

SBHS500 材による正方形断面鋼製柱の繰返し載荷試験の FE 解析とその改善提案

瀧上工業(株) 正会員 ○藤原 史

豊田工業高等専門学校 正会員 川西直樹

次世代耐震工学研究所 フェロー会員 後藤芳顕

名古屋工業大学 正会員 海老澤健正

1. 研究背景と目的 橋梁用高性能鋼材である SBHS500 鋼は従来鋼に比べ高降伏強度を有するので、地震時に損傷を許容しない上部工などへの適用においてはコストの低減が可能である。一方、エネルギー吸収部材である鋼製橋脚などに適用する場合は、SBHS 鋼の塑性領域における力学挙動の解明が十分進んでいない理由から、弾性範囲内の設計に留めなければならないという不経済な制約が課せられているのが現状である。塑性域での繰返しを含む SBHS500 鋼の材料試験に基づく過去の検討¹⁾から、SBHS 鋼は従来鋼に比して降伏比が大きいことと公称応力のピーク点が比較的小さいひずみで現れるという他の従来鋼と異なった特徴があることが指摘されている(図 1)。

著者らは各種従来鋼による鋼製橋脚などのエネルギー吸収部材の塑性域での繰返し挙動をシェル要素による FE 解析で精度よく表現する材料構成則として 3 曲面モデルの開発を行ってきた²⁾。本研究では、この 3 曲面モデルを SBHS500 鋼による構造物の塑性域での繰返し挙動解析に適用するための各種検討を行った。まず、SBHS500 鋼による無補剛正方形断面鋼製柱モデルの繰返し載荷実験の解析に従来鋼用の 3 曲面モデルを用いて得られる結果を実験結果と比較することで、SBHS500 鋼に 3 曲面モデルを適用する場合の課題を抽出した。さらに、この課題を解決するために有効な 3 曲面モデルの修正方法について検討した。

2. 従来型 3 曲面モデルの SBHS500 鋼への適用性の検討

(1) 従来型 3 曲面モデルによる SBHS500 の材料定数：従来の 3 曲面モデルを SBHS500 鋼に適用する場合の材料パラメータは鋼材の単調引張と繰返し材料試験から定まる。表 1 に過去の SBHS 鋼の繰返し材料試験結果¹⁾から同定された繰返し材料定数の値と今回の鋼製柱モデルに用いた鋼材の単調引張り試験で求めた基本的な材料定数を記す。周知のとおり 3 曲面モデルは、降伏曲面(混合硬化則)、不連続曲面(等方硬化則)、限界曲面(不動)の 3 つの応力曲面を利用して材料特性が規定され、有効相当塑性ひずみが大きくなると、相当応力は限界曲面に漸近していく(図 2)。限界曲面の大きさ σ_u は、引張り試験において応力分布の一樣性が保持される限界である公称応力のピーク点を真応力に変換した値としている。3 曲面モデルでは簡単のため限界曲面に応力状態が近づくと硬化係数が 0 に漸近するモデルを用いているが、真応力—対数ひずみ関係では公称応力のピーク点に相当する限界曲面位置でも硬化係数は厳密には 0 にならず正の値をとる。このように、従来の 3 曲面モデルでは限界曲面に近づくと硬化係数を過小評価し精度が低下する傾向にある。SBHS500 鋼は限界曲面を規定する公称応力のピーク点は有効相当塑性ひずみが 0.10 近傍で生じ、従来鋼の 0.20 にくらべるとかなり小さいので、従来の 3 曲面モデルの枠組みで SBHS500 鋼を表すと、従来鋼に比べ応力が限界曲面に接近しやすく、硬化係数の値が実際より小さく評価されやすい傾向にあると考えられる。

(2) 鋼製橋脚柱の繰返し載荷実験とモデル化：載荷実験では図 3、表 2 に示す SBHS500 材を用いた正方形断面無補剛鋼製柱の供試体(縮尺率：1/10)を用いた。この供試体に死荷重に相当する鉛直荷重($P=100\text{kN}$)を載荷後、一方

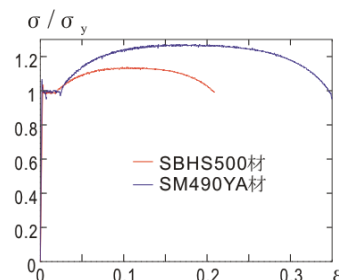


図 1 引張試験結果
(公称応力-工学ひずみ関係)

表 1 SBHS500 材の 3 曲面モデルでの主な材料パラメータ

鋼種	E (GPa)	ν	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	f_b/σ_y	β	ρ	κ	ζ
SBHS500	204	0.3	544.3	684.2	0.56	1764	2.0	3.0	0.98

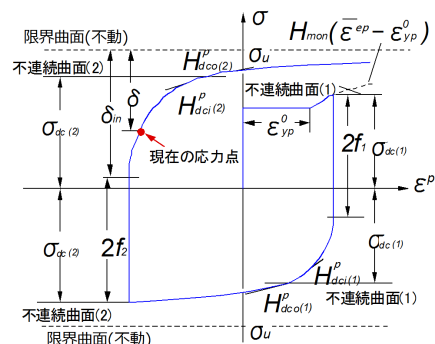


図 2 3 曲面モデルの概要(単軸表記)

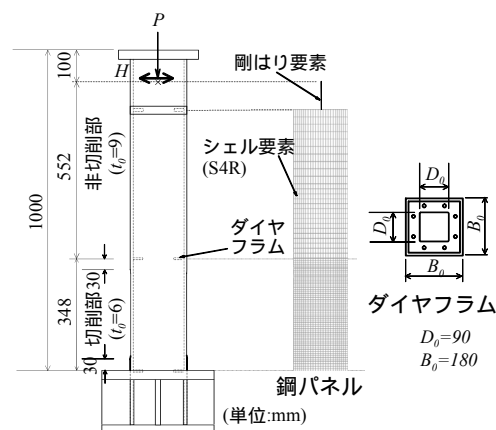


図 3 検討対象と解析モデル

キーワード： SBHS, 3 曲面モデル, 鋼製柱, 弾塑性解析

連絡先： 〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学 TEL:0565-735-5021 FAX:052-735-5563

向漸増両振り繰返し載荷を変位制御により行った．FE解析におけるモデル化ではABAQUSの厚肉シェル要素(S4R)を用いて図3のように要素分割し，材料構成則は(1)に記した3曲面モデルを用いる．なお，実験条件を正確に再現するため，解析では基部には適切な回転剛性をもった回転ばねを配置するとともに，載荷装置もその機構を再現した．

(3) 従来型 3 曲面モデルによる数値解析

a) 解析結果：図4には実験および従来型 3 曲面モデルによる数値解析で得られた繰返し載荷での水平復元力 - 水平変位の履歴関係を示す．これより，ピーク点付近までの比較的小さな変位領域では両者はほぼ一致するものの，変位が大きくなるにつれて，包絡線の軟化域では解析による復元力の低下が大きくなり実験結果との差が開くことがわかる．また，結果については割愛するが，局部座屈形状については図示を割愛しているが，解析による座屈モードは実験と一致するものの，座屈波長は実験結果より長くなる．

b) 課題とその改善方法の提案：a)で説明した従来型 3 曲面モデルを用いた解析は包絡線の軟化域での復元力を実験より低く評価するという特性を持つが，これは(1)で述べたピーク応力に到達時の塑性ひずみの小さい SBHS500 鋼ではピーク近傍の材料の硬化係数を過小評価するという本モデルの問題点により説明できる．

そこで，ここでは相当塑性ひずみがある一定値を超えたときに 3 曲面モデルにおける限界曲面を等方硬化則にしたがって拡大させる限界曲面拡大型 3 曲面モデルを提案する．このモデルでは有効相当塑性ひずみが増加する塑性負荷のとき不連続曲面は限界曲面と等しいものとし，不連続曲面外での応力の降伏曲面はその簡便性を考えて，等方硬化係数と移動硬化係数の比が一定の古典的な混合硬化則による．材料の引張り試験結果は真応力-対数塑性ひずみに変換し，3 曲面モデルに組み込むが，公称応力のピーク点以降はネッキングが生じ，ひずみ分布の一樣性が保持されないためピーク点以降の応力-ひずみ関係は不明である．ここでは，ピーク点以降の公称応力が一定と仮定し，これを真応力-対数塑性ひずみに変換した関係を用いる(図5)．これによると，今回対象とした SBHS500 材の場合，対数塑性ひずみが 0.40 まではピーク点以降の硬化係数はほぼ一定となる．

3. 限界曲面拡大型 3 曲面モデルによる解析結果

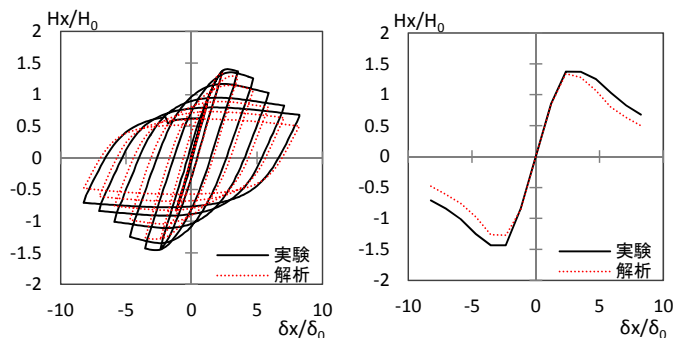
2(3)b)で提案した限界曲面拡大型の 3 曲面モデルとしては，図5のように有効相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^{ep}$ が 4%に到達した段階で 3 曲面モデルから限界曲面拡大モデルに移行するものを用いる．また，降伏曲面の等方硬化係数と移動硬化係数の比は 1:1 とする．この構成則による解析結果を図6に示す．図6より，限界曲面拡大型 3 曲面モデルによる結果は，実験結果とよく整合することが分かる．また，局部座屈による変形モードおよび座屈波長についても実験結果とほぼ整合することを確認している．今後さらに複数の実験結果との詳細な比較を行い，限界曲面拡大型 3 曲面モデルの精度向上を計りたい．

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP16K18140 の助成を受けたものです．

参考文献：1) 中村ら：三曲面モデルのパラメータ同定手法改良による各種鋼材の繰返し挙動の再現精度の改良，土木学会全国大会第 67 回年次学術講演会，2012．2) 後藤ら：2 方向繰返し荷重を受ける薄肉円形断面鋼製橋脚柱の履歴特性，土木学会論文集，No.780/I-70，pp.181-198，2005．

表 2 検討対象の主な諸元

鋼脚切削部		水平降伏変位	水平降伏荷重	幅厚比	軸力比
板厚	幅	δ_0 (mm)	H_0 (kN)	パラメータ R	P/P_y
5.98	174.40	6.99	130.5	0.735	0.046



(a) 荷重変位履歴曲線 (b) 包絡線

図4 3曲面モデルによる解析結果

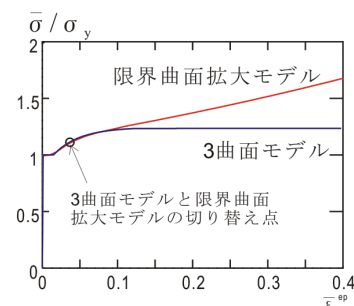
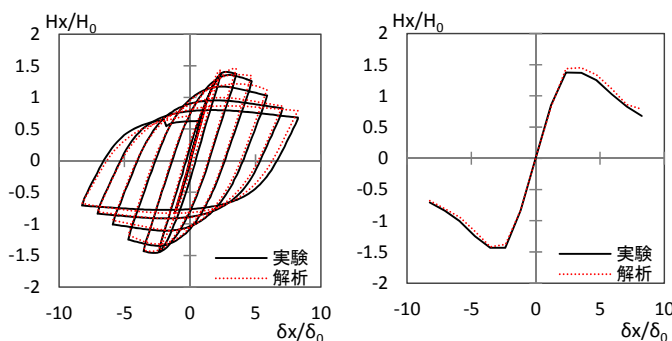


図5 限界曲面拡大モデル
(真応力-対数塑性ひずみ関係)



(a) 荷重変位履歴曲線 (b) 包絡線

図6 限界曲面拡大型 3 曲面モデルを適用した解析結果