

I-73

降伏棚を有する種々の鋼素材の繰返し弾塑性モデル

中部電力株式会社 正 員○田中良仁 名古屋大学工学部 藩 赤
名古屋大学工学部 正 員 水野英二 名古屋大学工学部 正 員 宇佐美勉

1. はじめに 本研究では、先に発表したSS41材に対する弾塑性モデル¹⁾にさらに改良を加え、SS41, SM50およびSM58鋼材の降伏棚からひずみ硬化域への遷移領域および高ひずみ領域での繰返し挙動を統一的かつ合理的に表現できる弾塑性モデルを提案する。

2. Dafalias・Popovの二曲面モデル Dafalias・Popovの二曲面モデル²⁾では、接線塑性係数 E^P を式(1)のように定式化している。

$$E^P = E_0^P + h \frac{\delta}{\delta_{in} - \delta} \quad (1)$$

ここで、 E_0^P は境界線の定常勾配、 δ_{in} は塑性開始点から境界線までの距離、 h は形状パラメータ、 δ は任意点から境界線までの距離を示す。形状パラメータは δ_{in} の関数であり、一つの負荷曲線において一定値である。また、その関数のパラメータは各鋼材によって固有である。

3. 著者らの修正二曲面モデル 主としてSS41材に対する一軸繰返し引張・圧縮実験結果より、著者らは、以下に示す修正弾塑性二曲面モデル¹⁾を提案してきた。①弾性域の低減を累積相当塑性ひずみの関数とし、式(2)で表現する。②形状パラメータ h を δ の関数とし、接線塑性係数 E^P を式(3)のように定式化する。③硬化開始時の塑性仕事と累積相当塑性ひずみの関係を調べた結果、図1に示すような線形関係が認められたため、式(4)により硬化開始時を判定する。④仮想の境界線概念の導入する。

$$\frac{\kappa}{\kappa_0} = \alpha - a \exp(-b \bar{\epsilon}_p \times 100) - (\alpha - a - 1) \exp(-c \bar{\epsilon}_p \times 100) \quad (2)$$

$$E^P = E_0^P + e \cdot \delta + f \cdot \frac{\delta}{\delta_{in} - \delta} \quad (3)$$

$$\frac{\bar{\epsilon}_p}{\epsilon_{p_{st}}} - 1 = M \cdot \left(\frac{W^P}{W_{p_{st}}^P} - 1 \right) \quad (4)$$

κ :弾性域の大きさ

κ_0 :初期の弾性域の大きさ

$\bar{\epsilon}_p$:累積相当塑性ひずみ

$\epsilon_{p_{st}}$:硬化開始時の累積相当塑性ひずみ

W^P :塑性仕事

$W_{p_{st}}^P$:硬化開始時の塑性仕事

α, a, b, c, M, e, f :各鋼材固有のパラメータ

4. 境界線の移動を考慮した修正二曲面モデル 図2に示す

SS41鋼材の実験結果を用いて、境界線の移動を考慮した修

正モデルについて説明する。上記の二曲面モデルでは、境界線を直線と仮定して、引張側および圧縮側ともに固定した位置に設定している。しかし、図2に示す実験結果を見ると、単調引張における境界線はAA'、除荷および圧縮载荷した後の圧縮側の境界線はBB'、次に続く引張側の境界線はCC'とすることができる。このように考えると、前述の固定境界線の仮定は妥当ではなく、境界線は塑性変形進展に従い、移動すると考えた方が合理的である。なお、図2で、記号Rは半径を示す。半径とは一般応力状態のときの曲面の半径を意味し、一軸応力状態では、NN'から各境界線までの垂直距離である。再び、図2の実験結果において、単調引張における境界線AA'と原点に関して点対称の位置に単調圧縮における境界線DD'があったと仮定すると、圧縮側の境界線の移動量 ΔR^C は、その後続く引張側の境界線の移動量 ΔR^T より大きいことが分かる。

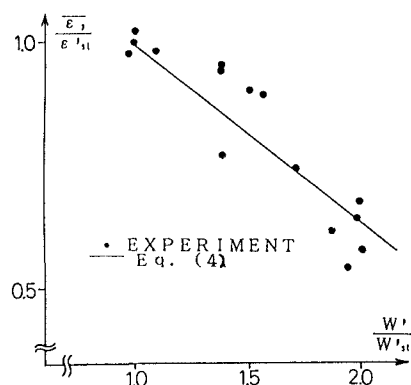


図1 硬化開始時の累積相当塑性ひずみと塑性仕事の関係

表1 各種鋼材に対するモデルパラメータの値

鋼材	記号	SS41	SM50	SM58
ヤング率 (kgf/cm ²)	E	2.11×10^6	2.10×10^6	2.20×10^6
降伏応力 (kgf/cm ²)	σ_y	2.80×10^3	3.64×10^3	5.35×10^3
初期硬化塑性ひずみ	ϵ_{st}^p	1.53×10^{-2}	1.24×10^{-2}	0.00
ポアソン比	ν	2.90×10^{-1}	2.47×10^{-1}	2.52×10^{-1}
初期硬化係数	E_{st}^p / E	2.49×10^{-2}	3.41×10^{-2}	1.02×10^{-2}
弾性域の大きさ κ	a	-5.05×10^{-1}	-5.28×10^{-1}	-5.53×10^{-1}
	b	2.17	1.88	6.47
	c	1.44×10	1.87×10	3.48×10
	α	1.91×10^{-1}	2.17×10^{-1}	1.75×10^{-1}
境界線の勾配	E_{st}^p / E_{st}^p	3.61×10^{-1}	4.11×10^{-1}	4.90×10^{-1}
初期境界線半径	R_0 / σ_y	1.15	1.06	1.05
境界線の移動率	λ / σ_y	5.43	4.35	2.06
降伏棚の減少	M	-4.70×10^{-1}	-5.22×10^{-1}	—
形状パラメータ h	e	5.00×10^2	3.16×10^2	7.00×10^2
	f / E	3.00×10^{-1}	4.84×10^{-1}	3.61×10^{-1}

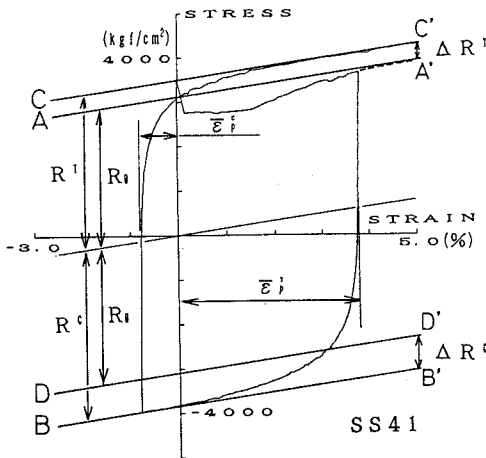


図2 境界線移動の定義

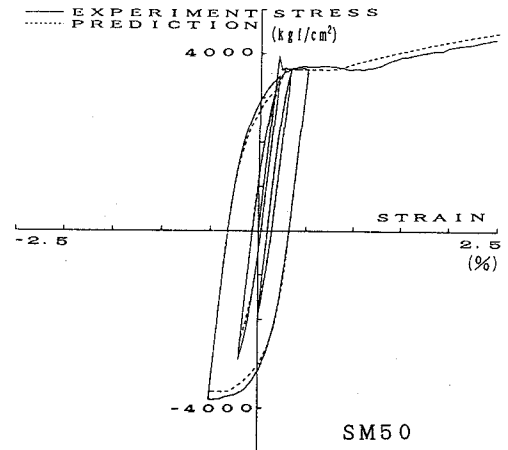


図3 SM50材に対する予測結果

このことを考慮して、圧縮側の境界線は引張側の累積相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_p^I$ の影響を受け、引張側の境界線は圧縮側の累積相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_p^C$ の影響を受けるものとし、その移動率 λ を導入することにより、圧縮側境界線半径 R^C および引張側境界線間半径 R^I を次式のように定義する。

$$\text{圧縮側: } R^C = \lambda \cdot \bar{\epsilon}_p^I + R_0 \quad \text{引張側: } R^I = \lambda \cdot \bar{\epsilon}_p^C + R_0 \quad (5.6)$$

ここで、 R_0 は初期境界線半径である。このように定義することにより、境界線は累積相当塑性ひずみの増加に伴い、線形的に変化することになる。累積相当塑性ひずみの増加に伴い、 $\lambda > 0$ のとき、境界線間は大くなり、 $\lambda < 0$ のとき小さくなり、 $\lambda = 0$ のときは変化しない。

各種鋼材 (SS41, SM50 および SM58 鋼材) に対するモデルパラメータの値の一覧を表1に示す。

5. 予測結果および考察 本研究で提案した修正二曲面モデルによる SM50 材に対する予測結果を図3に示す。本モデルにより様々なタイプの繰返し挙動を精度よく予測することができる。また、本二曲面モデルを、一般応力状態におけるモデルへと拡張することが今後の課題である。

【参考文献】 1) 田中良仁ら：構造工学論文集, Vol. 37A, 1991年3月。 2) Dafalias, Y.F. and Popov, E. P.: Trans. ASME J. Appl. Mech., (1975), pp. 645-651.