

免震支承と橋脚基部の降伏震度比と 総エネルギー入力の関係

松田 泰治¹・大塚 久哲²・山田純司³・神農 誠⁴

¹正会員 博(工) 九州大学大学院助教授 工学研究科建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

²フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究科建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

³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)

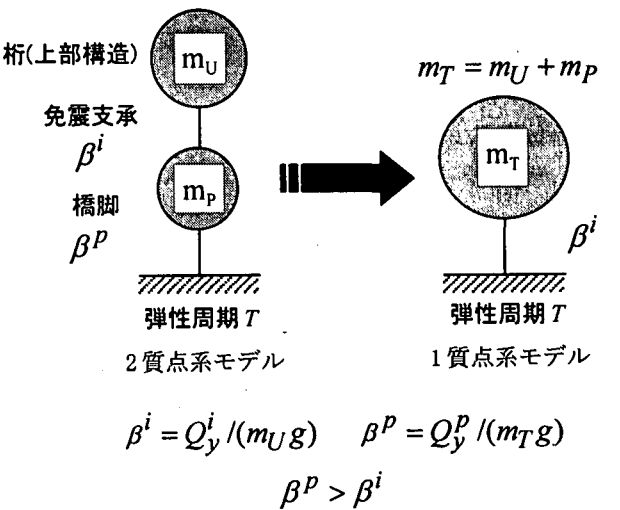
⁴正会員 修(工) (株)構造技術センター 技術部 (〒812-0011 福岡市博多区博多駅前 3-5-7)

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多重非線形系へのエネルギー入力の総量は、橋脚系の総質量と弾性周期および免震支承の降伏震度比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、多重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既往の実験結果との比較に基づき検証し、エネルギー入力の総量が汎用的な地震荷重指標となりうることを示す。

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¹⁾。そこでは、支承部と橋脚基部双方が塑性化する多重非線形系へのエネルギー入力の総量は、橋脚系の総質量と弾性周期および免震支承の降伏震度比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。建築構造物を対象にした同様の研究として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⁾が挙げられる。しかし、土木構造物を対象に検討された例は少なく免震支承を有する単柱式橋脚等の多重非線形系この仮定を適用する場合はその妥当性を検証しておく必要がある。本研究では、多重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既往の実験結果との比較に基づき検証し、エネルギー入力の総量が汎用的な地震荷重指標として適用可能であることを示す。



m_U : 上部構造の質量 β^i : 免震支承の降伏震度
 m_P : 下部構造躯体の質量 β^P : 橋脚の降伏震度
 m_F : フーチングの質量 Q_y^i : 免震支承の降伏荷重
 m_T : 構造全体系の質量

図-1 多重非線形系橋脚モデルと
エネルギー的に等価な1質点系モデル

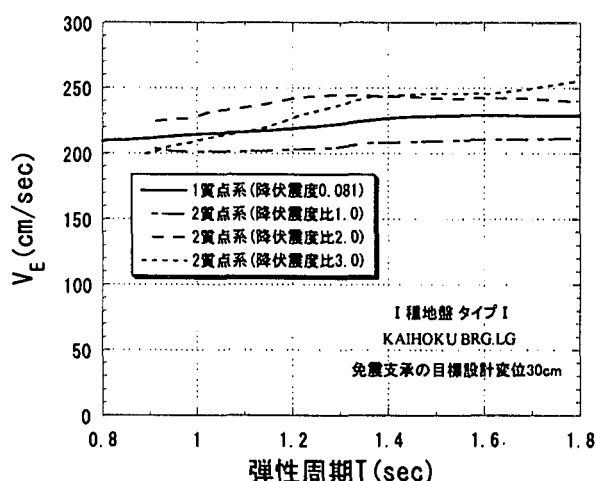
2. エネルギー的に等価な1質点系モデル

図-1に示すように、免震支承を有するRC単柱式橋脚は、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質点系にモデル化できる。復元力特性は、免震支承にバイリニアモデル、橋脚に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。ここで、免震支承の降伏震度 β^i に対する橋脚の降伏震度 β^o の比を降伏震度比とよび、その比を1, 2, 3の3通りに設定した。また、橋脚の降伏剛性は、支承固定時の弾性周期から求めることにする。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する。2質点系の弾性周期 T は、免震支承の第1剛性および橋脚の降伏剛性を用いた固有値解析から求まる1次固有周期とした。一方、この多重非線形系モデルとエネルギー的に等価な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_r 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%とする。図-2は上記の考え方をI種地盤A地域に対して試設計された3径間連続鋼桁橋に適用して2質点系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 E を等価速度 V_E に換算して弾性周期 T に対してプロットしたものである。図-2に示す計算例では、等価1質点系への総エネルギー入力は2質点系免震橋脚モデルへの総エネルギー入力の傾向を概略捉えている。

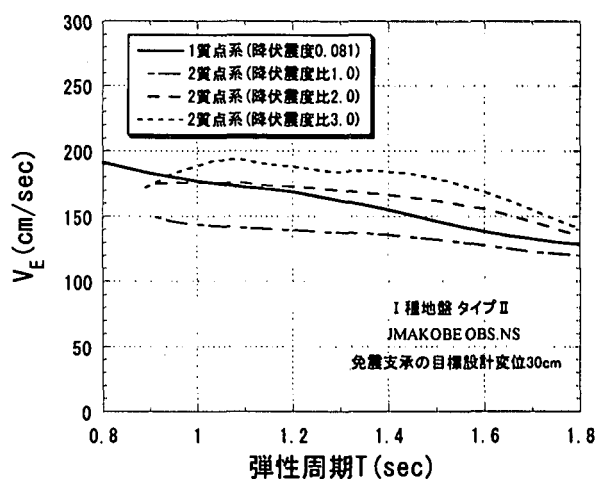
以上の結果より、等価な1質点系モデルへの総エネルギー入力は、2質点系免震橋脚モデルの総エネルギー入力を概略近似できることが示された。これらの結果を踏まえ多重非線形系となる免震橋梁への総エネルギー入力は、全体系の総質量と弾性周期および免震支承の降伏震度が等しい非線形1質点系への総エネルギー入力で代表できるという仮説が解析的に確認された。

3. 既往の実験結果との比較に基づく仮説の検証

ここでは足立、運上らによる免震支承を有するRC橋脚模型を用いた振動台実験³⁾の結果を参照して免震橋脚模型を2質点系にモデル化したものへの総エネルギー入力と、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とを比較検討する。それにより、1質点系への総エネルギー入力が多重非線形系の地震荷重指標となりうることを実験的にも明ら



(a) TYPE I I種地盤 KAIHOKU_BRG.LG
目標設計変位 30cm



(b) TYPE II I種地盤 JMAKOBE_OBS.NS
目標設計変位 30cm

図-2 2質点系および1質点系への総エネルギー入力

かにする。図-3および図-4は、足立、運上らによる研究から引用したものである。図-3は模型供試体の概要を示しており、上部構造重量395kN、脚躯体重量23kN、フーチング重量52kNである。また、免震支承を用いた場合の橋脚模型の等価固有周期は0.66sec、免震支承を用いない場合の橋脚模型の降伏固有周期は0.28sec、免震支承の降伏震度は0.21、橋脚の降伏震度は0.34である。図-4は供試体設置状況と加振装置の概要を示している。この研究では、免震支承のみならず橋脚基部まで塑性化するような大規模地震を受ける橋梁システムの地震応答特性を実験的に把握することを目的としている³⁾。免震支承とともに橋脚が非線形応答する際の橋梁システムの挙動を実験的にシミュレーションした研究事例は現段階では数少ないだけに、非常に貴重かつ有益と考えられる。供試体や実験方法・実験結果の詳細は参考文献3)に譲ることとする。また、この研究では、同一供試体(鉄筋コンクリート橋

脚模型および免震支承模型)を対象に3回に分けて加振実験が行われている。ここで総エネルギー入力の比較検討に用いたのは第一回加振時の実験データである。図-5に第一回加振時の振動台加速度の時刻歴を示す。これが供試体への入力地震動である。表-1に第一回加振時の最大応答加速度および最大応答変位を示す。免震支承と橋脚はこの加振により塑性化している。これらの実験データを用いて、総エネルギー入力に関して以下に示す三つの仮説を検証する。

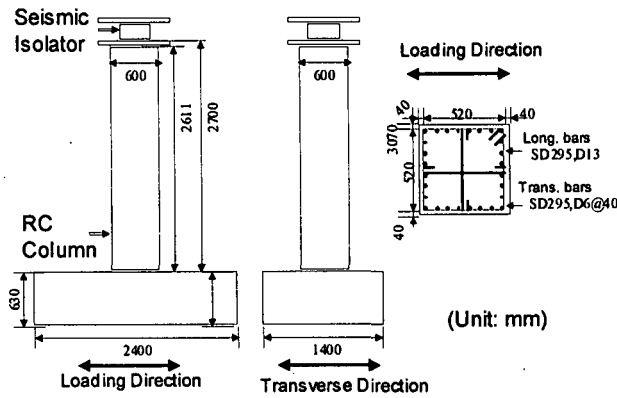
- 1) 多重非線形系の履歴吸収エネルギー(実験値) ≒ 多重非線形系への総エネルギー入力(実験値)
 - 2) 多重非線形系への総エネルギー入力(実験値) ≒ せん断2質点系への総エネルギー入力(解析値)
 - 3) 多重非線形系への総エネルギー入力(実験値) ≒ 等価1質点系への総エネルギー入力(解析値)
- である。

まず、最初の仮説である「多重非線形系の履歴吸収エネルギー(実験値) ≒ 多重非線形系への総エネルギー入力(実験値)」を検証するために、免震橋脚模型を図-1と同様にせん断2質点系でモデル化し、実験データから非線形化した免震橋脚模型の履歴吸収エネルギーとそれへの総エネルギー入力を計算した。なお、地震終了時の系への総エネルギー入力 E は式(1)により計算する。ここで m_i は各質点の質量、 z_0 は地震による地動変位、 y_i は各質点と地盤間の相対変位である。以降の検証も同様である。表-2に計算結果をまとめて示す。

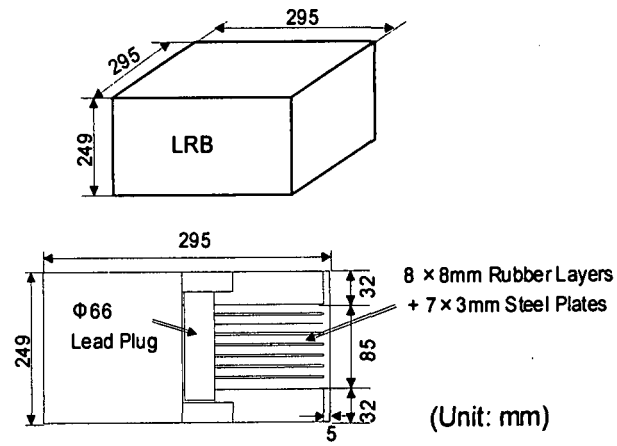
$$E = - \sum_{i=1}^n (m_i \int_0^{t_0} \ddot{z}_0 \dot{y}_i dt) \quad (1)$$

表-2より多重非線形系の履歴吸収エネルギーはそれへの総エネルギー入力にほぼ等しくなることが実験的に確認された。このことは、エネルギーの釣り合いに基づいて多重非線形系の応答推定を試みる場合に、系への総エネルギー入力と系の履歴吸収エネルギーの釣り合いを仮定することの妥当性を示すものである。

次に、二番目の仮説である「多重非線形系への総エネルギー入力(実験値) ≒ せん断2質点系への総エネルギー入力(解析値)」を検証するために、免震橋脚模型を図-1と同様にせん断2質点系でモデル化し、振動台加速度を入力地震動として動的解析を行った。その結果を用いて、せん断2質点系への総エネルギー入力を算出した。動的解析の際、免震支承の復元力特性はバイリニアモデル、橋脚のそれは降伏剛性を第一剛性とする完全弾塑性バイリニア型の武藤モデルを採用した。計算を行った結果免震橋梁模型の速度換算した総エネルギー入力124cm/secに対してせん断2質点系モデルの総エネルギー入力は128cm/secとなった。従って、



(a) 鉄筋コンクリート橋脚模型およびその配筋状況



(b) 免震支承模型

図-3 鉄筋コンクリート橋脚模型および免震支承模型 [文献3)より]

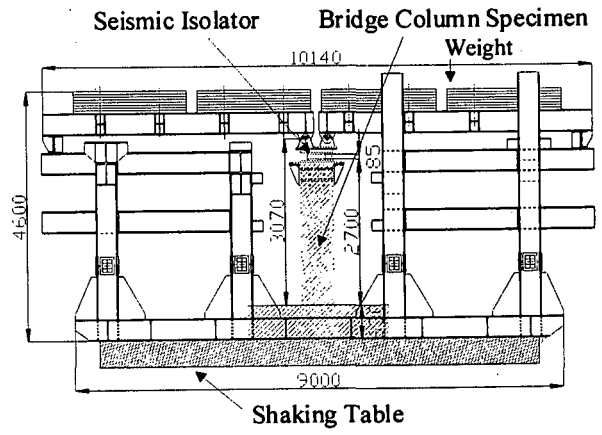


図-4 供試体設置状況および加振装置の概要 [文献3)より]

表-1 第一回加振時の最大応答加速度および最大応答変位

加振数	振動台 加速度 (gal)	橋脚 上端変位 (mm)	橋脚 上端加速度 (gal)	免震支承 上端変位 (mm)	免震支承 上端加速度 (gal)
1回	461	59.7	552	89.5	375

加振開始から19.99秒後まで

表-2 多重非線形系免震橋脚模型の履歴吸収エネルギーと総エネルギー入力

免震支承の 履歴吸収 エネルギー	橋脚の 履歴吸収 エネルギー	全体系の 履歴吸収 エネルギー	等価速度
MN*mm	MN*mm	MN*mm	cm/sec
15.76	20.82	36.58	124

エネルギー入力 (第1層)	エネルギー入力 (第2層)	全体系への 総エネルギー入力	等価速度
MN*mm	MN*mm	MN*mm	cm/sec
1.163	36.18	37.34	125

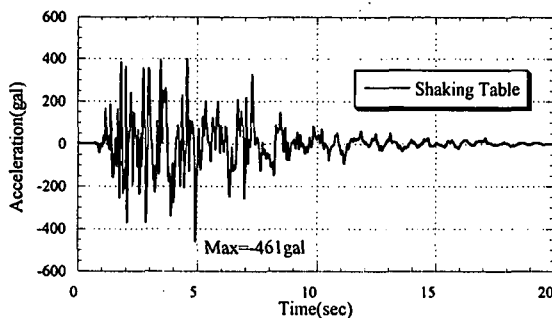


図-5 第一回加振時の振動台加速度

多重非線形系への総エネルギー入力は、そのせん断2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く、総エネルギー入力を計算する際、免震橋脚をせん断2質点系でモデル化することの妥当性が確認された。最後に、三番目の仮説である「多重非線形系への総エネルギー入力(実験値)≒等価1質点系への総エネルギー入力(解析値)」を検証するために、図-1と同様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1質点系モデルを作成し、振動台加速度を入力地震動として動的解析を行った。その結果を用いて、等価1質点系への総エネルギー入力を算出した。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。計算によれば免震橋梁模型の速度換算した総エネルギー入力124cm/secに対して等価な1質点系モデルの総エネルギー入力は121cm/secとなった。従って、多重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質点系モデルを用いて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、多重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非線形1質点系モデルへの総エネルギー入力で代表できることが示された。すなわち、多重非線形系に対して

も非線形1質点系への総エネルギー入力が地震荷重指標として適用可能であり、総エネルギー入力が汎用性の高い地震荷重指標であることが示された。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 既往の実験結果との比較に基づき免震支承と橋脚基部双方が塑性化する多重非線形系へのエネルギー入力の総量は、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事を示した。
- 2) 既往の実験結果の分析に基づき多重非線形系のエネルギー入力の総量は系の履歴吸収エネルギーが支配的であり、せん断2質点系モデルにより解析的に求めたエネルギー入力の総量と良く一致することを確認した。

謝辞: 本研究で使用した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において取得されたものである。当時、貴重なデータを御提供して下さい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) 神農 誠, 松田 泰治, 大塚 久哲, 入江 達雄, 内田 広明: 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: 地震工学研究発表会講演論文集第2分冊, pp. 673-676, 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) 足立幸郎, 運上茂樹, 近藤益央, 加賀山泰一: 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.