

早稲田大学大学院 学生員 岡 哲郎

早稲田大学理工学部 正 員 依田照彦

1. はじめに

大地震などの繰り返し荷重を受ける鋼構造物においては、構造部材の応力レベルが引張あるいは圧縮側で弾性域を超え、塑性域に達することが考えられる。兵庫県南部地震以後、構造物の安全性・信頼性のより一層の向上が求められるようになった現在、このような繰り返し荷重下における鋼構造物の弾塑性挙動を有限要素法などの解析手法を用いて十分な精度で評価するためには、繰り返し荷重を受ける鋼材の応力-ひずみ関係を忠実に表現しうる弾塑性復元力モデルの開発が期待されており、数多くのモデルが提案されている。特に、柱とはりの接合部などでは多軸応力状態となるので、多軸応力状態の構成則モデルが必要不可欠である。

そこで、本研究では1次元の構成則モデルとして信頼性のある2曲面モデルを3次元に拡張し、汎用プログラムABAQUSを用いて弾塑性解析を行うことにより、3次元2曲面モデルの妥当性を検証する。

2. 2曲面モデル

ここに述べる2曲面モデルとは1976年に Dafalias・Popov¹⁾によって提案された塑性論に基づいた構成則モデルであり、降伏関数・流れ則・硬化則の3つの仮定が用いられている。

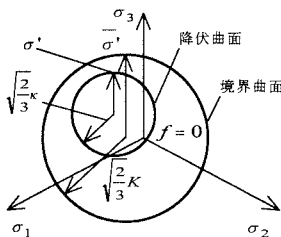


図1. 2曲面モデル

このモデルは、内側の負荷曲面(降伏曲面)と外側の境界曲面の2曲面から成り立つものであり、塑性硬化係数を負荷曲面上の応力点と、その点に対応する境界曲面上

の共役応力点の距離から求めるものである。解析で用いた2曲面モデルの基礎式は以下の通りである。

$$\text{境界曲面: } F(\overline{\sigma_{ij}}, \beta_{ij}') = \frac{3}{2} \cdot \overline{S_{ij}} \cdot \overline{S_{ij}} - K^2 = 0 \quad (2.1)$$

$$\text{降伏曲面: } f(\sigma_{ij}', \alpha_{ij}', \kappa) = \frac{3}{2} \cdot S_{ij}' \cdot S_{ij}' - k^2(\kappa) = 0 \quad (2.2)$$

$$\text{関連流れ則: } d\epsilon_{ij}^p = H \cdot \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \cdot \frac{\partial F}{\partial \sigma_{kl}} \cdot d\sigma_{kl} \quad (2.3)$$

$$\text{塑性硬化係数: } H^p = \frac{1}{H} = h \cdot \frac{\delta}{\delta_m - \delta} \quad (2.4)$$

ここで、 $\overline{S_{ij}} = (\overline{\sigma_{ij}}' - \beta_{ij}')$ 、 $S_{ij}' = (\sigma_{ij}' - \alpha_{ij}')$ 、 β_{ij}' および α_{ij}' は π 平面上における境界曲面および降伏曲面の中心、 K は一軸引張時の降伏応力より求まる定数、 $k(\kappa)$ は硬化パラメータ κ によって与えられる変数($\kappa=0$ のとき一軸引張時の降伏応力)、 h は応力-ひずみ曲線の曲率を決める正のスカラ値、 $\delta = \overline{\sigma_e} - \sigma_e$ 、 δ_m は降伏時の δ 、ダッシュは偏差成分、添え字 e は相当応力を示す。

3. 解析モデル

(1) 一要素に対する解析

今回提案する2曲面モデルを用いた場合、材料非線形性がどのように再現できるかを調べるために、各辺1cmの立方体一要素に対する解析を行った。荷重の載荷方法は、単調載荷および繰り返し載荷の2パターンであり、解析は荷重増分法によるものである。鋼材はSM490とし、材料定数は下表に示すが、降伏応力には、公称値を用いた。

表1. 材料定数

項目	材料定数
一軸引張応力	3200 kgf/cm ²
弾性係数	2.1×10 ⁶ kgf/cm ²
ポアソン比	0.30

(2) 鋼製橋脚モデルの解析

次に鋼製橋脚の解析を行った。解析モデルは、平成7～8年に日本橋梁建設協会が行った正負交番載荷試験で用いた矩形断面B1供試体(図2. 参照)とし、対称性を利用して半分をモデル化した²⁾。なお、

キーワード：2曲面モデル、弾塑性解析、3次元有限要素法

連絡先：早稲田大学理工学部 〒169-8555 新宿区大久保3-4-1 Tel・Fax:03(5286)3399

今回はダイアフラムはモデル化していない。荷重条件は、載荷実験の載荷方法に合わせ、所定の軸力Pを載荷したあと、その軸力を一定に保った状態で所定の載荷点に正負の水平荷重を静的に載荷する水平交番載荷とした。載荷は、橋脚の下端が降伏する時の載荷点の変位を δ_y として、 $\delta=0 \rightarrow +\delta_y \rightarrow -\delta_y \rightarrow +2\delta_y \rightarrow \dots$ のように振幅を増しながら変位制御で行った。今回は座屈による幾何学的非線形性が比較的弱く、材料非線形性が卓越すると思われる $\pm 3\delta_y$ の範囲まで解析を行った。

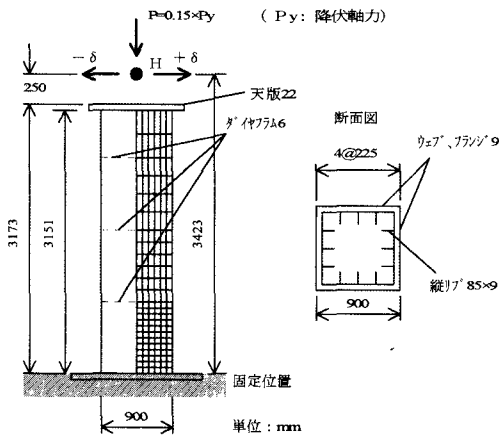


図2. 解析対象モデルの諸元

4. 解析結果

一要素に対する解析の、単調載荷時の結果を図3に示す。図3では、バイリニアモデルでの応力-ひずみ曲線との比較を行った。バイリニアモデルでの降伏応力は、材料試験で求められた実測値3825 (Kg/cm²)を用いた。ひずみ硬化係数はヤング係数の1/100とした。

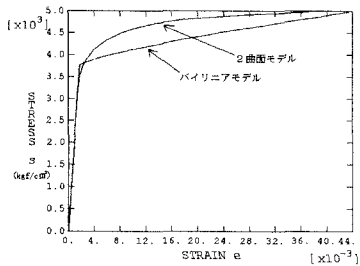


図3. 応力-ひずみ曲線(引張方向)

次に、鋼製橋脚モデルB 1 供試体の解析結果を図

4および図5に、また実験値との比較を表2に示す。図5の応力-ひずみ曲線は、変形が大きかった橋脚下端から41.25cmの隅角部のものである。

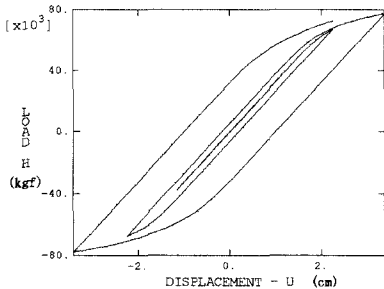


図4. 水平荷重-水平変位曲線(載荷位置)

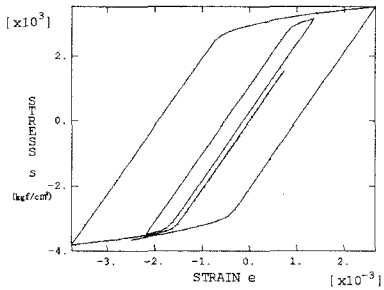


図5. 応力-ひずみ曲線(軸方向ひずみ)

表2. 実験値と解析値の比較

	H (+3δy)	H (-3δy)
実験値	+142.0tf	-146.0tf
解析値	+154.1tf	-155.4tf

5. 考察

本研究では、2曲面モデルを用いて、塑性硬化係数を式(2.4)で定義し、それが弾塑性解析に及ぼす影響を調べた。一要素の解析より、式(2.4)における1つのパラメータhの値を変えるだけで、実際の現象に近い応力-ひずみ関係を比較的精度よく表現できることが分かった。また、鋼製橋脚の解析においても、表2に示したように、実験値にある程度近い結果が得られた。以上のことより、ここで提案している2曲面モデルが3次元において材料非線形性を精度よく表せることが確認できた。しかしながら、今回は、幾何学的非線形性が比較的弱い領域での解析しか行っておらず、材料非線形性と幾何学的非線形性の両者が強く現れる、座屈後の大変形領域での挙動を追跡するときに、このモデルが解析にどのような影響を与えるかを調べるのが今後の課題となる。

参考文献：1) Dafalias, Y.F. and Popov, E.P.: Plastic Internal Variables Formalism of Cyclic Plasticity, Jour, Appl. Mech. pp.645-651, Dec. 1976
 2) 建設省土木研究所：道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書〔Ⅶ〕 平成9年4月