

鋼製ラーメン橋脚の弾塑性面内挙動に関する実験的研究

渡邊英一¹・杉浦邦征²・永田和寿³・古池正宏⁴・徳林宗孝⁵・陵城成樹⁶

¹フェロー会員 工博・Ph.D. 京都大学大学院教授 工学研究科 土木工学専攻（〒606-8501 京都市左京区吉田本町）

²正会員 Ph.D. 京都大学大学院助教授 工学研究科 土木システム工学専攻（〒606-8501 京都市左京区吉田本町）

³正会員 工修 京都大学大学院助手 工学研究科 土木工学専攻（〒606-8501 京都市左京区吉田本町）

⁴正会員 工修 阪神高速道路公団設計課長 工務部 設計課（〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3）

⁵正会員 工修 阪神高速道路公団設計係長 工務部 設計課（〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3）

⁶正会員 工修 ㈱ニュージェック課長 技術開発部（〒542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19）

1. はじめに

平成7年1月17日に起きた兵庫県南部地震によって生じた被災から学んだ鋼製橋脚の耐震設計に関する教訓は以下のようなものである。

- ①橋脚の強度を上昇させずに変形性能を高めること
- ②橋脚に入力する地震動を軽減する工夫をすること
- ③橋梁構造物全体が一つのシステムとして、バランスのとれた耐震設計を行うこと
- ④可能な限り動的解析により実挙動を予測し、その安全性を確認すること

震災以前より鋼製橋脚の耐震性ならびにその設計法に関する検討は、数多く行われてきたが、それらのほとんどは単柱形式の鋼製橋脚の強度と変形能、とりわけ保有水平耐力照査法に基づく耐震設計法に関して多くの研究が行われ、その成果が実設計に生かされつつある。しかし、ラーメン形式の鋼製橋脚に関する検討は極めて少ない^{1)~12)}。それらの成果は道路橋伺方書に反映されてきている¹³⁾。

このような状況を踏まえ、本研究は、①および③の方策をより具体化する意味で、鋼製ラーメン橋脚に注目し、その面内方向の強度と変形能を明らかにすることを目的とする。最終的にはこのような鋼製橋脚の耐震設計における基本的な考え方をまとめるための基礎データを得るものである。なお、本研究は、阪神高速道路公団と京都大学大学院との間で実施された平成10年度の共同研究の一部、単調載荷実験結果、繰り返し載荷実験および対比のために実施した解析結果について報告するものである。

2. 載荷実験およびFEM解析の概要

ラーメン形式の橋脚の面内挙動に関しては、柱をつなぐはり部ならびにはり部と桁構造をつなぐ支承構造が複雑な荷重伝達形態を発生させ、図-1に示すように種々な課題について検討する必要がある。例えば、ラーメン形式の特有な力学性状としては、フレームアクションが挙げられ、柱部材に作用する変動軸力が、柱の水平耐力については脚全体の水平耐力に及ぼす影響を明らかにする必要がある。特に、終局時における柱の水平力の分担率を明らかにする必要がある。同時に、はり部には繰り返しせん断力が作用することとなりウェブの繰り返しせん断座屈が発生する可能性がある。また、上部構造の転倒モーメントがさらに局所的なせん断力を増加させることも想定しなければならない。

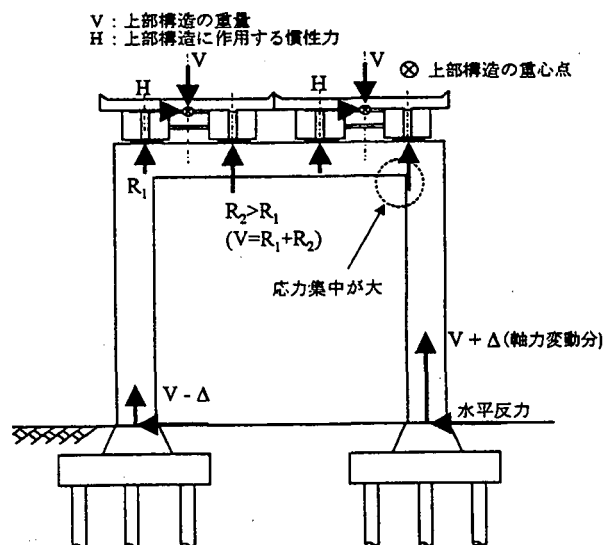


図-1 ラーメン橋脚における検討課題の一例

(1) 載荷実験

本研究では、対称形に近い一層の門型鋼製ラーメン橋脚として阪神高速道路・湾岸線・岸 P34 橋脚を取り上げ、図-2 に示すような載荷形式により、実橋脚の約 1/17 程度に縮尺し、製作した標準モデルに対して単調漸増載荷および繰り返し漸増振幅載荷実験を行った。

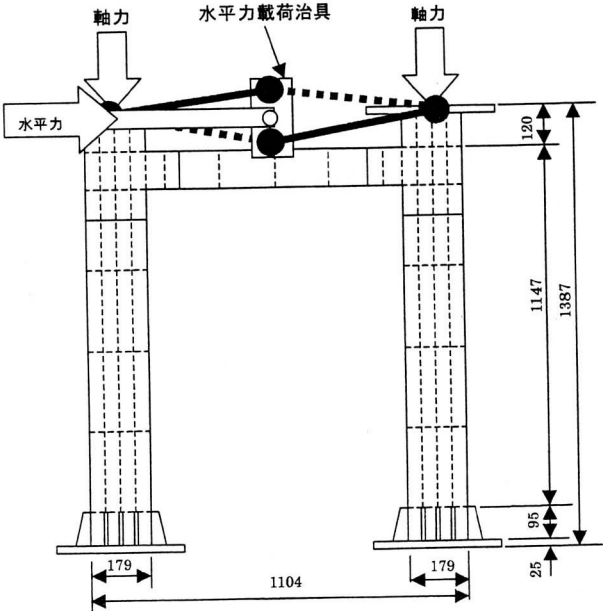


図-2 試験体および載荷方法(単位 mm)

なお、鋼製橋脚の強度および変形能を支配する幅厚比、縦方向補剛材の剛比は、実構造物のそれらに準じ、表-1 に示す値を用いた。また、試験体製作には、SS400 の 1.6mm (一般部) および 2.3mm (隅角部) の鋼板を用い、断面寸法の 1/200 程度の初期不整に納まるよう慎重に溶接組み立てを行った。これらの使用鋼材の材料試験結果を表-2 にまとめて示す。

一方、載荷に関しては、柱部材直上の鉛直載荷用の 2 台のアクチュエータは荷重制御とし、柱部材基部の軸力比 σ_c/σ_Y が、実橋脚の軸力比レベル相当 (降伏軸圧縮力の 4.15%) に達するまで軸力を載荷した。ここで、軸力比 σ_c は実橋脚において上部構造死荷重反力、および橋脚自重により生じる軸圧縮応力を示し、 σ_Y は鋼材の降伏点応力である。また、水平方向載荷は、ふたつの柱の頭上部に均等に載荷できるように、また、ラーメンはり部材の変形 (曲げ変形および軸変形) を拘束しないよう柱頭部をヒンジでリンクしたパンタグラフ構造を採用し、柱頭部の平均水平変位を対象に変位制御で行った。水平変位計測は、基部の弾性変形を取り除くための基点を設け、高精度ひずみゲージ式変位計を用いて行った。

なお、写真-1 には実験状況を示す。他の計測項目としては、柱基部の平均曲率、隅角部のせん断回転角、柱およびはりのたわみ形状、代表点における曲げひずみ (フランジ板上) を対象として、コンピュータによるオンライン計測を実施した。

表-1 補剛箱断面の座屈パラメータ

	柱基部	はり中央部
板パネルの幅厚比 パラメータ R_r	0.438	0.731
板パネルの幅厚比 パラメータ R_f	0.363	0.481
補剛材剛比 γ/γ^*	1.47	2.46

表-2 鋼薄板の材料特性 (ロール方向)

板厚 (mm)	弾性係数 (GPa)	ポア ソン 比	降伏応力 (MPa)	引張強度 (MPa)	破断 伸び (%)
1.6	205	0.33	194	308.6	60.8
2.3	204	0.33	174	320.7	66.0

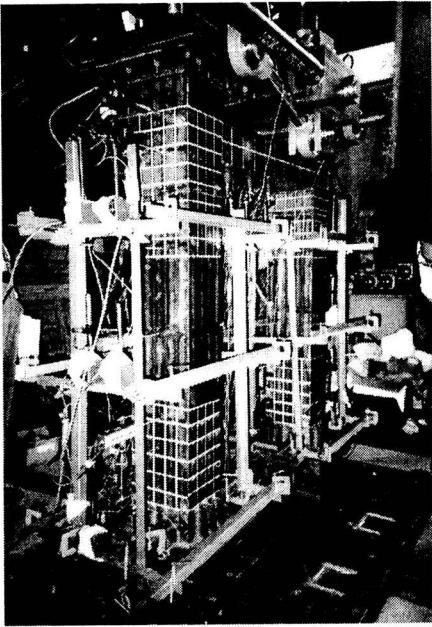


写真-1 載荷状況

(2) ABAQUS による弾塑性有限変位解析

鋼製橋脚を構成する薄肉要素の局部変形をも考慮した解析を行うためには、シェル要素を用いた詳細な解析を行わなければならない。ここでは、汎用有限要素解析コード ABAQUS¹⁴⁾を用いて、ラーメン橋脚の弾塑性有限変位解析を行い、実験結果と比較した。なお、鋼箱断面の主板、縦方向補剛材、ダイアフラムのすべてにシェル要素を用いるが、ワーク

ステーションに実装された主メモリの制限から、構造物および変形の対称面を考慮して、ラーメン橋脚の1/2を解析対象とし、解析を行った。この要素分割の概要を図-3に示す(総節点数=18734, 総要素数=18648)。ここでは、ラーメン橋脚の基本的挙動を検討することを目的としたため、残留応力ならびに初期変形は考慮しなかった。また、材料の非弾性挙動には、von Misesの降伏関数、連合流れ則および等方硬化則を仮定して解析を行った。

別途、局部座屈を考慮しない場合の検討として、はり要素で鋼製橋脚をモデル化して、弾塑性有限変位解析を行った。

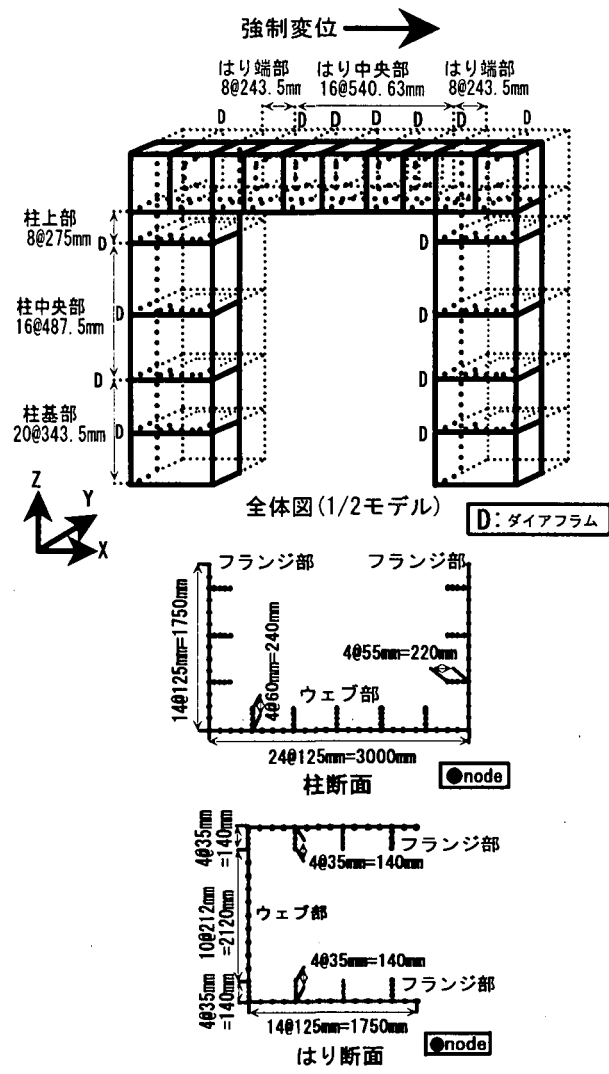


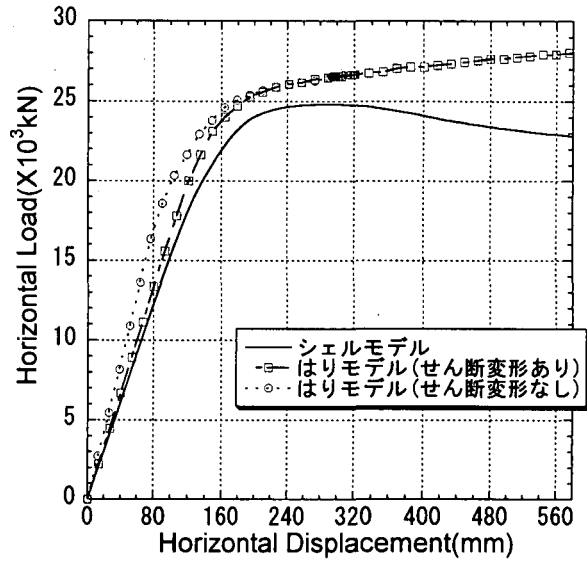
図-3 要素分割

3. 結果および考察

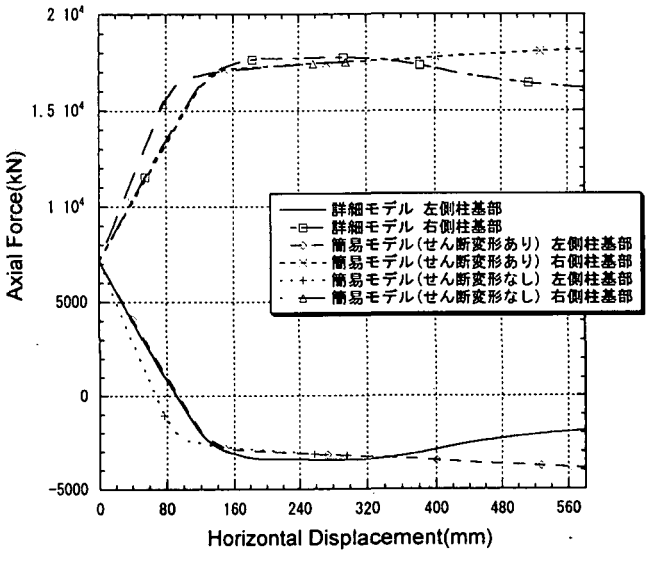
(1) 予備検討

それぞれシェル要素およびはり要素を用いた解析モデルにそれぞれ降伏変位 δ_y の10倍の水平変位まで単調荷重の解析を変位制御で行った。水平荷重-水平変位曲線の比較結果を図-4(a), フレームアク

ションによる軸力変動曲線の比較結果を図-4(b)に示す。なお、水平荷重は2載荷点の水平力を総和したもの(シェルモデルでは総和の2倍)であり、また、水平変位は2載荷点の変位の平均値を用いている。また降伏条件を、シェルモデル、はりモデルともに、いずれかの要素でミーゼスの相当応力が材料の降伏応力に達した時点の載荷位置の水平変位と水平荷重を降伏変位および降伏荷重とした。



(b) 水平荷重-変位関係



(b) 軸力変動曲線

図-4 単調載荷下での荷重-変位関係(解析)

シェルモデルにおいては、圧縮柱側の隅角部・はり側のウェブが先行して降伏し、その後柱基部において局部座屈が発生し始め、軸力変動差最大付近(最大耐荷力付近以前)において、フレームアクションによるはり部へのせん断力が最大となり、はり部のウェブ面にせん断力に起因する局部座屈が発生した。

一方、最大耐力力は、降伏水平荷重($11.74 \times 10^3 \text{ kN}$)の約 2.11 倍となり、初期降伏以後の余剰耐力がかなり大きいことがわかる。ここで、最大耐力力点のはり部におけるミーゼスの応力分布図を図-5 に示す。この分布図から隅角部内側コーナーでの応力集中が顕著で、しかもはり中央部には、せん断力の影響と思われるウェブ面の局部座屈が見て取れる。しかし、最大耐力力点に達した後、水平耐力は緩やかに減少し続けるが、変形性能にも優れていることがわかる。軸力変動曲線を見ると、ちょうど柱基部の局部座屈が起こり始めたところから左右の軸力変動は緩やかとなりるが、左右柱基部での軸力変動差は、最大時で $21.18 \times 10^3 (\text{kN})$ もの差が生じている。

一方、はりモデルによる解析では、局部座屈を考慮できないため、明確な最大耐力力点、耐力の劣化を十分表現できていない。特にシェルモデルに比べて全体的に荷重-変形曲線が右上がりであることがわかる。また初期剛性に注目してみると、はりモデルによる解析においてせん断変形を考慮しなければ、シェルモデルの剛性との整合性が劣ることがわかる。しかし、せん断変形を考慮することで両者の差異は小さくなり、はりモデルによっても実挙動に近づくことがわかる。

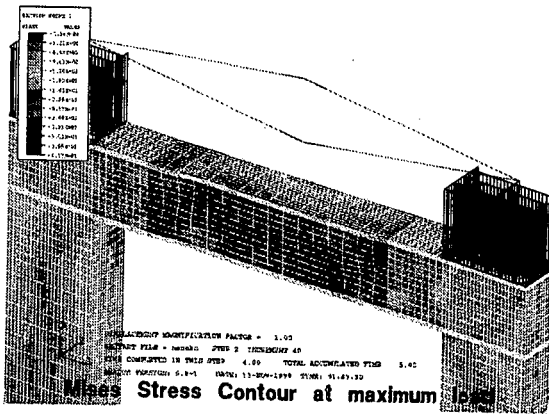


図-5 最大耐力力点時のはり部の応力 Contour 図

(2) 単調荷重実験結果に関する考察

図-6 には単調荷重実験から得られた水平荷重 H と水平変位 δ との関係と汎用有限要素解析コード ABAQUS を用いて、弾塑性有限変位理論に基づき求めた水平荷重 H と水平変位 δ との関係を比較して示している。ただし、解析においては部材断面内の残留応力、および補剛板の初期たわみは考慮していない。

図中の○は供試体の面内方向の降伏水平荷重 H_Y 、および降伏水平変位 δ_Y を示している。 H_Y 、および δ_Y は圧縮力下にある柱基部で圧縮側の補剛板が von Mises の降伏条件を満足した場合の水平荷重と

水平変位である。実線は実験結果を示し、■は実験で得られた最高耐力力点を示している。また、破線は解析結果を示し、●は解析で得られた最高耐力力点を示している。

実験結果から、降伏点以降もラーメン脚の耐力力は上昇し、降伏水平力 H_Y のおよそ 3 倍の水平荷重において最高耐力力点に達し、緩やかに耐力力は減少していることがわかる。最高耐力力点における変形性能 δ/δ_Y は約 14 を示し、単柱式橋脚を対象とした実験結果と比較して極めて大きな値を示し、不静定構造であるラーメン形式橋脚が優れた変形性能を有することが明らかになった。

次に実験結果と解析結果とを比較した場合、降伏点に達するまでは、両者は良く一致しているが、降伏点以降において若干の差異が見られる。これは、解析において、断面内の残留応力、および補剛板の初期たわみ（面外変位）を考慮していないためと考えられる。今後これらを解析モデルに反映し、解析精度を向上させていく必要がある。

また、解析結果より、およそ耐力力が最高耐力力点の 95% 程度に低下した時、圧縮応力状態にある柱基部だけでなく、はり部材の隅角部近傍のフランジ部 2 か所においても局部座屈による面外変形が発生していることが明らかになった(図-7 に示すワイヤー図を参照)。このことは、不静定次数が高いラーメン式橋脚の場合、単柱式橋脚とは異なり、1 箇所の局部座屈が構造全体の崩壊を決定せず、不静定次数以上の部位に明確な局部座屈が生じるまで、構造的安定性を保持することができ、極めて粘り強い構造であることが理解できる。しかし、保有水平耐力照査時において基礎の設計に用いる入力荷重が大きくなる可能性が有り、初期降伏レベルと終局耐力レベルのバランスに十分な配慮が必要と考えられる。

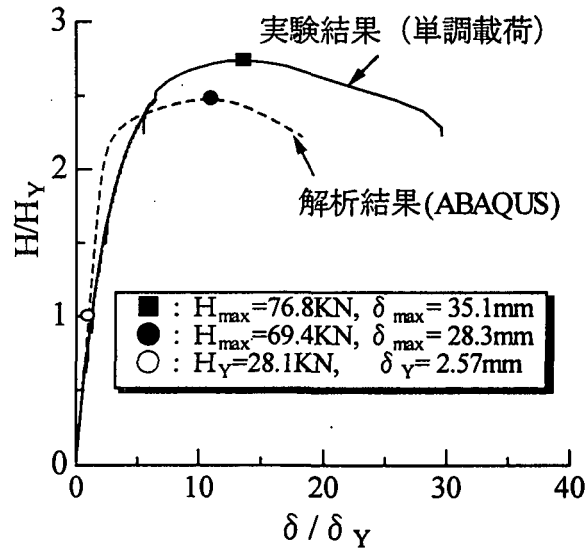


図-6 単調荷重実験結果

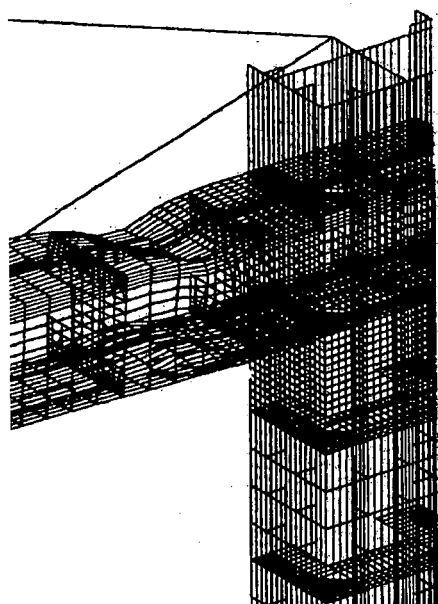


図-7 はり部の局部座屈性状（解析結果）

(3) 繰り返し載荷実験結果に関する考察

図-8には繰り返し載荷実験から得られた水平荷重 H と水平変位 δ との関係と汎用有限要素解析コードABAQUSを用いて、弾塑性有限変位理論に基づき求めた水平荷重 H と水平変位 δ との関係を比較して示している。単調載荷の場合と同様に、解析においては部材断面内の残留応力、および補剛板の初期たわみは考慮していない。

図中の実線は実験結果を示し、■は実験で得られた最高耐荷力点を示している。また、破線は解析結果を示し、●は解析で得られた最高耐荷力点を示している。

繰り返し載荷実験結果から、単調載荷時の挙動と同様に降伏点以降もラーメン脚の耐荷力は上昇し、降伏水平力 H_Y のおよそ3倍の水平荷重において最高耐荷力点に達し、緩やかに耐荷力は減少していることがわかる。最高耐荷力点における変形性能 δ/δ_Y は約8を示し、単柱式橋脚を対象とした実験結果と比較しても極めて大きな値を示し、優れた変形性能を有することが明らかである。

次に実験結果と解析結果とを比較した場合、入力変位の反転時において弾性除荷に続く再載荷過程で、早期に剛性低下を生じるが十分再現されていないことが分かる。これは、解析において、鋼材の非弾性挙動である硬化則として等方硬化を仮定しているためであり、移動硬化則を導入することでより現実的な履歴性状が予測できると考えられる。より高度な材料モデルを用いて、解析精度を向上させていく必要がある。

また、実験終了間近において、はり部隅角部近傍（内側）に小さな割れが観察された。初期の耐荷力

低下は、柱基部の局部座屈によるものであるが、大変形時の著しい耐力低下は、この割れに依存するところもあると考えられる。また、圧縮側補剛板の局部座屈の波形は、一面で外向きとなり、初期たわみ等の影響があったと考えられる。

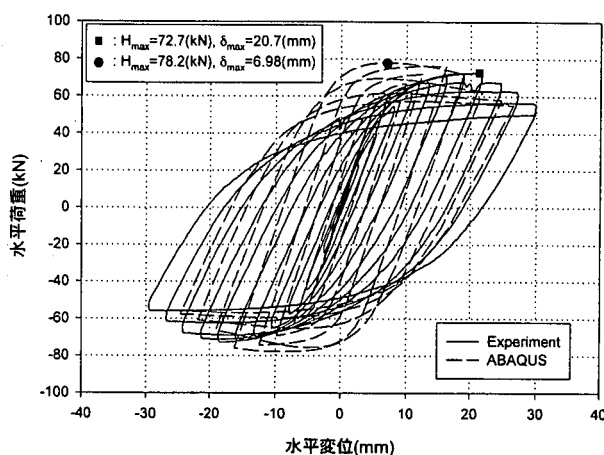


図-8 繰り返し荷重下での履歴曲線

4. 結論

本研究で、ラーメン形式の鋼製橋脚を対象に行った実験的検討・解析的検討から得られた結果をまとめると次のようになる。

- ① ラーメン面内方向単調載荷実験の結果、鋼製ラーメン橋脚は、単柱式鋼製橋脚と比較して極めて優れた変形性能、および耐荷力を有し耐震性に優れていることが明らかになった。
- ② 弾塑性有限変位解析と実験結果とを比較した場合、降伏点以降の挙動に若干の差異が見られるが、崩壊に至る経緯については、解析結果は実験を定性的に良く近似していることが明らかになった。
- ③ 今後、部材断面内の残留応力や補剛板の初期たわみを考慮した解析を実施し、解析精度の向上を図り、さらには、より簡便で合理的な解析モデルへと発展させることが必要である。
- ④ 鋼製ラーメン橋脚のフレームアクションによる軸力変動は、非常に大きく柱が引張状態に達する場合もあり、鋼製ラーメン橋脚全体に与える影響は非常に大きいと考えられる。
- ⑤ 初等理論に基づくはり要素を用いた弾塑性有限変位解析結果は、シェル要素を用いた解析結果と大きくかけ離れるが、せん断変形を考慮したはり要素を用いることにより実挙動に近い結果を得ることができることが分かった。

謝辞：本実験ならびに解析の実施に際して、京都大学大学院工学研究科土木工学専攻修士課程1回生・國司了君の献身的な協力を得た。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 酒造敏広，事口寿男：鋼製ラーメン橋脚の崩壊性状と変形性能に関する実験的検討，構造工学論文集 Vo.37A，pp.121-134，1991年3月。
- 2) 宇佐美勉，戸谷和彦，鈴木森晶，是津文章：繰り返し荷重を受ける鋼製門型ラーメンの強度と変形能に関するパイロット実験，構造工学論文集 Vo.41A，pp.289-300，1994年3月。
- 3) 山田尚之，青木徹彦：鋼製八角形断面柱を有するラーメン隅角部の静的および繰り返し強度特性に関する実験的研究，構造工学論文集 Vo.43A，pp.197-206，1996年3月。
- 4) 土木学会・鋼構造新技術委員会 最終報告書（耐震設計研究WG），1996年5月
- 5) 青木徹彦，長谷川桂，山田将樹：鋼製ラーメン橋脚隅角部モデルの曲げおよび繰り返し強度特性に関する実験的研究，構造工学論文集 Vo.43A，pp.177-186，1997年3月。
- 6) 酒造敏広，事口寿男：鋼変断面門型ラーメンの非弾性地震応答性状と崩壊モードに関する研究，構造工学論文集 Vo.43A，pp.205-216，1994年3月。
- 7) 三木千寿，四十沢利康，穴見健吾：鋼製橋脚ラーメン隅角部の地震時脆性破壊，土木学会論文集，No.591，pp.273-281，1998年4月。
- 8) 宇佐美勉：Pushover 解析による鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査 第1回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，1998年1月。
- 9) 高橋実，西川和廣，村越潤，松田宏：角補強を施した矩形断面橋脚の変形性能に関する数値解析，第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集，pp.77-84，1998年11月。
- 10) 中島章典，小野寺理：鋼製門形ラーメン橋脚の大地震時弾塑性挙動と耐震設計法におけるエネルギー一定則の適用性について，第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集，pp.135-142，1998年11月。
- 11) 佐々木栄一，臼井節，三木千寿：鋼製門型ラーメン橋脚隅格部に対する耐震要求性能，第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集，pp.157-164，1998年11月。
- 12) 池田学，山田正人，市川篤司，安波博道，富永知徳，寺田昌弘：鉄道鋼ラーメン橋脚の耐震設計法に関する検討，第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集，pp.143-150，1998年11月。
- 13) (社)日本道路協会：日本道路橋示方書・同解説，V. 耐震設計編，1996年12月。
- 14) Hibbit, Karlsson Sorensen Inc：ABAQUS /Standard User's Manual Ver.5.8.