

SBHS400の構成則に関する実験的研究

川井健吾¹・小野潔²・市川尚樹³・山田信司⁴・宮下剛⁵

¹学会員 早稲田大学創造理工学術院 建設工学専攻(〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

²正会員 博士(工学) 早稲田大学創造理工学部教授 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

³学会員 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

⁴非会員 大阪市立工業研究所(〒536-0025 大阪府大阪市城東区森之宮1丁目6-50)

⁵正会員博士(工学) 長岡技術科学大学(〒940-2137 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

1. 目的

SBHS400 は高い溶接性や、高強度等、建設コストの縮減が可能であると考えられている。今後一般的な橋梁構造物に対して広く用いられることが期待される鋼材であるが、JIS 化された¹⁾時期が遅くSBHS400 の繰返し塑性履歴に関するデータは未だ十分とは言えない。鋼構造物の耐震性能を評価するには幅広いデータの蓄積が必要である。しかし実験のみによって情報の蓄積を行うのはコスト等の問題から難しい。既往の研究²⁾によって鋼材の繰返し塑性履歴を精度よく表現することができる構成則を用いれば、弾塑性有限解析により荷重-変位の履歴特性を精度よく再現できることが明らかになっている。そのため本研究では繰返し載荷試験を行い、SBHS400 の応力-ひずみ関係、機械的性質の把握を行い、データの蓄積や整理を行った。また既往の研究における鋼材の構成則との比較も行った。

2. 構成式の概要

弾塑性有限変位解析に用いる構成式の概要を説明する。単調載荷曲線の模式図を図-1 に、繰返し載荷経路の模式図を図-2 に示す。図-1 の点 0～8 は図-2 の点 0～8 に対応している(ただし点 4、7 を除く)。図-2 において、一軸状態における塑性履歴曲線の新能力-塑性ひずみの関係を 0-1 の初期弾性域、1-3、5-6、8 以降の単調載荷曲線に準ずる領域、3-5、6-8 の遷移領域に分け、さらに単調載荷曲線に準ずる領域を 1-2 の降伏棚、2-3、5-6、8 以降のひずみ硬化開

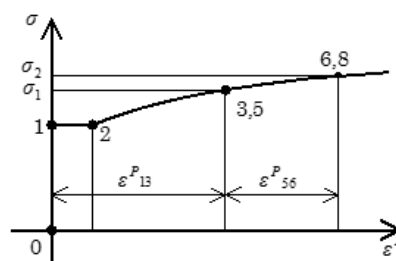


図-1 単調載荷曲線

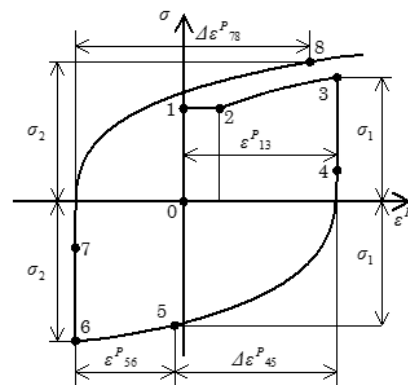


図-2 繰返し載荷経路

始後の領域に、遷移領域を 3-4、6-7 の弾性域、4-5、7-8 の非線形遷移領域に分けて表現している。例えば、ここで応力の絶対値が σ_1 である点 3 まで載荷した後、除荷したとする。除荷が進み点 5 において応力の絶対値が再び σ_1 に達したとすると、点 5 から再載荷する点 6 までの部分は図-1 の単調載荷の点 5 から点 6 までの部分と等価であると考えられる。

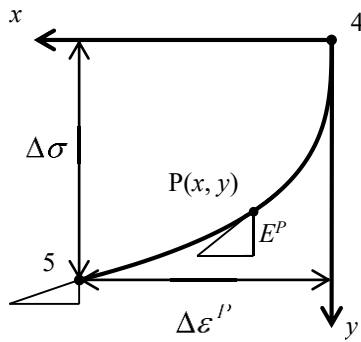


図-3 非線形遷移領域

(1) 単調載荷曲線に準ずる領域

ひずみ硬化領域の単調載荷曲線については、以下の式(1)によって示される。

$$\sigma = \frac{E_{st}^P}{b} e^{a\epsilon^{P*}_{mon}} \ln(1 + b\epsilon^{P*}_{mon}) + \sigma_y \quad (a \geq 0) \quad (1)$$

ここに、

ϵ^{P*}_{mon} : ひずみ硬化開始点を原点とした単調載荷曲線上の塑性ひずみ

E_{st}^P : ひずみ硬化勾配

σ_y : 下降伏応力度

a, b : 鋼材によって決まる定数

(2) 弾性遷移領域

鋼材が繰り返し塑性履歴を受けるとバウシニング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、ある程度以上の繰り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。そこで、繰り返し塑性履歴にともなう弾性域の大きさの変化を以下の式(2)によって表現している。

$$\frac{\kappa}{\kappa_0} = \frac{1-c}{(\epsilon^{P*}_{mon} + 1)^n} + c \quad (2)$$

ここに、

ϵ^{P*}_{mon} : 単調載荷曲線上の塑性ひずみ

κ : 弾性域の大きさ

κ_0 : 初期の弾性域の大きさ ($= 2\sigma_y$)

c, n : 鋼材によって決まる定数

(3) 非線形遷移領域

図-3に非線形遷移領域の模式図を示す。非線形遷移領域の開始点(点4)を原点とし、x軸に塑性ひずみ、y軸に真応力をとる。非線形遷移領域上の任意の点 $P(x, y)$ における接線塑性係数 E^P を以下の式(3)で算

出している。

$$y = E_{00}^P x + (\Delta\epsilon^P E_{00}^P - \Delta\sigma) \left(\frac{x}{\Delta\epsilon^P} \right)^{m+1} \left\{ (1+m) \ln \left(\frac{x}{\Delta\epsilon^P} \right) - 1 \right\} \quad (3)$$

ここに、

$\Delta\epsilon^P$: 遷移領域の塑性ひずみの大きさ

$\Delta\sigma$: 原点から非線形遷移領域終了点(点5)までの真応力の大きさ

E_{00}^P : 非線形遷移領域終了点(点5)における接線塑性係数

m : 非線形遷移領域の形状を表すパラメータ ($-1 < m < 0$)

単調載荷曲線上で荷重が反転した場合、遷移領域の塑性ひずみの大きさ $\Delta\epsilon^P$ は、単調載荷曲線上の塑性ひずみ ϵ^P_{mon} の関数として以下の式によって表現している。

$$\Delta\epsilon^P = \frac{e}{d} \sqrt{(\epsilon^P_{mon})^2 + 2d\epsilon^P_{mon}} \quad (4)$$

ここに、

d, e : 鋼材によって決まる定数

非線形遷移領域で荷重が反転した場合、遷移領域の塑性ひずみの大きさ $\Delta\epsilon^P$ は式(5)で表現される。

$$\Delta\epsilon^P = \frac{e}{d} \sqrt{(\epsilon^P_{mon})^2 + 2d\epsilon^P_{mon}} - \Delta\epsilon^P_R \quad (5)$$

ここに、

$\Delta\epsilon^P_R$: 荷重が反転する点から非線形遷移領域終了点までの塑性ひずみの大きさ(%)

非線形遷移領域での反転例の模式図を図-4、図-5に示す。式(5)は、図-4において非線形遷移領域の点Rで荷重が反転した場合、次の非線形遷移領域の終了点(図中の点5')が前の荷重反転点(点3)と一致するようにしている。図-5のように、非線形遷移領域の点Rで荷重が反転した後、再度非線形遷移領域の点R'で荷重が反転しても、遷移領域の塑性ひずみの大きさ $\Delta\epsilon^P$ は式で表現される。

非線形遷移領域の m は、ひずみ硬化開始点を原点としたときの単調載荷曲線上の塑性ひずみ ϵ^{P*}_{mon} の関数として以下の式で表現される。

$$m = \frac{f}{\epsilon^{P*}_{mon} + \{1 + \exp(g)\}f} - 1 \quad (6)$$

ここに、

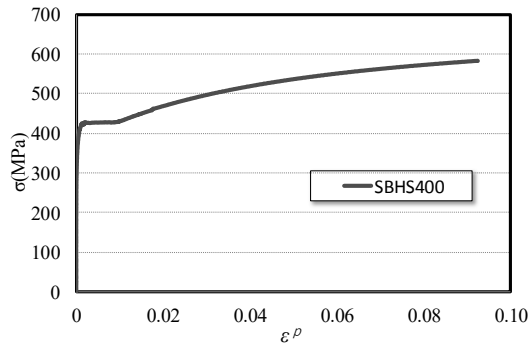


図-6 単調荷重実験

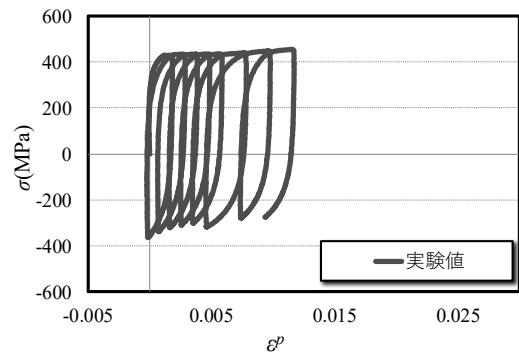


図-8 弾性域の大きさの減少を調べる実験

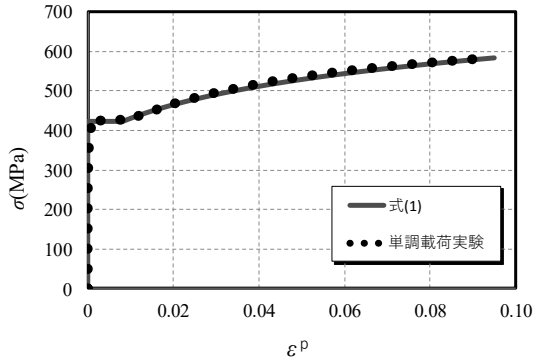


図-7 σ - ε^P 関係の実験値と構成式の比較

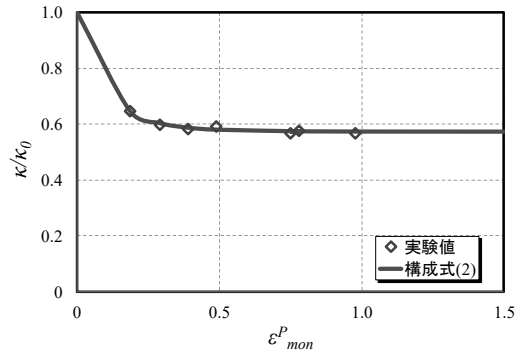


図-9 κ/κ_0 - ε^P_{mon} 関係の構成式と実験値の比較

定するにあたり，除荷開始点から 0.03% オフセット法によって各除荷ループの弾性域の大きさ κ を求める．こうして求めた弾性域の大きさ κ を初期の弾性域の大きさ $\kappa_0 (= 2\sigma_y)$ で割って無次元化して κ/κ_0 と，それぞれの κ に対応する単調荷重曲線上の塑性ひずみ ε^P_{mon} との関係を図-9 に示す． ε^P_{mon} と κ/κ_0 の実験データを式に代入し，回帰計算により材料定数 c ， n を決定する．

(3) 両振り実験

非線形遷移領域に関する材料定数を求めるためには，正負のひずみを漸増する両振り実験を行う．図-10 に，両振り実験より得られる各鋼材の σ - ε^P の関係を示す．両振り実験結果から，それぞれの除荷・荷重ループについて非線形遷移領域を取り出し，単調荷重曲線上の塑性ひずみ ε^P_{mon} と遷移領域の塑性ひずみの大きさ $\Delta\varepsilon^P$ を求める．図-11 に，得られた ε^P_{mon} と $\Delta\varepsilon^P$ の関係を示す． ε^P_{mon} と $\Delta\varepsilon^P$ の実験データを式に代入し，回帰計算により，材料定数 d ， e を決定する．

非線形遷移領域の曲率に関するパラメータ m を表現する材料定数 f ， g に関しては，両振り実験結果と比較して曲率を精度良く表現できるように値を入力し，決定した．

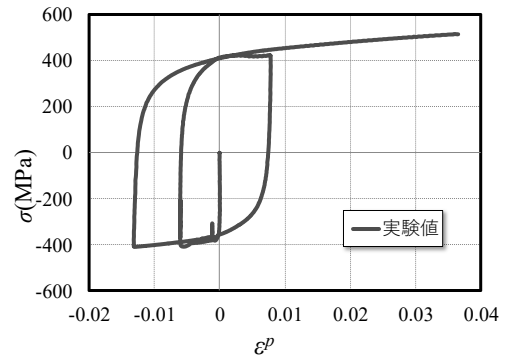


図-10 両振り実験

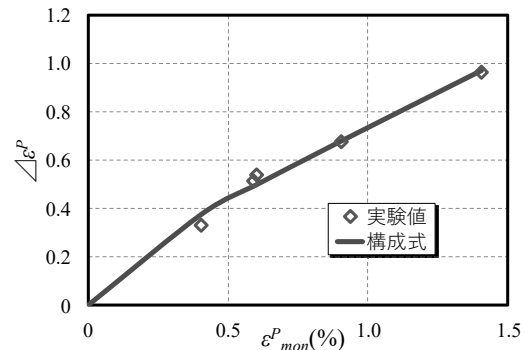


図-11 $\Delta\varepsilon^P$ - ε^P_{mon} 関係の実験値と構成式の比較

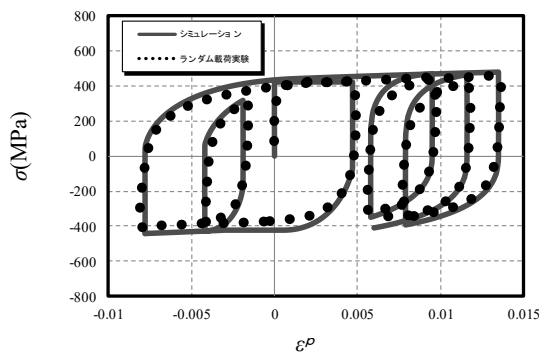


図-12 ランダム載荷実験と数値シミュレーションの比較

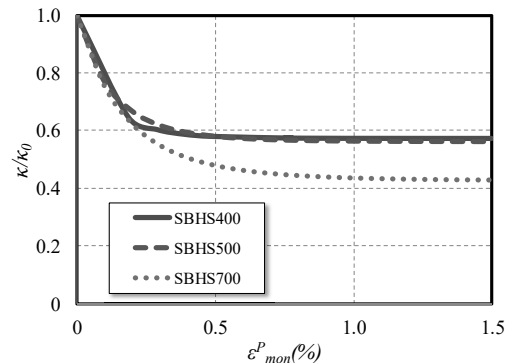


図-14 $\kappa/\kappa_0 - \varepsilon^P_{mon}$ 関係の比較

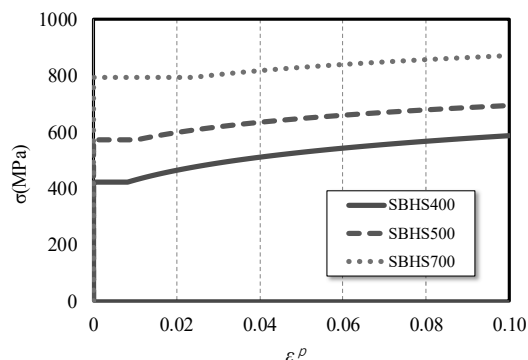


図-13 $\sigma - \varepsilon^P$ 関係の比較

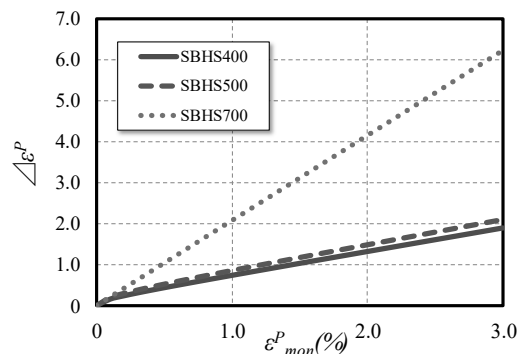


図-15 $\Delta\varepsilon^P - \varepsilon^P_{mon}$ 関係の比較

表-1 各鋼材とひずみ硬化勾配の比較

鋼材	E^P_{st} (MPa)
SBHS400	4391
SBHS500	3162
SBHS700	1775

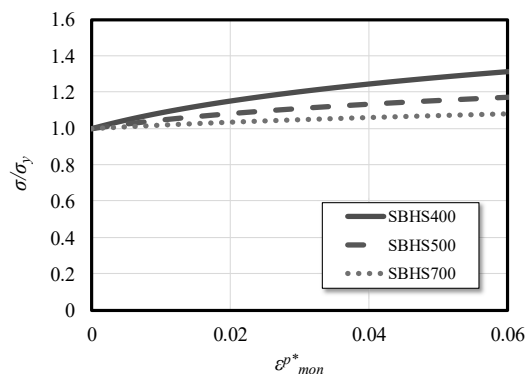


図-16 ひずみ硬化後の応力-ひずみ関係の比較

(4)ランダム載荷試験との比較

以上の実験結果から得られた材料定数を用いて鋼材の一般的な塑性履歴特性を再現できることを確認するため、載荷パターンを変化させたランダム載荷実験を行い数値シミュレーションと比較する。図-12 に実験値と構成式による計算値の比較を示す。図-12 よりランダム載荷での塑性履歴挙動を数値シミュレーションにより良好に再現出来ており、今回決定したSBHS400の材料定数を用いて鋼材の一般的な塑性履歴特性を再現できることを確認した。

4. 既往の研究との比較

実験から得られたSBHS400の構成則を既往の研究^{3),4)}で示されている構成則と比較した。図-13は単調載荷領域を表す構成式(式(1)) 図-14は弾性域の大きさの減少に関する構成式(式(2))、図-15は非線形

遷移領域を表す構成式(式(4))を示す。図-13よりSBHS400はSBHS500, SBHS700よりも降伏点が低いことがわかる、また表-1、図-16より降伏後のひずみ硬化の割合が大きく降伏後に応力が上昇しやすいといえる。図-15の非線形遷移領域においては同一ひずみでの非線形遷移領域の塑性ひずみの大きさ $\Delta\varepsilon^P$ はSBHS700の方が大きい傾向にみられた。このことからSBHS700の方が他の2つの鋼材に比べて非線形遷移領域において荷重を反転させた際に、ひずみの変化がより大きい段階で単調載荷曲線に準ずる領域に移行しやすいことがわかる。またそれぞれの材料試験結果から降伏比はSBHS400は79%⁵⁾、SBHS500は91%³⁾、SBHS700は97%⁶⁾であった。このことからSBHS400は他の鋼材に比べて降伏強度を受けたあとに、引張強度に到達するまで強度的に

余裕があることがわかる。

5. まとめ

繰り返し塑性履歴を受ける鋼材の繰り返し履歴特性の把握を行うためSBHS400の繰返し載荷材料試験を実施し、実験結果から鋼材の構成則を決定した。また決定した構成則を用いた数値シミュレーション結果と実験結果の比較により、本稿で決定した構成則を用いてSBHS400の繰返し塑性履歴を精度よく表現できることが確認できた。SBHS400,SBHS500,SBHS700の比較結果では本稿で対象にしたものに関してはSBHS700に比べてSBHS400, SBHS500のほうが繰返し載荷時に繰返し回数に応じて履歴ループが増大しやすい傾向にあることがわかった。

謝辞：本研究は、JSPS研究費 25420483および「日本鉄鋼連盟 鋼構造研究・教育助成事業(一般テーマ研究)」によって実施したものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) JIS G 3140：橋梁用鋼降伏点鋼板，2012.
- 2) 西村宣男，小野潔，池内智行：単調載荷曲線を基にした繰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，pp.27-38，1995年4月.
- 3) S.HASHIMOTO, K.ONO and S.OKADA：An experimental study on mechanical properties and constitutive equation of SBHS500，eassec13-G-4-1，2013.
- 4) 橋本祥太，小野潔，北市さゆり，岡田誠司：繰返し塑性履歴を受けるSBHSの構成則に関する実験的研究，第16回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム公演論文集，pp.385-390，2013年7月.
- 5) 相澤宏行，小野潔，宮下剛，宮寄靖大：SBHS400の機械的性質に関する実験的研究，第31回日本道路会議，5016，2015.
- 6) 浜村圭太，小野潔，松村政秀，垂井敬寛，幸田真也：SBHS700を用いたハイブリッド鋼製短柱の耐力および変形能に関する実験的研究，第16回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム公演論文集，pp.391-394，2013年7月.