

# 総エネルギー入力を地震荷重指標とする 複合非線形系橋脚の応答推定

神農 誠<sup>1</sup>・松田 泰治<sup>2</sup>・大塚 久哲<sup>3</sup>・入江 達雄<sup>4</sup>・内田 広明<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 学生員 九州大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

<sup>2</sup> 正会員 工博 九州大学大学院助教授 工学研究科建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

<sup>3</sup> フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究科建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

<sup>4</sup> 正会員 工博 (株)建設技術研究所 福岡支社技術第2部 (〒810-0041 福岡市中央区大名 2-4-12)

免震支承・橋脚基部双方が塑性化する単柱式橋脚の支承と橋脚の最大応答の推定法として、著者らは地震動によるエネルギー入力の総量と構造物の総吸収エネルギーとの釣り合いによる方法を提案している。そこでは、支承部と橋脚基部双方が塑性化する複合非線形系へのエネルギー入力の総量は、橋脚系の総質量と支承固定時の弾性周期および免震支承の降伏震度に等しい構造特性を有する1質点系へのエネルギー入力の総量で代表できると仮定している。本研究では、複合非線形系の単柱式橋脚にこの仮定を適用する場合の妥当性を検証し、エネルギー入力の総量が地震荷重指標となりうることを示した上で、前述の応答推定法の適用例を示す。

**Key Words:** seismic load, energy input, seismic isolation device, reinforced concrete pier, hysteretic absorption energy, energy spectrum

## 1. はじめに

免震支承を有する単柱式橋脚が大規模な地震動を受ける場合、支承部のみならず橋脚基部の塑性化をも想定する必要がある。その際の支承と橋脚の最大応答の推定法として、著者らは地震動による構造物へのエネルギー入力の総量とその総吸収エネルギーとの釣り合いによる方法を提案している<sup>1)</sup>。そこでは、支承部と橋脚基部双方が塑性化する複合非線形系へのエネルギー入力の総量は、橋脚系の総質量と支承固定時の弾性周期および免震支承の降伏震度に等しい構造特性を有する1質点系へのエネルギー入力の総量で代表できると仮定している。この仮定は建築構造物を対象にしたせん断型多層骨組の弾塑性応答に関する加藤・秋山の研究<sup>2)</sup>に基づくが、免震支承を有する複合非線形系の単柱式橋脚にこの仮定を適用する場合はその妥当性を再検証する必要がある。本研究では、複合非線形系の単柱式橋脚にこの仮定を適用する場合の妥当性を検証し、エネルギー入力の総量が地震荷重指標となりうることを示した上で、前述の応答推定法の適用例を示す。

## 2. エネルギー入力

$$m \int_0^{t_0} \ddot{y} \dot{y} dt + c \int_0^{t_0} \dot{y}^2 dt + \int_0^{t_0} F(y) \dot{y} dt = -m \int_0^{t_0} \ddot{z}_0 \dot{y} dt \quad (1)$$

式(1)は、1自由度系の振動方程式よりエネルギーの釣り合い方程式を導いたものである。ここで、 $m, c, F(y)$   $z_0, y$  はそれぞれ質点の質量、粘性減衰係数、復元力、水平地動変位、質点の相対変位を表している。右辺は地震終了時( $t=t_0$ )の地震動による振動系へのエネルギー入力の総量を表している。左辺第1項は地震終了時の系の運動エネルギーを、左辺第2項は粘性減衰による吸収エネルギーを、そして左辺第3項はばね系の弾塑性変形による履歴吸収エネルギーと地震終了時の弾性ひずみエネルギーを表している。

## 3. 免震支承-橋脚系へのエネルギー入力

### (1) 免震支承の設計

本研究で用いる免震支承(高減衰積層ゴム支承)は、I種地盤を対象として、松田らが提案している簡易設計法<sup>3)</sup>を参考にして設計した。まず、減衰定数15%時のタイプIおよびタイプIIの標準波形(KAIHOKU BRG.LGおよびJMAKOBEOBS.NS)入力時の加速度応答スペクトルと

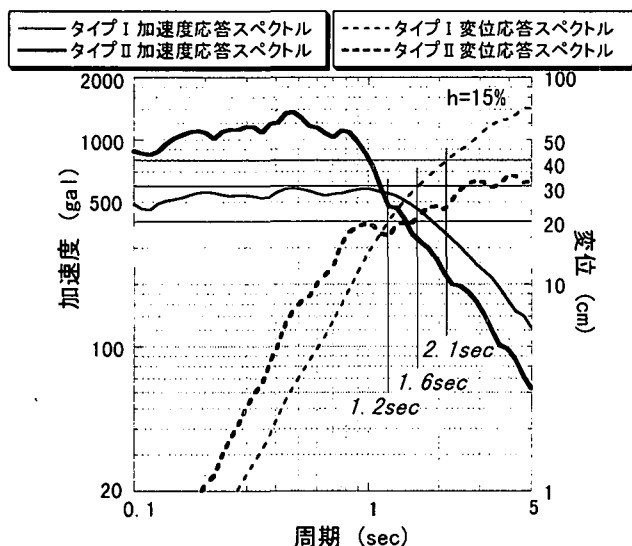


図-1 加速度・変位応答スペクトル(I種地盤)

変位応答スペクトルを図-1のように作成し、両者を重ね書きする。免震橋脚の目標固有周期としては、この変位応答スペクトルでタイプⅠ・タイプⅡ両地震動に対して免震支承の設計変位を越えない最大の周期を設定した。その結果、免震支承の設計変位 $\delta_d$ が20cm・30cm・40cmに対して、目標固有周期はそれぞれ1.2秒・1.6秒・2.1秒となった。この範囲の周期であれば加速度の低減効果も十分認められる。そして、桁の質点と免震支承のばねで構成される1質点系の等価固有周期がそれぞれの目標固有周期となるように、表1のように免震支承の特性を決定した。

## (2) 解析モデル

本研究では免震支承を有するRC単柱式橋脚を解析対象とし、図-2のように桁と橋脚のせん断2質点系でモデル化した。Ⅰ種地盤A地域の条件で試設計された鋼桁橋のデータを参考にして、桁と橋脚の重量をそれぞれ $W_u = 670.0\text{tf}$ 、 $W_p = 197.5\text{tf}$ と設定した。復元力特性は、免震支承ではバイリニアモデル、橋脚ではひびわれを無視した完全弾塑性バイリニア型の武藤モデルを考慮した。橋脚の降伏震度 $k_p$ は免震支承の降伏震度 $k_i$ の1倍・2倍・3倍の3通りとした。また、橋脚の初期剛性は、支承固定時の弾性周期 $T_p$ から求めた。そして免震支承と橋脚の減衰定数は、それぞれ0%および2%とし、それらをもとにひずみエネルギー比例型減衰行列を作成して動的解析に用いた。

一方、この複合非線形系と総エネルギー入力を比較する1質点系は、図-2のように $W_u$ と $W_p$ を合わせた重量 $W$ をもつ質点と降伏震度が $k_i$ に等しく完全弾塑性バイリニア型の復元力特性を有するばねから構成される。この系の減衰定数は2%とした。次式(2)の $R_y$ は1質点系の降伏耐力を表す。

表-1 免震支承の非線形パラメータ(Ⅰ種地盤)

| 設計変位(cm) | ゴム総厚(cm) | 正方形ゴムの辺長(cm) | 第1剛性(tf/m) | 降伏変位(m) | 剛性低下率  | 降伏震度  |
|----------|----------|--------------|------------|---------|--------|-------|
| 20       | 9        | 59           | 6810       | 0.0116  | 0.2099 | 0.12  |
| 30       | 13       | 53           | 4143       | 0.0154  | 0.1957 | 0.095 |
| 40       | 20       | 50           | 1937       | 0.0293  | 0.2359 | 0.085 |

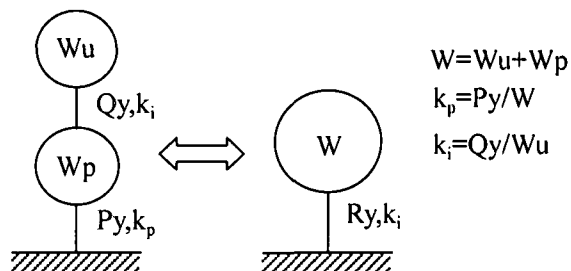


図-2 解析モデル

$$R_y = (Q_y / W_u) \cdot W = k_i \cdot W \quad (2)$$

## (3) 総エネルギー入力の計算

(2)で設定した解析モデルに対して動的解析を行った。入力地震波は、Ⅰ種地盤のタイプⅠ・Ⅱの標準波形をそれぞれ1波用いた。次式(3)より地震終了時の系へのエネルギー入力の総量 $E$ を計算した。

$$E = - \sum_{i=1}^n (m_i \int_0^{t_0} \ddot{z}_0 \dot{y}_i dt) \quad (3)$$

ここで、 $n$ は質点数(1あるいは2)を表す。

## (4) 2質点系と1質点への総エネルギー入力の比較

図-3は、Ⅰ種地盤のタイプⅠ・Ⅱの標準波形を入力したときに式(3)から求まる2質点系および(2)で述べた構造特性を有する1質点系へのエネルギー入力の総量 $E$ を、支承固定時の橋脚の弾性周期 $T_p$ に対してプロットしたものである。図は地震動のタイプと免震支承の設計変位(降伏震度)によって、6種類掲載している。 $T_p$ が免震橋脚の目標固有周期以上の橋脚は、明らかに橋脚自身が長周期なので免震設計の適用範囲外と判断し、図には載せていない。

図-3より、Ⅰ種地盤のタイプⅠおよびタイプⅡ地震動による2質点系へのエネルギー入力の総量に対して1質点系へのそれは、免震支承の目標固有周期以下の周期帯で降伏震度比 $k_p/k_i$ によらずよく一致していることがわかる。以上のことから、免震支承-橋脚の複合非線形系へのエネルギー入力の総量は、橋脚系の総質量と支承固定時の弾性周期および免震支承の降伏震度に等しい構造特性を有する非線形1質点系へのエネルギー入力の総量で代表できるといえる。

## 4. エネルギーの釣り合いによる複合非線形系の応答推定法<sup>1)</sup>

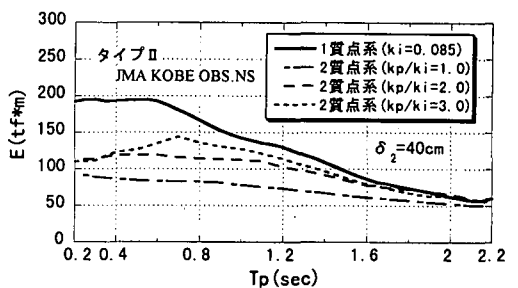
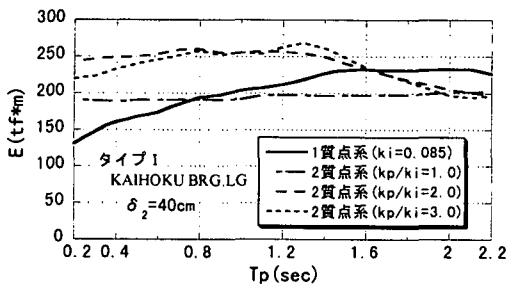
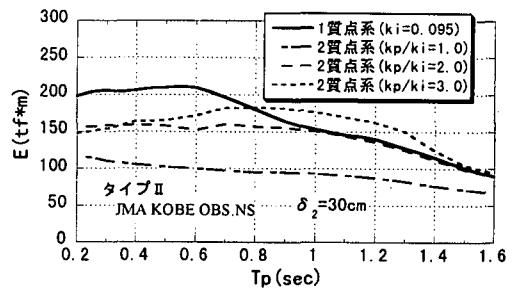
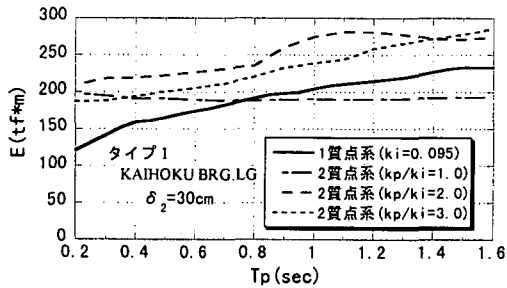
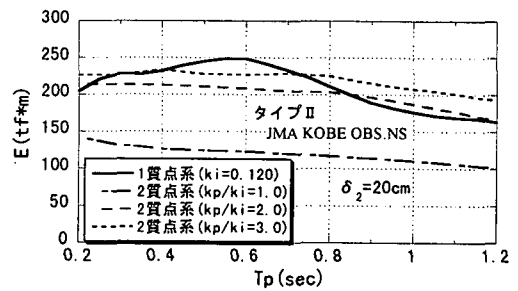
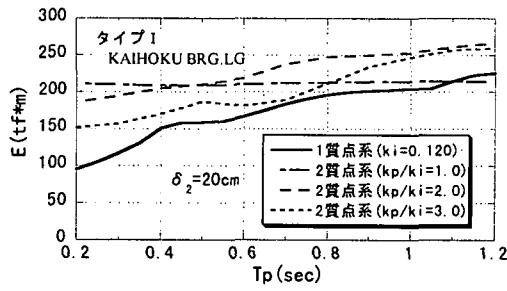


図-3 2質点系および1質点系へのエネルギー入力の総量(Ⅰ種地盤)

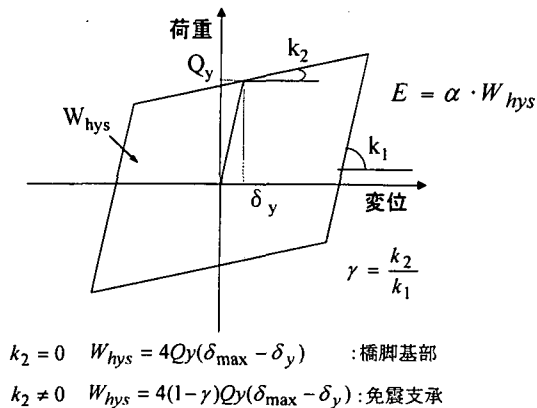


図-4 構造物の吸収エネルギーの定義

#### (1) 本推定法の概要

エネルギーの釣り合いによる応答推定法は、地震動による構造物へのエネルギー入力の総量 $E$ と図-4のような系の弾塑性変形による総吸収エネルギー $W_{hys}$ に着目し、それらの釣り合いから最大応答値を推定する方法である。複合非線形系の単柱式橋脚に本推定法を適用すると、エネルギー入力の総量 $E$ は式(4)のように、免震支承の1サイクル間の履歴吸収エネルギー $W_I$ と橋脚基部の1サイクル間の履歴吸収エネルギー $W_P$ との和に係数 $\alpha$ をかけたものと表現できる。

$$E = \alpha \cdot (W_I + W_P) \quad (4)$$

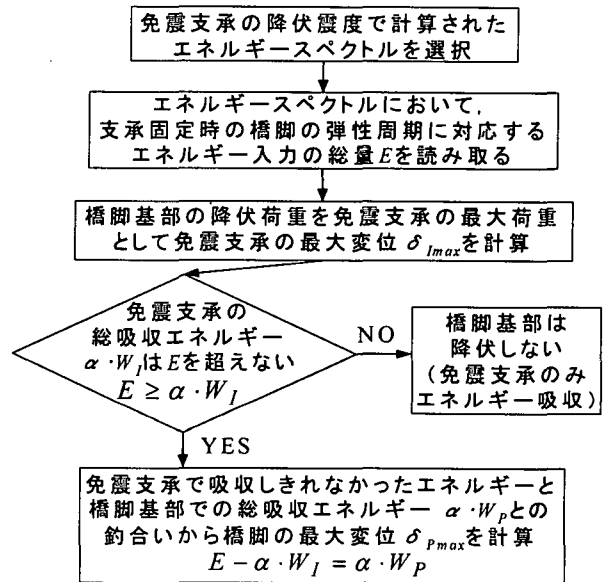


図-5 エネルギー法のフローチャート

図-5に、本推定法のフローチャートを示す。ここで、エネルギー入力の総量 $E$ は、エネルギースペクトルとしてあらかじめ与えられているものとする。エネルギースペクトルとは、 $E$ を式(5)で速度換算した $V_E$ を弾性周期 $T$ に対してプロットしたものである。

$$V_E = \sqrt{\frac{2E(T)}{m}} \quad (5)$$

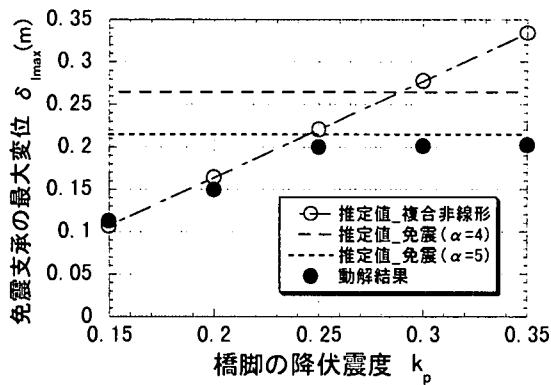


図-6 免震支承と橋脚の応答推定結果(I種地盤 タイプI KAIHOKU BRG.LG)

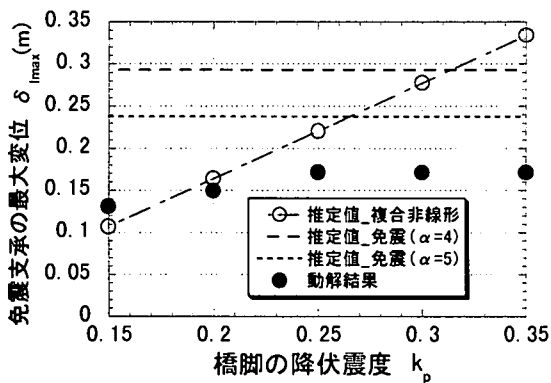


図-7 免震支承と橋脚の応答推定結果(I種地盤 タイプII JMAKOBÉ OBS.NS)

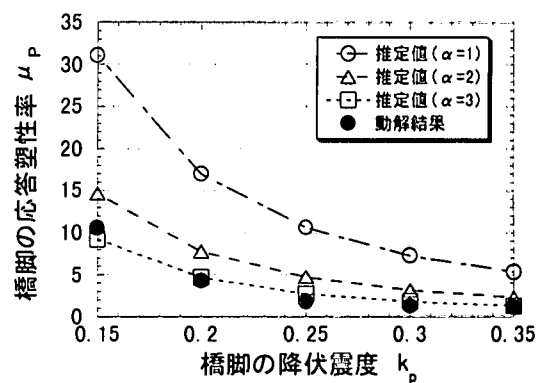
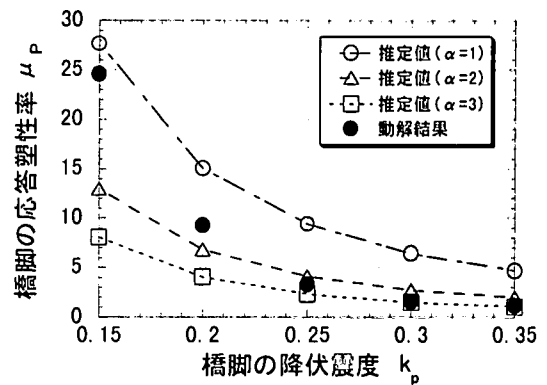
また、本推定法では系は桁と橋脚が同位相で振動する1次モードを仮定している。

## (2) 本推定法の適用例

I種地盤A地域の条件で試設計された単柱式橋脚をはり要素でモデル化したものを用いて本推定法の適用性を検証した。免震支承は3章(1)節で設計した設計変位30cmのものを使用し、橋脚基部の非線形性はM-φ関係を完全弾塑性のバイリニア型でモデル化した。モデル化に際し、免震支承とともに橋脚基部も塑性域に入るよう橋脚基部の降伏耐力を適宜低減した。また、係数 $\alpha$ の値としては既往研究を参考にして $\alpha=1, 2, 3$ と設定した。入力地震波は3章(3)節で用いたI種地盤のタイプI・IIの標準波形と同じものを使用した。

## (3) 推定結果と動的解析結果との比較

図-6と図-7に本推定法による免震支承の最大変位と橋脚の応答塑性率の推定結果と動的解析結果とを比較したものを示す。橋脚の降伏震度が0.25までの場合、免震支承の最大変位の推定値は動的解析結果によく一致している。このとき橋脚の応答塑性率の推定結果はタイプI地震動で $\alpha=1\sim2$ 、タイプII地震動で $\alpha=3$ で動的解析結果と対応する。しかし、橋脚の降伏震度が0.25を超えると免震支承の最大変位は頭打ちとなるが、それに対して推定値は大きめの評価を与えている。このとき橋脚基部は応答塑性率が2以下の弱非線形性を示してい



る。このことは、橋脚基部が弱非線形性を示す領域では、複合非線形系を対象とした本推定法が単純に適用できないことを示している。今後、その領域での本推定法の適用性に関する検討が必要と考えられる。

## 5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 免震支承と橋脚基部双方が塑性化する複合非線形系へのエネルギー入力の総量は、I種地盤で検討した範囲では、橋脚系の総質量と支承固定時の弾性周期および免震支承の降伏震度に等しい構造特性を有する非線形1質点系へのエネルギー入力の総量で代表できる。
- 2) 免震支承を有する単柱式橋脚にエネルギーの釣り合いによる応答推定法を適用した結果、橋脚の塑性率が2以上の強非線形性を示す場合にはタイプI地震動で $\alpha=1\sim2$ 、タイプII地震動で $\alpha=3$ を用いた推定値が動的解析結果に近い値となった。

## 参考文献

- 1) 神農・松田・大塚・入江：エネルギー入力に基づく複合非線形系の耐震性に関する一考察，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp. 78-79，1999。
- 2) 秋山宏：建築物の耐震極限設計 第2版，東京大学出版会，1987。
- 3) 松田・大塚・楊・山口：免震支承の固有周期決定および免震査の簡易設計法に関する考察，構造工学論文集，Vol. 44A，pp. 711-718，1998。