บทที่ 6
โปรแกรมคอมพิวเตอร์ TFRAME

TFRAME เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติ โหมดเชพ ผลตอบสนองสูงสุด และความเร็วสูงสุดของระบบโครงสร้างภายใต้ภาระกระทำแบบฮาร์โมนิคโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับโครงสร้างแบบระนาบ 2 มิติ (Plane frame structure) ซึ่งโปรแกรมนี้ถูกเขียนขึ้นจากโปรแกรมภาษาฟอร์แทรน และใช้คอมไพเลอร์ของฟอร์แทรน 90 ชื่อ NDP ในการคอมไพล์ โปรแกรมนี้ทำงานกับระบบปฏิบัติการบนดอส (DOS : disk operating system)

โปรแกรม TFRAME นี้ประกอบด้วย โปรแกรมหลัก (Main program) และ โปรแกรมย่อย (Subroutines) 10 โปรแกรม มีไฟล์สำหรับป้อนข้อมูลคือ AFRMIN.DAT และ ไฟล์ผลลัพธ์มีอยู่ด้วยกัน 3 ไฟล์ ได้แก่ PRIMAR.DAT PUREFQ.DAT และ RESPON.DAT รายละเอียดของโปรแกรมมีดังนี้

6.1 ขั้นตอนการคำนวณในโปรแกรม TFRAME

6.1.1 เริ่มต้นการทำงานโดยอ่านข้อมูลของปัญหาจากไฟล์ AFRMIN.DAT

6.1.2 แสดงผลของข้อมูลที่ถูกป้อนเข้ามาสำหรับคำนวณในไฟล์ PRIMAR.DAT

6.1.3 คำนวณเมตริกซ์มวล และเมตริกซ์ความแข็งเกร็ง ในโปรแกรมหลัก

6.1.4 ประกอบเมตริกซ์มวลย่อย และเมตริกซ์ความแข็งเกร็งย่อย ในโปรแกรมหลัก

6.1.5 กำจัดพิกัดที่ตัวแปรมีค่าเป็นศูนย์ และลดขนาดของสมการในโปรแกรมหลัก

6.1.6 ใช้เมตริกซ์มวล และเมตริกซ์ความแข็งเกร็งของระบบในการหาค่าความถี่ธรรมชาติ และโหมดเชพของโครงสร้าง โดยเรียกโปรแกรมย่อย (SUBROUTINE RG)

6.1.7 แสดงค่าความถี่ธรรมชาติ และโหมดเชพ ของโครงสร้างในไฟล์ PUREFQ.DAT

6.1.8 นำโหมดเชพที่แต่ละความถี่มาเรียงกัน เป็นเมตริกซ์โมแดล (Modal matrix) ในโปรแกรมหลัก

6.1.9 ใช้เมตริกซ์โมแดล เปลี่ยนพิกัดของโครงสร้างจากพิกัดทั่วไปเป็นพิกัดหลัก เพื่อแก้ปัญหาความเกี่ยวพันระหว่างตัวแปรของแต่ละสมการ จนได้ระบบสมการที่มีตัวแปรเป็นอิสระต่อกันทั้งหมด ทำการคำนวณหาค่าเมตริกซ์มวล เมตริกซ์ความหน่วงและเมตริกซ์ความแข็งเกร็งของระบบที่ถูกแปลงพิกัดแล้ว และแสดงผลการคำนวณในไฟล์ PUREFQ.DAT

6.1.10 ขยายเมตริกซ์มวล เมตริกซ์ความแข็งเกร็ง และเมตริกซ์ความหน่วง เนื่องจากมีการติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือนในโปรแกรมหลัก

6.1.11 ส่งค่าเมตริกซ์มวล และเมตริกซ์ความแข็งเกร็งใหม่ ไปหาค่าความถี่ธรรมชาติและโหมดเชพ ของระบบอีกครั้ง โดยเรียกโปรแกรมย่อย [SUBROUTINE RG]

6.1.12 แสดงค่าความถี่ธรรมชาติ และโหมดเชพของระบบโครงสร้างรวมในไฟล์ RESPON.DAT

6.1.13 นำโหมดเชพที่แต่ละความถี่มารวมกันเป็นเมตริกซ์โมแดลใหม่อีกครั้ง ในโปรแกรมหลัก

6.1.14 ใช้เมตริกซ์โมแดล เปลี่ยนพิกัดของโครงสร้างจากพิกัดทั่วไปเป็นพิกัดหลัก เพื่อแก้ปัญหาความเกี่ยวพันระหว่างตัวแปรของแต่ละสมการ แล้วแสดงผลการคำนวณในไฟล์ RESPON.DAT

6.1.15 หาผลตอบสนองสูงสุดของแต่ละพิกัดทั้งในโครงสร้างอาคารและเครื่องจักร และแสดงผลการคำนวณในไฟล์ RESPON.DAT

<u>ขั้นตอนในการคำนวณสามารถสรุปได้ดังนี้</u>

รับข้อมูลจากไฟล์ AFRMIN.DAT

แสดงข้อมูลที่รับเข้ามาในไฟล์ PRIMAR.DAT

สร้าง ELEMENT MASS MATRIX $[m]_e$ และ ELEMENT STIFFNESS MATRIX $[k]_e$ ของคาน

แปลงพิกัดของคานเป็นพิกัดทั่วไป จากลักษณะการวางตัว ดังนั้น

$$[\bar{m}]_e = [R]^T [m]_e [R] \ , \ [\bar{k}]_e = [R]^T [k]_e [R]$$

ประกอบเมตริกซ์ของแต่ละเอลิเมนต์เข้าด้วยกัน โดย

$$[M] = \sum_{e=1}^{p} [A]_e^T [\bar{m}]_e [A]_e \ , \ [K] = \sum_{e=1}^{p} [A]_e^T [\bar{k}]_e [A]_e$$

กำจัดพิกัดที่เป็นศูนย์

ทำการคูณ $[K]^{-1}[M]$

แสดงค่า NATURAL FREQUENCIES และ
MODE SHAPES ของอาคาร ในไฟล์ PUREFQ.DAT

สร้าง MODAL MATRIX $[\Phi]$

หา DIAGONAL MASS , STIFFNESS MATRIX

จาก $[M_r]=[\Phi]^T[M][\Phi]$

และ $[K_r]=[\Phi]^T[K][\Phi]$

สร้าง DIAGONAL DAMPING MATRIX

$$[C_r]=2\zeta_r\,\omega_r[M_r]$$

สร้าง DAMPING MATRIX [C] จาก

$$[C]=\left([\Phi]^T\right)^{-1}[C_r][\Phi]^{-1}$$

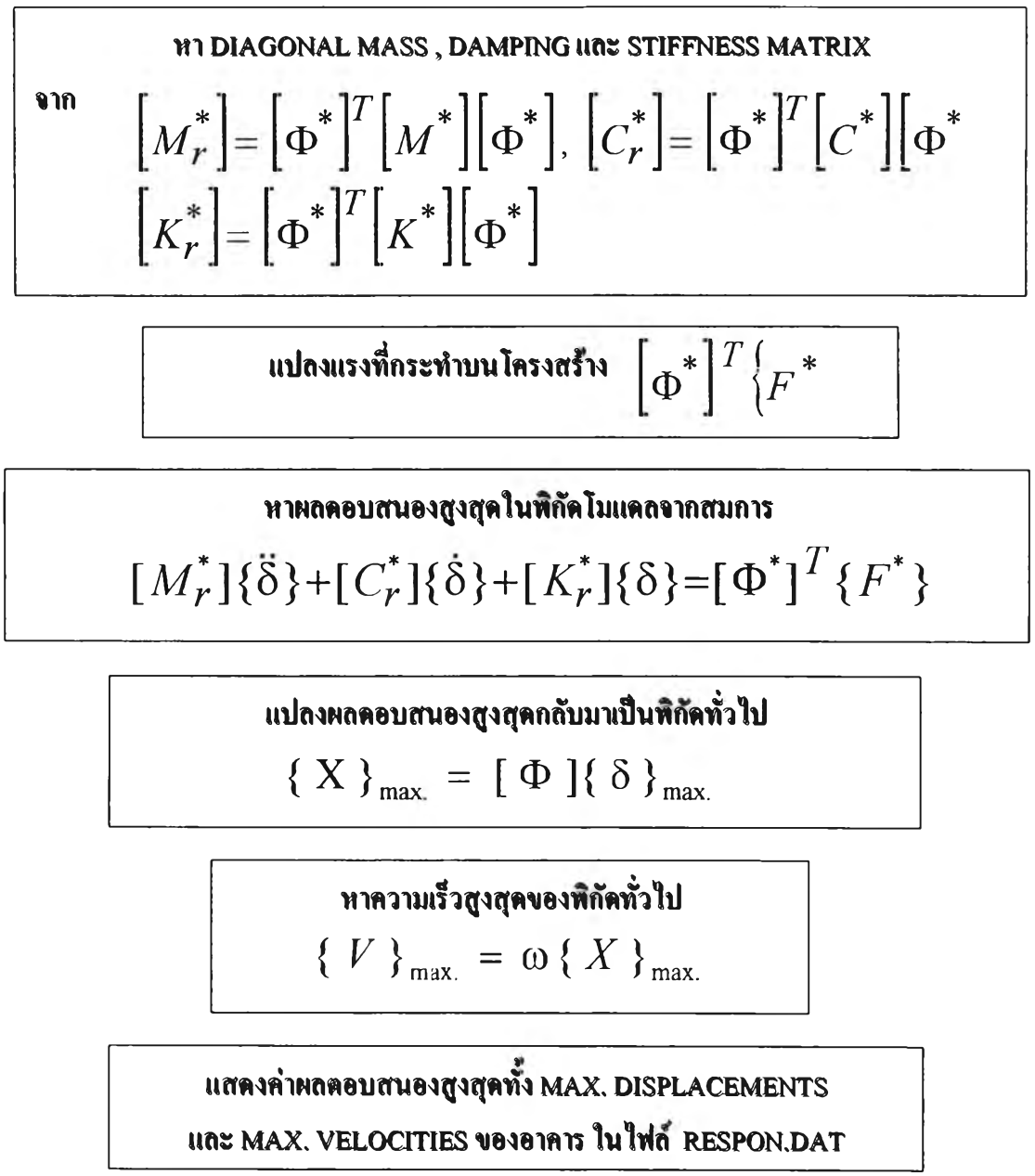
ใช้ Perturbation Method รวม Isolation properties สร้างเมตริกซ์

$$[M^*]\ ,\ [C^*]\ ,\ [K^*]$$

นำเมตริกซ์ผลคูณ ไปหาค่าเจาะจง และ
เวคเตอร์เจาะจง ใน SUBROUTINE RG

แสดงค่า NATURAL FREQUENCIES และ
MODE SHAPES ของอาคาร ในไฟล์ RESPON.DAT

สร้าง MODAL MATRIX $[\Phi^*]$



รูปที่ 6-1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม TFRAME

6.2 รายละเอียดของโปรแกรม TFRAME

6.2.1 โปรแกรมหลัก [Main program]

ก่อนอื่นให้พิจารณาว่าปัญหามีจำนวนระดับขั้นความเสรีเท่าไหร่ แล้วเปรียบเทียบกับค่าสูงสุดของจำนวนเอลิเมนต์ (NUMELM) จำนวนจุดต่อ (NUMJNT) และขนาดของเมตริกซ์ (NM) ที่ตั้งไว้ในโปรแกรม ถ้าปัญหามีขนาดใหญ่เกินกว่าค่าที่ตั้งเอาไว้ ให้ปรับขนาดเหล่านี้เพิ่มขึ้น

และทำการคอมไพล์โปรแกรมใหม่โดยลบไฟล์โปรแกรม TFRAME.EXE ออกก่อน แล้วใช้คำสั่ง TFRAME คอมไพล์ หน้าที่ของโปรแกรมหลัก ได้แก่ อ่านข้อมูลของปัญหาจากไฟล์ AFRMIN.DAT สร้างเมตริกซ์มวลและเมตริกซ์ความแข็งเกร็งย่อย ๆ ของแต่ละเอลิเมนต์ สร้างระบบสมการรวม กำจัดพิกัดที่ไม่จำเป็น ทำการแก้ปัญหาระบบสมการเชิงอนุพันธ์ โดยใช้วิธีการสังเคราะห์ด้วยเมตริกซ์โมแดล (Modal synthesis method) และทำการบันทึกผลการคำนวณไว้ในไฟล์ข้อมูล PRIMAR.DAT PUREFQ.DAT และ RESPON.DAT

6.2.2 โปรแกรม ย่อย MATINV (Subroutine MATINV)

โปรแกรมย่อย MATINV ใช้ในการหาค่าเมตริกซ์ผกผัน (Inverse matrix) จากเมตริกซ์ที่ให้มาโดยการรับค่าเมตริกซ์ และขนาดของเมตริกซ์ในเทอมของตัวแปร B และ N (ตามที่แสดงในโปรแกรม) ตามลำดับ แล้วส่งค่าเมตริกซ์ผกผันในเทอมของ A กลับคืนสู่โปรแกรมหลัก

6.2.3 โปรแกรมย่อย MATMPY (Subroutine MATMPY)

โปรแกรมย่อย MATMPY ใช้หาผลคูณของเมตริกซ์ โดยรับค่าเมตริกซ์ A เมตริกซ์ B และขนาดของเมตริกซ์ N แล้วส่งค่าเมตริกซ์ผลคูณระหว่างเมตริกซ์ทั้งสองคืนสู่โปรแกรมหลักในเทอมของตัวแปร C

6.2.4 โปรแกรมย่อย RG (Subroutine RG)

เป็นโปรแกรมที่นำมาจากหนังสืออ้างอิง [3] ใช้สำหรับหาค่าเจาะจง และเวคเตอร์เจาะจงของเมตริกซ์ A ซึ่งมีขนาดใหญ่ หลักการคือพยายามแปลงเมตริกซ์ให้อยู่ในรูปที่สามารถหาค่าเจาะจงได้ง่าย รูปแบบทั่วไปคือ $[A]\{x\} = \lambda\{x\}$ เมื่อ λ คือ กำลังสองของค่าเจาะจง และเวคเตอร์ $\{x\}$ คือโหมดเชพที่แต่ละความถี่ โปรแกรมย่อย RG นี้ทำงานร่วมกับโปรแกรมย่อยอื่น ๆ ได้แก่ โปรแกรมย่อย BALANC โปรแกรมย่อย ELTRAN โปรแกรมย่อย HQR2 โปรแกรมย่อย BALBAK และโปรแกรมย่อย SORT สำหรับรายละเอียดของวิธีการหาค่าเจาะจง และเวคเตอร์เจาะจง สามารถศึกษาได้จากภาคผนวก ข

6.2.5 โปรแกรมย่อย BALANC (Subroutine BALANC)

เป็นโปรแกรมที่ใช้ถ่วงน้ำหนักของเมตริกซ์ที่ต้องการจะหาค่าเจาะจง และเวคเตอร์เจาะจง เนื่องจากเมตริกซ์โดยทั่วไปอาจจะมีกรณีที่สมาชิกในบางตำแหน่งมีระดับขนาดแตกต่างกับสมาชิกในตำแหน่งอื่น ๆ มาก เป็นผลให้เกิดค่าผิดพลาดขึ้นได้ง่ายเมื่อนำไปหาค่าเจาะจง และเวคเตอร์

เจาะจงโดยการแทนค่าตัวเลขในคอมพิวเตอร์ ดังนั้นโปรแกรมนี้อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงทั้งทางหลักและทางแถวเพื่อให้สมาชิกแต่ละตัวของเมตริกซ์ผลลัพธ์มีระดับขนาดใกล้เคียงกัน โดยที่เมตริกซ์ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นใหม่ยังคงมีค่าเจาะจงเหมือนเดิม แต่สำหรับเมตริกซ์ที่สมมาตรอยู่แล้ว เมื่อนำมาคำนวณด้วยโปรแกรมนี้จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

6.2.6 โปรแกรมย่อย ELMHES

เป็นโปรแกรมทำหน้าที่ลดรูปเมตริกซ์ทั่วไปให้อยู่ในรูปเมตริกซ์เฮสเซนเบอร์กด้านบน (Upper Hessenberg Matrix) เนื่องจากเป็นเมตริกซ์ที่สามารถหาค่าเจาะจงได้ง่ายและมีค่าผิดพลาดน้อยมาก หลักการแปลงเมตริกซ์ทั่วไปเป็นเมตริกซ์เฮสเซนเบอร์กด้านบนคือใช้วิธีการกำจัดสมาชิกนอกแนวทแยงมุมแนวที่ 1 ออกแบบทีละคอลัมน์ (Elimination method)

6.2.7 โปรแกรมย่อย ELTRAN

ทำหน้าที่เก็บข้อมูลที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงจากเมตริกซ์ทั่วไปเป็นเมตริกซ์เฮสเซนเบอร์กด้านบนในรูปของเมตริกซ์ เพื่อใช้ในการแปลงจากเมตริกซ์ของเวคเตอร์เจาะจงที่หาได้จากเมตริกซ์เฮสเซนเบอร์กกลับมาเป็นเวคเตอร์เจาะจงของเมตริกซ์ทั่วไป

6.2.8 โปรแกรมย่อย HQR2

เป็นโปรแกรมย่อยที่ใช้สำหรับหาค่าเจาะจง และเวคเตอร์เจาะจงของเมตริกซ์เฮสเซนเบอร์กด้านบน โดยใช้วิธีการแปลงแบบคิวอาร์ (The QR Transformation) รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ข.

6.2.9 โปรแกรมย่อย BALBAK (Subroutine BALBAK)

ใช้สำหรับแปลงค่าเวคเตอร์เจาะจงของเมตริกซ์เฮสเซนเบอร์กด้านบนเป็นค่าเวคเตอร์เจาะจงของเมตริกซ์ทั่วไป โดยใช้เมตริกซ์ที่ได้จากโปรแกรมย่อย ELTRAN

6.2.10 โปรแกรมย่อย SEARCH (Subroutine SEARCH)

เป็นโปรแกรมย่อยที่ใช้ในการทำเวคเตอร์เจาะจงให้นอร์มอลไลซ์ โดยการค้นหาว่าสมาชิกใดในแต่ละหลักมีขนาดมากที่สุด เฉพาะในกรณีที่พิกัดแรกของโปรแกรมมีค่าต่ำมาก ทั้งนี้เพื่อนำไปหารสมาชิกทั้งหมดของหลักนั้น ๆ ของเวคเตอร์เจาะจงแทนตัวแรก (โดยปกติจะใช้ค่าแรกสุดของแต่ละหลักเป็นตัวหารแต่ถ้าค่าแรกสุดมีค่าต่ำมากเมื่อนำไปหารจะทำให้เกิดปัญหาได้)

6.2.11 โปรแกรมย่อย SORT (Subroutine SORT)

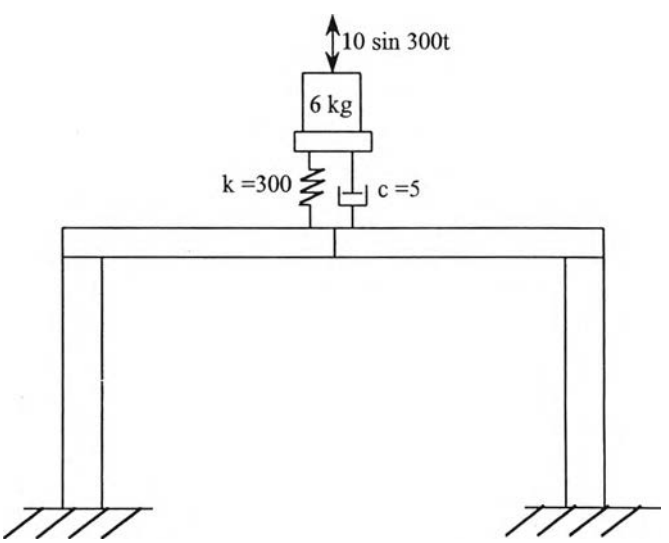
เป็นโปรแกรมสำหรับเรียงลำดับค่าเจาะจง และเวคเตอร์เจาะจงที่สอดคล้องกันจากค่าน้อยไปหามาก เนื่องจากค่าเจาะจงและเวคเตอร์เจาะจงของแต่ละค่าเจาะจงที่หาได้จากวิธีการแปลงเมตริกซ์ที่ได้กล่าวมาแล้วนี้ จะให้ค่าเจาะจงและเวคเตอร์เจาะจงออกมาทั้งหมด แต่ไม่ได้เรียงลำดับมาให้

6.3 ตัวอย่างการแก้ปัญหาด้วยโปรแกรม TFRAME

ตัวโปรแกรมที่เขียนขึ้น TFRAME.F ควรใส่อยู่ใน PATH C:\NDP\SRC เพื่อที่จะไม่ต้องแก้ไข PATH ในไฟล์ TFRAME.BAT (เป็นไฟล์ที่ใช้ระบุเส้นทางในการคอมไพล์) การคำนวณด้วยโปรแกรม TFRAME แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนป้อนข้อมูล ส่วนประมวลผล และส่วนแสดงผลข้อมูล ในที่นี้จะแสดงให้ดูเฉพาะส่วนป้อนข้อมูล และส่วนแสดงผลข้อมูล ดังนี้

6.3.1 ส่วนป้อนข้อมูล

ข้อมูลที่โปรแกรมอ่านค่าเพื่อใช้ในการคำนวณมาจากไฟล์ AFRMIN.DAT วิธีใช้ให้เข้าไปแก้ไขข้อมูลโดยใช้คำสั่ง EDIT AFRMIN.DAT ที่ C:\NDP\SRC ในที่นี้ป้อนข้อมูล PATH ตามที่กำหนดในโปรแกรมที่นำไปลง พิจารณาตัวอย่างปัญหาที่สมมติขึ้นมาดังนี้



รูปที่ 6-2 แสดงตัวอย่างปัญหาการสั่นสะเทือนของโครงสร้าง

ปัญหาในรูปที่ 6-2 นี้ ได้แบ่งโครงสร้างเป็น 4 เอลิเมนต์ การป้อนค่าให้เรียงลำดับ ดังนี้

```
----ENTER NUMBER OF BEAM ELEMENTS NUMEL(INTEGER)-----NO FORMAT
4

----ENTER CROSS-SECTIONAL AREA OF BEAM ELEMENTS A(I)------
0.0008818
0.0008818
0.0008818
0.0008818

----ENTER MODULI OF ELASTICITY E(I)-----
2.0E11
2.0E11
2.0E11
2.0E11

----ENTER AREA MOMENTS OF INERTIA IA(I)-----
12.2E-08
12.2E-08
12.2E-08
12.2E-08

----ENTER MASS PER UNIT LENGTH GAMMA(I)
6.92
6.92
6.92
6.92

----ENTER NUMBER OF JOINTS NJTS(INTEGER)
5

----ENTER JOINT-MATRIX CONNECTION JNM(I,J)INTEGER----
 1
 2
 2
 3
 3
 4
 4
 5

----ENTER JOINT COORDINATES X(I),Y(I)
    0.0,       0.0
    0.0,       4.0
    2.0,       4.0
    4.0,       4.0
    4.0,       0.0

----ENTER NUMBER OF FIX COORDINATES NB(INTEGER)
6

----ENTER THE COORDINATE CFIX(I) INTEGER
1
2
3
13
14
15


----ENTER PERCENTAGE OF MODAL DAMPING MATRIX ETHA(I)
2
2
2
2
2
2
```

จำนวนเอลิเมนต์

พื้นที่หน้าตัดของแต่ละเอลิเมนต์

ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นแต่ละเอลิเมนต์

โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่รอบแกนหมุน

มวลต่อหน่วยความยาวของแต่ละเอลิเมนต์

จำนวนจุดต่อทั้งหมดเฉพาะของโครงสร้าง

ลำดับในการเชื่อมโยงจุดต่อเข้าด้วยกัน

ตำแหน่งของแต่ละจุดต่อในโครงสร้าง

จำนวนพิกัดที่ถูกจำกัดให้มีการขจัดเป็นศูนย์

แต่ละพิกัดที่มีการขจัดเป็นศูนย์ตลอดเวลา

ค่าสัมประสิทธ์ความหน่วงของพิกัด

```
2
2
2

---ENTER NUMBER OF EQUIPMENT ADDING IN THE STRUCTURE.
1

----ENTER EQUIPMENT PROPERTIES ADDING IN THE ENTIRE SYSTEM.(ATTC,M,C,K)
5,6,5,300

----ENTER NUMBER OF JOINT INCLUDING THEIR OWN MEMBERS WEIGHT.
0

----ENTER INCLUDING MASS IN THE STRUCTURE.

----ENTER NUMBER OF UNBALANCED FORCE APPLY TO ENTIRE STRUCTURE.
1

----ENTER FORCE DETAIL
10,10,300

******************** END OF DATA INPUT ************************
```

จำนวนพิกัดที่ใส่เพิ่ม

คุณสมบัติ isolation

จำนวนภาระแบบจุด และพิกัดที่รับภาระ

จำนวนภาระฮาร์โมนิค และรายละเอียด

6.3.2 ส่วนแสดงผลการคำนวณ

มีอยู่ด้วยกัน 3 ไฟล์ ได้แก่ PRIMAR.DAT PUREFQ.DAT และ RESPON.DAT แสดงข้อมูลแตกต่างกันดังนี้

- PRIMAR.DAT แสดงข้อมูลของปัญหาที่ได้รับจากไฟล์ AFRMIN.DAT เพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการป้อนข้อมูล
- PUREFQ.DAT แสดงค่าความถี่ธรรมชาติ และโหมดเชพของโครงสร้างไม่รวมชุดแยกการสั่นสะเทือน รวมถึงสมาชิกเฉพาะในแนวทแยงมุมของเมตริกซ์มวล เมตริกซ์ความแข็งเกร็ง และเมตริกซ์ความหน่วงที่ถูกแปลงเป็นเมตริกซ์ทแยงมุมแล้วทั้งหมดของโครงสร้าง
- RESPON.DAT แสดงความถี่ธรรมชาติ และโหมดเชพของโครงสร้างเมื่อรวมชุดแยกการสั่นสะเทือน รวมถึงสมาชิกเฉพาะในแนวทแยงมุมของเมตริกซ์มวล เมตริกซ์ความแข็งเกร็ง และเมตริกซ์ความหน่วงที่ถูกแปลงเป็นเมตริกซ์ทแยงมุมแล้วทั้งหมดของระบบโครงสร้างรวมเครื่องจักร และค่าผลตอบสนองสูงสุดของแต่ละพิกัด

ต่อไปนี้จะแสดงตัวอย่างไฟล์ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณปัญหาข้างต้นด้วยโปรแกรม TFRAME จากไฟล์ PUREFQ.DAT และไฟล์ RESPON.DAT

ตัวอย่างไฟล์แสดงผลข้อมูล PUREFO.DAT

```
NATURAL FREQUENCIES AND MODE SHAPES OF STRUCTURE

      OMEGA(  1) =        0.11914457D+02 RAD/SEC.

      THE ASSOCIATED EIGENVECTOR IS:
         1        0.10000000D+01
         2        0.56302446D-04
         3       -0.13821642D+00
         4        0.10000111D+01
         5       -0.14155614D-12
         6        0.69331160D-01
         7        0.10000000D+01
         8       -0.56302446D-04
         9       -0.13821642D+00

      OMEGA(  2) =        0.49088571D+02 RAD/SEC.

      THE ASSOCIATED EIGENVECTOR IS:
         1        0.10000000D+01
         2        0.13356206D+02
         3        0.18268131D+05
         4        0.71062405D-10
         5        0.29194226D+05
         6        0.22331337D-10
         7       -0.10000000D+01
         8        0.13356206D+02
         9       -0.18268131D+05

      OMEGA(  3) =        0.11902036D+03 RAD/SEC.

      THE ASSOCIATED EIGENVECTOR IS:
         1        0.10000000D+01
         2       -0.20340604D-02
         3       -0.46191832D+01
         4        0.10011125D+01
         5       -0.12102702D-12
         6        0.33553791D+01
         7        0.10000000D+01
         8        0.20340604D-02
         9       -0.46191832D+01

      OMEGA(  4) =        0.15311077D+03 RAD/SEC.

      THE ASSOCIATED EIGENVECTOR IS:
         1        0.10000000D+01
         2       -0.87666210D+00
         3        0.69265394D+03
         4       -0.21290563D-12
         5       -0.46710108D+03
         6        0.64122166D-12
         7       -0.10000000D+01
         8       -0.87666210D+00
         9       -0.69265394D+03
```

เป็นข้อมูลของโครงสร้างขณะที่ยังไม่มีการติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือน โดยข้อมูลที่แสดงได้แก่ ค่าความถี่ธรรมชาติ และโหมดเชพที่สอดคล้องกัน โดยจำนวนพิกัดของโหมดเชพขึ้นอยู่กับการแบ่งจำนวนเอลิเมนต์ของปัญหา และการกำหนดพิกัดที่มีการขจัดเป็นศูนย์

```
OMEGA(  5) =        0.34844744D+03 RAD/SEC.

      THE ASSOCIATED EIGENVECTOR IS:
         1        0.10000000D+01
         2        0.51170741D-01
         3       -0.42188557D+01
         4        0.10095891D+01
         5        0.19131211D-13
         6       -0.19605506D+02
         7        0.10000000D+01
         8       -0.51170741D-01
         9       -0.42188557D+01

      OMEGA(  6) =        0.18035292D+04 RAD/SEC.

      THE ASSOCIATED EIGENVECTOR IS:
         1        0.10000000D+01
         2       -0.13596095D+02
         3        0.21074656D+01
         4       -0.11351625D-14
         5        0.43898526D+01
         6       -0.37552760D-13
         7       -0.10000000D+01
         8       -0.13596095D+02
         9       -0.21074656D+01

      OMEGA(  7) =        0.18627160D+04 RAD/SEC.

      THE ASSOCIATED EIGENVECTOR IS:
         1        0.10000000D+01
         2        0.18831379D+02
         3       -0.45578815D+01
         4        0.13326781D+01
         5        0.31620027D-13
         6        0.28252199D+02
         7        0.10000000D+01
         8       -0.18831379D+02
         9       -0.45578815D+01

      OMEGA(  8) =        0.34610377D+04 RAD/SEC.

      THE ASSOCIATED EIGENVECTOR IS:
         1        0.10000000D+01
         2        0.14823044D+00
         3       -0.12990055D+01
         4       -0.15451558D-15
         5        0.16597302D+00
         6       -0.44423230D-15
         7       -0.10000000D+01
         8        0.14823044D+00
         9        0.12990055D+01

      OMEGA(  9) =        0.71919809D+04 RAD/SEC.

      THE ASSOCIATED EIGENVECTOR IS:
         1        0.10000000D+01
         2        0.87623665D-01
         3       -0.13202921D+01
         4       -0.13792047D+01
         5        0.37428730D-16
         6       -0.85041606D+00
         7        0.10000000D+01
         8       -0.87623665D-01
         9       -0.13202921D+01
```

```
 MODAL MASS          MODAL DAMP          MODAL STIFFNESS

0.4523765E+02       0.2155928E+02       0.6421679E+04
0.1376213E+11       0.2702254E+11       0.3316245E+14
0.1800730E+03       0.8572940E+03       0.2550886E+07
0.5703053E+07       0.3492795E+08       0.1336961E+12
0.3963012E+03       0.5523605E+04       0.4811715E+08
0.5071340E+04       0.3658524E+06       0.1649564E+11
0.9064007E+04       0.6753468E+06       0.3144948E+11
0.1490215E+02       0.2063076E+04       0.1785096E+09
0.1932064E+02       0.5558146E+04       0.9993521E+09
```

แสดงสมาชิกในแนวทแยงมุมของเมตริกซ์ที่ถูกลดรูปเป็นเมตริกซ์ทแยงมุมแล้ว เฉพาะของโครงสร้างเท่านั้น

ตัวอย่างไฟล์แสดงผลข้อมูล RESPON.DAT

```
RESPONSE OF STRUCTURE UNDER FORCE CONDITIONS

      OMEGA(  1) =        0.70416834D+01 RAD/SEC.

      THE ASSOCIATED EIGENVECTOR IS:
         1        0.10000000D+01
         2       -0.82435621D+01
         3       -0.99503065D+04
         4        0.89227625D-09
         5       -0.19821623D+05
         6        0.44775762D-09
         7       -0.10000000D+01
         8       -0.82435621D+01
         9        0.99503065D+04
        10       -0.23899054D+07

      OMEGA(  2) =        0.11914457D+02 RAD/SEC.

      THE ASSOCIATED EIGENVECTOR IS:
         1        0.10000000D+01
         2        0.56302446D-04
         3       -0.13821642D+00
         4        0.10000111D+01
         5        0.19188919D-12
         6        0.69331160D-01
         7        0.10000000D+01
         8       -0.56302446D-04
         9       -0.13821642D+00
        10       -0.10550309D-12

      OMEGA(  3) =        0.49281305D+02 RAD/SEC.

      THE ASSOCIATED EIGENVECTOR IS:
         1        0.10000000D+01
         2        0.13041939D+02
         3        0.17861061D+05
         4        0.34119429D-10
         5        0.28490132D+05
         6        0.12112847D-10
         7       -0.10000000D+01
         8        0.13041939D+02
         9       -0.17861061D+05
        10       -0.59887262D+03
```

เป็นข้อมูลของระบบโครงสร้างรวมเครื่องจักรหลังจากที่มีการติดตั้งชุดแยกการสั่นสะเทือนแล้ว โดยข้อมูลที่แสดงได้แก่ ค่าความถี่ธรรมชาติ และโหมดเชพที่สอดคล้องกัน โดยจำนวนพิกัดของโหมดเชพขึ้นอยู่กับการแบ่งจำนวนเอลิเมนต์ของปัญหา การกำหนดพิกัดที่มีการขจัดเป็นศูนย์ รวมถึงพิกัดของเครื่องจักรที่เพิ่มขึ้นในระบบ

```
OMEGA(  4) =        0.11902036D+03 RAD/SEC.

      THE ASSOCIATED EIGENVECTOR IS:
         1        0.10000000D+01
         2       -0.20340604D-02
         3       -0.46191832D+01
         4        0.10011125D+01
         5       -0.23463262D-12
         6        0.33553791D+01
         7        0.10000000D+01
         8        0.20340604D-02
         9       -0.46191832D+01
        10        0.79244240D-15

      OMEGA(  5) =        0.15314836D+03 RAD/SEC.

      THE ASSOCIATED EIGENVECTOR IS:
         1        0.10000000D+01
         2       -0.87720869D+00
         3        0.69228810D+03
         4       -0.15375167D-12
         5       -0.46744232D+03
         6        0.26739422D-12
         7       -0.10000000D+01
         8       -0.87720869D+00
         9       -0.69228810D+03
        10        0.99861971D+00

      OMEGA(  6) =        0.34844744D+03 RAD/SEC.

      THE ASSOCIATED EIGENVECTOR IS:
         1        0.10000000D+01
         2        0.51170741D-01
         3       -0.42188557D+01
         4        0.10095891D+01
         5        0.10914741D-13
         6       -0.19605506D+02
         7        0.10000000D+01
         8       -0.51170741D-01
         9       -0.42188557D+01
        10       -0.47808663D-17

      OMEGA(  7) =        0.18035295D+04 RAD/SEC.

      THE ASSOCIATED EIGENVECTOR IS:
         1        0.10000000D+01
         2       -0.13596119D+02
         3        0.21074640D+01
         4       -0.11351651D-14
         5        0.43899005D+01
         6       -0.11744338D-13
         7       -0.10000000D+01
         8       -0.13596119D+02
         9       -0.21074640D+01
        10       -0.67481518D-04

      OMEGA(  8) =        0.18627160D+04 RAD/SEC.

      THE ASSOCIATED EIGENVECTOR IS:
         1        0.10000000D+01
         2        0.18831379D+02
         3       -0.45578815D+01
         4        0.13326781D+01
         5        0.13741753D-13
         6        0.28252199D+02
         7        0.10000000D+01
         8       -0.18831379D+02
         9       -0.45578815D+01
        10       -0.17116939D-18
```

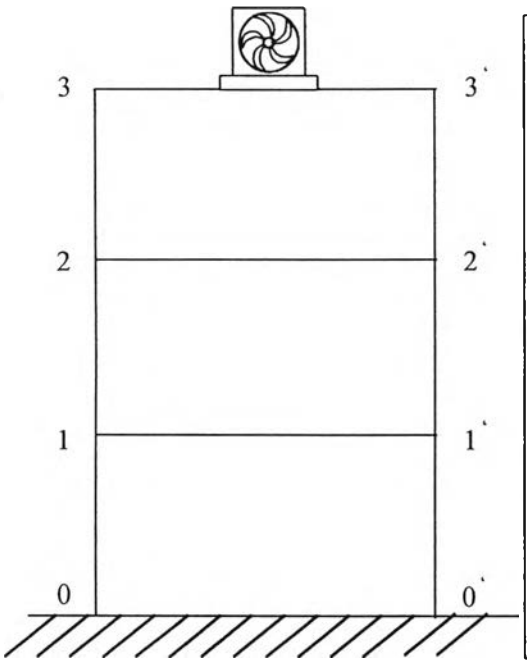
```
OMEGA(  9) =        0.34610378D+04 RAD/SEC.

      THE ASSOCIATED EIGENVECTOR IS:
         1        0.10000000D+01
         2        0.14823037D+00
         3       -0.12990056D+01
         4        0.11588669D-15
         5        0.16597346D+00
         6       -0.42491785D-15
         7       -0.10000000D+01
         8        0.14823037D+00
         9        0.12990056D+01
        10       -0.69278388D-06

      OMEGA( 10) =        0.71919809D+04 RAD/SEC.

      THE ASSOCIATED EIGENVECTOR IS:
         1        0.10000000D+01
         2        0.87623665D-01
         3       -0.13202921D+01
         4       -0.13792047D+01
         5        0.48858496D-16
         6       -0.85041606D+00
         7        0.10000000D+01
         8       -0.87623665D-01
         9       -0.13202921D+01
        10       -0.59684387D-22


       MODAL MASS          MODAL DAMP         MODAL STIFFNESS

      0.3427554E+14       0.2809774E+14       0.1699563E+16
      0.4523765E+02       0.2155928E+02       0.6421679E+04
      0.1312311E+11       0.2999444E+11       0.3187141E+14
      0.1800730E+03       0.8572940E+03       0.2550886E+07
      0.5701300E+07       0.3601436E+08       0.1337207E+12
      0.3963012E+03       0.5523605E+04       0.4811715E+08
      0.5071357E+04       0.3659500E+06       0.1649570E+11
      0.9064007E+04       0.6753468E+06       0.3144948E+11
      0.1490215E+02       0.2063213E+04       0.1785096E+09
      0.1932064E+02       0.5558146E+04       0.9993521E+09

       POSITION          MAX.DISPLACEMENT       MAX.VELOCITY
           1              0.3935441E-10       0.1180632E-07
           2              0.1555203E-09       0.4665608E-07
           3              0.1884197E-06       0.5652592E-04
           4              0.2672280E-18       0.8016839E-16
           5              0.3144107E-06       0.9432322E-04
           6              0.2355676E-19       0.7067028E-17
           7              0.3935441E-10       0.1180632E-07
           8              0.1555203E-09       0.4665608E-07
           9              0.1884197E-06       0.5652592E-04
          10              0.1852875E-04       0.5558624E-02
```

แสดงสมาชิกในแนวทแยงมุมของเมตริกซ์ที่ถูกลดรูปเป็นเมตริกซ์ทแยงมุมแล้ว ของระบบโครงสร้างรวมเครื่องจักรเท่านั้น

การขจัดสูงสุดและความเร็วสูงสุดของแต่ละพิกัด ทั้งของโครงสร้างและเครื่องจักรเนื่องจากภาระกระทำ

6.4 การเปรียบเทียบผลการคำนวณจากโปรแกรม TFRAME กับวิธีการอื่น

ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณปัญหาการสั่นสะเทือนของโครงสร้างอาคาร 3 ชั้น กับวิธีการสโลป-ดีเฟลคชัน (Slope-deflection Method) โดยนำข้อมูลมาจากรายการอ้างอิง [7] และรายละเอียดของวิธีการสโลปดีเฟลคชันนี้ได้สรุปไว้ในภาคผนวก จ. สำหรับปัญหาที่คำนวณนั้นมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ขนาดของโครงสร้างที่ใช้ในการคำนวณ

$l_{01} = l_{12} = l_{23} = 6$ เมตร

$l_{11'} = l_{22'} = l_{33'} = 5$ เมตร

$J_{01} = J_{12} = J_{23} = 1\times10^{-4}$ เมตร^4

$J_{11'} = J_{22'} = J_{33'} = 2\times10^{-4}$ เมตร^4

$\mu_{01} = \mu_{12} = \mu_{23} = 204$ กิโลกรัมต่อเมตร

$\mu_{11'} = \mu_{22'} = \mu_{33'} = 51$ กิโลกรัมต่อเมตร

E (ของเหล็ก) $= 210 \times 10^9$ นิวตันต่อเมตร^2

$P = mr\omega^2 = 2.53\times1.0\times62.8^2$ นิวตัน

รูปที่ 6-3 รายละเอียดของปัญหาที่ใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบ

ในการคำนวณด้วยโปรแกรม TFRAME ได้แบ่งโครงสร้างทั้งหมดออกเป็น 42 เอลิเมนต์มีจำนวน 41 จุดต่อ และมีจำนวนระดับขั้นความเสรีทั้งหมดเท่ากับ 117 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณแบบสโลป-ดีเฟลคชันในหนังสือได้ผลดังในตารางต่อไปนี้

วิธีการคำนวณ	ความถี่ธรรมชาติ						ผลตอบสนองสูงสุด	
	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6	แนวนอน	แนวตั้ง
TFRAME	8.37	25.84	42.45	103.74	125.47	147.07	5.92×10^{-4}	9.32×10^{-4}
SLOPE DF.	8.41	25.80	42.40	103.70	126.25	155.44	5.63×10^{-4}	9.00×10^{-4}
% DIFF.	0.50	0.16	0.12	0.04	0.62	5.53	5.11	3.50

ตารางที่ 6 – 1 เปรียบเทียบผลการคำนวณจาก TFRAME กับวิธีการ Slope Deflection Method

โดยที่ผลตอบสนองสูงสุดในแนวนอนและแนวตั้ง หมายถึงผลตอบสนองที่พิกัดกึ่งกลางของชั้นที่ 3 และจากการเปรียบเทียบพบว่าวิธีการคำนวณในโปรแกรม TFRAME ให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับวิธีการ Slope-deflection Method มากทั้งในส่วนของค่าความถี่ธรรมชาติและขนาดของผลตอบสนองสูงสุด ดังนั้นในบทถัดไปจะทำการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของโครงสร้างอาคารจากแรงไม่สมดุลของเครื่องจักร โดยอาศัยโปรแกรม TFRAME