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

名古屋工業大学大学院　学生員　○藤原　史
名古屋工業大学　フェロー会員　後藤　芳顯　　名古屋工業大学　正会員　海老澤健正
豊田工業高等専門学校　正会員　川西　直樹　　いであ株式会社　正会員　増田　賢人

1. 背景・目的：近年開発された SBHS 鋼は従来鋼に比べ高降伏強度を有し，鋼材単価は従来鋼に比して高価であるものの単純な強度あたりのコストは従来鋼より優れている [1]．しかし，SBHS 鋼を用いた構造部材の塑性域での挙動は十分明らかにされておらず，鋼製橋脚などの耐震設計におけるエネルギー吸収部材には適用できていないのが現状である．著者らの SBHS 鋼材(SBHS500, SBHS700)の塑性域での繰り返しを含む材料特性についての検討 [2]では，**図 1** に示すように 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．そのため SBHS を用いた鋼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．本研究では，SBHS500 鋼の無充填脚と CFT 脚の縮小供試体に対して水平 1 方向繰り返し載荷実験を行い，従来鋼 SM490Y を用いた橋脚による実験結果と比較することで SBHS500 材を鋼脚に用いた場合の耐震性能について検討を行う．さらに，実験結果に基づき，SBHS 鋼を用いたエネルギー吸収部材としての設計法を確立する上で必須となるシェル要素を用いた高精度 FE 解析についても検討する．

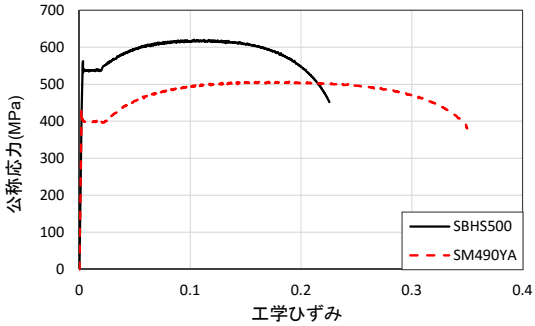


図 1　単調引張試験での応力－ひずみ関係

2.供試体の設計と実験の方法：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 δ_{max} を算出し，これが許容値 δ_a 以下であることを確認する．δ_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，文献 2)の精緻な数値解析により水平繰り返し載荷実験を模擬し，この包絡線のピーク点を安定限界としその時の変位を許容値 δ_a とした．設計条件として上載質量を 1000ton，載荷点高さを 10m と設定して無補剛正方形断面無充填鋼脚を設計し，それを縮尺比 1/10 で縮小して供試体の諸元を**図 2**，**表 1** のように決定した．また，ダイヤフラムをパネル幅 B 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(σ_{ck} =18MPa)を充填した．このため，CFT 脚での鋼脚部は無充填鋼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載荷を与え，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 δ_1 =4.0mm として，鋼脚にき裂が発生するまで振幅を増加させた．

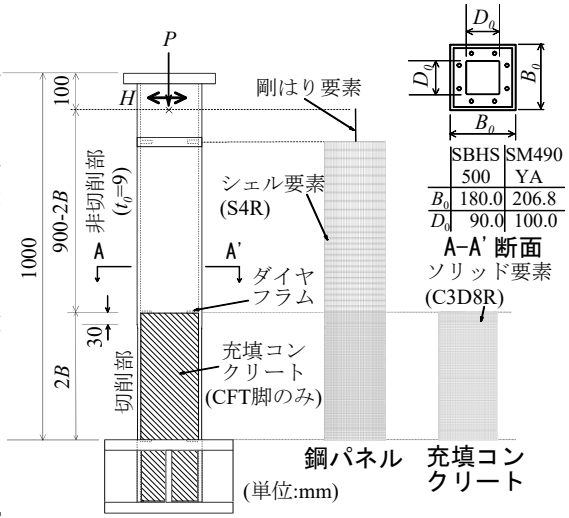


図 2　実験供試体およびモデル化

表 1　供試体諸元

供試体名	鋼脚切削部		充填コンクリート		水平降伏変位 δ_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
	板厚 t (mm)	幅 B (mm)	高さ (mm)	断面積 (mm²)				
SBHS500-無充填	5.98	174.40	-	-	6.99	130.5	0.735	0.046
SBHS500-CFT	5.89	174.60	348.0	2.65×10^5	6.97	129.0	0.741	0.046
SM490YA-無充填	6.02	200.99	-	-	4.60	130.0	0.728	0.053
SM490YA-CFT	5.95	201.09	401.2	3.58×10^5	4.58	128.7	0.736	0.053

表 2　三曲面モデルのパラメータ

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	0.95	1764	1.5	3.0	0.98
SM490YA	207	0.3	403.1	599.6	0.80	550	1.5	2.3	0.98

表 3　損傷塑性モデルのパラメータ

供試体	E_c (GPa)	ν	f'_c (MPa)	σ_t (MPa)	K_c	σ_{b0}/σ_{c0}	e	ψ
SBHS500-CFT	19.68	0.16	20.47	2.20	0.67	1.16	0.1	10°
SM490YA-CFT	23.69	0.17	23.42	2.49	0.67	1.16	0.1	10°

3. 橋脚の FE 解析：橋脚の解析には ABAQUS を用い，鋼は材料構成則に三曲面モデル [4]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**図 1** に示す一軸引張試験結果から定め，繰り返しに関するパラメー

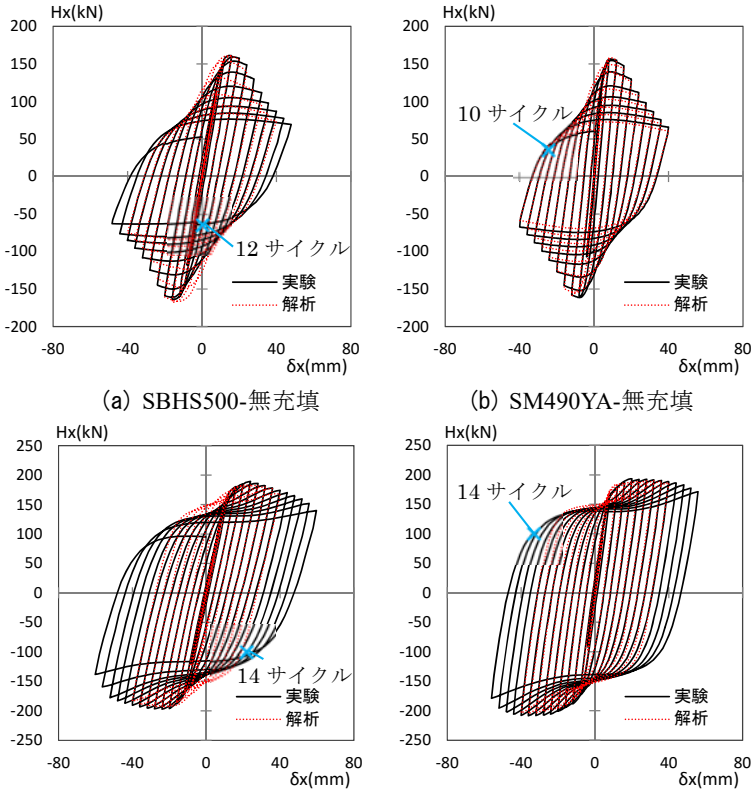
キーワード　SBHS500　コンクリート充填鋼製橋脚，　FE 解析
連絡先　〒466-8555　愛知県名古屋市昭和区御器所町　名古屋工業大学　TEL052-735-5021　FAX052-735-5563

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**表 2** のように同定した．充填コンクリートは 3 次元ソリッド要素(C3D8R)を用い，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，鋼パネルー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ー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[5]．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．

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，水平荷重ー水平変位関係を**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．図中の×印とサイクル数はき裂発生点を示す．**図 3**(b),(d) より，SM490Y では無充填脚と CFT 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 では無充填脚と CFT 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改良が必要である．

5. 脚柱の挙動特性：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ー吸収エネルギーA_E関係の包絡線をそれぞれ**図 4**，**図 5** 示す．A_Eは式(1)で算定した．

$$A_E = \int H_x d\delta_x \qquad (1)$$



(a) SBHS500-無充填　(b) SM490YA-無充填

(c) SBHS500-CFT　(d) SM490YA-CFT

図 3　水平荷重ー水平変位関係

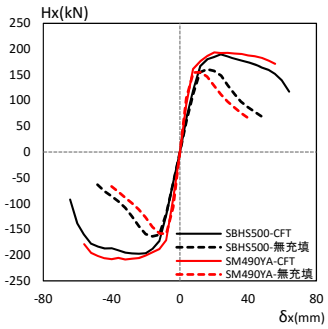


図 4 水平荷重ー水平変位関係包絡線

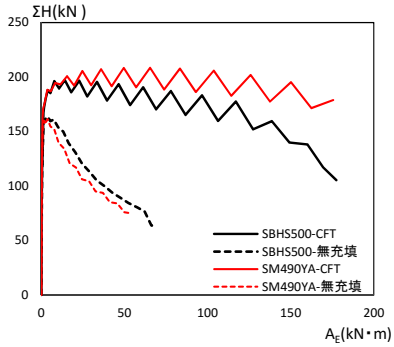


図 5 水平荷重ー吸収エネルギー関係

図 5 の水平復元力ー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る．**図 4** より無充填脚では，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，**表 1** に示すように SBHS500 による橋脚では断面寸法が小さく曲げ剛性が低くなることと，降伏強度が高いことによると考えられる．これは，δ_0の値が SM490Y 橋脚の 1.6 倍ほど大きくなっていることからもわかる．一方，CFT 化で SBHS500 の橋脚は無充填の場合と比べてエネルギー吸収能は 3 倍程度向上するものの，充填コンクリートの断面が SM490Y の橋脚に較べ小さいためその効果は SM490Y と比べると小さい．これは，充填コンクリートに同一の設計基準強度の材料を用いているため，断面積が 26%小さい SBHS500 の橋脚では SM490Y よりも充填コンクリートの効果が小さくなったと考えられる．

6. まとめと課題：SBHS500 鋼の塑性域を考慮して耐震設計された無充填脚とこれにコンクリートを充填した CFT 脚の耐震性能を実験および数値解析により検討した．その結果，FE 解析による鋼製橋脚の履歴挙動の再現精度は，SBHS500 では従来鋼の SM490Y に比べてやや劣っており，今後 SBHS 鋼に対する三曲面モデルの改良が必要であることが分かった．また，無充填橋脚では SM490Y に比べ断面の小さい SBHS500 の橋脚の方が耐震性能に優れる．一方，CFT 化で SBHS500 の橋脚は無充填脚と比べて耐震性能は大きく向上するものの，充填コンクリートの断面が SM490Y の橋脚に較べ小さいためその効果は SM490Y と比べると小さい．

参考文献： 1) 新しい高性能鋼材の利用技術調査研究小委員会：新しい高性能鋼材の利用技術調査研究報告書, 2009.　2) 中村ら：，土木学会全国大会第 67 回年次学術講演会，I-45, 2012.　3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2014.　4) 後藤ら：土木学会論文集，No.780/I-70，pp.181-198，2005.　5) 後藤ら：土木学会論文集 A，Vol.66，No.4，pp.816-835，2010.