



การวิเคราะห์โครงข้อแข็ง 3 มิติ โดยใช้โปรแกรม STAAD - III
STRUCTURAL ANALYSIS OF SPACE FRAME BY STAAD - III PPOGRAM

นายจตุมนัส วรมณีรัตน์
นายประสิทธิ์ ศีพิจารณ์
นายวันชัย หงษ์อ่อนสา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอเนก
ปีการศึกษา 2541

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์	
วันที่รับ.....	14 ก.ค. 2542
เลขทะเบียน.....	2310209
เลขเรียกหนังสือ.....	TA
มหาวิทยาลัยอเนก	647
	๖ 638 ๙

2541



ใบรับรองโครงการงานวิศวกรรมโยธา

หัวข้อโครงการงานวิศวกรรมโยธา : การวิเคราะห์โครงสร้างแข็ง 3 มิติ ด้วยโปรแกรม STAAD-III
ผู้ดำเนินงานวิศวกรรมโยธา : นายจตุมนัส วรมณีรัตน์ รหัส 38361085
นายประสิทธิ์ ดีพิجارณ์ รหัส 38361192
นายวันชัย หงษ์อ่อนตา รหัส 38361291
ที่ปรึกษาโครงการงานวิศวกรรมโยธา : อาจารย์ สรณกร เหมะวิบูลย์
อาจารย์ สมศักดิ์ เหลืองวิชเชจริญ
สาขาวิชา : Civil Engineering
ภาควิชา : วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงการงานวิศวกรรมโยธาฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา

คณะกรรมการสอบโครงการงานวิศวกรรมโยธา

.....
.....ประธานกรรมการ

(อ.สรณกร เหมะวิบูลย์)

.....กรรมการ

(อ.สมศักดิ์ เหลืองวิชเชจริญ)

.....หัวหน้าภาควิชา(รักษาการแทน)

(อ. สมบัติ ชื่นชุกกลิ่น)

หัวข้อ โครงงานวิศวกรรมโยธา	: การวิเคราะห์โครงสร้างสามมิติโดยใช้โปรแกรม STAAD - III
ผู้ดำเนินงานวิศวกรรมโยธา	: นายจลมนัส วรมณีรัตน์ รหัส 38361085
	: นายประสิทธิ์ ศีพิจารณ์ รหัส 38361192
	: นายวันชัย หงษ์อ่อนสา รหัส 38361291
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานวิศวกรรมโยธา	: อาจารย์สรันกร เหมะวิบูลย์
	: อาจารย์สมศักดิ์ เหลืองวิษเจริญ
สาขาวิชา	: วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา	: วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา	: 2541

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้งานของโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง STAAD-III ที่อำนวยความสะดวกในการคำนวณค่าต่าง ๆ ของโครงสร้าง ที่จำเป็นในการออกแบบของค้ำอาคาร สิ่งก่อสร้าง ต่าง ๆ ที่พบทั่วไปในปัจจุบัน และเป็นโปรแกรมที่นิยมมากในหมู่ของวิศวกร ผู้ดำเนินงานได้ทำการศึกษาทฤษฎีและหลักการทํางานของโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง STAAD - III การดำเนินงานเริ่มจากได้กำหนดขอบเขตของการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวกับโครงข้อแข็ง 3 มิติ ซึ่งเป็นหนึ่งในความสามารถของโปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์ได้ โดยทำการศึกษาตัวอย่างลักษณะของโครงข้อแข็ง 3 มิติ จำนวน 5 ตัวอย่างที่มีลักษณะแตกต่างกัน และแสดงตัวอย่างการออกแบบโครงสร้างที่ทำด้วยโปรแกรม STAAD - III

จากการศึกษาและวิเคราะห์ พบว่าโปรแกรม STAAD - III สามารถป้อนข้อมูลได้สองระบบ คือ ป้อนข้อมูลเป็นรายการ (Text Editor) และการป้อนข้อมูลระบบกราฟิก (Graphic) ส่งผลให้สามารถแก้ไขข้อมูลได้ง่าย ซึ่งเป็นความได้เปรียบของโปรแกรม STAAD-III เมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรมอื่น อีกทั้งโปรแกรมนี้สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ได้ในเวลาอันรวดเร็ว ในกรณีที่มีการป้อนข้อมูลผิดพลาด โปรแกรมจะหยุดทํางานซึ่งเป็นการรายงานถึงข้อมูลที่เกิดการผิดพลาด ดังนั้นโปรแกรม STAAD-III จึงเป็นโปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างที่น่าสนใจอย่างยิ่ง

Project Title of Civil Engineering : Structural Analysis of Space Frame by STAAD-III Program
Name : Mr. Julmanus Woramaneerat Code 38361185
Mr. Prasit Deepijam Code 38361192
Mr. Wanchai Hong-onsa Code 38361291
Project Advisor : Mr. Sarangon Hamavibool
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 framework has been indicated to examine only a space frame 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, which are; a.) Text editor and b.) Graphic. To compare with other programs, this program has an 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

โครงการวิจัยฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ก็เพราะได้รับความอนุเคราะห์จากท่าน อาจารย์ สมศักดิ์ เหลืองวิซชเจริญ ที่กรุณาให้คำชี้แนะการใช้โปรแกรม STAAD - III และอธิบาย ขอบเขตของการวิจัย ตลอดจนข้อเสนอแนะ และข้อมูลต่างๆ ในการดำเนินโครงการวิจัย รวมทั้ง การเขียนรายงานฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณท่าน อาจารย์ สรัณกร เหมะวิบูลย์ ที่ได้ให้ความกรุณาสละเวลาอันมีค่าใน การให้คำปรึกษาและความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีการวิเคราะห์โครงสร้าง และ แนะนำรูปแบบของ โครงการวิจัย ตลอดจนเอกสารต่างๆ ที่มีประโยชน์มากต่องานวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเครื่องกลที่เอื้อเฟื้อเครื่องคอมพิวเตอร์ และเครื่องพิมพ์ ในการพิมพ์งานวิจัย ในการดำเนินการวิจัยโครงการฉบับนี้

นาย จุตมนัส วรมณีรัตน์
นาย ประสิทธิ์ คีฬิจารณ์
นาย วันชัย หงษ์อ่อนสา

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูปภาพ	จ
สัญลักษณ์	ฉ
นิยามศัพท์	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	5
๑๖-๔๐ บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ	26
บทที่ 4 ผลการทดลอง	40
บทที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผล	81
บรรณานุกรม	83
ภาคผนวก	
- ภาคผนวก ก	84
- ภาคผนวก ข	94
- ภาคผนวก ค	96
- ภาคผนวก ง	107
- ภาคผนวก จ	109
ประวัติผู้เขียน	113

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1 แสดงทิศทางของความอิสระของแต่ละจุดต่อในระบบ โคออร์ดิเนต โกลบัล	6
2ก แสดงแรง (S) และการเคลื่อนที่ (y) ที่ปลายของชิ้นส่วน โครงข้อแข็งสามมิติในระบบ โคออร์ดิเนตประจำตัว (Local coordinate system)	7
2ข แสดงแรง (\bar{S}) และการเคลื่อนที่ (\bar{y}) ที่ปลายของชิ้นส่วน โครงข้อแข็งสามมิติ ในระบบ โคออร์ดิเนต โกลบัล (Global coordinate system)	9
3 แสดงมุมระหว่างแกนของระบบ โคออร์ดิเนต โกลบัล และระบบ โคออร์ดิเนต ประจำตัว.....	11
3ก แสดงมุม $\theta_{x\bar{x}}, \theta_{y\bar{y}}, \theta_{z\bar{z}}$	10
3ข แสดงมุม $\theta_{y\bar{x}}, \theta_{z\bar{y}}, \theta_{x\bar{z}}$	11
3ค แสดงมุม $\theta_{z\bar{x}}, \theta_{x\bar{y}}, \theta_{y\bar{z}}$	11
4 แสดงการคำนวณ โคออร์ดิเนต ประจำตัวด้วยวิธีกำหนดจุดอ้างอิง.....	12
5ก แสดงมุมที่ Member กระทำกับระบบแกนต่าง ๆ	13
5ข แสดงตำแหน่งเดิมในจินตนาการและตำแหน่งที่แท้จริงของชิ้นส่วน AB	14
5ค แสดงตำแหน่งและระบบแกนของชิ้นส่วน AB ที่ได้จากการหมุนรอบแกนหลัก (\bar{y})	14
5ง แสดงตำแหน่งและระบบแกน (x_y, y_y, z_y) ของชิ้นส่วน AB ที่ได้ จากการหมุนรอบแกนรอง (z_α)	15
5จ แสดงมุมเบต้า (β) ตำแหน่งและระบบ โคออร์ดิเนต ประจำตัว (x, y, z) ที่แท้จริง ของชิ้นส่วน AB	15
5ฉ แสดงการวางตัวของหน้าตัดทำมุม β กับแกน โคออร์ดิเนต เดิม (x_y, y_y, z_y)	16
5ช แสดงตัวอย่างการวางตัวของหน้าตัดทำมุม β ต่างๆ	16
5ซ แสดงการวางตัวของเสาในกรณีที่ $\gamma = 90^\circ$ และ $\gamma = 270^\circ$	19
6ก แสดงตัวอย่าง เงื่อนไขความต่อเนื่องของข้อต่อ	23
6ข แสดงตัวอย่าง สภาวะสมดุลของข้อต่อ	23
7 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ โครงสร้างด้วยวิธี Direct Stiffness Method of Space Frame Structure.....	25
8 สรุปขั้นตอนการใช้งาน โปรแกรม STAAD - III.....	39

สัญลักษณ์

$(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$	ระบบโคออร์ดิเนตโกลบัล
x, y, z	ระบบโคออร์ดิเนตประจำตัว
\underline{S}	แรงภายในของระบบโคออร์ดิเนตประจำตัว
\underline{v}	การเคลื่อนที่ของระบบโคออร์ดิเนตประจำตัว
A_x	พื้นที่หน้าตัด
I_x, I_y	โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัด
E	ค่าโมดูลัสของชิ้นส่วน
J	โมเมนต์อินเนอร์เซียของการบิด
L	ความยาวของชิ้นส่วน
G	โมดูลัสของแรงเฉือน
$\begin{pmatrix} \underline{S} \\ \underline{v} \end{pmatrix}$	แรงและการเคลื่อนที่
$\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$	เวกเตอร์หลัก 1 หน่วยของระบบโคออร์ดิเนตโกลบัล
$\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$	เวกเตอร์หลัก 1 หน่วยของระบบโคออร์ดิเนตประจำตัว
$\underline{X}, \underline{X}$	ชุดของเวกเตอร์หลัก 1 หน่วยในระบบโคออร์ดิเนตทั้งสอง
\underline{L}	เมตริกซ์แปลงสำหรับปริมาณเวกเตอร์ (Vector transformation matrix) ระหว่างโคออร์ดิเนตทั้งสอง
\underline{I}	เมตริกซ์เอกลักษณ์
$\theta_{\bar{x}x}, \theta_{\bar{y}y}, \theta_{\bar{z}z}$	มุมระหว่างแกน x และ แกน $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$
$\theta_{y\bar{x}}, \theta_{y\bar{y}}, \theta_{y\bar{z}}$	มุมระหว่างแกน y และ แกน $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$
$\theta_{z\bar{x}}, \theta_{z\bar{y}}, \theta_{z\bar{z}}$	มุมระหว่างแกน z และ แกน $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$
$x - y$	ระนาบ $x - y$
\overline{AB}	เวกเตอร์ \overline{AB}
\overline{AK}	เวกเตอร์ \overline{AK}
$c_{\bar{x}x}, c_{\bar{y}y}, \dots, c_{jz}$	โคไซน์ทิศทาง (Direction Cosine)

β	มุมที่หน้าตัดของชิ้นส่วน AB หมุน (Rotate) รอบแกนตามยาวของระบบแกนเดิม
α	มุมที่ชิ้นส่วน AB หมุนรอบแกนหลักให้มาอยู่ในแนวเดียวกับตำแหน่งที่แท้จริงของชิ้นส่วน AB
γ	มุมที่หมุนชิ้นส่วน AB รอบแกนรอง (z_α) เพื่อให้ชิ้นส่วน AB มาอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง
AB	ชิ้นส่วน AB
(z_α)	แกนรอง (z_α)
$(x_\gamma, y_\gamma, z_\gamma)$	ตำแหน่ง $(x_\gamma, y_\gamma, z_\gamma)$ ของชิ้นส่วน AB ที่ได้จากการหมุนรอบแกนรอง (z_α)
$(x_\alpha, y_\alpha, z_\alpha)$	ตำแหน่ง $(x_\alpha, y_\alpha, z_\alpha)$ ของชิ้นส่วน AB ที่ได้จากการหมุนรอบแกนหลัก (\bar{y})
(\bar{x}_γ)	แกนตามยาว (\bar{x}_γ)
$(\bar{x}_A, \bar{y}_A, \bar{z}_A)$	พิกัดตำแหน่งของ A ที่แท้จริงในระบบโคออร์ดิเนตโกลบอล
$(\bar{x}_B, \bar{y}_B, \bar{z}_B)$	พิกัดตำแหน่งของ B ที่แท้จริงในระบบโคออร์ดิเนตโกลบอล
\bar{X}_α, \bar{X}	ชุดของเวกเตอร์หลักหนึ่งหน่วยในระบบโคออร์ดิเนตทั้งสอง
$R_\beta, R_\gamma, R_\alpha$	เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ (Coefficient Matrix)
a	เมตริกซ์แปลง (Transformation Matrix) ของชิ้นส่วนโครงข้อแข็งสามมิติ
u_i	การเคลื่อนที่ของข้อต่อที่ ดีกรี ของความอิสระของ โครงสร้างที่ i
\bar{v}^m	การเคลื่อนที่ที่ปลายของชิ้นส่วน m ณ จุดต่อเดียวกันและการเคลื่อนที่ในทิศเดียวกับ u_i
P_i	แรงภายนอกที่กระทำ ณ ข้อต่อ ดีกรี ของความอิสระของ โครงสร้างที่ i
\bar{S}^m	แรงภายในที่เกิดขึ้นของชิ้นส่วน m , ในทิศเดียวกับ P_i ณ จุดต่อเดียวกัน
\bar{K}	สติฟเนสของโครงสร้างในระบบโคออร์ดิเนตโกลบอล
\bar{k}	สติฟเนสของชิ้นส่วนในระบบโคออร์ดิเนตประจำตัว
\bar{k}^e	สติฟเนสของชิ้นส่วนที่ e
\bar{P}^e	แรงภายนอกที่กระทำชิ้นส่วนที่ e
$\bar{\bar{k}}$	สติฟเนสของชิ้นส่วนย่อยในระบบโคออร์ดิเนตโกลบอล

คำนิยามศัพท์

Global Coordinate System	= ระบบ โคออร์ดิเนต โกลบัล
Local Coordinate System	= ระบบ โคออร์ดิเนตประจำตัว
Global Stiffness of Members	= สติฟเนสของชิ้นส่วนย่อยในระบบ โกลบัล
Local Stiffness Matrix	= สติฟเนสของชิ้นส่วนย่อยในระบบ โคออร์ดิเนตประจำตัว
Degree of Freedom	= โคออร์ดิเนตของการเปลี่ยนตำแหน่งอิสระ
Transformation of Vector Value	= การแปลงปริมาณเวกเตอร์
Principle Unit Vector	= เวกเตอร์หลัก 1 หน่วย
Direction Cosine	= โคไซน์ทิศทาง
Vector Transformation Matrix	= เมตริกซ์แปลงสำหรับปริมาณเวกเตอร์
Orthogonal Matrix	= เมตริกซ์ตั้งฉาก
Reference Point Method	= วิธีกำหนดจุดอ้างอิง
Reference Angle Method	= วิธีกำหนดมุมอ้างอิง
Coefficient Matrix	= เมตริกซ์สัมประสิทธิ์
Horizontal Plane	= ระนาบแนวนอน
Transformation Matrix	= เมตริกซ์แปลง
Space Frame Member	= ชิ้นส่วน โครงข้อแข็งสามมิติ
Compatibility Conditions	= เงื่อนไขของความต่อเนื่อง
Equilibrium Conditions	= สภาวะสมดุล
Global Stiffness of Space Frame Structure	= สติฟเนสของ โครงสร้างในระบบ โคออร์ดิเนต โกลบัล
Member	= ชิ้นส่วน
Joint	= ข้อต่อของชิ้นส่วน
Node	= จุดต่อ
Displacement	= การเคลื่อนที่
Nodal Displacement	= การเคลื่อนที่ ณ จุดต่อ
Axial	= แรงตามแนวแกน
Shear	= แรงเฉือน
Element	= อนุภาค , ชิ้นส่วนย่อย

Moment	= โมเมนต์
Reaction	= แรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับ
Plot Out Put	= แสดงผลรูป Graphic
Print Out Put	= แสดงผลโดยการพิมพ์ผล
Text Editor	= การป้อนข้อมูลเป็นรายการ
Isometric	= การแสดง โครงสร้างในรูป 3 มิติ
Plane	= ระนาบ
Geometry	= การป้อนข้อมูลลักษณะของ โครงสร้าง
Property	= คุณสมบัติของ โครงสร้าง
Constant	= ค่าคงที่ของ โครงสร้าง
Reference Angle	= มุมอ้างอิง
Hinge Support	= ที่รองรับที่มี โมเมนต์เท่ากับศูนย์
Fixed Support	= ที่รองรับที่มีแรงและ โมเมนต์
Spring Support	= ที่รองรับที่มีสปริง
Uniform Load	= แรงกระทำที่กระทำต่อชิ้นส่วนเท่าๆกันบนชิ้นส่วน
Point Load	= แรงกระทำที่กระทำต่อชิ้นส่วนเป็นจุดบนชิ้นส่วน
Pressure Load	= แรงกระทำที่กระทำเป็นลักษณะแรงดัน
Trapezoidal Load	= แรงกระทำที่กระทำเป็นลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมู
Yield Strength	= กำลังคลากของเหล็ก
Compressive Strength	= กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต
Bearing Capacity	= กำลังรับแรงอัดของคินฐานราก
STAAD – III	= โปรแกรมการวิเคราะห์ผลและออกแบบ
STAAD – Post	= โปรแกรมแสดงผลการวิเคราะห์
STAAD – Pre	= โปรแกรมป้อนข้อมูล
Bending Moment Diagram	= แสดงค่าโมเมนต์แรงคัตโดยการเขียนกราฟ
Deflection	= แสดงค่าการแอ่นตัวของ โครงสร้างเมื่อมีแรงกระทำ
Query Member	= แสดงผลของชิ้นส่วนที่สนใจ
Beta	= ค่าของมุมอ้างอิง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการวิจัย

เวลาเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในชีวิตประจำวันของทุกคน ไม่ว่าจะเป็นด้านความเป็นอยู่ การทำงาน การติดต่อสื่อสาร การวิเคราะห์วิจัย เป็นต้น เมื่อเวลาเข้ามาเกี่ยวข้องเราต้องบริหารเวลาให้คุ้มค่าที่สุด เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อที่ทำงานพร้อมทั้งส่วนประสานต่าง ๆ จะสำเร็จได้ด้วยดีตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ อาทิเช่น เศรษฐกิจของประเทศไทยในขณะนี้กำลังตกต่ำ ผู้บริหารประเทศพร้อมทั้งคณะจะต้องวางแผนการแก้ไขปัญหาเศรษฐกิจให้กลับคืนสู่สภาพปกติโดยเร็วที่สุด เพื่อที่ว่าประชาชนจะเดือดร้อนน้อยที่สุด

เช่นเดียวกับการวิเคราะห์โครงสร้าง (Structural Analysis) เวลาก็เป็นสิ่งสำคัญเมื่อต้องการจะออกแบบโครงสร้างใดโครงสร้างหนึ่งขึ้นมา จะทำอย่างไรเพื่อให้โครงสร้างนั้นเสร็จตามเวลาที่คาดหมายไว้ สิ่งสำคัญประการแรกของการออกแบบคือ การวิเคราะห์โครงสร้าง ให้ได้ค่าใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด และประหยัดเวลาที่สุด หากทำการวิเคราะห์ผิดพลาดถึงแม้ว่าจะทำการออกแบบ (Design) ได้อย่างถูกต้องตามผลการวิเคราะห์นั้นก็ตาม โครงสร้างนั้นจะใช้งานตามวัตถุประสงค์ไม่ได้ เพราะโครงสร้างที่ออกแบบอาจรับน้ำหนักไม่ได้แล้วพังลงมาเป็นอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สิน ดังในกรณีของ โรงแรม Royal Plaza ที่ จ. นครราชสีมา เป็นต้น

ทางคณะผู้วิจัยได้ตระหนักถึงสาเหตุของปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น จึงได้จัดทำโครงการนี้ขึ้นมา เพื่อช่วยลดปัญหาดังกล่าว โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่เรียกว่า STAAD-III มาช่วยในการวิเคราะห์โครงสร้าง ซึ่งจะกล่าวถึง โครงข้อแข็ง 3 มิติ (Space Frame) เป็นหลัก

STAAD-III Release 1.9a (Student Version) เป็นโปรแกรมสำหรับวิศวกรออกแบบโครงสร้าง โดยเฉพาะสามารถวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างได้ทุกกรณี เช่น โครงสร้างไม้ เหล็ก รูปพรรณ คอนกรีตเสริมเหล็ก อะลูมิเนียม ทั้งโครงสร้างที่เป็น 2 และ 3 มิติ โดยสามารถพิจารณาน้ำหนักกระทำได้ทุกกรณี เช่น น้ำหนักแบบ Moving Load , Wind Load , Earthquake , Temperature ,

Natural Frequency และได้ถึง 500 Load Case. สามารถติดต่อกับโปรแกรมอื่นได้ง่าย เช่น โอนค่าการคำนวณไปยังโปรแกรมอื่นบน Windows ได้ทันที ได้แก่ EXCEL , MS WORD , POWER POINT ส่งข้อมูลเป็น DXF File เข้าโปรแกรม Auto CAD ได้

หากเปรียบเทียบกับโปรแกรม MICROFEAP แล้วโปรแกรม STAAD-III มีข้อได้เปรียบกว่าเช่น ป้อนข้อมูลเป็นแบบ Graphic ทำให้เห็นภาพทุกขั้นตอน สามารถแก้ไขได้ง่าย วิเคราะห์ Dynamics Load มี Load Case หลากหลายให้เลือกมากกว่า ทำการออกแบบโครงสร้างได้ และแสดงภาพการพังของโครงสร้าง (Structural Failure) ได้

1.2 สถานที่เก็บข้อมูล

1.2.1 แบบโครงสร้างหอพักนิสิตหญิง มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.2.2 โครงสร้างหอจ่ายน้ำประปา มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.2.3 โครงสร้างสะพานแขวน

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อเรียนรู้การใช้งานโปรแกรมสำเร็จรูป STAAD-III และสามารถทำการวิเคราะห์โครงสร้างให้เป็นไปได้ด้วยความถูกต้อง สะดวก รวดเร็ว โดยเฉพาะ โครงข่ายแข็ง 3 มิติ (Space Frame)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เรียนรู้การใช้งานโปรแกรมสำเร็จรูป STAAD-III

1.4.2 เข้าใจในทฤษฎีการวิเคราะห์โครงสร้างวิธี Direct Stiffness Method ยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการทำงานหรือศึกษาต่อในอนาคต

1.4.3 เข้าใจถึงการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมากขึ้น และสามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานในอนาคตได้

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

ใช้โปรแกรม STAAD-III เพื่อวิเคราะห์และออกแบบโครงข่ายแข็ง 3 มิติ โดยใช้ทฤษฎี Perform Analysis (Direct Stiffness Method) จะแสดงผลจากรายการคำนวณออกมาเป็น 2 ลักษณะคือ

1.5.1 แสดงผลเป็นรายการ (Text)

1.5.2 แสดงผลเป็นรูปภาพ (Graphic) ทำให้ดูเข้าใจได้ง่ายขึ้น

1.5.3 Load Case ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีดังนี้

1.5.3.1 Wind Load

1.5.3.2 Moving Load

1.5.3.3 Self weight (Dead Load)

1.5.3.4 Live Load

1.6 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1.6.1 เลือกเรื่อง โครงการที่สนใจ

1.6.2 เขียนเค้าโครงการวิจัย (Research Proposal)

1.6.3 เสนออาจารย์ที่ปรึกษา

1.6.4 ศึกษาเนื้อหาโดยละเอียด เพื่อเขียนขั้นตอนการทำงาน (Flowchart)

1.6.5 เลือกโครงสร้างที่จะใช้ในการวิเคราะห์

1.6.6 ปฏิบัติตามขั้นตอนการทำงานที่เตรียมไว้

1.6.7 เสนอผลการทำงานให้อาจารย์ตรวจสอบเป็นระยะ

1.6.8 จัดพิมพ์เอกสาร โครงการ เพื่อเข้ารูปเล่ม

1.6.9 เสนอให้อาจารย์ที่ปรึกษาตรวจสอบผลงาน

1.7 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ

เดือน	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
กิจกรรม						
1. เสนอเค้าโครง	████████████████████					
2. ศึกษาการใช้โปรแกรม	████████████████████					
3. เตรียมรายละเอียดโครงการ		████████████████████				
4. วิเคราะห์โครงสร้าง		████████████████████				
5. ตรวจสอบความถูกต้องของผลที่ได้		████████████████████				
6. เขียนรายงาน		████████████████████				

1.8 รายละเอียดงบประมาณของโครงการ

1.8.1 ค่าหมึกเครื่อง Print	1000	บาท
1.8.2 ค่าแผ่น Disk	250	บาท
1.8.3 ค่าถ่ายเอกสาร	550	บาท
1.8.4 ค่าเช่าเล่ม	1100	บาท
รวม	2900	บาท



บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

ในความเป็นจริงโครงสร้างส่วนใหญ่ นั้น อยู่ภายใต้ความไม่แน่นอนมากมาย เช่น คุณสมบัตินี้ของวัสดุที่ใช้ ขนาดและสัดส่วนของโครงสร้าง สภาพการรองรับต่าง ๆ รวมทั้งแรงที่มากระทำต่อโครงสร้างทั้งหลาย ทำให้การวิเคราะห์โครงสร้างอย่างถูกต้องจริง ๆ กระทำได้ยากหรืออาจเป็นไปได้เลย ดังนั้นเราจึงมักใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้าง เพื่อให้การวิเคราะห์โครงสร้างเป็นไปได้ และกระทำได้ง่ายพอสมควร โดยทั่วไป แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดี (ใกล้เคียงกับ โครงสร้างจริง) ร่วมกับสมมติฐาน และวิธีการวิเคราะห์ที่เหมาะสม จะให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมของ โครงสร้างจริงกว่าแบบจำลองที่ไม่ดี

หน้าที่ของผู้ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์โครงสร้าง คือ การป้อนข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ โครงสร้างที่ใกล้เคียงกับ โครงสร้างจริงมากที่สุด และตีความผลการวิเคราะห์ที่ได้ถูกต้องตามจริง ซึ่งหากผู้ใช้มีความเข้าใจในหลักการพื้นฐาน ทฤษฎี สมมติฐาน และวิธีการที่ใช้วิเคราะห์ โครงสร้างของ โปรแกรมวิเคราะห์ โครงสร้างนั้นดีเพียงพอก็จะช่วยให้ทำหน้าที่ดังกล่าวได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

2.1 วิธีการรวมสติฟเนสโดยตรง (Direct Stiffness Method)

เป็นวิธีการสังเคราะห์ สติฟเนสของโครงสร้างทั้งระบบ จากสติฟเนสของชิ้นส่วนย่อย ๆ โดยการเลือกระบบโคออร์ดิเนตที่เหมาะสม ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ และเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างใหญ่ ๆ หรือ โครงสร้างที่ยู่ไกล โดยอาศัยเครื่องคอมพิวเตอร์ และจัดเป็นวิธีการพื้นฐานส่วนหนึ่งที่ใช้ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย

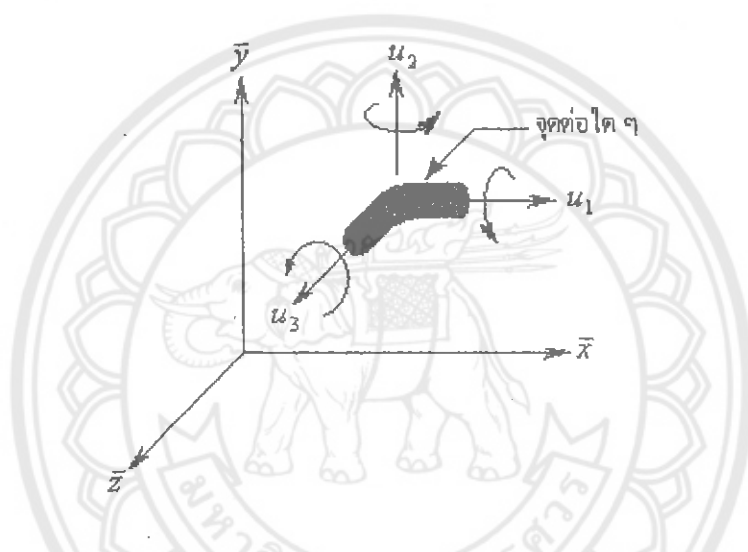
2.2 การสังเคราะห์สติฟเนสของโครงสร้างข้อแข็งสามมิติ

สำหรับโครงสร้างที่กำหนดให้ เราจะใช้ระบบแกนคาร์ทีเซียน $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ เพื่อใช้กำหนดเรขาคณิตของโครงสร้างและการเปลี่ยนตำแหน่งของข้อต่อทั้งระบบ เรียกว่า ระบบโคออร์ดิเนต โกลบอล (Global Coordinate System)

การตั้งเคราะห์สถิตินั้นของโครงสร้าง กระทำได้โดยการพิจารณาลักษณะของชิ้นส่วนย่อย ความต่อเนื่องของเปลี่ยนตำแหน่ง และสถานะสมดุลของข้อต่อ ซึ่งสิ่งที่ควรทราบมีดังนี้

2.3 โคออร์ดิเนตของการเปลี่ยนตำแหน่งอิสระ (Degree of Freedom)

สำหรับ โครงข้อแข็งสามมิติ ซึ่งใน 1 จุดจะมี 6 ดีกรีของควมอิสระ (Degree of freedom) ได้แก่ การเคลื่อนที่ในทิศทาง \bar{x}, \bar{y} และ \bar{z} และการหมุนรอบแกนของการเคลื่อนที่ทั้ง 3 แกน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงดีกรีของควมอิสระของแต่ละจุดต่อในระบบ โคออร์ดิเนตโกลบัล

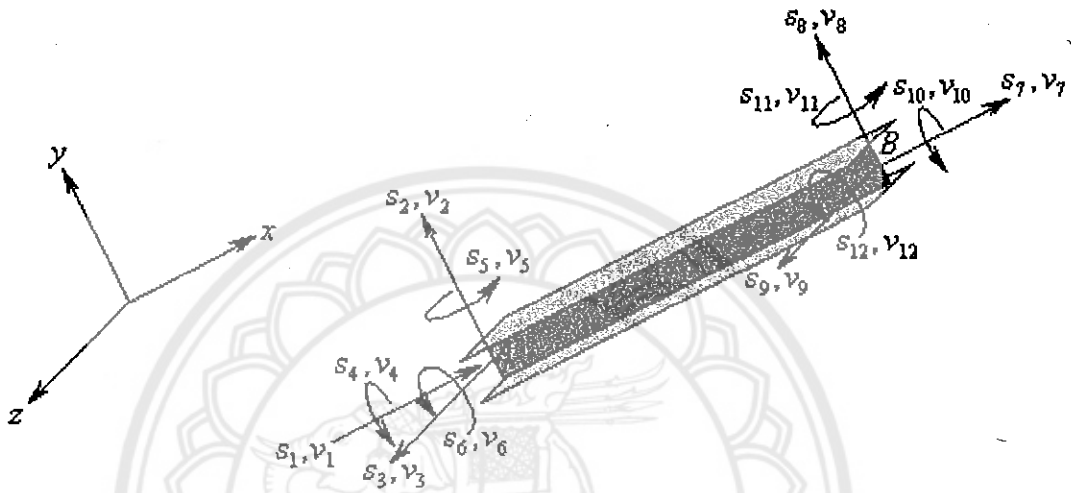
2.4 สถิตินั้นของชิ้นส่วนย่อยในระบบโคออร์ดิเนตประจำตัว (Local Stiffness Matrix)

สำหรับชิ้นส่วนใด ๆ เราจะเรียกระบบโคออร์ดิเนตประจำตัว (Local coordinate system) (x, y, z) ซึ่งผ่านแนวแกนของชิ้นส่วนและเขียนความสัมพันธ์ของแรงที่ปลายชิ้นส่วน \underline{S} กับการเปลี่ยนตำแหน่งที่ปลายชิ้นส่วน \underline{v} ตามสมการ

$$\underline{S} = k \underline{v} \quad (1a)$$

ซึ่งสำหรับชิ้นส่วนโครงข้อแข็งสามมิติ จะมีแรงและการเปลี่ยนตำแหน่งที่ปลายทั้งสอง อย่างละ 12 องค์ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 2ก หรือสมการที่ (1a) อาจเขียนเป็น

$$\begin{Bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{112} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{212} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{121} & k_{122} & \cdots & k_{1212} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_{12} \end{Bmatrix} \quad (1b)$$



รูปที่ 2ก แสดงแรง (S) และการเคลื่อนที่ (v) ที่ปลายของชิ้นส่วน โครงข้อแข็งสามมิติ ในระบบ
โคออร์ดิเนต ประจำตัว (Local coordinate system)

พึงสังเกตว่า การใช้ระบบ โคออร์ดิเนตประจำตัวทำให้สามารถเขียนสตีเฟนเนสของชิ้นส่วน
ต่าง ๆ ในรูปแบบเดียวกันโดยไม่ขึ้นกับทิศทางของชิ้นส่วนนั้น ๆ ทำให้ง่ายต่อการสร้าง (Generate)
สตีเฟนเนสประจำตัวโดยใช้โปรแกรมย่อย อันเดียวสำหรับชิ้นส่วนประเภท เดียวกัน

สำหรับชิ้นส่วน โครงข้อแข็งสามมิติสามารถพิสูจน์จากวิชาวิเคราะห์โครงสร้างได้ว่า
สตีเฟนเนสเมตริกซ์ในระบบโคออร์ดิเนตประจำตัวเป็นดังนี้ (ดูการพิสูจน์ได้ที่ภาคผนวก ข)

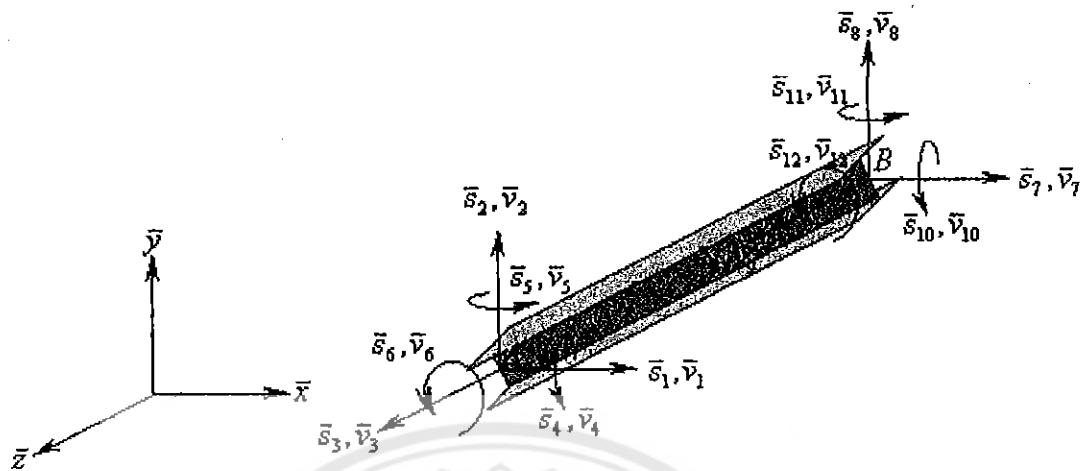
$$\tilde{k} = \begin{bmatrix}
 \frac{EA_x}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA_x}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \frac{12EI_x}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_x}{L^2} & 0 & -\frac{12EI_x}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_x}{L^2} \\
 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 \\
 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 \\
 0 & \frac{6EI_x}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_x}{L} & 0 & -\frac{6EI_x}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_x}{L} \\
 -\frac{EA_x}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA_x}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -\frac{12EI_x}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_x}{L^2} & 0 & \frac{12EI_x}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_x}{L^2} \\
 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 \\
 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 \\
 0 & \frac{6EI_x}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_x}{L} & 0 & -\frac{6EI_x}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_x}{L}
 \end{bmatrix}$$

(2)

- เมื่อ A_x หมายถึง พื้นที่หน้าตัด
 I_x, I_y หมายถึง โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัด
 E หมายถึง ค่าโมดูลัสของชิ้นส่วน
 J หมายถึง โมเมนต์อินเนอร์เซียของการบิด
 L หมายถึง ความยาวของชิ้นส่วน
 G หมายถึง โมดูลัสของแรงเฉือน

2.5 ระบบโคออร์ดิเนตโกลบัล (Global Stiffness System)

เนื่องจากระบบโคออร์ดิเนตประจำตัวของชิ้นส่วน แต่ละอัน หันในทิศทางต่าง ๆ กัน เวกเตอร์ของแรงที่ปลายชิ้นส่วนแต่ละอัน จึงไม่สามารถรวมกันได้โดยตรง เพื่อให้สามารถทำการรวมเวกเตอร์ได้โดยตรง จำเป็นต้องนิยามแรงและการเปลี่ยนตำแหน่งของแต่ละชิ้นส่วนในระบบโคออร์ดิเนตร่วมกัน ซึ่งหมายถึงระบบโคออร์ดิเนตโกลบัล $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ รูปที่ 2ก และรูปที่ 1 แสดงแรงและการเปลี่ยนตำแหน่งที่ปลายของชิ้นส่วนในระบบโคออร์ดิเนตทั้งสอง หวังระลึกว่า ชิ้นส่วนที่แสดงนี้เป็นชิ้นส่วนเดียวกัน เพียงแต่เขียนแสดงเวกเตอร์ของแรงและการเปลี่ยนตำแหน่ง ในระบบโคออร์ดิเนตที่ต่างกันเท่านั้น



รูปที่ 2 ข แสดงแรง $\begin{pmatrix} \bar{S} \\ \bar{v} \end{pmatrix}$ และการเคลื่อนที่ $\begin{pmatrix} \bar{v} \\ \bar{v} \end{pmatrix}$ ที่ปลายของชิ้นส่วน โครงข้อแฉ่งสามมิติในระบบ
โคออร์ดิเนต โกลบัล (Global coordinate system)

การคำนวณแรงและการเคลื่อนที่ ในระบบ โคออร์ดิเนต โกลบัล จำเป็นต้องอาศัยวิธีการ
แปลงปริมาณ เวกเตอร์ ระหว่างระบบโคออร์ดิเนตทั้งสอง ดังแสดงในหัวข้อถัดไป

2.6 การแปลงปริมาณเวกเตอร์ (Transformation of Vector Value)

สำหรับระบบโคออร์ดิเนต โกลบัล และระบบโคออร์ดิเนตประจำตัวที่มีเวกเตอร์หลัก 1
หน่วย (Principle unit vector) คือ $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ และ $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ ตามลำดับนั้น เราสามารถเขียนความ
สัมพันธ์ ระหว่างเวกเตอร์หลักทั้ง 6 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\hat{x} &= \cos \theta_{\bar{x}\bar{x}} \hat{x} + \cos \theta_{\bar{x}\bar{y}} \hat{y} + \cos \theta_{\bar{x}\bar{z}} \hat{z} \\ \hat{y} &= \cos \theta_{\bar{y}\bar{x}} \hat{x} + \cos \theta_{\bar{y}\bar{y}} \hat{y} + \cos \theta_{\bar{y}\bar{z}} \hat{z} \\ \hat{z} &= \cos \theta_{\bar{z}\bar{x}} \hat{x} + \cos \theta_{\bar{z}\bar{y}} \hat{y} + \cos \theta_{\bar{z}\bar{z}} \hat{z}\end{aligned}\quad (3)$$

หรือเขียนในรูปเมตริกซ์เป็น

$$\begin{Bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{\bar{x}\bar{x}} & \cos \theta_{\bar{x}\bar{y}} & \cos \theta_{\bar{x}\bar{z}} \\ \cos \theta_{\bar{y}\bar{x}} & \cos \theta_{\bar{y}\bar{y}} & \cos \theta_{\bar{y}\bar{z}} \\ \cos \theta_{\bar{z}\bar{x}} & \cos \theta_{\bar{z}\bar{y}} & \cos \theta_{\bar{z}\bar{z}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{Bmatrix}\quad (4a)$$

หรือ

$$\bar{X} = \bar{L} \times \bar{X}\quad (4b)$$

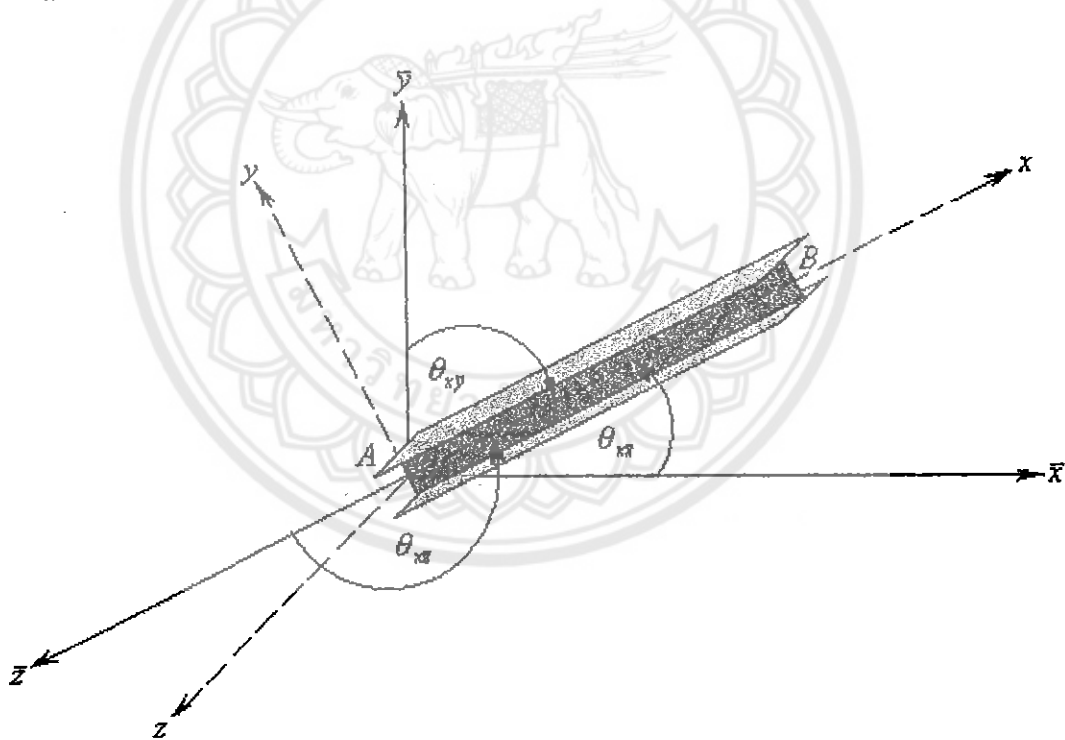
เมื่อ $\cos\theta_{\bar{x}\bar{x}}, \cos\theta_{\bar{x}\bar{y}}, \dots, \cos\theta_{\bar{x}\bar{z}}$ หมายถึง ค่าโคไซน์ ทิศทาง (Direction cosine) ของมุมระหว่างแกนโคออร์ดิเนตทั้งสอง เช่น มุม $\theta_{\bar{x}\bar{y}}$ จะหมายถึง มุมระหว่างแกน \bar{x} และ แกน \bar{y} เป็นต้น ซึ่งแสดงอย่างละเอียดในรูปที่ 3ก, 3ข และ 3ค ตามลำดับ

$\underline{X}, \bar{\underline{X}}$ หมายถึง ชุดของเวกเตอร์หลัก 1 หน่วยในระบบโคออร์ดิเนตทั้งสอง

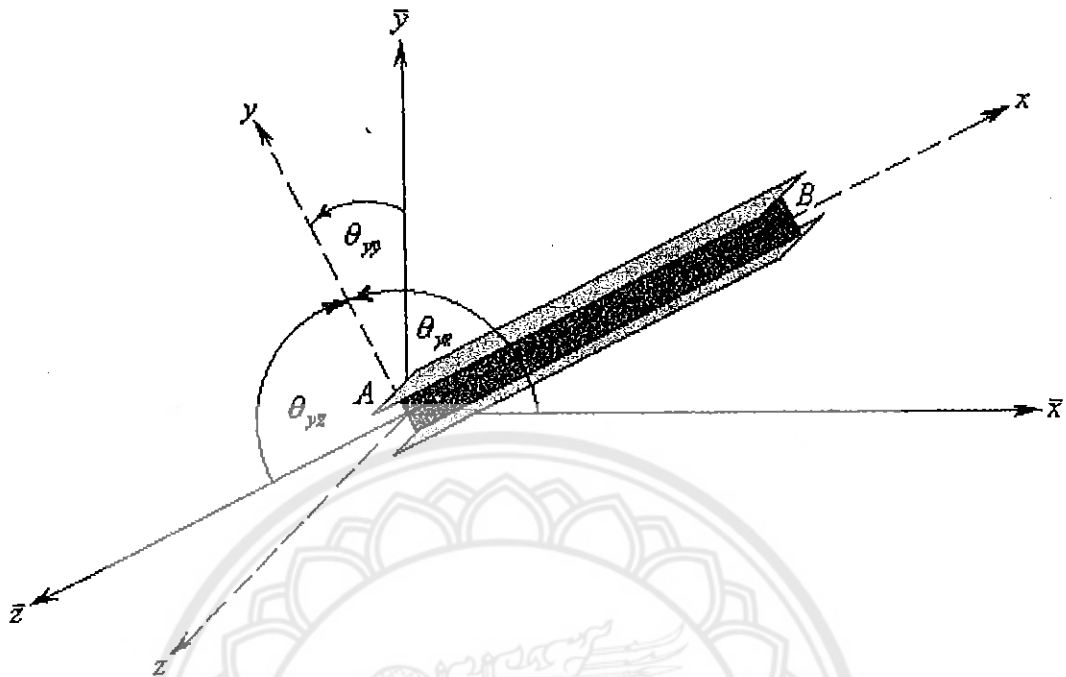
\underline{L} หมายถึง เมตริกซ์แปลงสำหรับปริมาณเวกเตอร์ (Vector transformation matrix) ระหว่างโคออร์ดิเนตทั้งสอง โดยเมตริกซ์ \underline{L} ที่ได้นี้มีคุณสมบัติเชิงตั้งฉาก (Orthogonal matrix) กล่าวคือ

$$\underline{L} \cdot \underline{L}^T = \underline{L}^T \cdot \underline{L} = \underline{I} \quad (5)$$

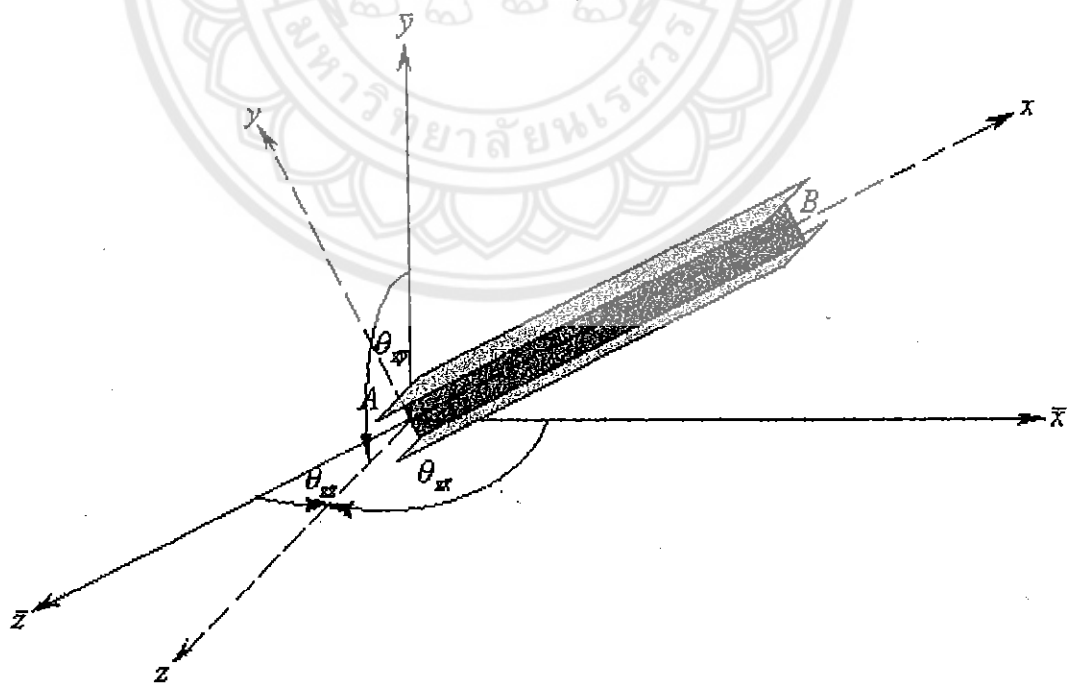
เมื่อ \underline{I} หมายถึง เมตริกซ์เอกลักษณ์



รูปที่ 3ก แสดงมุม $\theta_{\bar{x}\bar{x}}, \theta_{\bar{x}\bar{y}}, \theta_{\bar{x}\bar{z}}$



รูปที่ 3ข แสดงมุม $\theta_{yx}, \theta_{yz}, \theta_{xz}$



รูปที่ 3ค แสดงมุม $\theta_{zx}, \theta_{zy}, \theta_{xy}$

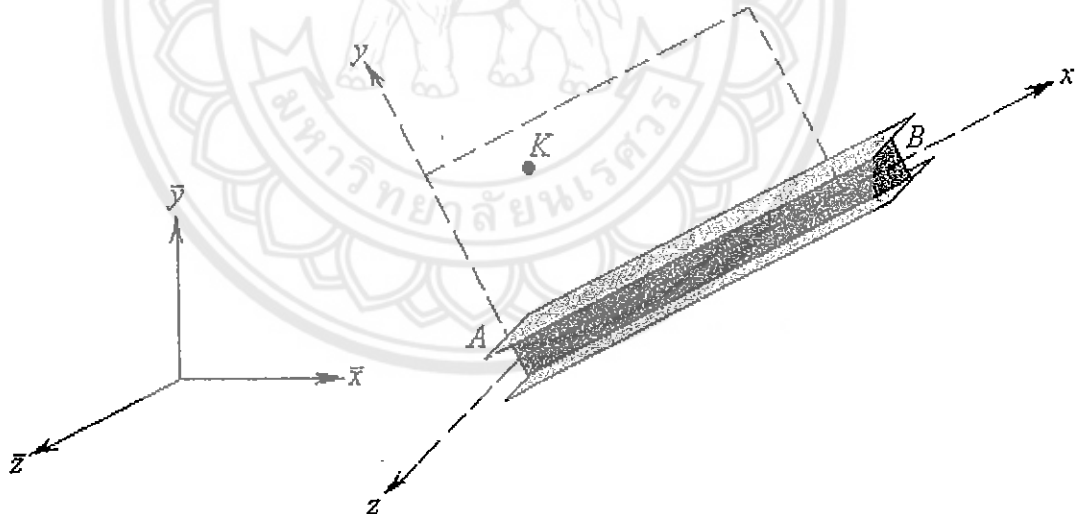
รูปที่ 3 แสดงมุมระหว่างแกนของระบบโคออร์ดิเนตโกลบัล และระบบโคออร์ดิเนตประจำตัว

เนื่องจากเนื้อที่หน้ากระดาษและมีจำกัดเพื่อความสะดวกในการเขียน รายงานฉบับนี้จึงเขียนย่อสมาชิกในเมตริกซ์ L เป็นดังนี้

$$\tilde{L} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{x\bar{x}} & \cos\theta_{y\bar{y}} & \cos\theta_{z\bar{z}} \\ \cos\theta_{y\bar{x}} & \cos\theta_{x\bar{y}} & \cos\theta_{z\bar{y}} \\ \cos\theta_{z\bar{x}} & \cos\theta_{x\bar{z}} & \cos\theta_{y\bar{z}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{x\bar{x}} & c_{y\bar{y}} & c_{z\bar{z}} \\ c_{y\bar{x}} & c_{x\bar{y}} & c_{z\bar{y}} \\ c_{z\bar{x}} & c_{x\bar{z}} & c_{y\bar{z}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

สำหรับการป้อนข้อมูลในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยทั่วไปทิศทางของระบบโคออร์ดิเนตประจำตัว จะทราบเฉพาะทิศทางของแกน x แต่ทิศทางของแกน y และ z ต้องได้จากการใส่ข้อมูลเพิ่มเติม สามารถทำได้ 2 วิธีคือ วิธีกำหนดจุดอ้างอิง (Reference point method) และวิธีกำหนดมุมอ้างอิง (Reference angle method) ดังนี้

2.6.1 วิธีกำหนดจุดอ้างอิง (Reference point method) เป็นการกำหนดจุดที่อยู่บนระนาบ $x-y$ ในส่วนที่เป็นช่วงบวกของแกน y ดังแสดงในรูปที่ 4 เพื่อช่วยในการคำนวณทิศทางของแกน y และ z



รูปที่ 4 แสดงการคำนวณ โคออร์ดิเนตประจำตัวด้วยวิธีกำหนดจุดอ้างอิง

จากรูปเวกเตอร์ 1 หน่วยในแนวแกน x ได้จากเวกเตอร์ \overline{AB} หารด้วยขนาดของเวกเตอร์ \overline{AB} นั้นเองและจากสมการที่ (3) สามารถเขียนได้เป็น

$$\hat{x} = \frac{\overline{AB}}{|\overline{AB}|} = c_{x\bar{x}}\hat{x} + c_{y\bar{y}}\hat{y} + c_{z\bar{z}}\hat{z} \quad (7a)$$

เวกเตอร์ 1 หน่วยในแนวแกน z ได้จากผลคูณแบบเวกเตอร์ของเวกเตอร์ \overline{AB} กับเวกเตอร์ \overline{AK} หาขนาดของผลคูณนั้น ได้สมการ

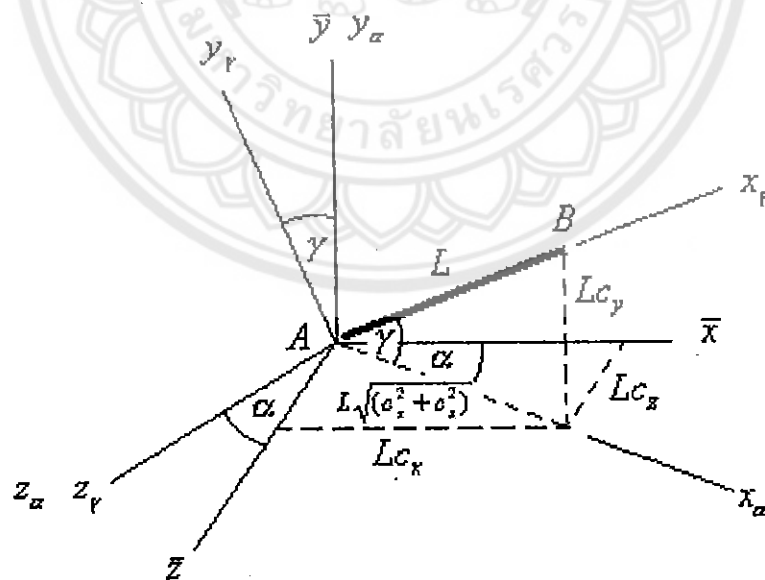
$$\hat{z} = \frac{\overline{AB} \times \overline{AK}}{|\overline{AB} \times \overline{AK}|} = c_{zx}\hat{x} + c_{zy}\hat{y} + c_{zz}\hat{z} \quad (7b)$$

และสำหรับในแนวแกน y ได้จากผลคูณแบบเวกเตอร์ของเวกเตอร์ 1 หน่วยในแนวแกน z กับเวกเตอร์ 1 หน่วยในแนวแกน x ดังนี้

$$\hat{y} = \hat{z} \times \hat{x} = c_{yx}\hat{x} + c_{yy}\hat{y} + c_{yz}\hat{z} \quad (7c)$$

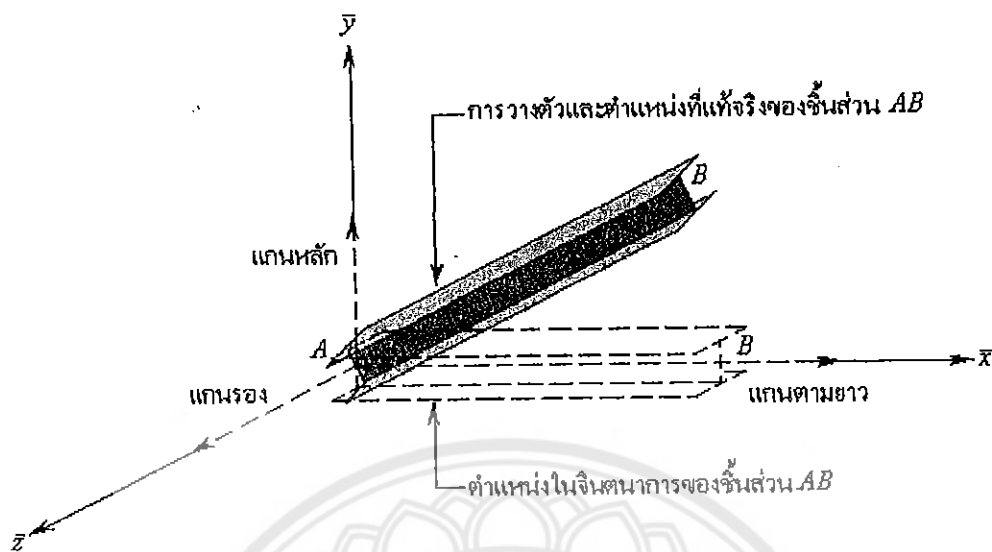
จากสมการที่ (7) จะสามารถคำนวณโคไซน์ทิศทาง (Direction cosine) ของ $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ ได้ โดยเวกเตอร์ \overline{AB} และ \overline{AK} คำนวณจาก วิธีทางเวกเตอร์ธรรมดา เมื่อนำ $c_{xx}, c_{xy}, \dots, c_{yz}$ แทนลงในสมการที่ (6) ก็จะได้เมตริกซ์ L ตามต้องการ

2.6.2 วิธีกำหนดมุมอ้างอิง (Reference angle method) วิธีนี้เป็นการกำหนดมุมที่หน้าตัดของชิ้นส่วนโครงข้อแข็ง 3 มิติหมุนไปจากแนวเดิม ซึ่งมุมดังกล่าวสำหรับในโปรแกรม STAAD-III เรียกว่า มุมเบต้า (β) ซึ่งจะหาค่ามุมเบต้า β ได้ดังนี้

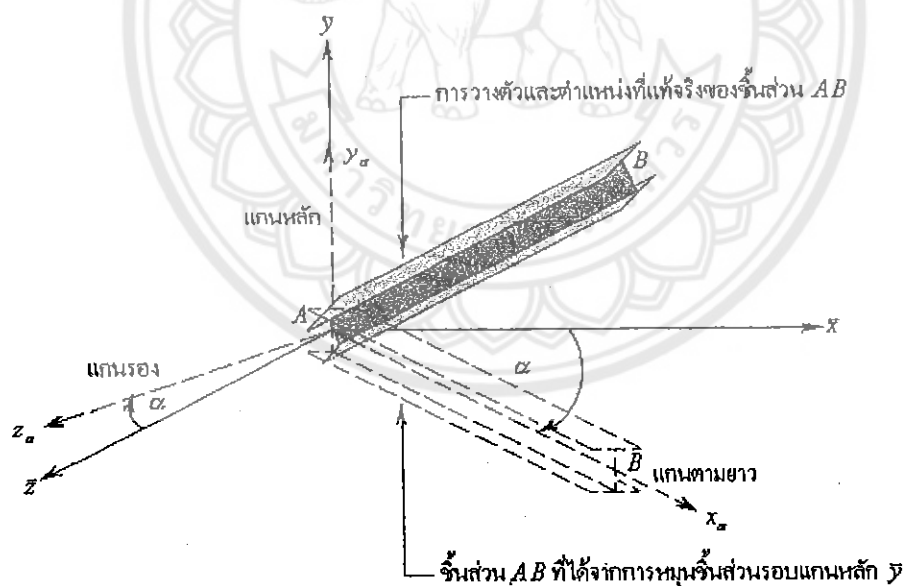


รูปที่ 5ก แสดงมุมที่ member กระทำกับระบบแกนต่าง ๆ

จากรูปที่ 5ก จินตนาการให้ชิ้นส่วน AB เดิมวางตัวอยู่ในแนวแกน \bar{x} และมีระบบแกนประจำตัวเดิมซ้อนพอดีกับระบบโคออร์ดิเนตโกลบอล ดังแสดงในรูปที่ 5ข

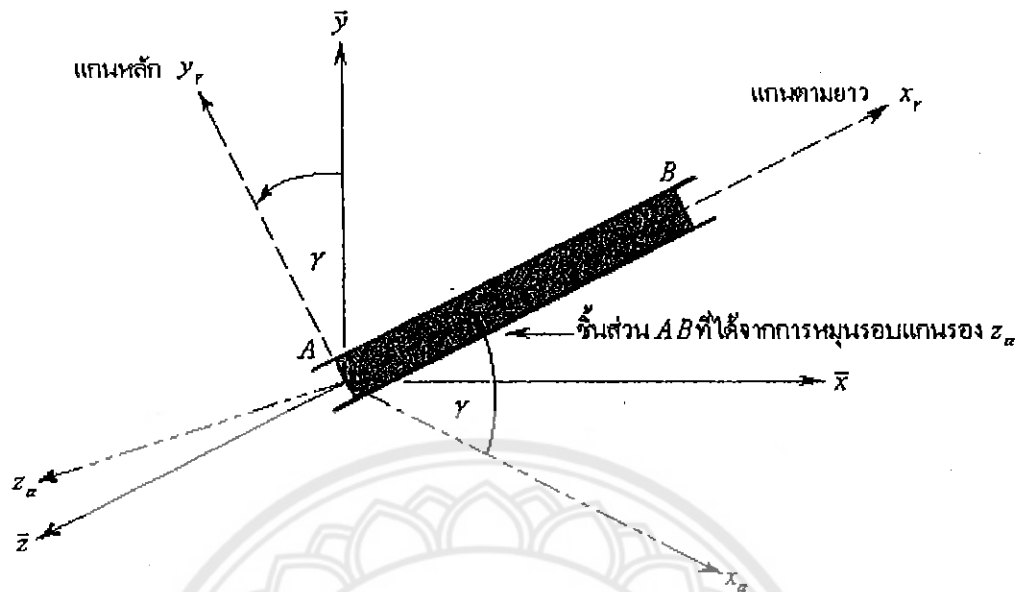


รูปที่ 5ข แสดงตำแหน่งเดิมในจินตนาการและตำแหน่งที่แท้จริงของชิ้นส่วน AB หมุนชิ้นส่วน AB รอบแกนหลักให้มาอยู่ในแนวเดียวกับตำแหน่งที่แท้จริงของชิ้นส่วน AB มุมที่หมุนไปเรียกว่ามุม อัลฟ่า (α) ดังแสดงในรูปที่ 5ค



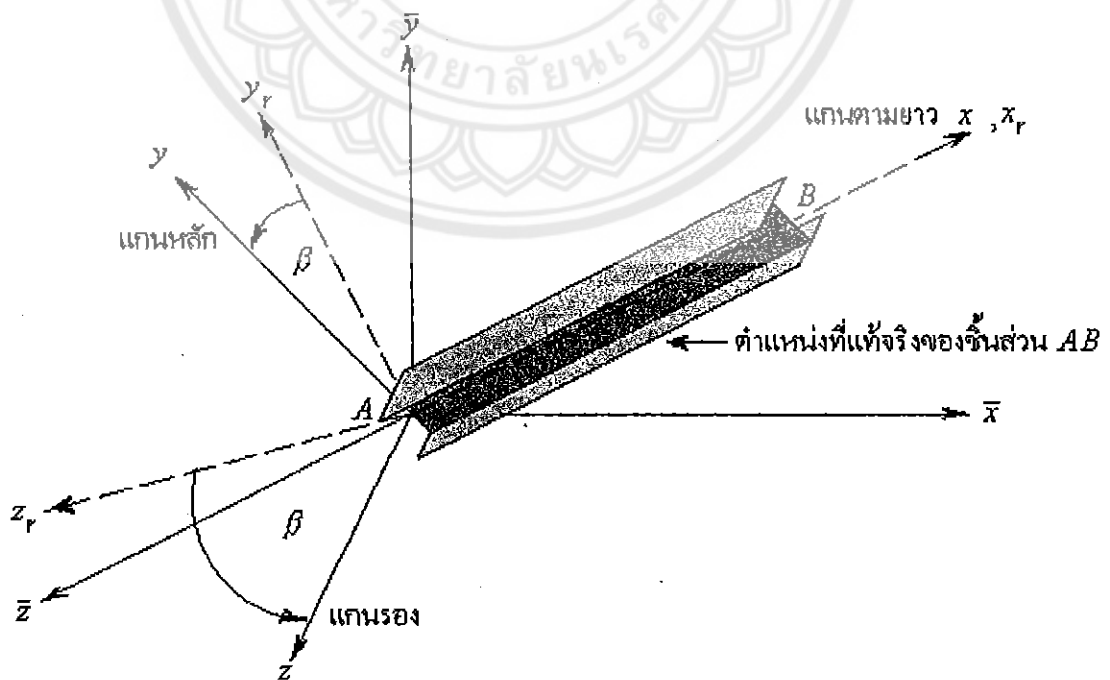
รูปที่ 5ค แสดงตำแหน่งและระบบแกนของชิ้นส่วน AB ที่ได้จากการหมุนรอบแกนหลัก (y)

จากนั้นหมุนชิ้นส่วน AB รอบแกนรอง (z_α) เพื่อให้ชิ้นส่วน AB มาอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง มุมที่หมุนไปเรียกว่า มุมแกมมา (γ) ดังแสดงในรูป 5ง



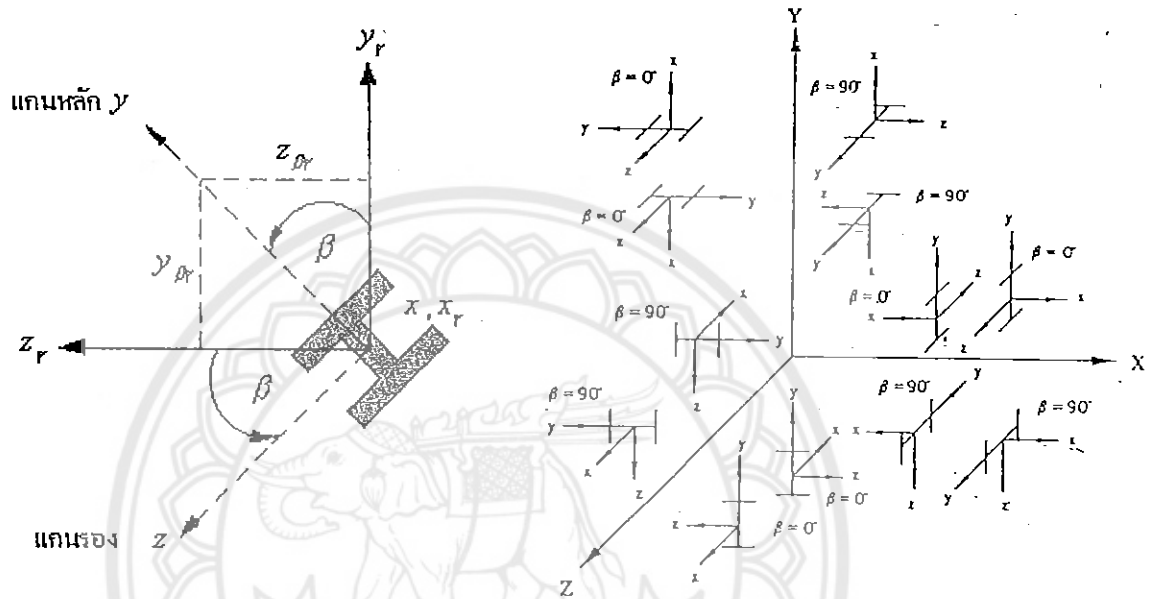
รูปที่ 5ง แสดงตำแหน่งและระบบแกน (x_r, y_r, z_r) ของชิ้นส่วน AB ที่ได้จากการหมุนรอบแกน z_α

และขั้นสุดท้าย หมุนหน้าตัดของชิ้นส่วน AB รอบแกนตามยาว (x_r) เพื่อให้ได้การวางตัวของหน้าตัดตรงตามที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 5จ



รูปที่ 5จ แสดงมุมเบค้า (β) ตำแหน่งและระบบโคออร์ดิเนตประจำตัว (x, y, z) ที่แท้จริงของชิ้นส่วน AB

ตั้งมุมเบต้า (β) จึงหมายถึงมุมที่หน้าตัดของชิ้นส่วน AB หมุน (Rotate) รอบแกนตามยาวของระบบแกนเดิมเพื่อให้ได้การวางตัวของหน้าตัดที่ถูกต้องตามความเป็นจริง โดยระบบแกนเดิมได้จากการหมุนชิ้นส่วนนั้นรอบแกนหลักและแกนรองตามลำดับ จนมาอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง ดังรูป



รูปที่ 5ค แสดงการวางตัวของหน้าตัดทำมุม β รูปที่ 5ข แสดงตัวอย่างการวางตัวของหน้าตัดทำมุมกับแกนโคออร์ดิเนตเดิม (x_r, y_r, z_r) β ต่างๆ

จากรูปที่ 5ค สามารถเขียนความสัมพันธ์ของเวกเตอร์หลักหนึ่งหน่วยในระบบโคออร์ดิเนตใหม่ ($\hat{x}_\alpha, \hat{y}_\alpha, \hat{z}_\alpha$) ที่เกิดจากการหมุนชิ้นส่วน AB รอบแกนหลัก (\hat{y}) กับเวกเตอร์หลักหนึ่งหน่วยในระบบโคออร์ดิเนตโกลบัลดังนี้

$$\begin{aligned} \hat{x}_\alpha &= \cos\alpha \hat{x} + \cos 90^\circ \hat{y} + \sin\alpha \hat{z} \\ \hat{y}_\alpha &= \cos 90^\circ \hat{x} + \cos 0^\circ \hat{y} + \cos 90^\circ \hat{z} \\ \hat{z}_\alpha &= -\sin\alpha \hat{x} + \cos 90^\circ \hat{y} + \cos\alpha \hat{z} \end{aligned} \tag{8a}$$

หรือเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \hat{x}_\alpha \\ \hat{y}_\alpha \\ \hat{z}_\alpha \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{Bmatrix} \tag{8b}$$

$$\underset{\sim}{X}_\alpha = \underset{\sim}{R}_\alpha \underset{\sim}{\bar{X}} \tag{8c}$$

โดยที่ $\hat{x}_\alpha, \hat{y}_\alpha, \hat{z}_\alpha$ หมายถึง เวกเตอร์หลักหนึ่งหน่วยในระบบโคออร์ดิเนตใหม่ $(x_\alpha, y_\alpha, z_\alpha)$

$$\alpha \text{ หมายถึง มุมที่หมุนไปรอบแกน } \bar{y} \text{ มีค่าเป็น } \alpha = \begin{cases} 0 & \text{เมื่อ } \bar{z}_B = \bar{z}_A \\ \arctan\left(\frac{\bar{z}_B - \bar{z}_A}{\bar{x}_B - \bar{x}_A}\right) & \text{เมื่อ } \bar{z}_B \neq \bar{z}_A \end{cases}$$

$(\bar{x}_A, \bar{y}_A, \bar{z}_A)$ และ $(\bar{x}_B, \bar{y}_B, \bar{z}_B)$ หมายถึง พิกัดตำแหน่งของ A และ B ที่แท้จริงในระบบ
โคออร์ดิเนตโกลบัล

\tilde{X}_α และ \tilde{X}_γ หมายถึง ชุดของเวกเตอร์หลักหนึ่งหน่วยในระบบโคออร์ดิเนต
ทั้งสอง

จากรูปที่ 5g ความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์หลักหนึ่งหน่วยในระบบโคออร์ดิเนตใหม่ที่เกิด
จากการหมุนชิ้นส่วน AB รอบแกนหลัก (z_α) กับเวกเตอร์หลักหนึ่งหน่วยในระบบโคออร์ดิเนต
 $(x_\alpha, y_\alpha, z_\alpha)$ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \hat{x}_\gamma &= \cos \gamma \hat{x}_\alpha + \sin \gamma \hat{y}_\alpha + \cos 90^\circ \hat{z}_\alpha \\ \hat{y}_\gamma &= -\sin \gamma \hat{x}_\alpha + \cos \gamma \hat{y}_\alpha + \cos 90^\circ \hat{z}_\alpha \\ \hat{z}_\gamma &= \cos 90^\circ \hat{x}_\alpha + \cos 90^\circ \hat{y}_\alpha + \cos 0^\circ \hat{z}_\alpha \end{aligned}$$

หรือเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_\gamma \\ \hat{y}_\gamma \\ \hat{z}_\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_\alpha \\ \hat{y}_\alpha \\ \hat{z}_\alpha \end{bmatrix} \quad (9a)$$

หรือ

$$\tilde{X}_\gamma = R_{\tilde{y}} \tilde{X}_\alpha \quad (9b)$$

โดย γ หมายถึงมุมที่หมุนรอบแกนหลัก (z_α) มีค่าเป็น

$$\gamma = \arctan\left(\frac{y_B - y_A}{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + (z_B - z_A)^2}}\right)$$

$(\hat{x}_\gamma, \hat{y}_\gamma, \hat{z}_\gamma)$ และ \tilde{X}_γ มีความหมายนัยเดียวกันกับ $(\hat{x}_\alpha, \hat{y}_\alpha, \hat{z}_\alpha)$ และ \tilde{X}_α ในสมการที่ (8)

ในการทำงานเดียวกัน รูปที่ 5 อาจเขียนความสัมพันธ์ระหว่างจุดของเวกเตอร์หลักหนึ่งหน่วยได้ว่า

$$\begin{aligned}\hat{x} &= \cos 0^\circ \hat{x}_\gamma + \cos 90^\circ \hat{y}_\gamma + \cos 90^\circ \hat{z}_\gamma \\ \hat{y} &= \cos 90^\circ \hat{x}_\gamma + \cos \beta \hat{y}_\gamma + \sin \beta \hat{z}_\gamma \\ \hat{z} &= \cos 90^\circ \hat{x}_\gamma - \sin \beta \hat{y}_\gamma + \cos \beta \hat{z}_\gamma\end{aligned}$$

หรือเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{x}_\gamma \\ \hat{y}_\gamma \\ \hat{z}_\gamma \end{Bmatrix} \quad (10a)$$

หรือ

$$\underset{\sim}{X} = \underset{\sim}{R} \underset{\sim}{R}_\beta \underset{\sim}{X}_\gamma \quad (10b)$$

โดย β เป็นมุมอ้างอิงของชิ้นส่วน

แทนสมการที่ (8) และ (9) ลงใน (10) จะได้ว่า

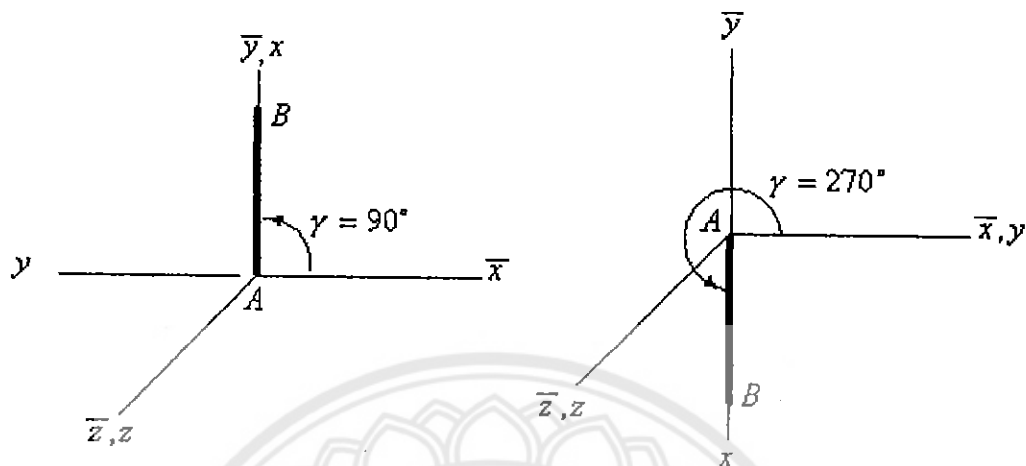
$$\underset{\sim}{X} = \underset{\sim}{R} \underset{\sim}{R}_\beta \underset{\sim}{R}_\gamma \underset{\sim}{X}_\alpha \quad (11)$$

$\underset{\sim}{R}_\beta \underset{\sim}{R}_\gamma \underset{\sim}{R}_\alpha$ หมายถึง เมทริกซ์สัมประสิทธิ์ (Coefficient matrix)

ดังนั้นจากสมการข้างต้นและสมการที่ (4) จะสรุปได้ว่า

$$\begin{aligned}L &= \underset{\sim}{R} \underset{\sim}{R}_\beta \underset{\sim}{R}_\gamma \underset{\sim}{R}_\alpha \\ &= \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \alpha & \sin \gamma & \cos \gamma \sin \alpha \\ -\cos \beta \sin \gamma \cos \alpha - \sin \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \gamma & -\cos \beta \sin \gamma \sin \alpha + \sin \beta \cos \alpha \\ \sin \beta \sin \gamma \cos \alpha - \cos \beta \sin \alpha & -\sin \beta \cos \gamma & \sin \beta \sin \gamma \sin \alpha + \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix}\end{aligned}$$

ในกรณีของเสาที่ z จะอยู่ในแนวระนาบ (Horizontal plane) ซึ่งแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 5 ข แสดงการวางตัวของเสาในกรณี $\gamma = 90^\circ$ และ $\gamma = 270^\circ$

เราหมุนแกน x ให้ $\gamma = 90^\circ$ ก็จะได้ว่าแกน z จะอยู่ตำแหน่งเดียวกับ \bar{z} หรือในกรณีที่ $\gamma = 270^\circ$ ก็เช่นเดียวกัน แตกต่างกันเพียงเครื่องหมายเท่านั้นดังนั้น

$$\begin{aligned}x &= \bar{x} \cos \gamma + \bar{y} \sin \gamma + \bar{z} \cos 90^\circ \\y &= -\bar{x} \sin \gamma + \bar{y} \cos \gamma + \bar{z} \cos 90^\circ \\z &= \bar{x} \cos 90^\circ + \bar{y} \cos 90^\circ + \bar{z} \cos 0^\circ\end{aligned}$$

กำหนดให้ $\gamma = 90^\circ$ ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปเมทริกซ์ได้เป็น

$$L_{\text{vertical}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ในกรณีที่เสาไม่ได้ทำมุม 90° หรือ 270° แต่แกน z ยังอยู่ตำแหน่งเดียวกับ \bar{z} เราจะได้ความสัมพันธ์ในรูปเมทริกซ์คือ

$$L_{\text{incline}} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.7 เมตริกซ์แปลงสำหรับชิ้นส่วนโครงข้อแข็งสามมิติ (Transformation Matrix of Space Frame Member)

ด้วยการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์ จากสมการที่ (4) เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ที่ปลายของชิ้นส่วนทั้ง 12 องศาประกอบตั้งในรูปที่ 2 ในระบบโคออร์ดิเนตทั้งสองได้ดังนี้

ที่ปลาย A จะได้ว่า

$$\begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\bar{x}\bar{x}} & C_{\bar{x}\bar{y}} & C_{\bar{x}\bar{z}} \\ C_{\bar{y}\bar{x}} & C_{\bar{y}\bar{y}} & C_{\bar{y}\bar{z}} \\ C_{\bar{z}\bar{x}} & C_{\bar{z}\bar{y}} & C_{\bar{z}\bar{z}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \\ \bar{v}_3 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} v_4 \\ v_5 \\ v_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\bar{x}\bar{x}} & C_{\bar{x}\bar{y}} & C_{\bar{x}\bar{z}} \\ C_{\bar{y}\bar{x}} & C_{\bar{y}\bar{y}} & C_{\bar{y}\bar{z}} \\ C_{\bar{z}\bar{x}} & C_{\bar{z}\bar{y}} & C_{\bar{z}\bar{z}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{v}_4 \\ \bar{v}_5 \\ \bar{v}_6 \end{Bmatrix}$$

และที่ปลาย B ก็เป็นในทำนองเดียวกัน ดังนั้นเขียนรวมความสัมพันธ์ทั้งหมดได้เป็น

$$\begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \\ v_7 \\ v_8 \\ v_9 \\ v_{10} \\ v_{11} \\ v_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\bar{x}\bar{x}} & C_{\bar{x}\bar{y}} & C_{\bar{x}\bar{z}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{\bar{y}\bar{x}} & C_{\bar{y}\bar{y}} & C_{\bar{y}\bar{z}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{\bar{z}\bar{x}} & C_{\bar{z}\bar{y}} & C_{\bar{z}\bar{z}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{\bar{x}\bar{x}} & C_{\bar{x}\bar{y}} & C_{\bar{x}\bar{z}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{\bar{y}\bar{x}} & C_{\bar{y}\bar{y}} & C_{\bar{y}\bar{z}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{\bar{z}\bar{x}} & C_{\bar{z}\bar{y}} & C_{\bar{z}\bar{z}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{\bar{x}\bar{x}} & C_{\bar{x}\bar{y}} & C_{\bar{x}\bar{z}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{\bar{y}\bar{x}} & C_{\bar{y}\bar{y}} & C_{\bar{y}\bar{z}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{\bar{z}\bar{x}} & C_{\bar{z}\bar{y}} & C_{\bar{z}\bar{z}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{\bar{x}\bar{x}} & C_{\bar{x}\bar{y}} & C_{\bar{x}\bar{z}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{\bar{y}\bar{x}} & C_{\bar{y}\bar{y}} & C_{\bar{y}\bar{z}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{\bar{z}\bar{x}} & C_{\bar{z}\bar{y}} & C_{\bar{z}\bar{z}} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \\ \bar{v}_3 \\ \bar{v}_4 \\ \bar{v}_5 \\ \bar{v}_6 \\ \bar{v}_7 \\ \bar{v}_8 \\ \bar{v}_9 \\ \bar{v}_{10} \\ \bar{v}_{11} \\ \bar{v}_{12} \end{Bmatrix} \quad (12a)$$

หรือเขียนย่อเป็น

$$\underset{\sim}{v} = a \underset{\sim}{\bar{v}} \quad (12b)$$

เมตริกซ์ a ก็คือเมตริกซ์แปลง (Transformation matrix) ของชิ้นส่วน โครงข้อแข็งสามมิติ ซึ่งเราจะ ตั้งเกตุว่า

$$\underline{a} = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 & 0 \\ \sim & \sim & \sim & \sim \\ 0 & L & 0 & 0 \\ \sim & \sim & \sim & \sim \\ 0 & 0 & L & 0 \\ \sim & \sim & \sim & \sim \\ 0 & 0 & 0 & L \\ \sim & \sim & \sim & \sim \end{bmatrix} \quad (13)$$

และในทำนองเดียวกัน แรงที่ปลายของชิ้นส่วน โครงข้อแข็งสามมิติ ก็สามารถแปลงระหว่างในระบบโคออร์ดิเนตโกลบัลและโคออร์ดิเนตประจำตัวได้ตามสมการ

$$\underline{S} = \underline{a} \underline{\bar{S}} \quad (14)$$

เมื่อ \underline{S} และ $\underline{\bar{S}}$ หมายถึง $[S_1 \ S_2 \ \dots \ S_{12}]^T$ และ $[\bar{S}_1 \ \bar{S}_2 \ \dots \ \bar{S}_{12}]^T$ ตามลำดับ (แสดงในรูปที่ 2)

เนื่องจาก \underline{L} มีคุณสมบัติเชิงเส้นตั้งฉาก ดังนั้น \underline{a} จึงมีคุณสมบัติดังกล่าวด้วย หรืออาจเขียนได้ว่า

$$\underline{a} \cdot \underline{a}^T = \underline{a}^T \cdot \underline{a} = \underline{I} \quad (15)$$

2.8 สติฟเนสของชิ้นส่วนย่อยในระบบโกลบัล (Global Stiffness of Members)

จากสมการที่ (1) เมื่อแทนสมการที่ (12) ลงไป จะได้ว่า

$$\underline{S} = \underline{k} \underline{a} \underline{\bar{v}} \quad (16)$$

จากนั้นแทนสมการที่ (14) ลงในสมการข้างต้นและใช้คุณสมบัติเชิงตั้งฉากของเมทริกซ์ \underline{a} จะได้ว่า

$$\underline{\bar{S}} = \underline{a}^T \underline{k} \underline{a} \underline{\bar{v}} \quad (17a)$$

หรือ

$$\underline{\bar{S}} = \underline{\bar{k}} \underline{\bar{v}} \quad (17b)$$

สมการข้างต้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงและการเคลื่อนตัวที่จุดต่อของชิ้นส่วนในระบบโคออร์ดิเนตโกลบัล

เมื่อ $\underline{\bar{k}}$ คือ เมทริกซ์สติฟเนสของชิ้นส่วนย่อยในระบบโคออร์ดิเนตโกลบัล ซึ่งจะขึ้นกับขนาด ความยาว ชนิดของวัสดุ และการวางตัวในสามมิติของแต่ละชิ้นส่วนจากการคำนวณจะได้ $\underline{\bar{k}}$ ดังนี้

$$\bar{k} = \begin{bmatrix} \bar{k}_{11} & \bar{k}_{12} & \bar{k}_{13} & \bar{k}_{14} & \bar{k}_{15} & \bar{k}_{16} & \bar{k}_{17} & \bar{k}_{18} & \bar{k}_{19} & \bar{k}_{1,10} & \bar{k}_{1,11} & \bar{k}_{1,12} \\ - & \bar{k}_{22} & \bar{k}_{23} & \bar{k}_{24} & \bar{k}_{25} & \bar{k}_{26} & \bar{k}_{27} & \bar{k}_{28} & \bar{k}_{29} & \bar{k}_{2,10} & \bar{k}_{2,11} & \bar{k}_{2,12} \\ - & - & \bar{k}_{33} & \bar{k}_{34} & \bar{k}_{35} & \bar{k}_{36} & \bar{k}_{37} & \bar{k}_{38} & \bar{k}_{39} & \bar{k}_{3,10} & \bar{k}_{3,11} & \bar{k}_{3,12} \\ - & - & - & \bar{k}_{44} & \bar{k}_{45} & \bar{k}_{46} & \bar{k}_{47} & \bar{k}_{48} & \bar{k}_{49} & \bar{k}_{4,10} & \bar{k}_{4,11} & \bar{k}_{4,12} \\ - & - & - & - & \bar{k}_{55} & \bar{k}_{11} & \bar{k}_{11} & \bar{k}_{11} & \bar{k}_{11} & \bar{k}_{11} & \bar{k}_{11} & \bar{k}_{11} \\ - & - & - & - & - & \bar{k}_{66} & \bar{k}_{67} & \bar{k}_{68} & \bar{k}_{69} & \bar{k}_{6,10} & \bar{k}_{6,11} & \bar{k}_{6,12} \\ - & - & - & - & - & - & \bar{k}_{77} & \bar{k}_{78} & \bar{k}_{79} & \bar{k}_{7,10} & \bar{k}_{7,11} & \bar{k}_{7,12} \\ - & - & - & sym & - & - & - & \bar{k}_{88} & \bar{k}_{89} & \bar{k}_{8,10} & \bar{k}_{8,11} & \bar{k}_{8,12} \\ - & - & - & - & - & - & - & - & \bar{k}_{99} & \bar{k}_{9,10} & \bar{k}_{9,11} & \bar{k}_{9,12} \\ - & - & - & - & - & - & - & - & - & \bar{k}_{10,10} & \bar{k}_{10,11} & \bar{k}_{10,12} \\ - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & \bar{k}_{11,11} & \bar{k}_{11,12} \\ - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & \bar{k}_{12,12} \end{bmatrix}$$

ซึ่งค่า \bar{k} ต่าง ๆ สามารถดูได้จากภาคผนวก ค

2.9 เงื่อนไขของความต่อเนื่อง (Compatibility Conditions)

โดยการพิจารณาภาวะความต่อเนื่องของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของปลายชิ้นส่วนแต่ละอันกับของข้อต่อในโครงสร้าง พบว่าการเคลื่อนที่ของข้อต่อในโครงสร้าง จะมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่ปลายของชิ้นส่วนแต่ละอันที่มาต่อกัน ณ ข้อต่อนั้นเสมอ ตัวอย่างแสดงในรูปที่ 6k หรือเขียนเป็นสมการได้ว่าสำหรับการเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน และ ณ จุดต่อเดียวกันจะได้

$$u_i = \bar{v}^m \quad (18)$$

เมื่อ u_i หมายถึง การเคลื่อนที่ของข้อต่อที่ติดริขของความอิสระของโครงสร้างที่ i

\bar{v}^m หมายถึง การเคลื่อนที่ที่ปลายของชิ้นส่วน m ณ จุดต่อเดียวกันและการเคลื่อนที่ในทิศเดียวกับ u_i

2.10 ภาวะสมดุล (Equilibrium Conditions)

จากการพิจารณาภาวะสมดุลของข้อต่อใด ๆ พบว่า ผลรวมของแรงภายในจากของทุกชิ้นส่วนที่มาต่อกัน ณ ข้อต่อกับแรงภายนอกที่กระทำบริเวณข้อต่อจะเท่ากับศูนย์ หรือกล่าวว่า ณ ทุก ๆ รอยต่อต้องอยู่ในภาวะสมดุล ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 6ข หรือเขียนเป็นสมการได้ว่า สำหรับแรงในทิศทางเดียวกัน และ ณ จุดต่อเดียวกันซึ่งมีชิ้นส่วน n รอยต่อจำนวน n ชิ้น ดังนี้

$$P_i = \sum_{r=1}^n \bar{S}^m \quad (19)$$

เมื่อ P_i หมายถึง แรงภายนอกที่มากระทำ ณ ข้อต่อ ที่ติกริขของความอิสระของโครงสร้างที่ i
 \bar{S}^m หมายถึง แรงภายในที่เกิดขึ้นของชิ้นส่วน m , ในทิศเดียวกับ P_i ณ จุดต่อเดียวกัน



รูปที่ 6 แสดงตัวอย่าง เงื่อนไขความต่อเนื่องของข้อต่อ (การเคลื่อนที่ของข้อต่อและปลายของชิ้นส่วนมีค่าเท่ากันเสมอ) รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างสถานะสมดุลของข้อต่อ (ณ รอยต่อต้องอยู่ในสถานะสมดุลเสมอ)

2.11 สถิติฟเนสของโครงสร้างในระบบโคออร์ดิเนตโกลบัล (Global Stiffness of Space Frame Structure)

ซึ่งจากสถานะสมดุลและเงื่อนไขความต่อเนื่องดังกล่าว ทำให้เราสามารถรวมผลสถิติฟเนสได้ดังนี้

จากสมการที่ (19) สำหรับทุก ๆ รอยต่อ อาจเขียนในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

$$\tilde{P} = \sum_{m=1}^n \tilde{S}^m = \sum_{m=1}^n (\tilde{k} \tilde{v})^m \quad (20)$$

และจากสมการที่ (18) และสมการที่ (20) จะได้ว่า

$$\tilde{P} = \left[\sum_{m=1}^n \tilde{k} \right] \tilde{u}$$

หรือเขียนใหม่ได้เป็น

$$\tilde{P} = \tilde{K} \tilde{u} \quad (21)$$

เมื่อ

$$\tilde{K} = \sum_{m=1}^n \tilde{k} \quad (22)$$

โดยต้องรวมผลให้ถูกต้องตามตำแหน่งและโคออร์ดิเนตของกันและกันเสมอ

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสมการที่ (21) ทำให้เราสามารถคำนวณหาการเคลื่อนที่ ณ จุดต่อได้ครบถ้วนและจากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (18) กับสมการที่ (16) ทำให้สามารถหาแรงภายในในระบบโคออร์ดิเนตประจำตัว \bar{S} ได้ด้วย อีกทั้งจากสมการที่ (14) ทำให้เราสามารถคำนวณหาแรงภายใน ในระบบโคออร์ดิเนตโอบัล \bar{S} ได้เช่นเดียวกันและจากสมการที่ (19) เราก็จะได้แรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับของโครงสร้างด้วย

2.12 สรุปขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการรวมผลสตีฟเฟสโดยตรงของโครงสร้าง (Direct Stiffness Method of Space Frame Structure)

2.12.1 แยกชิ้นส่วน (Member) แต่ละชิ้นส่วน ของ โครงสร้างออกมา กำหนด node และจำนวนของชิ้นส่วนเข้าไป (Define member actions and nodal displacement)

2.12.2 กำหนดโคออร์ดิเนตทั้งจุดเริ่มต้นและจุดปลายให้กับแต่ละชิ้นส่วนแล้วหาค่า k ของแต่ละชิ้นส่วน (Member properties)

2.12.3 ทำการแปลงเมตริกซ์ (Transformation matrix) จาก k มาเป็น \bar{k} โดยใช้ a

2.12.4 คำนวณหาค่า $\bar{k} = a^T k a$ ของแต่ละชิ้นส่วน (Global stiffness matrix)

2.12.5 ทำการรวมค่า \bar{k} ในแต่ละชิ้นส่วน จะได้ K ของโครงสร้างทั้งระบบ (Global stiffness matrix of structure)

2.12.6 คำนวณหาค่า u (Nodal displacement)

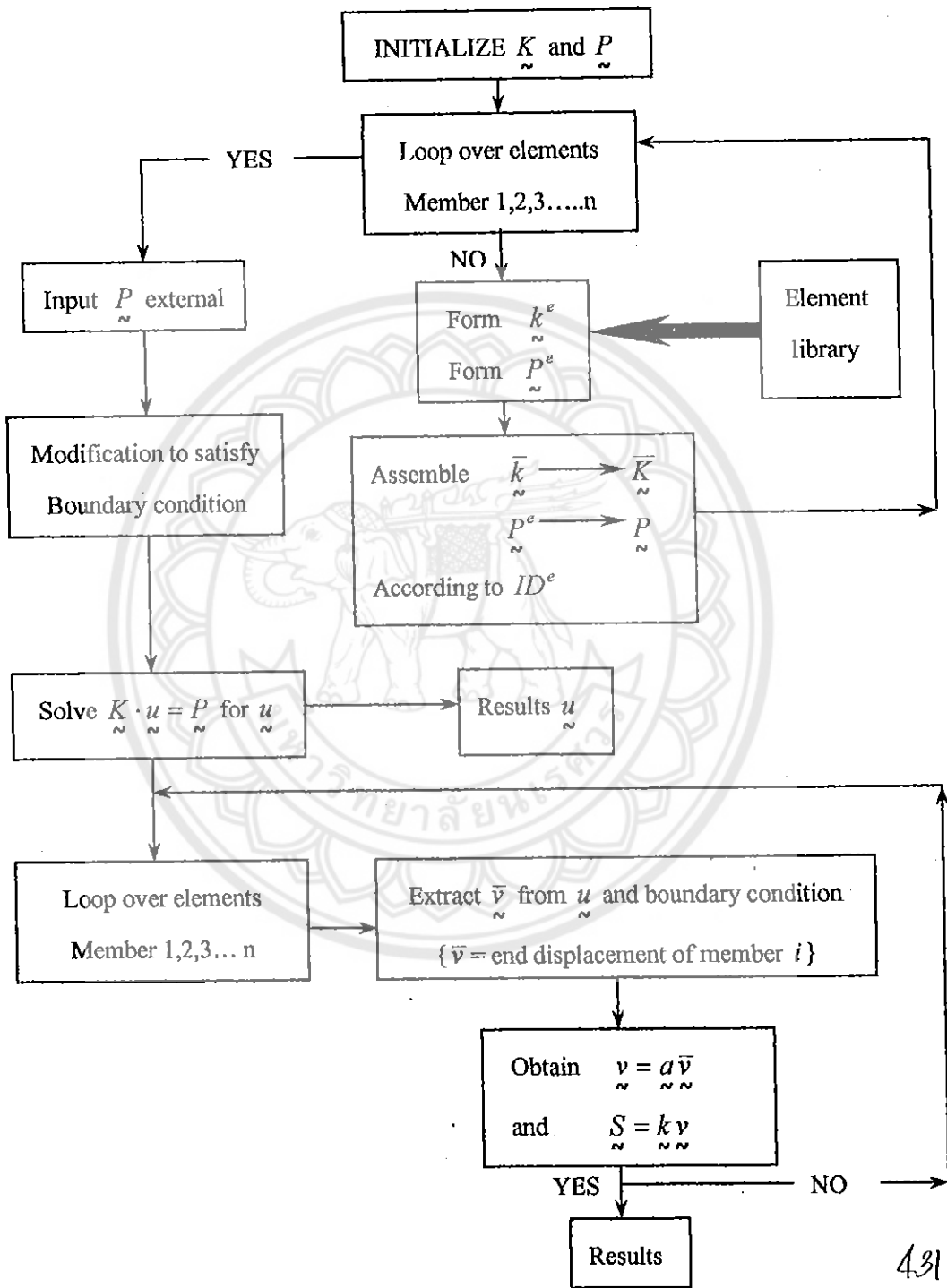
$$\text{จาก } P = K u$$

$$\text{และจะได้ } v \text{ จาก } u_i = \bar{v}^m$$

2.12.7 คำนวณหาค่า S ของแต่ละชิ้นส่วนจะได้ แรงภายใน (Axial) , แรงเฉือน (Shear) , และ โมเมนต์ (Moment) ที่ปลายทั้งหมดของ Member

2.12.8 ทำการแปลงเมตริกซ์ จาก S มาเป็น \bar{S} ของแต่ละชิ้นส่วน จะได้แรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับ ตามต้องการ (Results)

ซึ่งสามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังรูปต่อไปนี้



4310209
TA
647
จ 6399
2541

4310209 CF
TA
647
จ 664 9.

รูปที่ 7 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธี Direct Stiffness Method of Space Frame Structure

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 รายละเอียดของโปรแกรมและข้อจำกัดของการใช้งาน

3.1.1 เป็นโปรแกรมที่ใช้งานได้ทั้งใน Windows และ โปรแกรม MS DOS

3.1.2 หาก RUN Program ใน Windows จะให้ผล Output ได้เร็วกว่าใน MS DOS

3.1.3 โปรแกรม STAAD-III Release 1.9 Student Version 2.0 จะใช้ได้สำหรับ
โครงสร้างที่มีจำนวน member ไม่เกิน 500 member เท่านั้น

3.1.4 การป้อนข้อมูลจะต้องป้อนตามลำดับรายการที่กำหนดไว้ของโปรแกรม
มิฉะนั้น โปรแกรมอาจจะคำนวณซ้ำหรือผิดพลาดได้

3.2 พื้นฐานการใช้งานโปรแกรม STAAD-III

3.2.1 ส่วนประกอบของโปรแกรม STAAD-III



ตั้งชื่อ File ของ โครงสร้าง

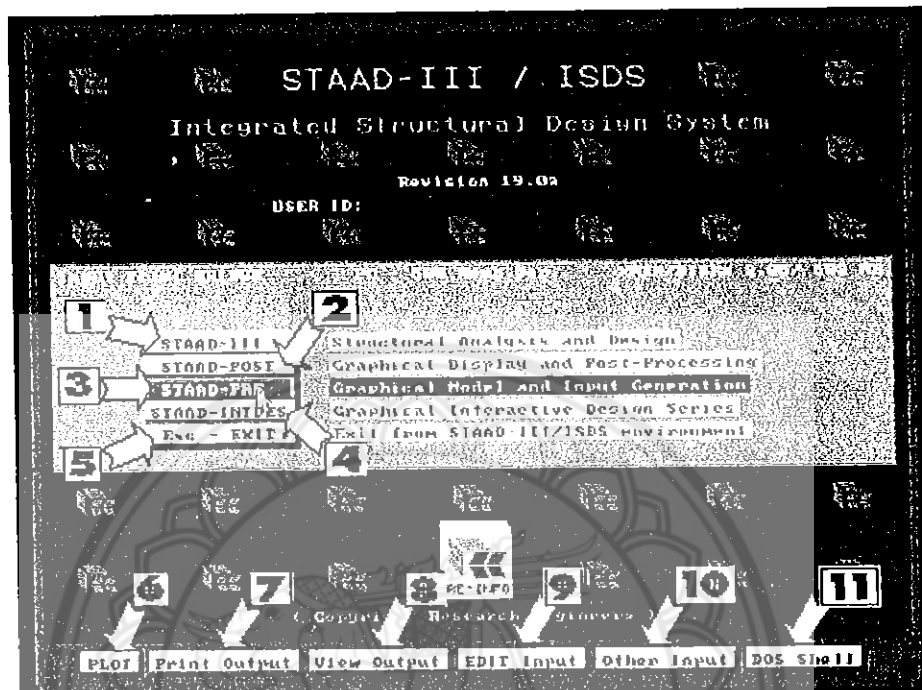
ไปที่ MS DOS Prompt

ชื่อของ โครงสร้างที่มีอยู่แล้ว

ออกจาก โปรแกรม

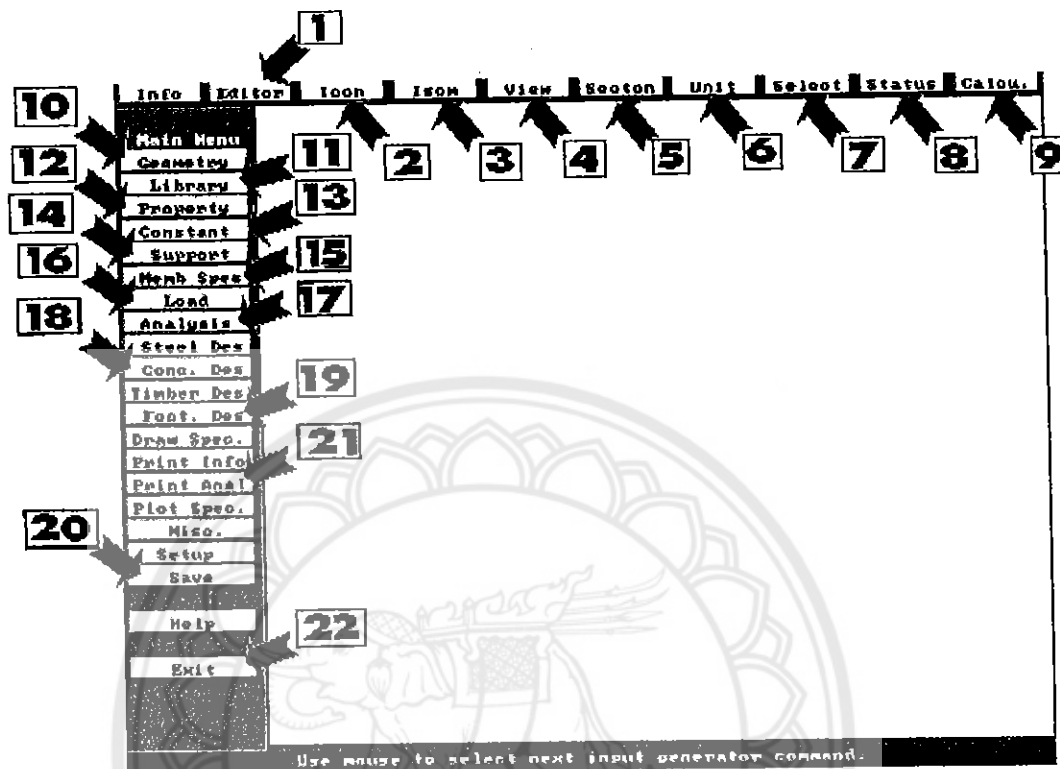
คำแนะนำโดยทั่วไป

3.2.2 ฟังก์ชันการทำงานของโปรแกรม STAAD-III



1. ใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์โครงสร้าง
2. แสดง Out Put ของ โครงสร้างเป็น Graphic
3. ใช้ในการป้อนข้อมูลของ โครงสร้างต่าง ๆ
4. ใช้ในการออกแบบ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทต่าง ๆ
5. ออกจาก โปรแกรม STAAD-III
6. ใช้ในการ Plot Out Put ส่วนที่เป็น Graphic
7. ใช้ในการ Print Out Put ที่แสดง โดยโปรแกรม
8. แสดงข้อมูล Out Put
9. ใช้ในการแก้ไขข้อมูลที่ป้อนเข้าไป
10. เลือก File ข้อมูลที่มีอยู่ หรือป้อนข้อมูลใหม่
11. ไปที่ MS-DOS Prompt

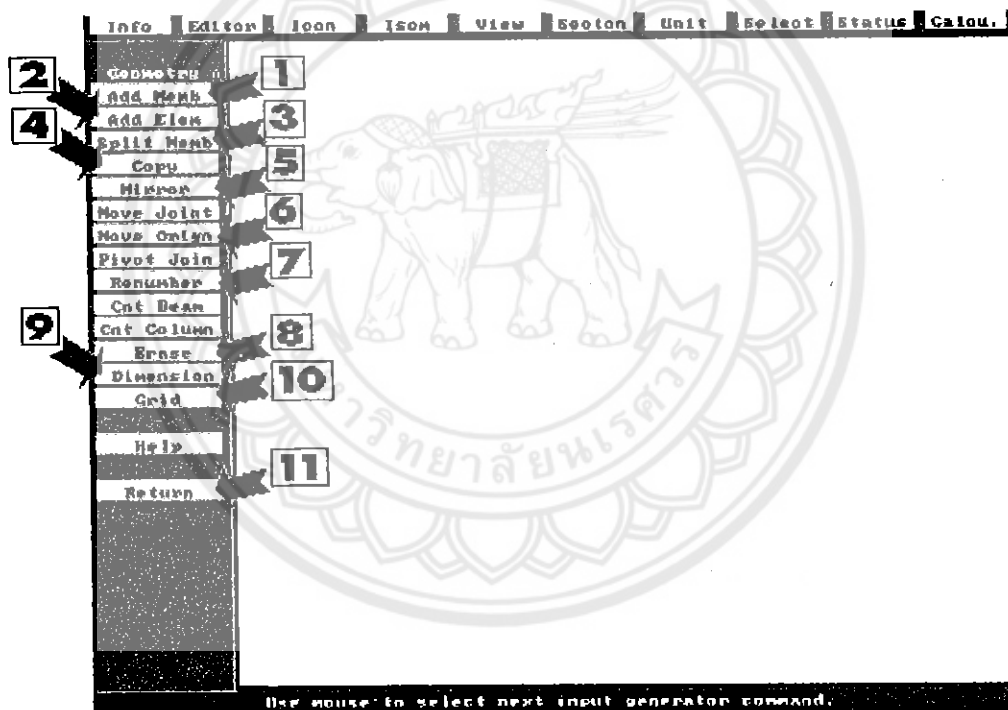
3.2.3 ขั้นตอนการป้อนข้อมูลในโปรแกรม STAAD-III



1. ใช้แก้ไขข้อมูลด้วย Text Editor
2. ใช้แสดงข้อมูลของโครงสร้างเป็นรูปภาพ
3. แสดงภาพของโครงสร้างเป็นรูป Isometric
4. ใช้ดูภาพย่อ ขยาย ของโครงสร้าง
5. แสดง Section ของโครงสร้างที่ Plane ต่าง ๆ
6. ใช้เปลี่ยนหน่วยของโครงสร้าง
7. แสดงรายละเอียด Member หรือ Joint ของโครงสร้าง
8. แสดง Property , Length , Joint Coordinate ของ Member
9. เครื่องคิดเลข (Calculator)
10. ใช้กำหนดชิ้นส่วนของโครงสร้าง (ดูที่หัวข้อ 3.2.3.1)
11. โครงสร้างที่มีอยู่แล้วนำไปใช้ได้
12. ใช้กำหนดคุณสมบัติต่าง ๆ ของโครงสร้าง (ดูที่หัวข้อ 3.2.3.2)
13. ใช้กำหนดค่าคงที่ต่าง ๆ (ดูที่หัวข้อ 3.2.3.3)
14. ใช้ใส่ Support ของโครงสร้าง (ดูที่หัวข้อ 3.2.3.4)
15. ใช้กำหนดชนิดของ Member เช่น Cable เป็นต้น

16. ใช้ป้อนข้อมูล Load ที่กระทำกับ โครงสร้าง (ดูที่หัวข้อ 3.2.3.5)
17. ใช้เลือกทฤษฎีการวิเคราะห์โครงสร้าง (ดูที่หัวข้อ 3.2.3.6)
18. ใช้ทำการออกแบบ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (ดูที่หัวข้อ 3.3.3.7)
19. ใช้ทำการออกแบบฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก (ดูที่หัวข้อ 3.3.3.8)
20. ให้โปรแกรมแสดงผล Out Put ออกมา (ดูที่หัวข้อ 3.3.3.9)
21. ใช้ Save ข้อมูลที่ป้อนเข้าไป
22. ออกจากการป้อนข้อมูล

3.2.3.1 Geometry ขั้นตอนเริ่มแรกในการใส่ Coordinate ของ โครงสร้าง



1. ใส่ Coordinate แต่ละจุดของ โครงสร้างหรือเพิ่ม Member ลงใน โครงสร้าง
2. ใส่ Element (3 Node หรือ 4 Node) ใน โครงสร้างหรือเพิ่ม Element
3. แบ่ง Member ที่มีอยู่ให้มากขึ้น
4. ใช้สำหรับคัดลอก โครงสร้าง แล้วนำ โครงสร้าง ไปวาง ณ. จุดที่ต้องการ
5. ใช้สำหรับคัดลอก โครงสร้าง แล้วนำ โครงสร้าง ไปวาง ณ. ระบายใด ๆ ที่ต้องการ
6. ใช้สำหรับย้ายจุดกำเนิดของ โครงสร้าง

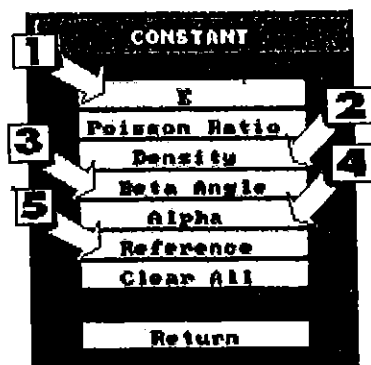
7. ใช้จัดเรียงเลข Joint และเลข Member ใหม่
8. ใช้ลบ Member ของ โครงสร้าง
9. ใช้บอกความยาว Member ของ โครงสร้าง
10. ใช้แสดง Grid ของ โครงสร้าง
11. กลับไป Menu หลัก

3.2.3.2 Property



1. แสดงตารางเหล็กชนิดต่าง ๆ
2. ใช้ป้อน Property ต่าง ๆ ของโครงสร้าง
3. ใช้ป้อนข้อมูลตารางเหล็กเพิ่มเติม
4. ใช้ป้อนความหนาของ Element นั้น ๆ

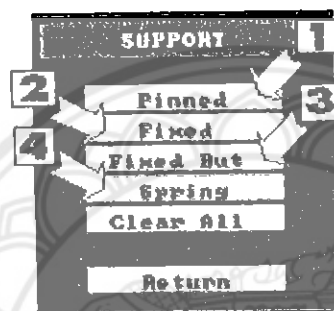
3.2.3.3 Constants



1. ป้อนค่า Young's Modulus เช่น คอนกรีต เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น

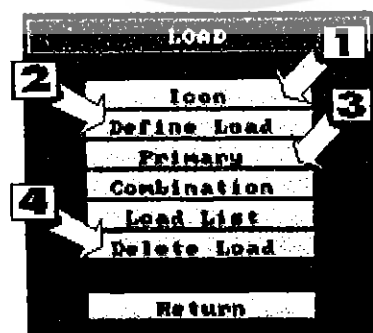
2. ใช้ป้อนค่าความหนาแน่นของวัสดุที่นำมาทำโครงสร้าง
3. ใช้ป้อนค่า Reference Angle (Beta Angle เฉพาะ Space Frame)
4. ใช้ป้อนค่าคงที่ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
5. ใช้ป้อนค่าจุดอ้างอิง (เฉพาะ Space Frame)

3.2.3.4 Type of Support



1. หมายถึง Hinge Support
2. หมายถึง Fixed Support
3. หมายถึง Other Support เช่น Roller เป็นต้น
4. หมายถึง Spring Support

3.2.3.5 Load



1. แสดงรูปแรงกระทำต่อ โครงสร้าง
2. ใช้ป้อนคุณสมบัติของแรงที่กระทำ เช่น Moving Load , Wind Load เป็นต้น
3. ใช้ป้อนค่าแรงที่กระทำ (ดูที่หัวข้อ 3.2.3.5.1)

4. ใช้คลิกแรงกระทำต่อโครงสร้าง

3.2.3.5.1 Load Type

Load Types	
1	Selfweight
2	Joint
4	Member
3	Element
5	Area
6	Floor
	Prestress
7	Poststress
	Temperature
	Strain
	Fixed End
	Supp Displ
	Repeat
8	Natur Frey
	Moving Lo.
9	UBC Load
	Wind Load
	Dynamics
	Modal Calc
	Resp Spect
	Time Hist.
	Return
	Diff. Load
	Help

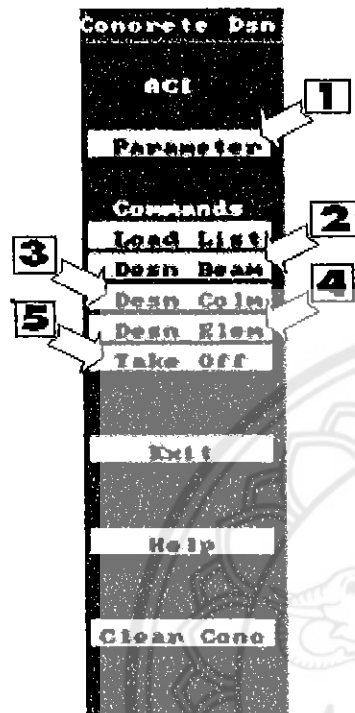
1. น้ำหนักของโครงสร้างเอง
2. แรงที่กระทำ ณ จุดต่อต่าง ๆ ของโครงสร้าง
3. แรงที่กระทำบน ชิ้นส่วนต่าง ๆ ของโครงสร้าง เช่น Uniform Load หรือ Concentrate Load (Point Load)
4. แรงที่กระทำที่ Element ต่าง ๆ ของโครงสร้าง เช่น Pressure Load หรือ Trapezoidal Load
5. แรงกระทำกระจายเป็นพื้นที่ในแนวแกน Local ของ Member ในโครงสร้าง
6. แรงกระทำกระจายเป็นพื้นที่ในแนวแกน Global ของโครงสร้าง
7. ผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป
8. น้ำหนักบรรทุกจรที่กระทำกับ โครงสร้าง (ดูที่ Define Load)
9. แรงลมที่กระทำกับ โครงสร้าง (ดูที่ Define Load)

3.2.3.6 Analysis

ANALYSIS	
1	Perform Analysis
	Delta Analysis
	Nonlinear Analysis
	Change
	Return

1. ทฤษฎีที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างคือ Finite Element Method หรือ Direct Stiffness Method

3.2.3.7 Concrete Design



1. ป้อนค่าที่ใช้ในการทำ Reinforce Concrete Design

(ดูที่หัวข้อ 3.3.3.7.1)

2. การออกแบบคาน

3. การออกแบบเสา

4. การออกแบบแผ่นพื้นหรือผนัง

5. หาปริมาณคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้ในโครงสร้างที่

ได้ออกแบบไว้

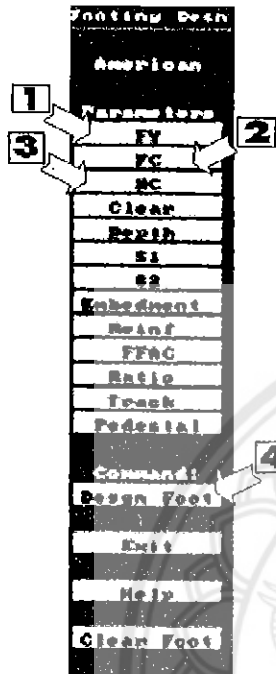
3.2.3.7.1 Concrete Design Parameter

The image shows a vertical menu titled "Concrete Design Parameters". The menu items are: acI, Parameters, Main, Base, RC, Splice, Eface, Width, Depth, Clear Top, Clear Bottom, Clear Side, Min Rein, Max Rein, Reinf, Max, Max Rein, Track, and Return. Five numbered callouts (1-5) point to the following items:

- 1. Main
- 2. Base
- 3. Width
- 4. Depth
- 5. Max Rein

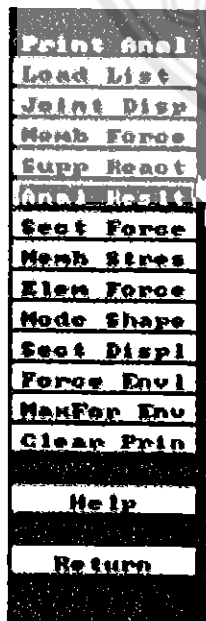
1. ป้อนค่า Yield Strength ของเหล็กเสริม
 2. ป้อนค่า Compressive Strength ของคอนกรีต
 3. ป้อนค่าความกว้างของ Member ที่จะออกแบบ
 4. ป้อนค่าความหนาของ Member ที่จะออกแบบ
 5. แสดงรูปการวางเหล็กเสริมใน Member ที่ออกแบบ

3.2.3.8 Footing Design



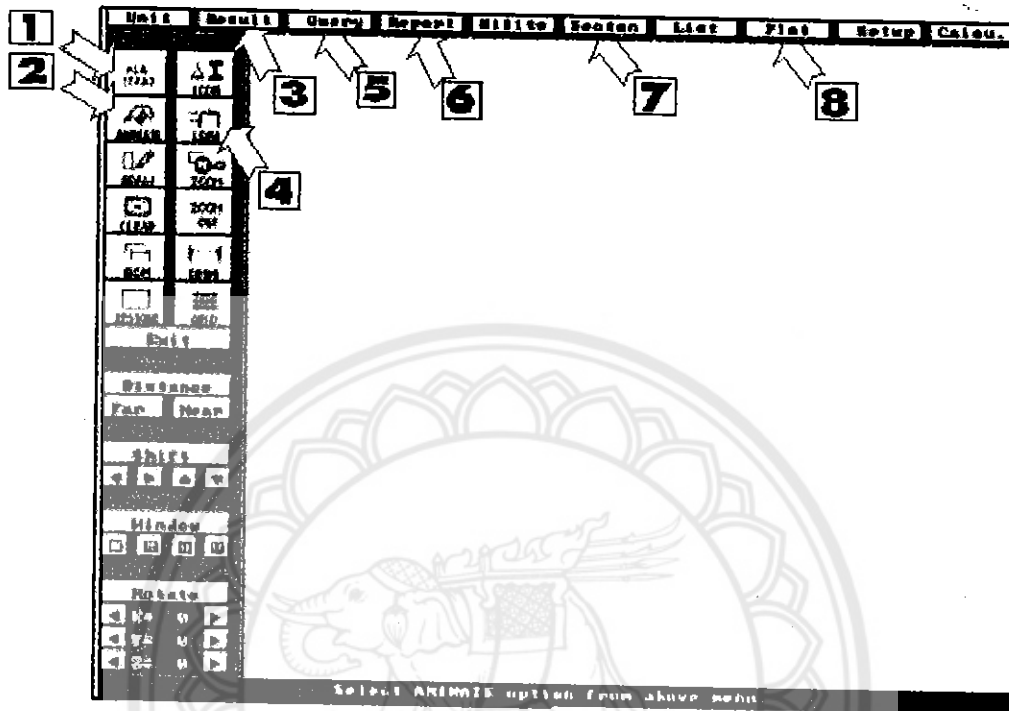
1. ป้อนค่า Yield Strength ของเหล็กเสริม
2. ป้อนค่า Compressive Strength ของคอนกรีต
3. ป้อนค่า Bearing Capacity ของดินใต้ฐานราก
4. ออกแบบฐานราก

3.2.3.9 Print Analysis



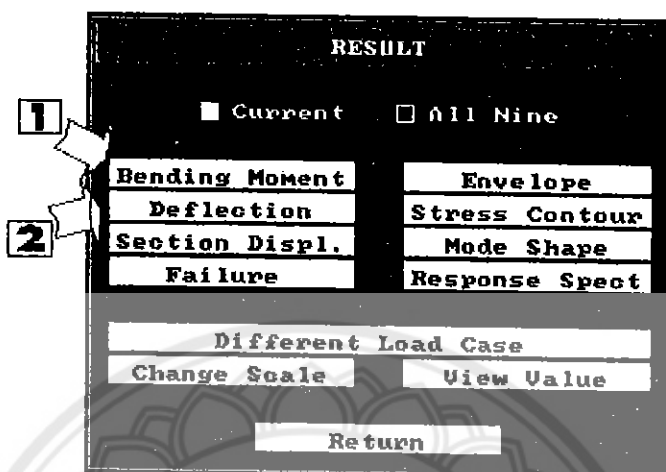
1. แสดงผลของการวิเคราะห์โครงสร้าง

3.2.4 STAAD - Post



1. ใช้คำนวณ วิเคราะห์และออกแบบ โครงสร้าง
2. แสดงพฤติกรรมการ โกงตัวของ โครงสร้าง
3. แสดง Out Put เป็น Graphic เช่น Bending Moment Diagram เป็นต้น (ดูที่ 3.3.4.1)
4. แสดงแรงที่กระทำกับ โครงสร้าง
5. เลือกแสดงผลการคำนวณของ โครงสร้างในรูปแบบรายงาน (ดูที่ 3.3.4.2)
6. แสดงค่า Out Put เป็นข้อมูลตัวเลขทั้งหมด (ดูที่ 3.3.4.3)
7. เลือกแสดงผลการคำนวณของ โครงสร้าง โดยแสดงเป็นรูปภาพ (ดูที่ 3.3.4.4)
8. Print ข้อมูลของ โครงสร้างที่เป็นรูปภาพ ได้ทั้งหมด (ดูที่ 3.3.4.5)

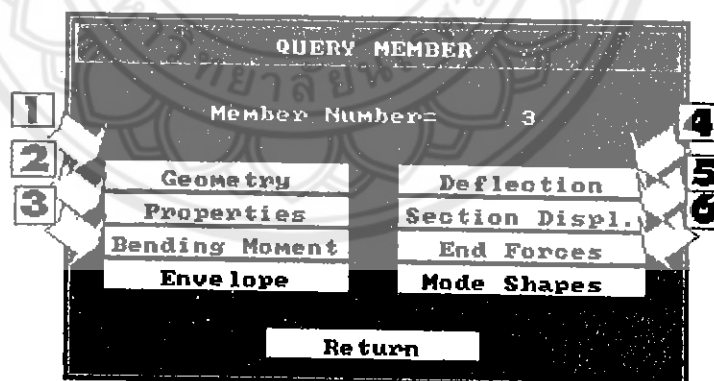
3.2.4.1 Result แสดงผลการคำนวณต่าง ๆ



1. แสดง Bending Moment Diagram ของ โครงสร้าง

2. แสดง Deflection ที่เกิดขึ้นของ โครงสร้าง

3.2.4.2 Query Member ข้อมูลแสดงผลต่าง ๆ ของ Member ใน โครงสร้าง



1. บอกค่า Coordinate และมุม Beta ของแต่ละ Member ที่เลือก

2. แสดงคุณสมบัติของแต่ละ Member

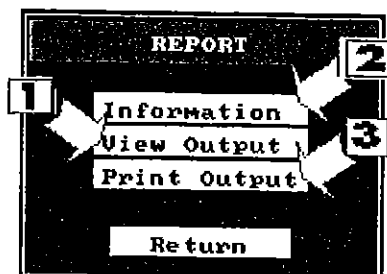
3. แสดงค่า Bending Moment Diagram ของแต่ละ Member ที่เลือกตลอดความยาว

4. แสดงค่า Deflection Profile ของแต่ละ Member ที่เลือกตลอดความยาว

5. แสดง Displacement Profile ของแต่ละ Member ที่เลือกตลอดความยาว

6. แสดง Axial , Shear , Torsion , Moment ที่ Node ของแต่ละ Member ที่เลือก

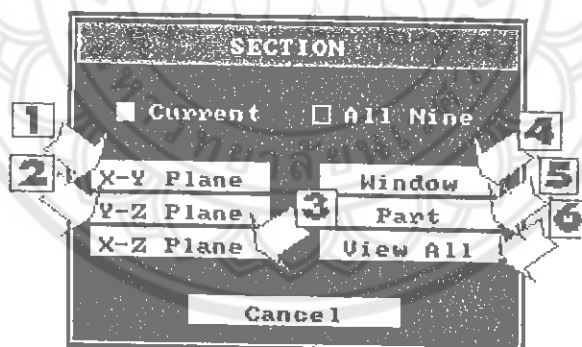
3.2.4.3 Report การรายงานผล



1. แสดงผลการคำนวณเป็นรายการต่าง ๆ
2. แสดงคุณลักษณะทั่วไปของโครงสร้าง
3. ใช้พิมพ์รายงานผลการคำนวณ

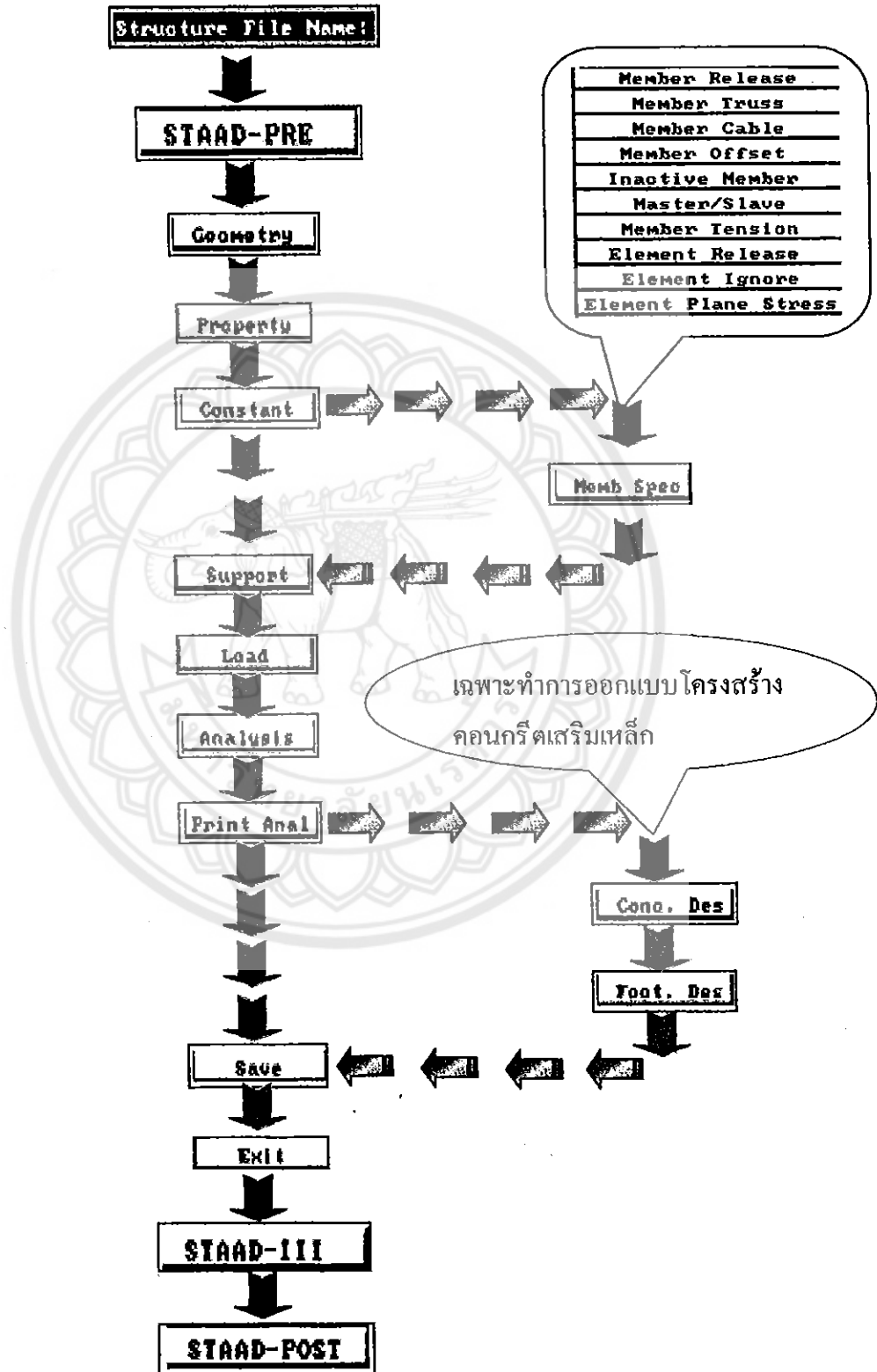
3.2.4.4 Section เลือกแสดงผลการคำนวณต่าง ๆ เป็น Graphic เฉพาะบางส่วนของ

โครงสร้าง



1. แสดงผลการคำนวณในระนาบ x - y
2. แสดงผลการคำนวณในระนาบ y - z
3. แสดงผลการคำนวณในระนาบ x - z
4. เลือกแสดงผลการคำนวณในขอบเขตที่ต้องการ
5. เลือกแสดงผลการคำนวณในแต่ละ Member
6. แสดงผลการคำนวณเป็น Graphic ทุก Member ใน โครงสร้าง

3.3 วิธีใช้โปรแกรม STAAD-III



รูปที่ 8. สรุปขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม STAAD-III

บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 ขอบเขตการรายงานผลการวิจัย

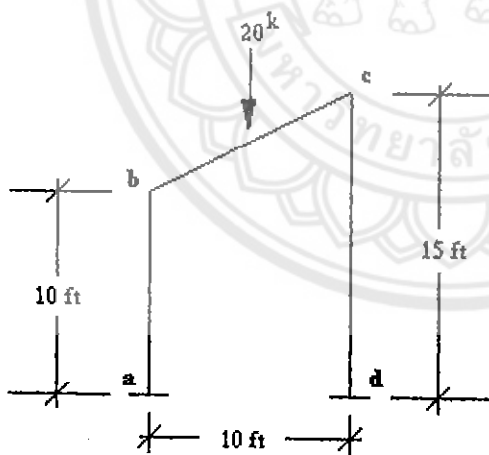
4.1.1 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างประเภทต่าง ๆ ได้แก่ โครงสร้าง 2 มิติ (Plane Frame) โครงสร้าง 3 มิติ (Space Frame) และ โครงสร้างคอมโพสิต (Composite Structure)

4.1.2 ในโครงสร้างที่มี member จำนวนมากจะรายงานผลเป็นบาง member เท่านั้น

4.1.3 ผลการออกแบบโครงสร้างสามารถดูได้จากภาคผนวกเพราะอยู่เหนือขอบเขตการวิจัย

4.1.4 จะแสดงข้อมูลที่ป้อนเข้าไปในโปรแกรมเป็นบางโครงสร้างเท่านั้น เนื่องจากข้อมูลมีเป็นจำนวนมาก

4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้าง 2 มิติ (Plane Frame)



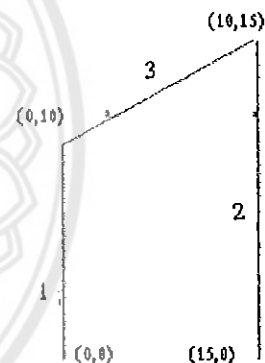
Example 1 ในตัวอย่างนี้เป็น การตรวจสอบความถูกต้องของ โปรแกรม STAAD - III โดยเปรียบเทียบ ผลที่ได้จากโปรแกรม กับผลที่ได้จากการใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์โครงสร้าง (Direct Stiffness Method) ซึ่งเราอาจจะใช้วิธีวิเคราะห์โครงสร้างวิธีอื่น ๆ ก็ได้เช่นกัน เช่นวิธี Slope Deflection Method เป็นต้น (ดูที่ภาคผนวก ก.)

ผลจากโปรแกรม STAAD - III แสดงได้ดังนี้

```

*   S T A A D - III   *
*   Revision 19.0a   *
*   Proprietary Program of   *
*   RESEARCH ENGINEERS, Inc. *
*   Date= FEB 1, 1999   *
*   Time= 15:15:30   *
*   USER ID:   *
  
```

- 1. STAAD PLANE → คือ ชนิดของโครงสร้าง
- 2. INPUT WIDTH 72 → คือ ความกว้างของจอภาพ
- 3. UNIT FEET KIP → คือ หน่วยที่ใช้
- 4. JOINT COORDINATES
- 5. 1 0. 0. 0.; 2 0. 10. 0.; 3 10. 15. 0.; 4 10. 0. 0.
- 6. MEMBER INCIDENCES
- 7. 1 1 2; 2 3 4; 3 2 3
- 8. UNIT CM KG
- 9. MEMBER PROPERTY AMERICAN



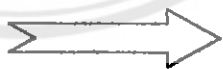
10. 1 TO 3 PRI YD 30. ZD 20.



คือ Property ของ member

11. UNIT INCHES POUND

12. CONSTANTS



คือค่า Modulus ของ member

13. E 28999992. ALL

14. SUPPORTS

15. 1 4 FIXED

16. UNIT FEET KIP

17. LOAD 1 GRAVITY

18. MEMBER LOAD

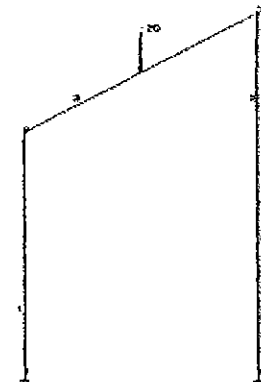
19. 3 CON GY -20. 0. 0.

20. UNIT INCH KIPS

21. PERFORM ANALYSIS PRINT ALL



คือทฤษฎีที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้าง
Direct Stiffness Method



ORIGINAL/FINAL BAND-WIDTH = 1/ 1
 TOTAL PRIMARY LOAD CASES = 1, TOTAL DEGREES OF FREEDOM = 6
 SIZE OF STIFFNESS MATRIX = 36 DOUBLE PREC. WORDS
 REQUIRED DISK SPACE = 12.00 MB, TOTAL EXMEM = 2.05 MB

LOADING 1 GRAVITY

MEMBER LOAD - UNIT KIP FEET

MEMBER	UDL	L1	L2	CON	L	LIN1	LIN2
3				-20.000 GY	5.59		

***TOTAL APPLIED LOAD (KIPS INCH) SUMMARY (LOADING 1)

SUMMATION FORCE-X = 0.00

SUMMATION FORCE-Y = -20.00

SUMMATION FORCE-Z = 0.00

SUMMATION OF MOMENTS AROUND THE ORIGIN-

MX = 0.00 MY = 0.00 MZ = -1200.00

++ PROCESSING ELEMENT STIFFNESS MATRIX. 16:22:43

++ PROCESSING GLOBAL STIFFNESS MATRIX. 16:22:43

++ PROCESSING TRIANGULAR FACTORIZATION. 16:22:43

++ CALCULATING JOINT DISPLACEMENTS. 16:22:43

++ CALCULATING MEMBER FORCES. 16:22:43

***TOTAL REACTION (KIPS INCH) SUMMARY

LOADING 1

SUM -X = 0.00 SUM -Y = 20.00 SUM -Z = 0.00

SUMMATION OF MOMENTS AROUND ORIGIN-

MX = 0.00 MY = 0.00 MZ = 1200.00

EXTERNAL AND INTERNAL JOINT LOAD SUMMARY-

JT	EXT FX/	EXT FY/	EXT FZ/	EXT MX/	EXT MY/	EXT MZ/
	INT FX	INT FY	INT FZ	INT MX	INT MY	INT MZ
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	-1.78	-10.66	0.00	0.00	0.00	40.25
2	0.00	-10.00	0.00	0.00	0.00	-300.00
	0.00	10.00	0.00	0.00	0.00	300.00
3	0.00	-10.00	0.00	0.00	0.00	300.00
	0.00	10.00	0.00	0.00	0.00	-300.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.78	-9.34	0.00	0.00	0.00	-119.38

***** END OF DATA FROM INTERNAL STORAGE *****

22. PRINT ANALYSIS RESULTS

JOINT DISPLACEMENT (INCH RADIANS) STRUCTURE TYPE = PLANE

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	0.00691	-0.00047	0.00000	0.00000	0.00000	-0.00025
3	1	0.00688	-0.00062	0.00000	0.00000	0.00000	0.00023
4	1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

SUPPORT REACTIONS -UNIT KIPS INCH STRUCTURE TYPE = PLANE

JOINT	LOAD	FORCE-X	FORCE-Y	FORCE-Z	MOM-X	MOM-Y	MOM Z
1	1	1.78	10.66	0.00	0.00	0.00	-40.25
4	1	-1.78	9.34	0.00	0.00	0.00	119.38

MEMBER END FORCES STRUCTURE TYPE = PLANE

ALL UNITS ARE - KIPS INCH

MEMB	LOAD	JT	AXIAL	SHEAR-Y	SHEAR-Z	TORSION	MOM-Y	MOM-Z
1	1	1	10.66	-1.78	0.00	0.00	0.00	-40.25
		2	-10.66	1.78	0.00	0.00	0.00	-172.80
2	1	3	9.34	1.78	0.00	0.00	0.00	200.20
		4	-9.34	-1.78	0.00	0.00	0.00	119.38
3	1	2	6.36	8.74	0.00	0.00	0.00	172.80
		3	2.59	9.15	0.00	0.00	0.00	-200.21

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

จากตัวอย่างข้างต้นเป็นการแสดงลำดับผลการคำนวณที่ได้จากการรายงานผลจากโปรแกรมโดยตรง ซึ่งจะเห็นว่ามียาละเอียดมาก ฉะนั้นจะได้แสดงผลการคำนวณของค่าที่จำเป็น เช่น Deflection , Reaction , Shear และ Moment ในรูปแบบของตารางและรูปภาพ Bending Moment Diagram เพื่อจะได้นำค่าเหล่านี้ไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างต่อไป ดังนี้

Joint Displacement (inch.)

JOINT	X-TRANS	Y-TRANS	Z-TRANS	X-ROTAN	Y-ROTAN	Z-ROTAN
1	0	0	0	0	0	0
2	0.00691	-0.00047	0	0	0	-0.00025
3	0.00688	-0.00062	0	0	0	0.00023
4	0	0	0	0	0	0

Support Reaction (kips - inch)

JOINT	FORCE-X	FORCE-Y	FORCE-Z	MOM-X	MOM-Y	MOM Z
1	1.78	10.66	0	0	0	-40.25
4	-1.78	9.34	0	0	0	119.38

Structural Analysis Results

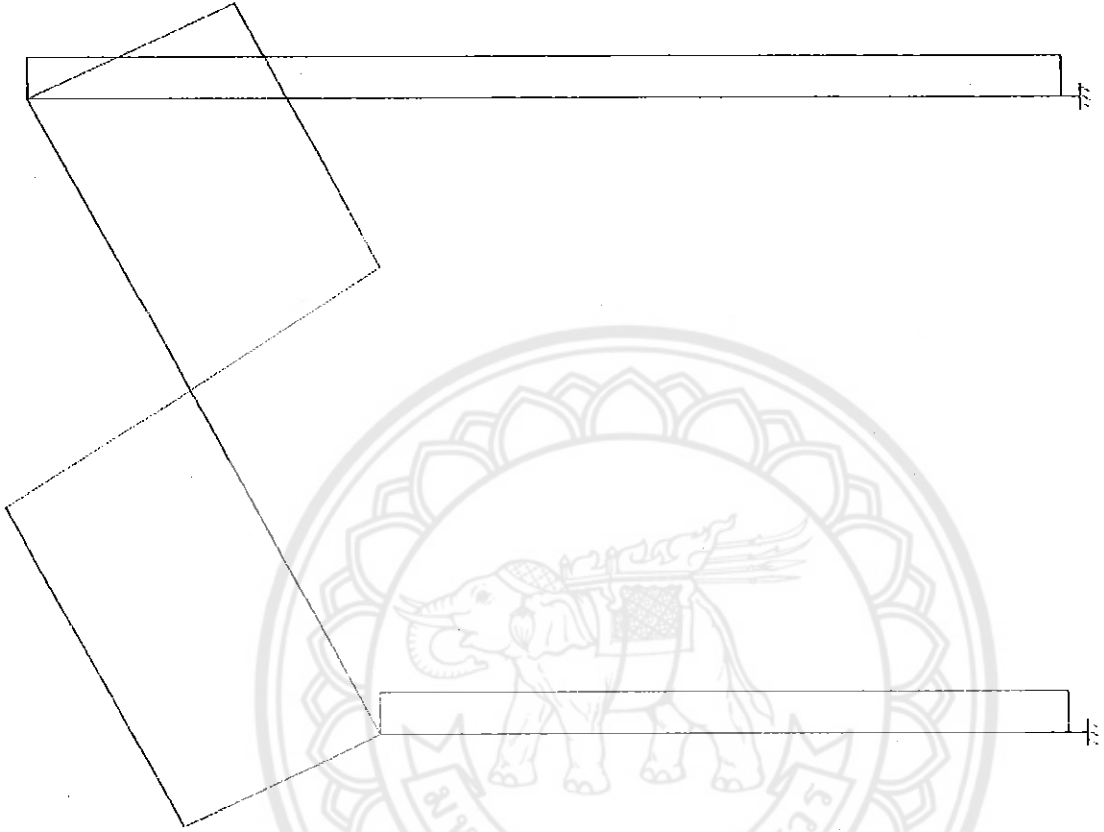
Unit kips – inch

MEMB	JT	AXIAL	SHEAR-Y	SHEAR-Z	TORSION	MOM-Y	MOM-Z
1	1	10.66	-1.78	0	0	0	-40.25
	2	-10.66	1.78	0	0	0	-172.8
2	3	9.34	1.78	0	0	0	200.2
	4	-9.34	-1.78	0	0	0	119.38
3	2	6.36	8.74	0	0	0	172.8
	3	2.59	9.15	0	0	0	-200.21

หมายเหตุ

- ผลลัพธ์ของแรงที่คำนวณ ได้มีค่าเป็นลบหมายถึงแรงมีทิศทางซึ่ลง
- ผลลัพธ์ของแรงที่คำนวณ ได้มีค่าเป็นบวกหมายถึงแรงมีทิศทางซึ่ขึ้น
- ค่า Bending Moment Diagram ที่แสดงในโปรแกรมนี้จะกลับทิศ คือ ค่าโมเมนต์บวกจะแสดง Bending Moment Diagram ในทิศทางลง ในทำนองกลับกัน ค่าโมเมนต์ลบจะแสดง Bending Moment Diagram ใน ทิศทางขึ้น

MN/ELEM
SHEAR FY LN= 1



UNIT NET KG

DATE: MAR 24, 1999 46

S T A A D P L - P L O T (REV: 19.0a)
TITLE: STAAD.PLANE

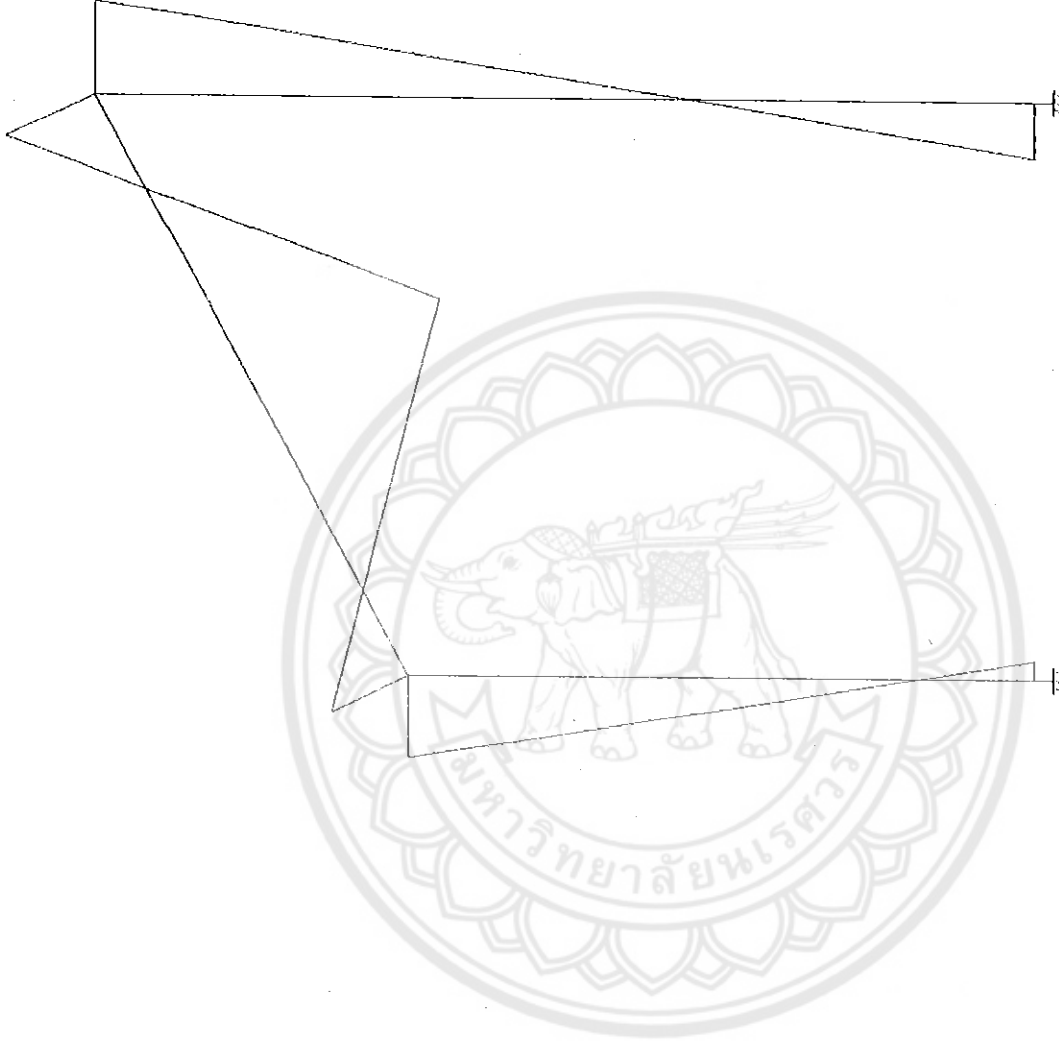
STRUCTURE DATA

TYPE = PLANE
NJ = 4
NM = 3
NE = 0
NS = 2
NL = 1
XMAX = 3.0
YMAX = 4.6
ZMAX = 0.0

J=4, M=3

COMPANY:

MN/ELEM
MOMENT MZ LN= 1



UNIT MET KG

STRUCTURE DATA

TYPE = PLANE

NJ = 4

NM = 3

NE = 0

NS = 2

NL = 1

XMAX= 3.0

YMAX= 4.6

ZMAX= 0.0

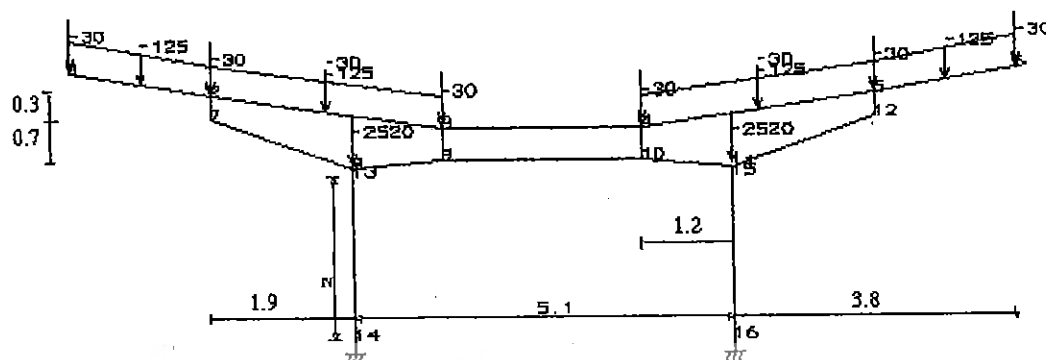
J=4,N=3

COMPANY:

STAAD PL - PLOT (REV: 19.0a)

DATE: MAR 24, 1999

TITLE STAAD PLANE

Example 2

UNIT MET KG

ในตัวอย่างที่ 2 เป็นวิเคราะห์โครงสร้างของที่จอดรถคณะวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งคิดเป็น แบบ
โครงข้อแข็ง 2 มิติ (Plane frame) ได้จากการถ่าย Load แบบ One way slab ของ โครงสร้าง ที่จอด
รถแบบ 3 มิติ

- Joint Displacement (cm)

JOINT	X-TRANS	Y-TRANS	Z-TRANS	X-ROTAN	Y-ROTAN	Z-ROTAN
1	-0.15152	-0.83961	0	0	0	0.00379
2	-0.06629	-0.29877	0	0	0	0.00031
3	-0.00843	0.01789	0	0	0	0.00072
4	0.00843	0.01789	0	0	0	-0.00072
5	0.06629	-0.29877	0	0	0	-0.00031
6	0.15152	-0.83961	0	0	0	-0.00379
7	-0.06391	-0.29804	0	0	0	0.00024
8	0.01563	-0.00733	0	0	0	0.00036
9	0.00768	0.01805	0	0	0	0.0002
10	-0.00768	0.01805	0	0	0	-0.0002
11	-0.01563	-0.00733	0	0	0	-0.00036
12	0.06391	-0.29804	0	0	0	-0.00024
13	0.0177	-0.0062	0	0	0	0.00006
14	0	0	0	0	0	0

JOINT	X-TRANS	Y-TRANS	Z-TRANS	X-ROTAN	Y-ROTAN	Z-ROTAN
15	-0.0177	-0.0062	0	0	0	-0.00006
16	0	0	0	0	0	0

Support Reaction (kg - m)

JOINT	FORCE-X	FORCE-Y	FORCE-Z	MOM - X	MOM - Y	MOM - Z
14	-170.28	3820.88	0	0	0 0.00	156.06
16	170.28	3820.88	0	0	0 0.00	-156.06

Structural Analysis Results (kg - m)

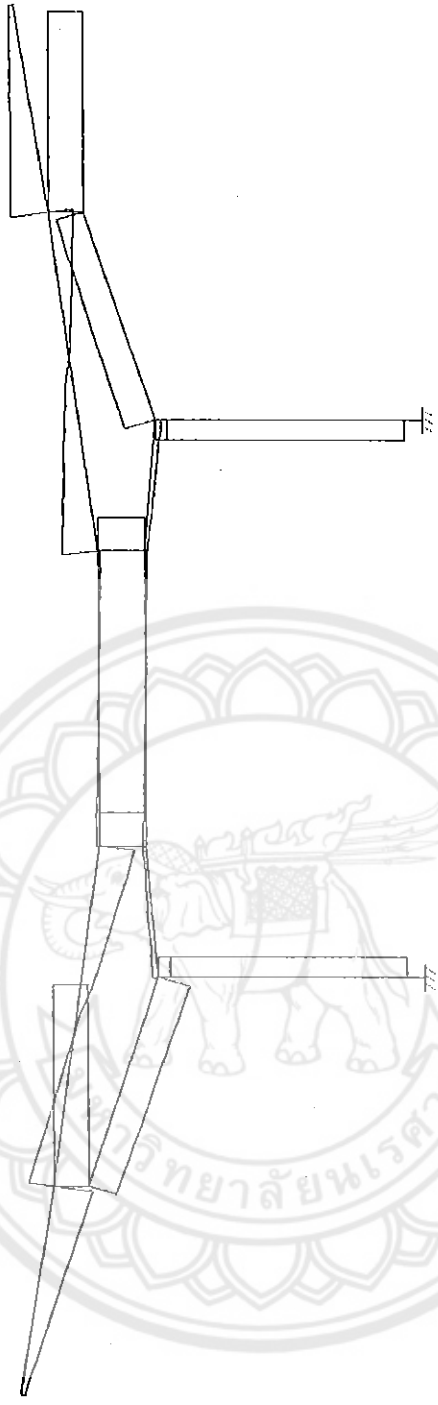
MEMB	JT	AXIAL	SHEAR-Y	SHEAR-Z	TORSION	MOM-Y	MOM-Z
1	1	4.68	-29.63	0	0	0	0
	2	-47.1	298.28	0	0	0	-315.38
2	2	-1673.79	194.02	0	0	0	54.92
	3	1613.4	274.05	0	0	0	-180
3	3	-1903.23	22.13	0	0	0	43.75
	4	1903.23	22.13	0	0	0	-43.75
4	4	-1613.4	274.05	0	0	0	180
	5	1673.79	194.02	0	0	0	-54.92
5	5	47.1	298.28	0	0	0	315.38
	6	-4.68	-29.63	0	0	0	0
6	2	738.61	1635.2	0	0	0	260.46
	7	-743.53	-1635.2	0	0	0	230.1
7	7	1783.2	-216.59	0	0	0	-230.1
	8	-1793.03	247.74	0	0	0	-232.48
8	8	1473.64	43.66	0	0	0	30.95
	9	-1472	-23.99	0	0	0	9.78

MEMB	JT	AXIAL	SHEAR-Y	SHEAR-Z	TORSION	MOM-Y	MOM-Z
9	9	1732.95	22.13	0	0	0	19.26
	10	-1732.95	22.13	0	0	0	-19.26
10	10	1472	-23.99	0	0	0	-9.78
	11	-1473.64	43.66	0	0	0	-30.95
11	11	1793.03	247.74	0	0	0	232.48
	12	-1783.2	-216.59	0	0	0	230.1
12	12	743.52	-1635.21	0	0	0	-230.1
	5	-738.6	1635.21	0	0	0	-260.46
13	10	124.02	-268.03	0	0	0	29.04
	4	-117.46	268.03	0	0	0	-136.25
14	3	117.46	268.03	0	0	0	136.25
	9	-124.02	-268.03	0	0	0	-29.04
15	8	3462.07	170.28	0	0	0	201.53
	13	-3463.7	-170.28	0	0	0	-184.5
16	13	3463.71	170.28	0	0	0	184.5
	14	-3820.88	-170.28	0	0	0	156.06
17	11	3462.07	-170.27	0	0	0	-201.53
	15	-3463.7	170.27	0	0	0	184.5
18	15	3463.71	-170.28	0	0	0	-184.5
	16	-3820.88	170.28	0	0	0	-156.06

MIN/ELEM
SHEAR FY LINE= 1

1

STRUCTURE DATA
TYPE = PLANE
NJ = 16
NM = 18
NE = 0
NS = 2
NL = 1
XMAX= 12.7
YMAX= 3.3
ZMAX= 0.0



J=16,M=18

UNIT NET KG

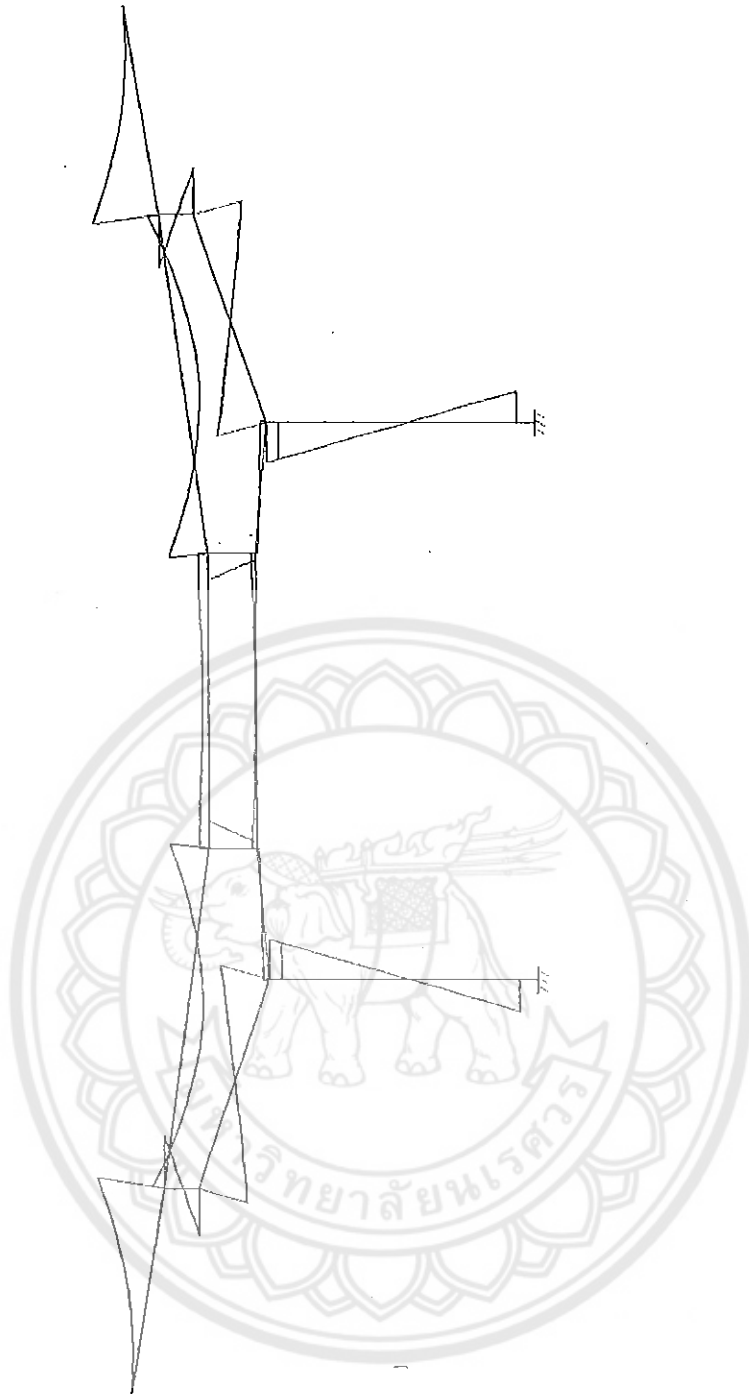
COMPANY :

STAAD PL - PLOT (REV: 19.0a) DATE: MAR 24, 1999
TITLE: STAAD PLANE

MN/ELEM
MOMENT MZ LNF 1

STRUCTURE DATA

TYPE = PLANE
NJ = 16
NM = 18
NE = 0
NS = 2
NL = 1
XMAX= 12.7
YMAX= 3.3
ZMAX= 0.0



J=16,M=18

UNIT MET KG

COMPANY:

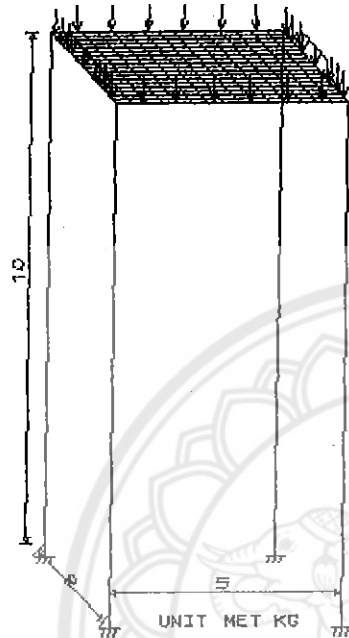
STADPL - PLOT (REV. 19.0a)

DATE MAR 24, 1999

TITLE STAD PLANE

4.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้าง 3 มิติ

Example 3



ในตัวอย่างที่ 3 เป็นการแสดงการใช้ Load ต่างๆ ในโปรแกรม เช่น Self weight , Floor load , Pressure load จะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่าง Floor load กับ Pressure load

ซึ่ง Floorload จะถ่ายแรงลงบนชิ้นส่วนของโครงสร้างแบบ Two way slab แต่ไม่สามารถใช้ได้เมื่อ Element ของโครงสร้างไม่อยู่ในแนวระนาบ (ใช้ Load ในทิศทาง GY ซึ่งหมายถึง Global Y direction)

แต่ Pressure load สามารถกระทำได้

Joint Displacement (cm)

JOINT	LOAD	X-TRANS	Y-TRANS	Z-TRANS	X-ROTAN	Y-ROTAN	Z-ROTAN
1	1	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0
2	1	0	-0.01716	0.0001	0.00109	0	-0.00044
	2	0	-0.002	0.00002	0.00023	0	-0.00005
	3	0	-0.002	0.00001	0.00014	0	-0.00006
3	1	0	-0.01716	-0.0001	-0.00109	0	-0.00044
	2	0	-0.002	-0.00002	-0.00023	0	-0.00005
	3	0	-0.002	-0.00001	-0.00014	0	-0.00006
4	1	-0.00001	-0.01716	-0.0001	-0.00109	0	0.00044
	2	0	-0.002	-0.00002	-0.00023	0	0.00005
	3	0	-0.002	-0.00001	-0.00014	0	0.00006

JOINT	LOAD	X-TRANS	Y-TRANS	Z-TRANS	X-ROTAN	Y-ROTAN	Z-ROTAN
5	1	0	-0.01716	0.0001	0.00109	0	0.00044
	2	0	-0.002	0.00002	0.00023	0	0.00005
	3	0	-0.002	0.00001	0.00014	0	0.00006
6	1	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0
7	1	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0
8	1	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0

Support Reaction (kg – meter)

JOINT	LOAD	FORCE-X	FORCE-Y	FORCE-Z	MOM-X	MOM-Y	MOM Z
1	1	667.71	49583.24	1660.12	5526.42	-0.92	-2222.94
	2	75.66	5000	354.86	1181.28	-0.27	-251.91
	3	97.55	4999.99	219.86	731.89	-0.11	-324.77
6	1	667.71	49583.29	-1660.12	-5526.44	0.93	-2222.94
	2	75.66	5000	-354.86	-1181.28	0.27	-251.91
	3	97.55	5000	-219.86	-731.89	0.11	-324.77
7	1	-667.71	49583.28	-1660.12	-5526.44	-0.92	2222.94
	2	-75.66	5000	-354.86	-1181.28	-0.27	251.91
	3	-97.55	5000	-219.86	-731.89	-0.11	324.77
8	1	-667.71	49583.21	1660.12	5526.42	0.93	2222.94
	2	-75.66	5000	354.86	1181.28	0.27	251.91
	3	-97.55	4999.98	219.86	731.88	0.11	324.77

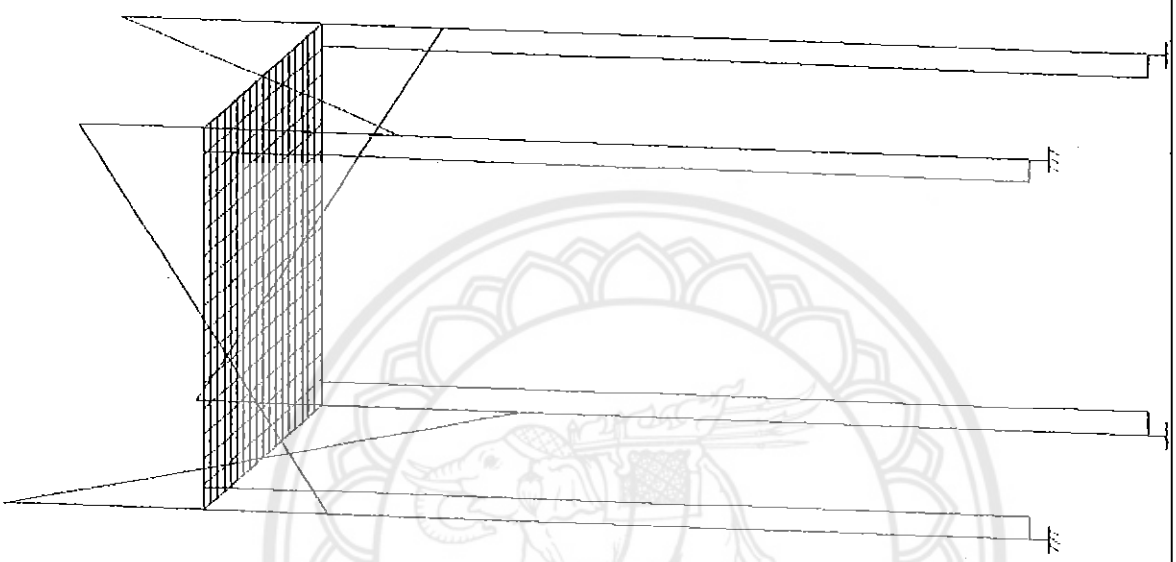
Structural Analysis Results

Unit kg - meter

MEMB	LOAD	JT	AXIAL	SHEAR-Y	SHEAR-Z	TORSION	MOM-Y	MOM-Z
1	1	1	49583.24	-667.71	1660.12	-0.92	-5526.42	-2222.94
		2	-36149	667.71	-1660.12	0.92	-11074.8	-4454.13
	2	1	5000	-75.66	354.86	-0.27	-1181.28	-251.91
		2	-5000	75.66	-354.86	0.27	-2367.27	-504.7
	3	1	4999.99	-97.55	219.86	-0.11	-731.89	-324.77
		2	-4999.99	97.55	-219.86	0.11	-1466.67	-650.76
6	1	6	49583.29	-667.71	-1660.12	0.93	5526.44	-2222.94
		3	-36149.1	667.71	1660.12	-0.93	11074.8	-4454.13
	2	6	5000	-75.66	-354.86	0.27	1181.28	-251.91
		3	-5000	75.66	354.86	-0.27	2367.27	-504.7
	3	6	5000	-97.55	-219.86	0.11	731.89	-324.77
		3	-5000	97.55	219.86	-0.11	1466.68	-650.76
7	1	7	49583.28	667.71	-1660.12	-0.92	5526.44	2222.94
		4	-36149.1	-667.71	1660.12	0.92	11074.8	4454.13
	2	7	5000	75.66	-354.86	-0.27	1181.28	251.91
		4	-5000	-75.66	354.86	0.27	2367.27	504.7
	3	7	5000	97.55	-219.86	-0.11	731.89	324.77
		4	-5000	-97.55	219.86	0.11	1466.68	650.76
8	1	8	49583.21	667.71	1660.12	0.93	-5526.42	2222.94
		5	-36149	-667.71	-1660.12	-0.93	-11074.8	4454.13
	2	8	5000	75.66	354.86	0.27	-1181.28	251.91
		5	-5000	-75.66	-354.86	-0.27	-2367.27	504.7
	3	8	4999.98	97.55	219.86	0.11	-731.88	324.77
		5	-4999.98	-97.55	-219.86	-0.11	-1466.67	650.76

MEMB	LOAD	JT	AXIAL	SHEAR-Y	SHEAR-Z	TORSION	MOM-Y	MOM-Z
170	1	2	648.32	5373.69	0	0	3.15	229.48
		3	-648.32	5373.69	0	0	-3.15	-229.47
	2	2	146.79	3437.5	0	0	0.91	4096.13
		3	-146.79	3437.5	0	0	-0.91	-4096.12
	3	2	84.74	0	0	0	0.39	-918.48
		3	-84.74	0	0	0	-0.39	918.48
171	1	3	48.49	3358.56	0	0	-5.05	-1663.59
		4	-48.49	3358.56	0	0	5.05	1663.59
	2	3	-27.14	1562.5	0	0	-1.45	1139.05
		4	27.14	1562.5	0	0	1.45	-1139.05
	3	3	11.53	0	0	0	-0.62	-651.97
		4	-11.53	0	0	0	0.62	651.97
172	1	4	648.32	5373.69	0	0	3.15	229.47
		5	-648.32	5373.69	0	0	-3.15	-229.49
	2	4	146.79	3437.5	0	0	0.91	4096.12
		5	-146.79	3437.5	0	0	-0.91	-4096.13
	3	4	84.74	0	0	0	0.39	-918.48
		5	-84.74	0	0	0	-0.39	918.48
173	1	5	48.49	3358.56	0	0	-5.05	-1663.58
		2	-48.49	3358.56	0	0	5.05	1663.59
	2	5	-27.14	1562.5	0	0	-1.45	1139.05
		2	27.14	1562.5	0	0	1.45	-1139.05
	3	5	11.53	0	0	0	-0.62	-651.97
		2	-11.53	0	0	0	0.62	651.97

MIN/ELEM
SHEAR FY LNE= 1



UNIT MET KG

1

STRUCTURE DATA

TYPE = SPACE
NJ = 308
NM = 8
NE = 278
NS = 4
NL = 1
XMAX = 5.0
YMAX = 10.0
ZMAX = 8.0

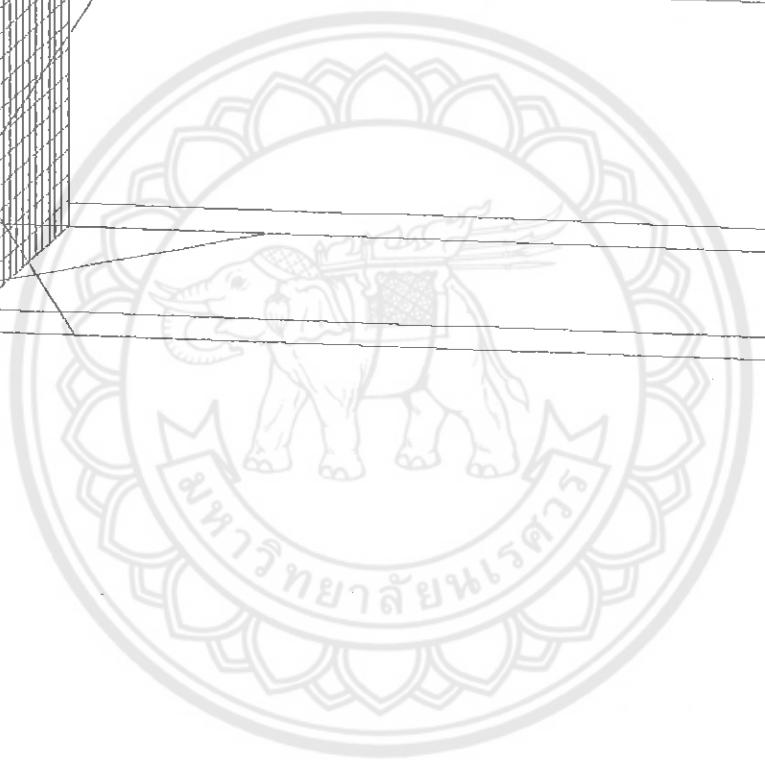
J=308,M=8,E=278

DATE: MAR 24, 1999

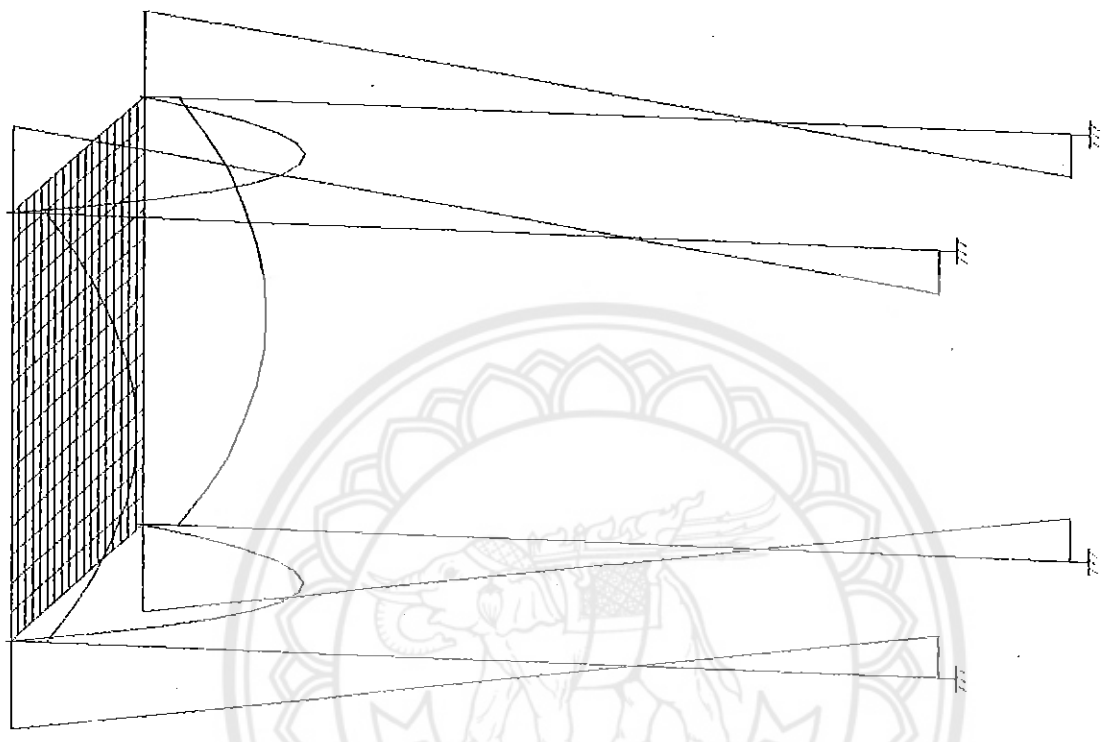
ST A D P L - P L O T (REV: 19.0a)

TITLE: STAAD.GRAC1

COMPANY:



MIN/ELEM
MOMENT MZ LINE 1



UNIT NET KG

J=308 ,M=8 ,E=278

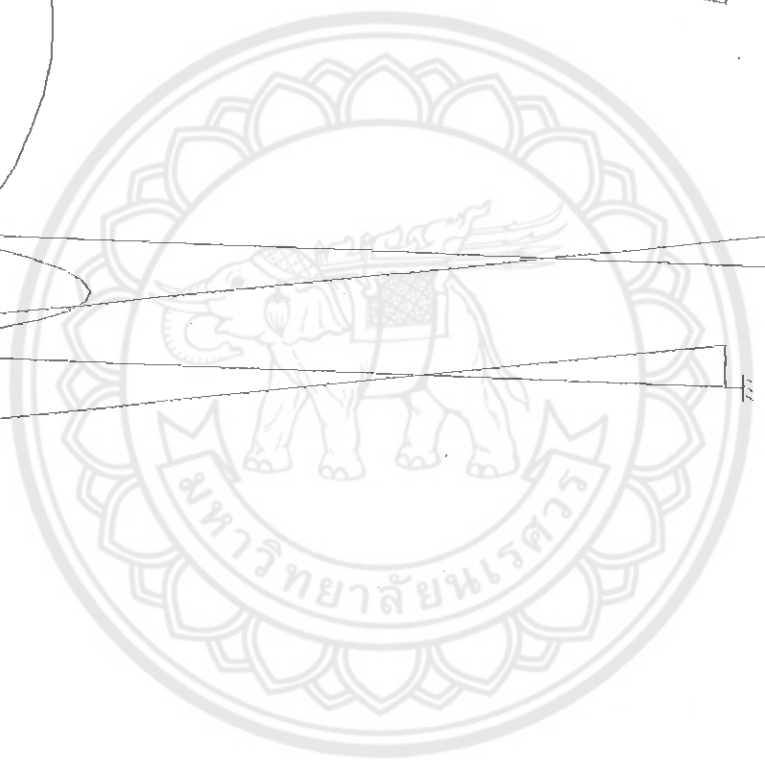
STRUCTURE DATA
 TYPE = SPACE-
 NJ = 308
 NM = 8
 NE = 278
 NS = 4
 NL = 1
 XMAX= 5.0
 YMAX= 10.0
 ZMAX= 8.0

COMPANY :

STADPL - PLOT (REV. 19.0a)

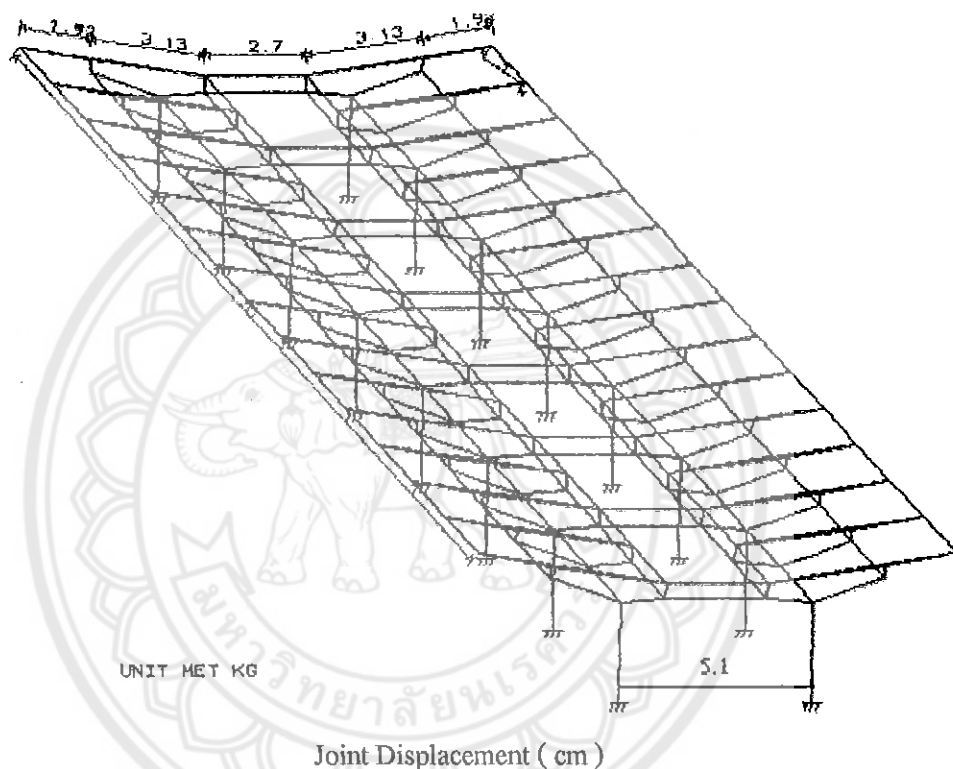
DATE: MAR 24, 1999

TITLE: STAAD SPACE



Example 4.

ในตัวอย่างที่ 4 เป็นโครงสร้างที่จอตรดคณะวิศวกรรมศาสตร์ โดยคิดแบบโครงข้อแข็ง 3 มิติ (space frame) ให้รับ Load ครบทุกกรณี ได้แก่ Wind load , Self weight , Pressure load (Live load บนหลังคา) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้กับการวิเคราะห์โครงสร้างแบบ 2 มิติ ซึ่งจะเห็นว่า การวิเคราะห์แบบ 3 มิติ จะมีความถูกต้องมากกว่า ซึ่งในข้อนี้ใช้ Live load = 50 kg/m²



JOINT	X-TRANS	Y-TRANS	Z-TRANS	X-ROTAN	Y-ROTAN	Z-ROTAN
69	-0.15284	-2.30286	0.00022	0.00001	0	0.00428
70	0.08289	-0.59367	-0.00001	0.00001	0	0.00139
71	0.14945	-0.1464	-0.00015	0	0	0.00429
72	0.21789	-0.07436	0.00015	0	0	-0.00488
73	0.31489	-0.74704	-0.00004	0.00001	0	-0.00174
74	0.56198	-2.5293	-0.00009	0.00001	0	-0.00488
75	0.08252	-0.59137	-0.00032	0.00001	0	0

JOINT	X-TRANS	Y-TRANS	Z-TRANS	X-ROTAN	Y-ROTAN	Z-ROTAN
76	0.22228	-0.00769	0.00017	0	0	-0.00054
77	0.21078	-0.14536	-0.0005	0.00001	0	-0.00018
78	0.13755	-0.07313	-0.00023	0.00001	0	-0.00002
79	0.11821	-0.0081	0.0002	0	0	-0.00119
80	0.30586	-0.74475	-0.00033	0.00001	0	-0.0003
81	0.21357	-0.00649	0.00015	0	0	-0.00119
82	0	0	0	0	0	0
83	0.10749	-0.00684	0.00019	0	0	-0.00096
84	0	0	0	0	0	0

Support Reaction (kg - m)

JOINT	FORCE-X	FORCE-Y	FORCE-Z	MOM-X	MOM-Y	MOM Z
82	-688.35	3995.66	-0.22	-0.52	0	983.58
84	-86.55	4201.61	-0.3	-0.66	0	323.96

Structural Analysis Result (kg - m)

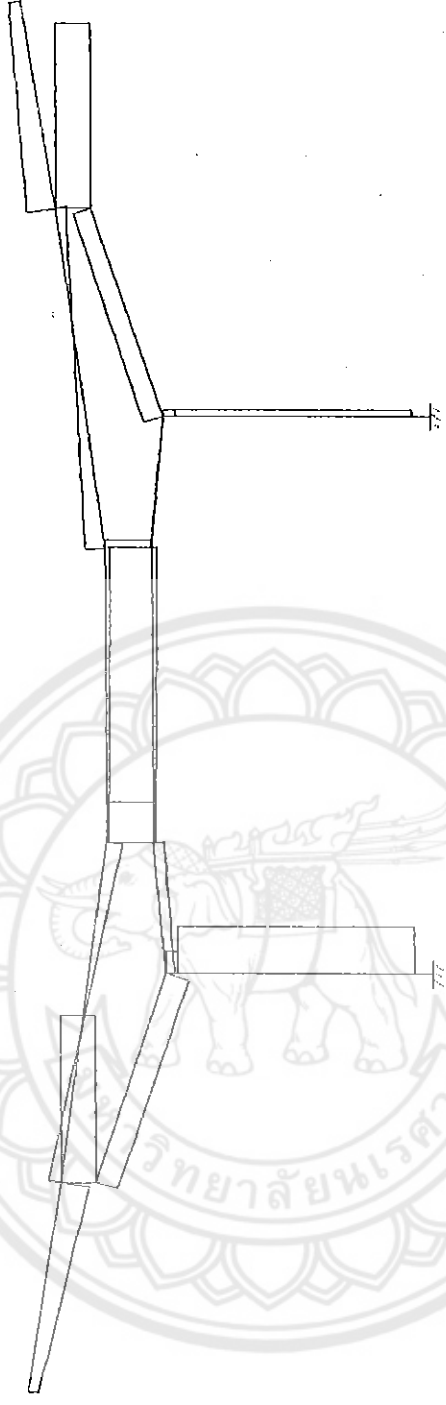
MEMB	JT	AXIAL	SHEAR-Y	SHEAR-Z	TORSION	MOM-Y	MOM-Z
73	69	5340.16	-1244.51	0.02	0	-0.03	-1111.5
	70	-5345.08	1275.66	-0.02	0	-0.02	-1312.32
74	70	-858.46	133.78	-0.01	0	0.02	123.76
	71	851.9	-82.96	0.01	0	0.01	214.96
75	71	-7725.82	-36.21	-0.07	0	0.09	146.28
	72	7725.82	80.47	0.07	0	0.1	-303.81
76	72	-982.81	-62.77	0	0	-0.01	-188.15
	73	989.37	113.59	0	0	-0.01	-87.48

MEMB	JT	AXIAL	SHEAR-Y	SHEAR-Z	TORSION	MOM-Y	MOM-Z
77	73	5372.87	1257.45	0	0	0.01	1302.82
	74	-5367.95	-1226.3	0	0	0	1085.97
78	70	2336.22	5971.24	0.03	0	0	1188.56
	75	-2341.13	-5971.24	-0.03	0	-0.01	602.81
79	75	6495.1	-611.96	-0.31	0	0.26	-602.65
	76	-6504.94	643.11	0.31	0	0.36	-647.71
80	76	5794.55	412.5	0.6	0	-0.38	225.33
	77	-5792.91	-392.83	-0.6	0	-0.34	259.55
81	77	8266.6	-16.38	-0.06	0	0.16	-45.81
	78	-8266.6	60.64	0.06	0	0	-58.17
82	78	6242.2	-582.14	-0.41	0	0.2	-293.1
	79	-6243.84	601.81	0.41	0	0.29	-419.74
83	79	6565.1	602.57	0.25	0	-0.29	561.79
	80	-6555.26	-571.42	-0.25	0	-0.21	607.79
84	80	2324.13	-6077.71	-0.01	0	0	-607.97
	73	-2319.21	6077.71	0.01	0	0	-1215.34
85	78	944.04	-2089.09	-9.25	0	1.47	351.08
	72	-937.49	2089.09	9.25	0	2.23	-1186.71
86	71	789.03	2474.38	8.21	0	-1.95	1203.31
	77	-795.59	-2474.38	-8.21	0	-1.33	-213.56
87	76	3636.86	295.34	0.22	0	0.06	422.61
	81	-3638.5	-295.34	-0.22	0	-0.08	-393.08
88	81	3638.49	688.35	0.22	0	0.08	393.12
	82	-3995.66	-688.35	-0.22	0	-0.52	983.58
89	79	3842.8	86.68	0.3	0	0.04	-142.2
	83	-3844.44	-86.68	-0.3	0	-0.07	150.87
90	83	3844.44	86.55	0.3	0	0.07	-150.87
	84	-4201.61	-86.55	-0.3	0	-0.66	323.96

MIN/ELEM
SHEAR FY LN= 1

1

STRUCTURE DATA
TYPE = SPACE
NJ = 212
NM = 368
NE = 0
NS = 16
NL = 1
XMAX= 12.7
YMAX= 3.3
ZMAX= 70.0



J=212,M=368

UNIT MET KG

COMPANY:

S T A A D P L - P L O T (REV: 19.0a)

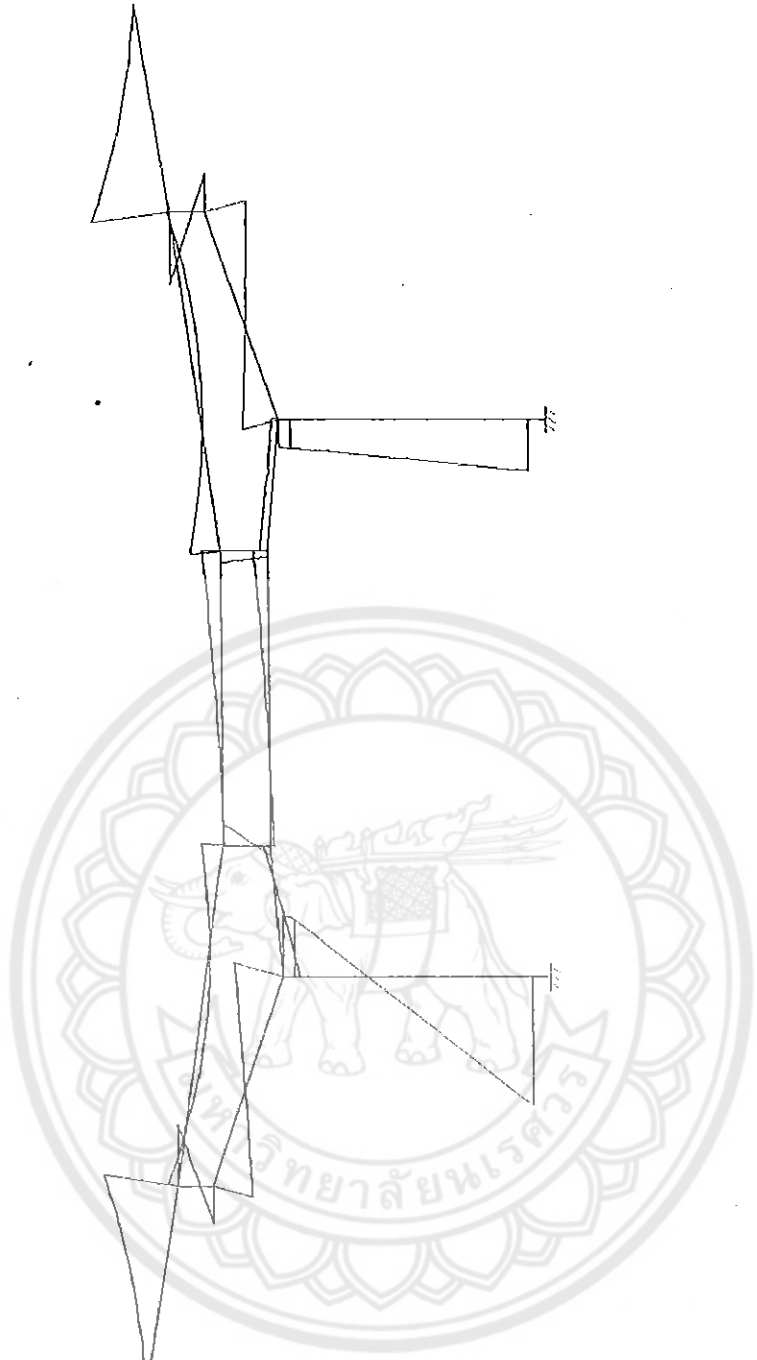
DATE: MAR 24, 1999

TITLE: STAAD SPACE

MR/ELEM
MOMENT MZ LN= 1

1

STRUCTURE DATA
TYPE = SPACE
NJ = 212
NM = 368
NE = 0
NS = 16
NL = 1
XMAX= 12.7
YMAX= 3.3
ZMAX= 70.0



UNIT MET KG

J=212,M=368

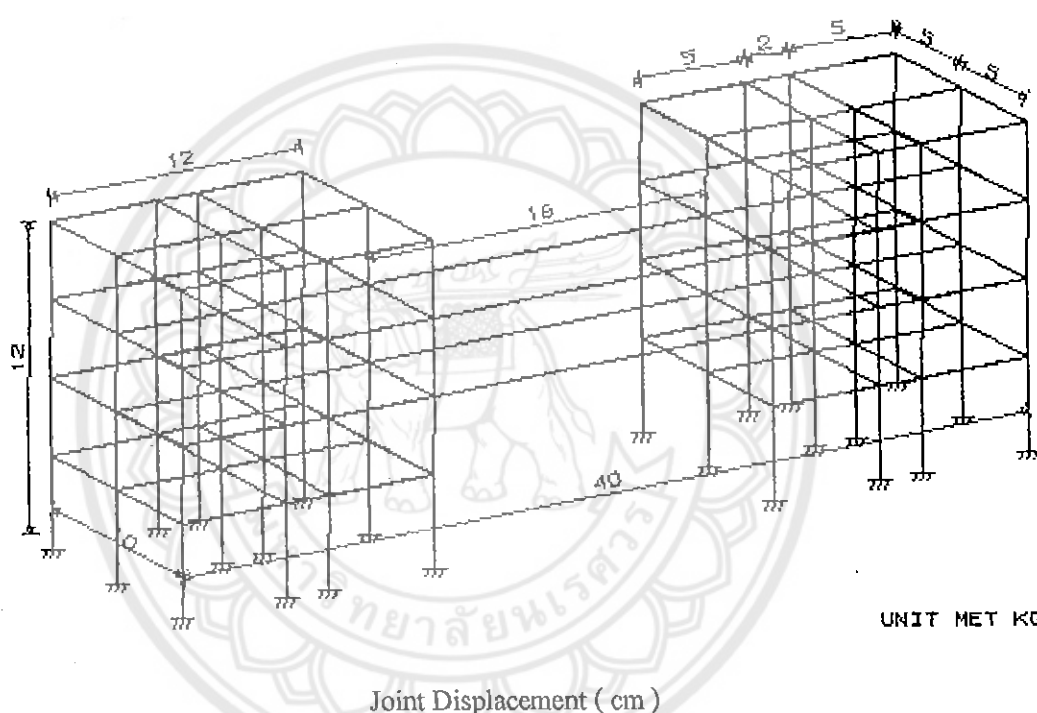
STAAD PL - PLOT (REV 19.0a) DATE: MAR 24, 1999

TITLE STAAD SPACE

COMPANY:

Example 5.

ในตัวอย่างที่ 5 เป็นโครงสร้างหอพักนิสิตหญิง มหาวิทยาลัยนเรศวร เนื่องจากข้อจำกัดของโปรแกรม Version นี้สามารถใช้ได้กับโครงสร้างที่มีจำนวน Member ไม่เกิน 500 Member และได้ load ชนิดต่างๆ เช่น Self wight , Floor load , Wind load ตามค่ามาตรฐานที่กำหนดซึ่งจะได้นำผลการวิเคราะห์โครงสร้างที่ได้ไปใช้ในการออกแบบต่อไปในข้อนี้ใช้ $LL = 200 \text{ kg/m}^2$



JOINT	X-TRANS	Y-TRANS	Z-TRANS	X-ROTAN	Y-ROTAN	Z-ROTAN
16	0.77334	-0.12272	0.08401	0.00014	-0.00003	-0.00062
31	0.47623	-0.05944	0.00974	0.00001	-0.00008	-0.00083
35	0.70112	-0.07824	0.01468	0.00001	-0.00013	-0.00069
36	0.66473	-0.13048	0.08529	0.00009	-0.00005	-0.00058
37	0.92343	-0.07267	-0.07995	-0.00001	-0.00017	-0.00067
38	0.90048	-0.07236	-0.01077	0	-0.00015	-0.00035
51	0.43129	-0.03855	0.00993	-0.00003	-0.00009	-0.00077
55	0.63882	-0.05009	0.01563	-0.00005	-0.00013	-0.00059

JOINT	X-TRANS	Y-TRANS	Z-TRANS	X-ROTAN	Y-ROTAN	Z-ROTAN
56	0.63629	-0.1867	0.08868	0.00003	-0.00005	-0.00045
75	0.49573	-0.0383	0.01769	0.00007	0.00022	-0.00037
95	0.60635	-0.06624	0.01841	0.00001	0.00014	-0.00038

Support Reaction (kg - m)

JOINT	FORCE-X	FORCE-Y	FORCE-Z	MOM-X	MOM-Y	MOM Z
61	-4155.79	145575.4	1920.41	2996.39	-185.6	10433.76
101	-5419.95	143036.8	37.43	1147.25	-162.27	13798.24
104	-4312.21	207338.3	-954.74	-2406.45	-186.44	12794.77

Structural Analysis Results (kg - m)

MEMB	JT	AXIAL	SHEAR-Y	SHEAR-Z	TORSION	MOM-Y	MOM-Z
61	16	-2039	4025.74	-1987.84	-158.32	5096.25	1706.77
	36	2039	6278.82	1987.84	158.32	4842.94	-7339.48
66	37	9146.5	5707.01	16.96	-1.29	-47.21	5220.46
	38	-9146.5	6431.63	-16.96	1.29	-37.58	-7032.02
93	31	-298.25	4425.87	-34.88	-211.58	110.17	3229.87
	51	298.25	5113.68	34.88	211.58	64.22	-4949.4
101	55	1011.48	2706.09	-42.28	-18.61	81.42	2383.64
	56	-1011.48	3057.55	42.28	18.61	129.96	-3262.29
176	75	-1145.84	6680.8	439.4	38.13	-711.79	6190.04
	95	1145.84	6343.75	-439.4	-38.13	-1485.24	-5347.41
104	35	-1514.95	6128.28	56.16	-319	-162.08	4831.15
	55	1514.95	6896.28	-56.16	319	-118.73	-6751.14

MN/ELEM
SHEAR FY LNE= 1

STRUCTURE DATA

TYPE = SPACE

NJ = 120

NM = 236

NE = 246

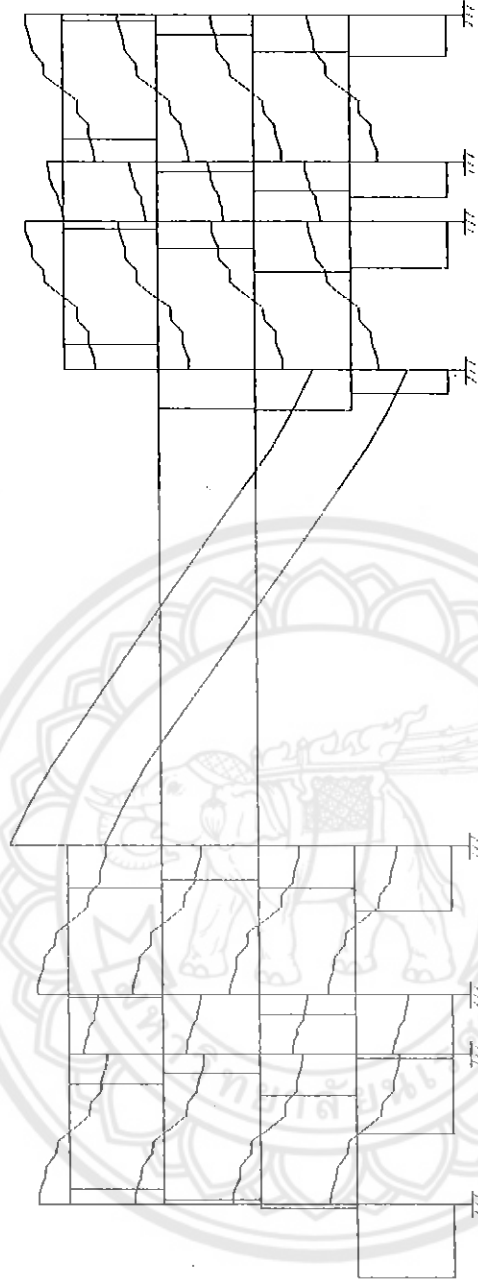
NS = 24

NL = 1

XMAX= 40.0

YMAX= 12.0

ZMAX= 10.0



J=120.M=236.E=246

UNIT MET KG

COMPANY:

S T A A D P L - P L O T (REV: 19.0a)

DATE: MAR 24, 1999

TITLE: STAAD SPACE

MN/ELEM
MOMENT MZ LN= 1

STRUCTURE DATA

TYPE = SPACE

NJ = 120

NM = 236

NE = 246

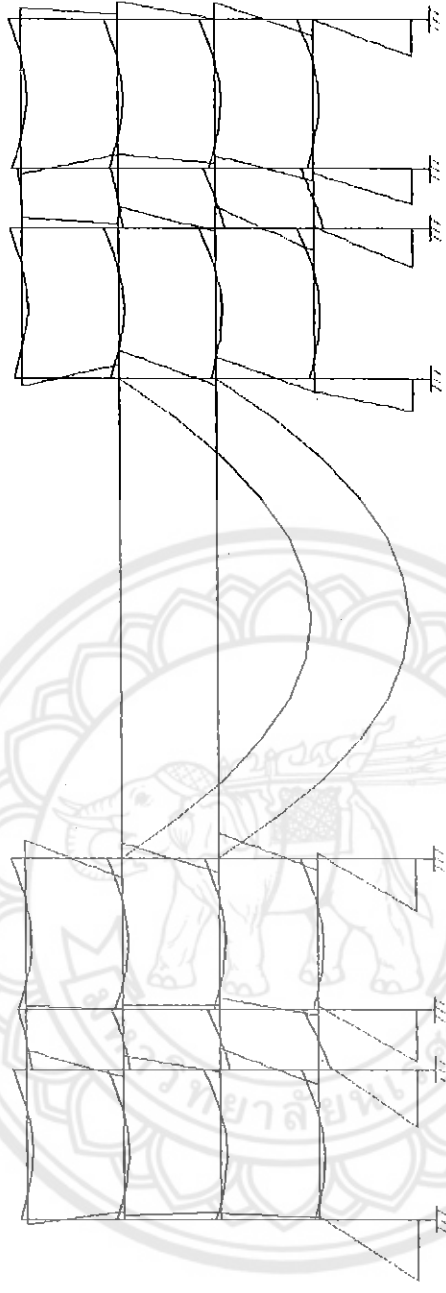
NS = 24

NL = 1

XMAX= 40.0

YMAX= 12.0

ZMAX= 10.0



J=120,M=236,E=246

UNIT MET KG

COMPANY:

S T A A D P L - P L O T (REV: 19.0a)

DATE: MAR 24, 1999

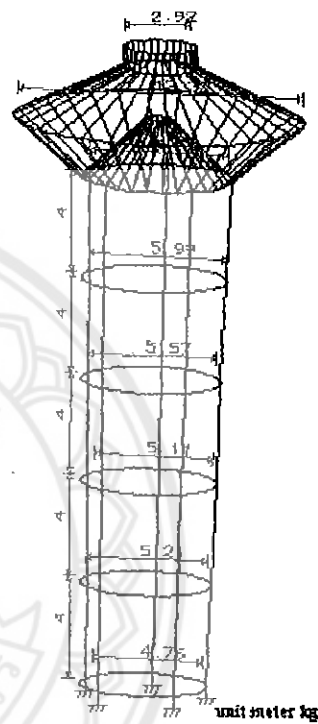
TITLE: STAAD SPACE

Example 6.

ในตัวอย่างที่ 6 เป็น โครงสร้างหอส่งน้ำของมหาวิทยาลัยนเรศวร ได้แสดงการใส่ Load ที่มีแรงดันน้ำ ได้แก่ Pressure load เนื่องจากน้ำหนักของน้ำ และแรงดันด้านข้าง (Trapezoid) ซึ่งจะแปรผันตามความสูง ($P = \rho gh$)



Actual Structure



Model Structure

Joint Displacement (cm)

JOINT	LOAD	X-TRANS	Y-TRANS	Z-TRANS	X-ROTAN	Y-ROTAN	Z-ROTAN
1	1	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0
2	1	0.00979	-0.00063	-0.00478	-0.00001	-0.00022	0
	2	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0
3	1	0.02184	-0.00139	-0.01242	-0.00001	-0.00018	-0.00001
	2	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0

JOINT	LOAD	X-TRANS	Y-TRANS	Z-TRANS	X-ROTAN	Y-ROTAN	Z-ROTAN
74	1	-0.02072	-0.08898	-0.02196	0.00001	-0.00004	0
	2	2.53995	0.20276	-0.00274	0.00024	0.0001	-0.00165
	3	0.16284	-0.42927	-0.07412	0.00002	-0.00037	-0.00009
75	1	-0.0248	-0.08994	-0.01675	0.00001	-0.00004	0.00001
	2	2.54485	0.22333	-0.00122	0.00012	0.00006	-0.00161
	3	0.14123	-0.42882	-0.08115	0.00002	-0.00037	-0.00008
149	1	0.03006	-0.15198	0.03091	0.00001	-0.00007	0.00002
	2	4.79894	-0.31627	-0.00069	0.00017	0.00004	-0.00162
	3	0.21528	-0.89718	0.27136	0	-0.00071	0.00004
151	1	0.02446	-0.12333	-0.02535	-0.00001	-0.00006	0.00001
	2	3.74595	-0.0156	-0.02884	-0.00005	-0.00004	-0.00103
	3	0.34996	-0.65584	0.05583	0	-0.00054	-0.00006
153	1	0.01151	-0.17847	0.0378	-0.00007	-0.0001	-0.0001
	2	5.84956	-0.32662	0.01834	-0.00023	0.0001	-0.00164
	3	0.35706	-1.21974	0.41177	-0.00096	-0.00093	-0.00179

Support Reaction (kg - m)

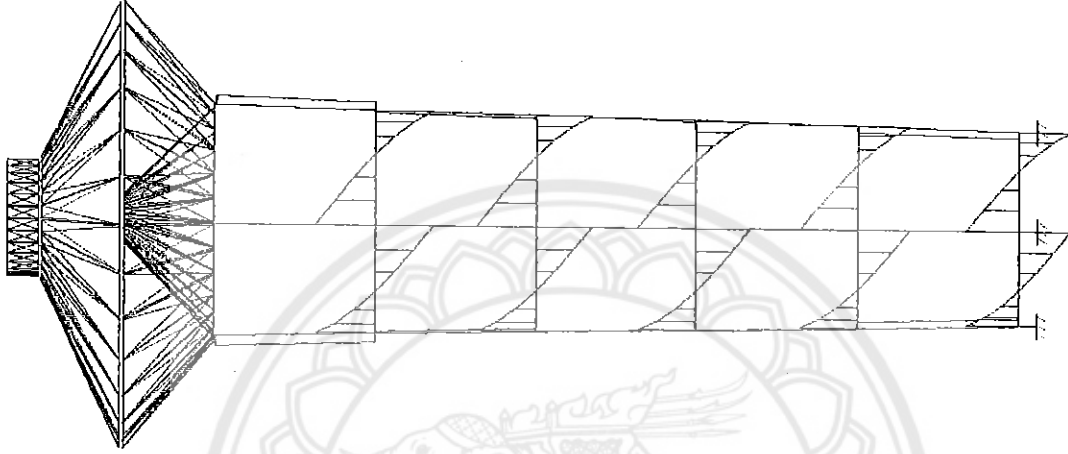
JOINT	LOAD	FORCE-X	FORCE-Y	FORCE-Z	MOM-X	MOM-Y	MOM Z
1	1	-41630.84	59473.14	-69.6	-143.74	30.25	727.35
	2	-8355.2	96105.22	-0.71	-0.19	0.97	25138.14
	3	5764.16	251048.66	-780.67	-1616.09	294.79	1212.86
7	1	-12910.71	59157.27	39561.64	643.44	18.96	366.77
	2	-13274.52	30045.01	-1375.51	-707.48	778.52	28904.89
	3	677.38	246606.14	-6203.4	-573.71	322.2	2592.82
13	1	33621.28	58864.5	24552.67	537.78	26.6	-488.19
	2	-10489.32	-77882.69	2552.6	1886.91	290.03	27131.94
	3	-5757.46	242282.5	-3066.95	988.19	299.56	1857.39

Structural Analysis Results (kg - m)

MEMB	LOAD	AXIAL	SHEAR-Y	SHEAR-Z	TORSION	MOM-Y	MOM-Z
1	1	31408.22	2320.33-	18138.37	-130	12271.49	1344.55
		-31408.22	-1546.5	18138.37	130	-1839.42	-232.56
	2	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0
2	1	34500.35	1546.51-	11189.39	-175.64	1839.42	200.34
		-34500.35	-772.55	11189.39	175.64	4597.08	466.66
	2	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0
3	1	36071.48	772.55	-3784.78	-74.95	-4597.08	-492.95
		-36071.48	-0.38	3784.78	74.95	6769.23	714.75
	2	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0
74	1	-194.91	1731.72	62.61	-233.5	0.16	308.86
		194.91	-901.18	-62.61	233.5	-38.81	503.77
	2	1065.97	6.72	1077.64	-2731.72	978.2	-8378.84
		-1065.97	-6.72	-1077.64	2731.72	-1643.69	8382.99
	3	35.49	432.6	-10.7	-273.99	-2.95	163.23
		-35.49	-432.6	10.7	273.99	9.54	103.89

MEMB	LOAD	AXIAL	SHEAR-Y	SHEAR-Z	TORSION	MOM-Y	MOM-Z
75	1	-203.63	901.15	20.5	-123.07	38.81	-541.4
		203.63	-71.9	-20.5	123.07	-51.44	841.25
	2	723.51	6.25	381.49	-919.38	1643.72	-8768.8
		-723.51	-6.25	-381.49	919.38	-1879.13	8772.62
	3	37.21	433.06	-2.79	-246.23	-9.58	-158.76
		-37.21	-433.06	2.79	246.23	11.3	425.63
149	1	54840.38	369.56	-69.58	26.65	144.46	749.31
		-52115.8	-301.45	69.58	-26.65	133.96	593.13
	2	95866.38	10754.47	-0.71	0.97	0.21	25138.14
		-95866.4	-10754.5	0.71	-0.97	2.62	17893.18
	3	251114.3	511.89	-780.67	254.31	1622.95	1212.86
		-251114.3	-511.89	780.67	-254.31	1500.73	835.33
151	1	54231.33	363.96	-70.5	26.19	146.39	732.72
		-51506.8	-295.7	70.5	-26.19	135.69	587.01
	2	-77683.6	-8924.04	-8239.02	-148.33	17501.28	-20819.9
		77683.55	8924.04	8239.02	148.33	15465.12	-14887.4
	3	242368.3	-389.6	-910.76	252.08	1899.23	-919.53
		-242368.3	389.6	910.76	-252.08	1744.94	-639.37
153	1	54660.12	371.26	-64.6	26.33	132.02	750.99
		-51935.6	-302.54	64.6	-26.33	126.46	597.04
	2	29626.55	3524.31	13052.09	-77.46	-27728.8	8200.87
		-29626.6	-3524.31	13052.09	77.46	-24496.2	5900.86
	3	248216.9	299.62	-123.24	252.98	220.73	700.44
		-248216.9	-299.62	123.24	-252.98	272.39	498.41

MIN/ELEM
SHEAR FY LN= 1



UNIT MET KG

DATE: MAR 24, 1999

S T A A D P L - P L O T (REV: 19.0a)

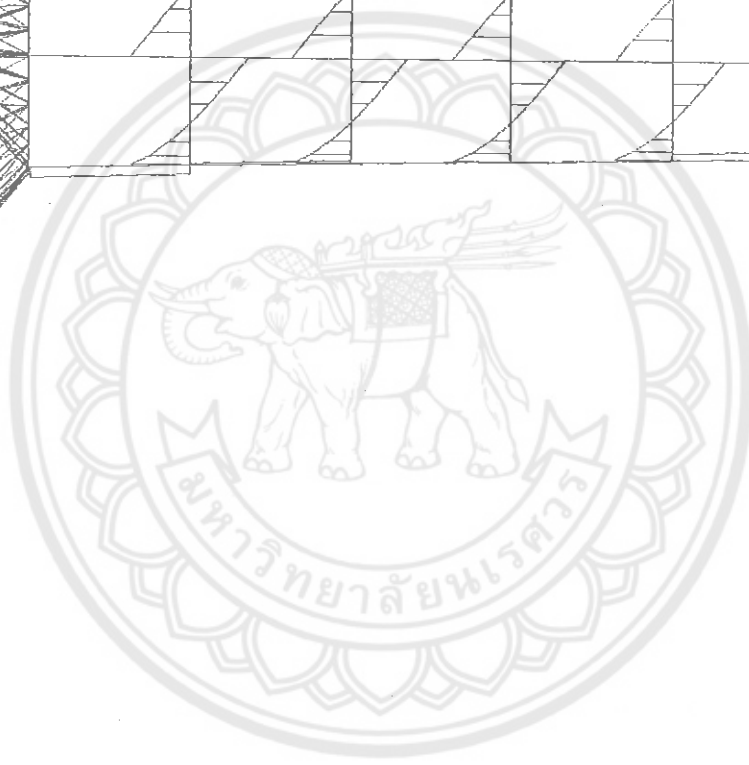
TITLE: STAAD SPACE

J=300,M=175,E=295

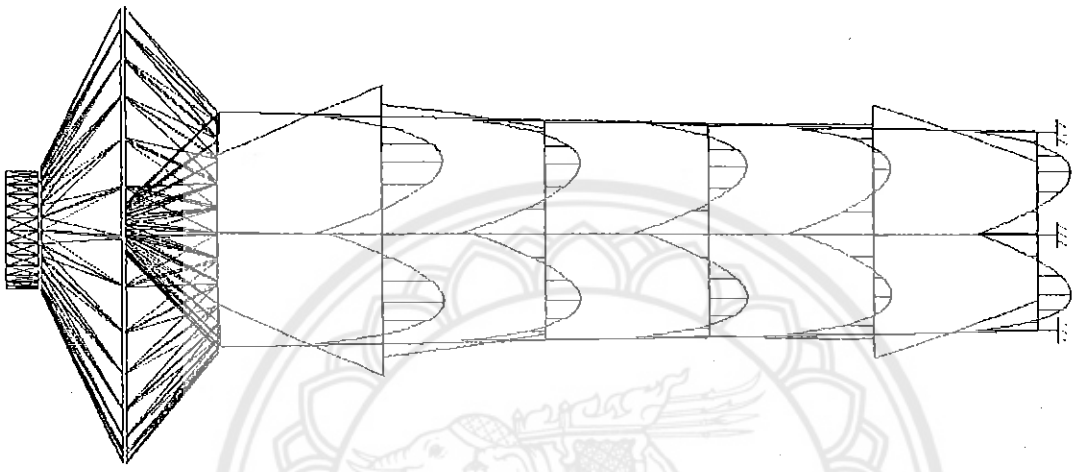
STRUCTURE DATA

TYPE = SPACE
NJ = 300
NM = 175
NE = 295
NS = 5
NL = 1
XMAX= 12.6
YMAX= 25.2
ZMAX= 12.5

COMPANY:



MIN/ELEM
MOMENT MZ LN= 1



UNIT MET KG

DATE: MAR 24, 1999

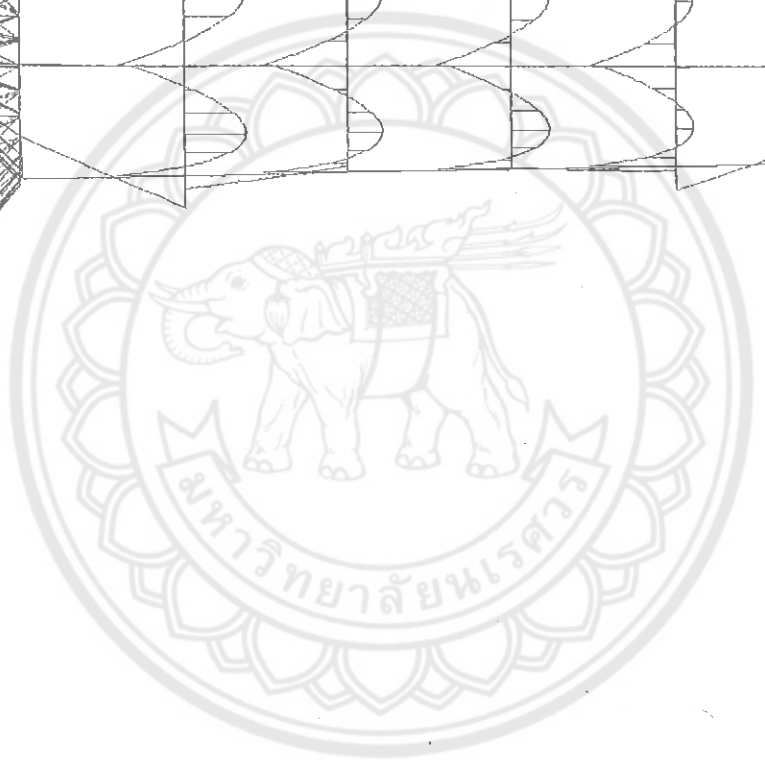
S T A A D P L - P L O T (REV: 19.0a)

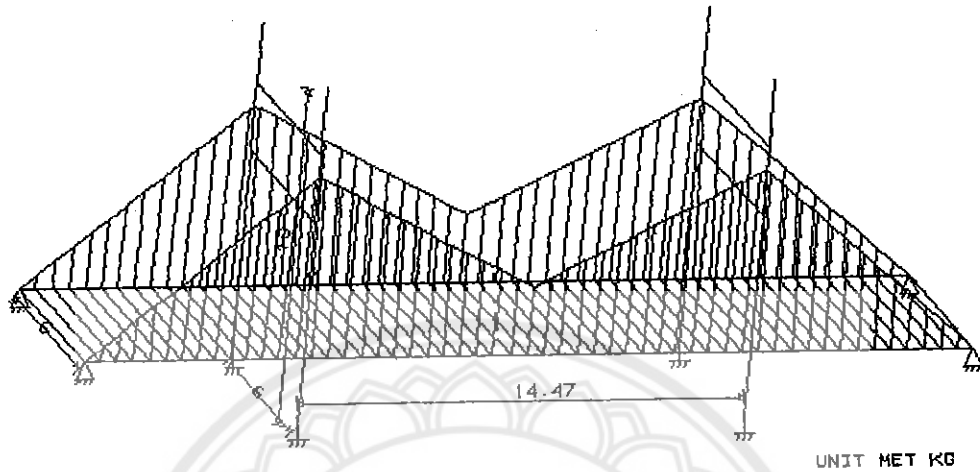
TITLE: STAAD SPACE

J=300 ,M=175 ,E=295

COMPANY :

STRUCTURE DATA
TYPE = SPACE
NJ = 300
NM = 175
NE = 295
NS = .5
NL = 1
XMAX= 12.6
YMAX= 25.2
ZMAX= 12.5



Example 7

ในตัวอย่างที่ 7 เป็นโครงสร้างสะพานแขวน (Composite Structure) จะแสดงการใช้
Member Cable , Member Release และ Moving Load ไซ้รถ HS 20

Joint Displacement (cm)

JOINT	LOAD	X-TRANS	Y-TRANS	Z-TRANS	X-ROTAN	Y-ROTAN	Z-ROTAN
1	1	0	0	0	0.00011	0	-0.00199
	2	0	0	0	0	-0.00002	-0.00026
28	1	0.00002	-0.0997	0.00001	0.00016	0	-0.00001
	2	0.00001	1.4453	0.00021	0.00007	0	0
29	1	0	0	0	-0.00011	0	-0.00199
	2	0	0	0	0	0.00002	-0.00026
56	1	0.00002	-0.09971	-0.00001	-0.00016	0	-0.00001
	2	0.00001	1.4453	-0.00021	-0.00007	0	0
67	1	0.06612	-0.03991	0.00043	-0.00001	0	-0.00021
	2	-0.32762	-0.01003	0	0	0	0.00069
68	1	0.0661	-0.03991	-0.00043	0.00001	0	-0.00021
	2	-0.32762	-0.01003	0	0	0	0.00069
185	1	-0.06737	-0.03995	0.00043	-0.00001	0	0.00021
	2	0.32704	-0.01005	0	0	0	-0.00069

JOINT	LOAD	X-TRANS	Y-TRANS	Z-TRANS	X-ROTAN	Y-ROTAN	Z-ROTAN
186	1	-0.06736	-0.03995	-0.00043	0.00001	0	0.00021
	2	0.32704	-0.01005	0	0	0	-0.00069
187	1	-0.00158	-0.12614	0	0	0	0
	2	-0.00092	1.36594	0	0	0	0
188	1	-0.00158	-0.12612	0	0	0	0
	2	-0.00092	1.36594	0	0	0	0

Support Reaction (kg - meter)

JOINT	LOAD	FORCE-X	FORCE-Y	FORCE-Z	MOM-X	MOM-Y	MOM Z
59	1	-1214.84	65638.43	-145.14	-71.37	0.09	686.34
	2	-10822.6	7340.3	-8.29	-10.29	1.53	5834.74
60	1	-1214.75	65638.31	145.15	71.38	-0.14	686.3
	2	-10822.6	7340.3	8.29	10.28	-1.53	5834.76
177	1	1183.9	65698.21	-145.04	-71.24	-0.09	-668.06
	2	10808.28	7367.9	-8.24	-10.23	-1.53	-5826.28
178	1	1183.82	65698.09	145.05	71.26	0.13	-668.02
	2	10808.34	7367.91	8.24	10.22	1.53	-5826.32
1	1	-20904.1	-7752.47	144.83	0	0	0
	2	-6635.47	-90.41	2141.4	0	0	0
29	1	-20903.9	-7752.37	-144.84	0	0	0
	2	-6635.45	-7347.88	-2141.4	0	0	0
121	1	20935.11	-7779.39	147.22	0	0	0
	2	6649.78	-7360.29	2142.53	0	0	0
148	1	20934.92	-7779.28	-147.23	0	0	0
	2	6649.74	-7360.3	-2142.53	0	0	0

Structural Analysis Results (kg - meter)

Concrete Column

MEMB	LOAD	JT	AXIAL	SHEAR-Y	SHEAR-Z	TORSION	MOM-Y	MOM-Z
84	1	57	63216.63	1214.84	145.14	0.09	-218.91	1743.35
		59	-65638.5	-1214.84	-145.14	-0.09	-71.37	686.34
	2	57	7340.31	10822.59	8.29	1.53	-6.3	15810.45
		59	-7340.31	-10822.6	-8.29	-1.53	-10.29	5834.74
85	1	58	63216.52	1214.75	-145.15	-0.14	218.91	1743.2
		60	-65638.3	-1214.75	145.15	0.14	71.38	686.3
	2	58	7340.31	10822.63	-8.29	-1.53	6.3	15810.51
		60	-7340.31	-10822.6	8.29	1.53	10.28	5834.76

Concrete Beam

MEMB	LOAD	JT	AXIAL	SHEAR-Y	SHEAR-Z	TORSION	MOM-Y	MOM-Z
92	1	63	1647.19	2043.41	0.01	0.02	-0.05	1920.22
		65	-1647.19	2043.41	-0.01	-0.02	-0.03	-1920.22
	2	63	-1.45	0	0	0	-0.17	-0.04
		65	1.45	0	0	0	0.17	0.04
93	1	64	-1441.54	2043.41	0	0.03	-0.02	1977.81
		66	1441.54	2043.41	0	-0.03	0.01	-1977.81
	2	64	3.8	0	0	0	-0.22	0.25
		66	-3.8	0	0	0	0.22	-0.25
294	1	181	1647.2	2043.41	-0.01	-0.02	0.05	1920.22
		183	-1647.2	2043.41	0.01	0.02	0.03	-1920.22
	2	181	-1.44	0	0	0	0.17	-0.04
		183	1.44	0	0	0	-0.17	0.04
295	1	182	-1441.59	2043.41	0	-0.03	0.02	1977.81
		184	1441.59	2043.41	0	0.03	-0.01	-1977.81
	2	182	3.78	0	0	0	0.22	0.25
		184	-3.78	0	0	0	-0.22	-0.25

Member Cable

MEMB	LOAD	JT	AXIAL	SHEAR-Y	SHEAR-Z	TORSION	MOM-Y	MOM-Z
136	1	94	-26240.12	1.26	0	0	0	0
		67	26241.97	1.26	0	0	0	0
	2	94	-12941.2	0	0	0	0	0
		67	12941.19	0	0	0	0	0
162	1	107	-23738.66	2.15	0	0	0	0
		67	23740.64	2.15	0	0	0	0
	2	107	-10964.6	0	0	0	0	0
		67	10964.64	0	0	0	0	0
352	1	187	-23792	5.87	0	0	0	0
		215	23797.41	5.87	0	0	0	0
	2	187	-10986.7	0	0	0	0	0
		215	10986.72	0	0	0	0	0
406	1	95	-23694.2	5.95	0	0	0	0
		187	23688.77	5.95	0	0	0	0
	2	95	-10939.1	0	0	0	0	0
		187	10939.07	0	0	0	0	0
407	1	187	-19732.7	0	0	0	0	0
		56	19689.59	0	0	0	0	0
	2	187	-9117.11	0	0	0	0	0
		56	9117.11	0	0	0	0	0

Wide Flange Beam

MEMB	LOAD	JT	AXIAL	SHEAR-Y	SHEAR-Z	TORSION	MOM-Y	MOM-Z
54	1	55	-82.18	-9037.71	-0.91	0	0.21	2719.77
		56	82.18	9094.48	0.91	0	0.27	-7570.14
	2	55	-941.71	-4577.63	-0.65	0	0.18	8378.6
		56	941.71	4577.63	0.65	0	0.17	-10827.9

MEMB	LOAD	JT	AXIAL	SHEAR-Y	SHEAR-Z	TORSION	MOM-Y	MOM-Z
256	1	174	-48.58	-9167.89	-0.84	0	0.19	2664.51
		56	48.58	9224.66	0.84	0	0.26	-7584.54
	2	174	-926.16	-4638.2	-0.16	0	0	8352.97
		56	926.16	4638.2	0.16	0	0.08	-10834.8
286	1	175	63276.42	-1183.9	145.04	-0.09	-218.84	-1699.74
		177	-65698.2	1183.9	-145.04	0.09	-71.24	-668.06
	2	175	7367.91	-10808.3	8.24	-1.53	-6.26	-15790.3
		177	-7367.91	10808.29	-8.24	1.53	-10.23	-5826.28
287	1	176	63276.29	-1183.82	-145.05	0.13	218.84	-1699.62
		178	-65698.1	1183.82	145.05	-0.13	71.26	-668.02
	2	176	7367.91	-10808.3	-8.24	1.53	6.26	-15790.4
		178	-7367.91	10808.34	8.24	-1.53	10.22	-5826.32

หมายเหตุ ค่า Load ที่กระทำกับ โครงสร้างที่ขอลด หอพักนิสิตหญิง หอส่งน้ำ
สะพานแขวน ใช้ค่าตามเทศบัญญัติ (ดูที่ภาคผนวก ง)

MIN/VELEM
SHEAR FY LINE= 1

STRUCTURE DATA

TYPE = SPACE

NJ = 240

NM = 409

NE = 463

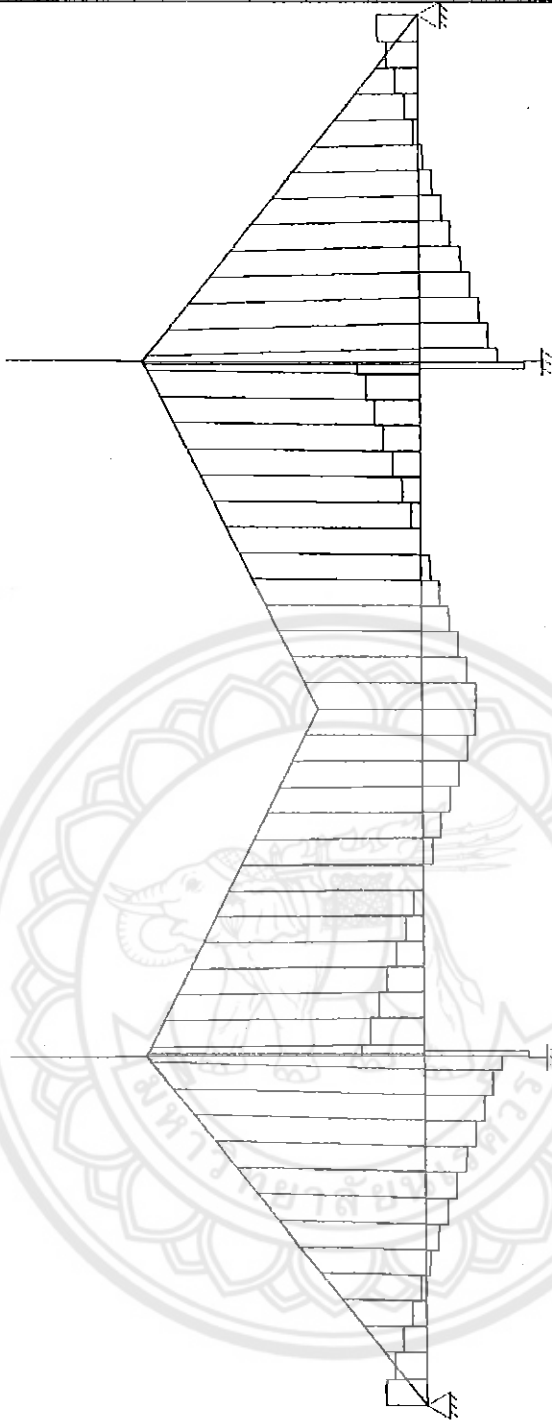
NS = 8

NL = 2

XMAX= 28.9

YMAX= 10.0

ZMAX= 6.0



J=240,M=409,E=463

UNIT NET KG

STAAD PL - PLOT (REV: 19.0a) DATE: MAR 24, 1999

TITLE: STAAD SPACE

COMPANY:

MIN/ELEM
MOMENT MZ LN= 1

STRUCTURE DATA

TYPE = SPACE

NJ = 240

NM = 409

NE = 463

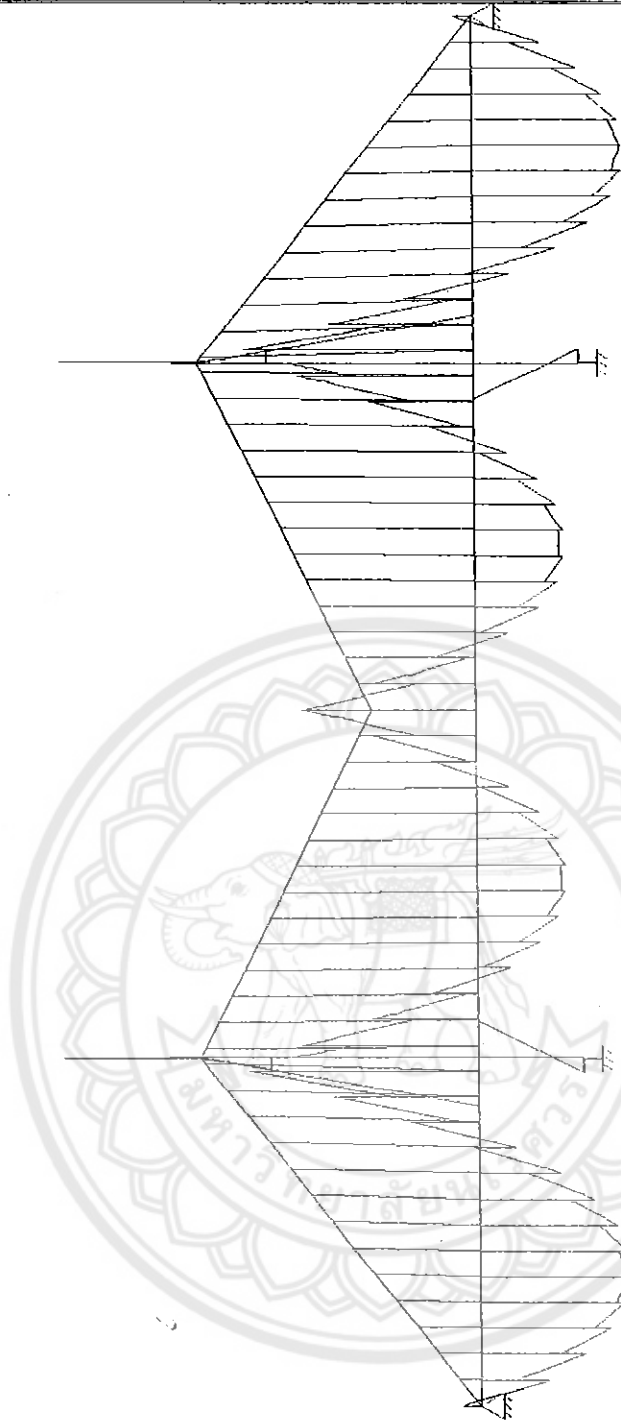
NS = 8

NL = 2

XMAX= 28.9

YMAX= 10.0

ZMAX= 6.0



J=240,M=409,E=463

UNIT MET KG

COMPANY:

S T A A D P L - P L O T (REV: 19.0a)

DATE: MAR 24, 1999

TITLE: STAAD SPACE

บทที่ 5

วิเคราะห์และสรุปผล

5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของโปรแกรม

5.1.1 ผู้ใช้โปรแกรมควรจะมีความรู้ทางวิชาวิเคราะห์โครงสร้าง โดยเฉพาะวิธี Direct Stiffness Method จะได้ทราบว่าผลที่ได้ผิดหรือถูก

5.1.2 ผลการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับแบบการจำลอง โครงสร้าง ดังนั้นควรจะสร้างแบบจำลองให้ใกล้เคียงความจริงมากที่สุด

5.1.3 ผลการวิเคราะห์ยังขึ้นอยู่กับกรป้อนข้อมูลเข้าไปในโปรแกรม ดังนั้นจึงต้องป้อนข้อมูลด้วยความระมัดระวัง ป้อนให้ถูกต้อง เพราะถ้าป้อนผิดเพียงจุดเดียวจะทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้ผิดทั้งหมด

5.2 สรุปผลของการใช้โปรแกรม

5.2.1 การแสดงผลของโปรแกรมแสดงได้ทั้งแบบ รูปภาพ (Graphic) และแสดงเป็นข้อมูลตัวเลข

5.2.2 เลือกรูปแสดงผลว่าจะให้แสดงเฉพาะ Member ที่ต้องการหรือแสดงผลทั้งหมด

5.2.3 แสดงผลเป็น Case ต่างๆ ตาม Load Case ที่ป้อนข้อมูลเข้าไป

5.2.4 แสดงการเกิด Deflection เป็นภาพเคลื่อนไหวเหมือนจริงจะได้ทราบว่า Member ไหนมี Deflection มากจนเกิดการเสียหาย

5.2.5 สามารถวิเคราะห์โครงสร้างที่มีชิ้นส่วน (Member) ได้ไม่เกิน 500 ชิ้นส่วน

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 เนื่องจากโปรแกรม version 1.9a นี้สามารถใช้วิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างได้ไม่เกิน 500 ชิ้นส่วน (500 Members) ดังนั้นควรจะตรวจสอบจำนวน Member ของโครงสร้างก่อนที่ป้อนข้อมูลเข้าไป หากป้อนข้อมูลเข้าไปมากกว่า 500 member จะทำให้เครื่องหยุดทำงานได้

5.3.2 ควรตรวจสอบข้อมูลที่ป้อนเข้าไป โดยตรวจสอบที่ Text Editor หากบรรทัดใดมีข้อมูลมากกว่า 72 ตัวอักษร ควรจะเปลี่ยนค่าความกว้างที่ Text Editor ด้วย หากไม่เปลี่ยนจะทำให้โปรแกรมหยุดทำงานได้แต่ความกว้างต้องไม่เกิน 79 ตัวอักษร (ป้อนค่าเป็นจำนวนทศนิยมได้)

5.3.3 ผู้ใช้โปรแกรมควรจะศึกษาการใช้โปรแกรมให้ลึกก่อน มิฉะนั้นจะทำให้โปรแกรมหยุดทำงาน หรือผลที่ออกมาผิดพลาดได้

5.3.4 จะต้องทำการป้อนข้อมูลตามรายการ (Side Menu) ที่แสดงข้างๆ ของ โปรแกรม มิฉะนั้น โปรแกรมจะหยุดทำงานหรือไม่แสดงผลออกมา

5.3.5 ควรจะศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับความหมาย การป้อนข้อมูลของ Load ชนิดต่างๆ ในโปรแกรมให้ลึกก่อนที่จะทำการใช้โปรแกรม เพราะจะได้ป้อนค่าได้อย่างถูกต้อง ทำให้ผลที่ได้ออกมาถูกต้อง

5.3.6 ควรทำการตรวจสอบผลการวิเคราะห์โครงสร้างที่ได้ทุกครั้งซึ่งอาจจะใช้วิธี Static Equilibrium หรือวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างก็ได้คือ Approximate Method เช่น Portal Method หรือ Cantilever Method เป็นต้น

5.3.7 ในการวิเคราะห์แผ่นพื้นหรือคานโค้ง (Slab or Curve Beam) ควรแบ่ง Shell Element ของโครงสร้างออกเป็น Shell Element เล็กๆ เพราะยิ่งแบ่ง Shell Element ในโครงสร้างเล็กเท่าไร ค่าคำตอบที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างก็จะถูกต้องมากขึ้น คำตอบจะลู่เข้าหาค่าที่ถูกต้อง หากแบ่ง Shell Element ออกเป็น Shell Element ขนาดใหญ่คำตอบก็จะผิดพลาดคือ คำตอบอาจจะลู่ออกจากค่าที่ถูกต้อง ทำให้คำตอบที่ได้ผิดพลาด

5.4 แนวทางการพัฒนาโครงการวิจัย

5.4.1 ควรศึกษาเพิ่ม Load Case ที่กระทำกับ โครงสร้างอีก ได้แก่ Prestress Load และ UBC Load เนื่องจากในมาตรฐานการออกแบบ โครงสร้างได้กำหนดให้คิดแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวรวมเข้าไปด้วย และในอนาคตก็จะต้องใช้ โครงสร้าง Prestress มากขึ้นเพราะ โครงสร้างจะต้องรับ Load มากขึ้นแต่ต้องการ โครงสร้างที่มีขนาดเล็กเพื่อความประหยัด

5.4.2 ควรจะศึกษาการใช้โปรแกรมในการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กและ โครงสร้างเหล็ก (Reinforced Concrete Design and Steel Design) เพิ่มเติม โดยดูแนวทางการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กได้จากภาคผนวก ส่วนการออกแบบ โครงสร้างผสม (Composite Structure) ก็ น่าสนใจเช่นเดียวกัน

5.4.3 ควรทำการตรวจสอบผลการออกแบบทุกครั้ง เพราะอาจจะป้อนข้อมูลบางค่าผิดพลาดหรือคลาดเคลื่อนไปได้ ซึ่งการตรวจสอบการออกแบบทำได้สะดวกไม่ยากนักเพราะ โปรแกรมได้มีการแสดงผลเป็นรูปภาพออกมา

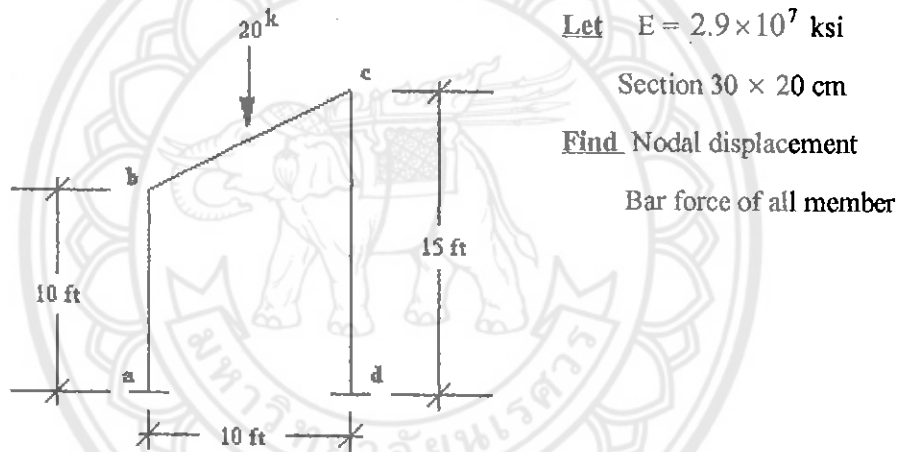
บรรณานุกรม

1. Mulhpadhyay , Madhujit. Structures Matrix and Finite Element . USA : A.A. Balkoma Publishers, 1993.
2. Meek , J.L. Computer Methods in Structural Analysis. Singapore : Fong & Sons Printers Pte . Ltd., 1991.
3. Sennett , Robert E. Metrix Analysis of Structures. New Jersey : Prentice-Hall,Inc. A Siimon & Schuster, 1994.
4. Yuan – Yu. Element Theory of Structures. Third Edition. New Jersey :Prentice-Hall,Inc. A Siimon & Schuster, 1988.
5. STAAD - III Reference Manual
6. STAAD - III Getting Start and Example Manual
7. เอกสารประกอบการสอนวิชา Structural Analysis II เรื่อง Direct Stiffness Method ของ
อาจารย์ สรัณกร เหมะวิบูลย์

ภาคผนวก ก.

ในภาคผนวกนี้จะการตรวจสอบผลการวิเคราะห์โครงสร้างในตัวอย่างที่ 1 ด้วยวิธี Direct Stiffness Method และใช้โปรแกรม MICROFEAP 1 จะได้แสดงการตรวจสอบผลการวิเคราะห์โครงสร้างในตัวอย่างที่ 2 ด้วยวิธี Check Static Equilibrium

Example 1.



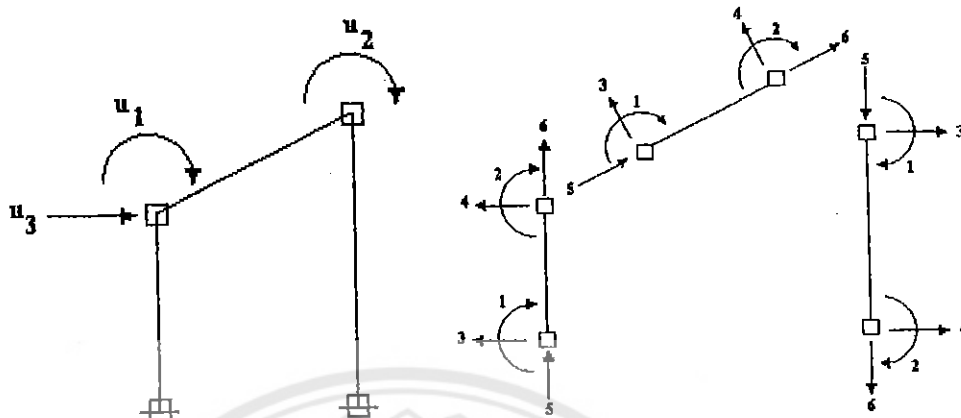
$$\text{Joint d.o.f} = 4 \times 3 = 12$$

$$\text{Constraints} = 3$$

$$\text{BC} = 3 \times 2 = 6$$

$${}^0KI = 3$$

Define member actions and u



Member	v_i		v_j		ID						Length (in.)
	x_1	y_1	x_2	y_2	1	2	3	4	5	6	
1	0	0	0	10	0	1	0	3	0	0	120
2	0	10	10	15	1	2	0	0	3	0	134.164
3	10	15	10	0	2	0	0	0	0	0	180

Displacement transformation matrix

$$a = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 0 & \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

Global stiffness matrix

$$\underset{\sim}{k}_{\text{global}} = \underset{\sim}{a}^T \underset{\sim}{k}_{\text{local}} \underset{\sim}{a}$$

$$k_{\sim local} = \begin{bmatrix} \frac{4EI}{L} & \frac{2EI}{L} & \frac{-6EI}{L^2} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & 0 \\ \frac{2EI}{L} & \frac{4EI}{L} & \frac{-6EI}{L^2} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & 0 \\ \frac{L}{-6EI} & \frac{L}{-6EI} & \frac{L^2}{12EI} & \frac{L^2}{12EI} & 0 & 0 \\ \frac{L^2}{6EI} & \frac{L^2}{6EI} & \frac{L^3}{12EI} & \frac{L^3}{12EI} & 0 & 0 \\ \frac{L^2}{6EI} & \frac{L^2}{6EI} & \frac{L^3}{12EI} & \frac{L^3}{12EI} & 0 & 0 \\ \frac{L^2}{6EI} & \frac{L^2}{6EI} & \frac{L^3}{12EI} & \frac{L^3}{12EI} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{AE}{L} & -\frac{AE}{L} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{AE}{L} & \frac{AE}{L} \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

Neglect axial deformation

$$\delta = 0 = \frac{PL}{AE}; P = 0$$

Member 1: $\cos \theta = 0$; $\sin \theta = 1$

$$a^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

$$k_{\sim local}^1 = EI \begin{bmatrix} 0.033 & 0.0167 & -0.000417 & 0.000417 & 0 & 0 \\ 0.0167 & 0.033 & -0.000417 & 0.000417 & 0 & 0 \\ -0.000417 & 0.000417 & 6.94 \times 10^{-6} & -6.94 \times 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0.000417 & 0.000417 & -6.94 \times 10^{-6} & 6.94 \times 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

$$k_{\sim global}^1 = EI \begin{bmatrix} 0.033 & 0.0167 & 0 & 0 & 0.000417 & -0.000417 \\ 0.0167 & 0.033 & 0 & 0 & 0.000417 & -0.000417 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.000417 & 0.000417 & 0 & 0 & 6.94 \times 10^{-6} & -6.94 \times 10^{-6} \\ -0.000417 & -0.000417 & 0 & 0 & -6.94 \times 10^{-6} & 6.94 \times 10^{-6} \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

Member 2 $\cos \theta = 0.894$; $\sin \theta = 0.447$

$$a^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.894 & 0 & -0.447 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.894 & 0 & -0.447 \\ 0 & 0 & 0.447 & 0 & 0.894 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.447 & 0 & 0.894 \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

$$k_{\sim local}^2 = EI \begin{bmatrix} 0.0298 & 0.0149 & -0.00033 & 0.00033 & 0 & 0 \\ 0.0149 & 0.0298 & -0.00033 & 0.00033 & 0 & 0 \\ -0.00033 & -0.00033 & 4.969 \times 10^{-6} & -4.969 \times 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0.00033 & 0.00033 & -4.969 \times 10^{-6} & 4.969 \times 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

$$k_{\sim global}^2 = EI \times 10^{-6} \begin{bmatrix} 29800 & 14900 & -295 & 295 & 147.5 & -147.5 \\ 14900 & 29800 & -295 & 295 & 147.5 & -147.5 \\ -295 & -295 & 3.971 & -3.971 & -1.985 & 1.985 \\ 295 & 295 & -3.971 & 3.971 & 1.985 & -1.985 \\ 147.5 & 147.5 & -1.985 & 1.985 & 0.9929 & -0.9929 \\ -147.5 & -147.5 & 1.985 & -1.985 & -0.9929 & 0.9929 \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

Member 3 $\cos\theta = 0$; $\sin\theta = -1$

$$\tilde{a}^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

$$k^3_{\sim local} = EI \begin{bmatrix} 0.022 & 0.011 & -1.852 \times 10^{-4} & 1.852 \times 10^{-4} & 0 & 0 \\ 0.011 & 0.022 & -1.852 \times 10^{-4} & 1.852 \times 10^{-4} & 0 & 0 \\ -1.852 \times 10^{-4} & -1.852 \times 10^{-4} & 2.06 \times 10^{-6} & -2.06 \times 10^{-6} & 0 & 0 \\ 1.852 \times 10^{-4} & 1.852 \times 10^{-4} & -2.06 \times 10^{-6} & 2.06 \times 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

$$k^3_{\sim global} = EI \begin{bmatrix} 0.022 & 0.011 & 0 & 0 & -1.852 \times 10^{-4} & 1.852 \times 10^{-4} \\ 0.011 & 0.022 & 0 & 0 & -1.852 \times 10^{-4} & 1.852 \times 10^{-4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.852 \times 10^{-4} & -1.852 \times 10^{-4} & 0 & 0 & 2.06 \times 10^{-6} & -2.06 \times 10^{-6} \\ 1.852 \times 10^{-4} & 1.852 \times 10^{-4} & 0 & 0 & -2.06 \times 10^{-6} & 2.06 \times 10^{-6} \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

System Global Stiffness Matrix

$$K = EI \begin{bmatrix} 0.033 + 0.0298 & 0.0149 & 1.475 \times 10^{-4} \\ 0.0149 & 0.0298 + 0.022 & 1.475 \times 10^{-4} \\ 1.475 \times 10^{-4} & 1.475 \times 10^{-4} & 9.929 \times 10^{-7} \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

$$K = EI \begin{bmatrix} 0.0628 & 0.0149 & 1.475 \times 10^{-4} \\ 0.0149 & 0.518 & 1.475 \times 10^{-4} \\ 1.475 \times 10^{-4} & 1.475 \times 10^{-4} & 9.929 \times 10^{-7} \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

Nodal displacement

$$\underline{P} = \underline{K} \underline{u}$$

$$\underline{u} = \underline{K}^{-1}_{global} \underline{P} = \underline{K}^{-1}_{global} \begin{Bmatrix} 300 \\ -300 \\ 0 \end{Bmatrix}_{3 \times 1}$$

$$\underline{u} = \frac{1}{EI} \begin{Bmatrix} -7830 \\ 7250 \\ 216830 \end{Bmatrix}_{3 \times 1}$$

Bar force

$$\underline{S} = \underline{k}_{local} \underline{a} \underline{u}$$

Member 1

$$\underline{S}^1 = \underline{k}_{local} \underline{a}^1 \underline{u}^1 = \underline{k}_{local} \underline{a}^1 \cdot \frac{1}{EI} \begin{Bmatrix} 0 \\ -7830 \\ 0 \\ 216630 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -41.4 \\ -173.06 \\ 1.79 \\ -1.79 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}_{6 \times 1}$$

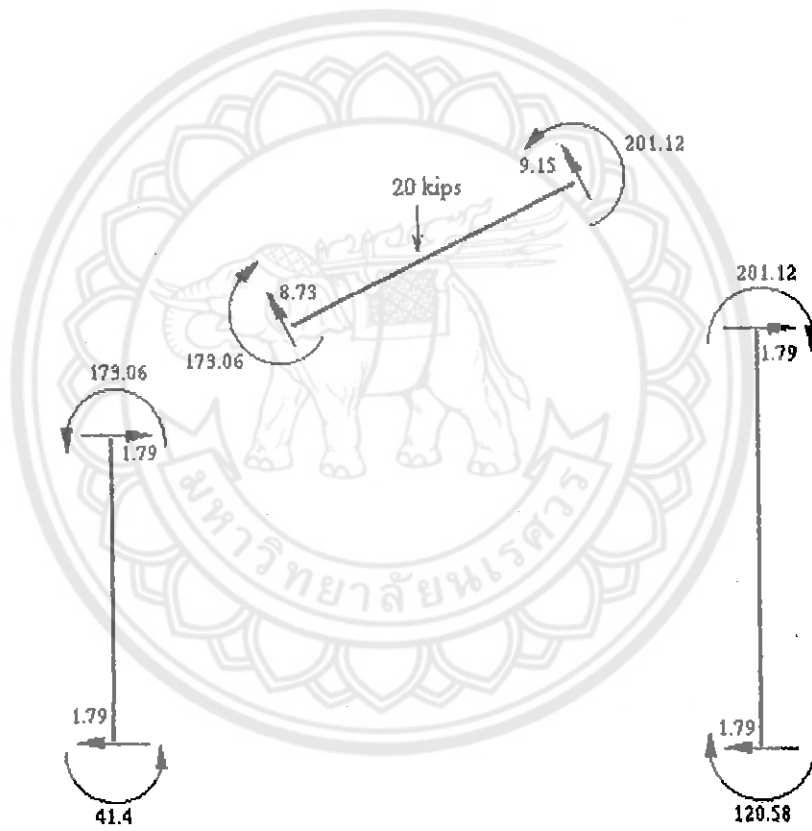
Member 2

$$\underline{S}^2 = \underline{k}_{local} \underline{a}^2 \underline{u}^2 = \underline{k}_{local} \underline{a}^2 \cdot \frac{1}{EI} \begin{Bmatrix} -7830 \\ 7250 \\ 0 \\ 0 \\ 216630 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -300 \\ 300 \\ 8.94 \\ 8.94 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 173.06 \\ -201.12 \\ 8.73 \\ 9.15 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}_{6 \times 1}$$

Member 3

$$S^3 = k_{local} a^3 u^3 = k_{local} a^3 \cdot \frac{1}{EI} \begin{Bmatrix} 7250 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 201.12 \\ 120.58 \\ 1.79 \\ -1.79 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}_{6 \times 1}$$

Result



ตารางแสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรม STAAD – III กับ
การวิเคราะห์ด้วยวิธี Direct Stiffness Method และ โปรแกรม MICROFEAP 1.

Member 1	Shear force (kips)		Axial force (kips)		Bending moment (kips-in.)	
	1	2	1	2	1	2
Direct Stiffness Method	1.79	-1.79	-	-	-41.4	-173.06
STAAD- III	1.78	-1.78	10.66	-10.66	-40.25	-172.80
MICROFEAP 1.	1.786	-1.786	10.66	-10.66	-41.2	-173.13
Difference	0.01	0.01	0	0	0.95	0.33
Member 2	Shear force (kips)		Axial force (kips)		Bending moment (kips-in.)	
	3	4	3	4	3	4
Direct Stiffness Method	1.79	-1.79	-	-	201.12	120.58
STAAD- III	1.78	-1.78	9.34	-9.34	200.21	119.38
MICROFEAP 1.	1.786	-1.786	9.338	-9.338	200.976	120.55
Difference	0.006	0.006	0.002	0.002	0.766	1.17
Member 3	Shear force (kips)		Axial force (kips)		Bending moment (kips-in.)	
	2	3	2	3	2	3
Direct Stiffness Method	8.73	9.15	-	-	173.06	-201.12
STAAD- III	8.74	9.15	6.36	2.59	172.80	-200.21
MICROFEAP 1.	8.736	9.15	6.36	2.578	173.13	-200.976
Difference	0.004	0.00	0.00	0.012	0.33	0.766

Design. Beam (Member 2)

$$R = 0.16 f'_c = 0.16 \times (280) = 44.8 \text{ ksc.}$$

$$f_y = 4000 \text{ ksc.}$$

$$f'_c = 280 \text{ ksc.}$$

Max. Moment at Member 2 (bc)

$$= 4768.547 \text{ kg. - m.}$$

$$M_n = Rbd^2$$

$$= (44.8) \times (0.20) \times (27^2)$$

$$= 6531.84 \text{ kg. - m.}$$

$$A_s = \frac{M}{f_y j d}$$

$$= \frac{4768.544}{(4,000) \times (0.89) \times (0.27)} = 4.961 \text{ cm}^2$$

Use 2- DB 20 ($A_s = 6.283 \text{ cm}^2$)

Check shear

$$V_c = 0.53 \sqrt{f'_c} b_w d$$

$$= 0.53 \sqrt{280} \times (20) \times (27) = 4789.042 \text{ kg.}$$

$$V_u = 4154.1 \text{ kg.}$$

$$V_n = \frac{V_u}{\phi} = \frac{4154.1}{0.85} = 4887.176 \text{ kg.}$$

$$V_s = V_n - V_c$$

$$= 4887.176 - 4789.042 = 98.134 \text{ kg.}$$

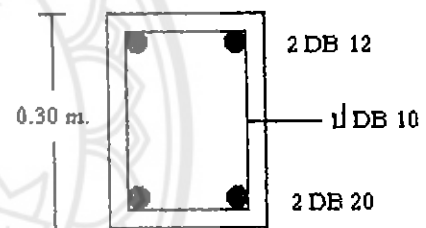
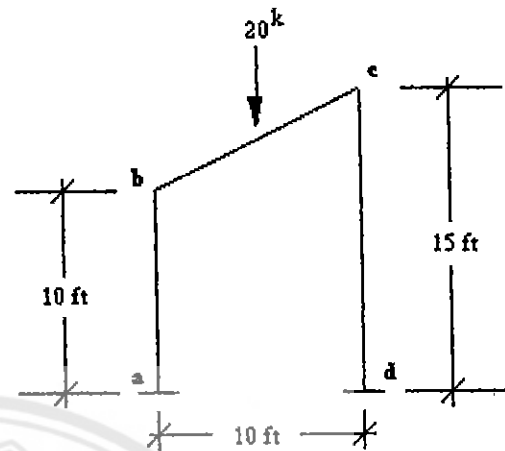
From STAAD-3 program

$$V_c = 41.25 \text{ kNs}$$

$$V_u = 40.69 \text{ kNs}$$

$$V_s = 6.62 \text{ kNs}$$

เนื่องจากเวลาในการทำโครงการมีจำกัด จึงได้แสดงวิธีตรวจสอบ เฉพาะตัวอย่างที่ 1 และตัวอย่างที่ 2 เท่านั้น ซึ่งจากการใช้โปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างต่าง ๆ จะเห็นว่าเมื่อตรวจสอบแล้วผลที่ได้มีความถูกต้องซึ่งไม่ได้แสดงการคำนวณ ณ. ที่นี้



จากตัวอย่างที่ 1 จะเห็นว่า ผลการวิเคราะห์โครงสร้างที่ได้ทั้งจากการใช้วิธี Direct Stiffness Method และจากการใช้โปรแกรม STAAD - III และการใช้โปรแกรม MICROFEAP 1 จะมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากในการใช้วิธี Direct Stiffness Method ไม่ได้คิดผลเนื่องจาก Axial deformation ซึ่งถ้ารวมผลของ Axial Deformation ด้วยผลที่ได้จะออกมาเท่ากัน

สำหรับในตัวอย่างที่ 2 ได้แสดงการ Check Static Equilibrium ของโครงสร้าง จะเห็นว่า แรงกระทำมีค่าเท่ากับ Support Reaction และผลรวมโมเมนต์ $\sum M$ รอบจุดใด ๆ มีค่าเป็นศูนย์ จึงมั่นใจได้ว่าคำตอบที่ได้มีความถูกต้องดังแสดงในตารางข้างล่าง (ไม่คิด Self weight ของโครงสร้าง)

ดังนั้นจึงทราบได้ว่าผู้ใช้โปรแกรมทำการป้อนข้อมูลได้อย่างถูกต้อง

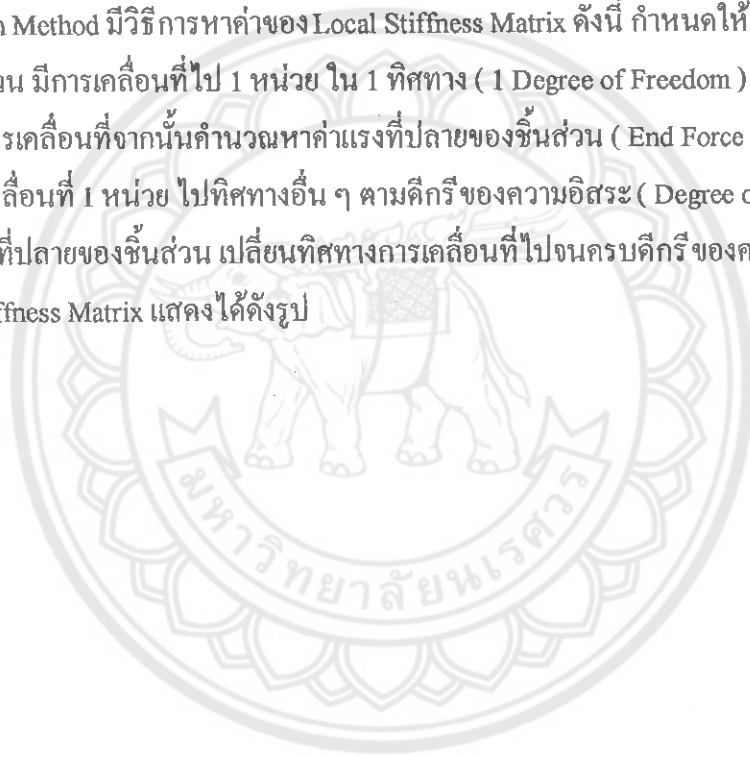
Actual Load (kg - meter)					
$\sum F_x$		$\sum F_y$		$\sum M_z$	
				Node 14	Node 16
0		-6541.25		152.35	-152.35
Structural Analysis (kg - meter)					
F_x		F_y		M_z	
Node 14	Node 16	Node 14	Node 16	Node 14	Node 16
-167.34	167.34	3271.16	3271.15	153.51	-153.51
$\sum F_x$		$\sum F_y$		$\sum M_z$	
				Node 14	Node 16
0		6542.31		153.51	-153.51
Difference					
$\sum F_x$		$\sum F_y$		$\sum M_z$	
				Node 14	Node 16
0		1.06		1.16	1.16

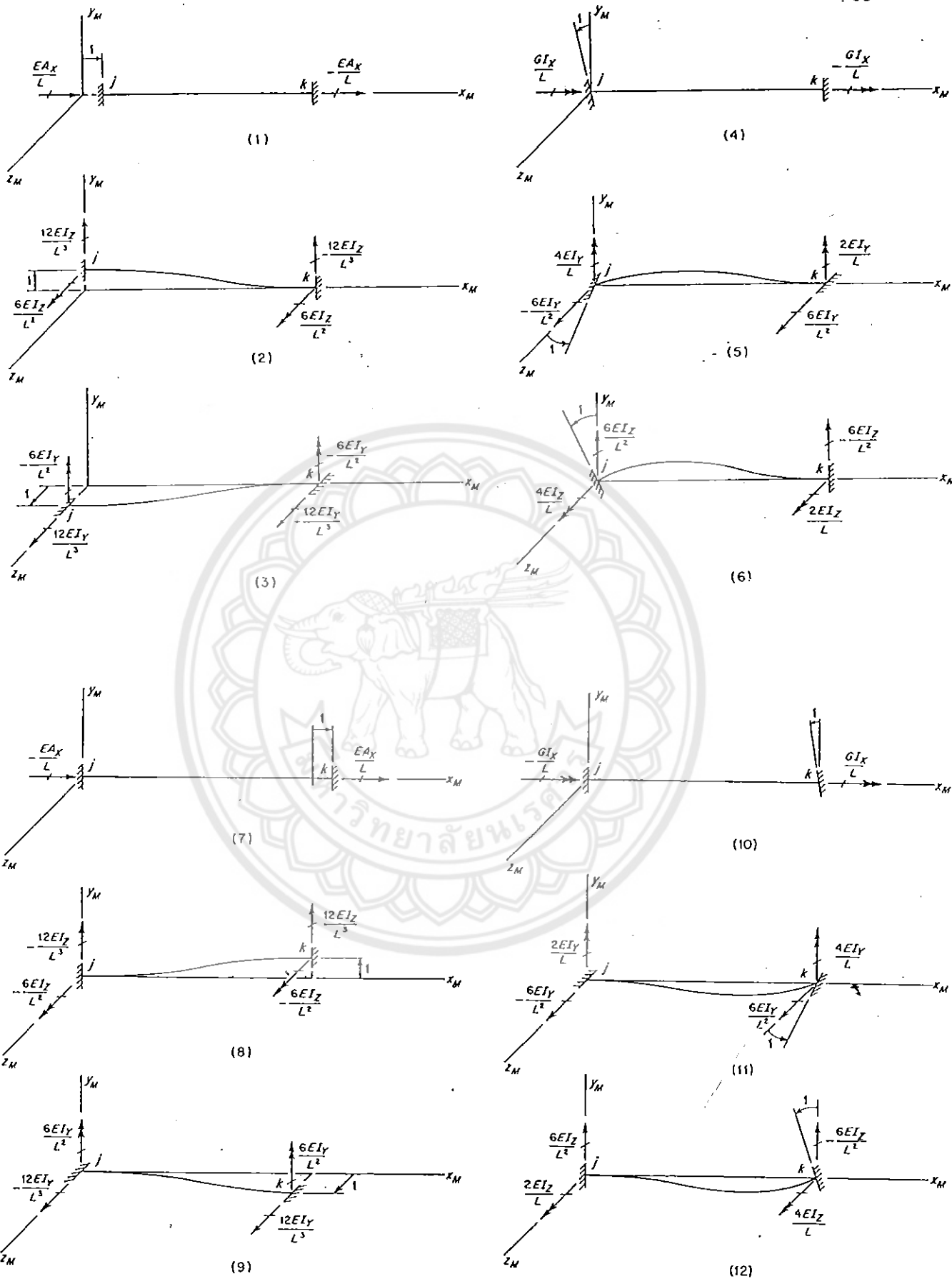
ภาคผนวก ข.

การหาสติเฟนสเมตริกซ์ในระบบโคออร์ดิเนตประจำตัว

(Stiffness Matrix in Local Coordinate)

ในการหาค่า Local Stiffness Matrix จะใช้วิธีการวิเคราะห์โครงสร้าง เช่น วิธี Slope Deflection Method มีวิธีการหาค่าของ Local Stiffness Matrix ดังนี้ กำหนดให้ Node ใด Node หนึ่ง ของชิ้นส่วน มีการเคลื่อนที่ไป 1 หน่วย ใน 1 ทิศทาง (1 Degree of Freedom) ส่วน Node ที่เหลือ ไม่ให้มีการเคลื่อนที่จากนั้นคำนวณหาค่าแรงที่ปลายของชิ้นส่วน (End Force) ต่อ ไปก็เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ 1 หน่วย ไปทิศทางอื่น ๆ ตามคี่กรีของความอิสระ (Degree of Freedom) ทำการหาค่าแรงที่ปลายของชิ้นส่วน เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ไปจนครบคี่กรีของความอิสระ ก็จะได้ Local Stiffness Matrix แสดงได้ดังรูป





รูป แสดงการหาค่าสติฟเนสเมตริกซ์ในระบบ โคออร์ดิเนตประจำตัวของชิ้นส่วน
 (Stiffness Matrix in Local Coordinate) ที่ Degree of Freedom ต่าง ๆ

ภาคผนวก ก.

Global Stiffness Matrix of Space frame

กำหนดให้	A	หมายถึง	พื้นที่หน้าตัด
	Iz , Iy	หมายถึง	โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัด
	E	หมายถึง	ค่าโมดูลัสของชิ้นส่วน
	J	หมายถึง	โมเมนต์อินเนอร์เซียของการบิด
	L	หมายถึง	ความยาวของชิ้นส่วน
	G	หมายถึง	โมดูลัสของแรงเฉือน
	B	หมายถึง	มุมอ้างอิงของชิ้นส่วน
	cx , cy , cz	หมายถึง	โคซายน์ทิศทาง (Direction Cosine)
	\bar{k}_{ij}	หมายถึง	สมาชิกในแถวที่ i หลัที่ j ของสติฟเนสเมตริกซ์

ในระบบ โคออร์ดิเนต โกลบอล โดยที่ $\bar{k}_{ij} = \bar{k}_{ji}$

จะได้สติฟเนสเมตริกซ์ของโครงข้อแข็ง 3 มิติในระบบ โคออร์ดิเนต โกลบอลคือ

1"-----Row-S-----"

$$\bar{k}_{11} = (A*cx^2*E)/L + (12.*E*Iy*(-1.*cz*Cos[B] + cx*cy*Sin[B])^2)/((cx^2 + cz^2)*L^3) + (12.*E*Iz*(cx*cy*Cos[B] + cz*Sin[B])^2)/((cx^2 + cz^2)*L^3)$$

$$\bar{k}_{12} = (A*cx*cy*E)/L + (12.*E*Iy*Sin[B]*(cz*Cos[B] - 1.*cx*cy*Sin[B]))/L^3 - (12.*E*Iz*Cos[B]*(cx*cy*Cos[B] + cz*Sin[B]))/L^3$$

$$\bar{k}_{13} = (A*cx*cz*E)/L + (12.*E*Iz*(cy*cz*Cos[B] - 1.*cx*Sin[B])*(cx*cy*Cos[B] + cz*Sin[B]))/((cx^2 + cz^2)*L^3) + (12.*E*Iy*(-1.*cz*Cos[B] + cx*cy*Sin[B])*(cx*Cos[B] + cy*cz*Sin[B]))/((cx^2 + cz^2)*L^3)$$

$$\bar{k}_{14} = (3 \cdot E \cdot (I_y - 1 \cdot I_z) \cdot (-2 \cdot c_x \cdot c_y \cdot c_z \cdot \cos[2 \cdot B] + c_x^2 \cdot c_y^2 \cdot \sin[2 \cdot B] - 1 \cdot c_z^2 \cdot \sin[2 \cdot B])) / ((c_x^2 + c_z^2) \cdot L^2)$$

$$\bar{k}_{15} = (3 \cdot E \cdot (c_z \cdot I_y + c_z \cdot I_z + c_z \cdot I_y \cdot \cos[2 \cdot B] - 1 \cdot c_z \cdot I_z \cdot \cos[2 \cdot B] - 1 \cdot c_x \cdot c_y \cdot I_y \cdot \sin[2 \cdot B] + c_x \cdot c_y \cdot I_z \cdot \sin[2 \cdot B])) / L^2$$

$$\bar{k}_{16} = (6 \cdot E \cdot I_y \cdot (-1 \cdot c_y \cdot c_z \cdot \cos[B] + c_x \cdot \sin[B]) \cdot (c_z \cdot \cos[B] - 1 \cdot c_x \cdot c_y \cdot \sin[B])) / ((c_x^2 + c_z^2) \cdot L^2) - (6 \cdot E \cdot I_z \cdot (c_x \cdot c_y \cdot \cos[B] + c_z \cdot \sin[B]) \cdot (c_x \cdot \cos[B] + c_y \cdot c_z \cdot \sin[B])) / ((c_x^2 + c_z^2) \cdot L^2)$$

$$\bar{k}_{17} = (-1 \cdot A \cdot c_x^2 \cdot E) / L - (12 \cdot E \cdot I_y \cdot (-1 \cdot c_z \cdot \cos[B] + c_x \cdot c_y \cdot \sin[B])^2) / ((c_x^2 + c_z^2) \cdot L^3) - (12 \cdot E \cdot I_z \cdot (c_x \cdot c_y \cdot \cos[B] + c_z \cdot \sin[B])^2) / ((c_x^2 + c_z^2) \cdot L^3)$$

$$\bar{k}_{18} = (E \cdot (6 \cdot c_x \cdot c_y \cdot I_y + 6 \cdot c_x \cdot c_y \cdot I_z - 1 \cdot A \cdot c_x \cdot c_y \cdot L^2 - 6 \cdot c_x \cdot c_y \cdot I_y \cdot \cos[2 \cdot B] + 6 \cdot c_x \cdot c_y \cdot I_z \cdot \cos[2 \cdot B] - 6 \cdot c_z \cdot I_y \cdot \sin[2 \cdot B] + 6 \cdot c_z \cdot I_z \cdot \sin[2 \cdot B])) / L^3$$

$$\bar{k}_{19} = (-1 \cdot A \cdot c_x \cdot c_z \cdot E) / L + (12 \cdot E \cdot I_z \cdot (-1 \cdot c_y \cdot c_z \cdot \cos[B] + c_x \cdot \sin[B]) \cdot (c_x \cdot c_y \cdot \cos[B] + c_z \cdot \sin[B])) / ((c_x^2 + c_z^2) \cdot L^3) + (12 \cdot E \cdot I_y \cdot (c_z \cdot \cos[B] - 1 \cdot c_x \cdot c_y \cdot \sin[B]) \cdot (c_x \cdot \cos[B] + c_y \cdot c_z \cdot \sin[B])) / ((c_x^2 + c_z^2) \cdot L^3)$$

$$\bar{k}_{1,10} = (3 \cdot E \cdot (I_y - 1 \cdot I_z) \cdot (-2 \cdot c_x \cdot c_y \cdot c_z \cdot \cos[2 \cdot B] + c_x^2 \cdot c_y^2 \cdot \sin[2 \cdot B] - 1 \cdot c_z^2 \cdot \sin[2 \cdot B])) / ((c_x^2 + c_z^2) \cdot L^2)$$

$$\bar{k}_{1,11} = (3 \cdot E \cdot (c_z \cdot I_y + c_z \cdot I_z + c_z \cdot I_y \cdot \cos[2 \cdot B] - 1 \cdot c_z \cdot I_z \cdot \cos[2 \cdot B] - 1 \cdot c_x \cdot c_y \cdot I_y \cdot \sin[2 \cdot B] + c_x \cdot c_y \cdot I_z \cdot \sin[2 \cdot B])) / L^2$$

$$\bar{k}_{1,12} = (6.*E*Iy*(-1.*cy*cz*Cos[B] + cx*Sin[B])*(cz*Cos[B] - 1.*cx*cy*Sin[B]))/$$

$$((cx^2 + cz^2)*L^2) - (6.*E*Iz*(cx*cy*Cos[B] + cz*Sin[B])*$$

$$(cx*Cos[B] + cy*cz*Sin[B]))/((cx^2 + cz^2)*L^2)$$

2"-----Row-S-----"

$$\bar{k}_{22} = (A*cy^2*E)/L + (12.*(cx^2 + cz^2)*E*Iz*Cos[B]^2)/L^3 +$$

$$(12.*(cx^2 + cz^2)*E*Iy*Sin[B]^2)/L^3$$

$$\bar{k}_{23} = (E*(-6.*cy*cz*Iy - 6.*cy*cz*Iz + A*cy*cz*L^2 + 6.*cy*cz*Iy*Cos[2.*B] -$$

$$6.*cy*cz*Iz*Cos[2.*B] - 6.*cx*Iy*Sin[2.*B] + 6.*cx*Iz*Sin[2.*B]))/L^3$$

$$\bar{k}_{24} = (3.*E*(-1.*cz*Iy - 1.*cz*Iz + cz*Iy*Cos[2.*B] - 1.*cz*Iz*Cos[2.*B] -$$

$$1.*cx*cy*Iy*Sin[2.*B] + cx*cy*Iz*Sin[2.*B]))/L^2$$

$$\bar{k}_{25} = (3.*(cx^2 + cz^2)*E*(Iy - 1.*Iz)*Sin[2.*B])/L^2$$

$$\bar{k}_{26} = (3.*E*(cx*Iy + cx*Iz - 1.*cx*Iy*Cos[2.*B] + cx*Iz*Cos[2.*B] -$$

$$1.*cy*cz*Iy*Sin[2.*B] + cy*cz*Iz*Sin[2.*B]))/L^2$$

$$\bar{k}_{27} = (E*(6.*cx*cy*Iy + 6.*cx*cy*Iz - 1.*A*cx*cy*L^2 - 6.*cx*cy*Iy*Cos[2.*B] +$$

$$6.*cx*cy*Iz*Cos[2.*B] - 6.*cz*Iy*Sin[2.*B] + 6.*cz*Iz*Sin[2.*B]))/L^3$$

$$\bar{k}_{28} = (-1.*A*cy^2*E)/L - (12.*(cx^2 + cz^2)*E*Iz*Cos[B]^2)/L^3 -$$

$$(12.*(cx^2 + cz^2)*E*Iy*Sin[B]^2)/L^3$$

$$\bar{k}_{29} = (E*(6.*cy*cz*Iy + 6.*cy*cz*Iz - 1.*A*cy*cz*L^2 - 6.*cy*cz*Iy*Cos[2.*B] +$$

$$6.*cy*cz*Iz*Cos[2.*B] + 6.*cx*Iy*Sin[2.*B] - 6.*cx*Iz*Sin[2.*B]))/L^3$$

$$\bar{k}_{2,10} = (3 \cdot E \cdot (-1 \cdot cz \cdot Iy - 1 \cdot cz \cdot Iz + cz \cdot Iy \cdot \cos[2 \cdot B] - 1 \cdot cz \cdot Iz \cdot \cos[2 \cdot B] - 1 \cdot cx \cdot cy \cdot Iy \cdot \sin[2 \cdot B] + cx \cdot cy \cdot Iz \cdot \sin[2 \cdot B])) / L^2$$

$$\bar{k}_{2,11} = (3 \cdot (cx^2 + cz^2) \cdot E \cdot (Iy - 1 \cdot Iz) \cdot \sin[2 \cdot B]) / L^2$$

$$\bar{k}_{2,12} = (3 \cdot E \cdot (cx \cdot Iy + cx \cdot Iz - 1 \cdot cx \cdot Iy \cdot \cos[2 \cdot B] + cx \cdot Iz \cdot \cos[2 \cdot B] - 1 \cdot cy \cdot cz \cdot Iy \cdot \sin[2 \cdot B] + cy \cdot cz \cdot Iz \cdot \sin[2 \cdot B])) / L^2$$

3"-----Row-S-----"

$$\bar{k}_{33} = (A \cdot cz^2 \cdot E) / L + (12 \cdot E \cdot Iz \cdot (-1 \cdot cy \cdot cz \cdot \cos[B] + cx \cdot \sin[B])^2) / ((cx^2 + cz^2) \cdot L^3) + (12 \cdot E \cdot Iy \cdot (cx \cdot \cos[B] + cy \cdot cz \cdot \sin[B])^2) / ((cx^2 + cz^2) \cdot L^3)$$

$$\bar{k}_{34} = (6 \cdot E \cdot Iz \cdot (-1 \cdot cy \cdot cz \cdot \cos[B] + cx \cdot \sin[B]) \cdot (-1 \cdot cz \cdot \cos[B] + cx \cdot cy \cdot \sin[B])) / ((cx^2 + cz^2) \cdot L^2) + (6 \cdot E \cdot Iy \cdot (cx \cdot cy \cdot \cos[B] + cz \cdot \sin[B]) \cdot (cx \cdot \cos[B] + cy \cdot cz \cdot \sin[B])) / ((cx^2 + cz^2) \cdot L^2)$$

$$\bar{k}_{35} = (3 \cdot E \cdot (-1 \cdot cx \cdot Iy - 1 \cdot cx \cdot Iz - 1 \cdot cx \cdot Iy \cdot \cos[2 \cdot B] + cx \cdot Iz \cdot \cos[2 \cdot B] - 1 \cdot cy \cdot cz \cdot Iy \cdot \sin[2 \cdot B] + cy \cdot cz \cdot Iz \cdot \sin[2 \cdot B])) / L^2$$

$$\bar{k}_{36} = (3 \cdot E \cdot (Iy - 1 \cdot Iz) \cdot (2 \cdot cx \cdot cy \cdot cz \cdot \cos[2 \cdot B] - 1 \cdot cx^2 \cdot \sin[2 \cdot B] + cy^2 \cdot cz^2 \cdot \sin[2 \cdot B])) / ((cx^2 + cz^2) \cdot L^2)$$

$$\bar{k}_{37} = (-1 \cdot A \cdot cx \cdot cz \cdot E) / L - (12 \cdot E \cdot Iz \cdot (cy \cdot cz \cdot \cos[B] - 1 \cdot cx \cdot \sin[B]) \cdot (cx \cdot cy \cdot \cos[B] + cz \cdot \sin[B])) / ((cx^2 + cz^2) \cdot L^3) + (12 \cdot E \cdot Iy \cdot (cz \cdot \cos[B] - 1 \cdot cx \cdot cy \cdot \sin[B]) \cdot (cx \cdot \cos[B] + cy \cdot cz \cdot \sin[B])) / ((cx^2 + cz^2) \cdot L^3)$$

$$\bar{k}_{38} = (E \cdot (6 \cdot cy \cdot cz \cdot Iy + 6 \cdot cy \cdot cz \cdot Iz - 1 \cdot A \cdot cy \cdot cz \cdot L^2 - 6 \cdot cy \cdot cz \cdot Iy \cdot \cos[2 \cdot B] + 6 \cdot cy \cdot cz \cdot Iz \cdot \cos[2 \cdot B] + 6 \cdot cx \cdot Iy \cdot \sin[2 \cdot B] - 6 \cdot cx \cdot Iz \cdot \sin[2 \cdot B])) / L^3$$

$$\bar{k}_{39} = (-1.*A*cz^2*E)/L - (12.*E*Iz*(-1.*cy*cz*\text{Cos}[B] + cx*\text{Sin}[B])^2)/$$

$$((cx^2 + cz^2)*L^3) - (12.*E*Iy*(cx*\text{Cos}[B] + cy*cz*\text{Sin}[B])^2)/$$

$$((cx^2 + cz^2)*L^3)$$

$$\bar{k}_{3,10} = (6.*E*Iz*(-1.*cy*cz*\text{Cos}[B] + cx*\text{Sin}[B])*(-1.*cz*\text{Cos}[B] + cx*cy*\text{Sin}[B]))/$$

$$((cx^2 + cz^2)*L^2) + (6.*E*Iy*(cx*cy*\text{Cos}[B] + cz*\text{Sin}[B])*$$

$$(cx*\text{Cos}[B] + cy*cz*\text{Sin}[B]))/((cx^2 + cz^2)*L^2)$$

$$\bar{k}_{3,11} = (3.*E*(-1.*cx*Iy - 1.*cx*Iz - 1.*cx*Iy*\text{Cos}[2.*B] + cx*Iz*\text{Cos}[2.*B] -$$

$$1.*cy*cz*Iy*\text{Sin}[2.*B] + cy*cz*Iz*\text{Sin}[2.*B]))/L^2$$

$$\bar{k}_{3,12} = (3.*E*(Iy - 1.*Iz)*(2.*cx*cy*cz*\text{Cos}[2.*B] - 1.*cx^2*\text{Sin}[2.*B] +$$

$$cy^2*cz^2*\text{Sin}[2.*B]))/((cx^2 + cz^2)*L^2)$$

4"-----Row-S-----"

$$\bar{k}_{44} = (cx^2*G*J)/L + (4.*E*Iz*(-1.*cz*\text{Cos}[B] + cx*cy*\text{Sin}[B])^2)/$$

$$(cx^2*L + cz^2*L) + (4.*E*Iy*(cx*cy*\text{Cos}[B] + cz*\text{Sin}[B])^2)/$$

$$(cx^2*L + cz^2*L)$$

$$\bar{k}_{45} = (cx*cy*G*J)/L + (4.*E*Iz*\text{Sin}[B]*(cz*\text{Cos}[B] - 1.*cx*cy*\text{Sin}[B]))/L -$$

$$(4.*E*Iy*\text{Cos}[B]*(cx*cy*\text{Cos}[B] + cz*\text{Sin}[B]))/L$$

$$\bar{k}_{46} = (cx*cz*G*J)/L + (4.*E*Iy*(cy*cz*\text{Cos}[B] - 1.*cx*\text{Sin}[B])*$$

$$(cx*cy*\text{Cos}[B] + cz*\text{Sin}[B]))/(cx^2*L + cz^2*L) +$$

$$(4.*E*Iz*(-1.*cz*\text{Cos}[B] + cx*cy*\text{Sin}[B])*(cx*\text{Cos}[B] + cy*cz*\text{Sin}[B]))/$$

$$(cx^2*L + cz^2*L)$$

$$\bar{k}_{47} = (3.*E*(-1.*Iy + Iz)*(2.*cx*cy*cz*\text{Cos}[2.*B] - 1.*cx^2*cy^2*\text{Sin}[2.*B] +$$

$$cz^2*\text{Sin}[2.*B]))/((cx^2 + cz^2)*L^2)$$

$$\bar{k}_{48} = (3 \cdot E \cdot (-1 \cdot cz \cdot I_y - 1 \cdot cz \cdot I_z + cz \cdot I_y \cdot \cos[2 \cdot B] - 1 \cdot cz \cdot I_z \cdot \cos[2 \cdot B] - 1 \cdot cx \cdot cy \cdot I_y \cdot \sin[2 \cdot B] + cx \cdot cy \cdot I_z \cdot \sin[2 \cdot B])) / L^2$$

$$\bar{k}_{49} = (6 \cdot E \cdot I_z \cdot (-1 \cdot cy \cdot cz \cdot \cos[B] + cx \cdot \sin[B]) \cdot (-1 \cdot cz \cdot \cos[B] + cx \cdot cy \cdot \sin[B])) / ((cx^2 + cz^2) \cdot L^2) + (6 \cdot E \cdot I_y \cdot (cx \cdot cy \cdot \cos[B] + cz \cdot \sin[B]) \cdot (cx \cdot \cos[B] + cy \cdot cz \cdot \sin[B])) / ((cx^2 + cz^2) \cdot L^2)$$

$$\bar{k}_{4,10} = (-1 \cdot cx^2 \cdot G \cdot J) / L + (2 \cdot E \cdot I_z \cdot (-1 \cdot cz \cdot \cos[B] + cx \cdot cy \cdot \sin[B])^2) / (cx^2 \cdot L + cz^2 \cdot L) + (2 \cdot E \cdot I_y \cdot (cx \cdot cy \cdot \cos[B] + cz \cdot \sin[B])^2) / (cx^2 \cdot L + cz^2 \cdot L)$$

$$\bar{k}_{4,11} = (-1 \cdot cx \cdot cy \cdot G \cdot J) / L + (2 \cdot E \cdot I_z \cdot \sin[B] \cdot (cz \cdot \cos[B] - 1 \cdot cx \cdot cy \cdot \sin[B])) / L - (2 \cdot E \cdot I_y \cdot \cos[B] \cdot (cx \cdot cy \cdot \cos[B] + cz \cdot \sin[B])) / L$$

$$\bar{k}_{4,12} = (-1 \cdot cx \cdot cz \cdot G \cdot J) / L + (2 \cdot E \cdot I_y \cdot (cy \cdot cz \cdot \cos[B] - 1 \cdot cx \cdot \sin[B]) \cdot (cx \cdot cy \cdot \cos[B] + cz \cdot \sin[B])) / (cx^2 \cdot L + cz^2 \cdot L) + (2 \cdot E \cdot I_z \cdot (-1 \cdot cz \cdot \cos[B] + cx \cdot cy \cdot \sin[B]) \cdot (cx \cdot \cos[B] + cy \cdot cz \cdot \sin[B])) / (cx^2 \cdot L + cz^2 \cdot L)$$

5"-----Row-S-----"

$$\bar{k}_{55} = (cy^2 \cdot G \cdot J) / L + (4 \cdot (cx^2 + cz^2) \cdot E \cdot I_y \cdot \cos[B]^2) / L + (4 \cdot (cx^2 + cz^2) \cdot E \cdot I_z \cdot \sin[B]^2) / L$$

$$\bar{k}_{56} = (cy \cdot cz \cdot G \cdot J) / L + (4 \cdot E \cdot I_y \cdot \cos[B] \cdot (-1 \cdot cy \cdot cz \cdot \cos[B] + cx \cdot \sin[B])) / L - (4 \cdot E \cdot I_z \cdot \sin[B] \cdot (cx \cdot \cos[B] + cy \cdot cz \cdot \sin[B])) / L$$

$$\bar{k}_{57} = (3 \cdot E \cdot (cz \cdot I_y + cz \cdot I_z + cz \cdot I_y \cdot \cos[2 \cdot B] - 1 \cdot cz \cdot I_z \cdot \cos[2 \cdot B] - 1 \cdot cx \cdot cy \cdot I_y \cdot \sin[2 \cdot B] + cx \cdot cy \cdot I_z \cdot \sin[2 \cdot B])) / L^2$$

$$\bar{k}_{58} = (3 \cdot (cx^2 + cz^2) \cdot E \cdot (Iy - 1 \cdot Iz) \cdot \sin[2 \cdot B]) / L^2$$

$$\bar{k}_{59} = (3 \cdot E \cdot (-1 \cdot cx \cdot Iy - 1 \cdot cx \cdot Iz - 1 \cdot cx \cdot Iy \cdot \cos[2 \cdot B] + cx \cdot Iz \cdot \cos[2 \cdot B] - 1 \cdot cy \cdot cz \cdot Iy \cdot \sin[2 \cdot B] + cy \cdot cz \cdot Iz \cdot \sin[2 \cdot B])) / L^2$$

$$\bar{k}_{5,10} = (-1 \cdot cx \cdot cy \cdot G \cdot J) / L + (2 \cdot E \cdot Iz \cdot \sin[B] \cdot (cz \cdot \cos[B] - 1 \cdot cx \cdot cy \cdot \sin[B])) / L - (2 \cdot E \cdot Iy \cdot \cos[B] \cdot (cx \cdot cy \cdot \cos[B] + cz \cdot \sin[B])) / L$$

$$\bar{k}_{5,11} = (-1 \cdot cy^2 \cdot G \cdot J) / L + (2 \cdot (cx^2 + cz^2) \cdot E \cdot Iy \cdot \cos[B]^2) / L + (2 \cdot (cx^2 + cz^2) \cdot E \cdot Iz \cdot \sin[B]^2) / L$$

$$\bar{k}_{5,12} = (-1 \cdot cy \cdot cz \cdot G \cdot J) / L + (2 \cdot E \cdot Iy \cdot \cos[B] \cdot (-1 \cdot cy \cdot cz \cdot \cos[B] + cx \cdot \sin[B])) / L - (2 \cdot E \cdot Iz \cdot \sin[B] \cdot (cx \cdot \cos[B] + cy \cdot cz \cdot \sin[B])) / L$$

6"-----Row-S-----"

$$\bar{k}_{66} = (cz^2 \cdot G \cdot J) / L + (4 \cdot E \cdot Iy \cdot (-1 \cdot cy \cdot cz \cdot \cos[B] + cx \cdot \sin[B])^2) / (cx^2 \cdot L + cz^2 \cdot L) + (4 \cdot E \cdot Iz \cdot (cx \cdot \cos[B] + cy \cdot cz \cdot \sin[B])^2) / (cx^2 \cdot L + cz^2 \cdot L)$$

$$\bar{k}_{67} = (6 \cdot E \cdot Iy \cdot (cy \cdot cz \cdot \cos[B] - 1 \cdot cx \cdot \sin[B]) \cdot (-1 \cdot cz \cdot \cos[B] + cx \cdot cy \cdot \sin[B])) / ((cx^2 + cz^2) \cdot L^2) - (6 \cdot E \cdot Iz \cdot (cx \cdot cy \cdot \cos[B] + cz \cdot \sin[B]) \cdot (cx \cdot \cos[B] + cy \cdot cz \cdot \sin[B])) / ((cx^2 + cz^2) \cdot L^2)$$

$$\bar{k}_{68} = (3 \cdot E \cdot (cx \cdot Iy + cx \cdot Iz - 1 \cdot cx \cdot Iy \cdot \cos[2 \cdot B] + cx \cdot Iz \cdot \cos[2 \cdot B] - 1 \cdot cy \cdot cz \cdot Iy \cdot \sin[2 \cdot B] + cy \cdot cz \cdot Iz \cdot \sin[2 \cdot B])) / L^2$$

$$\bar{k}_{69} = (3 \cdot E \cdot (Iy - 1 \cdot Iz) \cdot (2 \cdot cx \cdot cy \cdot cz \cdot \cos[2 \cdot B] - 1 \cdot cx^2 \cdot \sin[2 \cdot B] + cy^2 \cdot cz^2 \cdot \sin[2 \cdot B])) / ((cx^2 + cz^2) \cdot L^2)$$

$$\begin{aligned}\bar{k}_{6,10} = & (-1.*cx*cz*G*J)/L + (2.*E*Iy*(cy*cz*\text{Cos}[B] - 1.*cx*\text{Sin}[B])* \\ & (cx*cy*\text{Cos}[B] + cz*\text{Sin}[B]))/(cx^2*L + cz^2*L) + \\ & (2.*E*Iz*(-1.*cz*\text{Cos}[B] + cx*cy*\text{Sin}[B])*(cx*\text{Cos}[B] + cy*cz*\text{Sin}[B]))/ \\ & (cx^2*L + cz^2*L)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{k}_{6,11} = & (-1.*cy*cz*G*J)/L + (2.*E*Iy*\text{Cos}[B]*(-1.*cy*cz*\text{Cos}[B] + cx*\text{Sin}[B]))/L - \\ & (2.*E*Iz*\text{Sin}[B]*(cx*\text{Cos}[B] + cy*cz*\text{Sin}[B]))/L\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{k}_{6,12} = & (-1.*cz^2*G*J)/L + (2.*E*Iy*(-1.*cy*cz*\text{Cos}[B] + cx*\text{Sin}[B])^2)/ \\ & (cx^2*L + cz^2*L) + (2.*E*Iz*(cx*\text{Cos}[B] + cy*cz*\text{Sin}[B])^2)/ \\ & (cx^2*L + cz^2*L)\end{aligned}$$

7"-----Row-S-----"

$$\begin{aligned}\bar{k}_{77} = & (A*cx^2*E)/L + (12.*E*Iy*(-1.*cz*\text{Cos}[B] + cx*cy*\text{Sin}[B])^2)/ \\ & ((cx^2 + cz^2)*L^3) + (12.*E*Iz*(cx*cy*\text{Cos}[B] + cz*\text{Sin}[B])^2)/ \\ & ((cx^2 + cz^2)*L^3)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{k}_{78} = & (A*cx*cy*E)/L + (12.*E*Iy*\text{Sin}[B]*(cz*\text{Cos}[B] - 1.*cx*cy*\text{Sin}[B]))/L^3 - \\ & (12.*E*Iz*\text{Cos}[B]*(cx*cy*\text{Cos}[B] + cz*\text{Sin}[B]))/L^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{k}_{79} = & (A*cx*cz*E)/L + (12.*E*Iz*(cy*cz*\text{Cos}[B] - 1.*cx*\text{Sin}[B])* \\ & (cx*cy*\text{Cos}[B] + cz*\text{Sin}[B]))/((cx^2 + cz^2)*L^3) + \\ & (12.*E*Iy*(-1.*cz*\text{Cos}[B] + cx*cy*\text{Sin}[B])*(cx*\text{Cos}[B] + cy*cz*\text{Sin}[B]))/ \\ & ((cx^2 + cz^2)*L^3)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{k}_{7,10} = & (3.*E*(Iy - 1.*Iz)*(2.*cx*cy*cz*\text{Cos}[2.*B] - 1.*cx^2*cy^2*\text{Sin}[2.*B] + \\ & cz^2*\text{Sin}[2.*B]))/((cx^2 + cz^2)*L^2)\end{aligned}$$

$$\bar{k}_{7,11} = (3.*E*(-1.*cz*Iy - 1.*cz*Iz - 1.*cz*Iy*\text{Cos}[2.*B] + cz*Iz*\text{Cos}[2.*B] + cx*cy*Iy*\text{Sin}[2.*B] - 1.*cx*cy*Iz*\text{Sin}[2.*B]))/L^2$$

$$\bar{k}_{7,12} = (6.*E*Iy*(-1.*cy*cz*\text{Cos}[B] + cx*\text{Sin}[B])*(-1.*cz*\text{Cos}[B] + cx*cy*\text{Sin}[B]))/((cx^2 + cz^2)*L^2) + (6.*E*Iz*(cx*cy*\text{Cos}[B] + cz*\text{Sin}[B])*(cx*\text{Cos}[B] + cy*cz*\text{Sin}[B]))/((cx^2 + cz^2)*L^2)$$

8"-----Row-S-----"

$$\bar{k}_{88} = (A*cy^2*E)/L + (12.*(cx^2 + cz^2)*E*Iz*\text{Cos}[B]^2)/L^3 + (12.*(cx^2 + cz^2)*E*Iy*\text{Sin}[B]^2)/L^3$$

$$\bar{k}_{89} = (E*(-6.*cy*cz*Iy - 6.*cy*cz*Iz + A*cy*cz*L^2 + 6.*cy*cz*Iy*\text{Cos}[2.*B] - 6.*cy*cz*Iz*\text{Cos}[2.*B] - 6.*cx*Iy*\text{Sin}[2.*B] + 6.*cx*Iz*\text{Sin}[2.*B]))/L^3$$

$$\bar{k}_{8,10} = (3.*E*(cz*Iy + cz*Iz - 1.*cz*Iy*\text{Cos}[2.*B] + cz*Iz*\text{Cos}[2.*B] + cx*cy*Iy*\text{Sin}[2.*B] - 1.*cx*cy*Iz*\text{Sin}[2.*B]))/L^2$$

$$\bar{k}_{8,11} = (3.*(cx^2 + cz^2)*E*(-1.*Iy + Iz)*\text{Sin}[2.*B])/L^2$$

$$\bar{k}_{8,12} = (3.*E*(-1.*cx*Iy - 1.*cx*Iz + cx*Iy*\text{Cos}[2.*B] - 1.*cx*Iz*\text{Cos}[2.*B] + cy*cz*Iy*\text{Sin}[2.*B] - 1.*cy*cz*Iz*\text{Sin}[2.*B]))/L^2$$

9"-----Row-S-----"

$$\bar{k}_{99} = (A*cz^2*E)/L + (12.*E*Iz*(-1.*cy*cz*\text{Cos}[B] + cx*\text{Sin}[B])^2)/((cx^2 + cz^2)*L^3) + (12.*E*Iy*(cx*\text{Cos}[B] + cy*cz*\text{Sin}[B])^2)/((cx^2 + cz^2)*L^3)$$

$$\bar{k}_{9,10} = (6.*E*I_z*(cy*cz*\text{Cos}[B] - 1.*cx*\text{Sin}[B])*(-1.*cz*\text{Cos}[B] + cx*cy*\text{Sin}[B]))/((cx^2 + cz^2)*L^2) - (6.*E*I_y*(cx*cy*\text{Cos}[B] + cz*\text{Sin}[B])*(cx*\text{Cos}[B] + cy*cz*\text{Sin}[B]))/((cx^2 + cz^2)*L^2)$$

$$\bar{k}_{9,11} = (3.*E*(cx*I_y + cx*I_z + cx*I_y*\text{Cos}[2.*B] - 1.*cx*I_z*\text{Cos}[2.*B] + cy*cz*I_y*\text{Sin}[2.*B] - 1.*cy*cz*I_z*\text{Sin}[2.*B]))/L^2$$

$$\bar{k}_{9,12} = (3.*E*(-1.*I_y + I_z)*(2.*cx*cy*cz*\text{Cos}[2.*B] - 1.*cx^2*\text{Sin}[2.*B] + cy^2*cz^2*\text{Sin}[2.*B]))/((cx^2 + cz^2)*L^2)$$

10"-----Row-S-----"

$$\bar{k}_{10,10} = (cx^2*G*J)/L + (4.*E*I_z*(-1.*cz*\text{Cos}[B] + cx*cy*\text{Sin}[B])^2)/(cx^2*L + cz^2*L) + (4.*E*I_y*(cx*cy*\text{Cos}[B] + cz*\text{Sin}[B])^2)/(cx^2*L + cz^2*L)$$

$$\bar{k}_{10,11} = (cx*cy*G*J)/L + (4.*E*I_z*\text{Sin}[B]*(cz*\text{Cos}[B] - 1.*cx*cy*\text{Sin}[B]))/L - (4.*E*I_y*\text{Cos}[B]*(cx*cy*\text{Cos}[B] + cz*\text{Sin}[B]))/L$$

$$\bar{k}_{10,12} = (cx*cz*G*J)/L + (4.*E*I_y*(cy*cz*\text{Cos}[B] - 1.*cx*\text{Sin}[B])*(cx*cy*\text{Cos}[B] + cz*\text{Sin}[B]))/(cx^2*L + cz^2*L) + (4.*E*I_z*(-1.*cz*\text{Cos}[B] + cx*cy*\text{Sin}[B])*(cx*\text{Cos}[B] + cy*cz*\text{Sin}[B]))/(cx^2*L + cz^2*L)$$

11"-----Row-S-----"

$$\bar{k}_{11,11} = (cy^2*G*J)/L + (4.*(cx^2 + cz^2)*E*I_y*\text{Cos}[B]^2)/L + (4.*(cx^2 + cz^2)*E*I_z*\text{Sin}[B]^2)/L$$

$$\bar{k}_{11,12} = (cy*cz*G*J)/L + (4.*E*Iy*\text{Cos}[B]*(-1.*cy*cz*\text{Cos}[B] + cx*\text{Sin}[B]))/L - \\ (4.*E*Iz*\text{Sin}[B]*(cx*\text{Cos}[B] + cy*cz*\text{Sin}[B]))/L$$

12"-----Row-S-----"

$$\bar{k}_{12,12} = (cz^2*G*J)/L + (4.*E*Iy*(-1.*cy*cz*\text{Cos}[B] + cx*\text{Sin}[B])^2)/ \\ (cx^2*L + cz^2*L) + (4.*E*Iz*(cx*\text{Cos}[B] + cy*cz*\text{Sin}[B])^2)/ \\ (cx^2*L + cz^2*L)$$

-----END-----

หมายเหตุ

ใช้โปรแกรม MATHAMATICA ในการคูณ



ภาคผนวก ง.

ตาราง แสดงขนาดน้ำหนักรรทุกจรในแนวตั้งของอาคารประเภทต่าง ๆ (ข้อมูลบัญชีกรุงเทพมหานคร)

ประเภทและส่วนต่าง ๆ ของอาคาร	น้ำหนักบรรทุก (กก./ตร.ม.)
1. หลังคา	50
2. กันสาดหรือหลังคาคอนกรีต	100
3. ที่พักอาศัย โรงเรียนอนุบาล ห้องน้ำ ห้องส้วม	150
4. ห้องแถว ตึกแถว ที่ใช้พักอาศัย อาคารชุด หอพัก โรงแรมและห้องคนไข้พิเศษของโรงพยาบาล	200
5. สำนักงาน ธนาคาร	250
6. (ก) อาคารพาณิชย์ ส่วนของห้องแถว ตึกแถวที่ใช้เพื่อการพาณิชย์ มหาวิทยาลัย วิทยาลัย โรงเรียน และโรงพยาบาล	300
(ข) ห้องโถง บันได ช่องทางเดิน ของอาคารชุด หอพัก โรงแรม สำนักงานและธนาคาร	300
7. (ก) ตลาด อาคารสรรพสินค้า หอประชุม โรงมหรสพ ภัตตาคาร ห้องประชุมห้องอ่านหนังสือในห้องสมุดและหอสมุด ที่จอดรถหรือเก็บรถยนต์นั่งหรือรถจักรยานยนต์	400
(ข) ห้องโถง บันได ช่องทางเดิน ของอาคารพาณิชย์ มหาวิทยาลัย วิทยาลัย และโรงเรียน	400
8. (ก) คลังสินค้า โรงกีฬา พิพิธภัณฑ์ อัฒจันทร์ โรงงานอุตสาหกรรม โรงพิมพ์ ห้องเก็บเอกสารและฟิล์ม	500
(ข) ห้องโถง บันได ช่องทางเดินของตลาด อาคารสรรพสินค้า ห้องประชุม หอประชุม โรงมหรสพ ภัตตาคาร ห้องสมุด และหอสมุด	500
9. ห้องเก็บหนังสือ ของห้องสมุดหรือหอสมุด	600
10. ที่จอดรถหรือเก็บรถยนต์บรรทุกเปล่า	800

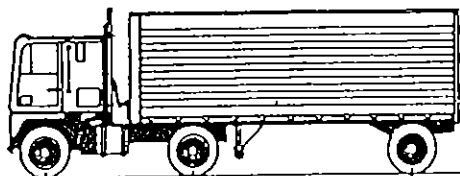
ขนาดของแรงลมตามความสูงของอาคาร (ข้อมูลบัญชีกรุงเทพมหานคร)

ความสูงของอาคาร (H เมตร)	หน่วยแรงลม (กก. /ตร.ม.)
$H \leq 10$	50
$10 < H \leq 20$	80
$20 < H \leq 40$	120
$40 < H$	160

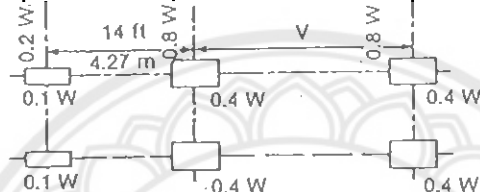
น้ำหนักบรรทุกกระทำต่อสะพาน

AASHTO (The American Association of Highway and Transportation Officials)

ได้กำหนดน้ำหนักบรรทุกมาตรฐานของรถบรรทุกดังแสดงในรูป



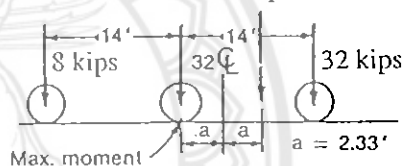
HS 20 8 kips 36 kN 32 kips 144 kN 32 kips 144 kN
 HS 15 6 kips 27 kN 24 kips 108 kN 24 kips 108 kN



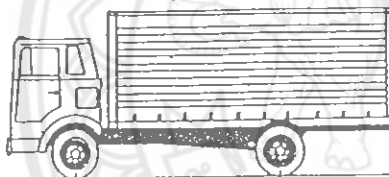
W = combined weight on the first two axles which is the same as for the corresponding H truck (4.27 to 9.14 m)

V = variable spacing 14 to 30 ft inclusive spacing to be used is that which produces maximum stresses.

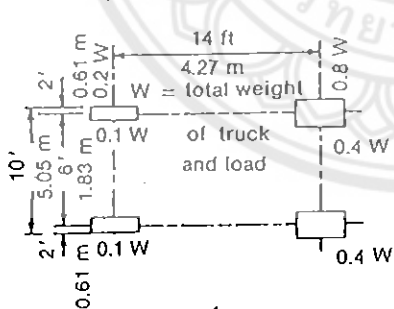
R = 72 kips (HS 20)



General location of maximum moment due to truck loadings is as shown (with HS 20 values)



H 20 8 kips 36 kN 32 kips 144 kN
 H 15 6 kips 27 kN 24 kips 108 kN



Truck	W/length		V			
	kip/ft	kN/m	Moment		Shear	
			kip	kN	kip	kN
HS 20	0.640	9.3	18	80	26	116
H 20	0.640	9.3	18	80	26	116
HS 15	0.480	7.0	13.5	60	19.5	87
H 15	0.480	7.0	13.5	60	19.5	87

V placed anywhere on span to produce maximum effect

W/length and covers full lane width



รูป แสดงน้ำหนักบรรทุกมาตรฐานของรถบรรทุก

(มาตรฐาน AASHTO)

ภาคผนวก จ.

แสดงการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้ โปรแกรม STAAD - III ซึ่งประกอบไปด้วย การออกแบบคาน การออกแบบเสา และการออกแบบฐานราก ซึ่งอ้างอิงมาตรฐานการออกแบบจาก Code ACI – 89 (Reinforced Concrete Design by Ultimate Strength Design Method) เนื่องจากมีเวลาจำกัดจึงได้แสดงการตรวจสอบได้เพียง 1 ตัวอย่างเท่านั้นซึ่งผลการออกแบบ (Track 2) จากโปรแกรมจะแสดงรูปภาพการเสริมเหล็กในคานในช่วงต่างๆ แสดงรูปจำนวนเหล็กเสริมในเสาและทำการ Plot Interaction Curve ของเสาที่ทำการออกแบบซึ่งเป็น Interaction Curve ที่ยังไม่ได้คูณค่า ϕ Factor จาก Interaction Curve เราก็จะทราบค่า ความหนาแน่นของเหล็กเสริมที่ใส่ในหน้าตัดเสา (ρ_g) และทราบค่า Eccentricity (e) แสดงเหล็กเสริมในแผ่นพื้น (element) และแสดงรูปการเสริมเหล็กในฐานราก (ใน โปรแกรมนี้ทำการออกแบบเป็นฐานรากแผ่) ซึ่งจะได้แสดงผลการออกแบบต่อไป

Design Example 1.

=====

BEAM NO. 3 DESIGN RESULTS - FLEXURE

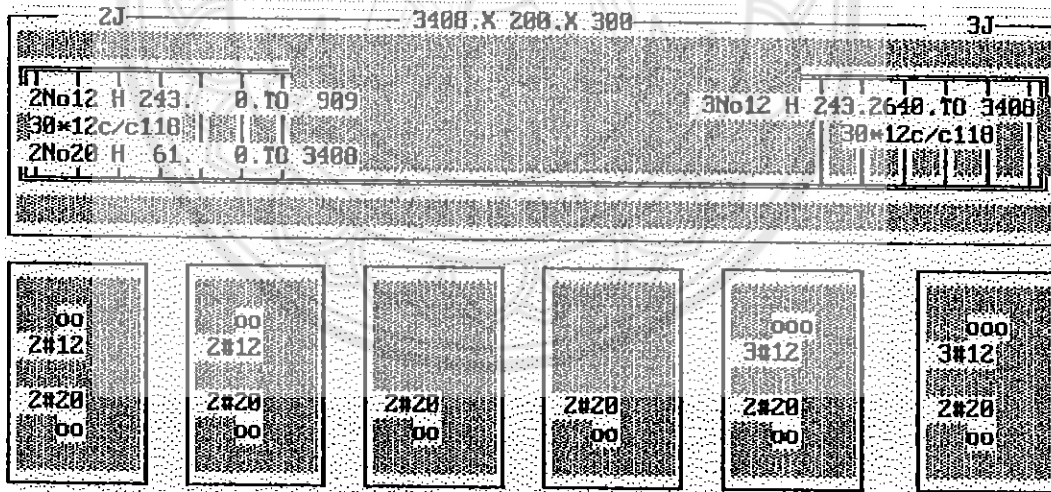
LEN - 3408. MM FY - 414. FC - 28. MPA, SIZE - 200. X 300. MMS

LEVEL	HEIGHT (MM)	BAR INFO	FROM (MM)	TO (MM)	ANCHOR	
					STA	END
1	61.	2 - 20MM	0.	3408.	YES	YES
2	243.	2 - 12MM	0.	909.	YES	NO
3	243.	3 - 12MM	2640.	3408.	NO	YES

BEAM NO. 3 DESIGN RESULTS - SHEAR

AT START SUPPORT - Vu= 38.88 KNS Vc= 41.25 KNS Vs= 4.49 KNS
 PROVIDE 12 MM BARS AT 118. MM C/C FOR 3408. MM

AT END SUPPORT - Vu= 40.69 KNS Vc= 41.25 KNS Vs= 6.62 KNS
 PROVIDE 12 MM BARS AT 118. MM C/C FOR 3408. MM



Example 5COLUMN NO. 176 DESIGN RESULTS

*** COLUMN IS IN TENSION FOR LOAD 1 - LOAD IGNORED ***

FY - 392.3 FC - 27.5 MPA, SQRE SIZE - 600.0 X 600.0 MMS, TIED

AREA OF STEEL REQUIRED = 3600.0 SQ. MM

BAR CONFIGURATION	REINF PCT.	LOAD	LOCATION	PHI
32 - 12 MM	1.005	1	END	0.741

(PROVIDE EQUAL NUMBER OF BARS AT EACH FACE)

COLUMN INTERACTION: MOMENT ABOUT Z -AXIS (KN-MET)

P0	Pn max	P-bal.	M-bal.	e-bal. (MM)
9730.47	7784.37	3727.72	930.17	*****
M0	P-tens.	Pu/PHI	Pn	Mn e/h
359.14	-1412.16	6.00	84.97	348.05 6.827

COLUMN INTERACTION: MOMENT ABOUT Y -AXIS (KN-MET)

P0	Pn max	P-bal.	M-bal.	e-bal. (MM)
9730.47	7784.37	3727.72	930.17	*****
M0	P-tens.	Pu/PHI	Pn	Mn e/h
359.14	-1412.16	6.00	245.22	390.78 2.656

	Pn	Mn	Pn	Mn	(@ Z)
P0	4612.59	878.70	3317.04	911.94	
P0 *	4394.50	892.96	3126.56	899.28	
*	4193.08	905.29	2945.15	884.51	
Pn,max	4004.81	915.50	2775.84	868.91	
*	3834.74	925.32	2615.60	851.97	
Pn	3516.58	922.14	2467.45	835.05	
NOMINAL					
AXIAL					
COMPRESSION					
Pb	4612.59	878.70	3317.04	911.94	
*	4394.50	892.96	3126.56	899.28	
Pb	4193.08	905.29	2945.15	884.51	
*	4004.81	915.50	2775.84	868.91	
*	3834.74	925.32	2615.60	851.97	
* M0 Mn,	3516.58	922.14	2467.45	835.05	
BENDING					
P-tens					
MOMENT					

FOOTING AT SUPPORT: 104

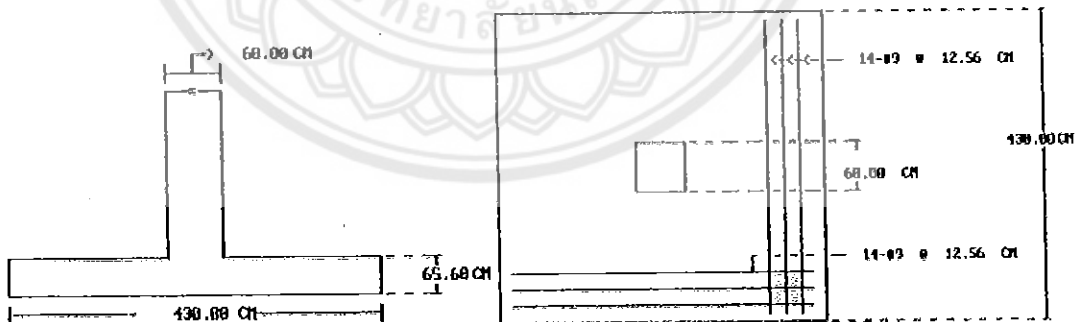
UNIT : KG CM
 LOAD :
 VERTICAL LOAD = P = 228071.9060
 MOMENT IN X-DIR. = $H_x \times d + M_z$ = 1926302.5000
 MOMENT IN Z-DIR. = $H_z \times d + M_x$ = 383855.6560

DIMENSIONS :
 COLUMN SIZE = $c_x \times c_z$ = 60.000 x 60.000
 FOOTING AREA REQUIRED = 184899.92
 SLAB SIZE = $s_1 \times s_2$ = 430.000 x 430.000
 DEPTH OF SLAB = s_y = 65.600
 EMBEDMENT DEPTH = 150.000

SOIL :
 BEARING CAPACITY = 1.465
 MAXIMUM BEARING PRESSURE = 1.408

REINFORCEMENT :
 BOTTOM REINFORCEMENT: UNIT : INCH
 BAR NUMBER OF SLAB REINFORCEMENT = 9
 REINFORCEMENT RATIO (X-DIR) = 0.00306
 REINFORCEMENT RATIO (Z-DIR) = 0.00287
 AREA OF STEEL (X-DIR) = 11.55
 NO. OF BARS IN X-DIR. = 14
 SPACING OF BARS IN X-DIR. = 12.56
 AREA OF STEEL (Z-DIR) = 10.81
 NO. OF BARS IN Z-DIR. = 14
 SPACING OF BARS IN Z-DIR. = 12.56
 DOWEL REINF. : BAR #8 AREA= 2.8 TOTAL NOS.= 4 DEV. LENGTH= 18.03

FOOTING W/O PEDESTAL :



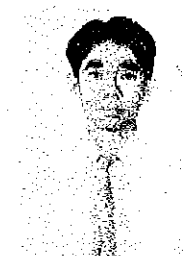
ประวัติผู้เขียน



ชื่อผู้เขียน นายจตุมนัส วรมณีนันท์
 วันเดือนปีเกิด 21 เมษายน 2519
 สถานที่เกิด จังหวัดลำปาง
 สถานที่อยู่ปัจจุบัน 374 ถ. เม็งราย ต. สบค้อย อ. เมือง จ. ลำปาง 52000
 ☎ 054 - 217357 เพจ 1144 -572079
 ประวัติการศึกษา มัธยมศึกษา ร.ร.บุญวาทย์วิทยาลัย จังหวัดลำปาง
 ปริญญาตรี วศ.บ. (โยธา) คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยนเรศวร



ชื่อผู้เขียน นายประสิทธิ์ คีพิจารณ์
 วันเดือนปีเกิด 9 กุมภาพันธ์ 2519
 สถานที่เกิด จังหวัดกำแพงเพชร
 สถานที่อยู่ปัจจุบัน 53 หมู่ 15 ต. พุ่งทราย อ. ทรายทองวัฒนา จ. กำแพงเพชร
 62190 ☎ 055 - 732156
 ประวัติการศึกษา มัธยมศึกษา ร.ร. พุ่งทรายวิทยา จังหวัดกำแพงเพชร
 ปริญญาตรี วศ.บ. (โยธา) คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยนเรศวร



ชื่อผู้เขียน นายวันชัย หงษ์อ่อนสา
 วันเดือนปีเกิด 17 กันยายน 2519
 สถานที่เกิด จังหวัดพิษณุโลก
 สถานที่อยู่ปัจจุบัน 150 หมู่ 3 ต. บ้านพร้าว อ. นครไทย จ. พิษณุโลก 65120
 ประวัติการศึกษา มัธยมศึกษา ร.ร. นครไทย จังหวัดพิษณุโลก
 ปริญญาตรี วศ.บ. (โยธา) คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยนเรศวร