

I-B75

複合非線形系への総エネルギー入力に関する一考察

九州大学大学院 学生員 ○神農 誠 九州大学大学院 正会員 松田 泰治
九州大学大学院 フェロー 大塚久哲 (株)建設技術研究所 正会員 入江 達雄

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までも塑性化する可能性がある。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推定法を提案している¹⁾。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、および降伏せん断力係数と弾性周期とがそれぞれ免震支承と橋脚系のそれに等しい1質点系に入力される総エネルギーがともに等しいと仮定している。この仮定は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²⁾に基づく。しかしながら、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、その妥当性を改めて検証する必要がある。本研究では、免震支承-橋脚系を対象としてその仮定を検証した。

2. エネルギー入力²⁾

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。

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

ここで、 m :質点の質量、 c :粘性減衰定数、 $F(y)$:復元力、 z_0 :水平地動変位、 y :質点の相対変位

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) 解析条件

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1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。免震支承の設計は松田らが提案している簡易設計法³⁾を参考にしたが、本研究では、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I種地盤で1.5秒、II・III種地盤では2.0秒となるように免震支承の特性

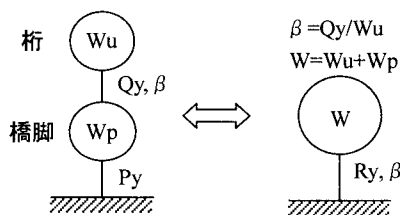


図1 解析モデル

を決定した。なお、免震支承の設計変位はすべて30cmとした。橋脚の降伏耐力 P_y は免震支承の降伏耐力 Q_y の2.0倍に固定した。また、橋脚の初期剛性は、支承固定時の弾性周期 T_p が0.2秒から5.0秒となるように変化させた。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1のように W_u と W_p を合わせた重量 W をもつ質点と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 は系の降伏耐力を表す。

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

なお、上式の β は免震支承の降伏せん断力係数を表す。

(2) 総エネルギー入力の計算

(1)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・II・III種地盤ごとにタイプI・IIの標準波形を2波づつ、計6波用いた。地震終了時の系へのエネルギー入力の総量 E は次式(3)より計算した。

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

$n=1:1$ 質点系、
 $n=2:2$ 質点系

(3) 2質点系と1質点系への総エネルギー入力の比較

図2から図4は、I・II・III種地盤ごとにタイプ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1質点系へのエネルギー入力の総量 E を、それぞれの系の弾性周期 T に対してプロットしたものである。ここで、2質点系の弾性周期は、免震支承と橋脚の初期剛性をを用いた固有値解析から求まる1次固有周期としている。

これらの図より、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、I種地盤のタイプI地震動の場合に $T=2.5 \sim 3.5$ 秒あたりでやや危険側になっているものの、全般的には地盤種別や地震動のタイプによらず広い周期帯においてよく一致していることがわかる。

キーワード: エネルギー入力, 免震支承, RC橋脚, 履歴吸収エネルギー, エネルギースペクトル

連絡先: 〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1 九州大学大学院工学研究科建設システム工学専攻 TEL 092-641-3131(内線)8653

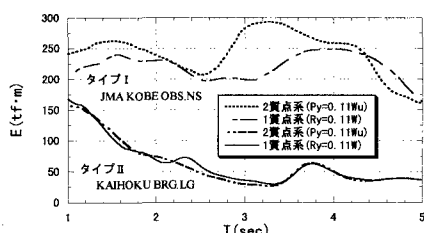


図2 系への総エネルギー入力 (I種地盤)

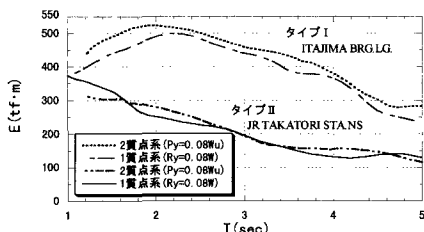


図3 系への総エネルギー入力 (II種地盤)

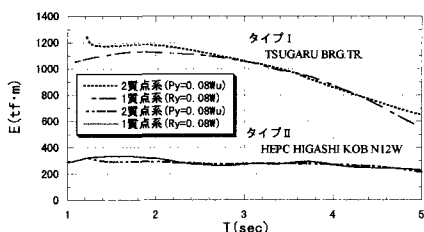


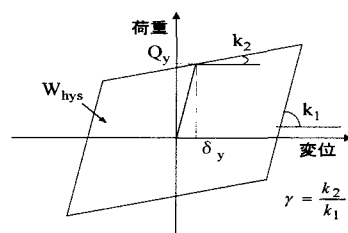
図4 系への総エネルギー入力 (III種地盤)

タイプII地震動の場合には両者は特によく一致している。以上のことから、免震支承－橋脚の複合非線形系のエネルギー入力の総量は、降伏せん断力係数と弾性周期とがそれぞれ免震支承と橋脚系のそれに等しい非線形1質点系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¹⁾

エネルギーの釣り合いによる応答推定法は、地震動によるエネルギー入力の総量Eと振動系で消費される弾塑性変形による構造物の総吸収エネルギー 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。ここでは、複合非線形系の単柱式橋脚に本推定法を適用する場合の手順の概略を示す。

- 1) 降伏せん断力係数と弾性周期とが、それぞれ免震支承と橋脚系のそれに等しい1質点系へのエネルギー入力の総量Eを計算する。実際の設計においては、弾性周期Tに対してプロットされたエネルギースペクトル $VE = \sqrt{2E/m}$ からEを読み取る。
- 2) 橋脚基部の降伏耐力が免震支承に生じる最大せん断力に等しいとして免震支承の最大変位 δ_{lmax} を計算する。このとき、系は桁のみが剛体で振動する1次モードを仮定している。
- 3) 図5から求める免震支承の履歴吸収エネルギー W_I に



$$k_2 = 0 \quad W_{hys} = 4Q_y(\delta_{max} - \delta_y) \quad : \text{橋脚基部}$$

$$k_2 \neq 0 \quad W_{hys} = 4(1-\gamma)Q_y(\delta_{max} - \delta_y) : \text{免震支承}$$

$$E(T) = \alpha \cdot (W_I + W_P)$$

図5 構造物の総吸収エネルギー

係数 α をかけた $\alpha \cdot W_I$ と1)で求めたEを比較し、 $E \leq \alpha \cdot W_I$ ならば橋脚基部は降伏しない、すなわち支承部のみでエネルギー吸収するとみなし、 $E > \alpha \cdot W_I$ ならば $(E - \alpha \cdot W_I)$ 分のエネルギーは橋脚基部で吸収するとみなす。

- 4) 免震支承で吸収しきれなかった $(E - \alpha \cdot W_I)$ 分のエネルギーと図5から求める橋脚基部の履歴吸収エネルギー W_P に係数 α をかけた $\alpha \cdot W_P$ との釣り合いから橋脚の最大変位 δ_{Pmax} を計算する。

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。免震支承の設計変位は30cmとし、橋脚基部の非線形性はM- ϕ 関係を完全弾塑性のパ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 α の値としては $\alpha=1, 2, 3$ を考慮した。検討結果の詳細は文献1)に掲載しているので割愛するが、そのとき検討を行った範囲では、I種地盤のタイプI地震動に対しては $\alpha=1$ 程度を用いた推定値が動的解析結果と近い値となった。

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の単柱式橋脚への総エネルギー入力は、地盤種別や地震動のタイプによらず、降伏せん断力係数と弾性周期とがそれぞれ免震支承と橋脚系のそれに等しい非線形1質点系への総エネルギー入力で代表できることを確認した。したがって、総エネルギー入力を地震荷重指標として用いることは可能であるといえる。

<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.78-79，1999.3
- 2) 秋山宏：建築物の耐震極限設計 第2版，東京大学出版会，1987.7
- 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.711-718，1998.3