

鋼製ラーメン橋脚のハイブリッド地震応答実験および その耐震設計法に関する考察

渡邊英一¹・永田和寿²・杉浦邦征³・水谷治弘⁴・陵城成樹⁵

¹フェロー会員 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）

²正会員 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）

³正会員 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）

⁴正会員 工修 阪神高速道路公団 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 (株)ニュージェック 大阪本社技術開発部（〒542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19）

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。この理由は、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と考えられる。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阪神高速道路公団と京都大学では平成 10 年より、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、研究対象とした実橋脚の縮小モデルを製作し、面内方向に対するハイブリッド実験および繰返し正負交番載荷実験を行い、鋼製ラーメン橋脚の地震時応答性状および弾塑性挙動を明らかにした。また、残留応力および初期変形を考慮した弾塑性有限変位解析を行い、これら初期不整が鋼製ラーメン橋脚の耐震性能に及ぼす影響についても検討した。

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 に示すような約 1/17 に縮尺した実験供試体を製作した。対象橋脚の各要素の構造寸法をすべて横並びにスケールダウンすることが極めて困難であったため、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。また、対象橋脚に使われている主要鋼材は SM490Y であるが、材料手配の都合により SS400 を用いた。そこで、主として幅厚比パラメータ (R_f , R_l)、補剛材剛比 (γ /

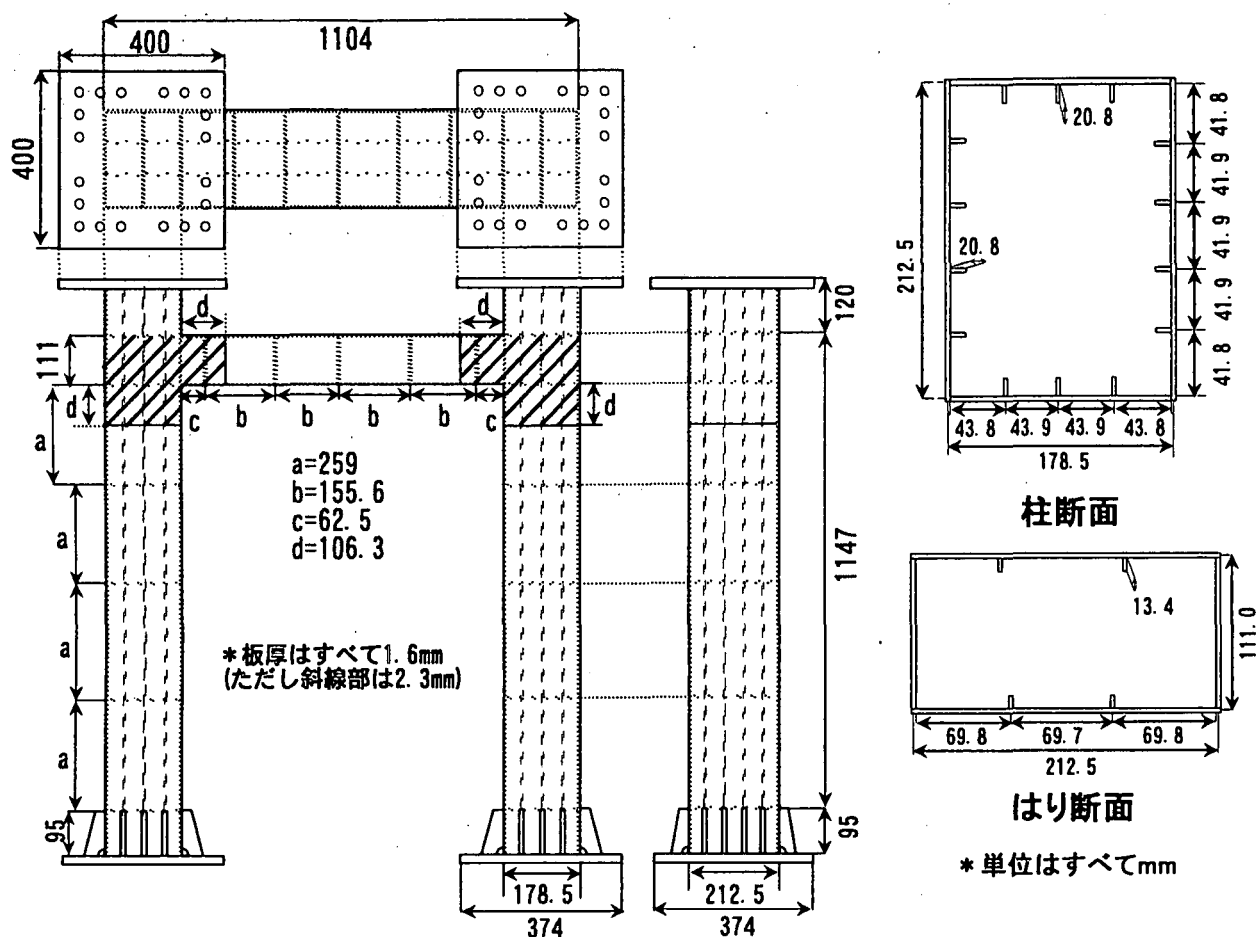


図-1 実験供試体の全体図と補剛箱断面

γ*) の座屈パラメータを対象橋脚に合わせ込んだ実験供試体の製作を行った。ここで、繰り返し正負交番載荷実験に使用された実験供試体の材料試験結果を表-1 に、対象橋脚と実験供試体の補剛箱型断面の座屈パラメータを表-2 に示す。なお、ハイブリッド実験に使用された実験供試体の材料試験結果と座屈パラメータは繰り返し正負交番載荷実験に使用された実験供試体とほぼ同じであったため省略する。これらの実験供試体には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、実験供試体の製作においては、断面幅寸法の約 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。

(2) 載荷方法

実験供試体への載荷方法を図-2 に示す。軸力の載荷は、左右柱部材の真上から鉛直に2台のアクチュエータにより載荷を行った。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

表-1 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	0.332	194	308	60.8
2.3	204	0.331	174	320	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_f	0.500	0.438	0.781	0.731
R_f	0.373	0.363	0.398	0.481
τ/τ^*	1.81	1.47	3.99	2.46
σ_c/σ_y	4.15(%)	4.15(%)		

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

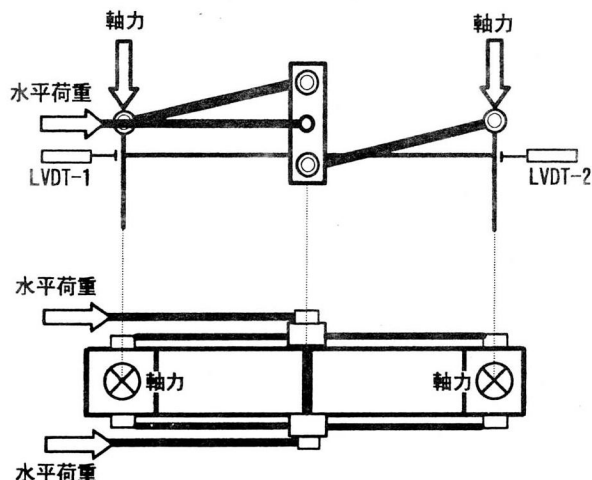


図-2 実験供試体への載荷方法

お制御方法は荷重制御とした。また、水平力の載荷は、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。この載荷方法を採用した理由は左右柱頭上部にかかる水平力を均等に載荷できること、さらに、載荷治具よりはりの部材軸方向の変形ならびに部材端での回転が拘束されないよう載荷することである。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。また、載荷実験において、水平荷重はアクチュエータの荷重値、水平変位は図-2 に示す外部変位計 LVDT-1 と LVDT-2 の平均値とした。

(3) ハイブリッド実験

鋼製ラーメン橋脚の面内地震時挙動を明らかにするためには、その復元力特性を正確に評価する必要がある。そこで、本研究ではハイブリッド実験手法によりその評価を行い、面内地震時挙動を明らかにすることにした。ここでは、鋼製ラーメン橋脚を1質点系と見なし、逐次載荷実験によりその復元力の大きさを参照しながらその運動方程式を解くことにより、鋼製ラーメン橋脚の面内地震時挙動を明らかにすることとした。なお、運動方程式を解くにあたり質量は上部構造物の重さ、減衰定数は 0.02、積分時間間隔は 0.01 秒とした。また、本研究で対象とした橋脚がⅢ種地盤上に設置されていることから、入力波形には兵庫県南部地震において東神戸大橋で観測された NS 方向の加速度波形の振幅を（図-3）を 1 倍、2 倍、3 倍と増幅させながら同一供試体に入力させた。

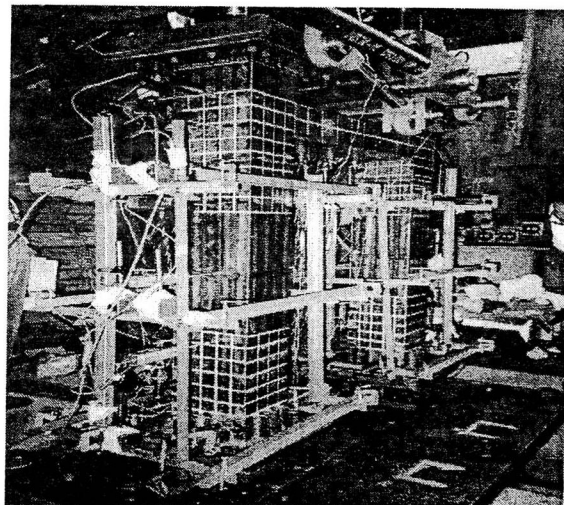


写真-1 実験状況

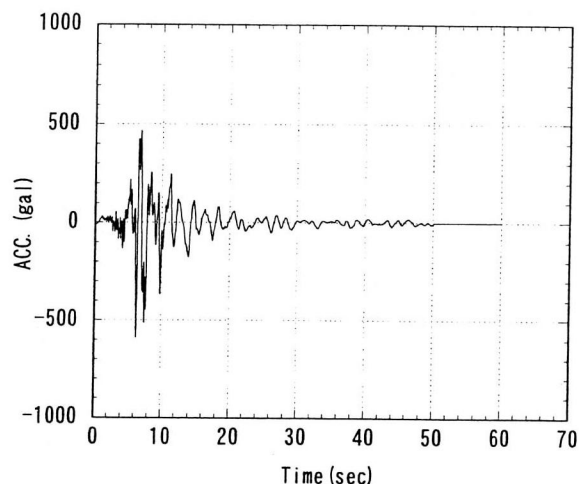


図-3 東神戸大橋で観測された NS 方向の
加速度成分（図は 1 倍）

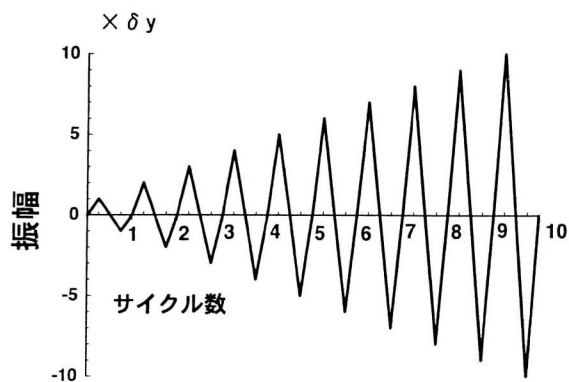


図-4 繰り返し載荷実験の載荷パターン

(4) 繰り返し正負交番載荷実験

繰り返し正負交番載荷に関しては、図-4 に示すように各振幅 1 サイクルずつ降伏変位の ± 11 倍まで行った。なお、降伏変位は、実験に先立って行わ

れた解析結果をもとに決定した。その判定方法は 3 (2) で述べる。

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 節点の 1 次のシェル要素で、低減積分を採用した。また、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-5 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）主メモリの制約上、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（ABAQUS のデフォルト値を使用）を仮定することにより解析を行った。

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解析も行った。残留応力は、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⁸⁾を参考にして図-6 に示すように、断面全体が自己平衡となるような矩形分布とした。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、初期たわみは、図-7 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

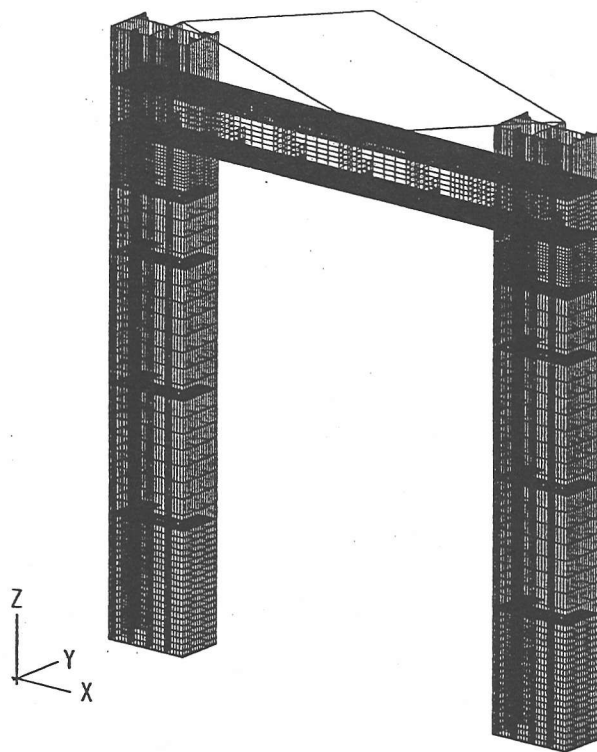


図-5 解析モデル全体図

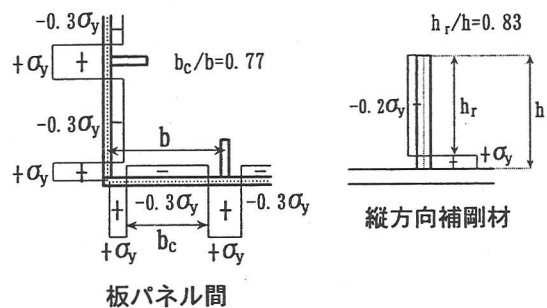


図-6 残留応力分布図

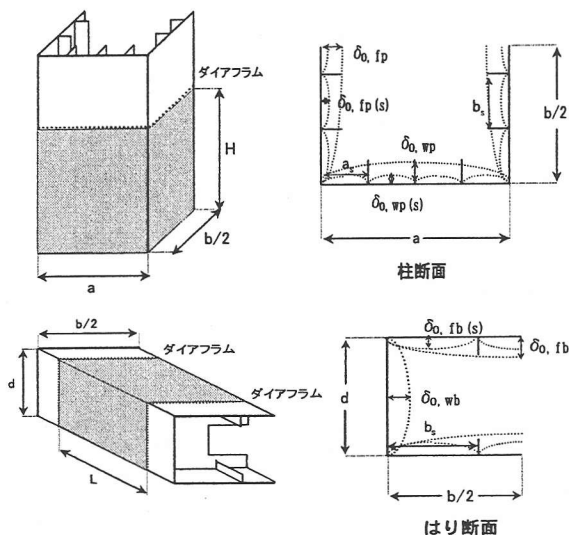


図-7 初期たわみ波形

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、補剛板全体ではダイアフラム間の 1/1000、板パネル間では板パネル幅の 1/150 とした。

(2) 載荷方法および降伏条件

解析モデルへの載荷方法については、基本的に載荷実験と同じであるが、図-8 に示すようなパンタグラフ構造となっており若干異なっている。この載荷方法を採用した理由は、載荷実験の理由と同様である。ここで、水平荷重は図-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）、水平変位は点 A、B の水平変位の平均値とした。また、降伏条件は、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とし、その時の水平荷重、水平変位をそれぞれ H_y 、 δ_y とした。

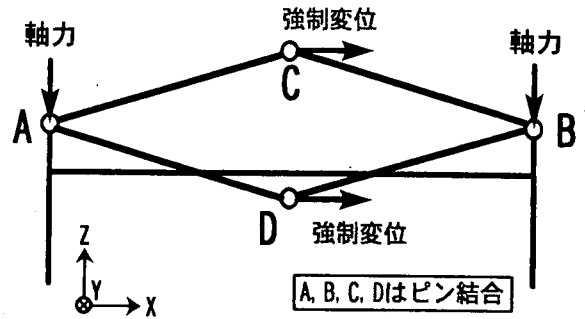


図-8 解析モデルへの載荷方法

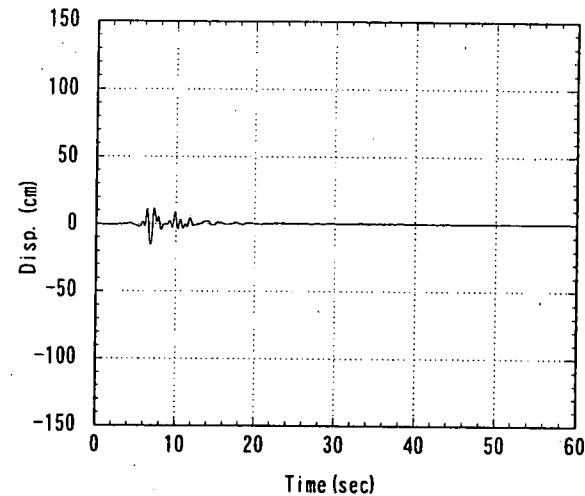


図-9 応答変位（東神戸大橋 1 倍）

4. 実験結果および解析結果と考察

(1) ハイブリッド実験

2 章で述べたように、加速度波形の振幅を 1 倍、2 倍、3 倍と増幅させながら行ったハイブリッド実験結果の時刻歴変位応答および水平変位－水平荷重関係をそれぞれ図 9～14 に示す。1 倍の加速度入力では、降伏変位（実橋脚レベルで約 5.04cm）の 3 倍の最大応答変位を生じたものの最大耐力には達しなかった。なお、目で観てわかるような損傷は観測されなかった。また、2 倍の加速度入力では、降伏変位の 8 倍の最大応答変位を生じ、ほぼ最大耐力に達したが耐力の低下は観測されなかった。なお、柱基部フランジ面に局部座屈が観測された。さらに、3 倍の加速度入力では、明らかに耐力力の低下が観測された。その低下とともに変形が増大し制御可能な範囲を超えたため、その時点で実験を終了した。なお、柱基部の局部座屈が進展するとともに、隅角部においても局部座屈と亀裂が発生した。以上の結果からわかるように、本研究で対象とした鋼製ラーメン橋脚は優れた面内地震時特性を有していることが明らかとなった。

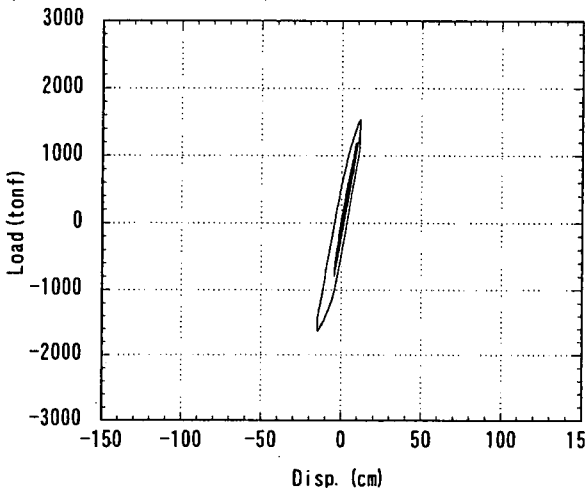


図-10 水平荷重-水平変位曲線（東神戸大橋 1 倍）

(2) 繰り返し正負交番載荷

図-15 に繰り返し正負交番載荷における実験結果と解析結果の包絡曲線を示す。この図より、降伏以降も耐力は上昇し、最大耐力力は降伏荷重 H_y の約 3 倍を示し、その後耐力は緩やかに減少していくこ

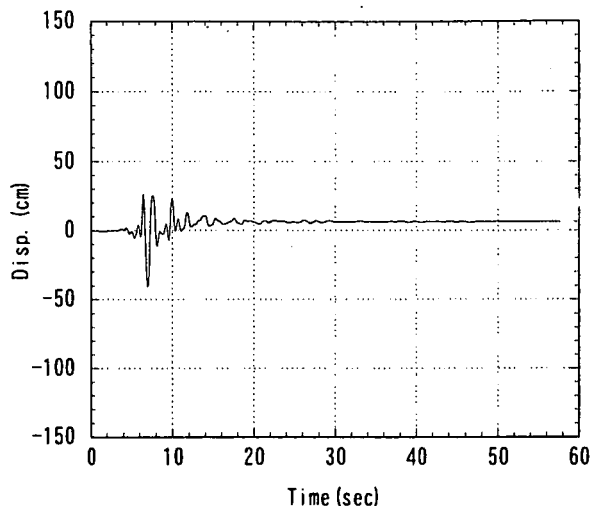


図-11 応答変位 (東神戸大橋 2 倍)

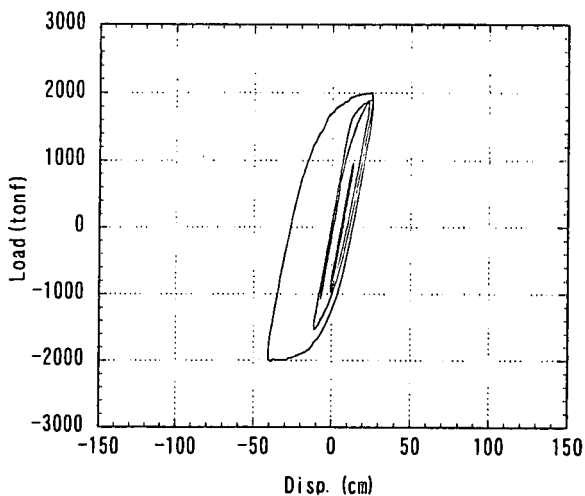


図-12 水平荷重-水平変位曲線 (東神戸大橋 2 倍)

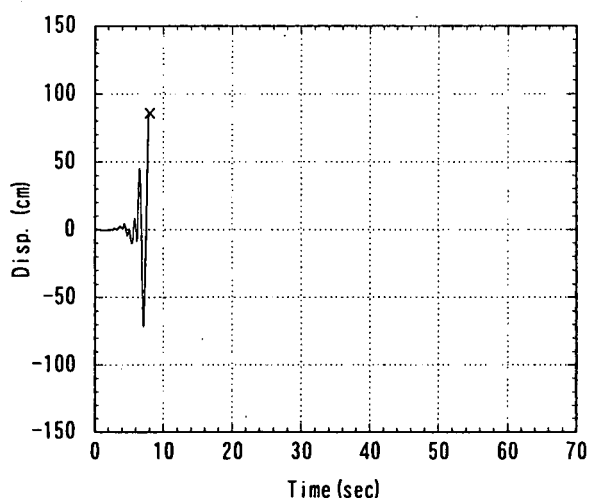


図-13 応答変位 (東神戸大橋 3 倍)

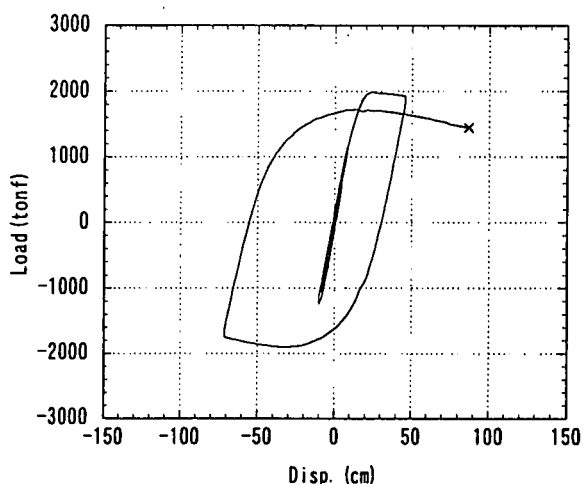


図-14 水平荷重-水平変位曲線 (東神戸大橋 3 倍)

とがわかる。また、変形性能は、最高耐荷力点における塑性率 δ/δ_y が実験結果では 8 を示し、初期不整を考慮した解析結果においても 6 を示していることがわかる。以上の点から、対象とした鋼製ラーメン橋脚は優れた強度と変形性能を有していることがわかる。

実験結果と解析結果の包絡曲線は $4\delta_y$ までよく一致しており、耐荷力の劣化挙動も似ているものの、実験結果が解析結果よりも大きく、それらの値には差異が認められる。また、初期不整を考慮することによって両者の差異は小さくなることがわかる。したがって、初期不整は鋼製ラーメン橋脚の劣化後の挙動に影響を与えており、大きな変形能力を有する鋼製ラーメン橋脚においては、弾塑性挙動を正確に評価するには初期不整を適切に考慮する必要があると考えられる。

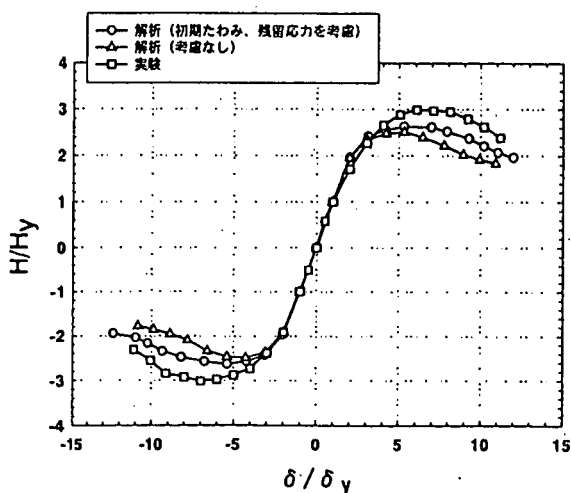


図-15 包絡曲線の比較

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-2 のよう

に外向きに発生したものが観察された。これは初期不整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必要があると考えられる。また実験終了付近において、はり部・隅角部（内側）近傍ウェブパネルに亀裂が観察された（写真-3）。初期の耐力力低下については柱基部の局部座屈が起因しているものと思われるが、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。したがって、隅角部の応力集中が軽減されるような設計をする必要がある。

5. 結論

本研究では、鋼製ラーメン橋脚の面内方向に対するハイブリッド実験および繰り返し正負交番載荷実験を行い、地震時応答性状および弾塑性挙動を明らかにした。また、残留応力および初期変形を考慮した弾塑性有限変位解析を行い、これら初期不整が鋼製ラーメン橋脚の耐震性能に及ぼす影響について検討した。本論文での結論をまとめると以下のようである。

- 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に劣化していることから変形性能にも優れている。
- 2) 鋼製ラーメン橋脚のハイブリッド実験を行い、その地震時応答性状明らかにした。兵庫県南部地震クラスの大地震に対しても降伏変位の3倍の最大応答変位を生じる程度で大きな損傷は観られず、十分な耐震性能を有している。
- 3) 初期不整は鋼製ラーメン橋脚の劣化挙動に影響を及ぼす。したがって、大きな変形能力を有する鋼製ラーメン橋脚では、弾塑性挙動を正確に評価するのに、初期不整を適切に考慮する必要がある。
- 4) 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

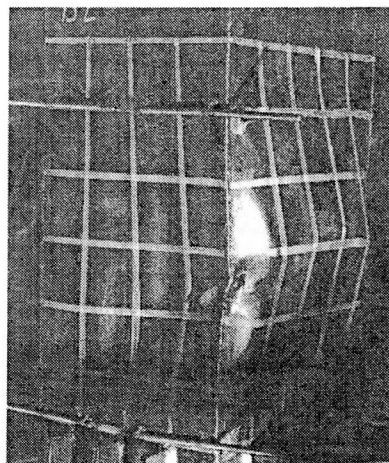


写真-2 柱基部の外向きへの面外変形（左）

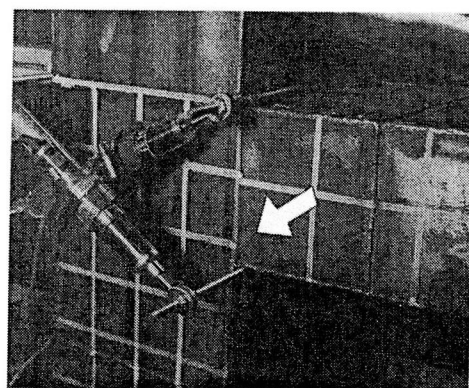


写真-3 隅角部における応力集中による亀裂（右）

ならない。

謝辞：京都大学工学研究科土木工学専攻修士2回生の國司了君、および修士1回生の武居正樹君には載荷実験および解析の実施にあたり、多大な援助を受けた。ここに感謝の意を表す。

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。
- 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。
- 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。

- 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.
- 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.
- 6) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ、耐震設計編 1996.
- 7) Hibbit, Karlsson Sorensen Inc : ABAQUS /Standard User' s Manual Ver. 5. 7.
- 8) 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.