

橋脚基部の塑性化を伴う免震橋梁への総エネルギー入力に関する一考察

(株)構造技術センター 正会員 神農誠 九州大学大学院 学生員 山田純司
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

1. はじめに

性能設計への移行にあたっては、大地震時の構造物の挙動を評価するための地震荷重指標として、構造物の非線形領域における変形能力およびエネルギー吸収性能を精度良く反映できるものが望ましいと考えられる。また、その地震荷重指標は1自由度系のみならず、多自由度系にまで適用可能な汎用性の高いものが望ましい。そのような地震荷重指標として、本研究では地震動による構造物への総エネルギー入力に着目した。

ここでは、免震支承・橋脚基部双方が塑性化する免震橋梁に代表される複合非線形系への総エネルギー入力は、それとエネルギー的に等価な1質点系への総エネルギー入力で代表できることを明らかにし、地震荷重指標としての総エネルギー入力の有効性を示した。次に、総エネルギー入力を実際に地震荷重指標として用い、エネルギーの釣り合いに基づく複合非線形系橋梁の応答推定法の概要を示した。

2. エネルギー入力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。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。

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

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

本研究では、式(1)の右辺を E と表し、それを式(2)により速度換算したものを等価速度 V_E とよび、それを系の弾性周期に対してプロットしたものをエネルギースペクトルという。

$$V_E = \sqrt{2E/m} \quad (2)$$

3. 2 質点系免震橋脚モデルへの総エネルギー入力

(1) 免震橋脚モデルおよびエネルギー的に等価な1質点系モデル

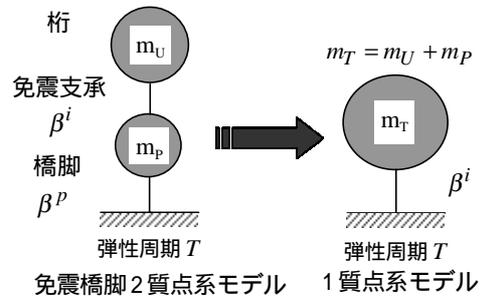
本研究では、図1のように、免震支承を有するRC単柱式橋脚を、桁および橋脚を表す質点と免震支承および橋脚を表すせん断ばねからなるせん断2質点系にモデル化した。

一方、この複合非線形系モデルと総エネルギー入力を比較する1質点系モデルは、図1のように、桁(上部構造)の質量 m_U と橋脚(下部構造躯体)の質量 m_P を合わせた質量 m_T をもつ質点と降伏震度が免震支承の降伏震度 β^i に等しく、かつ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。

地震終了時の系への総エネルギー入力 E は式(3)により計算した。また本研究では、橋脚の降伏震度を免震支承のそれと除したものを降伏震度比と定義する。

(2) 免震橋脚と等価1質点系モデルへの総エネルギー入力の振動台実験による検証

本節では、建設省土木研究所で行われた免震支承を有するRC橋脚模型を用いた振動台実験²⁾の結果を用いて、免震橋脚モデルと等価1質点系モデルへの総エネルギー入力とを比較した。なお既に、現実的な降伏震度比の範囲では、免震橋脚2質点系せん断ばねモデルへの総エネルギー入力は等価1質点系モデルへのそれと代表できることを解析的に確認している³⁾。



$$\beta^i = Q_y^i / (m_U g) \quad \beta^p = Q_y^p / (m_T g)$$

$$\beta^p > \beta^i$$

m_U : 上部構造の質量
 m_P : 下部構造躯体の質量
 m_T : 構造全体系の質量
 g : 重力加速度
 i : 免震支承の降伏震度
 p : 橋脚の降伏震度
 Q_y^i : 免震支承の降伏荷重
 Q_y^p : 橋脚の降伏荷重

図1 免震橋脚モデルとエネルギー的に等価な1質点系モデル

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

$n=1$: 1質点系、
 $n=2$: 2質点系

キーワード: 免震, エネルギー, 鉄筋コンクリート橋脚, 鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB), 道路橋

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

仮説 複合非線形系への総エネルギー入力(実験値)は等価1質点系への総エネルギー入力(解析値)と等価である¹⁾を検証するために、免震橋脚模型せん断2質点系モデルとエネルギー的に等価な図1のような1質点系モデルを作成し、振動台加速度を入力波として動的解析を行った。なお、等価1質点系の弾性周期は、免震橋脚模型せん断2質点系モデルの固有値解析から求まる一次周期とした。表1に等価速度換算した総エネルギー入力を比較した結果を示す。

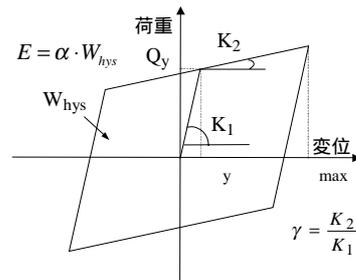
表1から、複合非線形系への総エネルギー入力は、それとエネルギー的に等価な1質点系モデルに対して動的解析を行うことで求められる総エネルギー入力とほぼ等しいことが示された。これにより、複合非線形系への総エネルギー入力はそれとエネルギー的に等価な1質点系モデルへの総エネルギー入力に代表するという可能性が示された。

表1 複合非線形系免震橋脚模型と等価1質点系モデルへの総エネルギー入力(等価速度換算)

	免震橋脚模型	動的解析 (等価1質点系 モデル)
等価速度 (cm/sec)	124	121

4. エネルギーの釣り合いに基づく複合非線形系の応答推定³⁾

図2に、図1のような複合非線形系免震橋脚モデルの履歴吸収エネルギーの概念図を示す。桁と橋脚が同位相で振動する1次モードを仮定すると、総エネルギー入力 E は式(4)のように、免震支承の1サイクルの履歴吸収エネルギー W_i と橋脚の1サイクルの履歴吸収エネルギー W_p との和に係数をかけたものと表現できる。なお、履歴吸収エネルギーを計算する際、免震支承の復元力特性はバイリニア型、橋脚の復元力特性は完全弾塑性のバイリニア型でモデル化することにする。図3にエネルギーの釣り合いに基づく複合非線形系の応答推定のフローチャートを示す。ここで、応答推定に用いる減衰定数2%時の非線形エネルギースペクトルは地震荷重としてあらかじめ与えられているものとする。



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

$$W_{hys} = W_p = 4Q_y^p(\delta_{max}^p - \delta_y^p) \text{ : 橋脚}(\gamma = 0)$$

- W_i : 免震支承の履歴吸収エネルギー
- W_p : 橋脚(基部)の履歴吸収エネルギー
- δ_{max}^i : 免震支承の最大変位
- δ_{max}^p : 橋脚の最大変位
- δ_y^i : 免震支承の降伏変位
- δ_y^p : 橋脚の降伏変位
- Q_y^i : 免震支承の降伏荷重
- Q_y^p : 橋脚の降伏荷重

5. まとめ

- 1) 複合非線形系への総エネルギー入力は、全体系の総質量と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質点系への総エネルギー入力に代表できることを実験結果との比較に基づき明らかにし、総エネルギー入力が複合非線形系の地震荷重指標として有効であることを示した。
- 2) エネルギーの釣り合いに基づく複合非線形系の応答推定法概念を示した。

謝辞

本研究で使用した振動台実験データは建設省土木研究所耐震技術研究センター耐震研究室から御提供いただいたものである。貴重なデータを提供して下さった同研究室の足立幸郎主任研究員ならびに運上茂樹室長に心から感謝致します。

参考文献

- 1) 秋山宏：建築物の耐震極限設計 第2版，東京大学出版会，1987。
- 2) 足立・運上・近藤・加賀山：振動台実験による免震支承を有するRC橋脚の非線形地震応答特性に関する研究 構造工学論文集，Vol.45A，pp.879-890，1999。
- 3) 神農・松田・大塚・入江・内田：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，第25回地震工学研究発表会講演論文集，pp.673-676，1999。

図2 複合非線形系免震橋脚モデルの履歴吸収エネルギー

$$E = \alpha \cdot (W_i + W_p) \quad (4)$$

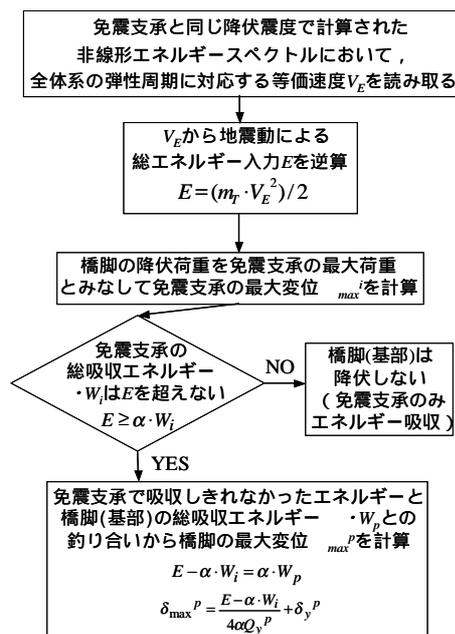


図3 エネルギーの釣り合いに基づく複合非線形系の応答推定のフローチャート