

繰り返し塑性履歴を受ける SBHSの構成則に関する実験的研究

橋本祥太¹・小野潔²・北市さゆり³・岡田誠司⁴

^{1,3}学生員 大阪大学大学院 工学研究科（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1）
²正会員 博士(工学) 大阪大学大学院准教授 工学研究科（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1）
⁴正会員 博士(工学) IHIインフラシステム課長 開発部（〒590-0977 大阪府堺市堺区大浜西町3番地）

1. 目的

橋梁用高降伏点鋼板(SBHS)がJISに規定された¹⁾。SBHSは高い降伏点、高い施工性等の特色を有し、既往の研究²⁾では、SBHSを適用することによる鋼橋の建設コスト縮減の可能性について検討も行われている。他方、構造物の挙動を明らかにする手法の一つとして有限要素法などの数値解析を用いる場合、繰り返し塑性履歴を受ける鋼材の応力-ひずみ関係を定義する構成式が必要である。SM490等の一般的な鋼材の構成式については著者らにより、塑性履歴特性を精度よく再現できる構成式が提案されている^{3), 4)}。しかしSBHS700の繰り返し塑性履歴特性は明らかになっておらず、また既往の構成式でSBHS700の繰り返し塑性履歴を表現できるかどうかは分かっていない。

そこで本稿ではSBHSのうち、SBHS700について繰り返し材料試験を行い、SBHS700の繰り返し塑性履歴特性を把握し、既往の構成式のSBHS700への適用性について検討するとともに、既往の高張力鋼の構成則との比較を行った。

2. 構成式の概要

SM490等の一般的な鋼材の構成式については著者らにより、塑性履歴特性を精度よく再現できる構成式が提案されている^{3), 4)}。既往の構成式のSBHS700への適用性の検討を行う。

構成式の概要を以下に示す。図-2の点0～8は図-1の点0～8に対応している(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真応力-塑性ひずみの関係を0-1の初期弾性域、1-3、5-6、8以

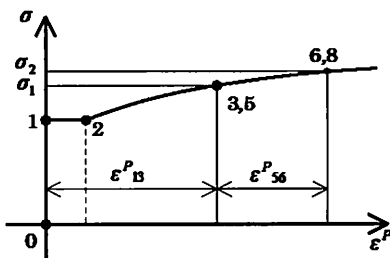


図-1 単調載荷曲線

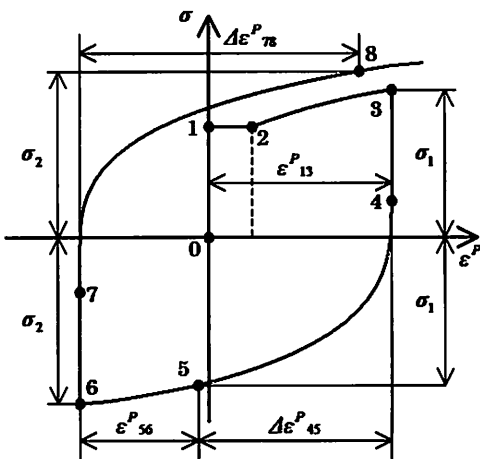


図-2 繰り返し塑性履歴経路

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。

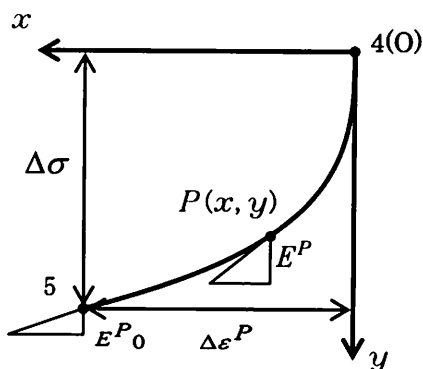


図-3 非線形遷移領域

(1) 単調載荷曲線に準ずる領域

ひずみ硬化以降の単調載荷曲線については、以下の式(1)によって表現している。

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

ここに、

E^P_{st} : ひずみ硬化勾配

ϵ^{P*}_{mon} : 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

σ_y : 下降伏応力

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inger効果により弾性域の大きさは初期の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 σ_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における真応力yは以下の式(3)で表される。

$$y = E^P_0 x + (\Delta\epsilon^P E^P_0 - \Delta\sigma) \left(\frac{x}{\Delta\epsilon^P} \right)^{m+1} \left\{ (1+m) \ln \left(\frac{x}{\Delta\epsilon^P} \right) - 1 \right\} \quad (3)$$

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^P_0 : 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定数

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 $\Delta\epsilon^P$ は以下の式(4)によって表される。

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

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 $\Delta\epsilon^P$ は以下の式(5)によって表される。

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

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-4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-4において遷移領域の塑性ひずみの大きさ $\Delta\epsilon^P_{4'5'}$ は $\Delta\epsilon^P_{45} - \Delta\epsilon^P_R$ で表される。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(5)で表現される。また図-5において遷移領域の塑性ひずみの大きさ $\Delta\epsilon^P_{4'5'}$ は $\Delta\epsilon^P_{45} - \Delta\epsilon^P_R$ で表される。

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(6)で表現される。

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

ここに、

f, g : 鋼材によって決まる定数

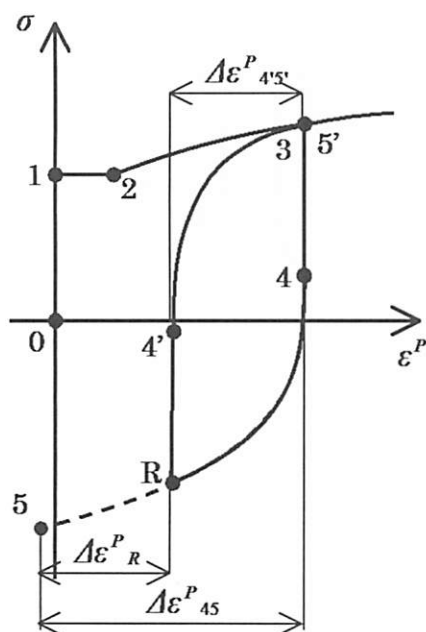


図-4 非線形遷移領域の反転(1)

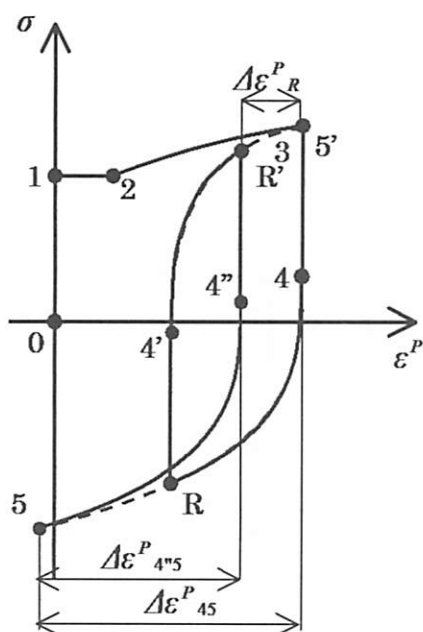


図-5 非線形遷移領域の反転(2)

ただし単調載荷曲線上の塑性ひずみが降伏棚の範囲内であるときは一定値($m=-0.01$)とする.

3. 構成式に含まれる材料定数の決定

構成式に含まれる SBHS700 の材料定数を決定するため単調載荷実験、弾性域の大きさの減少を調べる実験、両振り実験の 3 種類の実験を行った。

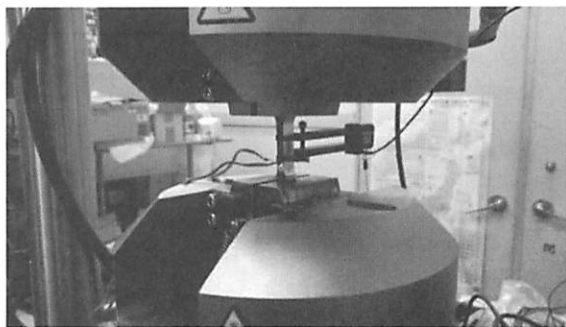


写真-1 繰り返し材料試験状況

構成式は真応力-塑性ひずみ($\sigma - \varepsilon^p$)関係を対象としている. 実験から得られるデータは工学ひずみ ε_N と, 荷重 P であるので, 以下の式(7)のよって ε_N と P を, 塑性ひずみ ε^p と真応力 σ に変換した.

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{P(1 + \varepsilon_N)}{A} \\ \varepsilon &= \ln(1 + \varepsilon_N) \\ \varepsilon^P &= \varepsilon - \varepsilon^e = \varepsilon - \frac{\sigma}{E} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここに、 ε : 真ひずみ (対数ひずみ)
 ε^e : 弾性ひずみ
 A : 実験供試体の断面積
 E : ヤング率

(1) 実験概要

実験装置として大阪市立工業研究所のデジタル油圧サーボ式材料試験機(インストロン 8801 型)を用いて実験を行った。荷重は試験機に内蔵されたロードセルにより、ひずみは平行部に取り付けた伸び計により測定した。実験の状況を写真-1 に示す。

(2) 単調載荷実験

単調載荷曲線に関する材料定数を求めるために、単調載荷実験を行った。その実験結果の例を図-6に示す。材料定数を求めるために、実験結果を真応力-塑性ひずみに変換した後、下降伏応力 σ_y 、降伏棚の長さ ε_{st}^P 、ひずみ硬化勾配 E_{st}^P を決定する。さらに、 $\varepsilon_{mon}^{P*} = \varepsilon_{mon}^P - \varepsilon_{st}^P$ により求めたひずみ硬化開始点を原点とした塑性ひずみ ε_{mon}^{P*} と真応力 σ で表現した実験データを、 E_{st}^P 、 σ_y を代入した式(2)で回帰計算を行い材料定数 a 、 b を決定した。図-7 に構成式と実験結果の比較を示す。

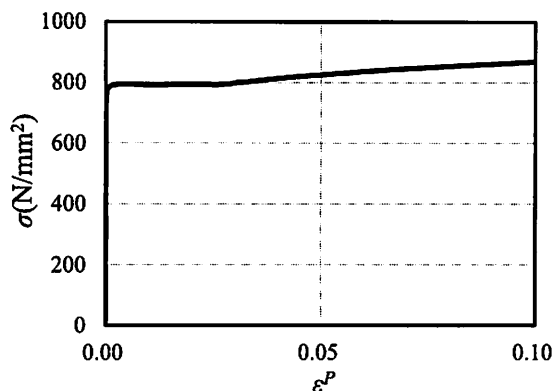


図-6 単調載荷実験

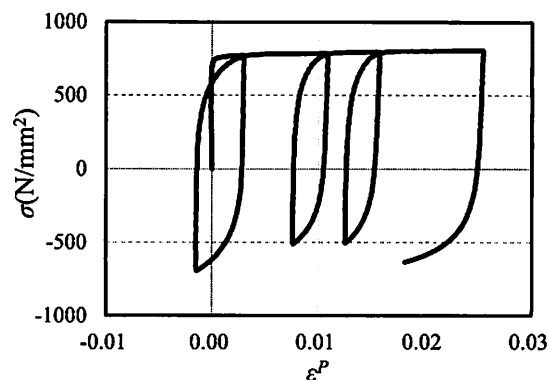


図-8 弾性域の大きさの減少を調べる実験

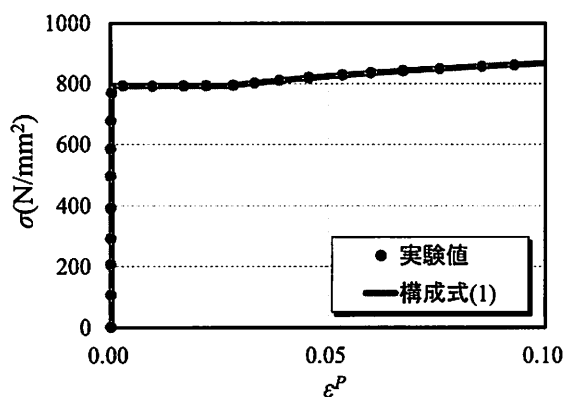


図-7 $\sigma - \varepsilon^p$ 関係の実験値と構成式の比較

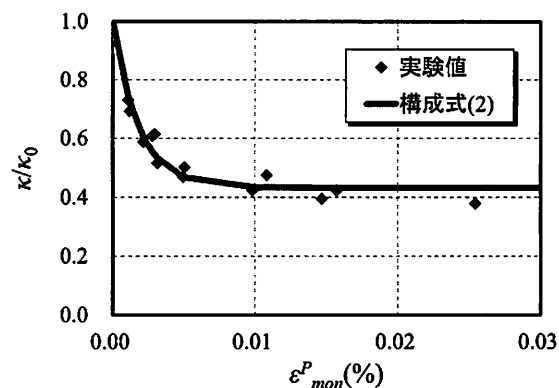


図-9 $\kappa/\kappa_0 - \varepsilon^p_{mon}$ 関係の構成式と実験値の比較

(3) 弾性域の減少を調べる実験

弾性域の大きさの減少に関する材料定数を求めるために、図-8 に示すような小さいひずみのステップで除荷と載荷を繰り返す実験を行った。弾性域の大きさを決定するにあたり、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 を求めた。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 $\kappa_0(2\sigma_s)$ で割って無次元化し、それぞれの κ に対応する単調載荷曲線上の塑性ひずみ ε^p_{mon} との関係 (図-9) を調べ、式(2)によって回帰計算し、 c と n を求めた。

(4) 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、図-10 に示すような、原点を中心に与える正負のひずみを漸増する両振り実験を行った。

非線形遷移領域の材料定数 d 、 e に関しては、図-11 に示すように、真応力-塑性ひずみに変換した実験データから得られる単調載荷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 $\Delta\varepsilon^p$ の関係を求め、 ε^p_{mon} と $\Delta\varepsilon^p$ を式(4)に代入して、回帰計算を行うことによって決定した。

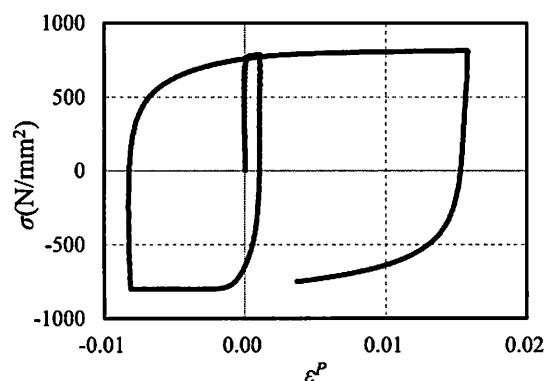


図-10 両振り実験

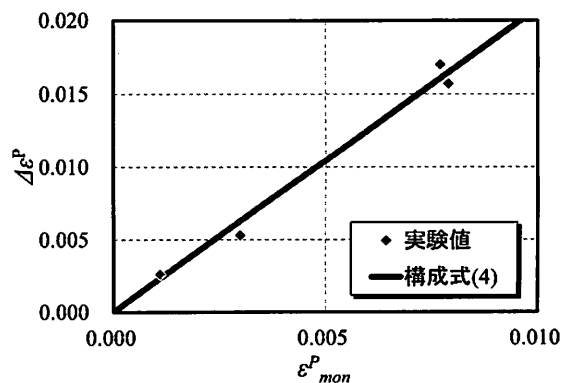


図-11 $\Delta\varepsilon^p - \varepsilon^p_{mon}$ 関係の実験値と構成式の比較

表-1 両振り実験

	σ_y MPa	ε^P_{st}	E^P_{st} MPa	a	b	c	n	d	e	f	g
SBHS700	793	0.024	1775	0.576	26.37	0.424	5.86	0.0027	0.0056	0.0111	-2.56

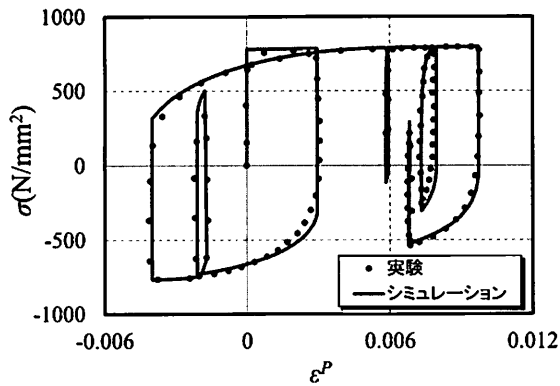


図-12 ランダム載荷実験と数値シミュレーションの比較

非線形遷移領域の曲率に関する m を表現する材料定数 f, g に関しては, f, g を変化させた数値シミュレーション結果と実験結果とのカーブフィッティングにより値を決定した。

(5) 構成則の妥当性の検証

単調載荷実験, 弾性域の減少を調べる実験, 両振り実験の3種類の実験から求められたSBHS700の材料定数を表-1に示す。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SBHS700の構成則による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, 決定した構成則でSBHS700の繰り返し塑性履歴を精度よく表現できることが確認できる。

4. 既往の高張力鋼との比較

決定したSBHS700の構成則を既往の研究で示されるSM570³⁾, SHY685⁵⁾の構成則と比較した。図-13, 図-14, 図-15にSBHS700, SM570およびSHY685それぞれの鋼種の単調載荷曲線を表す構成式(式(1)), 弾性域の大きさの減少に関する構成式(式(2)), 非線形遷移領域を表す構成式(式(4))を示す。図-13, 図-14, 図-15よりSBHS700の構成則はSM570とは異なりSHY685の構成則に近い特性を示すことがわかる。

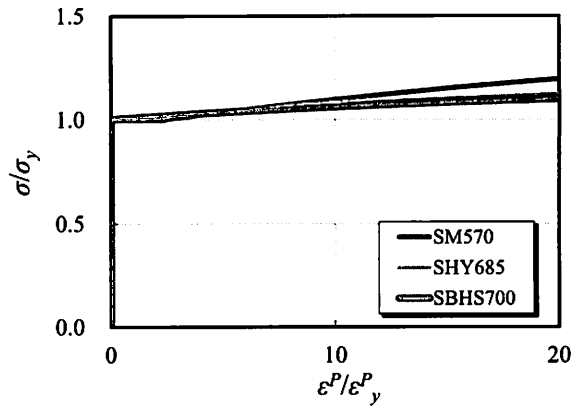


図-13 $\sigma - \varepsilon^P$ 関係

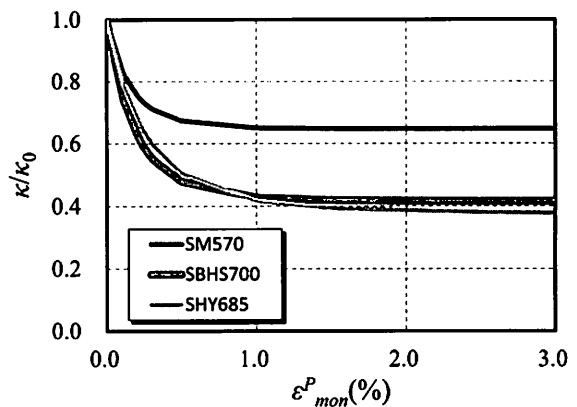


図-14 $\kappa/\kappa_0 - \varepsilon^P_{mon}$ 関係

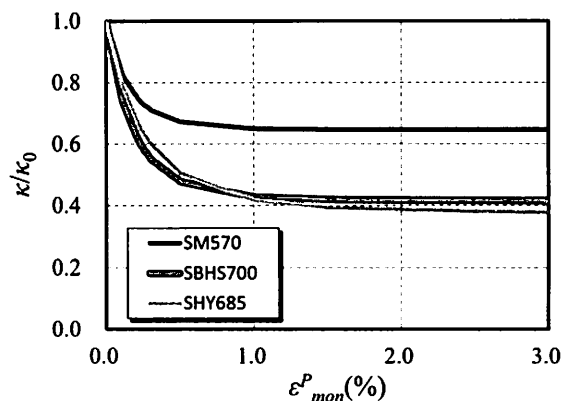


図-15 $\Delta\varepsilon^P - \varepsilon^P_{mon}$ 関係の実験値と構成式の比較

5. まとめ

本稿では、SBHS700 の繰返し材料試験を行い、SBHS700 の繰返し塑性履歴特性の把握を行った。また既往の構成式の SBHS700 への適用性について検討するとともに既往の高張力鋼の構成則との比較を行った。本稿で得られた知見の概要を以下に示す。

- ・著者らが提案している既往の構成式で SBHS700 の繰返し塑性履歴特性を精度よく再現できる。
- ・本稿で対象とした SBHS700 の構成則は既往の研究で示される SHY685 の構成則に近い特性を示す。

6. 謝辞：本稿は、JSPS 科研費 22560476 により実施したものです。また実験の実施にあたり、元大阪大学大学院学生(現(株)大林組)の垂井敬寛氏に御協力いただきました。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，2008.
- 2) 土木学会 新しい高性能鋼と利用技術調査研究小委員会：新しい高性能鋼と利用技術調査研究報告書～ SBHS500(W)，SBHS700(W)の設計・製作ガイドライン（案）～，2009.
- 3) 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，No513/I-31，pp.27-38，1995.
- 4) 鈴木雄大，小野潔，池内智行，岡田誠司，西村宣男，高橋実：実用的な構成式の開発，第 6 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.351-358，2003.
- 5) 遠藤和男：大規模地震に対する長大吊橋主塔の耐震性能照査法に関する研究，大阪大学博士論文，2007.