

鋼製ラーメン橋脚の崩壊過程に関する研究

武居正樹*・渡邊英一**・杉浦邦征***・永田和寿****・足立幸郎*****・陵城茂樹*****

*京都大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

**Ph. D. ・工博 京都大学教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

***Ph. D. 京都大学助教授 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)

****工修 京都大学助手 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

*****工修 阪神高速道路公団 工務部設計課 技術係長 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

*****工修 株式会社ニュージェック 技術開発部 課長 (〒542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19)

本研究では、実在する鋼製ラーメン橋脚を対象として、その強度と変形性能を明らかにするために、座屈パラメータをほぼ等しくした供試体を製作し、載荷実験を行った。また、汎用有限要素解析コード ABAQUS を用いて、局部座屈が考慮できるようにシェル要素を用いた弾塑性有限変位解析を別途行い、載荷実験結果と数値解析との比較・検討を行った。その結果単柱形式の鋼製橋脚と比べ、強度および変形性能に優れた橋脚であることが明らかになった。また、全体の挙動および橋脚の損傷過程を明らかにし、崩壊過程と橋脚の耐力および変形性能の関係について考察を行った。

Keywords: steel rigid-frame piers, loading test,

elasto-plastic finite displacement analysis, collapse process

1. はじめに

従来の道路橋示方書・同解説 (V耐震設計編)¹⁾では、ラーメン形式の橋脚のような不静定構造物は、一般に単柱形式の橋脚のような静定構造物に比べて高い耐力と変形性能を有しているため、地震時保有水平耐力の照査は省略されてきた。しかし 1995 年に起きた兵庫県南部地震では、ラーメン形式の橋脚でさえも、地震による大きな繰返し荷重が原因と思われる数多くの損傷が観察された。そのため最近では、不静定構造物の中でも特にラーメン形式の橋脚に関する様々な研究が行われるようになった^{2), 3), 4), 5)}。しかし現在の道路橋示方書・同解説 (V耐震設計編)⁶⁾では、鉄筋コンクリートラーメン橋脚に関して地震時保有水平耐力法の適応は確立されているが、鋼製ラーメン橋脚についての耐震設計法は述べられていない。この原因としては、鋼製ラーメン橋脚が地震力を受けた時の応答性状、エネルギー吸収性能の評価、崩壊に至るまでの挙動など、未解明な部分が多いためである。この未解明な部分を明らかにするためには、橋脚全体に対して上部構造物の重量を想定した鉛直荷重と地震力を想定した水平荷重の載荷を行い、柱部、はり部および隅角部を含む橋脚全体の保有水平耐力と変形性能について検討することが必要不可欠である。

このような状況において京都大学と阪神高速道路公団では平成 10 年より、実在する鋼製ラーメン橋脚である阪神高速道路公団・湾岸線・岸 P34 橋脚を取り上げ、鋼製ラーメン橋脚の面内挙動を明らかにすることを目的とし

た共同研究を実施してきた。本研究では、この対象橋脚を約 1/17 に縮尺した実験供試体を製作し、橋軸直角方向に対して単調載荷および繰返し正負交番載荷実験を行った。また実験との対比のため、局部座屈を精度よく表現できるように、シェル要素を用いた弾塑性有限変位解析も別途行った。本論文はこれらの結果を取りまとめたものである。

2. 実験概要

(1) 実験供試体

本研究では、一層の門型鋼製ラーメン橋脚として阪神高速道路公団・湾岸線・岸 P34 橋脚を取り上げ、実験施設の規模的制約から、図-1 に示すように対象橋脚を約 1/17 に縮尺した実験供試体を製作した。対象橋脚はそのままスケールダウンすることは極めて困難であった。そこで対象橋脚を柱部は柱基部断面、はり部ははり中央部断面とする各部一様な断面の橋脚に置き換えた。そして主として幅厚比パラメータ (R_f , R_l)、補剛材剛比 (γ/γ^*) をあわせこむように供試体の製作を行った。また対象橋脚に使われている主要鋼材は SM490Y であるが、供試体製作にあたり SS400 を用いた。なお隅角部で先行して応力集中による溶接割れが起こらないように、図-1 の斜線部は板厚を 1.6mm から 2.3mm にすることにより補強を施した。また供試体製作時には、断面寸法の約 1/200 の初期不整に納まるように慎重に溶接組み立てを行った。ここで、実験供試体に用いられた SS400 材の材料試験結

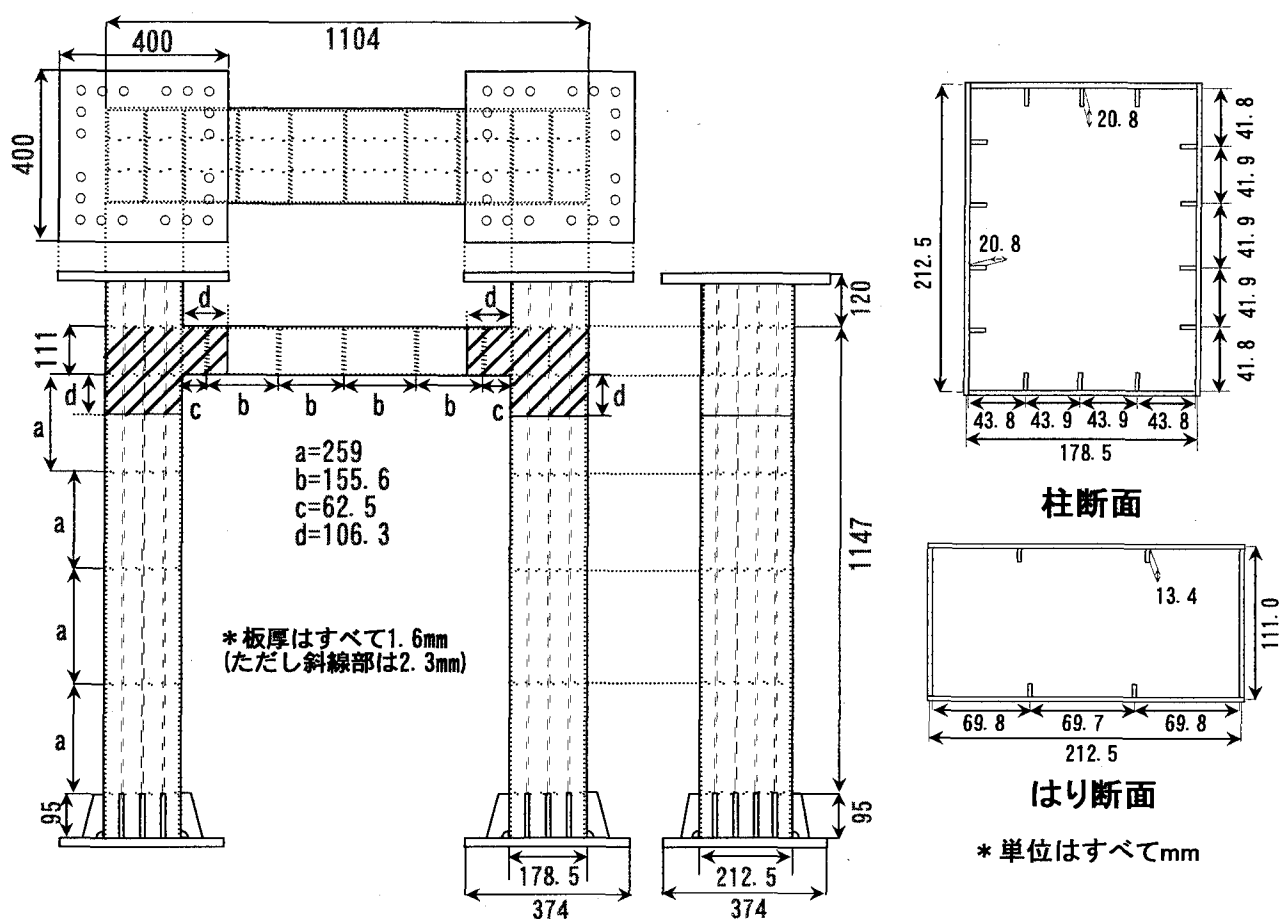


図-1 実験供試体の全体図と補剛箱断面

表-1 実験供試体に使用した鋼材の引張り試験結果

板厚 (mm)	ヤング係数 (GPa)	ポアソン比	降伏応力 (MPa)	引張強度 (MPa)	破断伸び (%)
1.6	205.0	0.33	194.0	308.6	60.8
2.3	204.0	0.34	174.0	320.7	66.0

表-2 補剛箱断面の座屈パラメータの比較

	柱基部		はり中央部	
	岸P34橋脚	実験供試体	岸P34橋脚	実験供試体
R_r	0.500	0.438	0.781	0.731
R_f	0.373	0.363	0.398	0.481
γ/γ^*	1.810	1.470	3.990	2.460
σ_c/σ_y	4.15(%)	4.15(%)		

果を表-1に、補剛箱型断面の座屈パラメータの対象橋脚と実験供試体との比較を表-2に示す。

(2) 載荷方法

実験供試体への載荷方法を図-2に示す。軸力の載荷に関しては、左右柱部材の真上から鉛直に2台のアクチュエータでそれぞれ載荷を行った。柱基部の軸力比 σ_c/σ_y (σ_c :対象橋脚における上部構造死荷重反力により生じる軸圧縮応力、 σ_y :鋼材の降伏応力)を対象橋脚の軸力比レベル(降伏軸圧縮力の4.15%)とほぼ同等とし、試験中一定に保った。なお制御方法は荷重制御とした。また水平力の載荷に関しては、左右柱頭上部をヒンジで図-2に示すような形でリンクさせた構造を採用した。この載荷

R_r : 補剛材間の板パネルの幅厚比パラメータ

$$R_r = \frac{b}{nt} \sqrt{\frac{\sigma_y \cdot 12(1-\mu^2)}{E \pi^2 k}}$$

ただし、

b : フランジ幅

t : フランジ厚

σ_y : 板パネルの降伏応力

E : ヤング係数

μ : ポアソン比

k : 板の座屈係数

n : 補剛材で囲まれたサブパネル数

I_s : 断面2次モーメント

γ : 縦補剛材と板の剛比

$$\gamma = \frac{I_s}{b \cdot t^3 / 11}$$

γ^* : 線形座屈理論から求められる最適剛比

方法を採用した理由としては2つあり、1つは左右柱頭上部にかかる水平力を均等に載荷できるように、もう1つは、はり部材の変形が上部構造物の存在により拘束されないような載荷方法を取り、橋脚自身の耐震性能を評価するためである。なお制御方法は変位制御とした。ここで、載荷実験の様子を写真-1に示す。

(3) 載荷パターンなど

載荷パターンについては、単調載荷および繰り返し正負交番載荷とした。単調載荷に関しては、降伏変位の20倍まで行った。また繰り返し正負交番載荷に関しては、図-3に示すように各振幅1サイクルずつとして ± 11 倍まで行った。また降伏変位に関しては、実験に先立って行

われた解析結果をもとに決定した。決定方法に関しては後述する。また後に示す水平荷重-水平変位曲線における水平荷重（縦軸）・水平変位（横軸）に関しては、水平荷重をアクチュエータの荷重値、水平変位を図-2のLVDT-1、LVDT-2の両外部変位計の平均値とした。そして降伏時のこれらの場所における水平荷重、水平変位をそれぞれ H_y 、 δ_y とした。また解析結果との比較のため、水平変位 δ を δ_y で、水平荷重 H を H_y で除することにより無次元化を行っている。

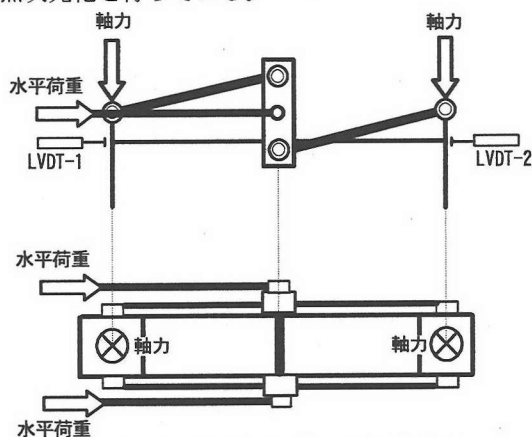


図-2 実験供試体への荷重方法

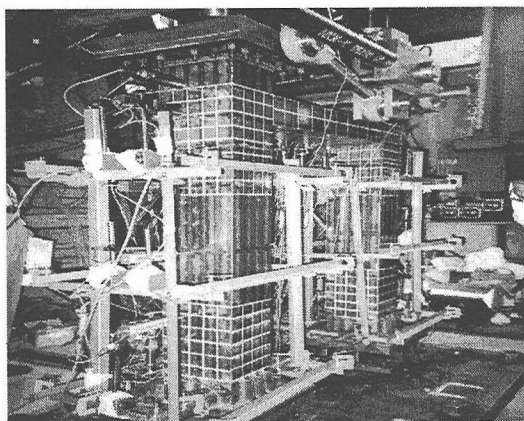


写真-1 実験状況

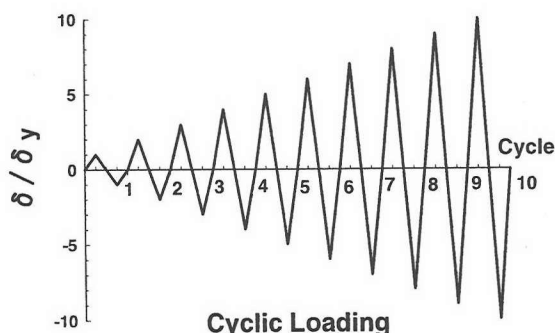


図-3 繰り返し荷重実験の荷重パターン

3. 弾塑性有限変位解析

(1) 解析モデルの設定

一方、弾塑性有限変位解析では汎用有限要素解析コード ABAQUS⁷⁾を用いて供試体をモデル化し、解析を行った。使用した要素は4節点で1次の低減積分シェル要素であり、鋼箱断面、縦方向補剛材、ダイアフラムのすべての構造部材を局部座屈が考慮できるように、シェル要素でモデル化した。

解析モデルを図-4に示す。要素分割に関しては、局部座屈を精度よく表すために十分な要素分割を行った。柱部ではウェブ面、フランジ面とも縦方向補剛材間で6分割、縦方向補剛材の高さ方向に4分割し、また軸方向では合計56分割とした。一方はり部フランジ面では、縦方向補剛材間で10分割、縦方向補剛材の高さ方向に4分割し、はり部ウェブ面では16分割とし、また軸方向では合計40分割とした。さらにシェルの厚さ方向の層分割数はすべて16とした。また、節点数と要素数が非常に多くなったため（総節点数18754、総要素数18658）対称性を考慮して、Y軸に垂直なX-Z平面に対して対称な変形モードを仮定することにより、供試体の1/2のみを解析対象とした。また境界条件は、柱基部底面において完全固定、さらに材料特性は先に示した材料試験結果を入力し、非弾性挙動に関しては von Mises の降伏関数、連合流れ則および等方硬化則と移動硬化則を併せ持った混合硬化則を仮定することにより解析を行った。

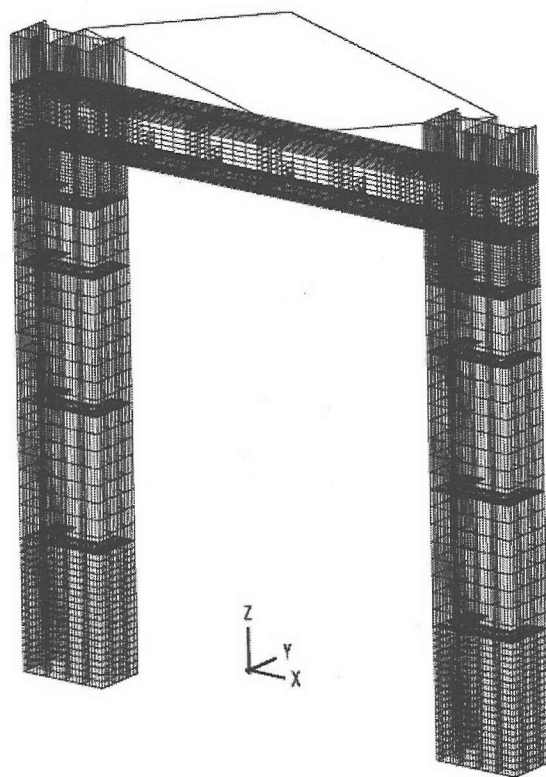


図-4 解析モデル

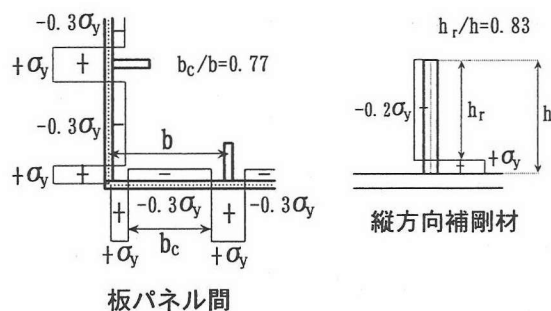


図-5 残留応力分布図

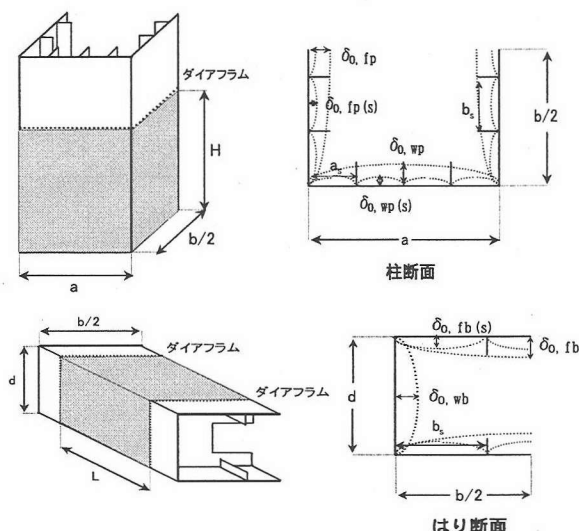


図-6 初期たわみ波形

本解析では、初期不整として初期たわみおよび残留応力を考慮した。残留応力については、橋脚の柱部・はり部すべてに対して板の部材軸方向のみに導入し、小松らの論文⁹⁾を参考にして図-5に示すように、断面全体が自己平衡となるように、矩形分布とした。その際、引張残留応力度 σ_{rt} を $\sigma_{rt}=\sigma_y$ とし、板パネルでの圧縮残留応力度 σ_{rc} を $\sigma_{rc}=-0.30\sigma_y$ 、および縦方向補剛材の圧縮残留応力度 $\sigma_{rc,s}$ を $\sigma_{rc,s}=-0.20\sigma_y$ とした。また初期たわみに関しては、図-6に示すように、はり部ウェブプレートについては正弦波(1/2波)で与え、それ以外すべてについては補剛板としての全体的な初期たわみ波形(正弦波1/2波)と縦補剛材間での板パネルの局所的な初期たわみ波形(正弦波1/2波)との重ね合わせとして与えた。なお初期たわみの最大値は、道路橋示方書で規定されている製作誤差の許容値とした。

なお本論文においてこの解析モデルは、単調載荷実験および繰返し正負交番載荷実験との比較・検討のために使用するものとする。

(2) 載荷方法および降伏条件など

解析モデルへの載荷方法については、基本的に実験供試体のそれと同じではあるが、図-7に示すようなパンタグラフ構造となっており、実験供試体のそれとは若干異

なっている。この載荷方法を採用した理由については、実験供試体への載荷の場合と同様である。

また降伏条件としては、解析モデルすべての要素のうち1要素でも von Mises の相当応力が材料の降伏応力に達した時点の載荷位置における水平変位と水平荷重を降伏変位および降伏荷重とした。水平荷重-水平変位曲線における水平荷重(縦軸)・水平変位(横軸)に関しては、水平荷重を図-8の載荷点C、Dの水平力を総和したものの2倍(解析モデルが1/2モデルであるため)、水平変位を点A、Bの平均値とした。そして降伏時のこれらの場所における水平荷重、水平変位を H_y 、 δ_y とした。今回の解析においては $H_y=2.565$ (kN) $\delta_y=2.34$ (mm)とした。

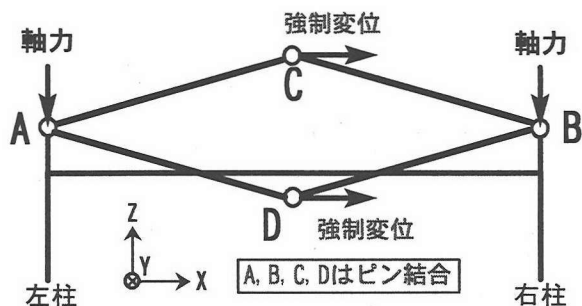


図-7 解析モデルへの載荷方法

4. 実験結果および解析結果の比較・検討

(1) 単調載荷実験

単調載荷試験による実験と解析の水平荷重-水平変位曲線の比較を図-8に示す。解析結果と実験結果より降伏点以降も耐荷力は上昇し続け、最高耐荷力点では H_y のおおよそ3倍を示しており、その後耐荷力は緩やかに減少していることがわかる。また最高耐荷力点における変形性能 δ/δ_y は解析結果では約12、実験結果では約14であることから、単柱形式橋脚を対象とした例えば文献9)のような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わかった。解析、実験を比較した場合、降伏点近傍までは解析、実験ともによく一致している。しかし、降伏点以降において若干の差異が見られる。

また橋脚の損傷箇所は、解析、実験ともに柱基部において集中しており、最大耐荷力点付近において局部座屈が顕著に現れ始めており、柱基部での局部座屈の発生が橋脚全体の耐荷力を低下させていることがわかった。また写真-2は実験および解析終了時における柱基部の局部座屈性状であるが、解析・実験ともに非常に近似した形状であることがわかる。これらのことから解析結果は実験結果を定性的によく近似していることが言える。

しかし実験において水平荷重が最高耐荷力点の95%程度に劣化した時には柱基部だけでなく、はり部・隅角部近傍ウェブプレートにおいても、写真-3に示すようにそれだけでなくフランジプレートにも局部座屈が観測さ

れた。不静定次数の高いラーメン形式橋脚は1箇所の局部座屈の発生による構造全体の崩壊は生じず、複数断面で断面崩壊が生じてから終局状態に至るという極めて粘り強い構造であることがわかる。しかし保有水平耐力照査時においては、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。

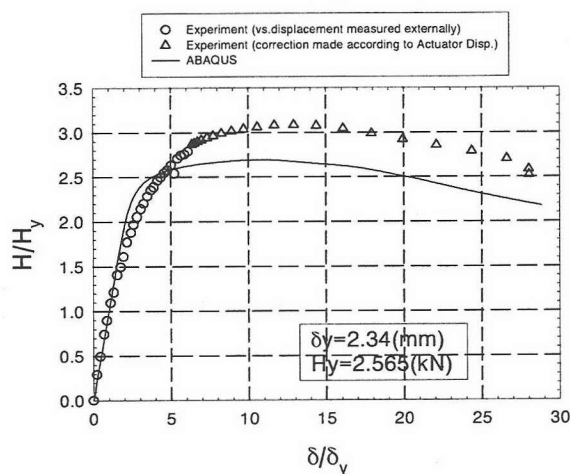


図-8 単調載荷実験結果

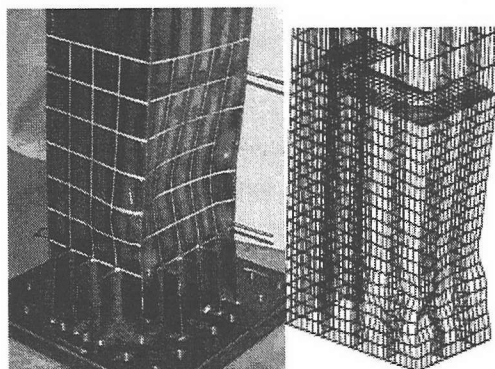
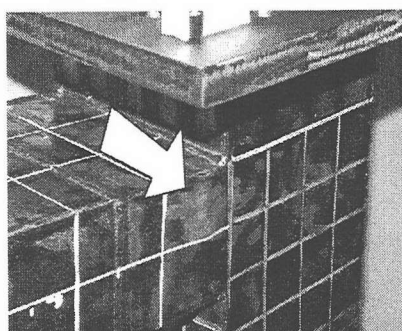


写真-2 柱基部の局部座屈性状



損傷を受けた供試体

写真-3 隅角部近傍の座屈性状

(2) 繰り返し正負交番載荷実験

図-9 に繰り返し正負交番載荷実験における実験と解析を比較した包絡曲線を示す。この図より、降伏点以降も耐力は上昇し、最大耐力力は H_y の約 3 倍を示しており、その後水平耐力は緩やかに減少している。また変形性能に関しても、最高耐力力点における δ/δ_y は実験結果では 8 を示し、初期たわみおよび残留応力を考慮した解析結果では 6 を示していることから、優れた強度と変形性能を有していることがわかる。解析と実験との比較では、最大耐力力において若干の差異は認められるが、最大耐力力以降の領域における劣化の挙動は実験結果と解析結果とでは近似していると言える。

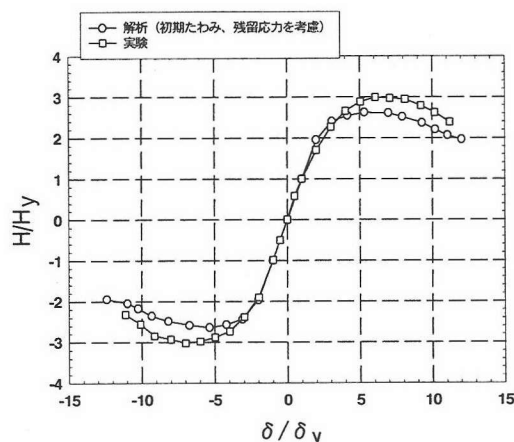


図-9 包絡曲線の比較

橋脚の損傷箇所は実験も解析も主として柱基部であったが、実験において面外変形が写真-4 のように外向きに発生したものが観察された。これは初期変形などの影響が大きいと考えられる。今後、初期変形の計測結果を解析モデルに反映させることでより精度良い解析を行うことができると考えられる。また実験終了近くにおいて、はり部・隅角部（内側）近傍ウェブパネルには応力集中による亀裂が観察された（写真-5）。初期の耐力力低下については柱基部の局部座屈に起因しているが、その後の著しい耐力力低下はこの亀裂によるものと考えられる。

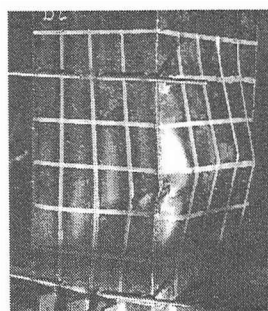


写真-4 柱基部の外向きへの面外変形（左）

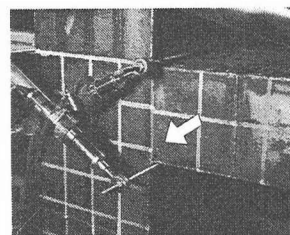


写真-5 隅角部における応力集中による亀裂（右）

5. 解析による崩壊の過程の検討

損傷の各イベントを整理する上で、解析における座屈の判定を次のように行った。柱基部やはり部のシェル要素に注目し、その要素の厚さ方向における両縁端の部材軸方向ひずみが分岐する点、目視(ABAQUSのPost-Script機能から)の双方により座屈を判定した。

(1) 単調載荷

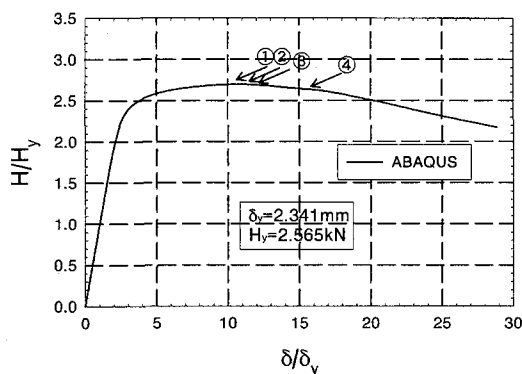
単調載荷による水平荷重-水平変位曲線と損傷の各イベントを整理した図を図-10に示す。単調載荷における崩壊の過程は、最大荷重点付近において右側柱基部右側フランジ面で局部座屈が最も早く発生し、その後最大荷重点通過後に左右はり部隅角部近傍上下フランジ面に局部座屈が発生し、その後左側柱基部右側フランジ面に損傷が進展していった。また、 $+2\delta_y$ から $+4\delta_y$ までの領域では、水平荷重の増加が緩やかになり始めている。この領域では、左右柱基部やはり部の断面が塑性化し始めていると考えられる。そこで解析において、 $+2\delta_y$ から $+4\delta_y$ までの左右柱基部断面、左右隅角部はり部近傍、およびはり部板厚変化点近傍断面の塑性化の進展状況を調べた。その図を図-11に示す。これらの図より、約 $+2\delta_y$ で右側柱基部断面右フランジプレート全体が塑性化し、 $+2.5\delta_y$ では左右柱基部が断面全体として塑性化した。また $+3\delta_y$ 以降では、左右隅角部はり部近傍断面やはり部板厚変化点近傍断面においても塑性化が起こった。これらより、複数箇所の断面で塑性化が起こり、不静定次数(ラーメン橋脚では3)以上の断面で塑性化が起こるまで水平荷重が上昇することが、確かめられた。

(2) 繰り返し正負交番載荷

繰り返し正負交番載荷による水平荷重-水平変位の包絡曲線と各イベントを整理した図を図-12に示す。繰り返し載荷における崩壊の過程は、 $+5\delta_y$ において右側柱基部右フランジ面において最も早く局部座屈が発生し、その後若干ではあるが耐力は上昇するが、最大荷重点($+6\delta_y$)において、左右はり部上下フランジにも局部座屈が発生した。その後、左側柱基部にも局部座屈が発生した。また図-13には右側柱基部右フランジ面での各サイクルの部材軸方向ひずみの変化を表したグラフを示す。このグラフより、 $+5\delta_y$ において局部座屈が発生し、次のサイクル($\pm 6\delta_y$)において、部材軸ひずみが急激に変化(局部座屈が進展)していることがわかる。また図-14にはり部左側隅角部近傍上フランジ面での各サイクルの部材軸方向ひずみの変化を表したグラフを示す。はり部では7サイクルから8サイクルにかけてひずみが急激に変化している。最大荷重点以降の耐力の劣化は、初期の劣化については、柱基部での局部座屈の進展が影響を及ぼしているが、その後の劣化は、はり部における局部座屈の進展によるものであると言える。

単調載荷の結果および繰り返し載荷の結果から、不静定次数以上の断面で塑性化が起こるまで水平荷重が上昇し、最大耐力点付近において柱基部において局部座屈

が発生し、その後はり部上下フランジ面に局部座屈が発生し耐力の低下が顕著となることが明らかとなった。



- ① 右柱基部右フランジ局部座屈発生 ($+11.3\delta_y$)
- ② はり部右側下側フランジ局部座屈発生 ($+11.5\delta_y$)
- ③ はり部左側上側フランジ局部座屈発生 ($+11.7\delta_y$)
- ④ 左側柱基部右フランジ局部座屈発生 ($+16.3\delta_y$)

図-10 単調載荷における崩壊過程

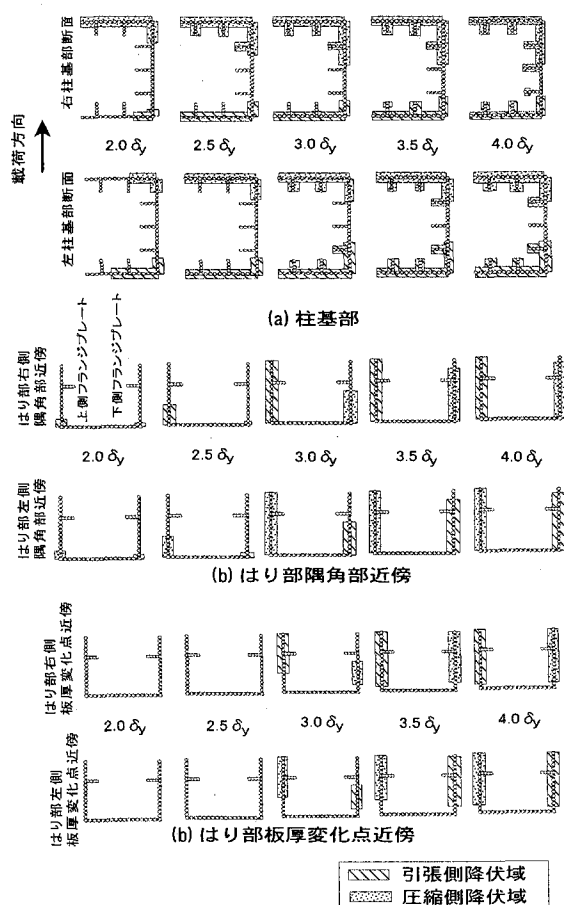
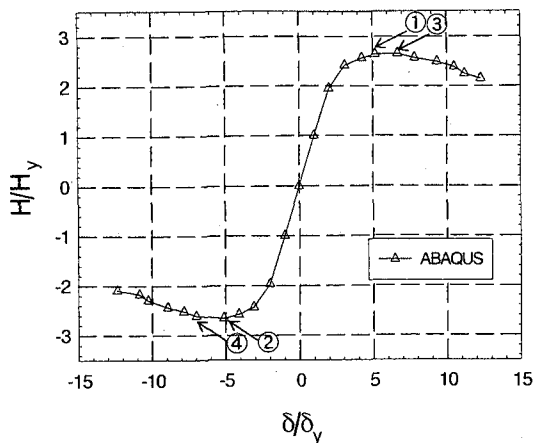


図-11 橋脚各断面における降伏域の変化



繰返し載荷

- ①右フランジ局部座屈発生 ($\delta=+5\delta_y$)
- ②左柱基部左フランジ局部座屈発生 ($\delta=-5\delta_y$)
はり部右側上フランジ局部座屈発生 ($\delta=+5\delta_y$)
はり部左側下フランジ局部座屈発生 ($\delta=-5\delta_y$)
- ③左柱基部右フランジ局部座屈発生 ($\delta=+6\delta_y$)
はり部右側下フランジ局部座屈発生 ($\delta=+6\delta_y$)
はり部左側上フランジ局部座屈発生 ($\delta=+6\delta_y$)
- ④右柱基部左フランジ局部座屈発生 ($\delta=-7\delta_y$)

図-12 繰返し載荷における崩壊過程

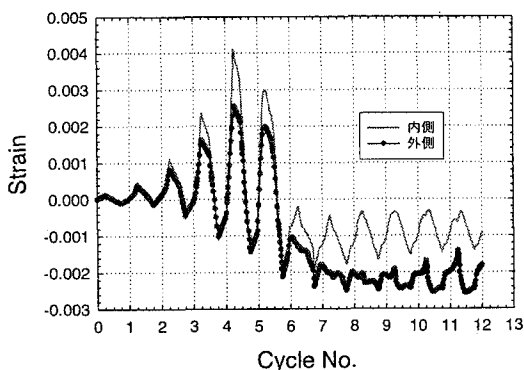


図-13 右側柱基部右フランジ面における部材軸方向ひずみの変化

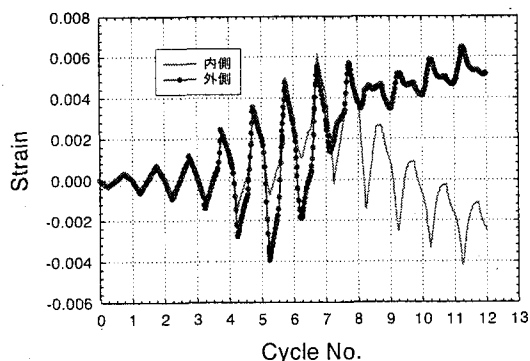


図-14 左側はり部隅角部近傍上フランジ面における部材軸方向ひずみの変化

5. 結論

本研究では、一層の門型鋼製ラーメン橋脚の面内挙に関して、単調載荷および繰返し正負交番載荷の実験と汎用有限要素解析コード ABAQUS を用いた弾塑性有限変位解析を行い、その非線形挙動および崩壊過程について検討を行った。本論文での結論をまとめると以下のである。

- 1) 鋼製ラーメン橋脚は、単柱形式の鋼製橋脚に比べて初期降伏から最大耐力力にいたる余剰耐力力が著しく大きく強度に優れている。また最大耐力力後も緩やかな劣化をしていることから変形性能にも優れている。このことが解析および載荷実験の両方から明らかになった。
- 2) 実験結果と解析結果の比較においては単調・繰返し載荷ともに若干の差異はあったが、崩壊に至る過程については、解析結果は実験結果を定性的に良く近似していることが明らかになった。
- 3) 鋼製ラーメン橋脚の損傷が集中する箇所は主として柱基部ではあるが、隅角部近傍のはり部におけるせん断変形による局部座屈が実験・解析によって観察された。またこの近傍では応力集中が起これやすく亀裂発生にも注意を払わなければならない。したがって柱基部だけでなく隅角部に対しても設計上注意を払わなければならない。
- 4) 本研究で対象とした鋼製ラーメン橋脚では、最大水平荷重点付近間まで局部座屈が発生することなく、水平荷重は上昇していくことが明らかとなった。柱基部フランジ面やはり部フランジ面において局部座屈が発生し、ラーメン橋脚の不静定次数 3 以上の箇所において局部座屈が発生した後、水平荷重が減少していくことが明らかとなった。

【参考文献】

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V、耐震設計編、1990年2月。
- 2) 酒造敏廣、事口尋男：鋼変断面ラーメンの非弾性地震時応答性状と崩壊モード性状に関する研究、構造工学論文集、Vol. 43A, pp. 205-216、1997年3月。
- 3) 酒造敏廣：せん断崩壊型はり部材を有する鋼門型ラーメンの非線形地震時応答性状に関する研究、構造工学論文集、Vol. 44A, pp. 169-178、1998年3月。
- 4) 池田学、山田正人、市川篤史、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。

- 5) 池田学、山田正人、市川篤史、安波博道、富永知徳：鉄道鋼ラーメン橋脚の耐震設計法に関する一研究、第3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. 17-24、2000年1月。
- 6) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ、耐震設計編、1996年12月。
- 7) Hibbit, Karlsson Sorensen Inc : ABAQUS /Standard User's Manual Ver. 5.7.
- 8) 小松定夫、牛尾正之、北田俊行：補剛板の溶接残留応力および初期たわみに関する実験的研究、土木学会論文報告集、第285号、pp. 25-35、1977年9月。

(2001年12月7日受付)

Collapse process of steel rigid-frame piers

Masaki TAKEI, Eiichi WATANABE, Kunitomo SUGIURA, Kazutoshi NAGATA,
Yukio ADACHI and Shigeki OKASHIRO

ABSTRACT: Many steel rigid-frame piers were damaged by local buckling and brittle crack failure during the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake. Therefore, in order to improve the seismic performance, it is necessary to clarify the relationship between horizontal load bearing capacity and ductility of such bridge piers. In this study monotonic and cyclic loading tests, as well as elasto-plastic finite displacement analysis using shell elements were carried out to evaluate the in-plane behavior of steel rigid-frame pier. It is found that the steel rigid-frame pier has the high strength and the high ductility.