

構造性能研究部会報告

次ステップの構造性能評価技術の開発

第28回土木鋼構造シンポジウム

2025年3月3日

埼玉大学 奥井義昭

構造性能研究部会（Ⅱ期）

活動期間：2020-2024年度

委員会メンバー

主査

奥井義昭 埼玉大学

副主査

春日井俊博 日本橋梁建設協会

幹事長

宮下 剛 名古屋工業大学

連絡幹事

栗原康行 日本鉄鋼連盟

幹事

小室雅人 室蘭工業大学

岸 祐介 東京都立大学

田村 洋 横浜国立大学

野阪克義

長山智則

宮寄靖大

委員

浅井貴幸

飯嶋 淳

牧山大祐

斉藤雅充

高木優任

田中賢太

日野昭二

松下政弘

立命館大学

東京大学

大同大学

東日本高速道路

JIPテクノサイエンス

首都高速道路

大林組

日本鉄鋼連盟

長大

建設コンサルタンツ協会

日本鉄鋼連盟

オブザーバー

小野健太 土木研究所

研究項目

- (1) 不完全合成桁の曲げ耐力
- (2) 合成桁適用拡大に向けての検討
- (3) 鋼橋上部工に用いられるH形断面部材の圧縮強度評価法
- (4) 耐震WG報告

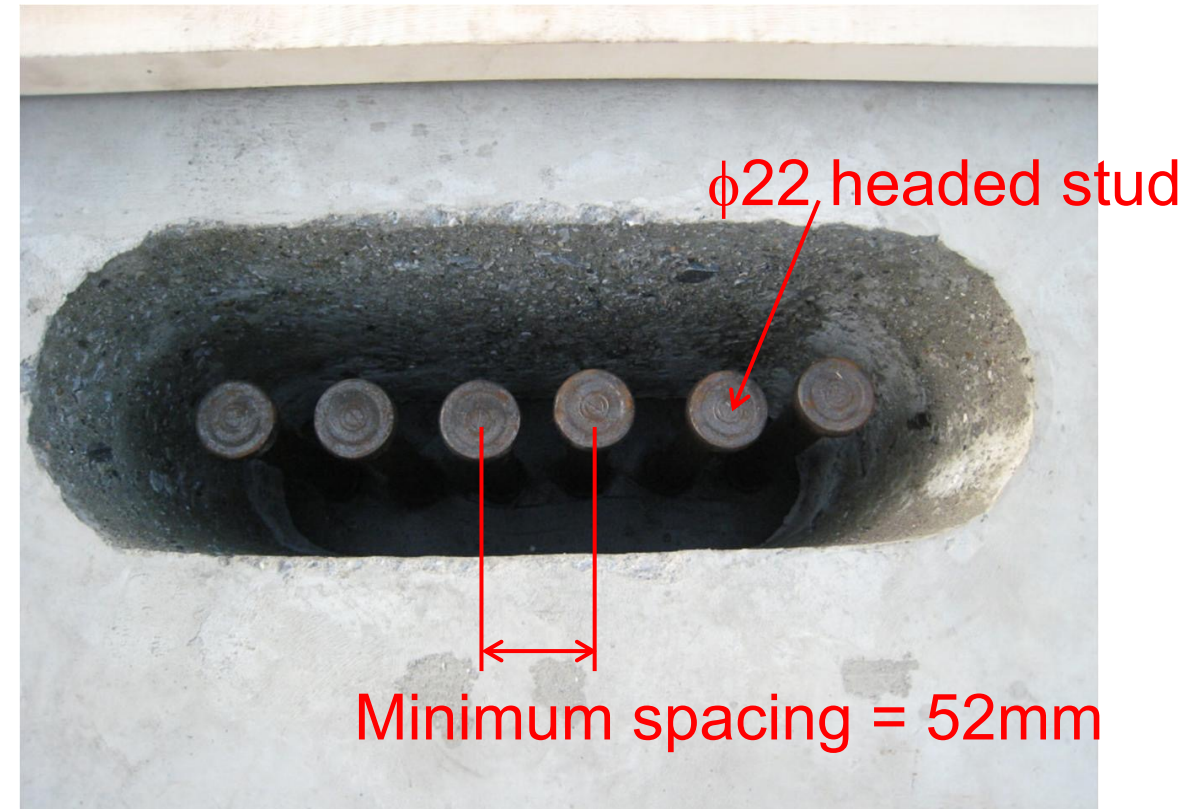
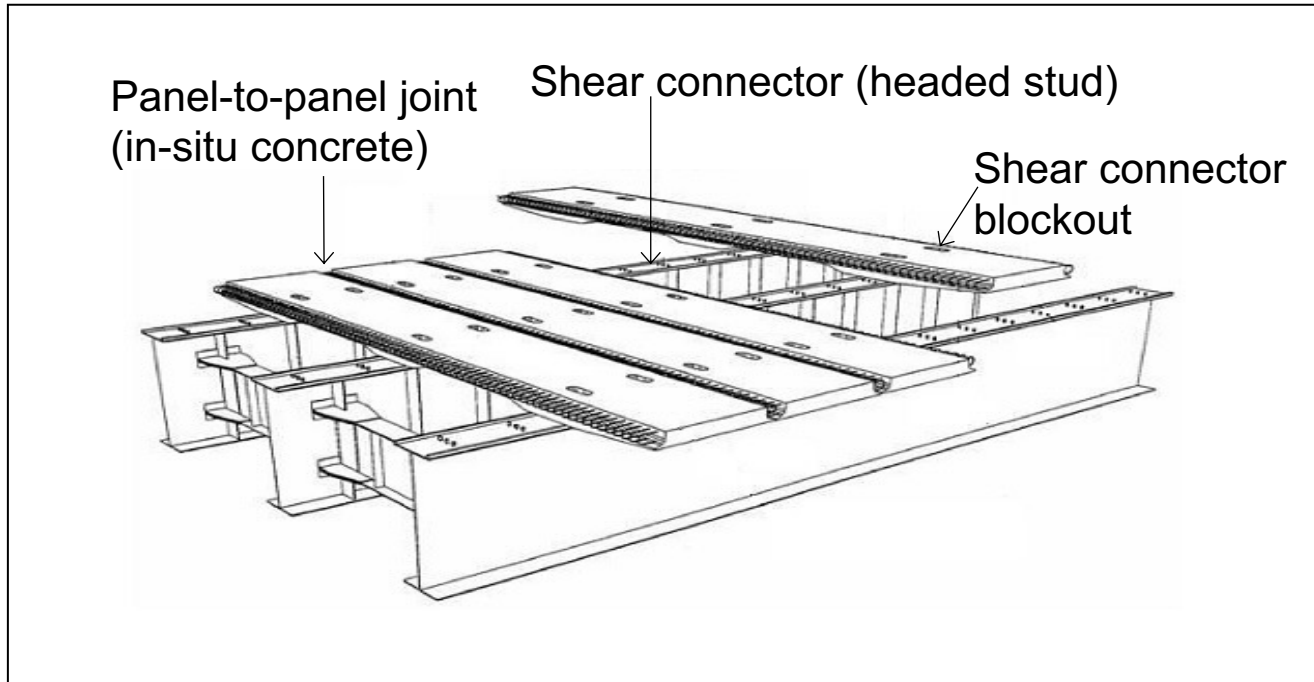
赤字：本日の発表項目

不完全合成桁の曲げ耐力の検討

埼玉大学 奥井

研究背景

- 床版取替におけるPCa床版の採用→不完全合成桁



非合成桁の床版取替



スタッド 2 本/スロット

EurocodeにおけるPartial Shear Connection

EC建築基準

仮定：

- 合成断面=コンパクト断面
- 鋼断面 =コンパクト断面

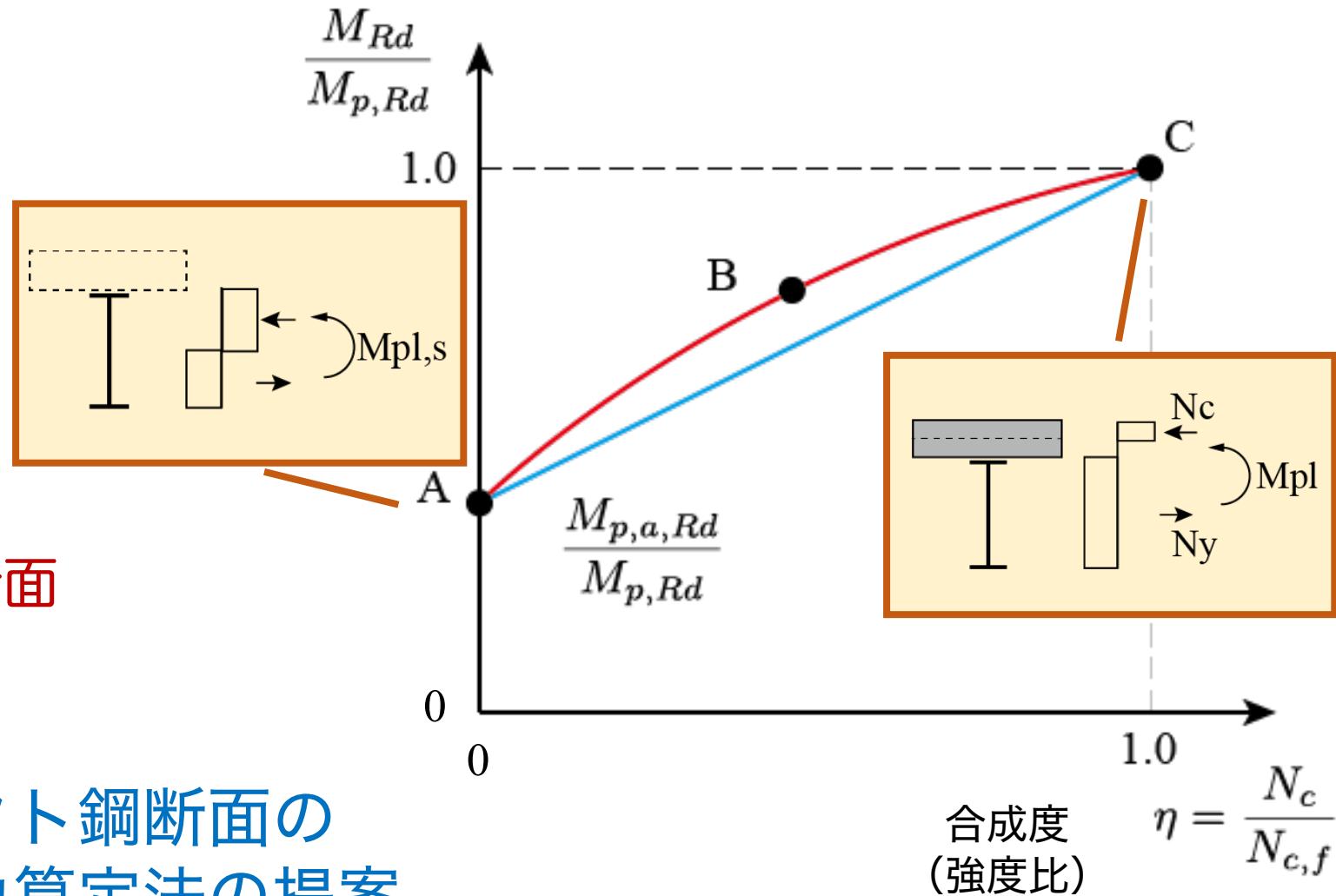
橋梁

合成断面=コンパクト断面

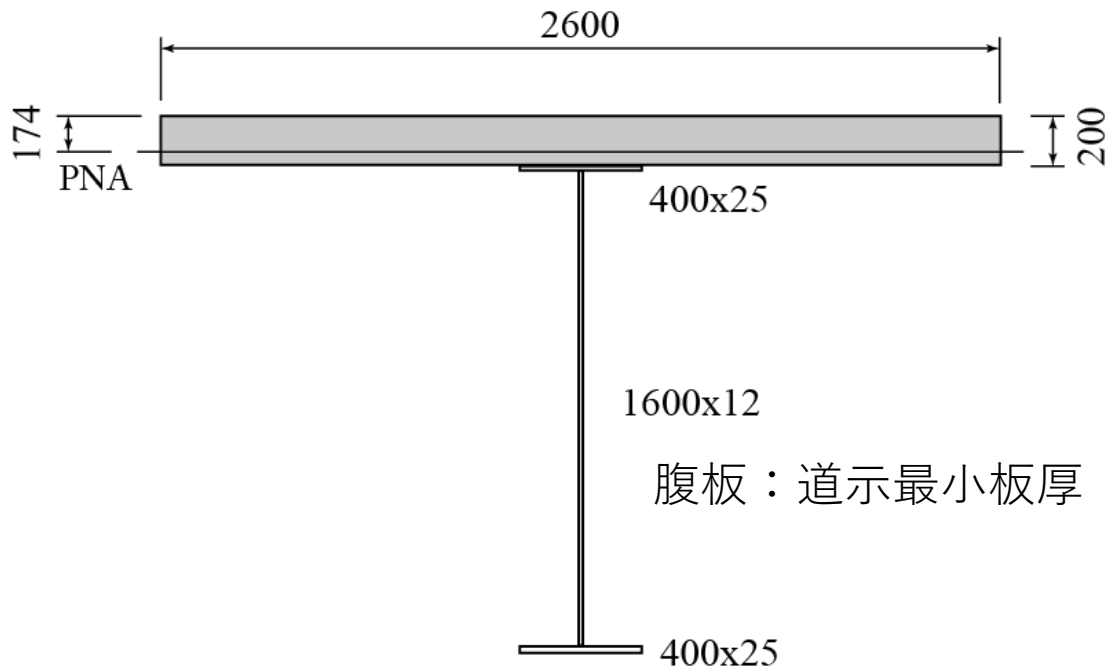
鋼断面 =ノンコンパクト断面

この場合の設計法？

研究目的：ノンコンパクト鋼断面の
不完全合成桁の曲げ耐力算定法の提案

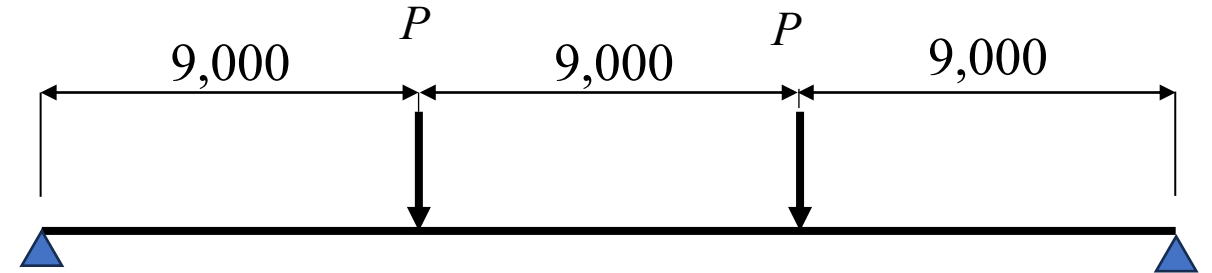


パラメトリックスタディ



基準モデル

上記の断面以外に20断面を計算
(鋼桁単体ではノンコンパクト断面)



鋼材降伏応力: $f_y = 355 \text{ MPa}$

コンクリート強度: $f'_c = 35 \text{ MPa}$

合成断面: **コンパクト断面**

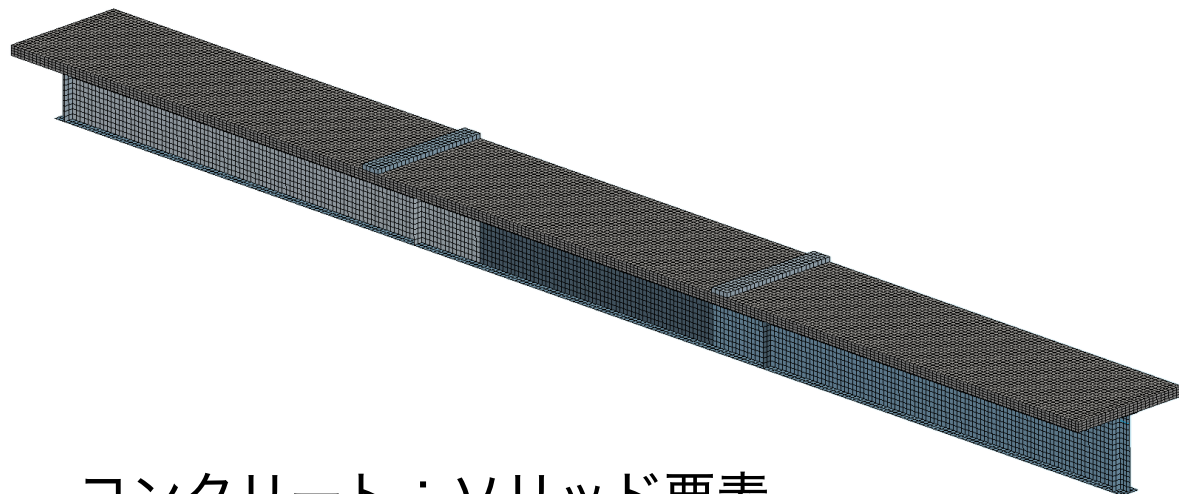
鋼桁単体: **ノンコンパクト断面**

スタッド: $d=22 \text{ mm}$, $h=120 \text{ mm}$

スタッドせん断強度: 166 kN/本

スタッド配置: 2本, 500mmピッチ ($\eta=0.47$)
2本, 1.00mピッチ ($\eta=0.25$)

FEモデル



コンクリート：ソリッド要素
鋼桁：曲面シェル要素
スタッド：インターフェース要素

弾塑性有限変位解析

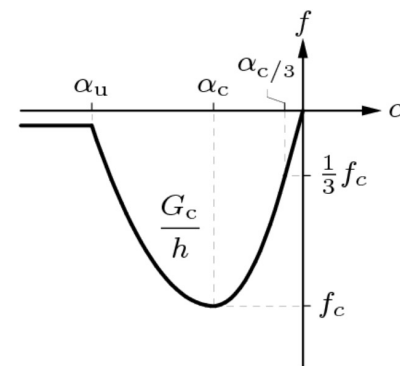
構成モデル

鋼材

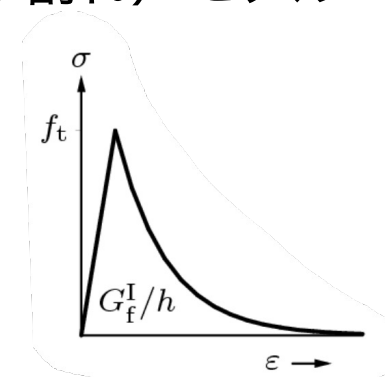
Mises降伏条件，関連流れ則，完全弾塑性

コンクリート

分布ひび割れ（回転ひび割れ）モデル



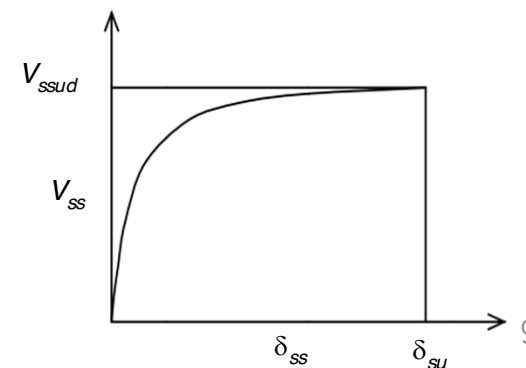
圧縮側



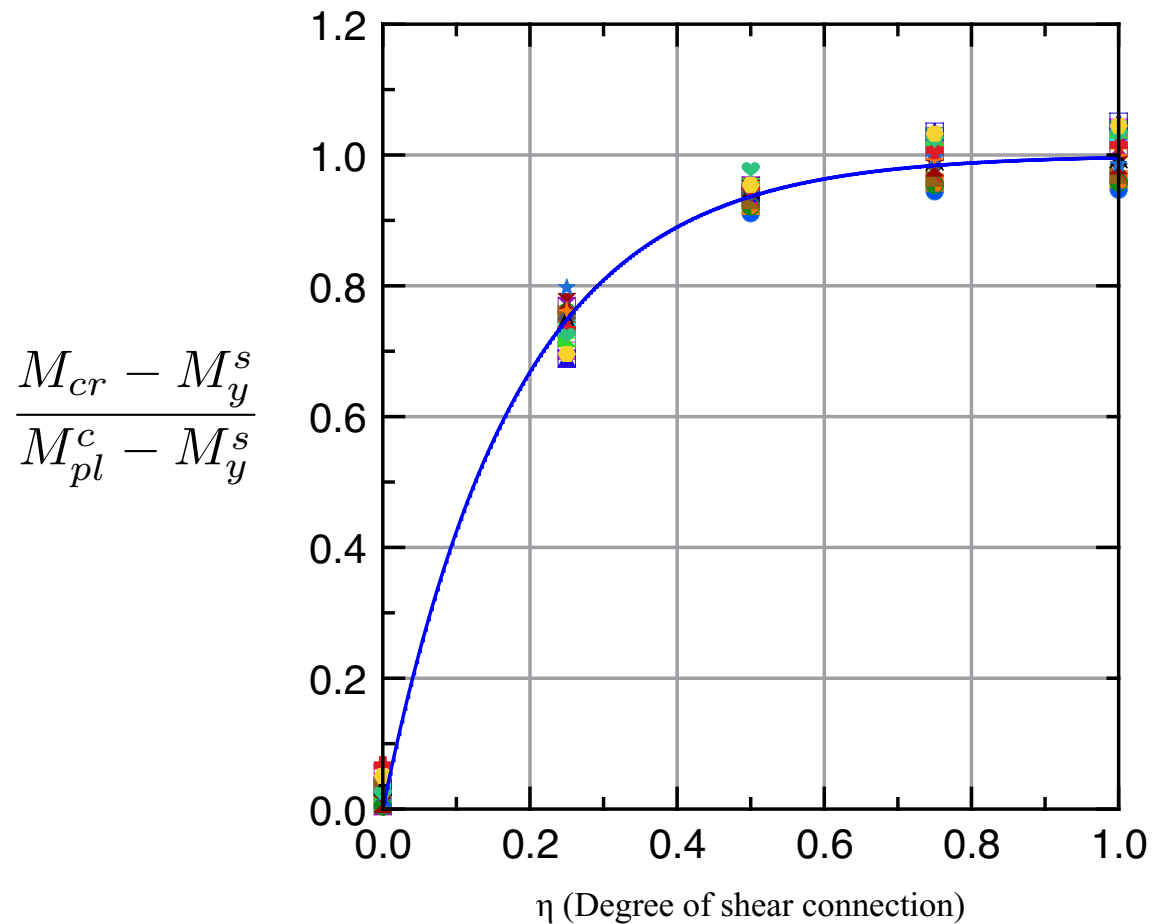
引張側

ずれ止め

JSCE複合標準
分布バネ



曲げ耐力



合成度

縦軸

不完全合成断面
曲げ耐力

$$\frac{M_{cr} - M_y^s}{M_{pl}^c - M_y^s}$$

鋼断面
降伏モーメント

合成断面
全塑性モーメント

提案式

$$\frac{M_{cr} - M_y^s}{M_{pl}^c - M_y^s} = 1 - \exp[-5.52\eta]$$

合成度→曲げ耐力の算定可能

まとめ

- 基準モデルで $M_{pl}/M_y=1.67$
→完全合成($\eta=1.0$)までずれ止めを設置すれば、
曲げ耐力は非合成桁($\eta=0$)の67%up
- 不完全合成桁でも $\eta=0.3$ を実現すれば $M_{cr}/M_y=1.55$
→曲げ耐力は非合成桁の55%up
- $\eta=0.3$ の不完全合成桁のイメージ
→基準モデルで1スロット(1mピッチ)にスタッド3本
- 塑性設計時に不完全合成桁としての設計は経済的
→床版取り換え時に桁補強を削減もしくはしない選択が可能

鋼橋上部工に用いられるH形断面部材の 圧縮強度評価法

東京都立大学 岸
大同大学 宮寄

SBHS500を用いたH形断面部材の载荷試験

試験体	SBHS500-R08	SBHS500-R09
鋼種	SBHS500	SBHS500
降伏応力 [N/mm ²]	559.0	559.0
弾性係数 [N/mm ²]	2.0×10^5	2.0×10^5
ポアソン比	0.29	0.29
フランジ幅（全幅）[mm]	180.0	200.0
ウェブ高さ [mm]	260.0	290.0
フランジ板厚 [mm]	9.0	9.0
ウェブ板厚 [mm]	9.0	9.0
断面積 [mm ²]	5580.0	6210.0
$I_y [\times 10^3 \text{ mm}^4]$	71,816	98,777
$I_z [\times 10^3 \text{ mm}^4]$	8,764	12,018
$r_y [\text{mm}]$	113.45	126.12
$r_z [\text{mm}]$	39.63	43.99
Rf	0.81	0.91
Rw	0.81	0.90
部材長 [mm]	1320.0	1340.0
λ' (部材長ベース)	0.560	0.511
有効座屈長[mm]	1915.0	1930.0
λ （有効座屈長ベース）	0.812	0.739
Py [kN]	3119.2	3471.4

→ ミルシート値

道示の積公式に
基づき設定

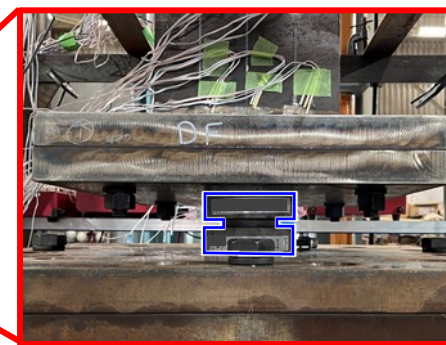
- 連成座屈の生じ得る座屈パラメータを有する諸元で試設計を実施
- 境界条件：両端ピン支持を治具で模擬



セットアップ状況



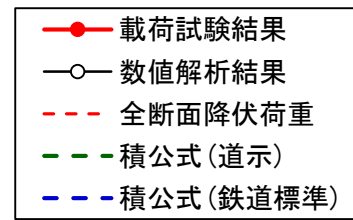
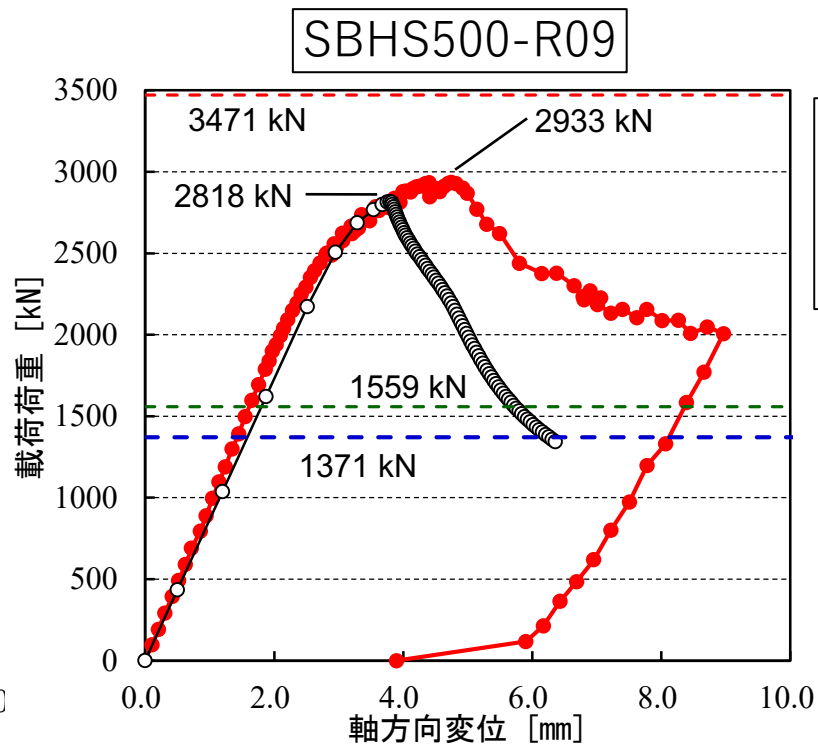
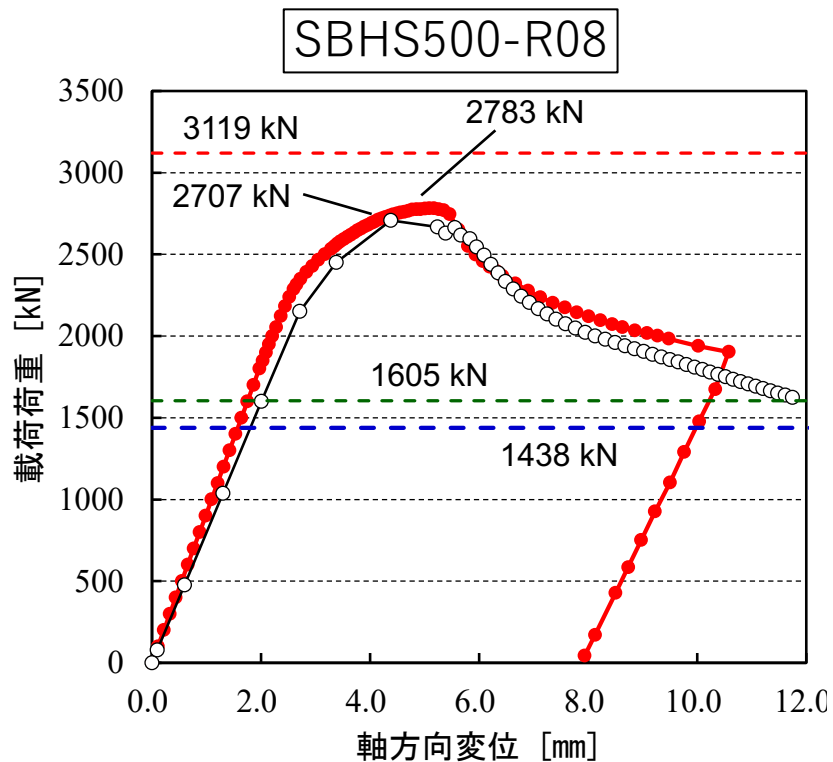
ユニバーサルヘッド



球座

載荷試験結果 (P- δ 関係)

- 載荷試験結果と数値解析結果を比較



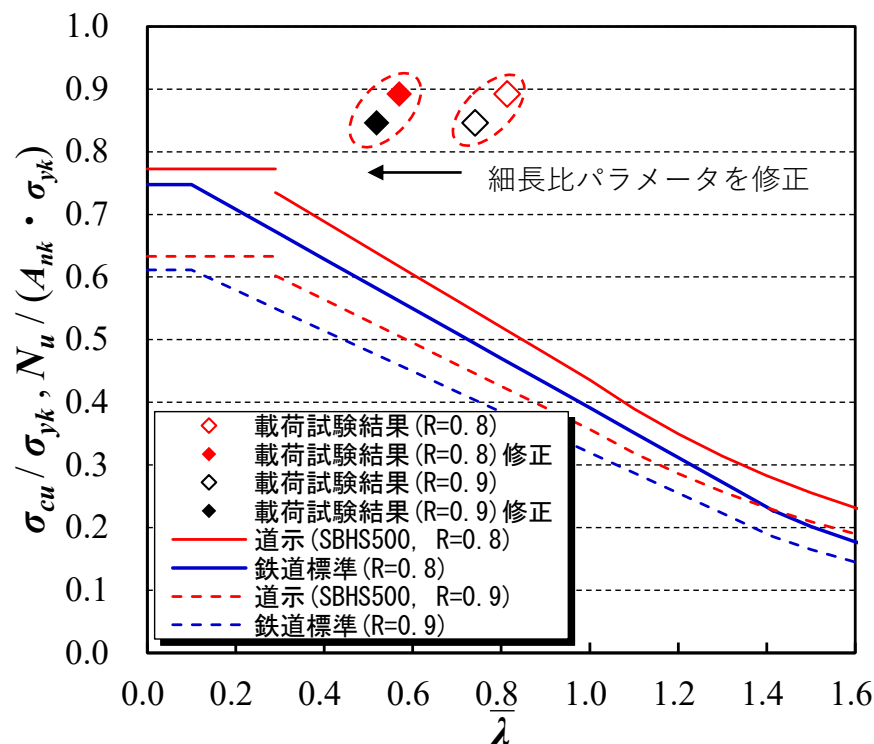
- ◆ 数値解析：
- ・ 材料試験結果
 - ・ 初期たわみ計測結果
 - ・ クロスヘッド側の境界条件
→ 固定支持へ修正
- ※実験の計測結果に基づく

- SBHS500-R08：載荷試験結果の方が数値解析結果より2.8%，最大荷重値が大きい
- SBHS500-R09：載荷試験結果の方が数値解析結果より4.1%，最大荷重値が大きい
- 全体的な傾向：実験結果による初期剛性の方が大きい

最大荷重値，最大荷重時変位ともに実験結果の方が大きい

→ 初期不整，材料特性，境界条件を適切に定義することで数値解析による耐力推定が可能と判断

国内耐荷力基準との比較



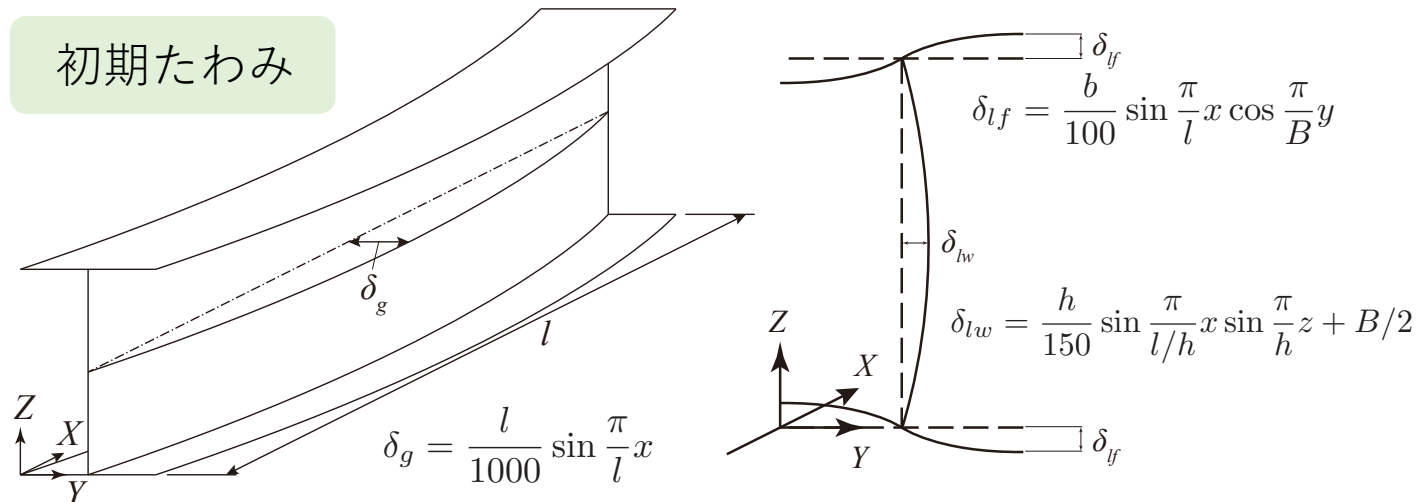
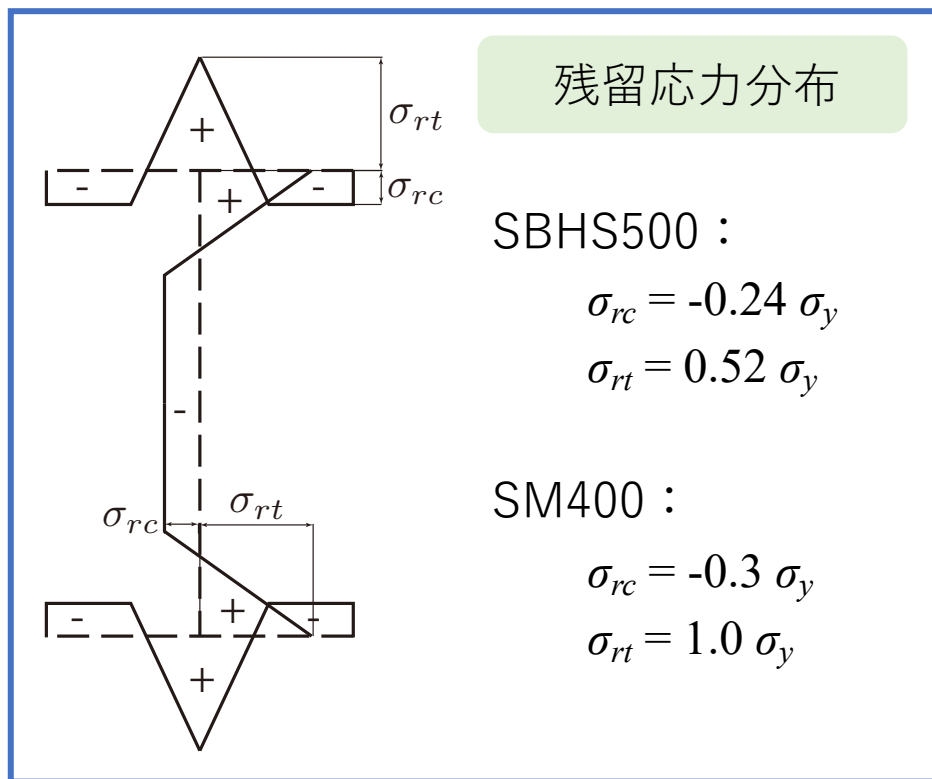
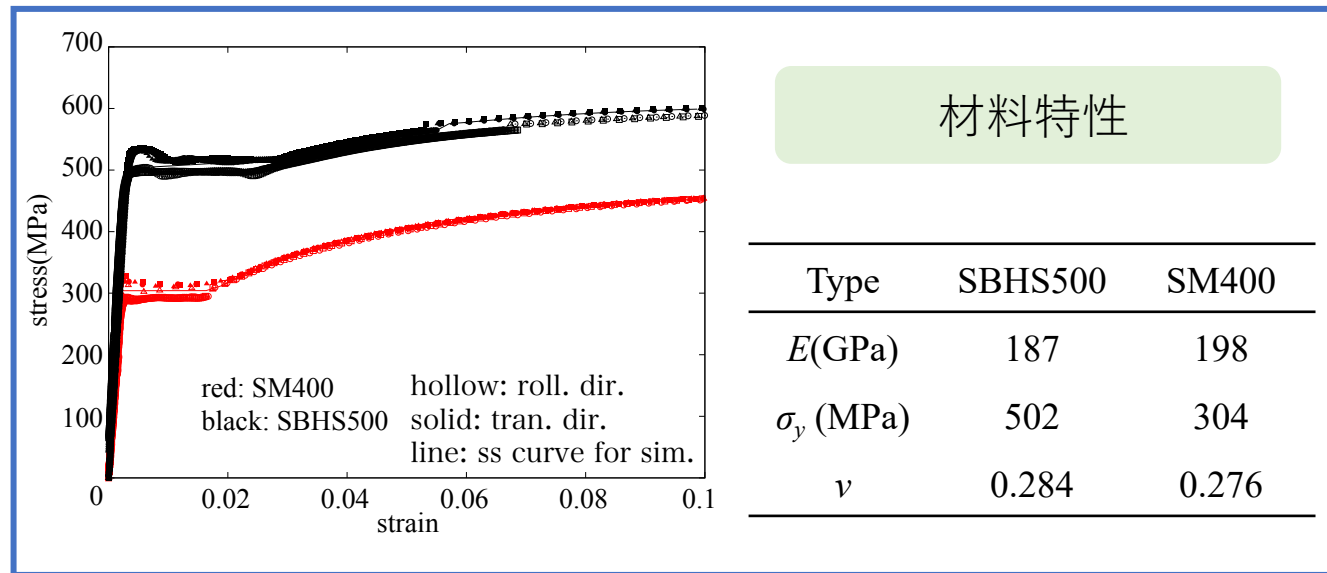
- SBHS500-R08
H29道示の軸方向圧縮強度で44.5%,
H21鉄道標準※で60.2%の大きな値を示す
 - SBHS500-R09
H29道示の軸方向圧縮強度で60.9%,
H21鉄道標準で82.0%の大きな値を示す
- いずれの設計規準も安全側の評価となるように設定されている

※鉄道構造物等設計標準

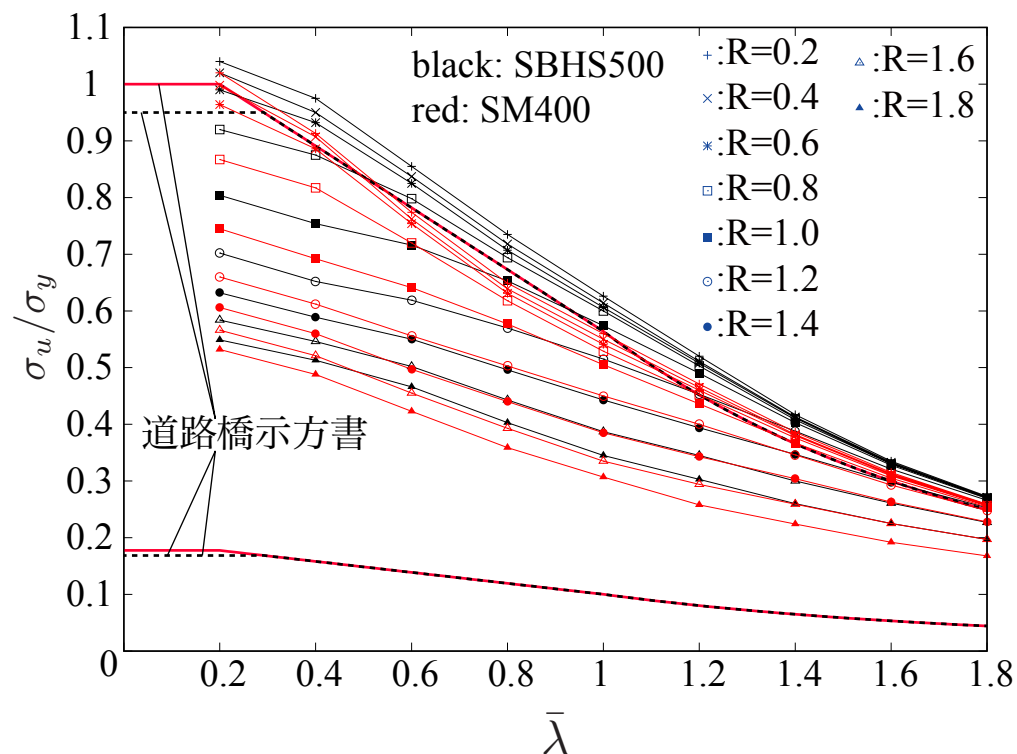
- 載荷試験体の座屈パラメータの範囲では、圧縮部材で一般的に使用される幅厚比パラメータよりも大きい領域の部材でも、耐荷性能は期待できる可能性
- 現行の設計規準に用いている曲線は、実部材の応答値との差異が大きい可能性を示すと考えられ、圧縮部材耐荷力の推定には合理化の余地がある

パラメトリック解析による座屈モード判別

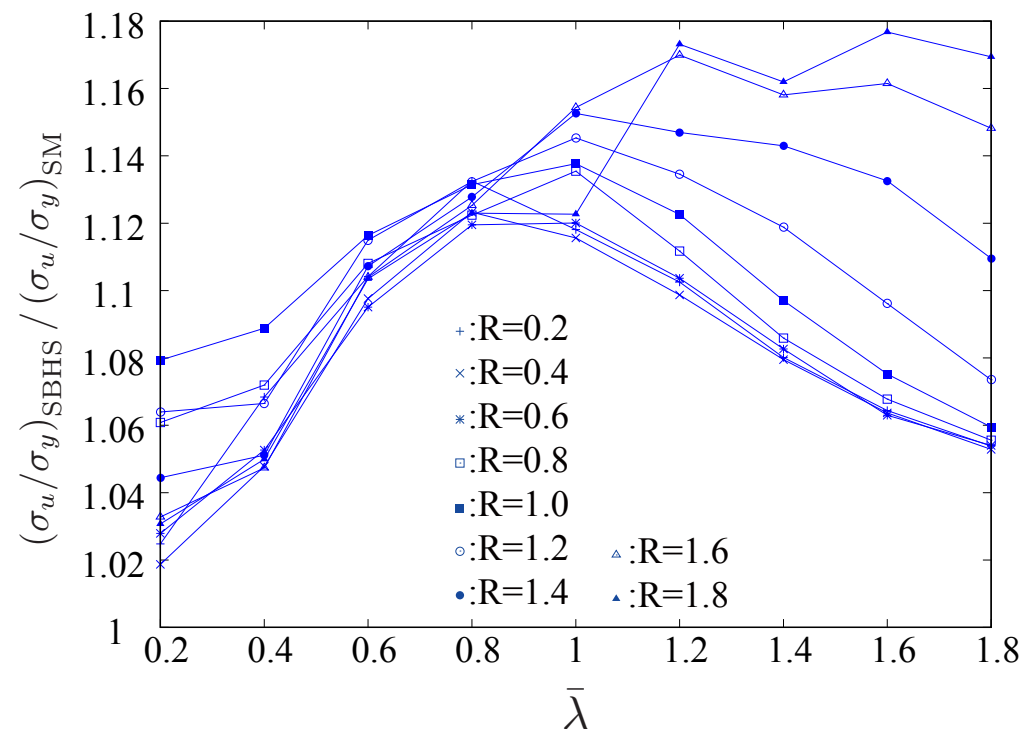
- 鋼種：SBHS500, SM400の2鋼種
- 幅厚比パラメータおよび細長比パラメータ：
→ 0.2~1.8まで, 0.2刻みで変化
- 材料特性：材料試験結果に基づく
- 残留応力：残留応力計測結果に基づく
- 初期たわみ：道示の製作誤差の最大許容値



パラメトリック解析による座屈モード判別



耐荷力分布（解析結果）



鋼種による耐荷力の比率

- 耐荷力分布：全体的な傾向として、道示の積公式よりも数値解析結果は耐荷力が高い
 - ▶ SM400の幅厚比パラメータの小さいモデルは、柱の耐荷力基準に近い結果であるのに対し、SBHS500の幅厚比パラメータの小さいモデルは、柱の耐荷力基準よりも大きい傾向が見られる
- 鋼種による耐荷力の比率：短柱領域と長柱領域では、幅厚比パラメータによる比率のばらつきが大きい

パラメトリック解析による座屈モード判別

SBHS500

R

λ

	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8
0.2	C	G	C	C	C	C	C	C	C
0.4	G	G	C	C	C	C	C	C	C
0.6	G	G	G	C	C	C	C	C	C
0.8	G	G	G	G	C	C	C	C	C
1	G	G	G	G	G	C	C	C	C
1.2	G	G	G	G	G	C	C	C	C
1.4	G	G	G	G	G	C	C	C	C
1.6	G	G	G	G	G	G	C	C	C
1.8	G	G	G	G	G	G	C	C	C

全体座屈(G) :

終局強度時の中立軸位置の節点の最大面外変位が $L/1000$ を超える場合

局部座屈(L) :

終局強度時のフランジ自由辺の節点の最大面外変位が $b/100$ を超える場合

連成座屈(C)

上記の条件を共に満たす場合

SM400

R

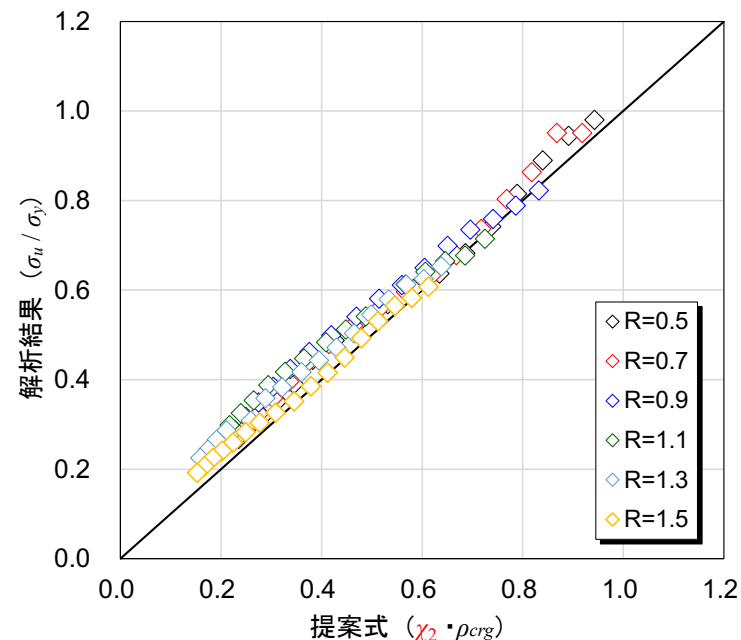
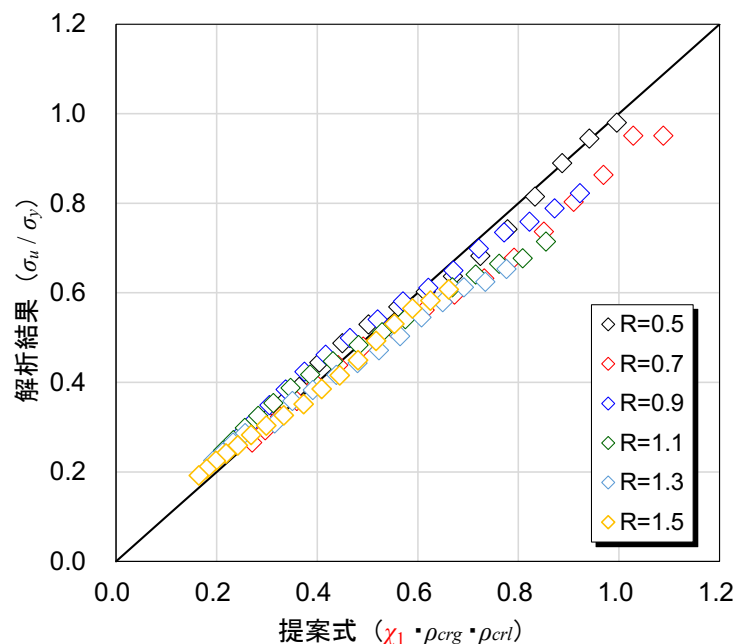
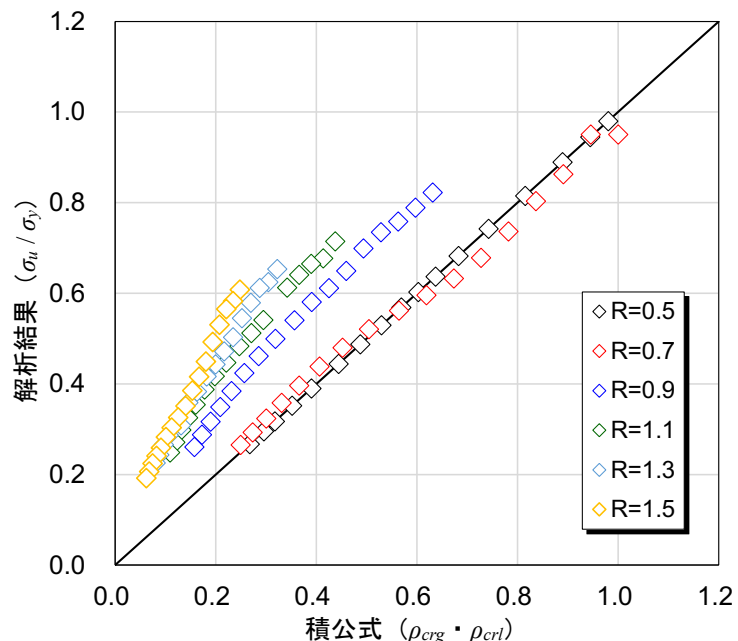
λ

	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8
0.2	G	G	G	G	L	L	L	L	L
0.4	G	G	C	C	C	C	C	C	C
0.6	G	G	C	C	C	C	C	C	C
0.8	G	G	G	G	C	C	C	C	C
1	G	G	G	G	G	C	C	C	C
1.2	G	G	G	G	G	G	C	C	C
1.4	G	G	G	G	G	G	C	C	C
1.6	G	G	G	G	G	G	G	C	C
1.8	G	G	G	G	G	G	G	C	C

- 中間柱～長柱となる細長比パラメータのモデルでは，構成板が薄板であっても部材全体の曲がり
が支配的になる傾向が見られる

耐荷評価の検討例

・・・パラメトリック解析の結果に基づき、道示の基準を補正する形で検討



- 積公式－解析結果の関係と比較すると、評価式により求まる値は全体的に数値解析結果と概ね良い一致を示す
- 積公式($\rho_{crg} \cdot \rho_{crl}$)よりも、全体座屈の特性値を補正する方が危険側で評価される値が少ない

道示の積公式の値に補正関数 χ_1 を乗じて、評価する方法

$$\sigma_{cr} / \sigma_y = \chi_1 \cdot \rho_{crg} \cdot \rho_{crl}$$

$$\chi_1 = -3.7272R^3 + 10.497R^2 - 8.508R + 3.0412$$

$$\{ R \mid 0.5 \leq R \leq 1.5 \}$$

道示の全体座屈の特性値に補正関数 χ_2 を乗じて、評価する方法

$$\sigma_{cr} / \sigma_y = \chi_2 \cdot \rho_{crg}$$

$$\chi_2 = 0.8502R^3 - 2.5532R^2 + 2.0132R + 0.4682$$

$$\{ R \mid 0.5 \leq R \leq 1.5 \}$$



係数等の整理を進めるとともに、他の基準類との比較を行う

まとめ

■ 載荷試験による検討

- ・道示の積公式ベースで設計した2体の試験体について載荷試験を実施
 - 部材強度は設計基準より求まる値との差が大きい
 - 設計基準に用いる曲線の合理化の余地があると考えられる

■ 座屈モードの判別に関する検討

- ・SBHS500, SM400の2鋼種について幅厚比パラメータ, 細長比パラメータを変えてパラメトリック解析を実施
 - 道示の積公式は数値解析結果より安全側で評価（幅厚比パラメータが大きい領域は顕著に差異が表れる）
 - 中間柱～長柱となる領域では, 構成板が薄板であっても部材全体の曲がりが支配的になる

■ 耐荷力評価法の提案

- ・パラメトリック解析の結果を踏まえて, 道示の積公式および全体座屈の特性値を補正
 - 補正係数を乗じることで全体的に数値解析結果と一致する
 - 係数等の整理と他の基準類との比較を今後進める

耐震WG活動報告

田村洋（横浜国立大学）

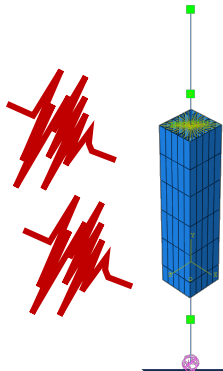
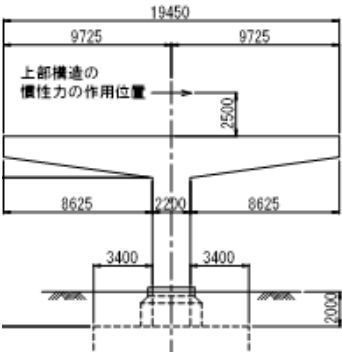
小室雅人（室蘭工業大学）

宮寄靖大（大同大学）

田中賢太（長大）

ロードマップ

テーマ1

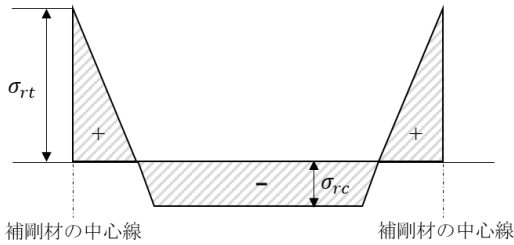
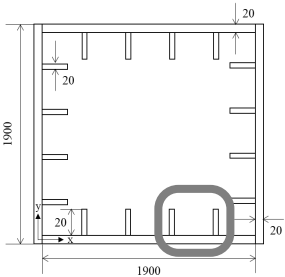


テーマ4

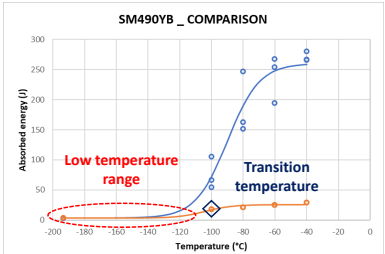
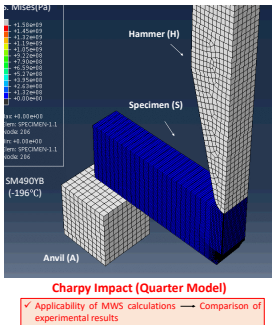
項目	SBHS500		
	厚肉2	厚肉3	厚肉4
列・梁の R_F ($0.3 \leq R_F \leq 0.5$)	0.304	0.324	0.322
列・梁の R_R ($0.3 \leq R_R \leq 0.5$)	0.309	0.329	0.323
全梁の $\bar{\lambda}$ ($0.2 \leq \bar{\lambda} \leq 0.5$)	0.571	0.606	0.653

取組内容	目標達成に向けたロードマップ助成計画（予定金額/万円）					
	～FY2019	FY2020	FY2021	FY2022	FY2023	FY2024
<構造性能> 耐震設計へのSBHS適用	SM570構成則 &許容ひずみ提案	基本構成則の検証 SBHS繰返し 構成則評価	局部降伏後の残存耐震性能 SBHS500端構脚の 解析的耐震評価	地震応答解析、初 期不整の影響評価	破壊じん性評価 残存耐荷力の評価、 残存破壊じん性等の 推定法	SBHS試設計 &適用メリット評価

テーマ2



テーマ3



テーマ1 残存耐荷力の評価（目的と条件）

目的：SBHS500を適用した場合の橋脚の地震後残存耐荷力（残存耐震性能）を評価

鋼材

SBHS500
(降伏比：0.87)

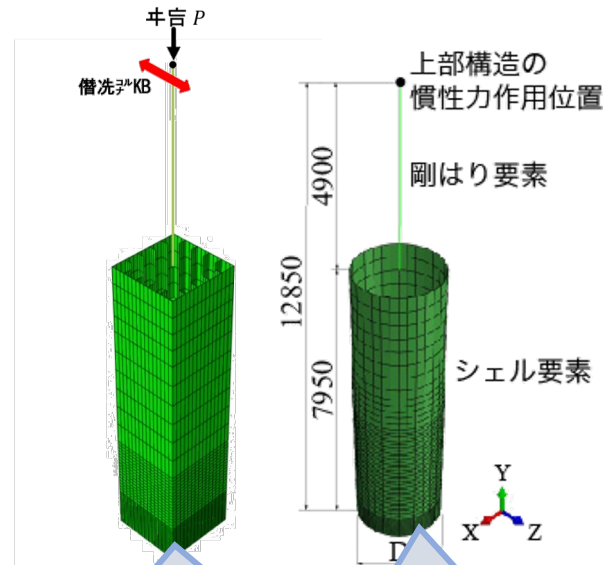
SM570①
(降伏比：0.87)

SM570②
(降伏比：0.83)

SM490Y
(降伏比：0.72)

降伏比はミルシート値から算出

断面形状



幅厚比パラメータ：大or小

径厚比パラメータ：大or小

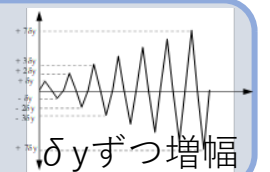
解析結果

被災前の包絡線

L2地震動1回被災後の包絡線

L2地震動2回被災後の包絡線

頂部に正負交番の漸増水平変位を付与

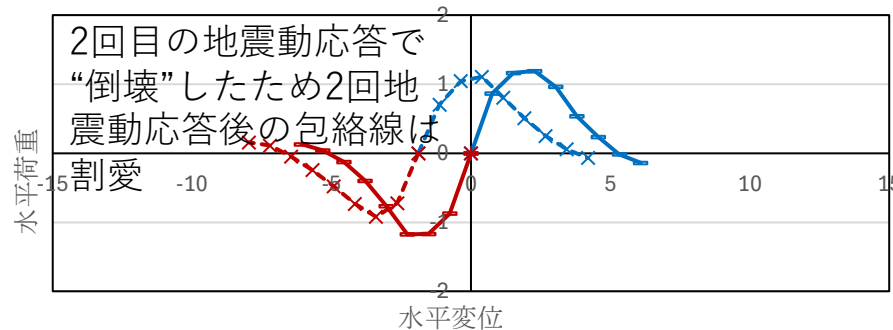


非線形複合硬化則（Chaboche・Rousselierモデル+当WGで提案した材料パラメータ）を使用し，
Abaqusで複合非線形有限要素解析（地震応答解析&静的解析）を実施

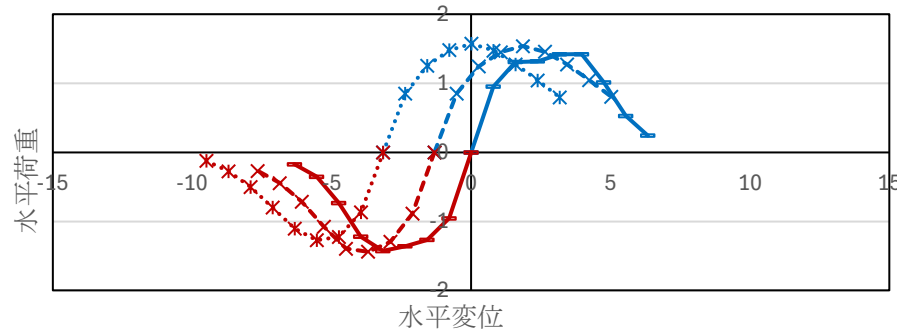
テーマ1 残存耐荷力の評価（結果）

矩形，公称値ベースの荷重・変位で正規化

薄肉断面 (R_F : 0.450)



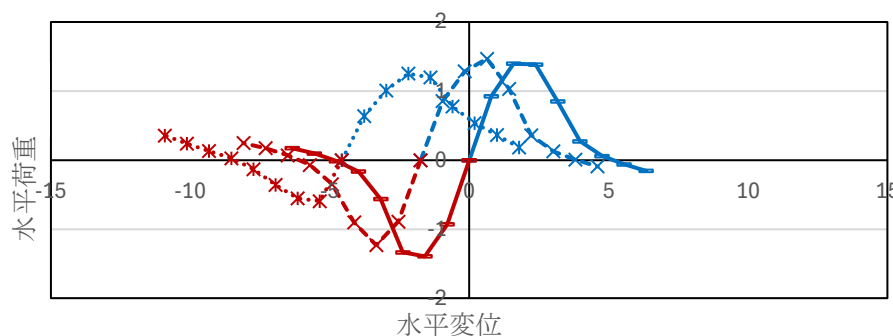
厚肉断面 (R_F : 0.340)



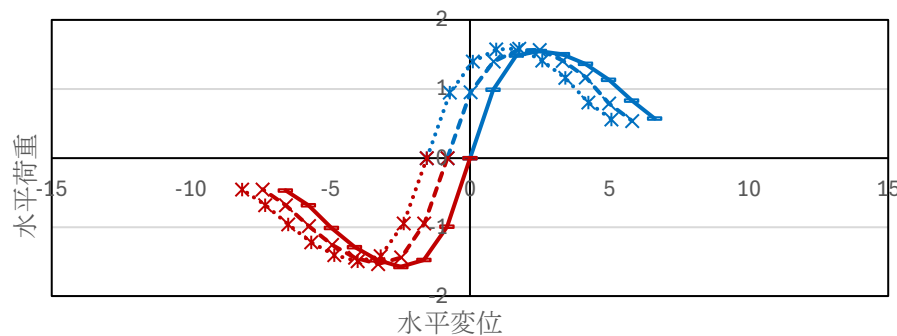
— 地震応答前
- - 1回地震応答後
... 2回地震応答後

- 薄肉断面では1回の地震応答で，包絡線は大きく左にシフトし圧縮側の形も変化
- 厚肉断面では1回の地震応答後の左へのシフト量は小さいが，2回目で大きくシフト

薄肉断面 (R_F : 0.475)



厚肉断面 (R_F : 0.305)



— 地震応答前
- - 1回地震応答後
... 2回地震応答後

- 耐力のピークが引張側・圧縮側ともにSM490Yの場合よりやや大きい
- 厚肉断面では，包絡線のシフト量が小さく，2回の地震応答を経ても耐震性能を保持

SM490Y
(降伏比: 0.72)

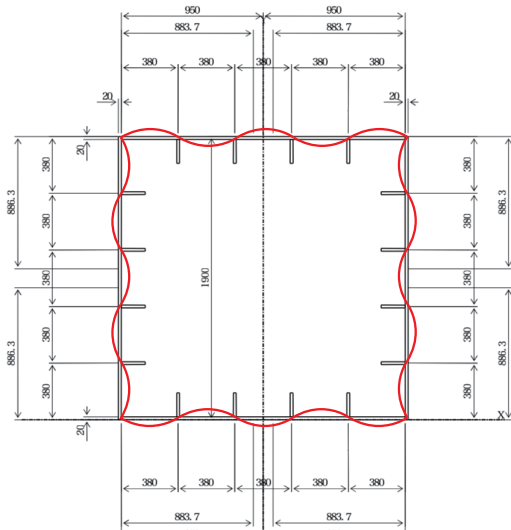
SBHS500
(降伏比: 0.87)

テーマ2 初期不整の影響評価（目的と条件）

目的：非線形複合硬化則を用いた包絡線評価結果における初期不整の影響を確認

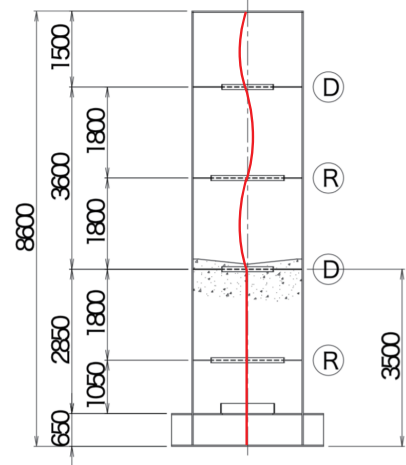
初期たわみ

SBHS500の使用を想定した矩形断面単柱橋脚



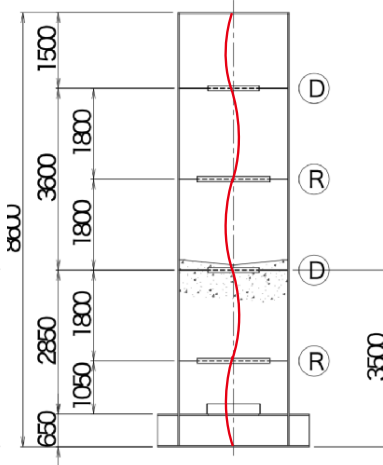
初期たわみの最大値：
補剛板の補剛材間隔/150

パターン1



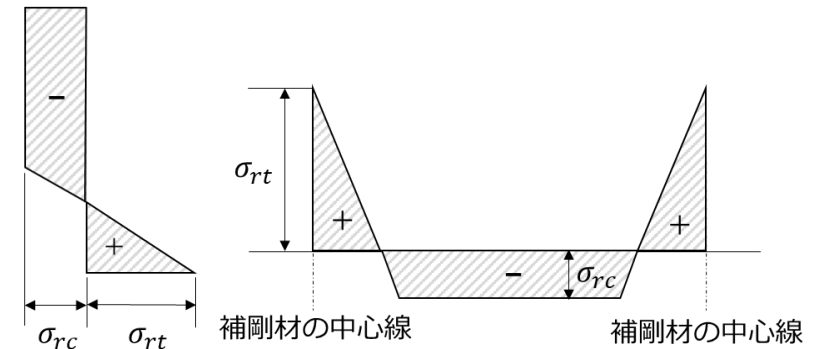
頭頂部から約0.7L

パターン2



柱全体

溶接残留応力

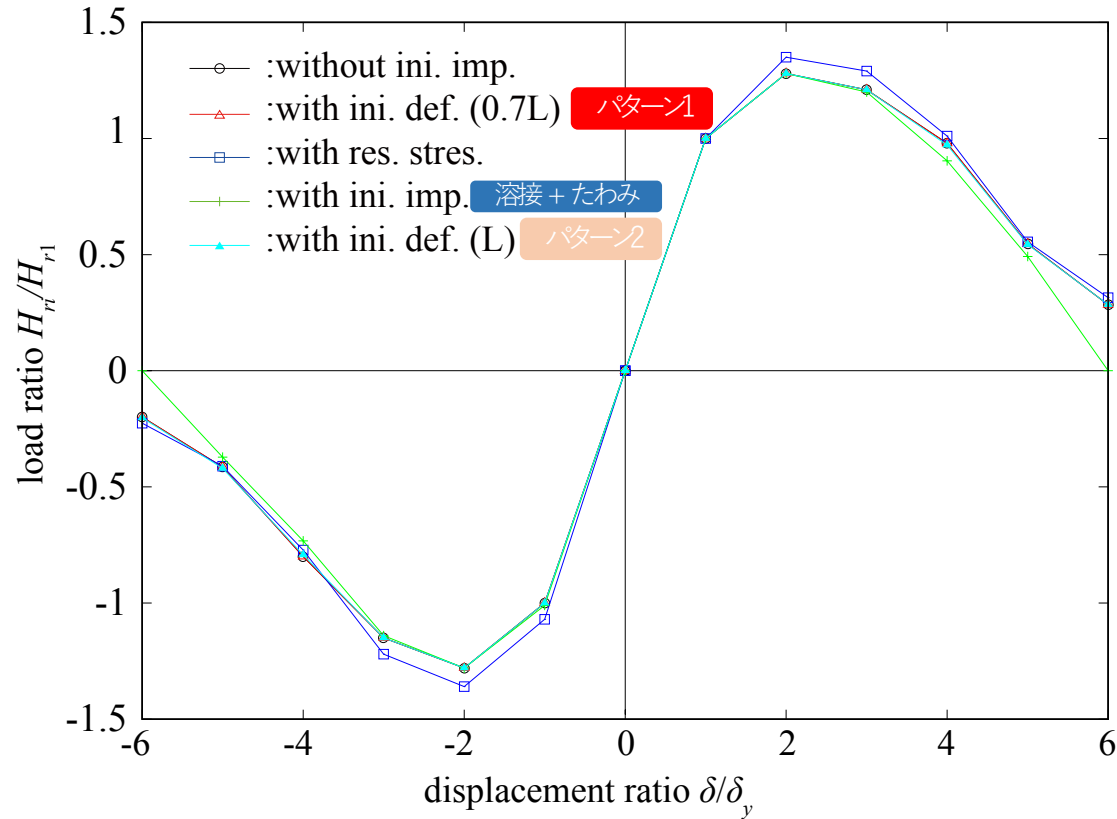


$$\begin{aligned}\sigma_{rc} &= -0.3\sigma_y \quad \dots \text{圧縮残留応力} \\ \sigma_{rt} &= \sigma_y \quad \dots \text{引張残留応力}\end{aligned}$$

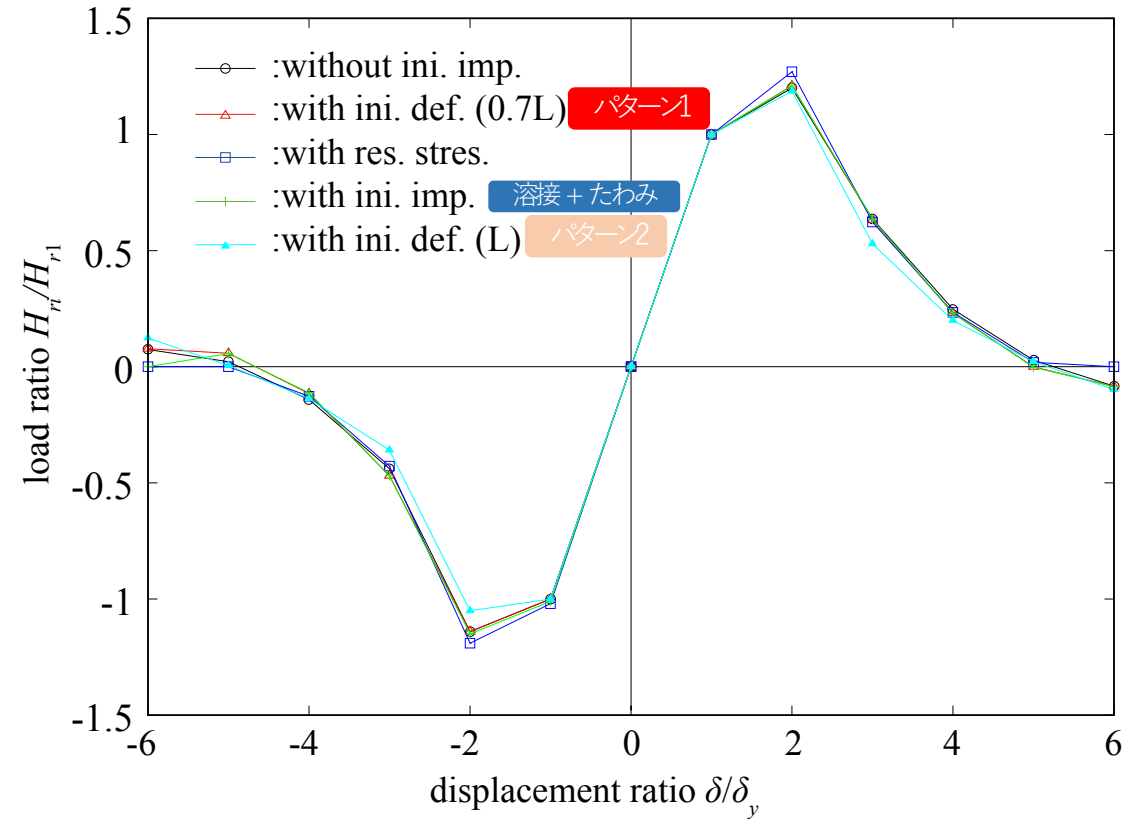
非線形複合硬化則を使用し，Marcによる複合非線形有限要素解析（静的解析）を実施

テーマ2 初期不整の影響評価（結果）

$R_R=0.3$



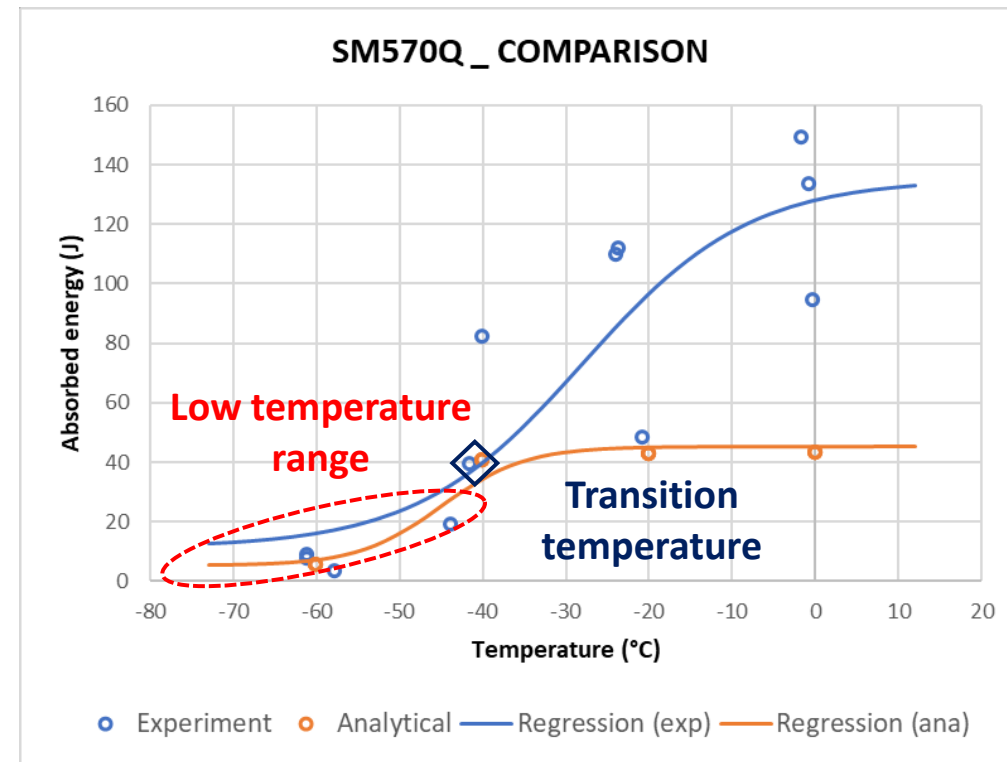
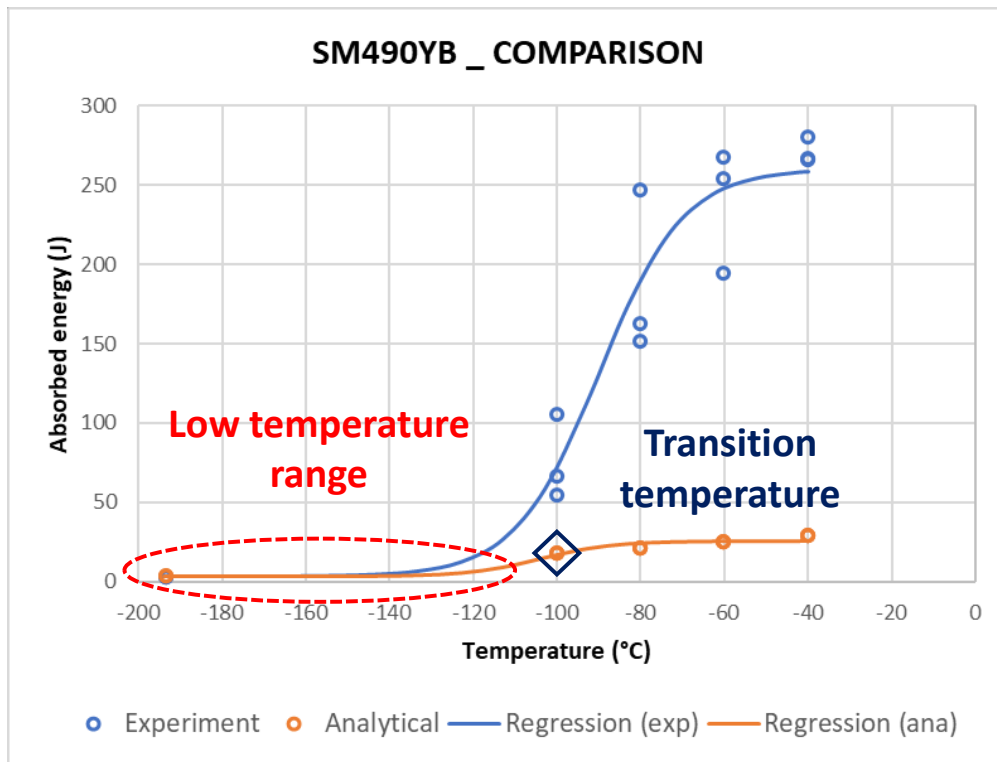
$R_R=0.526$



- 溶接残留応力を考慮するとわずかに最大耐力が上昇
- パターン2（柱全体）の初期たわみを考慮すると最大耐力が低下（ $R_R=0.526$ の圧縮側でとくに）
- 双方を考慮すると、双方を考慮しない場合に近い包絡線となる

テーマ3 残存破壊じん性等の推定法

目的：解析的な残存破壊じん性推定法を確立し，初期じん性の異なる鋼材間で鋼製橋脚地震応答後の残存じん性を比較する

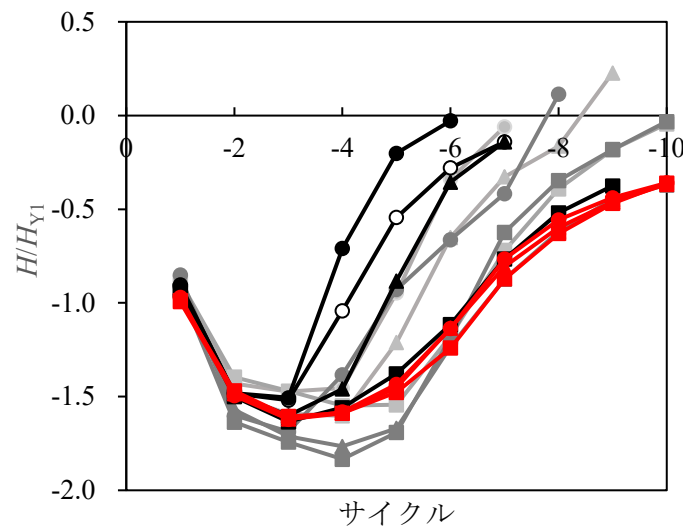
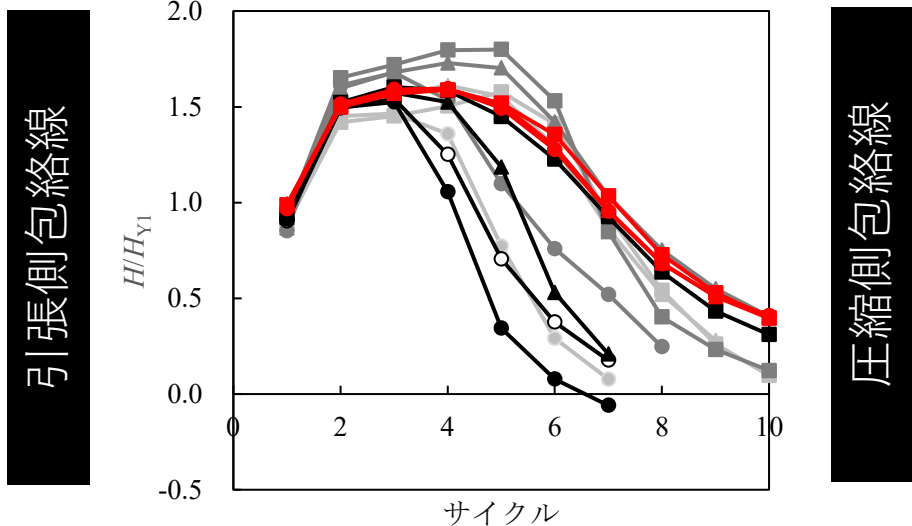


脆性領域と一部の遷移領域においてはシャルピー試験結果を解析的に再現することが可能
塑性ひずみ履歴によるじん性低下をこの手法で再現できるかどうかを今後検証する必要あり

テーマ4 SBHS適用メリット評価

目的：SBHS500を鋼製橋脚に適用することで，単柱矩形断面橋脚において，従来以上の耐震性能を備えつつ断面のコンパクト化を実現できるかを解析的に検討

現道示の細長比パラメータの制限 (≤ 0.5) を取り払い，複数の厚肉断面橋脚を試設計



断面諸元：

SBHS500, 厚肉1 (1700mm×1700mm)

SBHS500, 厚肉2 (1600mm×1600mm)

SBHS500, 厚肉3 (1500mm×1500mm)

SBHS500, 厚肉4 (1400mm×1400mm)

SM490Y, 薄肉 (RR=0.487, $\lambda = 0.338$)

SM490Y, 中肉 (RR=0.478, $\lambda = 0.360$)

SM490Y, 厚肉 (RR=0.478, $\lambda = 0.409$)

SM570, 薄肉 (RR=0.499, $\lambda = 0.457$)

SM570, 中肉 (RR=0.359, $\lambda = 0.489$)

SM570, 厚肉 (RR=0.310, $\lambda = 0.478$)

SBHS500, 薄肉1 (RR=0.526, $\lambda = 0.471$)

SBHS500, 薄肉2 (RR=0.500, $\lambda = 0.468$)

SBHS500, 中肉 (RR=0.394, $\lambda = 0.4500$)

SBHS500, 厚肉1 (RR=0.308, $\lambda = 0.538$)

SBHS500, 厚肉2 (RR=0.309, $\lambda = 0.571$)

SBHS500, 厚肉3 (RR=0.329, $\lambda = 0.606$)

SBHS500, 厚肉4 (RR=0.323, $\lambda = 0.653$)

細長比制限を超過しても，上部構造の重量に対して包絡線評価時の正負交番载荷の過程で柱の座屈は発生せず，耐力の劣化は他の橋脚よりも小さかった

まとめ

- テーマ1 : レベル2地震2回作用時において, SM490Y橋脚より
SBHS500橋脚のほうが耐震性高い
- テーマ2 : 正負交番載荷の包絡曲線において初期不整の影響小さい
- テーマ3 : 地震後の破壊靱性の推定において, 脆性領域と一部の遷移領域においてはシャルピー試験結果を解析的に再現可能
- テーマ4 : SBHS500橋脚は細長比制限を超過しても, 耐力の劣化は他の橋脚(SM490Y, SM570)よりも小さい