

マルチセル構造を有する鋼製橋脚の耐震性能

高久 達将*, 岡本 隆**, 興 守***, 安藤 紘三****, 池田 茂*****, 森下 泰光*****

* 日本鋼管株式会社鋼構造機械システム本部(〒230 横浜市鶴見区弁天橋 2-1)

** 日本鋼管株式会社基盤技術研究所都市工学研究部(〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町 1-1)

*** 株式会社宮地鐵工所設計部(〒290-8580 千葉県市原市八幡海岸通 3 番地)

**** 石川島播磨重工業株式会社技術研究所(〒235-8501 横浜市磯子区新中原町 1 番地)

***** 住友重機械工業株式会社鉄構機器事業本部技術部(〒141-0001 東京都品川区北品川 5-9-11)

***** 高田機工株式会社技術研究所(〒649-0111 和歌山県海草郡下津町方 1375-1)

矩形断面橋脚の内部に隔壁を配置しマルチセル構造とすると、高いダクティリティを有し、地震時に高い保有耐力を有することが、載荷実験により確認された。

実験は2種類行われた。①900×900断面の矩形モデル：建設省土木研究所における1方向正負交番繰返し載荷実験、マルチセルパネルに低降伏点鋼を使用。②450×450断面の矩形モデル：NKKにおける2方向正負交番繰返し載荷実験、マルチセルパネルに普通鋼(SS400)と低降伏点鋼(NK-LY100)を使用。マルチセル内壁の配置方向が載荷方向に平行(シアウォール)と直交(ダブルフランジ)の2種類。

実験結果により以下のことが確認できた。①普通鋼と低降伏点鋼の挙動の違い：低降伏点鋼の方が塑性率が大きく、エネルギー吸収量が大きい。②シアウォール構造とダブルフランジ構造の違い：曲げ剛性がほぼ同じ断面を比較すると、塑性率には差がない。

900×900矩形断面モデルの実験について、弾塑性有限変位FEM解析も実施した。

本研究は6者(建設省土木研究所、首都高速道路公団、阪神高速道路公団、名古屋高速道路公社、鋼材倶楽部、日本橋梁建設協会)の共同研究の一部である。

Key Word: Seismic design, Cyclic loading test, Steel pier, Ductility, Low yield strength steel

1. はじめに

大きな地震動を受ける時に内部パネルに低降伏点鋼を用いたマルチセル構造を有する鋼製橋脚は、高いダクティリティと終局強度を提供することができる。ここでいうマルチセル構造とは、矩形断面のなかに2枚の内部パネルを挿入することにより3セル構造としたものである。また、地震力の載荷方向に従って、載荷方向に平行方向の内部パネルをシアウォールと呼び、載荷方向に直角方向の内部パネルをダブルフランジと呼ぶ。

そのようなマルチセル構造を有する矩形断面鋼製橋脚が、内部パネルの方向に関わらず、標準的な矩形断面橋脚よりも、より高いダクティリティとより大きい終局強度を示すことを実験により明らかにする。また、シアウォールとダブルフランジが同様の耐震性を示すことを明らかにする。そして、内部パネルに低降伏点鋼を使用した場合に、普通鋼を用いた場合より、より大きなエネルギー吸収能力を示すことを明らかにする。

この研究で使用した低降伏点鋼は、普通鋼に対して約半分の降伏強度を有し、約2倍の破断伸びを示す鋼材で、日本鋼管(株)にて製作されたものを使用した。

本研究は、6者共同研究(建設省土木研究所、首都高速道路公団、阪神高速道路公団、名古屋高速道路公社、鋼材倶楽部、日

本橋梁建設協会)の一環として日本橋梁建設協会により実施された研究の一部である。

2. マルチセル構造を有する鋼製橋脚の終局強度

兵庫県南部地震以降、実験及び解析を通じて、鋼製橋脚のダクティリティを改善して耐震性を向上させるための構造が検討されている。それらの検討の中で、マルチセル構造を有する矩形断面橋脚が提案された。その概念を、図-1に示す。

1) 角補強

矩形断面においては、角部が強いということによく知られている。しかし、パネル部分は、局部座屈などにより変形することにより、終局強度を低下させる。このため、剛性がより高い角部により多くの荷重が分配される。スペーstrass構造は、その角の剛性を増やすことによって構成される。マルチセル構造では、角部への荷重分配を減らし、パネルの剛性を改善することができる。

2) リブ補強

リブの剛性を最適化された補剛板では、局部座屈が防止され、ダクティリティが改善され耐震性が増強される。Uリブを使用することにより、その剛性とダクティリティをさらに改善することができる。

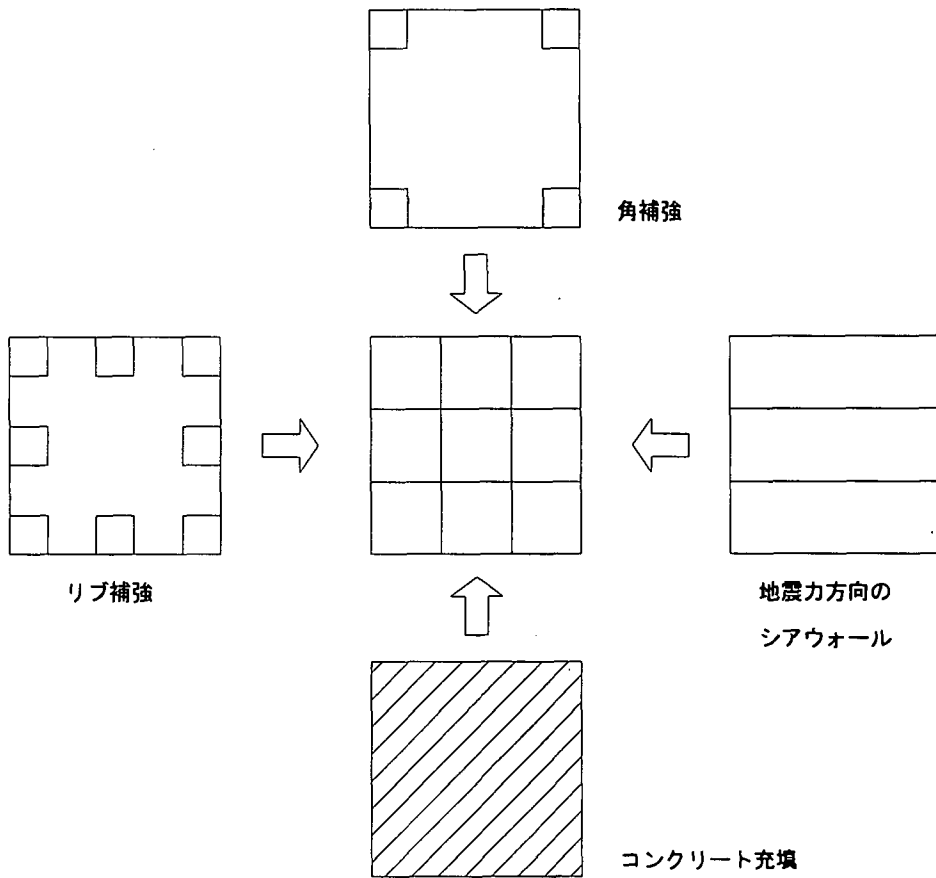
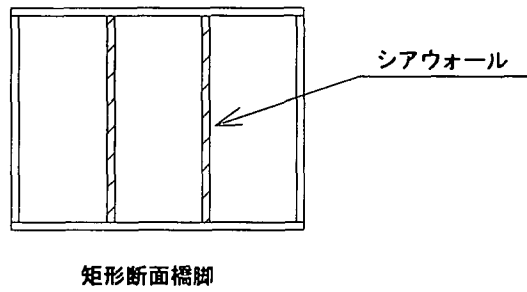


図-1 マルチセル構造の概念



矩形断面橋脚

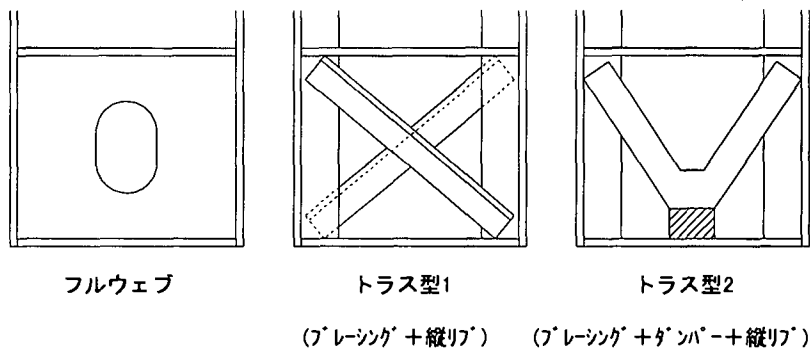


図-2 シアウォールの構造上の種類

3) コンクリート充填

コンクリートを充填することにより、パネル変形を防止することができる。さらに、コンクリートによりエネルギー吸収が行われる。マルチセル構造については、コンクリート充填と同程度の剛性とエネルギー吸収能力を有するように内壁の材質と配置を選択しなければならない。

4) 地震力方向のシアウォール

地震力方向のシアウォールが、建築構造物におけるセンターコア方法で使われる。その断面のダクティリティは、ウェブ断面積比率を増やすことによってよくなる。

3. シアウォールを使用したマルチセル構造

3.1 シアウォールの構造上の種類(図-2 参照)

1) フルウェブ

この方法は、矩形断面ウェブと同様の剛性をマルチセル内壁に持たせることができる。その安定性とダクティリティは、ウェブのその材料と配置を最適化することによって改善される。また、マルチセルの効果により、その断面形状はよく維持することができ、エネルギー吸収能力が改善されることが予想される。

既設橋脚の補強では、縦リブにボルトにより取り付ける。新設橋脚では、縦リブ相当位置に溶接される。

2) トラス型1(ブレース+縦リブ)

この構造の剛性は低いので、地震の影響が比較的小さい橋脚の上部で使われる。構造部材が小さいので、運搬が容易であるので、既設橋脚の補強に利用しやすいと考えられる。

3) トラス型2(ブレース+ダンパー+縦リブ)

いろいろな種類のダンパーを用いることにより、エネルギー吸収能力を最適に設定することができる。

3.2 大型供試体(B6)

断面形状は、矩形断面の内側に2枚のウェブをもつフルウェブ型シアウォール構造(図-3 参照)とした。

断面設計にあたり、以下のような点に配慮した。

1) フランジの縦リブの剛性を十分とることにより局部座屈が起こらない値にする。

実験を行う前に実施したFEM解析により、シアウォール効果が発揮される前に縦リブが十分な剛性を持たない場合、フランジに局部座屈が発生し、十分なダクティリティが得られないことが明らかになった。

2) シアウォールの役割は、断面形状を維持することにより、材料の弾塑性特性を利用することによってエネルギーを吸収することである。したがって、シアウォールは外側のウェブと同じ剛性を持つこととした。また、材質は低降伏点鋼(NK-LY100)とした。

内部のウェブの曲げ変形が小さいので、限界状態で、内部のウェブは垂直荷重を支えることができる。

3.3 小型供試体(B9~B12)

大型供試体の他に4種類の小型供試体(図-4 参照)を計画した。4供試体の実験条件は表-1に示す。また、荷重方向とマルチセル内壁の方向の関係を図-5に示す。

既設橋脚の調査によると、85%の橋脚が細長比パラメータ λ が $0.2 \leq \lambda \leq 0.4$ の範囲に入る。B6 供試体の細長比パラメータ λ は、下限付近の0.23であった。小型供試体では、上限付近の $\lambda=0.4$ (供試体高さ:h=2500 mm)とした。矩形断面のフランジウェブを構成する補剛板の板厚は6mm、縦方向補剛材の寸法は60mm×6mmとした。マルチセル構造の内壁の板厚は6mmとし、内壁の縦方向補剛材は圧縮補剛板として設計し、寸法は40mm×6mmとした。鋼種は、フランジウェブは普通鋼とし、内壁は低降伏点鋼と普通鋼を供試体によって使い分けた。供試体基部から450mm間隔で板厚4.5mmのダイアフラムを設置した。

供試体の設計は基準降伏応力度を用いて、構造パラメータを計算した決定した。各パラメータの値は、フランジウェブの幅厚比パラメータ R_w が $R_w \leq 0.4$ 、補剛材剛比 γ/γ^* が $\gamma/\gamma^* \geq 2$ 、

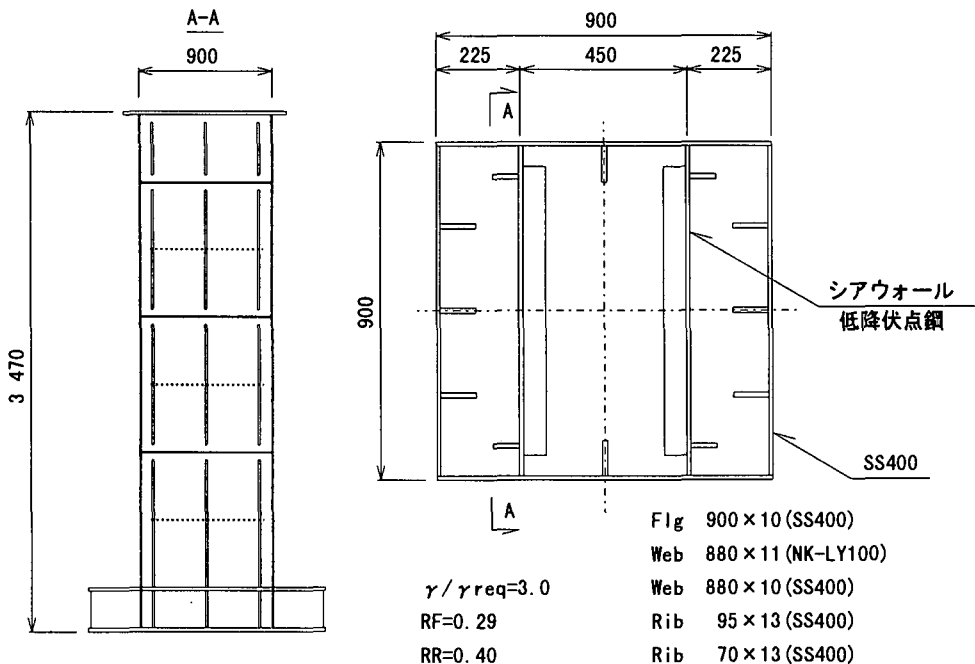


図-3 大型供試体(B6)

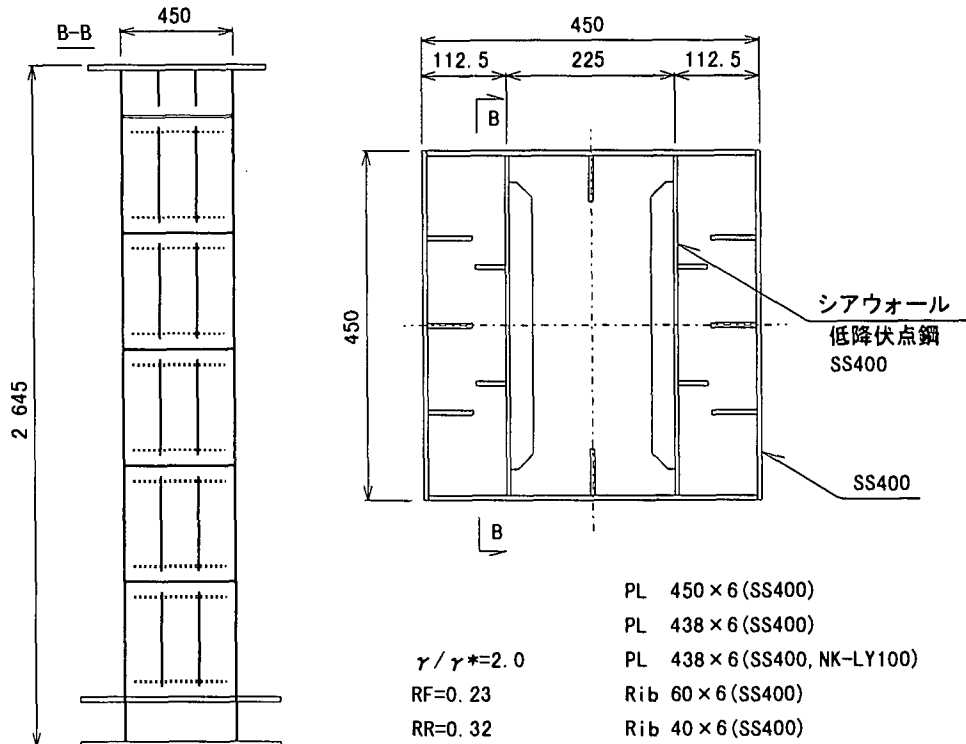


図-4 小型供試体 (B9~B12)

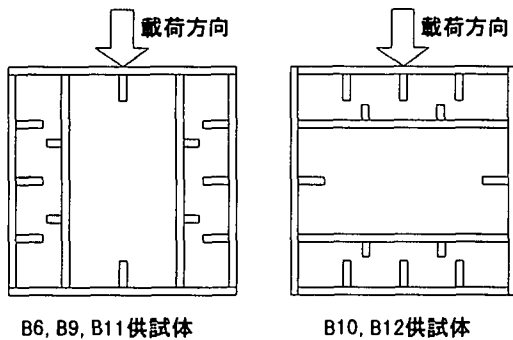


図-5 荷重方向

内壁の R_p は $R_p \leq 0.5$, γ/γ^* は $\gamma/\gamma^* \geq 1$ とした。この値は、内壁については道路橋示方書の補剛板レベルとし、フランジ・ウェブについてはそれ以上となるように意図したものである。

供試体の製作については、断面寸法が小さいために、外側から溶接作業を行って製作した。また、荷重直角方向のフランジと荷重方向に平行なウェブの内の片方は供試体基部から荷重点まで連続であるが、ウェブの残りはダイアフラム毎に1パネルずつ分かれている構造とした。

4. 低降伏点鋼

表-2 に実験で使用した普通鋼 (SS400) と低降伏点鋼 (NK-LY100) の化学成分を示す。低降伏点鋼は、最新の製鋼技術を駆使して、降伏強度を上昇させる固溶状態の炭素や他の不純物元素の含有量を低減し、さらに、これらの固溶成分を炭窒化物として固定する元素を添加した成分系である。低降伏点鋼は、熱間圧延後、特種熱処理により製造される。

表-3 に鋼材の機械的性質を示す。低降伏点鋼 (NK-LY100) は、普通鋼 (SS400) と比較して、極めて低い強度 (降伏強度、引張強度) と、極めて高い変形能 (伸び) を実現している。図-6 に、低

表-1 実験条件

供試体名	内壁の鋼種	内壁の構造
B9	低降伏点鋼	シアウォール
B10	低降伏点鋼	ダブルフランジ
B11	普通鋼	シアウォール
B12	普通鋼	ダブルフランジ

表-2 鋼材の化学成分 (単位:%)

成分	C	Si	Mn	P	S
NK-LY100	≤ 0.003	≤ 0.03	0.1~0.2	≤ 0.02	≤ 0.01
SS400	-	-	-	≤ 0.05	≤ 0.05

表-3 鋼材の機械的性質

項目	板厚 (mm)	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	破断伸び (%)
NK-LY100	6~	90~130	200~300	50以上
SS400	4.5~	235以上	400~510	21以上

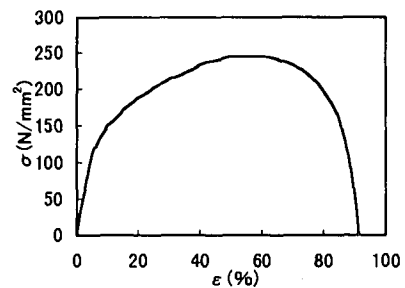


図-6 低降伏点鋼の応力-ひずみ曲線
低降伏点鋼の引張試験における応力-ひずみ曲線を示す。

5. 正負交番2軸繰返し載荷実験法

大型供試体(B6)は、6者共同研究の一環として、建設省土木研究所にて行われた(図-3参照)。B6供試体の実験結果により小型供試体が計画され(図-4参照)、NKKにて実験が行われた。

載荷方法としては、供試体に上部構造重量に相当する軸力 N を載荷した後、その軸力を一定に保持した状態で、図-7に示すように水平変位制御による水平繰返し漸増載荷を実施した。

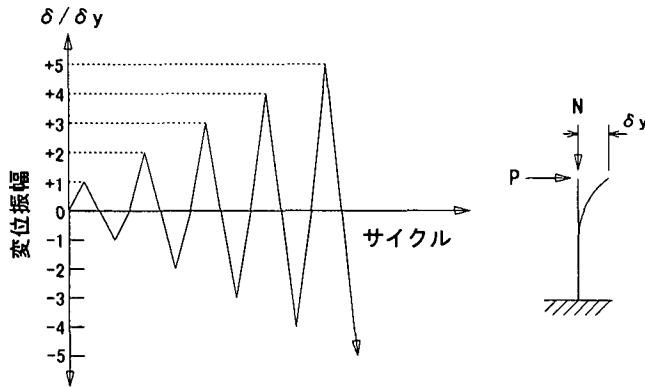


図-7 載荷方法

6. 実験結果

6.1 大型供試体(B6)

図-8に、降伏荷重 P_y と降伏変位 δ_y で規準化した水平荷重-水平変位関係(ヒステリシスループ)を示す。ヒステリシスループは、圧縮と引張が対称であり、よいエネルギー吸収を示している。ヒステリシスループが対称であることは、断面剛性が局部座屈によって大きく低下しないことを示し、また、終局状態に至るまで、元の断面形状が維持されていたことを示している。

塑性率は、普通鋼(SS400)の公称降伏応力度を基準にした場合14.5、材料試験結果を基準にした場合11.5、であった。

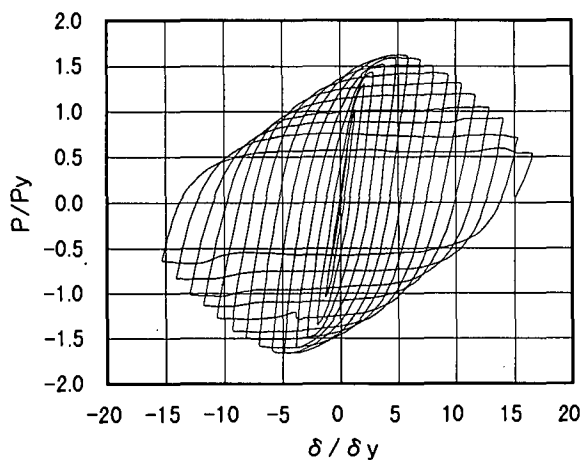


図-8 ヒステリシスループ(B6)

6.2 小型供試体(B9, B10, B11, B12)

マルチセル構造の内壁の鋼種の違いによる影響を、B9供試体(低降伏点鋼)とB11供試体(普通鋼)、B10供試体(低降伏点鋼)とB12供試体(普通鋼)で比較する。図-9の水平荷重-水平変位関係に示すように、低降伏点鋼を用いた供試体の方が劣化勾配が緩やかであり、最大耐力を越えて降伏耐力まで強度が低下し

たときを終局状態とした塑性率 μ_u が普通鋼を用いた供試体よりも大きい。最大耐力 P_{max} は、強度の高い普通鋼を用いた供試体の方が、低降伏点鋼を用いた供試体よりも大きい。

マルチセル構造の内壁の配置の違いによる影響を、B9供試体(シアウォール)とB10供試体(ダブルフランジ)、B11供試体(シアウォール)とB12供試体(ダブルフランジ)で比較する。図-10の水平荷重-水平変位関係に示すように、どちらの鋼種を用いた場合も、最大耐力はシアウォール構造の方がダブルフランジ構造よりも高いが、塑性率 μ_u は内壁の配置に依存しない。

6.3 エネルギー吸収量

1サイクルの吸収エネルギーは、履歴曲線と変位軸とで囲まれる面積で表すことができる。

マルチセル構造の内壁の鋼種の違いによる影響を、B9供試体(低降伏点鋼)とB11供試体(普通鋼)、B10供試体(低降伏点鋼)とB12供試体(普通鋼)で比較する。1サイクルのエネルギー吸収量の最大までは鋼種による差は見られず、最大値以降は低降伏点鋼を用いた供試体の方がエネルギー吸収量が大きい。最大耐力 P_{max} は普通鋼を用いた供試体の方が大きいですが、各サイクルでのループの膨らみが低降伏点鋼を用いた供試体の方が大きいと考えられる。

6.4 変形状況

内壁の鋼種として低降伏点鋼を用いた供試体(B9供試体とB10供試体)では、補剛板に発生した亀裂の長さは5cm以下であった。他方、内壁の鋼種として普通鋼を用いた供試体(B11供試体とB12供試体)では、補剛板に約20cmの長さの亀裂が発生した。

内壁の状況としては、内壁の鋼種として低降伏点鋼を用いた供試体(B9供試体とB10供試体)では、内壁は大きく局部座屈している。他方、内壁の鋼種として普通鋼を用いた供試体(B11供試体とB12供試体)では、内壁はほとんど座屈していない。内壁の鋼種に低降伏点鋼を用いることにより、内壁が座屈して補剛板の損傷を緩和する効果がある。

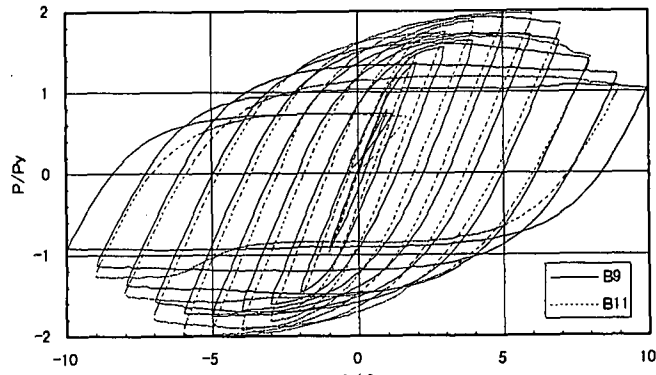
7. 弾塑性有限変位FEM解析

実験結果をシミュレーションするために、大型供試体(B6)について、全体モデルによる弾塑性有限変位FEM解析を実施した。

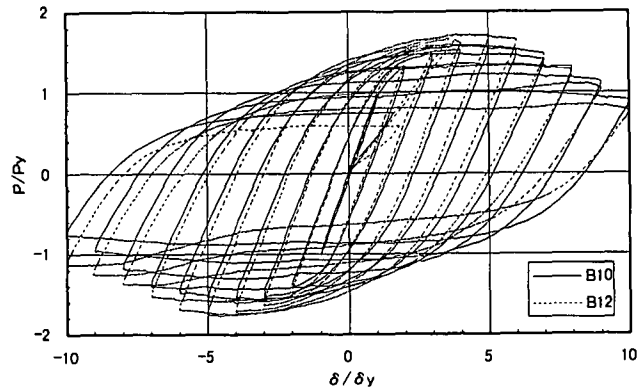
解析仕様を表-4に、解析諸元を表-5に示す。解析には、汎用のFEM解析プログラムである「ADINA Ver. 6.1.6」を使用した。解析モデルとして、対称性を考慮した3次元シェル構造の1/2モデルとし、実際の実験と同様の漸増載荷パターンにより解析を実施した。

鋼材の応力-ひずみ曲線は、材料試験データによるマルチニア型とした。硬化則については、普通鋼(SS400)については移動硬化則を用い、低降伏点鋼(NK-LY100)については、その硬化特性から等方硬化則を用いた。また、初期不整、残留応力については考慮しなかった。

解析結果の水平荷重-水平変位関係を図-11に示す。ピーク荷重を迎えるまでの性状としては、ある程度シミュレーションできた。

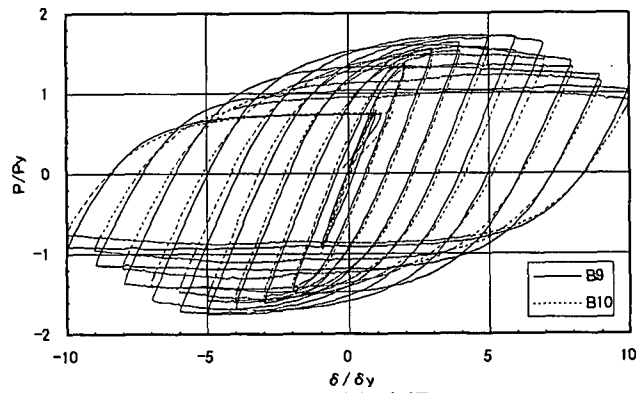


(a) シアウォール構造

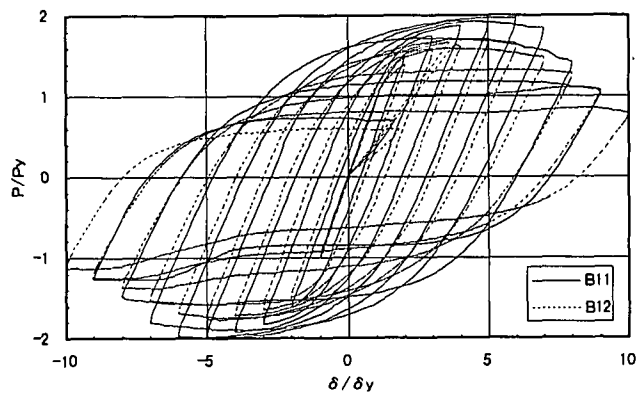


(b) ダブルフランジ構造

図-9 内壁の鋼種の違いによる比較



(a) 低降伏点鋼



(b) 普通鋼

図-10 内壁の配置の違いによる比較

表-4 解析仕様

項目	解析仕様	
解析プログラム名	ADINA Ver. 6.1.6	
共通仕様	解析モデル	水平荷重載荷方向を含む鉛直面を対称面とした全体の 1/2 モデルの三次元シェル構造
	使用要素	4 節点曲面シェル要素
	積分点	面内方向 2×2(ガウス), 板厚方向 2 点(ガウス)
	応力評価点	積分評価点
	応力度-ひずみ曲線	マルチリニア型(材料試験データに準じる)
	降伏条件	Von-Mises
	ひずみ硬化係数	材料試験データに準じる
	硬化則	せん断パネルは等方硬化, その他は移動硬化
	幾何学的非線形性	応力は Cauchy の応力, Total-lagrangian で解析
	初期条件	初期不整, 初期応力(残留応力): なし
その他の解析条件	収束エネルギーの収束公差: 0.001, 力とモーメントの収束公差: 0.01	

表-5 解析諸元

項目	諸元		
	ウェブ/フランジ/ダイアフラム/せん断パネルの横リブ	縦リブ/せん断パネルの縦リブ	せん断パネル
鋼材	SS400	SS400	NK-LY100*
降伏応力: σ_y (kgf/cm ²)	2780	2850/2790	888.5
ヤング係数: E (kgf/cm ²)	2.1 × 10 ⁶		
断面積: A (cm ²)	454.8(ウェブ/フランジ/縦リブ) + 193.6(せん断パネル) = 648.40		
降伏軸力: P_y (tf)	454.8cm ² × 2400kgf/cm ² + 193.6cm ² × 1000kgf/cm ² = 1285.1		
鉛直荷重(軸力): P (tf)	0.15 × P_y = 192.77		
降伏水平力: H_y (tf)	87.174		
降伏変位: δ_y (cm)	0.84312		
載荷パターン	±1 δ_y , ±2 δ_y , ... ±6 δ_y (各 1 サイクル)		
供試体高さ (cm)	315.1 (ベースプレート上面～天板下端)		
載荷点位置 (cm)	342.3 (ベースプレート上面からの高さ)		
境界条件	反力指示点: ベース上面位置で完全拘束		

*) 低降伏点鋼

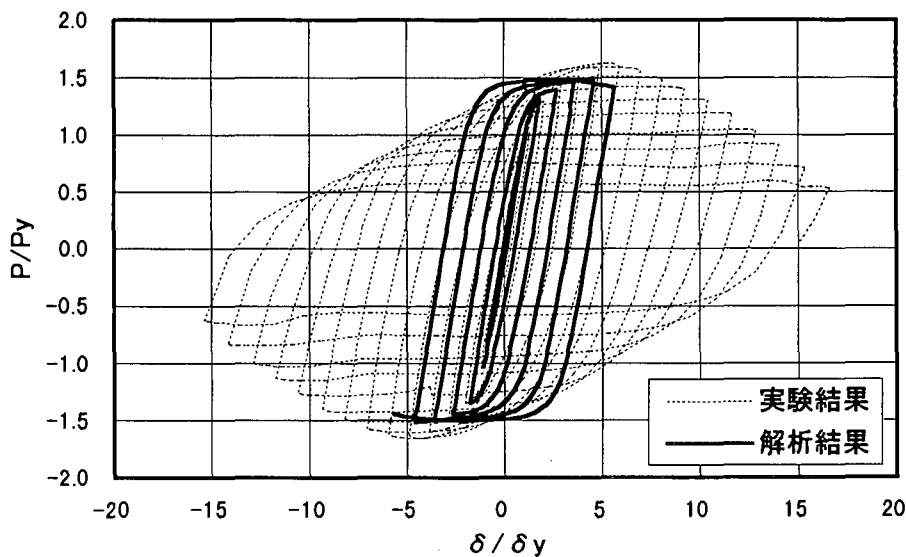


図-11 ヒステリシスループ(B6 供試体: 解析結果)

8. まとめ

繰返し載荷実験により、以下のことを確認した。

- (1) マルチセル構造の内壁の鋼種として「低降伏点鋼」の場合と「普通鋼」の場合での挙動の違い

マルチセル構造の内壁の鋼種に低降伏点鋼を用いた供試体の方が普通鋼を用いた供試体より、劣化勾配が緩やかであり、降伏荷重 P_y に低下するまでの塑性率も大きい。また、最大耐力 P_{max} は普通鋼を用いた供試体の方が大きい。1 サイクルのループの膨らみは低降伏点鋼を用いた供試体の方が大きいため、エネルギー吸収量は低降伏点鋼を用いた供試体の方が大きい。

内壁の鋼種に低降伏点鋼を用いることにより、内壁が座屈して補剛版の損傷を緩和する効果がある。

- (2) マルチセル構造の内壁を載荷方向とした「シアウォール構造」と載荷直角方向とした「ダブルフランジ構造」での挙動の違い

内壁をシアウォールとして配置した場合と、ダブルフランジとして配置した場合を比較すると、最大耐力はシアウォールとして配置した方が大きい。しかし、最大荷重を越えて降伏荷重まで劣化したときを終局状態とした塑性率 μ_u は、内壁の配置には依存しない。

以上のことより、柱の座屈安定性、じん性向上の一般的な方策は、以下のように要約できる。

① 大変形、局部変形を極力防止する。幾何学的非線形性を最小にする。

② 材料の弾塑性効果を最大限に引き出す。材料非線形性を最大にする。

具体的には、次のような構造が有効である。

① 曲げ+軸力を受ける部材を、各々の断面力を分担する機能別構造にする。すなわち、センターコアを設け、軸力を分担させ、従来の外壁は曲げのみを受ける構造とする。こうすることにより、極限状態で $P-\delta$ 効果が最小に押さえられ、曲げ部材のじん性が向上する。マルチセル構造は極限状態で形状を保持し、センターコアの役割を果たす。

② 弾塑性の効果を最大限に引き出すためには、材料特性の異なる複合構造が有効である。例えば、免震支承の鉛+高減衰ゴム、鋼+コンクリートの合成構造などである。履歴曲線を見ると、バイリニア、トリリニア曲線を有する構造である。すなわち、「剛性の高い材料」+「剛性の小さい材料」の組合せが有効である。

鋼製橋脚にコンクリートを充填した構造は、上記を満足しているものと考えられる。その効果を分析すると、以下のようになる。

① コンクリート充填は極限状態で形状を保持する。座屈変形は拘束され、外側にのみ変形する。

② コンクリートがセンターコアの役割を示し、鉛直荷重を極限状態で支持している。

③ コンクリートの弾塑性効果、固体が砂状化するエネルギー吸収効果がある。

マルチセル構造はコンクリート充填と同じ、あるいはそれ以上の効果を期待する構造であり、コンクリートに代わる材料を選択し、断面力に応じた最適配置により、高いじん性を期待できる。

【参考文献】

- 1) 建設省土木研究所、首都高速道路公団、阪神高速道路公団、名古屋高速道路公社、(社)鋼材倶楽部、(社)日本橋梁建設協会：道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書(Ⅰ～Ⅶ)－鋼製橋脚の正負交番繰返し載荷実験－、1997.4
- 2) Y.Fukumoto, T.Takaku, T.Okamoto, H.Tsukahara, M.Koyama, K.Ozeki, "Ultimate strength of steel piers with multi-cell cross section under cyclic loading", Stability and Ductility of Steel Structures Volume 1, 1997.7
- 3) (社)日本橋梁建設協会、鋼製橋脚の弾塑性有限変位 FEM 解析マニュアル、1998.2

(1998年8月17日受付)

SEISMIC DESIGN OF STEEL PIERS USING LOW YIELD STRENGTH STEEL FOR INTERNAL MULTI-CELL PANELS

Tatsumasa TAKAKU, Takashi OKAMOTO, Mamoru KOSHI, Kozo ANDO, Shigeru IKEDA, Hiromitsu Morishita

Multi-cell steel piers that use low yield strength steel for internal panels can provide high ductility and ultimate strength when subjected to large earthquakes. Laboratory tests and analysis showed that piers with multi-cell cross sections provide higher ductility and greater ultimate strength than standard rectangular sections. Low yield strength steel, which has half of the yield point and twice the elongation of mild steel, was produced in mills for this particular project and provided by NKK. The seismic tests on the steel piers were conducted by the Japan Association of Steel Bridge Construction (JASBC), based on a Joint Research Program between PWRI and others.