

◆ 設計法特集 ◆

## 鋼製橋脚の新しい耐震設計法

中谷昌一\* 中洲啓太\*\* 西川和廣\*\*\* 村越 潤\*\*\*\* 小野 潔\*\*\*\*\* 高橋 実\*\*\*\*\*

### 1. はじめに

#### 1.1 鋼製橋脚の被災

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、道路橋においても橋脚の倒壊や落橋等の多くの被害が生じた。鋼製橋脚については、我が国で初めて大きな被害を受け、その被害は橋脚を構成する補剛板や鋼管の局部座屈(写真-1, 2参照)、変形、割れ等であり、うち2基は倒壊に至っている<sup>1)</sup>。

この兵庫県南部地震での被害を受け、鋼製橋脚の大地震時の弾塑性挙動、抵抗メカニズム等を明らかにするため、建設省土木研究所を中心とした共同研究<sup>2)</sup>において、正負交番載荷実験等が行われた。その成果は、平成8年12月に改定された道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編<sup>3)</sup>(以下、H8道示という)に反映され、鋼製橋脚に対して初め



写真-1 矩形断面鋼製橋脚の補剛板の局部座屈

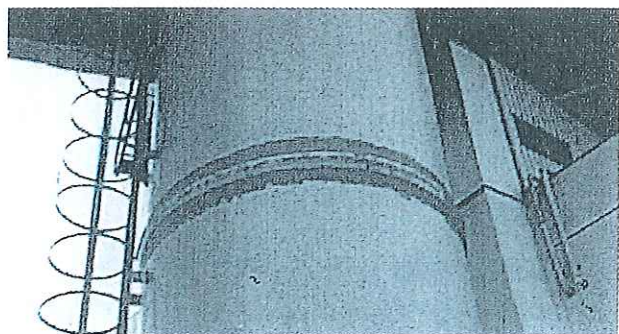


写真-2 円形断面鋼製橋脚の局部座屈

てじん性を考慮した設計法が導入された。

#### 1.2 平成8年の道路橋示方書

H8道示では、コンクリートを充填した鋼製橋脚については、鉄筋コンクリート橋脚と同様に、地震時保有水平耐力法による耐震設計が規定された。一方、コンクリートを充填しない鋼製橋脚については、大きな地震力を受けた場合の抵抗メカニズム、じん性の評価について未解明な部分が多いため、構造細目を規定するとともに非線形性を考慮した動的解析により耐震性の照査を行うこととされた。そして、非線形動的解析について、時刻歴応答解析による耐震性評価手法が具体的に示されている。

非線形動的解析による耐震設計を行うためには、許容変位に対応した復元力モデル(繰返し載荷を受けるときの履歴特性を表す非線形履歴モデル)を設定する必要がある。

H8道示では、鋼製橋脚の許容変位について、タイプIの地震動に対しては、「耐力低下をほとんど起こさない領域の最大変位」を、タイプIIの地震動に対しては、「耐力低下の小さい領域の最大変位」を目安に設定することになっている。また、復元力モデルとしてP- $\delta$ (荷重-変位)関係による例が示されている。図-1にH8道示に示されている非線形動的解析モデルの設定例を示す。

なお、非線形動的解析で必要となる鋼製橋脚の弾塑性挙動を表す諸数値(例えば、復元力モデルの設定に用いる許容変位)は、「同等の構造細目を

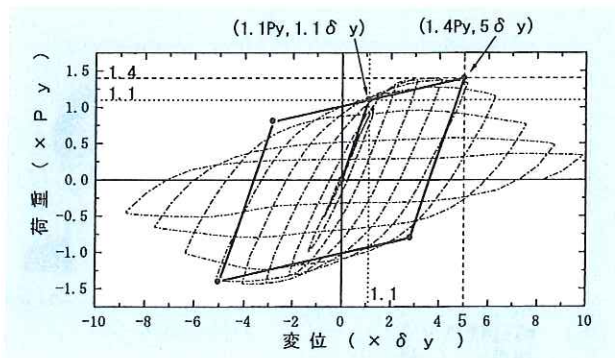


図-1 H8道示の非線形動的解析モデルの設定例

有する供試体の繰返しの影響を考慮した載荷実験データに基づいて定めることを原則」としている。

### 1.3 最近の研究動向

近年、コンピュータ等の発達がめざましく、橋梁全体系での非線形動的解析の普及が進んできている。また、橋梁の耐震性を柱一本のような部分ごとではなく、全体系で考えることは、より合理的な設計を行う上で有効であるため、今後、橋梁の耐震設計における動的解析の重要性は高まっていくものと考えられる。こうした状況を背景に、複雑な構造にも幅広く適用でき、かつ、安定した解を得ることのできる非線形動的解析モデルに対するニーズが高まっている。そこで、本稿では、橋梁全体系での非線形動的解析による耐震設計に適した新しい設計手法を提案する。

## 2. 鋼製橋脚の新しい耐震設計法

### 2.1 新しい設計法の特徴

本稿で提案する鋼製橋脚の耐震設計法は、H8道示の設計法と比較して、以下の3つの相違点を有している。

- ① 充填コンクリートの有無に関係なく、非線形動的解析を用いて耐震性照査を行う。
- ② 許容変位は最大水平力となる時の変位 (図-2中の  $\delta_m$ ) を目安に設定する。
- ③ 非線形動的解析に用いる非線形履歴特性として、 $M-\phi$  (モーメント-曲率) 関係に基づく復元力モデルを用いる。

### 2.2 許容変位の考え方

本稿では、鋼製橋脚の許容変位を「最大水平力となる時の変位を目安に設定する」こととしている (図-2 参照)。これは、水平力が最大となる変位  $\delta_m$  以内であれば、補剛板の局部座屈の影響が少なく、載荷繰返し回数等の載荷履歴に関わらず、安定した非線形履歴特性が得られること<sup>2)</sup>、また、弾塑性挙動を考慮した詳細な解析により、実現象を精度よく再現できることを理由としている。

### 2.3 復元力モデル

H8道示では、非線形動的解析に用いる復元力モデルとして、 $P-\delta$  関係 (図-3 参照) に基づく設定例が示されている。 $P-\delta$  関係に基づく復元力モデルは、変位から直接復元力モデルを求めるもので、対象とする鋼製橋脚と同等の構造細目を有する実験供試体の繰返し載荷試験結果が得られて

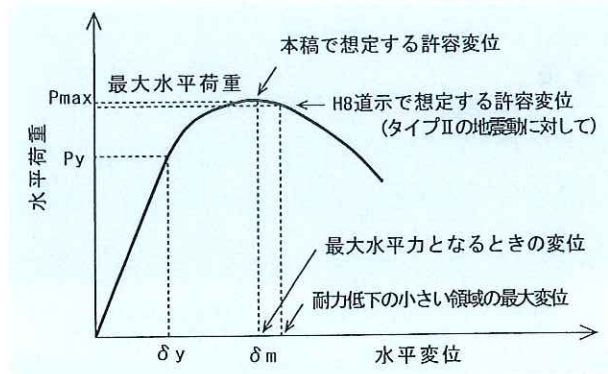


図-2 許容変位の考え方

いる場合には有用なものである。しかしながら、同等の構造細目を有する実験供試体の繰返し載荷試験結果等が得られていない場合は、橋脚の弾塑性挙動を適切に考慮できる詳細な解析を行う必要があるため、設計の実務においては、実験データの少ない複雑な構造に対して適用が限定されるのが現実である。

一方、本稿で採用している  $M-\phi$  関係 (図-4 参照) に基づく復元力モデルでは、一本柱の実験結果を利用して、各橋脚断面の  $M-\phi$  関係を決定することが可能であり、一本柱のみならずラーメン橋脚などのより複雑な構造にも適用できる汎用性の高いモデルである。ただし、 $M-\phi$  関係は、ある特定の軸力下において設定されるのが一般的である。よって、繰返し力の作用により軸力変動が生じる構造物に適用する場合には、その適用性を検証する必要がある。

$\sigma-\epsilon$  (応力-ひずみ) 関係 (図-5 参照) を直接利用する復元力モデル (一般にファイバーモデルを指すことが多い) を用いると、大きな軸力変動にも対応することができる。しかしながら、 $\sigma-\epsilon$  関係に基づく復元力モデルは、材料の構成則や繰返し載荷履歴が解析結果に大きな影響を与えることについて十分検討されているとは言い難いこと<sup>4)</sup>、また、現状の復元力モデルでは、本稿で対象とする最大水平力時の変位について、解析結果が

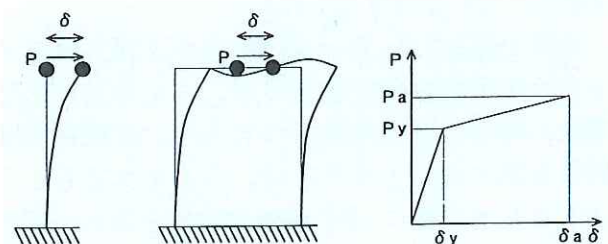


図-3  $P-\delta$  関係

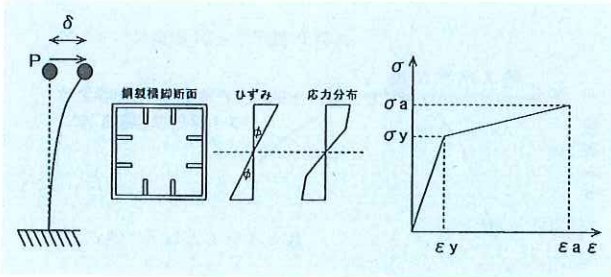


図-4 M- $\phi$ 関係(コンクリート充填柱の場合)

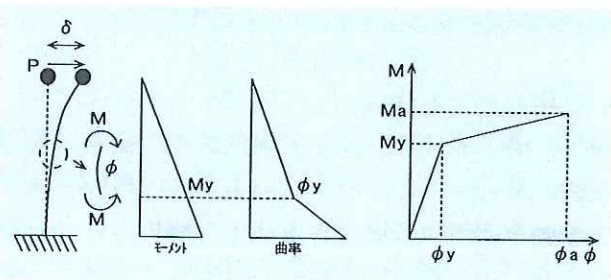


図-5  $\sigma$ - $\epsilon$ 関係(ファイバーモデルの場合)

精度良く正負交番載荷実験結果を再現できているとは言い難い<sup>5)</sup>等の理由から、本稿では、対象から外すこととした。

### 3. 復元力モデルの設定方法

#### 3.1 復元力モデルの概要

復元力モデルは、設計対象と同等の構造細目を有する供試体を用いた繰返し載荷実験もしくは弾塑性挙動を適切に考慮できる詳細な解析を行うことにより求めることができる。しかしながら、実務設計において、このような実験や解析を行うことは困難であるため、既存の実験結果を基に、復元力モデルが鋼製橋脚の構造諸元をパラメータとして求められれば便利である。

そこで、著者らは、土木研究所等で行われた正負交番載荷実験(写真-3参照)を基にして、復元力モデルを設定する上で必要となる許容ひずみ $\epsilon_a$ と鋼製橋脚の構造諸元を関連づけるための検討を行ってきた。正負交番載荷実験については文献2)を、復元力モデルの設定に関する検討については、文献6)~10)を参考にされたい。

本稿で提案するM- $\phi$ 関係に基づく復元力モデルの設定手順の概略を図-6に、コンクリート充填柱の場合の設定例を図-7に示す。非線形履歴特性を表す復元力モデルは、バイリニアもしくはトリリニア型のM- $\phi$ 関係の形状を決め、硬化則を導入することにより求められる。M- $\phi$ 関係は、降伏時を表す点( $\phi_y, M_y$ )および許容変位時

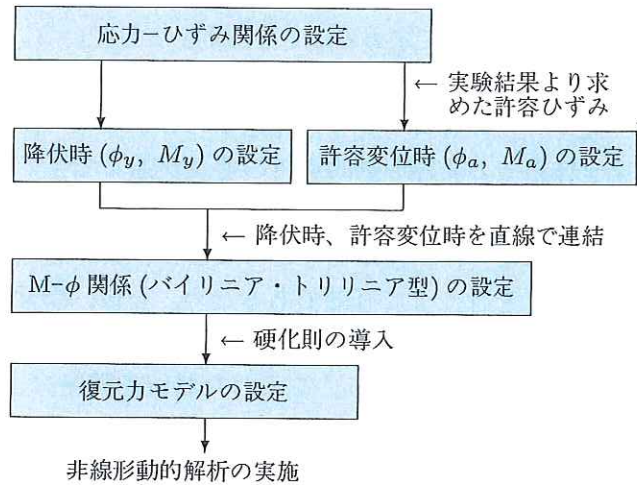


図-6 復元力モデルの設定手順

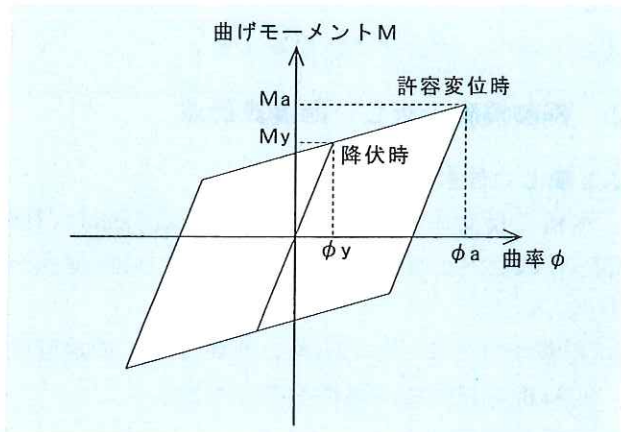


図-7 復元力モデルの設定例(コンクリート充填柱の場合)

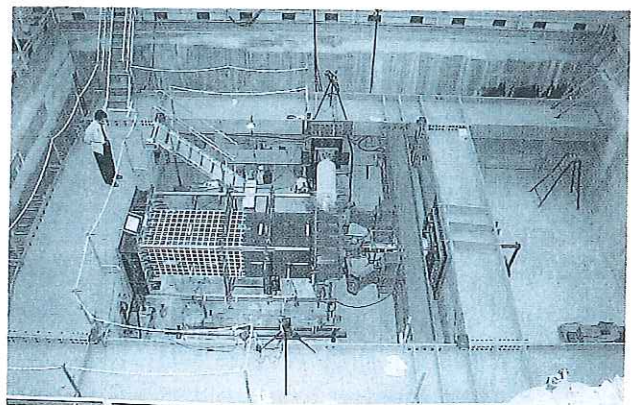


写真-3 土木研究所で行われた正負交番載荷実験

を表す点( $\phi_a, M_a$ )を計算し、原点、( $\phi_y, M_y$ )、( $\phi_a, M_a$ )を折れ線で連結することにより決定される。最大水平力時変位に対応する許容変位時の点( $\phi_a, M_a$ )の算出では、実験結果より求めた許容ひずみ $\epsilon_a$ を利用する。

以下の3.2および3.3では、本稿で提案する非線形動的解析に用いる復元力モデル設定手法を具体的に示すこととする。

3.2 コンクリートを充填しない鋼製橋脚の場合

①応力-ひずみ関係

鋼材の応力-ひずみ関係を、図-8 に示す 2 次勾配  $E/100$  を有するバイリニア型とする。ここに、 $E$  は鋼材のヤング率である。

②許容ひずみの算出

鋼製橋脚の断面形状に応じて、式 (1)<sup>7)</sup> および式 (2)<sup>8)</sup> により、許容変位の算出に用いる許容ひずみ  $\epsilon_a$  を求める。

$$\text{矩形断面 } \epsilon_a / \epsilon_y = 20 - 25R_F \quad (1)$$

$$\text{円形断面 } \epsilon_a / \epsilon_y = 20 - 140R_t \quad (2)$$

ここに、 $\epsilon_y$  は鋼材の降伏ひずみ、 $R_F$  は鋼断面の幅厚比パラメータ、 $R_t$  は鋼断面の径厚比パラメータである。

なお、式 (1) および (2) は、正負交番荷重実験に合うように設定されたものである。そのため、実験で用いた供試体の幅厚比・径厚比パラメータ、軸力比、細長比パラメータ等の諸元により適用の範囲が存在する。詳細については、文献 7), 8) を参考にされたい。

③ M- $\phi$  関係の設定

①の応力-ひずみ関係を利用して、平面保持の仮定が成り立つものとし、軸力の影響を考慮して鋼材の板厚中心位置における鋼材の圧縮ひずみおよび引張ひずみが、それぞれ初めて降伏ひずみに達するときの  $(\phi_{yc}, M_{yc})$  および  $(\phi_{yt}, M_{yt})$ 、鋼材の板厚中心位置における圧縮ひずみが初めて②で求めた許容ひずみに達するときの  $(\phi_a, M_a)$  を算出し、その 3 点を結んだトリリニア型の M- $\phi$  モデルを設定する (図-9 参照)。

④復元力モデルの設定

③で求めた M- $\phi$  関係を骨格曲線とする復元力モデルを設定する。復元力モデルの硬化則は、移動硬化型とする。

3.3 コンクリートを充填した鋼製橋脚の場合

①鋼材およびコンクリートの応力-ひずみ関係

鋼材の応力-ひずみ関係は、図-8 に示す 2 次勾配  $E/100$  を有するバイリニア型とする。また、充填コンクリートの応力-ひずみ関係は、図-10 に示すモデルとする。

②許容ひずみの算出

鋼製橋脚の断面形状に応じて、式 (3)<sup>9)</sup> および式 (4)<sup>10)</sup> により、許容変位を算出するために用い

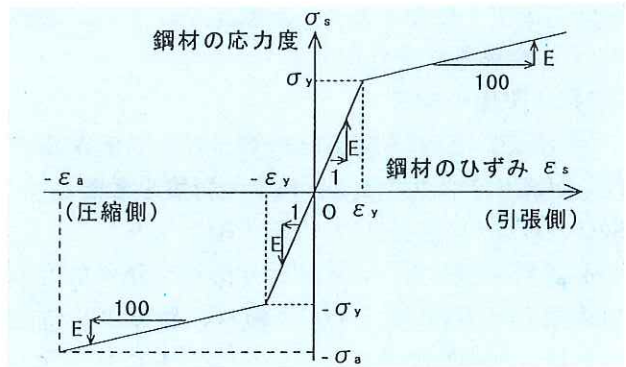


図-8 鋼材の応力-ひずみ関係

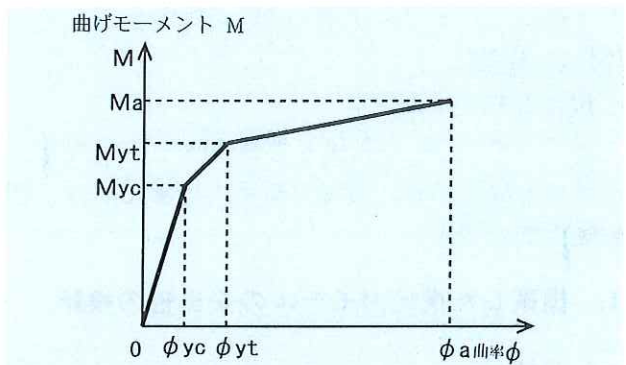


図-9 トリリニア型の M- $\phi$  モデル

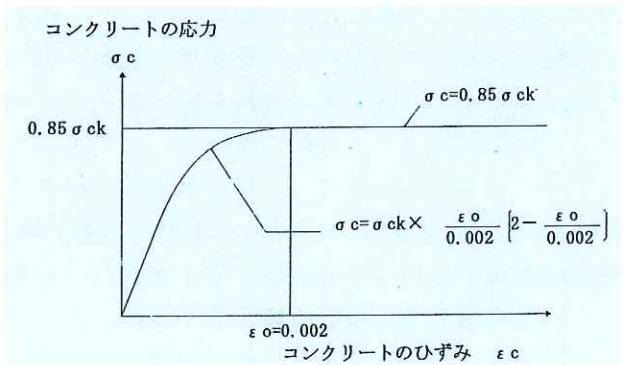


図-10 コンクリートの応力-ひずみ関係

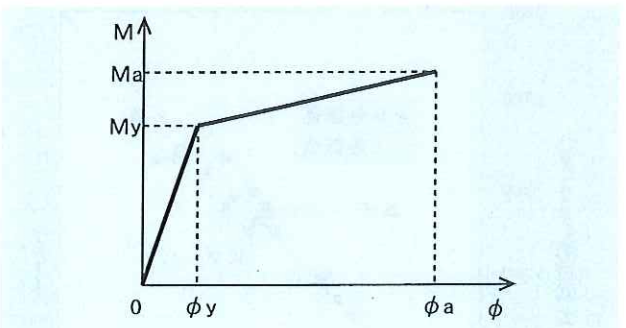


図-11 バイリニア型の M- $\phi$  モデル

る許容ひずみ  $\epsilon_a$  を求める。

$$\text{矩形断面 } \epsilon_a / \epsilon_y = 7 \quad (3)$$

$$\text{円形断面 } \epsilon_a / \epsilon_y = 5 \quad (4)$$

式 (3) および式 (4) についても、式 (1), (2) と

同様に適用の範囲がある。詳細については、文献 9), 10) を参考にされたい。

③M-φ 関係の設定

①の応力-ひずみ関係を利用して、平面保持の仮定が成り立つものとし、軸力の影響を考慮して、鋼材の板厚中心位置における圧縮ひずみもしくは引張ひずみのうち、いずれかが最初に降伏ひずみに達するときの ( $\phi_y, M_y$ )、鋼材の板厚中心位置における圧縮側ひずみが初めて②で求めた許容ひずみに達するときの ( $\phi_a, M_a$ ) を算出し、その2点を結んだバイリニア型の M-φ 関係を設定する (図-11 参照)。

④復元力モデルの設定

③で求めた M-φ 関係を骨格曲線とする復元力モデルを設定する。復元力モデルの硬化則は、移動硬化型とする。

4. 提案した復元力モデルの妥当性の検証

今回検討した M-φ 関係に基づく復元力モデルの妥当性を検証するため、正負交番載荷実験の最大水平荷重および最大荷重時変位について、提案した復元力モデルを用いた計算結果と比較を行った。計算結果と実験結果の比較を図-12~15 に示す。これらの図より、本稿で検討を行った復元力モデルによる計算結果は、正負交番載荷実験から得られる最大荷重および最大荷重時を比較的精度よく表現していることがわかる。また、コンクリートを充填しない鋼製橋脚については、ハイブリッド地震応答実験結果と提案した復元力モデル

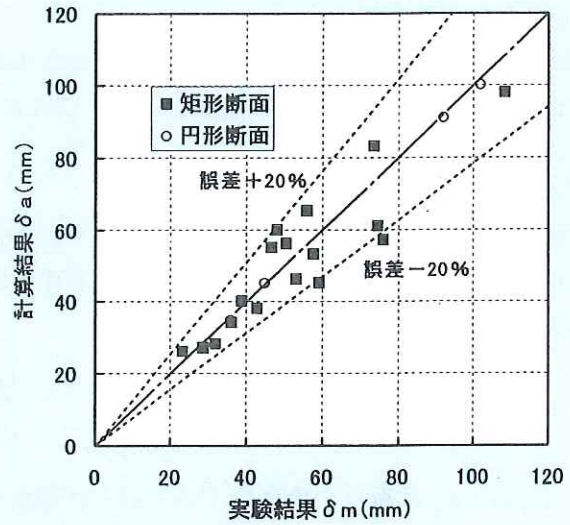


図-13 許容変位の比較 (コンクリート未充填柱)

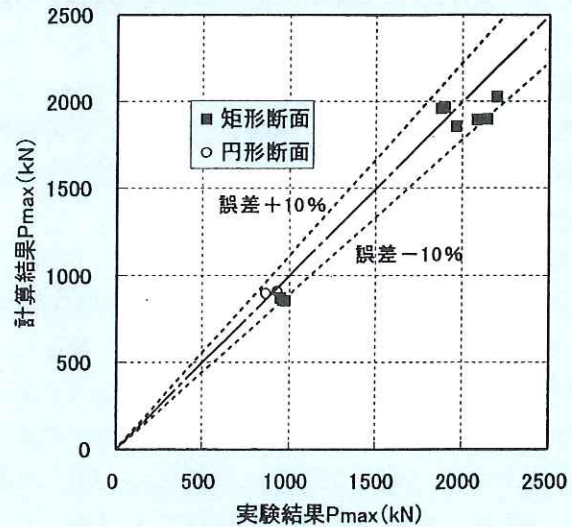


図-14 最大水平荷重の比較 (コンクリート充填柱)

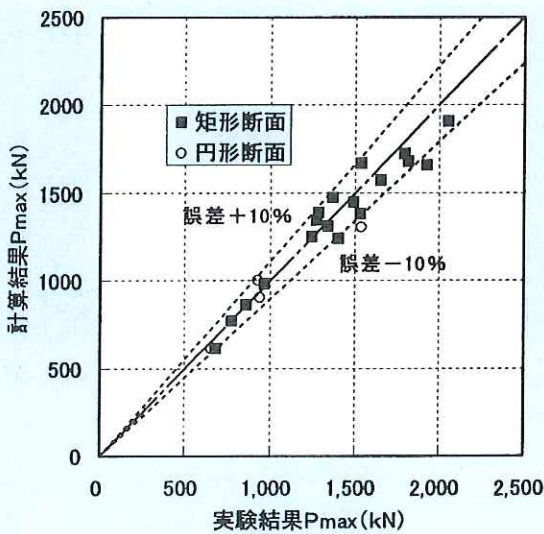


図-12 最大水平荷重の比較 (コンクリート未充填柱)

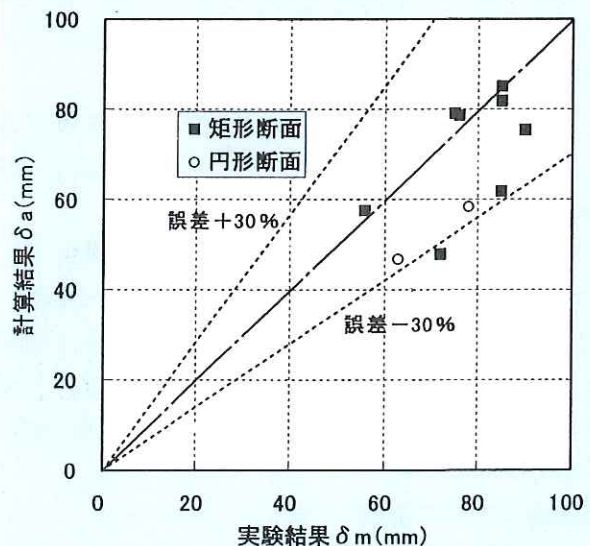


図-15 最大荷重時変位の比較 (コンクリート充填柱)

を用いた非線形動的解析結果の比較も行い、有用性の確認も行っている。詳しくは、文献<sup>7)</sup>などを参考にされたい。

## 5. おわりに

本稿では、非線形動的解析を用いた鋼製橋脚の新しい耐震設計手法を紹介した。今後は、提案した手法を用いて試設計等を行い、これまでの検討結果と合わせて、設計法の理解を助ける資料としてとりまとめる予定である。

### 参考文献

- 1) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書, 1995.12
- 2) 建設省土木研究所、首都高速道路公団、阪神高速道路公団、名古屋高速道路公社、(社)鋼材倶楽部、(社)日本橋梁建設業協会：道路橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書 (I)~(VII), (総括編), 1997.4~1999.3
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996.12
- 4) 中洲啓太、西川和廣、小野潔、野中哲也：実験結果に基づく矩形断面鋼製橋脚のファイバーモデルを用いた復元力モデル設定手法に関する一検討, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集, I-A143, 2000.9
- 5) 宇佐美勉、森下邦宏、阪野崇人：鋼構造物の動的耐震照査法に関する検討, 第 4 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, 2002.1
- 6) 西川和廣、村越潤、小野潔、高橋実：実験結果に基づく鋼製橋脚の非線形動的解析モデル設定法, 土木技術資料, 1999.10
- 7) 深谷茂広、小野潔、沈赤、村越潤、西川和廣：矩形断面鋼製橋脚の正負交番載荷実験結果を基にした曲げ-曲率関係の検討, 構造工学論文集, Vol.46A, 2000.3
- 8) 小野潔、西村宣男、西川和廣、高橋実、中洲啓太：円形断面鋼製橋脚の正負交番載荷実験結果に基づく M- $\phi$  モデル設定手法に関する検討, 鋼構造論文集, 2001.9
- 9) 小野潔、西村宣男、西川和廣、中洲啓太、野中哲也、坂本佳子：コンクリートを充填した矩形断面鋼製橋脚の M- $\phi$  関係を利用した耐震性評価手法に関する検討, 構造工学論文集, Vol.48A, 2002.3
- 10) 小野潔、西村宣男、高橋実、野中哲也、坂本佳子：コンクリートを充填した鋼製橋脚の M- $\phi$  関係を利用した耐震性能評価手法に関する検討, 第 4 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, 2002.1

中谷昌一\*



国土交通省国土技術政策総合研究所道路研究部橋梁研究室長  
Shoichi NAKATANI

中洲啓太\*\*



同 道路研究部橋梁研究室  
研究官  
Keita NAKASU

西川和廣\*\*\*



同 企画部評価研究官  
Kazuhiro NISHIKAWA

村越 潤\*\*\*\*



同 危機管理技術研究センター  
地震防災研究室長  
Jun MURAKOSHI

小野 潔\*\*\*\*\*



大阪大学大学院助手  
(前 橋梁研究室研究員)  
Kiyoshi ONO

高橋 実\*\*\*\*\*



独立行政法人土木研究所構造物  
研究グループ橋梁構造チーム  
研究員  
Minoru TAKAHASHI