第　1　回　定　期　研　究　会

平成27年度SGST第1回定期研究会　議事録

日時：平成27年 4月16日　16:00～17:30
場所：名城大学　天白キャンパス　研究実験棟Ⅱ　多目的室
出席者：青嶌，中本，原田(中部復建)，天野，家田，伊藤，上田，岡本，鎌田，櫻井，酒井，高地，種岡，所，菱川，松原，松村(瀧上)，安藤(日本工営)，安藤(ー)，伊藤，北根，舘石，判治，廣畑(名大)，入山，加藤(中日本C)，岩本，海老澤(名工大)，岡本(パシコン)，加藤，野田(中日本H)，川瀬(日中)，木下(岐阜大)，近藤，渡辺(名城大)，坂井田，柴田(大日C)，杉山(日本ピーエス)，高橋(中部地整)，谷川(コベルコ)，陳(サンワ構造)，土橋(横河)，永富(八千代)，長谷川(セントラルC)，長谷部(長谷部)，藤井，渕上(パルステック)，萬谷(川田)，水谷(JFE)，三輪，山田(忠)，山田(尚)(日車)

以上　52名(敬称略)

１．定期研究会（16：00～17：30）
講演者：名古屋工業大学大学院　都市社会工学科　助教授　海老澤　健正委員
講演項目：【橋梁用高性能鋼材SBHS鋼のための繰り返し材料構成則の構築と
鋼製橋脚への適用性の検討】

講演内容
講演【橋梁用高性能鋼材SBHS鋼のための繰り返し材料構成則の構築と
鋼製橋脚への適用性の検討】：

橋梁用の新しい高性能鋼材であるSBHS鋼(Steels for Bridge High Performance Structure)においては，JISによる規格化や設計ガイドラインの整備が着実に進んでいるものの，既往の検討事例では，弾性設計による検討でとどまっているものがほとんどである．そのため，耐震設計においは部材の塑性化を許容することで，従来の弾性設計に較べてより合理的な設計に発展できる可能性があることを説明された。

今回は，繰り返し材料試験に基づきSBHS鋼の塑性領域での繰り返し特性を再現する材料構成則を構築し，高精度の複合非線形解析によりBHS鋼を用いた鋼製橋脚の耐震性能を評価した研究について紹介をされた．本講演では，発表時間を短くし，質疑応答の時間を長くとり，多くの議論が行われた．

以上

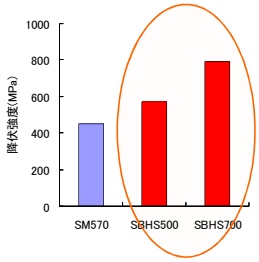
SGST 定期研究会

橋梁用高性能鋼材SBHS鋼のための繰り返し材料構成則の構築と鋼製橋脚への適用性の検討

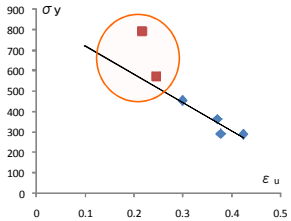
名古屋工業大学　都市社会工学科
海老澤　健正

SBHS鋼(Steels for Bridge High Performance Structure)　の特徴

高い降伏強度



優れたじん性・加工性



SBHS鋼の適用事例

- JIS規格化，ガイドラインの整備
- 東京ゲートブリッジなど施工実績も増加

現行設計での課題

塑性域での挙動が明らかでなく，現状は弾性設計
(H24道路橋示方書では，レベル2地震動に対してSM570では弾性設計)

耐震設計では，塑性化を許容することで，より合理的な設計に発展できる可能性

研究の目的

- SBHS鋼の高精度繰り返し材料構成則の開発と材料パラメータの同定
  （三曲面モデルにもとづく）
- SBHS鋼橋脚の終局挙動予測
- FEM解析を用いたSBHS鋼橋脚の試設計

SBHS鋼の高精度繰り返し材料構成則の開発

対象鋼種

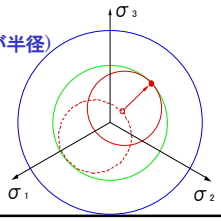
SS400:一般構造用圧延鋼材
SM490B，SM570TMC:溶接構造用圧延鋼材
SBHS500，SBHS700:橋梁用高性能鋼材

各鋼材機械的性質

	降伏点(MPa)	引張強さ(MPa)	伸び(%)
SS400	235～	400～510	21～
SM490B	315～	490～610	21～
SM570TMC	450～	570～720	26～
SBHS500	500～	570～720	26～
SBHS700	700～	780～930	24～

三曲面モデル

- 降伏曲面：拡大・縮小・移動
- 不連続曲面：それまでに受けた最大の相当応力を半径に等方的に拡大
- 境界曲面：不変
（材料の発揮する最大相当応力が半径）



三曲面モデルに含まれる材料パラメータ

- 単調引張挙動
  ヤング率E，降伏応力σ_y，
  最大応力σ_u，降伏棚長さε^0_{yp}
  ひずみ硬化域での挙動を表す指数ξ

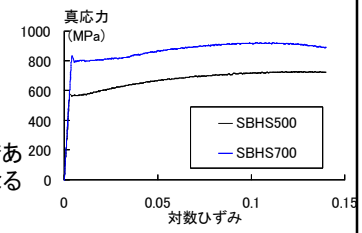
→ 一般的な単調引張試験で容易に同定可能

- 繰り返し履歴挙動
  弾性域の縮小拡大を表す定数
  f_b，β，ρ
  不連続曲面での硬化係数比κ
  不連続境面半径の最大値β_{dc}

→ 材料パラメータを提示する必要性

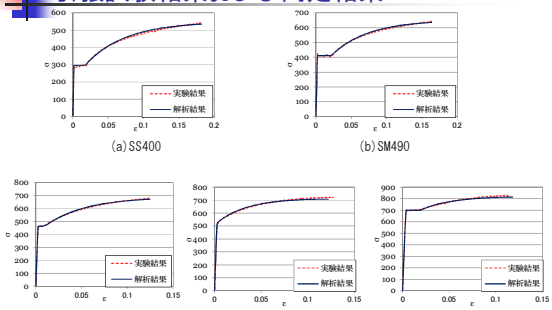
単調引張試験　結果

- 高い降伏強度
- 降伏比が大きい
- 降伏棚を有する
  - ひずみ1～2%であり極端に小さくなる傾向はない



真応力－対数ひずみ関係

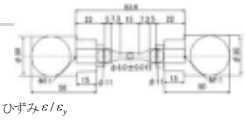
引張試験結果および同定結果



(a) SS400　(b) SM490　(c) SM570　(d) SBHS500　(d) SBHS700

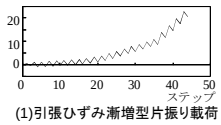
一軸繰り返し載荷試験

試験片
圧縮時に座屈が生じないよう平行部を短くした試験片



載荷パターン
(1)引張ひずみ漸増型片振り載荷

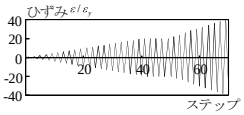
有効相当塑性ひずみを少しずつ増加
→降伏棚消失前の挙動を把握



(1)引張ひずみ漸増型片振り載荷

(2)圧縮および引張の両振り載荷

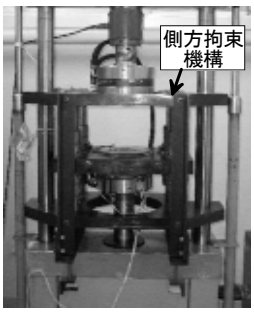
大きな有効相当塑性ひずみを蓄積
→降伏棚消失後の挙動を把握



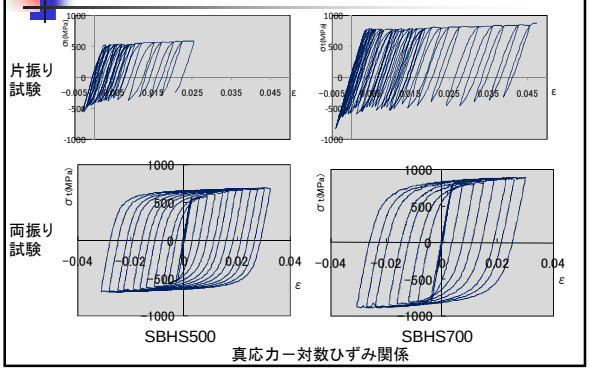
(2)圧縮および引張の両振り載荷

試験装置

- MTS社製一軸万能試験装置
  - 側方拘束機構を油圧グリップに取り付け試験片の座屈を抑制
- 伸び計によるひずみにより制御



実験結果　繰り返し載荷試験

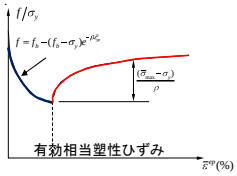


繰り返し挙動を表す材料パラメータの同定手法（弾性域同定法）

・繰り返し履歴挙動
弾性域の縮小拡大
一軸繰り返し載荷の材料試験から
オフセット法により有効相当塑性ひずみー降伏曲面半径の関係を同定

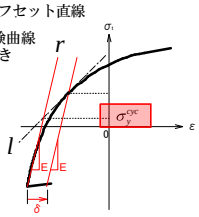
不連続曲面での硬化係数比κ
材料試験とのキャリブレーションから同定

不連続境面半径の最大値β_{dc}
境界曲面まで拡大すると仮定



弾性域の同定方法（オフセット法）

r :オフセット直線
l:実験曲線の傾き



δ :オフセット量
(0.03%)

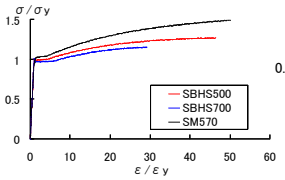
$$f=(\sigma_{max}+\sigma_y^{cyc})/2$$
$$f=(\sigma_{max}-\sigma_y^{cyc})/2$$

σ_{max}　:それまで真応力の絶対値
σ_y^{cyc}　:継続降伏応力

オフセット法

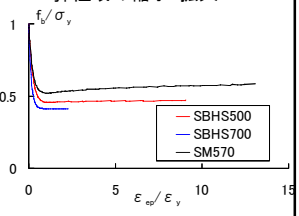
従来鋼(SM570)との比較

応力ーひずみ関係



降伏比が大きい

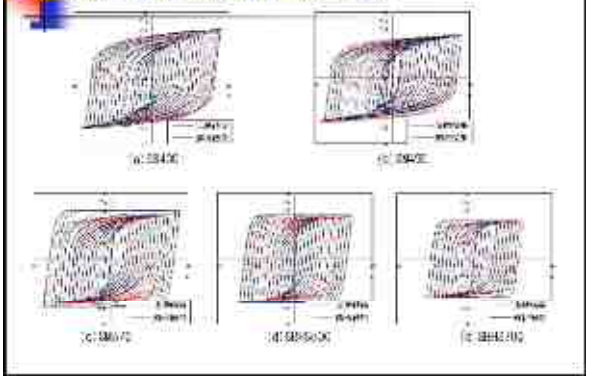
塑性化に伴う
弾性域の縮小・拡大



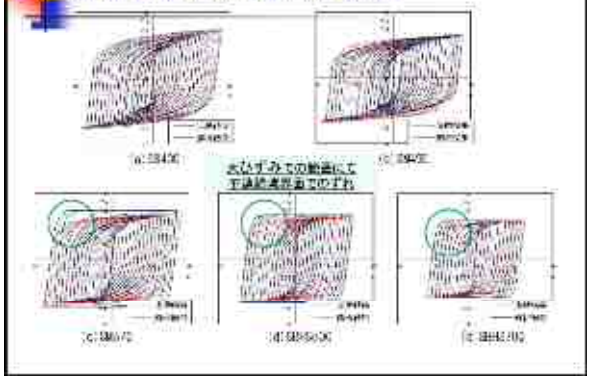
弾性域の縮小が顕著

塑性域での強度上昇や変形能が
従来鋼に比べ相対的に小さくなる懸念

同定結果：1軸両振り繰り返し

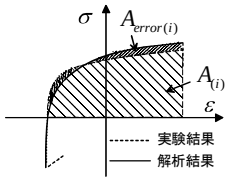


同定結果：1軸両振り繰り返し



パラメータ同定方法の改良

最適化手法 一軸繰り返し載荷の材料試験から得られる応力－ひずみ関係との誤差を最小化



$A_{(i)}$:実験結果の塑性ひずみ－真応力による面積
$A_{error(i)}$:実験結果と解析結果とで囲まれる面積

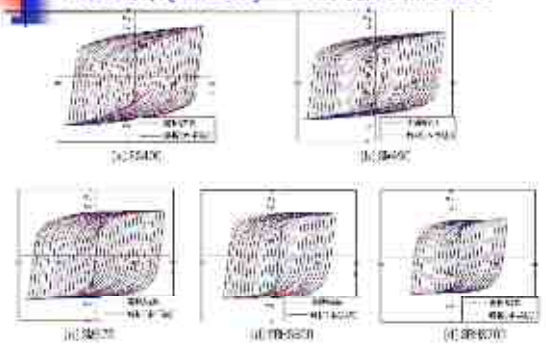
$$A_{ratio(i)} = A_{error(i)} / A_{(i)}$$

$$A_{ratio}^{ave} = \sum_i A_{ratio(i)} / N$$

平均誤差面積比が最小となる最適なパラメータを探索

対象パラメータ
f_b, β, ρ, ξ, κ, β_{dc}

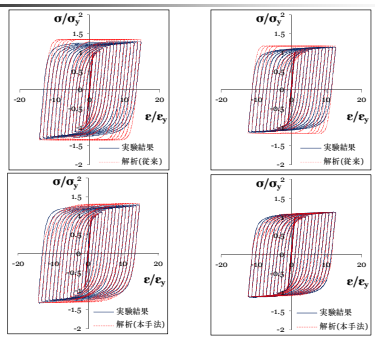
同定結果(最適化) 1軸両振り繰り返し



同定結果の比較

改良前（弾性域同定法）

改良後（最適化手法）

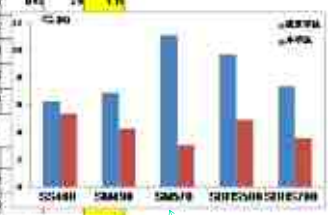


(a)SBHS500　(b)SBHS700

同定精度（平均誤差面積比）

(a)本手法

(b)従来手法



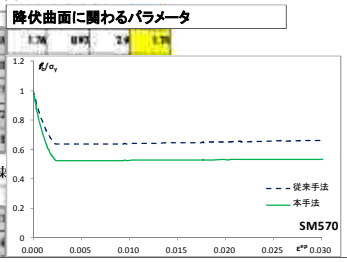
誤差面積比の低減

同定方法改良による影響：降伏曲面

(a)本手法

降伏曲面に関わるパラメータ

(b)従来



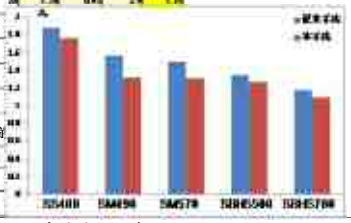
・降伏曲面に関わるパラメータ　[f_b, β, ρ]
　f_bが小さく，ρが大きい
　→従来法と較べ降伏曲面は小さく評価される

同定方法改良による影響：不連続曲面

(a)本手法

不連続曲面に関わるパラメータ

(b)従



・境界曲面に関わるパラメータ　[β_{dc}]
　β_{dc}が最大値よりも小さい
　→不連続曲面は境界曲面まで到達しない

SBHS鋼の高精度繰り返し材料構成則のまとめ

三曲面モデルのパラメータ同定手法を改良し，種々の鋼材に対して材料パラメータを同定

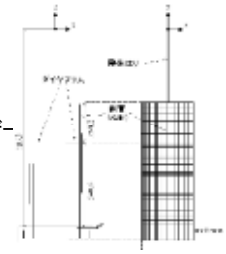
1. 従来法では精度がやや劣る高性能鋼についても精度のよい再現が可能
2. 弾性域の大きさ，不連続曲面半径の最大値については従来鋼材よりも小さい

塑性域での強度上昇や変形能が
従来鋼に比べ相対的に小さくなる懸念

SBHS鋼を用いた鋼製橋脚の終局挙動解析

SBHS鋼を用いた鋼製橋脚の終局挙動解析

- 解析対象
  - 円形断面鋼製供試体模型(相似比1/8)
- モデル化
  - 橋脚部：シェル要素
  - 載荷装置部：剛体はり要素
- 材料構成則
  - 三曲面モデルをABAQUSのユーザーサブルーチンとして組み込み
  - 材料試験でのパラメータを使用
- 載荷方法
  - 漸増型一軸繰り返し載荷



検討モデル

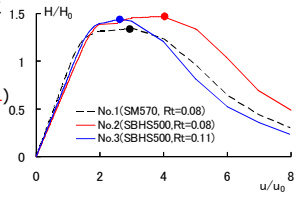
- 橋脚高さ，上部工質量を一定
- 震度法設計により直径および板厚を決定

No.1： 従来鋼SM570による橋脚・Rt=0.08
No.2： SBHS500による橋脚・Rt=0.08
鋼材使用量はNo.1とほぼ同等
No.3： SBHS500による橋脚・Rt>0.08を許容し，Rt=0.11
鋼材使用量はNo.1の約90%

No.	鋼種	Rt	直径 (mm)	板厚(mm)	鋼材使用量比	価格
1	SM570	0.08	338.0	7.62	1.00	1.00
2	SBHS500	0.08	294.8	8.86	1.01	1.11
3	SBHS500	0.11	326.3	7.13	0.90	0.99

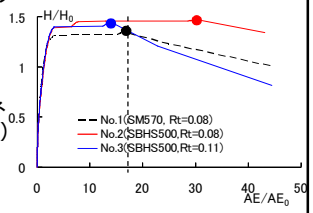
解析結果： 水平荷重ー水平変位包絡線

- No.2橋脚(SBHS500，Rt=0.08)
  SM570橋脚(No.1)と較べて
  最大荷重・最大荷重時変位
  ともに向上
- No.3橋脚(SBHS500，Rt=0.11)
  - 最大荷重は向上
  - 変形能が若干低下



解析結果： 水平荷重ー吸収エネルギ

- No.2橋脚(SBHS500，Rt=0.08)
  - 最大荷重点までの吸収エネルギはNo.1橋脚(SM570)の約2倍
- NO.3橋脚(SBHS500，Rt=0.11)
  - 最大荷重点までの吸収エネルギーはNo.1橋脚(SM570)に比べ約10%減



効率的なSBHS鋼の利用

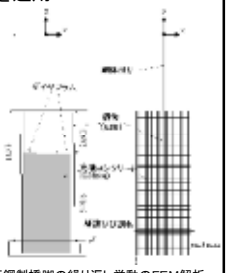
- Rtの制限をはずし，鋼材使用量をより低減させた場合
  従来鋼(SM570)と較べ
  - 耐力の確保は比較的容易
  - 変形能の低下が懸念

- 変形能の向上のための対策が必要
  - コンクリート充填

コンクリート充填効果の検討

- 解析モデル
  - 従来鋼の実験供試体[1)]にSBHS500を適用

	要素	材料構成則
鋼管	シェル要素	3曲面モデル
充填コンクリート	3次元ソリッド要素 コンタクトペア(離散ひび割れモデル)	損傷塑性モデル クーロン摩擦
鋼管-コンクリート コンクリート-コンクリート境界	コンタクトペア	クーロン摩擦



1) 後藤ら： 充填コンクリートとの相互作用を考慮した円形断面鋼製橋脚の繰り返し挙動のFEM解析，土木学会論文集，2009

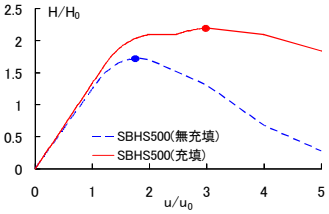
コンクリート充填効果： 解析結果

- 水平荷重－水平変位関係
  一軸繰り返し載荷での包絡線

•最大荷重時変位が約2倍に向上

•最大荷重後の耐力低下も減少

変形能の向上が可能



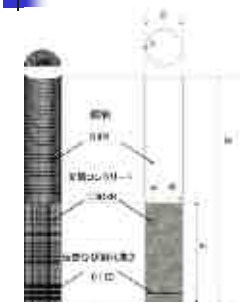
SBHS鋼を用いた鋼製橋脚の終局挙動解析のまとめ

- SBHS鋼を使用した鋼構造の耐震性能評価のためのFEM解析ツールの開発

- SBHS鋼橋脚の終局挙動予測
  - 鋼材使用量を約10%低減しても従来鋼に比べ高い耐力
  - 鋼材使用量のさらなる低減には変形能の低下が懸念される．内部にコンクリートを充填する対策が有効．

FEM解析を用いたSBHS鋼橋脚の試設計

レベル2地震動に対する設計 ーモデル，設計条件ー



解析モデル　　界面：接触ばね，せん断ばね

設計に関する条件

鋼種	SM490YB SBHS500
設計条件	モデル高さ H=12(m) 集中質量 M=1.08E+6(kg)
設計変数	断面積 A [D,t](m^2)
制約条件	SM490B ：R/t ≥15 , R/at ≤ 35 SBHS500 : R/t ≥7 , R/at ≤25
目的関数	断面積 A→min

レベル2地震動に対する設計
―安定基準―

安定基準

仕事の2次増分　$2\Delta^2 W = \Delta F_x \Delta u_x$

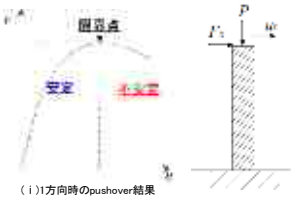
変位成分　(u_x)

復元力成分　(F_x)

$\Delta^2 W > 0$　:安定

$\Delta^2 W = 0$　:臨界

$\Delta^2 W < 0$　:不安定



（ｉ）1方向時のpushover結果

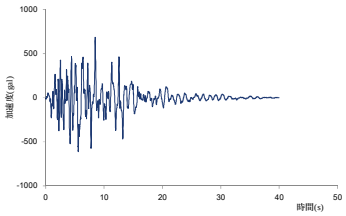
（ii）橋脚頂部の変位及び復元力

最適断面

道路橋示方書の限界状態と整合
安定状態を満たす最小断面.

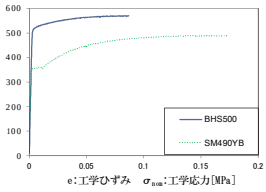
レベル2地震動に対する設計
―入力地震動―

道路橋示方書II-II-1波形を使用



加速度波形Ⅱ－Ⅱ－1

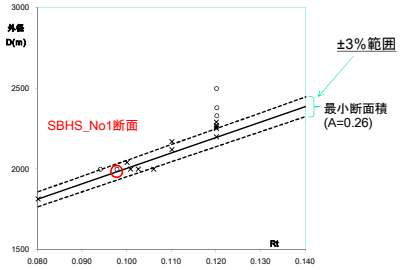
レベル2地震動に対する設計
―材料構成則―



JIS規格に基づいた引張試験データ

引張材料定数　→ 実験データをJIS規格最低限満たすように変更
繰り返し材料定数 → 修正された材料パラメータ

最適設計での断面探索範囲



断面諸元
―最適断面―

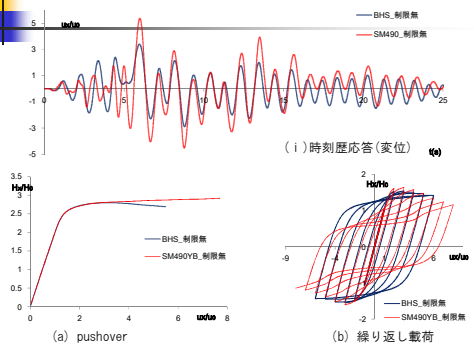
コスト考慮するとSBHS鋼が大きい

モデル名	鋼種	D(mm)	t(mm)	A(m²)	Rt	軸力比α	R/t	T(s)	A*コスト比
SBHS_制限無	SBHS500	2000	42.30	0.260	0.10	0.081	23.6	1.02	0.390
SM490YB_制限無	SM490YB	2700	33.27	0.279	0.12	0.107	40.6	0.73	0.279

コスト比　SBHS500：SM490B　=　1.5: 1.0

Rtは鋼材によって異なる

力学特性―最適断面―



（ｉ）時刻歴応答（変位）

（a）pushover

（b）繰り返し載荷

（ii）水平荷重-水平変位関係

SBHS鋼の特性を発揮する断面の検討

これまでの検討から，

SBHS鋼は，従来鋼に較べ変形能に劣る
R_tを小さくし板厚を確保する必要がある

外径に制限を設けた場合に，
SBHS鋼の特性を生かした断面となりうる

断面諸元　—制限(D=2.0m)断面—

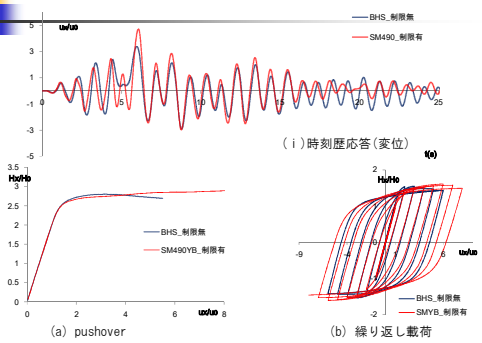
コスト考慮するとほぼ同程度

モデル名	鋼種	D(mm)	t(mm)	A(m^2)	R_t	軸力比α	R/t	T(s)	A*コスト比
SBHS_制限有	SBHS500	2000	42.30	0.260	0.10	0.081	23.6	1.02	0.390
SM490YB_制限有	SM490YB	2000	63.0	0.383	0.05	0.078	15.9	0.86	0.383

コスト比　SBHS500：SM490B　=　1.5: 1.0

従来鋼は板厚，鋼重が大きい

力学特性—最適断面—



（ｉ）時刻歴応答（変位）

(a) pushover　(b) 繰り返し載荷

（ii）水平荷重-水平変位関係

FEM解析を用いたSBHS鋼橋脚の試設計のまとめ

- 断面積は低減可能，鋼材コスト考慮では不利
- 従来鋼より，SBHS鋼の変形能に劣る
- 直径に制限が発生する時，SBHS鋼適用のメリット

まとめ

- SBHS鋼の繰り返し材料構成則の開発
  - 繰り返し挙動を高精度に再現する材料パラメータを同定
- SBHS鋼橋脚の終局挙動予測および試設計
  - 変形能の低下が懸念される．内部にコンクリートを充填する対策が有効．
  - 実大橋脚の試設計ではSM570と比べ，重量比で3割程度の低減が可能．