

引張試験に基づく材料定数をパラメータとする鋼材の繰返し構成則

岐阜大学工学部 正員 奈良 敬 岐阜大学工学部 正員 村上 茂之
岐阜大学大学院 学生員 ○小西 隆史

1. まえがき

鋼構造物が地震力などの繰返し外力を受けた場合の挙動を正確に把握するためには、鋼材の繰返し塑性履歴を精度よく表現できる構成則が必要となる。また、この構成則に含まれる定数が少なく、定数の決定法が簡易であることも実用性の観点から重要である。

本研究では、繰返し載荷試験を必要とせず、単調引張試験から構成則の定数を決定できる混合硬化則¹⁾に2曲面モデルの概念を取り入れた構成則を開発した。この構成則を用い、板要素の弾塑性有限変位解析を行い、板要素が軸方向に繰返し載荷を受けたときの弾塑性挙動について検討した。さらに、その結果を、修正2曲面モデル²⁾の解析結果と比較し、検討した結果について報告する。

2. 構成則の概要

本研究で用いる構成則は、降伏曲面と境界曲面の2つの曲面を用い、鋼材の応力-ひずみ履歴を、弾性域、遷移領域、硬化領域の3つの領域に分類している。図-1に本研究で用いる構成則の概要、図-2に偏差応力空間における模式図を示す。ここで、 K は境界曲面の半径、 dK は境界曲面の半径の拡大である。降伏曲面・境界曲面は、von Misesの降伏条件に従い、境界曲面は、混合硬化則、境界曲面の中心の移動は、Ziegler則に従うものと仮定した。また、構成則に係る定数を、以下に示すように、引張試験から得られる材料定数を用いて与えるものと仮定した。

(1) 弾性域(点0-1, 点3-4および点6-7)

弾性域については、鋼材が繰返し塑性履歴を受けるとBauschinger効果により弾性域の大きさは初期弾性域の大きさより減少し、ある程度以上の繰返し塑性履歴を受けると弾性域の大きさは一定値に収束することが明らかにされている⁴⁾⁻⁶⁾。本構成則では、繰返し塑性履歴に伴う弾性域の大きさの変化を次式で示すように一定値で与える。

$$\frac{\kappa}{\kappa_0} = 0.6, \quad (1)$$

ここに、 κ :弾性域の大きさ、

κ_0 :初期の弾性域の大きさ($=\sigma_Y$)。

(2) 遷移領域(点4-5および点7-8)

繰返し載荷試験^{3), 4), 7)}によると、遷移領域は緩やかな曲線となるが、本構成則では簡素化のため簡単に直線で表現し、遷移領域の開始点と終了点を結ぶ直線の傾き、すなわち接線塑性係数と累積相当塑性ひずみ³⁾の関係を以下の式によって与える。

$$E^P = E \left(0.1 + \frac{0.9}{1.0 + \bar{\epsilon}^P / \epsilon_Y} \right), \quad (2)$$

ここに、 E^P :接線塑性係数、 E :弾性係数、

$\bar{\epsilon}^P$:累積相当塑性ひずみ、 ϵ_Y :降伏ひずみ。

(3) 硬化領域(点1-3, 点5-6および点8-)

硬化領域では、一般に応力-ひずみ関係を降伏応力 σ_Y 、降伏ひずみ ϵ_Y で無次元化した次式で与える⁸⁾。

$$\frac{\sigma}{\sigma_Y} = B \left(C + \frac{\epsilon}{\epsilon_Y} \right)^n = B \left(C + \frac{\epsilon_Y + \bar{\epsilon}^P}{\epsilon_Y} \right)^n, \quad (3)$$

ここに、 B , n , C :単調載荷試験から得られる鋼材によって決まる定数、

σ_Y :降伏応力、 ϵ_Y :降伏ひずみ、 $\bar{\epsilon}^P$:累積相当塑性ひずみ。

3. 既往の構成則との比較

本構成則の繰返し荷重を受ける板要素の解析結果と修正2曲面モデルを用いた文献²⁾の解析結果と比較して、構成則が解析結果に及ぼす影響について検討する。

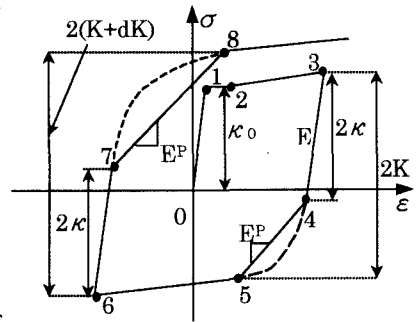


図-1 構成則の概要

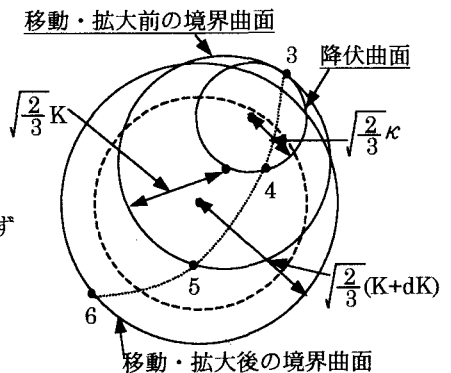


図-2 偏差応力空間模式図

(1) 解析モデル

解析モデルは図-3に示す周辺単純支持板とし、構造および変形の対称性より1/4モデルとし、要素分割は4×4とする。

初期たわみ W_0 は、次式で与える。

$$W_0 = \delta_0 \cos \frac{\pi X}{a} \sin \frac{\pi Y}{b}, \quad (4)$$

ここで、 $\delta_0 = b/450$, b : 板幅, a : 板長さ。

図-3に示すように、残留応力は X 軸方向では一定であり、引張残留応力度 σ_{rx} および圧縮残留応力度 σ_{rx} を、それぞれ $\sigma_{rx} = \sigma_Y$, $\sigma_{rx} = -\sigma_Y/3$ で与える。鋼種として SS400 を用い、降伏応力度 $\sigma_Y = 274.4\text{MPa}$, ヤング係数 $E = 207.7\text{GPa}$, ポアソン比 ν を 0.29, 幅厚比パラメータ λ_p を 0.767, アスペクト比 a/b を 0.7 とする。

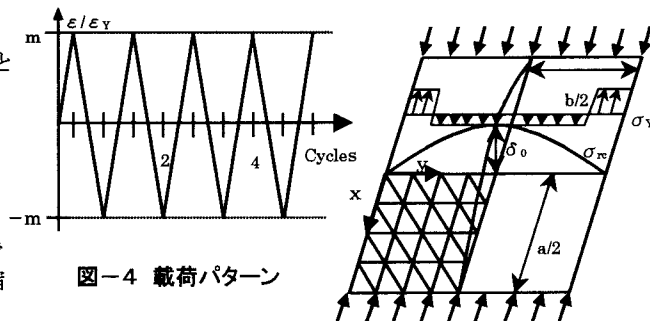


図-4 荷重パターン

図-3 解析モデル

(2) 荷重パターン

圧縮から始まる一定ひずみ振幅を 4.5 サイクルまで図-4に示すように荷重辺に与える。ひずみの振幅は $m=4$ で行なう。ここで、 $m = (\text{平均ひずみの最大値}) / (\text{降伏ひずみ})$ である。

(3) 解析結果と考察

図-5, 6にそれぞれ修正2曲面モデルと本構成則の平均応力-平均ひずみ関係を示す。図-7, 8にそれぞれ修正2曲面モデルと本構成則の平均応力-板たわみ関係を示す。図-5と図-6を比較すると、各ループ毎の平均応力の最大値はほぼ同じ値であり、包絡線もほぼ一致していることがわかった。図-7と図-8を比較すると、1ループ目の板たわみの最小値はほぼ同じであるが、2ループ目以降、本構成則が小さい値を示している。これは、本構成則では簡素化のため弾性域の大きさを式(1)で与えているためである。しかし、各ループ毎の板たわみの最大値はほぼ一致しており、引張試験に基づく材料定数をパラメータとする本構成則が、繰り返し荷重実験からパラメータを決定する修正2曲面モデルと全体的にほぼ同じ挙動を示す。

4. まとめ

本研究では、引張試験に基づく材料定数をパラメータとする鋼材の繰り返し構成則について述べた。さらに、この構成則を用いて繰り返し荷重を受ける板要素の弾塑性解析を行ない、修正2曲面モデルと比較して数値計算例を示した。その結果、本構成則の有効性と特徴がわかった。

【参考文献】

- 1) 奈良敏, 服部松利, 森脇良一: 繰り返し軸方向荷重を受ける鋼板の弾塑性解析, 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 第19巻, pp. 177-182, 1995年7月。
- 2) 坂野茂, 宇佐美勉, 水野英二: 修正2曲面モデルによる板要素の繰り返し圧縮・引張弾塑性有限変位解析, 土木学会論文集, No.525/I-33, pp.1-15, 1995.3)
- 3) 水野英二, 沈赤, 宇佐美勉: 鋼素材に対する修正2曲面モデルの一般定式化, 構造工学論文集, Vol.40A, 1994年3月。
- 4) 西村宜男, 小野潔, 池内智行: 単調荷重曲線を基にした繰り返し塑性履歴を受ける鋼材の構成式, 土木学会論文集, No.513/I-31, 27-38, 1995年4月。
- 5) C. Shen, E. Mizuno and T. Usami: A generalized two-surface model for structural steels under cyclic loading, *Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng.*, Vol.10, No.2, pp.22-33, 1993.
- 6) G. C. Lee, K. C. Chang and K. Sugiura: The experimental basic of material constitutive laws of structural steel under cyclic and nonproportional loading, 動的荷重を受ける鋼構造物の繰り返し座屈安定に関する総合的研究, 平成3年度科学研究費補助金研究成果報告書, pp.3-14, 1991.
- 7) Y. F. Dafalias and E. P. Popov: A Model of Nonlinear Hardening Materials for Complex Loading, *Acta Mech.*, pp.173-192, 1975.
- 8) 奈良敏, 出口恭司, 小松定夫: ひずみ硬化を考慮した圧縮板の極限強度に関する研究, Vol.33A, 1987年3月, pp. 141-150.

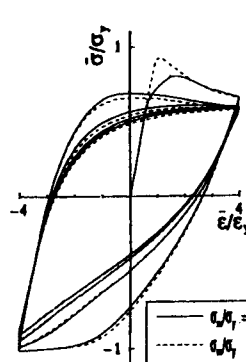


図-5 修正2曲面モデル

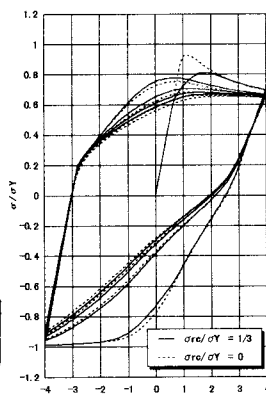


図-6 本構成則

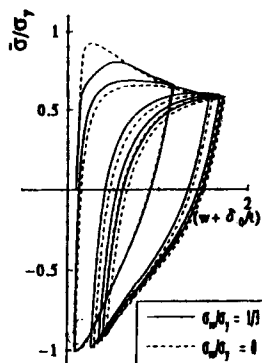


図-7 修正2曲面モデル

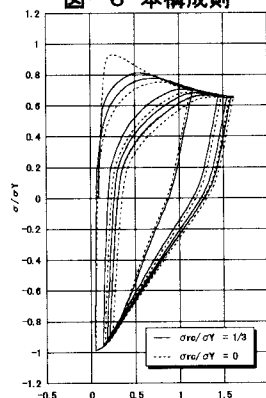


図-8 本構成則