75
ข้อเสนอแนะ	76
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	77
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	79

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1	คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	25
2	ช่วงเวลาที่ใช้ในการทำวิจัย	33
3	รายละเอียดของคานคอนกรีตอัดแรงที่ผ่านกระบวนการหาสรีระที่เหมาะสมที่สุด	36

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	หน้าตัดออกแบบเบื้องต้น	5
2	โครงสร้างสุดท้ายของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีฐานรองรับอย่างง่าย	6
3	โครงสร้างสุดท้ายของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นคานยื่น	7
4	โครงสร้างสุดท้ายของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นคานต่อเนื่อง	7
5	แนวความคิดการออกแบบเอลิเมนต์	8
6	แบบจำลองเนื้อวัสดุที่ประกอบด้วยโครงสร้างย่อย	9
7	ผังวิธีการทำเส้นขอบละเอียด	13
8	เอลิเมนต์ที่มีจุดเชื่อมต่อที่มุม	14
9	ผังลำดับงานของวิธีการแปลงย้อนกลับ	16
10	รูปแบบ สตรัท-ไท ที่เหมาะสมที่สุดของคานลึกที่รับแรงกระทำแบบจุดที่ท้องคาน	18
11	รูปแบบ สตรัท-ไท ที่เหมาะสมที่สุดของคานที่มีค่าสัดส่วนความยาวต่อความลึกคานที่หลากหลาย	18
12	คานคอนกรีตอัดแรง	19
13	รูปแบบ สตรัท-ไท ที่ดีที่สุด ในคานคอนกรีตที่ไม่มีการอัดแรง	19
14	รูปแบบ สตรัท-ไท ที่ดีที่สุด ในคานคอนกรีตที่มีการอัดแรงบางส่วน	20
15	รูปแบบ สตรัท-ไท ที่ดีที่สุด ในคานคอนกรีตที่มีการอัดแรงเต็มส่วน	20
16	แบบผังลำดับที่ 99 แบบผังลำดับสุดท้ายหลังดำเนินการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในแบบผัง	21
17	แบบผังลำดับที่ 6 แบบผังลำดับสุดท้ายหลังดำเนินการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในแบบผัง	21
18	การปรับปรุงเกณฑ์ของ Mohr-Coulomb ด้วยเวกเตอร์การเคลื่อนที่	22
19	การปรับปรุงเกณฑ์ของ Mohr-Coulomb ของความเค้นระนาบหรือความเครียดระนาบด้วยเวกเตอร์การเคลื่อนที่	23
20	คานขนาด 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 11,000 กก.	28

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	คานขนาด 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 12,000 กก.	29
22	คานขนาด 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 11,000 กก.	29
23	คานขนาด 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 12,000 กก.	29
24	คานขนาด 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 7,000 กก.	30
25	คานขนาด 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 8,000 กก.	30
26	คานขนาด 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 7,000 กก.	30
27	คานขนาด 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 8,000 กก.	31
28	ผังลำดับงานการวิเคราะห์การหาสรีระที่เหมาะสมที่สุดเหมาะสมของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงด้วยระเบียบวิธีการทำซ้ำ	32
29	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 11,000 กก. สภาวะตั้งต้น	37
30	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 11,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 30	37
31	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 11,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 60	38
32	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 11,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 89	38

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
33	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 11,000 กก.	39
34	ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวของคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 11,000 กก.	39
35	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 11,000 กก.	40
36	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 11,000 กก.	40
37	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 12,000 กก. สภาวะตั้งต้น	41
38	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 12,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 25	41
39	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 12,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 50	42
40	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 12,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 75	42
41	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 12,000 กก.	43
42	ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวของคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 12,000 กก.	43

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
43	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 12,000 กก.	44
44	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 12,000 กก.	44
45	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 11,000 กก. สภาวะตั้งต้น	45
46	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 11,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 40	45
47	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 11,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 80	46
48	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 11,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 117	46
49	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 12,000 กก.	47
50	ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวของคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 12,000 กก.	47

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
51	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 12,000 กก.	48
52	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 12,000 กก.	48
53	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 11,000 กก. สภาวะตั้งต้น	49
54	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 11,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 25	49
55	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 11,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 50	50
56	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 11,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 73	50
57	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 11,000 กก.	51
58	ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวของคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 11,000 กก.	51

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
59	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 11,000 กก.	52
60	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 11,000 กก.	52
61	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 7,000 กก. สภาวะตั้งต้น	53
62	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 7,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 25	53
63	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 7,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 50	54
64	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 7,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 73	54
65	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 7,000 กก.	55
66	ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวของคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 7,000 กก.	55
67	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 7,000 กก.	56
68	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 7,000 กก.	56

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
69	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 8,000 กก. สภาวะตั้งต้น	57
70	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 8,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 40	57
71	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 8,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 80	58
72	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 8,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 113	58
73	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 8,000 กก.	59
74	ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวของคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 8,000 กก.	59
75	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 8,000 กก.	60
76	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 8,000 กก.	60
77	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 7,000 กก. สภาวะตั้งต้น	61
78	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 7,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 35	61

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
79	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 7,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 70	62
80	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 7,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 105	62
81	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคานกับลำดับของการวิวัฒนาการ ของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 7,000 กก.	63
82	ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวของคานกับลำดับของการวิวัฒนาการ ของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 7,000 กก.	63
83	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการ ของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 7,000 กก.	64
84	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการ ของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 7,000 กก.	64
85	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 8,000 กก. สภาวะตั้งต้น	65
86	ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 8,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 40	65

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

87 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม.
รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 8,000 กก.
วิวัฒนาการลำดับที่ 80 66

88 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม.
รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 8,000 กก.
วิวัฒนาการลำดับที่ 115 66

89 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคานกับลำดับของการวิวัฒนาการ
ของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม.
รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 8,000 กก. 67

90 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวของคานกับลำดับของการวิวัฒนาการ
ของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม.
รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 8,000 กก. 67

91 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการ
ของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม.
รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 8,000 กก. 68

92 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการ
ของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม.
รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 8,000 กก. 68

93 แผนภาพโมเมนต์ดัดของคานที่รับน้ำหนักกระทำแบบแผ่
และ น้ำหนักกระทำแบบแผงทุกๆระยะ 50 ซม. 69

94 แผนภาพโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตขนาด 20 × 25 × 400 ซม. อัดแรง 11,000 กก. 70

95 แผนภาพโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตขนาด 20 × 25 × 400 ซม. อัดแรง 11,500 กก. 71

96 แผนภาพโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตขนาด 20 × 25 × 400 ซม. อัดแรง 12,000 กก. 71

97 แผนภาพโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตขนาด 20 × 25 × 400 ซม. อัดแรง 12,500 กก. 72

98 ทอพอโลยีของคานคอนกรีตอัดแรงที่มีปริมาณการอัดแรงต่างกัน 72

99 หน่วยแรงหลักมุขสำคัญของคานคอนกรีตอัดแรงที่มีปริมาณการอัดแรงต่างกัน 73

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

100 หน่วยแรงรองมุขสำคัญของคานคอนกรีตอัดแรงที่มีปริมาณการอัดแรงต่างกัน 73
101 ภาพแท่งความถี่ของหน่วยแรงหลักมุขสำคัญในชิ้นส่วนย่อย 74
102 ภาพแท่งความถี่ของหน่วยแรงรองมุขสำคัญในชิ้นส่วนย่อย 74

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

σ_{maj} = หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ (กก./ซม.^{2})

σ_{min} = หน่วยแรงรองมุขสำคัญ (กก./ซม.^{2})

σ_{maj}^{max} = หน่วยแรงหลักมุขสำคัญสูงสุด (กก./ซม.^{2})

σ_{min}^{min} = หน่วยแรงรองมุขสำคัญต่ำสุด (กก./ซม.^{2})

σ_{maj}^{rej} = หน่วยแรงหลักมุขสำคัญกำจัด (กก./ซม.^{2})

σ_{min}^{rej} = หน่วยแรงรองมุขสำคัญกำจัด (กก./ซม.^{2})

RR_i = อัตราการกำจัดออกในรุ่นปัจจุบัน (%)

RR_{i+1} = อัตราการกำจัดออกในรุ่นถัดไป (%)

ER = อัตราการวิวัฒนาการ (%)

E_{on} = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเอลิเมนต์วัสดุเปิดตัว (กก./ซม.^{2})

E_{off} = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเอลิเมนต์วัสดุปิดตัว (กก./ซม.^{2})

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดของคานคอนกรีตอัดแรง

Topology Optimization of Prestressed Concrete Beams.

คำนำ

เนื่องด้วยความขาดแคลนของทรัพยากรและวัตถุดิบ ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และการแข่งขันในทางเทคโนโลยี เป็นจุดกำเนิดของแนวคิดวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization) เพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด มีความสามารถในการรับแรงสูงสุด และมีต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุดภายใต้การใช้วัตถุดิบอย่างมีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยวิธีการทำให้เหมาะสมที่สุดนี้เริ่มมีการศึกษาเมื่อ 100 กว่าปีที่ผ่านมาแต่ยังมีการประยุกต์ใช้จริงไม่มากเท่าที่ควรเนื่องจากข้อจำกัดในด้านต่างๆเช่น ความยุ่งยากในกระบวนการวิเคราะห์ ความยากลำบากในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อน เป็นต้น จนกระทั่งในปัจจุบันได้มีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีมากขึ้นและได้นำวิทยาการทางด้านคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบด้วย จึงได้เริ่มมีการนำวิธีการทำให้เหมาะสมที่สุดมาประยุกต์ใช้งานจริงมากขึ้นทั้งในงานวิศวกรรมโยธา, วิศวกรรมเครื่องกล, วิศวกรรมยานยนต์, รวมไปถึงวิศวกรรมอากาศยาน ซึ่งนอกจากจะได้ชิ้นส่วนที่มีประสิทธิภาพสูงแล้วยังได้ความสวยงามของชิ้นส่วนอันเป็นผลพลอยได้มาจากความซับซ้อนของรูปร่างอีกด้วย

ในปัจจุบันโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นที่นิยมเพราะเป็นโครงสร้างที่สามารถขึ้นรูปเป็นรูปร่างตามต้องการได้ง่ายและมีราคาในการผลิตที่ไม่สูงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างที่ใช้วัสดุประเภทอื่น แต่อย่างไรก็ดีโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีข้อจำกัดคือคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการรับแรงดึงได้ต่ำซึ่งทำให้ชิ้นส่วนหลักโครงสร้าง เช่น คาน จำเป็นต้องมีความลึกของคานเพิ่มขึ้นตามช่วงความยาวคานทำให้สิ้นเปลืองวัสดุ ซึ่งการอัดแรง (Prestressed) นั้นสามารถแก้ปัญหาในเรื่องหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตได้และยังทำให้คานมีความลึกลดลงได้อีกด้วย แต่ด้วยข้อจำกัดการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตนั้นจำกัดอยู่ที่การใช้สูตรคำนวณทั่วไปในการวิเคราะห์ทำให้ไม่สามารถใช้ในการออกแบบโครงสร้างที่มีรูปร่างที่ซับซ้อนได้ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดในการวิเคราะห์การหาสรีระที่เหมาะสมที่สุด เพราะโดยทั่วไปรูปร่างของโครงสร้างที่ผ่านกระบวนการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดมักมีรูปร่างที่ซับซ้อน แต่ด้วยการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) นั้นสามารถแก้ปัญหาการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีรูปร่างซับซ้อน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ได้ จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำวิธีการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุด (Topology Optimization) มาประยุกต์ใช้ เพื่อออกแบบชิ้นส่วนคานคอนกรีตอัดแรงที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดทั้งในด้านของขนาด น้ำหนัก และความสามารถในการรับแรง

วิธีการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดที่ได้นำใช้ในงานวิจัยนี้คือ กระบวนการวิวัฒนาการอย่างง่าย (Simple Evolutionary Procedure) โดยวิธีการนี้เป็นกระบวนการที่ใช้ระเบียบวิธีการทำซ้ำ โดยทำการกำจัดชิ้นส่วนย่อย ที่มีค่าหน่วยแรงต่ำกว่าค่าหน่วยแรงกำจัดออกที่กำหนดไว้ ออกไปอย่างเป็นลำดับขั้น จนกระทั่งเข้าสู่เงื่อนไขของการสิ้นสุดการวิวัฒนาการ ซึ่งมีผลทำให้ทอพอโลยีของโครงสร้างเปลี่ยนไปอย่างต่อเนื่อง และชิ้นส่วนที่คงเหลืออยู่มีการรับหน่วยแรงอย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อวิเคราะห์หาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดของชิ้นส่วนโครงสร้างประเภทคานแทนที่จะจะทำการพิจารณาเพียงการหาค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะขนาด (Size) และรูปร่าง (Shape) ของโครงสร้าง อย่างเดิมที่นิยมปฏิบัติกันโดยทั่วไปซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการวิวัฒนาการทางโครงสร้างที่จะเกิดขึ้นต่อไปในอนาคต ประกอบกับในงานวิจัยก่อนหน้าได้นำเสนอการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดของคานประกอบที่ทำจากแผ่นเหล็กและไม้ ซึ่งจำเป็นต้องมีการเจาะแผ่นเหล็กเพื่อให้ได้ทอพอโลยีของคานตามต้องการ ซึ่งทำให้เกิดวัสดุเหลือทิ้ง จึงได้ทำการศึกษาเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับคานคอนกรีตอัดแรงด้วยเหตุผลในด้านการผลิตซึ่งคอนกรีตนั้นสามารถขึ้นรูปร่างได้ตามต้องการ โดยไม่จำเป็นต้องมีการเจาะออก เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาออกแบบรูปแบบโครงสร้างให้เกิดประสิทธิภาพสูงที่สุดในด้านการใช้งาน โดยที่มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำและไม่เกิดวัสดุเหลือทิ้งต่อไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาถึงลำดับขั้นพัฒนาการทางโครงสร้างเพื่อให้ได้มาซึ่งทอพอโลยี (Topology) ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดโดยคำนึงถึงวัสดุภายในโครงสร้างที่ใช้รับแรงให้สามารถรับแรงได้อย่างเต็มความสามารถของวัสดุภายใต้เงื่อนไขข้อจำกัดที่กำหนด

2. เพื่อศึกษาหาพฤติกรรมการรับแรงของคานคอนกรีตอัดแรงที่ผ่านกระบวนการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดเพิ่มเติม

ขอบเขตการศึกษา

ดำเนินการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดของคานคอนกรีตอัดแรง ภายใต้เงื่อนไขข้อจำกัดและสภาวะตั้งต้นที่กำหนดขึ้นด้วยการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic Finite Element) ประกอบกับกระบวนการทำให้เหมาะที่สุดในสรีระโดยวิธีการกำจัดเนื้อวัสดุ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

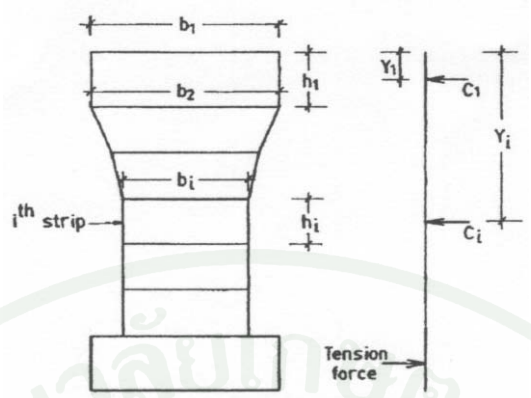
การตรวจเอกสาร

การทำให้เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างนั้นจะพิจารณาตัวแปรออกแบบ (Design Variable) เช่น ขนาด (Size) รูปร่าง (Shape) และกลสมบัติของวัสดุ (Material Property) เป็นต้น เพื่อให้ได้มาซึ่งโครงสร้างที่มีลักษณะตามสมการเป้าหมาย (Objective Function) ภายใต้สมการจำกัดขอบเขต (Boundary Function) เช่น ความสามารถในการรับแรงของวัสดุ การโก่งตัวที่ยอมให้ ปริมาณของวัสดุที่ต้องคงเหลือ เป็นต้น ในระยะแรกนั้นนิยมการทำให้เหมาะที่สุดในขนาดโครงสร้าง (Size Optimization) โดยจะคำนึงถึงเพียงขนาดของโครงสร้าง โดยมีตัวแปรออกแบบเป็นตัวที่ใช้ระบุขนาดของโครงสร้าง เช่น ความหนาของโครงสร้าง พื้นที่หน้าตัดเป็นต้น เพื่อไม่จำต้องเปลี่ยนแปลงแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ใหม่ระหว่างกระบวนการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุด

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ถูกนำมาใช้ในกระบวนการทำให้เหมาะสมที่สุดโดยการแบ่งโครงสร้างออกเป็นชิ้นส่วนย่อย โดยที่ในแต่ละชิ้นส่วนนั้นจะแสดงค่าการเปลี่ยนตำแหน่งและค่าหน่วยแรง แทนที่จะเป็นค่าของฟังก์ชันต่อเนื่อง

Rath *et al.* (1999) ได้ทำการออกแบบหารูปร่างที่เหมาะที่สุดของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทคานซึ่งกำหนดให้หน้าตัดเบื้องต้นเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและจะเปลี่ยนแปลงความกว้างและความลึกของหน้าตัดไปตามความยาวของคาน โดยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและจำนวนของเหล็กเสริมจะใช้โปรแกรมและระเบียบวิธีการคำนวณเฉพาะ (Algorithm) ในการคำนวณ โดยสมการเป้าหมายจะเน้นเรื่องราคาซึ่งประกอบด้วยค่าวัสดุ ค่าประกอบ และค่าขนย้าย โดยราคาค่าวัสดุและค่าไม้แบบของคอนกรีตจะแปรผันตรงกับปริมาตรของคอนกรีตนอกจากนั้นราคาของเหล็กเสริมก็ยังแปรผันตรงตามพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตเช่นกัน ดังนั้นสมการเป้าหมายจึงถูกกำหนดด้วยพื้นที่หน้าตัดของคานดังภาพที่ 1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 1 หน้าตัดออกแบบเบื้องต้น

ที่มา: Rath *et al*. (1999)

จากภาพจะได้สมการเป้าหมายดังนี้

$$F_J = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{b_i + b_{i+1}}{2} \times h_i \qquad (1)$$

โดยที่ F_J คือพื้นที่ของหน้าตัด J , b_i และ h_i คือความกว้างและความลึกของแถบพื้นที่ย่อยที่ i , n คือจำนวนทั้งหมดของแถบพื้นที่ย่อยที่หน้าตัด J

ตัวแปรที่กำหนดให้เป็นตัวแปรคงที่ (Constant Parameters) ได้แก่ สภาพขอบเขต, น้ำหนักบรรทุก คุณสมบัติของวัสดุ ความกว้างของปีกบนและปีกล่าง และระยะหุ้มเหล็กของคอนกรีต (ความหนาของปีกบน และ ปีกล่าง) ตัวแปรออกแบบได้แก่ขนาดหน้าตัด, เส้นผ่าศูนย์กลาง และจำนวนของเหล็กเสริม ซึ่งสมการจำกัดขอบเขตที่ใช้ในการควบคุมคือ การรับโมเมนต์, การรับแรงเฉือน, การโก่งตัว และมาตรฐานในการจัดวางเหล็ก

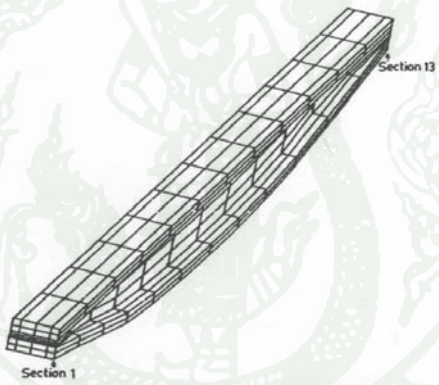
กระบวนการในการแก้ปัญหาจะจำลองคอนกรีตด้วยเอลิเมนต์ชนิด 3 มิติ แบบ 8 จุดต่อ (eight-noded 3D solid element) และจำลองเหล็กเสริมด้วยเอลิเมนต์ชนิดเส้น 3 มิติ (linear 3D spar element) จากนั้นจึงทำ การสร้างสมการขึ้นมาเป็นสมการที่รวมสมการเป้าหมายและสมการจำกัดขอบเขตเข้าไว้ด้วยกันเรียกสมการนี้ว่า Lagrangian function ดังสมการที่ (2)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$L = F_i + \sum_{i=1}^{n_c} \lambda_i g_i \qquad (2)$$

โดยที่ F_i คือสมการเป้าหมาย , λ_i และ g_i คือสัมประสิทธิ์ของ Lagrangian และสมการจำกัดขอบเขตตามลำดับ , n_c คือจำนวนของสมการจำกัดขอบเขต

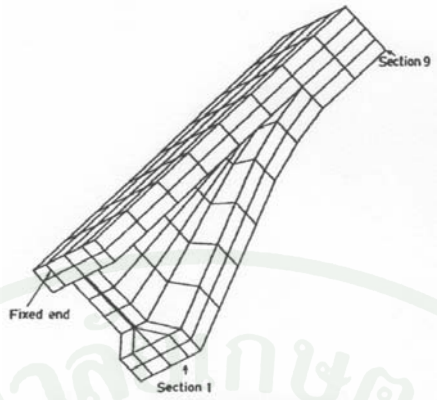
เมื่อได้สมการข้างต้นแล้วทำการคำนวณหาค่าตัวแปรออกแบบให้เหมาะสมกับสมการจำกัดขอบเขตโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จากนั้นทำการแทนค่าลงในสมการเป้าหมายเพื่อพิจารณาว่าเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดหรือไม่ถ้าไม่ให้ทำการแทนค่าตัวแปรออกแบบใหม่จนกระทั่งได้รูปแบบของคานที่เหมาะสมที่สุดดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2 โครงสร้างสุดท้ายของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีฐานรองรับอย่างง่าย

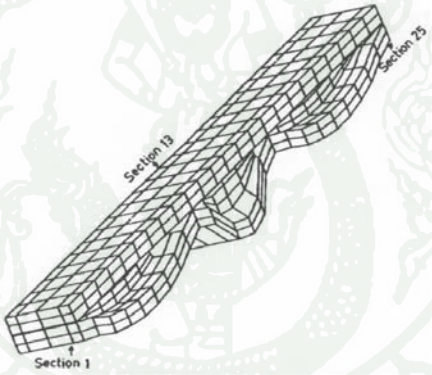
ที่มา: Rath et al. (1999)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 3 โครงสร้างสุดท้ายของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นคานยื่น

ที่มา: Rath et al. (1999)



ภาพที่ 4 โครงสร้างสุดท้ายของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นคานต่อเนื่อง

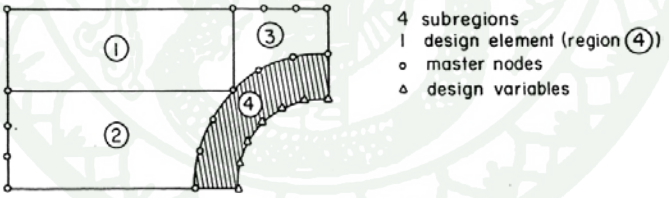
ที่มา: Rath et al. (1999)

จากภาพจึงสรุปได้ว่าหน้าตัดไม่จำเป็นต้องเป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าตลอดความยาวซึ่งความลึกของคานและความกว้างของส่วนเอวสามารถเปลี่ยนไปได้เรื่อยๆตามความยาวคาน เป็นชิ้นส่วนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบหน้าตัดแปรผัน (Nonprismatic RC Section) และน้ำหนักของโครงสร้างจะลดลงไปร้อยละ 40 ถึง 56 ขึ้นอยู่กับประเภทของฐานรองรับโดยกระบวนการเหล่านี้จะนำไปใช้ในงานออกแบบชิ้นส่วนหล่อสำเร็จและชิ้นส่วนหล่อในที่ ที่ใช้เป็นโครงสร้างสะพาน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การทำให้เหมาะสมที่สุดในรูปร่าง (Shape Optimization) ที่มีตัวแปรทางเรขาคณิต (Geometric Variable) ไว้นิยามรูปร่างสภาพขอบเขตของวัสดุซึ่งเป็นเพียงรูปร่างของสภาพขอบเท่านั้นที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ในระหว่างกระบวนการทำให้เหมาะสมที่สุด และเมื่อตัวแปรออกแบบเปลี่ยนค่าไปจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ตามไปด้วย ซึ่งการทำให้เหมาะสมที่สุดในรูปร่างทำขึ้นเพื่อที่จะลดผลของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบริเวณขอบของโครงสร้างให้น้อยลง

Haftka and Grandhi (1986) ได้ทำการศึกษาและใช้ฟังก์ชันโพลิโนเมียลกำหนดถึงลักษณะรูปร่างขอบเขตของโครงสร้างโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ฟังก์ชันโพลิโนเมียลเป็นตัวแปรออกแบบ สำหรับฟังก์ชันโพลิโนเมียลที่มีอันดับสูง การนิยามรูปร่างขอบเขตจะมีความไม่แน่นอนของรูปร่างจึงควรใช้เส้นโค้งซึ่งประกอบด้วยฟังก์ชันโพลิโนเมียลลำดับต่ำๆรวมเข้าด้วยกันแทน ในเบื้องต้นจะทำการแบ่งโครงสร้างออกเป็น 2 ถึง 3 ส่วน ซึ่งแต่ละส่วนจะถูกนิยามด้วยกลุ่มของจุดต่อหลัก (Master Node) ที่ใช้ควบคุมลักษณะทางเรขาคณิตของชิ้นส่วนนั้น โดยชิ้นส่วนที่จะออกแบบนั้น (Design Element) ตำแหน่งพิกัดของจุดต่อหลักถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรออกแบบคือยอมให้มีการเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งในการออกแบบได้ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แนวความคิดการออกแบบเอลิเมนต์

ที่มา: Haftka and Grandhi (1986)

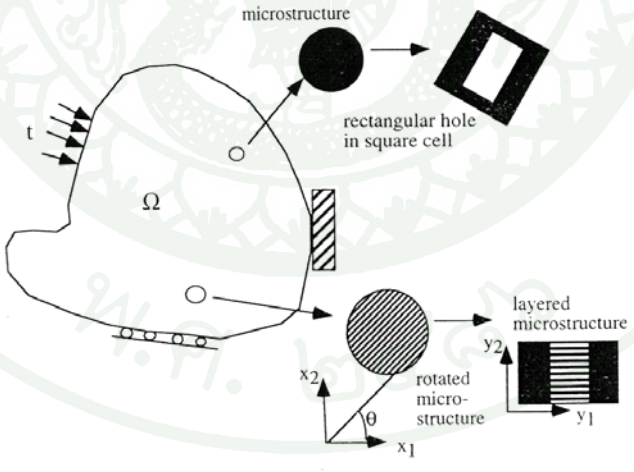
โดยเมื่อรูปร่างสภาพขอบเขตเปลี่ยนไปก็จะทำให้โครงตาข่าย (Mesh) บางบริเวณเสียรูปไป ส่งผลให้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นไม่สามารถวิเคราะห์หาค่าได้อย่างถูกต้องต่อไป ต้องหยุดขบวนการการทำ ให้เหมาะสมที่สุด แล้วทำ การปรับเปลี่ยนโครงตาข่ายใหม่ (Remesh) ตรงบริเวณดังกล่าวเพื่อให้โครงตาข่ายมีความละเอียดมากขึ้น ซึ่งนอกจากการปรับเปลี่ยนโครงตาข่ายอาจกระทำโดยการเพิ่มจำนวนชิ้นส่วนย่อยเข้าไปตรงบริเวณพื้นที่นั้นหรืออาจทำโดยการเพิ่มอันดับของไฟไนต์เอลิเมนต์ หลังจากการทำการปรับเปลี่ยนโครงตาข่ายก็ทำการวิเคราะห์ในลักษณะเดิมซึ่ง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตราบที่รูปร่างสภาพขอบเขตยังคงเปลี่ยนแปลงอยู่ ก็ยังคงต้องปรับเปลี่ยนโครงตาข่ายไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไปจนกระทั่งได้รูปร่างและโครงตาข่ายที่เหมาะสมที่สุด

เนื่องจากการทำให้เหมาะสมที่สุดในรูปร่างสามารถนำไปใช้ได้อย่างจำกัดเพียงในโครงสร้างที่สามารถระบุขอบเขตด้วยฟังก์ชันโพลิโนเมียลเท่านั้น และวิธีการในการปรับเปลี่ยนรูปร่างมีความยุ่งยากในการหาสมการเส้นโค้งมาเพื่อใช้บรรยายสภาพของขอบเขตของโครงสร้างทั้งหมด ซึ่งต่อมาในระยะหลังได้มีการยอมให้เปลี่ยนแปลงสรีระได้ในระหว่างการทำให้เหมาะสมที่สุดซึ่งเรียกว่า การหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุด (Topology Optimization) หรือการทำให้เหมาะที่สุดในแบบผัง (Layout Optimization)

Bendsøe and Kikuchi (1988) ได้เสนอวิธี Homogenization Method ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดของโครงสร้าง โดยเป็นวิธีการวิเคราะห์เพื่อกำหนดพื้นที่ที่เป็นช่องว่างและพื้นที่ที่มีเนื้อวัสดุ เพื่อให้ได้มาซึ่งสรีระที่เหมาะสมที่สุดภายใต้บรรทัดฐานที่กำหนด โดยการทำแบบจำลองเนื้อวัสดุ (Material Model) ที่ประกอบด้วยโครงสร้างย่อย (Microstructure) จำนวนมาก และในโครงสร้างย่อยนั้นประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิดคือเนื้อวัสดุ (Substance) และ ช่องว่าง (Hole)



ภาพที่ 6 แบบจำลองเนื้อวัสดุที่ประกอบด้วยโครงสร้างย่อย

ที่มา: Bendsøe (1995)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อโครงสร้างรับแรงกระทำโครงสร้างจะเกิดการปรับตัวในโครงสร้างย่อยโดยซึ่งจะมีความพรุน (Porosity) มากขึ้นที่ตำแหน่งโครงสร้างย่อยที่ได้รับแรงกระทำน้อยและมีความพรุนลดน้อยลงที่ตำแหน่งที่ได้รับแรงกระทำสูง จนกระทั่งได้ค่าความพรุนที่เหมาะสม นั้นคือกระบวนการได้ลู่เข้าสู่โครงสร้างที่มีความเหมาะที่สุดในทอพอโลยี

ในกระบวนการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดนั้นอาจทำได้โดยการกำหนดโครงตาข่ายตารางหมากรุกขึ้นมาเป็นช่องว่างก่อนแล้วจึงเติมเนื้อวัสดุเข้าไป หรือสร้างโครงตาข่ายที่มีเนื้อวัสดุขึ้นมาแล้วกำจัดออกทีละช่อง ซึ่งวิธีเช่นนี้ทำให้สามารถช่วยให้หลีกเลี่ยงการสร้างโครงตาข่ายใหม่ได้ และสามารถกำหนดค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) ของวัสดุเสมือนให้มีค่าประมาณ 10^{-2} - 10^{-3} เท่าของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุนั้น โดยยังคงค่าอัตราส่วนปัวซองก์ไว้เท่าเดิม เพื่อทำให้วัสดุเสมือนมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับช่องว่าง

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำนั้น โครงสร้างที่มีการรับแรงมากไม่จำเป็นที่จะต้องมีการเสียหายเสมอไป Von Mises ได้สร้างสมการระบุถึงหน่วยแรงระบุสภาวะครากที่ทำให้เกิดความเสียหายแก่เนื้อวัสดุ เรียกว่า Von Mises Stress (σ_{von}) ซึ่งการวิบัติของเนื้อวัสดุของ Von Mises คือ วัสดุจะเกิดการวิบัติเมื่อเกิดหน่วยแรง σ_{von} มากกว่าหน่วยแรงครากของวัสดุ (Yield Strength) ซึ่ง σ_{von} สามารถหาได้จากสมการที่ (3)

$$\sigma_{von} = \sqrt{\frac{(\sigma_{maj} - \sigma_{min})^2 + \sigma_{maj}^2 + \sigma_{min}^2}{2}} \qquad (3)$$

โดยที่ σ_{maj} คือ หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ

σ_{min} คือ หน่วยแรงรองมุขสำคัญ

สมการที่ (3) เป็นสมการระบุหน่วยแรงระบุสภาวะคราก สำหรับชิ้นส่วนสองมิติ ในขั้นตอนการวิเคราะห์ความเหมาะสมของโครงสร้าง นิยมใช้หน่วยแรงระบุสภาวะคราก เป็นตัวกำหนดหน่วยแรงที่ทำให้เนื้อวัสดุถึงจุดคราก (yield) ในทางปฏิบัติต้องมีการกำหนดสัดส่วนความปลอดภัยเพื่อควบคุมให้หน่วยแรงสูงสุดไม่มากเกินไปกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ด้วยตามสมการที่ (4)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$\text{หน่วยแรงที่ยอมให้} = \frac{\text{หน่วยแรงที่จุดครากของวัสดุ}}{\text{ตัวส่วนความปลอดภัย}} \quad (4)$$

วิธีการในข้างต้นนั้นใช้สำหรับกำหนดสภาวะครากสำหรับวัสดุที่เป็นวัสดุอ่อน (Ductile Material) และมีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic Material) เช่น เหล็ก ซึ่งมีความสามารถในการรับหน่วยแรงดึงและหน่วยแรงอัดใกล้เคียงกันและมีการวิบัติจากหน่วยแรงเฉือนเป็นหลัก

Xie and Steven (1992) ได้นำเสนอกระบวนการวิวัฒนาการอย่างง่าย (Simple Evolutionary Procedure) และได้ถูกพัฒนาต่อมาโดย Hinston and Seinz (1995) เป็นวิธีการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดของโครงสร้างให้มีหน่วยแรงสูงสุดโดยกระบวนการวิวัฒนาการ (Fully Stressed Topological Design of Structures Using an Evolutionary Procedure (EFSD))โดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองขึ้นโดยกำหนดเป็นโครงตาข่ายซึ่งประกอบด้วยเนื้อวัสดุ และทำการกำหนดพื้นที่ที่ยอมให้มีการปรับเปลี่ยนได้ (Design Domain) และบริเวณที่ไม่ยอมให้มีการปรับเปลี่ยน (Non Design Domain) เช่น บริเวณที่สัมผัสกับฐานรองรับ บริเวณที่สัมผัสกับแรงกระทำ ซึ่งในระหว่างกระบวนการวิเคราะห์นั้นจะไม่มีการปรับเปลี่ยนโครงตาข่ายเกิดขึ้น

จากนั้นทำการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic Finite Elemnt) โดยจะพิจารณาหน่วยแรงระบุสภาวะคราก (Von Mises Stress (σ_{von})) ที่เกิดขึ้น ซึ่งพบว่าชิ้นส่วนย่อยส่วนหนึ่งเกิดหน่วยแรงขึ้นน้อย หรือวัสดุบางส่วนไม่มีความจำเป็นต่อโครงสร้างและสามารถกำจัดออกไปได้ตามบรรทัดฐานการกำจัดออก (Rejection Criterion) โดยที่ชิ้นส่วนย่อยที่ถูกกำจัดออกคือชิ้นส่วนที่มีหน่วยแรงน้อยกว่าค่าผลคูณระหว่างอัตราส่วนกำจัดออก (Rejection Ratio (RR)) กับหน่วยแรงระบุสภาวะครากสูงสุด ($\sigma_{von}^{\max}$) ดังสมการที่ (5)

$$\sigma_{von}^{rej} < RR \times \sigma_{von}^{\max} \quad (5)$$

ซึ่งวิธีการกำจัดเนื้อวัสดุนั้นจะอยู่ในรูปของการปิดตัวของชิ้นส่วนโดยการกำหนดค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุปิดตัวให้มีค่าน้อยกว่าวัสดุเปิดตัวอย่างมาก โดยยังคงค่าอัตราส่วนปัวซองก์ไว้เท่าเดิม ดังสมการที่ (6)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$E_{off} = 10^{-6} \times E_{on} \quad (6)$$

โดยที่ E_{off} คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุปิดตัว

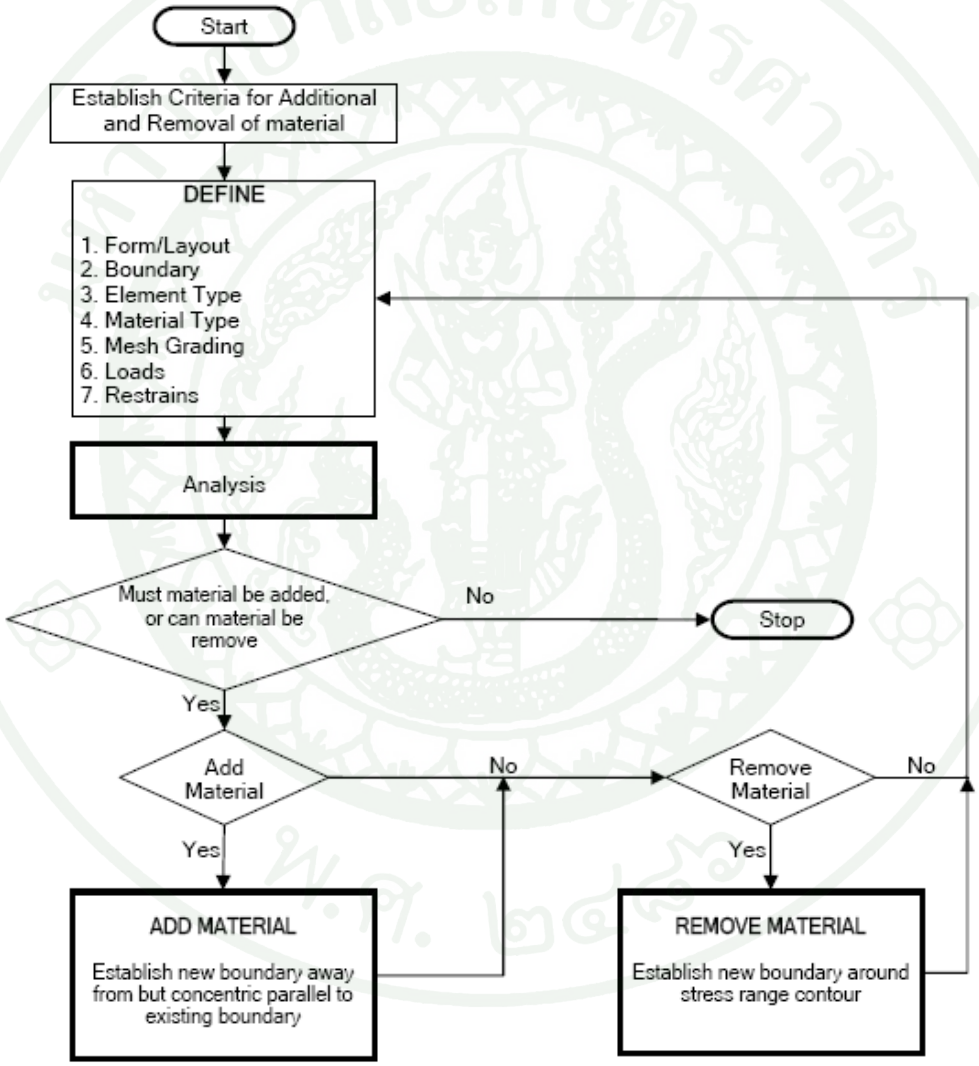
E_{on} คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเปิดตัว

การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และกระบวนการกำจัดเนื้อวัสดุออกจะทำในลักษณะของการวนรอบ (Iteration) โดยนำค่าทอพอโลยีที่ได้จากกระบวนการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดในรอบก่อนหน้ามาวิเคราะห์และทำการกำจัดชิ้นส่วนที่เกิดหน่วยแรงขึ้นน้อย ดำเนินการวิเคาะห์ซ้ำจนกระทั่งเข้าสู่เงื่อนไขการหยุดการวิเคราะห์ เช่น ชิ้นส่วนเกิดหน่วยแรงขึ้นเกินค่าที่กำหนด ข้อกำหนดการใช้งาน หรือปริมาณของวัสดุเหลือน้อยกว่าปริมาณที่ต้องการคงไว้ ซึ่งในแต่ละรอบของการวิเคราะห์นั้นหากไม่มีชิ้นส่วนที่ถูกกำจัดให้ทำการเพิ่มค่าอัตราการกำจัดออก ด้วยอัตราการวิวัฒนาการ (Evolution Ratio (ER)) เพื่อให้กระบวนการสามารถดำเนินต่อไปได้ โดยทั่วไปแล้วค่าอัตราส่วนการกำจัดออกและอัตราการวิวัฒนาการนั้น ไม่ควรมีค่าเกิน 1% เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการแยกตัวออกจากกันของโครงสร้างเนื่องจากการกำจัดชิ้นส่วนที่มากเกินไป

Christie *et al*. (1998) ได้เสนอกระบวนการทำเส้นขอบให้ละเอียด (Boundary Refinement Procedure) เป็นวิธีการที่ทำให้เส้นขอบเขตของโครงสร้างมีความราบเรียบโดยในขั้นตอนการพัฒนาโครงสร้างนั้นจะเริ่มจากการวาดเส้นแสดงระดับขั้นหน่วยแรง (Stress Contour) ลงไปบนโครงสร้างเพื่อใช้เป็นแม่แบบในการปรับปรุงโครงสร้างต่อไป การสร้างแม่แบบนั้นทำโดยการกำหนดขอบเขตของโครงสร้างตามเส้นระดับชั้นหน่วยแรงที่ได้เลือกไว้ จากนั้นจึงทำการปรับเปลี่ยนโครงตาข่ายภายในขอบเขตดังกล่าวใหม่ ซึ่งวิธีการนี้จะใช้เพียงโปรแกรมวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เท่านั้น ทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์เพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับปฏิบัติงานจริงไม่ได้มีพื้นฐานการใช้เทคนิคการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดในเชิงคณิตศาสตร์ การกำจัดเนื้อวัสดุก็ขึ้นอยู่กับความสามารถของผู้ทำการออกแบบเอง การรักษาไม่ให้เกิดการแยกตัวออกจากกันของโครงสร้างก็กระทำได้ด้วยการตรวจสอบเพียงสายตาเท่านั้น โดยเริ่มต้นด้วยการกำหนดค่าหน่วยแรงขึ้นมา 2 ค่า คือค่าระดับฐานหน่วยแรงมากที่สุด (Maximun Stress Threshold) เพื่อเป็นขอบเขตบนของค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นสูงที่สุดที่ยอมให้เกิดขึ้น และระดับฐานหน่วยแรงกำจัดออก (Removal Stress Threshold) เพื่อใช้เป็นขอบเขตล่างของค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นต่ำที่สุด ซึ่งถ้าชิ้นส่วนใดมีค่าต่ำกว่านี้จะต้องถูกกำจัดออก จากนั้นทำการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แล้วจึงพิจารณาค่าหน่วยแรงในโครงสร้างโดยมีเงื่อนไขว่า ชิ้นส่วนใดที่เกิดค่าหน่วยแรงสูงกว่าค่าระดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ฐานหน่วยแรงมากที่สุดจะต้องมีการเพิ่มเนื้อวัสดุในตำแหน่งร่วมศูนย์กลางและขนานกับชิ้นส่วนนั้นๆ และในทางตรงกันข้ามขิ้นส่วนที่เกิดค่าหน่วยแรงขึ้นน้อยกว่าค่าระดับฐานหน่วยแรงกำจัดออกหมายความว่าที่ตำแหน่งนั้นไม่จำเป็นต้องมีเนื้อวัสดุ กระบวนการดังที่ได้กล่าวมานี้ถูกกระทำซ้ำจนกระทั่งโครงสร้างไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอีกซึ่งหมายถึงโครงสร้างนั้นมีความเหมาะที่สุดในรูปร่างแล้ว ซึ่งสามารถแสดงในรูปผังลำดับงานได้ดังภาพที่ 7

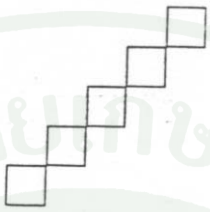


ภาพที่ 7 ผังวิธีการทำเส้นขอบละเอียด

ที่มา: Christie *et al*. (1998)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Renolds *et al.* (1999) ให้ความเห็นถึงข้อเสียของวิธีฮาร์ดคิล (Hard Kill) คือ ความไม่มีเสถียรภาพของโครงสร้างเนื่องจากเกิดเอลิเมนต์ที่มีจุดเชื่อมต่อที่มุมเนื่องจากการลบเอลิเมนต์ที่เกิดหน่วยแรงน้อยออก ซึ่งสภาพการเกิดเอลิเมนต์ที่มีจุดเชื่อมต่อที่มุมสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 เอลิเมนต์ที่มีจุดเชื่อมต่อที่มุม

ที่มา: Renold *et al*. (1998)

และข้อเสียของกระบวนการวิวัฒนาการอย่างง่ายที่ต้องใช้โครงตาข่ายที่มีความละเอียดมากตั้งแต่เริ่มต้นการวิเคราะห์ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองทรัพยากรในการคำนวณ จึงได้เสนอวิธีการแปลงย้อนกลับ (Reverse Adaptivity) ขึ้นซึ่งสามารถลดข้อเสียดังกล่าวลงได้ โดยจะมีการปรับเปลี่ยนโครงข่ายให้มีความละเอียดมากขึ้นในบริเวณที่มีค่าหน่วยแรงต่ำเพื่อป้องกันการเกิดสภาพตารางการเชื่อมดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นทั้งนี้เนื่องจากส่วนที่จะถูกกำจัดออกมีความละเอียดมากขึ้นทำให้การกระจายตัวของหน่วยแรงมีความละเอียดมากขึ้น

ขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มด้วยการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จากนั้นจึงทำการคำนวณหาค่าหน่วยแรงที่จุดต่อเพื่อนำมาหาค่าหน่วยแรงระบุสภาวะคราก เทียบเท่าจากจุดต่อที่ประกอบมาเป็นชิ้นส่วนนั้น จากนั้นจึงทำการเรียงลำดับหน่วยแรงในชิ้นส่วนทั้งหมดจากน้อยไปมาก และทำการรวมพื้นที่ย่อยไปเรื่อยๆ จนกว่าจะถึงอัตราส่วนร้อยละเป้าหมายของการกำจัดออก จากนั้นจึงมีการปรับความละเอียดของชิ้นส่วนที่จะทำการกำจัดออก โดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้คือ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$L = \sqrt{\frac{A}{NC}} \qquad (7)$$

โดยที่ L คือ ความยาวด้านของชิ้นส่วนที่จะทำการปรับขนาด

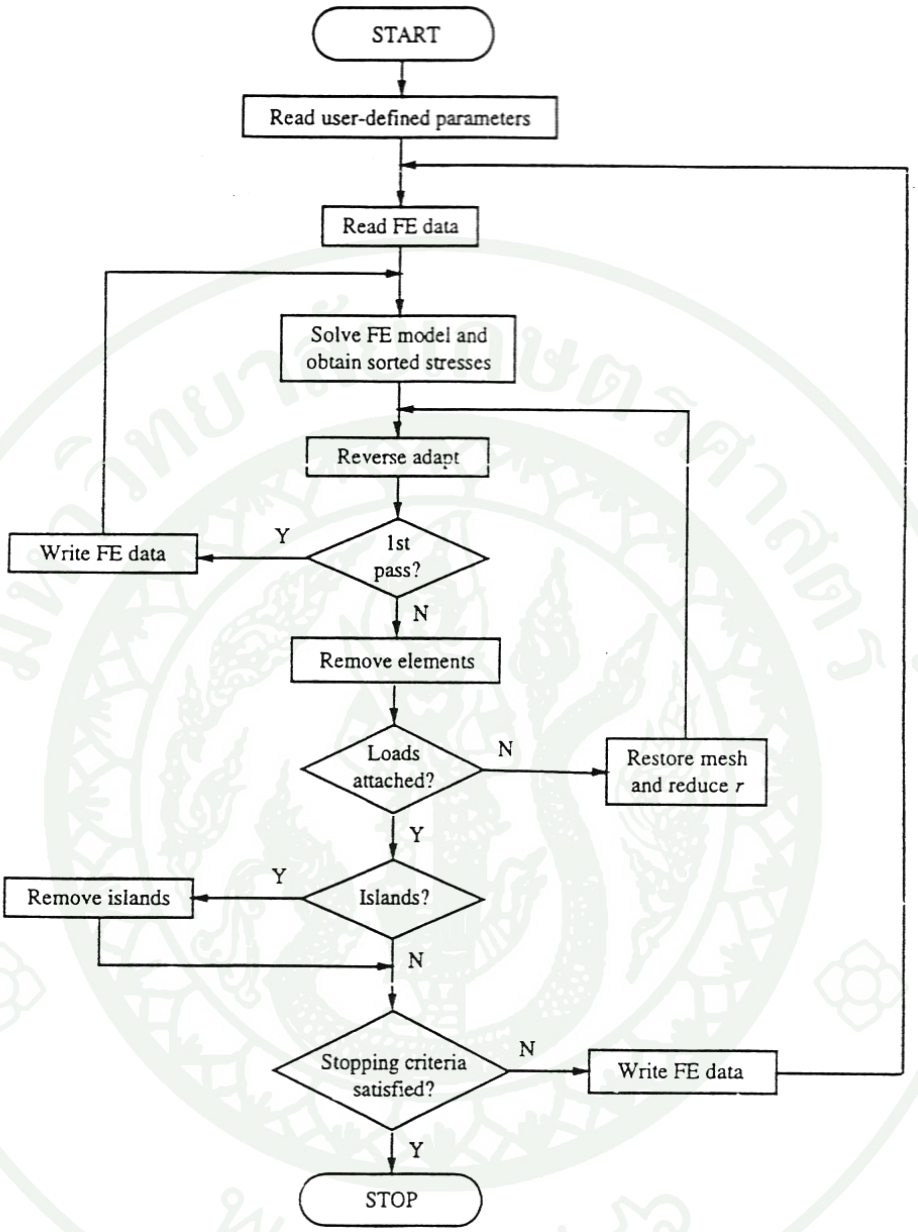
A คือ พื้นที่รวมของชิ้นส่วนที่มีหน่วยแรงน้อยกว่าหน่วยแรงตัดออก (cut-off stress)

N คือ จำนวนชิ้นส่วนที่ต้องการจะแบ่งย่อย

C คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของโครงข่าย

หลังจากได้โครงตาข่ายที่ปรับเปลี่ยนใหม่ก็ดำเนินการวิเคราะห์โครงสร้างทำให้ได้ค่าหน่วยแรงของชิ้นส่วนที่ได้แบ่งย่อย แล้วจึงทำการกำจัดชิ้นส่วนที่ยังคงมีค่าหน่วยแรงน้อยกว่าค่าหน่วยแรงกำจัดออก ซึ่งสามารถแสดงเป็นผังลำดับงานได้ดังภาพที่ 9

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 9 ผังลำดับงานของวิธีการแปลงย้อนกลับ

ที่มา: Renold *et al*. (1998)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Liang *et al.* (2000) ได้ทำการวิจัยการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดของแบบจำลอง สตรัท-ไท ของการเสริมกำลังในโครงสร้างคอนกรีตด้วยกระบวนการวิวัฒนาการอย่างง่าย (Topology Optimization of strut-and-tie model in reinforced concrete structures Using an Evolutionary Procedure) และได้เสนอกระบวนการทำให้เหมาะสมในสมรรถนะ (Performance Based Optimization) ขึ้นเพื่อปรับปรุงข้อด้อยในเรื่องการเกิดความหนาแน่นของหน่วยแรง (Stress Concentration) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่มีขนาดไม่เท่ากันของแบบจำลองในแต่ละรอบการวิเคราะห์ ซึ่งการเกิดความหนาแน่นของหน่วยแรงนั้นมีทำให้กระบวนการทำให้เหมาะสมที่สุดต้องหยุดลงไปก่อนที่จะได้ค่าทอพอโลยีที่เหมาะสมที่สุด โดยการใช้ดัชนีสมรรถนะ (Performance Index (PI)) ในการพิจารณาจุดสิ้นสุดของกระบวนการ โดยกระบวนการทำให้เหมาะสมที่สุดจะหยุดตัวลงเมื่อค่าดัชนีสมรรถนะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 ซึ่งดัชนีสมรรถนะนี้จะนำเอาปริมาตรของโครงสร้างมาประกอบการวิเคราะห์ดังสมการที่ (8)

$$PI_s = \frac{\sigma_{0,\max} V_0}{\sigma_{i,\max} V_i} \tag{8}$$

โดยที่ PI_s คือ ค่าดัชนีสมรรถนะของโครงสร้าง

$\sigma_{0,\max}$ คือ ค่าหน่วยแรงระบุสภาวะคราดสูงสุดของโครงสร้างแรกเริ่ม

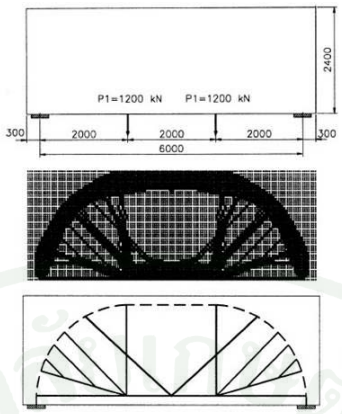
$\sigma_{i,\max}$ คือ ค่าหน่วยแรงระบุสภาวะคราดสูงสุดของโครงสร้างในรอบปัจจุบัน

V_0 คือ ค่าปริมาตรของโครงสร้างแรกเริ่ม

V_i คือ ค่าปริมาตรของโครงสร้างในรอบปัจจุบัน

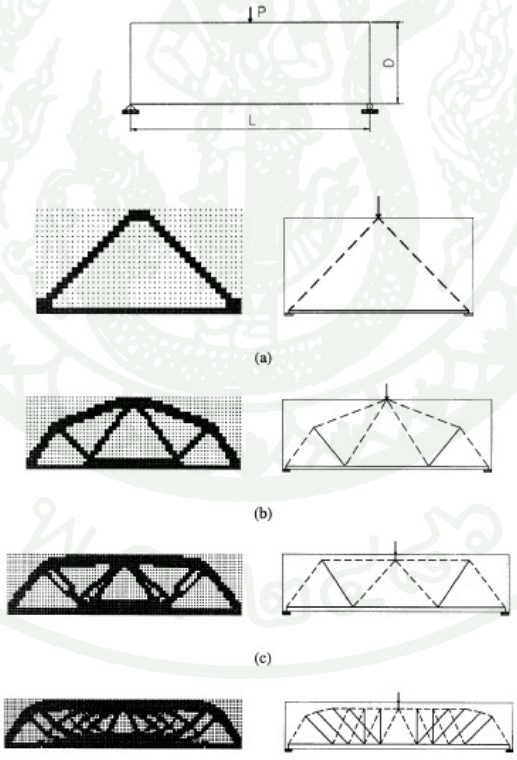
ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบการวางแนวเหล็กเสริมกำลังของโครงสร้างคานคอนกรีตในรูปแบบของสตรัท-ไท (Strut-and Tie) ที่เหมาะที่สุด ซึ่งแบบจำลองสตรัท-ไทนั้นสามารถนำมาอธิบายผลกระทบของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตได้ โดยการสร้างแบบจำลองโครงสร้างคอนกรีตแล้วทำการกำจัดเนื้อวัสดุด้วยกระบวนการวิวัฒนาการอย่างง่าย ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือรูปแบบการจัดวางแนวเหล็กเสริมกำลังที่เหมาะสมในลักษณะของโครงถักที่มีรูปแบบแตกต่างกันออกไปตามลักษณะของแบบจำลองที่กำหนดขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 10 รูปแบบ สตรัท-ไท เหมาะที่สุดของคานลึกที่รับแรงกระทำแบบจุดที่ท้องคาน

ที่มา: Liang *et al.* (2000)



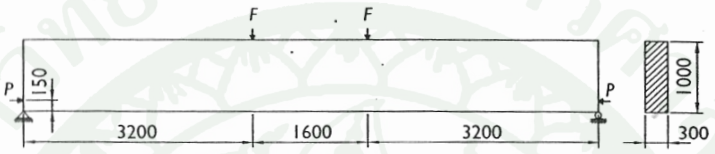
ภาพที่ 11 รูปแบบ สตรัท-ไท เหมาะที่สุดของคานที่มีค่าสัดส่วนความยาวต่อความลึกคานที่หลากหลาย : (a) L/D = 2 , (b) L/D = 3 , (c) L/D = 4 , (b) L/D = 5

ที่มา: Liang *et al.* (2000)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

และต่อมาในปี 2001 ได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองสตรัท-ไทในคานคอนกรีตอัดแรง โดยกระบวนการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดในสมรรถนะ (Generating Optimal Strut-and-Tie Models in Prestressed Concrete Beams by Performance Based Optimization)

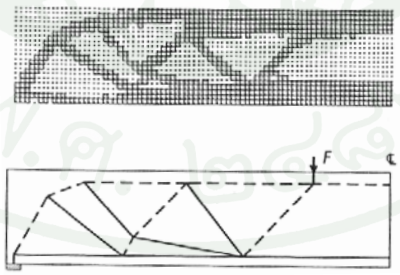
การสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตอัดแรงทำขึ้นโดยการสร้างขอบเขตของคานคอนกรีต ให้แรงกระทำภายนอก (F) และแรงที่ใช้ในการการอัดแรง (P) ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 คานคอนกรีตอัดแรง

ที่มา: Liang (2005)

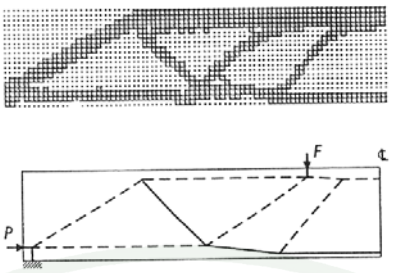
ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการสร้างแบบจำลองสตรัท-ไทในคานคอนกรีตอัดแรงโดยกระบวนการทำให้เหมาะสมที่สุดในประสิทธิภาพคือแนวการวางเหล็กเสริมกำลังอย่างมีประสิทธิภาพดังภาพที่ 13 ถึง 15



ภาพที่ 13 รูปแบบ สตรัท-ไท เหมาะที่สุด ในคานคอนกรีตที่ไม่มีการอัดแรง

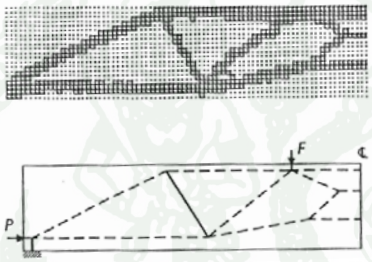
ที่มา: Liang (2005)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 14 รูปแบบ สตรัท-ไท เหมาะที่สุด ในคานคอนกรีตที่มีการอัดแรงบางส่วน

ที่มา: Liang (2005)

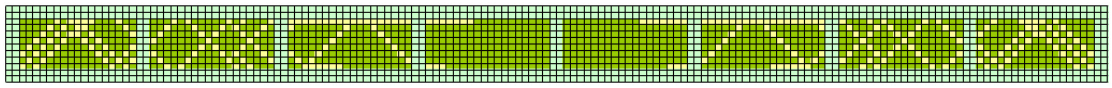


ภาพที่ 15 รูปแบบ สตรัท-ไท ที่ดีที่สุด ในคานคอนกรีตที่มีการอัดแรงเต็มส่วน

ที่มา: Liang (2005)

กริช (2545) ได้ทำการศึกษาการหาค่าที่เหมาะที่สุดในแบบผังของคานประกอบ (Layout Optimization of Composite Beams) โดยศึกษาลำดับการเกิดวิวัฒนาการในแบบผังของคานประกอบซึ่งประกอบด้วยแผ่นเหล็กบางกับไม้เต็งด้วยวิธีการกำจัดเนื้อวัสดุโดยคำนึงถึงเนื้อวัสดุภายในให้คงเหลืออยู่ได้เท่าที่จำเป็นภายใต้เงื่อนไขข้อจำกัดต่างๆที่กำหนดไว้ ด้วยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับชุดคำสั่งการทำให้เหมาะสมที่สุดที่เขียนขึ้น ในลักษณะของการวนรอบ ทำให้เกิดการวิวัฒนาการอย่างเป็นลำดับขั้นตอนจนกระทั่งได้แบบผังสุดท้ายที่มีค่าเหมาะที่สุด ซึ่งได้ข้อสรุปว่า แบบจำลองคานประกอบที่นำมาวิเคราะห์นั้นมีวิวัฒนาการถึงลำดับที่ 99 โดยที่เนื้อวัสดุเหล็กนั้นคงเหลืออยู่ร้อยละ 54.2 จากปริมาณเหล็กทั้งหมด โดยมีแบบผังที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างดังภาพที่ 16

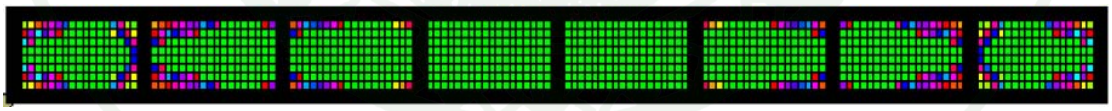
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 16 แบบผังลำดับที่ 99 แบบผังลำดับสุดท้ายหลังดำเนินการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในแบบผัง

ที่มา: กริช (2545)

บัญชา (2547) ได้ทำการศึกษาการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดของคานประกอบด้วยเทคนิคการกระตุ้นเนื้อวัสดุ (Optimal Topology of Composite Beams with Material Activation Technique) โดยทำการศึกษาลำดับการเกิดวิวัฒนาการในแบบผังของคานประกอบซึ่งประกอบด้วยแผ่นเหล็กบางกับไม้เต็งด้วยวิธีการกระตุ้นเนื้อวัสดุ โดยการสร้างแบบจำลองของคานด้วยแบบผังของช่องว่าง ทำการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากนั้นทำการเติมเนื้อวัสดุเข้าไปในตำแหน่งของชิ้นส่วนย่อยที่ติดกับตำแหน่งของชิ้นส่วนย่อยที่มีค่าหน่วยแรงสูงกว่าค่าหน่วยแรงระบุสภาวะครากที่ได้กำหนดไว้ แล้วทำการวิเคราะห์แบบจำลองที่ได้มาหลังจากการเติมเนื้อวัสดุซ้ำในลักษณะของการวนรอบ จนกระทั่งได้แบบผังสุดท้ายที่เหมาะที่สุด ซึ่งได้ข้อสรุปว่า แบบจำลองคานประกอบที่นำมาวิเคราะห์นั้นมีวิวัฒนาการถึงลำดับที่ 6 ปริมาณของเนื้อวัสดุเหล็กหลังจากผ่านกระบวนการกระตุ้นเนื้อวัสดุแล้วคิดเป็นร้อยละ 53.33 ของพื้นที่เนื้อเหล็กทั้งหมด โดยมีแบบผังที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างดังภาพที่ 17



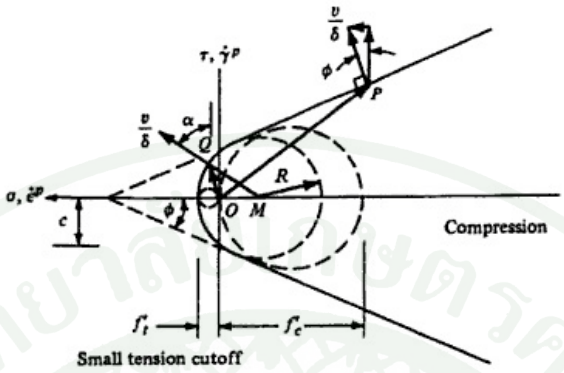
ภาพที่ 17 แบบผังลำดับที่ 6 แบบผังลำดับสุดท้ายหลังดำเนินการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในแบบผัง

ที่มา: บัญชา (2547)

แต่วัสดุที่เป็นวัสดุเปราะ (Brittle Material) และไม่มีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Anisotropic Material) เช่นคอนกรีต ซึ่งที่สภาวะครากนั้นมีกำลังรับหน่วยแรงดึงประมาณ 1 ใน 10 เท่าของกำลังรับหน่วยแรงอัด จำเป็นต้องมีการกำหนดสภาวะครากขึ้นมาใหม่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Chen and Drucker (1969) ได้นำ Mohr-Coulomb Criterion มาปรับปรุงเพื่อใช้ในการกำหนดสภาวะครากของคอนกรีตดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 การปรับปรุงเกณฑ์ของ Mohr-Coulomb ด้วยเวกเตอร์การเคลื่อนที่

ที่มา: Wai-Fah Chen (2007)

ซึ่งจะแบ่งการวิบัติออกเป็น 2 ส่วนคือ การวิบัติแบบลื่นไถล

$$|\tau| = c - \sigma\tan\phi \tag{9}$$

และ การวิบัติแบบแยกตัว

$$\sigma = f_t' \tag{10}$$

โดยที่ f_c' คือ หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีต, f_t' คือ หน่วยแรงดึงประลัยของคอนกรีต, τ, σ คือ หน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงในหน้าตัดตามลำดับ, c คือแรงยึดเหนี่ยว และ ϕ คือ มุมเสียดทานภายใน

เมื่อพิจารณาสมการที่ (9) ในแนวแกนหลัก (Principal Axis) จะสามารถเปลี่ยนรูปสมการเป็น

$$\frac{1}{2}\sigma_1(1+\sin\phi) + \frac{1}{2}\sigma_3(1-\sin\phi) - c\cos\phi = 0 \tag{11}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

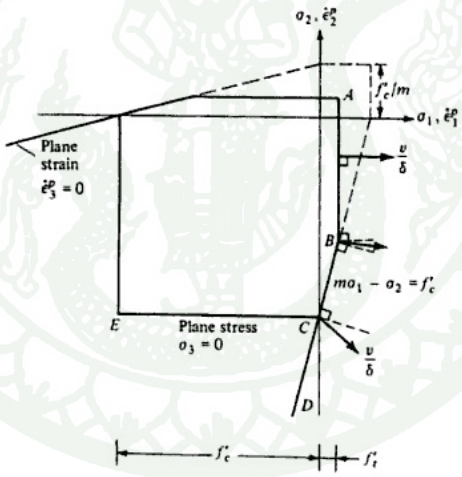
ซึ่งเมื่อ $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ สมการที่ สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$m\sigma_1 - \sigma_3 = 2c\sqrt{m} \tag{12}$$

โดยที่ $$m = \left(\frac{\cos\phi}{1-\sin\phi}\right)^2 = \tan^2\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\phi}{2}\right) = \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} = \frac{f_c^{'}}{f_t^{'}} \tag{13}$$

และ $$f_c^{'} = \frac{2c\cos\phi}{1-\sin\phi}, \qquad f_t^{'} = \frac{2c\cos\phi}{1+\sin\phi} \tag{14}$$

จากผลการใช้ข้อมูลของ Johansen (1958) Richart et al. (1928) เมื่อมุมเสียดทานภายในมีค่าเข้าใกล้ค่าคงที่ $\phi \approx 37^{\circ}$ จะให้ค่า $m \approx 4.0$ และ $f_c^{'} = c / 4$ ขอบเขตกำลังรับแรงของคอนกรีตจะมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 การปรับปรุงเกณฑ์ของ Mohr-Coulomb ของความเค้นระนาบหรือความเครียดระนาบด้วยเวกเตอร์การเคลื่อนที่

ที่มา: Wai-Fah Chen (2007)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ และอุปกรณ์มาตรฐาน
2. ระบบปฏิบัติการณ์ Microsoft Windows XP
3. โปรแกรมวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC NASTRAN 4.5

วิธีการ

1. การออกแบบหน้าตัดของคานคอนกรีตอัดแรงเบื้องต้น

ทำการออกแบบประมาณหน้าตัดของคานคอนกรีตอัดแรงเพื่อให้ได้ขนาดหน้าตัดที่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานที่กำหนดได้ และมีค่าการโก่งตัวของคานไม่เกินค่าการที่ยอมให้ตามมาตรฐานการออกแบบ

2. ตั้งบรรทัดฐานที่ยอมให้สำหรับผลการวิเคราะห์ที่เกิดขึ้นดังนี้

หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีต	=	350	กก/ซม^2
หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ในสภาวะใช้งานของคอนกรีต	=	157.5	กก/ซม^2
หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ในสภาวะใช้งานของคอนกรีต	=	29.93	กก/ซม^2
หน่วยแรงดึงประลัยของลวดอัดแรง	=	17,500	กก/ซม^2
หน่วยแรงดึงที่จุดคราก ครากของลวดอัดแรง	=	12,600	กก/ซม^2
การโก่งตัวเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน	$<$	$\frac{L}{360}$	

3. การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1. การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีสมมติฐานดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.1.1. วิเคราะห์แบบจำลองภายในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic)

3.1.2. วิเคราะห์แบบจำลองในระนาบ 2 มิติ ที่ไม่มีแรงกระทำตั้งฉากกับแนวระนาบ

3.1.3. ไม่เกิดการลื่นไถลระหว่างพันธะของคอนกรีตกับเหล็กเสริมและลวดอัดแรง

3.1.4. ไม่เกิดการบิดตัวในคานที่นำมาทำการวิเคราะห์

3.1.5. พิจารณาหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นส่วนแทนผลกระทบจากแรงเฉือนที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุก

ซึ่งขั้นตอนการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นมีขั้นตอนดังนี้

3.2. กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ (Material Property)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

วัสดุ	โมดูลัสยืดหยุ่น(E) (กก/ซม^2)	โมดูลัสการเฉือน(G) (กก/ซม^2)	อัตราส่วนปัวซอง(V)
คอนกรีต			
วัสดุเปิดตัว (E_{on})	284,365	114,663	0.24
วัสดุปิดตัว (E_{off})	284.365	114.663	0.24
ลวดอัดแรง	1,912,950	735,750	0.30

3.3. กำหนดชนิดของเอลิเมนต์ (Type of Element) ที่ใช้จำลองลักษณะการรับแรงของแต่ละส่วนภายซึ่งแต่ละชนิดเอลิเมนต์ที่จำลองแทนจะให้รูปแบบสติฟเนสเมทริกซ์ ที่ต่างกันไปตามการเคลื่อนที่อิสระที่เกิดขึ้นได้ โดยในคานคอนกรีตอัดแรงนี้ ได้จำลองให้คานอยู่ในระนาบ 2 มิติ คานคอนกรีตจะถูกจำลองด้วย เอลิเมนต์ระนาบ ชนิดสี่เหลี่ยมเชิงเส้นสองมิติ (Linear Quadratic in-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

plane Element) และลวดอัดแรงจะถูกจำลองด้วย เอลิเมนต์มิติเดียว ชนิดท่อนรับแรงตามแนวแกน (Rod Element)

3.4. กำหนดบริเวณที่ยอมให้มีการปรับเปลี่ยน (Design Area) และ และบริเวณที่ไม่ยอมให้มีการปรับเปลี่ยน (Non-Design Area) โดยกำหนดให้ลวดอัดแรงและขอบโดยรอบของคานในส่วนที่เป็นคอนกรีตและส่วนที่สัมผัสกับลวดอัดแรงเป็นบริเวณที่ไม่ยอมให้มีการปรับเปลี่ยน ซึ่งบริเวณที่ยอมให้มีการปรับเปลี่ยนในระหว่างการวิเคราะห์ชิ้นส่วนที่มีค่าหน่วยแรงน้อยกว่าค่าหน่วยแรงกำจัดออกจะถูกปรับลดค่าโมดูลัสลง ซึ่งทำให้ชิ้นส่วนนั้นเสมือนเป็นช่องว่าง ส่วนบริเวณที่ไม่ยอมให้มีการปรับเปลี่ยนนั้นค่าโมดูลัสจะมีค่าคงที่แม้ว่าชิ้นส่วนนั้นจะเกิดหน่วยแรงน้อยเท่าใดก็ตาม

3.5. กำหนดสภาพขอบเขตยึดรั้ง (Constrain) โดยที่ปลายคานด้านหนึ่ง ยอมให้มีการหมุนได้แต่ไม่ยอมให้มีการเคลื่อนที่ทั้งในแนวดิ่งและแนวราบ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่ง ยอมให้มีการหมุนได้และยอมให้มีการเคลื่อนที่ได้เฉพาะในแนวราบ

3.6. กำหนดน้ำหนักบรรทุก (Load) ที่กระทำต่อคานโดยคิดเป็นน้ำหนักแบบจุดเทียบเท่าน้ำหนักแผ่ทุกๆจุดต่อ

$$P = w \times \text{mesh width} \tag{15}$$

โดยที่ P คือ แรงกระทำต่อจุด
w คือ น้ำหนักบรรทุก
mesh width คือ ความกว้างของโครงตาข่าย 1 ช่อง

4. ทำการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดของโครงสร้าง

ในขั้นตอนของการวิเคราะห์นั้นผลลัพธ์ที่ได้ออกมาในแต่ละรอบจะได้ค่าหน่วยแรงหลักมุขสำคัญ (Major Principal Stress (σ_{maj})) และ หน่วยแรงรองมุขสำคัญ (Minor Principal Stress (σ_{min})) ซึ่งใช้เป็นตัวกำหนดว่าชิ้นส่วนใดในบริเวณที่ยอมให้มีการปรับเปลี่ยนจะถูกกำจัดออก โดยกำหนดให้หน่วยแรงดึงมีค่าเป็นบวก และหน่วยแรงอัดมีค่าเป็นลบ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ซึ่งขั้นตอนการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดของโครงสร้างที่ใช้อ้างอิงมาจากกระบวนการวิวัฒนาการอย่างง่าย ในทางปฏิบัติสามารถกระทำได้โดยมีขั้นตอนดังนี้

4.1. กำหนดค่าเริ่มต้นให้ค่าอัตราส่วนกำจัดออก (Rejection Ratio (RR)) = 1% และ ค่าอัตราการวิวัฒนาการ (Evolution Ratio (ER)) = 1%

4.2. ทำการวิเคราะห์โครงสร้างที่ได้สร้างแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.3. บันทึกค่าหน่วยแรงหลักมุขสำคัญที่เกิดขึ้นสูงสุดและหน่วยแรงรองมุขสำคัญที่เกิดขึ้นต่ำสุด ($\sigma_{maj}^{max}, \sigma_{min}^{min}$)

4.4. ตรวจสอบค่าหน่วยแรงกำจัดออก ดังสมการที่ (16) และ (17)

$$\sigma_{maj}^{rej} = RR \times \sigma_{maj}^{max} \quad (16)$$

$$\sigma_{min}^{rej} = RR \times \sigma_{min}^{min} \quad (17)$$

โดยที่ σ_{maj}^{rej} คือ ค่าหน่วยแรงหลักมุขสำคัญกำจัด

σ_{maj}^{max} คือ ค่าหน่วยแรงหลักมุขสำคัญสูงสุดของการวิเคราะห์ในแต่ละรอบ

σ_{min}^{rej} คือ ค่าหน่วยแรงหลักมุขสำคัญกำจัด

σ_{min}^{min} คือ ค่าหน่วยแรงหลักมุขสำคัญต่ำสุดของการวิเคราะห์ในแต่ละรอบ

4.5. ทำการกำจัดชิ้นส่วนที่มีค่าหน่วยแรงตามเงื่อนไขการกำจัดดังอสมการที่ (18) ถึง (21) และทำการบันทึกสรีระของโครงสร้าง

$$\sigma_{maj} < \sigma_{maj}^{rej} \text{ (ในกรณีที่ } \sigma_{maj} \text{ มีค่าเป็นบวก)} \quad (18)$$

$$\sigma_{maj} > \sigma_{min}^{rej} \text{ (ในกรณีที่ } \sigma_{maj} \text{ มีค่าเป็นลบ)} \quad (19)$$

$$\sigma_{min} < \sigma_{maj}^{rej} \text{ (ในกรณีที่ } \sigma_{min} \text{ มีค่าเป็นบวก)} \quad (20)$$

$$\sigma_{min} > \sigma_{min}^{rej} \text{ (ในกรณีที่ } \sigma_{min} \text{ มีค่าเป็นลบ)} \quad (21)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในกรณีที่ไม่มีชิ้นถูกกำจัดออกให้เพิ่มค่าอัตราส่วนกำจัดออก (RR) ด้วยอัตราการวิวัฒนาการ (ER) ดังสมการที่ (22)

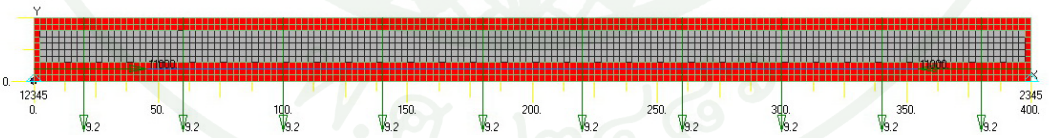
$$RR_{i+1} = RR_i + ER \tag{22}$$

4.6. ทำการวิเคราะห์ในข้อ 4.1 ถึง 4.5 ซ้ำ โครงสร้างจนกระทั่งมีชิ้นส่วนที่มีค่าหน่วยแรงมากกว่าค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ หรือมีค่าการโก่งตัวโดยรวมของโครงสร้างมากกว่าค่าการโก่งตัวที่ยอมให้ ให้ใช้รูปร่างที่บันทึกไว้ในรุ่นก่อนหน้าเป็นค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดของโครงสร้าง

5. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุด

ทำการวิเคราะห์ในข้อที่ 1 ถึง 4 ซ้ำ โดยทำการปรับเปลี่ยน ชนิดของน้ำหนักกระทำโดยทำการปรับเปลี่ยนจากน้ำหนักกระทำแบบแผ่ (Distributed load) เป็น น้ำหนักกระทำแบบแผงทุกๆ ระยะ 50 ซม. (Panel load at 50 cm.) ปรับเปลี่ยนความลึกของคาน และปรับเปลี่ยนปริมาณของแรงที่ใช้ในการอัดแรง โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคานคอนกรีตอัดแรงทั้งหมด 8 รูปแบบ ดังแสดงในภาพที่ 20 ถึง 27

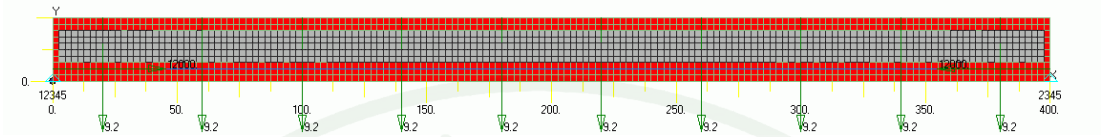
5.1. คานขนาด 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 11,000 กก.



ภาพที่ 20 คานขนาด 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 11,000 กก.

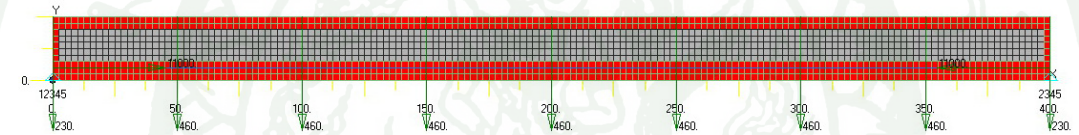
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5.2. คานขนาด 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 12,000 กก.



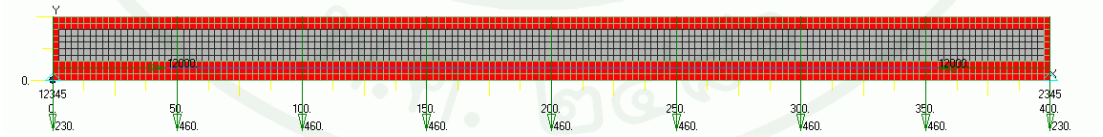
ภาพที่ 21 คานขนาด 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 12,000 กก.

5.3. คานขนาด 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 11,000 กก.



ภาพที่ 22 คานขนาด 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 11,000 กก.

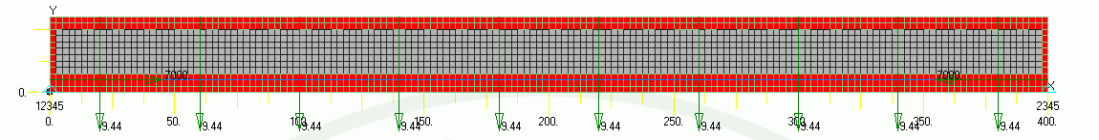
5.4. คานขนาด 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 12,000 กก.



ภาพที่ 23 คานขนาด 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 12,000 กก.

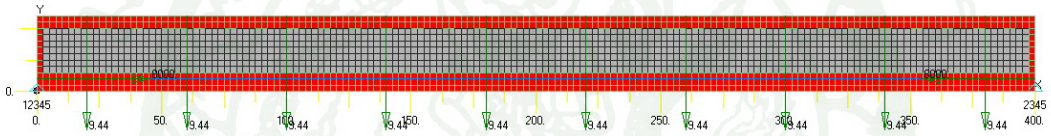
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5.5. คานขนาด 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 7,000 กก.



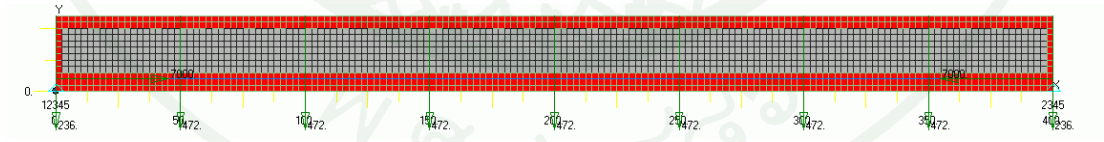
ภาพที่ 24 คานขนาด 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 7,000 กก.

5.6. คานขนาด 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 8,000 กก.



ภาพที่ 25 คานขนาด 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 8,000 กก.

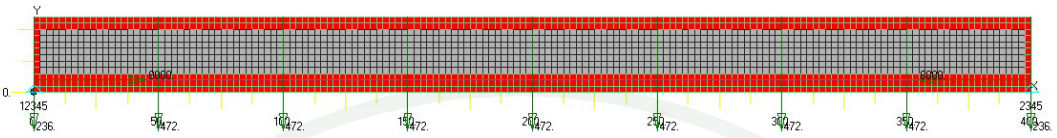
5.7. คานขนาด 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 7,000 กก.



ภาพที่ 26 คานขนาด 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 7,000 กก.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

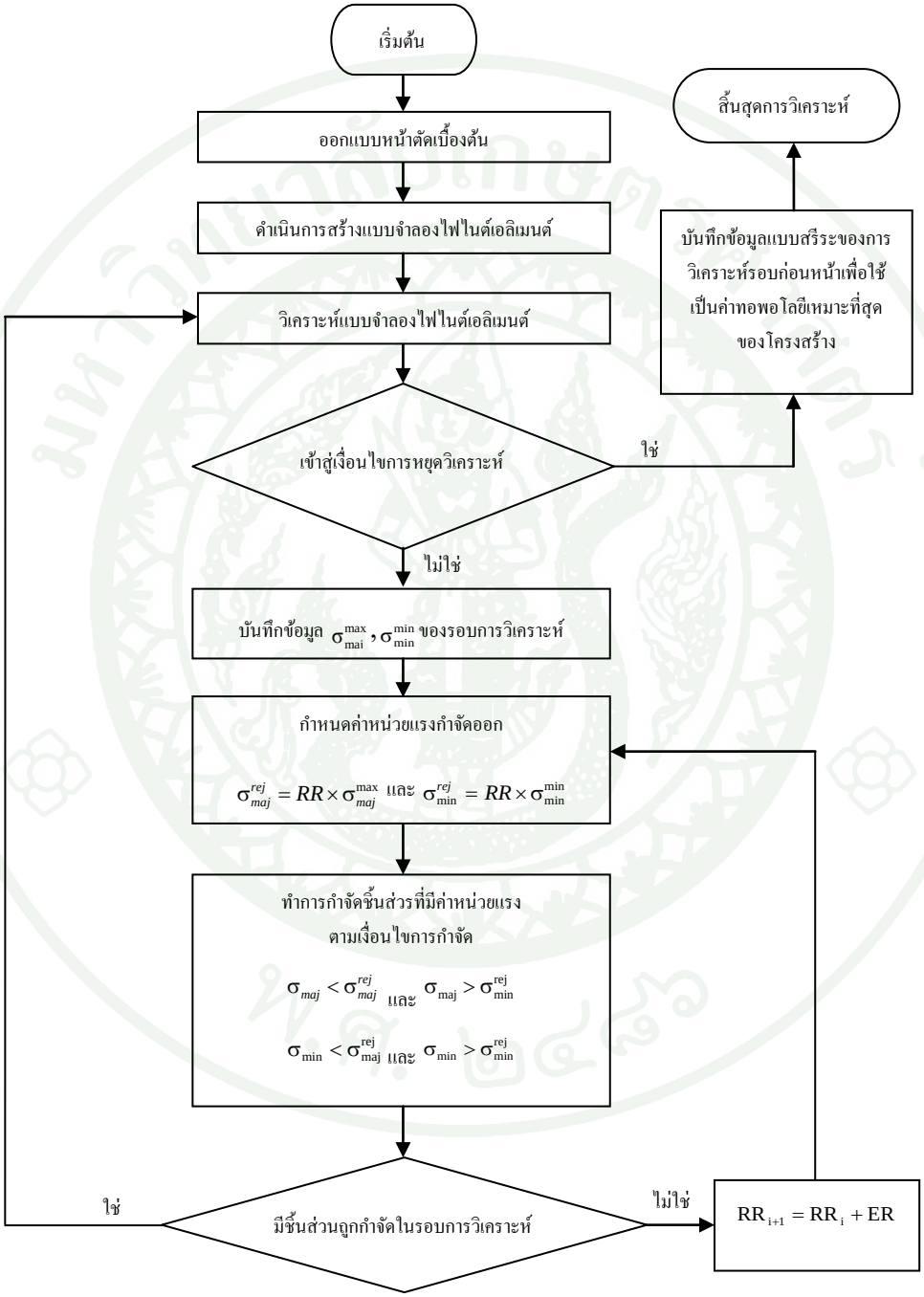
5.8. คานขนาด 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 8,000 กก.



ภาพที่ 27 คานขนาด 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 8,000 กก.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสะดวกในการนำเสนอขั้นตอนการวิเคราะห์สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของผังลำดับงานได้ดังนี้



ภาพที่ 28 ผังลำดับงานการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สถานที่และระยะเวลาการวิจัย

สถานที่ในการทำวิจัยคือคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

ระยะเวลาในการทำวิจัยโดยประมาณ (ช่วงเวลาละ 1 ไตรมาส)

ตารางที่ 2 ช่วงเวลาที่ใช้ในการทำวิจัย

ขั้นตอน	2552				2553				2554			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
ค้นคว้าหาข้อมูลและรวบรวมเอกสาร												
ทำการวิเคราะห์แบบจำลอง												
สรุปผลการวิจัย												
ศึกษาค้นคว้า,ทำการวิจัยเพิ่มเติม												
จัดทำเอกสาร, รูปเล่มรายงาน												

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

ผล

1. ผลการวิเคราะห์การหาสรีระที่เหมาะสมที่สุด

คานคอนกรีตอัดแรงที่ผ่านกระบวนการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดจะเกิดวิวัฒนาการของแบบสรีระไปอย่างต่อเนื่องโดยเกิดการปิดตัวของชิ้นส่วนวัสดุคอนกรีตในส่วนที่เกิดค่าหน่วยแรงน้อยกว่าค่าหน่วยแรงกำจัดออก จนกระทั่งเข้าสู่เงื่อนไขการหยุดวิเคราะห์มีรายละเอียดดังนี้

1.1. คานขนาด 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 11,000 กก. ค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดเกิดขึ้นในลำดับการวิวัฒนาการที่ 89 สามารถลดเนื้อวัสดุคอนกรีตลงไปได้ร้อยละ 34.00

1.2. คานขนาด 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 12,000 กก. ค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดเกิดขึ้นในลำดับการวิวัฒนาการที่ 75 สามารถลดเนื้อวัสดุคอนกรีตลงไปได้ร้อยละ 28.75

1.3. คานขนาด 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม.
อัดแรง 11,000 กก. ค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดเกิดขึ้นในลำดับการวิวัฒนาการที่ 117 สามารถลดเนื้อวัสดุคอนกรีตลงไปได้ร้อยละ 37.75

1.4. คานขนาด 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม.
อัดแรง 12,000 กก. ค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดเกิดขึ้นในลำดับการวิวัฒนาการที่ 73 สามารถลดเนื้อวัสดุคอนกรีตลงไปได้ร้อยละ 26.75

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.5. คานขนาด 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 7,000 กก. ค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดเกิดขึ้นในลำดับการวิวัฒนาการที่ 73 สามารถลดเนื้อวัสดุคอนกรีตลงไปได้ร้อยละ 33.96

1.6. คานขนาด 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 8,000 กก. ค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดเกิดขึ้นในลำดับการวิวัฒนาการที่ 113 สามารถลดเนื้อวัสดุคอนกรีตลงไปได้ร้อยละ 42.92

1.7. คานขนาด 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 7,000 กก. ค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดเกิดขึ้นในลำดับการวิวัฒนาการที่ 105 สามารถลดเนื้อวัสดุคอนกรีตลงไปได้ร้อยละ 39.06

1.8. คานขนาด 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 8,000 กก. ค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดเกิดขึ้นในลำดับการวิวัฒนาการที่ 115 สามารถลดเนื้อวัสดุคอนกรีตลงไปได้ร้อยละ 40.52

ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3 และวิวัฒนาการของคานในกรณีศึกษาดังแสดงภาพที่ 29 ถึง 92

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

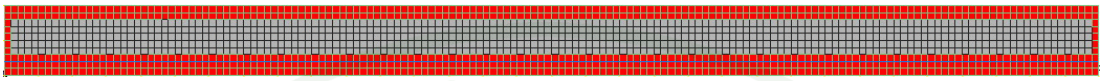
ตารางที่ 3 รายละเอียดของคานคอนกรีตอัดแรงที่ผ่านกระบวนการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุด

ลำดับที่	มิติ (ซม.)	ประเภทของแรง	การอัดแรง (กก.)	จำนวนเอลิเมนต์คอนกรีต			σ_{maj}^{max} (กก./ซม.^{2})	σ_{min}^{min} (กก./ซม.^{2})	Δ (มม.)
				ทั้งหมด	ปิดตัว	คิดเป็น %			
1	20x25x400	แผ่ 920 กก./ม.	11,000	1,600	544	34.00	27.82	-136.98	2.81
2	20x25x400	แผ่ 920 กก./ม.	12,000	1,600	460	28.75	27.30	-149.95	2.38
3	20x25x400	แผง 460 กก. ทุกระยะ 50 ซม.	11,000	1,600	604	37.75	29.56	-136.23	3.23
4	20x25x400	แผง 460 กก. ทุกระยะ 50 ซม.	12,000	1,600	428	26.75	29.32	-148.64	2.08
5	20x30x400	แผ่ 944 กก.	7,000	1,920	652	33.96	28.07	-93.79	1.76
6	20x30x400	แผ่ 944 กก.	8,000	1,920	824	42.92	29.85	-103.36	2.16
7	20x30x400	แผง 472 กก. ทุกระยะ 50 ซม.	7,000	1,920	750	39.06	27.30	-93.42	1.96
8	20x30x400	แผง 472 กก. ทุกระยะ 50 ซม.	8,000	1,920	778	40.52	29.80	-103.33	2.08

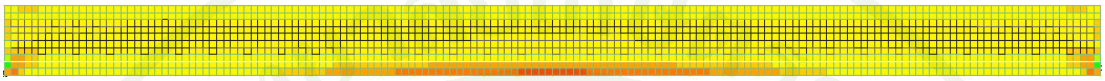
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.1. คานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 11,000 กก.

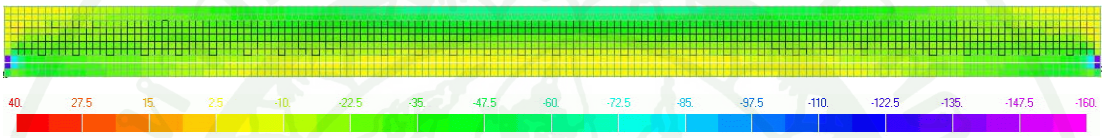
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ

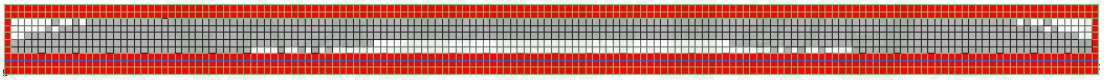


หน่วยแรงรองมุขสำคัญ

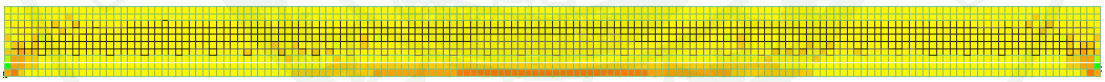


ภาพที่ 29 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 11,000 กก. สภาวะตั้งต้น

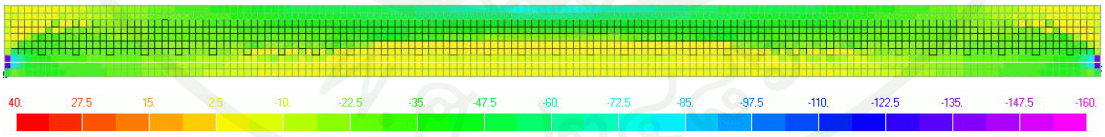
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ



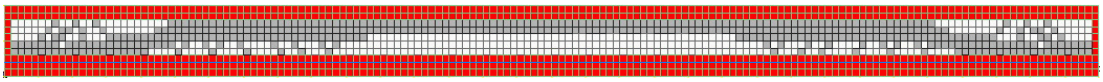
หน่วยแรงรองมุขสำคัญ



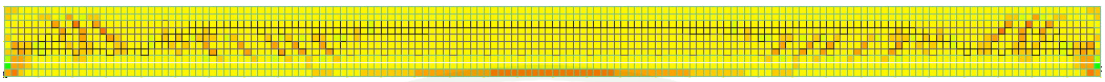
ภาพที่ 30 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 11,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 30

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

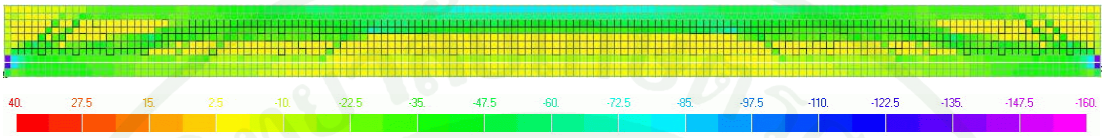
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ

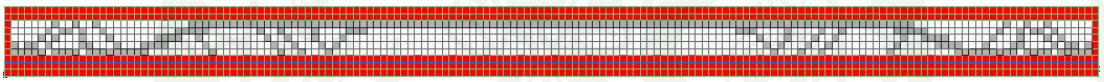


หน่วยแรงรองมุขสำคัญ

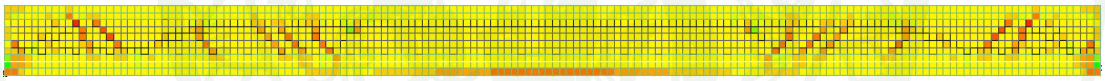


ภาพที่ 31 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 11,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 60

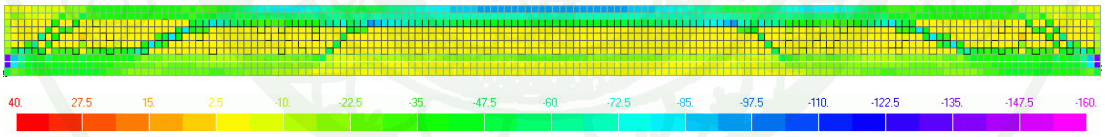
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ

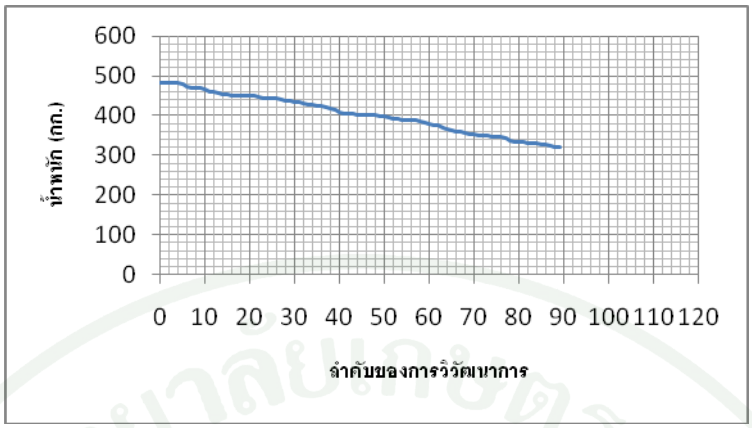


หน่วยแรงรองมุขสำคัญ

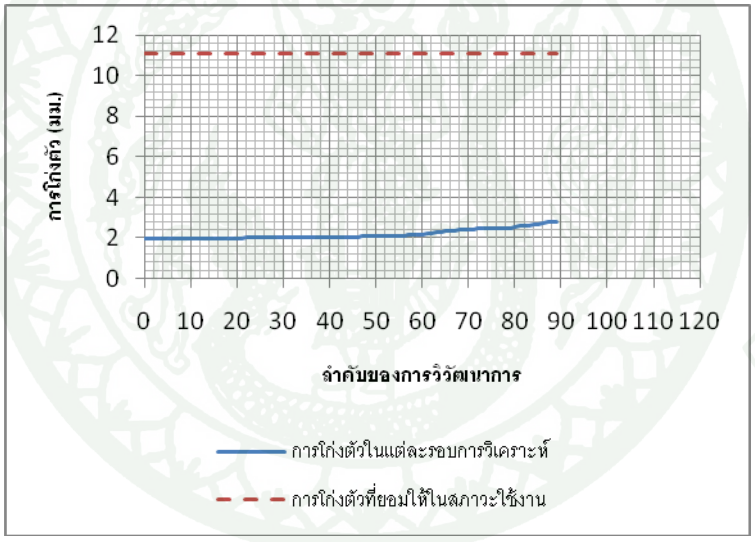


ภาพที่ 32 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 11,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 89

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

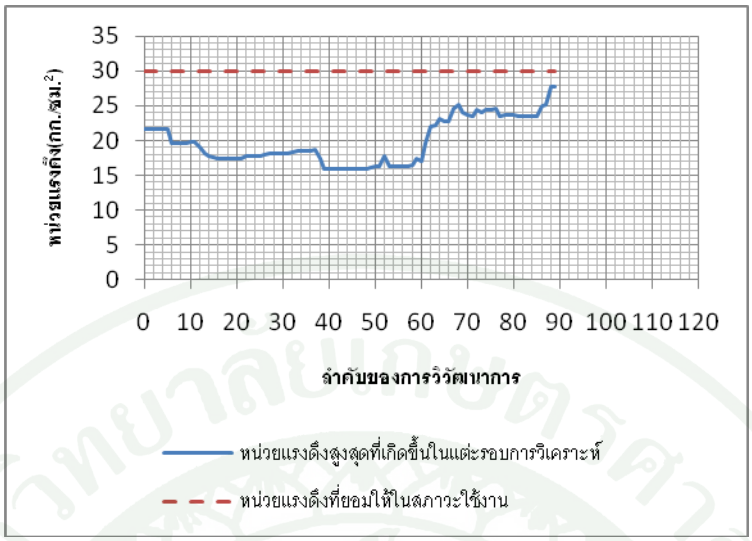


ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 11,000 กก.

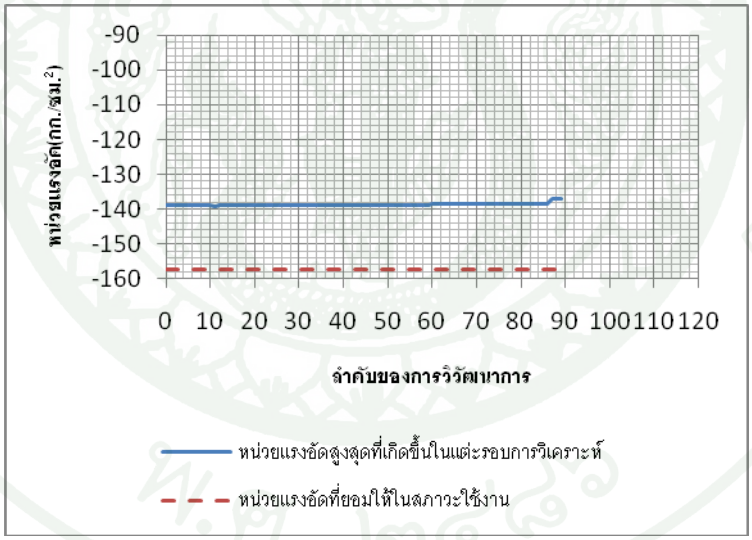


ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวของคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 11,000 กก.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 11,000 กก.

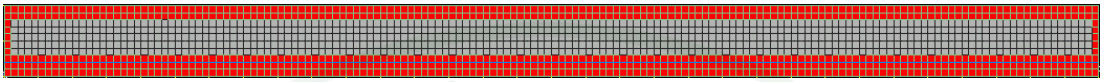


ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 11,000 กก.

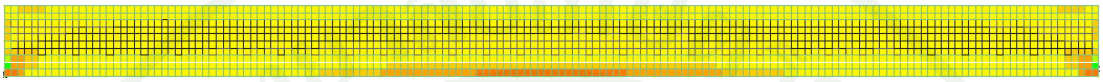
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.2. คานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 12,000 กก.

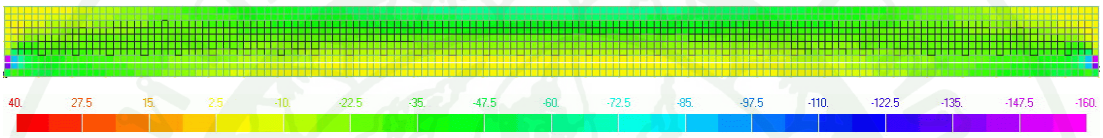
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ

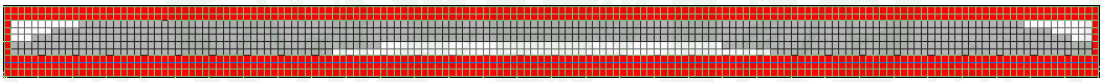


หน่วยแรงรองมุขสำคัญ

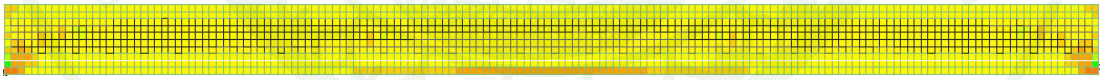


ภาพที่ 37 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 12,000 กก. สภาวะตั้งต้น

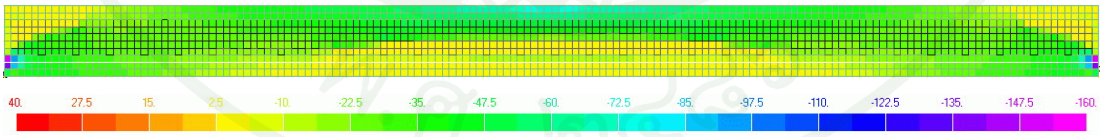
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ



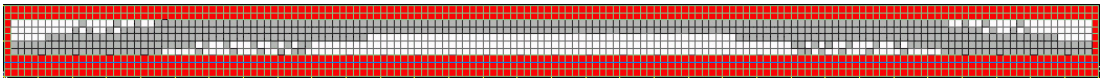
หน่วยแรงรองมุขสำคัญ



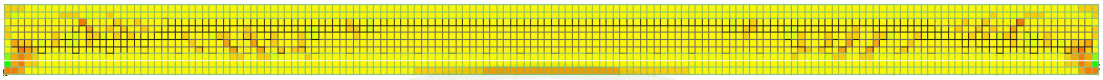
ภาพที่ 38 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 12,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 25

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

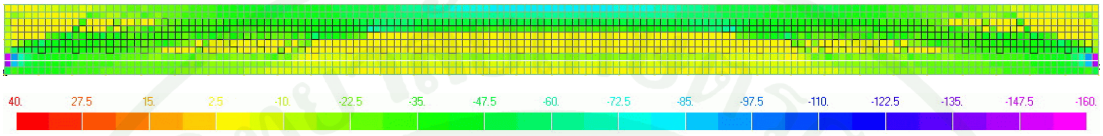
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ

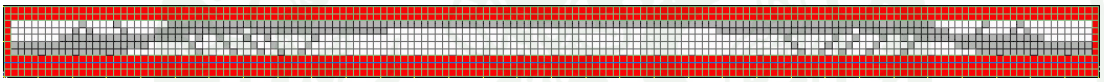


หน่วยแรงรองมุขสำคัญ

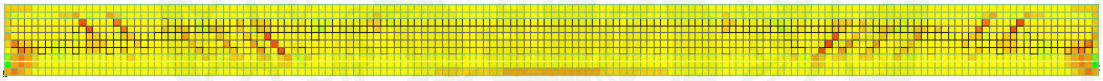


ภาพที่ 39 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 12,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 50

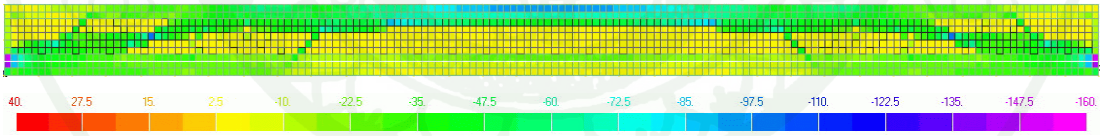
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ

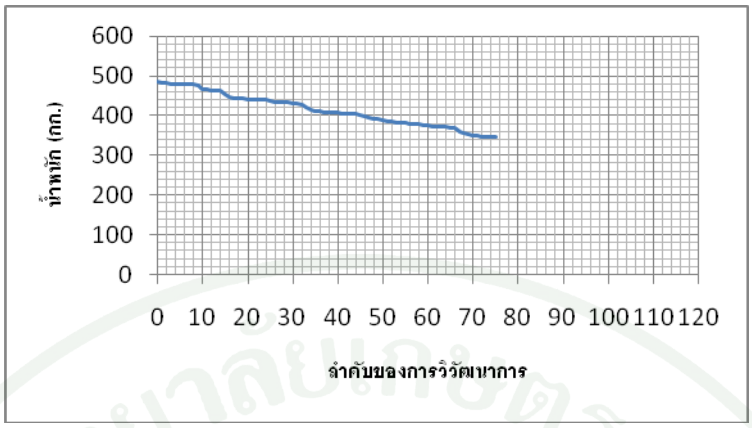


หน่วยแรงรองมุขสำคัญ

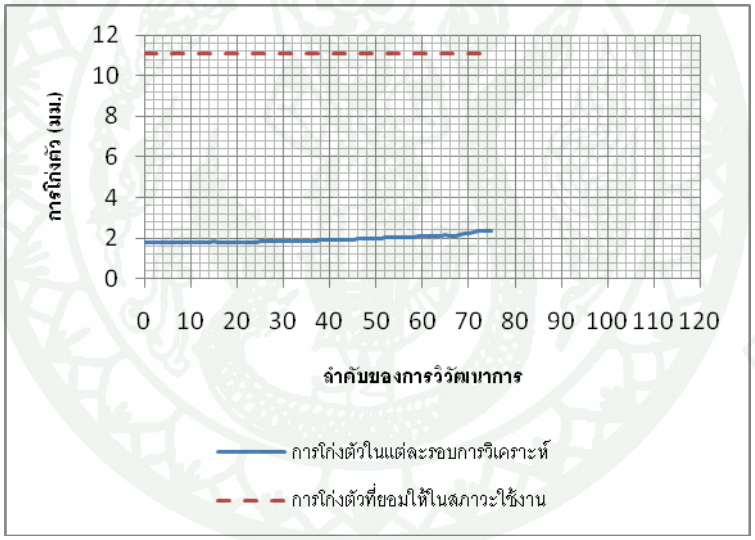


ภาพที่ 40 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 12,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 75

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

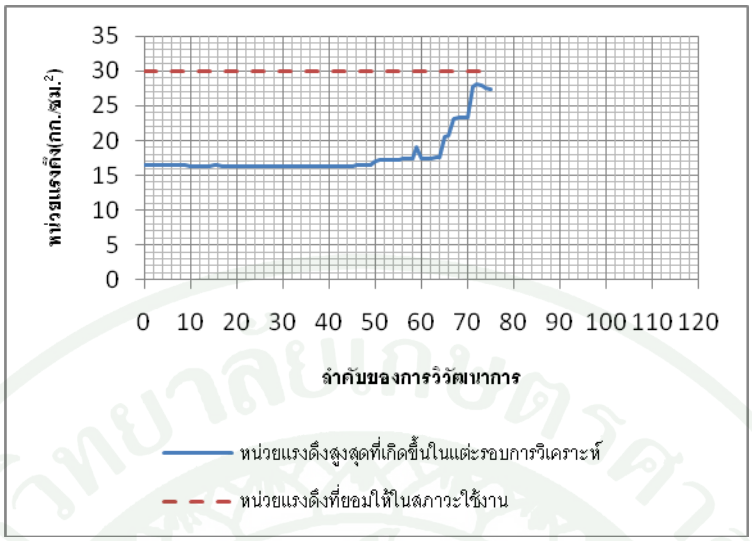


ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 12,000 กก.

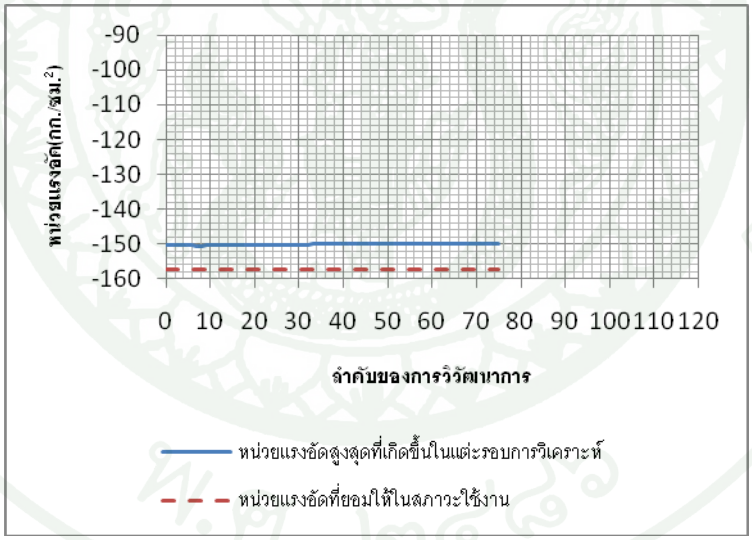


ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวของคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 12,000 กก.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 12,000 กก.

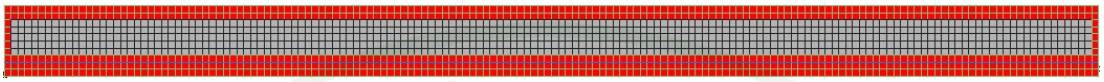


ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 920 กก./ม. อัดแรง 12,000 กก.

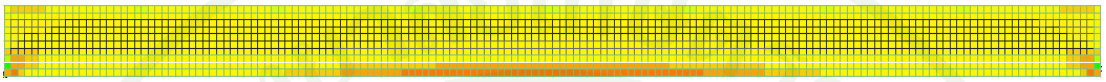
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.3. คานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆ ระยะ 50 ซม. อัดแรง 11,000 กก.

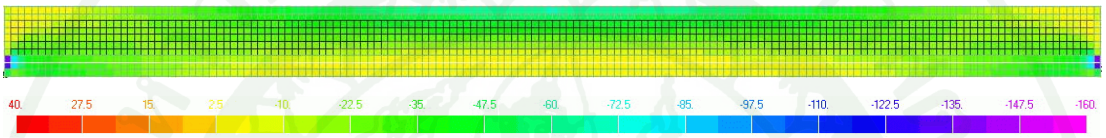
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ

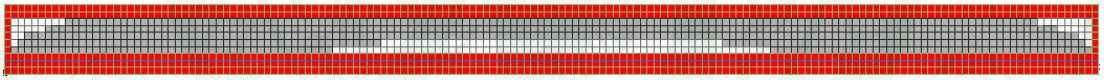


หน่วยแรงรองมุขสำคัญ

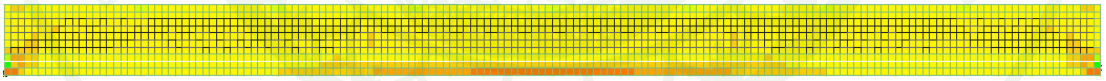


ภาพที่ 45 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 11,000 กก. สภาวะตั้งต้น

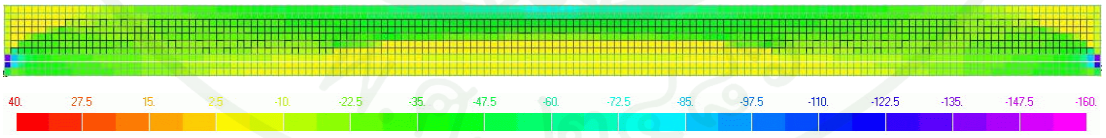
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ



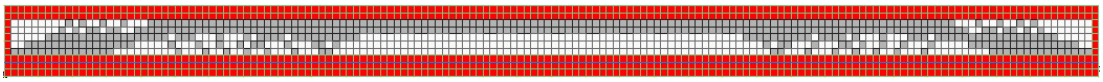
หน่วยแรงรองมุขสำคัญ



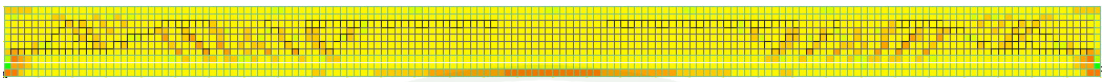
ภาพที่ 46 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 11,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 40

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

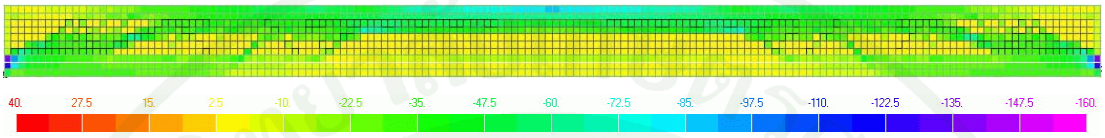
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ

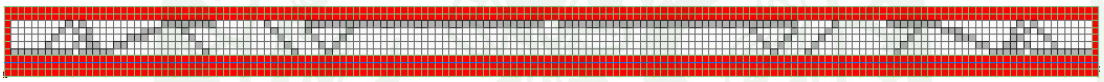


หน่วยแรงรองมุขสำคัญ

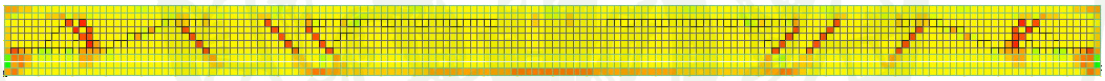


ภาพที่ 47 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 11,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 80

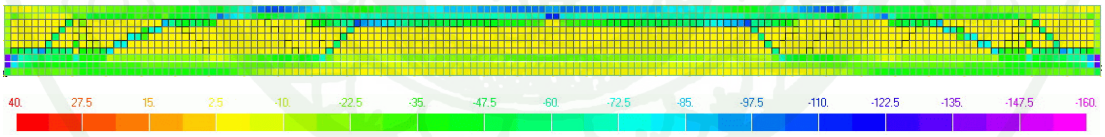
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ

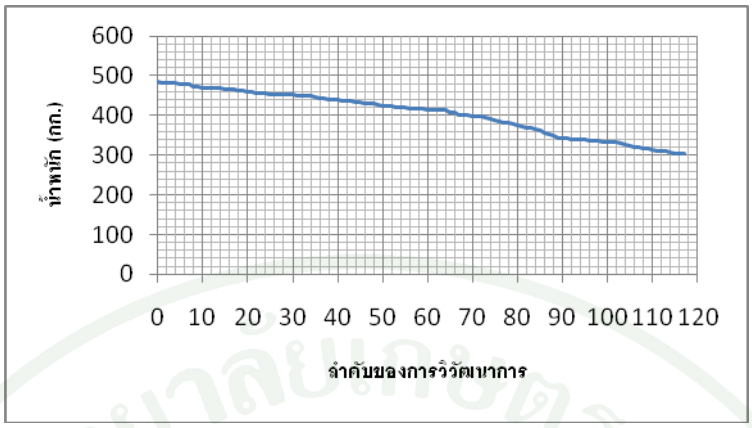


หน่วยแรงรองมุขสำคัญ

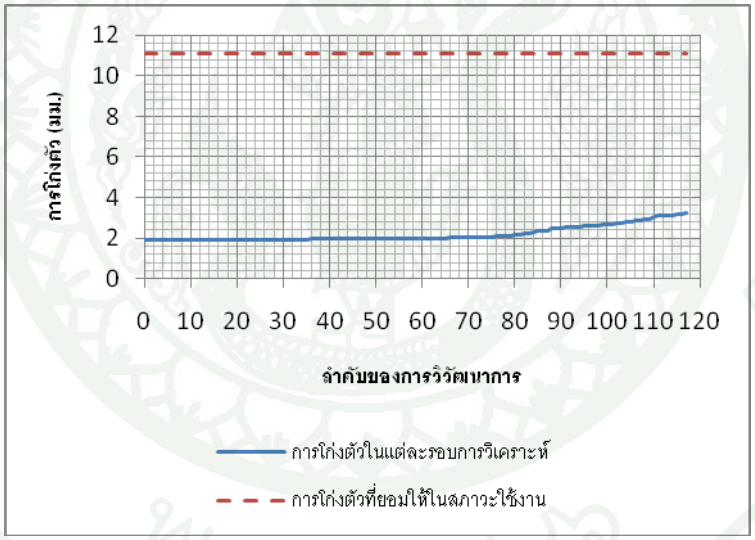


ภาพที่ 48 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 11,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 117

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

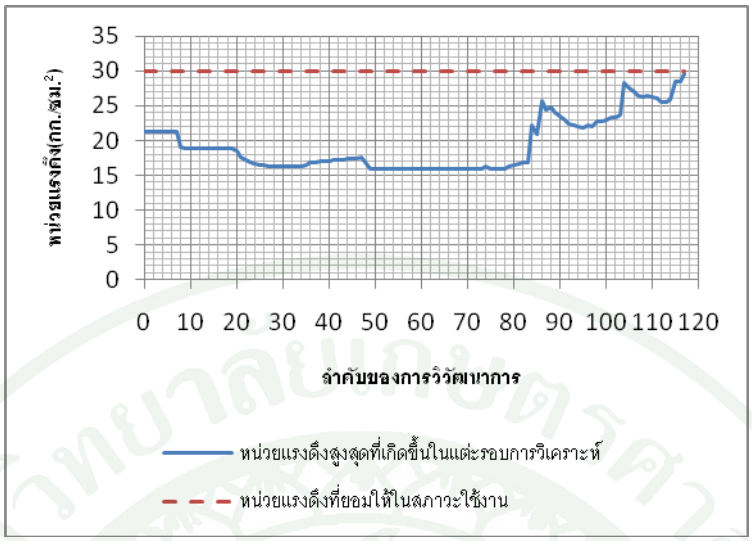


ภาพที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 11,000 กก.

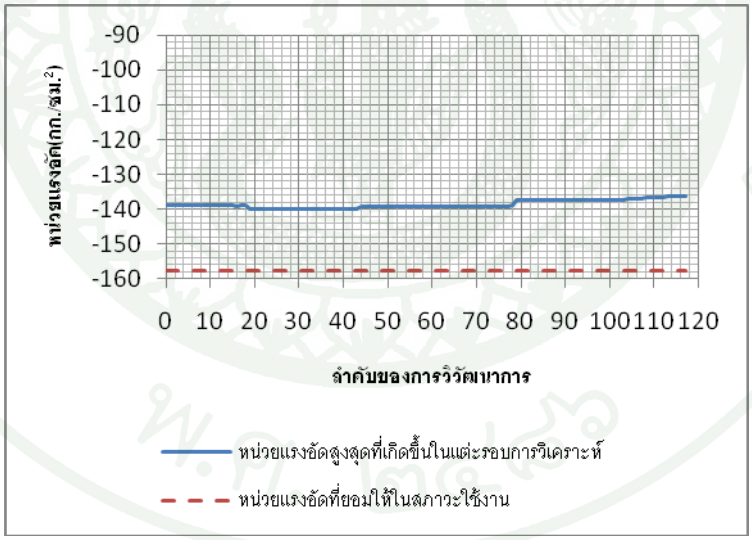


ภาพที่ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวของคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 11,000 กก.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 51 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 11,000 กก.

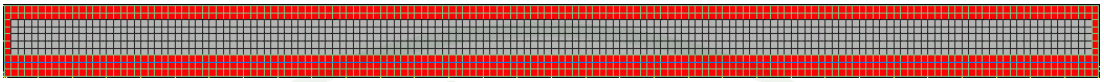


ภาพที่ 52 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 11,000 กก.

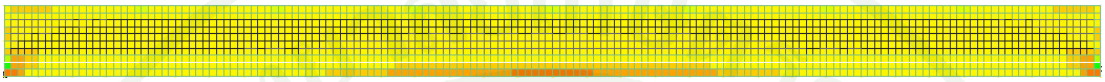
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.4. คานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆ ระยะ 50 ซม. อัดแรง 12,000 กก.

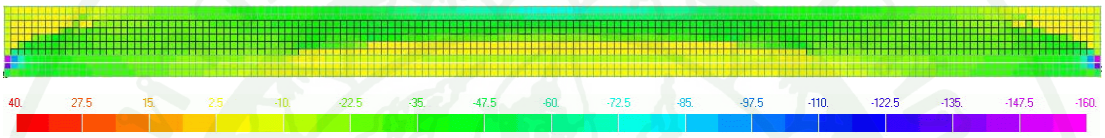
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ

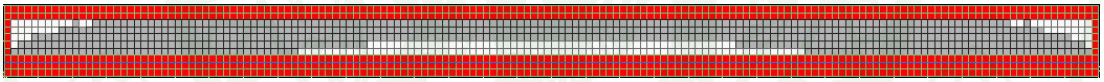


หน่วยแรงรองมุขสำคัญ

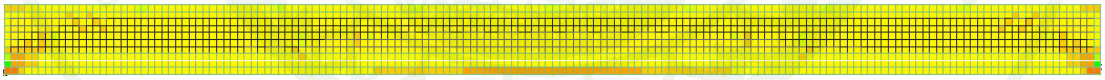


ภาพที่ 53 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 12,000 กก. สภาวะตั้งต้น

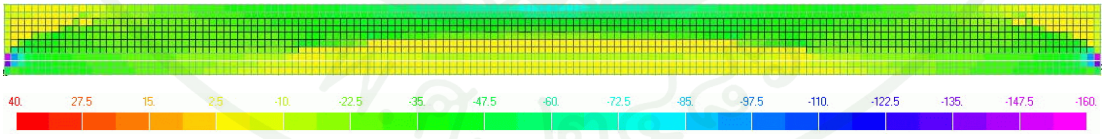
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ



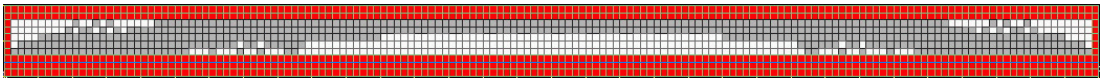
หน่วยแรงรองมุขสำคัญ



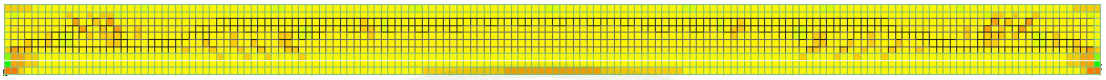
ภาพที่ 54 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 12,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 25

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

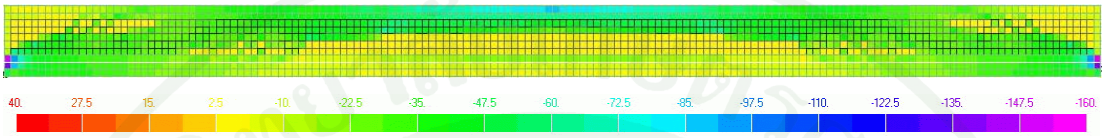
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ

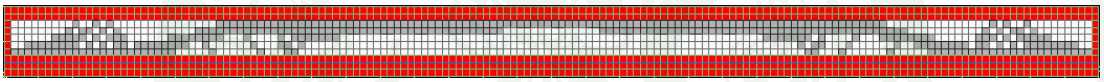


หน่วยแรงรองมุขสำคัญ

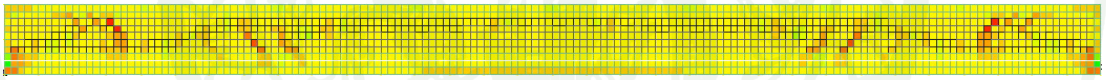


ภาพที่ 55 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 12,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 50

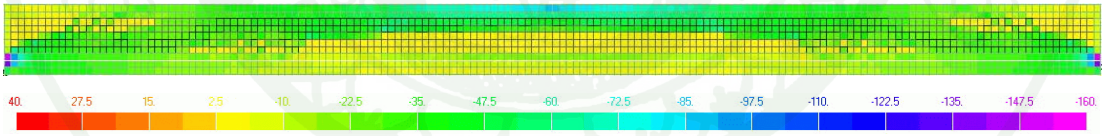
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ

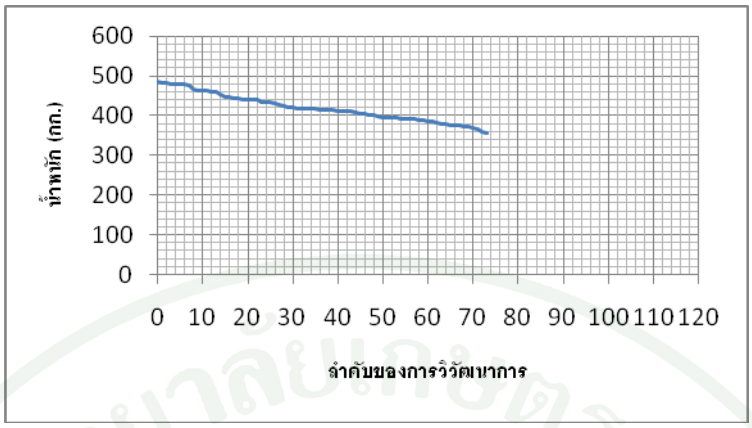


หน่วยแรงรองมุขสำคัญ

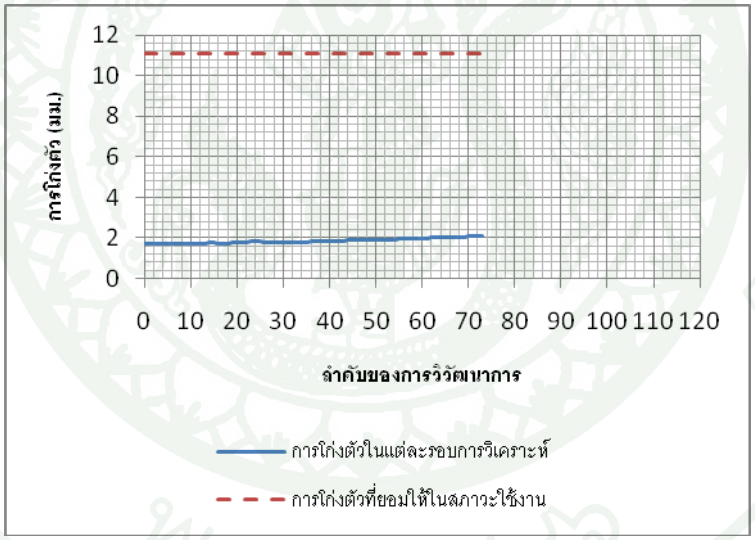


ภาพที่ 56 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 12,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 73

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

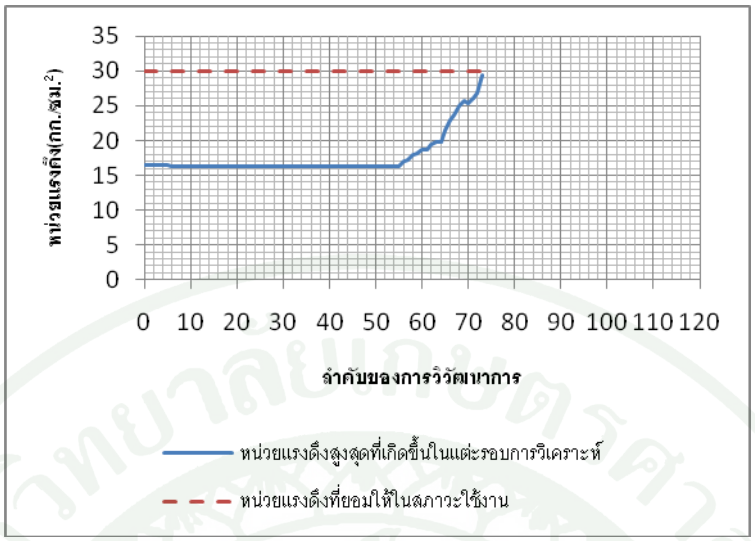


ภาพที่ 57 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 12,000 กก.

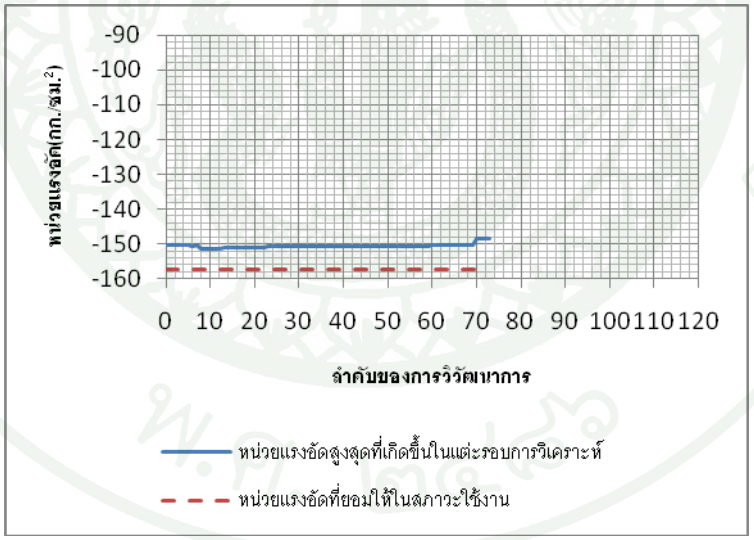


ภาพที่ 58 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวของคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 12,000 กก.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 59 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 12,000 กก.

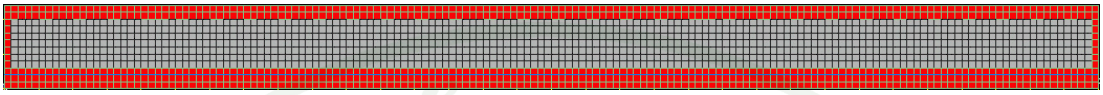


ภาพที่ 60 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 12,000 กก.

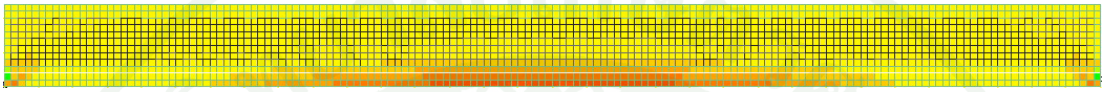
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.5. คานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 7,000 กก.

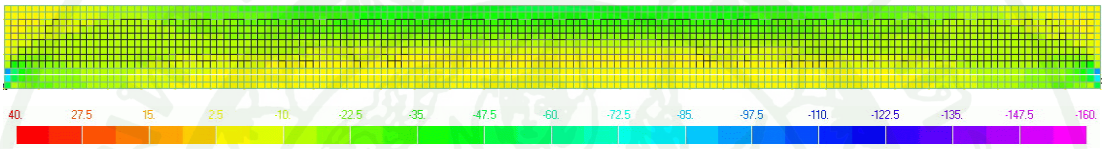
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ

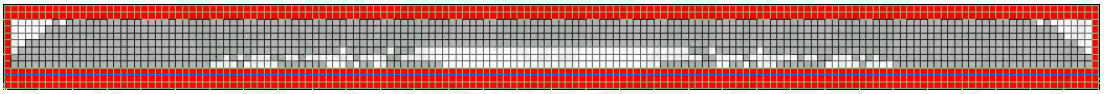


หน่วยแรงรองมุขสำคัญ

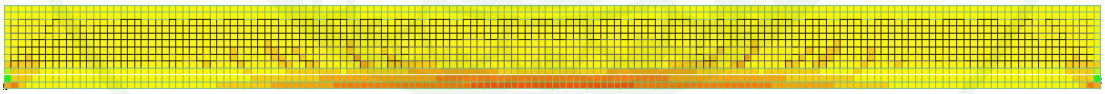


ภาพที่ 61 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 7,000 กก. สภาวะตั้งต้น

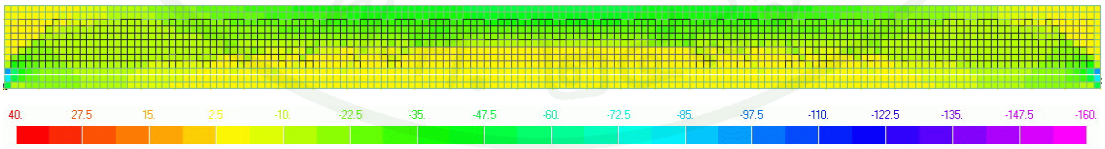
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ



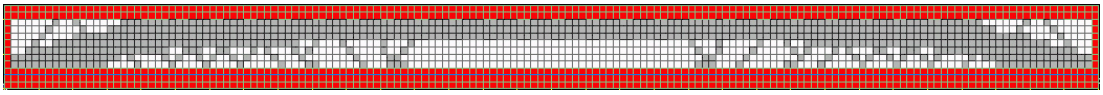
หน่วยแรงรองมุขสำคัญ



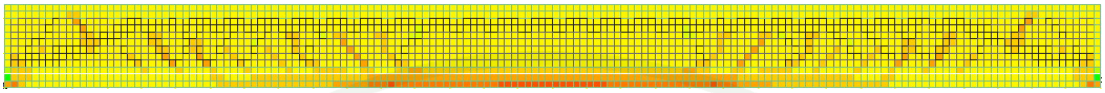
ภาพที่ 62 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 7,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 25

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

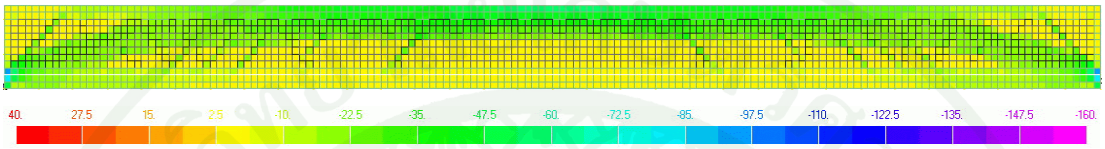
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ

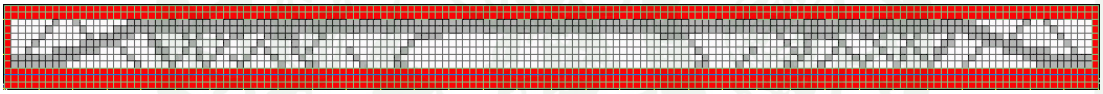


หน่วยแรงรองมุขสำคัญ

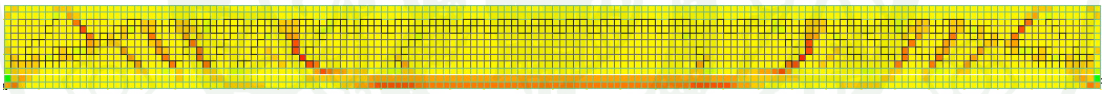


ภาพที่ 63 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 7,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 50

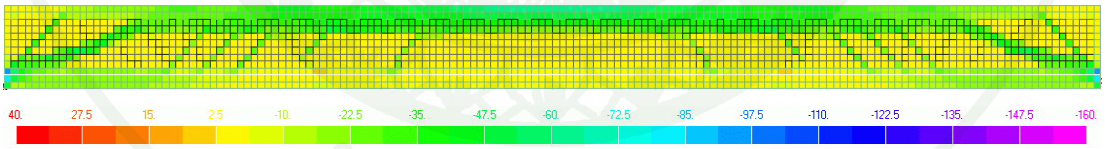
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ

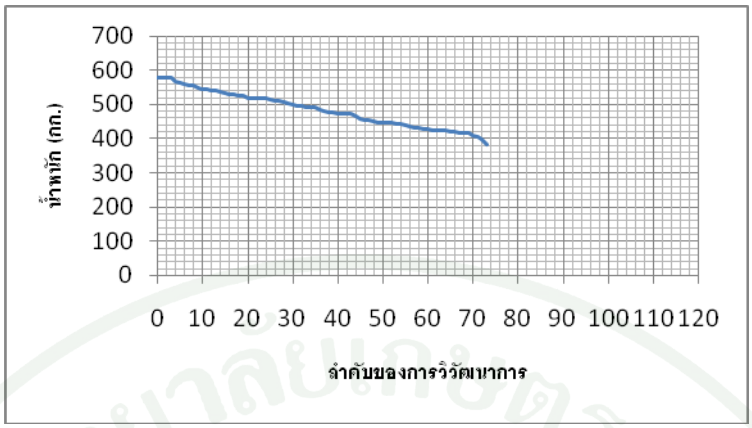


หน่วยแรงรองมุขสำคัญ

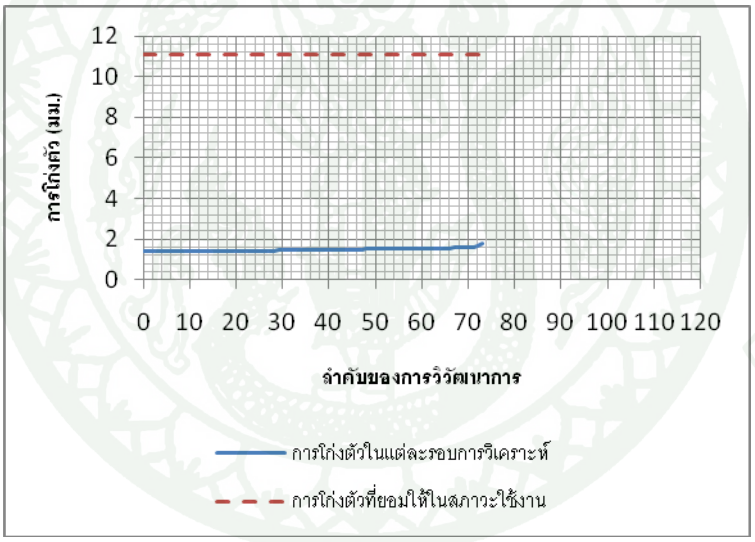


ภาพที่ 64 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 7,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 73

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

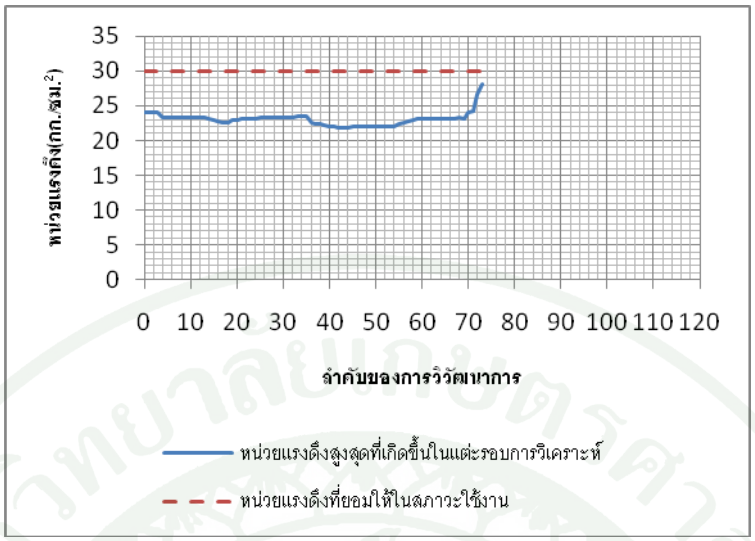


ภาพที่ 65 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 7,000 กก.

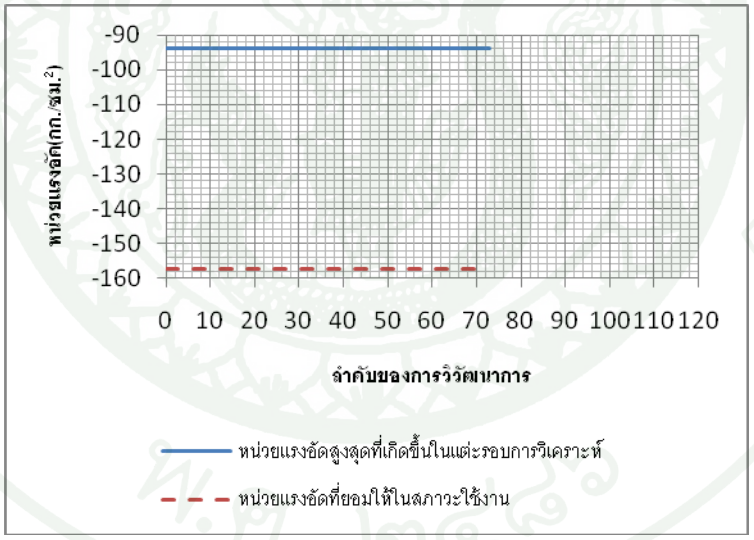


ภาพที่ 66 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวของคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 7,000 กก.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 67 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 7,000 กก.

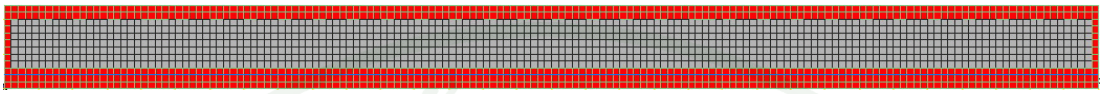


ภาพที่ 68 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 7,000 กก.

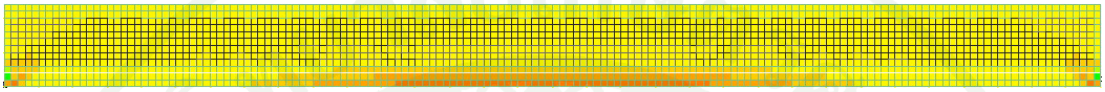
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.6. คานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 8,000 กก.

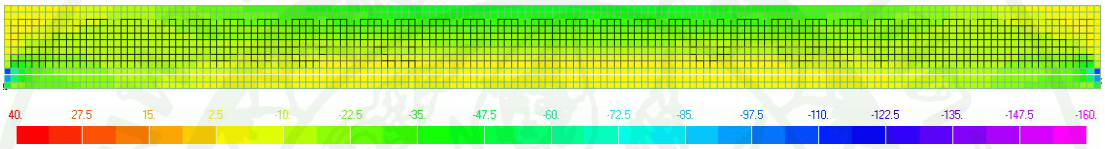
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ

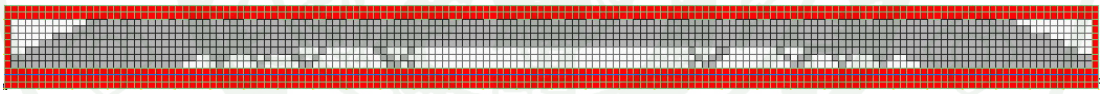


หน่วยแรงรองมุขสำคัญ

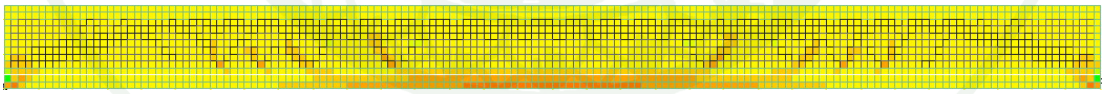


ภาพที่ 69 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 8,000 กก. สภาวะตั้งต้น

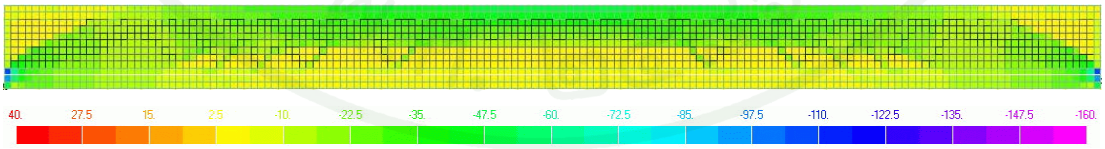
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ



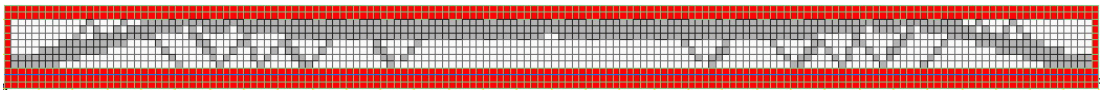
หน่วยแรงรองมุขสำคัญ



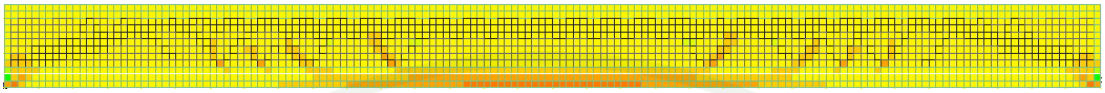
ภาพที่ 70 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 8,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 40

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

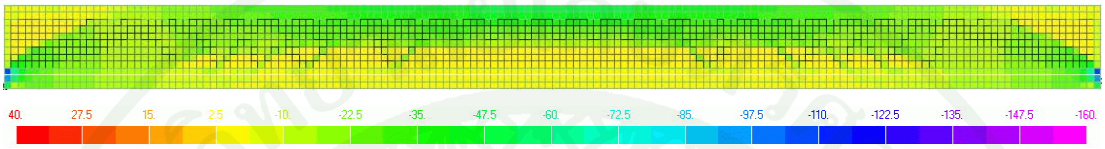
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ

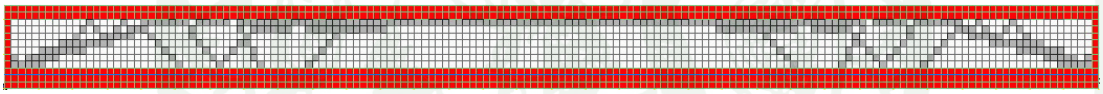


หน่วยแรงรองมุขสำคัญ

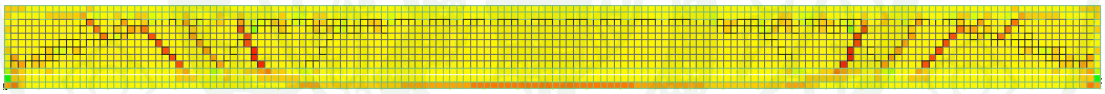


ภาพที่ 71 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 8,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 80

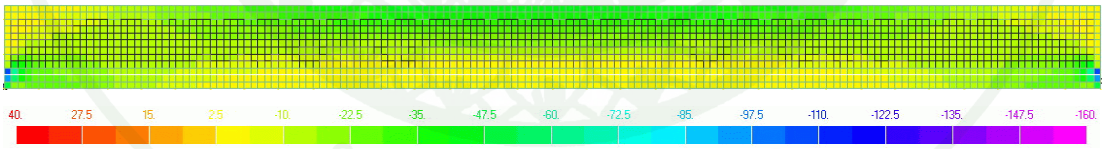
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ

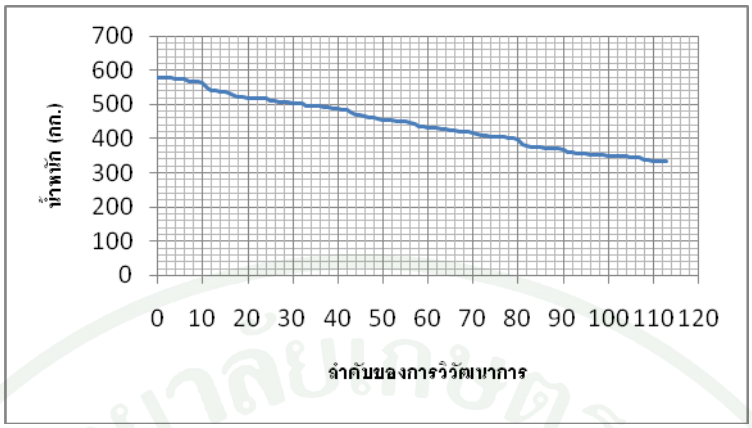


หน่วยแรงรองมุขสำคัญ

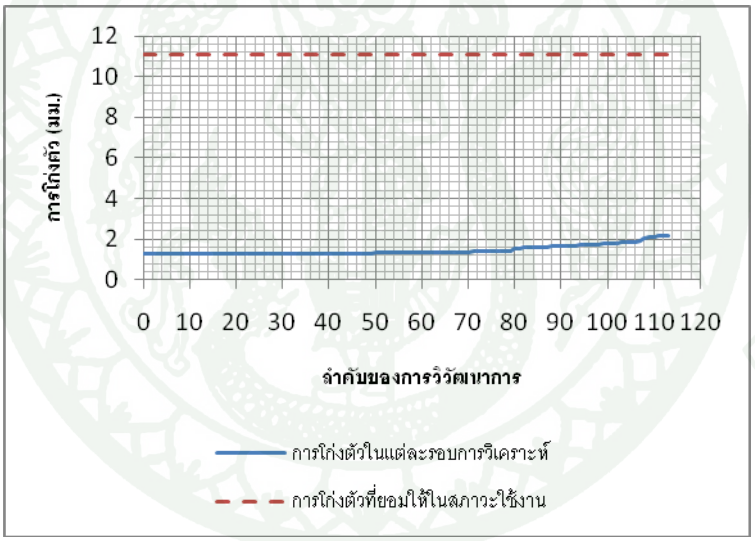


ภาพที่ 72 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 8,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 113

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

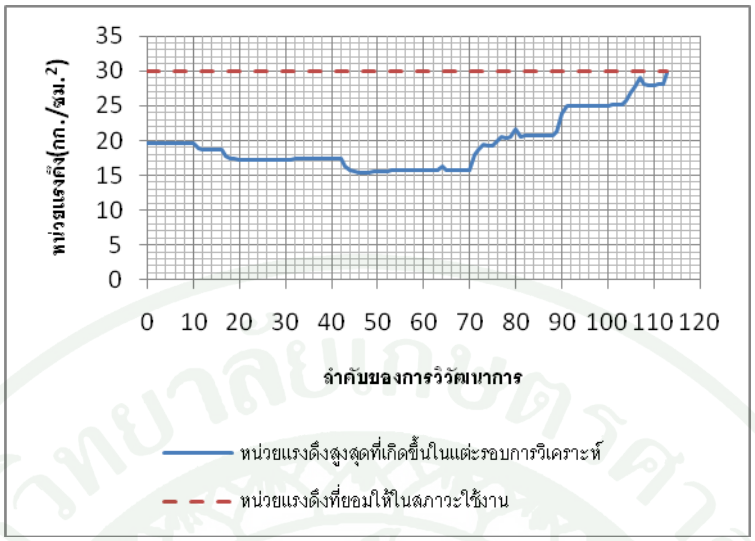


ภาพที่ 73 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 8,000 กก.

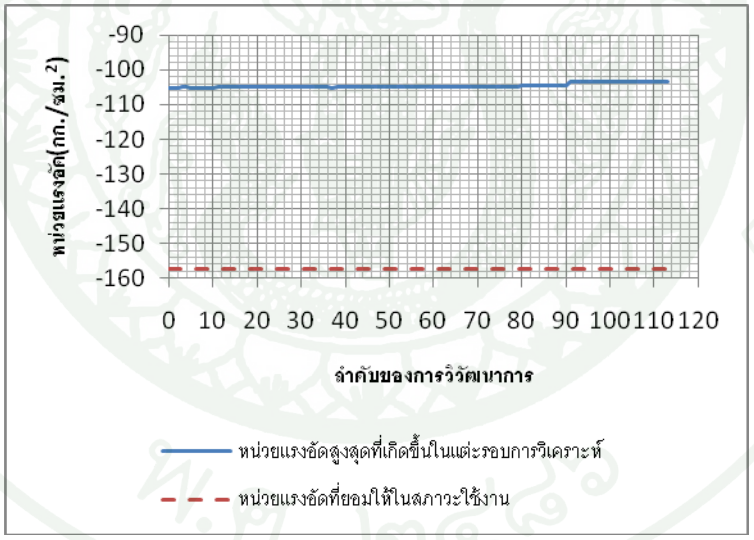


ภาพที่ 74 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวของคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 8,000 กก.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



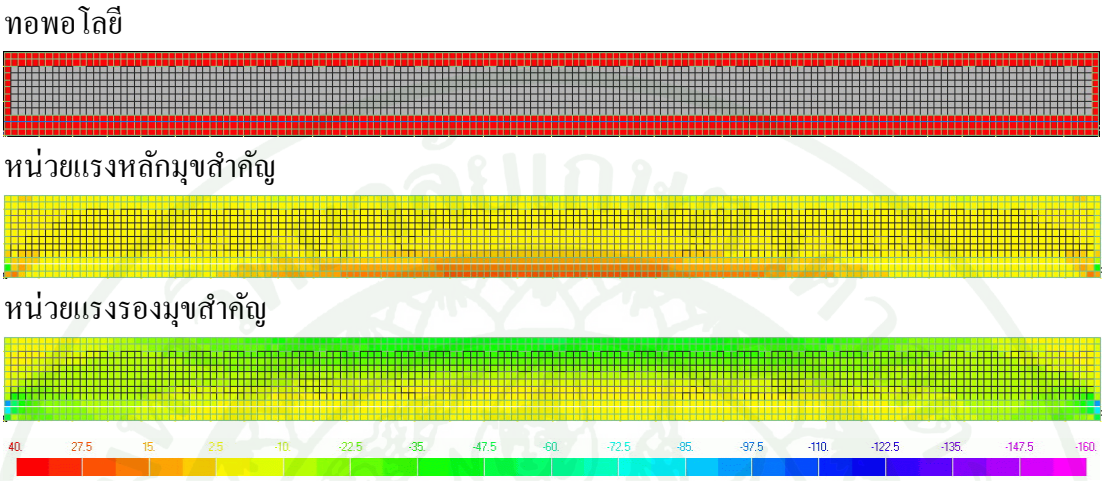
ภาพที่ 75 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 8,000 กก.



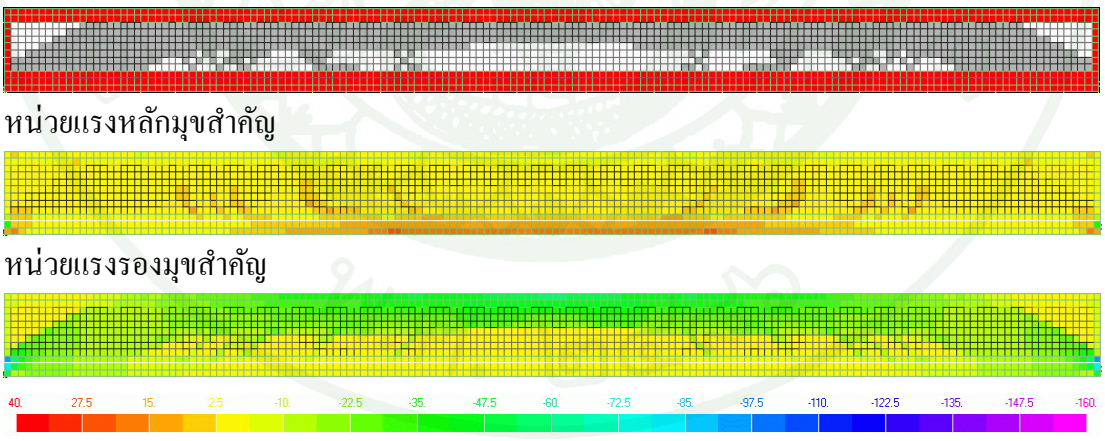
ภาพที่ 76 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักแผ่ 944 กก./ม. อัดแรง 8,000 กก.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.7. คานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กก. ทุกๆ ระยะ 50 ซม. อัดแรง 7,000 กก.



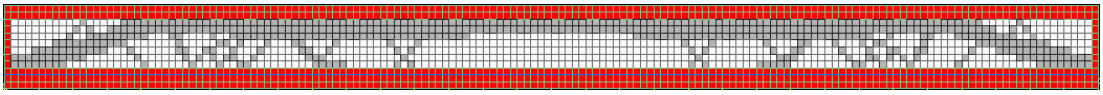
ภาพที่ 77 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 7,000 กก. สภาวะตั้งต้น



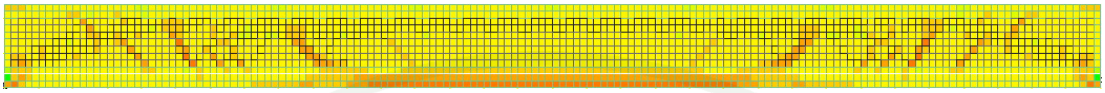
ภาพที่ 78 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 7,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 35

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

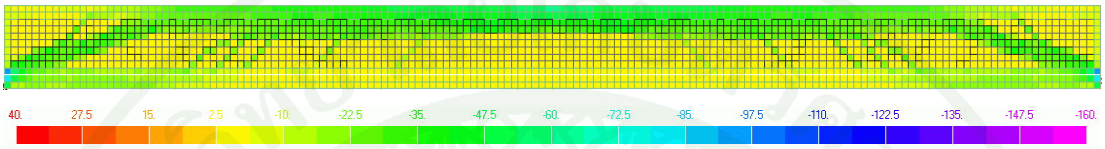
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ

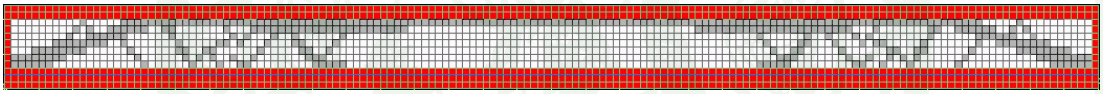


หน่วยแรงรองมุขสำคัญ

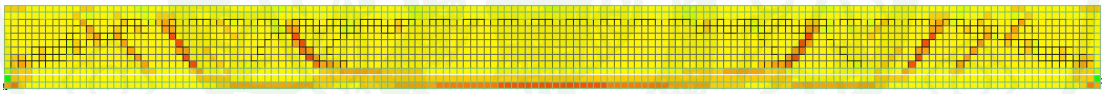


ภาพที่ 79 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 7,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 70

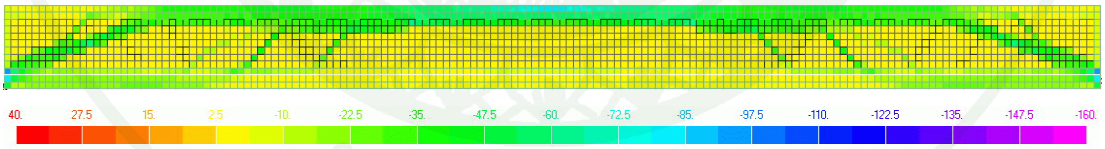
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ

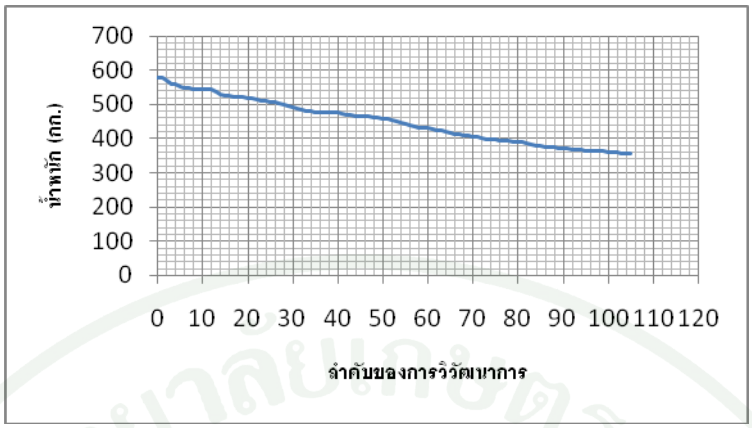


หน่วยแรงรองมุขสำคัญ

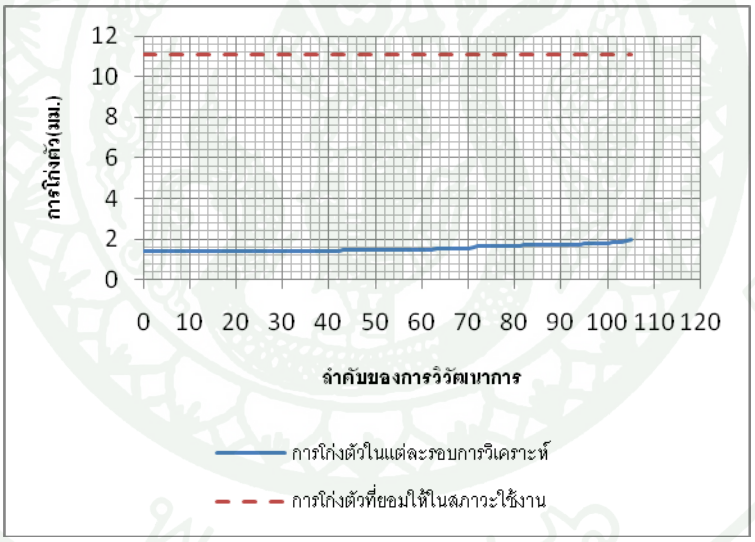


ภาพที่ 80 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 7,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 105

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

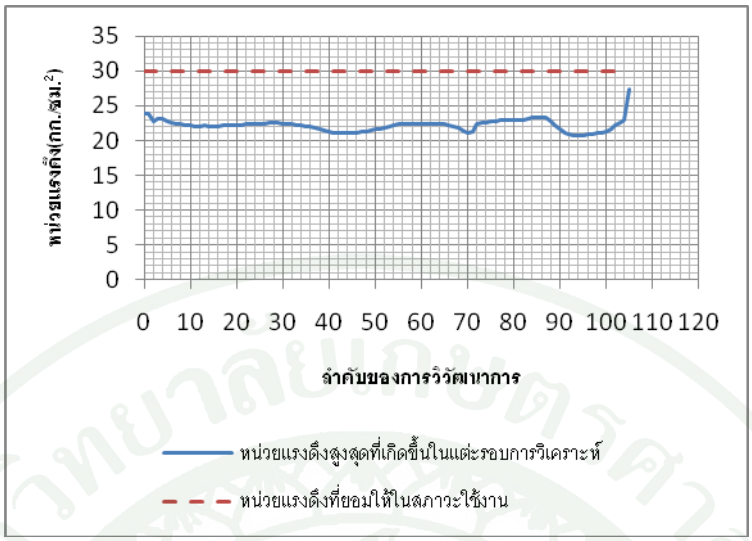


ภาพที่ 81 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 7,000 กก.

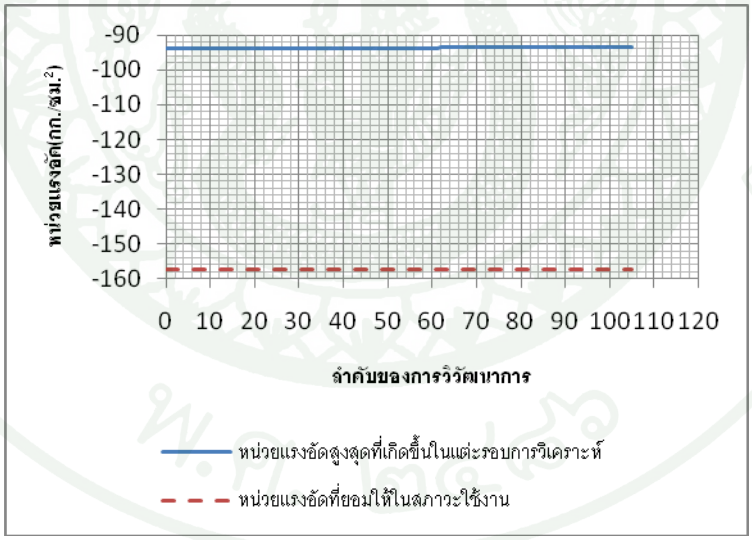


ภาพที่ 82 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวของคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 7,000 กก.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



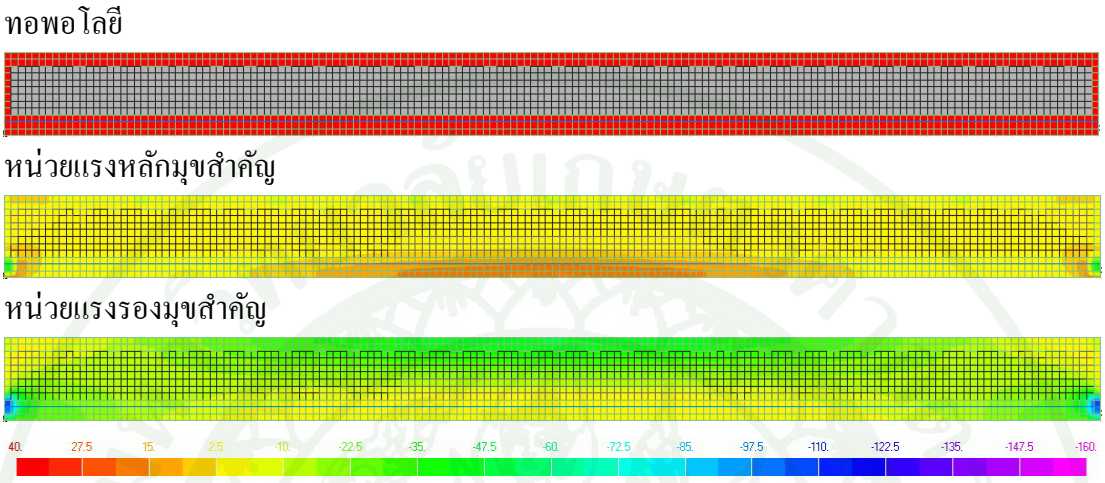
ภาพที่ 83 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 7,000 กก.



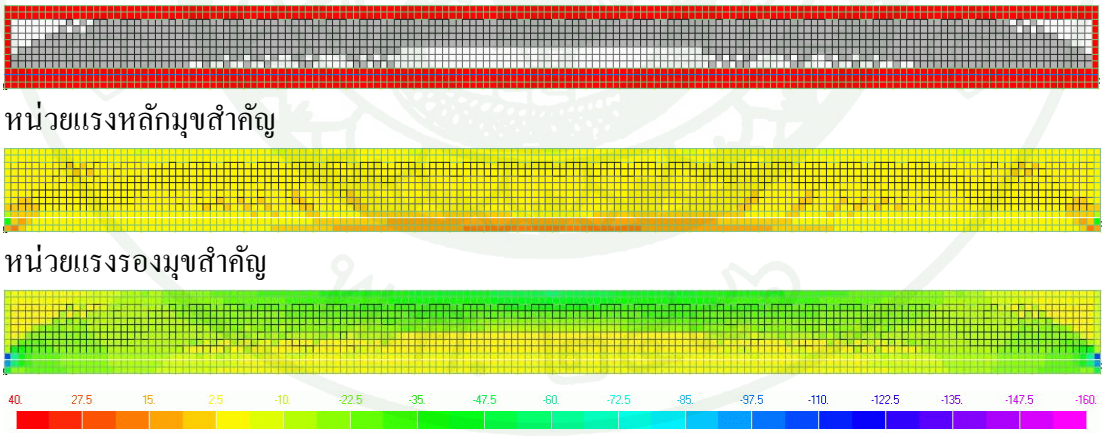
ภาพที่ 84 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 7,000 กก.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.8. คานคอนกรีตอัดแรง 20 × 25 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กก. ทุกๆ ระยะ 50 ซม. อัดแรง 8,000 กก.



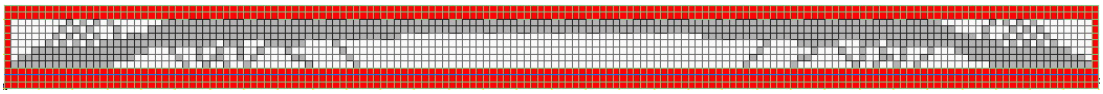
ภาพที่ 85 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 8,000 กก. สภาวะตั้งต้น



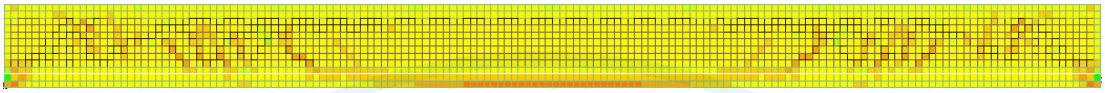
ภาพที่ 86 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 8,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 40

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

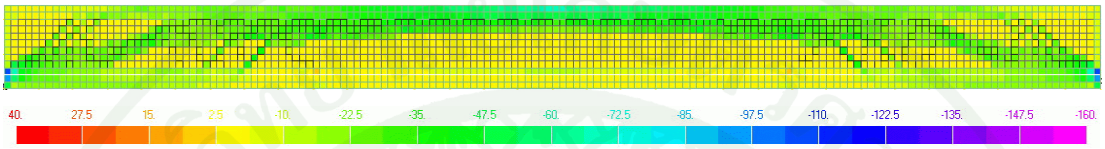
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ

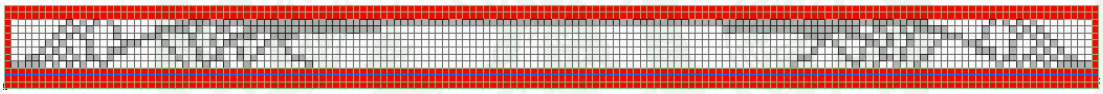


หน่วยแรงรองมุขสำคัญ

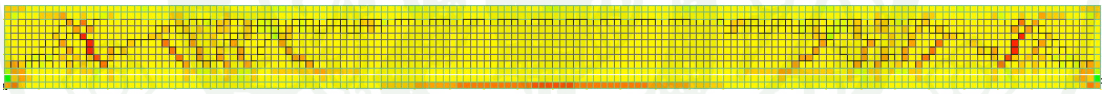


ภาพที่ 87 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 8,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 80

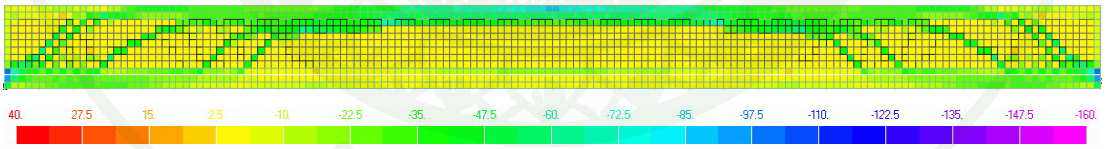
ทอพอโลยี



หน่วยแรงหลักมุขสำคัญ

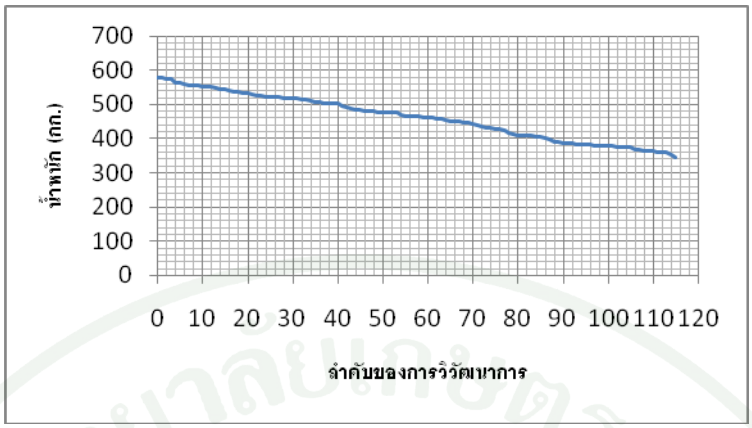


หน่วยแรงรองมุขสำคัญ

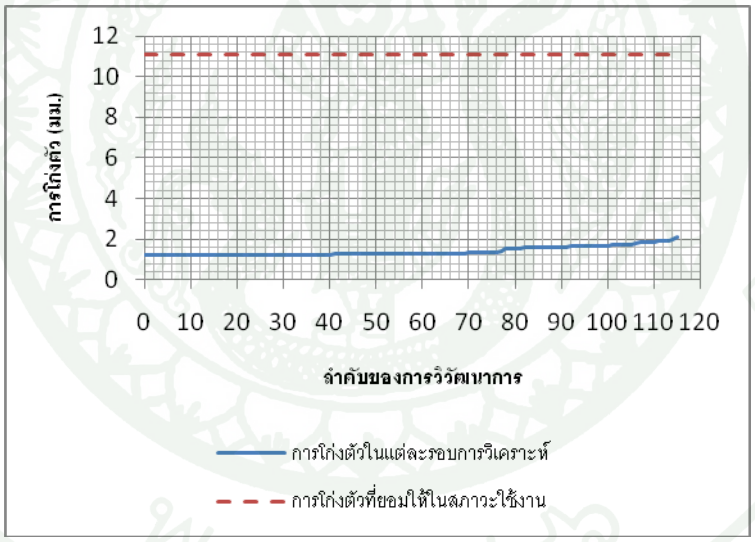


ภาพที่ 88 ทอพอโลยีและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 460 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 8,000 กก. วิวัฒนาการลำดับที่ 115

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

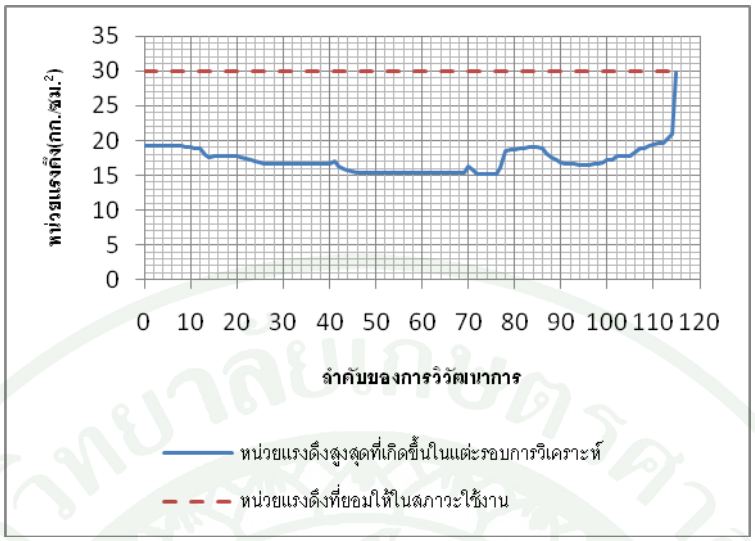


ภาพที่ 89 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 8,000 กก.

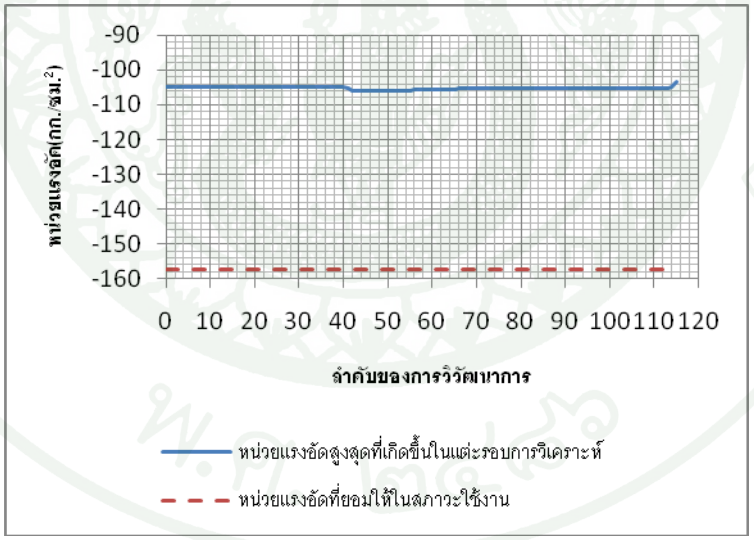


ภาพที่ 90 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวของคานกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 8,000 กก.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 91 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 8,000 กก.



ภาพที่ 92 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นกับลำดับของการวิวัฒนาการของคานคอนกรีตอัดแรง 20 × 30 × 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบแผง 472 กก. ทุกๆระยะ 50 ซม. อัดแรง 8,000 กก.

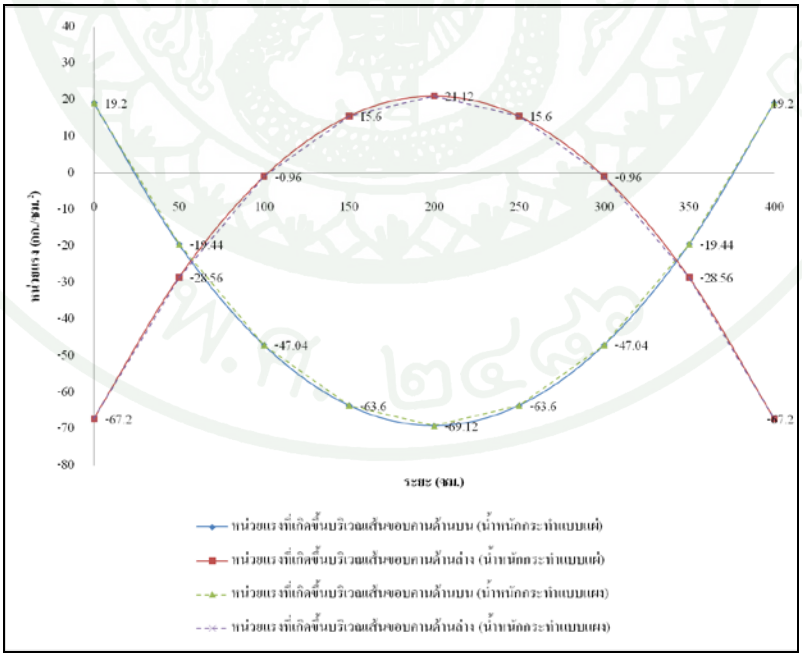
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิจารณ์

1. ทอพอโลยีของคานคอนกรีตอัดแรงที่ได้จากกระบวนการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดนั้นออกมาในรูปแบบของส่วนโค้ง (Arch) ในส่วนที่เกิดแรงอัด และโครงถัก (Truss) ในส่วนที่เกิดแรงดึง ซึ่งเป็นรูปแบบของสรีระที่ค่อนข้างเหมาะสมสำหรับคอนกรีต เพราะเป็นรูปแบบที่เกิดหน่วยแรงอัดเป็นส่วนใหญ่ในโครงสร้าง

2. ลักษณะของแรงกระทำ ความลึกของคาน และ ปริมาณของการอัดแรงมีผลต่อทอพอโลยีของคานดังที่แสดงผลการทดสอบ เนื่องจากลักษณะของแรงกระทำมีผลต่อการไหลของหน่วยแรง (stress flow) ทำให้การกระจายของหน่วยแรงต่างกัน ส่งผลทำให้เกิดชิ้นส่วนวัสดุปิดตัวในตำแหน่งที่ต่างกัน

2.1. ลักษณะของแรงกระทำมีผลต่อทอพอโลยีของคานโดยที่น้ำหนักกระทำแบบแผ่ก่อให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดสูงกว่าในช่วงที่อยู่ระหว่างจุดที่แรงกระทำของน้ำหนักกระทำแบบแผงดังภาพที่ 93 ส่งผลทำให้เกิดหน่วยแรงขึ้นสูงกว่าส่งผลให้สามารถกำจัดชิ้นส่วนเนื้อวัสดุได้น้อยกว่า

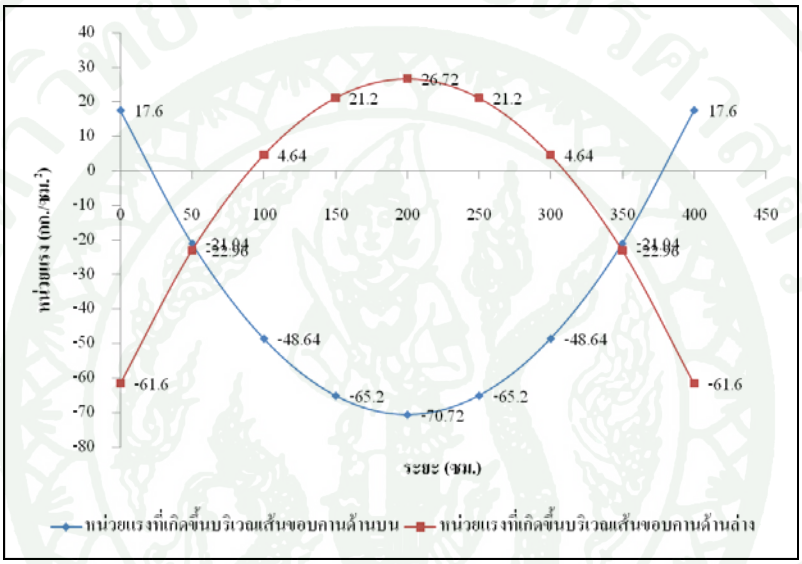


ภาพที่ 93 แผนภาพโมเมนต์ดัดของคานที่รับน้ำหนักกระทำแบบแผ่ และ น้ำหนักกระทำแบบแผงทุกๆระยะ 50 ซม.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

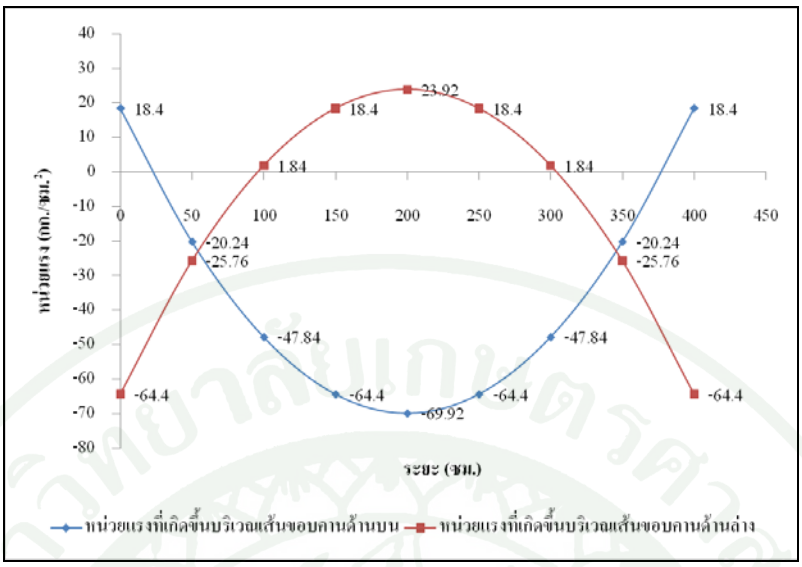
2.2. ความลึกของคานที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตที่สภาวะตั้งต้นมีค่าลดลงส่งผลทำให้คานที่มีความลึกมากสามารถกำจัดชิ้นส่วนเนื้อวัสดุได้มากกว่า

2.3. ปริมาณของการอัดแรงส่งผลทำให้ตำแหน่งบนคานที่มีค่าโมเมนต์ดัดต่ำแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลทำให้ตำแหน่งของการเกิดชิ้นส่วนวัสดุปิดตัวมีความแตกต่างกันซึ่งสามารถแสดงการเปรียบเทียบคานคอนกรีตขนาด 20 × 25 × 400 ซม. อัดแรงต่างๆได้ดังภาพที่ 94 ถึง 97

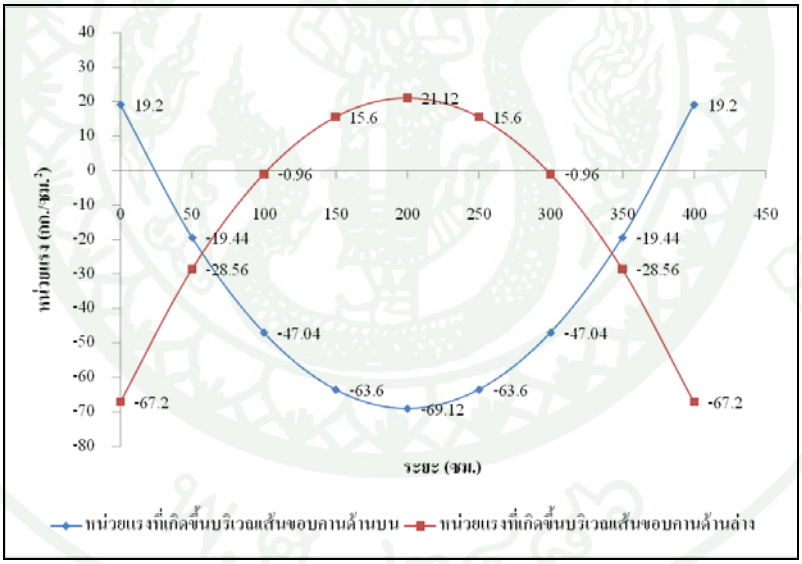


ภาพที่ 94 แผนภาพโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตขนาด 20 × 25 × 400 ซม. อัดแรง 11,000 กก.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

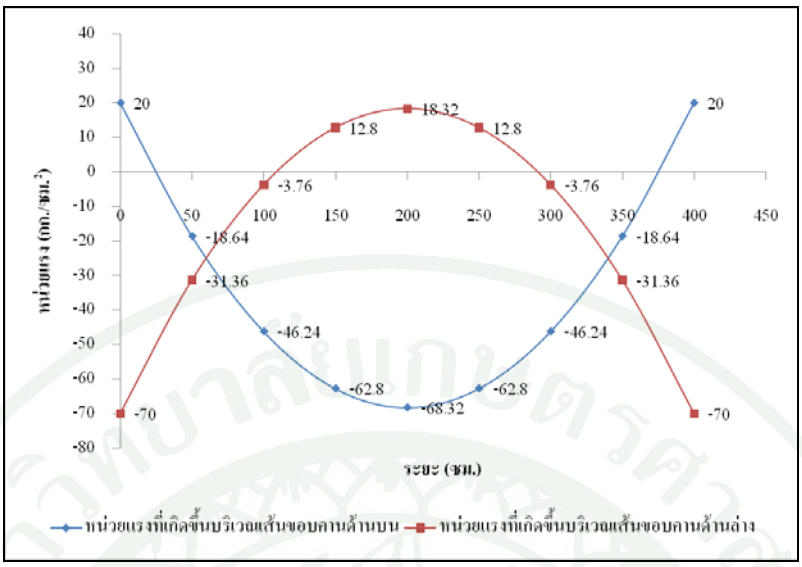


ภาพที่ 95 แผนภาพโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตขนาด 20 × 25 × 400 ซม. อัดแรง 11,500 กก.



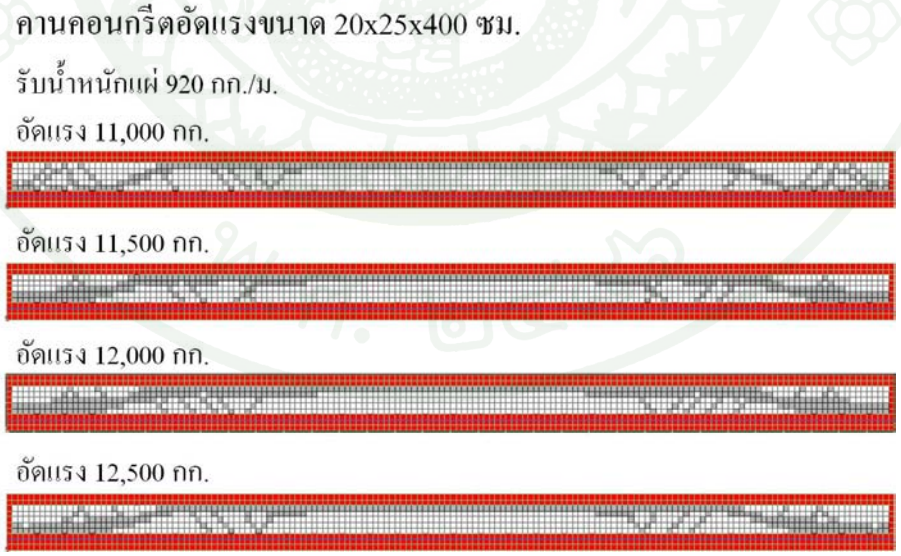
ภาพที่ 96 แผนภาพโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตขนาด 20 × 25 × 400 ซม. อัดแรง 12,000 กก.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 97 แผนภาพโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตขนาด 20 × 25 × 400 ซม. อัดแรง 12,500 กก.

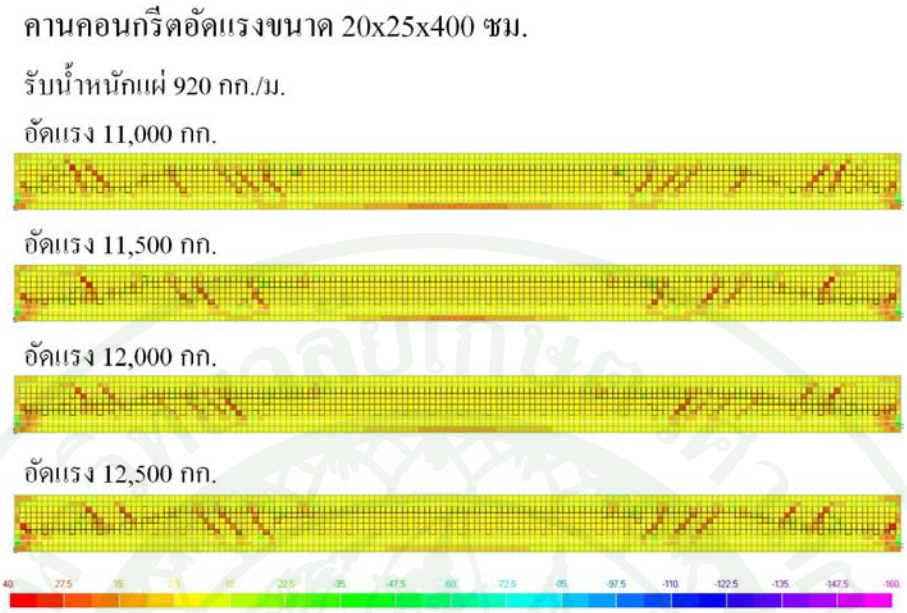
ซึ่งเมื่อเกิดการปิดตัวชิ้นส่วนเนื้อวัสดุในตำแหน่งที่แตกต่างกัน ทำให้โครงสร้างในการวิเคราะห์รอบถัดไปมีลักษณะที่ต่างกัน การกระจายตัวของหน่วยแรงก็จะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปซึ่งทำให้ได้ทอพอโลยีสุดท้ายที่แตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 98



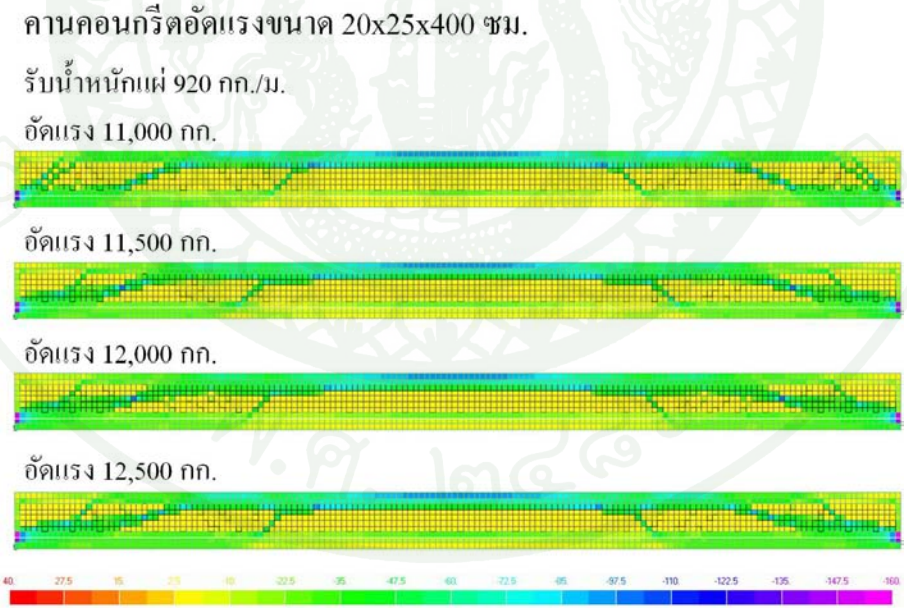
ภาพที่ 98 ทอพอโลยีของคานคอนกรีตอัดแรงที่มีปริมาณการอัดแรงต่างกัน

และการกระจายตัวของหน่วยแรงดังภาพที่ 99 ถึง 100

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



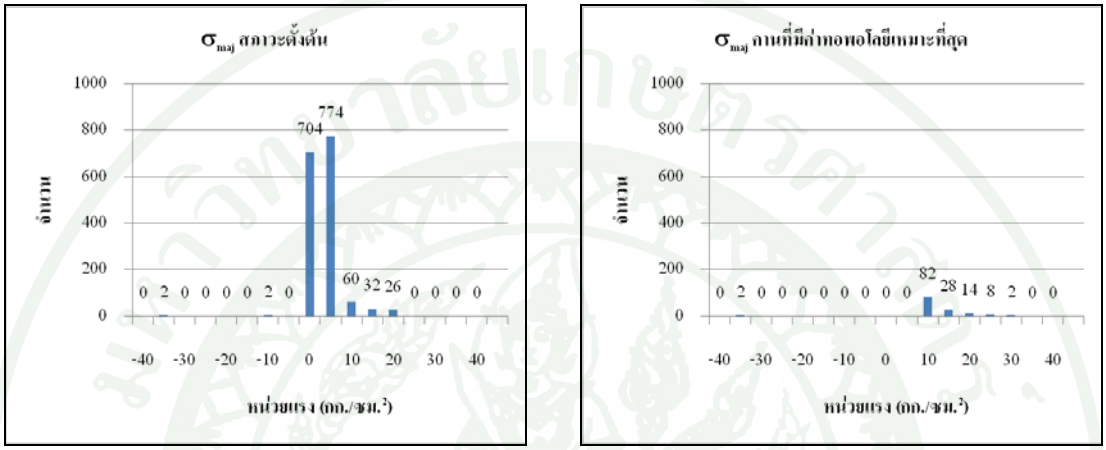
ภาพที่ 99 หน่วยแรงหลักมุขสำคัญของคานคอนกรีตอัดแรงที่มีปริมาณการอัดแรงต่างกัน



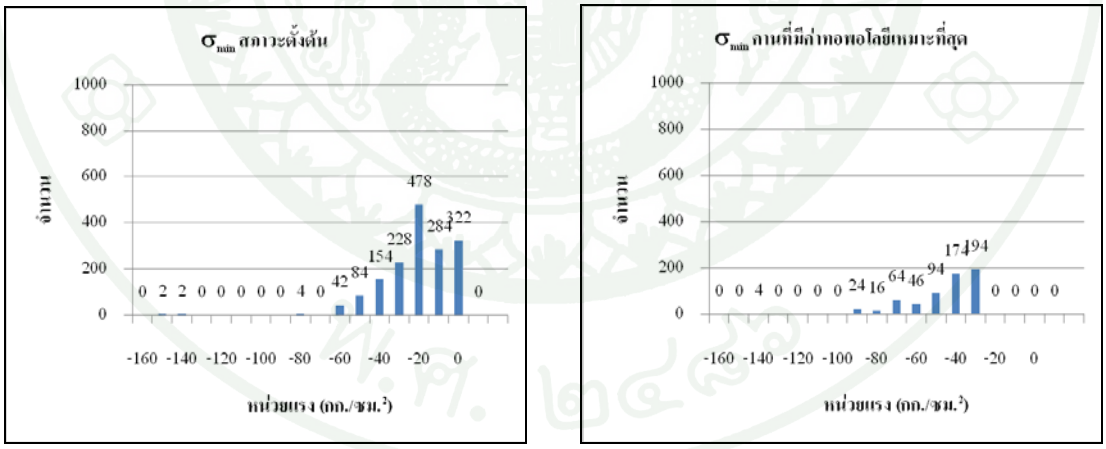
ภาพที่ 100 หน่วยแรงรองมุขสำคัญของคานคอนกรีตอัดแรงที่มีปริมาณการอัดแรงต่างกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. เมื่อพิจารณาจากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์ของคานคอนกรีตอัดแรงที่ผ่านกระบวนการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุด พบว่าในเอลิเมนต์วัสดุเปิดตัวที่คงเหลือมีการรับหน่วยแรงอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยที่ค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นยังอยู่ภายใต้ข้อกำหนดที่ยอมให้ในการออกแบบ ซึ่งสามารถแสดงเป็นภาพแห่งความถี่ได้ดังภาพที่ 101 ถึง 102



ภาพที่ 101 ภาพแห่งความถี่ของหน่วยแรงหลักมุขสำคัญในชิ้นส่วนย่อย



ภาพที่ 102 ภาพแห่งความถี่ของหน่วยแรงรองมุขสำคัญในชิ้นส่วนย่อย

4. เมื่อพิจารณาในด้านการนำไปใช้งานภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานพบว่าคานตัวอย่างในกรณีศึกษาที่ผ่านกระบวนการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดแล้ว มีค่าการโก่งตัวมากขึ้นแต่ยังอยู่ภายใต้ค่าการโก่งตัวที่ยอมให้ในการออกแบบ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. คานคอนกรีตอัดแรงที่ผ่านกระบวนการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุดนั้นสามารถลดปริมาณเนื้อวัสดุในส่วนที่เป็นคอนกรีตลงประมาณร้อยละ 20 ถึง 40 ขึ้นอยู่กับลักษณะของแรงกระทำ, ขนาดหน้าตัดของคาน และปริมาณของแรงที่ใช้ในการอัดแรง โดยที่ค่าหน่วยแรงและค่าการโก่งตัวยังอยู่ภายใต้ค่าที่ยอมให้ในการออกแบบ

2. จากผลการวิเคราะห์ทำให้ทราบถึงลักษณะของการกระจายตัวของหน่วยแรงและสามารถระบุบริเวณที่เกิดหน่วยแรงขึ้นสูง ของคานคอนกรีตอัดแรงที่ผ่านกระบวนการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข้อเสนอแนะ

1. แบบสรีระของคานที่ได้จากงานวิจัยนี้ หากนำไปก่อสร้างจริง จำเป็นต้องเพิ่มเหล็กเสริมกำลังและระยะหุ้มเหล็กของคอนกรีตเข้าไปตามข้อบังคับในการออกแบบ ดังนั้นปริมาณของวัสดุคอนกรีตที่ต้องใช้ในการก่อสร้างจริงนั้นจะแตกต่างปริมาณที่ได้จากกระบวนการหาค่าทอพอโลยีเหมาะที่สุด

2. ความละเอียดของโครงตาข่ายมีผลต่อแบบสรีระที่ผ่านกระบวนการทำให้เหมาะสมที่สุด ซึ่งหากโครงตาข่ายไม่มีความละเอียดพอจะส่งผลให้แบบสรีระสุดท้ายผิดไปจากที่ควรจะเป็น จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ขนาดโครงตาข่ายที่มีความเหมาะสม

3. ปริมาณของแรงที่ใช้การอัดแรงส่งผลกระทบต่อกระบวนการทำให้เหมาะสมที่สุดในแบบสรีระโดยไม่จำเป็นว่าการเพิ่มปริมาณของแรงที่ใช้ในการอัดแรงจะทำให้เนื้อวัสดุสามารถถูกกำจัดได้มากขึ้น จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของปริมาณการอัดแรงที่เหมาะสมที่จะทำให้แบบสรีระมีการใช้เนื้อวัสดุที่น้อยที่สุด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กริช อัชชโคสิต. 2545. **การทำให้เหมาะสมที่สุดในแบบผังของคานประกอบ.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นเรศ พันธราธร. 2540. **การออกแบบคอนกรีตอัดแรง.** ไลบรารี นาย, กรุงเทพฯ.

บัญชา ลยางกูร. 2547. **การทำให้เหมาะสมที่สุดในแบบผังของคานประกอบด้วยเทคนิคการกระตุ้นเนื้อวัสดุ.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศิรเดช สุริต. 2547. **การวิเคราะห์รูปร่างประโยชน์สุดของโครงสร้างโดยพิจารณาข้อจำกัดการผลิต.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Benjapon, W., S. Surit and B. Layangkoon. 2003. **The optimal topology of structures with boundary constraint**. pp. D3-1-D3-10. In The Fourth Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering (RSID4). Department of Civil Engineering Kasetsart University, Bangkok.

Bendsøe, M.P. and N. Kikuchi. 1988. Generating optimal topologies in structural design using a Homogenization Method. **Computer methods in Applied Mechanics and Engineering.** (71): 197-224.

Bendsøe, M.P. 1995. **Optimization of Structural Topology, Shape and Material.** Springer, Berlin.

Christie, W.C., P. Bettess and J.W. Bull. 1998. Self-Designing structures : A practical approach. **Engineering Computation.** 15 (1): 34-48.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Haftka, R.T. and Z. Gurdal. 1986. Structure shape optimization a survey. **Computer Methods In Applied Mechanics and Engineering.** (57): 91-106.

Hinston, E. and J. Sienz. 1995. Fully Stressed Topological Design of Structures Using an Evolutionary Procedure. **Engineering Computation.** (12): 229-244.

Liang, Q.Q. 2005. **Performance-based Optimization of Structures.** Spon Press, New York.

Liang, Q.Q., Y.M. Xie and G.P. Steven 2000. Topology Optimization of Strut-and-Tie Models in Reinforced Concrete Structures Using an Evolutionary Procedure. **ACI Structure Journal.** (97): 322-330

Rath, D.P., A.S. Ahlawat and A. Ramaswamy. 1999. Shape Optimization of RC Flexural Members. **Journal of Structural Engineering.** : 1439-1446.

Reynolds, D., J. McConnachie, P. Bettess, J.C. Christie and J. W. Bull. 1999. Reverse adaptivity a new evolutionary tool for structural optimization. **Numerical Method in Engineering.** (45): 529-552.

Wai-Fah Chen. 2007. **Plasticity in Reinforced Concrete.** McGraw-Hill, New York.

Xie, Y.M. and G.P. Steven 1993. A simple evolutionary procedure for structural optimization. **Computers and Structures.** 49 (5): 885-896.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายจิระพัฒน์ จิระภาพันธ์
เกิดวันที่	13 กันยายน 2528
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	2550 วศ.บ. วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์