

I-55

断面力表示二曲面モデルを用いた鋼骨組構造物の有限変位解析

静岡県 正員 鈴木健泰
名古屋大学 学生員 I. H. P. Mamaghani
名古屋大学 正員 水野英二
名古屋大学 正員 宇佐美勉

1. はじめに 筆者らは、複合応力状態下での構造用鋼材の繰返し弾塑性挙動を精緻に表現できる応力-ひずみモデル(修正二曲面モデル¹⁾)を開発した。しかし、このモデルを骨組鋼構造物の解析に用いる場合、精度良い解析結果が得られるものの、計算時間が莫大なものとなり、実用的な方法とは言えない。そこで、本研究では、修正二曲面モデルの概念を一軸曲げモーメント(M)-軸力(N)空間での断面力表示構成則モデルへと拡張し、その有効性を確認する。

2. 断面力表示構成則モデルの構築 曲げモーメント-軸力空間における構造部材断面の初期降伏曲線 F_0 、降伏棚曲線 F_y 、境界曲線 F_B を以下のように設定した。

$$F_0 = |m| + |n| - 1.0 \quad (1)$$

$$F_y = (m/f_y)^{C_1} + n^{C_2} - 1.0 \quad (2)$$

$$F_B = \left(\frac{m - \beta_m}{r_B \cdot f_B} \right)^{C_3} + \left(\frac{n - \beta_n}{r_B} \right)^{C_4} - 1.0 \quad (3)$$

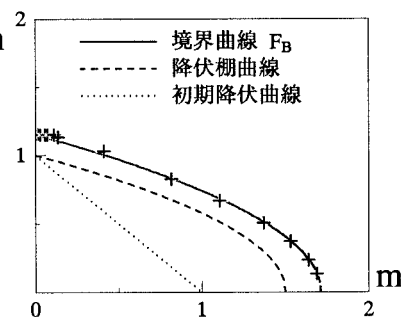


図-1 初期状態の曲線(矩形断面)

ここで、 $m = M/M_y$ 、 $n = N/N_y$ 、 M_y =降伏曲げモーメント、 N_y =降伏軸力、 f_y 、 f_B =形状係数、 (β_m, β_n) =(m, n)空間における境界曲線の中心座標、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 =断面形状により定まる係数、 r_B =境界曲線の大きさである。降伏棚曲線は、一般断面(矩形、箱型・H型など)に完全弾塑性体を適用してモーメントと軸力の相関関係を求めた²⁾。境界曲線は各断面に修正二曲面モデルを適用して強度限界の初期値を求め、非線形最小二乗法を用いて C_3 、 C_4 、 f_B を定めた。しかし、境界曲線で凹形状になる部分があるため、 $C_3=1.0$ として、 C_4 および f_B のみを上記の方法で定めた。図-1には矩形断面(SS400鋼材)に対する各種曲線の初期状態例を示す。図-1に示すように、一般に初期降伏曲線、降伏棚曲線および境界曲線が相似形でないために、断面の塑性状態が進展するに従い、負荷曲線がそれら降伏棚曲線および境界曲線とオーバーラップを起こす可能性がある。そこで、負荷曲線 f は降伏棚曲線と接するまでの段階で、それに相似な形状に変形し、さらに、境界曲線と接するまでの段階では、境界曲線に相似な形状に変形すると仮定した。負荷曲線 f は、Mrozの硬化則³⁾に従うものとし、次式のように定義した。

$$f = \theta_1 g_0 + (1 - \theta_1) g_y + (1 - \theta_2) g_B - 1.0 \quad (4)$$

ここで、 g_0 =初期降伏曲線と関連する関数、 g_y =降伏棚曲線に相似な曲線と関連する関数、 g_B =境界曲線に相似な曲線と関連する関数、 θ_1 および θ_2 =変形記述パラメータである。負荷曲線が降伏棚曲線の内側にある場合には、 $0 < \theta_1 < 1$; $\theta_2 = 1$; 降伏棚曲線と境界曲線との間にある場合には、 $\theta_1 = 0$; $0 < \theta_2 < 1$ である。修正二曲面モデル¹⁾の特徴として、累積相当塑性ひずみ(A. E. P. S.)が塑性パラメータとして使われている。本モデルでは、無次元化塑性ひずみ-無次元化塑性曲率空間で次のような曲線 ϕ を設定し、この曲線の直径(2ρ)をA. E. P. S.に相当する塑性パラメータとして設定した(図-2参照)。すなわち、

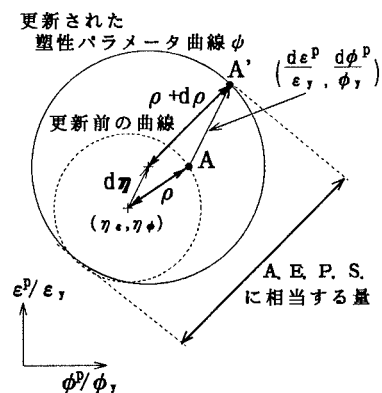


図-2 塑性パラメータ曲線の定義

$$\psi(\varepsilon^p, \phi^p) = \left(\frac{\varepsilon^p}{\varepsilon_y} - \eta_\varepsilon \right)^2 + \left(\frac{\phi^p}{\phi_y} - \eta_\phi \right)^2 - \rho^2 = 0 \quad (5)$$

ここで、 ε_y = 降伏軸ひずみ、 ε^p = 塑性ひずみ、 ϕ_y = 降伏曲率、 ϕ^p = 塑性曲率、 $(\eta_\varepsilon, \eta_\phi)$ = 曲線の中心座標である。

3. 構成則 増分型の構成方程式は以下の条件式から導かれる。

$$(1) \text{ 線形関係: } \begin{Bmatrix} dN \\ dM \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} EA & 0.0 \\ 0.0 & EI \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon^e \\ d\phi^e \end{Bmatrix} \quad (6)$$

$$(2) \text{ ひずみ、曲率増分}(d\varepsilon, d\phi) \text{ の分解: } \begin{Bmatrix} d\varepsilon \\ d\phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} d\varepsilon^e \\ d\phi^e \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} d\varepsilon^p \\ d\phi^p \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$$(3) \text{ 関連流れ則: } \begin{Bmatrix} d\varepsilon^p \\ d\phi^p \end{Bmatrix} = \frac{1}{K^p} \begin{Bmatrix} (dn)^T \{i_n\} \\ (dm)^T \{i_m\} \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} 1/N_y & 0.0 \\ 0.0 & 1/M_y \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_n \\ i_m \end{Bmatrix} \quad (8)$$

ここで、 $d\varepsilon^e$ = 線形ひずみ増分、 $d\phi^e$ = 線形曲率増分、 $d\varepsilon^p$ = 塑性ひずみ増分、 $d\phi^p$ = 塑性曲率増分、 (i_n, i_m) = 負荷曲線の単位法線、 K^p = 断面塑性係数である。上式を整理することにより、断面力表示構成式 $\{dS\} = [D^e] \{d\kappa\}$ を導くことができる。ここで、 $\{dS\} = \{dN, dM\}^T$ 、 $\{d\kappa\} = \{d\varepsilon, d\phi\}^T$ 、 $[D^e] = [2 \times 2]$ の弾塑性マトリックスである。

4. 数値解析 図-3に示すような、一定横力 $Q_c = 0.4Q_y$ (Q_y : 初期降伏を起こす横力) を受け、かつ、繰り返し軸力 P を受ける薄肉円管柱 ($D/t=49.6$) の有限変位解析を行った。図-4には、載荷実験結果⁴⁾と本断面力表示構成則モデルの解析結果、断面を要素分割(48要素)して修正二曲面モデルを適用した解析結果との比較を示す。CPU時間は、本断面力表示構成則モデルで 36405秒、修正二曲面モデルを適用した結果で 680323秒であった。断面力構成則モデルの計算時間は、修正二曲面モデルを用いた計算時間の約1/20であり、計算時間短縮の効果が確認できた。解析結果の詳細については、当日、発表する。

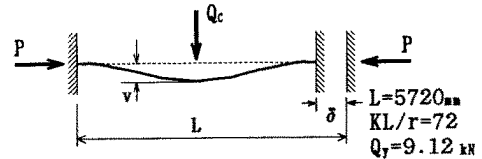


図-3 有限変位解析の荷重状態

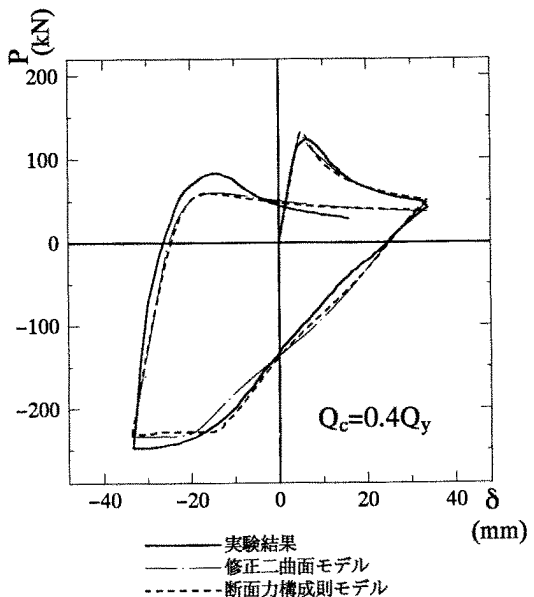


図-4 有限変位解析結果

参考文献 1) Shen C., Mizuno E., and Usami T.

: A Generalized Two-Surface Model for Structural Steel under Cyclic Loading, Structural Eng./Earthquake Eng., Proc. of JSCE, Vol. 10 No. 2, 1993, pp. 23 (59s) - 33 (69s). 2) 宇佐美勉, 柴田輝昭: 断面力表示構成則を用いた鋼骨

組構造物の弾塑性有限変位解析, 土木学会論文集, 第416号/1-13, 1990. 4, pp. 339-348. 3) Mroz, Z.: On the Description of Anisotropic Work Hardening, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 15, 1967, pp. 163-175. 4) Sherman, D. R.: Inelastic Local Buckling of Circular Tubes, US Japan Seminar on Inelastic Instability of Steel Structures and Steel Elements, Tokyo, Japan, 1981.