

鋼製ラーメン橋脚の損傷形態に着目した
繰り返し載荷実験と解析的検討

野村和嗣¹・時田英夫²・尾山靖史³

¹正会員 修（工） 首都高速道路公団 工務部設計技術課（〒100-8390 東京都千代田区霞が関1-4-1）
²正会員 工修 首都高速道路公団 工務部設計技術課（〒100-8390 東京都千代田区霞が関1-4-1）
³正会員 修（工） 株式会社 長大（〒305-0812 茨城県つくば市東平塚730）

1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震における鋼製橋脚の被災分析結果によると、阪神高速道路3号神戸線の鋼製ラーメン橋脚については、78基中26基に座屈が生じていたが、損傷程度が大きいものは数基であったと報告されている¹⁾。さらに、座屈が生じている部位は、単柱形式橋脚のような脚柱部だけでなく、横梁にも見受けられたと報告されている¹⁾。

このような鋼製ラーメン橋脚の被災状況を踏まえて、文献1)では、現在の鋼製ラーメン橋脚の耐震設計においては、脚柱と横梁のバランスや上部構造とのバランスにより、座屈の発生箇所が脚柱基部以外となる可能性を有していることを注意する必要があると報告している。鋼製ラーメン橋脚に大きな地震動が作用した場合に生じる損傷は、大まかに1)脚柱部に損傷が生じる場合、2)横梁部に損傷が生じる場合、3)隅角部に損傷が生じる場合の3つに分類することができる。このうち、応力（ひずみ）集中が起点となって発生する隅角部やその直近における損傷に対しては、コーナープレートを設置するなど構造細目を充実させることにより、応力集中を低減させることが期待される。脚柱部に損傷が生じる場合と横梁部に損傷が生じる場合については、実験やFEM解析を実施することにより、損傷モードや最大耐力および変形性能を評価するとともに、鋼製ラーメン橋脚としての望ましい損傷モードを確認することが必要と考えられる。

本報告は、鋼製ラーメン橋の脚柱部に損傷が生じる場合と、横梁部に損傷が生じる場合を対象に正負交番載荷実験を行い、損傷モードが鋼製ラーメン橋脚の保有耐力や保有変形性能に与える影響を検討し

たものである。さらに、これらの損傷モードをシェル要素を用いた非弾性有限変位解析と簡易モデル（M-φモデル、ファイバーモデル）を用いた非線形静的解析（プッシュオーバー解析）によってどの程度再現できるかを検討した結果を報告するものである。

2. 実験概要

(1) 実験供試体

表-1は、実験供試体の概要を示したものである。供試体の形状寸法は、載荷装置の制約から、柱高さ2.94m、柱間隔は4.5mとした。柱の断面寸法は450mm×450mm、梁の断面寸法は梁幅450mm×梁高550mmとした。これは、実橋脚の1/4～1/5スケールに相当する。供試体1は、脚柱部に損傷が生じる鋼製ラメ

表-1 実験供試体の概要 単位(mm)

	項目	供試体 1	供試体 2
供試体	高さ	2940	2940
	柱間隔	4500	4500
柱基部	断面形状(高さ×幅)	450×450	450×450
	板厚(Flg, Web)	6, 6	6, 6
	縦方向補剛材	50×6	50×6
	材質	SS400	SS400
柱上部	断面形状	450×450	450×450
	板厚(Flg, Web)	6, 6	6, 6
	縦方向補剛材	40×6	50×6
	材質	SS400	SS400
梁部	断面形状(高さ×幅)	550×450	550×450
	板厚(Flg, Web)	16, 16	6, 4.5
	縦方向補剛材	なし	70×9
	材質	SS400	SS400

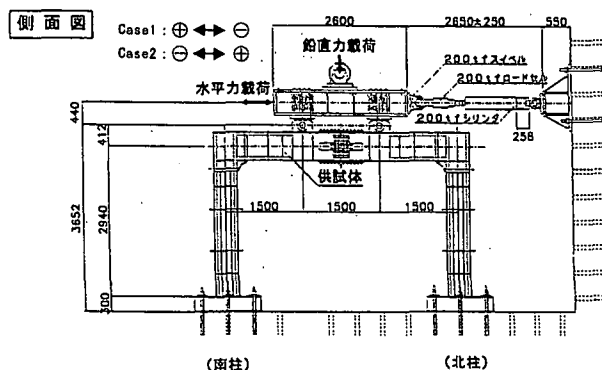


図-1 供試体の載荷状況

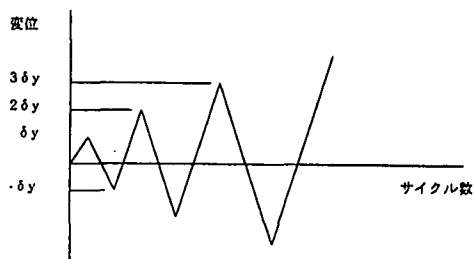
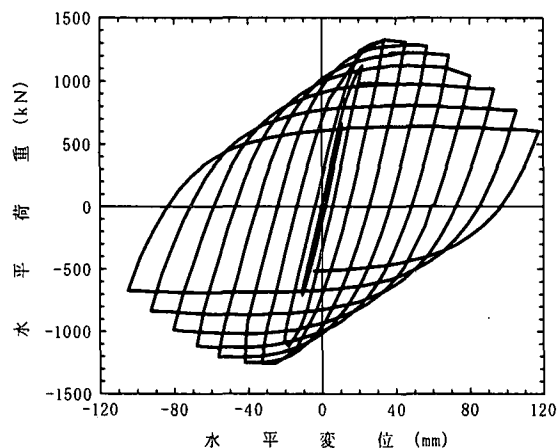
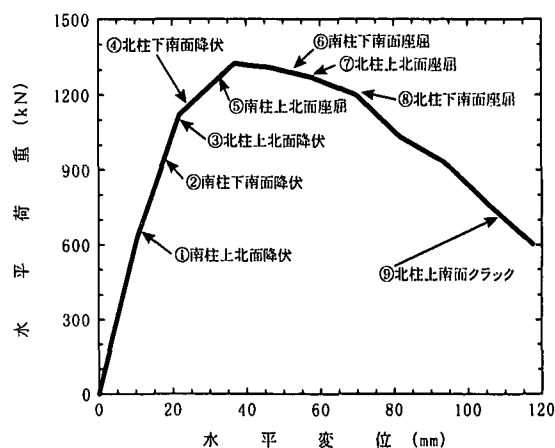


図-2 載荷方法



(脚柱部に損傷が生じる場合、供試体1)

図-3 水平荷重－水平変位関係



(脚柱部に損傷が生じる場合、供試体1)

図-4 包絡線（正側）と損傷過程

ン橋脚を、供試体2は横梁部に損傷が生じる鋼製ラーメン橋脚を想定している。なお、横梁部の損傷形態としては、横梁中央部の腹板に生じるせん断座屈と隅角部付近に生じる座屈の2つがあるが、ここでは載荷装置の制約から、横梁中央部の腹板に生じるせん断座屈ではなく、後者の損傷形態を対象とした。なお、横梁中央部の腹板のせん断座屈に関しては、阪神高速道路5号湾岸線の鋼製ラーメン橋脚の被災状況によると、鋼製ラーメン橋脚の安定性を著しく損なうものではなかったことが報告されている²⁾。

(2) 載荷装置および載荷方法

供試体の設置状況を図-1に示す。実験は、供試体柱基部の軸圧縮応力度が降伏応力度の約10%となるように、載荷梁を介して鉛直荷重を載荷させた後、その鉛直荷重を保持した状態で、水平変位を与えた。供試体に与える水平変位は、供試体の柱部が最初に降伏する時の水平変位 δ_y （以後、降伏水平変位）を基準とし、図-2に示すように、 $\pm 1\delta_y$ 、 $\pm 2\delta_y$ 、 $\pm 3\delta_y$ …と振幅を増加させた。各振幅における繰返し回数は、1回とした。なお、供試体1、2共に、降伏水平変位は柱上端部での計測ひずみが

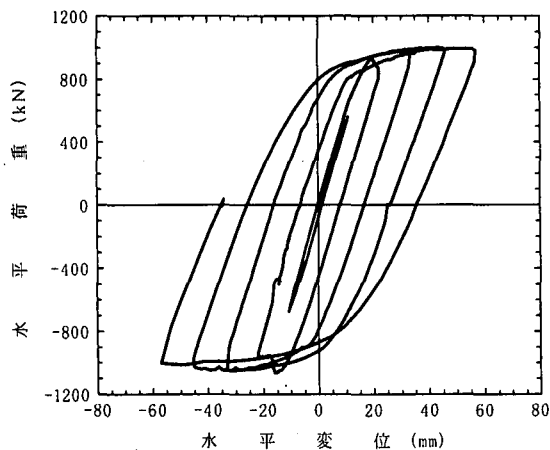
材料試験から得られた降伏ひずみ $\epsilon_y=1733\mu$ に達した時の水平変位量 $\delta_y=11.89\text{mm}$ とした。

(3) 実験結果と考察

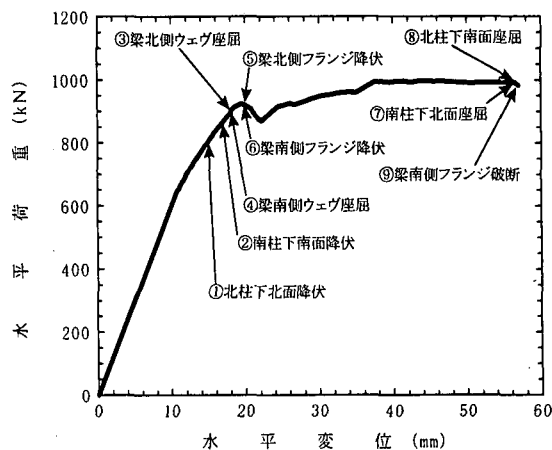
a) 繰返し荷重による水平荷重－水平変位関係

図-3～図-6は、各供試体頂部の水平荷重－水平変位関係を示したものである。供試体1は、柱上端部と柱基部の4カ所に塑性化を生じた後、 $2\delta_y \sim 3\delta_y$ の間に最大荷重に達し、その後徐々に耐力を低下させ、 $10\delta_y$ で水平耐力が降伏耐力 P_y を下回ったため、実験を終了した。 $8\delta_y \sim 9\delta_y$ の耐力低下域では、柱上端部の座屈位置において角部にクラックが生じていた。脚柱部に損傷が生じる供試体1は、塑性ヒンジが複数発生するため、同程度の単柱式の鋼製橋脚に比べて最大水平耐力が大きく得られている。具体的には、最大水平耐力は、降伏水平耐力の約2倍となり、単柱形式の最大水平耐力（＝降伏水平耐力の約1.2～1.4倍）よりも大きい結果となった。

供試体2は、 $1\delta_y \sim 2\delta_y$ の間に梁部がせん断力による局部座屈を発生した後、水平変位の増加に伴い梁部が垂れ下がるような挙動を示した。梁部の座



(横梁部に損傷が生じる場合、供試体2)
図-5 水平荷重—水平変位関係



(横梁部に損傷が生じる場合、供試体2)
図-6 包絡線（正側）と損傷過程

屈発生時には、一時的に耐力低下を生じているが、その後、緩やかに耐力が上昇している。実験は、 $5\delta_y$ において梁部の上フランジの隅角部側にクラックが発生したため終了した。梁部にせん断座屈が発生した時の水平荷重 925kN と水平変位 21.3mm は、それぞれ降伏時の約 1.7 倍、約 1.8 倍に相当する。最大耐力時の水平荷重は、脚柱が損傷する場合（供試体 1）に比べて小さく、水平変位は大きくなった。最大耐力時の水平荷重 998kN と水平変位 46.5mm は、それぞれ降伏時の約 1.8 倍、約 3.9 倍に相当する。

表-2 最大水平耐力と変形性能

		P_y (kN)	δ_y (mm)	P_m (kN)	δ_m (mm)
供試体 1	正側	664	11.9	1330	35.8
	負側	-	-	-1274	-35.7
供試体 2	正側	560	11.9	998	46.5
	負側	-	-	-1046	-40.6

b) 履歴によるエネルギー吸収量

図-7 は、各供試体の水平荷重—水平関係をもとに求めた各ループごとのエネルギー吸収量を示したものである。同図では、脚柱部に損傷が生じる場合（供試体 1）と横梁部に損傷が生じる場合（供試体 2）の各ループごとの履歴形状を比較する形で示しており、横梁に損傷が生じる場合（供試体 2）は、脚柱部に損傷が生じる場合（供試体 1）と同程度のエネルギー吸収性能が有することがわかる。これは、横梁が損傷する場合は、脚柱部が損傷する場合に比較して水平耐力（水平荷重）が小さくなるものの、横方向に膨らんだ履歴ループを描くため、ほぼ同様なエネルギー吸収性能を有することができたものと考えられる。

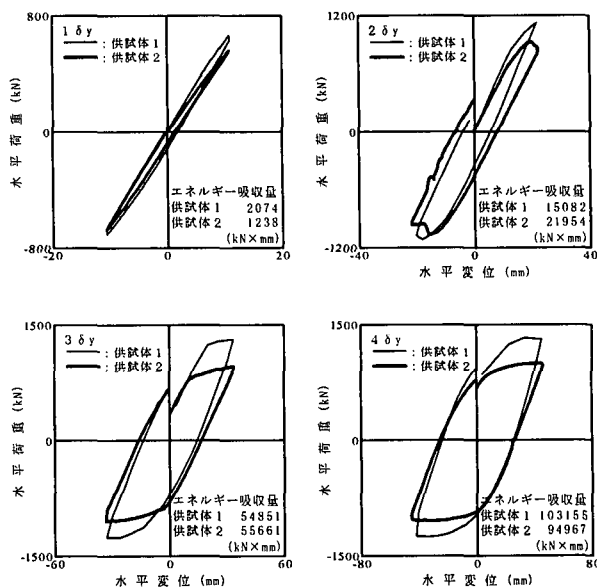


図-7 吸収エネルギー量の比較

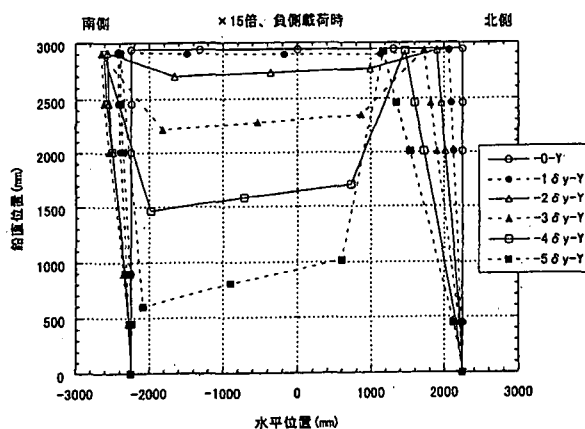
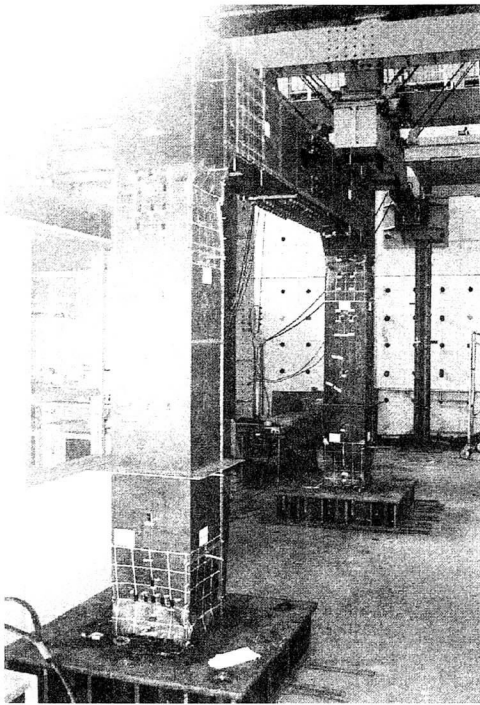
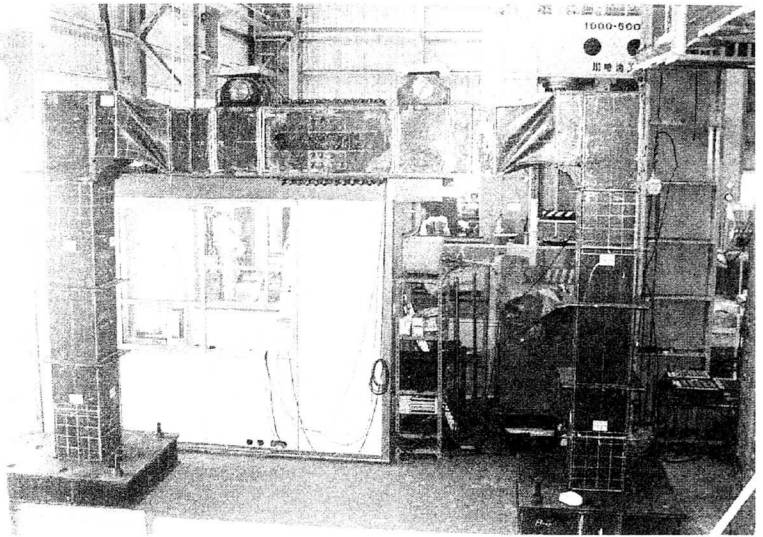


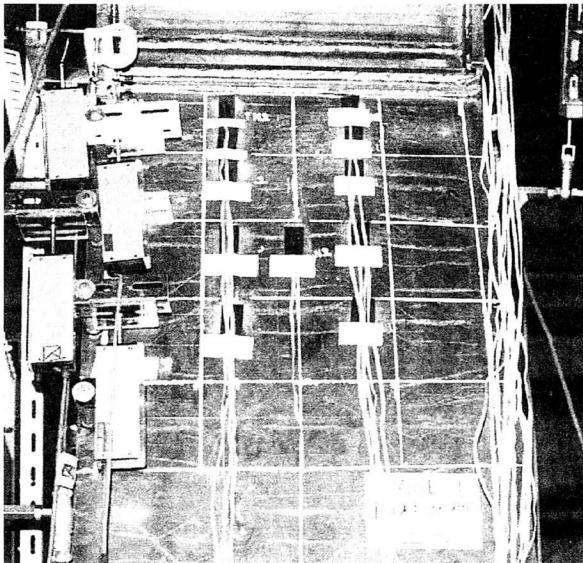
図-8 横梁部の鉛直方向変位量



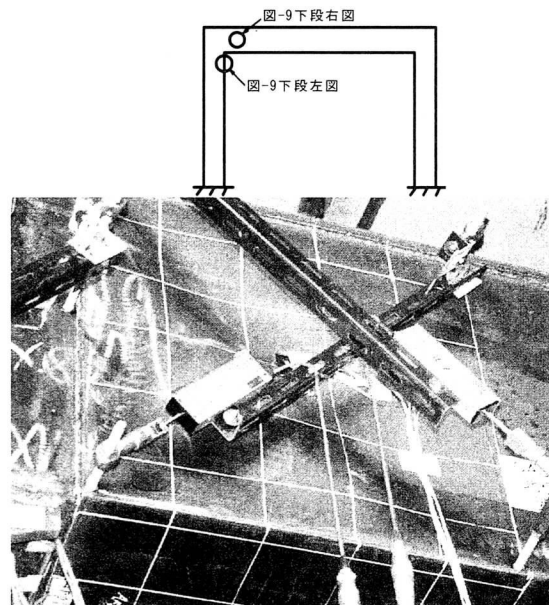
脚柱部に損傷が生じる場合（供試体1）
実験終了時



横梁部に損傷が生じる場合（供試体2）
実験終了時



脚柱部に損傷が生じる場合（供試体1）
局部座屈による凹凸（最大耐力直後， $3\delta_y \sim 4\delta_y$ ）



横梁部に損傷が生じる場合（供試体2）
せん断座屈による凹凸（せん断座屈発生後， $1\delta_y \sim 2\delta_y$ ）

図-9 繰り返し荷重による変形状態

c) 横梁部の水平変位－鉛直変位関係

図-8は、横梁に損傷が生じる場合（供試体2）の横梁に生じた鉛直方向変位量を示したものである。供試体2は、せん断座屈発生後、死荷重にともなう鉛直荷重によって垂れ下がるように大きく変形している。実験終了時の鉛直変位量140mmは、最大水平

耐力時の水平変位46.5mmの2倍以上であり、梁高550mmの約1/4に相当する。また、せん断座屈が生じた直後（ $2\delta_y \sim 3\delta_y$ ）の鉛直方向変位量は、15～50mm程度である。なお、脚柱部に損傷が生じる場合（供試体1）の横梁部の鉛直方向変位量（最大耐力時）は、0～5mm程度であった。

d) 座屈による変形状態

図-9は、各供試体の変形状態を示したものである。供試体1は、柱基部に比較して座屈強度が劣る柱上端部の補剛板パネルに座屈が先行した後、その進展に伴い、柱基部補剛板パネルにも座屈が発生している（同図上段左）。なお、柱基部補剛板の座屈パラメータは、それぞれ $R_F=0.37$, $R_R=0.41$, $\gamma/\gamma_{req}=1.28$ であり、柱上端部は $R_F=0.54$, $R_R=0.55$, $\gamma/\gamma_{req}=1.05$ である。最大耐力直後の変形状態からは、南柱上端部に発生した局部座屈による凹凸が目視で確認できることがわかる（同図下段左）。これより、耐力低下は、南柱上端部の局部座屈による損傷が大きくなったために生じたものと推測できる。供試体1は、柱上端部に損傷が集中することなく、柱の複数箇所に損傷（塑性化）が分散されているため、高い耐震性を有することができたものと考えられる。

供試体2は、せん断座屈を発生した後、せん断座屈による損傷が進展することにより、横梁部がアコーディオンのように伸び縮みする挙動を示した（同図上段右）。これにより、梁は押込み側の柱に水平力を伝達できなくなり、水平力が引抜き側の柱に集中する結果となった。せん断座屈による凹凸は、 $1\delta y \sim 2\delta y$ の間に目視で確認されるほど大きくなっていることがわかる（同図下段右）。

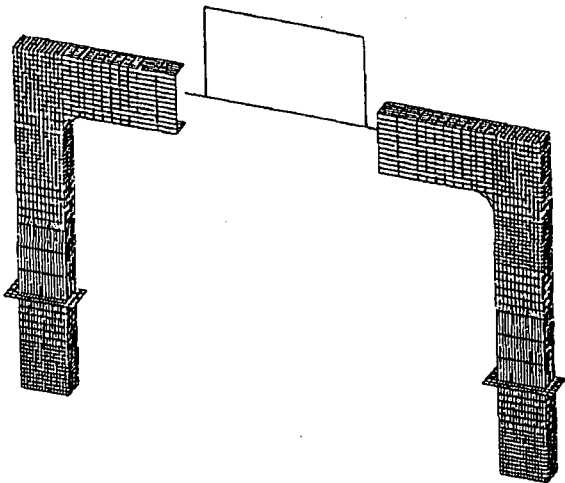


図-10 解析モデル

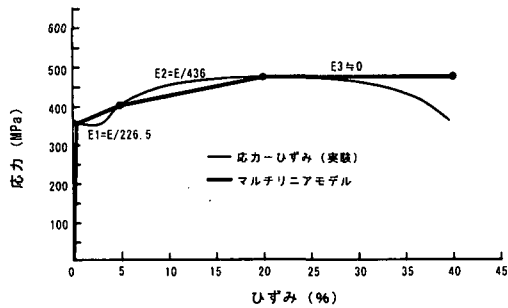


図-11 鋼材の応力-ひずみ関係

3. 実験結果と解析結果の比較

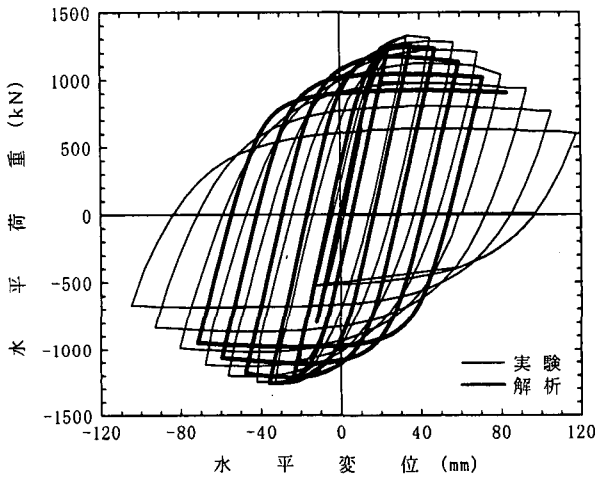
(1) シェル要素を用いた非弾性有限変位解析

シェル要素を用いた非弾性有限変位を実施した（解析コード：DIANA）。解析モデルは、図-10に示すように、供試体の対称性を考慮して1/2モデルとした。荷重の載荷方法は、実験と同様に、載荷梁の中央部に鉛直荷重を載荷した後、鉛直荷重を保持させた状態で、載荷梁を介して強制変位を繰り返し作用させた。要素には、4節点シェル要素を使用し、解析手法には、Total Lagrangian法を採用した。図-11は、仮定した鋼材の応力-ひずみ関係を示したものであり、材料試験の結果をもとに、ひずみ効果の影響を考慮したマルチリニア型とした。履歴硬化則は、移動硬化則を仮定した。

(2) 実験結果と非弾性有限変位解析結果の比較

a) 水平荷重-水平変位関係の比較

図-12及び図-13は、実験結果とFEM解析結果による各供試体の水平荷重-水平変位関係と比較したものである。解析モデルの初期剛性は、いずれも実験結果の初期剛性に比較して小さくなっているが、



脚柱部に損傷が生じる場合（供試体1）

図-12 水平荷重-水平変位関係の比較

これは実験結果がベース部の浮き上がり等による誤差を含んでいるためと考えられる。同図より、脚柱部に損傷が生じる場合は、解析結果の方が実験結果の最大耐力よりもわずかに小さくなっているものの、実験結果の最大耐力とそれに至るまでの変形性能を概ね良く再現していることがわかる。最大耐力以降

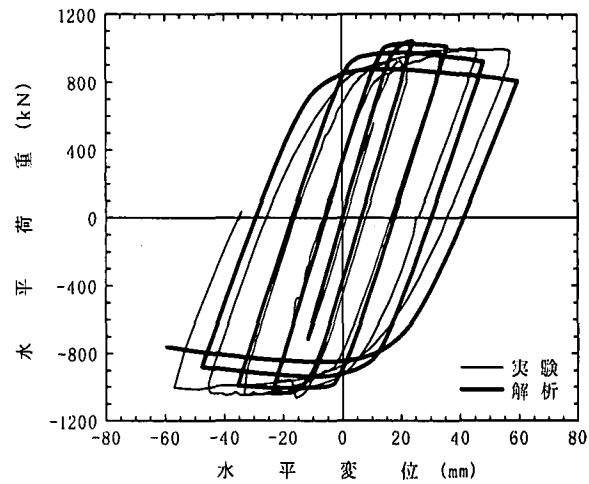
も同じように、解析結果の方が実験結果よりも耐力が小さくなっているものの、耐力低下域の挙動は概ね良く再現できていることがわかる。

図-13より、横梁部に損傷が生じる場合は、 $2\delta_y$ 以降の解析結果と実験結果を比較すると、 $2\delta_y$ の正側では解析結果の方が実験結果に比較して耐力が大きくなり、対する負側では解析結果と実験結果の耐力がほぼ等しくなっていることがわかる。 $3\delta_y$ の正側では、解析結果と実験結果の耐力が等しく、負側では解析結果の方が小さくなっている。また、 $4\delta_y$ 以降は、解析結果の方が実験結果に比較して耐力が小さい。実験結果は、実験終了まで緩やかに耐力を上昇させ、明確な最大耐力を示していないのに対して、解析結果は水平変位20mm程度で最大耐力に達した後、耐力低下を生じている。なお、最大耐力の発生位置は異なるものの、最大耐力（正側）は実験結果998kNと解析結果1041kNでほぼ近い値となった。

供試体2における繰り返し荷重の初期（ $2\delta_y$ の正側）に生じた耐力の差は、実験結果が初期不整や残留変位を含んでいるのに対して、解析では初期不整や残留変位の影響を考慮していないことが原因の一つとして考えることができる。また、実験結果が耐力低下を生じていないのに対して、解析結果が耐力低下を生じた原因としては、解析が横梁のせん断損傷（曲げとせん断の降伏判定等）を精度良く評価できていないことや、実験では装置によって横梁の鉛直方向変形が拘束されていたこと等が考えられる。これについては、より詳細な検討が必要である。

b) 変形状態の比較

図-14は、実験結果と解析結果の柱及び梁の変形状態を比較したものである。同図より、横梁に損傷が生じる場合は、解析結果と実験結果の横梁の鉛直

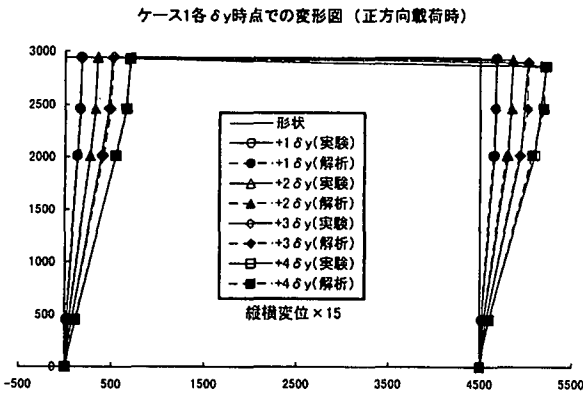


横梁部に損傷が生じる場合（供試体2）

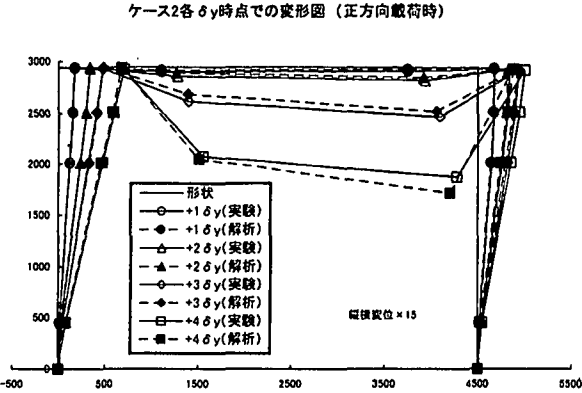
図-13 水平荷重－水平変位関係の比較

変位量に多少違いが見られるものの、全般的にはいずれの場合も解析結果は実験結果を良く再現できている。

図-15は、FEM解析による局部座屈の発生位置を示したものである。脚柱部に損傷が生じる場合は、最大耐力直後（ $3\delta_y \sim 4\delta_y$ ）の局部座屈の様子を示したものであるが、実験結果（図-9下段左参照）と同様に左側柱上端部の局部座屈による凹凸が確認できる。横梁部に損傷が生じる場合は、実験結果で横梁に局部座屈が生じた $1\delta_y \sim 2\delta_y$ 時の局部座屈の様子を示したものであるが、実験結果（図-9下段右側参照）と同様に横梁部にせん断座屈による凹凸が確認できることがわかる。

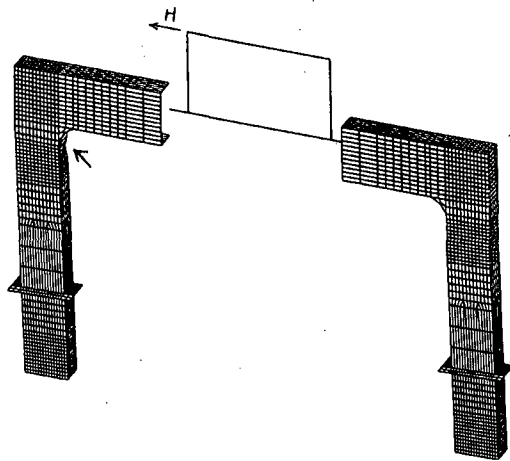


脚柱部に損傷が生じる場合（供試体1）



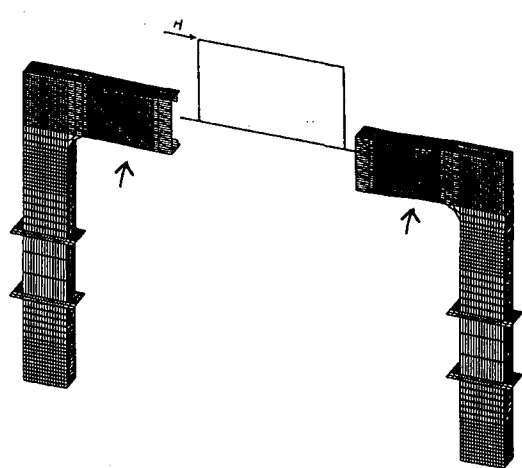
横梁部に損傷が生じる場合（供試体2）

図-14 変形状態の比較



脚柱部に損傷が生じる場合（供試体1）

最大耐力直後 $3\delta_y \sim 4\delta_y$



横梁部に損傷が生じる場合（供試体2）

せん断座屈発生後 $1\delta_y \sim 2\delta_y$

図-15 FEM解析による座屈発生位置

(3) 非線形はり要素を用いたプッシュオーバー解析

脚柱部が損傷する供試体1を対象に、非線形はり要素（M- ϕ モデル、ファイバーモデル）を用いたプッシュオーバー解析（非線形静的解析）を実施し、このような簡易的な非線形解析によって実験結果の最大耐力や変形性能及び損傷過程をどの程度再現できるかを検討した。図-16は、プッシュオーバー解析に用いた供試体1の骨組モデルを示したものである。

図-17は、解析結果を示したものであり、実験結果の最大耐力と最大耐力までの変形性能は、非線形はり要素を用いた簡易解析によっても概ね良く再現できることがわかる。初期剛性については、骨組モデルにおいて柱のせん断変形を考慮することによ

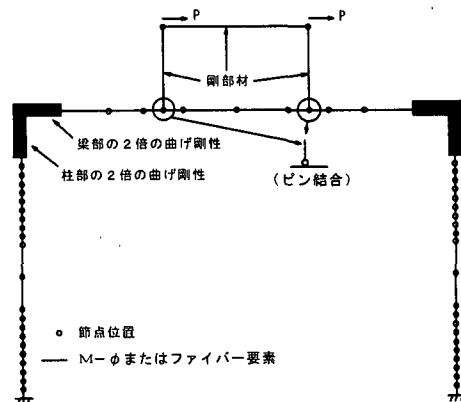


図-16 骨組みモデル

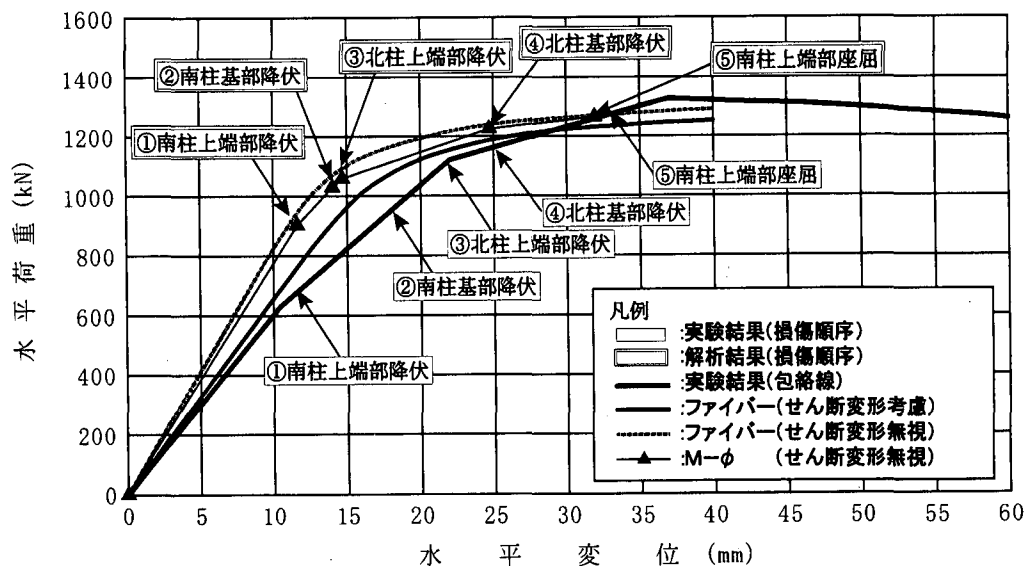


図-17 非線形はり要素を用いたプッシュオーバー解析の結果

て実験結果の初期剛性を概ね再現できていることから、柱のせん断変形による影響を無視できないことが推測される。

4. まとめ

(1) 脚柱部に損傷が生じる鋼製ラーメン橋脚は、複数箇所に塑性化を許容することができるため、ラーメン構造系としては、大きな耐荷力と変形性能を有することが確認された。

(2) 横梁部に損傷が生じる鋼製ラーメン橋脚は、最大耐力以後の耐力低下はわずかであるが、脚柱部に損傷が生じる鋼製ラーメン橋脚に比較して最大耐力は小さくなった。

(3) 横梁部に損傷が生じる鋼製ラーメン橋脚では、横梁部の鉛直方向への変形が大きいため、車両の走行性等に支障をきたす可能性がある。

今後は、FEM解析によるパラメトリック解析を実施し、複数の塑性ヒンジが発生する不静定鋼構造物の変形性能についての実用的な評価手法および梁のせん断座屈による損傷の許容損傷レベルの推定を検討する必要があるものと考えられる。

参考文献

- 1) (社) 土木学会関西支部：大震災に学ぶ－阪神・淡路大震災調査研究委員会報告書－，第1巻，2.3.鋼製橋脚，1998.6.
- 2) 阪神高速道路公団（監修）：大震災を乗り越えて－震災復旧工事誌－，1997.9.
- 3) 鋼橋技術研究会：阪神・淡路大震災被害調査研究部会報告書，1999.2.
- 4) 阪神高速道路公団監修：阪神高速道路・震災から復旧まで・写真集，（財）阪神高速道路技術センター，1997.1. 2) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編，1996.
- 5) 建設省土木研究所他：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・鋼製橋脚の正負交番繰返し載荷実験・，1997.4.
- 6) 田嶋，半野，池田，興：矩形鋼製橋脚の変形性能に関する載荷実験，構造工学論文集，vol.43A, pp1251-1258, 1998.3.
- 7) 山崎，半野，田嶋，船本：首都高速道路における既設鋼製橋脚の耐震補強（上，下），橋梁と基礎，1999.6-7.