

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18140

研究課題名（和文）SBHS鋼を用いた鋼橋の塑性域での挙動解明による安全性確保と耐震設計に関する研究

研究課題名（英文）A study on safety secure and seismic design of steel bridge with SBHS by investigation of plastic behavior

研究代表者

海老澤 健正 (Ebisawa, Takemasa)

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：90332709

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：SBHS鋼の材料試験を実施したところ、SBHS鋼は従来鋼と較べ降伏比が高く、材料としての変形能が小さくなることが確認された。この材料試験結果に基づき、SBHS鋼の三曲面モデルのパラメータ同定を行った。次に、実構造の約1/10程度の橋脚供試体を製作し水平1方向繰り返し載荷実験を行った。供試体には、無充填橋脚とCFT橋脚を用いた。実験では、マクロ的な挙動である変位や荷重の計測に加え、柱基部のき裂発生を観察および局所的なひずみ状態を把握した。そして、実験との比較から、SBHS鋼による橋脚の解析への三曲面モデルの適用性を検討した。

研究成果の概要（英文）：As the result of the tensile tests of SBHS steel, SBHS steel has a high yield ratio and low ductility compared with normal steels. Based on the tensile tests, the parameters of Three surface model are determined. The 1-directional cyclic tests of the steel pier specimens with 1/10 scale are conducted. The hollow and CFT pier specimens are used. In addition to the displacement and reaction force, the cracks and the local strain at the bottom of the specimens are measured. The applicability of Three surface mode to the seismic analysis of the piers with SBHS steel is examined by comparing the results of the experiment.

研究分野：構造工学

キーワード：耐震構造 SBHS鋼 塑性

### 1. 研究開始当初の背景

近年、鋼橋の建設総コスト削減のため、高い強度とじん性を備え、予熱省略・低減の溶接施工性に優れた橋梁用高性能鋼材 SBHS 鋼が開発され、東京ゲートブリッジにも採用されるなど、その利用は広がりつつある。ただし、現時点では SBHS 鋼の塑性領域での力学挙動が十分に明らかとなっていないため、弾性範囲内に限定した設計がなされている。しかし、最近公表された南海トラフ巨大地震などいくつかの想定地震動は L2 設計地震動を遥かに超えるキラーパルスであり、弾性設計された SBHS 鋼による構造にも塑性化が生じる可能性が高い。このような場合にも安全性を確保するには構造系の塑性域での繰り返し挙動を把握し、局部座屈の進展や低サイクル疲労破壊の発生で急激に耐力が低下しないような設計を行うことが必要である。

一方、SBHS 鋼材はその使用範囲の拡大を目指し、鋼製橋脚などに地震時のエネルギー吸収部材として使用とすることも視野に入れて検討が進められている。エネルギー吸収部材として使用することを前提とするのであれば、鋼材の塑性域での繰り返し挙動特性の把握のみならず橋脚としての履歴挙動の特性と低サイクル疲労特性も明らかにしておく必要がある。しかしながら、SBHS 鋼を用いた構造の塑性域での挙動に関する検討は、高々、繰り返し塑性に関する材料レベルの研究にとどまっているのが現状である。

### 2. 研究の目的

SBHS 鋼は塑性域の挙動が十分に把握されていないため、現状の耐震設計では弾性範囲の使用に留まっている。ここでは、橋脚を対象に SBHS 鋼の塑性域を利用した設計の可能性を探ることと、想定を超える極大地震動が作用し塑性化が生じた場合の安全性確保の方策を提示することを目的とする。まず、SBHS 鋼で製作された鋼製橋脚や CFT 橋脚の繰り返し載荷実験を実施し塑性域での履歴特性を明らかにする。また、この実験結果を基に、SBHS 鋼材の繰り返し構成則(三曲面モデル)を導入した FE モデルの calibration を行うことで高精度の FE 解析手法を開発する。

### 3. 研究の方法

(1) 材料試験による SBHS 鋼の繰り返し塑性時の挙動把握と三曲面モデルのパラメータ同定：JIS 試験片を用いた単調引張試験を行うとともに、高精度な材料構成則である三曲面モデルのパラメータを同定する。

(2) 鋼製橋脚の繰り返し載荷実験に基づく提案手法の精度の検証と補正：地震時に塑性履歴を受ける構造物として SBHS 鋼による橋脚を取り上げ、実構造の約 1/10 程度の供試体(無充填および CFT)を製作し、一定軸力下における繰り返し変位を与えてその終局挙

動を把握する。三曲面モデルをシェルおよびソリッド要素に適用した高精度 FE モデルによる再現解析と比較することで、三曲面モデルの適用性妥当性を検討する。

### 4. 研究成果

(1) 材料試験による SBHS 鋼の材料特性の把握と三曲面モデルのパラメータの同定

SBHS500 鋼と、その比較として従来鋼の SM490Y 鋼の引張試験結果を図 1 に示す。これによると、SBHS 鋼は降伏比が大きく荷重ピーク点が比較的小さいひずみで現れる特徴がある。この特徴により、SBHS を用いた鋼製橋脚では変形能が従来鋼と比べて低下する可能性が考えられる。

また、この引張試験結果により後述の SBHS 鋼を用いた鋼製橋脚の載荷実験に基づき同定した三曲面モデルのパラメータを表 1 に示す。

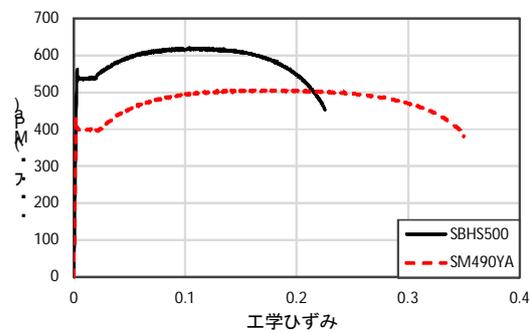


図 1 単調引張試験での応力-ひずみ関係

表 1 三曲面モデルのパラメータ

鋼種	E (GPa)	$\nu$	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)
SBHS500	204	0.3	544.3	684.2
SM490YA	207	0.3	403.1	599.6

鋼種	$f_h/\sigma_y$	$\beta$	$\rho$	$\kappa$	$\zeta$
SBHS500	0.95	1764	1.5	3.0	0.98
SM490YA	0.80	550	1.5	2.3	0.98

### (2) 鋼製橋脚の水平 1 方向繰り返し載荷試験

SBHS 鋼の塑性域を考慮した橋脚の耐震設計法はないため、ここでは現行の耐震設計法 3) を極力準用することで代用する。その概略は、バイリニア型移動硬化則 ( $E_2 = E_1 / 100$ ) を用いたファイバーモデルで設計地震動に対する弾塑性動的解析を行い、その最大応答変位  $d_{max}$  を算出し、これが許容値  $d_a$  以下であることを確認する。 $d_a$  の算定は、SBHS 鋼のように知見が不足する場合、実験でこれを規定することとなっているが、ここでは、数値解析により水平繰り返し載荷実験を模擬し、この包絡線の安定限界変位を許容値  $d_a$  とした。設計条件として上載質量を 1000ton、載荷点高さを 9m と設定して無補剛正方形断面無充填鋼製橋脚を設計し、それを縮尺比 1/10 で縮小して供試体の諸元を図 2、表 2 のよう

に決定した。また、ダイヤフラムをパネル幅  $B_0$  の 2 倍の高さに配置し、CFT 脚ではこのダイヤフラムまで普通コンクリート ( $s_{ck} = 18\text{MPa}$ ) を充填した。このため、CFT 脚での橋脚部は無充填鋼製橋脚と同一諸元であり合成効果を考慮した設計は行っていない。実験では、脚柱頂部の水平変位制御による漸増両振り繰り返し载荷を与え、基準振幅はいずれの橋脚でも公称値を用いた SM490Y 供試体の降伏水平変位  $d_0 = 4.0\text{mm}$  として、鋼脚にき裂が発生するまで振幅を増加させた。

表 2 供試体諸元

供試体名)	水平降伏変位 $d_0$ (mm)	水平降伏荷重 $H_0$ (kN)	幅厚比パラメータ $R$	軸力比 $P/P_y$
SBHS500-4V-HOL	6.99	130.5	0.735	0.046
SBHS500-4V-CFT	6.97	129.0	0.741	0.046
SM490YA-4V-HOL	4.60	130.0	0.728	0.053
SM490YA-4V-CFT	4.58	128.7	0.736	0.053

\*) HOL:無充填脚, CFT:コンクリート充填脚

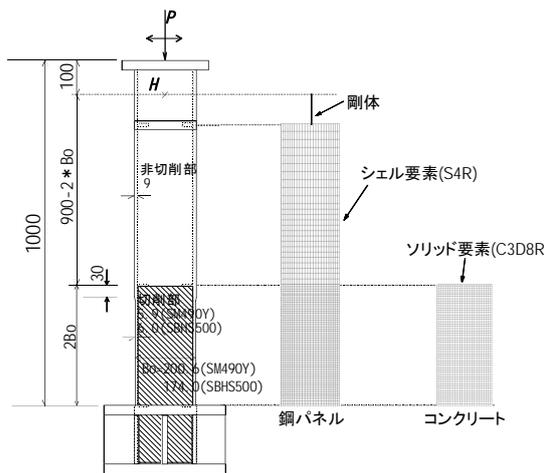


図 2 実験供試体およびモデル化

### (3) 橋脚の FE 解析

橋脚の解析には ABAQUS を使い、鋼は材料構成則に三曲面モデルを導入した厚肉シェル要素 (S4R) で表す。鋼の引張に関するパラメータは表 1 に示す値を用いる。なお、繰り返しに関するパラメータは無充填橋脚の実験結果をもとにキャリブレーションを行い同定した。充填コンクリートは 3 次元ソリッド要素 (C3D8R) を使い、構成則には損傷塑性モデルを適用し、表 3 にそのパラメータを示す。境界面は、鋼パネル-コンクリート間はコンタクトペアを用いるが、数値解析の収束性を考慮しダイヤフラム-コンクリート間は接触バネ要素、コンクリートの仮想ひび割れ面は接触バネ要素とせん断バネ要素を用いて表現する。充填コンクリートの膨張角やダイヤフラム下面と充填コンクリートとの

間隙は実験結果と比較して調整した。なお、幾何学的初期不整は十分小さいことから無視した。

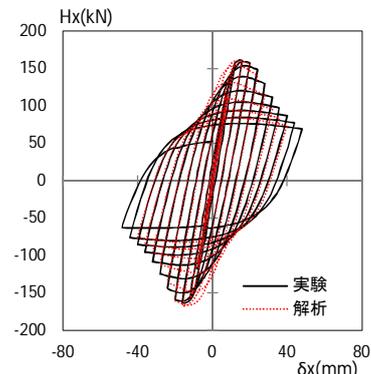
表 3 損傷塑性モデルのパラメータ

供試体	$E_c$ (GPa)	$\nu$	$f'_c$ (MPa)	$s_t$ (MPa)
SBHS500-4V-CFT	19.68	0.16	20.47	2.20
SM490YA-4V-CFT	23.69	0.17	23.42	2.49

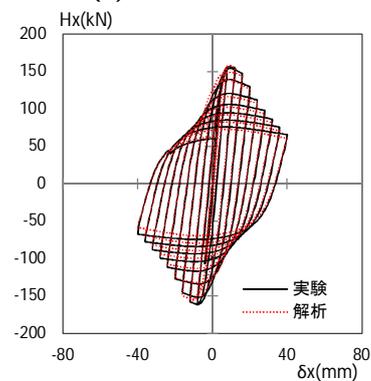
供試体	$K_c$	$s_{b0}/s_{c0}$	$e$	$\gamma$
SBHS500-4V-CFT	0.67	1.16	0.1	$10^\circ$
SM490YA-4V-CFT	0.67	1.16	0.1	$10^\circ$

### (4) FE 解析の精度検証

各供試体の実験と解析の比較として、水平荷重-水平変位関係を図 3 に示す。履歴曲線は、FE 解析の解の収束性から最大で  $10\delta_0$  まで示している。図 3(b), (d) より、SM490Y では無充填橋脚と CFT 橋脚とも解析は実験結果と概ね一致しており精度が良い。一方、図 3(a), (c) の SBHS500 では無充填橋脚と CFT 橋脚とも実験と比べ解析では荷重がやや低めに出る傾向があり SM490Y ほど再現性は高くない。精度をさらに向上するには、構成則として用いた三曲面モデルのさらなる改良が必要であり、これについては(6)にて検討を行う。

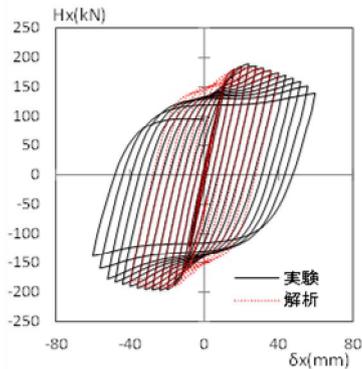


(a) SBHS500-4V-HOL

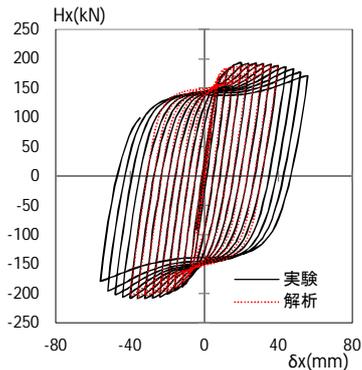


(b) SM490YA-4V-HOL

図 3 水平荷重-水平変位関係



(c) SBHS500-4V-CFT



(d) SM490YA-4V-CFT

図3 水平荷重－水平変位関係(つづき)

(5) 鋼製橋脚の挙動特性

各供試体の履歴曲線の包絡線および各橋脚の水平復元力－吸収エネルギー関係の包絡線をそれぞれ図4, 図5示す. ここで  $A_E$  は式(1)で算定した.

$$A_E = \oint H_x d\Delta_x \quad (1)$$

図5の水平復元力－吸収エネルギー関係がのこぎり状となっているのは, 正方向と負方向の水平荷重の絶対値に差があるためであり, 試験機の特性が原因であると考えられる. 無充填橋脚では, SM490Y と比べて SBHS500の方がピーク点以降の軟化が緩く変形能に優れている. これは, 各橋脚の水平降伏変位で無次元化したピーク点変位(SBHS500:  $2.29 a_0$ , SM490YA:  $2.60 a_0$ )はSBHS500の方が小さいが, 表2に示すように  $a_0$ の値が1.6倍ほど高いためと考えられる. 一方, CFT橋脚では, SBHS500よりもSM490Yの方が変形能に優れている. これは, 同一の設計基準強度の充填コンクリートを用いているために鋼材と比べてコンクリートの相対的な強度がSBHS500ではSM490Yよりも小さく, CFT化による耐震性能向上効果が小さくなったと考えられる. 鋼材の強度に比例したより高い強度のコンクリートを充填すれば, SBHS500のCFT脚の性能はより向上する可能性がある. なお, 本実験での条件下でも無充填橋脚と比べてエネルギー吸収能は3倍程度向上しており, CFT化により耐震性能が大幅に向上することは確認できた.

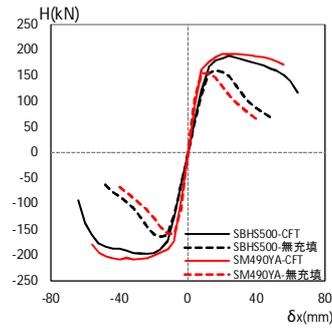


図4 水平荷重－水平変位関係包絡線

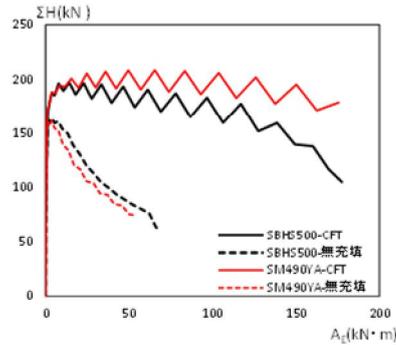


図5 水平復元力－吸収エネルギー関係

(6) SBHS鋼の材料構成則の改善

図4に示したように, 従来の三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. これはピーク応力に到達時の塑性ひずみの小さいSBHS500鋼では, 三曲面モデルにおいてピーク近傍の硬化係数を過小評価することに起因すると考えられる. そこで, 相当塑性ひずみがある一定値を超えたときに三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三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ものとする. 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図6の関係を用いる. また, 有効相当塑性ひずみが4%に到達した段階で3曲面モデルから限界曲面拡大型モデルに移行するものとし, 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7に示すが, ここで提案する限界曲面拡大型三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.

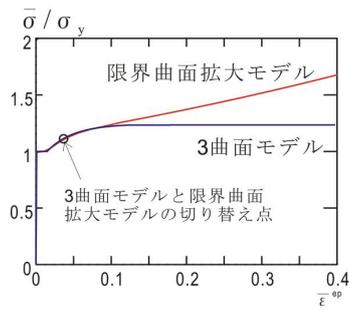
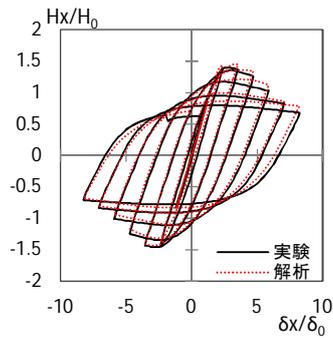
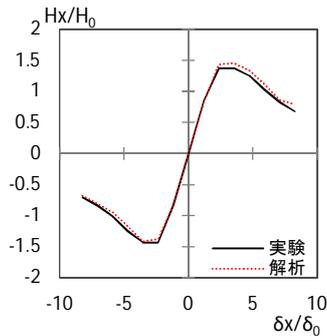


図6 限界曲面拡大モデル



(a) 荷重—変位関係



(b) 包絡線

図7 限界曲面拡大大型三曲面モデルによる解析結果

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計2件)

- ① 藤原史, 後藤芳顕, 海老澤健正, 川西直樹, 増田賢人, SBHS500 を用いた無充填鋼製橋脚と CFT 橋脚の塑性域での履歴特性と FE 解析, 土木学会第 71 回年次学術講演会, 2016.
- ② 藤原史, 川西直樹, 後藤芳顕, 海老澤健正, SBHS500 材による正方形断面鋼製柱の繰り返し載荷試験の FE 解析とその改善提案, 土木学会第 72 回年次学術講演会, 2017.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

海老澤 健正 (EBISAWA, Takemasa)  
 名古屋工業大学・工学研究科・助教  
 研究者番号：90332709