

鋼製ラーメン橋脚における 地震時面内方向非線形挙動に関する解析的検討

秦 健作¹・内田 諭²・長尾 圭介³・永田 和寿⁴・渡邊 英一⁵

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

²正会員 工修 (株)ニュージェック技術開発部構造室 (〒542-0082 大阪府大阪市中央区島之内 1-20-19)

³(株)ニュージェック技術開発部構造室 (〒542-0082 大阪府大阪市中央区島之内 1-20-19)

⁴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 京都府京都市左京区吉田本町)

⁵フェロー会員 Ph.D.・工博 京都大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻

(〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

ラーメン橋脚に面内方向の地震力が作用した場合、各柱部において軸力変動が発生し、これが耐荷力に大きな影響をおよぼすと考えられる。そこで本検討では、軸力変動の影響を考慮した簡易解析モデル(はり要素)を用いて、鋼製ラーメン橋脚に面内方向の地震力が作用した場合の静的解析を行い、鋼製ラーメン橋脚の地震時面内方向非線形挙動について検討を行った。また、別途行われたシェル要素を用いた弾塑性有限変位解析結果との比較を行った。

軸力変動、および、せん断変形を考慮した簡易解析結果と弾塑性有限変位解析結果とを比較すると、水平力載荷位置における水平力-水平変位関係において、ほぼ一致することが明らかとなった。

Key Word : rigid-frame steel pier, elasto-plastic behavior, fluctuation of the axial force

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、鋼製ラーメン橋脚の面内方向での非線形挙動に関する多くの研究が発表されている。特に近年では、耐震解析ツールの高度化に伴い、様々な解析モデル、および、手法が提案されており、構造物の損傷過程まで考慮した複雑な非線形域の数値計算が可能になるとともに、実験値等と比較しても精度の良い結果を得ることが可能になっている。しかしながら、そのようなモデルでは、モデル化および計算に多くの時間を費やすため、設計段階の解析には利用しがたい。

設計段階の解析では、はり要素を用いた骨組みモデルを用いることがほとんどである。このモデルでは、軸力一定のもとで曲げモーメント-曲率関係をあらかじめ求めておき、曲げ変形のみを考慮して解析を行う方法が一般的であるが、ラーメン橋脚のような軸力変動を伴う場合などの複雑な負荷条件に対しては、適用が困難である。

そこで本検討では、鋼製ラーメン橋脚の面内方向の非線形挙動を対象とし、非線形特性を、部材の曲げモーメント-曲率関係(以下、 $M-\phi$ 関係)

に軸力変動を考慮することで表現することにより、水平力-水平変位関係において、はり要素を用いた骨組みモデルによる解析(以下、簡易解析)の精度向上を図った。また、別途実施された、シェル要素を用いた弾塑性有限変位解析¹⁾(以下、詳細解析)による解析結果と簡易解析による解析結果との比較を行った。

2. 解析モデル

本検討においては、鋼製ラーメン橋脚の弾塑性面内挙動に関する実験に用いられた模型供試体(縮尺 1/17)を対象として解析を実施した。図-2.1 に対象とした模型鋼製ラーメン橋脚を示す。図中の①、②、③および④はそれぞれ梁一般部、梁隅角部、柱一般部、および柱隅角部を示している。また、簡易解析モデルにおいては⑤に剛域を設けている。表-2.1 に断面諸元²⁾を示す。表中の $I_{面内}$ 、 $I_{面外}$ 、および A は、それぞれ面内方向の断面 2 次モーメント、面外方向の断面 2 次モーメント、および部材断面積を示している。

(1)簡易解析のモデル

簡易解析では、図-2.1 に示す模型鋼製ラーメン橋脚をはり要素でモデル化した。部材の非線形特性は、M- ϕ 関係に軸力変動を考慮することによって表現した。

a)平面保持の法則に基づいた M- ϕ 関係の算出法

図-2.2 に、本検討で用いた部材の M- ϕ 関係を示す。圧縮軸力が作用した部材の M- ϕ 関係は、降伏時、側板引張縁降伏時、および、終局時の 3 点を結んだトリリニア型とした。ここで降伏時とは、圧縮側縁端ひずみが降伏ひずみに達した状態、側板引張縁降伏時(STATE I)とは、断面が降伏時から終局時に移行するまでに、側板の引張側縁端ひずみが降伏ひずみに達した状態、終局時(STATE II)とは圧縮側縁端ひずみが終局ひずみに達した状態と定義した³⁾。

一方、引張軸力が作用した部材の M- ϕ 関係は、降伏時、側板圧縮縁降伏時、および、終局時の 3 点を結んだトリリニア型とした。ここで降伏時とは、引張側縁端ひずみが降伏ひずみに達した状態、側板圧縮降伏時(STATE I)とは、断面が降伏時から終局時に移行するまでに、側板の圧縮側縁端ひずみが降伏ひずみに達した状態、終局時(STATE II)とは引張側縁端ひずみが終局ひずみに達した状態と定義した。表-2.2 に各状態におけるひずみ分布、および、応力分布のイメージを示す。

なお、本検討において、終局ひずみ ϵ_u は、降伏ひずみ ϵ_y の 20 倍とし、また鋼材の降伏後のひずみ硬化は、 $E'/E=1/150$ とした。

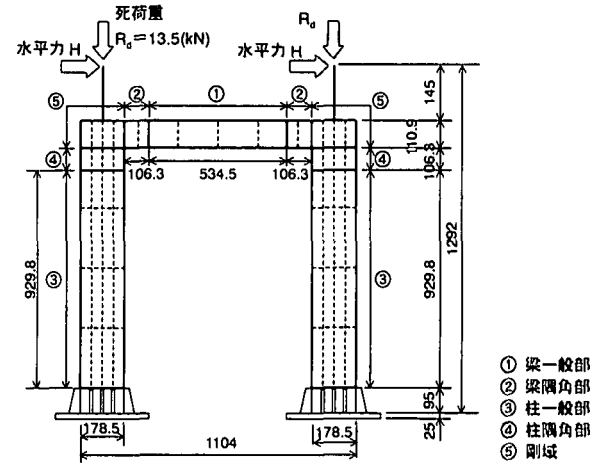


図-2.1 対象とした鋼製ラーメン橋脚 (寸法: mm)

表-2.1 対象とした鋼製ラーメン橋脚の断面諸元

部 材		I _{面内} (cm ⁴)	I _{面外} (cm ⁴)	A (cm ²)
梁	隅角部	365	940	16
	一般部	256	650	11
柱	隅角部	1,168	1,515	23
	一般部	861	1,116	17

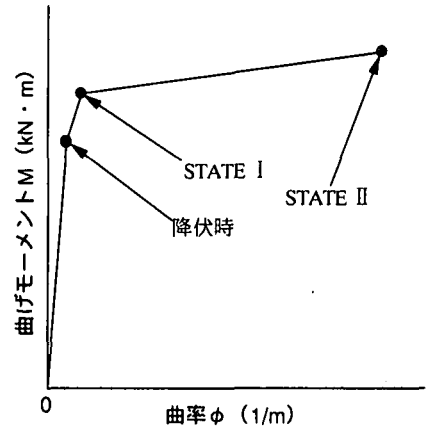


図-2.2 鋼製橋脚の M- ϕ 関係

表-2.2 各状態におけるひずみ分布、および、応力分布

部材軸力	応力、および、ひずみ分布 (引張を正)			
	降伏時	STATE I	STATE II	
圧縮軸力が作用 	 ひずみ分布	 ひずみ分布	 ひずみ分布	 応力分布
	 応力分布	 応力分布		
引張軸力が作用 	 ひずみ分布	 ひずみ分布	 ひずみ分布	 応力分布
	 応力分布	 応力分布		

b) M-N 相関曲線の作成、および、M-φ 関係の設定

図-2.3 は、a)で示した定義により、任意の軸力のもとで降伏時、STATE I および、STATE II の状態における曲げモーメントを算出し、同じ状態の点を結ぶことで作成した、M-N 相関曲線である。

部材の M-φ 関係の設定においては、まず線形解析を行い、部材に作用する曲げモーメント、および、軸力の比（以下、M-N 比）を算出した。次に図-2.3 に示す M-N 相関曲線と M-N 比一定として引いた直線との交点を算出し、各交点における曲げモーメント M と曲率 φ との関係を出し、図-2.2 に示す M-φ 関係を作成した。

軸力変動を考慮した簡易解析は、柱部の非線形特性に、上記の方法で算出した M-φ 関係を用いることによって実施した。

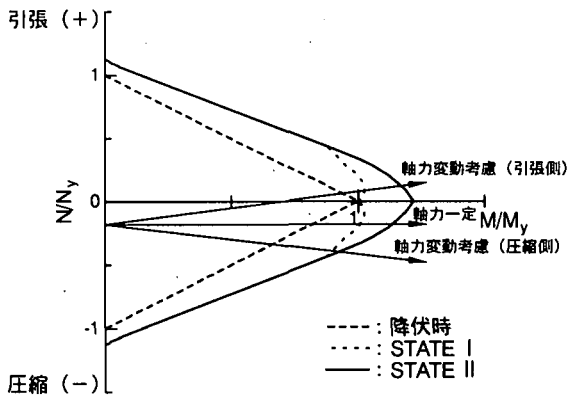


図-2.3 鋼製橋脚の M-N 相関曲線

(2) 詳細解析

詳細解析では、図-2.1 に示す模型鋼製ラーメン橋脚をシェル要素でモデル化した。要素分割においては、鋼箱型断面、縦補剛材、ダイアフラムの全ての構造部材に対して局部座屈が考慮できるようにした。材料の非線形特性に関しては、von Mises の降伏関数、連合流れ則、および、混合硬化則を設定する事により表現した。

3. 解析モデルの終局状態の定義

本検討においては、簡易解析モデルの終局状態を、部材の一断面が終局状態 (STATE II) に達した時と設定した。これは、鋼製ラーメン橋脚の部材の一断面が終局状態に達すると、その断面に局部座屈変形が集中し、鋼製ラーメン橋脚の強度と変形性能に大きな上昇が望めないためである。

また、詳細解析モデルでは最高耐力力点を終局状態と定義した。

4. 解析結果、および、考察

(1) 解析ケース

本検討で対象とした解析ケースを表-4.1 に示す。Case1 では初期軸力一定のもとで M-φ 関係を求めて解析を行い、Case2 では軸力変動を考慮した M-φ 関係を用いて解析を行った。また、Case3 では、軸力変動、および、せん断変形を考慮して解析を実施した。

表-4.1 解析ケース

解析ケース	M-φ 関係の算出方法	せん断変形
Case1	軸力一定として算出	考慮しない
Case2	軸力変動を考慮して算出	考慮しない
Case3	軸力変動を考慮して算出	考慮する

(2) 水平力-水平変位関係

図-4.1 に、水平力載荷位置における水平力-水平変位関係を示す。図中の点線、一点鎖線、および、破線は、それぞれ Case1、Case2、Case3 における解析結果を示している。また、実線は詳細解析結果を示している。図中の◆、▲、●は、それぞれ Case1、Case2、Case3 における終局状態を示している。また、■は詳細解析における終局状態を示している。なお、簡易解析との比較に用いた詳細解析結果は、繰返し載荷解析における包絡線とした。これは、地震時の繰返し載荷荷重の影響を考慮したためである。

Case1 と詳細解析とを比較すると、終局状態での水平変位において大きな差が見られた。これは、Case1 では初期軸力一定のもとで部材の M-φ 関係を設定したため、軸力変動による圧縮側柱基部の耐力低下を表現できず、終局状態の水平変位が大きくなったことが原因と考えられる。また、初期勾配においても大きな差が見られた。

Case2 と詳細解析とを比較すると、終局状態での水平力、および、水平変位はほぼ等しくなった。これは、軸力変動を考慮したことにより、圧縮側柱の耐力低下を表現したためである。しかし、Case1 と同様に初期勾配において大きな差が見られた。これは、簡易解析モデルにおいてせん断変形を考慮していないことが原因と考えられる。

Case3 と詳細解析とを比較すると、両解析結果はほぼ一致することが明らかとなった。初期勾配に若干の差が見られるが、これは詳細解析では初期不整（残留応力、初期たわみ）を考慮していることが原因と考えられる。

以上より、簡易解析において軸力変動、および、せん断変形を考慮すると、詳細解析における終局状態を、算出できることが示された。

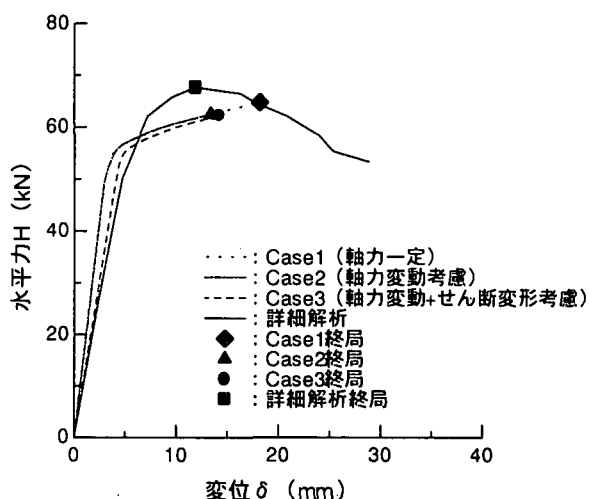


図-4.1 水平荷重-水平変位関係

(3) ラーメン橋脚の損傷イベント

表-4.2 は簡易解析における解析モデルの損傷イベントを図化し、表にまとめたものである。

Case3 における損傷イベントは、①柱基部の圧縮側が降伏し、②柱基部の引張側が降伏し、③梁の隅角部、および、一般部が降伏し、④柱基部の圧縮側が終局に達している。これは、詳細解析における損傷イベントと同様の結果となった。また、Case2 における損傷イベントも、詳細解析における損傷イベントと同様であった。なお、Case1 における損傷イベントは、詳細解析における損傷イベントと一致しない。

したがって、軸力変動を考慮した簡易解析 (Case2、Case3) における損傷イベントは、詳細解析における損傷イベントと同様の結果となることが明らかとなった。

5. まとめ、および、今後の課題

本検討により、以下に示す知見が得られた。

- (1) 軸力変動、および、せん断変形を考慮した簡易解析は、水平力載荷位置における水平力-水平変位関係において、詳細解析をほぼ近似できる。
- (2) 軸力変動を考慮した簡易解析における損傷イベントは、詳細解析における損傷イベントと同様の結果となる。

今後の課題としては、動的解析における簡易解析モデルの検討、および、複雑な形状をしたラーメン橋脚を対象にした簡易解析の検討などが挙げられる。

表-4.2 簡易解析における損傷イベント

軸力変動考慮 (Case2, Case3)	軸力一定 (Case1)
①柱基部降伏 (圧縮側) 	①梁降伏 (隅角部、一般部)
②柱基部降伏 (引張側) 	②柱基部降伏 (圧縮側、引張側)
③梁降伏 (隅角部、一般部) 	③梁終局 (一般部)
④柱基部終局 (圧縮側) 	図中の○は降伏を、●は終局を示す。

参考文献

- 1) 武居正樹、渡邊英一、杉浦邦征、永田和寿、水谷治弘：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、土木学会、第 55 回年次学術講演会講演概要集、I-B205、2000 年 9 月
- 2) 水谷治弘、秦健作、陵城成樹、内田諭、渡邊英一：鋼製ラーメン橋脚の面内弾塑性挙動に関する解析的検討、土木学会、第 55 回年次学術講演会講演概要集、I-B204、2000 年 9 月
- 3) 阪神高速道路公団：鋼製橋脚設計要領 (案)、平成 11 年 3 月