

## I - 10 鋼製橋脚の弾塑性有限変位解析用標準プログラム

### 10.1 プログラムの概要

鋼製橋脚の地震時保有水平耐力の算定を行うには、骨組の終局状態における変形挙動を正確に求める必要があるため、本解析プログラムでは名古屋工業大学で開発した幾何学的非線形性ならびに材料非線形性を考慮した精度の良い複合非線形解析<sup>1) 2)</sup>を用いている。

このうち材料非線形性は、いわゆる塑性領域理論<sup>1)</sup>を用いて解析する。すなわち部材断面は図-10.1に示すように数多くのメッシュに分割され、各メッシュには鋼材あるいはコンクリートに対応した構成則が与えられる。数値計算においては各メッシュの中心点における応力・ひずみ関係で各メッシュ全体の応力・ひずみ関係を代表させ、それらをもとに断面力を求めている。また、部材軸方向の塑性化の進展については通常の有限要素法における有限要素をいくつかのセグメントに分割することにより考慮している。また、幾何学的非線形性は剛体変位除去の手法<sup>3)</sup>により考慮している。この手法は部材に生じる全変位を要素変形成分と剛体変位成分に分解することで解析過程を簡易化するものである。本プログラムで用いた剛体変位除去の手法<sup>3)</sup>は、要素分割長を無限小にすると有限ひずみ・有限変位の厳密解に収束する<sup>3)</sup>。

剛体変位除去の手法と塑性領域理論を用いることにより、はり要素の複合非線形性を考慮した高精度の接線剛性マトリックスが得られるが、骨組全体での弾塑性有限変位挙動はこのマトリックスをもとにして組み立てた全体系の接線剛性方程式に増分法を適用することで解析される。増分法としてはニュートンラプソン法による収束計算過程を含む弧長増分法を用いる。これにより最大荷重到達後のいわゆる後座屈領域を含めた任意の形状の釣り合い経路の解析を行うことができる。

本プログラムは上記のように有限要素法に基づく複合非線形解析により数値計算を行うようになっている。従って通常の有限要素法に基づく汎用プログラム同様、基本的にはどのような形状の平面骨組を解析することも可能である。ただ、複合非線形解析では要素分割により解析精度が大きく影響されたり、また、増分計算でも適当な増分量を設定しないと収束解が得られないというようなこともあり得る。このように、複合非線形解析は線形解析と異なり、正確な解析を行うためにはかなりの経験が必要であり、非線形解析が一般化していない現状では、一般の設計者に要素分割、増分量等の設定を任せるとは必ずしも適当ではないと考えられる。ここでは対象とする構造物を鋼製橋脚に限定することで必要な要素分割、増分量等をあらかじめプログラム内で与えている。この結果、設計者が入力すべきデータは主として構造諸元、荷重条件、材料定数となり、非線形解析に対する十分な知識がなくとも正確に地震時保有水平耐力を求めることができる。以下にこのプログラムで解析可能な構造物についての詳細を述べる。

本プログラムで解析を行うことができる構造形式は図 10.2 に示すような片持ち柱、逆L字型柱および門型ラーメンで、断面形状は箱形断面である。構造物の形状に関して設計者が入力する必要のあるデータは、構造形式（片持ち柱、逆L字型柱あるいは門型フレームを選択）、はり柱の長さ、コンクリート充填高さ、断面寸法および有効破壊長を決定するために必要となる中空断面フランジ補剛板のダイアフラム間隔である。汎用プログラムで必要な部材を有限要素に置換した際の座標値、軸方向の塑性化を考慮するための有限要素の分割数、支点条件、荷重増分といったものは入力する必要はない。

材料構成則に関しても本来は任意の構成則を用いることが可能であるが、ここではコンクリート、鋼材とも文献4) に示されるものを用いる。従って設計者が入力すべきデータはコンクリートについては設計基準強度のみであり、また鋼材については鋼材の種類（SS400, SM490, SM570 の中から選択）、ヤング係数、降伏応力および限界ひずみ値である。

載荷方法は図-10.2 に示すように一定の鉛直荷重  $P$  を作用させた後、 $P$  を一定に保ったまま水平荷重  $H$  を作用させる。載荷位置に関しては今回のプログラムでは図-10.2 に示すもののみとした。従って設計者は鉛直荷重  $P$  の大きさと作用位置を入力すればよい。

以上のデータを入力し計算を行った結果出力される値としては、降伏水平荷重

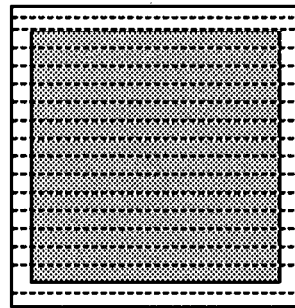


図-10.1 断面分割

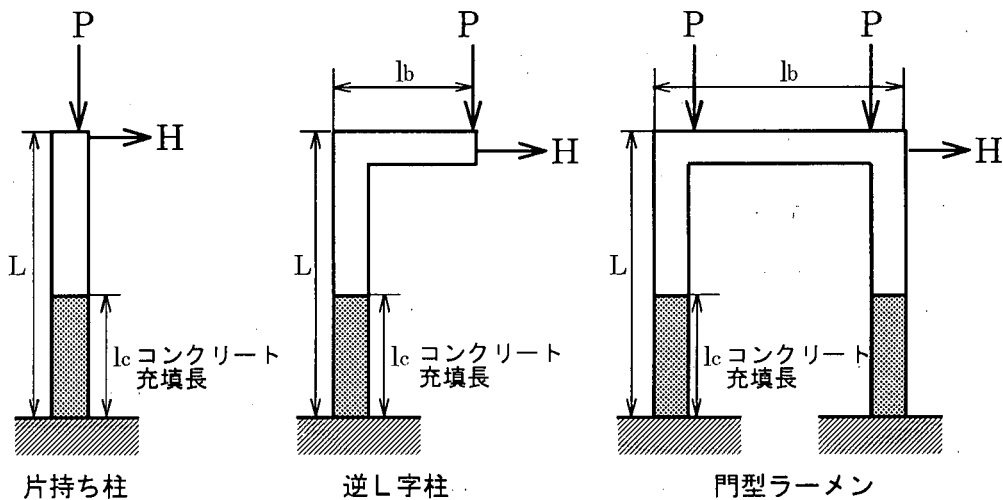


図-10.2 構造形式

とその際の水平変位ならびに終局水平荷重とその際の水平変位、各照査断面における損傷度、さらにこれらの値を用いて求められる地震時保有水平耐力および塑性率である。また、水平荷重  $H$  と柱頭部水平変位  $\delta$  の関係 ( $H$ - $\delta$  曲線) も出力されるようになっている。

## 10.2 プログラムのデータ入力および出力形式

### 【入力データの書式】

線で囲まれている変数が記述すべき変数である。各変数の書式 (a; 文字 i; 整数 f; 実数) と意味がその下にかかっている。

#data-name
------------

data name[a] 解析対象物の名前、番号

#frame-type
-------------

frame-type[i] 構造物の形状 (図-1 参照)

= 1 片持ち柱

= 2 逆 L 型柱

= 3 門型ラーメン

#H hc lb
----------

H[f] 柱の高さ

hc[f] コンクリート充填高さ

lb[f] frame-type = 1 の時 記述しない  
= 2,3 の時 はりの長さ

#dia[i]
---------

dia[i] ダイアフラム間隔

#nfig[i]
----------

nfig[i] 鋼断面種類数

#henka bc dc tfc twc (A)
(column)

henka[f] 断面変化点の位置 (柱基部からの距離)

bc[f] 柱断面の幅 (図-2 参照)

dc[f] 柱断面の高さ

tfc[f] 柱断面のフランジの厚さ

twc[f] 柱断面のウェブの厚さ

```
# nstlc yngc sypc sync eu0c (A)
(column)
```

nstlc[i] 鋼材の種類

= 1 SS400  
= 2 SM490  
= 3 SM570

yngc[f] 鋼材のヤング係数

sypc[f] 鋼材の降伏応力（引張側 絶対値で入力）

sync[f] 鋼材の降伏応力（圧縮側 絶対値で入力）

eu0c[f] 鋼材の限界塑性ひずみ（絶対値で入力）

(A)がついている行を nfig 組記述する。

```
# bb db tfb twb ( frame-type = 1 の時は記述しない)
(beam)
```

bb[f] はり断面の幅

db[f] はり断面の高さ

tfb[f] はり断面のフランジの厚さ

twb[f] はり断面のウェブの厚さ

```
# nstlb yngb sypb synb eu0b ( frame-type = 1 の時は記述し
(beam) ない)
```

nstlb[i] 鋼材の種類

= 1 SS400  
= 2 SM490  
= 3 SM570

yngb[f] 鋼材のヤング係数

sypb[f] 鋼材の降伏応力（引張側 絶対値で入力）

synb[f] 鋼材の降伏応力（圧縮側 絶対値で入力）

eu0b[f] 鋼材の限界塑性ひずみ（絶対値で入力）

```
# syncn
```

syncn[f] コンクリートの設計基準強度

```
# chp fl1
```

f12

chp[f] 鉛直荷重の値  
f11 左鉛直荷重の作用位置 (nftype = 3 のみ使用)  
f12 右鉛直荷重の作用位置 (nftype = 3 のみ使用)

#afac

t

afact[f] 地震時保有水平耐力、塑性率を算出する際の安全係数

#nout

1

nout1[i] = 1 水平荷重 - 水平変位曲線を出力する  
= 0 水平荷重 - 水平変位曲線を出力しない

### 【出力データ】

標準出力ファイルには以下の項目が出力される。

Yield Load.	H	=	0.04758	(初期降伏荷重)
Horizontal Displacement	u	=	0.00670	(初期降伏荷重
載荷時の				柱頭部水平変
				位)
Failure Load.	H	=	0.08040	(破壊時水平荷
重)				重)
Horizontal Displacement	u	=	0.03258	(破壊時水平荷
重載荷時の				重)
				柱頭部水平変
				位)
Check Area.	( D =	0.18 )	(損傷度 D*)	
Check Area.	( D =	1.00 )	(損傷度 D)	

----- C O N C L U S I O N -----

Ha = 0.08040                      myu = 4.86254                      (地震時保有水平耐力および塑性率)

\* 損傷度を判定する照査断面の位置について

nframe = 1,2 の場合は柱基部から上部へ向かい表記する。nframe = 3 の場合は、左側の柱基部を始点とし、時計回りに表記している。

出力番号 1 によって作成されるファイルには水平荷重 - 水平変位曲線が出力されている。

【計算例 1】

図 - 例 1 に示される片持ち柱は一定鉛直荷重 ( $P = 0.2P_y$ ) を載荷した後、水平荷重  $H$  を漸増させたものである。

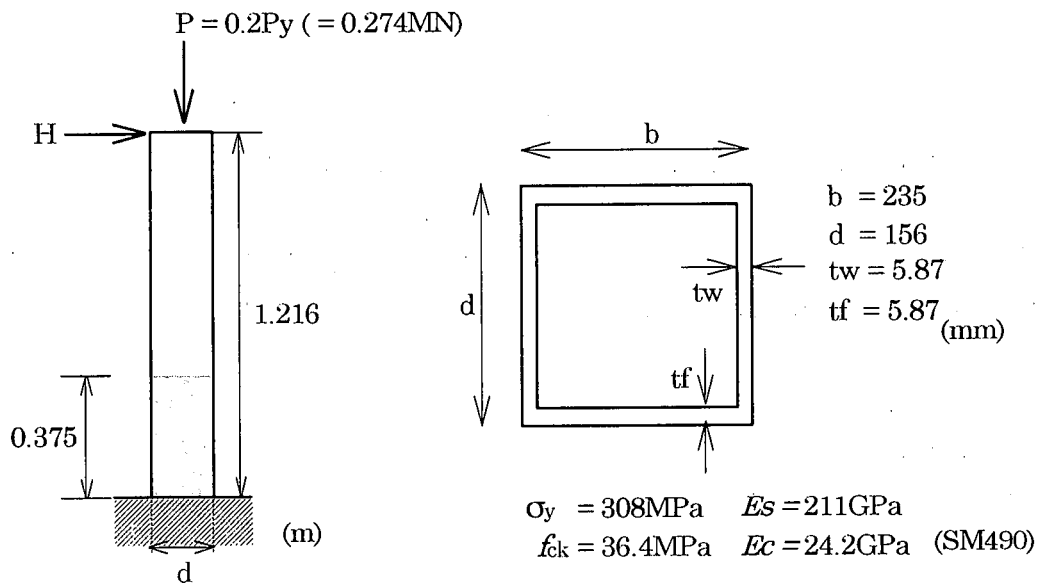


図-例 1 解析対象物

以上の解析を行うための入力データを以下に示す。

```
#data name
sample
#frame type
1
# H      dh
```

```

1.216 0.375
# dia
0.5
# nfig
1
#henka      b      d      tf      tw
1.216 .235 .156 .00587 .00587
# nstl yng      syp      syn      eu0
1 211000. 308. 308. 0.0136
# syncn
36.4
# chp
0.274
#afact
1.0
#nout1 nout4
1      1

```

出力ファイルは以下のようなになる。

```

Yield      Load.      H =      0.04758
Horizontal Displacement      u =      0.00670

Failure Load.      H =      0.08038
Horizontal Displacement      u =      0.03256

Check Area.      ( D =      1.00 )
Check Area.      ( D =      0.18 )

```

----- C O N C L U S I O N -----

```

Ha =      0.08038      myu =      4.85932

```

-----

【計算例 2】

図-例 2 の門型ラーメンの解析例を以下に示す。

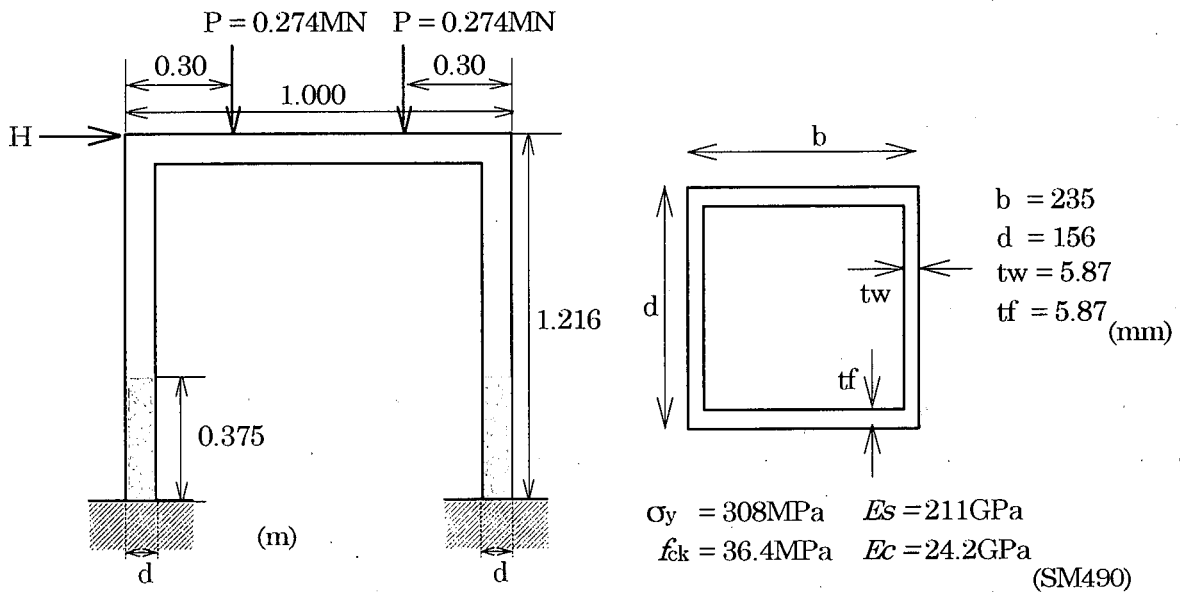


図-例 2 解析対象物

入力データは以下のようなになる。

```

#data name
sample
#frame type (1=column ; 3=rahmen)
3
# Lc hc Lb
1.216 0.365 1.00
# dia
0.5
# nfig
1
# henka b d tf tw (column)
1.216 .235 .156 .00587 .00587
# nstl yng syp syn eu0 (column)
1 211000. 308. 308. 0.0136
# b d tf tw (beam)
.235 .156 .00587 .00587
# nstl yng syp syn (beam)
1 211000. 308. 308.
  
```



```

# syncn
  36.4
# chp   fl1   fl2
  0.10   0.3   0.3
#afact
  1.0
#nout1  nout4
  1       1

```

出力ファイルを以下に示す。

```

Yield      Load.          H =    0.18072
Horizontal Displacement  u =    0.00456

Failure Load.          H =    0.31221
Horizontal Displacement  u =    0.02636

Check Area.            ( D =    0.59 )
Check Area.            ( D =    0.04 )
Check Area.            ( D =    0.08 )
Check Area.            ( D =    1.00 )

```

----- C O N C L U S I O N -----

```

Ha =    0.31221          myu =    5.77596

```

-----

【参考資料】

< 鋼材およびコンクリートの材料構成則について >

このプログラムにおいて鋼材の材料構成則は図-参1および式(参1)、(参2)で示されるようなひずみ効果の影響を考慮したものをを用いている。

$$E' = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E_{st} \cdot e^{-\xi(\varepsilon/\varepsilon_y - \varepsilon_{st}/\varepsilon_y)} \quad (\text{参1})$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_y} = \frac{1}{\epsilon} \frac{E_{st}}{E} \left( 1 - e^{-\xi(\epsilon/\epsilon_y - \epsilon_{st}/\epsilon_y)} \right) + 1 \quad (\epsilon \geq \epsilon_y) \quad (\text{参 2})$$

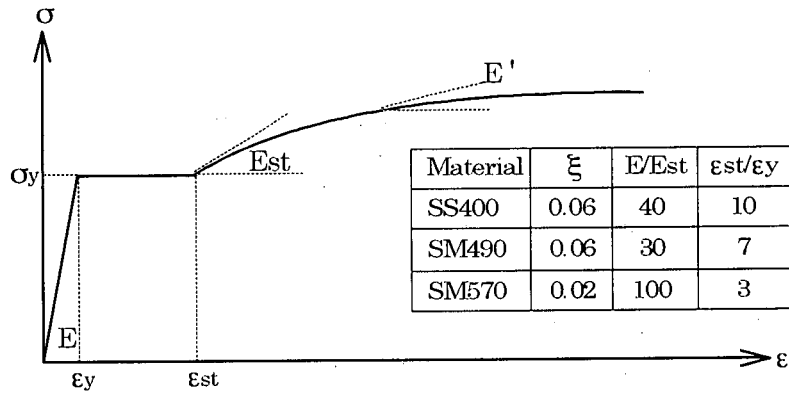


図-参1 鋼材の構成則

コンクリートの材料構成則は式(参3)および図-参2で表されるものを用いる。コンクリートの破壊は、鋼板による拘束効果があるため、0.6%まで生じないと仮定している。

$$\sigma_c = \sigma_{ck} \left\{ 2(\epsilon / 0.0023) - (\epsilon / 0.0023)^2 \right\} \quad (\text{参 3})$$

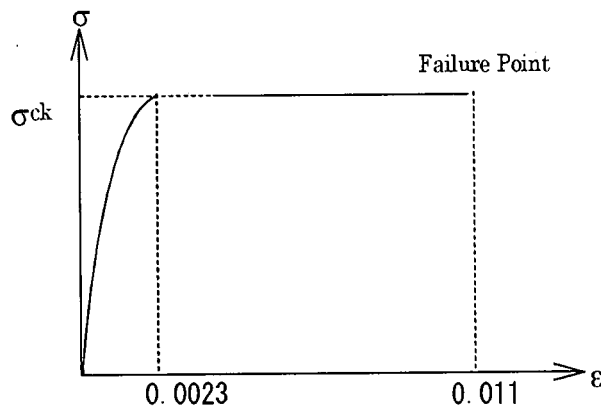


図-参2 コンクリートの構成則

### 10.3 使用方法

本プログラムは1つのファイル(prog.c)に収められている。プログラムの記述にはC言語を用いており、UNIXの上で使用することができる。ファイル(prog.c)に対しUNIXにおける通常のコンパイルをほどこせば実行ファイルが作成されるようになっている。付属のフロッピーディスクのルートディレクトリにprog.cがあり、サブディレクトリdataの中にサンプルデータとしてnf1.dat(nftype=1の場合)nf2.dat(nftype=2の場合)nf3.dat(nftype=3の場合)が入っている。プログラムを実行する際にはこれらのデータを標準入力すればよい。なお、

本プログラムは Sony NEWS および Sun SPARCstation において動作確認されている。

#### 参考文献

- 1) 後藤 芳顯、宮下 敏：平面骨組の弾塑性分岐挙動の解析法と初期曲げを受ける剛結門型骨組の座屈特性、構造工学論文集、Vol.40A , pp.283-294 , 1994
- 2) Goto,Y. and Miyashita,S. ' Validity of classification systems of semi-rigid conections ' , Engineering Structures, Vol. 17 , 1995
- 3) 後藤 芳顯、吉光 友雄、小畑 誠、西野 文雄：平面骨組の有限ひずみ・有限変位理論の解に収束する2種類の数値解析法と精度特性、土木学会論文集、No.428 / I-15 , pp.67-76 , 1991
- 4) 宇佐美 勉、鈴木 森晶、Iraj,H.P.Mamaghani、葛 漢彬：コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査法の提案、土木学会論文集、No.525 / I-33 , pp.69-82, 1995