

既設鋼製ラーメン橋脚における 地震時保有水平耐力に関する解析的検討

秦 健作*・足立幸郎*・吉村敏志*・陵城成樹**・内田 諭**・永田 和寿***・渡邊 英一****

*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)

**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)

***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)

****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)

ラーメン橋脚の面内方向水平荷重漸増増載荷解析において、橋脚に発生する軸力変動、およびせん断変形を考慮した簡易解析(梁要素)は、シェル要素を用いた弾塑性有限変位解析とほぼ同様の結果が得られることが明らかとなっている。そこで本検討では、梁柱の剛性比、および上部工と橋脚との支点条件の異なる既設の鋼製ラーメン橋脚を対象として簡易解析を行い、各橋脚の面内方向保有水平耐力について検討を行った。検討の結果、梁柱の剛性比、および上部工と橋脚との支点条件は、各橋脚の面内方向耐力に大きな影響をおよぼす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、鋼製ラーメン橋脚面内方向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解析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領域の数値計算が可能である。また、解析値と実験値とを比較しても精度の良い結果を得ることが出来る。しかしながら、その様なモデルは、解析モデルの作成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^{1), 2)}

本検討においては、鋼製ラーメン橋脚の弾塑性面内挙動の実

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³⁾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。

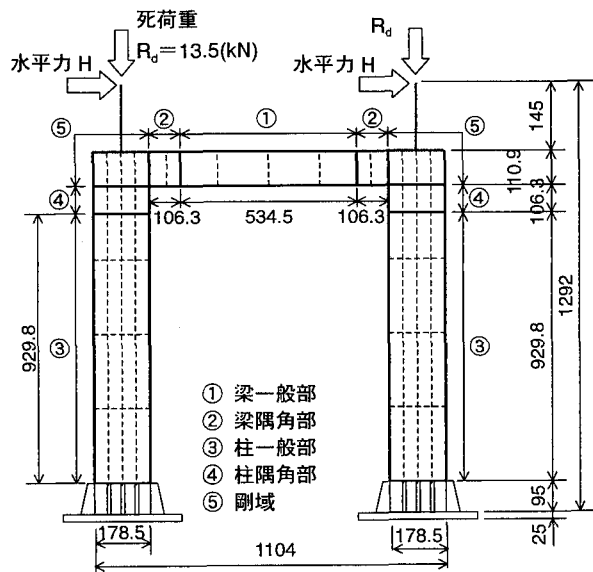


図-2.1 対象とした鋼製ラーメン橋脚(寸法:mm)

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

(1) 簡易解析のモデル³⁾

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。

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。

軸力変動を考慮した部材の 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 との関係は算出し、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行う。

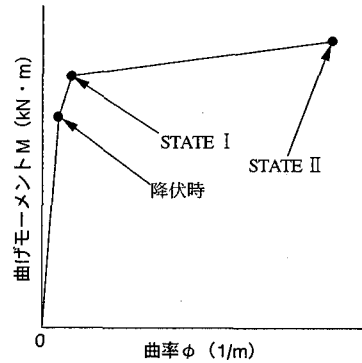


図-2.2 鋼製橋脚の M-φ 関係

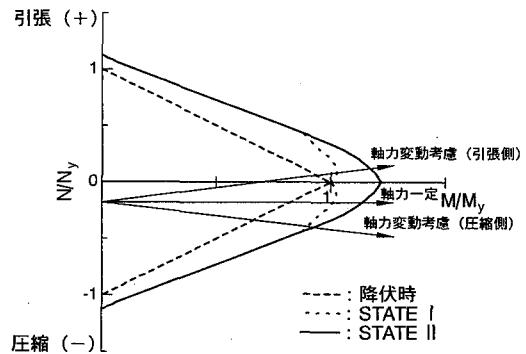


図-2.3 鋼製橋脚の M-N 相関曲線

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 	<p>ひずみ分布 応力分布</p>	<p>ひずみ分布 応力分布</p>	<p>ひずみ分布 応力分布</p>
引張軸力が作用 	<p>ひずみ分布 応力分布</p>	<p>ひずみ分布 応力分布</p>	<p>ひずみ分布 応力分布</p>

(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、ダイヤ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ことにより表現した。

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荷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、および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。

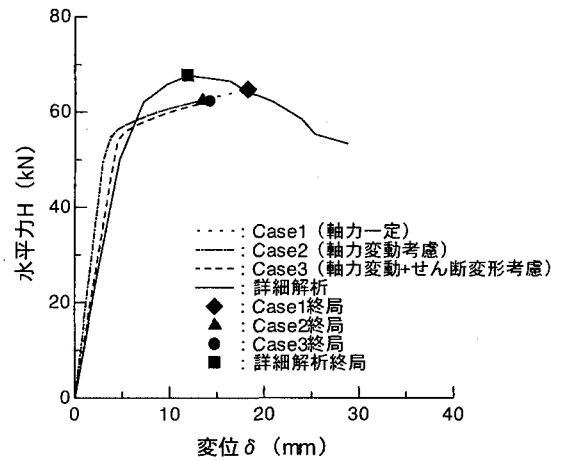


図-4.1 水平荷重-水平変位関係

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。

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。

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。

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。

(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。

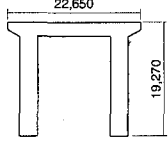
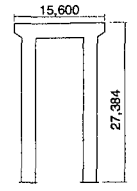
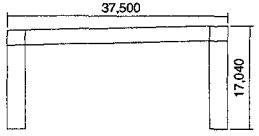
5. 既設鋼製ラーメン橋脚面内方向耐力

(1) 既設鋼製ラーメン橋脚

一般に鋼製ラーメン橋脚の面内方向の保有水平耐力は単柱式橋脚と比較して大きいと言われている。しかし、既設の橋脚を対象とした解析的検討は少ないのが現状である。そこで、本研究では既設の鋼製橋脚から代表的な形状を有する鋼製ラーメン橋脚を抽出し、簡易解析モデルを用いて面内方向の弾塑性解析を行った。抽出した橋脚を表-5.1 にまとめて示す。対象橋脚の抽出、および解析における着目点は橋脚の梁、柱の剛性比、および支点条件である。荷重の載荷は面内方向の水平荷重漸増載荷である。

表中の P1 橋脚は実験供試体のモデル化対象となった橋脚であり、橋軸方向の支点条件は固定となっている。このため、P1 橋脚の柱断面は橋軸方向（面外方向）の地震時において決定されている。また、P2 橋脚は梁の長さと比較して柱高さが高く、橋軸方向の支点条件は多点固定条件である。P2 橋脚の柱断面は橋軸方向（面外方向）の地震時において決定されている。そして、P3 橋脚は梁の長さが柱高さと比較して長く、橋軸方向の支点条件は可動となっている。この橋脚のみ、柱断面は常時荷重時（死荷重+活荷重+温度荷重）に決定されている。

表-5.1 解析対象橋脚

解析対象橋脚	橋軸方向 固定条件	柱断面決定 荷重ケース
P1 (実験供試体) 	一点固定	死荷重 + 面外地震荷重
P2 	多点固定	死荷重 + 面外地震荷重
P3 	移動	死荷重 + 活荷重 + 温度荷重

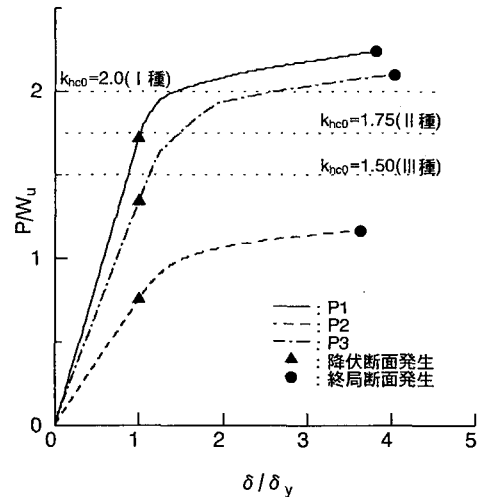


図-5.1 解析結果

(2) 静的解析結果

図-5.1 には表-5.1 に挙げた橋脚の解析結果をまとめて示している。図中の縦軸は水平荷重 P を各橋脚の上部工反力 W_u で無次元化しており、横軸は水平変位 δ を各橋脚降伏水平変位 δ_y で無次元化している。なお、上部工慣性重量 W_u は、死荷重反力と設定した。

図中の▲は各橋脚の降伏時を、●は終局時を示している。ここで、降伏時とは橋脚を構成する断面の中で最初に降伏ひずみに達した断面が生じた時をいい、終局時とは同様に、最初に終局ひずみに達した断面が生じた時をいう。

また、図中の点線は道路橋示方書に規定されているタイプII の設計基準震度レベルの地震時水平力を示している。

解析結果より、明らかになったことを次にまとめて示す。

- 1) P1 橋脚、および P3 橋脚の面内方向の耐荷力は大きく、これらの橋脚が建設されている地点の地盤条件に相当する基本設計震度 $k_{10}=1.5$ に対応する水平力作用時においては、ほぼ弾性挙動範囲にある。
- 2) P2 橋脚は他の 2 橋脚と比較して面内方向の耐荷力は小さい。しかし、その変形性能 (δ/δ_y) は 3.5 以上あり、この橋脚が建設されている地点の地盤条件に相当する基本設計震度 $k_{10}=1.5$ に対して、エネルギー一定則により弾塑性挙動を考慮した保有水平耐荷力は十分にあると考えられる。
- 3) P1 橋脚は、橋軸方向の支点条件が 1 点固定であり、上部工の橋軸方向地震時慣性力は P1 橋脚のみで支持される。この結果、橋脚断面は面外地震荷重で決定されている。これに対して面内方向地震荷重は支点条件が多点固定となり、隣接橋脚に分散され、P1 橋脚が支持する面内方向地震荷重は面外方向地震荷重と比較して小さくなる。さらラーメン構造を有する面内方向の耐荷力は、面外方向地震荷重に対応する片持ち梁構造の耐荷力より大きくなることは明らかである。
- 4) P2 橋脚の場合、橋脚柱断面は P1 橋脚と同様に面外方向地震荷重時において決定されているが、面外方向の支点条件

が多点固定であるため、面外方向地震荷重は面内方向地震荷重と同様に隣接橋脚に分散される。

この結果、P1 橋脚と比較して P2 橋脚が分担する面外方向地震力と面内方向地震力との差が小さいため、P2 橋脚は P1 橋脚と比較して、面内方向の耐荷力は小さくなるものと考えられる。

- 5) P3 橋脚の場合、その梁長は柱高さの約 2.2 倍となっており、梁の剛性は柱の剛性と比べて小さい。また、この橋脚の弾性設計時における設計荷重は面内の常時荷重時（死荷重+活荷重+温度荷重）が支配的である。このような場合、地震時の耐荷力は、余裕を有する場合が多い。

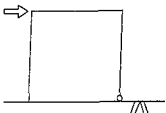
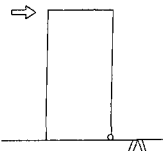
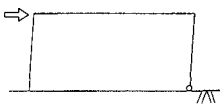
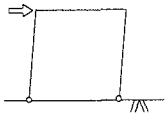
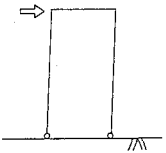
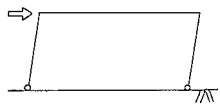
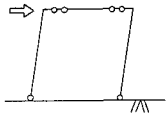
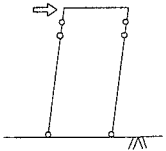
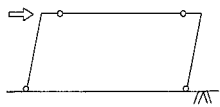
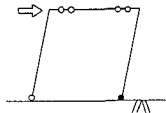
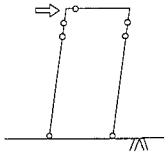
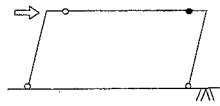
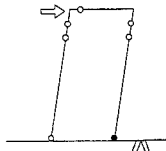
しかし、梁部材の弾塑性挙動が明確ではなく、本解析では、梁部材のせん断耐荷力特性を十分に反映していないため、今後、梁部材のせん断挙動を簡易解析モデルに導入し、解析的検討を行う必要がある。

(3) 既設鋼製ラーメン橋脚の損傷モード

表-5.2 には解析から得られた、各橋脚の損傷メカニズムをまとめて示している。

P1 橋脚は、圧縮側柱基部がまず降伏し、続いて引張側柱が降伏する。そして、梁部の隅角部近傍が降伏し、最終的に圧縮側

表-5.2 損傷モード一覧

P1 橋脚 (実験供試体)	P2 橋脚	P3 橋脚
①圧縮側柱基部降伏 	①圧縮側柱基部降伏 	①圧縮側柱基部降伏 
②引張側柱基部降伏 	②引張側柱基部降伏 	②引張側柱基部降伏 
③梁部降伏 	③柱上部降伏 	③梁部降伏 
⑤圧縮側柱基部終局 	④梁部降伏 	④梁部終局 
	⑤圧縮側柱基部終局 	図中の○は降伏を、●は終局を示す。

柱基部が終局に達する。

P2 橋脚は、圧縮側柱基部がまず降伏し、続いて引張側柱が降伏する。そして、柱上部が降伏し、さらに梁部が降伏して、最終的に圧縮側柱基部が終局に達している。

P3 橋脚は、P1 橋脚とほぼ同様の損傷形態をしめすが、最終的に終局に達するのは梁部の隅角部近傍であった。

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。
- (3) 解析対象とした既設鋼製ラーメン橋脚の面内方向の保有水平耐力は大きく、大地震時において、その応答がほぼ弾性挙動範囲内である橋脚も存在する。
- (4) 梁と比較して柱の剛性が高い鋼製ラーメン橋脚 (P3 橋脚) は、面内方向の地震時保有水平耐力は柱の剛性が低いもの (P2 橋脚) と比較して大きい。

- (5) 支点条件は多点固定の場合 (P2 橋脚)、面内地震荷重と面外地震荷重との差が小さいため、一点固定の支承条件を有する橋脚 (P1 橋脚) の場合と比較して面内方向の耐力が小さい。

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、梁部のせん断挙動を考慮できる簡易解析モデルの開発、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。

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) 阪神高速道路公団：鋼製橋脚設計要領 (案)、平成 11 年 3 月
- 3) 秦健作、内田諭、長尾圭介、永田和寿、渡邊英一：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、土木学会、第 26 回地震工学研究発表会講演論文集、pp.1229~1232、2001 年 8 月

(2001 年 12 月 7 日 受付)

Study on load-carrying capacity of actual rigid-frame steel pier under seismic load

Kensaku Hata, Yukio Adachi, Satoshi Yoshimura,
Shigeki Okashiro, Satoshi Uchida, Kazutoshi Nagata, Eiichi Watanabe

It is known that the simple analysis using the beam elements, that is considered the fluctuation of axial force and shear deformation of the pier members, give an approximation the results of the finite displacement analyses using the shell elements in elasto-plastic behavior in push-over analysis of the rigid-frame steel pier in plane direction.

Therefor, in this study we focused on the ratio of beam- rigidity and pier- rigidity , and the bearing conditions of the actual rigid frame steel piers. And we carried out the elasto-plastic analysis on these actual rigid frame steel piers using that simple beam elements. The main conclusions of this study were that the rigidity ratio of beam and pier, and the bearing conditions has great effect on the load-carrying capacity in plane direction of the rigid frame steel piers.