第１部門　　　繰り返し荷重を受ける弾塑性梁－柱の限界状態に関する基礎的研究

京都大学　学生員○國枝達郎　　京都大学　正会員　渡邊英一
京都大学　正会員　古田均　　京都大学　正会員　杉浦邦征
京都大学　正会員　宇都宮智昭

１．研究の目的

本研究では，繰り返し荷重が構造物の終局強度に及ぼす影響を正しく評価するため，降伏棚を有する鋼材の履歴特性を大変形領域においても精度よく予測できる力学モデルを構築する．また，弾塑性有限変形解析により，繰り返し荷重を受ける構造部材の終局挙動を明らかにする．

まず，わが国で桁，トラス，ラーメン，アーチ，吊り構造などの終局限界状態として座屈が問題となる鋼骨組構造物を対象に，各種限界状態を算定する解析法の特徴を図１に示す．

この中で，弾塑性有限変位解析に基づく設計法では，地震荷重や風荷重などの巨大な繰り返し荷重を受ける鋼材の終局時の挙動について十分把握しておくことが重要である．

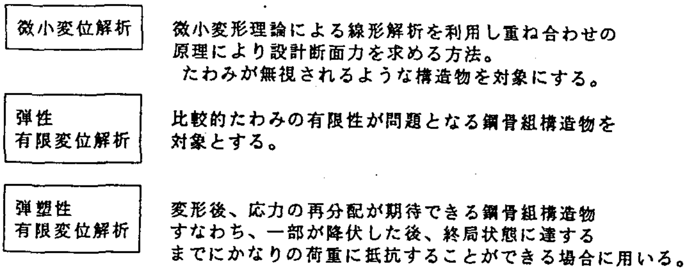

図１　限界状態設計に用いる各種解析法

２．二曲面モデルの修正

本研究では，鋼材の履歴特性を予測するモデルとしてDafalias•Popovの提案した二曲面モデルに対して，田中ら[2)]が行った修正を，繰り返し荷重による繰り返し硬化を物理的に意味あるパラメータを用いて表現できるようにするため，塑性ひずみの振幅という概念（図３）を用いてさらに修正を行った．具体的には，図２の様に圧縮側および引張側に境界線(XX',YY')を設け弾性域（弾性係数Ｅ）と定常状態の塑性域（塑性係数Ｅ　）との間の遷移域(DF間)の傾きを式１で決定する[2)]．式中ｈは形状パラメータであり，δ_{in}は降伏開始点での応力と境界線との距離である．δは任意点(E点)の境界線との距離である．

$$E_p = E_0^p + h \times \frac{\delta}{\delta_{in} - \delta} \qquad (1)$$

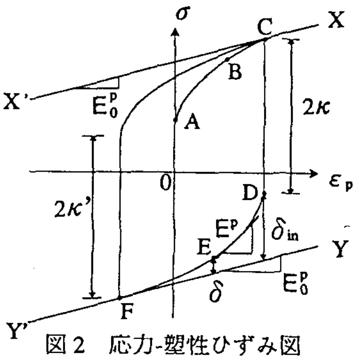

図２　応力-塑性ひずみ図

繰り返し荷重による弾性域の減少を表すため弾性域の大きさ　κ を初期の弾性域の大きさ　$\kappa_0(=2\sigma_y)$ で除し無次元化したκ/κ_0 を式２で表した[2)]．式中，a,b,c,α は材料固有のパラメータである．

$$\kappa/\kappa_0 = \alpha - aEXP(-b\varepsilon_p \times 100) - (\alpha - a - 1)EXP(-c\varepsilon_p \times 100) \qquad (2)$$

また，繰り返し硬化による境界線の移動を表すため式３を用いた．

$$\sigma_b/\sigma_y = \alpha_{cyc} - (\beta_{cyc} - \alpha_{cyc})EXP(-D \times \varepsilon_{cyc}/2) \qquad (3)$$

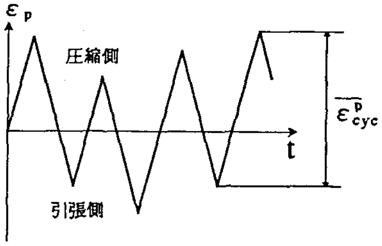

図3　塑性ひずみの振幅の概念図

式中，$\alpha_{cyc},\beta_{cyc},D$ は，材料固有のパラメータである．

結果を図４，５に示す．

この図より，図５の大変形の後の繰り返し載荷でも，繰り返し硬化は塑性ひずみの振幅に支配されているため，図４の繰り返し載荷による履歴特性と一致することがわかる．

Tatsuo KUNIEDA, Eiichi WATANABE, Hitoshi FURUTA, Kunitomo SUGIURA, Tomoaki UTSUNOMIYA

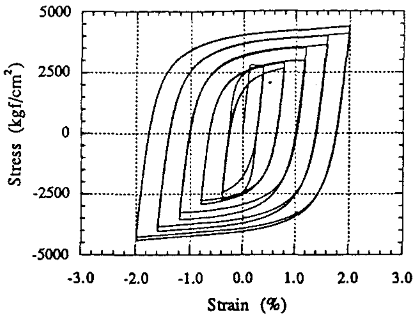

図4　繰り返し載荷時の応力－ひずみ曲線

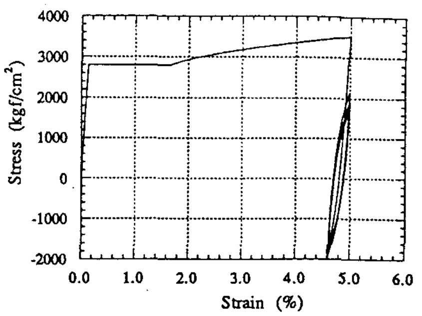

図５　σ - ε 曲線におよぼす平均ひずみの影響

３．離散化極限解析

前節で構築した繰り返し変形下の応力－ひずみ関係を予測する力学モデルを用いて柱の極限解析を行う．柱を図５により離散化すると，増分形剛性方程式は以下のようになる．

$$[\bar{K}]\{\Delta d\}=\{\Delta F\}+\{B\} \qquad (4)$$

ここで

$$[\bar{K}]=[K_1]+[K_2]+[K_3];$$

$$[K_1]=A\cdot k_1\begin{bmatrix}1 & \frac{H}{L}+\frac{2}{L}u \\ -\frac{H}{L}+\frac{2}{L}u & \left(\frac{H}{L}+\frac{2}{L}u\right)^2\end{bmatrix} \quad [K_2]=A\cdot k_2\begin{bmatrix}1 & -\frac{H}{L}+\frac{2}{L}u \\ -\frac{H}{L}+\frac{2}{L}u & \left(\frac{H}{L}+\frac{2}{L}u\right)^2\end{bmatrix}$$

$$[K_3]=\frac{A}{2}\begin{bmatrix}0 & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_1+\sigma_2}{L}\end{bmatrix}$$

$$\{\Delta d\}=\begin{Bmatrix}\Delta w \\ \Delta u\end{Bmatrix},\ \{\Delta F\}=\begin{Bmatrix}\Delta P \\ 0\end{Bmatrix},\ \{B\}=\begin{Bmatrix}P \\ 0\end{Bmatrix}-\frac{A}{2}\begin{Bmatrix}\sigma_1+\sigma_2 \\ \left(\frac{H}{L}+\frac{2}{L}u\right)\sigma_1+\left(-\frac{H}{L}+\frac{2}{L}u\right)\sigma_2\end{Bmatrix}$$

式中，$[K_1]$および $[K_2]$は，ばね要素の剛性マトリックスであり　$[K_3]$は，初期応力マトリックスである．また，$\{\Delta d\}$は変位増分，$\{\Delta F\}$は荷重増分，　$\{B\}$は残差項である．
解析結果を図７に示す．図中，λは細長比である．

図７において，繰り返し載荷による耐荷力の低下がよく表されている．

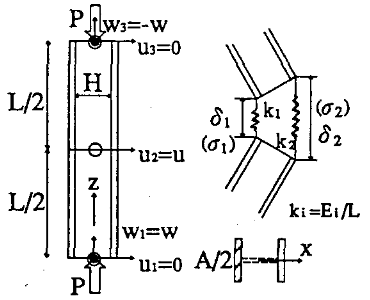

図6　剛体.ばね要素モデル

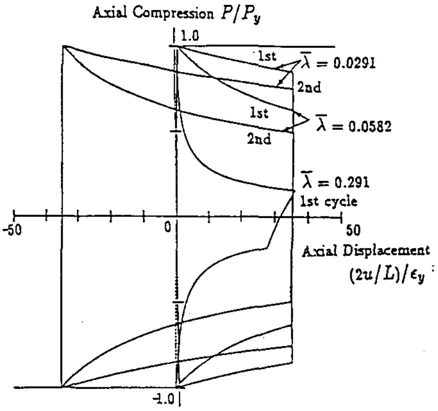

図７　繰り返しひずみのもとでの軸荷重－変形曲線

４．結論

① 鋼材の履歴特性を予測するモデルは，塑性ひずみの振幅という概念を用いることにより繰り返し荷重による履歴特性を表すモデルとしてより意味のあるものになった．

② 剛体・ばねモデルを用いて柱の軸荷重－変形曲線を求めた結果，繰り返し硬化による柱部材の変形挙動をうまく表せた．

（参考文献）

１）土木学会鋼構造委員会：終局強度設計分科会研究成果報告書（案）:1992
２）田中良仁，水野英二，濤赤，宇佐美勉：降伏棚を有する繰り返し弾塑性モデル
－二曲面モデルの開発－　（構造工学論文集Vol.37A 1991.3）