

徳島大学工学部 正会員 鳩 鴻 弘 行
 徳島県庁 ハラタケヒコ
 徳島県庁 ハラタケヒコ
 徳島県庁 ハラタケヒコ

1. 要旨： 本研究は各節点に一定荷重と比例漸増荷重をうける任意の立体剛滑節骨組を対象として、軸力と2軸まわりの曲げおよび振りの組合せ降伏条件式を使用し、有限変位を考慮した非線形な変形法の基本式を用いて、安定解析も含めた弾塑性解析と電子計算機により自動的に行なわんとするものである。

2. 解析上の仮定： 弾塑性解析に際して、1) 材料はひずみ硬化のない完全弾塑性体とし、材料の応力-ひずみ特性は時間に独立とする。2) 材料の降伏剪断応力度 τ_0 は Von Mises の降伏基準に従って、 $\tau_0 = \sigma/\sqrt{3}$ とする。3) 降伏条件式においては剪断力の影響は無視する。4) 剪断面の形状係数は1とし、塑性域の部材軸方向の伸びりは無視する。5) すべての荷重は節点に作用し、その強度は一定、または、同一割合で変化するものとする。6) 局部座屈はオイラー値による弾性座屈とする。7) 部材は2軸対称な一定断面を有する直線部材とする。8) 降伏箇所の発生位置は各部材の材端に限定する。などの仮定をもうけ、基本式の誘導に際して、1) 部材の弯曲による軸方向変位は無視する。2) 回転変位に伴なう断面(主軸)の回転は無視する。3) 曲げと振りとは互いに独立とし、曲げ振りの拘束に伴なう剪断力の変化などは無視する。などの仮定をもうけている。

3. 降伏条件式： S. J. Fenves らは軸力、2軸まわりの曲げおよび振りの組合せ降伏条件式に対する理論式を説明しているが、これららの理論式は多くの中立軸の位置によって異なる複雑な形のものであり、本解析のように荷重倍数を用いて荷重強度を変更しようとすると解析ではこれらの理論式を直接使用することは困難なため、本解析では上記の理論式をもとに、最小2乗法により、つぎのような近似式を説明して用いている。

$$\phi(p, m_x, m_y, m_z) = \alpha p^2 + m_x^2 + b m_y^2 + C m_z^2 + d p m_y + e m_x m_z + f m_z p = 1 \quad (1)$$

なお、各断面形に対する係数の値はそれぞれつぎのようである。

1) 矩形断面: $\alpha = 1.07$, $b = C = 1$, $d = f = 0.4$, $e = 0.1$

2) 箱形断面: $\alpha = 1.1$, $b = C = 1$, $d = 0.5$, $f = 0.55$, $e = 0.1$

ただし、 $\{m_x = 0, 0.686 \leq p \leq 0.825\}$, $\{m_z = 0, 0.534 \leq p \leq 0.87\}$

の範囲では: $a=1, b=0.52, C=0.61, d=1.44, e=1.12, f=1.56$

3) I形断面: $\alpha=b=1, C=0.65$, $d=f=0.3, e=0.6$

ただし、 $\{m_y = 0, 0.368 \leq p \leq 0.99\}$, $\{m_z = 0, p = 0\}$

の範囲では: $a=c=1, b=0.69, d=e=1.67, f=2.0$

$\{m_z = 0, 0.279 \leq p \leq 0.368\}$ では, $a=b=d=1, C=e=f=0$

4) パイプ断面: $\alpha=1.19, b=c=0.98, d=f=0.27, e=-0.06$

なお、本文のような組合せ降伏条件式を使用して、塑性流れ理論

を導入した解析では降伏断面に沿う材端力増分 ds_i と塑性変位増分 $d\delta_i$ との関係が非線形となるため、これらの関係を線形化しておく必要がある。この方法には図-1 の実線で示すような下界近似の方法と、異線で示すような上界近似の方法があるが、本解析では降伏条件を犯さないようにするため前者の方法を採用している。

4. 解析に用いた基本式： 本文の解析で用いた、部材軸とz軸とが一致するよう、部材固有の座標系をもつて右手系にに対する非線形な変形法の基本式は弾性部材については式(2), 降伏部材については式(3)のように表わされる。 $S_{ij} = K_{ii} \cdot \delta_i + K_{jj} \cdot \delta_j + L_i$, $S_{ji} = K_{ii} \cdot \delta_i + K_{jj} \cdot \delta_j + L_j$ ————— (2)
 $S_{ij} = K_{ii} \cdot \delta_i + K_{jj} \cdot \delta_j + L_i$ ————— (3) ただし、 S は材端力、 δ は節点変位を表わす列ベクトルである。

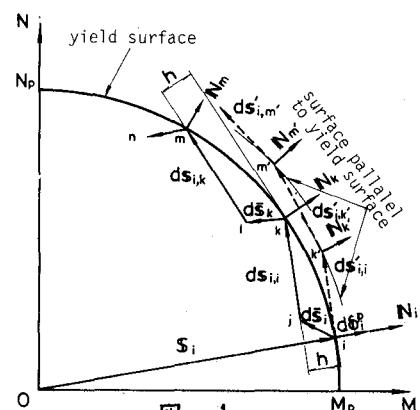


図-1

り、 $S = \{N, Q_4, Q_5, M_3, M_4, M_5\}^T$ 、 $\delta = \{\delta_4, \delta_5, \theta_3, \theta_4, \theta_5\}^T$ である。また、 LL_i, LL'_i は変位の2次項とか部材の初期たわみ、あるいは、降伏時における材料強度などからなる荷重項を表わす。 K, L の内容は講演会当日簡単に説明することにし、以下に、各種の降伏端部材に対する KL_i, KL'_i および LL_i の内容を示す。

- 1) し端降伏, よ端弾性部材: $K'_u = K_{uu} - K_{ui} \cdot N_i \cdot N_i^T \cdot K_{ii} \cdot T_i$, $K'_y = K_{uy} - K_{ui} \cdot N_i \cdot N_i^T \cdot K_{ui} \cdot T_i$
 $L'_i = K_{ui} \cdot N_i \cdot N_i^T (S_{pu} - L_i) \cdot T_i + L_i$, $T_i = (N_i^T \cdot K_{ui} \cdot N_i)^{-1}$

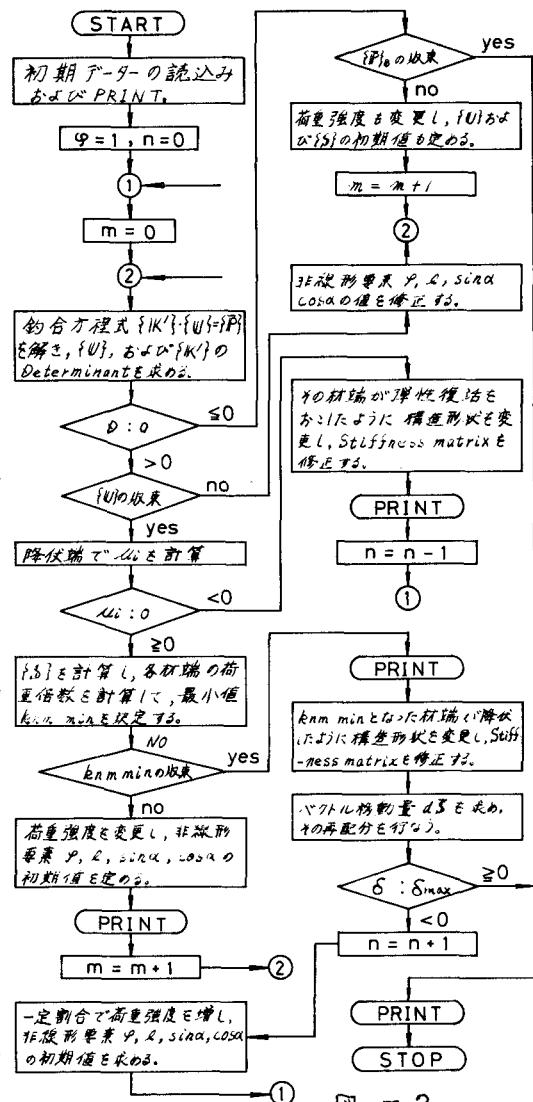
2) i, j 両端降伏部材: $K'_u = K_{ui} - (K_{ui} \cdot N_i \cdot X_1 + K_{uj} \cdot N_j \cdot X_3) \cdot T$, $K'_y = K_{uy} - (K_{ui} \cdot N_i \cdot X_2 + K_{uj} \cdot N_j \cdot X_4) \cdot T$, $L'_i = (K_{ui} \cdot N_i \cdot C_i + K_{uj} \cdot N_j \cdot C_j) \cdot T + L_i$, ただし, $T = (N_i^T \cdot K_{ui} \cdot N_i)(N_j^T \cdot K_{uj} \cdot N_j) - (N_i^T \cdot K_{uj} \cdot N_j)^2)^{-1}$, $C_i = N_i^T \cdot K_{ui} \cdot N_i \cdot N_i^T (S_{pu} - L_i) - N_i^T \cdot K_{ui} \cdot N_i \cdot N_i^T (S_{pj} - L_j)$, $C_j = N_j^T \cdot K_{uj} \cdot N_j \cdot N_j^T (S_{pu} - L_i) - N_j^T \cdot K_{uj} \cdot N_j \cdot N_j^T (S_{pj} - L_j)$, $X_1 = N_i^T \cdot K_{ui} \cdot N_i \cdot N_i^T \cdot K_{ui} - N_i^T \cdot K_{ui} \cdot N_i \cdot N_i^T \cdot K_{uj}$, $X_2 = N_i^T \cdot K_{ui} \cdot N_i \cdot N_i^T \cdot K_{uj} - N_i^T \cdot K_{ui} \cdot N_i \cdot N_i^T \cdot K_{uj}$, $X_3 = N_j^T \cdot K_{uj} \cdot N_j \cdot N_j^T \cdot K_{ui} - N_j^T \cdot K_{uj} \cdot N_j \cdot N_j^T \cdot K_{ui}$, $X_4 = N_j^T \cdot K_{uj} \cdot N_j \cdot N_j^T \cdot K_{uj} - N_j^T \cdot K_{uj} \cdot N_j \cdot N_j^T \cdot K_{ui}$.

3) し端弾性, よ端降伏部材: $T_i = (N_i^T \cdot K_{ui} \cdot N_i)^{-1}$
 $K'_{ui} = K_{ui} - K_{ui} \cdot N_i \cdot N_i^T \cdot K_{ui} \cdot T_i$, $K'_{uy} = K_{uy} - K_{ui} \cdot N_i \cdot N_i^T \cdot K_{ui} \cdot T_i$, $L'_i = K_{ui} \cdot N_i \cdot N_i^T (S_{pu} - L_i) \cdot T_i + L_i$
 ただし, 式中の S_{pu} (S_{pj}) はもとより降伏時の大変形であり, N_{ui} は S_{ui} (S_{pj}) に対する降伏曲面上を表すものから引いた外向き法線ベクトルである。(図-1)
 3. で示したような降伏条件式子 (や, m_3, m_4, m_5) = 0 を用いた場合には $N = \{m_1, m_2, 0, 0, 0, m_3, m_4, m_5\}^T$ となる。

5. 解析手順： 本文の弾塑性解は、1)仕様の荷重強度 $\{\bar{P}\}_{n,m}$ に対する $\{S\}_{n,m}$, $\{\delta\}_{n,m}$ の収束値、ならびに構造全体の stiffness matrix $K_{n,m}$ の determinant $D_{n,m}$ の計算。2)降伏端における弾性復活の判定。3)荷重倍数の計算。4)弾性復活および降伏箇節が発生した場合の構造形式の変更。5)降伏端におけるベクトル移動の計算。6) $D_{n,m} < 0$ となった場合の座屈荷重を求めるための計算。などの繰返しによって進められるが、詳しいことは図-2の解析プログラムにおけるフローチャートを参照されたい。

6. 計算例： 矩形ラーメンなどに対する2,3の計算例を講演会当日スライドで紹介し、線形解析との比較とか、降伏条件式の相異による解析結果の比較などを行ない、簡単な考察を加える。

ワ 参考文献： 1)星, 沢嶋, 平尾: 軸力の影響を考慮した平面剛滑節構造物の一自動弹性性解析, 土木学会論文報告集, 第202号, 1972年6月。 2) Shosuke Morino: Analysis of Space Frames, Fritz Engineering Laboratory Report No. 331.13, 1971。 3)上田, 赤松, 遠江: マトリックス法による滑節構造物の弹性性解析(その2), 日本造船学会論文集 第126号, 1978年12月。 4) Glenn A. Morris



E - 2