

## コンクリート部分充填鋼製橋脚の地震応答推定手法の精度に関する比較検証

葛 漢彬<sup>1</sup>・K.A.S. Susantha<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 博士(工学) JSPS 特別研究員 愛知工業大学工学部土木工学科(〒470-0392 豊田市八草町八千草1247)

<sup>3</sup>フェロー D.Sci. 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)

### 1. はじめに

土木構造物の地震時応答(要求性能)を求めるための解析手法としては、(1)1自由度系モデル(マス・ばねモデル)、(2)はり要素モデル、および(3)鋼板にシェル・板要素、中詰めコンクリートにソリッド要素を用いた3次元モデルがあるが、通常の耐震設計レベルでは(1)と(2)の方法が推奨されている<sup>1)</sup>。ここでは、コンクリートを基部に部分的に充填した鋼製橋脚に(1)と(2)の2つの方法を適用した場合の手法およびそれらの精度検証について述べる。

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。

一方、はり要素を用いたモデルとしては、応力-ひずみ関係に基づくファイバーモデルと、断面力構成関係に基づくM- $\Phi$ モデルがある。M- $\Phi$ モデルは、単柱式橋脚の非線形動的解析でよく用いられているが、ラーメン橋脚などの軸力変動がある場合や、せん断変形がある場合、さらにねじりが関与する3次元はり要素へ適用する場合は、正確に扱おうとすると非常に複雑になるため、将来的にはファイバーモデルに移行するものと思われる<sup>1)</sup>。このことから、ここではファイバーモデルのみによる検討を行う。先で述べたように、ファイバーモデルによる地震応答解析では、鋼とコンクリートの部材断面を分割した微小要素すなわちファイバーに1軸の応力-ひずみ関係を与える必要がある。よく用いられる鋼材の構成則は、降伏棚のあるひずみ硬化型<sup>3)</sup>またはバイリニア型(完全弾塑性型を含む)の応力-ひずみ関係に加え、移動硬化則を適用したものである。充填コンクリートの構成則、特に硬化則については、研究がまだ十分ではないが、文献2)で提案した静的解析用応力-ひずみ関係を、負荷・除荷

の剛性に初期剛性を用いることで拡張したもの<sup>4)</sup>と、幅厚比などの陽な関数として定義した軟化勾配および負荷・除荷の剛性を含む強度劣化型構成則がある<sup>5),6)</sup>。しかし、コンクリート無充填鋼製橋脚に比べ、コンクリート部分充填鋼製橋脚を対象としたファイバーモデルの適用検討がまだ少なく、この種の構造物の動的耐震照査法を確立するには更なる検討が必要である。

そこで、本研究では、コンクリート部分充填鋼製橋脚の地震時応答を、1自由度系モデルとファイバーモデルを用いた地震応答解析手法による予測結果についての比較検討を行っている。1自由度系モデルを用いた手法では、文献2)のトリリニアモデルを発展する形で静的実験の結果を用いずにPushover解析から復元力モデル( $H-\delta$ 関係)のパラメータを決定する。また、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する。さらに、ファイバーモデルを用いた手法においては、鋼材にバイリニア型応力-ひずみ関係と移動硬化則、充填コンクリートに最近行った研究<sup>7),8)</sup>で開発した充填コンクリートの構成則を適用する。最大応答変位と残留変位に着目し、ファイバーモデル、1自由度系モデルおよびハイブリッド地震応答実験の結果の相互比較・検討を行い、提案する手法の精度を検証する。なお、経験式による残留変位の予測についての検討も行う。

### 2. 地震応答予測の解析手法

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。

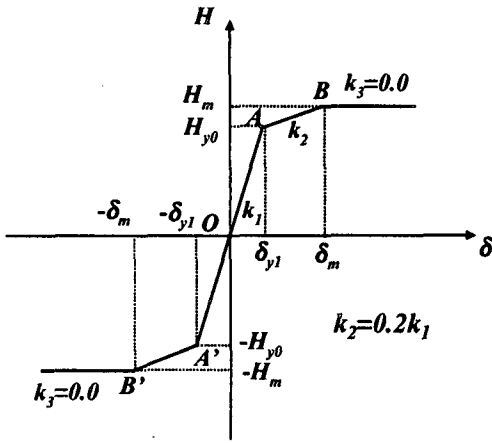


図-1 トリリニア復元力の骨格曲線

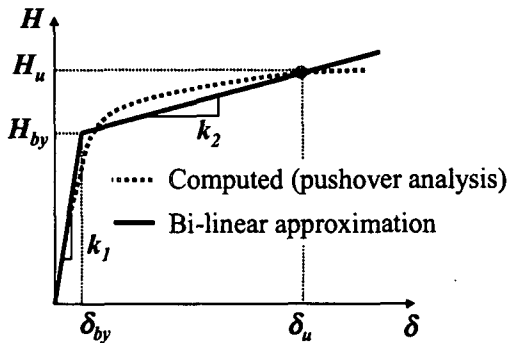
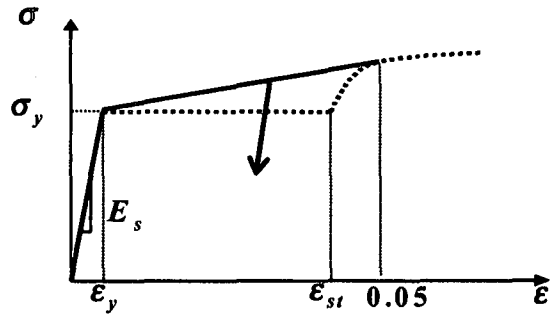
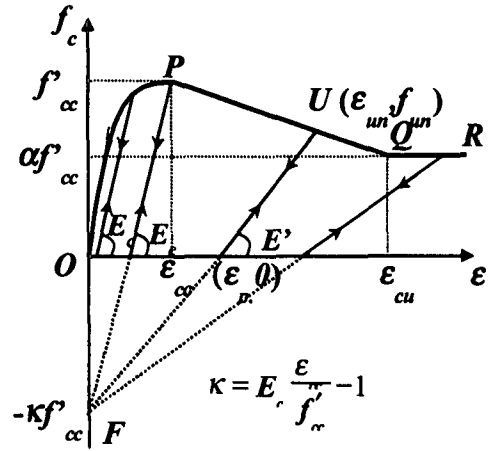


図-2 バイリニア復元力の骨格曲線



(a) 鋼材の応力-ひずみ関係



(b) コンクリートの応力-ひずみ関係

図-3 構成則

### (1) 荷重-変位関係に基づく1自由度系モデル

1自由度系モデルによる地震応答解析手法においては、荷重-変位特性を表す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。

#### a) トリリニア復元力モデル

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>。

#### b) バイリニア復元力モデル

バイリニア復元力モデル(図-2)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( $H-\delta$ 骨格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), 9)などで示されたコンクリート無充填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3), 10)などを参照されたいが、解析に用いた鋼材とコンクリートの構成則は、図-3に示されるように、鋼材に降伏棚とひずみ硬化領域を有するもので、充填コンクリートに文献7)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である。これまでの充填コンクリートモデル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、本モデルでは圧縮強度 ( $f_c'$ )、軟化勾配 ( $Z$ ) 及び残余強度 ( $\alpha f_c'$ ) 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。

### (2) 応力-ひずみ関係に基づくファイバーモデル

ファイバーモデルを用いた手法においては、鋼材にバイリニア型応力-ひずみ関係と移動硬化則、充填コンクリートに文献8)で静的繰り返し解析に用いられた構成則を適用する。鋼材のバイリニア型応力-ひずみ関係においては、図-3(a)に示すように、第2勾配は弾性係数の  $1/100$  とし、これは降伏棚のあるひずみ硬化型応力-ひずみ関係で降伏点と5%のひずみ点を結んだ直線とほぼ等

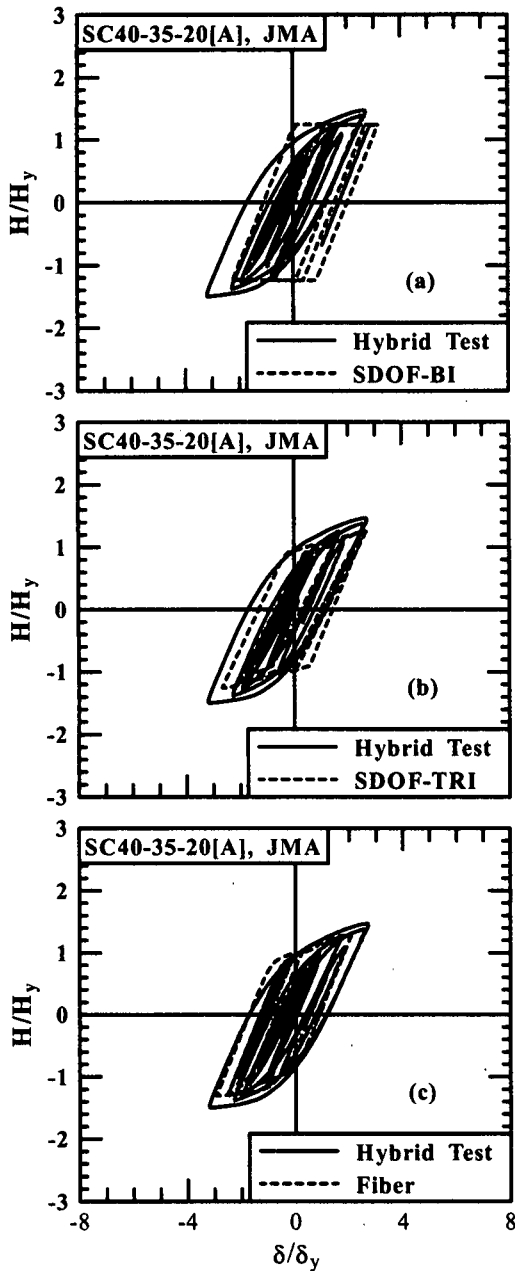


図-4 JMA を入力した場合の復元力特性の比較

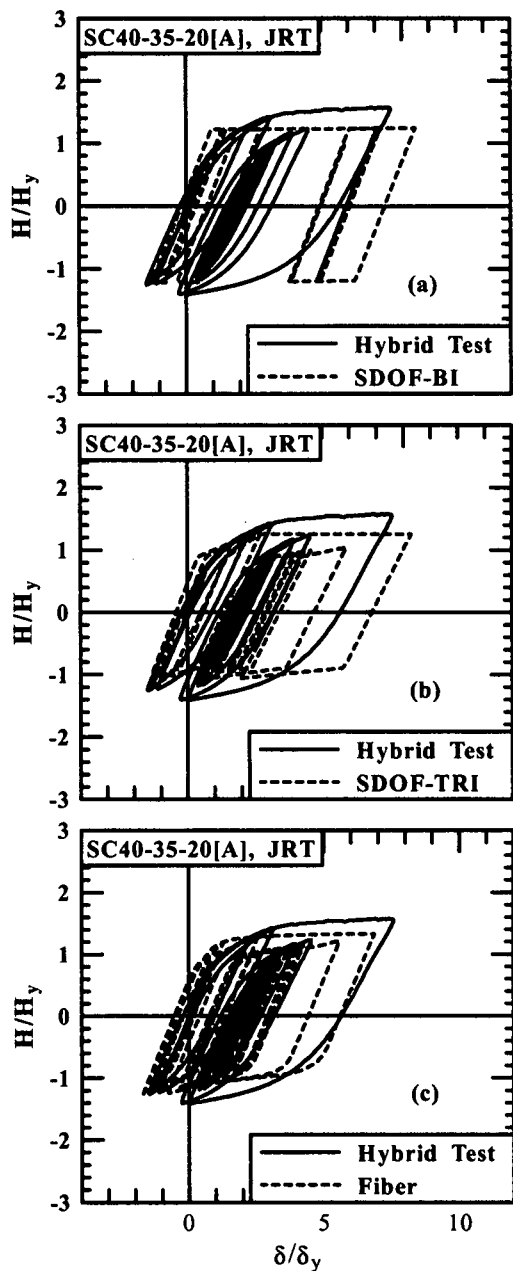


図-5 JRT を入力した場合の復元力特性の比較

しくなる。また、充填コンクリートの除荷・負荷剛性は、図-3 (b) に示すように、圧縮強度に達するまでは初期剛性、その後は圧縮強度点と縦軸との交点 F に目指すものとしている<sup>9)</sup>。なお、引張については無視する。

### 3. 実験データによる検証と相互比較

地震応答解析の対象としたのは、文献 12)~15)で報告されているハイブリッド地震応答実験の供試体 15 体、計 29 ケースである。これらの供試体における主なパラメータの範囲は次の通りである。構成断面のフランジ幅厚比パラメータ  $R_f$  は 0.328~0.481、橋脚の細長比パラメータ  $\lambda$  は 0.351~0.625、充填コンクリートの高さ  $l_c$  は橋脚高

さ  $h$  の 20~30% である。 $R_f$  と  $\lambda$  の定義は文献 1) などを参照されたい。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 JRT)、III 種地盤の東神戸大橋地震波 N12W 成分(以下 HK)を用いた。同一供試体に JRT や JMA の異なる地震波を入力するときは、軸力が異なるため、それぞれの軸力に対して地震時保有水平耐力照査法に基づく Pushover 解析より得られた復元力特性(すなわち、モデルパラメータ  $k_1$ 、 $k_2$  など)を用いた。

例として、JMA と JRT 地震波を受けた SC40-35-20[A] の解析結果と実験結果との復元力特性に関する比較を図-4、5 にそれぞれ示す。いずれの図でも、(a)がパイリニ

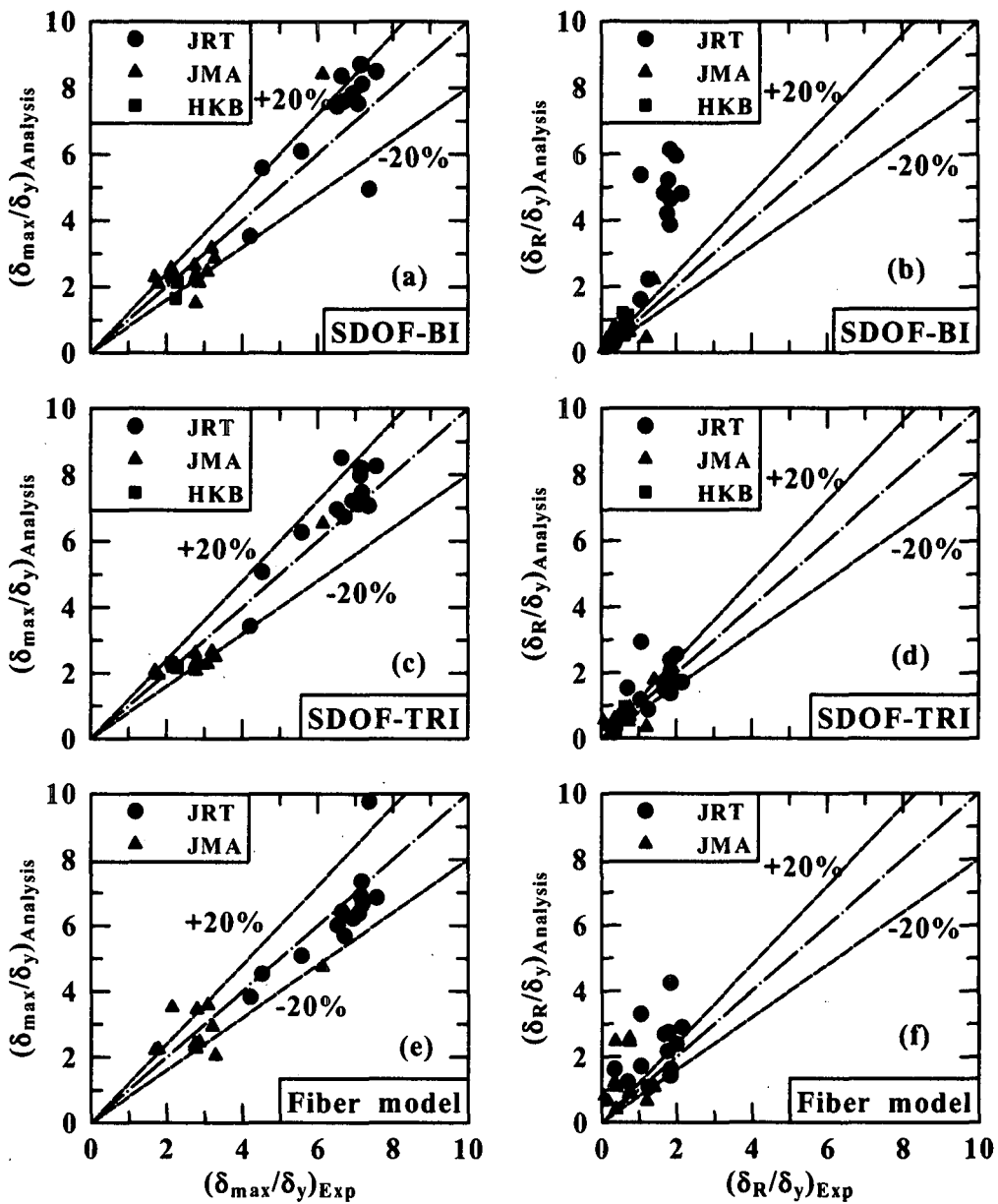


図-6 応答推定手法の精度検証

ア型復元力モデルを適用した1自由度系モデルによる地震応答解析(SDOF-BI)をハイブリッド地震応答実験と比較したもの、(b)がトリリニア型復元力モデルを適用した1自由度系モデルによる地震応答解析(SDOF-TRI)をハイブリッド地震応答実験と比較したもの、および(c)がファイバーモデル(Fiber)による地震応答解析をハイブリッド地震応答実験と比較したものである。

図-4では、SDOF-BIモデルの場合に比べ、SDOF-TRIモデルとFiberモデルによる復元力特性が実験結果と一般的に一致している。特に、同じ1自由度系モデルでSDOF-BIとSDOF-TRIとの比較を見ると、文献2)で提案したトリリニア型復元力モデルは実験結果を精度よく予測できているが、バイリニア型復元力モデルは応答特性を上手く捉えていない。これは、前者が剛性低下などを考慮した高精度復元力モデルで後者が実務設計での応用を目指した簡便な復元力モデルであることに加え、

SDOF-BIで得られた2次剛性 $k_2$ が過小であることに起因しているためである。一方、JRT地震動を受けた場合は、図-5に見られるように、解析結果と実験結果との吻合具合がSDOF-BI、SDOF-TRIとFiberの順に良くなっている。また、最大応答変位に限定して図-4、5から、SDOF-BIは実験結果を大きめに、Fiberは小さめに予測する傾向があることが言える。

次に、3つの手法による最大応答変位推定値の比較・検討を行う。図-6(a)、(c)および(e)にそれぞれ、SDOF-BI、SDOF-TRIおよびFiberモデルを適用した地震応答解析から得られた最大応答変位(縦軸)とそれらの実験結果(横軸)との比較を示している。同図より、以下の考察ができる。

1. どの手法を用いても、推定誤差をほぼ20%以内に収めることができる。
2. 同一手法でも異なる地震波を受けた場合の推定誤差

に若干の差がある。例えば、(c)のFiberモデルの場合、1ケースを除いて、JMAよりJRTの場合は推定値のばらつきが比較的小さい。

3. 同じ1自由度系モデルのSDOF-BIとSDOF-TRIとを比較すると、高度な復元力モデルを用いたSDOF-TRIのほうが精度良く推定できる。
4. JRTの結果に注目すると、SDOF-BIとSDOF-TRIの1自由度系モデルは実験結果を少し大きめに評価する傾向があるが、Fiberモデルは逆に小さめに与えることになる。
5. JMAの結果だけ見ると、SDOF-TRIモデルの精度は最も良い。
6. 以上のことを総括する、SDOF-BI, Fiber, SDOF-TRIの順に推定精度が良いと言える。

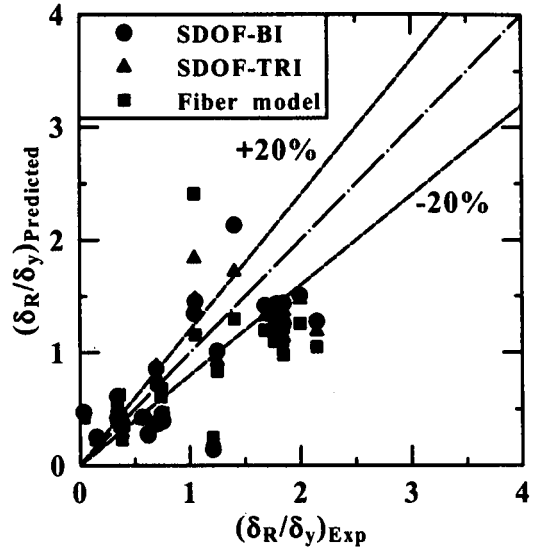


図-7 経験式による残留変位

さらに、残留変位であるが、図-6 (b), (d) および (f) に示されるように、どの手法を適用しても、解析と実験との相関関係が最大応答変位ほど良くなく、地震応答解析による推定が困難である。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、JRT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。これに対して、トリリニアモデルによる推定精度はバイリニアモデルほど悪くない。ただし、3つのグラフのスケールを比較のため統一しているため図-6 (d) からは判りづらいが、 $2\delta_y$ 程度の残留変位についても、30%程度の誤差が出ている。また、Fiberモデルの場合は、バイリニアモデルより良いがトリリニアモデルには及ばない。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、鉄道構造物等設計基準<sup>16)</sup>の考え方と同様に、最大応答変位と残留変位との相関関係を利用して文献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-7で比較している。同図より、誤差が20%の精度内に収まっていないものが少なくないが、全般的に精度よく予測できているといえる。

#### 4. あとがき

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. SDOF-TRIモデルとFiberモデルの地震応答解析から得られる復元力特性が実験結果と全般的に一致しているが、SDOF-BIモデルは応答特性を上手く捉えないうちがある。
3. ただし、最大応答変位に限って見れば、どの手法を用いても、推定誤差をほぼ20%以内に収めることができる。また、SDOF-BI, Fiber, SDOF-TRIの順に推定精度が良い。
4. 残留変位はトリリニアモデルからはある程度の精度で予測できるが、バイリニアモデルとFiberモデルを用いる場合の精度が悪い。その代わりに、最大応答変位から推定する経験式より求めた方が実験値に近い。

#### 参考文献

- 1) 日本鋼構造協会・次世代土木鋼構造研究特別委員会・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) 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。
- 4) 前野裕文, 森下宣明, 野中哲也：高架橋の耐震設計法の一考察, 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.33-42, 2000.1。
- 5) 渡辺浩, 崎元達郎, 千場幸輝, 大西俊一：コンクリート充填鋼管構造の終局挙動の簡易解析法, 構造工学論文集,

- Vol.43A, pp217-224, 1997.3.
- 6) 渡辺 浩, 崎元 達郎: コンクリートを充填した鋼製橋脚の地震応答解析法に関する研究, 土木学会論文集, No.647/I-51, 2000.4.
  - 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*, Vol.23, No.10, pp.1331-1347, 2001.
  - 8) Susantha, K.A.S., Ge, H.B. and Usami, T.: Cyclic analysis and capacity prediction of concrete-filled steel columns, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.31, No.2, pp.195-216, 2002.
  - 9) 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.
  - 10) 宇佐美勉, 鈴木森晶, Iraj H.P.Mamaghani, 葛漢彬: コンク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.
  - 11) 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.
  - 12) 鈴木俊光, 宇佐美勉, 伊藤義人, 豊島 啓: 細長比パラメータのおきなコンクリート部分充填鋼柱の強震時挙動, 土木学会論文集, No.537/I-35, pp.77-88, 1996.4.
  - 13) 才塚邦弘, 宇佐美勉, 芳崎一也, 鈴木森晶: 兵庫県南部地震観測地震波を用いたハイブリッド地震応答実験による鋼製橋脚の激震時挙動, 土木学会論文集, No.556/I-38, pp.119-129, 1997.1.
  - 14) 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.
  - 15) 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.
  - 16) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計標準), 1999.