

免震効果を得るために必要な長周期化

飯山かほり¹・川島一彦²・庄司学³

¹ 学生会員 東京工業大学大学院 総合理工学研究科人間環境システム専攻修士課程

(〒227 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259 番地)

² フェロー会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (役所)

³ 正会員 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科 (同上)

免震設計に際しては、構造物を長周期化し、エネルギー吸収性能を増大させることが重要である。本研究においては、免震橋の固有周期を変化させることにより、橋脚と免震支承の両者にどれだけのエネルギーが分配されるかについて、履歴エネルギー吸収を指標として検討した。その結果、兵庫県南部地震における神戸海洋気象台記録のような地震動に対しては、非免震橋に対する免震橋の固有周期を2倍以上にとることにより、免震支承にエネルギー吸収が集中し、橋脚の塑性化を抑えられることが明らかとなった。

Key Words : *Menshin design, Seismic isolation, Bridge, Energy dissipation*

1. はじめに

阪神大震災を機に、道路橋において免震設計が普及し始めている。免震設計においては、免震支承に変形を集中させることにより、橋脚に生じる損傷を低減させることが重要である。免震支承に変形を集中させるため、免震支承の剛性を下げ、系全体としての長周期化を図るが、どの程度の長周期化を行う必要があるかに関しては十分検討されていない。そこで、本研究では非線形時刻歴応答解析を行い、橋脚に生じる損傷度を橋脚の吸収エネルギーによって表し、免震橋の固有周期と橋脚および免震支承の累積エネルギー吸収の関係について考察する。

2. 解析対象とする免震橋とそのモデル化

解析対象としたのは、橋脚駆体高さ10m、上部構造重量710tf、橋脚駆体重量364tf、橋脚駆体寸法2.2m(橋軸方向)×5m(橋軸直角方向)の鉄筋コンクリート橋脚である。解析では橋軸方向の応答を対象とした。図-1に、対象橋とその解析モデルを示す。表-1は

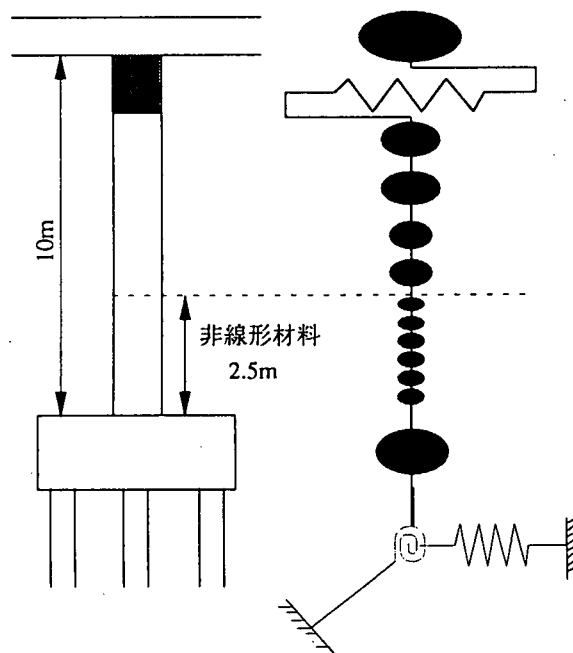


図-1 解析対象とする免震橋とそのモデル

杭基礎の地盤ばね定数を示したものである。免震支承としては鉛プラグ入り積層ゴム支承を用い、桁～橋脚天端間に設置した。道路橋示方書に従えば、同一支承線上の免震支承数は5個となるが、後述する解析では

表-1 杭基礎の地盤ばね定数

併進ばね定数 (tf/m)	回転ばね定数 (tfm/rad)
401200.00	3421000.00

表-2 免震支承および橋脚の履歴パラメータ

	降伏変位 (m)	降伏耐力 (tf)
免震支承 (r=5/5)	0.008623	111.0
橋脚	0.0366	489.7

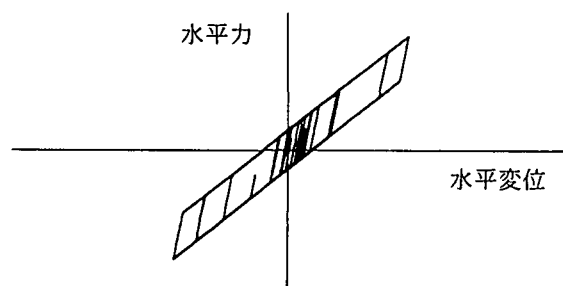


図-2 免震支承の材料非線形モデル（バイリニア型）

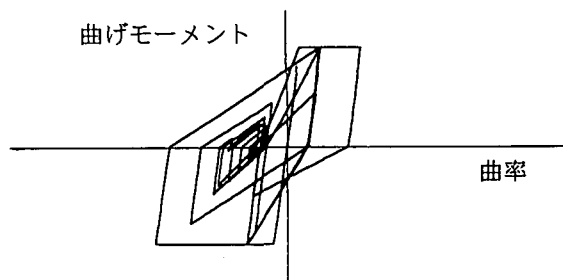


図-3 橋脚の材料非線形モデル（最大点指向バイリニア型（Takeda 型））

免震橋の固有周期を変化させるために、支承個数を単純に $n=1 \sim 10$ の範囲で変化させた。支承個数が n 個の場合には、支承個数が 5 個の場合の免震支承の 1 次および 2 次剛性、降伏力 Q_y を単純に $n/5$ 倍して 1 次および 2 次剛性を求めた。ここでは以下、 $r \equiv n/5$ を支承剛性比と呼ぶ。免震支承および橋脚の履歴特性としては、図-2、3 に示すバイリニア型および最大点指向バイリニア型（Takeda 型）モデルを選定した。表-2 に免震支承および橋脚の履歴パラメータを示す。ただし、橋脚の非線形性は、基部から 2.5m の範囲の塑性ヒンジ領域において考慮している。橋脚および免震支承ともに履歴減衰のみを考慮した。

免震橋の固有周期 T は、免震橋を 1 質点系振動モデル

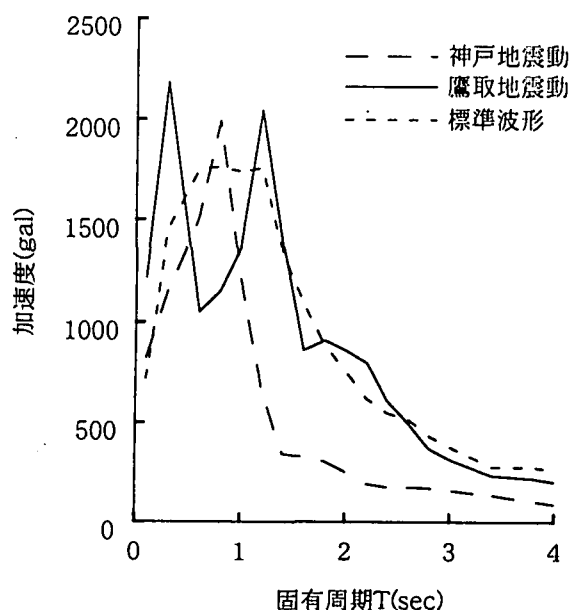


図-4 解析に用いた地震動の加速度応答スペクトル

ルに置き換えた場合の、免震支承—橋脚—地盤ばねから成る合成剛性と、地震時保有水平耐力法に用いる等価重量から求めた。ただし、ここでは免震支承および橋脚の剛性としてはともに等価剛性を用いている。免震橋の固有周期 T は入力地震動によって多少変化するが、おおよそ 1 秒 ($n=1$) ～ 3 秒 ($n=10$) の範囲にある。また、固定支承を用いた場合（以下、非免震橋と呼ぶ）の橋の固有周期 T_0 はおおよそ 1 秒となる。

また本解析においては、図-2、3 に示す履歴曲線の描く面積の累積をそれぞれ免震支承、橋脚の累積吸収エネルギーと呼ぶ。

3. 入力地震動

兵庫県南部地震において観測された神戸海洋気象台記録（EW 成分）および JR 西日本鷹取駅地震記録（EW 成分）¹⁾ を入力地震動とした。ただし、地震動強度の違いを検討するために、前者についてはその 1.5 倍、2 倍の地震動も用いた。また、後者については加速度応答スペクトルが大きく突出する固有周期が 2 つあるという特徴的な性質をもつため、応答スペクトル特性を振動数領域で振幅調整した標準波形も用いることとした。このようにして求めた入力地震動を、以下、それぞれ神戸地震動、神戸 1.5 倍地震動、神戸 2 倍地震動、鷹取地震動、標準波形と呼ぶ。神戸地震動、鷹取地震動、標準波形の加速度応答スペクトルを図-4 に示す。

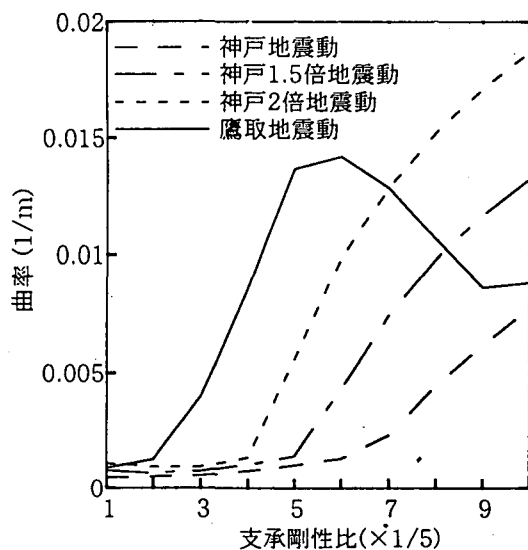
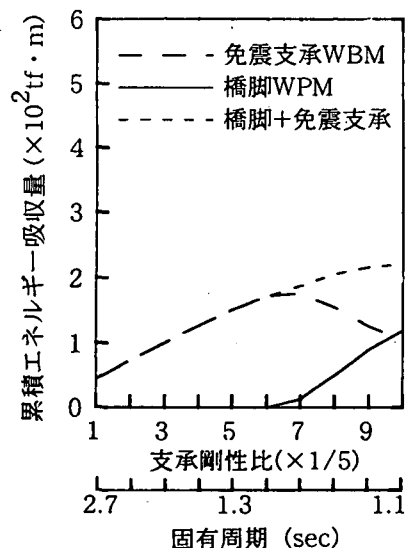
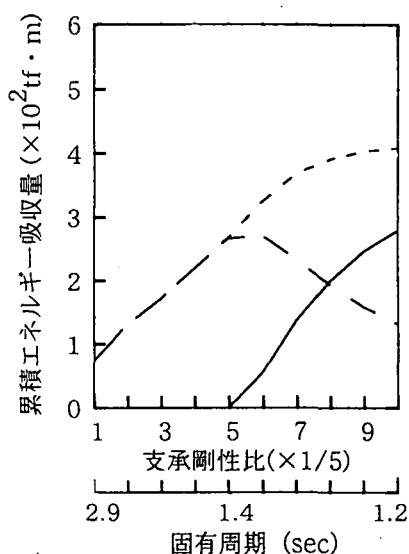


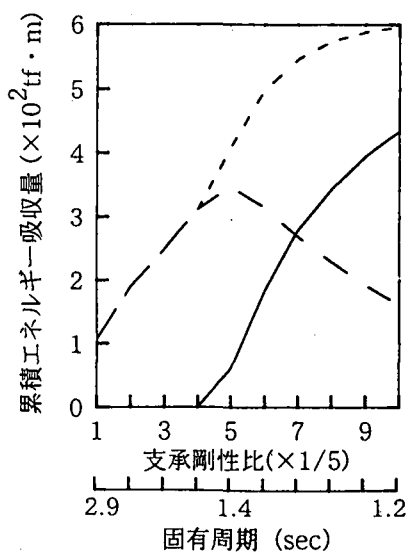
図-5 支承剛性比と橋脚基部の曲率の関係



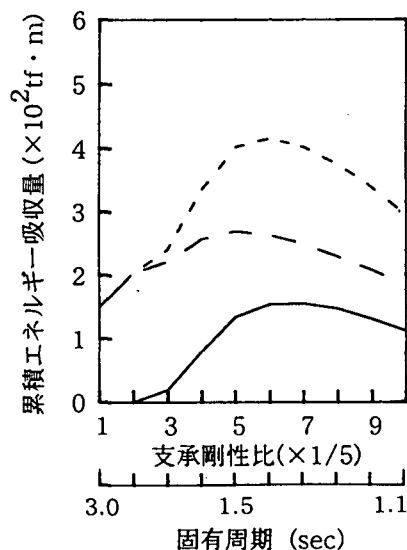
(a) 神戸入力の場合



(b) 神戸1.5倍入力の場合



(c) 神戸2倍入力の場合



(d) 鷹取入力の場合

図-6 免震橋における支承剛性比と累積エネルギーの関係

4. 解析結果

(1) 免震特性

図-5 に、支承剛性比 r と橋脚基部に生じる曲率の関係を示す。これより、神戸、神戸1.5倍、神戸2倍地震動を入力した場合には、 r が大きくなるほど、橋脚の塑性化が進むが、鷹取地震動を入力した場合には、最も橋脚の塑性化が進むのは $r=6/5$ のときであり、免震効果は支承剛性比に比例しないことがわかる。

図-6 に、橋脚および免震支承の累積エネルギー吸収量を示す。これより、入力地震動にかかわらず、支承剛性比 r が小さいときには橋脚は非線形領域に入らず、免震支承によるエネルギー吸収 W_B^M が全てを占める。この W_B^M は、いったん増加した後、ある r をピー

クに減少するが、これは、橋脚は非線形化するとその降伏耐力以上の水平力を受け持つことができないため、免震支承に作用する水平力もそれ以上増大しない。 r が大きくなり、支承剛性が增大すると、同じ水平力に対する支承の水平変位が減少するため、免震支承の吸収エネルギー W_B^M が減少するのである。

r がある程度大きくなると橋脚の非線形化が進展し、 W_P^M も増加していく。本解析の範囲においては、神戸、神戸1.5倍、神戸2倍地震動を入力した場合には、 W_P^M および $W_P^M + W_B^M$ とともに支承剛性比 r に比例して増加する。ただし、図-6(d)からわかるように、鷹取地震動を入力した場合には、 W_P^M や $W_P^M + W_B^M$ は r に比例せず、ともに $r=6/5$ の時に最大となる。

(2) 固有周期とエネルギー吸収の関係

入力地震動の種類により系全体が吸収するエネルギー量も異なることを考慮して、以下、免震程度を表す指標として非免震橋に対する免震橋のエネルギー吸収 W_p^M/W_p^F を定義する。図-7 に、免震橋の固有周期 $T(\text{sec})$ と非免震橋に対する免震橋のエネルギー吸収の比 W_p^M/W_p^F の関係を示す。これより、神戸、神戸 1.5 倍、神戸 2 倍地震動を入力した場合には、 $T \geq 1.5\text{sec}$ においては $W_p^M/W_p^F \approx 0$ であり、免震効果が大きいことがわかる。 $T < 1.5\text{sec}$ となると橋脚の塑性化が進み、 W_p^M/W_p^F が 1 に近づく。ただし鷹取地震動を入力した場合には、 $T \approx 2\text{sec}$ からすでに橋脚の塑性化が始まり、 T が短くなるにつれて W_p^M/W_p^F は増加し、 $T \approx 1.4\text{sec}$ で最大値をとる。しかし、図-4 に示したように、鷹取地震動の $T \approx 1.3\text{sec}$ における加速度応答スペクトルのピークを抑えた標準波形を入力した場合には、鷹取地震動を入力した場合のような特性は認められない。したがって、免震橋は鷹取地震動と共振していることを示している。また、 $W_p^M/W_p^F \approx 0$ となるのが、神戸地震動を入力した場合には $T \geq 1.5\text{sec}$ であるのに対して、鷹取地震動と標準波形を入力した場合には $T \geq 2\text{sec}$ と異なるのは、図-4 からわかるように、鷹取地震動と標準波形には、神戸地震動よりも $T \approx 2\text{sec}$ の成分がより多く含まれているためである。

道示においては「非免震橋に対する免震橋の固有周期 T/T_0 は 2 倍以上とする」と規定されていることから、図-7 を、 T/T_0 によって表した結果を図-8 に示す。これより、 $T/T_0 \geq 2$ であれば、鷹取地震動を除いては W_p^M/W_p^F は小さく、免震効果が大きいことがわかる。しかし、鷹取地震動を入力した場合は、 $T/T_0 \geq 2$ であっても免震効果は生じないことに注意しなければならない。

5. まとめ

(1) 免震橋が地震動を受ける際、免震支承剛性比が小さいほど、同じ入力エネルギーに対する免震橋の吸収エネルギーは少ない。このとき橋脚はほとんど非線形化せず、免震支承の変形により入力エネルギーの大部分が吸収される。

(2) 道示に規定されているように、非免震橋に対する

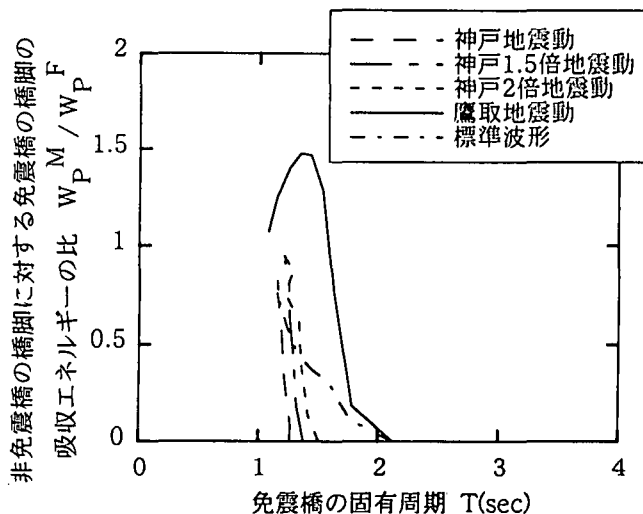


図-7 固有周期と橋脚累積エネルギー吸収の比の関係

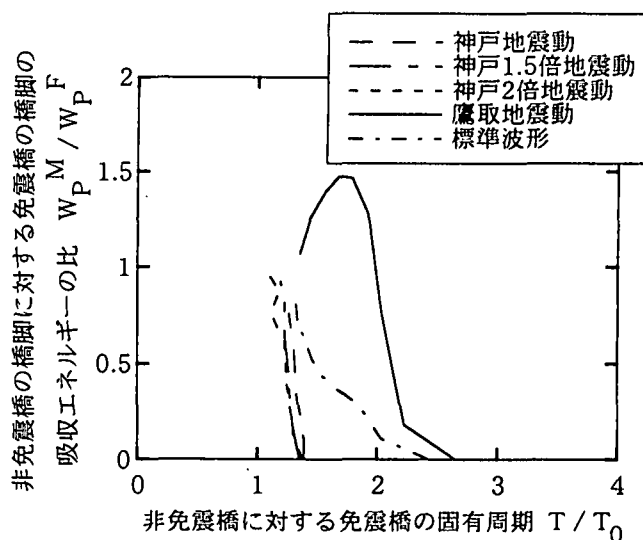


図-8 非免震橋に対する免震橋の固有周期の比と橋脚累積エネルギーの比との関係

免震橋の固有周期 T/T_0 を 2 倍以上とすることは、神戸海洋気象台記録のような地震動に対しては安全側の結果を与える。しかし、JR 鷹取記録のように地震動と共振し、免震効果が生じない場合もある。したがって、免震設計に際しては、免震橋の固有周期と、地盤の固有振動特性や地震動の周期特性等に十分注意することが重要である。

参考文献

- 1) Nakamura, Y. : Waveform and Its Analysis of the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, JR Earthquake Information N.23c, Railway Technical Research Institute, 1995