

# FPHM & FPHM-D v5.10

## ユーザーズマニュアル

修行 稔

(長崎大学名誉教授 工博)

2024年3月5日

## 目次

1. はじめに	4
2. 繊維化塑性関節モデル (Fibered Plastic Hinge Model) の特長	5
3. FPHMの信頼性の検証	8
4. FPHMの入力データファイルの基本構造と解析例	9
(1) 標準モデルによる解析	9
(2) 補正モデルによる解析 (塑性変形低減係数 $r$ の導入)	17
5. 入力データの作成方法	19
(1) 骨組の要素への分割と節点座標値	19
(2) 要素両端の節点番号	19
(3) 断面形状, 寸法および材料定数	20
(a) 標準的な部材	20
(b) プレストレスト・コンクリート (PC) 部材	24
(c) 十字およびT字鉄骨内臓SRC部材	25
(d) スラブの影響を考慮したRCはり部材	26
(e) 偏心付与用の仮想の要素と欠番にする要素	27
(4) コードアングル	27
(5) 半剛接機能および特殊な部材の指定	28
(a) 半剛接接合	28
(b) 引張りブレース	29
(c) 鋼材制振ブレース (座屈拘束ブレース) およびトラス部材	30
(d) RCスラブ面内剛性置換ブレース	31
(e) 半剛接機能等に関する入力データの作成例	32
(6) 固定節点	34
(7) 初期荷重 (長期荷重)	35
(8) 荷重増分	35
(9) 解析の制御に用いる変位	36
(10) 除荷点の数と各除荷点の変位	36
(11) 出力する荷重と変位	36
6. FPHMの実行と結果の出力	38
(1) 入力データのチェックと初期荷重に対する解析結果 : s6.txt	39
(2) 荷重～変位関係 : s7.txt	46
(3) 骨組の降伏状況 : s8.txt	47
(4) 各要素の要素端力 : s9.txt	48
(5) 荷重～変位関係の最終点での要素端力 : s9.txt	49
7. FPHM-Dの使い方	50
7. 1 プログラムの概要	50

7. 2	2層1スパン門形平面ラーメンの振動解析例	51
(1)	入力データファイルの作成	51
(2)	骨組の固有振動数の計算	61
(3)	地動加速度データファイルの準備	62
7. 3	FPHM-Dの実行と結果の出力	63
(1)	入力データのチェック : d6.txt	64
(2)	指定した5つの層の層せん断力と層間変形角の時刻歴 : d7.txt と d10.txt	74
(3)	200ステップおきの骨組の降伏の進展状況, 各節点の座標値, 現時点 までの各層の変位・層間変形角・加速度・層せん断力の最大値 : d8.txt	74
(4)	200ステップおきの全要素の要素端力 : d9.txt	76
8.	グラフの作成 (gnuplot の導入)	78
9.	まとめ	84
10.	参考文献	86
<付録1>	要素の破壊判定値 $\eta$ の設定と破壊した要素の骨組からの除去および 不平衡力の解消	88
<付録2>	不平衡力の評価に用いる内力の計算方法の指定	91

著者は本プログラムの使用によって生じたいかなる損害にも責任を負いません。マニュアルの誤りや不備, 計算結果への疑問, ご希望などがありましたら下記までご連絡下さい。

電話 : 095-823-6165

E-mail : shugyo@nagasaki-u.ac.jp

## 1. はじめに

FPHM は、繊維化塑性関節モデル (Fibered Plastic Hinge Model) <sup>1)</sup> を実用化し、鋼部材・RC 部材・SRC 部材・CFT 部材・PC 部材・合成はり・引張りブレース・鋼材制振ブレース (座屈が防止され部材軸方向の塑性変形が卓越する部材)・トラス部材の混在する骨組の三次元的な大変形弾塑性解析を可能にした準静的増分解析プログラムである。大変形に起因する  $P\Delta$  効果をかなり厳密に評価しているので、骨組の保有水平耐力を正確に知ることができる。もちろん、平面骨組にも、骨組各節点の固定条件に注意が必要であるがそのまま使用できる。本モデルは基本的には塑性関節モデルであり、その特徴から繊維化塑性関節モデルと称している。鋼部材に関しては文献 1~7 に、RC, SRC, CFT 部材に関しては文献 8~10 にそれぞれ述べた仮定のもとに定式化されている。本モデルには要素の両端に接合部のコンプライアンスを付加させる機能 (半剛接機能) があるが、この機能を用いれば片側ピン接合や両端ピン接合の部材を簡単に設定でき、部材接合部や露出柱脚の回転剛性や耐力を解析に反映させることもできる。

FPHM-D は、FPHM を骨組復元力の算定に用いた大変形弾塑性動的応答解析プログラムである。当然、鋼部材・RC 部材・SRC 部材・CFT 部材・PC 部材・合成はり・引張りブレース・鋼材制振ブレース・トラス部材の混在する骨組の三次元的な地震応答解析を行うことができる。骨組の構造に関する情報の入力形式は FPHM と全く同じであるので、解析したい骨組をまず FPHM で準静的に弾塑性解析して結果を吟味し、骨組の構造に関する情報の入力データに間違いがないことを確認してから動的解析に必要な入力データを追加されるようお勧めする。

想定している PC は Windows 10 以降の 64bitOS 機で、Fortran で書かれたプログラムを Windows 11 上の gfortran (tdm-gcc の Web ページ <https://jmeubank.github.io/tdm-gcc/> からインストーラーをダウンロードしてインストール) でコンパイルして実行ファイルを得て、「FPHM & FPHM-D v5.10-64.zip」という名前でこのマニュアルとともに公開している。実行ファイルの名前は、FPHM (準静的解析) が s64.exe と ms64.exe, FPHM-D (動的解析) が d64.exe と md64.exe である。これらに加えて、簡素なフーリエ変換の実行ファイル ft64.exe を添付している。

これらの実行ファイルはバッチファイルを介して起動するが、起動した直後に PC が「.dll ファイルが見当たらない」とメッセージを出したときは、上記 Web ページから tdm-gcc パッケージをインストールする必要がある。インストールの方法は「gfortran のインストール.pdf」と題して別ファイルで添付している。

解析可能な骨組モデルの総節点数は s64.exe と d64.exe で 1200, ms64.exe と md64.exe で 600 である。

## 2. 繊維化塑性関節モデル (Fibered Plastic Hinge Model) の特長

弾塑性域における骨組部材の剛性を数学的に評価する要素モデルは、大まかに言ってファイバーモデル (fiber model) と塑性関節モデル (plastic hinge model) とに二分できる。

ファイバーモデルは図 1(a)に示すように 1 部材を 6 ないし 10 程度の要素に分割するとともに、各要素をもとの部材に等価になるような繊維の集合体に置き換え、荷重増分によって刻々と変化する各繊維の状況 (弾性域か、降伏しているか、あるいは除荷の状態か) を断面二軸方向と材軸方向に数値積分して、要素ひいては部材の剛性や内力を評価しつつ骨組全体の解析を進めるモデルである。当然、部材軸力の変動、二軸回りの曲げモーメントや H 形鋼などがねじられたときに生じる断面のそりの影響も考慮でき、精度の高いモデルである。しかし、1 部材だけでもかなりの数の繊維数となり、解析の各ステップで全繊維について数値積分を実行しなければならないため、計算量の多さに問題がある。加えて、このモデルではファイバーを弾性ひずみと塑性ひずみの混在する弾塑性状態で扱うため、骨組全体の釣り合い状態への収束のための繰返し計算において頻繁に生じる各ファイバーの除荷と負荷の管理が難しいという、より深刻な問題を抱えていると筆者は考えている。

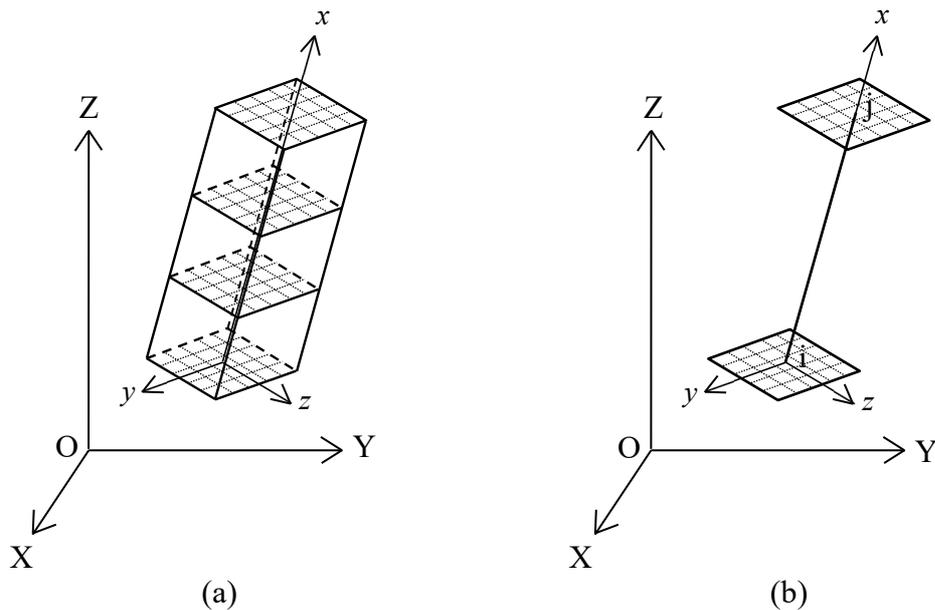


図 1 ファイバーモデル(a) と繊維化塑性関節モデル(b)

一方、塑性関節モデルは部材に生じる塑性変形を部材中の幾つかの点に集中させて評価するモデルである。簡略さと計算速度の速さに利点がある反面、このモデルを基礎とする既存の解析コードでは、骨組の塑性化で生じる大変形による耐力低下、変動する軸力と二軸曲げモーメントの相互作用の影響、部材の弾塑性的なねじり挙動、部材接合部の半剛接性などは必ずしも正確には評価されておらず、非対称断面材などへの適用は不可能に近い。

繊維化塑性関節モデル (Fibered Plastic Hinge Model) は上記二つのモデルの長所を組み合わせで開発されたもので、図 1(b)に示すように弾性変位増分は線材としての弾性接線剛性行列で評価し、塑性変形増分を繊維化した塑性関節の各繊維の構成式を根拠にして得られる塑性接線柔性行列で評価している。ここでの「繊維化」とは、要素両端の断面を微小に分割することを意味する。長さ 0 の繊維に分割する、とも言える。部材が H 形鋼であれば、モデル定式化に際しての仮定は以下のようなものである。

- (1) 部材は薄肉であり、断面はそり成分を除けば平面を保持する。
- (2) 骨組の節点変位は大きい部材の弾性ひずみは小さい。
- (3) 軸力、二軸曲げモーメントおよびそりモーメントによる軸方向応力が部材の降伏に寄与する。
- (4) 塑性変形成分は軸力、二軸曲げモーメントおよびそりモーメントに対応する4成分である。
- (5) 局部座屈はない。
- (6) 要素内では一般化塑性ひずみの増分は線形に分布する。
- (7) 要素の長さの1/2に生じる塑性変形増分はそれぞれ要素両端  $i, j$  の長さ零の塑性関節に集中して生じる。

部材が円形純鋼管と正方形純鋼管の場合は、上記の仮定(3)と(4)は以下のようなものである。

- (3) 軸力、二軸曲げモーメントによる軸方向応力および材軸回りのねじりモーメントによるせん断応力が部材の降伏に寄与する。
- (4) 塑性変形成分は軸力、材軸回りのねじりモーメントおよび二軸曲げモーメントに対応する4成分である。

部材がH形鋼でも純鋼管でもなければ、上記の仮定(3)と(4)は以下のようなものである。

- (3) 軸力と二軸曲げモーメントによる軸方向応力が部材の降伏に寄与する。
- (4) 塑性変形成分は軸力と二軸曲げモーメントに対応する3成分である。

H形鋼以外の部材では断面のそり変形を無視している。

鋼材の構成則はvon Misesの降伏条件とZieglerの移動硬化則に従い、降伏後のひずみ硬化係数はヤング率 $E$ の $\beta$ 倍一定のままであると仮定して定式化している。ここに $\beta$ は無次元化ひずみ硬化係数であり、データとして入力する。従って、曲げモーメントと材軸回りねじりモーメントの相互作用を考慮する純鋼管以外はbilinear形の構成則となる。コンクリートの構成則は図2に示すように初期の引張り強度を考慮し、劣化挙動のないtrilinear形を仮定している。

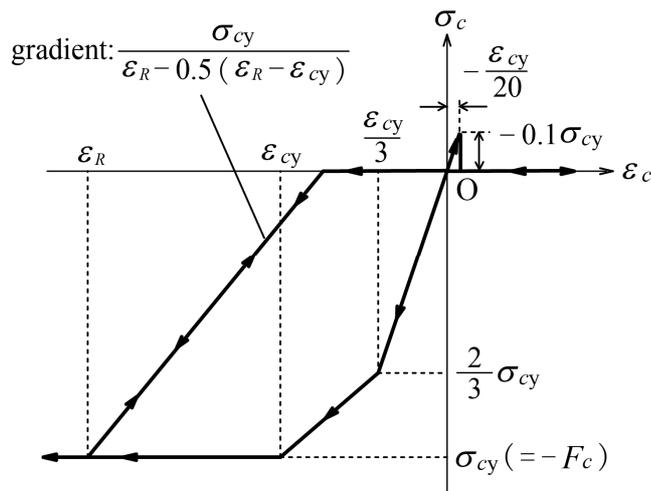


図2 コンクリートの構成則

以下に本モデルの特色と思われるところを列挙する。

- (1) 基本的には塑性関節モデルであり，要素の弾塑性接線剛性行列を導くのに必要な弾性接線剛性行列は陽な形で得られるので，解析手順は比較的簡素であり，計算時間を短くできる。
- (2) 塑性関節の塑性変形挙動を，塑性関節を繊維化してNewton-Raphson法で精密に追跡するので，各種の断面の一般化応力を引数とする降伏曲面のデータベースを必要とせず，原理的には任意の断面形状・寸法や使用材料に対応できる。また，要素断面を精細に繊維に分割するので，断面の各部寸法などの入力データでその要素の断面積や断面二次モーメントなどの断面定数，図心および断面主軸をプログラム内部で計算している。従って，本プログラムは各種断面の断面定数や図心および主軸の計算のみにも利用できる。
- (3) H形鋼部材のねじりによるそり変形が部材の降伏に及ぼす影響を考慮でき，純鋼管部材では材軸回りのねじり変形の塑性成分を，各繊維について軸力と二軸曲げによる垂直応力とねじりによるせん断応力を用いてvon Misesの降伏条件とZieglerの移動硬化則を適用して評価しているので，特に鋼管柱やH形鋼柱が大きなねじりモーメントを受ける場合に高い精度が期待できる。
- (4) 部材と部材の接合部あるいは柱脚が完全な剛接合でない場合，接合部の曲げモーメント～相対回転角の関係が分かっているならば，これを要素端コンプライアンスとして解析に導入できる。ピン接合や半剛接，接合部耐力も設定でき，鋼材制振ブレースやトラス部材，引張りブレースなども取り扱える。
- (5) 弾塑性域において収束計算を行わないので，大変位弾塑性解析に際して安定度が高い。

- (6) 弾塑性大変形時の骨組の内力を，骨組全体の残存弾性ひずみエネルギーの勾配として評価している．従って，大変位状態における不平衡力（内力と外力増分の総和との差）が正しく得られるとともに，これを解消して荷重～変形関係を自動的に釣り合い経路に引き戻す機能を持っている．

### 3. FPHM と FPHM-D の信頼性の検証

準静的解析のための FPHM の，鋼立体骨組の解析における信頼性については文献 1～7 を，RC 部材，SRC 部材および CFT 部材を含む骨組の解析での信頼性については文献 8～10 および 18～19 を，PC 部材を含む骨組の解析例については文献 14 と 22 を，合成はりを含む骨組の解析例については文献 17 と 20 を参照されたい．

一般によく行われる平面骨組解析での本モデルの精度も，キャリブレーション・フレームとして著名な Vogel の 6 層フレーム<sup>11)</sup>などを用いて，ファイバーモデルなど既存の高精度な要素モデルによる解析と本プログラムによる解析の結果を比較し，本モデルの標準である 1 部材 4 要素近似<sup>1)</sup>で解析すればファイバーモデルと同程度の精度を有することを確認している<sup>12)</sup>．なお，4 章の最後で示すように，塑性変形低減係数  $r$  を導入した「補正モデル」を使用することによって，1 部材 1 要素近似でも 1 部材 4 要素近似にかなり近い結果を得ることができる<sup>23)</sup>．

本解析法は，理論的には非対称を含む任意の断面形状および複数の材料からなる合成部材に対応できるが，現時点では図 9-1～図 9-5 に示す 16 種類の部材が適用対象である．露出柱脚や部材接合部の剛性や耐力の値が既知であればそれらを容易に設定できるが，壁には対応していないためブレースなどへの置換が必要である．また，部材のせん断破壊をプログラム内部では判断しないので，短い部材を有する骨組の場合は解析結果を十分に吟味する必要がある．

動的解析のための FPHM-D の信頼性については，E-ディフェンス（(独)防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター）で 2007 年に実施された「E-ディフェンス・ブラインド解析コンテスト 2007」の供試体である実大 4 層 2 スパン鋼骨組を対象とした三次元的な地震応答解析によって信頼性を確認している<sup>17)</sup>．また，2009 年に実施された「E-ディフェンス・ブラインド解析コンテスト 2009」では FPHM-D を用いた 5 層 2 スパン鋼骨組の解析がカテゴリー 1（鋼材ダンパー付き骨組の 3 次元解析）の 3 位に入賞している<sup>21)</sup>．

#### 4. FPHM の入力データファイルの基本構造と解析例

##### (1) 標準モデルによる解析

入力データファイルの基本構造を理解していただくために、図 3 に示す 1 層 1 スパンの門形平面ラーメンの解析に必要な入力データの内容を説明する。骨組の柱は角形鋼管で□-300×300×9、はりはH-400×200×8×13 である。本プログラムは、要素の断面形状と各部の寸法をデータとして与えれば、要素の端部を自動的に繊維に分割する。図 4 は柱とはりの断面の繊維への分割図である。

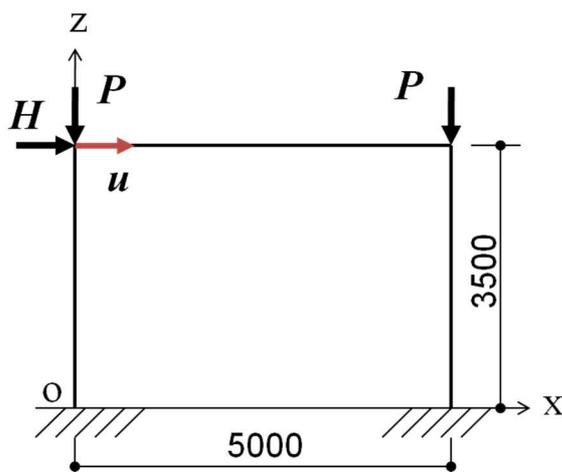


図3 解析骨組の形状、寸法および载荷状況と全体座標軸

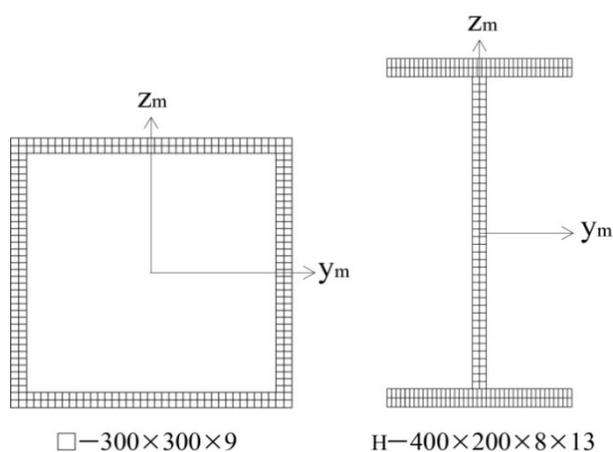


図4 柱とはりの断面の繊維への分割と部材（要素）座標軸

要素分割数の影響を見るために、1部材を1要素、2要素および4要素（本モデルの標準）の三種類の要素分割で解析する。本プログラムは、節点と節点の間に荷重がないときを対象として、1要素を自動的に2要素、3要素または4要素に増やす機能を持っているので、入力データとしては図5に示すように部材接合部を節点とする要素分割でのデータを準備すればよい。

ただし、部材の中間部に荷重が载荷されるときや分布荷重をいくつかの集中荷重に置換する場合には、荷重载荷点にも入力データで節点を設ける必要がある。図5において、普通の数字が節点番号、○付き数字が要素番号である。図5から各節点の座標値と要素両端の節点番号（例えば、要素①の両端の節点番号は1と2、要素②の両端の節点番号は2と3）を入力データとして作成する。節点の座標値にはY方向の値も必要なので注意を要する（この例の場合すべて0）。図6と図7はそれぞれ要素再分割数を2および4としたときの節点番号と要素番号である（これらのデータはプログラム内部で自動的に作られる）。

例えば要素再分割数を4とすると、図7で分かるようにその要素の長さを $L$ として $0.1L$ 、 $0.5L$ 、 $0.9L$ の点に新たに節点を増やし、要素番号も付け直される。入力データとの対応は全くなり、この新しい節点の座標値や要素と節点番号との関係は出力ファイルs6.txt（6章を参照）に書かれるので、解析結果を検討する際にはs6.txtの情報をもとにして行う必要がある。

各要素の断面形状や寸法および材料定数は5章の（3）で述べる方法でデータを作成し、各要素に割り当てる。

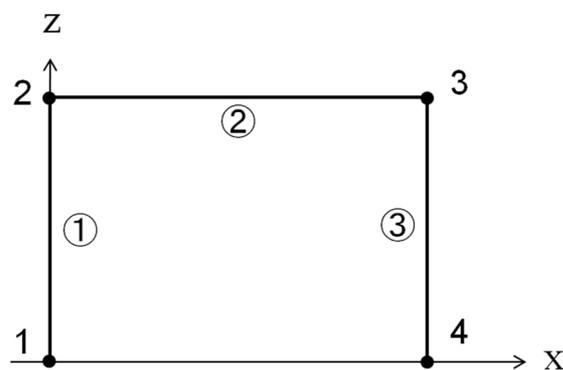


図5 1部材1要素近似でのモデル（入力データ）

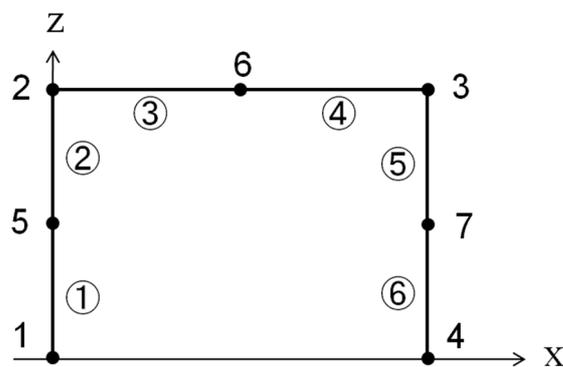


図6 再分割数を2と指定したときの解析モデル（プログラム内で作成）

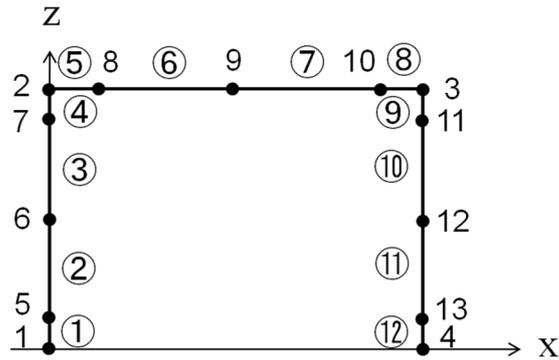


図7 再分割数を4と指定したときの解析モデル（プログラム内で作成）

本プログラムは骨組の三次元的な解析を基本としているので、入力データとして各要素のコードアングルが必要である。コードアングルの正確な定義については5章の（4）で説明するが、大雑把に言えば図4に示す要素座標系（材軸方向が $x_m$ ）の $z_m$ 軸と全体座標系（図3）のX軸とZ軸で作る平面とのなす角度である。このコードアングルの扱いを容易にするため、全体座標系として必ず図3のようにX軸を水平右方向に、Z軸を鉛直上方にとる。このとき、Y軸は紙面に垂直で読者から遠ざかる向きになることに留意されたい。このようにすると、ほとんどの場合要素のコードアングルは0となる。ただし、柱のコードアングルを0とすることで部材座標軸 $z_m$ 軸は全体座標系X軸とZ軸で作る平面に平行で、その正の方向は $y_m$ 軸の正方向がY軸の正方向に一致するときの方向になるので、計算結果から柱要素に生じている曲げモーメント分布を描くときには、この点に注意する必要がある。また、平面ラーメンの解析でH形鋼はりのコードアングルを $\pi/2$ （ $\approx 1.57079633$ ）と置くとH形鋼はりを弱軸で用いることになることが容易にわかる。

本プログラムは半剛接機能を持っているが、この例では半剛接機能は必要ないので、この機能については5章の（5）で説明する。半剛接機能を使わないときでも、半剛接機能を使っている要素数が0である旨をデータとして入れる必要がある。

次に、変位の固定条件であるが、このデータを作成するには一節点当たりの自由度に関する知識が必要となる。本プログラムは、三次元的な解析が基本であることに加えてH形鋼部材の材軸回りのねじり変形による断面のそり変形も考慮しているため、一節点当たりの自由度はX,Y,Z軸方向の変位 $U, V, W$ とX,Y,Z軸回りの回転角 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ および $\psi$ （そり変形に相当）の合計7になる。そり変形に相当する $\psi$ は通常の建築骨組ではすべての節点を固定に設定する。これを忘れると骨組全体の剛性マトリクスが特異になって解析不能になるから注意を要する。この例では、図3から明らかのように節点1と4が完全固定であり、XZ面内の挙動なので、節点1と4の $U$ 、節点1～4の $V$ 、節点1と4の $W$ 、節点1～4の $\theta_x$ 、節点1と4の $\theta_y$ 、節点1～4の $\theta_z$ 、節点1～4の $\psi$ を固定とする。入力データとしては、まず $U, V, W, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ および $\psi$ が固定されている節点の数をこの順番に1行で示し、その次の行からそれぞれ

れの節点番号を書く．ある変位についてすべての節点が固定の場合（この例題では $V$ や $\theta_x$ など）は，固定節点の数を-1とすればプログラム内部で全節点を固定に設定するので，節点番号の入力を省略することができる．

荷重のデータとしては，初期荷重（解析を通じて一定値の荷重）と荷重増分（解析中に増加していく荷重）が必要となる．線形弾性解析の場合は初期荷重のみとなるが，本プログラムは入力データを一気に読み込むので，荷重増分以下のデータも（実際には使用されないが）適当な数値を入力データファイルに書いておく必要がある．

図3中の $P$ は初期鉛直荷重である．初期荷重データは以下の手順で作成する．まず $X$ ， $Y$ ， $Z$ 方向への荷重 $F_x$ ， $F_y$ ， $F_z$ が載荷されている節点の数および各軸回りのモーメント $M_x$ ， $M_y$ ， $M_z$ が載荷されている節点の数（そり変形に対応する外力はない）計6個の数値を1行で示し，その次の行からそれぞれの節点番号とその節点に載荷する荷重値を書く．

図3中の $H$ は荷重増分の積算値である．荷重増分データの作成方法は初期荷重と同じであるが，荷重増分の値は相対的な値でよく，この例の場合一箇所しかないので「1」としてある．荷重増分が複数箇所に載荷される場合は，それらの比の値をデータとして入力する．

本プログラムでは変位制御型荷重増分法で解析を進める．そのため，制御に用いる変位を指定する必要がある．この例では図5の節点2の $X$ 方向変位 $U_2$ を制御用の変位としている．一般に，制御用変位には荷重が載荷されている節点の荷重の方向の変位を採用する．柱の座屈解析などでは横たわみを制御用変位にすることもある．制御用変位は全体座標系における自由度番号で指定する．この自由度番号は節点番号順に付けられる．従って，例えば節点1の $Z$ 方向変位の自由度番号は3，節点2の $X$ 方向変位の自由度番号は8となる（一節点当たりの自由度数が7であるから）．制御変位の大きさも必要であるが，制御変位を $10^{-8}$ 以下に指定するとプログラム内部で最適な値に自動的に設定する．

本プログラムは繰返し載荷に対応しているので，除荷の回数と各除荷点の変位（この変位は制御用変位）が必要になる．この例では繰返しのない単調載荷なので，除荷の回数は1，除荷点の変位（この場合，解析の終了点）を100mm（層間変形角で0.029rad）としている．

最後に，解析結果としてどの節点のどの方向の荷重～変形関係をファイルに出力するかを自由度番号で指定する．[荷重：変位]を一組として5組まで指定できる．この例では水平荷重 $H$ と柱はり接合部（節点2と3）の水平変位と鉛直変位を出力指定している．

以上の記述に従って，1要素（この例の場合は1要素が1部材）の再分割数を1（再分割しない）として作成した入力データファイルの内容を以下に示す．要素の再分割数として1～4が使えるが，再分割数を5とすると再分割は行わず1要素は1要素のままで「補正モデル」を用いた解析の指定となる．入力データファイルの先頭に要素再分割数，続けて骨組の全節点数と全要素数を書く．入力データの単位系は，全体が統一されていればSI単位系でも工学単位系

でも構わない。当然，解析結果も入力データと同じ単位系で出力される。筆者は荷重をN，長さをmmに換算して計算している。入力データファイルには引用符で挟まれたコメントも必ず入れなければならない。初期鉛直荷重  $P$  の値は  $P = 0.3P_y = 1,040,000$  (N) を用いている。ここに  $P_y$  は柱の降伏軸力である。なお，この入力データファイルの構造は，骨組の種類に関係なく，一部の特殊な部材を含む場合を除けばほぼ同じである。

-----ここから-----

' 1 要素の再分割数：再分割しない場合は 1，補正モデルは 5 '

1

' 節点数と要素数 '

4, 3

' 節点番号と節点の X, Y, Z 座標値 (mm) '

1, 0, 0, 0

2, 0, 0, 3500

3, 5000, 0, 3500

4, 5000, 0, 0

' 要素番号と要素両端 i, j の節点番号 '

1, 1, 2

2, 2, 3

3, 4, 3

' 断面形状の数 '

2

' 各要素の断面番号(要素番号順) '

1, 2, 1

' 断面 1 のデータ '

' S', 300, 300, 9, 9, 330, 210000, 0.01, 1.0

0, 0, 0, 0

0, 0, 0

0, 0, 0

' 断面 2 のデータ '

' H', 400, 200, 8, 13, 326, 210000, 0.01, 1.0

0, 0, 0, 0

0, 0, 0

0, 0, 0

' 各要素のコードアングル(要素番号順) '

0, 0, 0

' i 端が半剛接の要素の数 '

0

```

' j 端が半剛接の要素の数'
0
' 引張りブレースの数'
0
' 鋼材制振ブレースおよびトラス部材の数と要素番号'
0
' RCスラブ置換ブレースの数と要素番号'
0
' 固定節点の数 (U , V , W ,  $\theta_x$  ,  $\theta_y$  ,  $\theta_z$  ,  $\psi$  , の順) とその節点番号'
2, -1, 2, -1, 2, -1, -1
1, 4
1, 4
1, 4
' 初期荷重の数 (Fx , Fy , Fz , Mx , My , Mzの順) および節点番号と荷重値 (N) '
0, 0, 2, 0, 0, 0
2, -1040000
3, -1040000
' 荷重増分の数 (Fx , Fy , Fz , Mx , My , Mzの順) および節点番号と荷重の相対的な値'
1, 0, 0, 0, 0, 0
2, 1
' 解析の制御に用いる変位の自由度番号と増分変位の大きさ (mm) '
8, 1E-8
' 除荷点の数および除荷点の変位の値'
1
100
' 出力する荷重と変位の自由度番号(5組)'
8, 8, 8, 15, 8, 10, 8, 17, 8, 17
-----ここまで-----

```

このファイルはframe-s-2d.txt (sはstatic, 2dは平面骨組の意) という名前で添付している。なお、第6章の解析例では入力データファイルとして上記の内容に加えてはりの両端に半剛接 (semi-rigid) を設定したframe-s-2d-sr.txtを使用しているので注意を要する。

ここまで説明してきた要素モデルを「標準モデル」と呼ぶことにする。標準モデルでは要素の再分割数として1～4を指定することができる。

図8-1～図8-3に、それぞれ初期鉛直荷重が0,  $0.3P_y$  および $0.5P_y$  のときに要素の再分割数を1, 2, 3および4としたときの解析結果を示す。図の縦軸は節点2に載荷された水平荷重

(自由度番号8)，横軸は節点2の水平変位(自由度番号8)である。図から明らかなように，再分割数を1(1部材を1要素で近似)または2(1部材を2要素で近似)とすると水平荷重を低く評価する。この傾向ははりが先に降伏しても柱が先に降伏してもあまり変わらない。要素分割数を小さくすると水平荷重が低目になるのは，本モデルの定式化に際して用いた仮定(2章の仮定(6))によるものである。要素分割数を小さくして1要素の長さが大きくなると塑性変形を過大に評価する仕様になっている。言うまでもなく，1部材4要素近似のときが理論的には最も現実に近い結果となる。

この例では1部材1要素近似と1部材2要素近似の結果にはあまり差がなく，1部材4要素近似および1部材3要素近似よりも水平荷重を低く評価することがわかる。1部材1要素近似と1部材2要素近似の結果に大きな差がないのは，この骨組が剛接骨組で曲げモーメントの反曲点が部材の中央近くにあって，部材中央の節点に塑性変形が生じないためである。逆に言えば剛接骨組では部材中央部の節点は本解法ではあまり意味がない。1部材3要素近似はこの点を考慮して1部材4要素近似から部材中央の節点を除いて要素を1つ減らしたものであるが，図から明らかなように再分割数3での結果は同じく4の結果とほぼ一致している。一般には剛接骨組では再分割数4の代わりに3を用いても差し支えない。

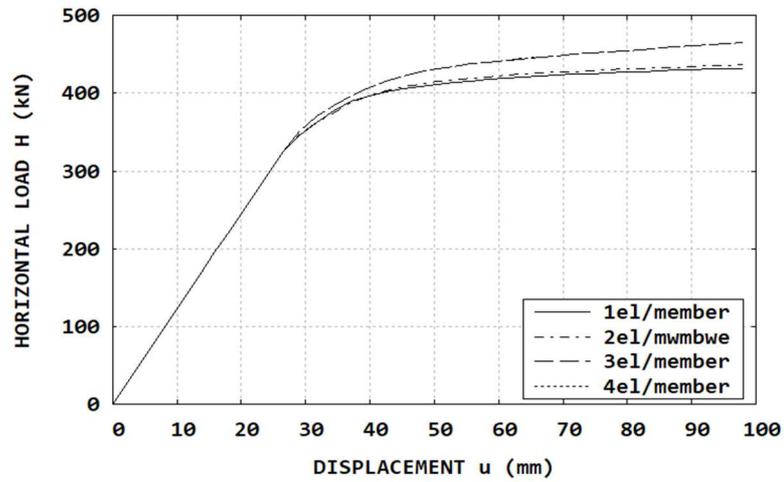


図8-1 水平荷重～水平変位関係の比較 (標準モデル :  $P=0$ )

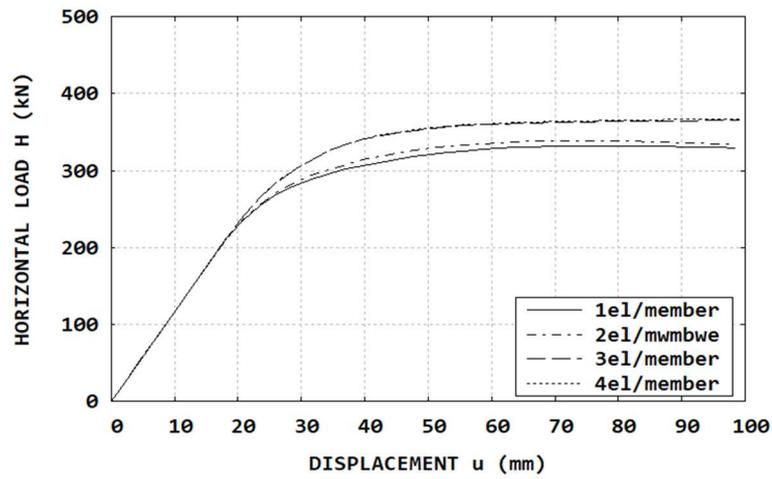


図8-2 水平荷重～水平変位関係の比較 (標準モデル :  $P=0.3P_y$ )

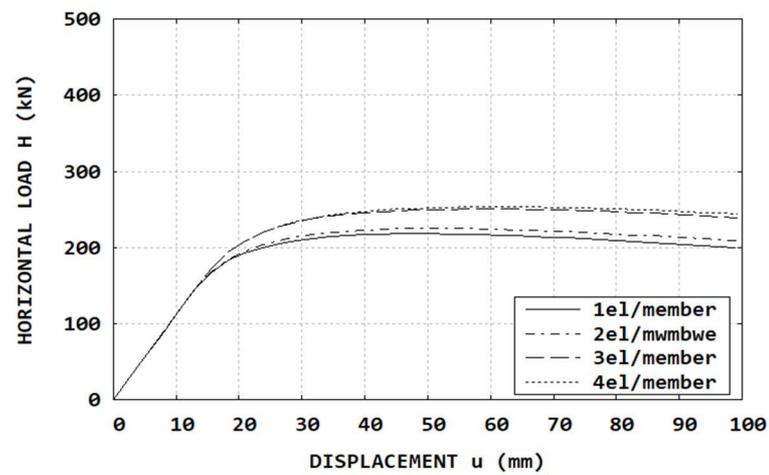


図8-3 水平荷重～水平変位関係の比較 (標準モデル :  $P=0.5P_y$ )

## (2) 補正モデルによる解析 (塑性変形低減係数 $r^{23}$ の導入)

上に述べたように、繊維化塑性関節モデルは定式化に際して導入した仮定 (2章の仮定 (6)) によって、1要素の長さが大きくなると曲げ変形の塑性成分を常に過大に評価する仕様になっている。すなわち、部材の要素分割数を小さくすると図 8-1~図 8-3 に示すように水平荷重を必ず低目に評価する。これは、本モデルの塑性変形成分をある比率で低減させれば1部材1要素近似の結果が1部材4要素近似での精解に近くなる可能性を示唆している。

ここで、塑性関節部の塑性変形量を低減する塑性変形低減係数  $r$  を新たに導入する。以下にこの  $r$  (プログラムでの変数名 VARSP (第5章の (3) 参照)) の最適値について述べる。

図 8-4~図 8-6 は、それぞれ初期鉛直荷重が  $0$ 、 $0.3P_y$  および  $0.5P_y$  のときの  $r$  (VARSP) の値が荷重~変形関係に及ぼす影響を示したものである。図 3 の骨組は柱降伏型であるが、はりを H-350×175×7×11 に換えてはり降伏型としたときの比較図が図 8-7~図 8-9 である。

これらの図から、 $r=0.3$  (VARSP=0.3) とすれば、1部材4要素近似の精解との水平荷重の差は骨組降伏の初期にはほとんどなく、解析の最終点  $u=105\text{mm}$  (層間変形角  $0.03\text{rad}$ ) で最も大きくなるのがわかる。その最大値は柱降伏型骨組で  $P=0.5P_y$  (図 8-6) のときの 4.0% である。これは十分に実用になる数値であると言える。ただ、これらは1層1スパンの純鉄骨平面骨組のみでの結果なので、複数の多層立体骨組についての三次元的な静的および動的な解析を行って検討を進めてきた。その結果も含めて、1部材4要素近似の精解に総合的に最も近い結果を出す値として  $r=0.3$  を推奨する。この  $r$  の値に関する検討の詳細については文献 23 を参照されたい。

なお、上記の  $r$  の推奨値 0.3 は塑性変形が部材端に集中する部材に対してのものである。骨組に剛接または半剛接で接合されている K 形ブレース材のように軸力が卓越して弾塑性座屈する可能性のある部材は、 $r=1.0$  (VARSP=1.0, 塑性変形の低減なし: 標準モデルと同等) と指定して当初から4要素程度に分割しておく必要がある。曲げ部材か軸力部材か判断に迷うときや、はり部材を複数の要素でモデル化するときも同様である。

以後、この塑性変形低減係数  $r$  を導入した要素を「補正モデル」と呼ぶ。実用的にはこのモデルで十分であると考えている。前記の入力ファイル `frame-s-2d.txt` (「標準モデル」を用いた1部材1要素近似) を  $r=0.3$  の「補正モデル」による1部材1要素近似に変更したものを `frame-s-2d-mod.txt` (modは補正の意) という名前で添付している。

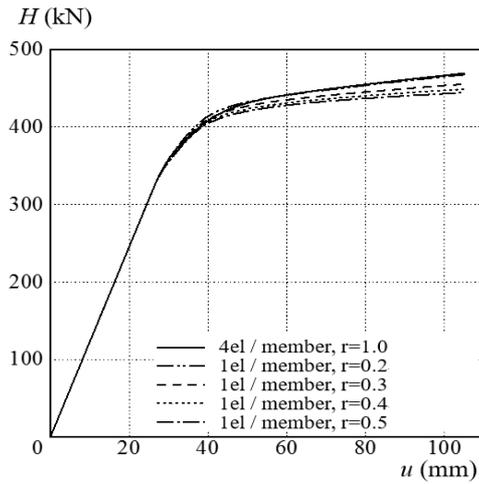


図 8-4  $H \sim u$  関係の比較 ( $P=0$ )  
(柱降伏型骨組)

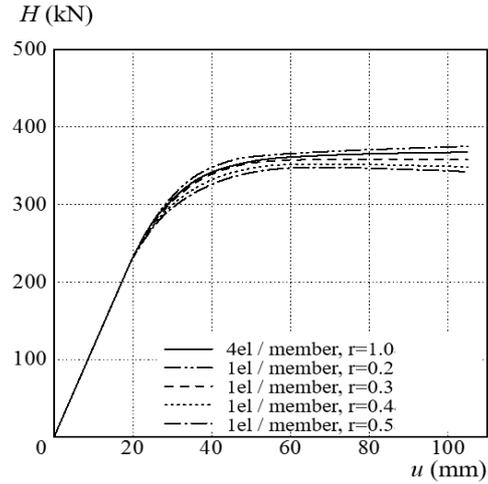


図 8-5  $H \sim u$  関係の比較 ( $P=0.3P_y$ )  
(柱降伏型骨組)

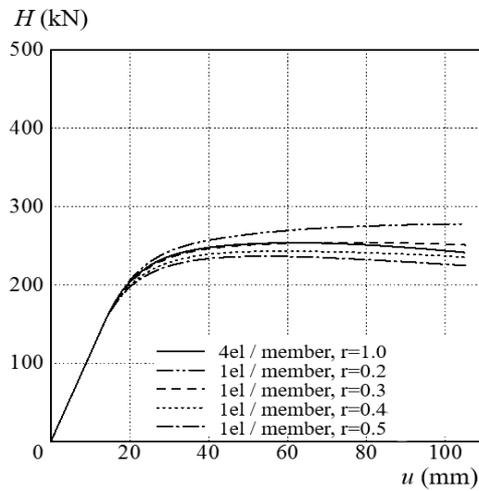


図 8-6  $H \sim u$  関係の比較 ( $P=0.5P_y$ )  
(柱降伏型骨組)

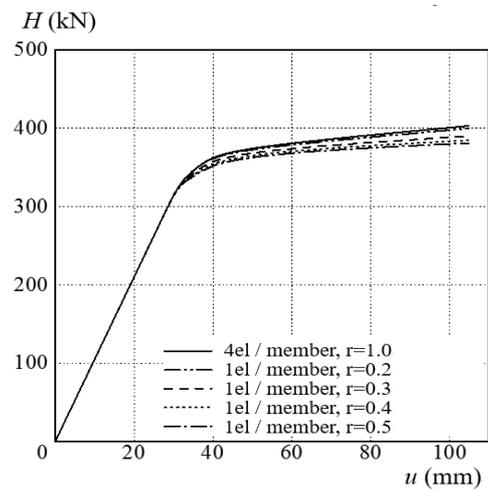


図 8-7  $H \sim u$  関係の比較 ( $P=0$ )  
(はり降伏型骨組)

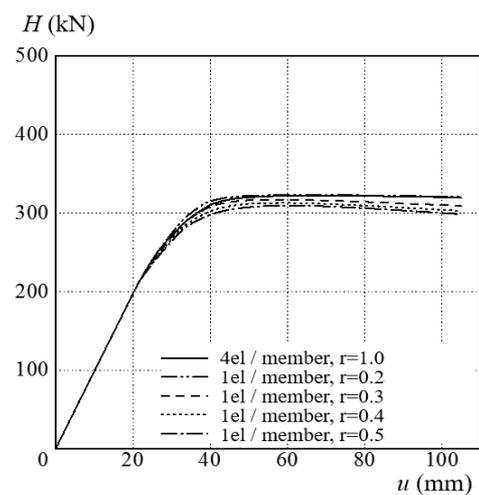


図 8-8  $H \sim u$  関係の比較 ( $P=0.3P_y$ )  
(はり降伏型骨組)

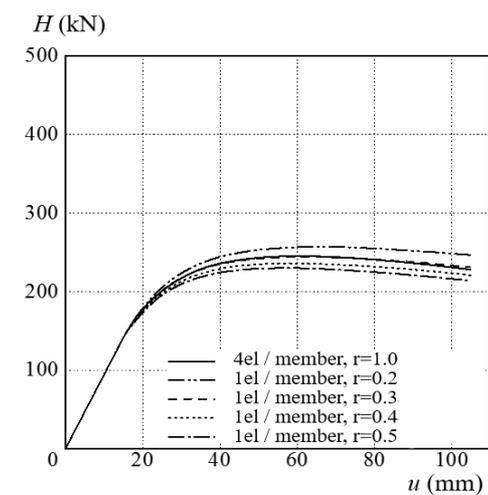


図 8-9  $H \sim u$  関係の比較 ( $P=0.5P_y$ )  
(はり降伏型骨組)

## 5. 入力データの作成方法

入力データファイルの冒頭で要素の再分割数（1～4）または補正モデルの使用（5）を指定する。

### （1）骨組の要素への分割と節点座標値

解析したい骨組に対して全体座標軸の X 軸を水平右向きに、Z 軸を鉛直上向きに設定する。原点はどこでもよい。骨組の部材を線材と見なし、原則として部材の図心の交点を節点として各節点に節点番号を付け、X, Y, Z 座標値を求める。節点番号の順序に制限はない。節点は原則として部材接合部や荷重載荷点にとる。前章の解析例では入力データは以下のようになる。

’節点番号と節点の X, Y, Z 座標値’

1, 0, 0, 0

2, 0, 0, 3500

3, 5000, 0, 3500

4, 5000, 0, 0

なお、これらのデータは節点番号 1 を先頭にして必ず節点番号順に書く必要があり、欠番があってはならない。入力データ作成後に欠番にしたい節点が見つかったときは、その節点番号に適切な座標値を書いておき、その節点のすべての変位を固定すればよい（(6) 固定節点の項参照）。

### （2）要素両端の節点番号

各要素に適当に要素番号を付け、要素番号と要素両端の節点番号を関係付ける。前章の解析例では入力データは以下のようになる。

’要素番号と要素両端 i, j の節点番号’

1, 1, 2

2, 2, 3

3, 4, 3

これらのデータも要素番号 1 を先頭にして必ず要素番号順に書く必要があり、欠番があってはならない。入力データ作成後に欠番にしたい要素が見つかったときは、その要素の降伏応力を  $10^8$ 、ヤング率を 0 に設定すればよい（(3) 断面形状、寸法及び材料定数の項参照）。平面骨組が解析対象の場合、柱部材の要素では下端を i 端、上端を j 端に、はり部材の要素では左端を i 端、右端を j 端にすれば、すべての要素で要素座標系の  $y_m$  軸が紙面に垂直で読者から遠ざかる方向に向くので、計算結果から曲げモーメント分布図などを描くときに便利である。

### (3) 断面形状, 寸法及び材料定数

#### (a) 標準的な部材

上記(2)で要素番号を付けた各要素がどのような断面形状・寸法と材料定数を有するかをデータで指定する。断面に関して必要な入力データには変数名が与えられている。表1に基本的な変数名とその内容を示す。

表1 部材断面に関する変数名とその意味

変数名	意味
<i>CSEC</i>	断面形状の名前 (文字変数)
<i>D,B,WTHK,FTHK</i>	鋼材の寸法に関する変数
<i>SYSS</i>	鋼材の降伏応力
<i>E</i>	鋼材のヤング率
<i>HARD</i>	鋼材の無次元化ひずみ硬化係数 $\beta$
<i>VARSP</i>	塑性変形低減係数 $r$
<i>CD,CB</i>	コンクリートの寸法に関する変数
<i>CYSS</i>	コンクリートの降伏応力
<i>CE</i>	コンクリートのヤング率

各断面形状に与えられている名前 (文字定数: これを変数 *CSEC* に読み込まれる) とその各部の寸法の変数名との対応を図9-1に示す。文字定数とは、図中に書いてあるように、引用符 (シングルクォート) でアルファベットを挟んだものである。要素座標系の  $x_m$  軸は材軸方向であり、 $y_m$  と  $z_m$  は図中に示すように設定している。変数 *CSEC* に 'C' (円形鋼管) または 'S' (角形鋼管) が入っているときは、コンクリートの降伏応力が0であれば純鋼管、0以外の数値が入っていれば、それぞれコンクリート充填円形鋼管またはコンクリート充填角形鋼管と判断する。変数 *CSEC* に 'P' が入っていれば中実の角形鋼棒となるが、断面のせい ( $D$ ) が幅 ( $B$ ) に対して十分に小さいときは細長い板として扱う。ただし、いずれも断面のそりは無視している。

図9-1中の要素座標軸  $y_m$  と  $z_m$  は必ずしも断面の主軸には一致していない。各要素の断面積や断面二次モーメントなどの断面定数と断面主軸は、表1の入力データを用いてプログラム内部で計算され、6章で述べるように *s6.txt* というファイルに出力される。従って、本プログラムは各種断面の断面定数、図心および断面主軸の計算のみにも利用できる。なお、本章(4)で説明するコードアングルの入力データとしては、図9-1で設定した  $z_m$  軸で評価した値を用いなければならない。真のコードアングルはプログラム内部で断面主軸を計算した後に再設定される。

塑性変形低減係数  $r$  (*VARSP*)は、入力データファイルの先頭にある「1要素の再分割数」が5のとき (補正モデルの指定) にのみ意味を持つ変数で、骨組の柱やはりのように曲げが卓越する部材であれば0.3、ブレースのように軸力が卓越して弾塑性座屈する可能性のある部材は、その

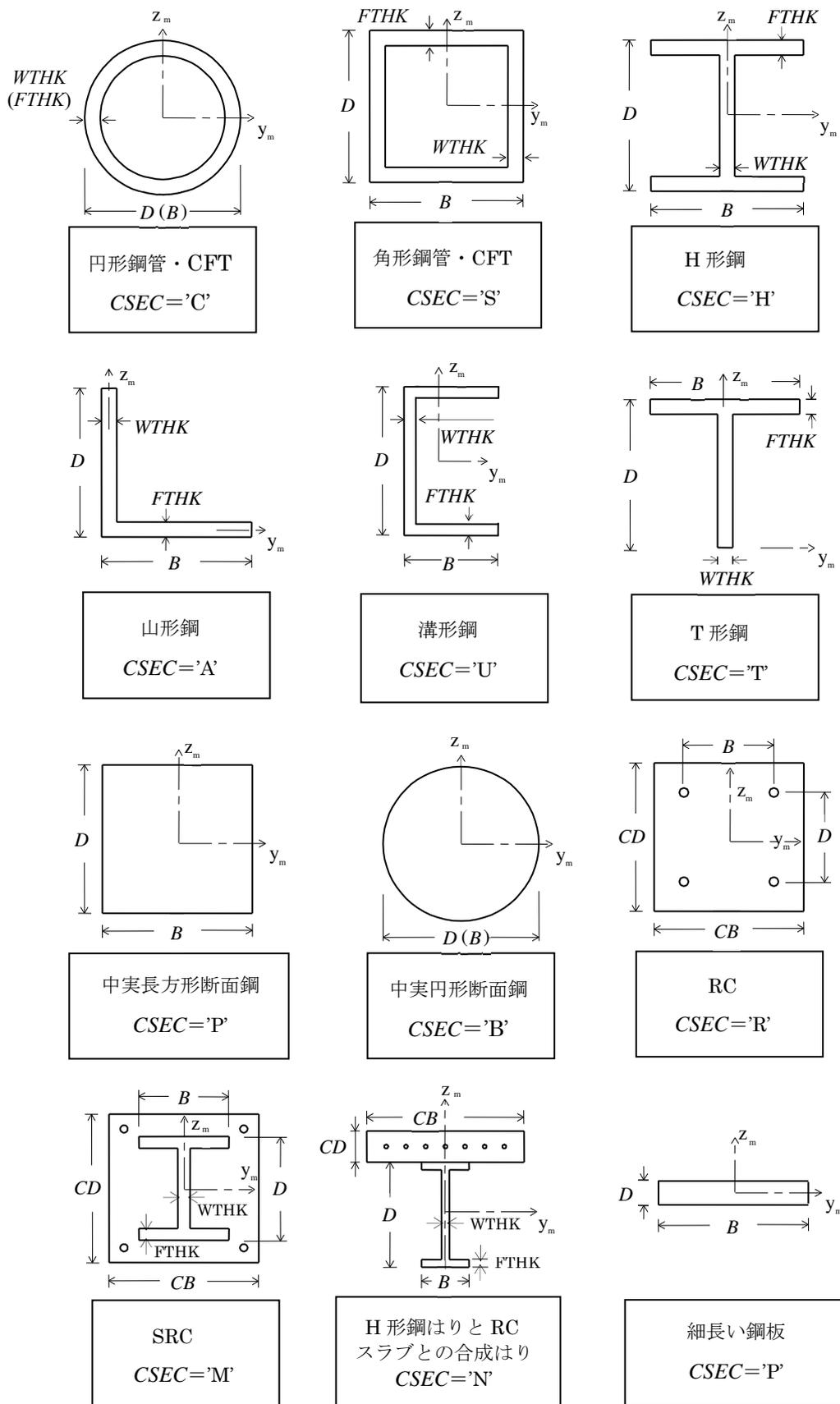


図 9-1 各種断面とその寸法の変数名との対応

部材だけ当初から直接 4 要素で近似してそれらの *VARSP* を 1.0 (標準モデルと同等) とすればよい。各要素への断面の割り当ては以下のように行う。(ア) まず使用する断面の種類の数を書き、(イ) 次に各要素に割り当てる断面番号を要素順に書き、(ウ) 続いて断面番号 1 から順に断面のデータを書く。断面のデータは、1 行目が主として鋼部材のデータで順次 *CSEC, D, B, WTHK, FTHK, SYSS, E, HARD, VARSP* に対応している。H 形鋼のようにフランジとウェブで降伏応力が異なるときは、*SYSS* の値として強度に主として寄与するフランジの値を筆者は用いている。2 行目はコンクリートのデータで、順に *CD, CB, CYSS, CE* の値である。コンクリートの降伏応力 *CYSS* としては、圧縮強度 *Fc* の値をそのまま用いる。コンクリートの初期弾性係数 *Ec* は次式で評価するが<sup>15)</sup>、他の参考資料の値を用いてもよい。

$$E_c = 20580\sqrt{0.05F_c} \quad (\text{N/mm}^2)$$

3 行目以降は鉄筋に関するデータ、その後にカーボンあるいはその他の補強ファイバーに関するデータを書く。前章の例では、角形純鋼管を断面 1、H 形鋼を断面 2 として入力データを作成しており、使っている要素は塑性変形を低減しない標準モデルで、いずれもコンクリートを含んでおらず鉄筋も補強ファイバーも無いので以下のようにになっている。

' 断面の種類の数 '

2

' 各要素の断面番号 (要素番号順) '

1, 2, 1

' 断面 1 のデータ '

' S', 300, 300, 9, 9, 330, 210000, 0.01, 1.0 (*CSEC, D, B, WTHK, FTHK, SYSS, E, HARD, VARSP*)

0, 0, 0, 0 (*CD, CB, CYSS, CE*)

0, 0, 0 (*NELMR, RYSS, RE*)

0, 0, 0 (*NELMF, FYSS, FE*)

' 断面 2 のデータ '

' H', 400, 200, 8, 13, 326, 210000, 0.01, 1.0 (*CSEC, D, B, WTHK, FTHK, SYSS, E, HARD, VARSP*)

0, 0, 0, 0 (*CD, CB, CYSS, CE*)

0, 0, 0 (*NELMR, RYSS, RE*)

0, 0, 0 (*NELMF, FYSS, FE*)

鉄筋と補強ファイバーのデータ入力方法についてはこの後に詳しく述べるが、本例から分かるように鉄筋がなければ 0 を 3 個、補強ファイバーがなければ同じく 0 を 3 個並べればよい。なお、角形鋼管 (柱) の降伏応力を  $330\text{N/mm}^2$ 、H 形鋼 (はり) の降伏応力を  $326\text{N/mm}^2$  に仮定しているが、特に理由はない。一般的な値として適当に決めたものである。この例には含まれていな

いが、断面形状や寸法が同じであっても材料定数が異なるときは別の断面として扱う必要があることに留意されたい。もし、断面 1 のデータの *CYSS* に対応するところに 0 でない数値（例えば-21）が書かれていれば、角形純鋼管ではなく降伏応力-21N/mm<sup>2</sup>のコンクリートが充填されたコンクリート充填角形鋼管（CFT）であると判断する。このときは、*CD*と*CB*は0のままでもいいが、*CE*には充填コンクリートのヤング率を入れておかなければならない。

表 2 は部材に鉄筋や補強ファイバーシートが含まれている場合に意味を持つ変数名である。RC 部材、SRC 部材、合成はり部材、PC 部材（後述）、鉄筋を有する CFT 部材、を扱うときに必要となる入力データである。表 2 中の「座標」の原点は図 9-1 と図 9-5 に示してある。図 9-2 の PC 部材や図 9-3~9-4 の SRC 部材ではコンクリート断面の図心が原点である。補強ファイバーシートは現時点では RC 部材のみをサポートしている。

表 2 鉄筋と補強繊維シートに関する変数名とその意味

変数名	意味
<i>NELMR</i>	鉄筋の本数
<i>RYSS</i>	鉄筋の降伏応力
<i>RE</i>	鉄筋のヤング率
<i>RU</i>	鉄筋の重心の座標（ <i>y<sub>m</sub></i> 軸方向）
<i>RV</i>	鉄筋の重心の座標（ <i>z<sub>m</sub></i> 軸方向）
<i>RAREA</i>	鉄筋の断面積
<i>NELMF</i>	補強繊維の本数
<i>FYSS</i>	補強繊維の降伏応力
<i>FE</i>	補強繊維のヤング率
<i>FU</i>	繊維の重心の座標（ <i>y<sub>m</sub></i> 軸方向）
<i>FV</i>	繊維の重心の座標（ <i>z<sub>m</sub></i> 軸方向）
<i>FAREA</i>	補強繊維の断面積

下記の断面データは、*CSEC='R'*（鉄筋コンクリート）のときの入力データの例である。*WTHK* や *FTHK* のように寸法がない場合は 1 と入力する。*SYSS* と *E* にはそれぞれ *RYSS* と *RE* の値を入れておく。

'断面 3 のデータ'

'R', 780, 280, 1, 1, 294, 206000, 0.01, 1.0      (*CSEC,D,B,WTHK,FTHK,SYSS,E,HARD,VARSP*)  
 900, 400, -18, 19500      (*CD,CB,CYSS,CE*)  
 14, 294, 206000      (*NELMR,RYSS,RE*)  
 140, 390, 491      (*RU,RV,RAREA*)  
 46.7, 390, 491      (*NELMR* の数の行がある)

-46.7, 390, 491  
 . . .  
 46.7, -390, 491  
 -46.7, -390, 491  
 -140, -390, 491  
 0, 0, 0

(*NELMP, FYSS, FE*)

上記のデータ中の  $D$  と  $B$  はそれぞれ最外縁の主筋の図心間の距離,  $CD$  と  $CB$  はそれぞれコンクリート断面の外形寸法であることに注意されたい。

最後の行は部材に補強ファイバーシートが貼付されていないことを意味する。補強ファイバーシートが貼付されているときは、補強ファイバーシートを例えば 10mm 幅に分割してそれぞれを 1 本の補強繊維に置き換え、その補強繊維の情報を鉄筋と同様に入力すればよい。

(b) プレストレスト・コンクリート (PC) 部材<sup>14)</sup> ( $CSEC='D'$ )

PC 部材では PC 鋼棒に初期緊張力を導入するため、入力データにもこれらの情報が必要となる。しかし基本的には RC 部材であり、これに PC 鋼棒が追加されたと考えれば、必要な追加情報は、PC 鋼棒の本数  $NELMP$ 、同じく降伏応力  $PYSS$ 、ヤング率  $PE$ 、PC 鋼棒の ( $y_m, z_m$ ) 座標値 ( $PU, PV$ )、断面積  $PAREA$ 、降伏応力に対する初期緊張力の割合  $PRETEN$  である。

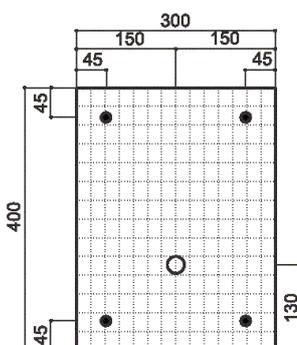


図 9-2 PC 部材の配筋例

図 9-2 は最もシンプルな PC 部材の断面である。●は鉄筋、○は PC 鋼棒を示す。下記の断面データは図 9-2 の入力データである。赤い文字が追加情報データである。 $SYSS$  と  $E$  にはそれぞれ  $PYSS$  と  $PE$  の値を入れておく。

'断面 4 のデータ'

'D', 310, 210, 1, 1, 1004, 206000, 0.01, 1.0 (*CSEC, D, B, WTHK, FTHK, SYSS, E, HARD, VARSP*)  
 1, 1004, 206000 (*NELMP, PYSS, PE*)  
 0, -70, 506.7, 0.8 (*PU, PV, PAREA, PRETEN*)

400, 300, -24.7, 22887 (CD, CB, CYSS, CE)  
 4, 328, 177000 (NELMR, RYSS, RE)  
 105, -155, 126.7 (RU, RV, RAREA)  
 -105, -155, 126.7 (NELMR の数の行がある)  
 105, 155, 126.7  
 -105, 155, 126.7  
 0, 0, 0 (NELMF, FYSS, FE)

(c) 十字およびT字鉄骨内臓 SRC 部材<sup>18)19)</sup> (CSEC='O' および CSEC='Q')

標準的な SRC 部材として当初図 9-1 の左下に示すように CSEC='M' として断面を準備したが、その後、図 9-3 および図 9-4 のように十字形鉄骨および T 字形鉄骨を内蔵した SRC 部材に対応した。それぞれ CSEC は 'O' と 'Q' である。これらの断面はプログラム内部で図のように繊維に分割される。入力データの形式を 'M' の場合に揃えるため、以下のような制限を設ける。

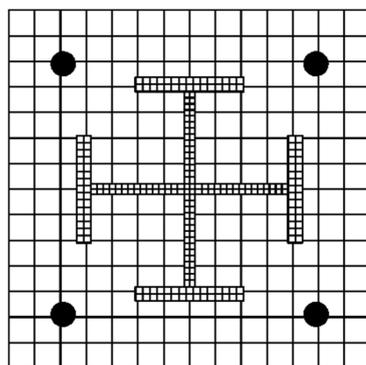


図 9-3 十字鉄骨内臓 SRC<sup>18)</sup>

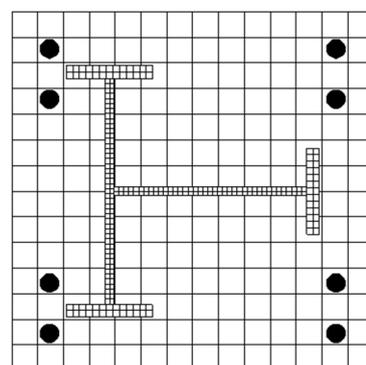


図 9-4 T 字鉄骨内臓 SRC<sup>19)</sup>

1. コンクリート断面は正方形とする。コンクリート断面の図心を原点として横方向に  $y_m$  軸，縦方向に  $z_m$  軸をとる。
2. 十字形鉄骨は全く同じ形状の H 形鋼がウェブ中心で接合されて一体化されているものとし，T 字形鉄骨は 3 枚のフランジが同じ板厚と幅 ( $B$ ) を有し，ウェブの板厚もすべて同じで，左側の H 形鋼の断面のせい ( $D$ ) と，この H 形鋼のフランジの左端から右側のフランジ外側表面までの距離が等しいものに限定する。この限定によって，必要な入力データは 'M' の場合と全く同じになる。鉄筋の場所や本数は任意である。

なお，H 形鋼内臓の 'M' の場合も含めて，SRC 部材の解析では内臓鉄骨と鉄筋のヤング率が異なるときは，断面に関する収束計算の速度の関係からプログラム内部で両者のヤング率を両者のヤング率の平均値に等しく再設定しているのに注意を要する。この再設定が部材剛性の評価に及ぼす影響については，SRC 部材には断面平面保持仮定からのずれなどの他の不確定要因も考えられることから無視している。

(d) スラブの影響を考慮した RC はり部材 ( $CSEC='F'$ )

RC の柱やはりについては、図 9-1 中に示すように  $CSEC='R'$ として長方形断面を準備したが、はりの曲げに対する床スラブの効果を、スラブの有効幅を考慮して評価したい場合もある。そこで、図 9-5 のように左右対称にスラブを付加した断面に対応した、 $CSEC='F'$ とする。

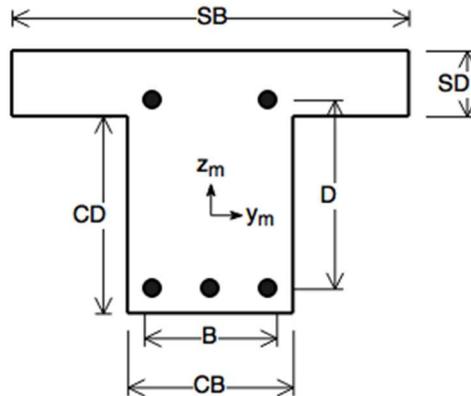


図 9-5 スラブの影響を考慮した RC はり

基本的には  $CSEC='R'$ のときと入力データの作り方は共通している。

1. もとものの長方形断面はりの図心を原点として横方向に  $y_m$  軸，縦方向に  $z_m$  軸をとる。
2. 最も外側の主筋の図心間の距離をそれぞれ  $D$ ,  $B$ とする。ちなみに鉄筋の総数には制限はない。
3. 長方形断面部分の寸法をそれぞれ  $CD$ ,  $CB$ とする。
4. スラブ厚を  $SD$ , スラブの有効幅を  $SB$ とする。

入力データの例を以下に示す。赤い文字が追加情報データである。

'断面 5 のデータ'

'F', 310, 210, 1, 1, 370, 175000, 0.01, 1.0 ( $CSEC, D, B, WTHK, FTHK, SYSS, E, HARD, VARSP$ )  
 400, 300, -24.7, 22887 ( $CD, CB, CYSS, CE$ )  
 80, 400 ( $SD, SB$ )  
 5, 370, 175000 ( $NELMR, RYSS, RE$ )  
 105, -155, 506.7 ( $RU, RV, RAREA$ )  
 0, -155, 506.7 ( $NELMR$  の数の行がある)  
 -105, -155, 506.7  
 105, 220, 506.7  
 -105, 220, 506.7  
 0, 0, 0 ( $NELMF, FYSS, FE$ )

なお、プログラム内部で長方形断面部分を  $14 \times 14$ 、スラブを  $4 \times 14$  に繊維分割している。

#### (e) 偏心付与用の仮定の要素と欠番にする要素

##### (i) 偏心付与用の仮定の要素

解析に際して部材にわずかな偏心を与えたいときなどは、偏心を与える要素の断面として断面サイズまたはヤング率の大きい  $CSEC='P'$  を指定し、降伏応力  $SYSS$  を  $10^8$  とする。 $SYSS$  を  $10^8$  とすると要素の塑性的挙動のチェックを行わないので安定した解析ができる。

##### (ii) 欠番にしたい要素

本章の(2)で述べたが、入力データ作成後に欠番にしたい要素が見つかったときは、その要素専用の断面を例えば  $CSEC='P'$  で別に作り、その降伏応力  $SYSS$  を  $10^8$  とし、ヤング率を 0 に設定する。この断面を有する要素は解析にまったく寄与しない。

#### (4) コードアングル

立体骨組構造物の解析では、各部材の要素座標系 ( $x_m, y_m, z_m$  座標系：図 9-1 参照) で求めた剛性マトリクスを全体座標系 ( $X, Y, Z$  座標系) に変換するために、要素座標系が全体座標系となす角の方向余弦が必要である。それを求めるための情報として、各要素のコードアングル  $\alpha$  をデータとして与えなければならない。コードアングルは、以下の手順で求めることができる。

1.  $x_m$  軸に垂直な平面  $P$  を考え、その平面上で  $X$  軸と  $Z$  軸で作る平面に平行な軸  $Z'$  (正負の方向は未定) を決める。
2.  $x_m$  軸、 $Z'$  軸と右手系をなし、正方向が  $Y$  軸の正方向を向くように  $Y'$  軸を定める。これによって  $Z'$  軸の正方向が決まる。
3. 平面  $P$  上で  $Z'$  軸から  $z_m$  軸に反時計回りに測った角度  $\alpha$  がコードアングルである。

$y_m$  軸と  $z_m$  軸は本来断面の主軸方向にとらなければならない。例えば等辺山形鋼の主軸は断面を「く」のように見たときに中央を通る水平線が強軸、断面の図心を通ってこれに垂直な線が弱軸となるが、本プログラムでは等辺不等辺を問わず、プログラム内部で主軸を求めて計算し直している。山形鋼でも図 9-1 に示す  $z_m$  を基準にして求めたコードアングルを入力しなければならない。ただし、解析結果の部材の曲げモーメントはこの計算し直した主軸回りの値になっているので注意を要する。前章の解析例で述べたように、建築骨組の解析ではほとんどの要素に関して  $Z'$  軸と  $z_m$  軸を一致させることができ、コードアングルを 0 にすることができる。

なお、 $x_m$  軸と  $Y$  軸の方向が一致するときは  $Z'$  軸が不定となるが、このときは  $Z$  軸から  $z_m$  軸に反時計回りに測った角度がコードアングルとなる。

## (5) 半剛接機能および特殊な部材の指定

### (a) 半剛接接合

本モデルでは、半剛接機能を利用して接合部をピンを含む任意の半剛接と仮定した解析が行える。接合部の耐力も設定できる。要素自体の材料定数などは(3) 断面形状、寸法及び材料定数のところで設定しておき、それに加えて以下に述べる機能を指定することになる。i, j 端ともに下記の2種類の指定ができる。

機能番号	0	接合部回転コンプライアンスのみ設定可能
機能番号	1	接合部回転コンプライアンスと接合部曲げ耐力が設定可能

機能番号「0」は接合部（柱脚を含む）が降伏しないことが自明で回転剛性の変化のみを考慮するときに使用する。機能番号「1」は接合部（柱脚を含む）の回転剛性の変化に加えて曲げ耐力まで考慮するときに使用する。耐震診断などでは機能番号「1」の機能はかなり有用であろうと思われる。

説明の都合上機能番号「1」の設定に必要な4個の物理量についてまず説明する。機能番号「1」では基本的に図10に示す一定圧縮軸力下での露出柱脚の力学的特性（ベースプレートが十分に剛強であるときのダブルフラグ形の復元力特性）を念頭に置いている。図の縦軸  $M$  は曲げモーメント、横軸  $\theta$  は回転角である。この特性を規定するためには図中にある4個の物理量、 $M_{cy1}$ （ベースプレートと基礎コンクリートが離間するときの曲げモーメント）、 $M_{cy2}$ （アンカーボルトが降伏するときの曲げモーメント）、 $C_1$ （ $M_{cy1}$  から  $M_{cy2}$  の区間のコンプライアンス）、および  $C_2$ （ $M_{cy2}$ 以降のコンプライアンス）が必要である。これらの値は、実験または精度の高い有限要素解析、あるいは何らかの概算的手法であらかじめ知られていなければならない。

図10 および上の記述から明らかなように、 $M_{cy1}$  を0とおけば原点から  $M_{cy2}$  までが  $C_1$ 、 $M_{cy2}$  以降が  $C_2$  のバイリニア形になる。また、 $C_1$  を0（つまり曲げ剛性が無限大）とおけば  $M_{cy1}$  の値に関係なく  $M_{cy2}$  までは剛接で  $M_{cy2}$  以降が  $C_2$  となるように設定でき、部材接合部の曲げ耐力の導入に使用できる。

機能番号「0」は、原点から  $C_1$  一定の半剛接の設定となる。接合部の降伏は考慮しないので、追加データは  $C_1$  のみである。

入力データとしては、まず i 端を半剛接にする要素についての情報を、続いて j 端を半剛接にする要素についての情報を作成する。

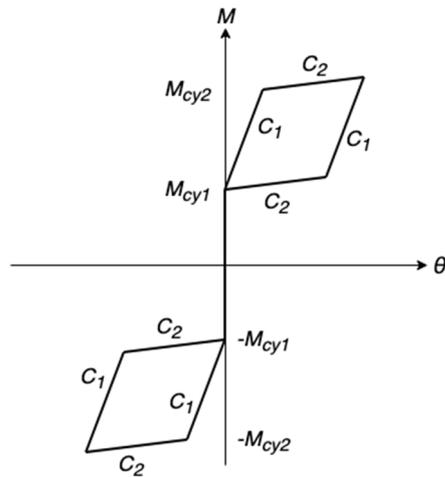


図 10 露出柱脚の復元力特性のモデル ( $C_1$ と  $C_2$ は曲げのコンプライアンス)

(b) 引張りブレース<sup>24)</sup>

ここで指定する引張りブレースは、圧縮にはほとんど抵抗せず、引張りに対しては弾性域では軸剛性  $EA/L$  (ここに  $E$  はヤング率,  $A$  はブレースの断面積,  $L$  はブレースの長さ) で抵抗し、降伏後はそれが  $1/20 \sim 1/200$  程度に低下するものを想定している。降伏後の軸方向塑性コンプライアンス  $C_3$  はデータとして入力しなければならない。

軸方向塑性コンプライアンスの繰返し挙動のモデル図を図 11-1 に示す。図中の  $N$  はブレースの軸力,  $\delta_p$  は塑性伸びである。降伏軸力  $N_y$  は (3) 断面形状, 寸法及び材料定数のところで入力したデータをもとにプログラム内部で計算される。 $N_p$  は直前の除荷点の軸力である。

追加データである図 11-1 中の  $C_3$  の値としては  $EA/L$  の  $1/20 \sim 1/200$  の値の逆数を用いることができる。引張りブレースは、骨組との接合点を節点として必ず 1 要素でモデル化しなければな

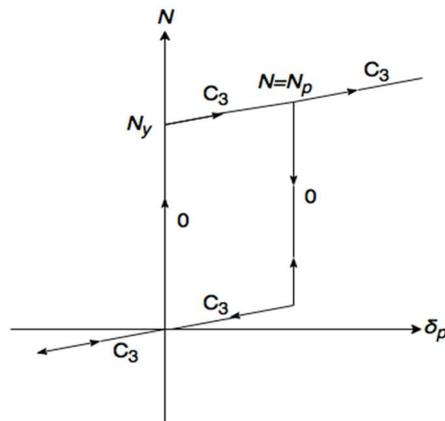


図 11-1 引張りブレースの軸方向塑性コンプライアンスの値

らない。ブレースの中間点に節点を設けると剛性マトリクスが特異になるので注意を要する。

上記 (a) の「曲げの半剛接合」の機能番号「1」にも言えることであるが、本機能でも繰返し荷重に際して除荷や再降伏を要素端力（ここでは軸力）で判断し、除荷点の伸びの値を厳密に管理していないので、解析時の変位増分が大きいと行きと帰りの経路が一致しないことがある。FPHM による準静的解析であれば制御変位の増分を初期降伏値の 1/500 程度に小さくすればそれほど問題ないが、後述する FPHM-D による動的解析では時間増分を相当に小さくしても得られる応答には時間増分の差に起因する相違が生じるので注意を要する。1 層 1 スパンの一般的な引張りブレース付き立体骨組で試算をし、最大応答層間変形角が 0.02rad 程度であれば 0.00005 秒の時間増分でほぼ収束した解が得られることを確認している。

引張りブレース単体での力学的挙動の計算例として、直径 22mm の丸鋼で長さ  $L=2280\text{mm}$  の鋼棒の一端を固定し、他端に繰返し軸力を荷重したときの履歴特性を調べた。材料定数は降伏応力  $\sigma_y=253.8\text{N/mm}^2$ 、 $E=217600\text{N/mm}^2$  と仮定し、 $C_3$  の値は  $E$ 、 $L$  および断面積  $A$  の値から  $EA/L$  の 1/100 の逆数として求めた  $0.00275\text{mm/N}$  を入力した。荷重は自由端の軸方向変位で制御し、3, -3, 6, -2, 8 (mm) を除荷点とする繰返し荷重とした。解析に際しては、引張りブレース単体では接線剛性行列が特異になるので、自由端（荷重点）を直径 2mm、長さ 1800mm の丸鋼でブレースの軸方向と直交方向に支えた。

図 11-2 は軸荷重～伸び量関係の履歴曲線である。図中の数字は履歴の順序を示す。弾性域の剛性は  $EA/L$  であるが、これはプログラム内部で計算される。

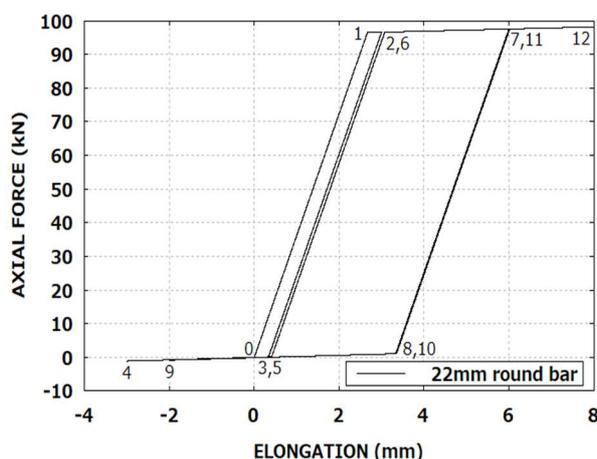


図 11-2 引張りブレース単体の履歴特性の例

### (c) 鋼材制振ブレース（座屈拘束ブレース）およびトラス部材

ある要素を鋼材制振ブレースに指定するときは、ブレースと骨組との接合部詳細を無視して骨組の柱はり接合点にブレース鋼材が直接接合されていると仮定し、その骨組との接合点を節点として必ず 1 要素でモデル化しなければならない。従って、鋼材制振ブレースの解析用モデルとし

では、巨視的に等価にその軸力～伸び関係を表現できるように、骨組との接合点間を要素長として実際のブレース鋼材とは異なる等価で様な断面形状と寸法および降伏応力（ヤング率は標準値を用いる）を入力する必要がある（(3) 断面形状、寸法及び材料定数を参照）。筆者は正方形中実断面（ $CSEC='P'$ ）と仮定して弾性域の軸力～伸び関係から等価な断面積を求め、その断面積から断面寸法を決定し、さらに降伏軸力が等価になるように降伏応力を設定して入力データとしている。

図 12 は「E-ディフェンス・ブラインド解析コンテスト 2009」<sup>21)</sup> において振動台実験に供された、実大 5 層鋼材制振ブレース付き骨組の Y 方向 1 階の制振ブレース 1 本の軸力～軸方向変形関係の、本要素での計算結果である。このブレースは骨組との接合点間をブレース長としたときの繰返し載荷実験の結果が公表されていたため、その結果に合うように断面寸法と降伏応力を設定して得られたものである。図からわかるように、本モデルでは鋼材制振ブレースの繰返し特性は降伏後の剛性が弾性剛性の 1/100 のバイリニア形となる。

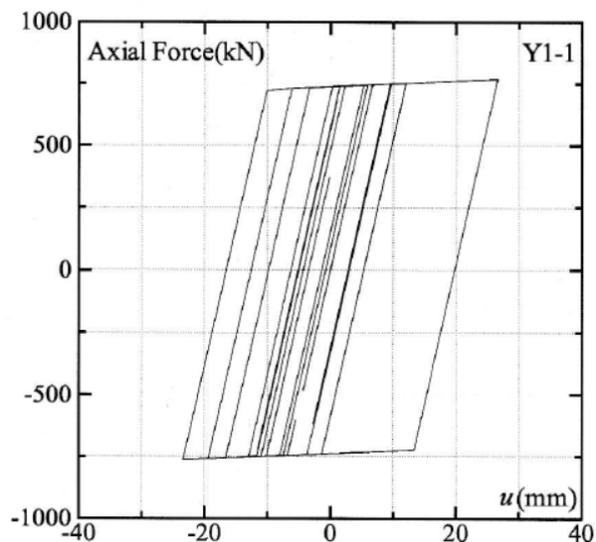


図 12 鋼材制振ブレースの力学的特性の一例

この指定をすると、その要素の軸剛性以外の剛性を無視するので、一般のトラス部材の指定にも使える。トラス構造物の部材をこの指定の要素でモデル化して解析するときは、構造物全体が不安定にならないように、各節点の固定条件に留意する必要がある。

#### (d) RC スラブ面内剛性置換ブレース

この置換は剛床仮定を近似的に実現するために行うものである。RC スラブの面内剛性を置換した鋼材ブレースを「RC スラブ置換ブレース」として指定すると、曲げ剛性を無視するとともに入力した降伏応力の値にかかわらず降伏しない部材として扱うので計算が安定する。このときもブレースの断面形状は正方形中実断面（ $CSEC='P'$ ）を仮定する。断面の寸法は軸剛性が直近のはりの 10%程度以下になるようにすると計算が安定する。直近のはりが鋼材であっても合成

はりであってもブレースの断面積をはりの鋼材の断面積の約 1/10 になるように 1 辺の長さを決めればよい。このときも、置換ブレースはその骨組との接合点を節点として必ず 1 要素でモデル化しなければならない。

### (e) 半剛接機能等に関する入力データの作成例

以上述べたように、どの機能を使うかによって必要な付随データが異なるので、入力データの形式もそれぞれ少し異なる。入力データはまず「半剛接接合」の  $i$  端と  $j$  端の情報を書き、次に引張りブレース、鋼材制振ブレースとトラス部材、そして RC スラブ置換ブレースの情報を書く。

例として、骨組全体の中で要素番号 15 の要素の  $i$  端と  $j$  端をピンに、要素番号 18 の要素の  $i$  端を曲げ耐力  $50\text{kN}\cdot\text{m}$  の接合部に、要素番号 8 と 13 の要素を引張りブレースに、要素番号 10 と 12 の要素を鋼材制振ブレースに、要素番号 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28 の 8 要素を RC スラブ置換ブレースに設定したい場合の入力データの作り方を以下に示す。

まず、'  $i$  端が半剛接の要素の数 ' というコメント行を置く。このコメント行は  $i$  端を半剛接にする要素がなくても書いておかななくてはならない。その次の行に要素の数を書く。数が 0 でなければ、次の行に '要素番号とデータ' というコメント、要素番号、機能番号の順に改行しながら書き、機能番号が「0」のときにはさらに  $y_m$  軸と  $z_m$  軸回りの  $C_i$  を 2 行に分けて書く。機能番号が「1」のときには上に述べた 4 個の物理量を  $y_m$  軸と  $z_m$  軸回りについて 2 行に分けて書く。これを半剛接要素の数だけ繰り返す。

続いて、'  $j$  端が半剛接の要素の数 ' というコメント行を置き、 $j$  端について同様の情報を書く。

次に、' 引張りブレースの数 ' というコメント行を置く。このコメント行も必須である。その次の行に引張りブレースの数を書き、数が 0 でなければ、次の行に '要素番号とデータ' というコメント、要素番号、 $C_3$  の順に改行しながら書く。これを引張りブレース要素の数だけ繰り返す。

次に、' 鋼材制振ブレースおよびトラス部材の数と要素番号 ' というコメント行を置く。このコメント行も必須である。その次の行に鋼材制振ブレースとトラス部材の数を書き、数が 0 でなければ、次の行から要素番号をコンマで区切って書く。複数の行になっても構わない。なお、すべての鋼材制振ブレースとトラス部材に一連の要素番号が付けられているときは、鋼材制振ブレースおよびトラス部材の数として -1 と書き、要素番号として最初の要素番号と最後の要素番号をコンマで区切って書くことですべての鋼材制振ブレースとトラス部材の指定ができる。

次に、' RC スラブ置換ブレースの数と要素番号 ' というコメント行を置く。このコメント行も必須である。その次の行に置換ブレースの数を書き、数が 0 でなければ、次の行から要素番号をコンマで区切って書く。複数の行になっても構わない。なお、すべての置換ブレースに一連の要素

番号が付けられていれば、置換ブレースの数として-1と書き、要素番号として最初の要素番号と最後の要素番号をコンマで区切って書くことですべての置換ブレースの指定ができる。以下の例ではこの機能を利用している。

'i 端が半剛接の要素の数'

2

'要素番号とデータ'

15

(要素番号)

0

(機能番号)

1E-3

( $y_m$  軸回りのコンプライアンス  $C_1$ )

1E-3

( $z_m$  軸回りのコンプライアンス  $C_1$ )

'要素番号とデータ'

18

(要素番号)

1

(機能番号)

0, 50E6, 0, 1E-3

( $y_m$  軸回りの  $M_{cy1}$ ,  $M_{cy2}$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ )

0, 50E6, 0, 1E-3

( $z_m$  軸回りの  $M_{cy1}$ ,  $M_{cy2}$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ )

'j 端が半剛接の要素の数'

1

'要素番号とデータ'

15

(要素番号)

0

(機能番号)

1E-3

( $y_m$  軸回りのコンプライアンス  $C_1$ )

1E-3

( $z_m$  軸回りのコンプライアンス  $C_1$ )

'引張りブレースの数'

2

'要素番号とデータ'

8

(要素番号)

6E-3

(材軸方向コンプライアンス  $C_3$ )

'要素番号とデータ'

13

(要素番号)

6E-3

(材軸方向コンプライアンス  $C_3$ )

'制振ブレースとトラス部材の数と要素番号'	
2	(制振ブレースとトラス部材の数)
10, 12	(要素番号)
'スラブ置換ブレースの数と要素番号'	
-1	(置換ブレースの数)
21, 28	(要素番号)

上記の例では  $y_m$  軸と  $z_m$  軸回りに同じ値を設定しているが、もちろん異なる値を設定できる。平面骨組解析のときもプログラムの仕様として二軸回りのデータが必要なので、上記の例のように両軸に同じ値を設定する。コンプライアンスの値は、ピン近似とするためには当該の要素の曲げ剛性  $EI$  の  $10^6$  分の 1 ないし  $10^8$  分の 1 の逆数にとればよい。露出型柱脚の  $C_I$  としては、例えば文献 16 中の回転剛性  $K_{BS}$  の逆数を用いることができる。コンプライアンス値を 0 とおくと剛接になる。

## (6) 固定節点

拘束されている節点の情報を入力する。まず変位や回転が固定されている節点の数を入力し、次の行から X 方向の変位  $U$ 、Y 方向の変位  $V$ 、Z 方向の変位  $W$ 、X 軸回りの回転  $\theta_x$ 、Y 軸回りの回転  $\theta_y$ 、Z 軸回りの回転  $\theta_z$ 、断面のそり  $\psi$  が固定されている節点の番号を書く。通常は、断面のそりはすべての節点で固定しておかなければならない。ある変位をすべての節点で固定するときは、節点の数を -1 とおけばプログラム内部でその変位を全節点で固定に設定する。この場合、節点番号はデータファイルに記入してはならない。前章の解析例では以下のようなになる。

'固定節点の数とその要素番号'	
2, -1, 2, -1, 2, -1, -1	( $U, V, W, \theta_x, \theta_y, \theta_z, \psi$ の固定数)
1, 4	( $U$ 固定の節点番号)
(記入しない)	( $V$ 固定の節点番号)
1, 4	( $W$ 固定の節点番号)
(記入しない)	( $\theta_x$ 固定の節点番号)
1, 4	( $\theta_y$ 固定の節点番号)
(記入しない)	( $\theta_z$ 固定の節点番号)
(記入しない)	( $\psi$ 固定の節点番号)

## (7) 初期荷重 (長期荷重)

$F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$  について, '初期荷重の数および節点番号と荷重値' というコメントの次の行に初期荷重を載荷する節点数を入力し, 次の行から節点番号と荷重値を書く. 前章の解析例では以下のようなになる.

```
'初期荷重の数および節点番号と荷重値'  
0, 0, 2, 0, 0, 0      ( $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$  が載荷される節点数)  
2, -1040000          ( $F_z$  が載荷される節点番号と荷重値)  
3, -1040000
```

なお, 初期荷重による線形弾性解析の結果が入力データチェック用の出力ファイル (s6.txt) の最後に出力されるので, 初期荷重による変形状態をチェックできる.

## (8) 荷重増分

$dF_x, dF_y, dF_z, dM_x, dM_y, dM_z$  について, '荷重増分の数および節点番号と荷重の相対的な値' というコメントの次の行に荷重増分を載荷する節点数を入力し, 次の行から節点番号と荷重値を書く. 荷重値は, どれかを 1 として相対的な値とする. 前章の解析例では以下のようなになる.

```
'荷重増分の数および節点番号と荷重の相対的な値'  
1, 0, 0, 0, 0, 0     ( $dF_x, dF_y, dF_z, dM_x, dM_y, dM_z$  の載荷される節点数)  
2, 1                 ( $dF_x$  が載荷される節点番号と荷重値)
```

荷重増分の数すべて 0 とすると増分解析は行われず, 上記 (7) に記したように初期荷重に対する線形弾性解析の結果のみが s6.txt というファイルに出力される. 初期荷重に対する弾性解析の結果だけが必要な場合は, 荷重増分の数すべて 0 とし, 下記 (9) ~ (11) に関しては添付の入力データファイル frame-s-2d.txt に例として書いてある数値をそのまま入力データとして使えばよい (計算には使用しない).

## (9) 解析の制御に用いる変位

本プログラムは解析を変位制御型荷重増分法で進めているので, 制御に用いる変位の方向および変位増分とその向きの情報が必要となる.

変位の方向は自由度番号で指定する. 自由度は 1 節点当たり 7 なので, 例えば節点 3 の Y 方向変位を制御に用いるとすると, 自由度番号は  $7 \times 2 + 2$  で 16 となる. 前章の解析例では第 2

節点の X 方向を制御変位にしているので、 $7 \times 1 + 1$  で 8 となる。

変位増分の大きさは弾性限界変位の  $1/100$  程度が標準である。変位増分の値として絶対値が  $10^{-8}$  以下の数値を指定するとプログラムが自動的に変位増分を決定してくれる。通常はこれでよいが、この指定では計算がうまく進まないときは弾性限界変位の  $1/50 \sim 1/500$  程度にして試してみる。変位増分の向きは変位増分の正負の符号で指定（+は省略可）するが、これは（8）の荷重増分および（10）の（最初の）除荷点の変位と整合していなければならない。計算がエラーを出さずにすぐに終了するときは、この整合性を調べるとよい。

前章の解析例では明らかに変位増分の向きは正なので入力データは以下のようになる。

’解析の制御に用いる変位の自由度番号と増分変位の大きさ’  
8, 1E-8 (自由度の番号と制御変位の大きさ)

#### （10）除荷点の数と各除荷点の変位

解析を終了させるために除荷点の数と除荷点の変位の入力が必要である。単調荷重の場合は除荷点の数は 1 となる。前章の解析例では除荷点の変位が 100mm なので、入力データは以下のようになる。

’除荷点の数および除荷点の変位の値’  
1 (除荷点の数)  
100 (除荷点の変位)

#### （11）出力する荷重と変位の設定

出力したい荷重～変位関係を 5 組まで指定できる。その設定は荷重と変位の自由度番号を入力することで行う。前章の解析例では、節点 2 に荷重された水平荷重と節点 2, 3 の水平変位および鉛直変位との関係を出させたいので、以下のように入力している。なお、出力が 5 組必要でない場合でも必ず 5 組分のデータを記述する（同じ値でもよい）。

’出力する荷重と変位の自由度番号（5 組）’  
8, 8, 8, 15, 8, 10, 8, 17, 8, 17 (荷重①, 変位①, 荷重②, 変位②,  
荷重③, 変位③, 荷重④, 変位④,  
荷重⑤, 変位⑤)

出力結果を描画させる際、荷重や変位の符号を反転させたいことがしばしばあるが、このときは上記の自由度番号の前に「-」記号を付ければ、その自由度番号の数値の符号が逆になって出力される。なお、これらの荷重と変位の値は `s7.txt` というファイルに出力される（7章参照）。

## 6. FPHM の実行と結果の出力

FPHM はバッチファイルを用いて実行させる。バッチファイルは Windows 系では拡張子が「bat」という名前のファイルで、このファイルをダブルクリックすると中に書いてあるコマンドを1行ずつ順次実行してくれる。バッチファイルの編集はそのファイルを右クリックして出てくるメニューから「編集」をクリックすることで可能である。

FPHM の実行形ファイルの名前は `s64.exe` で、約 1200 節点までの解析が可能であるが、必要記憶容量を減らして計算速度を上げた `ms64.exe` (m は mini の意で約 600 節点までの解析が可能) も添付している。以下、`ms64.exe` を前提に話を進める。`ms64.exe` への入力データファイルの入力はリダイレクトで可能なので、適当なエディタで例えば `frame-s-2d.bat` (`frame-s-2d` の部分は任意) というファイルを作り、その1行目に、

```
ms64.exe<frame-s-2d.txt
```

と書いてリターンキーを押し、エディタを終了する。ここに、`frame-s-2d.txt` は入力データファイルの名前である。`ms64.exe` がもし他のフォルダに入っている時にはフルパス名を書かなければならない。筆者の場合は `ms64.exe` を `C:\¥study¥base` というフォルダに置いているので、`frame-s-2d.bat` の内容は次のようになっている。

```
C:\¥study¥base¥ms64.exe<frame-s-2d.txt
```

さて、`frame-s-2d.bat` をダブルクリックすると計算が始まり、ディスプレイに `cmd.exe` のウィンドウが開いて計算が行われていることがわかる。計算が終了するとこのウィンドウが自動的に閉じ、計算が終了したことを知ることができる。計算が終了すると `s6.txt`, `s7.txt`, `s8.txt`, `s9.txt` の4個のファイルに結果が出力される。同名のファイルが既に同じフォルダにあると上書きされるので注意を要する。各出力ファイルの内容は以下のようである。

`s6.txt` : 入力データのチェックと初期荷重に対する解析結果

`s7.txt` : 荷重～変位関係 (5組)

`s8.txt` : 骨組の降伏の進展状況

`s9.txt` : 主要なステップでの各要素の軸力、せん断力および曲げモーメント

以下に、添付のデータファイル `frame-s-2d-sr.txt` (はり両端の柱との接合部の耐力を半剛接機能で設定した1層1スパンの平面ラーメンのデータ) を入力データファイルとして指定して解析したときの出力ファイルを用いてそれぞれのファイルの内容を詳しく説明する。

なお、Windows 10 や 11 の 64bitOS マシンは、機種によってはマシンにアクセスしなければデフォルトのままでは 30 分でスリープしてしまう。これでは長い時間がかかるような計算ができないので、スリープに入る時間の制限値を「無制限」あるいは「なし」に変更する必要がある。筆者の Windows 11 マシンでは以下の手順になる。

1. ディスプレイの左下隅のスタートボタン上でマウスの右ボタンをクリックする.
2. 出てくる一覧表から「電源オプション」を左クリックする.
3. 「画面とスリープ」を左クリックする.
4. 「・・・デバイスをスリープ状態にする」のメニューから「なし」を選択する.
5. 設定画面を閉じる.

(1) 入力データのチェックと初期荷重に対する解析結果 : s6.txt

赤色の文字は説明書きであり、実際の出力ファイルには記述されていない。このファイルの先頭には、下に示すようにFPHMのバージョンと入力データ読み込み途中の状況が出力される。入力データの数や形式にミスがある時はその前後でこの出力が中断されて計算が終了するので、入力データファイルの中での中断された場所の前後のデータを調べるとよい。

mini-FPHM v5.10 (C)SHUGYO, M. 3/5/2024

```

*** FPHM DATA-INPUT STARTED ***
(GRADIENT OF ELASTIC STRAIN ENERGY)
INPUT OF NUMBERS OF NODES AND ELEMENTS
INPUT OF COORDINATES OF EACH NODE
INPUT OF NODE NUMBERS OF EACH ELEMENT
INPUT OF NUMBER OF KINDS OF MEMBERS
INPUT OF SECTION-NUMBER OF EACH ELEMENT
INPUT OF DATA OF CROSS SECTION- 1
INPUT OF DATA OF CROSS SECTION- 2
INPUT OF CHORD ANGLE OF EACH ELEMENT
INPUT OF DATA OF SEMI-RIGID CONNECTIONS
I-SECTIONS
J-SECTIONS
INPUT OF DATA OF TENSION BRACES
INPUT OF DATA OF STEEL DAMPERS AND TRUSS MEMBERS
INPUT OF DATA OF SLAB EQUIVALENT BRACES
INPUT OF NUMBERS, NODE NOS OF FIXED POINTS
INPUT OF NUMBERS, NODE NOS AND INITIAL LOADS
INPUT OF NUMBERS, NODE NOS AND INCRMTL LOADS
INPUT OF DIRECTION, MAG OF CONTROLLED DISP
INPUT OF NUMBERS, DISPS OF UNLOADING POINTS
INPUT OF DRCTIONS OF LOAD AND DISP (5-PAIRS)

```

\*\*\* FPHM DATA-INPUT COMPLETED \*\*\*

以下、入力データおよびそれによって計算された断面定数などが順次出力される。

<1要素の再分割数の確認>

NDIV : 再分割数 (NDIVには1, 2, 3, 4, または 5 しか指定できない)

NDIV= 1 ( 1 は標準モデルでの 1 部材 1 要素近似. 補正モデルの時は 5)

<節点数, 要素数の確認>

NNOD : 節点数 NELM : 要素数

NNOD= 4 NELM= 3

<節点座標値の確認>

NODE : 節点番号 X(I) : X座標値 Y(I) : Y座標値 Z(I) : Z座標値

NODE	X(I)	Y(I)	Z(I)
1	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00
2	0.0000D+00	0.0000D+00	0.3500D+04
3	0.5000D+04	0.0000D+00	0.3500D+04
4	0.5000D+04	0.0000D+00	0.0000D+00

<各要素の両端の節点番号, 断面番号, 断面形状および断面定数の確認>

ELM : 要素番号 NODES : 要素両端の節点番号 SECT-NO : 断面番号 SHAPE : 断面形状 A : (鉄骨部分の) 断面積 YI : (鉄骨部分の) 断面二次モーメント ( $y_m$ 軸) ZI : (鉄骨部分の) 断面二次モーメント ( $z_m$ 軸) AKT : ねじれ定数 WI : そり定数 RI : 高次の断面定数 CEA : コンクリート部分の軸方向剛性 CEYI : コンクリート部分の曲げ剛性 ( $y_m$ 軸) CEZI : コンクリート部分の曲げ剛性 ( $z_m$ 軸)

ELM	NODES	SECT-NO	SHAPE	A	YI	ZI	AKT	WI
RI	CEA	CEYI	CEZI					
1	1 2	1	S	0.1048D+05	0.1480D+09	0.1480D+09	0.2218D+09	0.0000D+00 0.8764D+13
2	2 3	2	H	0.8192D+04	0.2296D+09	0.1735D+08	0.3568D+06	0.6490D+12 0.8692D+13
3	4 3	1	S	0.1048D+05	0.1480D+09	0.1480D+09	0.2218D+09	0.0000D+00 0.8764D+13

---

<断面形状の確認>

NO : 断面番号 D, B, WT (=WTHK) , FT (=FTHK) : 鋼材の寸法に関する変数 SYSS : 鋼材の降伏応力 E : 鋼材のヤング率 HARD : 降伏後の無次元化ひずみ硬化係数 VARSP : 塑性変形低減係数r CD, CB : コンクリートの寸法 CYSS : コンクリートの降伏応力 CE : コンクリートのヤング率 YO : 図心の  $y_m$ 座標値 ZO : 図心の  $z_m$ 座標値 PANG : 断面主軸 (強軸) の  $y_m$ 座標軸からの反時計回りの角度 (rad) NELMR : 鉄筋の本数 RYSS : 鉄筋の降伏応力 RE : 鉄筋のヤング率 RU, RV :  $y_m$ 軸と  $z_m$ 軸の交点を原点としたときの鉄筋の重心の座標値 RAREA : 鉄筋の断面積 この例では鉄筋がないのでNELMR, RYSS, REなどに対応する出力はない.

SECTION-NUMBER AND CORRESPONDING DATA

NO= 1 SECTION=S D= 0.3000D+03 B= 0.3000D+03 WT= 0.9000D+01 FT= 0.9000D+01

SYSS= 0.3300D+03 E= 0.2100D+06 HARD=0.1000D-01 VARSP= 0.1000D+01

(VARSPは標準モデルでは1.0であるが, 要素の再分割数が5以外のときはVARSPの値にかかわらずプログラムが強制的に1.0に変える)

CD= 0.0000D+00 CB= 0.0000D+00

CYSS= 0.0000D+00 CE= 0.0000D+00

YO ZO PANG

0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00

NO= 2 SECTION=H D= 0.4000D+03 B= 0.2000D+03 WT= 0.8000D+01 FT= 0.1300D+02

SYSS= 0.3260D+03 E= 0.2100D+06 HARD=0.1000D-01 VARSP= 0.1000D+01

CD= 0.0000D+00 CB= 0.0000D+00

CYSS= 0.0000D+00 CE= 0.0000D+00

YO ZO PANG

0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00

---

<コードアングルの確認> (要素番号順)

1行に5要素ずつコードアングルを出力. 左端の数値はその行の最後の要素の番号.

CHORD ANGLES

ELEMENTS

3 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00

---

<半剛接要素の確認>

NISR : i 端の半剛接要素の数 ELM : 要素番号 ISRST : 機能番号

NJSR : j 端の半剛接要素の数 ELM : 要素番号 JSRST : 機能番号

MCY1- やC1- などの付いた名前については, 5章の(5)項を参照されたい. この例では, この半剛接機能を利用してはりの両端にそれぞれ200kNmの耐力を設定している.

DATA OF SEMI-RIGID CONNECTIONS

NISR= 1

ELM= 2

ISRST= 1

MCY1-Y-I= 0.0000D+00 MCY2-Y-I= 0.2000D+09

C1-Y-I= 0.0000D+00 C2-Y-I= 0.1000D-04

MCY1-Z-I= 0.0000D+00 MCY2-Z-I= 0.2000D+09

C1-Z-I= 0.0000D+00 C2-Z-I= 0.1000D-04

---

NJSR= 1

ELM= 2

JSRST= 1

MCY1-Y-J= 0.0000D+00 MCY2-Y-J= 0.2000D+09

C1-Y-J= 0.0000D+00 C2-Y-J= 0.1000D-04

MCY1-Z-J= 0.0000D+00 MCY2-Z-J= 0.2000D+09

C1-Z-J= 0.0000D+00 C2-Z-J= 0.1000D-04

---

NUMBER OF TENSION BRACES

0

NUMBER OF STEEL DAMPERS AND TRUSS MEMBERS

0

NUMBER OF SLAB EQUIVALENT BRACES

0

---

<固定節点の確認>

NDX, NDY, NDZ, NRX, NRY, NRZ, NRXX : それぞれ  $U$ ,  $V$ ,  $W$ ,  $\theta_x$ ,  $\theta_y$ ,  $\theta_z$ ,  $\psi$  の固定数

入力データファイルの変位の固定数を-1にすると、プログラム内部ですべての節点の変位を固定に設定し、対応する節点番号のデータも自動的に作成する。入力データファイルに書いたものとは異なるので注意を要する。

NUMBERS OF FIXED NODES

NDX= 2 NDY= 4 NDZ= 2 NRX= 4 NRY= 2 NRZ= 4 NRXX= 4

<上記に対応した節点番号の確認>

FIXED NODES FOR NDX

1 4

FIXED NODES FOR NDY

1 2 3 4  
FIXED NODES FOR NDZ

1 4  
FIXED NODES FOR NRX

1 2 3 4  
FIXED NODES FOR NRY

1 4  
FIXED NODES FOR NRZ

1 2 3 4  
FIXED NODES FOR NRXX

1 2 3 4

---

<初期荷重（長期荷重）の確認>

NFXI, NFYI, NFZI, NMXI, NMYI, NMZI : それぞれ  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  の初期荷重を載荷する節点数

NODE : 節点番号

FXI (I), FYI (I), FZI (I), FMXI (I), FMYI (I), FMZI (I) : それぞれ  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  の荷重の値

INITIAL LOADS (ACTUAL VALUES)

NFXI=	0	NFYI=	0	NFZI=	2	NMXI=	0	NMYI=	0	NMZI=	0
NODE	FXI (I)	FYI (I)	FZI (I)	FMXI (I)	FMYI (I)	FMZI (I)					
1	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00					
2	0.0000D+00	0.0000D+00	-0.1040D+07	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00					
3	0.0000D+00	0.0000D+00	-0.1040D+07	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00					
4	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00					

---

<荷重増分の確認>

NFX, NFY, NFZ, NMX, NMY, NMZ : それぞれ  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  の荷重増分を載荷する節点数

NODE : 節点番号

FX (I), FY (I), FZ (I), FMX (I), FMY (I), FMZ (I) : それぞれ  $dF_x$ ,  $dF_y$ ,  $dF_z$ ,  $dM_x$ ,  $dM_y$ ,  $dM_z$  の相対的な値（ある荷重増分を1として、残りはそれとの比）

INCREMENTAL LOADS (RELATIVE VALUES)

NFX=	1	NFY=	0	NFZ=	0	NMX=	0	NMY=	0	NMZ=	0
NODE	FX (I)	FY (I)	FZ (I)	FMX (I)	FMY (I)	FMZ (I)					
1	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00					

```
2      0.1000D+01 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00
3      0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00
4      0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00
```

---

<解析の制御に用いる変位の確認>

IDISP : 自由度の番号    DINC : 制御変位の大きさ    (DINCを1.D-8と入力すると、プログラム内部で最適な値にDINCを変更する)

DIRECTION AND VALUE OF CONTROL-DISPLACEMENT

IDISP=    8    DINC= 0.1000D-07

---

<除荷点の変位の確認>

この例の場合、単調载荷なので除荷点の変位は一つしかない。

DISPLACEMENTS AT UNLOADING POINTS

0.1000D+03

---

<出力する荷重と変位の確認>

L1~L5 : 荷重の自由度番号    D1~D5 : 変位の自由度番号

DIRECTIONS OF LOAD AND DISPLACEMENT FOR OUTPUT

L1=    8    D1=    8

L2=    8    D2=  15

L3=    8    D3=  10

L4=    8    D4=  17

L5=    8    D5=  17

---

本プログラムはH形鋼の残留応力を考慮する機能を持っているが、配布用実行ファイルではサポートしていないので次のコメントが常に出力される。

(RESIDUAL STRESSES IN H-SECTION NOT CONSIDERED)

---

ここからは、初期荷重に対する解析結果、および解析終了時の各要素の軸力の状況である。

---

RESULTS FOR THE INITIAL LOADING

<初期荷重時の各節点の変位など>

DISPLACEMENTS

NODE	U	V	W	THETAX	THETAY	THETAZ
1	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00
2	-0.1952D-16	0.0000D+00	-0.1654D+01	0.0000D+00	-0.3586D-20	0.0000D+00
3	0.1150D-16	0.0000D+00	-0.1654D+01	0.0000D+00	0.6461D-20	0.0000D+00
4	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00

<初期荷重時の各要素の要素端力> RX, RYなどの意味については本章の(4)を参照.

ELEM NODE		RX	RY	RZ	MX	MY	MZ
1	1	0.1040D+07	0.1594D-46	-0.1088D-12	0.1678D-64	0.2312D-09	0.2789D-43
1	2	-0.1040D+07	-0.1594D-46	0.1088D-12	-0.1678D-64	0.1697D-09	0.2789D-43
2	2	-0.7590D-32	-0.5043-308	-0.3327D-13	0.0000D+00	-0.1372D-10	-0.8405-305
2	3	0.7590D-32	0.5043-308	0.3327D-13	0.0000D+00	0.1801D-09	-0.1681-304
3	4	0.1040D+07	0.1594D-46	-0.9777D-13	-0.3024D-64	0.1156D-09	0.2789D-43
3	3	-0.1040D+07	-0.1594D-46	0.9777D-13	0.3024D-64	0.2264D-09	0.2789D-43

<解析状況の確認>

ここに

COMPUTATION COMPLETED

と書かれていれば、最終ステップまで解析が正常に行われている。これ以外のエラーコメントが書かれているときは、解析は異常終了しているので別途検討が必要である。

<各要素の断面番号、断面形状と解析終了時の各要素の軸力の状況>

ELM: 要素番号 SECT-NO: 断面番号 SHAPE: 断面形状 T: 引張状態, C: 圧縮状態

この出力は、ラチスはりのラチス材のように引張りと圧縮で強度が異なるときに、本番の解

析において等価な降伏応力を設定するため、予備解析をして部材が引張り状態であるか圧縮状態であるかを確認するためのものである。本解析では引張りか圧縮かに応じて降伏応力を設定し直して（同じ断面形状でも引張と圧縮で別々の断面として定義して）計算を行う必要がある。

```
ELM SECT-NO SHAPE TEN-OR-COMP
1      1      S      C
2      2      H      C
3      1      S      C
```

(2) 荷重～変位関係 : s7.txt

入力データで指定した自由度番号の荷重と変位が出力される。L は荷重, D は変位を表しており括弧内は自由度の番号である。

```

L( 8)      D( 8)      L( 8)      D( 15)      L( 8)      D( 10)
L( 8)      D( 17)      L( 8)      D( 17)
0.0000D+00  0.0000D+00  0.0000D+00  0.0000D+00  0.0000D+00  0.0000D+00
0.0000D+00  0.0000D+00  0.0000D+00  0.0000D+00
0.1164D-03  0.1000D-07  0.1164D-03  0.9832D-08  0.1164D-03  -0.1654D+01
0.1164D-03  -0.1654D+01  0.1164D-03  -0.1654D+01
0.8197D-01  0.7044D-05  0.8197D-01  0.6926D-05  0.8197D-01  -0.1654D+01
0.8197D-01  -0.1654D+01  0.8197D-01  -0.1654D+01
0.1088D+03  0.9347D-02  0.1088D+03  0.9190D-02  0.1088D+03  -0.1654D+01
0.1088D+03  -0.1654D+01  0.1088D+03  -0.1654D+01
0.3223D+04  0.2770D+00  0.3223D+04  0.2724D+00  0.3223D+04  -0.1652D+01
0.3223D+04  -0.1656D+01  0.3223D+04  -0.1656D+01
0.6337D+04  0.5446D+00  0.6337D+04  0.5354D+00  0.6337D+04  -0.1651D+01
0.6337D+04  -0.1657D+01  0.6337D+04  -0.1657D+01
-----以下省略-----
```

(3) 骨組の降伏状況 : s8.txt

骨組のどこかの部材断面が降伏したときおよび解析の最終点で、そのときの増分ステップ数、入力データで指定した自由度番号の5組の荷重 (LOAD-) と変位 (DISP-) , および降伏した要素と節点の番号が出力される。要素端の降伏は要素端断面の一部が初めて塑性化した時点で判断するので、一般の塑性関節法よりも降伏の判断がかなり早くなる。なお、この例では柱

はり接合部の耐力を設定しているので、その降伏も出力されている。

```
STEP      LOAD-1      DISP-1      LOAD-2      DISP-2      LOAD-3      DISP-3
LOAD-4    DISP-4      LOAD-5      DISP-5
      85      0.2422D+06  0.2168D+02  0.2422D+06  0.2133D+02  0.2422D+06 -0.1655D+01
0.2422D+06 -0.1941D+01  0.2422D+06 -0.1941D+01
NUMBER OF YIELDED POINTS=      1      (*1)
CONNECTION      2 OF ELM      2 YIELDED.      (*2)
```

```
STEP      LOAD-1      DISP-1      LOAD-2      DISP-2      LOAD-3      DISP-3
LOAD-4    DISP-4      LOAD-5      DISP-5
      87      0.2439D+06  0.2222D+02  0.2439D+06  0.2186D+02  0.2439D+06 -0.1669D+01
0.2439D+06 -0.1963D+01  0.2439D+06 -0.1963D+01
NUMBER OF YIELDED POINTS=      2
CONNECTION      2 OF ELM      2 YIELDED.
CONNECTION      3 OF ELM      2 YIELDED.
```

```
STEP      LOAD-1      DISP-1      LOAD-2      DISP-2      LOAD-3      DISP-3
LOAD-4    DISP-4      LOAD-5      DISP-5
      118     0.2505D+06  0.3052D+02  0.2505D+06  0.3015D+02  0.2505D+06 -0.1939D+01
0.2505D+06 -0.2243D+01  0.2505D+06 -0.2243D+01
NUMBER OF YIELDED POINTS=      3
CONNECTION      2 OF ELM      2 YIELDED.
CONNECTION      3 OF ELM      2 YIELDED.
NODE      1 OF ELM      1 YIELDED.      (*3)
```

```
STEP      LOAD-1      DISP-1      LOAD-2      DISP-2      LOAD-3      DISP-3
LOAD-4    DISP-4      LOAD-5      DISP-5
      120     0.2508D+06  0.3105D+02  0.2508D+06  0.3069D+02  0.2508D+06 -0.1959D+01
0.2508D+06 -0.2263D+01  0.2508D+06 -0.2263D+01
NUMBER OF YIELDED POINTS=      4
CONNECTION      2 OF ELM      2 YIELDED.
CONNECTION      3 OF ELM      2 YIELDED.
NODE      1 OF ELM      1 YIELDED.
NODE      4 OF ELM      3 YIELDED.
```

```
STEP      LOAD-1      DISP-1      LOAD-2      DISP-2      LOAD-3      DISP-3
LOAD-4    DISP-4      LOAD-5      DISP-5
```

```

378    0.2456D+06  0.9982D+02  0.2456D+06  0.9947D+02  0.2456D+06 -0.5675D+01
0.2456D+06 -0.6224D+01  0.2456D+06 -0.6224D+01

```

```

NUMBER OF YIELDED POINTS=    4
CONNECTION    2 OF ELM    2 YIELDED.
CONNECTION    3 OF ELM    2 YIELDED.
NODE    1 OF ELM    1 YIELDED.
NODE    4 OF ELM    3 YIELDED.

```

(\*1)～(\*3)の意味は以下の通り.

- (\*1) 現時点までに降伏した節点と接合部の総数.
- (\*2) 要素2の節点2側の接合部が耐力に達した.
- (\*3) 要素1の節点1の断面が降伏した.

前述のs6.txtの最後の方に「COMPUTATION COMPLETED」と出力されていれば、最終点の結果（この例では378ステップ）は計算上正しい。「COMPUTATION COMPLETED」以外のエラーコメントが出力されたときは最終点の結果は正しくない.

#### (4) 各要素の軸力, せん断力, 曲げモーメント, そりモーメントの値 : s9.txt

骨組のどこかの部材断面が降伏したときおよび解析の最終点で、そのときの増分ステップ数, 入力データで指定した自由度番号の5組の荷重 (LOAD-) と変位 (DISP-), 降伏した場所の数, およびそのときの全要素の軸力や曲げモーメントなどが出力される.

```

STEP      LOAD-1      DISP-1      LOAD-2      DISP-2      LOAD-3      DISP-3
LOAD-4      DISP-4      LOAD-5      DISP-5
85    0.2422D+06  0.2168D+02  0.2422D+06  0.2133D+02  0.2422D+06 -0.1655D+01
0.2422D+06 -0.1941D+01  0.2422D+06 -0.1941D+01  (*1)
NUMBER OF YIELDED POINTS=    1  (*2)
RESULTANT FORCES  (*3)
ELEM NODE  RX          RY          RZ          MX          MY          MZ
MOMEGA
1    1  0.9595D+06  0.1919D-11  0.1294D+06  0.7897D-11 -0.2523D+09  0.5540D-08
0.0000D+00
1    2 -0.9595D+06 -0.1919D-11 -0.1294D+06 -0.7897D-11 -0.2005D+09  0.1176D-08
0.0000D+00
2    2  0.1187D+06  0.0000D+00 -0.7971D+05  0.0000D+00  0.2005D+09  0.0000D+00
0.0000D+00

```

```

2 3 -0.1187D+06 0.0000D+00 0.7971D+05 0.0000D+00 0.1980D+09 0.0000D+00
0.0000D+00
3 4 0.1119D+07 0.2933D-11 0.1255D+06 0.1203D-10 -0.2411D+09 0.8450D-08
0.0000D+00
3 3 -0.1119D+07 -0.2933D-11 -0.1255D+06 -0.1203D-10 -0.1980D+09 0.1811D-08
0.0000D+00
-----以下省略-----

```

- (\*1) 骨組のどこかが新たに降伏したステップ85での5組の荷重と変位が出力されている。
- (\*2) 現時点までに降伏した節点と接合部の総数が出力されている。どの要素のどの節点または接合部が降伏しているかは `s8.txt` に出力されている。
- (\*3) ここより以下に出力されているデータは、要素両端の軸力・せん断力・曲げモーメント・そりモーメントの値である。変数名の意味を以下に示す。ELEM：要素 NODE：節点 (i 端, j 端の順)  
RX： $x_m$ 方向の軸力 RY： $y_m$ 方向のせん断力 RZ： $z_m$ 方向のせん断力 MX： $x_m$ 軸回りのねじりモーメント MY： $y_m$ 軸回りの曲げモーメント MZ： $z_m$ 軸回りの曲げモーメント MOMEGA： $x_m$ 軸回りのそりモーメント

例えば,

```

ELEM NODE   RX           RY           RZ           MX           MY           MZ
MOMEGA
1 1 0.9595E+06 0.1525E-11 0.1294E+06 0.6275E-11 -0.2523E+09 0.4403E-08
0.0000E+00

```

は要素1の最初の節点1となっているので、節点番号1の節点に接合されている要素番号1の要素のi端に生じている各断面力の値である。曲げモーメント分布図を描くときなどは要素座標軸の向きに注意する必要がある。コードアングルの項を参照されたい。

#### (5) 荷重～変位関係の最終点での要素端力：s9.txt

前記のように、骨組の降伏の進展状況は `s8.txt` に、骨組のどこかが降伏するたびに各要素の軸力、せん断力および曲げモーメントが `s9.txt` に出力される。ところが、PC部材についてはPC鋼棒を主要な断面要素として降伏を判定しているため、実際には部材は降伏しているのにそれが降伏と判断されない場合がある(荷重～変位関係そのものは鉄筋やコンクリートの降伏を考慮して計算されているので非線形になる)。また、様々な事情で計算が途中で止まることもある。そこで、骨組の降伏判定の結果にかかわらず、解析の最後の状況を `s8.txt` や `s9.txt` に出力させるようにした。`s7.txt` の荷重～変位関係のある特定の時点での部材断面力が必要な場合は、最後の除荷点(5章の(10)参照)の変位をその時点の変位に合わせて入力して計算させれば `s8.txt` と `s9.txt` の最後にその時の状況が出力される。

## 7. FPHM-D の使い方

### 7. 1 プログラムの概要 <sup>17)</sup>

解析法の基本である解析モデルは、動的には任意形状の骨組への適用を考慮して節点に質量を集める質点系とし、復元力を動的モデルとは別に準備する復元力算定用モデルで求めるものである。動的モデルにおいては Newmark- $\beta$  法を基本とする反復法によって各時間ステップで運動方程式を満足するように加速度を収束させていること、復元力モデルにおいては前章までに述べた FPHM を用いて各部材の軸力と二軸曲げモーメントの相互作用を精密に評価し追跡していることを特徴としている。動的な解析に際して、骨組を次のような方針のもとにモデル化する。

- (1) 骨組の各層の質量を原則として柱はり接合部に集中させる。集中質量の動的応答に関する自由度は、水平二軸および上下方向への並進とする。
- (2) 各層の応答は、その層の重心に近い4個の質点の平均値として得る。
- (3) 計算時間の増大をさけるため、補正モデルの使用を原則とする。

本解析法では一つの時間ステップにおいて二種類の収束計算を行う。一つは運動方程式を満足させるための加速度の収束計算、もう一つは骨組を構成する繊維化塑性関節モデルの各要素両端断面について、骨組の振動による変位増分で生じる一般化応力増分に対して行う Newton-Raphson 法を用いた一般化応力～一般化ひずみ関係の収束計算である。各断面の繊維は骨組の振動による一般化応力の変動や Newton-Raphson 法による反復計算で除荷や再負荷を頻繁に繰返すため、有限桁数の数値で処理を進める数値計算上の事情で要素の弾塑性接線剛性行列が正しく得られず、骨組の復元力が急激に変化して加速度の収束計算が発散するという現象がしばしば生じる。この発散現象は一般化応力の履歴に起因するものであるから時間増分の大小には必ずしも依存せず、例えば 1/5000 秒以下の微小な時間増分でも解析不能となる場合がある。

本プログラムの最大の特徴は、上記の発散現象を回避するため、ある時間ステップにおいて加速度の収束計算の試行回数がある値を越えた場合、時間増分  $H$  を最初に設定した時間増分  $\Delta t$  の 1.1 倍にして再試行し、それでも収束しなければ 1.2 倍にして再試行する点にある。この時間増分を変えての再試行を可能にするために、骨組の復元力の計算をその時間ステップの最初の近似変位に対してのみ行うことにしている。こうすることで骨組は加速度の収束のための繰返し計算とは無縁となり、時間増分を 10% 増やして得られた新しい推定変位に対する復元力で加速度の収束を試すことができる。この時間増分の変更は骨組を上記の数値計算的に不安定な状態から少しシフトさせる効果があると思われる。

## 7. 2 2層1スパン門形平面ラーメンの振動解析例

### (1) 入力データファイルの作成

入力データの構造を理解していただくために、図13に示す2層1スパンの門形平面ラーメン（4章の骨組を二段重ねて同じ部材寸法で2層にした骨組）の面内振動解析に必要な入力データファイルの内容を説明する。第1層の柱の柱頭と第2層の柱の柱頭に集約される質量の大きさは等しいと仮定する。部材の断面形状などの詳細については4章を参照されたい。

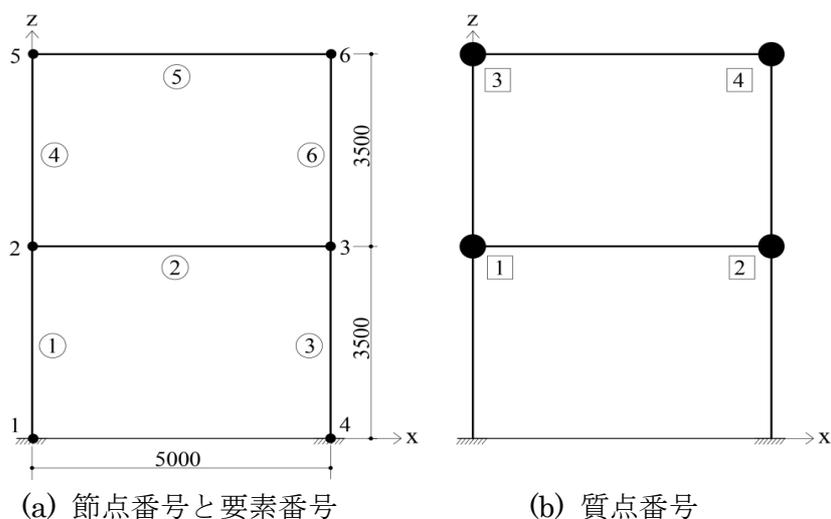


図13 解析対象骨組 (X方向の面内振動)

FPHM-Dでは骨組を以下のように取り扱う。

- (1) 骨組の各層の質量を原則として柱はり接合部に集中させる。RCスラブは、面内剛性を5章の(5)で述べたRCスラブ置換ブレースに置換する（立体骨組の場合）とともに、はりの曲げ挙動への影響をはりを合成はりとすることによって評価する。解析結果は層間変位と層せん断力の形で出力させる。層の変位はその層の重心に近い4個の質点の変位の平均値で代表させるが、その4個の質点の番号を選択できるようにする。
- (2) 集中質量の動的応答に関する自由度は、水平2軸（X, Y軸）および上下方向（Z軸）への並進とし、必要に応じてX方向のみ、Y方向のみ、XおよびYの2方向同時振動、X, Y, Zの3方向への同時振動の4種類の解析を選択できるようにする。
- (3) 骨組の線材への置換の原点に立って、H形鋼はりと角形鋼管柱の図心の交点を柱はり接合部と考える。原則としてパネルゾーンの詳細は無視する。柱の局部座屈を主因とする骨組の倒壊挙動を適用範囲外とすることを前提として、鋼材の降伏後の構成則はvon Misesの降伏条件とZieglerの移動硬化則のもと、降伏後のひずみ硬化係数がヤング率 $E$ の $\beta$ 倍一定のまま

であると仮定して定式化している．ここに $\beta$ は無次元化ひずみ硬化係数であり，データとして入力する．コンクリートの構成則は図2のような劣化挙動のないtrilinear形を仮定する．

入力データファイルの作成方法を以下に説明する．FPHM-D では基本次元である長さ，力，時間の単位を [ mm, N, s ] に固定しているので注意されたい．

(1) 部材の接合部以外（例えばはりの中間部）に初期集中荷重や初期分布荷重が載荷されていても，ひとまずこれらを見捨てて1部材を1要素として5章の（1）～（7）で述べた方法に従って骨組の入力データを作成する．部材の中間部にも質点を置きたいときにはそこにも節点が必要である．節点間を必ず1要素で近似しなければならないので「要素の再分割数」は必ず1または5（1部材1要素近似）とする．5章の（8）の荷重増分以降の情報は準静的な解析で用いるものなので，ここでは必要ない．結果として図13(a)のように節点番号と要素番号が決まる．減衰係数行列はこのデータに基づく剛性行列の成分を用いて作成される．このデータファイルに例えば `fd.txt` という名前を付けて保存しておく．

(2) 上記の `fd.txt` をもとにして，部材中間部の初期集中荷重（初期分布荷重は等価な初期集中荷重に置き換える）の作用点で質点を置かない場所，およびブレースなどの弾塑性座屈する可能性のある部材を4要素程度に分割して節点を追加（`fd.txt` の節点番号は変更しないで）し，要素番号を付け直したデータファイルを作成して，例えば `fr.txt` という名前で保存する．骨組の復元力はこのデータによって算定される．部材中間部の初期荷重やブレースがなければ `fd.txt` と `fr.txt` は全く同じ内容になるが，`fr.txt` では「要素の再分割数」として必要に応じて2～4（補正モデル（4章の（2）参照）使用で再分割しないときは5）が選択できる．4にすれば1部材を標準モデル4要素で近似するので精度上の心配はないが，計算時間は1または5のときに比べてかなり増大する．振動応答のおおよその傾向を把握するのが目的であれば，補正モデルを用いて1部材1要素近似で解析すれば計算時間を大きく低減できる．ただし，この場合は層間変形角や層せん断力の最大応答値に1部材4要素近似に対して目安として16%前後の差が生じる可能性があるので注意を要する<sup>22)</sup>．

(3) 上記 `fd.txt` と `fr.txt` が準備できたら，全体の入力データファイルの作成に入る．まず図13(b)のように `fd.txt` で節点としたところに質点を置き，順次番号を付ける．

入力データファイルの作成に必要なデータは以下のものである．

- (a) 質点の数
- (b) 質点番号と対応する節点番号
- (c) 質点番号と質量の大きさ ( $N/(mm/s^2)$ )
- (d) 振動の方向
- (e) 骨組の固有振動数  $f_1, f_2$  と減衰定数  $h_1, h_2$

- (f) 各質点の X, Y, Z 方向初期変位 (mm)
- (g) 各質点の X, Y, Z 方向初期速度 (mm/s)
- (h) 各質点の X, Y, Z 方向初期加速度 (mm/s<sup>2</sup>)
- (i) 地震動の X, Y, Z 方向最大加速度 (mm/s<sup>2</sup>), 時間刻みと解析範囲 (秒)
- (j) 骨組の層数
- (k) 各層の番号と代表質点番号 (各 4)
- (l) 各層の番号と階高 (mm)
- (m) 各層の番号と質量 (N/(mm/s<sup>2</sup>))
- (n) 結果を出力する層の番号 5 個

図 13 と 4 章の記述をもとに順次入力データを作成する。入力データファイルには FPHM のときと同様に引用符で挟まれたコメントも必ず入れなければならない。

- (a) 質点の数

'質点の数'  
4

- (b) 質点番号と対応する節点番号

'質点番号と対応する節点番号'  
1, 2  
2, 3  
3, 5  
4, 6

- (c) 質点番号と質量の大きさ (N/(mm/s<sup>2</sup>))

第 1 層の柱の初期軸力を降伏軸力の 0.2 倍の 693,000N に設定する。この軸力が柱の分担する質量で生じていると考えれば、その質量の大きさは  $693000/9800=70.7$  N/(mm/s<sup>2</sup>) となる。第 1 層と第 2 層の集中質量の大きさが等しいと仮定しているため、各質点の質量の大きさは  $70.7$  N/(mm/s<sup>2</sup>) の半分になる。

'質点番号と質量の大きさ (N/(mm/s<sup>2</sup>))'  
1, 35.4  
2, 35.4  
3, 35.4  
4, 35.4

(d) 振動の方向

振動の方向は文字定数で指定する。X方向のみの面内振動は'X'，Y方向のみなら'Y'，水平2方向なら'B'，鉛直方向も含めた3方向なら'T'とする。'T'以外では鉛直方向振動を考慮しない仕様になっている。この解析例はX方向面内振動である。従って，

```
'振動の方向'  
'X'
```

このように振動の方向を'X'と指定したときは，上で説明した復元力算定用骨組データ fr.txt の中で面外方向 (Y 方向) の変位を拘束しておく必要がある。減衰係数行列を評価するための骨組データ fd.txt は骨組の初期剛性行列を求めるためのものなので変位の固定条件は任意で構わないが，混乱を避けるために fr.txt と同じにしておく方がよい。

なお，X 方向面内振動で鉛直方向 (Z 方向) 地動加速度の影響を考慮したければ，振動の方向に'T'を指定し，下記の(i)項の「Y 方向の地動加速度の最大値」を0とおくことによって解析が可能である。

(e) 骨組の固有振動数 f1(Hz)，f2(Hz)と減衰定数 h1，h2

減衰係数行列を作成するためのデータである。骨組の固有振動数の計算法については後で述べる。FPHM-D では h2 が正ならばレイリー形減衰，h2 が0ならば質量比例形減衰，h2 が負ならば初期剛性比例形減衰として設定するようにしてある。この例では h1，h2 とともに 0.03 としレイリー形減衰を仮定する。従って，

```
'骨組の固有振動数 f1(Hz)，f2(Hz)と減衰定数 h1，h2'  
1. 10, 3. 60, 0. 03, 0. 03
```

(f) 各質点の X，Y，Z 方向初期変位 (mm)

地震応答解析の場合，通常すべて0となる。従って，

```
'X 方向初期変位 (mm)'  
0, 0, 0, 0  
'Y 方向初期変位 (mm)'  
0, 0, 0, 0  
'Z 方向初期変位 (mm)'  
0, 0, 0, 0
```

(g) 各質点の X，Y，Z 方向初期速度 (mm/s)

地震応答解析の場合，通常すべて0となる。従って，

'X 方向初期速度(mm/s)'

0, 0, 0, 0

'Y 方向初期速度(mm/s)'

0, 0, 0, 0

'Z 方向初期速度(mm/s)'

0, 0, 0, 0

(h) 各質点の X, Y, Z 方向初期加速度(mm/s<sup>2</sup>)

地震応答解析の場合、通常すべて 0 となる（ただし、次の節で述べる骨組の固有振動数の計算時には各質点に適切な値を設定する必要がある）。従って、

'X 方向初期加速度(mm/s<sup>2</sup>)'

0, 0, 0, 0

'Y 方向初期加速度(mm/s<sup>2</sup>)'

0, 0, 0, 0

'Z 方向初期加速度(mm/s<sup>2</sup>)'

0, 0, 0, 0

(i) 地震動の X, Y, Z 方向最大加速度(mm/s<sup>2</sup>)、時間刻みと解析範囲(sec)

地震応答解析では実際の地震波記録を使いながら、その最大加速度を再設定することが多い。ここでは X 方向最大加速度を 4000mm/s<sup>2</sup>、時間刻みを 0.002 秒、解析範囲を 20 秒間に仮定する。この例では X 方向の面内振動なので Y および Z 方向の最大加速度は任意の値でよい（プログラム内部で無視される）が、混乱を避けるために 0 としておいた方がよい。なお、時間刻みは建築骨組であれば 0.001~0.002 秒が適している。

'X, Y, Z 方向最大加速度(mm/s<sup>2</sup>)、時間刻みと解析範囲(sec)'

4000, 0, 0, 0.002, 20

(j) 骨組の層数

'層数'

2

(k) 各層の番号と代表質点番号(各 4)

骨組の変位応答は一般に層間変形角で表現される。本解法では質量を節点に集中させるとともに、立体骨組の場合 RC スラブの面内剛性を両端ピンのブレースに置き換えているので、層の変位を床の重心の近くの 4 個の質量（重心を囲むような）の変位の平均値で評価する。さら

に、この層の変位から一つ下の層の変位を差し引いた値（層間変位）を次の(1)項で入力する階高で除して層間変形角を求めて出力する仕様になっている（鉛直(Z)方向は層間変位）。この例題では明らかに、

’各層の番号と代表質点番号(各4)’

1, 1, 1, 2, 2

2, 3, 3, 4, 4

となる。ある層に質点が一つしかない場合は、同じ番号をコンマで区切って並べる。

(l) 各層の番号と階高(mm)

層間変形角を計算するための階高である。

’各層の番号と階高(mm)’

1, 3500

2, 3500

(m) 各層の番号と質量(N/(mm/s<sup>2</sup>))

本解法では、層せん断力を上記(k)項で指定した各層の4個の代表質点の加速度の平均値と各層の質量を用いて算出している。ある層の質量はその層に属するすべての質点の質量を合算して求める。

’各層の番号と質量(N/(mm/s<sup>2</sup>))’

1, 70.7

2, 70.7

(n) 結果を出力する層の番号5個

配布するプログラムでは出力データの量を勘案して、骨組のいずれか5つの層の層せん断力と層間変形角（おのおの3軸方向の値）のみを出力するようにしている。6個以上の層の結果を得るには、同じ計算を層の番号を変えて再実行する必要がある。

’結果を出力する層の番号5個’

1, 2, 2, 2, 2

以上が動的な解析に必要なデータのすべてである。上記(j)～(n)の説明で明らかなように、FPHM-Dは建築骨組に特化して出力が設計されている。しかし、単純支持はりなどの単一材を複数の要素と複数の質点でモデル化して振動応答解析を行うことも、1回の計算で1つの質点の応答しか出力できないという不便さはあるが、以下に述べるように入力データを設定することで

可能である.

単一材を何個の質点に置換するかは任意であるが, 質点の個数に関係なく'層数'を1とおく. 1以外は使えない. 次に'各層の番号と代表質点番号(各4)'  
'として目的の質点番号(同じ番号4つ)を指定し,'各層の番号と階高(mm)'  
'に対して階高を1とおき,'各層の番号と質量(N/(mm/s<sup>2</sup>))'  
'に対してその質点の質量を書き,'結果を出力する層の番号5個'として「1, 1, 1, 1, 1」と指定すれば, 目的の質点の変位応答(mm)とその点に作用しているせん断力(N)が出力される. この方法は, 骨組の中の特定の質点の挙動を知りたいときにも応用できる.

さて, 上記のデータに fd.txt と fr.txt のデータを順次追加したものが FPHM-D 用の入力データファイルとなる. 要素として上に述べた補正モデルを使用したときの入力データファイル frame-d-2d-mod.txt (d は dynamic, 2d は平面骨組, mod は補正モデルの意) の内容を以下に示す. この例の場合, fd.txt と fr.txt のデータは全く同じになる.

-----ここから-----

'質点の数'

4

'質点番号と対応する節点番号'

1, 2

2, 3

3, 5

4, 6

'質点番号と質量の大きさ(N/(mm/s<sup>2</sup>))'

1, 35.4

2, 35.4

3, 35.4

4, 35.4

'振動の方向'

'X'

'固有振動数 f1 (Hz), f2 (Hz) と減衰定数 h1, h2'

1. 1, 3.6, 0.03, 0.03

'X 方向初期変位 (mm)'

0, 0, 0, 0

'Y 方向初期変位 (mm)'

0, 0, 0, 0

'Z 方向初期変位 (mm)'

0, 0, 0, 0

'X 方向初期速度 (mm/s)'

0, 0, 0, 0  
'Y 方向初期速度 (mm/s)'  
0, 0, 0, 0  
'Z 方向初期速度 (mm/s)'  
0, 0, 0, 0  
'X 方向初期加速度 (mm/s<sup>2</sup>)'  
0, 0, 0, 0  
'Y 方向初期加速度 (mm/s<sup>2</sup>)'  
0, 0, 0, 0  
'Z 方向初期加速度 (mm/s<sup>2</sup>)'  
0, 0, 0, 0  
'X, Y, Z 方向最大加速度 (mm/s<sup>2</sup>), 時間刻みと解析範囲 (sec)'  
4000, 0, 0, 0.002, 20  
'層数'  
2  
'各層の番号と代表質点番号 (各 4)'  
1, 1, 1, 2, 2 (同じ質点番号でもよい)  
2, 3, 3, 4, 4  
'各層の番号と階高 (mm)'  
1, 3500  
2, 3500  
'各層の番号と質量 (N/(mm/s<sup>2</sup>))'  
1, 70.7  
2, 70.7  
'結果を出力する層の番号 5 個'  
1, 2, 2, 2, 2 (同じ層番号でもよい)  
(ここからが fd.txt. ここに 1 行空白をいれておくと後で見やすい)  
'1 要素の再分割数: 再分割しない場合は 1, 補正モデルは 5'  
5 (fd.txt は弾性剛性を求めるためのデータなので, ここは 1 でも 5 でもよい)  
'節点数と要素数'  
6, 6  
'節点番号と節点の X, Y, Z 座標値 (mm) '  
1, 0, 0, 0  
2, 0, 0, 3500  
3, 5000, 0, 3500  
4, 5000, 0, 0  
5, 0, 0, 7000  
6, 5000, 0, 7000

'要素番号と要素両端 i, j の節点番号'

1, 1, 2

2, 2, 3

3, 4, 3

4, 2, 5

5, 5, 6

6, 3, 6

'断面形状の数'

2

'各要素の断面番号(要素番号順)'

1, 2, 1, 1, 2, 1

'断面1のデータ'

'S', 300, 300, 9, 9, 330, 210000, 0.01, 0.3

0, 0, 0, 0

0, 0, 0

0, 0, 0

'断面2のデータ'

'H', 400, 200, 8, 13, 326, 210000, 0.01, 0.3

0, 0, 0, 0

0, 0, 0

0, 0, 0

'各要素のコードアングル(要素番号順)'

0, 0, 0, 0, 0, 0

'i端が半剛接の要素の数'

0

'j端が半剛接の要素の数'

0

'引張りブレースの数'

0

'鋼材制振ブレースおよびトラス部材の数と要素番号'

0

'RCスラブ置換ブレースの数と要素番号'

0

'固定節点の数 (U, V, W,  $\theta_x$ ,  $\theta_y$ ,  $\theta_z$ ,  $\psi$  の順) とその節点番号'

2, -1, 2, -1, 2, -1, -1

1, 4

1, 4

1, 4

'初期荷重の数 (Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz の順) および節点番号と荷重値 (N) '

0, 0, 4, 0, 0, 0

2, -346500 (693,000 (N) の半分)

3, -346500

5, -346500

6, -346500

(ここからが fr.txt. ここに 1 行空白をいれておくと後で見やすい)

' 1 要素の再分割数 : 再分割しない場合は 1, 補正モデルは 5 '

5 (fr.txt は復元力を求めるためのデータなので, 5 または 4 を用いる. 4 とすると標準モデルで 1 部材 4 要素近似の精解となるが計算時間が増大する)

'節点数と要素数'

6, 6

'節点番号と節点の X, Y, Z 座標値 (mm) '

1, 0, 0, 0

2, 0, 0, 3500

3, 5000, 0, 3500

4, 5000, 0, 0

5, 0, 0, 7000

6, 5000, 0, 7000

'要素番号と要素両端 i, j の節点番号'

1, 1, 2

2, 2, 3

3, 4, 3

4, 2, 5

5, 5, 6

6, 3, 6

'断面形状の数'

2

'各要素の断面番号(要素番号順)'

1, 2, 1, 1, 2, 1

'断面 1 のデータ'

'S', 300, 300, 9, 9, 330, 210000, 0.01, 0.3

0, 0, 0, 0

0, 0, 0

0, 0, 0

'断面 2 のデータ'

'H', 400, 200, 8, 13, 326, 210000, 0.01, 0.3

0, 0, 0, 0

```

0, 0, 0
0, 0, 0
'各要素のコードアングル(要素番号順)'
0, 0, 0, 0, 0, 0
' i 端が半剛接の要素の数'
0
' j 端が半剛接の要素の数'
0
'引張りブレースの数'
0
'鋼材制振ブレースおよびトラス部材の数と要素番号'
0
'RCスラブ置換ブレースの数と要素番号'
0
'固定節点の数 (U , V , W ,  $\theta_x$  ,  $\theta_y$  ,  $\theta_z$  ,  $\psi$  の順) とその節点番号'
2, -1, 2, -1, 2, -1, -1
1, 4
1, 4
1, 4
'初期荷重の数 (Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz の順) および節点番号と荷重値 (N) '
0, 0, 4, 0, 0, 0
2, -346500
3, -346500
5, -346500
6, -346500
-----ここまで-----

```

fd.txt に対応する方の骨組データは、補正モデルではなく通常の標準モデルで1部材1要素近似でも構わないのであるが、fd.txt と fr.txt の内容を同じにするほうが混乱しないと思われるため fr.txt に合わせている。fr.txt に対応する方の「1要素の再分割数」を4とすれば、復元力の計算のための骨組を標準モデルで1部材4要素に自動的に再分割する。この場合は精解が得られるが、計算時間はかなり増大する。

## (2) 骨組の固有振動数の計算

前節で述べたように、骨組の減衰係数行列を作成するためには一般に第1次と第2次の固有振動数と対応する減衰定数が必要である。減衰定数は通常 0.02 または 0.03 が使われるが、固有振動数は骨組ごとに何らかの方法で求めなければならない。筆者は上記の frame-d-2d-mod.txt を

利用して、その中の減衰定数, X, Y, Z 方向最大加速度, および初期荷重を 0 とおき, 骨組の最上階の床を構成する質点すべてに  $50\text{mm/s}^2$  程度の初期加速度を与え, 解析範囲を 20 秒以上にした `frame-d-2d-free.txt` を作って弾性自由振動の計算を行い, 得られる変位応答時刻歴をフーリエ変換することによって得ている. FPHM-D には筆者が作成した素朴なフーリエ変換の実行プログラム `ft64.exe` を添付している.

具体的な固有振動数の求め方は以下の通りである.

- (1) `frame-d-2d-free.txt` を入力データとして自由振動の計算を実行し, 変位応答時刻歴の出力ファイルである `d7.txt` を得る.
- (2) `d7.txt` を `ft64.exe` の入力データとしてリダイレクトで計算を実行 (添付の `ft64.bat` をダブルクリック) させれば, X 方向, Y 方向および Z 方向の変位応答スペクトルが, それぞれ `fsx.txt`, `fsy.txt`, `fsz.txt` に出力される. 1 列目が振動数 (Hz), 2 列目が相対変位である. 相対変位のピークのときの振動数が固有振動数である.

この例題では床の自由度は X 方向のみ 2 層の「2」であり問題はないが, 多層多スパン立体骨組の場合は, 減衰係数行列の作成にどのような固有振動数と減衰定数を設定するかを慎重に検討する必要がある.

### (3) 地動加速度データファイルの準備

地動加速度データは, 一般に時間刻みと単位の情報とともに数値列で提供される. FPHM-D は, 3 方向の地動加速度データがそれぞれ `x.acc`, `y.acc`, `z.acc` の 3 個のファイルに入っていると想定してプログラミングされている. また, それぞれのファイルの先頭に, 時間刻みと単位の情報がある形で書かれていることを求めている.

```
'時間刻み(sec)=' , 0.02                (文字データ, 数値データ)
'UNIT([-m] or [cm] or [mm])=' , '-m'    (文字データ, 文字データ)
```

いずれも最初の文字データは読み捨てられる. 2 行目の「'-m'」はデータファイル中の加速度の単位が  $\text{m/s}^2$ であることを示している.

添付ファイルの中のフォルダ「`frame-d-2d`」中にある「`el-ew.acc`」は,

The Earthquake Engineering Online Archive, <http://nisee.berkeley.edu/>

から入手したエルセントロの `ew` 方向のデータを FPHM-D 用に設定したファイルである. このように, 地動加速度データファイルの名前は自由に付けて構わない. 計算を実行させるときのバッチファイル (`*.bat`) の先頭に「`copy el-ew.acc x.acc`」のように書いておけばよい. 3 次

元振動の場合もこれに準じる。なお、自由振動をさせるときにもこの地動加速度データファイルは必ず存在していなければならない。

### 7. 3 FPHM-D の実行と結果の出力

FPHM-D の実行形ファイルの名前は `d64.exe` で、約 1200 節点までの解析が可能であるが、必要記憶容量を減らして計算速度を上げた `md64.exe` (`m` は `mini` の意で約 600 節点までの解析が可能) も添付している。以下、`md64.exe` を前提に話を進める。適当なエディタで例えば `frame-d-2d.bat` というバッチファイルを作り、上記の地動加速度データファイルの `copy` 命令の次の行に、

```
md64.exe<frame-d-2d-mod.txt
```

と書いてリターンキーを押し、エディタを終了する。ここに、`frame-d-2d-mod.txt` は入力データファイルの名前である。`md64.exe` がもし他のフォルダに入っている時にはフルパス名を書かなければならない。筆者の場合は `md64.exe` を `C:\¥study¥base¥dynamic` というフォルダに置いているので、`frame-d-2d.bat` の中の該当する行は次のようになっている。バッチファイルの編集はそのファイルを右クリックして出てくるメニューから「編集」をクリックすることで可能である。

```
C:\¥study¥base¥dynamic¥md64.exe<frame-d-2d-mod.txt
```

さて、`frame-s-2d.bat` をダブルクリックすると計算が始まり、ディスプレイに `cmd.exe` のウィンドウが開いて計算が行われていることがわかる。計算が終了するとこのウィンドウが自動的に閉じ、計算が終了したことを知ることができる。計算が終了すると `d6.txt`, `d7.txt`, `d8.txt`, `d9.txt` および `d10.txt` の 5 個のファイルに結果が出力される。同名のファイルが既に同じフォルダにあると上書きされるので注意を要する。各出力ファイルの内容は以下のようである。

`d6.txt` : 入力データのチェック

`d7.txt` : 入力で指定した最初の 2 つの層の層せん断力と層間変形角の時刻歴

`d10.txt` : 3 番目から 5 番目に指定した層の層せん断力と層間変形角の時刻歴

`d8.txt` : 200 ステップおきの骨組の降伏の進展状況、各節点の座標値、および現時点までの各層の変位・層間変形角・加速度・層せん断力の最大値

`d9.txt` : 200 ステップおきの全要素の要素端力

以下に、添付のデータファイル `frame-d-2d-mod.txt` (2 層 1 スパン門形平面ラーメン) を入力データファイルとして指定して解析したときの出力ファイルを用いてそれぞれのファイルの内容を説明する。左側が出力、右側の赤字が説明である。単位系として (`mm`, `N`, `s`) を用いているので、質量の単位は  $N/(mm/s^2)$  となる。

(1) 入力データのチェック : d6.txt

mini-FPHM-D v5.10 (C)SHUGYO, M. 3/5/2024

(FPHM-D のバージョンと作成日)

(ここから振動解析用データ)

\*\*\* DATA-INPUT FOR DYNAMIC ANALYSIS STARTED \*\*\*

(質点の数)

NUMBER OF MASSES

4

(質点番号と対応する節点番号)

NODE NUMBERS OF MASS-POINTS

MASS-NO. NODE-NO.

1	2
2	3
3	5
4	6

(各質点の質量の大きさ)

MAGNITUDES OF MASSES

MASS-NOS

4 0.3540D+02 0.3540D+02 0.3540D+02 0.3540D+02

(振動の方向 : この例ではX方向の1軸)

DIRECTIONS OF MOTION

UNI-AXIAL (X)

(2つの固有振動数と対応する減衰定数)

TWO NATURAL FREQUENCIES AND TWO DAMPING FACTORS

H2>0 : RAYLEIGH DAMPING

H2=0 : MASS PROPORTIONAL DAMPING

H2<0 : INITIAL STIFFNESS PROPORTIONAL DAMPING

F1= 0.1100D+01 F2= 0.3600D+01 H1= 0.3000D-01 H2= 0.3000D-01

(各質点のX方向初期変位)

INITIAL DISPLACEMENTS (X-DIRECTION)

MASS-NOS

```

4 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00
(各質点のY方向初期変位)
INITIAL DISPLACEMENTS (Y-DIRECTION)
MASS-NOS
4 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00D
(各質点のZ方向初期変位)
INITIAL DISPLACEMENTS (Z-DIRECTION)
MASS-NOS
4 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00
-----

(各質点のX方向初期速度)
INITIAL VELOCITIES (X-DIRECTION)
MASS-NOS
4 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00
(各質点のY方向初期速度)
INITIAL VELOCITIES (Y-DIRECTION)
MASS-NOS
4 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000ED00
(各質点のZ方向初期速度)
INITIAL VELOCITIES (Z-DIRECTION)
MASS-NOS
4 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00
-----

(各質点のX方向初期加速度)
INITIAL ACCELERATIONS (X-DIRECTION)
MASS-NOS
4 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00
(各質点のY方向初期加速度)
INITIAL ACCELERATIONS (Y-DIRECTION)
MASS-NOS
4 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00
(各質点のZ方向初期加速度)
INITIAL ACCELERATIONS (Z-DIRECTION)
MASS-NOS
4 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00
-----

(3方向地動の最大加速度の指定, Δt と時間範囲)
MAX-ACC-X MAX-ACC-Y MAX-ACC-Z DELTT TEND

```

0.4000D+04 0.0000D+00 0.0000D+00 0.2000D-02 0.2000D+02

---

(各層の重心位置をおおよそ対称点とする4個の質点の番号. 層の変位はこの  
4質点の変位の平均値として評価する)

FOUR REPRESENTATIVE MASS NUMBERS OF EACH STORY

NUMBER OF STORIES= 2

1 STORY :	1	1	2	2
2 STORY :	3	3	4	4

---

(各層の階高)

HEIGHT OF EACH STORY

1 STORY :	0.3500D+04
2 STORY :	0.3500D+04

---

(各層の質量)

MASS OF EACH STORY

1 STORY :	0.7070D+02
2 STORY :	0.7070D+02

---

(d7.txt と d10.txt に時刻歴を出力する層の番号5個)

FIVE STORY NUMBERS FOR OUTPUT OF RESULTS

1	2	2	2	2
---	---	---	---	---

---

(ここまでが振動解析用データ)

\*\*\* DATA-INPUT FOR DYNAMIC ANALYSIS COMPLETED \*\*\*

(ここからが減衰係数行列作成用骨組の入力データ)

\*\*\* ESTIMATION OF C-MATRIX USING ONE ELEMENT MODEL FRAME STARTED \*\*\*

\*\*\* FPHM DATA-INPUT STARTED \*\*\*

(GRADIENT OF ELASTIC STRAIN ENERGY)

INPUT OF NUMBERS OF NODES AND ELEMENTS

INPUT OF COORDINATES OF EACH NODE

INPUT OF NODE NUMBERS OF EACH ELEMENT

INPUT OF NUMBER OF KINDS OF MEMBERS

INPUT OF SECTION-NUMBER OF EACH ELEMENT

INPUT OF DATA OF CROSS SECTION- 1

INPUT OF DATA OF CROSS SECTION- 2

INPUT OF CHORD ANGLE OF EACH ELEMENT  
 INPUT OF DATA OF SEMI-RIGID CONNECTIONS  
 I-SECTIONS  
 J-SECTIONS  
 INPUT OF DATA OF TENSION BRACES  
 INPUT OF DATA OF STEEL DAMPERS AND TRUSS MEMBERS  
 INPUT OF DATA OF SLAB EQUIVALENT BRACES  
 INPUT OF NUMBERS, NODE NOS OF FIXED POINTS  
 INPUT OF NUMBERS, NODE NOS AND INITIAL LOADS  
 \*\*\* FPHM DATA-INPUT COMPLETED \*\*\*

-----

NDIV= 5 (補正モデルを用いた1部材1要素近似)

-----

NNOD= 6 NELM= 6

-----

NODE	X(I)	Y(I)	Z(I)
1	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00
2	0.0000D+00	0.0000D+00	0.3500D+04
3	0.5000D+04	0.0000D+00	0.3500D+04
4	0.5000D+04	0.0000D+00	0.0000D+00
5	0.0000D+00	0.0000D+00	0.7000D+04
6	0.5000D+04	0.0000D+00	0.7000D+04

-----

ELM	NODES	SECT-NO	SHAPE	A	YI	ZI	AKT	WI
RI	CEA	CEYI	CEZI					
1	1 2	1	S	0.1048D+05	0.1480D+09	0.1480D+09	0.2218D+09	0.0000D+00
								0.8764D+13
2	2 3	2	H	0.8192D+04	0.2296D+09	0.1735D+08	0.3568D+06	0.6490D+12
								0.8692D+13
3	4 3	1	S	0.1048D+05	0.1480D+09	0.1480D+09	0.2218D+09	0.0000D+00
								0.8764D+13
4	2 5	1	S	0.1048D+05	0.1480D+09	0.1480D+09	0.2218D+09	0.0000D+00
								0.8764D+13

5 5 6 2 H 0.8192D+04 0.2296D+09 0.1735D+08 0.3568D+06 0.6490D+12  
0.8692D+13 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00  
6 3 6 1 S 0.1048D+05 0.1480D+09 0.1480D+09 0.2218D+09 0.0000D+00  
0.8764D+13 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00

---

SECTION-NUMBER AND CORRESPONDING DATA

NO= 1 SECTION=S D= 0.3000D+03 B= 0.3000D+03 WT= 0.9000D+01 FT= 0.9000D+01  
SYSS= 0.3300D+03 E= 0.2100D+06 HARD= 0.1000D-01 VARSP= 0.3000D+00  
CD= 0.0000D+00 CB= 0.0000D+00  
CYSS=-0.0000D+00 CE= 0.0000D+00  
Y0 Z0 PANG  
0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00

NO= 2 SECTION=H D= 0.4000D+03 B= 0.2000D+03 WT= 0.8000D+01 FT= 0.1300D+02  
SYSS= 0.3260D+03 E= 0.2100D+06 HARD= 0.1000D-01 VARSP= 0.3000D+00  
CD= 0.0000D+00 CB= 0.0000D+00  
CYSS=-0.0000D+00 CE= 0.0000D+00  
Y0 Z0 PANG  
0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00

---

CHORD ANGLES

ELEMENTS

5 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00  
6 0.0000D+00

---

DATA OF SEMI-RIGID CONNECTIONS

NISR= 0

---

NJSR= 0

---

NUMBER OF TENSION BRACES

0

NUMBER OF STEEL DAMPERS AND TRUSS MEMBERS

0

NUMBER OF SLAB EQUIVALANT BRACES

0

---

NUMBERS OF FIXED NODES

NDX= 2 NDY= 6 NDZ= 2 NRX= 6 NRY= 2 NRZ= 6 NRXX= 6

FIXED NODES FOR NDX

1 4

FIXED NODES FOR NDY

1 2 3 4 5 6

FIXED NODES FOR NDZ

1 4

FIXED NODES FOR NRX

1 2 3 4 5 6

FIXED NODES FOR NRY

1 4

FIXED NODES FOR NRZ

1 2 3 4 5 6

FIXED NODES FOR NRXX

1 2 3 4 5 6

---

INITIAL LOADS (ACTUAL VALUES)

NFXI= 0 NFYI= 0 NFZI= 4 NMXI= 0 NMYI= 0 NMZI= 0

NODE	FXI (I)	FYI (I)	FZI (I)	FMXI (I)	FMYI (I)	FMZI (I)
1	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00
2	0.0000D+00	0.0000D+00-0.3465D+06	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00
3	0.0000D+00	0.0000D+00-0.3465D+06	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00
4	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00
5	0.0000D+00	0.0000D+00-0.3465D+06	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00
6	0.0000D+00	0.0000D+00-0.3465D+06	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00

---

(RESIDUAL STRESSES IN H-SECTION NOT CONSIDERED)

---

(ここまでが減衰係数行列作成用骨組の入力データ)

(以下は得られた減衰係数行列の対角項)

DAMPING MATRIX (DIAGONAL COMPONENTS)

0.7456D+03 0.4730D+02 0.0000D+00 0.7456D+03 0.4730D+02 0.0000D+00  
0.7280D+03 0.2963D+02 0.0000D+00 0.7280D+03 0.2963D+02 0.0000D+00

\*\*\* ESTIMATION OF C-MATRIX COMPLETED \*\*\*

(ここからが復元力算定用骨組の入力データ)

\*\*\* INITIALIZATION OF THE FRAME FOR RESTORING FORCE ANALYSIS \*\*\*

\*\*\* FPHM DATA-INPUT STARTED \*\*\*

(GRADIENT OF ELASTIC STRAIN ENERGY)

INPUT OF NUMBERS OF NODES AND ELEMENTS

INPUT OF COORDINATES OF EACH NODE

INPUT OF NODE NUMBERS OF EACH ELEMENT

INPUT OF NUMBER OF KINDS OF MEMBERS

INPUT OF SECTION-NUMBER OF EACH ELEMENT

INPUT OF DATA OF CROSS SECTION- 1

INPUT OF DATA OF CROSS SECTION- 2

INPUT OF CHORD ANGLE OF EACH ELEMENT

INPUT OF DATA OF SEMI-RIGID CONNECTIONS

I-SECTIONS

J-SECTIONS

INPUT OF DATA OF TENSION BRACES

INPUT OF DATA OF STEEL DAMPERS AND TRUSS MEMBERS

INPUT OF DATA OF SLAB EQUIVALENT BRACES

INPUT OF NUMBERS, NODE NOS OF FIXED POINTS

INPUT OF NUMBERS, NODE NOS AND INITIAL LOADS

\*\*\* FPHM DATA-INPUT COMPLETED \*\*\*

-----  
NDIV= 5 (補正モデルを用いた1部材1要素近似)  
-----

NNOD= 6 NELM= 6  
-----

NODE	X(I)	Y(I)	Z(I)
1	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00

2 0.0000D+00 0.0000D+00 0.3500D+04  
 3 0.5000D+04 0.0000D+00 0.3500D+04  
 4 0.5000D+04 0.0000D+00 0.0000D+00  
 5 0.0000D+00 0.0000D+00 0.7000D+04  
 6 0.5000D+04 0.0000D+00 0.7000D+04

---

ELM	NODES	SECT-NO	SHAPE	A	YI	ZI	AKT	WI
RI	CEA	CEYI	CEZI					
1	1	2	1	S	0.1048D+05	0.1480D+09	0.1480D+09	0.2218D+09
0.8764D+13	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00					0.0000D+00
2	2	3	2	H	0.8192D+04	0.2296D+09	0.1735D+08	0.3568D+06
0.8692D+13	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00					0.6490D+12
3	4	3	1	S	0.1048D+05	0.1480D+09	0.1480D+09	0.2218D+09
0.8764D+13	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00					0.0000D+00
4	2	5	1	S	0.1048D+05	0.1480D+09	0.1480D+09	0.2218D+09
0.8764D+13	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00					0.0000D+00
5	5	6	2	H	0.8192D+04	0.2296D+09	0.1735D+08	0.3568D+06
0.8692D+13	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00					0.6490D+12
6	3	6	1	S	0.1048D+05	0.1480D+09	0.1480D+09	0.2218D+09
0.8764D+13	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00					0.0000D+00

---

SECTION-NUMBER AND CORRESPONDING DATA

NO= 1 SECTION=S D= 0.3000D+03 B= 0.3000D+03 WT= 0.9000D+01 FT= 0.9000D+01  
 SYSS= 0.3300D+03 E= 0.2100D+06 HARD= 0.1000D-01 VARSP= 0.3000D+00  
 CD= 0.0000D+00 CB= 0.0000D+00  
 CYSS=-0.0000D+00 CE= 0.0000D+00  
 YO ZO PANG  
 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00

NO= 2 SECTION=H D= 0.4000D+03 B= 0.2000D+03 WT= 0.8000D+01 FT= 0.1300D+02  
 SYSS= 0.3260D+03 E= 0.2100D+06 HARD= 0.1000D-01 VARSP= 0.3000D+00  
 CD= 0.0000D+00 CB= 0.0000D+00  
 CYSS=-0.0000D+00 CE= 0.0000D+00  
 YO ZO PANG  
 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00

---

CHORD ANGLES

ELEMENTS

5 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00 0.0000D+00  
6 0.0000D+00

---

DATA OF SEMI-RIGID CONNECTIONS

NISR= 0

---

NJSR= 0

---

NUMBER OF TENSION BRACES

0

NUMBER OF STEEL DAMPERS AND TRUSS MEMBERS

0

NUMBER OF SLAB EQUIVALANT BRACES

0

---

NUMBERS OF FIXED NODES

NDX= 2 NDY= 6 NDZ= 2 NRX= 6 NRY= 2 NRZ= 6 NRXX= 6

FIXED NODES FOR NDX

1 4

FIXED NODES FOR NDY

1 2 3 4 5 6

FIXED NODES FOR NDZ

1 4

FIXED NODES FOR NRX

1 2 3 4 5 6

FIXED NODES FOR NRY

1 4

FIXED NODES FOR NRZ

1 2 3 4 5 6

FIXED NODES FOR NRXX

1 2 3 4 5 6

---

INITIAL LOADS (ACTUAL VALUES)

NFXI=	0	NFYI=	0	NFZI=	4	NMXI=	0	NMYI=	0	NMZI=	0
NODE	FXI (I)	FYI (I)	FZI (I)	FMXI (I)	FMYI (I)	FMZI (I)					
1	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00					
2	0.0000D+00	0.0000D+00	-0.3465D+06	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00					
3	0.0000D+00	0.0000D+00	-0.3465D+06	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00					
4	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00					
5	0.0000D+00	0.0000D+00	-0.3465D+06	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00					
6	0.0000D+00	0.0000D+00	-0.3465D+06	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00					

(RESIDUAL STRESSES IN H-SECTION NOT CONSIDERED)

(ここまでが復元力算定用骨組の入力データ)

(次はもともとの加速度データの最大値と時間範囲)

MAXIMUM VALUE IN x. acc = 0.2101E+04 TIME RANGE = 0.5352E+02

(以下は入力データで指定した最大加速度の値)

MAXIMUM ACCELERATIONS USED IN THE ANALYSIS

X-DIR: 0.4000D+04 Y-DIR: 0.0000D+00 Z-DIR: 0.0000D+00

(以下は時間刻み  $\Delta t$  と解析する時間の範囲)

TIME INCREMENT AND DURATION TIME OF ANALYSIS

DELTT= 0.2000D-02 TEND= 0.2000D-02

(振動の方向)

DIRECTIONS OF MOTION

UNI-AXIAL (X)

(2番目の減衰定数が正值なのでレイリー形の減衰係数数列となっている)

RAYLEIGH DAMPING ASSUMED

(ここからは現在解析が進んでいる時刻が200ステップおきに出力される.)

$\Delta t$  を変更する機能が働いた場合はその値と時刻も出力される)

TIME= 0.0000E+00

TIME= 0.4000E+00

TIME= 0.8000E+00

TIME= 0.1200E=01

.....

.....

## (2) 指定した5つの層の層せん断力と層間変形角の時刻歴 : d7.txt と d10.txt

1行が長いのでこのマニュアルでは折り返されているが、ファイル上では折り返されないので注意されたい。d7.txtには1列目が時刻、2列目以降は入力データで指定した最初の層のX方向層せん断力、X方向層間変形角、Y方向層せん断力、Y方向層間変形角、Z方向の慣性力の総量、Z方向の層間変位、2番目の層のX方向層せん断力、X方向層間変形角、...の順に1行ずつ出力されている。

d10.txtには同じように3番目から5番目に指定した層の結果が3層分を1行として出力されている。

TIME	1-F-X	1-DRIFT-X	1-F-Y	1-DRIFT-Y	1-F-Z	1-DISP-Z
2-F-X	2-DRIFT-X	2-F-Y	2-DRIFT-Y	2-F-Z	2-DISP-Z	
0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00
0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00
0.1000D-01	-0.3177D+01	-0.1363D-07	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00
-0.2516D+01	-0.2392D-09	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00
0.2000D-01	-0.8559D+01	-0.1079D-06	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00
-0.4747D+00	-0.1227D-08	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00
0.3000D-01	-0.3357D+02	-0.4215D-06	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00
-0.2538D+00	-0.5915D-08	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00
0.4000D-01	-0.9750D+02	-0.1319D-05	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00
0.2512D+01	-0.2557D-07	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00

-----以下省略-----

## (3) 200ステップおきの骨組の降伏の進展状況、各節点の座標値、および現時点までの各層の変位・層間変形角・加速度・層せん断力の最大値 : d8.txt

200ステップおきの表記の数値の出力であり、以下のような情報が書かれている。最初の2行は時刻と層せん断力などの情報、「NUMBER OF YIELDED POINTS」は現在までに降伏している要素端の数と場所、次が現時点での節点座標値、その次が第1層から最上層の変位、層間変形角などの現在までの最大値である。

TIME	1-F-X	1-DRIFT-X	1-F-Y	1-DRIFT-Y	1-F-Z	1-DISP-Z
2-F-X	2-DRIFT-X	2-F-Y	2-DRIFT-Y	2-F-Z	2-DISP-Z	
0.2400D+01	0.3444D+06	0.1344D-01	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00
0.1585D+06	0.9666D-02	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00
NUMBER OF YIELDED POINTS=	6					

(降伏した要素端または接合部が降伏した順に出力される)

```
NODE    4 OF ELM    3 YIELDED.  
NODE    2 OF ELM    2 YIELDED.  
NODE    1 OF ELM    1 YIELDED.  
NODE    3 OF ELM    2 YIELDED.  
NODE    3 OF ELM    3 YIELDED.  
NODE    2 OF ELM    1 YIELDED.
```

---

NODE AND (X, Y, Z) COORDINATES AT THE PRESENT TIME

(振動によって変形した状態での各節点の現在の座標値)

```
2  0.4703D+02  0.0000D+00  0.3499D+04  
3  0.5047D+04  0.0000D+00  0.3497D+04  
5  0.8088D+02  0.0000D+00  0.6998D+04  
6  0.5081D+04  0.0000D+00  0.6996D+04
```

---

OBSERVED MAXIMUM VALUES AT THE 1ST TO N-TH STORY

(現時点までの各層の変位, 層間変形角, 加速度および層せん断力の絶対値の  
最大値. それぞれ第1層から順に出力されている)

DISPLACEMENTS IN X-DIRECTION

```
0.4784D+02  0.8347D+02
```

DISPLACEMENTS IN Y-DIRECTION

```
0.0000D+00  0.0000D+00
```

DRIFT ANGLES IN X-DIRECTION

```
0.1367D-01  0.1105D-01
```

DRIFT ANGLES IN Y-DIRECTION

```
0.0000D+00  0.0000D+00
```

ACCELERATIONS IN X-DIRECTION

```
0.2708D+04  0.3939D+04
```

ACCELERATIONS IN Y-DIRECTION

```
0.0000D+00  0.0000D+00
```

SHEAR FORCES IN X-DIRECTION

0.3581D+06 0.2785D+06

SHEAR FORCES IN Y-DIRECTION

0.0000D+00 0.0000D+00

=====

-----以下省略-----

(4) 200 ステップおきの全要素の要素端力 : d9.txt

200 ステップおきにすべての要素の要素端力が出力される。最初の2行は時刻と層せん断力などの情報、「NUMBER OF YIELDED POINTS」は現在までに降伏している要素端の数、その後が要素端力である。

TIME	1-F-X	1-DRIFT-X	1-F-Y	1-DRIFT-Y	1-F-Z	1-DISP-Z	
2-F-X	2-DRIFT-X	2-F-Y	2-DRIFT-Y	2-F-Z	2-DISP-Z		
0.4000D+00	-0.3589D+05	-0.9053D-03	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	
-0.1685D+05	-0.7472D-03	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00	0.0000D+00		
NUMBER OF YIELDED POINTS= 0							
RESULTANT FORCES							
ELEM	NODE	RX	RY	RZ	MX	MY	MZ
MOMEGA							
1	1	0.7145D+06	0.0000D+00	-0.1767D+05	0.0000D+00	0.3651D+08	0.0000D+00
0.0000D+00							
1	2	-0.7145D+06	0.0000D+00	0.1767D+05	0.0000D+00	0.2530D+08	0.0000D+00
0.0000D+00							
2	2	-0.1844D+02	0.0000D+00	0.1464D+05	0.0000D+00	-0.3660D+08	0.0000D+00
0.0000D+00							
2	3	0.1844D+02	0.0000D+00	-0.1464D+05	0.0000D+00	-0.3660D+08	0.0000D+00
0.0000D+00							
3	4	0.6715D+06	0.0000D+00	-0.1767D+05	0.0000D+00	0.3653D+08	0.0000D+00
0.0000D+00							
3	3	-0.6715D+06	0.0000D+00	0.1767D+05	0.0000D+00	0.2530D+08	0.0000D+00
0.0000D+00							
4	2	0.3533D+06	0.0000D+00	-0.8122D+04	0.0000D+00	0.1130D+08	0.0000D+00
0.0000D+00							
4	5	-0.3533D+06	0.0000D+00	0.8122D+04	0.0000D+00	0.1713D+08	0.0000D+00

0.0000D+00  
5 5 -0.4919D+01 0.0000D+00 0.6851D+04 0.0000D+00 -0.1713D+08 0.0000D+00  
0.0000D+00  
5 6 0.4919D+01 0.0000D+00 -0.6851D+04 0.0000D+00 -0.1713D+08 0.0000D+00  
0.0000D+00  
6 3 0.3396D+06 0.0000D+00 -0.8122D+04 0.0000D+00 0.1129D+08 0.0000D+00  
0.0000D+00  
6 6 -0.3396D+06 0.0000D+00 0.8122D+04 0.0000D+00 0.1713D+08 0.0000D+00  
0.0000D+00

=====

-----以下省略-----

## 8. グラフの作成 (gnuplot の導入)

これまで述べてきたように、解析結果は数値情報としてテキストファイルで出力されるので、何らかのグラフ作成ツールがないと仕事にならない。グラフ作成ソフトはネットで探せばフリーのものがいろいろ見つかるが、ここでは筆者が使っている **gnuplot** について簡単に説明する。

まず入手方法であるが、ネットブラウザで「gnuplot」と検索して出てくる **gnuplot** ダウンロード関連のサイトの中から <https://sourceforge.net/projects/gnuplot/> を URL とするサイトを探してクリックする。トップページの緑色のダウンロードボタンをクリックすると画面左下にダウンロードの状況がでる。ファイルの拡張子は.exe である。ダウンロードが終了したらそのファイルをクリックすればインストールが始まる。手順は一般のソフトウェアのインストールと同じである。インストールのより詳しい手順を「gnuplot のインストール.pdf」として添付している。

インストール中に「デスクトップ上にアイコンを作成する」にチェックを入れておけばインストール終了時にデスクトップにアイコンができる。このアイコンをダブルクリックすると **gnuplot** のウィンドウがディスプレイに出る。デフォルトのままでは文字が見にくいので、ウィンドウの中央部辺りで右クリック（または右上の「ヘルプ」から「オプション」をクリック）して出てくるメニューから「Choose font....」を選択してフォントを変えた方がよい。筆者は「consolas」の「12 ポイント」を使っている。次に、描画させるデータファイルを置くフォルダを指定する。アイコンを右クリックして出てくるメニューから最下段の「プロパティ」を選択すると「作業用フォルダ」という項目があるので、ここに描画用データファイルを入れるフォルダ名をフルパス名で入力して「OK」で終了させる。筆者は「C:\study\plot」というフォルダを作業用フォルダとして使っている。

**gnuplot** のアイコンをダブルクリックして出てくるウィンドウの中のプロンプトに対してコマンドを入力すればグラフが作成できる。計算結果をチェックするだけならデフォルトの設定で十分である。上に述べた **s7.txt** (FPHM の解析での層せん断力と層間変形角の出力) と **d7.txt** (FPHM-D の解析での層間変形角の時刻歴の出力) のグラフを作成する方法を以下に述べる。

### (1) **s7.txt** の場合

**s7.txt** には左から順に、入力データファイルで指定した自由度番号の荷重と変位の値がペアとなって 8 列 (荷重 1, 変位 1, 荷重 2, 変位 2, 荷重 3, 変位 3, 荷重 4, 変位 4 の順) に並んでいる。まず **s7.txt** をそのまま上記の「作業用フォルダ」にコピーする。その後、**gnuplot** のアイコンをダブルクリックしてウィンドウを出し、例えば荷重 1 (1 列目) と変位 1 (2 列目) で変位を横軸にしてグラフを描きたければ、**gnuplot** のプロンプトに対して、

```
plot 's7.txt' u 2:1 w l
```

と入力する。ファイル名は半角の引用符で挟む。u は using, w は with, l は line の略である。1 枚のグラフに複数の線を同時に描きたければ,

```
plot 's7.txt' u 2:1 w l, 's7.txt' u 4:3 w l
```

のように「,」で区切って並べる。ファイルは同じでもよく異なってもよい。

## (2) d7.txt の場合

d7.txt には左から、時刻 (秒)、入力データで指定した二つの層の内の最初の層の X 方向層せん断力、X 方向層間変形角、Y 方向層せん断力、Y 方向層間変形角、Z 方向の力の総量、Z 方向の層間変位、2 番目の層の X 方向層せん断力、...、Z 方向層間変位 (計 13 列) の順に並んでいる。まず d7.txt をそのまま上記の「作業用フォルダ」にコピーする。その後、アイコンをダブルクリックしてウィンドウを出し、例えば時刻 (1 列目) と最初の層の X 方向層間変形角 (3 列目) を用いて時刻を横軸にしてグラフを描きたければ、gnuplot のプロンプトに対して、

```
plot 'd7.txt' u 1:3 w l
```

と入力する。

第三者に図を提示するとなると少し配慮が必要になる。座標軸にラベルを付け、凡例を見やすくし、フォントの種類やサイズにも気を配らなければならない。以下に筆者の設定例を紹介する。まず gnuplot のプロンプトに対して、

```
set key bottom
set key reverse
set key box
set grid
```

と入力する。1 行目は凡例を右下に書き、2 行目は凡例の線とタイトルをデフォルトとは逆に置き、3 行目は凡例を四角で囲み、4 行目は図にグリッドを入れるコマンドである。図中のフォントの種類やサイズは図が表示される別ウィンドウの中の「Options」をクリックして出てくるメニューから選択できる。筆者は「consolas」の「14 ポイント」を使用している。フォントを選択したあと、同じ「Options」から「Update」をクリックすれば選択が保存される。

座標軸のラベルは描画させるものによって異なるので、ここでは 4 章以下で説明した入力データファイル frame-s-2d.txt と frame-s-2d-sr.txt の要素再分割数を 4 (4div) として 1 部材を 4 要素で近似したとき (ファイル名はそれぞれ frame-s-2d-4div.txt と frame-s-2d-4div-sr.txt)、および塑性変形低減係数  $r$  を 0.3 とした補正モデルを用いて 1 部材を 1 要素で近似したとき (フ

ファイル名はそれぞれ frame-s-2d-mod.txt と frame-s-2d-mod-sr.txt)の結果の比較図を例にとる。横軸が水平変位  $u$ , 縦軸が水平力  $H$ であるから以下のコマンドを入力する。

```
set xlabel 'DISPLACEMENT u (mm)'
set ylabel 'HORIZONTAL LOAD H (kN)'
```

続いて横軸と縦軸の下限と上限を設定する。

```
set xrange [0:500]
set yrange [0:100]
```

これで準備ができたので描画を行う。

```
plot 's7-4div.txt' u 2:1 w l lt 1 t 'static-2d-4div', 's7-mod.txt' u 2:1 w l lt 2 t 'static-2d-mod', 's7-4div-sr.txt' u 2:1 w l lt 3 t 'static-2d-4div-sr', 's7-mod-sr.txt' u 2:1 w l lt 4 t 'static-2d-mod-sr'
```

s7-4div.txt や s7-mod.txt などは上で説明したように描画データの書かれたファイル名である。使用した入力データファイルに合わせて出力ファイル s7.txt の名前を変更している。lt は linetype の略で続く番号 (1~8) で線種を指定, t は凡例の title の略で引用符で挟まれた文字列が線のタイトルとなる。上記の plot コマンドで出力された図を以下に示す。s7-4div-sr.txt と s7-mod-sr.txt は、柱はり接合部耐力を「はり端の曲げ耐力 200,000,000Nmm (200kNm)」として設定したときの結果である。

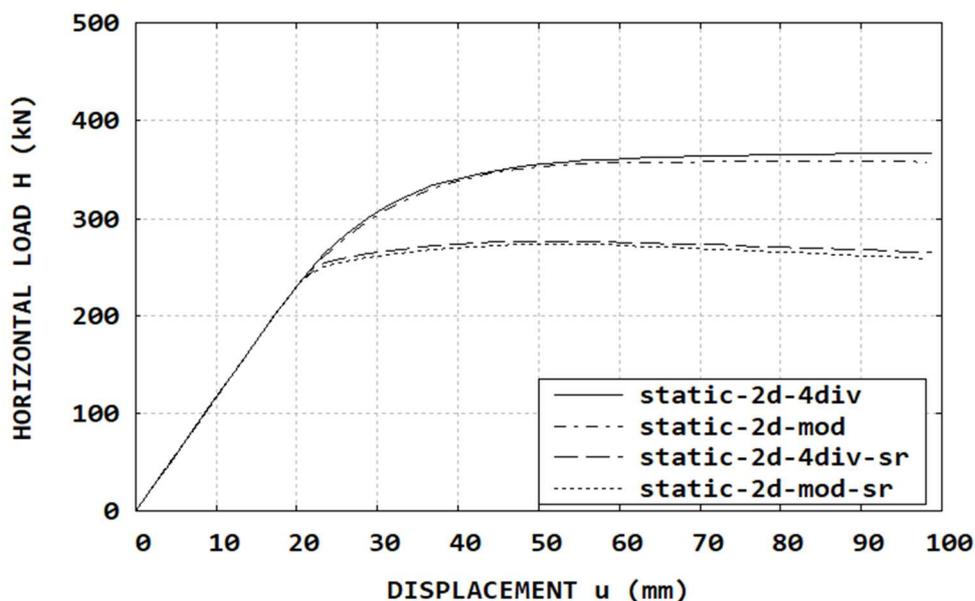


図 14 水平荷重～水平変位関係の比較 (剛接骨組と接合部耐力設定骨組)

この図は、plot コマンドで描画されたウィンドウの中の「Options」をクリックして出てくるメニューから「Save as EMF....」を選択して emf ファイルとして図を保存し、その emf ファイルを word の画像ファイル挿入機能で取り込んだものである。図の場所と大きさは「文字列の折り返し」または「レイアウト・オプション」機能で、余白は「図のトリミング」機能で変更できる。

もう一つ、添付の frame-d-2d-4div.txt と frame-d-2d-mod.txt を入力データとしたときの動的応答解析の結果 (d7-2d-4div.txt と d7-2d-mod.txt) を比較してみる。いずれも 7 章の FPHM-D の説明で使用した 2 層 1 スパン平面ラーメンの動的解析用のデータで、前者は標準モデルを用いた 1 部材 4 要素近似、後者は塑性変形低減係数  $r=0.3$  の補正モデルによる 1 部材 1 要素近似で解析している。第 1 層の層間変形角を比較する。

まず凡例の場所や形式などに関する設定を行い、軸のラベルを設定し、横軸と縦軸の下限値と上限値を設定する。

```
set key top
set key left
set key reverse
set key box
set grid
set xlabel 'TIME (sec)'
set ylabel 'DRIFT ANGLE (rad)'
set xrange [0:20]
set yrange [-0.02:0.025]
```

以上の準備のあと描画を行う。

```
plot 'd7-2d-4div.txt' u 1:3 w l lt 1 t 'dynamic-2d-4div ', 'd7-2d-mod.txt' u 1:3 w l lt 3 t
'dynamic-2d-mod '
```

図を emf ファイルに落とし、word で取り込んで整形した結果は以下のようなものである。

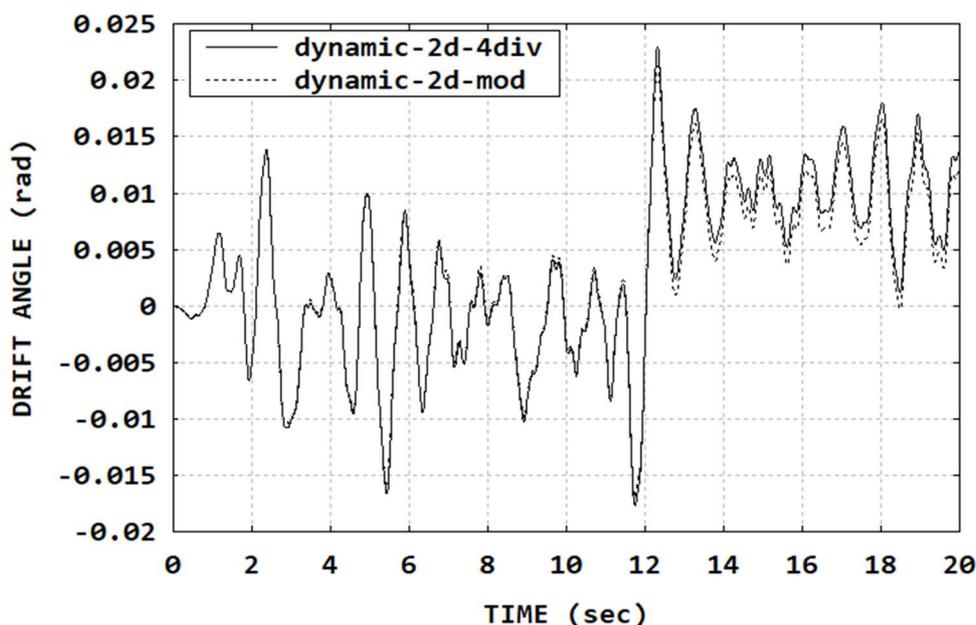


図 15 第 1 層の層間変形角の時刻歴の比較（補正モデルと 1 部材 4 要素近似）

補正モデルによる 1 部材 1 要素近似での結果は、標準モデルを用いた 1 部材 4 要素近似での結果と 12 秒辺りまではほとんど一致している。それ以降は補正モデルの応答は、波形はほぼ同じであるが変形角が負側にややシフトする。

ところで、これまで述べてきた `set` 命令で作成した環境は、環境ファイル（テキスト形式）として `gnuplot` のコマンドラインから「`save`」コマンドで `gnuplot` の作業用フォルダに保存できる。例えば、

```
save 'gnu-time-drift'
```

と入力すれば作業用フォルダに「`gnu-time-drift`」というファイルができる。「`save`」コマンドで保存した環境ファイルは「`load`」コマンドで呼び出すことができる。

```
load 'gnu-time-drift'
```

環境ファイルには「`save`」コマンドを入力する前の最後の「`plot`」コマンドも書かれているので、「`load`」コマンドを入力すると描画ウィンドウが開いて描画が行われ、設定された環境を確認することができる。

座標軸の目盛りに付けられる数値のフォーマットは「`set format`」コマンドで変更できる。デフォルトのフォーマットは「`%g`」である。よく使われるのは「`%.2f`」や「`%.3e`」などである。以下のように入力する。

```
set format x '%.2f'  
set format y '%3.0e'
```

筆者はデフォルトのまま使っている。

また、線種はデフォルトではカラーになっているが、「plot」コマンドで現れる描画ウィンドウの中の「Options」をクリックして出てくるメニューの「color」のチェックをはずせば、図 15 のようにモノクロの実線や破線になる。gnuplot は極めて多機能である（筆者はそのほとんどを知らないが）。プロンプトに対して「help」と入力すればマニュアルが出てくるので、詳細はそちらをお読み頂きたい。

## 9. まとめ

準静的な解析プログラム FPHM (実行ファイルは s64.exe および ms64.exe) と、FPHM を復元力の計算に用いた動的解析プログラム FPHM-D (実行ファイルは d64.exe および md64.exe) について、主として入力データファイルの作成方法と出力ファイルの内容について述べた。プリプロセッサとポストプロセッサが装備されていないので、特に一般の設計者には使いにくいと感じられる方が多いのではないかと思う。しかし、テキストエディタで入力データファイルを作成し、それに対してテキストで出力されたデータから自分で (何らかの描画ソフトウェアを利用して) 作図して計算結果を検討することは、コンピュータによる骨組構造解析技術の理解を深めることになるかと確信している。

入力データファイルの作成手順の理解にはテンプレートとして使える実例が欠かせない。このマニュアルには 4 章の図 3 の骨組の準静的解析、文献 14 中の PC はりの準静的解析、7 章の図 13 の骨組の動的解析、およびこの骨組を 1 構面とする 4 回回転対称な 2 層 1 スパンの立体骨組の動的解析に関して、以下の入力データファイルを添付している。

### 1. 平面骨組の準静的解析 (第 4 章の平面骨組)

frame-s-2d.txt : 標準モデルを用いた 1 部材 1 要素近似

frame-s-2d-sr.txt : 上と同じ。ただし、はりの両端の曲げ強度を 200kNm に設定

frame-s-2d-4div.txt : 標準モデルを用いた 1 部材 4 要素近似

frame-s-2d-4div-sr.txt : 上と同じ。ただし、はりの両端の曲げ強度を 200kNm に設定

frame-s-2d-mod.txt : 補正モデル ( $r=0.3$ ) を用いた 1 部材 1 要素近似

frame-s-2d-mod-sr.txt : 上と同じ。ただし、はりの両端の曲げ強度を 200kNm に設定

### 2. 立体骨組の準静的解析 (第 7 章図 13 の骨組を 1 構面とする 4 回回転対称な 2 層 1 スパンの立体骨組)

frame-s-3d-mod.txt : 補正モデル ( $r=0.3$ ) を用いた 1 部材 1 要素近似

### 3. 文献 14 中の PC はり (断面は本マニュアルの図 9-2) の準静的解析

pc-beam-s-2d.txt : 長さ 2.4m の PC はり。標準モデルによる 6 要素近似

### 4. 平面骨組の動的解析 (第 7 章の 2 層 1 スパンの平面骨組)

frame-d-2d-4div.txt : 標準モデルを用いた 1 部材 4 要素近似

frame-d-2d-mod.txt : 補正モデル ( $r=0.3$ ) を用いた 1 部材 1 要素近似

frame-d-2d-free.txt : 振動固有値を求めるための自由振動

### 5. 立体骨組の動的解析 (第 7 章図 13 の骨組を 1 構面とする 4 回回転対称な 2 層 1 スパンの立体骨組)

frame-d-3d-mod.txt : 補正モデル ( $r=0.3$ ) を用いた 1 部材 1 要素近似  
frame-d-3d-mod-Y.txt : 補正モデル ( $r=0.3$ ) を用いた 1 部材 1 要素近似で  
YZ 面内での振動  
frame-d-3d-free.txt : 振動固有値を求めるための自由振動

立体骨組の動的解析では、計算に要する時間を勘案すると、1 部材 4 要素近似よりもやや精度は落ちるが補正モデルによる 1 部材 1 要素近似での解析が現実的である。

FPHM および FPHM-D は、現時点で 5 章の (3) 節で述べた 16 種類の断面形状の部材にしか対応していないが、対称・非対称を問わず、また複数の材料の合成部材であっても、新しい部材に対応することはプログラムに 1 部材当たり数十行を追加するだけで可能であるので、もしご希望があれば筆者までご連絡頂きたい。鉄筋コンクリート壁はブレースと柱などに置換できれば計算は可能である。ただ、その解の精度などについて言及できる確かな材料を残念ながら現時点で筆者は持っていない。

## 10. 参考文献

- 1) Shugyo, M., Elastoplastic Large Deflection Analysis of Three-Dimensional Steel Frames, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.129, No.9, pp.1259-1267, 2003.9
- 2) 修行稔, 岡延夫, 李剣平, 半剛接接合部を有する鋼立体骨組の弾塑性非線形解析, *日本建築学会構造系論文集*, No.480, pp.89-94, 1996.2
- 3) 修行稔, 島津勝, 半剛接要素を境界条件の導入に利用した I 形鋼曲がりよりの崩壊解析, *日本建築学会構造系論文集*, 第 566 号, pp.59-64, 2003.4
- 4) 島津勝, 修行稔, 作本裕介, 繊維化塑性関節法による H 形鋼立体骨組の解析, *日本建築学会構造系論文集*, 第 587 号, pp.109-116, 2005.1
- 5) 修行稔, 林田幸浩, 島津勝, 峰下由靖, 非対称断面部材の弾塑性解析における繊維化塑性関節モデルの精度, *日本建築学会構造系論文集*, 第 73 巻, 第 609 号, pp.97-104, 2006.11
- 6) Shugyo, M., Shimazu, M. and Sakumoto, Y., Collapse Analysis of 3D Steel Frame by a Fibered Plastic Hinge Method, *Proc. of the International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS05)*, Shanghai, China, 2005, pp.309-314
- 7) Shugyo, M., Shimazu, M. and Hayashida, Y., Accuracy of the Fibered Plastic Hinge Model for Doubly Asymmetric Section Members, *Proc. of the 6th International Conference on Steel and Aluminium Structures (ICSAS07)*, Oxford, UK, 2007, pp.340-347
- 8) Shugyo, M., Shimazu, M. and Iwanaga, H., Development of the Fibered Plastic Hinge Method for Steel-Concrete Composite Members, *Proc. of the 5th International Conference on Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas (STESSA06)*, Yokohama, Japan, 5, 2006, pp.645-650
- 9) 修行稔, 李剣平, コンクリート充填円形鋼管柱の非線形解析法に関する研究, *日本建築学会構造系論文集*, No.505, pp.147-152, 1998.3
- 10) 修行稔, 島津勝, 林田幸浩, 岩永洋尚, 曲げで壊れる鋼コンクリート合成部材および骨組の弾塑性解析, *日本建築学会構造系論文集*, 第 73 巻, 第 631 号, pp.1535-1542, 2008.9
- 11) U.Vogel : Calibrating frames, *Stahlbau*, Vol.10, pp.1-7. 1985
- 12) 林田幸浩, 島津勝, 修行稔, 繊維化塑性関節モデルの平面骨組構造解析における精度, *鋼構造年次論文報告集*, 第 15 巻, pp.15-20, 2007.11
- 13) 修行稔, 島津勝, 繊維化塑性関節モデルによる学校体育館混合骨組の詳細解析, *日本建築学会構造系論文集*, 第 75 巻, 第 651 号, 2010.5
- 14) Shimazu, M., and Shugyo, M., Elastoplastic Analysis of Prestressed Concrete Beams and Frames by the Fibered Plastic Hinge Model, *Proc. of the 6th International Conference of Asian Concrete Federation*, Seoul, Korea, pp.777-782, 2014.9
- 15) 日本建築学会, *鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 (第 6 版第 5 刷)*, p.46, 1994
- 16) (社) 日本鉄鋼連盟, *建築構造教材作成委員会編: 基礎からわかる建築構造物の設計*, p.65, オーム社, 2004
- 17) 修行稔, 島津勝, 繊維化塑性関節法による質点系骨組モデルの地震応答解析, *日本建築学会*

構造系論文集, 第 79 卷, 第 696 号, pp.275-283, 2014.2

- 18) 島津勝, 修行稔, 柴田尚知, 十字形鉄骨を内蔵した鉄骨鉄筋コンクリート柱の弾塑性挙動解析, 鋼構造年次論文報告集, 第 17 卷, pp.627-630, 2009.11
- 19) 柴田尚知, 島津勝, 修行稔, T 字形芯鉄骨を有する SRC 柱の弾塑性挙動解析, 日本建築学会研究報告, 九州支部, 第 49 号 pp.581-584, 2010.3
- 20) 島津勝, 修行稔, 岩本弘, 床スラブの合成効果を考慮した鋼構造骨組の解析, 鋼構造年次論文報告集, 第 17 卷, pp.617-620, 2009.11
- 21) <http://www.bosai.go.jp/hyogo/blind-analysis/2008/index.html>
- 22) 島津勝, 小野明大, 修行稔, 繊維化塑性関節モデルによる PC はりの弾塑性曲げ挙動解析, 日本建築学会研究報告, 九州支部, 第 51 号, pp.233-236, 2012.3
- 23) 修行稔, 島津勝, 繊維化塑性関節モデルによる骨組解析の総自由度の低減, 日本建築学会構造系論文集, 第 81 卷, 第 726 号, pp.1263-1270, 2016.8
- 24) 修行稔, 引張りブレースが破断する骨組の 3 次元解析, 鋼構造年次論文報告集, 第 27 卷, pp.211-217, 2019.11
- 25) 修行稔: 骨組の弾塑性増分解析における不平衡力の解消について, 日本建築学会構造系論文集, 第 84 卷, 第 760 号, pp.801-809, 2019.6
- 26) 修行稔: 部材が壊れる骨組の 3 次元地震応答解析法, 日本建築学会構造系論文集, 第 85 卷, 第 777 号, pp.1441-1448, 2020.11

## <付録 1 >

### 要素の破壊判定値 $\eta$ の設定と破壊した要素の骨組からの除去および不平衡力の解消

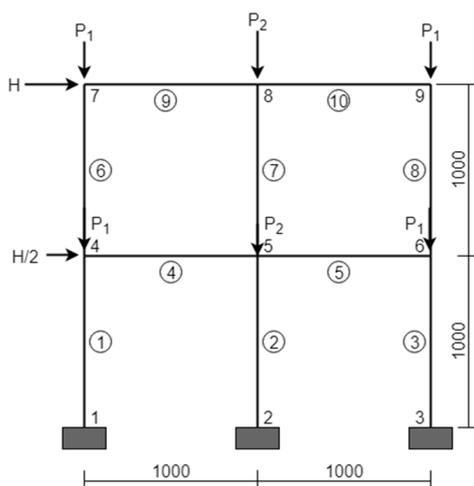
本解法では、増分解析途中の不平衡力評価の基本となる骨組の内力を、骨組に残存する弾性ひずみエネルギーの勾配として求めている<sup>a1)</sup>ため、不平衡力を精度よく求めることができる。加えて、Ramm<sup>a2)</sup>の変位制御型荷重増分法を小さな増分で適用して、収束のための反復計算を行っていないので、相当に大きな不平衡力でも安定に解消できる。従って、骨組の中の脆性部材が増分解析中に早期に瞬時に壊れた要素を骨組から除き、これによって生じる大きな不平衡力を解消しながら解析を進めることができる。現時点では要素の破壊判定の方法が未定であるため正式な機能ではないが、以下にこの機能を使用した解析例を紹介する。

本来は破壊判定の方法や判定値が最も重要であり、慎重に検討する必要があるが、ここではひとまず(a1)式を破壊条件式として用いる。

$$|\varepsilon|_{max} = \eta \varepsilon_y \quad (a1)$$

ここに、 $|\varepsilon|_{max}$ は要素両端断面の繊維の、変動軸力と2軸曲げモーメントおよび断面のそり（H形鋼のみ考慮）によって生じる軸方向ひずみ量の最大値、 $\varepsilon_y$ は同じく初期降伏ひずみ、 $\eta$ は破壊判定値（Reference Value）である。 $\eta$ の値はデフォルトで3000（破壊を考慮しない）とし、必要に応じて要素ごとに指定する。(a1)式はRCスラブ置換ブレース以外のすべての要素に適用するものとする。

付図1に解析例に用いる骨組を示す。2層2スパンの平面鋼骨組である。裸の数字が節点番号、丸付き数字が要素番号である。各要素の断面寸法と材料定数は以下の通りである。



付図1 一部に脆性破壊を起こすはりを有する2層2スパン骨組

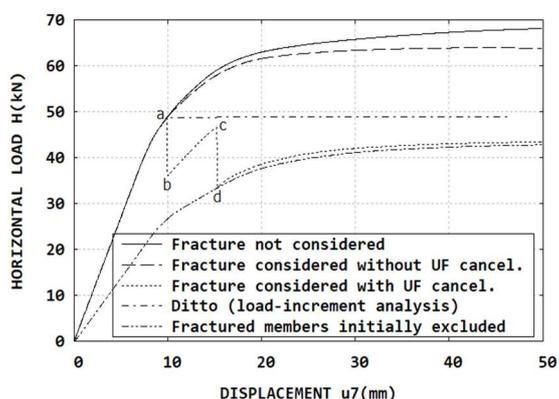
- (1) 要素④, ⑤, ⑨, ⑩ : H-100×100×6×8, 降伏応力 $\sigma_y=150\text{N/mm}^2$ , ヤング率  
 $E=200,000\text{ N/mm}^2$ , 降伏後のひずみ硬化係数 $E_t=E/100$
- (2) 上記以外の要素 : H-100×100×6×8, 降伏応力 $\sigma_y=300\text{N/mm}^2$ , ヤング率

$E=200,000 \text{ N/mm}^2$ , 降伏後のひずみ硬化係数  $E_t=E/100$

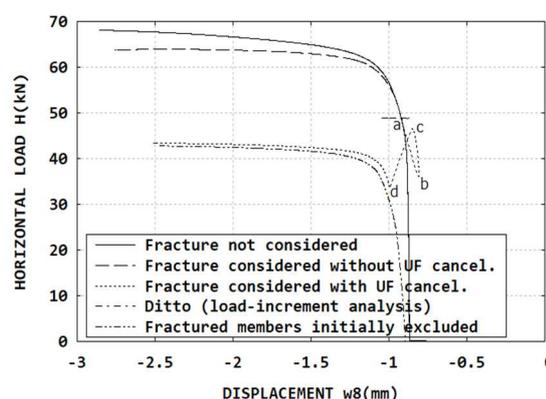
すなわち、はりの強度を低くしてこれらの柱が早期に降伏するように設定している。初期鉛直力は1階の①と③の柱にそれぞれの柱の降伏軸力 $P_y$ の0.2倍、②の柱に同じく0.4倍を載荷する。いずれの柱も断面積 $A$ は $2100\text{mm}^2$ なので、付図1を参照して $P_1=2100 \times 300 \times 0.1=63,000\text{N}$ ,  $P_2=2100 \times 300 \times 0.2=126,000\text{N}$ となる。一方、水平力 $H$ と $H/2$ を付図1のように比例的に漸増載荷する。

解析に際しては各部材をFPHMの自動再分割機能を使って4要素で近似する。補正モデルを用いれば1部材1要素近似でも実用的な精度が期待できるが、ここでは精度を特に重視して1部材4要素近似とした。破壊判定値 $\eta$ は部材④と⑩を3に、その他の部材は3000に設定する。すなわち、破壊は部材④と⑩のほりにのみ起こると仮定する。

付図2は節点7の水平荷重 $H$ とその方向の水平変位 $u_7$ との関係の比較、付図3は $H$ と節点8の鉛直方向(上向きが正)の変位 $w_8$ との関係の比較である。図中の実線は破壊を無視したとき、破線は破壊を考慮して不平衡力を解消しないとき、点線は破壊を考慮した本解法、1点鎖線は破壊を考慮し不平衡力を解消しつつ通常の荷重増分法で解いたとき、2点鎖線は当初から部材④と⑩を除いた骨組の結果である。図中のUFはUnbalanced Forceの略である。



付図2 水平荷重  $H$ ～水平変位 $u_7$ 関係



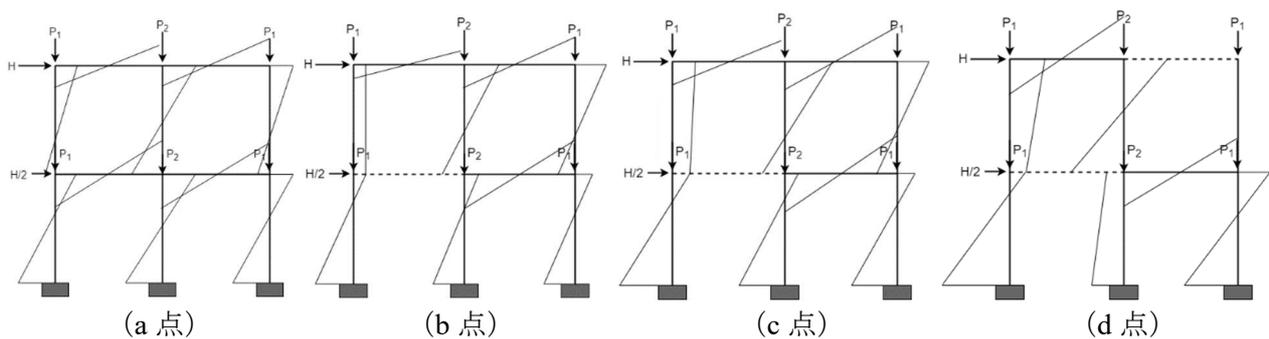
付図3 水平荷重  $H$ ～鉛直変位 $w_8$ 関係

本解法の結果(点線)に注目すると、図中のa点で部材④が壊れ、2ステップ程度で復元力が一気に低下してb点に到達する。さらに変位を増加させるとc点で部材⑩が壊れて復元力が再び大きく低下したあと、当初から部材④と⑩のない骨組(2点鎖線)とほぼ同じ挙動を示す。1点鎖線の挙動から、不平衡力を解消しても通常の荷重増分法では水平力低下後のc点の荷重は検出できないことがわかる。また、破壊を無視したとき(実線)と破壊を考慮して不平衡力を解消しないとき(破線)の結果にはそれほど差は見られず、载荷の途中で破壊した部材を取り除くだけで解析を進めると、骨組の保有水平耐力を大きく評価してしまう危険があると言える。

付図2と付図3から明らかなように、ここで用いた解析例では、载荷途中で壊れる部材を有する骨組の最終的な挙動は、当初からこれらの部材を除いた2層1スパン骨組の挙動に漸近する

傾向にある。付図 2 に点線で示した復元力特性は技術基準解説書<sup>a3)</sup>の模式図と定性的に一致している。

付図 4 は付図 2 と付図 3 中の a 点, b 点, c 点および d 点における骨組の曲げモーメント分布図である。いずれも本解法の結果である。図からは消去していないが, 付図 4 の b 点と c 点の骨組には部材④のはりは存在せず, 同じく d 点の骨組には部材④と⑩のはりは存在しない。d 点では部材⑩のはり壊れているので部材⑧の柱には曲げモーメントがほとんど生じていない。なお, 当初から部材④と⑩を除いた骨組の d 点における曲げモーメント分布は, 付図 4 の d 点の分布にほぼ一致する。



付図 4 曲げモーメント分布図

本マニュアルに付図 1 の骨組の入力データファイルを `frame-s-frac-4div.txt` という名前で添付している。破壊判定値 $\eta$ の値はコメント行に続けて要素番号とのペアで入力データファイルの最後尾に追加する形になっているので `frame-s-2d-frac-4div.txt` で確認されたい。破壊を判定する要素が一つもないときはこれらのデータは省略できる。

## <付録 2 >

### 不平衡力の評価に用いる内力の計算方法の指定

付録 1 で述べたように、本解法では増分解途中の不平衡力評価の基本となる骨組の内力を、骨組に残存する弾性ひずみエネルギーの勾配として求めている。これが本解法としてのデフォルトであるが、v4.05 からもう一つの方法である「増分解の結果得られる各要素の要素端力増分の積算値として内力を得る」方法 a1) を指定できるようにした。この指定は、FPHM の場合は入力データファイルの第 1 行目のコメント文、FPHM-D のときは入力データファイルの中の復元力を求めるための入力データ fr.txt (7 章の 7.2 (1) 節参照) の第 1 行目のコメント文の始めに「proc=2」または「PROC=2」と追加記述することで可能である。例えば添付の入力データファイル frame-s-2d-mod.txt では第 1 行目のコメント文を、

```
'proc=2, 1 要素の再分割数：再分割しない場合は 1, 塑性変形補正モデルは 5'
```

または、

```
'PROC=2, 1 要素の再分割数：再分割しない場合は 1, 塑性変形補正モデルは 5'
```

のように変える。「proc=2」または「PROC=2」を指定すると出力データファイル s6.txt または d6.txt 中の次のコメント文：

```
*** FPHM DATA-INPUT STARTED ***
```

の次の行に、

```
(INTEGRATION OF NODAL FORCE INCREMENTS)
```

と出力され、指定がなければ、

```
(GRADIENT OF ELASTIC STRAIN ENERGY)
```

と出力される。

3 次元的挙動の解析で「proc=2」を指定すると解析結果の信頼性がやや劣化するが、計算は安定する。デフォルトで計算が不調のときに「proc=2」を試みるとよい。

#### (参考文献)

- a1) 修行稔：骨組の弾塑性増分解における不平衡力の解消について、*日本建築学会構造系論文集*，第 84 巻，第 760 号，pp.801-809，2019.6
- a2) Ramm, E. : Riks/Wempner approach – an extension of the displacement control method in nonlinear analysis, *Recent Advances in Nonlinear Computational Mechanics*, Pineridge Press, pp.63-86, 1982
- a3) 国交省国土技術政策総合研究所（監修）：2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書，全国官報販売協同組合（発行），p.344，2015.6