

การวิเคราะห์โครงขั้หนุมน 2 มิติ และ 3 มิติด้วยโปรแกรม STAAD-III
STRUCTURAL ANALYSIS OF 2D / 3D TRUSS BY STAAD-III PROGRAM



ทวีศักดิ์ ภาณุไพศาล
ปาลินี พงษ์เจริญ
แสงชัย ศรีวิโรภาส

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2541

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์	
วันที่รับ...	14 ก.ค. 2542
เลขทะเบียน	A310211
เลขเรียกหนังสือ	TA
มหาวิทยาลัยนเรศวร	647
	9228



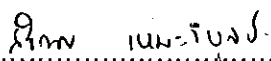
ใบรับรองโครงการวิศวกรรมโยธา


หัวข้อโครงการวิศวกรรมโยธา : การวิเคราะห์โครงข้อหมุน 2 มิติ และ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม STAAD-III
ผู้ดำเนินงานวิศวกรรมโยธา : นายทวีศักดิ์ ภาณุไพศาล รหัส 38361119
นางสาวปาลินี พงษ์เจริญ รหัส 38361218
นายแสงชัย ศิริวิโรภาส รหัส 38361507
ที่ปรึกษาโครงการวิศวกรรมโยธา : อาจารย์สมศักดิ์ เหลืองวิชชเจริญ
สาขาวิชา : วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา : วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงการวิศวกรรมโยธาฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา

คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรมโยธา

ประธานกรรมการ
(อาจารย์สมศักดิ์ เหลืองวิชชเจริญ)

กรรมการ
(อาจารย์สรัญกร เหมะวิบูลย์)

หัวหน้าภาควิชา (รักษาการแทน)
(อาจารย์สมบัติ ชื่นชุกกลิ่น)

หัวข้อโครงการวิศวกรรมโยธา : การวิเคราะห์โครงข้อมุม 2 มิติ และ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม STAAD-III
ผู้ดำเนินงานวิศวกรรมโยธา : นายทวีศักดิ์ ภาณุไพศาล รหัส 38361119
นางสาวปาลินี พงษ์เจริญ รหัส 38361218
นายแสงชัย ศรีวิโรภาส รหัส 38361507
ที่ปรึกษาโครงการวิศวกรรมโยธา : อาจารย์สมศักดิ์ เหลืองวิชชเจริญ
สาขาวิชา : วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา : วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา : 2541

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้งานของโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง STAAD - III ที่อำนวยความสะดวกในการคำนวณค่าต่างๆ ของโครงสร้าง ที่จำเป็นในการออกแบบองค์อาคาร สิ่งก่อสร้างต่างๆ ที่พบทั่วไปในปัจจุบัน และเป็นโปรแกรมที่นิยมมากในหมู่วิศวกร ผู้ดำเนินงานได้ทำการศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง STAAD - III การดำเนินงานเริ่มจากได้กำหนดขอบเขตของการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวกับโครงข้อมุม 2 มิติ และ 3 มิติ ซึ่งเป็นหนึ่งในความสามารถของโปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์ได้ โดยทำการศึกษาตัวอย่างลักษณะของโครงข้อมุมทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ จำนวน 5 ตัวอย่างที่มีลักษณะแตกต่างกัน

จากการศึกษาและวิเคราะห์ พบว่าโปรแกรม STAAD - III สามารถป้อนข้อมูลได้ทั้งแบบรายการ (Text Editor) และแบบกราฟฟิค (Graphic) ทำให้สามารถแก้ไขข้อมูลได้ง่าย ซึ่งเป็นความได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรมอื่น อีกทั้งโปรแกรมนี้สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ได้ในเวลารวดเร็ว และสามารถรายงานผลเมื่อเกิดการป้อนข้อมูลผิดพลาด ดังนั้นโปรแกรม STAAD - III จึงเป็นโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง

Project Title of Civil Engineering : Structural Analysis of 2D / 3D Truss by STAAD-III Program
Name : Mr. Taweesak Panupaisam Code 38361119
Ms. Palinee Pongcharoen Code 38361218
Mr. Sangchai Sriwaropas Code 38361507
Project Advisor : Mr. Somsak Leungvichcharoen
Major : Civil Engineering
Department : Civil Engineering
Academic Year : 1998

Abstract

The purpose of this project is to study and use the structural analysis program is called "STAAD-III". This program is well known for engineers, as it is convenience to calculate by computing results necessary for the structural design. The project started with a study of its theory and methodology. The project truss has been indicated to examine plane and space truss design. Five different examples were used to view a picture of how to implement this program.

From the study and analysis results, we know two different ways of the input data, Text Editor and Graphic. To compare with other program, this program has the advantage as it provides direct results, rapid on screen data of the analysis, use less time, and immediately reports whenever there is any error input data. Hence, STAAD-III is mostly interesting structural analysis program.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ถูกลงได้ด้วยดี เพราะได้รับความกรุณาจาก อาจารย์สมศักดิ์ เหลืองวิชชเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ ตลอดจนข้อมูลต่างๆ รวมทั้งตรวจสอบแก้ไข จนรายงานโครงการนี้เสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนรู้สึกสำนึกในความกรุณาและขอขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้ความสนับสนุน และส่งเสริมในเรื่องการศึกษาตลอดมา อีกทั้งให้กำลังใจอย่างไม่ขาด

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ นิสิตและรุ่นน้อง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร สำหรับความช่วยเหลือและกำลังใจที่มอบให้ในการดำเนินโครงการฉบับนี้

นายพีศักดิ์ ภาณุไพศาล
นางสาวปาณีย์ พงษ์เจริญ
นายแสงชัย ศรีวโรภาส



สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทที่ 1. บทนำ	1
บทที่ 2. หลักการและทฤษฎี	5
^{14-๒๒} * บทที่ 3. วิธีการดำเนินการวิจัย	14
บทที่ 4. ผลการวิจัย	22
บทที่ 5. สรุปผลการวิจัย	63
บรรณานุกรม	64
ภาคผนวก	65
ประวัติผู้เขียน	73



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในรอบทศวรรษที่ผ่านมาเศรษฐกิจของไทยเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วทำให้มีความต้องการสำนักงาน และที่อยู่อาศัยอย่างมาก การก่อสร้างของไทยจึงต้องขยายตัวตามไปด้วย ซึ่งจะสังเกตเห็นได้จากการที่มีสิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่และซับซ้อนเกิดขึ้นอย่างมากในปัจจุบัน เช่น อาคารสูง , สะพานทางด่วน , เสาไฟฟ้าแรงสูง เป็นต้น

และในยุคโลกาภิวัตน์นี้ ก็ได้เกิดระบบตลาดการค้าเสรีขึ้น ทำให้บริษัทข้ามชาติและวิศวกรชาวต่างชาติเข้ามามีส่วนแบ่งในโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ของประเทศไทยเป็นจำนวนมาก ในขณะที่บริษัทเอกชนของประเทศไทยหลายบริษัทกลับประสบภาวะขาดทุน บางบริษัทถึงกับต้องปิดกิจการลง อีกทั้งวิศวกรชาวไทยเองที่มีประสบการณ์ในการทำงาน และวิศวกรที่เพิ่งสำเร็จการศึกษาจำนวนไม่น้อยก็ประสบปัญหาการว่างงานเช่นเดียวกัน

ดังนั้น ทั้งบริษัทเอกชนและวิศวกรชาวไทยเราเองจึงควรที่จะมุ่งพัฒนาคุณภาพ ประสิทธิภาพและเทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรม เพื่อให้สามารถยืนหยัดและมีส่วนแบ่งในตลาดงาน ทั้งในประเทศไทยของเราเอง และต่างประเทศได้

ซึ่งการพัฒนางานทางด้านวิศวกรรมโยธา อาจแบ่งเป็น 3 ด้านคือ ด้านการบริหารงานก่อสร้าง ด้านเทคนิควิธีการก่อสร้าง และด้านการออกแบบสิ่งก่อสร้าง เฉพาะด้านการออกแบบนั้น มีพื้นฐานสำคัญมาจากการวิเคราะห์โครงสร้าง

โดยการวิเคราะห์โครงสร้างที่ให้ผลถูกต้องจะช่วยให้สามารถออกแบบได้ประหยัดและปลอดภัย ซึ่งหากวิศวกรโยธาส่วนใหญ่ในประเทศออกแบบโครงสร้างได้อย่างประหยัดและปลอดภัย ก็จะมีส่วนอย่างมากในการพัฒนาประเทศทั้งในด้านเศรษฐกิจและสวัสดิภาพของสังคม รวมทั้งเป็นการจรรโลงเกียรติภูมิให้แก่วิชาชีพวิศวกรของประเทศไทยเราด้วย

ในอดีตวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีดีกรีของความอินดีเทอร์มิเนตทางสถิตย์ (Degree of Indeterminacy) สูงอาจทำได้ 2 วิธี คือ การวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีทางอีลาสติกส์ล้วน ๆ (Elastic Theory) หรือ อาจวิเคราะห์แบบประมาณ (Approximate Method)

การวิเคราะห์แบบประมาณ มีข้อได้เปรียบที่ใช้เวลาในการคำนวณน้อย และสามารถวิเคราะห์ได้รวดเร็วแต่ผลการวิเคราะห์อาจมีความคลาดเคลื่อนไปมากพอสมควร

ส่วนการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีทางอีลาสติก เช่น วิธีกระจายโมเมนต์ (Moment Distribution) วิธีการโก่งตัวมุมหมุน (Slope deflection) หรือวิธีเมตริกซ์ (Matrix method) เป็นต้น จะให้คำตอบที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยเมื่อเทียบกับวิธีการประมาณ

แต่สำหรับโครงสร้างที่มี ดีกรีของความอินดีเทอร์มิเนตทางสถิตย์อยู่สูงมากๆ ก็จะต้องใช้เวลาและความพยายามในการคำนวณมาก รวมทั้งมีโอกาสเกิดความผิดพลาดจากการคำนวณได้ เพราะต้องใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนและอาจตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ได้ไม่ถนัดนัก

ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการวิเคราะห์โครงสร้าง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็วและให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยมาก จึงออกแบบได้อย่างประหยัดและปลอดภัยขึ้น

ซึ่งการใส่ข้อมูลที่ถูกต้องจะให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง แต่ในทางกลับกันหากใส่ข้อมูลผิดพลาดผลการวิเคราะห์ก็จะผิดพลาดด้วย ดังนั้นการใส่ข้อมูลในโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างจึงมีความสำคัญมาก

โปรแกรมการวิเคราะห์โครงสร้างที่ดี ควรป้อนข้อมูลได้สะดวกพอสมควร และถ้าสามารถแสดงผลในรูปภาพพิกัดได้จะดีมาก เพราะจะสามารถตรวจสอบความถูกต้องของโครงสร้างที่ป้อนเข้าไปในโปรแกรมได้ โดยดูจากรูปภาพพิกัดของโครงสร้างนั้น และยังช่วยในการตีความหมายของผลการวิเคราะห์ได้ชัดเจนยิ่งขึ้นด้วย

ซึ่งโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง STAAD-III เป็นโปรแกรมที่มีวิศวกรใช้มากเป็นอันดับ#1 ทั่วโลก จากการสำรวจของ McGraw-Hill และใช้กันเป็นที่แพร่หลายกันในประเทศไทย มีคุณสมบัติดังกล่าวครบถ้วน อีกทั้งยังมีคุณสมบัติเด่นอีกหลายประการเช่น สามารถที่จะออกแบบโครงสร้างได้ทุกกรณี ทั้งโครงสร้างไม้ เหล็ก รูปพรรณ คอนกรีตเสริมเหล็ก อลูมิเนียม ทั้งอาคารที่เป็น 2 มิติ และ 3 มิติ โดยสามารถพิจารณาน้ำหนักกระทำทุกกรณี เช่น น้ำหนักแบบ Moving Load ลม แผ่นดินไหว อุณหภูมิ Natural Frequency หน่วยระยะและแรงเลือกได้ตามต้องการ เช่น ม. ซม.

มม. ฟุต บ้อนข้อมูลได้ทั้ง Text หรือ Graphic จาก Template และแสดงภาพแบบเคลื่อนไหวได้ (Animation)

ดังนั้นหากศึกษาวิธีการใช้โปรแกรม STAAD-III ดังกล่าว จนมีความชำนาญ สามารถบ้อนข้อมูลได้อย่างไม่ผิดพลาด และแปลความหมายของผลการวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้องแล้ว ก็จะเป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัย ต่อวิชาชีพวิศวกร และต่อประเทศชาติโดยรวมได้บ้างไม่มากก็น้อย (สมมติเจตนารมณ์ของผู้วิจัยซึ่งเป็นประชาชนชาวไทยคนหนึ่ง)

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย

STAAD-III เป็นโปรแกรมการวิเคราะห์โครงสร้างโดยตัวโปรแกรมสามารถออกแบบและตรวจสอบซึ่งคณะผู้วิจัย มีความประสงค์ที่จะศึกษาในด้านทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโปรแกรม และการใช้งานโปรแกรม STAAD-III เพื่อการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง แต่เนื่องจากเวลาในการดำเนินการวิจัยนี้มีค่อนข้างจำกัด

ดังนั้น จึงศึกษาเฉพาะทฤษฎีและวิธีการใช้โปรแกรมในส่วนที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างที่เป็นโครงข้อหมุน 2 มิติ และ 3 มิติ โดยได้ทดลองใช้โปรแกรม STAAD-III เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างที่มีอยู่จริง เช่น โครงหลังคาอาคาร ป้ายโฆษณา เสาไฟฟ้าแรงสูง เป็นต้น รวมทั้งในบางตัวอย่างได้เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม STAAD-III กับการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีทางอีลาสติกและจากโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างอื่นๆ เช่น โปรแกรม DTRUSS เป็นต้น

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ช่วยให้สามารถใช้โปรแกรม STAAD-III เพื่อการวิเคราะห์โครงข้อหมุน 2 มิติ และ 3 มิติ ได้อย่างถูกต้อง รวมทั้งได้รับความเข้าใจในทฤษฎีการวิเคราะห์โครงข้อหมุนดังกล่าว อย่างชัดเจน

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.4.1 เลือกเรื่องโครงการวิจัยที่สนใจ
- 1.4.2 ศึกษาเนื้อหาขอบเขต และทฤษฎีที่ทำการวิจัย
- 1.4.3 ศึกษาการใช้งานของโปรแกรม STAAD-III

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 บทนำ

การวิเคราะห์โครงสร้างที่ใหญ่หรือโครงสร้างที่ยุงยากส่วนมากจะมีค่าที่เราไม่ทราบหลายค่า (Redundant) ทำให้เป็นโครงสร้างแบบอินดีเทอร์มิเนตที่ต้องอาศัยการแก้สมการหลายชั้น ตามปรกติการวิเคราะห์โครงสร้างแบบอินดีเทอร์มิเนตทำได้ 2 วิธี

1 Force Method หรือ Flexibility Method หรือ Compatibility Method

ในวิธีนี้ทำได้โดยการพยายามทำโครงสร้างให้เป็นแบบดีเทอร์มิเนตเสียก่อน ซึ่งทำได้โดยการกำหนดทิศทางของแรงไม่ทราบค่าแล้วหาการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น ณ จุดที่แรงไม่ทราบค่านี้กระทำ ซึ่งการเคลื่อนที่ดังกล่าวจะมีพจน์ของแรงไม่ทราบค่าอยู่ด้วยจากนั้นจึงสร้างสมการโดยใช้เงื่อนไข ความต่อเนื่อง (Compatibility Condition) ซึ่งจำนวนสมการที่ได้จะเท่ากับจำนวนของแรงเหล่านั้นพอดีเมื่อแก้สมการหลายชั้นดังกล่าวร่วมกัน ก็จะได้คำตอบที่สมบูรณ์

2 Displacement Method หรือ Stiffness Method หรือ Equilibrium Method

ในวิธีนี้ค่าการเคลื่อนที่ของโครงสร้างจะใช้เป็นตัวไม่รู้ค่า ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของโครงสร้างกับการเคลื่อนที่ของส่วนโครงสร้าง หาได้จากลักษณะสัมพันธ์ของโครงสร้าง และอาศัยหลักการสมดุลของแรงกับการเคลื่อนที่ ทำให้คำนวณหาตัวไม่รู้ค่าได้ ค่าของแรงภายในส่วนโครงสร้างต่าง ๆ ได้จากการแทนค่าของตัวไม่รู้ค่าลงในสมการของความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ภายในโครงสร้าง

2.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีการรวมสติฟเนสโดยตรง

การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะกำหนดให้มีการเคลื่อนที่ขึ้นที่จุดต่อของโครงสร้างจะให้เป็นตัวไม่รู้ค่า หรือจุดที่แรงกระทำ แล้วอาศัยการสมดุลของจุดต่าง ๆ ช่วยทำให้เขียนสมการซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของแรงหรือน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนที่ได้ เมื่อคำนวณได้ค่าของการเคลื่อนที่แล้วค่า

ของแรงต่าง ๆ ในโครงสร้างก็จะหาได้ จำนวนของสมการขึ้นอยู่กับ Degree of Freedom ของโครงสร้างนั้น ๆ ถ้าโครงสร้างมีดีกรีของอินดีเทอริเมนต์สูงหรือมีแรงหรือน้ำหนักภายนอกกระทำหลายจุด การแก้สมการดังกล่าวจะยุ่งยากมากขึ้น เพื่อการแก้สมการง่ายเข้าจึงต้องสมการอย่างเป็นระบบจึงต้องอาศัยวิธีของเมตริกซ์

สถิติเนตของชิ้นส่วนย่อยในระบบโคออร์ดิเนตประจำตัว (Local Coordinate System)

สำหรับชิ้นส่วนใด ๆ สถิติเนตของชิ้นส่วนย่อยในระบบโคออร์ดิเนตประจำตัว (Local Coordinate System) ซึ่งผ่านแนวแกนของชิ้นนั้น (ตามรูปที่ 2-1ก) ความสัมพันธ์ของแรงที่ปลายชิ้นส่วน ($\{S\}$) กับการเปลี่ยนตำแหน่งของปลายชิ้นส่วน ($\{v\}$) เป็นตามสมการ

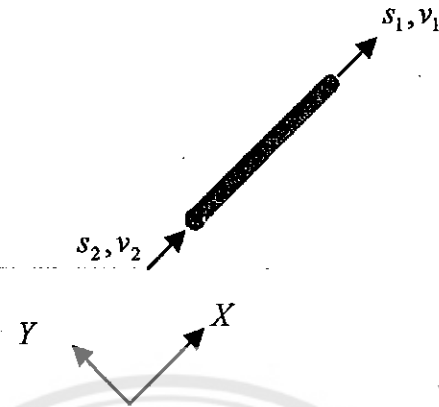
$$\{S\} = [k] \{v\} \quad \text{---(1)}$$

เมื่อ $[k]$ หมายถึง สถิติเนตของชิ้นส่วนย่อยในระบบโคออร์ดิเนตประจำตัว สำหรับชิ้นส่วนของโครงสร้างข้อหมุนใด ๆ (ดังแสดงในรูปที่ 2-1ก) จะได้ว่า

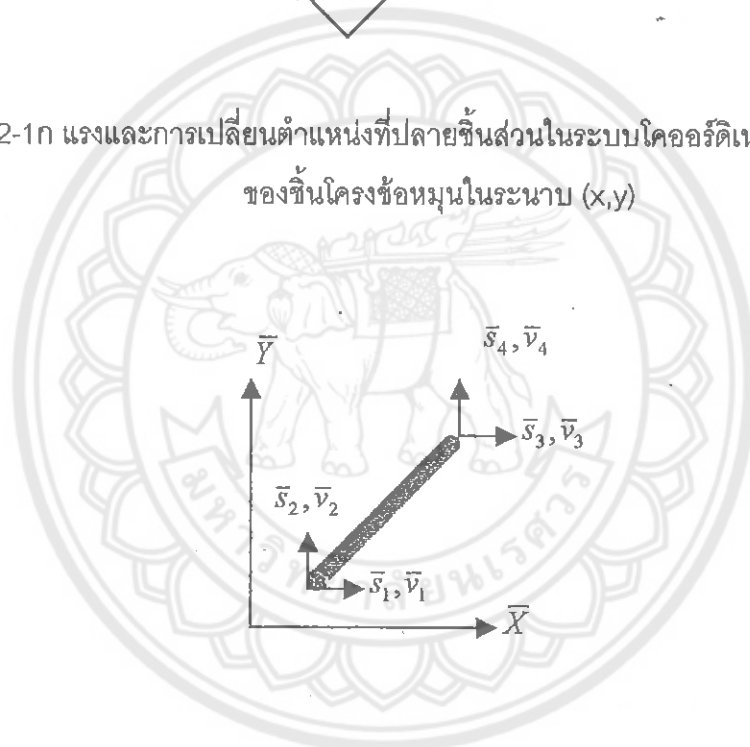
$$[k] = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{---(2)}$$

ระบบโคออร์ดิเนตโกลบอล (Global Coordinate System)

เนื่องจากระบบโคออร์ดิเนตประจำตัวของชิ้นส่วนแต่ละอันหันในทิศทางต่าง ๆ กัน เวกเตอร์ของแรงที่ปลายชิ้นส่วนแต่ละอัน จึงไม่สามารถรวมกันได้โดยตรง ในการพิจารณาภาวะสมดุลของข้อต่อเพื่อให้สามารถทำการรวมเวกเตอร์ได้โดยตรง จำเป็นต้องนิยามแรงและการเปลี่ยนตำแหน่งของแต่ละชิ้นส่วนในระบบโคออร์ดิเนตร่วมกัน ในที่นี้ใช้ระบบโคออร์ดิเนตโกลบอลแสดงในรูปที่ 2-1ก และ 2-1ข พึงระลึกว่า ชิ้นส่วนที่แสดงเป็นชิ้นส่วนเดียวกัน แรงและการเปลี่ยนตำแหน่งใด ๆ จึงเป็นแรงและการเปลี่ยนตำแหน่งเดียวกัน เพียงแต่เขียนแสดงในระบบโคออร์ดิเนตที่ต่างกันเท่านั้น



รูปที่ 2-1ก แรงและการเปลี่ยนตำแหน่งที่ปลายชิ้นส่วนในระบบโคออร์ดิเนตประจำตัว(x,y)
ของชิ้นโครงข้อหมุนในระนาบ (x,y)



รูปที่ 2-1ข แรงและการเปลี่ยนตำแหน่งที่ปลายชิ้นส่วนในระบบโคออร์ดิเนตโกลบัล(\bar{x}, \bar{y})
ของชิ้นส่วนโครงข้อหมุนในระนาบ

เมตริกซ์แปลงสำหรับชิ้นส่วนโครงข้อหมุน (Truss Element Transformation Matrix)

จากการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง แรง หรือการเปลี่ยนตำแหน่งในระบบโคออร์ดิเนตประจำตัวกับระบบโคออร์ดิเนตโกลบัลของชิ้นส่วนย่อยใดๆ ได้ดังนี้

$$\{v\} = [a] \{\bar{v}\} \quad \text{---(3)}$$

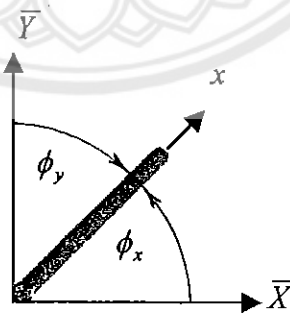
$$\{S\} = [a] \{\bar{S}\} \quad \text{---(4)}$$

เมื่อ $\{\bar{v}\}$ และ $\{v\}$ หมายถึง แรง และการเปลี่ยนตำแหน่งที่จุดต่อ (Node) ของชิ้นส่วนย่อยในระบบโคออร์ดิเนตโกลบอล และ $[a]$ หมายถึง เมตริกซ์แปลงของชิ้นส่วนย่อย (Element Transformation Matrix)

สำหรับชิ้นส่วนโครงข้อหมุนใน 2 มิติเฉพาะการจัดเรียงลำดับของแรงและการเคลื่อนที่ ณ จุดต่อเป็นดังรูปที่ 2-1 จะได้ว่า

$$[a] = \begin{bmatrix} \cos \phi_x & \cos \phi_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \phi_x & \cos \phi_y \end{bmatrix} \quad \text{---(5)}$$

โดย ϕ_x และ ϕ_y หมายถึงมุมที่วัดจากทิศทางตามยาวของชิ้นส่วนไปยังแกน \bar{x} และแกน \bar{y} ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2-2



รูปที่ 2 แสดงมุม ϕ_x, ϕ_y ของชิ้นส่วนโครงข้อหมุนในระนาบ

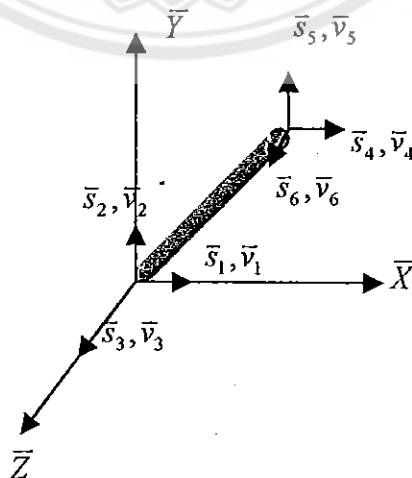
และสำหรับชิ้นส่วนโครงข้อหมุน 3 มิติ จะได้ว่า

$$[a] = \begin{bmatrix} \cos \phi_x & \cos \phi_y & \cos \phi_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \phi_x & \cos \phi_y & \cos \phi_z \end{bmatrix}$$

โดย ϕ_z หมายถึงมุมที่วัดจากทิศทางตามยาวของชิ้นส่วนไปยังแกน z ดังแสดงในรูป 2-3ก เมื่อการจัดเรียงลำดับของ แรง และการเคลื่อนที่ ณ จุดต่อเป็นดังรูปที่ 2-3ก และ 2-3ข



รูปที่ 2-3ก แสดงมุม ϕ_x, ϕ_y และ ϕ_z ของชิ้นส่วนโครงข้อหมุนในสามมิติ และแสดง แรง และการเปลี่ยนตำแหน่งที่ปลายในระบบโคออร์ดิเนตประจำตัว



รูปที่ 2-3ข แสดง แรง และการเปลี่ยนตำแหน่งที่ปลายของชิ้นส่วนโครงข้อหมุนในสามมิติ โดยที่เมตริกซ์ $[a]$ มีคุณสมบัติเชิงตั้งฉากดังนี้

$$[a]^T [a] = [a] [a]^T = [I] \quad \text{---(7)}$$

เมื่อ $[I]$ หมายถึง เมตริกซ์เอกลักษณ์

สถิติเฟสของชิ้นส่วนย่อยในระบบโคออร์ดิเนตโกลบอล

เมื่อแทนสมการ (3) ลงใน (1) จะได้ว่า

$$\{S\} = [k] [a] [\bar{v}] \quad \text{---(8)}$$

จากนั้นแทน (4) ลงในสมการ (8) แล้วใช้คุณสมบัติเชิงตั้งฉากในสมการ (7) ให้ความสัมพันธ์ระหว่าง แรง และการเคลื่อนที่ที่ปลายในระบบโคออร์ดิเนตโกลบอล ดังนี้

$$\{\bar{S}\} = [a]^T [k] [a] [\bar{v}] \quad \text{---(9a)}$$

หรือเขียนใหม่ได้เป็น

$$\{\bar{S}\} = [\bar{k}] \{\bar{S}\} \quad \text{---(9b)}$$

เมื่อ $[\bar{k}]$ หมายถึง สถิติเฟสของชิ้นส่วนในระบบโคออร์ดิเนตโกลบอล

$$[\bar{k}] = [a]^T [k] [a] \quad \text{---(10)}$$

สำหรับโครงข้อหมุนใน 2 มิติ จากสมการที่ (5) และ (10) จะได้ว่า

$$[\bar{k}] = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} \cos\phi_x & 0 \\ \cos\phi_y & 0 \\ 0 & \cos\phi_x \\ 0 & \cos\phi_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\phi_x & \cos\phi_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\phi_x & \cos\phi_y \end{bmatrix}$$

$$[\bar{k}] = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} \cos^2 \phi_x & \cos \phi_x \cos \phi_y & -\cos^2 \phi_x & -\cos \phi_x \cos \phi_y \\ \cos \phi_x \cos \phi_y & \cos^2 \phi_y & -\cos \phi_x \cos \phi_y & -\cos^2 \phi_y \\ -\cos^2 \phi_x & -\cos \phi_x \cos \phi_y & \cos^2 \phi_x & \cos \phi_x \cos \phi_y \\ -\cos \phi_x \cos \phi_y & -\cos^2 \phi_y & \cos \phi_x \cos \phi_y & \cos^2 \phi_y \end{bmatrix} \quad \text{---(11)}$$

$$[\bar{k}] = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} \cos^2 \phi_x & \cos \phi_x \cos \phi_y & \cos \phi_x \cos \phi_z & -\cos^2 \phi_x & -\cos \phi_x \cos \phi_y & -\cos \phi_x \cos \phi_z \\ \cos \phi_y \cos \phi_x & \cos^2 \phi_y & \cos \phi_y \cos \phi_z & -\cos \phi_y \cos \phi_x & -\cos^2 \phi_y & -\cos \phi_y \cos \phi_z \\ \cos \phi_z \cos \phi_x & \cos \phi_z \cos \phi_y & \cos^2 \phi_z & -\cos \phi_z \cos \phi_x & -\cos \phi_z \cos \phi_y & -\cos^2 \phi_z \\ -\cos^2 \phi_x & -\cos \phi_x \cos \phi_y & -\cos \phi_x \cos \phi_z & \cos^2 \phi_x & \cos \phi_x \cos \phi_y & \cos \phi_x \cos \phi_z \\ -\cos \phi_y \cos \phi_x & -\cos^2 \phi_y & -\cos \phi_y \cos \phi_z & \cos \phi_y \cos \phi_x & \cos^2 \phi_y & \cos \phi_y \cos \phi_z \\ -\cos \phi_z \cos \phi_x & -\cos \phi_z \cos \phi_y & -\cos^2 \phi_z & \cos \phi_z \cos \phi_x & \cos \phi_z \cos \phi_y & \cos^2 \phi_z \end{bmatrix}$$

---(12)



2.3 ขั้นตอนการคำนวณโดยใช้วิธี Direct Stiffness Method

1. กำหนด Matrix ของการเคลื่อนที่ที่จุดต่อซึ่งเป็นตัวไม่รู้ค่า $\{U^*\}$
2. จากสมการที่ (2) หาสติเฟนสในโคออร์ดิเนตประจำตัว $[k]$ ของแต่ละ Member

$$\text{ดังนี้ } [k] = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

3. จากสมการที่ (5) หรือ (6) คำนวณหา Transformation Matrix ของแต่ละ Member

$$\text{ถ้าเป็น Plane Truss } [a] = \begin{bmatrix} \cos \phi_x & \cos \phi_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \phi_x & \cos \phi_y \end{bmatrix}$$

$$\text{Space Truss } [a] = \begin{bmatrix} \cos \phi_x & \cos \phi_y & \cos \phi_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \phi_x & \cos \phi_y & \cos \phi_z \end{bmatrix}$$

4. หาสติเฟนสในโคออร์ดิเนตโกลบัล $[\bar{k}]$ ของแต่ละ Member จากสมการที่ (10)

$$[\bar{k}] = [a]^T [k] [a]$$

5. คำนวณหา $[\bar{K}^*]$ ของโครงสร้าง

$$\text{โดยที่ } [\bar{K}^*] = \sum_{m=1}^{\text{member}} [\bar{k}^m]$$

เมื่อ $[\bar{k}^m]$ หมายถึง สติเฟนสในโคออร์ดิเนตโกลบัลของชิ้นส่วนย่อย

6. หา $\{U^*\}$ จากสมการ $\{U^*\} = [K^*]^{-1} \{P^*\}$

เมื่อ $\{P^*\}$ คือ แรงภายนอกกระทำ ณ ข้อต่อของโครงสร้างในทิศทางและตำแหน่งเดียวกับการเคลื่อนที่ $\{U^*\}$

7. คำนวณหาแรงภายในส่วนโครงสร้าง จากสมการ $\{S\} = [k] [a] [v]$

เมื่อ $\{v\}$ ได้จาก $\{U^*\}$ ในทิศทางและตำแหน่งที่ถูกต้องของแต่ละชั้นส่วนย่อย

8. คำนวณหาแรงที่ฐานรองรับ (Support Reactions) และที่ปลายชั้นส่วนในโครงสร้าง จากสมการ

$$\{R\} = [a]^T \{S\}$$

จากขั้นตอนดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณที่

ได้จากโปรแกรม STAAD-III

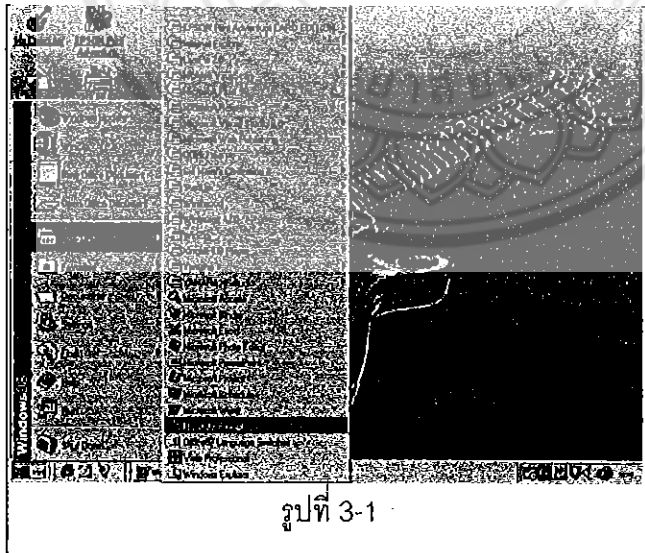
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 รายละเอียดในการติดตั้งโปรแกรม STAAD-III

ก่อนการติดตั้งโปรแกรมนั้นต้องตรวจสอบว่าเป็นไปตามข้อกำหนดของโปรแกรม โดยโปรแกรมต้องการ PC-486 ขึ้นไป สำหรับ Windows 3.11 หรือ PC Pentium สำหรับ Windows 95 / Windows NT , RAM อย่างน้อย 16 MB , พื้นที่ว่างบน Harddisk อย่างน้อย 80 MB สำหรับ Full Version (Student Version ใช้ประมาณ 20 MB), จอสีขนาด 14" ขึ้นไปขนาดความละเอียดของภาพ 800 x 600 , Mouse , Graphic card , Multimedia System

การติดตั้งสามารถทำได้ทั้งใน DOS หรือ Windows เวอร์ชันต่าง ๆ แต่ในที่นี้จะแสดงการติดตั้งบน Windows 98 โดยมีวิธีการดังนี้



1. เข้าไปในโปรแกรม Windows คลิกที่ปุ่ม Start แล้วคลิกไปที่ปุ่ม Program แล้วชี้ไปที่ MS-DOS Prompt ดังรูปที่ 3-1
2. พิมพ์ cd.. เพื่อออกจากกล่อง Windows
3. พิมพ์ md st เพื่อสร้างกล่อง ST
4. นำแผ่นโปรแกรมที่แนบมาให้ใส่เข้าไปที่ไดรฟ์ A

5. พิมพ์ a: เพื่อที่จะเปลี่ยนไดรฟ์ไปยังไดรฟ์ A
6. พิมพ์ copy *.* c:\stที่จะคัดลอกไฟล์ลงในไดรฟ์ C กล่อง ST
7. พิมพ์ c: เพื่อที่จะกลับไปยังไดรฟ์ C



รูปที่ 3-2



รูปที่ 3-3

8. พิมพ์ cd st เพื่อที่เข้าไปยัง
 กล่อง ST
9. พิมพ์ md data เพื่อสร้างกล่อง
 DATA
10. พิมพ์ st เพื่อขยายไฟล์ที่ถูกบีบ
 อัดอยู่ จะได้ผลดังรูปที่ 3-2
11. พิมพ์ swapdisk c:\st\data
 เพื่อ Run-โปรแกรม Swapdisk ใน
 การลบข้อมูลที่ใช้คำนวณชั่วคราว
 ในไดรฟ์ C กล่อง ST และในกล่อง
 DATA จะได้ผลดัง รูปที่ 3-3
 ทั้งหมดนี้เป็นวิธีการติดตั้ง
 โปรแกรม STAAD-III และวิธีการใช้
 โปรแกรม STAAD-III จะกล่าวถึง
 ในหัวข้อถัดไป

3.2 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม STAAD-III

ในที่นี้จะกล่าวถึงขั้นตอนต่างๆ ไปในการใช้โปรแกรม STAAD-III และเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์โครงสร้างโครงข้อหมุน 2 มิติ และ 3 มิติดังนี้

1. เข้าไปยังกล่อง ST ดับเบิลคลิกที่สัญลักษณ์ตามรูปที่ 3-4 แล้วจะปรากฏหน้าจอตามรูปที่ 3-5

2. พิมพ์ชื่อไฟล์ เพื่อที่จะแก้ไขข้อมูลในครั้งต่อไปได้ง่าย โดยในหน้าจอนี้จะมีคำสั่งดังนี้

Help = ข้อมูลช่วยในการใช้หน้าจอนี้

STAAD Files = เลือกดูไฟล์ข้อมูลที่เคยบันทึกไว้

DOS Shell = เข้าสู่การทำงานชั่วคราวของ DOS

Exit STAAD-III = ออกจากโปรแกรม STAAD-III

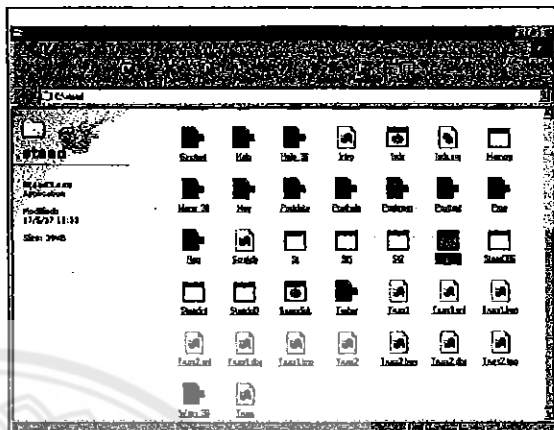
3. ในรูปที่ 3-6 จะแสดงขึ้นหลังจากการพิมพ์ชื่อไฟล์และจะมีคำสั่งดังนี้

STAAD-III = เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลที่ป้อนเข้าไป

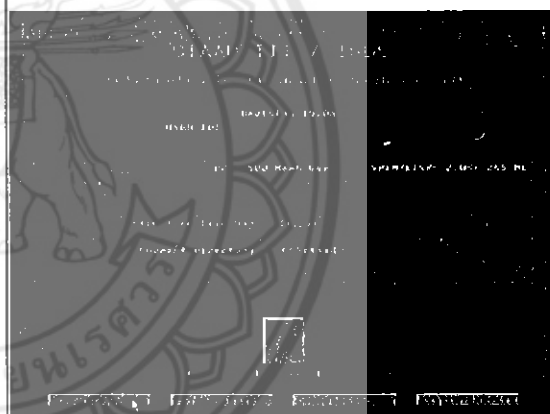
STAAD-POST = เพื่อดูผลการวิเคราะห์ในรูปแบบต่าง

STAAD-PRE = เพื่อป้อนข้อมูลที่ต้องการวิเคราะห์

STAAD-INTDES = เพื่อออกแบบส่วนต่าง เช่น แผ่นพื้น ฐานราก กำแพงกัน



รูปที่ 3-4



รูปที่ 3-5



รูปที่ 3-6

ดิน เป็นต้น

EDIT Input = เพื่อแก้ไขข้อมูลที่เป็นไฟล์
ปัจจุบัน

Other Input = เพื่อเลือกไฟล์ หรือป้อน
ชื่อไฟล์ข้อมูลอันใหม่

4. ในรูปที่ 3-7 จะเกิดจากการเลือกคำสั่ง
STADD-PRE โดยในหน้าจอจะมีคำสั่ง
ดังนี้

Info = บอกรายละเอียด ดังรูปที่ 3-8

Editor = ใช้เมื่อต้องการแก้ไข เปลี่ยน
แปลงข้อมูลที่เคยใส่เข้าไปในรูปแบบ
Text

Icon = ใช้เมื่อต้องการจะเลือกแสดงสิ่ง
ต่าง ๆ บนจอ เช่น joint, member,
support, load, grid ฯลฯ ดังรูปที่ 3-9

Isom = ให้แสดงภาพ Isometric View

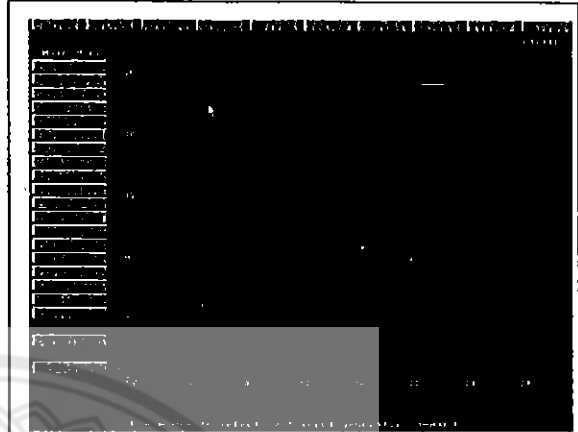
View = ใช้เมื่อต้องการจะดูรูปใน
ลักษณะใด ๆ เช่น ระยะใกล้-ไกล เลื่อน
ขึ้น ลง ซ้าย ขวา หมุนแกน x y z ดังรูปที่
3-10

Secton = ใช้เมื่อจะให้แสดงระนาบที่
ต้องการ (x-y , y-z , x-z plane) หรือ
เพื่อให้เห็นโครงสร้างเป็นบางส่วน

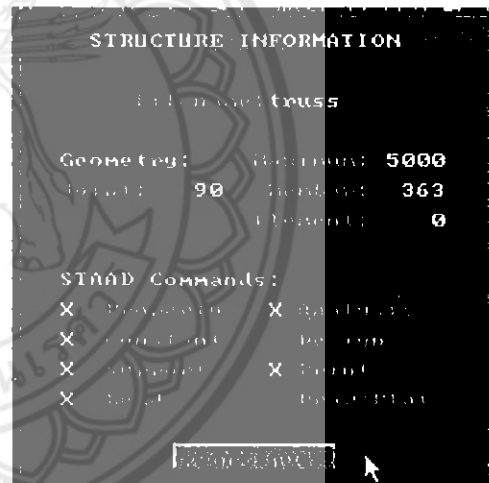
Unit = ใช้เมื่อต้องการกำหนดหน่วย
แรง และหน่วยความยาว ดังรูปที่ 3-11

Select = ใช้เลือก joint, member หรือ
element

Status = ใช้เมื่อต้องการทราบคุณ
สมบัติ, ความยาว, จุดพิกัดของชิ้นส่วน



รูปที่ 3-7



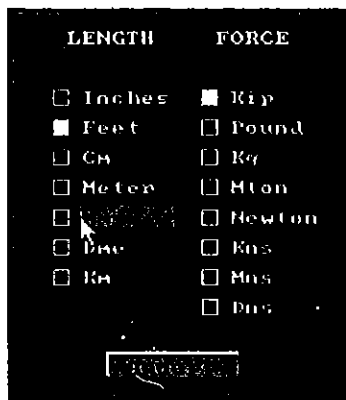
รูปที่ 3-8



รูปที่ 3-9



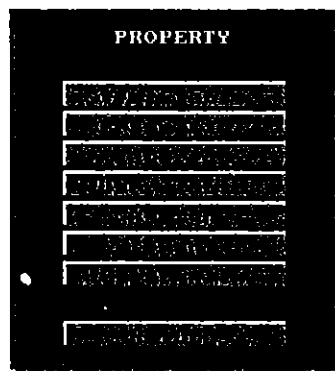
รูปที่ 3-10



รูปที่ 3-11



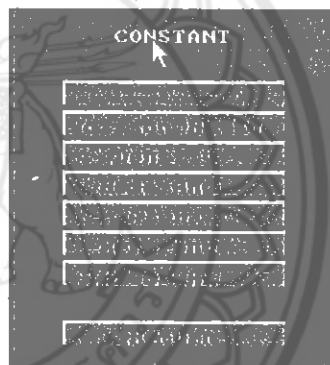
รูปที่ 3-12



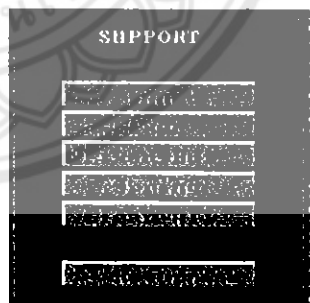
รูปที่ 3-14



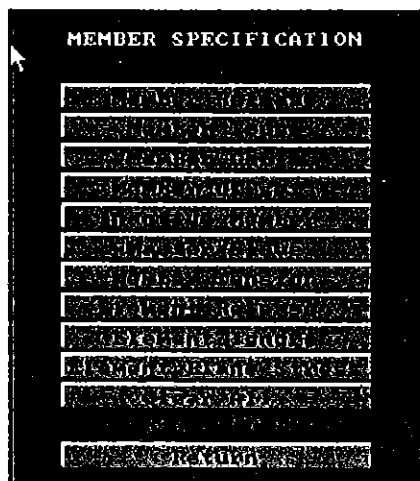
รูปที่ 3-13



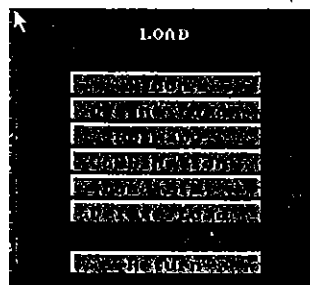
รูปที่ 3-15



รูปที่ 3-16



รูปที่ 3-17



รูปที่ 3-18

Calcu = menu เครื่องคิดเลขที่เราสามารถใช้คำนวณได้

Geometry = ใส่ข้อมูลต่าง ๆ ทางเรขาคณิต (ซึ่งสามารถใส่ข้อมูลต่าง ๆ ได้ 2 วิธี โดยการ
ใช้เมนู Geometry หรืออีกวิธีคือการเข้าไปเขียนใน Editor โดยตรง)เมื่อเข้าไปในคำสั่ง Geometry
จะพบคำสั่งย่อยดังรูปที่ 3-12 โดยรูปที่ 3-12 จะมีคำสั่งต่าง ๆ ดังนี้

Add Memb = เพิ่มขึ้นส่วน

Add Elem = เพิ่มแผ่น

Split Memb = แบ่ง member ออกเป็นหลาย ๆ member

Copy = คัดลอกกลุ่ม member ไปวางในส่วนอื่น ๆ ของโครงสร้าง

Mirror = คัดลอกกลุ่ม member ไปวางตรงข้ามของโครงสร้าง โดยสามารถเลือกว่าจะ
วางในแนวระนาบใด และวางตรงตำแหน่งใด

Move Joint = เคลื่อนย้ายจุด

Move Origin = เคลื่อนย้ายจุดกำเนิด

Pivot Joint = หมุน joint

Renumber = เรียงตัวเลขใหม่

Cn Beam = สร้างคาน

Cn Column = สร้างเสา

Erase = ลบ member หรือ ลบ element

Dimension = แสดงระยะ กว้าง ยาว ของโครงสร้าง

Grid = สร้าง grid

Return = กลับสู่หน้าจอหลัก

Library = เลือกแบบ (model) ของโครงสร้าง ดังรูปที่ 3-13

Property = เลือกคุณสมบัติให้ member หรือ element ดังรูปที่ 3-14

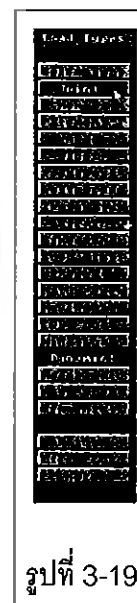
Constant = เลือกค่าคงที่ของวัสดุที่ใช้ ดังรูปที่ 3-15

Support = เลือกชนิดของจุดรองรับ ดังรูปที่ 3-16

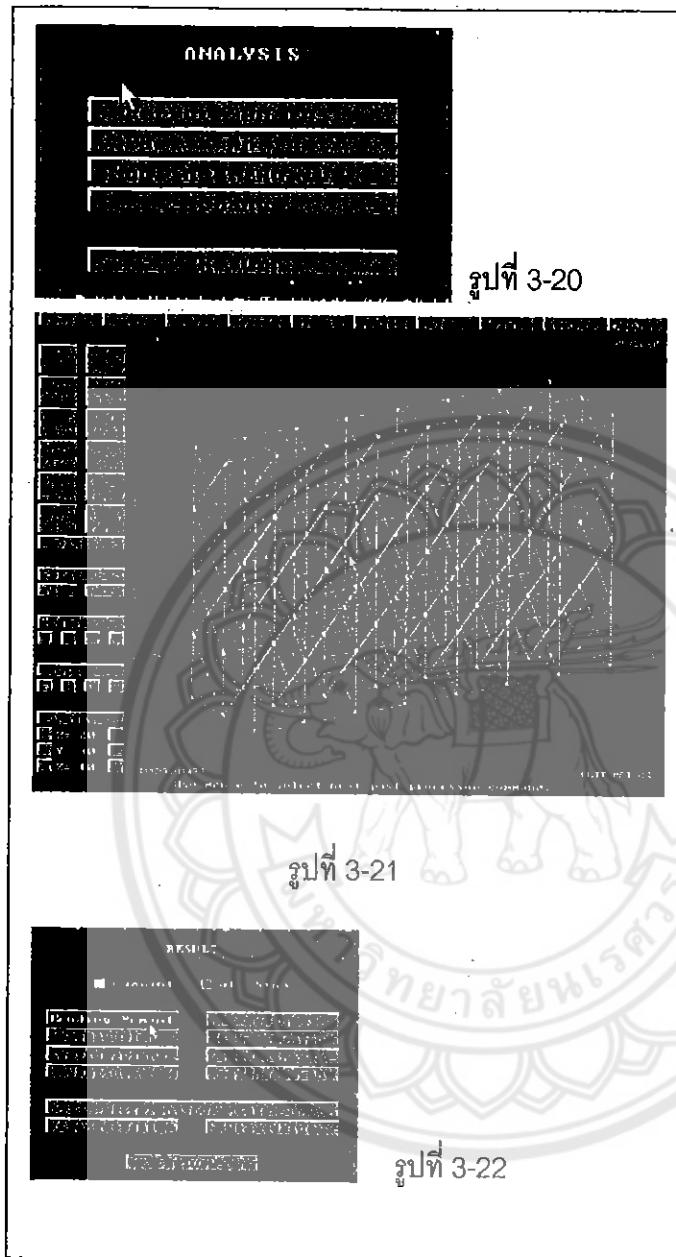
Mem Spec = เลือกชนิดของ member ดังรูปที่ 3-17

Load = เลือกชนิดของแรงที่มากระทำกับโครงสร้างโดยเมื่อเลือกคำสั่งนี้จะได้ดังรูปที่
3-18 โดยเลือกแรงเป็น Primary ซึ่งสามารถกำหนดให้ใส่แรงกระทำต่อโครงสร้างแบบ
ต่างๆดังรูปที่ 3-19

Analysis = เลือกประเภทของการวิเคราะห์ ดังรูปที่ 3-20



รูปที่ 3-19



5. ในการป้อนข้อมูลจะต้องทำเรียงลงมาใน Main Menu โดยใน Sub Menu จะสามารถข้ามบ้างอันได้ ที่ทำเช่นนี้เพื่อมิให้เป็นการสับสนเมื่อป้อนข้อมูลเรียบร้อยแล้วให้ safe แล้วออกมาจากโปรแกรม จะสู่หน้าจอ ดังรูปที่ 3-6

6. ให้เลือกคำสั่ง STAAD-III เป็นการสั่งให้โปรแกรมเริ่มวิเคราะห์

7. ให้เลือกคำสั่ง STAAD-POST เพื่อดูผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดังรูปที่ 3-21ซึ่งหน้าจอจะมีเมนูคำสั่งดังต่อไปนี้

Result = แสดงผลการวิเคราะห์ต่าง ๆ เช่น Bending Moment, Deflection ฯลฯ ดังรูปที่ 3-22

Query = ใช้เลือกดูผลการวิเคราะห์และข้อมูลอย่างละเอียดของแต่ละชิ้นส่วน

Report = แสดงรายงานต่าง ๆ

Section = แสดงหน้าตัดในแนว

ต่าง ๆ

List = แสดงรูป joint หรือ member เฉพาะที่เลือกไว้ หรือทั้งหมด

Setup = เป็นการกำหนดค่าต่าง ๆ เช่น กำหนดขนาดตัวอักษร ฯลฯ

Run STAAD = ให้วิเคราะห์โครงสร้างใหม่

ANIMATE = แสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบต่อเนื่อง

DIMEN = แสดงทิศทางและความยาวของ member

Shift = ใช้ในการเลื่อนขึ้น ลง ซ้าย ขวา

Windows = ใช้สำหรับแบ่งหน้าจอ ออกเป็น 1, 2 หรือ 4 หน้าจอ

จากขั้นตอนและคำอธิบายการใช้งานโปรแกรม STAAD-III อย่างคร่าวๆ ที่ผ่านมา ทำให้เราสามารถที่จะติดตั้งโปรแกรมป้อนข้อมูล สั่งให้โปรแกรมวิเคราะห์ผล และดูผลการวิเคราะห์นั้น ได้พอสมควรแล้ว ดังนั้นในบทถัดไป จะได้นำเสนอตัวอย่างการใช้งานกับโครงสร้างจริงเพื่อศึกษา และเปรียบเทียบต่อไป



บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลของการดำเนินงานซึ่งจะแสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างโครงข้อหมุน 2 มิติ และ 3 มิติ จากโปรแกรม STAAD-III แล้วเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยมือตามทฤษฎี ในบทที่ 2 และโปรแกรม D-TRUSS โดยจะมีตัวอย่างที่จะคำนวณอยู่ 5 ตัวอย่าง เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าโครงสร้างที่เราวิเคราะห์นั้นได้รับการ Input และประมวลผลอย่างถูกต้อง ในตัวอย่างแรก ๆ และในตัวอย่างหลังจะเป็นการวิเคราะห์โครงสร้าง 3 มิติ ที่ซับซ้อนขึ้น เพื่อแสดงศักยภาพของโปรแกรม STAAD-III ให้เห็นเด่นชัดขึ้น

ตัวอย่างที่ 1 จะเป็นการวิเคราะห์โครงสร้างแบบ 3 มิติ โดยในตัวอย่างนี้จะตรวจสอบโครงสร้างโดยการวิเคราะห์ด้วยการรวมสถิติเฟสโดยตรงโดยกลุ่มผู้วิจัยเองแล้วเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์กับโปรแกรม STAAD-III

ตัวอย่างที่ 2 จะเป็นการวิเคราะห์โครงสร้างแบบ 2 มิติ ซึ่งเป็นโครงสร้างโครงหลังคาโดยในตัวอย่างนี้จะเป็นการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ ด้วยโปรแกรม STAAD-III กับ โปรแกรม D-TRUSS

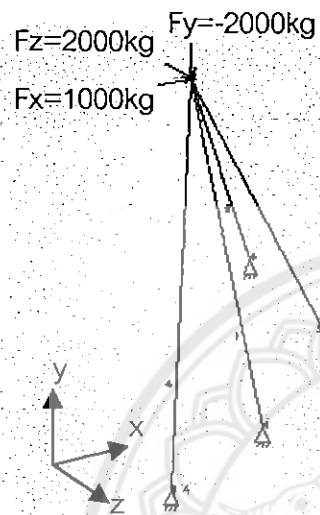
ตัวอย่างที่ 3 จะเป็นการวิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณาแบบ 3 มิติด้วยโปรแกรม STAAD-III แล้วเปรียบเทียบกับโปรแกรม D-TRUSS โดยโมเดลให้เป็นโครงสร้าง 2 มิติ ก่อน (เพราะโปรแกรม D-TRUSS วิเคราะห์ได้เฉพาะโครงข้อหมุน 2 มิติ เท่านั้น)

ตัวอย่างที่ 4 จะเป็นการวิเคราะห์โครงสร้างแบบ 3 มิติ ซึ่งเป็นโครงสร้างโครงหลังคา โดยโปรแกรม STAAD-III

ตัวอย่างที่ 5 จะเป็นการวิเคราะห์โครงสร้างแบบ 3 มิติ ซึ่งเป็นโครงสร้างเสาไฟฟ้าแรงสูง โดยโปรแกรม STAAD-III

4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้าง

ตัวอย่างที่ 1



วิเคราะห์โครงสร้างอย่างง่าย 3 มิติ ดังรูป ประกอบด้วยชิ้นส่วนท่อนเหล็กทรงกระบอก ต้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 ซม. จำนวน 4 ชิ้น ค่า $E=2.04 \times 10^6$ กก./ตร.ซ.ม. เป็นโครงสร้าง Indeterminate 1 Degree

รูปที่ 4-1

ตำแหน่งของข้อต่อและลักษณะของชิ้นส่วน

Joint	Coordinate	Member	Incident
1	(0,0,4)	1	1-5
2	(3,0,5)	2	2-5
3	(2,3,0)	3	3-5
4	(0,8,0)	4	4-5

คุณสมบัติของชิ้นส่วน (Member Properties)

Member	Length(m)	$\cos \phi_x$	$\cos \phi_y$	$\cos \phi_z$
1	8.9443	0.0	0.8944	-0.4472
2	9.8995	-0.303	0.8081	-0.5051
3	5.3852	-0.3714	0.9285	0.0
4	11.0454	0.0	0.9959	0.0905

หาค่าสติเฟนสของชิ้นส่วนต่างๆ ในระบบแกนร่วมกัน จากสมการที่ 12 จะได้

$$[\bar{k}] = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} \cos^2 \phi_x & \cos \phi_x \cos \phi_y & -\cos^2 \phi_x & -\cos \phi_x \cos \phi_y \\ \cos \phi_x \cos \phi_y & \cos^2 \phi_y & -\cos \phi_x \cos \phi_y & -\cos^2 \phi_y \\ -\cos^2 \phi_x & -\cos \phi_x \cos \phi_y & \cos^2 \phi_x & \cos \phi_x \cos \phi_y \\ -\cos \phi_x \cos \phi_y & -\cos^2 \phi_y & \cos \phi_x \cos \phi_y & \cos^2 \phi_y \end{bmatrix}$$

$$[\bar{k}_1] = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & v_3 & v_4 & v_5 & v_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8 & -0.4 & 0 & -0.8 & 0.4 \\ 0 & -0.4 & 0.2 & 0 & 0.4 & -0.2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.8 & 0.4 & 0 & 0.8 & -0.4 \\ 0 & 0.4 & -0.2 & 0 & -0.4 & 0.2 \end{bmatrix} \begin{matrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \\ s_5 \\ s_6 \end{matrix}$$

เนื่องจาก v_1 v_2 v_3 สำหรับทุกชิ้นส่วนมีค่าเป็นศูนย์ดังนั้นอาจเขียนย่อ สติเฟนสของแต่ละชิ้นส่วนได้เป็นดังนี้

$$[\bar{k}_1] = EA \begin{bmatrix} v_4 & v_5 & v_6 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0894 & -0.0447 \\ 0 & -0.0447 & 0.0224 \end{bmatrix} \begin{matrix} s_4 \\ s_5 \\ s_6 \end{matrix}$$

$$[\bar{k}_2] = EA \begin{bmatrix} v_4 & v_5 & v_6 \\ 0.0093 & -0.0247 & 0.0155 \\ 0.0247 & 0.066 & -0.0412 \\ 0.0155 & -0.0412 & 0.0258 \end{bmatrix} \begin{matrix} s_4 \\ s_5 \\ s_6 \end{matrix}$$

$$[\bar{k}_3] = EA \begin{bmatrix} v_4 & v_5 & v_6 \\ 0.0256 & -0.064 & 0 \\ -0.064 & 0.16 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} s_4 \\ s_5 \\ s_6 \end{matrix}$$

$$[\bar{k}_4] = EA \begin{matrix} & v_4 & v_5 & v_6 \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0898 & 0.0082 \\ 0 & 0.0082 & 0.0007 \end{bmatrix} & \begin{matrix} s_4 \\ s_5 \\ s_6 \end{matrix} \end{matrix}$$

นำค่าสติฟเนสของชิ้นส่วนในระบบแกนร่วมกันของแต่ละชิ้นส่วนมารวมกันจะได้เป็นค่าสติฟเนสของโครงสร้างในระบบแกนร่วม

$$[K^*] = \sum_{m=1}^4 [\bar{k}] = EA \begin{matrix} & v_4 & v_5 & v_6 \\ \begin{bmatrix} 0.0349 & -0.0887 & 0.0155 \\ -0.0887 & 0.4052 & -0.0777 \\ 0.0155 & -0.0777 & 0.0489 \end{bmatrix} & \begin{matrix} s_4 \\ s_5 \\ s_6 \end{matrix} \end{matrix}$$

เมื่อได้ค่าสติฟเนสของโครงสร้างจะสามารถหาระยะเคลื่อนที่ในแนวแกน x แกน y และ แกน z ได้

$$\{P\} = [K] \{U\} \quad \text{โดยที่} \quad \{P^*\} = \begin{Bmatrix} 1000 \\ -2000 \\ 2000 \end{Bmatrix}$$

$$\{U^*\} = [K^*]^{-1} \{P^*\} = \begin{Bmatrix} 2.8517 \times 10^{-3} \\ 9.3845 \times 10^{-4} \\ 3.4236 \times 10^{-3} \end{Bmatrix}$$

จากนั้นหาแรงภายในแต่ละชิ้นส่วนได้จากสมการที่ 8 $\{S\} = [k] [a] \{u\}$ จะได้

$$\{S_1\} = \frac{1.442 \times 10^7}{8.9943} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0.8944 & -0.5051 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8944 & -0.5051 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2.8517 \times 10^{-3} \\ 9.3845 \times 10^{-4} \\ 3.4236 \times 10^{-3} \end{Bmatrix}$$

$$\{S_1\} = \frac{1.422 \times 10^7}{8.9443} \begin{Bmatrix} 6.917 \times 10^{-4} \\ -6.917 \times 10^{-4} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1115.159 \\ -1115.159 \end{Bmatrix}$$

4310211 CE
TA
647
ท 2289.

4310211
TA
647
ท 2289
2541

$$\{S_2\} = \frac{1.442 \times 10^7}{9.8995} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.303 & 0.8081 & -0.5051 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.303 & 0.8081 & -0.5051 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2.8517 \times 10^{-3} \\ 9.3845 \times 10^{-4} \\ 3.4236 \times 10^{-3} \end{Bmatrix}$$

$$\{S_2\} = \frac{1.442 \times 10^7}{9.8995} \begin{bmatrix} 1.835 \times 10^{-3} \\ -1.835 \times 10^{-3} \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} 2672.933 \\ -2672.933 \end{Bmatrix}$$

$$\{S_3\} = \frac{1.442 \times 10^7}{5.3852} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.3714 & 0.9285 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.3714 & 0.9285 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2.8157 \times 10^{-3} \\ 9.3845 \times 10^{-4} \\ 3.4236 \times 10^{-3} \end{Bmatrix}$$

$$\{S_3\} = \frac{1.442 \times 10^7}{5.3852} \begin{bmatrix} 1.878 \times 10^{-4} \\ -1.878 \times 10^{-4} \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} 495.899 \\ -495.899 \end{Bmatrix}$$

$$\{S_4\} = \frac{1.442 \times 10^7}{11.0454} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0.9959 & 0.0905 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9959 & 0.0905 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2.815 \times 10^{-3} \\ 9.3845 \times 10^{-4} \\ 3.4236 \times 10^{-3} \end{Bmatrix}$$

$$\{S_4\} = \frac{1.442 \times 10^7}{11.0454} \begin{bmatrix} -1.244 \times 10^{-3} \\ 1.244 \times 10^{-3} \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} -1624.068 \\ 1624.068 \end{Bmatrix}$$

แรงที่จุดรองรับสามารถหาได้จากสมการที่ 4 ค่าที่ได้จะเป็นค่า s_1-s_6 โดยค่า s_1-s_3 จะเป็นแรงที่จุดรองรับ และค่า s_4-s_6 จะเป็นแรงที่กระทำต่อชิ้นส่วน

$$\{\bar{S}_1\} = [a]^T \{S\} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.8944 & 0 \\ -0.4472 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0.8944 \\ 0 & -0.4472 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1115.159 \\ -1115.159 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 997.398 \\ -498.699 \\ 0 \\ -997.398 \\ 498.699 \end{Bmatrix}$$

$$\{\bar{S}_2\} = \begin{bmatrix} -0.303 & 0 \\ 0.8081 & 0 \\ -0.5051 & 0 \\ 0 & -0.303 \\ 0 & 0.8081 \\ 0 & -0.5051 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 2672.933 \\ -2672.933 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -809.898 \\ 215.997 \\ -1350.098 \\ 809.898 \\ -215.997 \\ 1350.098 \end{Bmatrix}$$

$$\{\bar{S}_3\} = \begin{bmatrix} -0.3714 & 0 \\ 0.9285 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -0.3714 \\ 0 & 0.9285 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 495.889 \\ -495.899 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -184.172 \\ 460.4422 \\ 0 \\ 184.176 \\ -460.4422 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\{\bar{S}_4\} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.9959 & 0 \\ 0.0905 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0.9959 \\ 0 & 0.0905 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -1624.068 \\ 1624.068 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -1617.409 \\ -146.978 \\ 0 \\ 1617.409 \\ 146.978 \end{Bmatrix}$$

ในตัวอย่างที่นำเสนอไปนี้เป็นวิธีการคำนวณตามขั้นตอนที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 และที่จะกล่าวถึงต่อไปเป็นการคำนวณโครงสร้างเดียวกันด้วยโปรแกรม STADD-III โดยผลการคำนวณในที่นี้เป็นรูปแบบของโปรแกรม STAAD-III ซึ่งได้แสดงเป็นรายงานผลการวิเคราะห์ ดังต่อไปนี้

* *
 * STAAD - III *
 * Revision 19.0a *
 * Proprietary Program of *
 * RESEARCH ENGINEERS, Inc. *
 * Date= FEB 22, 1999 *
 * Time= 21:35:37 *
 * *
 * USER ID: *

1. STAAD SPACE
2. INPUT WIDTH 72
3. UNIT METER KG
4. JOINT COORDINATES
5. 10.0.4.; 20.8.0.; 33.0.5.; 42.3.0.; 50.-3.-1.
6. MEMBER INCIDENCES
7. 1 1 2; 2 3 2; 3 4 2; 4 5 2
8. MEMBER PROPERTY AMERICAN
9. 1 TO 4 PRI YD 0.03
10. MEMBER TRUSS
11. 1 TO 4
12. UNIT CM KG
13. CONSTANTS
14. E 2039996.38 ALL
15. SUPPORTS
16. 1 3 TO 5 PINNED
17. LOAD 1 POINTLOAD

18. JOINT LOAD

19. 2 FX 1000. FY -2000. FZ 2000.

20. PERFORM ANALYSIS

PROBLEM STATISTICS

NUMBER OF JOINTS/MEMBER+ELEMENTS/SUPPORTS = 5/ 4/ 4

ORIGINAL/FINAL BAND-WIDTH = 3/ 3

TOTAL PRIMARY LOAD CASES = 1, TOTAL DEGREES OF FREEDOM = 18

SIZE OF STIFFNESS MATRIX = 270 DOUBLE PREC. WORDS

REQUIRED DISK SPACE = 12.01 MB, TOTAL EXMEM = 2.05 MB

++ PROCESSING ELEMENT STIFFNESS MATRIX. 21:35:37
 ++ PROCESSING GLOBAL STIFFNESS MATRIX. 21:35:37
 ++ PROCESSING TRIANGULAR FACTORIZATION. 21:35:37
 ++ CALCULATING JOINT DISPLACEMENTS. 21:35:37
 ++ CALCULATING MEMBER FORCES. 21:35:37

21. LOAD LIST ALL

22. PRINT JOINT DISPLACEMENTS ALL

JOINT DISPLACEMENT (CM RADIANS) STRUCTURE TYPE = SPACE

JOINT	LOAD	X-TRANS	Y-TRANS	Z-TRANS	X-ROTAN	Y-ROTAN	Z-ROTAN
1	1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2	1	0.28736	0.09466	0.34355	0.00000	0.00000	0.00000

3	1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
4	1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
5	1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

***** END OF LATEST ANALYSIS RESULT *****

23. PRINT MEMBER FORCES ALL

MEMBER END FORCES STRUCTURE TYPE = SPACE

ALL UNITS ARE -- KG CM

MEMB	LOAD	JT	AXIAL	SHEAR-Y	SHEAR-Z	TORSION	MOM-Y	MOM-Z
1	1	1	1112.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		2	-1112.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1	3	2681.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		2	-2681.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	1	4	504.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		2	-504.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	1	5	-1636.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		2	1636.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

***** END OF LATEST ANALYSIS RESULT *****

24. PRINT SUPPORT REACTIONS

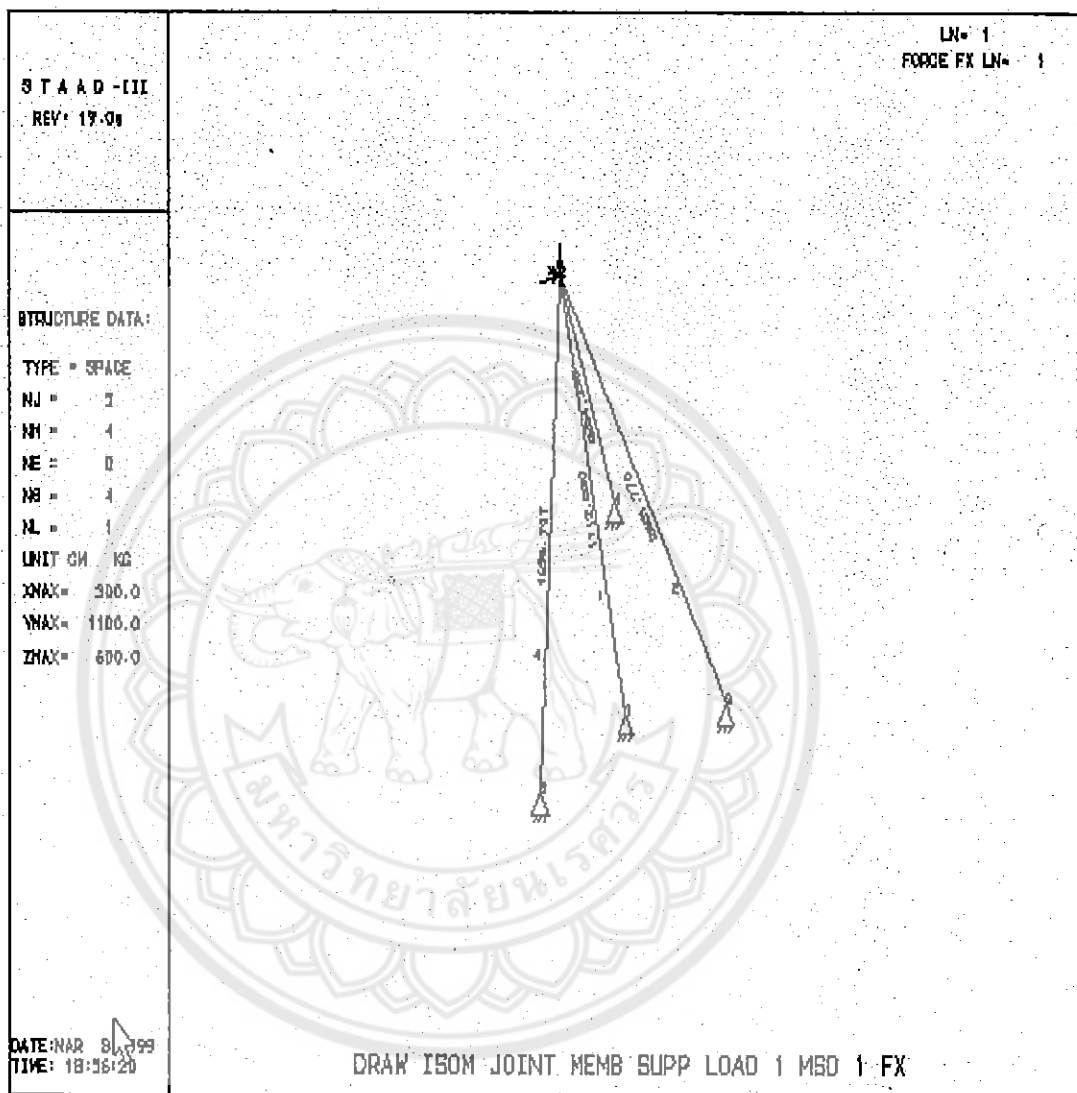
SUPPORT REACTIONS -UNIT KG CM STRUCTURE TYPE = SPACE

JOINT	LOAD	FORCE-X	FORCE-Y	FORCE-Z	MOM-X	MOM-Y	MOM Z
1	1	0.00	994.62	-497.31	0.00	0.00	0.00
3	1	-812.70	2167.20	-1354.50	0.00	0.00	0.00
4	1	-187.30	468.25	0.00	0.00	0.00	0.00
5	1	0.00	-1630.07	-148.19	0.00	0.00	0.00

***** END OF LATEST ANALYSIS RESULT *****



25. DRAW ISOM JOINT MEMB SUPP LOAD 1 MSD 1FX



26. FINISH

***** END OF STAAD-III *****

**** DATE= FEB 22,1999 TIME= 21:35:38 ****

* For questions on STAAD-III/ISDS, contact: *

* RESEARCH ENGINEERS, Inc at *

* Ph: (714) 974-2500 Fax: (714) 974-4771 *

และในบรรทัดต่างๆจะเป็นคำสั่งการทำงานของโปรแกรม STAAD-III โดยจะอธิบายคำสั่งแต่ละคำสั่งสำหรับตัวอย่างนี้ ดังนี้

ในบรรทัดที่ 1 จะบอกว่าตัวอย่างที่วิเคราะห์เป็นโครงสร้างประเภทใด เช่น 2 มิติ หรือ 3 มิติ (ในที่นี้เป็น 3 มิติ)

บรรทัดที่ 2 จะบอกว่าใน 1 บรรทัดจะมีตัวอักษรได้ 72 ตัว

บรรทัดที่ 3 จะบอกหน่วยที่ใช้ คือ เมตร และ กิโลกรัม

บรรทัดที่ 4,5 จะบอกโคออร์ดิเนตของข้อต่อต่างๆ

บรรทัดที่ 6,7 จะบอกลักษณะและทิศทางของชิ้นส่วนต่างๆ

บรรทัดที่ 8,9 จะบอกคุณสมบัติของชิ้นส่วนต่างๆ เช่น พื้นที่หน้าตัด เป็นต้น

บรรทัดที่ 10,11 จะบอกลักษณะพิเศษของชิ้นส่วนต่างๆ (ในที่นี้ หมายถึง เป็นชิ้นส่วน

โครงข้อหมุน)

บรรทัดที่ 13,14 จะบอกค่าคงที่ของชิ้นส่วนต่างๆ เช่น ค่าอีลาสติกโมดูลัส

บรรทัดที่ 15,16 จะบอกลักษณะของจุดรองรับต่างๆ

บรรทัดที่ 17,18,19 จะบอกน้ำหนักและทิศทางที่กระทำต่อชิ้นส่วนหรือข้อต่อ

บรรทัดที่ 20,21,22,23,24 จะเป็นคำสั่งให้วิเคราะห์โครงสร้างโดยจะแสดงผลที่ได้ใน

แบบต่างๆ

บรรทัดที่ 25 จะเป็นคำสั่งให้แสดงผลที่เป็นกราฟิก

ได้ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธี ได้ค่าดังนี้

ระยะเคลื่อนที่ของข้อต่อ

ข้อต่อ	โปรแกรม STAAD-III	การรวมสถิติเฟสโดยตรง	ค่าความคลาดเคลื่อน
แกน X	0.28736 cm	0.28157 cm	+0.00219 cm
แกน Y	0.09466 cm	0.09385 cm	+0.00081 cm
แกน Z	0.34355 cm	0.34236 cm	+0.00119 cm

แรงภายในชิ้นส่วนแต่ละชิ้นส่วน

ชิ้นส่วน	โปรแกรม STAAD-III	การรวมสถิติเฟสโดยตรง	ค่าความคลาดเคลื่อน
1	1112.02 kg	1115.16 kg	-3.14 kg
2	2681.77 kg	2672.93 kg	+8.84 kg
3	504.32 kg	495.9 kg	+8.42 kg
4	1636.79 kg	1624.07 kg	+12.72 kg

แรงที่จุดรองรับ

ข้อต่อ	แนวแกน	โปรแกรม STAAD-III	การรวมสถิติเฟสโดยตรง	ค่าความคลาดเคลื่อน
1	X	0 kg	0 kg	0 kg
	Y	994.62 kg	997.4 kg	-2.78 kg
	Z	-497.31 kg	-498.7 kg	-1.39 kg
2	X	-812.7 kg	-810 kg	+2.7 kg
	Y	+2167.2 kg	+2160 kg	+7.2 kg
	Z	-1354.5 kg	-1350.1 kg	+4.4 kg
3	X	-187.3 kg	-184.18 kg	+3.12 kg
	Y	+468.25 kg	+460.4 kg	+7.85 kg
	Z	0 kg	0 kg	0 kg
4	X	0 kg	0 kg	0 kg
	Y	-1630.07 kg	-1617.4 kg	+12.67 kg
	Z	-148.19 kg	-147 kg	+1.19 kg

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม STAAD-III และผลจากการวิเคราะห์โดยการรวม
สถิติเนตโดยตรงจะได้ผลที่ใกล้เคียงกันมาก

ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเกิดมาจากการปัดเศษทศนิยม หรือความละเอียดของ
ตำแหน่งทศนิยม



ตัวอย่างที่ 2

วิเคราะห์โครงสร้างโครงหลังคา กว้าง 31 m ยาว 32 m มีโครง Truss อยู่ 9 ช่วงดังแสดง
 ในรูปที่ 4-2 และ รูปที่ 4-3 โดยใช้วัสดุเหล็กจากแบบขาเท่ากับ 2 อัน

เหล็กดัดตั้ง และเหล็กดัดเอียง ใช้เหล็กขนาด 2L40x40x3

มีคุณสมบัติดังนี้ น้ำหนัก 3.669 kg/m พื้นที่ภาคตัดขวาง 4.672 cm²

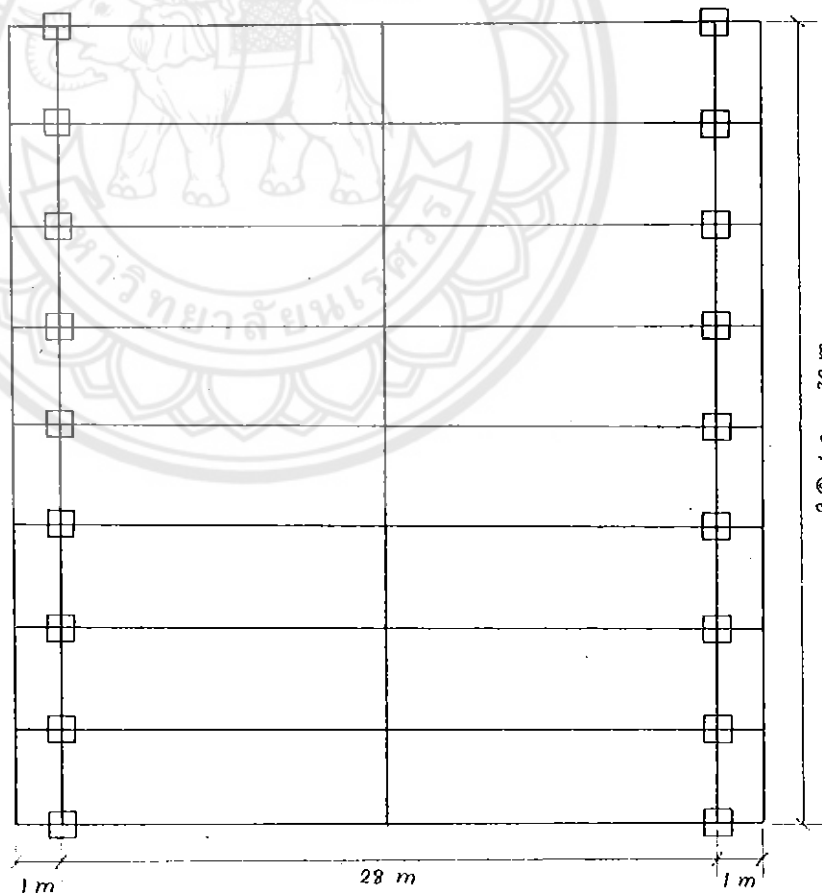
เหล็กบน และเหล็กล่าง ใช้เหล็กขนาด 2L50x50x6

มีคุณสมบัติดังนี้ น้ำหนัก 8.866 kg/m พื้นที่ภาคตัดขวาง 11.288 cm²

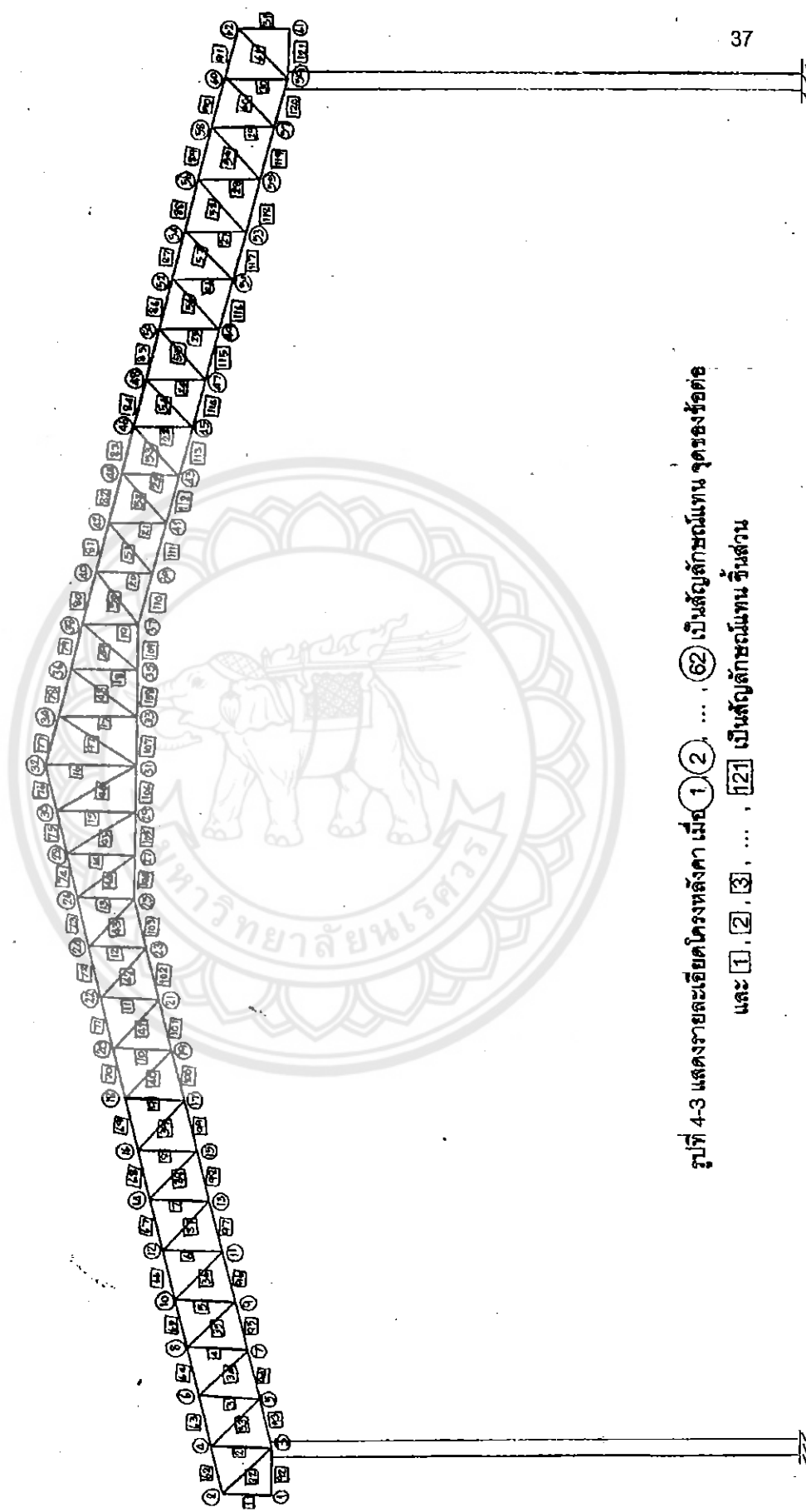
หลังคามีความชัน วัสดุผนังหลังคาใช้กระเบื้องแผ่น เรียบ มีน้ำหนัก 20 กก./ม² โดย
 วิเคราะห์ในกรณีต่างๆ ดังนี้

กรณีที่ 1 เป็นแรงเฉพาะน้ำหนักคงที่กับน้ำหนักจร (DL+LL)

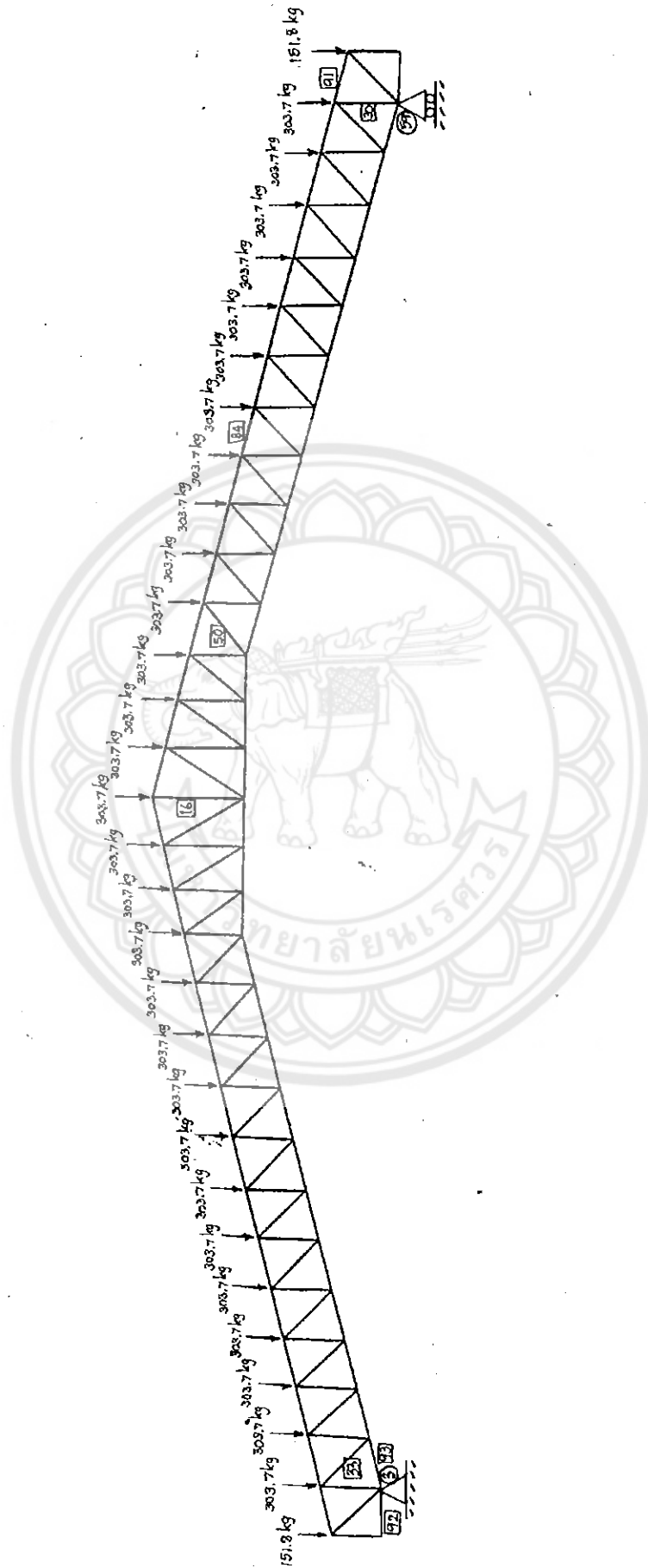
กรณีที่ 2 เป็นแรงที่มีแรงลมกระทำที่ด้านซ้ายของโครงสร้าง 0.75 (DL+LL+W_L)



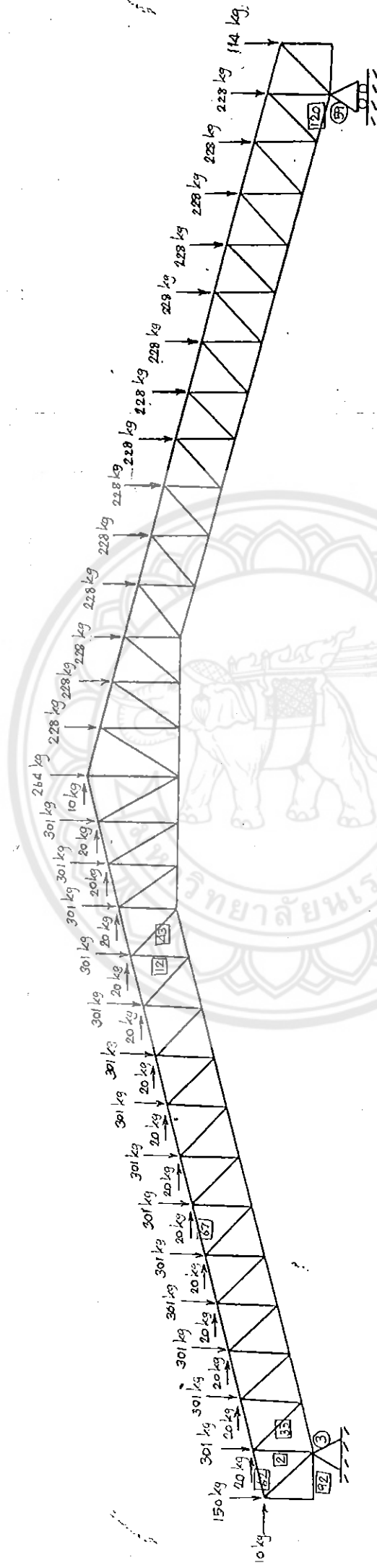
รูปที่ 4-2 แสดงภาพด้านบนของโครงหลังคา



รูปที่ 4-3 แสดงรายละเอียดโครงหลังคา เมื่อ 1, 2, ..., 62 เป็นสัญลักษณ์แทน จุดตรงข้อต่อ และ 1, 2, 3, ..., 121 เป็นสัญลักษณ์แทน ชิ้นส่วน



รูปที่ 4-4 แสดงแรงที่มากระทำกับโครงหลังคาโมเมนต์ที่ 1 : (DL+LL)



รูปที่ 4-5 แสดงแรงที่มากกระทำกับโครงหลังคาในกรณีนี้ 2 : (DL+LL+W_L)

วิธีการคำนวณแรงที่กระทำต่อโครงหลังคา

ความยาวของเหล็กบนเท่ากับ $\frac{15 \times 2}{\cos 15^\circ} = 31.06 \text{ m}$

ความยาวของเหล็กล่างเท่ากับ $8 + \left(\frac{11 \times 2}{\cos 15^\circ}\right) = 30.78 \text{ m}$

ความยาวของเหล็กลูกตั้งเท่ากับ

$$(12 \times 2) + (0.73 \times 2) + [(1 + \tan 15^\circ) \times 2] + [(1 + 2 \tan 15^\circ) \times 2] + [(1 + 3 \tan 15^\circ)] = 32.87 \text{ m}$$

ความยาวของเหล็กลูกเอียงเท่ากับ

$$\left(\sqrt{(0.73^2 + 1^2)} \times 24\right) + \left(\sqrt{(1^2 + 1^2)} \times 2\right) + \left(\sqrt{(1.27^2 + 1^2)} \times 2\right) + \left(\sqrt{(1.54^2 + 1^2)} \times 2\right) = 39.44 \text{ m}$$

น้ำหนักของโครงสร้างเท่ากับ

เหล็กบน $31.06 \times 8.866 = 275.38 \text{ kg}$

เหล็กล่าง $30.78 \times 8.866 = 272.90 \text{ kg}$

เหล็กลูกตั้ง $32.87 \times 3.669 = 120.6 \text{ kg}$

เหล็กลูกเอียง $39.44 \times 3.669 = 144.71 \text{ kg}$

น้ำหนักทั้งหมดเท่ากับ 813.59 kg

น้ำหนักที่แต่ละข้อต่อเท่ากับ $813.59/31 = 26.24 \text{ kg}$

จากข้อบัญญัติน้ำหนักบนโครงหลังคาเท่ากับ 50 kg/m^2

น้ำหนักที่ลงบนข้อต่อเท่ากับ $4 \times 1 \times 50 = 200 \text{ kg}$

น้ำหนักที่ลงที่ปลายขอบเท่ากับ $200/2 = 100 \text{ kg}$

น้ำหนักของกระเบื้องมุงหลังคา $20 \times 4 \times 30 = 2400 \text{ kg}$

น้ำหนักของกระเบื้องที่กระทำที่ข้อต่อ $\frac{2400}{31} = 77.42 \text{ kg}$

โดยน้ำหนักที่กระทำในกรณีที่ 1 (DL+LL) จะได้ดังนี้

น้ำหนักทั้งหมดที่กระทำบนข้อต่อโครงสร้างด้านในเท่ากับ $26.24 + 200 + 77.42 = 303.66 \text{ kg}$

น้ำหนักทั้งหมดที่กระทำบนข้อต่อโครงสร้างด้านนอกเท่ากับ $303.66/2 = 151.83 \text{ kg}$

จะแสดงในรูปที่ 4-4

จากข้อบัญญัติของแรงลมสำหรับโครงสร้างที่สูงไม่เกิน 10 ม. เท่ากับ 50 kg./m^2
แรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างด้านซ้ายในแนวแกน X จะหาได้จากจากสูตรของ Duchmin Formular

$$P_u = \frac{2P \sin \phi}{1 + \sin^2 \phi} = \frac{2 \times 50 \times \sin 15^\circ}{1 + \sin^2 15^\circ} = 24.26 \text{ kg}$$

แรงในแนวแกน X

$$P = 24.26 \times 4 \times 0.27 \times \tan 15^\circ \\ = 7.02 \text{ kg}$$

ที่ปลายโครงสร้างเท่ากับ $7.02/2 = 3.51 \text{ kg}$

แรงในแนวแกน Y

$$P = 24.26 \times 1 \times 4 \\ = 97.04 \text{ kg}$$

ที่ปลายโครงสร้างเท่ากับ $97.04/2 = 48.52 \text{ kg}$

น้ำหนักที่กระทำในกรณีนี้ที่ 2 เท่ากับ $0.75 \times (DL + LL + WL_L)$

แรงในแนวแกน Y

$$\text{น้ำหนักที่กระทำต่อโครงสร้างด้านซ้ายในแนวแกน Y} = 0.75 \times (103.66 + 200 + 97.04) \\ = 300.525 \text{ kg}$$

ที่ปลายโครงสร้างเท่ากับ $300.525/2 = 150.263 \text{ kg}$

$$\text{น้ำหนักที่กระทำต่อโครงสร้างด้านขวาเท่ากับ} = 0.75 \times (103.66 + 200) \\ = 227.745 \text{ kg}$$

ที่ปลายโครงสร้างเท่ากับ $227.745/2 = 113.873 \text{ kg}$

$$\text{น้ำหนักที่กระทำต่อโครงสร้างที่จุดยอดเท่ากับ} \left[\frac{300.525 + (0.75 \times 303.66)}{2} \right] = 264.135 \text{ kg}$$

จะแสดงในรูปที่ 4-5

แรงในแนวแกน X

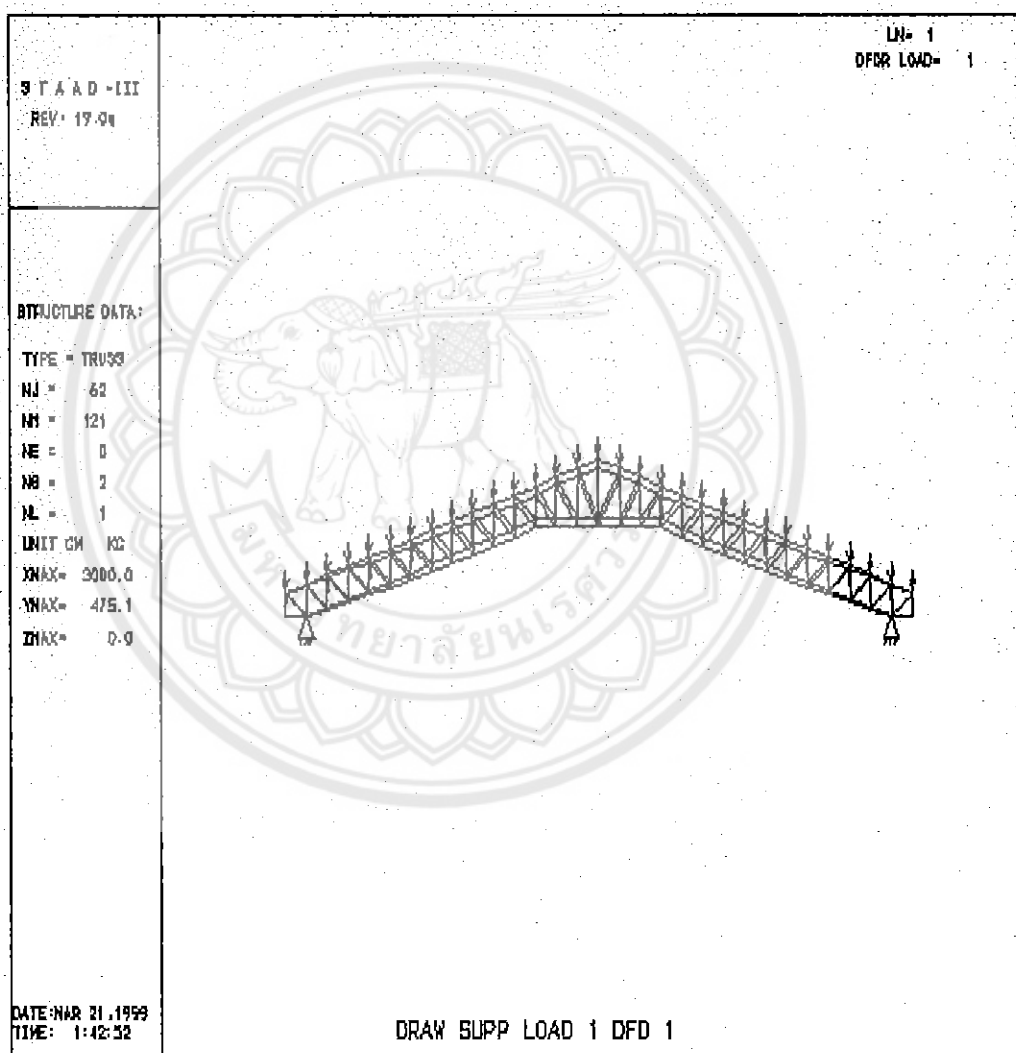
แรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างด้านซ้ายในแนวแกน X

น้ำหนักที่กระทำบนจุดต่อภายในโครงสร้าง $0.75 \times 26 = 19.5 \text{ kg}$

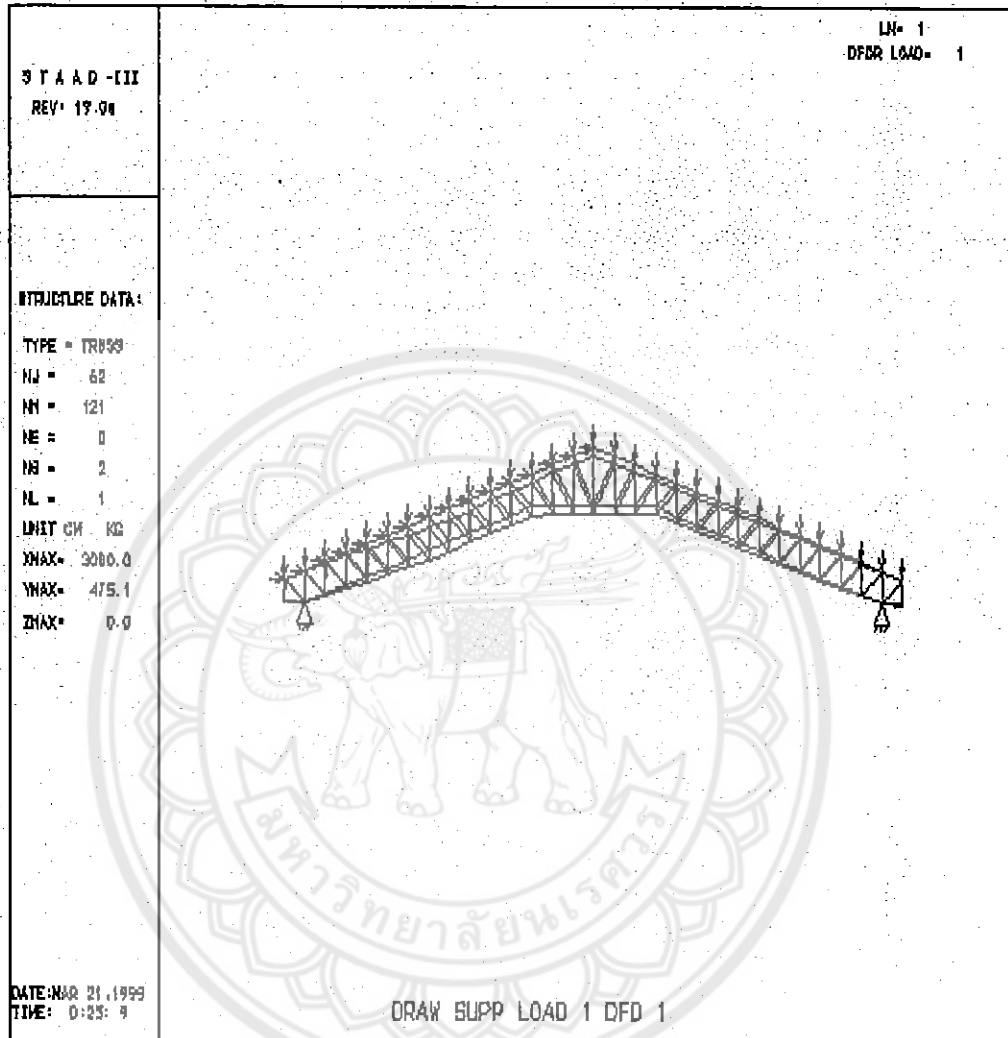
น้ำหนักที่กระทำบนจุดต่อที่ขอบของโครงสร้าง $0.75 \times 13 = 9.75 \text{ kg}$

ลักษณะของการเกิดการโก่งของโครงสร้างที่แสดงโดยโปรแกรม STAAD-III

Load case 1 : (DL+LL)



Load case 2 : (DL+LL+W_L)



เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม STAAD-III และ D-TRUSS1
ระยะเคลื่อนที่ของข้อต่อที่เกิดการเคลื่อนตัวสูงที่สุดของโครงสร้าง

แนวแกน	Load case 1 : (DL+LL)			Load case 2 : 0.75 (DL+LL+W _L)		
	STAAD-III (cm)	D-TRUSS (cm)	ERROR (cm)	STAAD-III (cm)	D-TRUSS (cm)	ERROR (cm)
X	0.11045	0.10726	0.00319	0.16598	0.161175	0.00481
Y	-1.00308	-0.97374	-0.02934	-0.97943	-0.950818	-0.02861

แรงกระทำที่จุดรองรับ

Load case 1 : (DL+LL)

ข้อต่อ	แนวแกน	STAAD-III (kg)	D-TRUSS (kg)	ERROR (kg)
3	X	8346.38	8346.3	0.08
	Y	4554.9	4554.9	0
59	X	-8346.38	-8346.3	-0.08
	Y	4554.9	4554.9	0

Load case 2 : 0.75 (DL+LL+W_L)

ข้อต่อ	แนวแกน	STAAD-III (kg)	D-TRUSS (kg)	ERROR (kg)
3	X	7083.96	7083.9	0.06
	Y	4225.81	4225.8	0.01
59	X	-7376.46	-7376.4	-0.06
	Y	3698.24	3698.2	0.04

แรงภายในของโครงข้อหมุน จะแสดงเฉพาะบางชิ้นส่วนที่เกิดแรงภายในสูงสุด

Load case 1 : (DL+LL)

ตำแหน่ง.	ชิ้นส่วน	STAAD-III (kg)	D-TRUSS (kg)	ERROR (kg)
Vertical Web	16 มีค่า + Max	1184.92	1184.79	0.13
	30 มีค่า - Max	2166.24	2167.1	-0.86
Diagonal Web	33 มีค่า + Max	2308.27	2309.36	-1.09
	50 มีค่า - Max	1454.94	1454.44	0.5
Top Chord	91 มีค่า + Max	154.19	154.196	-0.006
	84 มีค่า - Max	6746.05	6744.28	-1.77
Bottom Chord	92 มีค่า + Max	0.0	0.0	0.0
	93 มีค่า - Max	8798.1	8797.85	0.25

Load Case 2 : 0.75 (DL+LL+W_L)

ตำแหน่ง	ชิ้นส่วน	STADD-III (kg)	D-TRUSS (kg)	ERROR (kg)
Vertical Web	12 มีค่า +Max	883.087	882.526	0.561
	2 มีค่า -Max	2174.43	2175.09	-0.66
Diagonal Web	33 มีค่า +Max	2315.82	2316.77	-0.95
	43 มีค่า -Max	1473.31	1472.5	0.81
Top Chord	62 มีค่า +Max	148.18	148.184	-0.004
	67 มีค่า -Max	6460.47	6463.44	-2.97
Bottom Chord	92 มีค่า +Max	0	0	0
	120 มีค่า - Max	7754.66	7754.42	0.24

ค่าความคลาดเคลื่อนอาจเกิดมาจากตัวโปรแกรมคิดตำแหน่งทศนิยมไม่เท่ากัน

การทำงานของแต่ละโปรแกรม

โปรแกรม D-TRUSS เป็นโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างโครงข้อหมุนโดยเฉพาะ และสามารถเลือกหัวข้อการทำงานต่างๆ ได้ มีทั้งหมด 3 หัวข้อ

1. หัวข้อการออกแบบ (Design) คือ การใส่ข้อมูลต่างๆ ลงไปในโปรแกรม แล้วกำหนดว่าจะใช้วัสดุชนิดใดและใช้กี่ขนาด โดยแบ่งชิ้นส่วนที่ต้องการตามวัสดุที่เลือก แล้ววิเคราะห์ผลก็จะได้น้ำหนักที่ต้องการ การวิเคราะห์และออกแบบนี้จะรวมน้ำหนักของวัสดุด้วย
2. หัวข้อการวิเคราะห์ (Analysis) คือ การใส่ข้อมูลต่างๆ ลงไปในโปรแกรมแต่ต้องกำหนดว่าใช้วัสดุอะไร ขนาดเท่าไร แล้ววิเคราะห์ผล ซึ่งได้ใช้หัวข้อนี้ในการเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม STAAD-III
3. หัวข้อการตรวจสอบ (Re-Check) คือ การใส่ข้อมูลต่างๆ ลงไปในโปรแกรม ในที่นี้จะกำหนดชนิด และ ขนาดของหน้าตัด แล้วทำการวิเคราะห์ผล ถ้าชิ้นส่วนไหนไม่ผ่านข้อกำหนด หรือไม่ถูกต้องตามมาตรฐานการก่อสร้าง จะมีดอกจันอยู่ที่ท้ายของชิ้นส่วนนั้น

การป้อนข้อมูลในโปรแกรม D-TRUSS ทำได้โดยการกำหนดโคออร์ดิเนตข้อต่อของชิ้นส่วนต่างๆ และแรงที่มากระทำกับโครงสร้างในรูปแบบของคำสั่ง เหมือนกับโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างทั่วไป เช่น โปรแกรม MICROFEAP

โปรแกรม D-TRUSS สามารถแสดงกราฟฟิกได้จะแสดงแรงในแนวแกนเป็นกราฟจากโครงสร้าง แสดงการโก่งงอของโครงสร้างได้

โปรแกรม D-TRUSS สามารถวิเคราะห์โครงสร้างที่เป็น 2 มิติ ได้อย่างเดียวไม่สามารถวิเคราะห์โครงสร้างที่เป็น 3 มิติ ได้

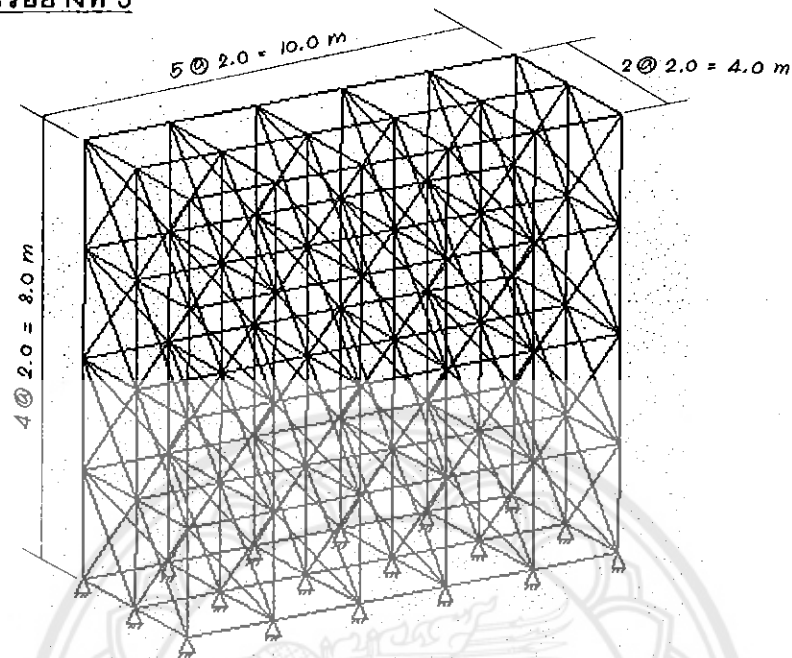
โปรแกรม STAAD-III เป็นโปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างได้เกือบทุกชนิด

การป้อนข้อมูลทำได้ง่ายโดยการใส่ข้อมูลเป็นคำสั่งหรืออาจจะใส่โดยวิธีกราฟฟิกก็ได้ ทำให้การป้อนข้อมูลทำได้ด้วยความรวดเร็ว การป้อนข้อมูลในโปรแกรม STAAD-III จะมีเมนูหลักมาให้ทำให้ไม่สับสนว่าขั้นตอนต่อไปจะทำอะไร โดยทำตามขั้นตอนที่เรียงมาให้ และมีเมนูที่ช่วยในการทำโครงสร้างที่มีความสมมาตร และโครงสร้างที่มีความเหมือนกันหลายๆ รูปได้อย่างรวดเร็ว ถูกต้องด้วย และโปรแกรมนี้สามารถแสดงภาพเคลื่อนไหวได้ทำให้เห็นการโก่งงอของโครงสร้างได้ สามารถแสดงผลในรูปกราฟฟิกที่โปรแกรม D-TRUSS สามารถแสดงได้

โปรแกรมนี้ได้มีการพัฒนาไปจนถึง เวอร์ชันที่ 22 ซึ่งเป็นเวอร์ชันที่สามารถแสดงผลได้เป็นอย่างดี การป้อนข้อมูลจะทำได้ง่ายขึ้นกว่าเวอร์ชัน ที่ใช้อยู่นี้มาก

โปรแกรม STAAD-III จึงถูกเลือกเป็นโปรแกรมที่ใช้งานง่าย สามารถวิเคราะห์โครงสร้างต่างๆ ได้ และสามารถออกแบบแผ่นพื้น ฐานราก กำแพงกันดินก็ได้

ตัวอย่างที่ 3



รูปที่ 4-6 แสดงโครงแผ่นป้ายโฆษณา

วิเคราะห์โครงสร้างป้ายโฆษณาที่มีความกว้าง 10 m สูง 8 m ลึก 4 m แสดงดังในรูปโดยใช้วัสดุเป็นหลักจากแบบขาเท่ากับขนาด L75×75×6 ตลอดทั้งโครงสร้าง โดยข้อบัญญัติแรงลมสำหรับส่วนสูงที่ไม่เกิน 10 m เท่ากับ 50 kg/m^2

วิธีการคำนวณแรง

$$P = 50 \times \text{Area}$$

แรงที่กระทำที่ขอบมุมบนทั้ง 2 ข้างของป้ายโฆษณา (A)

$$P = 50 \times (1 \times 1)$$

$$= 50 \text{ kg}$$

แรงที่กระทำที่ขอบทั้ง 3 ด้านของป้ายโฆษณา (B)

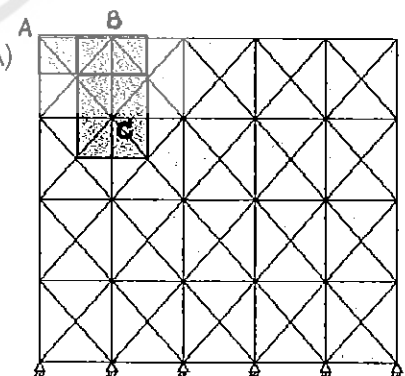
$$P = 50 \times (2 \times 1)$$

$$= 100 \text{ kg}$$

แรงที่กระทำด้านในของป้ายโฆษณา (C)

$$P = 50 \times (2 \times 2)$$

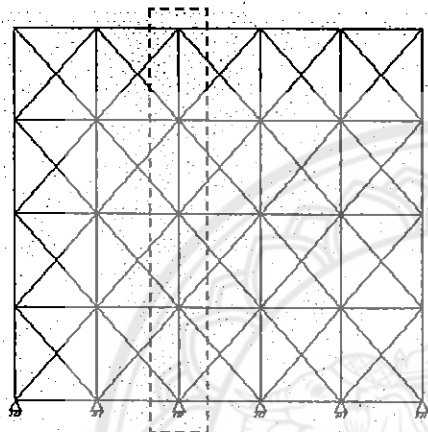
$$= 200 \text{ kg}$$



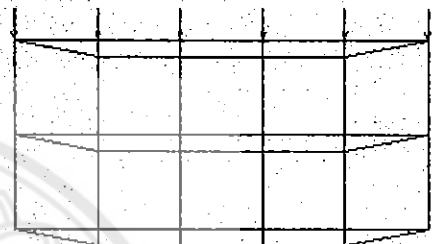
รูปที่ 4-7 แสดงวิธีหาแรงที่กระทำต่อโครงสร้าง

เนื่องจากโปรแกรมที่นำมาเปรียบเทียบกับ โปรแกรม STAAD-III (โปรแกรม D-TRUSS) เป็นโปรแกรมที่คำนวณโครงข้อหมุนโดยเฉพาะแต่สามารถคำนวณได้แค่ 2 มิติ เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องตัดโครงสร้างมาเพียงบางส่วนโดยพิจารณาดังต่อไปนี้

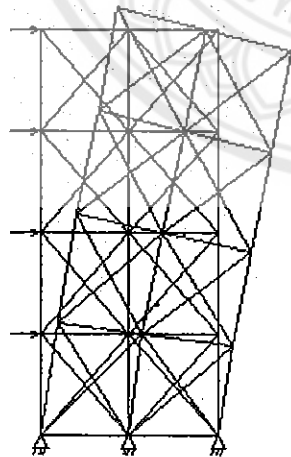
จากรูปที่ 4-8 ขึ้นส่วนตามเส้นประจะเกิดระยะโก่งมากที่สุด (แสดงในรูปที่ 4-9) จึงนำมาพิจารณาเป็นพิเศษ เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับโปรแกรม D-TRUSS



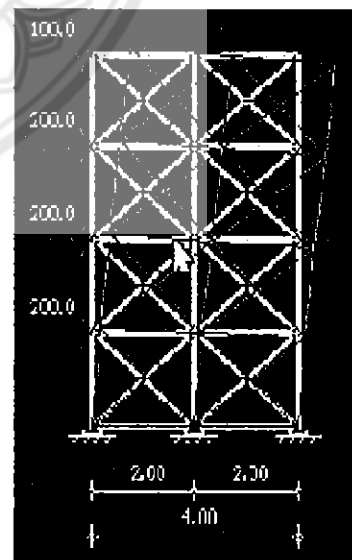
รูปที่ 4-8 แสดงภาพด้านข้างของ
ขึ้นส่วนที่เกิดระยะโก่งมากที่สุด



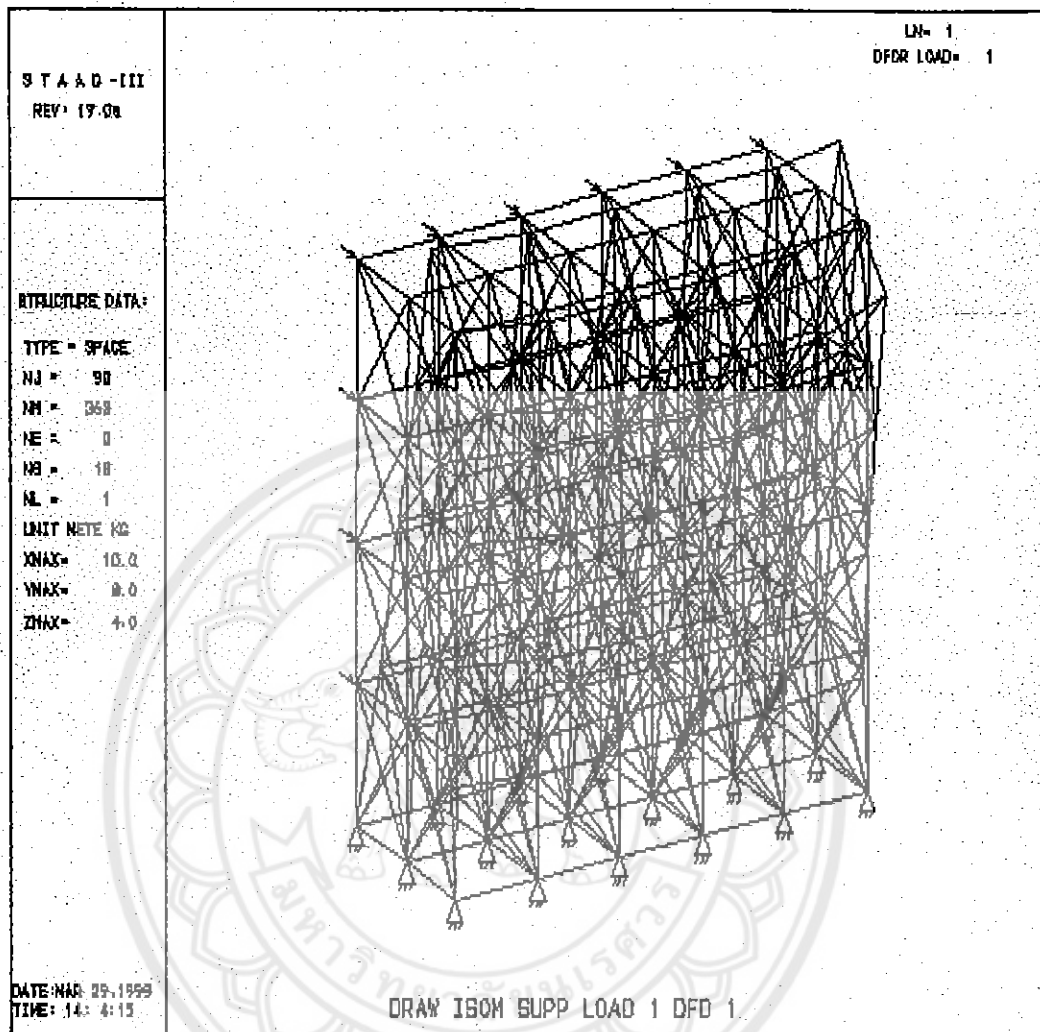
รูปที่ 4-9 แสดงภาพด้านบนของ
ขึ้นส่วนที่เกิดระยะโก่งมากที่สุด



รูปที่ 4-10 แสดงระยะโก่งด้าน
ข้างจาก โปรแกรม STAAD-III



รูปที่ 4-11 แสดงระยะโก่งด้าน
ข้างจาก โปรแกรม D-TRUSS



รูปที่ 4-12 แสดงผลการโก่งตัวของโครงสร้างในรูป 3 มิติ โดยโปรแกรม STAAD-III

ผลการวิเคราะห์ห้ทั้ง 2 โปรแกรม
การเคลื่อนที่ของจุดต่อ

ข้อต่อ	แนวแกน	โปรแกรม STAAD-III (cm)	โปรแกรม D-TRUSS (cm)	ERROR (cm)
1	X	0.00000	0.000000000	0.000000000
	Y	0.00000	0.000000000	0.000000000
2	X	0.00000	0.000000000	0.000000000
	Y	0.00000	0.000000000	0.000000000
3	X	0.00000	0.000000000	0.000000000
	Y	0.00000	0.000000000	0.000000000
4	X	0.00008	0.009356260	0.009276260
	Y	0.00013	0.004815730	0.004685730
5	X	0.00000	0.000764689	0.000764689
	Y	-0.00010	-0.001366040	-0.001266040
6	X	0.00007	0.008996950	0.008926950
	Y	-0.00011	-0.007231970	-0.007121970
7	X	0.00012	0.020733700	0.020613700
	Y	0.00027	0.007329250	0.007059250
8	X	0.00000	0.019594300	0.019594300
	Y	-0.00025	-0.002218150	-0.000968150
9	X	0.00011	0.019959600	0.019849600
	Y	-0.00025	-0.011429900	-0.011179900
10	X	0.00014	0.033151700	0.033011700
	Y	0.00042	0.008215970	0.007795970
11	X	0.00001	0.032088800	0.032078800
	Y	-0.00040	-0.002582900	-0.002182900
12	X	0.00012	0.032021000	0.031901000
	Y	-0.00040	-0.013236300	-0.012836300
13	X	0.00014	0.044502500	0.044362500
	Y	0.00056	0.008449100	0.007889100

ข้อต่อ	แนวแกน	โปรแกรม STAAD-III (cm)	โปรแกรม D-TRUSS (cm)	ERROR (cm)
14	X	0.00001	0.04390010	0.04389010
	Y	-0.00055	-0.00257398	-0.00502398
15	X	0.00013	0.04390010	0.04377010
	Y	-0.00054	-0.01367860	-0.01313860

แรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับ

ข้อต่อ	แนวแกน	โปรแกรม STAAD-III (kg)	โปรแกรม D-TRUSS (kg)	ERROR (kg)
1	X	-243.49	-203.55	-39.94
	Y	-776.32	-621.58	-154.74
	Z	-2.78	ไม่แสดง	ไม่แสดง
2	X	-213.20	-204.35	-8.85
	Y	35.14	255.13	219.99
	Z	0.22	ไม่แสดง	ไม่แสดง
3	X	-243.31	-292.10	-48.79
	Y	747.13	978.42	231.29
	Z	2.21	ไม่แสดง	ไม่แสดง

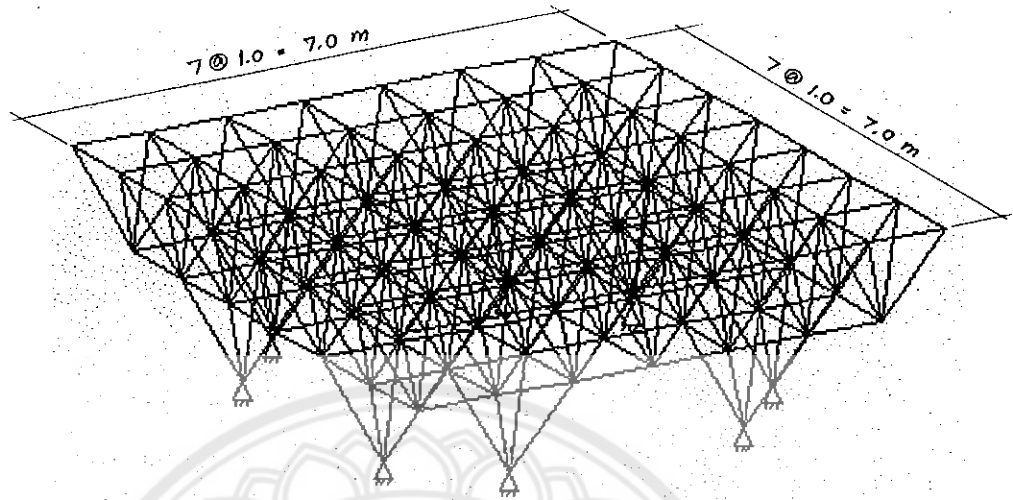
แรงในชิ้นส่วน

ตำแหน่ง	ชิ้นส่วน	โปรแกรม STAAD-III (kg)	โปรแกรม D-TRUSS (kg)	ERROR (kg)
Vertical Web	01 มีค่า +Max	535.61	441.433	94.177
	09 มีค่า -Max	-505.93	-662.919	-156.989
Horizontal Web	19 มีค่า +Max	69.26	123.753	54.493
	14 มีค่า -Max	-198.40	-156.690	-41.71
Diagonal Web	23 มีค่า +Max	344.35	287.867	56.483
	35 มีค่า -Max	-344.10	-413.085	-68.985

จะเห็นว่า ค่าความคลาดเคลื่อนในตัวแบบนี้มากกว่าตัวอย่างที่แล้วมา เพราะโปรแกรม D-TRUSS เป็นโปรแกรมที่คิด 2 มิติ แต่โปรแกรม STAAD-III เป็นโปรแกรมที่คิด 3 มิติ น้ำหนักที่กระทำจึงถ่ายไปทั้งโครงสร้าง ดังนั้นค่าที่ได้จากโปรแกรม STAAD-III น่าที่จะให้ค่าที่ใกล้เคียงความจริงมากกว่า



ตัวอย่างที่ 4



รูปที่ 4-13 แสดงโครงสร้างโครงหลังคา

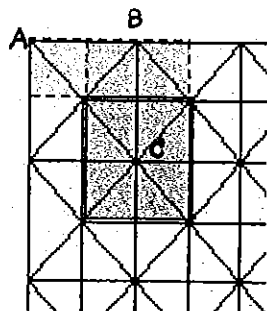
วิเคราะห์โครงสร้างโครงหลังคา 3 มิติ สี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังรูปที่ 4-13 ใช้วัสดุเหล็กกลวงรูปวงกลม 40 (Circular Tube 40) ซึ่งมีน้ำหนัก 3.25 kg/m และใช้น้ำหนักบรรทุกจรของหลังคาจากข้อบัญญัติ 50 kg/m²

จากรูปที่ 4-13 ความยาวทั้งหมดของเหล็กกลวง = $(112 \times 1) + (84 \times 1) + 1.225[(49 \times 4) + 32]$
 = 475.3 m

น้ำหนักของโครงหลังคา = $3.25 \times 475.3 = 1544.725$ kg

ดังนั้น น้ำหนักคงที่ (Dead Load) กระทำต่อ 1 ข้อต่อ = $\frac{1544.725}{64} = 24.14$ kg

พิจารณาน้ำหนักบรรทุกจรเพื่อทำเป็นแบบจุดกระทำที่ข้อต่อด้านบน



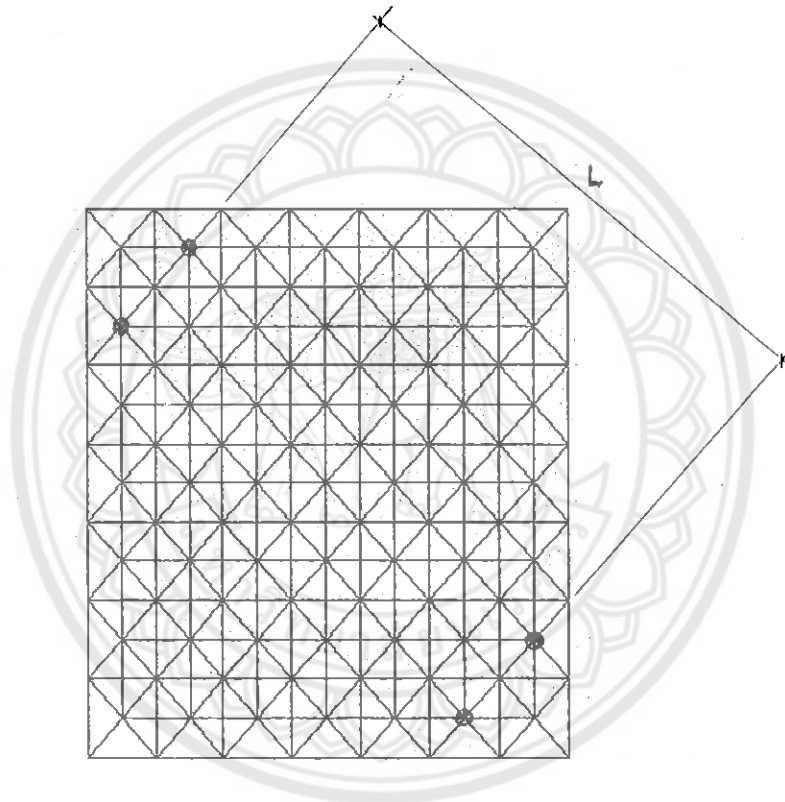
น้ำหนักกระทำที่จุด A (มุม) = $50 \times 0.5 \times 0.5$
 = 12.5 kg

น้ำหนักกระทำที่จุด B (ขอบ) = $50 \times 0.5 \times 1.0$
 = 25.0 kg

น้ำหนักกระทำที่จุด C (ภายใน) = $50 \times 1.0 \times 1.0$
 = 50.0 kg

รูปที่ 4-14 แสดงการคิดพื้นที่ของน้ำหนักกระทำ

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น น้ำหนักทั้งหมดที่กระทำที่จุด A (มุม)} &= 24.14 + 12.5 \\
 &= 36.64 \text{ kg} \\
 \text{น้ำหนักทั้งหมดที่กระทำที่จุด B (ขอบ)} &= 24.14 + 25.0 \\
 &= 49.14 \text{ kg} \\
 \text{น้ำหนักทั้งหมดที่กระทำที่จุด C (ภายใน)} &= 24.14 + 50.0 \\
 &= 74.14 \text{ kg}
 \end{aligned}$$



รูปที่ 4-15 แสดงระยะ L ที่ใช้

จากมาตรฐาน AISC / ASD / LRFD กำหนดให้มีระยะโก่งตัวสูงสุดไม่เกิน $L/180$

เมื่อ L คือระยะห่างระหว่างเสา (cm)

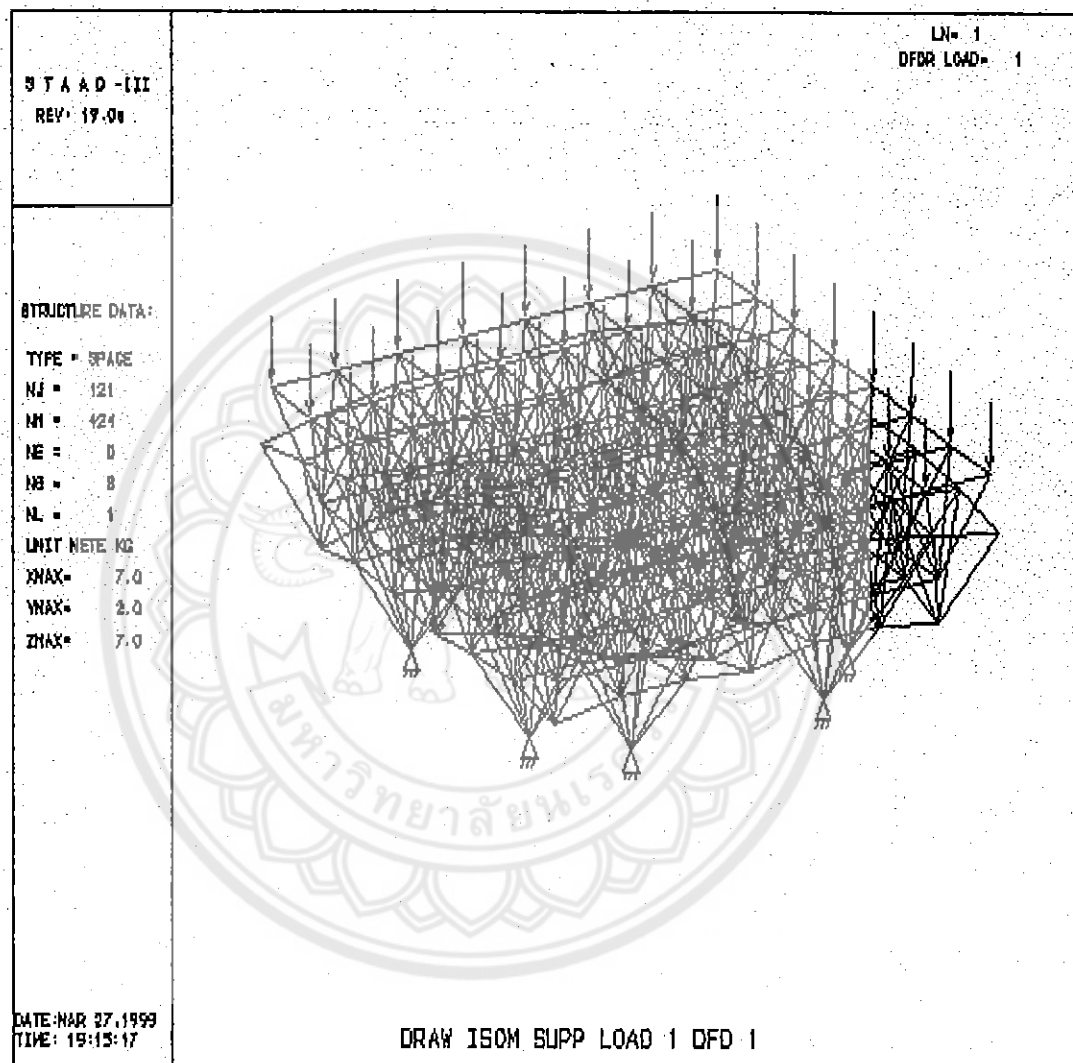
$$L = \sqrt{(500^2 + 500^2)}$$

$$= 707.11 \text{ cm}$$

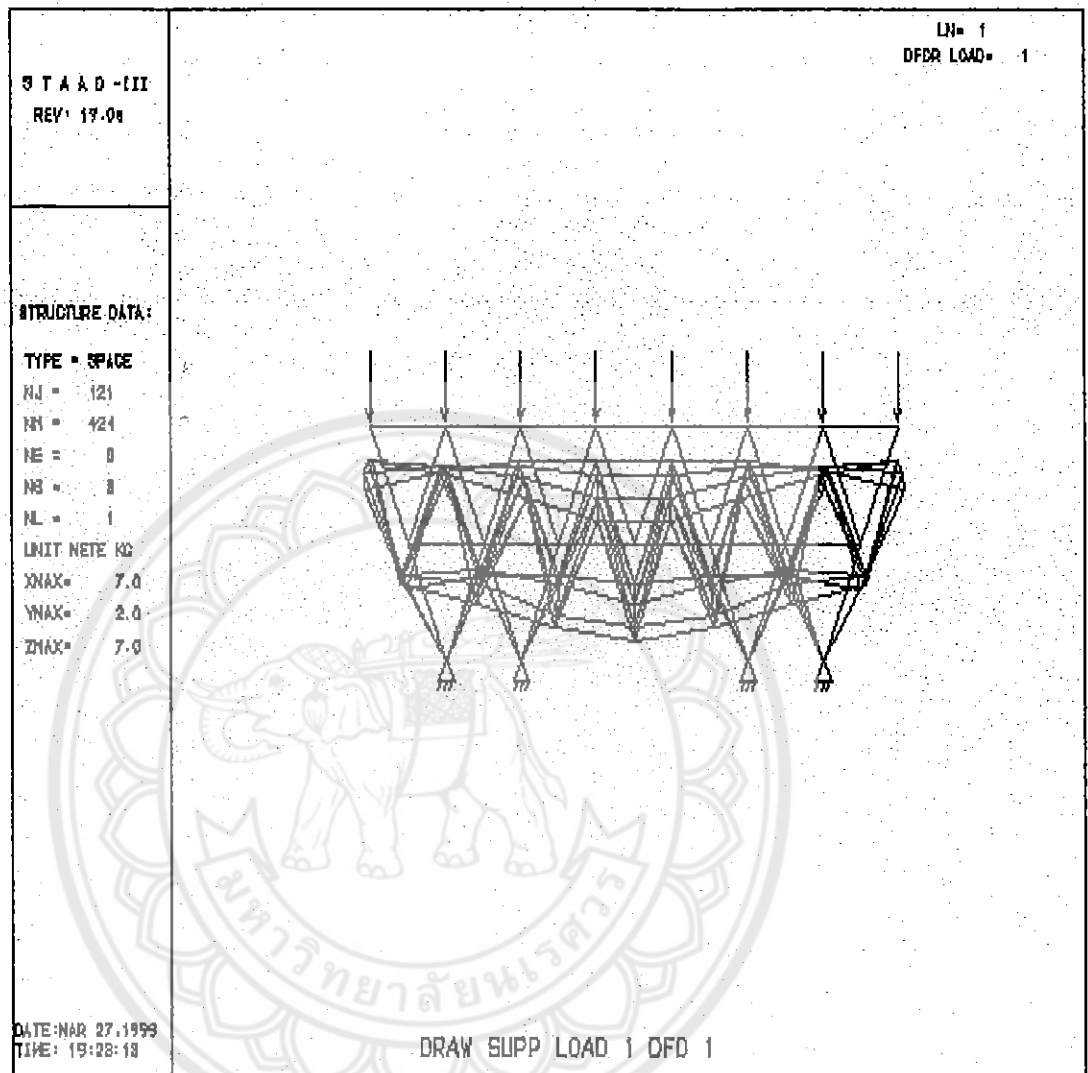
$$\text{ระยะโก่งที่ยอมให้} = \frac{707.11}{180} = 3.93 \text{ cm}$$

ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม STAAD-III

ลักษณะการโยงของโครงสร้างที่แสดงด้วยโปรแกรม STAAD-III



รูปที่ 4-16 แสดงการโยงตัวของโครงสร้างในรูป Isometric



รูปที่ 4-17 แสดงการโก่งตัวของโครงสร้างในรูปด้านหน้า

ระยะเคลื่อนที่ของข้อต่อที่มากที่สุดเกิดที่ข้อต่อที่ 62 เป็นข้อต่อที่อยู่กลางโครงหลังคา มีค่าเท่ากับ 0.00775 cm ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 3.93 cm

แรงในแนวแกนของชิ้นส่วน (Member Force) ที่มากที่สุด เกิดขึ้นที่ชิ้นส่วนที่ 396 , 400 , 402 , 405 , 411 , 414 , 419 และ 421 ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่อยู่บริเวณจุดรองรับ มีค่าเท่ากับ 198.84 kg

แรงที่เกิดในจุดรองรับ

จุดรองรับ	แรงในแนวแกน X (kg)	แรงในแนวแกน Y (kg)	แรงในแนวแกน Z (kg)
114	20.95	499.37	18.88
115	-20.95	499.37	18.88
116	20.95	499.37	-18.88
117	-20.95	499.37	-18.88
118	18.88	499.37	20.95
119	18.88	499.37	-20.95
120	-18.88	499.37	20.95
121	-18.88	499.37	-20.95
รวม	0.00	3994.96	0.00

ตรวจสอบแรงในแนวแกน Y

$$\sum F_y = \text{Selfweight Load} + (\text{Live Load} \times \text{Area})$$

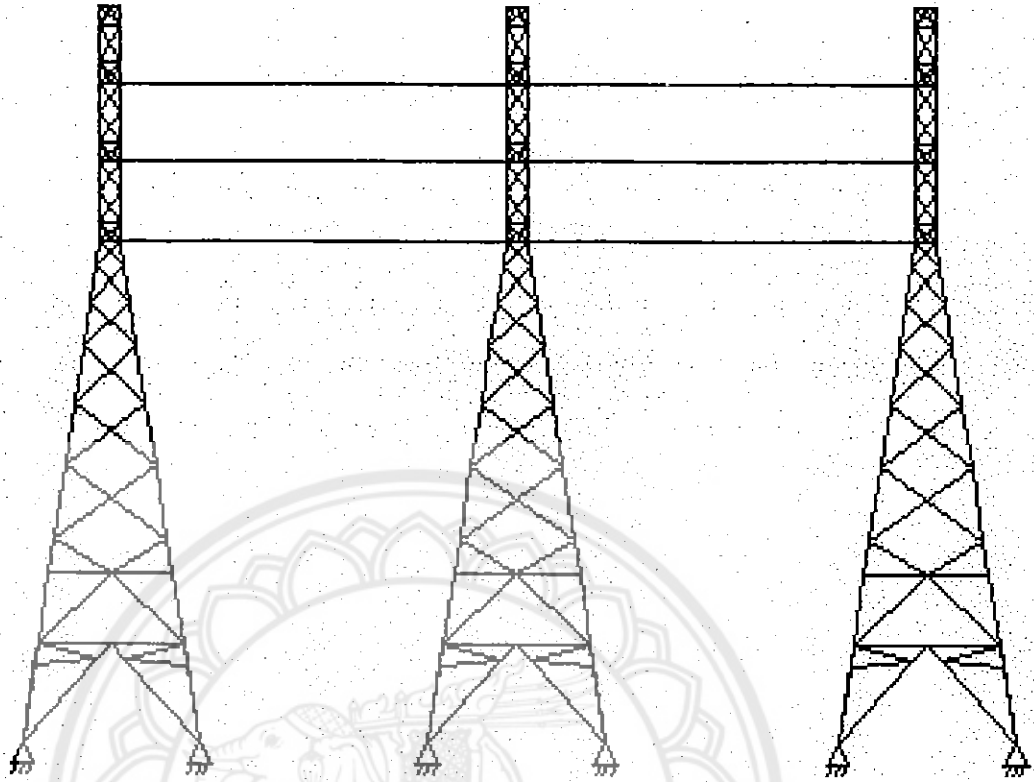
$$3994.96 \cong 1544.725 + (50 \times 7 \times 7)$$

$$3994.96 \text{ kg} \cong 3994.725 \text{ kg}$$

ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.235 kg ซึ่งเกิดมาจากการปัดเศษทศนิยม

จากผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่า โครงสร้างโครงหลังคาสามารถนำไปใช้งานได้จริง นั่นคือสามารถรับน้ำหนักของโครงหลังคาเอง และน้ำหนักบรรทุกจร 50 kg/m^2 ได้ อีกทั้งระยะโก่งที่เกิดขึ้นยังเป็นไปตามข้อกำหนดด้วย

ตัวอย่างที่ 5



รูปที่ 4-18 แสดงโครงสร้างเสาไฟฟ้าที่รับสายไฟ

วิเคราะห์โครงสร้างเสาไฟฟ้า ดังรูป 4-18 มีระยะห่างระหว่างเสาเท่ากับ 100 ม. โครงสร้างประกอบด้วยขาเหล็กจากเท่ากันขนาด

L100×100×7	มีน้ำหนัก 10.697 kg/m	มีพื้นที่หน้าตัด 13.62 cm ²	ยาว 104.47 m
L80×80×6	มีน้ำหนัก 7.328 kg/m	มีพื้นที่หน้าตัด 9.33 cm ²	ยาว 16.05 m
L60×60×5	มีน้ำหนัก 4.355 kg/m	มีพื้นที่หน้าตัด 5.80 cm ²	ยาว 50.07 m
L75×75×6	มีน้ำหนัก 6.857 kg/m	มีพื้นที่หน้าตัด 8.73 cm ²	ยาว 39.05 m
L50×50×6	มีน้ำหนัก 5.640 kg/m	มีพื้นที่หน้าตัด 4.43 cm ²	ยาว 360.74 m

ใช้สายไฟฟ้าที่มีน้ำหนัก 1.57 kg/m และใช้น้ำหนักบรรทุกจรหลังจากข้อบัญญัติ

ความสูงไม่เกิน 10 m เท่ากับ 50 kg/m²

ความสูง 10 m แต่ไม่เกิน 20 m เท่ากับ 80 kg/m²

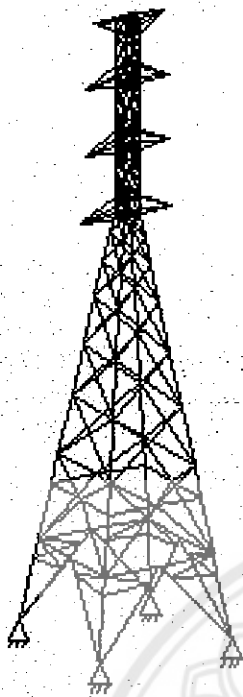
ความสูง 20 m แต่ไม่เกิน 40 m เท่ากับ 120 kg/m²

ความสูงเกิน 40 m เท่ากับ 160 kg/m²

แล้ววิเคราะห์โครงสร้างในกรณีต่างๆ ดังนี้

กรณีที่ 1 เป็นแรงเฉพาะน้ำหนักคงที่กับน้ำหนักกระทำเป็นจุด (DL+Point load)

กรณีที่ 2 มีแรงลมกระทำที่ด้านหน้าของโครงสร้างเพิ่มเข้ามา (DL+Point load+WL)



วิธีการคำนวณแรงที่กระทำต่อโครงสร้างเสาไฟฟ้าแรงสูง

น้ำหนักของโครงสร้างเท่ากับ

$$(16.697 \times 104.47) + (7.328 \times 16.05) + (4.355 \times 50.07) + (6.857 \times 39.05) + (5.64 \times 360.74) = 3755.52 \text{ kg}$$

น้ำหนักของสายไฟฟ้าที่กระทำกับโครงสร้างเท่ากับ

$$(100 \times 1.57) = 157 \text{ kg}$$

รูปที่ 4-19 แสดงลักษณะของโครงสร้าง

แรงลมที่กระทำต่อโครงสร้างคิดโดยประมาณให้มีพื้นที่รับแรงเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทั้งหมด

ที่ความสูงไม่เกิน 10 m มีจำนวนข้อต่อทั้งหมด 24 ข้อต่อ

$$((\frac{1}{2}) \times 10 \times (4.88 + 8.6) \times 50) \times 0.2 / 24 = 24.07 \text{ kg}$$

ที่ความสูง 10 m แต่ไม่เกิน 20 m มีจำนวนข้อต่อเท่ากับ 16 ข้อต่อ

$$((\frac{1}{2}) \times 10 \times (4.88 + 1.3) \times 80) \times 0.2 / 16 = 30.9 \text{ kg}$$

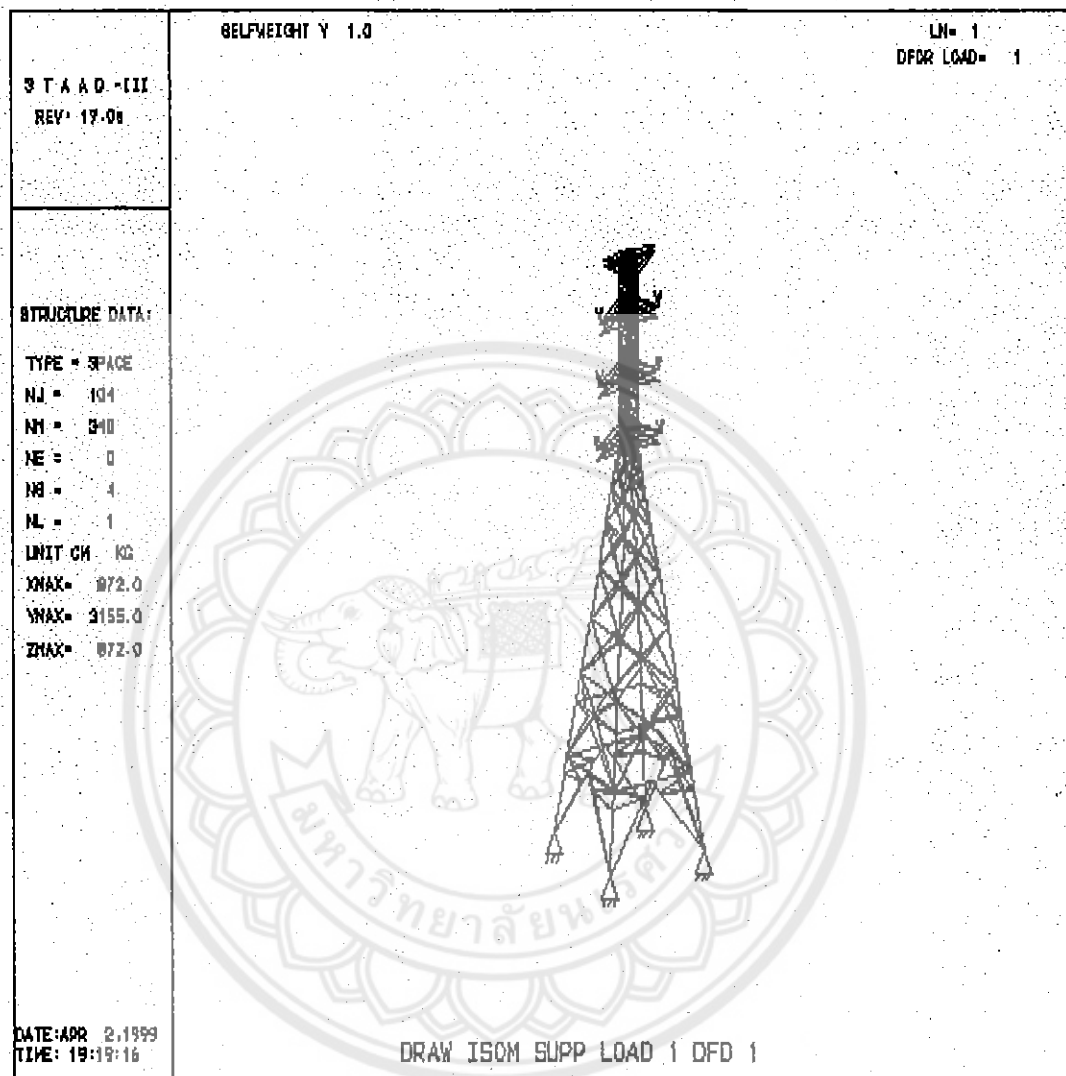
ที่ความสูง 20 m แต่ไม่เกิน 40 m มีจำนวนข้อต่อเท่ากับ 52 ข้อต่อ

$$(((\frac{1}{2}) \times 2.4 \times (1.3 + 1.1) \times 120) + ((1 + 10.1) \times 120) + ((\frac{1}{2}) \times 0.8 \times 2.5 \times 120 \times 8)) \times 0.2 / 52 = 9.07 \text{ kg}$$

ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม STAAD-III

ลักษณะของการเกิดการโก่งของโครงสร้างที่แสดงโดยโปรแกรม STAAD-III

Load case 1: (DL+Point load)



แรงกระทำที่จุดรองรับ

จุดรองรับ	แรงในแนวแกน X (kg)	แรงในแนวแกน Y (kg)	แรงในแนวแกน Z (kg)
1	-148.25	1175.67	-117.93
12	148.25	1175.68	-117.93
23	-148.25	1175.68	117.93
34	148.25	1175.67	117.93
รวม	0.00	4702.7	0.00

ตรวจสอบแรงในแนวแกน Y

$$\sum F_y = \text{Selfweight Load} + \text{Point Load}$$

$$4702.7 \cong 3657.2 + (157 \times 6)$$

$$4702.7 \text{ kg} \cong 4599.2 \text{ kg}$$

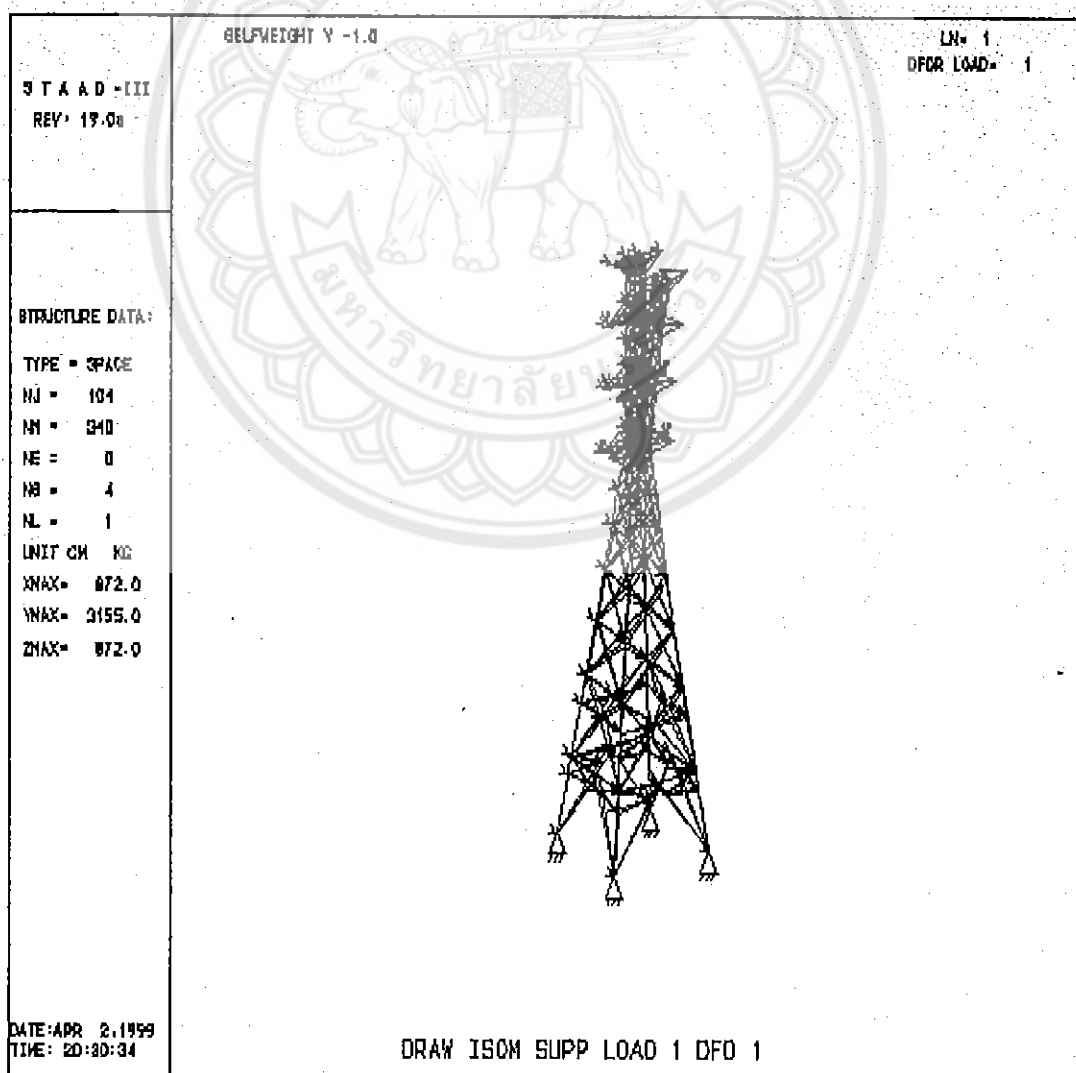
ค่าความคลาดเคลื่อนเกิดเนื่องมาจากความยาวของเหล็กที่คิดได้นั้นไม่เท่ากับกับความยาวของเหล็กจริง อาจมาจากการปัดเศษทศนิยม

ระยะเคลื่อนที่ของข้อต่อจะเกิดมากที่สุดที่ข้อต่อ 97 และ 98 ซึ่งเป็นข้อต่อที่อยู่ปลายของโครงสร้าง ในแนวแกน X มีค่าเท่ากับ 0.00713 cm และในแนวแกน Y มีค่าเท่ากับ -0.11849 cm

แรงในแนวแกนของชิ้นส่วน (Member Force) ที่มากที่สุด เกิดขึ้นที่ชิ้นส่วนที่ 1 ,11 ,21 และ 31 ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่อยู่บริเวณจุดรองรับมีค่าเท่ากับ 1155.43 kg

ลักษณะการโค้งงอของโครงสร้างที่แสดงโดยโปรแกรม STAAD-III

Load Case 2 : (DL+Point Load+WL)



จุดรองรับ	แรงในแนวแกน X (kg)	แรงในแนวแกน Y (kg)	แรงในแนวแกน Z (kg)
1	-5.46	-149.58	-207.31
12	5.46	-149.58	-207.31
23	471.47	2500.93	-612.69
34	-471.47	2500.93	-612.69
รวม	0.00	4702.7	-1640.0

ตรวจสอบแรงในแนวแกน Z

$$\sum F_z = \text{Selfweight Load} + \text{Point Load} + \text{Wind Load}$$

$$1640.0 \cong (24.07 \times 24) + (30.9 \times 16) + (9.07 \times 52)$$

$$1640.0 \text{ kg} \cong 1543.72 \text{ kg}$$

ค่าความคลาดเคลื่อนเกิดเนื่องมาจากความยาวของเหล็กที่คิดได้นั้นไม่เท่ากับความยาวของเหล็กจริง อาจมาจากการบิดเศษทศนิยม

ระยะเคลื่อนที่ของข้อต่อจะเกิดมากที่สุดที่ข้อต่อ 57 และ 59 ระยะเคลื่อนที่ในแนวแกน X มีค่าเท่ากับ 1.75348 cm ในแนวแกน Y มีค่าเท่ากับ -0.33411 cm และในแนวแกน Z มีค่าเท่ากับ 0.03955 cm

แรงในแนวแกนของชิ้นส่วน (Member Force) ที่มากที่สุด เกิดขึ้นที่ชิ้นส่วนที่ 21 และ 31 ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่อยู่บริเวณจุดรองรับมีค่าเท่ากับ 4649.73 kg

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

คณะผู้วิจัยได้ศึกษาวิธีการใช้โปรแกรม STAAD-III ในการวิเคราะห์โครงสร้างโครงข้อหมุน 2 มิติ 3 มิติ เพื่อเป็นพื้นฐานในการนำไปวิเคราะห์โครงสร้าง ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรม STAAD-III นั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าความเป็นจริงมาก โดยสามารถดูได้จากตัวอย่างในบทที่ 4

ตัวอย่างที่ 1-3 เป็นผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการนำ ทฤษฎีการรวมสติฟเนสโดยตรง (Direct Stiffness) และโปรแกรม D-TRUSS มาเปรียบเทียบกับโปรแกรม STAAD-III ค่าผลการวิเคราะห์ที่ได้มีความใกล้เคียงกันมาก และเราสามารถดูว่าข้อมูลโครงสร้างที่เราป้อนเข้าไปในนั้นถูกต้องหรือไม่ สามารถดูได้จากกราฟฟิกที่แสดง

โปรแกรม STAAD-III สามารถวิเคราะห์โครงสร้างได้จริงโดยข้อมูลที่ใส่ไปในโปรแกรมต้องตรงตามข้อกำหนดของโครงสร้าง ดังนั้นผู้ใช้โปรแกรมจึงควรทำความเข้าใจถึงวิธีการใช้ การป้อนข้อมูล และการใช้คำสั่งต่างๆ เป็นอย่างดี

จากการทำวิจัยการใช้โปรแกรม STAAD-III วิเคราะห์โครงสร้างโครงข้อหมุน 2 มิติ และ 3 มิติ ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ความเข้าใจในการใช้โปรแกรม STAAD-III วิเคราะห์โครงสร้างโครงข้อหมุนในลักษณะต่างๆ ได้ และคิดว่าผู้อ่านโครงงานวิจัยฉบับนี้จะสามารถใช้โปรแกรมนี้วิเคราะห์โครงสร้างได้

บรรณานุกรม

1. Louis C Tartaglione. Structrural Analysis. Singapore : McGraw-Hill, 1991.

2. อำนวย พานิชกุล, สมนึก กุลประภา, วินิต ษอวิเชียร. การวิเคราะห์โครงสร้าง.

พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด ป. สัมพันธ์พาณิชย์, 2531.

3. สนั่น เจริญเฝ้า และ วินิต ษอวิเชียร. การออกแบบโครงสร้างไม้และโครงสร้างเหล็ก.

พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด ป. สัมพันธ์พาณิชย์, 2539.

4. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์. การวิเคราะห์โครงสร้าง. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ :

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2527.



ภาคผนวก

แสดงรูปแบบที่ป้อนข้อมูลในโปรแกรม STAAD-III ของตัวอย่างที่ 2 และผลการวิเคราะห์
ของโปรแกรม D-TRUSS

STAAD TRUSS

INPUT WIDTH 79

UNIT METER KG

JOINT COORDINATES

1 0. 0. 0.; 2 0. 0.732 0.; 3 15. 4.751 0.; 4 15. 2.947 0.; 5 12. 2.947 0.6 1. 0. 0.; 7 14. 2.947
0.; 8 13. 2.947 0.; 9 1. 1. 0.; 10 2. 1.268 0.11 3. 1.536 0.;
12 4. 1.804 0.; 13 5. 2.072 0.; 14 6. 2.34 0.; 15 7. 2.608 0.16 8. 2.875 0.;
17 9. 3.143 0.; 18 10. 3.411 0.; 19 11. 3.679 0.20 12. 3.947 0.; 21 13. 4.215 0.; 22 14.
4.483 0.; 23 11. 2.679 0.24 10. 2.411 0.; 25 9. 2.143 0.; 26 8. 1.875 0.; 27 7. 1.607 0.; 28
6. 1.34 0.29 5. 1.072 0.; 30 4. 0.804 0.; 31 3. 0.536 0.;
32 2. 0.268 0.; 33 30. 0. 0.34 30. 0.732 0.; 35 18. 2.947 0.; 36 29. 0. 0.;
37 16. 2.947 0.38 17. 2.947 0.; 39 29. 1. 0.; 40 28. 1.268 0.; 41 27. 1.536 0.;
42 26. 1.804 0.; 43 25. 2.072 0.; 44 24. 2.34 0.; 45 23. 2.608 0.;
46 22. 2.875 0.; 47 21. 3.143 0.; 48 20. 3.411 0.; 49 19. 3.679 0.;
50 18. 3.947 0.; 51 17. 4.215 0.; 52 16. 4.483 0.; 53 19. 2.679 0.;
54 20. 2.411 0.; 55 21. 2.143 0.; 56 22. 1.875 0.; 57 23. 1.607 0.;
58 24. 1.34 0.; 59 25. 1.072 0.; 60 26. 0.804 0.; 61 27. 0.536 0.;
62 28. 0.268 0.;

MEMBER INCIDENCES

1 1 2; 2 2 9; 3 3 4; 4 4 7; 5 5 23; 6 6 1; 7 7 8; 8 8 5; 9 9 10; 10 10 11; 11 11 12; 12 12 13;
13 13 14; 14 14 15; 15 15 16; 16 16 17; 17 17 18; 18 18 19;
19 19 20; 20 20 21; 21 21 22; 22 22 3; 23 23 24; 24 24 25; 25 25 26; 26 26 27;
27 27 28; 28 28 29; 29 29 30; 30 30 31; 31 31 32; 32 32 6; 33 2 6; 34 6 9;
35 9 32; 36 32 10; 37 10 31; 38 31 11; 39 11 30; 40 30 12; 41 12 29; 42 29 13;
43 13 28; 44 28 14; 45 14 27; 46 27 15; 47 15 26; 48 26 16; 49 16 25;
50 25 17; 51 17 24; 52 24 18; 53 18 23; 54 23 19; 55 19 5; 56 5 20; 57 20 8;

58 8 21;59 21 7; 60 7 22; 61 22 4; 62 33 34; 63 34 39; 64 4 37; 65 35 53;
 66 36 33;67 37 38; 68 38 35; 69 39 40; 70 40 41; 71 41 42; 72 42 43;
 73 43 44; 74 44 45;75 45 46; 76 46 47; 77 47 48; 78 48 49; 79 49 50;
 80 50 51; 81 51 52; 82 52 3;83 53 54; 84 54 55; 85 55 56; 86 56 57; 87 57 58; 88 58 59;
 89 59 60; 90 60 61;91 61 62; 92 62 36; 93 34 36; 94 36 39;
 95 39 62; 96 62 40; 97 40 61; 98 61 41;99 41 60; 100 60 42; 101 42 59;
 102 59 43; 103 43 58; 104 58 44; 105 44 57;106 57 45; 107 45 56; 108 56 46; 109 46 55;
 110 55 47; 111 47 54; 112 54 48;113 48 53; 114 53 49; 115 49 35; 116 35 50; 117 50 38;
 118 38 51; 119 51 37;120 37 52; 121 52 4;

UNIT CM KG

MEMBER PROPERTY AMERICAN

1 3 33 TO 62 93 TO 121 PRI AX 4.672 IY 1.23 IZ 1.23

2 4 TO 32 63 TO 92 PRI AX 11.288 IY 1.5 IZ 1.5

MEMBER TRUSS

1 TO 121

CONSTANTS

E STEEL ALL

SUPPORTS

6 36 PINNED

LOAD 1 POINT LOAD

JOINT LOAD

2 FY -129.47

9 TO 22 FY -259.48

3 FY -259.48

39 TO 52 FY -259.48

34 FY -129.74

PERFORM ANALYSIS PRINT ALL

PRINT JOINT DISPLACEMENTS ALL

PRINT MEMBER FORCES ALL

PRINT SUPPORT REACTIONS

FINISH

FILENAME: CH1.T2
PROJECT : ch1

DPRUSS VERSION 2.1
AUTHORITY: SONGKHOV
ENGINEER: Sangchai Sriwaropas

/* NODAL DISPLACEMENT (cm) */

Node	X-Displacement	Y-Displacement
1	0.0000e+00	6.9543e-02
2	5.3423e-02	6.9543e-02
3	0.0000e+00	0.0000e+00
4	7.8044e-02	-1.8944e-02
5	-4.3272e-03	-1.7386e-01
6	1.1358e-01	-1.9016e-01
7	8.3943e-03	-3.6935e-01
8	1.4548e-01	-3.8300e-01
9	3.1287e-02	-5.6762e-01
10	1.7053e-01	-5.7863e-01
11	5.8453e-02	-7.5347e-01
12	1.8648e-01	-7.6184e-01
13	8.4972e-02	-9.1536e-01
14	1.9205e-01	-9.2108e-01
15	1.0690e-01	-1.0454e+00
16	1.8697e-01	-1.0485e+00
17	1.2128e-01	-1.1393e+00
18	1.7191e-01	-1.1397e+00
19	1.2613e-01	-1.1965e+00
20	1.4855e-01	-1.1943e+00
21	1.2043e-01	-1.2201e+00
22	1.1952e-01	-1.2152e+00
23	1.0416e-01	-1.2167e+00
24	8.8455e-02	-1.2092e+00
25	7.8266e-02	-1.1967e+00
26	6.2813e-02	-1.1972e+00
27	5.3442e-02	-1.2019e+00
28	4.2200e-02	-1.1998e+00
29	2.7586e-02	-1.2020e+00
30	2.1963e-02	-1.1966e+00
31	-1.1669e-05	-1.1971e+00
32	6.0665e-06	-1.1781e+00
33	-2.7609e-02	-1.2021e+00
34	-2.1959e-02	-1.1966e+00
35	-5.3463e-02	-1.2020e+00
36	-4.2202e-02	-1.1999e+00
37	-7.8287e-02	-1.1968e+00
38	-6.2819e-02	-1.1973e+00
39	-1.0418e-01	-1.2167e+00
40	-8.8468e-02	-1.2092e+00
41	-1.2045e-01	-1.2201e+00
42	-1.1954e-01	-1.2153e+00
43	-1.2615e-01	-1.1966e+00
44	-1.4857e-01	-1.1944e+00
45	-1.2130e-01	-1.1394e+00

```

=====
DTRUSS VERSION 2.1
FILENAME: CH1.T2 AUTHORITY: SONGKHW
PROJECT : ch1 ENGINEER: Sangchai Sriwaropas
=====

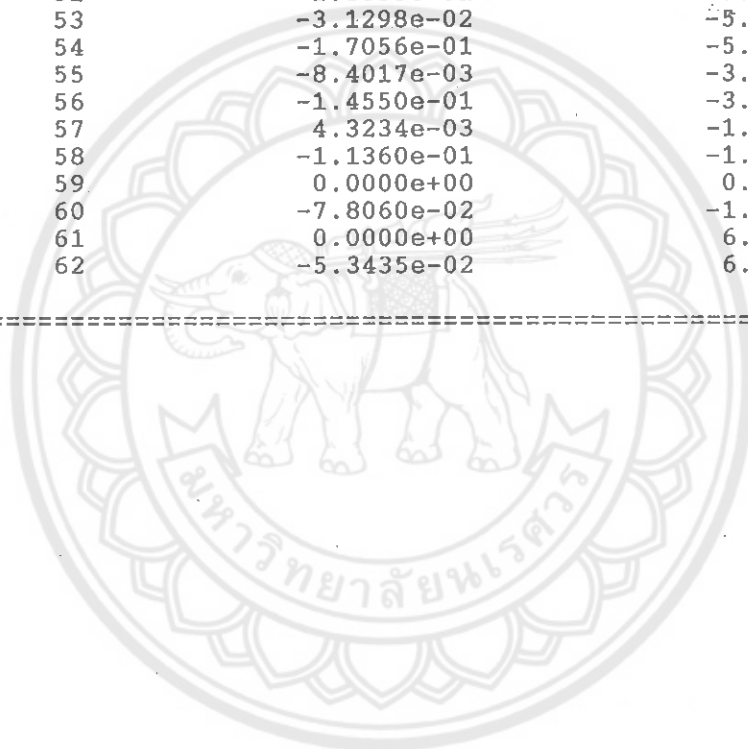
```

```

/* NODAL DISPLACEMENT (cm) */

```

Node	X-Displacement	Y-Displacement
46	-1.7194e-01	-1.1398e+00
47	-1.0692e-01	-1.0455e+00
48	-1.8699e-01	-1.0485e+00
49	-8.4989e-02	-9.1543e-01
50	-1.9208e-01	-9.2116e-01
51	-5.8467e-02	-7.5354e-01
52	-1.8650e-01	-7.6191e-01
53	-3.1298e-02	-5.6767e-01
54	-1.7056e-01	-5.7868e-01
55	-8.4017e-03	-3.6938e-01
56	-1.4550e-01	-3.8304e-01
57	4.3234e-03	-1.7388e-01
58	-1.1360e-01	-1.9018e-01
59	0.0000e+00	0.0000e+00
60	-7.8060e-02	-1.8945e-02
61	0.0000e+00	6.9560e-02
62	-5.3435e-02	6.9560e-02



```

=====
DTRUSS VERSION 2.1
FILENAME: CH1.T2 AUTHORITY: SONGKHEW
PROJECT : ch1 ENGINEER: Sangchai Sriwaropas
=====

```

```

/* ELEMENT FORCE */

```

```

-----
Element Length,m. Force,kg(P) Stress,ksc(fa)
-----
 1 0.73 0.0000e+00 0.0
 2 1.00 -1.8588e+03 -397.9
 3 1.00 -1.5993e+03 -342.3
 4 1.00 -1.3398e+03 -286.8
 5 1.00 -1.0803e+03 -231.2
 6 1.00 -8.2075e+02 -175.7
 7 1.00 -5.6126e+02 -120.1
 8 1.00 -3.0177e+02 -64.6
 9 1.00 -4.2290e+01 -9.1
10 1.00 2.1718e+02 46.5
11 1.00 4.7665e+02 102.0
12 1.00 7.3612e+02 157.6
13 1.00 -5.3315e+01 -11.4
14 1.27 1.6261e+02 34.8
15 1.54 3.4846e+02 74.6
16 1.80 1.0355e+03 221.6
17 1.54 3.4848e+02 74.6
18 1.27 1.6263e+02 34.8
19 1.00 -5.3281e+01 -11.4
20 1.00 7.3636e+02 157.6
21 1.00 4.7661e+02 102.0
22 1.00 2.1714e+02 46.5
23 1.00 -4.2330e+01 -9.1
24 1.00 -3.0181e+02 -64.6
25 1.00 -5.6130e+02 -120.1
26 1.00 -8.2080e+02 -175.7
27 1.00 -1.0803e+03 -231.2
28 1.00 -1.3398e+03 -286.8
29 1.00 -1.5993e+03 -342.3
30 1.00 -1.8589e+03 -397.9
31 0.73 0.0000e+00 0.0
32 1.24 -1.6080e+02 -34.4
33 1.24 1.9821e+03 424.3
34 1.24 1.6604e+03 355.4
35 1.24 1.3388e+03 286.6
36 1.24 1.0172e+03 217.7
37 1.24 6.9558e+02 148.9
38 1.24 3.7399e+02 80.0
39 1.24 5.2409e+01 11.2
40 1.24 -2.6915e+02 -57.6
41 1.24 -5.9070e+02 -126.4
42 1.24 -9.1222e+02 -195.3
43 1.24 -1.2337e+03 -264.1
44 1.41 -2.2994e+02 -49.2
45 1.61 -4.4377e+02 -95.0
-----

```

```

=====
DTRUSS VERSION 2.1
FILENAME: CH1.T2 AUTHORITY: SONGKHEW
PROJECT : ch1 ENGINEER: Sangchai Sriwaropas
=====

```

/* ELEMENT FORCE */

Element	Length,m.	Force,kg(P)	Stress,ksc(fa)
46	1.83	-6.1768e+02	-132.2
47	1.83	-6.1788e+02	-132.3
48	1.61	-4.4380e+02	-95.0
49	1.41	-2.2998e+02	-49.2
50	1.24	-1.2341e+03	-264.1
51	1.24	-9.1215e+02	-195.2
52	1.24	-5.9063e+02	-126.4
53	1.24	-2.6910e+02	-57.6
54	1.24	5.2459e+01	11.2
55	1.24	3.7403e+02	80.1
56	1.24	6.9563e+02	148.9
57	1.24	1.0172e+03	217.7
58	1.24	1.3389e+03	286.6
59	1.24	1.6605e+03	355.4
60	1.24	1.9822e+03	424.3
61	1.24	-1.6080e+02	-34.4
62	1.04	1.3433e+02	17.9
63	1.04	-1.5215e+03	-202.6
64	1.04	-2.9085e+03	-387.3
65	1.04	-4.0269e+03	-536.2
66	1.04	-4.8766e+03	-649.3
67	1.04	-5.4576e+03	-726.7
68	1.04	-5.7700e+03	-768.3
69	1.04	-5.8138e+03	-774.1
70	1.04	-5.5890e+03	-744.2
71	1.04	-5.0956e+03	-678.5
72	1.04	-4.3336e+03	-577.0
73	1.04	-3.3031e+03	-439.8
74	1.04	-3.1348e+03	-417.4
75	1.04	-2.8503e+03	-379.5
76	1.04	-2.5015e+03	-333.1
77	1.04	-2.5015e+03	-333.1
78	1.04	-2.8505e+03	-379.6
79	1.04	-3.1350e+03	-417.4
80	1.04	-3.3033e+03	-439.9
81	1.04	-4.3341e+03	-577.1
82	1.04	-5.0960e+03	-678.6
83	1.04	-5.5894e+03	-744.3
84	1.04	-5.8141e+03	-774.2
85	1.04	-5.7703e+03	-768.4
86	1.04	-5.4579e+03	-726.7
87	1.04	-4.8768e+03	-649.4
88	1.04	-4.0271e+03	-536.2
89	1.04	-2.9087e+03	-387.3
90	1.04	-1.5215e+03	-202.6

```

=====
                                DTRUSS      VERSION 2.1
FILENAME: CH1.T2                AUTHORITY: SONGKIEW
PROJECT : ch1                   ENGINEER: Sangchai Sriwaropas
=====

```

```

/* ELEMENT FORCE */

```

```

-----
Element      Length,m.      Force,kg(P)      Stress,ksc(fa)
-----
  91          1.04          1.3433e+02         17.9
  92          1.00          0.0000e+00          0.0
  93          1.04         -7.4906e+03        -997.4
  94          1.04         -5.8348e+03        -776.9
  95          1.04         -4.4477e+03        -592.2
  96          1.04         -3.3294e+03        -443.3
  97          1.04         -2.4797e+03        -330.2
  98          1.04         -1.8986e+03        -252.8
  99          1.04         -1.5863e+03        -211.2
 100          1.04         -1.5425e+03        -205.4
 101          1.04         -1.7673e+03        -235.3
 102          1.04         -2.2607e+03        -301.0
 103          1.04         -3.0227e+03        -402.5
 104          1.00         -3.9151e+03        -521.3
 105          1.00         -4.0777e+03        -543.0
 106          1.00         -4.3524e+03        -579.6
 107          1.00         -4.3523e+03        -579.5
 108          1.00         -4.0775e+03        -542.9
 109          1.00         -3.9149e+03        -521.3
 110          1.04         -3.0222e+03        -402.4
 111          1.04         -2.2603e+03        -301.0
 112          1.04         -1.7669e+03        -235.3
 113          1.04         -1.5421e+03        -205.3
 114          1.04         -1.5860e+03        -211.2
 115          1.04         -1.8984e+03        -252.8
 116          1.04         -2.4795e+03        -330.2
 117          1.04         -3.3292e+03        -443.3
 118          1.04         -4.4476e+03        -592.2
 119          1.04         -5.8347e+03        -776.9
 120          1.04         -7.4906e+03        -997.4
 121          1.00          0.0000e+00          0.0
-----

```

```
=====
                                DTRUSS   VERSION 2.1
FILENAME: CH1.T2                AUTHORITY: SONGKHEW
PROJECT : ch1                   ENGINEER: Sangchai Sriwaropas
=====
```

/* SUPPORT REACTION (kg) */

Node	X - Force	Y - Force
3	7.1057e+03	3.8922e+03
59	-7.1057e+03	3.8922e+03

```
=====
```



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ : ทวีศักดิ์ ภาณุไพศาล
วัน/เดือน/ปี เกิด : 17 กันยายน 2520
สถานที่เกิด : จังหวัดพิษณุโลก
การศึกษา : มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนพิษณุโลกพิทยาคม จังหวัดพิษณุโลก
: มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนพิษณุโลกพิทยาคม จังหวัดพิษณุโลก
: ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก

ชื่อ : ปาลินี พงษ์เจริญ
วัน/เดือน/ปี เกิด : 13 พฤศจิกายน 2517
สถานที่เกิด : จังหวัดพิษณุโลก
การศึกษา : มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนเฉลิมขวัญสตรี จังหวัดพิษณุโลก
: มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเฉลิมขวัญสตรี จังหวัดพิษณุโลก
: ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก

ชื่อ : แสงชัย ศรีวิโรภาส
วัน/เดือน/ปี เกิด : 20 กันยายน 2518
สถานที่เกิด : จังหวัดนครสวรรค์
การศึกษา : มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนลาซาลโชติรวี จังหวัดนครสวรรค์
: มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนนครสวรรค์ จังหวัดนครสวรรค์
: ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก