

# コンクリート充填鋼製橋脚の 地震応答値の算定に関する解析的研究

葛 漢彬<sup>1</sup>・佐竹 洋一<sup>2</sup>・宇佐美 勉<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) 名古屋大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

<sup>2</sup>正会員 修士(工学) 名古屋鉄道株式会社 (〒450-8501 名古屋市中村区名駅1-2-4)

<sup>3</sup>フェロー D.Sc. 工博 名古屋大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

コンクリート部分充填鋼製橋脚の動的耐震照査法を構築する際に、地震応答値(最大応答変位と残留変位)を精度よく推測できる解析手法を確立する必要がある。本研究では提案されているトリリニア復元力モデルのパラメータをPushover解析から求め、それをを用いた地震応答解析の結果の精度を検証している。さらに、実務設計での応用を念頭に、Pushover解析結果をバイリニア近似した簡単な復元力モデルを用いた地震応答解析による手法を考案し、その有用性を示した。

**Key Words:** Concrete-filled steel pier, maximum response displacement, residual displacement

## 1. 緒言

コンクリート部分充填鋼製橋脚の動的耐震照査法を構築する際に、地震応答値(最大応答変位と残留変位)を精度よく推測できる解析手法を確立する必要がある。主な地震応答解析手法としては、1自由度系モデル、はり要素を用いたファイバーモデル、およびシェル・板要素を用いた3次元モデルがあるが、通常的设计レベルではこの方法が推奨されている<sup>1)</sup>。ファイバーモデルのほうがより汎用性があるが、ここでは、1自由度系モデルによる地震応答解析とその結果について述べる。

1自由度系モデルによる地震応答解析においては、部材の復元力特性が必要となる。コンクリート部分充填鋼製橋脚の場合、劣化域のないトリリニアモデルが子林ら<sup>2)</sup>によって提案されているが、モデルパラメータが静的および静的繰り返し載荷実験結果から決定されるようになっている。相当する実験がない場合は、Pushover解析などを基にして決定することになるが、この点について検討が十分ではない。そこで、耐荷力実験結果を用いずにPushover解析から復元力モデル( $H-\delta$ 関係)のパラメータを決定し、地震応答解析結果の精度をハイブリッド地震応答実験の結果と比較して検証する。さらに、実務設計での応用を念頭に、Pushover解析から得られた $H-\delta$ 関係をバイリニア近似した簡単な復元力モデルを用いた地震応答解析による手法を考案し、解析結果と実験結果との比較よりその有用性を示す。

## 2. 解析手法

解析にあたっては、橋脚を頂部に質点を持つ1自由度系にモデル化した。集中質量は道路橋示方書に従い、上部構造重量に橋脚重量の0.3倍を加えた等価な重量から求めた。弾塑性地震応答解析には線形加速度法を用いた。なお、解析では、減衰定数を0.05、解析時間間隔を0.01sとした。復元力モデルはトリリニアとバイリニアの2種類を用いた。

トリリニア復元力モデルの骨格曲線を図-1に示す。ここで、初期剛性 $k_1$ と最大荷重 $H_m$ はPushover解析から得られた $H-\delta$ 関係より決定した。また、硬化域剛性 $k_2$ は $0.2k_1$ とし、最大荷重 $H_m$ に達した後の剛性 $k_3$ は零とした。なお、復元力特性を決定する際に、除荷剛性の低下と最大荷重に達する変位の変更などが考慮できるようになっている<sup>2)</sup>。

一方、バイリニア復元力モデル(図-2)においては、Pushover解析から求められた $H-\delta$ 関係から、終局点( $\delta_u$ ,  $H_u$ )までの吸収エネルギー( $H-\delta$ 曲線と基線との間に囲まれる面積)が元の曲線と同じになるように二次剛性 $k_2$ を決定した。復元力特性には移動硬化則を用いた。この手法は、文献1), 3)などで示された鋼製橋脚の耐震照査法と同様である。

前述したように、トリリニアモデルとバイリニアモデルのパラメータはPushover解析から求められる。すなわち、コンクリート部分充填鋼製橋脚の水平荷重-水平変

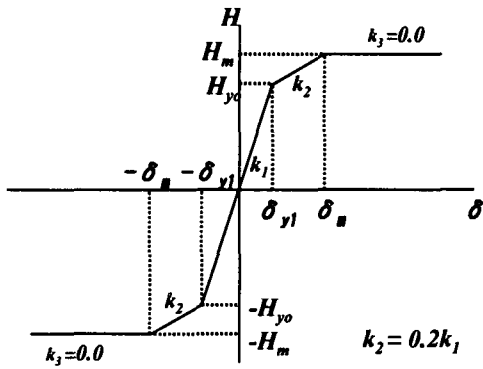


図-1 トリリニア復元力モデルの骨格曲線

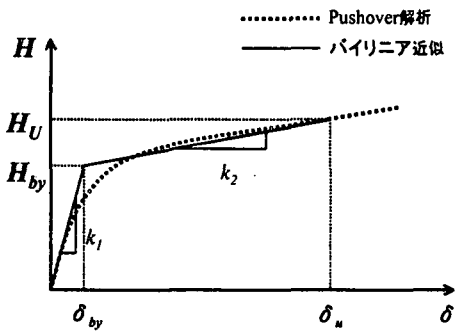
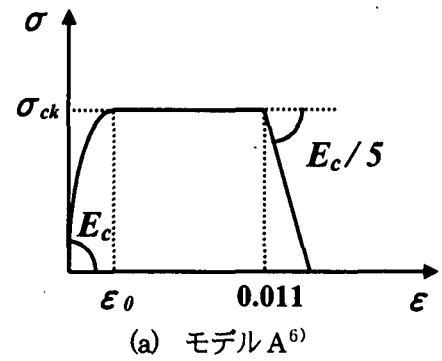
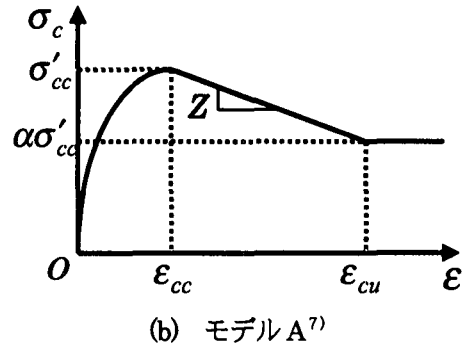


図-2 パイリニア復元力モデルの骨格曲線



(a) モデルA<sup>6)</sup>



(b) モデルA'<sup>7)</sup>

図-3 充填コンクリートの構成則

位関係が Pushover 解析を行うことにより得られる。地震時保有水平耐力照査法の詳細は、文献 4), 5)などに参照されたいが、解析に用いたコンクリートの構成則は、図-3に示されるように、文献6)で用いた強度軟化型モデル(モデルAと称す)、と文献7), 8)で提案されている拘束効果を考慮した充填コンクリートモデル(モデルBと称す)である。モデルAでは拘束効果による圧縮強度の増加と最大強度後の挙動が鋼板の寸法や材質に関係なくごく簡単にモデル化されているのに対して、モデルBでは圧縮強度 ( $\sigma_{cc}$ )、軟化勾配 ( $Z$ ) 及び残余強度 ( $\alpha\sigma'_{cc}$ ) に達したときのひずみ  $\epsilon_{cu}$  を算出する経験式が、幅厚比または径厚比パラメータ、コンクリートのシリンダー強度と鋼材の降伏応力との比を用いて表されている。これらの経験式は、Concrete-steel interaction modelを用いた解析と実験結果による検証を併用する手法に基づくものである。

### 3. 解析結果および考察

地震応答解析の対象としたのは、文献9)と10)でそれぞれ報告されているハイブリッド地震応答実験の供試体4体と3体の、計7体である。

復元力モデルの決定にあたっては、モデルAおよびモデルBを適用した地震時保有水平耐力照査法に基づく Pushover 解析をそれぞれ行った。その結果、地震応答解析の際に必要なモデルパラメータ ( $k_1, k_2$  など) が得られ

た。入力地震動は実験で使用したもので、兵庫県南部地震で観測された地震波のうち、I種地盤の神戸海洋気象台観測地震波のN-S成分(以下JMA)、II種地盤のJR警報地震計(鷹取)による観測地震波のN-S成分(以下JR-Takatori)、III種地盤の東神戸大橋地震波N12W成分(以下Higashi-Kobe)を用いた。

図-4に両復元力モデルを用いた地震応答解析から得られた最大応答変位と実験結果との比較を示す。図-4(a)より、トリリニアモデルは数ケースを除けば、コンクリートモデルAを適用した Pushover 解析により復元力特性を定めた場合、誤差が15%以内の精度で最大応答値を予測することができた。また、 $5\delta_u$ 以上の大きい応答値では若干安全側の予測を与えることがわかる。文献2)で実験から得られた値を復元力モデルの決定に使用した際は、誤差10%以内に収まったことを考慮すると、Pushover 解析から得られる最大荷重の値の精度が、影響を及ぼしていることが言える。一方、パイリニアモデルでは、誤差が81%とかなり大きいケースがあったものの、精度が概ね良好であることがわかる。これに対して、図-4(b)からわかるように、コンクリートモデルBからのトリリニアモデルとパイリニアモデルのいずれも、誤差がほぼ15%以内に収まっており、特に、 $5\delta_u$ 以上の大きい応答値ではより良い予測が得られている。コンクリートモデルAで大きな誤差を示したケースを見ると、モデルBにより定めたパイリニアモデルによる誤差が11.8%と精度よく求められた。この原因としては、モデルAからの復元力

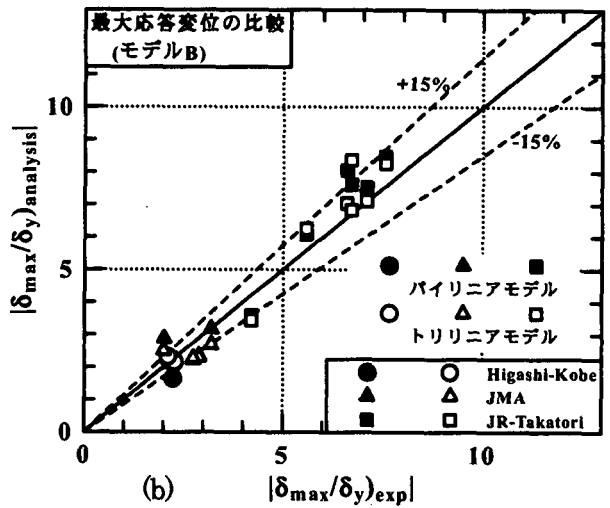
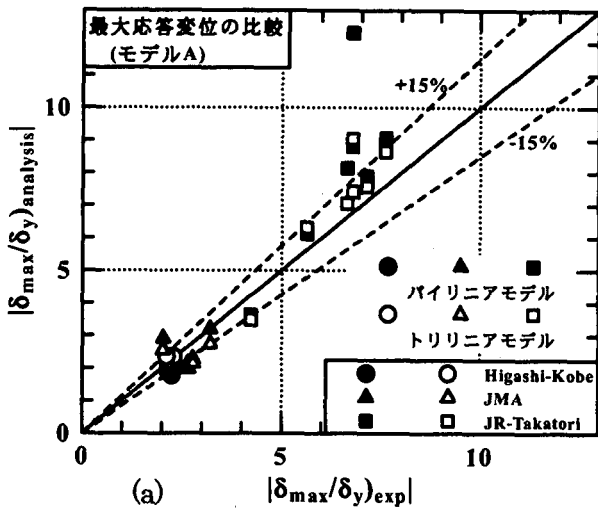


図-4 最大応答変位の比較

モデルの二次剛性  $k_2$  がほとんど負であるために、実際よりも復元力が小さくなり、変位が大きくなったものと考えられる。

次に残留変位であるが、図-5 に示されるように、コンクリートモデル A と B のいずれを適用しても、バイリニアモデルを用いた地震応答解析による残留変位は、実験結果に比較して非常に大きくなっている。特に、JR-Takatori 地震波を入力した解析においては、この傾向が顕著である。一方、トリリニアモデルでも大きな誤差がある。図-6 から判りづらいが、 $2\delta_y$  程度の変位についても、20~30%の誤差が出ている。したがって、地震応答解析から残留変位を予測するのが非常に困難である。そこで、文献 1) で提案されている最大応答変位  $\delta_{max}$  から算定する方法を適用してみる。それによると、残留変位  $\delta_R$  と最大応答変位  $\delta_{max}$  には相関関係があり、以下のように経験式が提案されている ( $S_R$  は標準偏差)。

$$\frac{\delta_R}{h} = \frac{1}{400} \left( \frac{\delta_{max}}{\delta_y} \right)^{0.7} - \frac{1}{500} \quad (S_R = 0.00303) \quad (1)$$

ここで、 $h$  = 橋脚の高さ、 $\delta_y$  = 降伏変位である。ただし、この式での  $\delta_y$  は、コンクリートの影響を無視した鋼柱の降伏変位であることに注意されたい。この式を用いて最大応答変位から推定した残留変位と地震応答実験から得られた値を図-6(a)と(b)に、コンクリートモデル A と B についてそれぞれ比較している。同図より、誤差が 15% の精度内に収まっていないものが多くあるが、全般的に精度よく予測できているといえる。

#### 4. 結言

本論文は、コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚

の応答値を簡単な地震応答解析により算出するための解析手法の精度をハイブリッド地震応答実験の結果と比較することにより検証したものである。本研究により得られた結果をまとめると次のようになる。

1. 過去に提案されているトリリニアモデルは、Pushover 解析からモデルパラメータを決定した場合も比較的精度のよい地震応答結果を予測できる。
2. コンクリートの拘束効果を比較的厳密に考慮したモデル B を適用した Pushover 解析から復元力モデルを決定すると、最大応答変位はモデル A の場合に比べ、より精度よく予測することができる。
3. 残留変位はトリリニアモデル、バイリニアモデルともに地震応答解析から求めるよりも、最大応答変位から推定する経験式より求める方が実験値に近い。

緒言でも述べたように、ファイバーモデルのほうがより汎用性があるため、将来的には、このモデルを用いた耐震解析が行われるようになると思われる。これについての検討が現在進行中であり、別途報告する予定である。

#### 参考文献

- 1) 日本鋼構造協会・次世代土木鋼構造物研究特別委員会・鋼橋の耐震設計小委員会：鋼構造物の耐震解析用ベンチマークと耐震設計法の高度化，2000。
- 2) 子林稔，宇佐美勉，鈴木森晶：コンクリート部分充填鋼製橋脚の復元力モデルと弾塑性地震応答解析，構造工学論文集，Vol.43A，pp.859-868，1997。
- 3) 宇佐美勉，鄭沂，葛漢彬：Pushover 解析と等価 1 自由度モデルによる鋼製ラーメン橋脚の耐震設計法，土木学会論文集，No.626/I-48，pp.231-240，1999。
- 4) 宇佐美勉，鈴木森晶，Iraj H.P.Mamaghani，葛漢彬：コンク

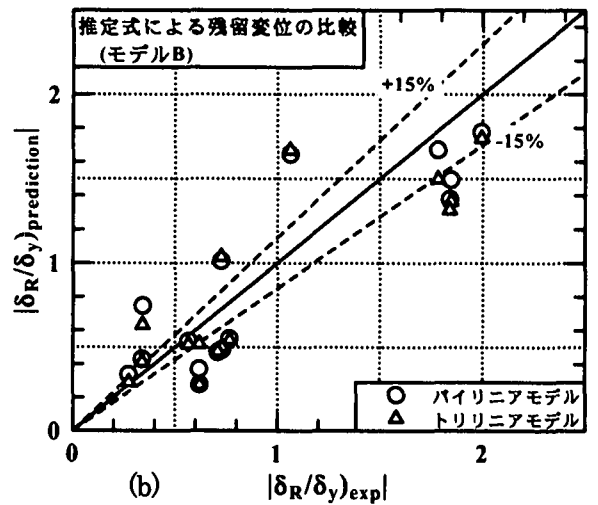
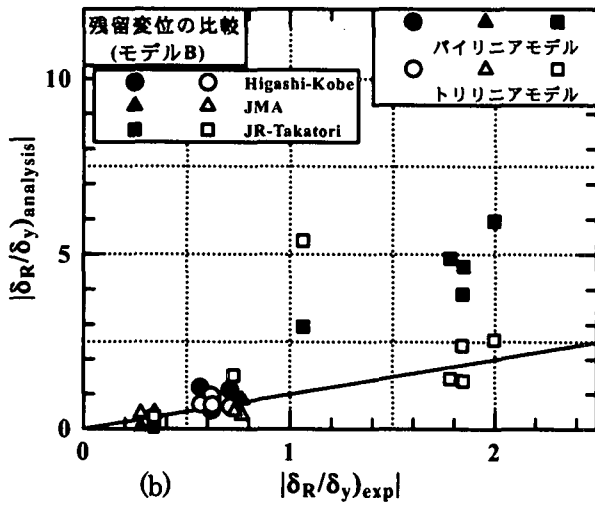
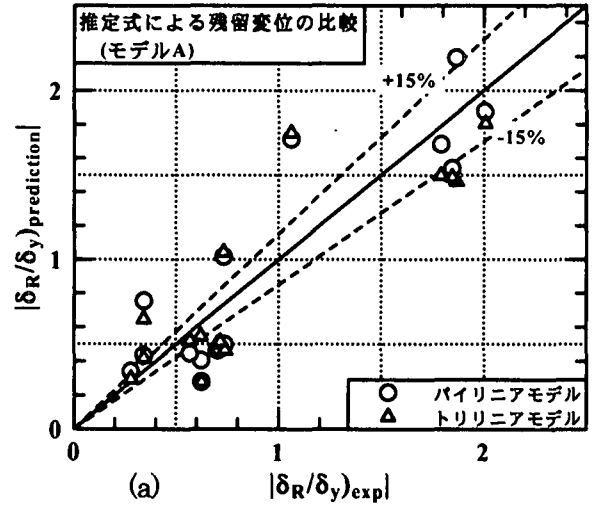
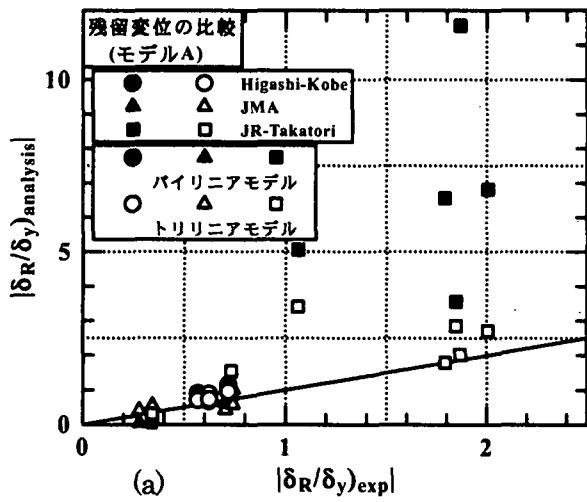


図-5 残留変位の比較

図-6 最大応答変位から推定した残留変位の比較

リートを部分的に充填した鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査法の提案, 土木学会論文集, No.525/I-33, pp.69-82, 1995.

5) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計WG(主査:宇佐美勉):鋼橋の耐震設計のための新技術, 1996.

6) 葛漢彬, 浅田秀史, K.A.S. Susantha, 宇佐美勉: 薄肉及び厚肉断面を有するコンクリート部分充填鋼製橋脚の統一的耐震照査法, 構造工学論文集, Vol. 47A, pp.783-792, 2001.

7) Susantha, K.A.S., Ge, H.B. and Usami, T.: Uniaxial stress-strain relationship of concrete confined by various shaped steel tubes, Engineering Structures, 2001.

8) Susantha, K.A.S., Ge, H.B. and Usami, T.: A capacity prediction procedure for concrete-filled steel columns, J. of Earthquake Engineering, 2001.

9) 才塚邦弘, 宇佐美勉: コンクリート部分充填鋼製橋脚の終局耐震設計法と耐震実験による検証, 土木学会論文集, No.570/I-40, pp.287-296, 1997.

10) 芳崎一也, 宇佐美勉, 本間大介: 大地震後残留変位を抑制した鋼製橋脚の開発-ハイブリッド地震応答実験による検証, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.1017-1026, 1999.

(2001. 5. 25 受付)