

# 免震橋の荷重低減係数に及ぼす じん性率の設定法に関する研究

永井政伸<sup>1</sup>・川島一彦<sup>2</sup>・庄司学<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻（〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1）  
<sup>2</sup>フェロー会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科（〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1）  
<sup>3</sup>正会員 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科（〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1）

## 1. はじめに

兵庫県南部地震以降、道路橋の設計においてゴム支承を用いた水平地震力分散構造や免震設計が広く使われるようになった。水平地震力分散式橋梁のような剛性の低いゴム支承で支持された橋梁では、じん性率として橋脚系のじん性率を用いると地震力を過小評価することが明らかとなっている<sup>1)</sup>。これは、免震支承のような非線形履歴特性を有する支承を用いた場合にも同様と考えられるが、これに関する既往の研究はない。本研究では、免震設計の荷重低減係数を求めるためのじん性率として橋脚系じん性率と全体系じん性率を用いた場合の違いを明らかにするとともに、免震支承および橋脚の履歴特性を考慮した等価線形化法の適用性を検討した結果を報告する。

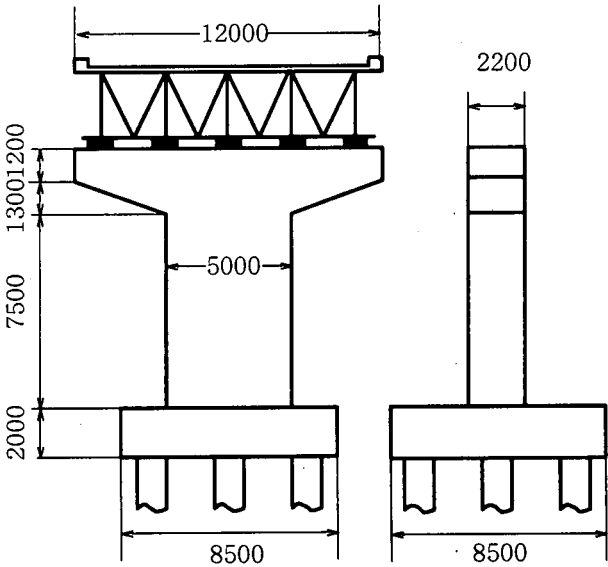


図-1 解析対象橋

## 2. 解析対象橋および解析モデル

解析対象とした橋脚は、図-1 に示すような RC 橋脚で支持された幅員 12m、橋長 5@40m の 5 径間連続鋼 I 桁橋の一部を取り出したものであり、平成 8 年道路橋示方書に基づいて地震時保有水平耐力法により耐震設計されている<sup>2)</sup>。単位橋脚あたりの上部構造重量は 710tf で、鉛プラグ入り積層ゴム支承 (LRB) 5 基により支持されている。支承の特性は、表-1 に示すとおりである。地盤種別はⅡ種である。解析では、1 基の橋脚、基礎とそれが支持する上部構造部分を図-2 に示すような多質点系にモデル化した。道路橋示方書に基づき、橋脚については降伏

表-1 免震支承の特性（支承が 5 基の場合）

|              |         |
|--------------|---------|
| 1 次剛性 (MN/m) | 128.7   |
| 2 次剛性 (MN/m) | 19.8    |
| 降伏変位 (m)     | 0.00862 |
| 降伏力 (MN)     | 1.11    |

剛性、免震支承には等価剛性を用いた場合の固有周期は 1.24 秒となる。ここで、免震支承の等価剛性を求めるためには、設計変位が必要であるが、ここでは 40cm とした。入力地震動によっては、この設計変位では不足する場合もあり、本来の設計であれば、設計変位を変化させて再設計が必要となる。しかし、ここでは断面決定が目的ではなく、免震橋の地震応答特性の解析が目的で、また、同一の固有周期特性

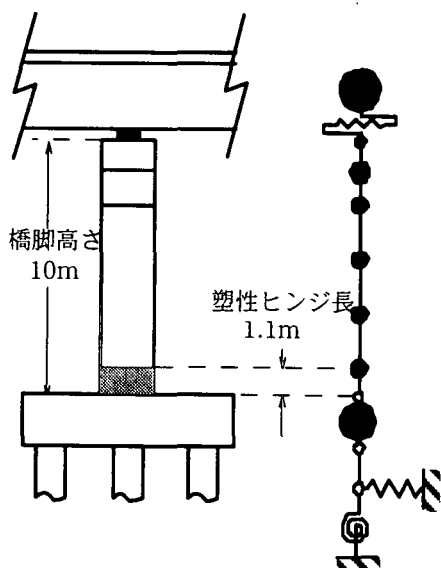


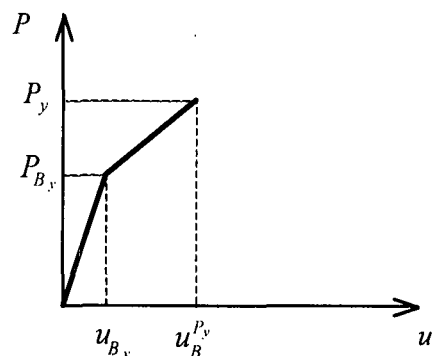
図-2 解析モデル

を有する橋を解析する方が相互の比較のためには都合がよいことから、ここでは免震支承の設計変位は40cmに固定することとした。

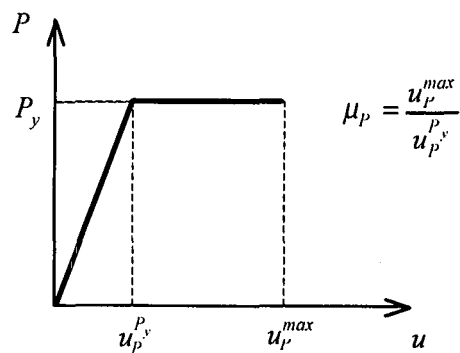
また、本研究では免震支承の剛性を変化させた場合の影響を検討するために、支承剛性を10段階に変化させることとし、便宜的に支承の個数が1～10個に変化するとしてモデル化した。実際には、支承個数が変化することはあり得ないが、橋脚に対する支承の相対的な剛性を変化させるために、ここでは便宜的にこのように取り扱ったものである。この結果、道路橋示方書に基づいて橋脚には降伏剛性、支承には等価剛性を用いた場合の橋の固有周期は0.96秒～2.55秒の範囲で変化した。非線形履歴特性としては、橋脚にはTakeda型モデル、免震支承にはバイリニア型モデルを用いた。非線形動的解析では、粘性減衰として免震支承には0%、橋脚には2%（履歴減衰を除く）、基礎には15%を、また、線形動的解析では、免震支承には、後述するように非線形応答解析から求められた支承の最大応答の70%に相当する変位の等価減衰定数、橋脚には5%、基礎には15%を与えた。また、入力地震動としては、平成7年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鷹取駅記録EW成分を用いた。

### 3. 荷重低減係数の評価

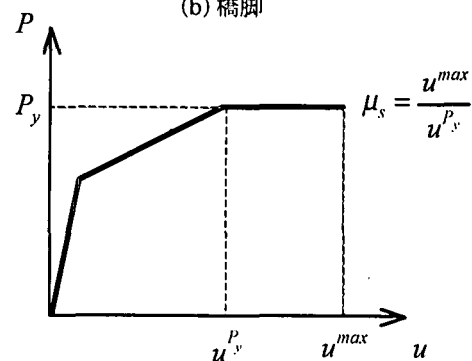
$a_L^{\max}$ を線形動的解析により求められた桁の応答加速度、 $a^{\max}$ を非線形動的解析により求められた桁の応答加速度とすると、荷重低減係数は次式のように与えられる。



(a) 免震支承



(b) 橋脚



(c) 全体系

図-3 免震支承および橋脚の変形によって桁に生じる変位

表-2 免震橋の減衰定数  $h$  に基づく補正係数  $c_E$

| 橋の減衰定数 $h$           | 補正係数 $c_E$ |
|----------------------|------------|
| $h < 0.1$            | 1.0        |
| $0.1 \leq h < 0.12$  | 0.9        |
| $0.12 \leq h < 0.15$ | 0.8        |
| $h \geq 0.15$        | 0.7        |

$$R = \frac{a_L^{\max}}{a^{\max}} \quad (1)$$

道路橋示方書では、免震橋に対する荷重低減係数  $R_E$  は次式のように与えられている。

$$R_E = \frac{\sqrt{2\mu - 1}}{c_E} \quad (2)$$

ここで、 $\mu$ ：許容じん性率、 $c_E$ ：免震橋の減衰定数に基づく補正係数で、表-2に示す。

免震橋では、桁に慣性力を作用させていくと、一

般には最初に免震支承が降伏し、続いて橋脚が塑性化する。この関係を示すと図-3(a)(b)のようになる。したがって、免震支承と橋脚がともに塑性変形した場合には、橋全体系としては、図-3(c)のような履歴を示すことになる。橋脚の変形だけを考えると、図-3(b)より橋脚系じん性率 $\mu_p$ は次式のようになる。

$$\mu_p = \frac{u_p^{max}}{u_p^y} \quad (3)$$

しかし、桁の変位には、橋脚の他に免震支承や基礎の変形が寄与する。したがって、これらを考慮すると、橋全体系のじん性率 $\mu_s$ は次式のようになる。

$$\mu_s = \frac{u^{max}}{u^y} \quad (4)$$

ここで、 $u_p^{max}$ ：橋脚の最大応答変位、 $u_p^y$ ：橋脚の降伏変位、 $u^{max}$ ：桁の最大応答変位、 $u^y$ ：橋脚が降伏したときに桁に生じる変位である。道路橋示方書では、式(2)の $\mu$ として式(3)のように定義した橋脚系の許容じん性率が用いられている。

10種類の固有周期を有する免震橋に対して、2種類の入力地震動を作用させて、非線形動的解析を行った。これより得られた免震支承および橋脚の履歴応答を示すと図-4のようになる。ここでは、JR鷹取駅記録を入力した場合の方が応答が大きいため、この場合を例に結果を示している。これによれば、固有周期が1.84秒以上の場合には、免震支承は塑性化するが、橋脚は塑性化しない。

非線形動的解析から求めた橋脚の応答じん性率を用いて、橋脚の塑性化に伴う荷重低減係数 $\sqrt{2\mu-1}$ を求めると、表-3のようになる。ここで、道路橋示方書では、橋脚の塑性化に伴う荷重低減係数を求める際には、橋脚の許容じん性率 $\mu_m$ が用いられている。荷重低減係数を求めるためには、本来は橋脚の応答じん性率を用いるべきであるが、このようにすると設計に繰り返し計算が必要となること、一般に設計では部材に許容される変形性能を十分生かせるように断面決定されることから、応答じん性率のかわりに許容じん性率が用いられている。こうしたことから、表-3では、応答じん性率を用いて荷重低減係数 $\sqrt{2\mu-1}$ を求めたものである。ただし、上述したように、じん性率には式(3)、(4)のように橋脚系じん性率と全体系じん性率があるため、ここでは両者を用いて荷重低減係数を求めている。これによれば、橋脚系じん性率を用いた場合には、固有周期が1.24秒あたりで最も荷重低減係数は大きく2.84程度であるが、同じ固有周期でも全体系じん性率を用いると、荷重低減係数は1.29程度となる。

表-3 橋脚の非線形化による荷重低減係数 $\sqrt{2\mu-1}$

(1) 神戸海洋気象台記録を入力した場合

| 固有周期<br>(s) | $\sqrt{2\mu-1}$   |                   |
|-------------|-------------------|-------------------|
|             | 橋脚系じん性率<br>を用いた場合 | 全体系じん性率<br>を用いた場合 |
| 2.546       | 1                 | 1                 |
| 1.841       | 1                 | 1                 |
| 1.536       | 1                 | 1                 |
| 1.358       | 1                 | 1                 |
| 1.240       | 1                 | 1                 |
| 1.154       | 1.106             | 1.015             |
| 1.090       | 1.484             | 1.083             |
| 1.038       | 1.692             | 1.143             |
| 0.997       | 1.770             | 1.181             |
| 0.963       | 2.090             | 1.308             |

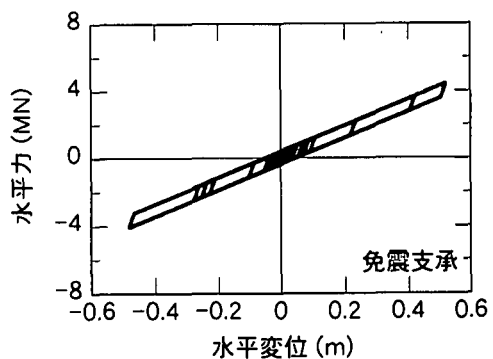
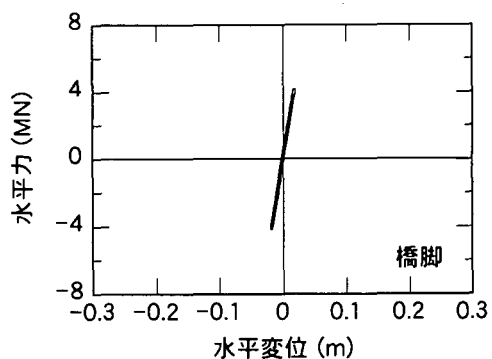
(2) JR鷹取駅記録を入力した場合

| 固有周期<br>(s) | $\sqrt{2\mu-1}$   |                   |
|-------------|-------------------|-------------------|
|             | 橋脚系じん性率<br>を用いた場合 | 全体系じん性率<br>を用いた場合 |
| 2.546       | 1                 | 1                 |
| 1.841       | 1                 | 1                 |
| 1.536       | 1.239             | 1.014             |
| 1.358       | 2.349             | 1.154             |
| 1.240       | 2.841             | 1.289             |
| 1.154       | 2.679             | 1.311             |
| 1.090       | 2.392             | 1.285             |
| 1.038       | 2.220             | 1.285             |
| 0.997       | 2.165             | 1.298             |
| 0.963       | 1.900             | 1.244             |

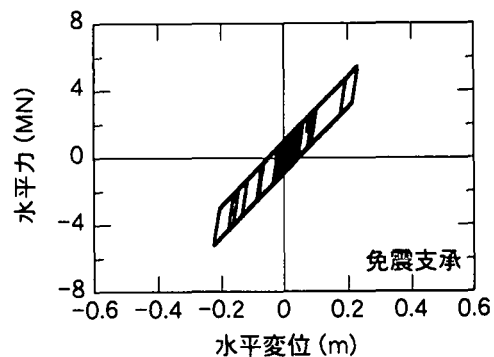
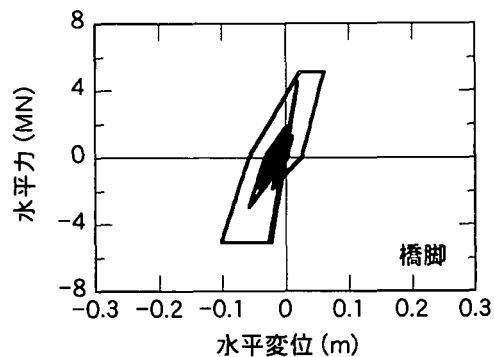
次に、ひずみエネルギー比例減衰法によって橋の減衰定数 $h$ を求め、これより表-2に基づいて免震橋の減衰定数に基づく補正係数 $c_E$ を求めた結果が表-4である。ここで、免震支承の等価減衰定数は、非線形動的解析によって求めた免震支承の最大応答変位の70%に相当する履歴減衰から求めている。もちろん、実際の設計では、設計する前から免震支承に生じる最大応答を知ることにはできないが、ここでは解析の目的が免震橋の非線形応答の推定法を評価することであるため、実際に非線形動的解析によって求めた免震支承の最大応答から等価減衰定数を求めたものである。表-4によれば、固有周期が短くなるにつれて、 $c_E$ は0.9~0.7程度の値をとる。

以上より、式(2)から荷重低減係数 $R_E = \sqrt{2\mu-1}/c_E$ を求めると、表-5のようになる。橋脚系じん性率を用いた場合には、全体系じん性率を用いるよりも荷重低減係数 $R_E$ は大きくなることがわかる。

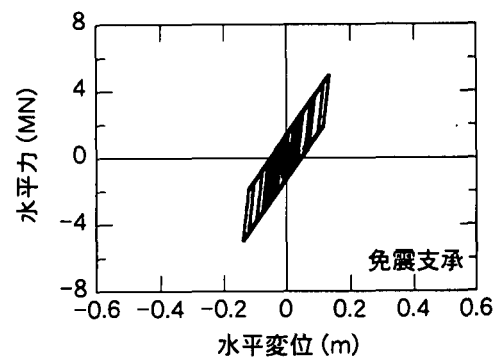
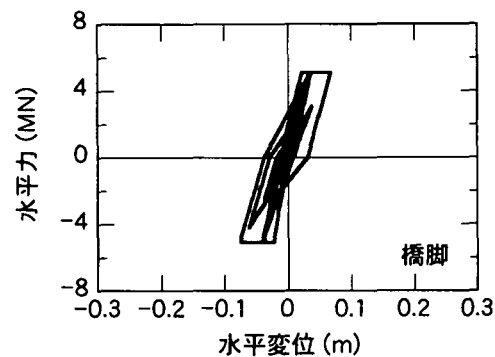
以上のように、荷重低減係数 $R_E$ が求められたため、式(1)より桁の非線形応答加速度を推定し、これを実際に非線形動的解析によって求めた結果と比較した結果が図-5である。ここで、 $a_L^{max}$ は線形動的解析によって求めた。



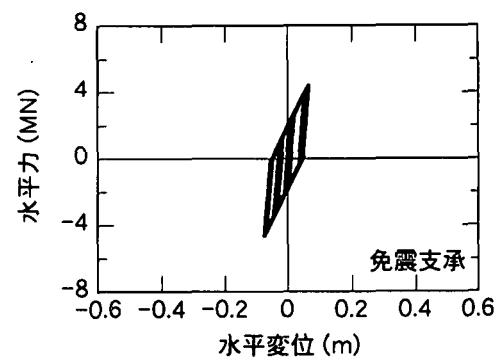
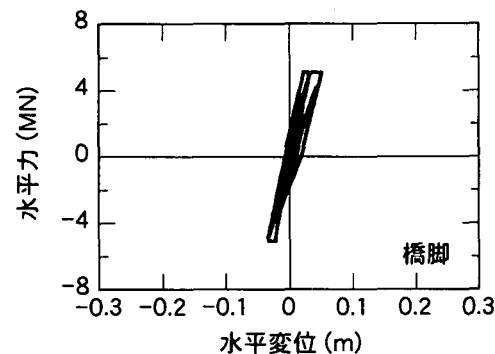
(a) 支承個数が2個の場合



(b) 支承個数が5個の場合



(c) 支承個数が7個の場合



(d) 支承個数が10個の場合

図-4 橋脚と免震支承の水平力-水平変位

表-4 免震橋の減衰定数に基づく補正係数  $c_E$ 

(1) 神戸海洋気象台記録を入力した場合

| 固有周期<br>(s) | 免震支承の<br>最大変位 (m) | 免震支承の<br>等価減衰定数 | 橋脚の<br>減衰定数 | 基礎の<br>減衰定数 | 橋の減衰定数 | $c_E$ |
|-------------|-------------------|-----------------|-------------|-------------|--------|-------|
| 2.546       | 0.204             | 0.149           | 0.02        | 0.15        | 0.147  | 0.8   |
| 1.841       | 0.126             | 0.201           | 0.02        | 0.15        | 0.191  | 0.7   |
| 1.536       | 0.133             | 0.195           | 0.02        | 0.15        | 0.181  | 0.7   |
| 1.358       | 0.138             | 0.191           | 0.02        | 0.15        | 0.174  | 0.7   |
| 1.240       | 0.147             | 0.184           | 0.02        | 0.15        | 0.166  | 0.7   |
| 1.154       | 0.145             | 0.185           | 0.02        | 0.15        | 0.164  | 0.7   |
| 1.090       | 0.140             | 0.189           | 0.02        | 0.15        | 0.163  | 0.7   |
| 1.038       | 0.134             | 0.194           | 0.02        | 0.15        | 0.163  | 0.7   |
| 0.997       | 0.124             | 0.203           | 0.02        | 0.15        | 0.165  | 0.7   |
| 0.963       | 0.112             | 0.214           | 0.02        | 0.15        | 0.168  | 0.7   |

(2) JR 鷹取駅記録を入力した場合

| 固有周期<br>(s) | 免震支承の<br>最大変位 (m) | 免震支承の<br>等価減衰定数 | 橋脚の<br>減衰定数 | 基礎の<br>減衰定数 | 橋の減衰定数 | $c_E$ |
|-------------|-------------------|-----------------|-------------|-------------|--------|-------|
| 2.546       | 0.584             | 0.065           | 0.02        | 0.15        | 0.067  | 1.0   |
| 1.841       | 0.523             | 0.071           | 0.02        | 0.15        | 0.074  | 1.0   |
| 1.536       | 0.389             | 0.117           | 0.02        | 0.15        | 0.116  | 0.9   |
| 1.358       | 0.302             | 0.112           | 0.02        | 0.15        | 0.111  | 0.9   |
| 1.240       | 0.232             | 0.136           | 0.02        | 0.15        | 0.130  | 0.8   |
| 1.154       | 0.178             | 0.163           | 0.02        | 0.15        | 0.148  | 0.8   |
| 1.090       | 0.136             | 0.193           | 0.02        | 0.15        | 0.166  | 0.7   |
| 1.038       | 0.108             | 0.217           | 0.02        | 0.15        | 0.176  | 0.7   |
| 0.997       | 0.087             | 0.239           | 0.02        | 0.15        | 0.183  | 0.7   |
| 0.963       | 0.072             | 0.255           | 0.02        | 0.15        | 0.184  | 0.7   |

表-5 荷重低減係数  $R_E$ 

(1) 神戸海洋気象台記録を入力した場合

| 固有周期<br>(s) | $R_E = \sqrt{2\mu - 1} / c_E$ |                   |
|-------------|-------------------------------|-------------------|
|             | 橋脚系じん性率<br>を用いた場合             | 全体系じん性率<br>を用いた場合 |
| 2.546       | 1.250                         | 1.250             |
| 1.841       | 1.429                         | 1.429             |
| 1.536       | 1.429                         | 1.429             |
| 1.358       | 1.429                         | 1.429             |
| 1.240       | 1.429                         | 1.429             |
| 1.154       | 1.581                         | 1.450             |
| 1.090       | 2.120                         | 1.547             |
| 1.038       | 2.418                         | 1.632             |
| 0.997       | 2.529                         | 1.687             |
| 0.963       | 2.986                         | 1.868             |

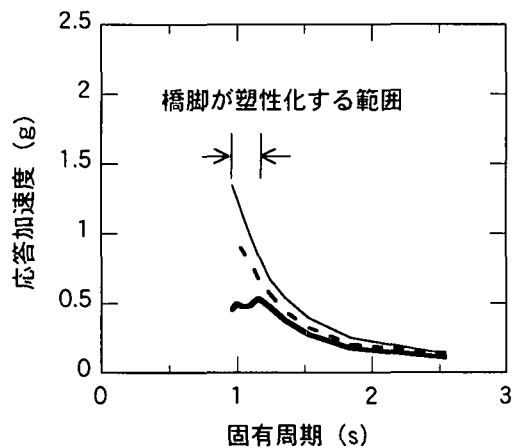
(2) JR 鷹取駅記録を入力した場合

| 固有周期<br>(s) | $R_E = \sqrt{2\mu - 1} / c_E$ |                   |
|-------------|-------------------------------|-------------------|
|             | 橋脚系じん性率<br>を用いた場合             | 全体系じん性率<br>を用いた場合 |
| 2.546       | 1.000                         | 1.000             |
| 1.841       | 1.000                         | 1.000             |
| 1.536       | 1.377                         | 1.127             |
| 1.358       | 2.610                         | 1.282             |
| 1.240       | 3.551                         | 1.612             |
| 1.154       | 3.348                         | 1.638             |
| 1.090       | 3.417                         | 1.836             |
| 1.038       | 3.171                         | 1.836             |
| 0.997       | 3.093                         | 1.855             |
| 0.963       | 2.714                         | 1.777             |

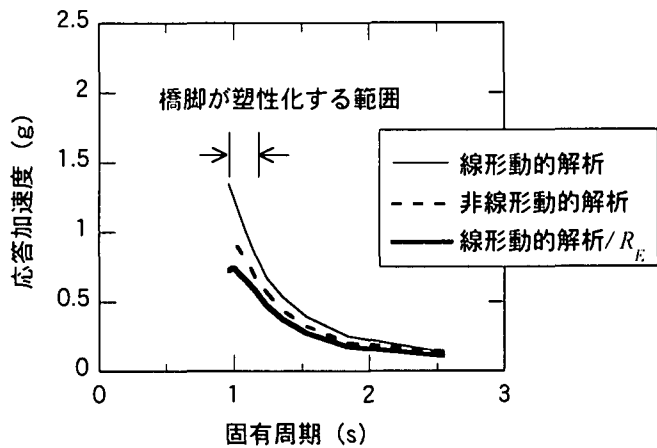
図-5 によれば、橋脚が塑性化しない場合には、式(2)において  $1/c_E$  だけが考慮されるため、橋脚系じん性率を用いるか全体系じん性率を用いるかの違いは生じない。橋脚も塑性化した範囲に注目すると、神戸海洋気象台記録を入力した場合、式(2)の荷重低減係数  $R_E$  を用いて求めた桁の加速度は非線形動的解析結果に対して、橋脚系じん性率  $\mu_p$  を用いた場合には 50%程度、全体系じん性率  $\mu_s$  を用いた場合には 80%程度となっており、式(2)においては橋脚系じん性率  $\mu_p$  を用いるよりも全体系じん性率  $\mu_s$  を用いた

方が推定精度のよいことがわかる。同様に、JR 鷹取駅記録を入力した場合には、式(2)の  $R_E$  を用いて求めた桁の応答加速度は非線形動的解析結果に対して、橋脚系じん性率  $\mu_p$  を用いた場合には 50%程度、全体系じん性率  $\mu_s$  を用いた場合には 70%~125%程度となっており、この場合にも式(2)においては橋脚系じん性率  $\mu_p$  を用いるよりも全体系じん性率  $\mu_s$  を用いた方が推定精度のよいことがわかる。

以上の解析において、式(2)によって求められる荷重低減係数  $R_E$  を式(1)により線形および非線形動的

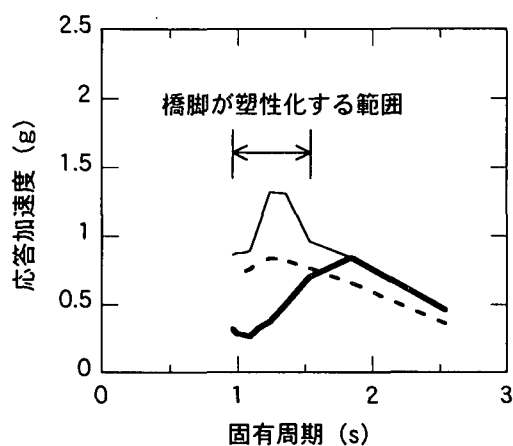


(a)橋脚系じん性率 $\mu_p$ を用いた場合

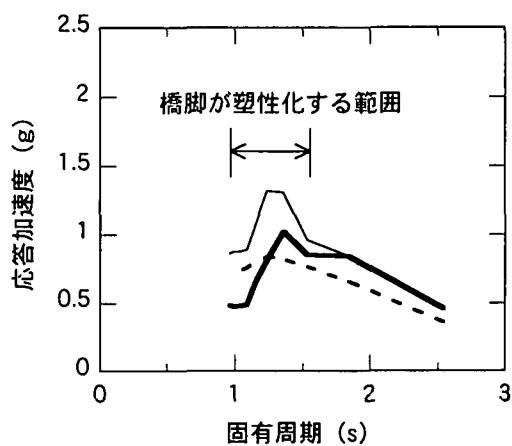


(b)全体系じん性率 $\mu_s$ を用いた場合

(1)神戸海洋気象台記録を入力した場合



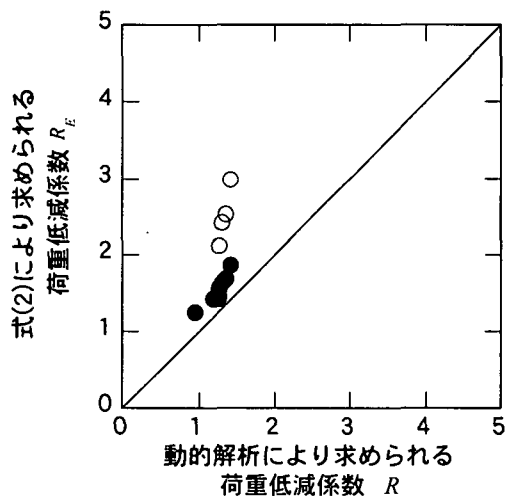
(a)橋脚系じん性率 $\mu_p$ を用いた場合



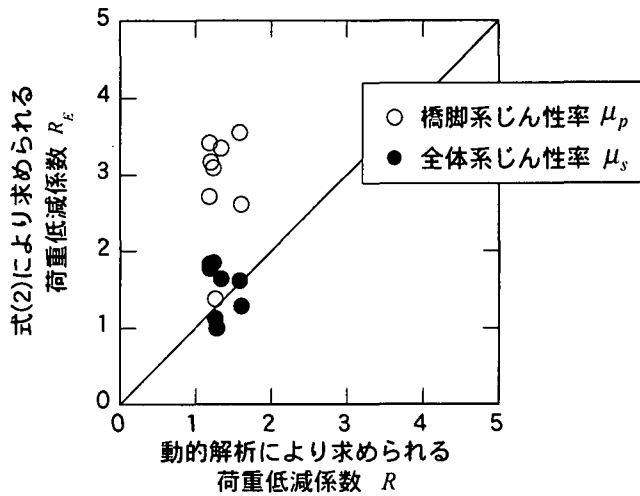
(b)全体系じん性率 $\mu_s$ を用いた場合

(2)JR鷹取駅記録を入力した場合

図-5 式(2)による荷重低減係数の推定精度



(1)神戸海洋気象台記録を入力した場合



(2)JR鷹取駅記録を入力した場合

図-6 荷重低減係数の推定精度

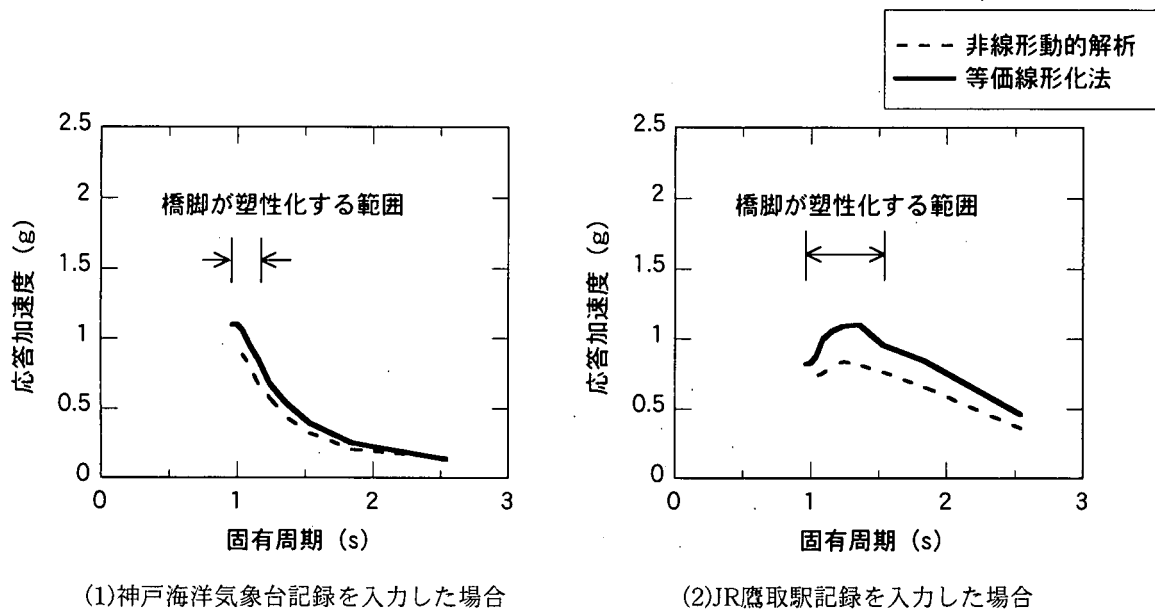


図-7 等価線形化法の推定精度

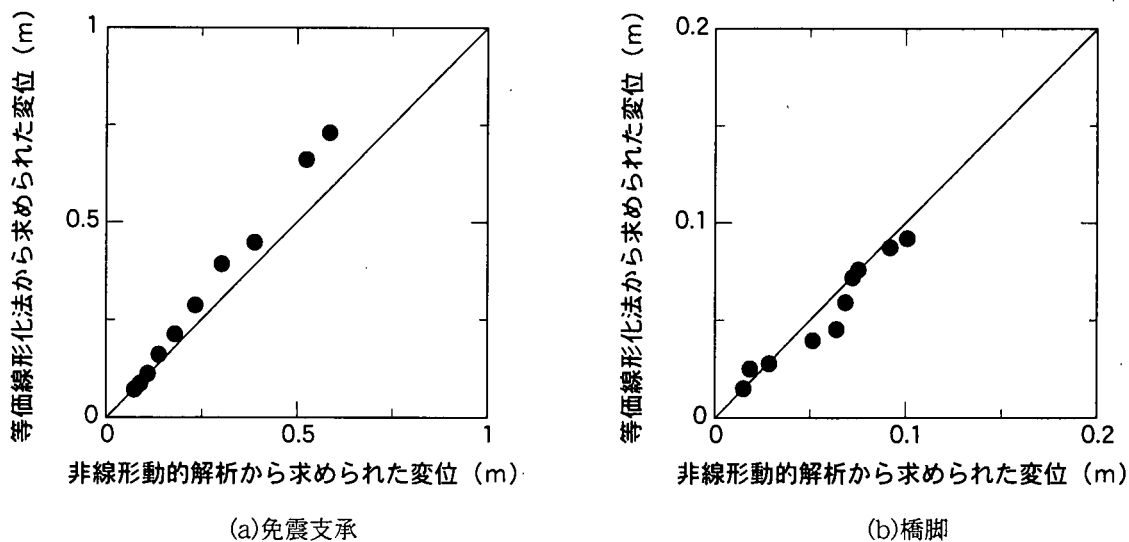


図-8 等価線形化法を用いた場合の部材系の変位の精度

解析によって求められる荷重低減係数  $R$  と比較した結果が図-6 である。これによれば、橋脚系じん性率  $\mu_p$  を用いて荷重低減係数  $R_E$  を求めると、式(1)による荷重低減係数  $R$  を 50% 程度過大評価するが、全体系じん性率  $\mu_s$  を用いれば、 $R_E$  は  $R$  とよく一致することがわかる。なお、図-6 において、橋脚系じん性率  $\mu_p$  を用いても  $R_E \equiv R$  となる場合もあるが、これは上述したように免震支承のみが塑性化し、橋脚が塑性化しなかった場合である。

#### 4. 等価線形化法の適用性

以上の免震設計では、橋脚の塑性化による応答の

低減と免震支承の塑性化による応答の低減が独立に評価されるようになっており、前者については、橋脚の降伏剛性とエネルギー一定則を用い、後者については免震支承の等価剛性と等価減衰定数を用いることにより、それぞれ解析に反映されている。しかし、橋脚と免震支承の塑性化をともにそれぞれの等価剛性と等価減衰定数により表現すると考えれば、これは免震橋を全体として等価線形化法で解析することに他ならない。

等価線形化法では、免震支承や橋脚に生じる最大応答変位を予測して、これに相当する等価剛性や等価減衰定数を繰り返し計算によって求める必要があるが、パソコンが進化した現在、設計基準に繰り返

し計算が入っても昔のような問題とはならない。ここでは、まず非線形動的解析より求められた免震支承および橋脚の最大応答に相当する履歴から、それぞれの等価剛性と等価減衰定数を求め、これらを用いて等価線形化法により桁の応答加速度を求めて、どの程度の精度を有するかを検討することとした。ただし、最大応答に相当する等価剛性や等価減衰定数よりも、最大応答の70%程度に相当する等価剛性や等価減衰定数を用いる方が解析精度がよいことが知られている。このため、ここでは最大応答の70%に相当する変位を用いて等価剛性、等価減衰定数を求めることとした。このようにして、等価線形化法により求めた桁の応答加速度と非線形動的解析結果を比較して示すと図-7 のようになる。これより、等価線形化法を用いた場合には、非線形動的解析結果に比較的近い値を与えることがわかる。

また、上述したように、免震橋の場合、免震支承と橋脚の2ヶ所で塑性化するため、等価線形化法を用いる場合には、橋全体系の変位に対して精度のよい結果が得られても、免震支承や橋脚のそれぞれの部材系の変位が非線形動的解析に近い結果を与えるかどうか問題となる。これを実際に検討した結果が図-8 であり、ここに示すように等価線形化法は免震支承、橋脚ともに精度の良い結果を与える。

## 5. 結論

本解析より得られた結論は以下に示す通りである。

- 1) 橋脚系じん性率  $\mu_p$  を用いて荷重低減係数  $R_E$  を式(2)により求めると、橋脚と免震支承の両者ともに塑性化する範囲では地震力を過小評価する。一方、全体系じん性率  $\mu_s$  を用いれば、橋脚系じん性率  $\mu_p$  を用いた場合に比べて、荷重低減係数の推定精度を高めることができる。
- 2) 等価線形化法を用いれば、上記1) よりもより非線形動的解析結果に近い桁の応答加速度を推定することができる。

## 参考文献

- 1) 板橋美保, 川島一彦, 庄司学: 橋脚系塑性率と全体系塑性率の違いが設計地震力の算定に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.619/I-47, pp.131-144, 1999.4
- 2) 飯山かほり, 川島一彦, 庄司学: 免震効果を得るために必要な橋梁の長周期化に関する一検討, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.701-709, 1998.3
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 1996.12

4) 土木研究所: 道路橋の免震設計法マニュアル(案), 1992.10