

コンクリート部分充填鋼製橋脚の地震応答推定手法の検証に関する解析的研究

Comparative study of demand prediction procedures for partially concrete-filled steel bridge piers

葛 漢彬*, K.A.S. SUSANTHA**, 佐竹 洋一***, 宇佐美 勉****

Hanbin GE, K.A.S. SUSANTHA, Yoichi SATAKE and Tsutomu USAMI

*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)

**正会員 博士 (工学) 愛知工業大学工学部土木工学科 JSPS 特別研究員 (〒470-0392 豊田市八草町八千草 1247)

***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)

****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)

This study deals with the demand predictions of partially concrete-filled steel bridge piers. For this purpose, two types of dynamic analysis procedures for such structures are presented. First, a SDOF model analysis procedure based on the force-displacement hysteretic model derived by means of the pushover analysis is established. Second, a fiber model analysis procedure based on the cyclic stress-strain relations of concrete and steel is developed. The analyses are carried out for specimens tested by Pseudo-dynamic testing procedure, and comparisons are made between results obtained through the analytical methods and tests. The effects of concrete material behavior on predictions were further examined by conducting additional analyses using a simple cyclic stress-strain model of concrete. It is found that the maximum displacement demands computed using the fiber model analysis procedure exhibits good agreement with test results. In addition, results obtained from the SDOF model analysis with the tri-linear model seem to be better than that of the bi-linear model.

Key Words: Concrete-filled steel pier, fiber model, maximum response displacement, residual displacement, SDOF model

キーワード: コンクリート部分充填鋼製橋脚, 1自由度系モデル, ファイバーモデル, 最大応答変位, 残留変位

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)を精度よく予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) 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) 鋼にシェル・板要素、充填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、通常的设计レベルでは(1)と(2)の方法が推奨されている¹⁾。

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²⁾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。

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- Φ モデルがある。M- Φ 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¹⁾。このことから、本文ではファイバーモデルのみによる検討を行う。先に述べたように、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³⁾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3)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⁴⁾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・

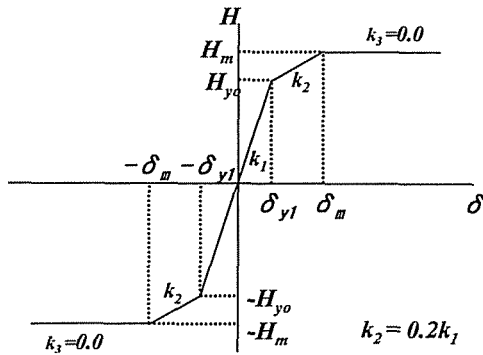


図-1 トリリニア復元力モデルの骨格曲線

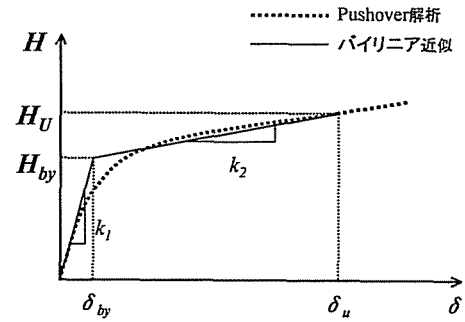


図-2 バイリニア復元力モデルの骨格曲線

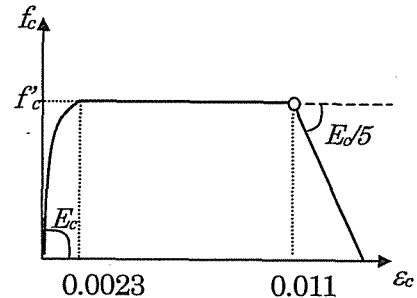
除荷の剛性を含む強度劣化型構成則がある^{7),9)}。しかし、コンクリート無充填鋼製橋脚に比べ、コンクリート部分充填鋼製橋脚を対象としたファイバーモデルの適用検討がまだ少なく、この種の構造物の動的耐震照査法を確立するには更なる検討が必要である。

そこで、本研究は、1自由度系モデルとファイバーモデルによるコンクリート部分充填鋼製橋脚の地震応答解析手法の確立を目指して行ったものである。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發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^{7),9)}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。

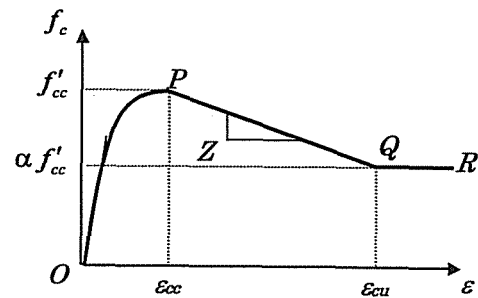
2. 解析手法

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0.01秒とした。

1自由度系モデルによる地震応答解析手法においては、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



(a) モデルA¹⁰⁾



(b) モデルB¹⁰⁾

図-3 充填コンクリートの構成則

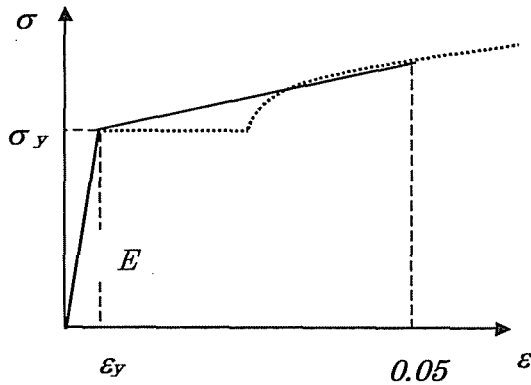
得られた $H-\delta$ 関係より決定した。また、硬化域剛性 k_2 は $0.2k_1$ とし、最大荷重 H_m に達した後の剛性 k_3 は零とした。なお、復元力特性を決定する際に、除荷剛性の低下と最大荷重に達する変位の変更などが考慮できるようになっている²⁾。

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(δ_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),9)などで示される鋼製橋脚の耐震照査法と同様である。

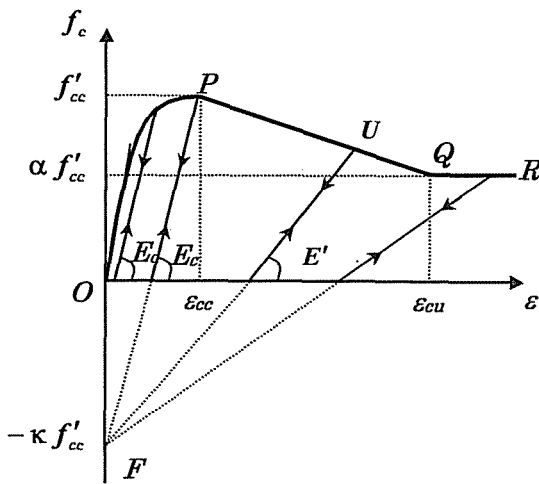
前述したように、トリリニアモデルとバイリニアモデルのパラメータはPushover解析から求められる。これら

表-1 実験供試体のパラメータ

パラメータ	範囲
フランジ幅厚比パラメータ(R_f)	0.328~0.481
細長比パラメータ(λ)	0.351~0.625
充填コンクリート高さ(h_c/h)	0.2~0.3
軸力比(HP)	0.099~0.202
鋼材の降伏応力(MPa)	294.0~410.0
コンクリートの圧縮強度(MPa)	15.7~23.7



(a) 鋼材のバイリニア型構成則¹⁾



(b) 充填コンクリートの除荷・負荷ルール⁸⁾

図-4 ファイバーモデルによる動的解析に用いた構成則

のパラメータは、コンクリート部分充填鋼製橋脚の Pushover 解析により得られる。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、解析に用いたコンクリートの構成則は、図-3に示されるように、文献 11)で用いた強度軟化型モデル(モデル A と称す)、と文献 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(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(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 ϵ_{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。

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-4(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-ひずみ関係において降伏点と 5%のひずみ点を結んだ直線の勾配とほぼ等しくなる。また、充填コンクリートの除荷・負荷剛性は、図-4(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 を目指すものとしている⁸⁾。なお、引張については無視する。

ファイバーモデルを用いた Pushover 解析と地震応答解析時の要素分割は長さ方向に鋼とコンクリートをそれぞれ 10, 4 分割している。また、断面分割に関しては、鋼断面は箱形断面、充填コンクリートは矩形断面を用い、それぞれ積分点は 21 個としている。このような要素と断面分割は収束解が得られるように確認できている¹¹⁾。

本研究で解析対象とする実験供試体の断面は補剛箱形断面であるが、計算の簡略化のため、文献 10), 11)などと同様に等価な無補剛箱形断面に置き換えた。

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 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。実験終了後の供試体の損傷状況については、それぞれの文献で述べられているように、コンクリート充填部より上の中空鋼断面部で座屈したものがなく、柱基部のコンクリート充填部で軽微な座屈が見られたものもあれば全く無かったものもあった。これらの供試体における諸パラメータの範囲を表-1に示す。各パラメータの定義は文献 1)などを参照されたい。この表から、各パラメータの範囲が広範囲にわたっていることがわかる。

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

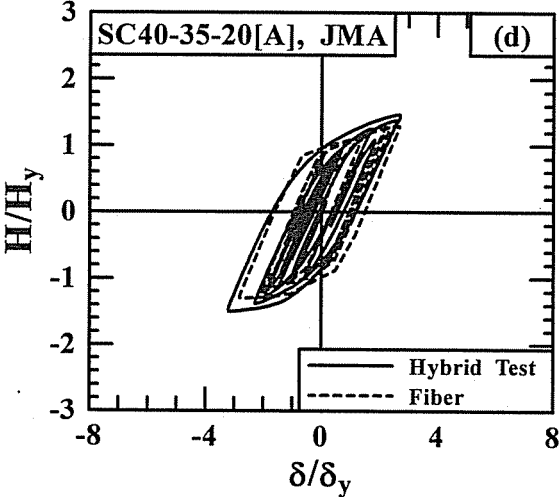
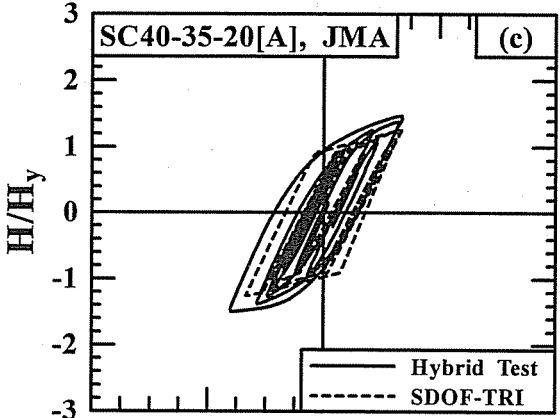
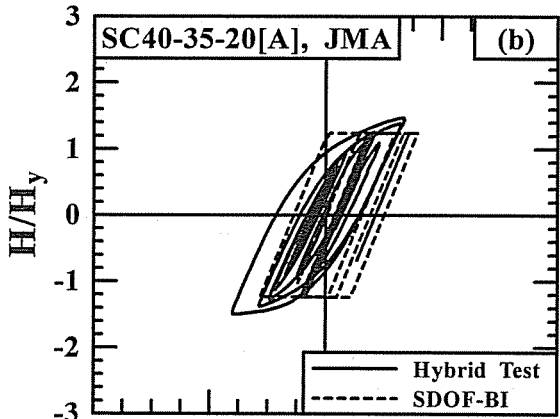
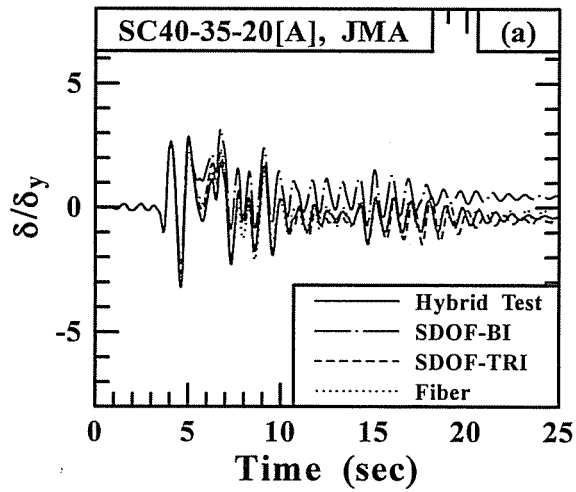


図-5 実験と解析との比較：JMA を入力した場合

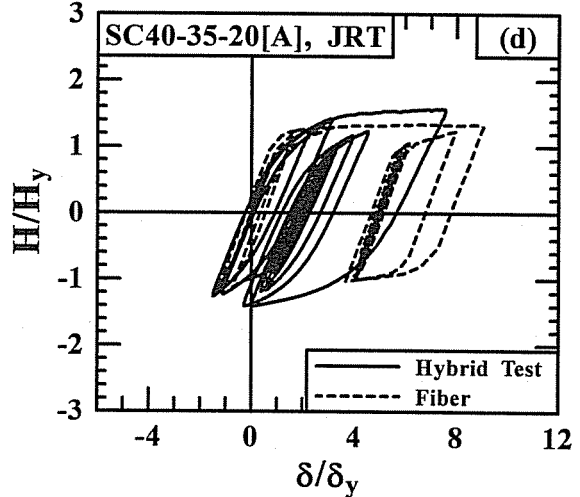
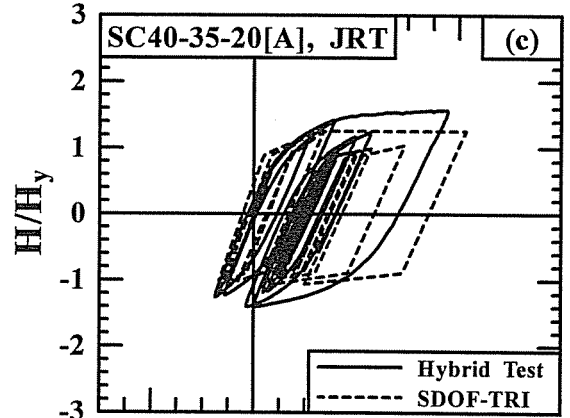
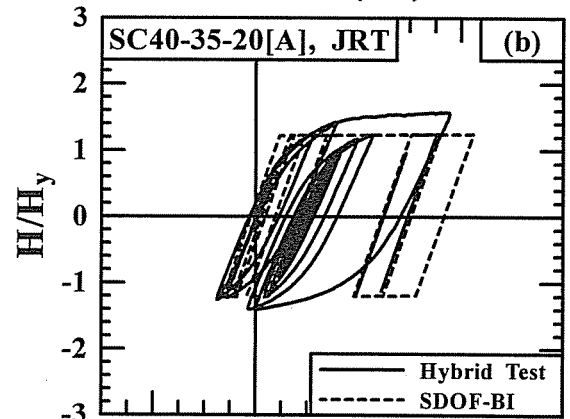
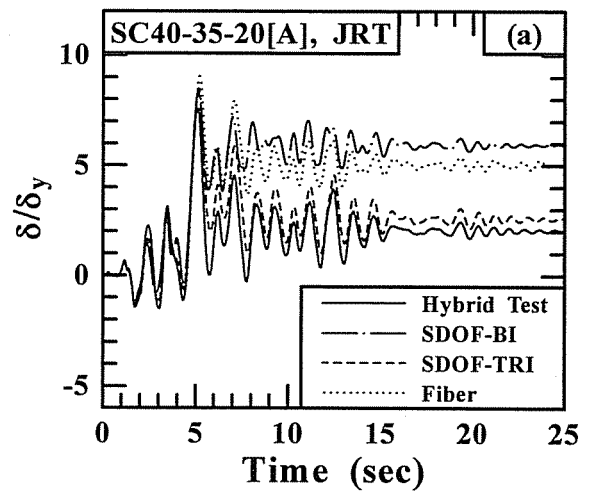


図-6 実験と解析との比較：JRT を入力した場合

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 HKB)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の時刻歴および復元力特性に関する比較を図-5, 6 にそれぞれ示す。いずれの図でも、(a) が実験と各解析手法による応答時刻歴を比較したものの、(b) がバイ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-BI) をハイブリッド地震応答実験と比較したものの、(c) 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の、および(d)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。ここで、解析手法の比較を行うため、コンクリート構成則は図-3(b)および 4(b)に示した拘束効果を考慮した充填コンクリートモデルを用いる。なお、図-3 に示したモデル A とモデル B の比較は後述する。

図-5 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全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-6 に見られるように、最大応答変位については、いずれのモデルにおいても解析は実験結果より若干大きめに予測するものの、予測が概ね良好であると言える。これに対して、残留変位に関しては SDOF-TRI モデルの結果が実験値に非常に近いが、SDOF-BI と Fiber モデルによる推定値が実験結果の 2 倍以上になっている。

次に、コンクリート構成則のモデル A とモデル B の比較について述べる。ここで、モデルの違いによる最大応答変位の推定に及ぼす影響を調べるため、7 体の供試体について、バイリニア復元力モデルとトリリニア復元力モデルを適用した 1 自由度系モデルの地震応答解析を行った結果を図-7 に示す。図-7(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て

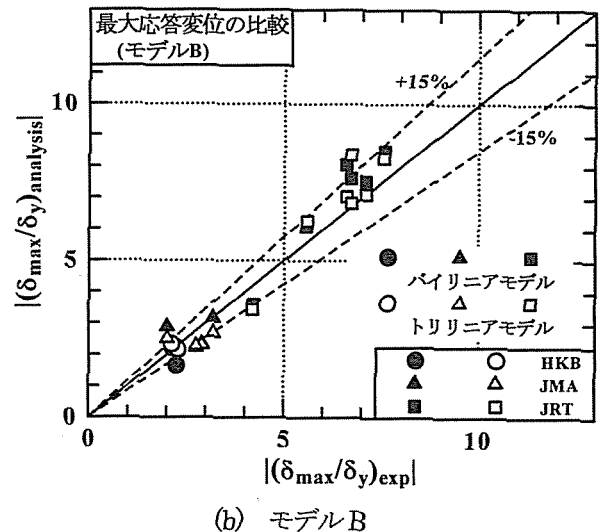
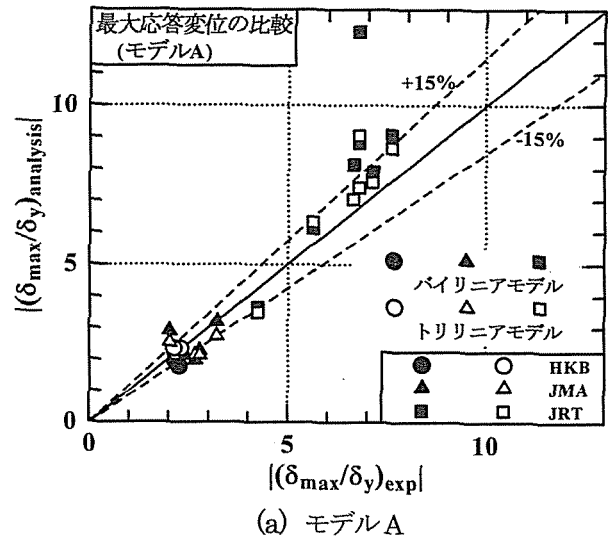


図-7 コンクリートモデルの精度検証

いる。また、 $5 \delta_y$ 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、バ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-7(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バ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、 $5 \delta_y$ 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 により定めたバ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

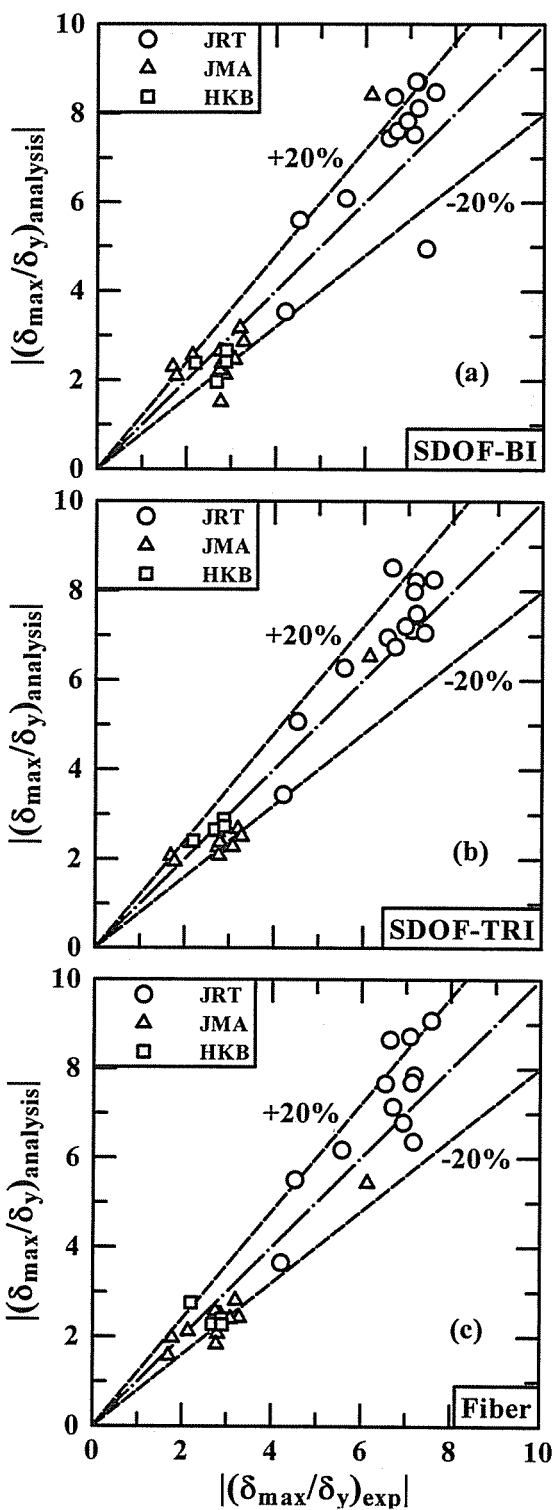


図-8 応答推定手法の精度検証：最大応答変位

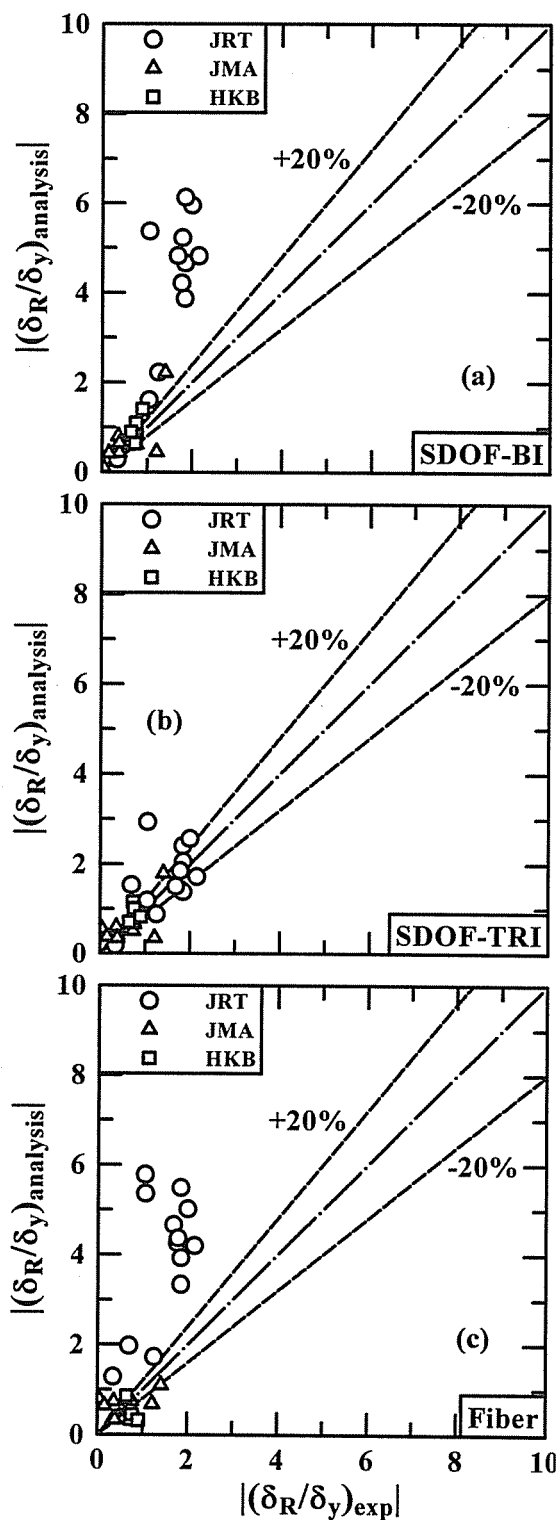


図-9 応答推定手法の精度検証：残留変位

小さくなり、変位が大きくなったものと考えられる。以上のことから、これ以後のすべての解析においてモデルBを用いることとした。

続いて、3つの手法、すなわち SDOF-BI、SDOF-TRI および Fiber モデルによる最大応答変位推定値の比較・検討を行う。前述したように、対象となった実験データが計 29 ケースである。図-8 の、上から下へのグラフにそ

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、(a)の SDOF-BI モデルで、JMA より JRT の場合は推定値のばらつきが比較的大きい。

- (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、SDOF-TRI および Fiber のいずれのモデルにおいても実験結果を少し大きめに評価する傾向がある。
- (5) 全般的に見ると、SDOF-BI、Fiber、SDOF-TRI の順に推定精度が良いことが言える。

さらに、残留変位であるが、図-9 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い。特に、SDOF-BI と Fiber 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。詳細に見てみると、JRT 地震波を入力した解析でこの傾向が顕著である。これに対して、SDOF-TRI モデルによる推定精度は SDOF-BI と Fiber 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-9 から判りづらいが、 $2\delta_y$ 程度の残留変位についても、30%程度の誤差が出ている。したがって、地震応答解析から残留変位を予測するのは非常に困難である。

そこで、鉄道構造物等設計基準¹⁰⁾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 δ_{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 δ_R と最大応答変位 δ_{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 は橋脚の高さ、 δ_y は降伏変位である。ただし、この式での δ_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。図-8 に示されている 3 種類の地震波に対するすべてのケースの最大応答変位から式(1)を用いて推定した残留変位と地震応答実験から得られた値を図-10 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言える。

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易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

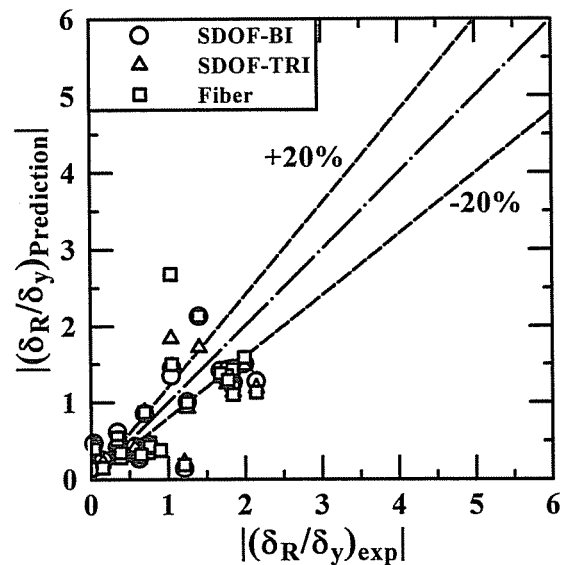


図-10 経験式による残留変位の推定

較することにより検証したものである。比較の対象となった手法は、1 自由度系モデルとファイバーモデルであるが、1 自由度系モデルでは過去に提案されているトリリニア復元力モデルを発展し、さらにより簡易なバイリニア復元力モデルを構築した。また、検証に用いた実験供試体は 15 体、計 29 ケースにも及び、広い範囲のパラメータをカバーできている。

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) 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。
- 2) 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でも比較的精度のよい地震応答結果を予測できる。
- 3) SDOF-TRI 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 モデルと Fiber モデルは応答特性を上手く捉えないことがある。
- 4) 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。
- 5) 残留変位は SDOF-TRI モデルからはある程度の精度で予測できるが、SDOF-BI 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年。
- 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年3月。
- 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年。
- 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年1月。
- 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，pp.217-224，1997年3月。
- 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年4月。
- 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年7月。
- 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年10月。
- 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年3月。
- 12) 鈴木俊光，宇佐美勉，伊藤義人，豊島径：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年4月。
- 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年1月。
- 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年7月。
- 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年3月。
- 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年。

(2001年9月14日受付)