

# 新しい免震工法の応答特性の確認

南雲広幸<sup>1</sup>・日紫喜剛啓<sup>1</sup>・竹田哲夫<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182 東京都調布市飛田給二丁目19-1）

阪神・淡路大震災以降、橋脚の耐震補強工事が全国的に実施されている。その一方で、橋脚の立地上、施工的に巻き立て工法が困難な橋脚が存在する。そのような橋脚に対して橋脚自体には手を触れず、上部工の慣性力を低減する免震工法は非常に有効であり、筆者らは合理的に既設橋梁の免震化を可能にする工法を提案した<sup>2)</sup>。その工法の基本特性を振動台実験により確認しているが、今回は、工法の適用性、汎用性を確認するために、振動数領域における応答特性に着目して再度、検討を行った。また、本工法において、既存支承の摩擦特性の評価が大きな問題となる。摩擦係数と入力地震動をパラメータとして、橋脚の応答特性がどのように変化するか本工法を適用したPC単純桁を例にとり非線形時刻歴応答解析により検討を行った。

**Key Word:** 免震、支承、振動数領域、伝達関数、摩擦係数、地震応答、時刻歴応答解析

## 1. はじめに

現在、全国で耐震補強工事が実施されているが、河川内橋脚や橋梁下が店舗になっている橋脚では、河川の阻害率や立ち退きの問題等により、一般的なRC巻き立てや鋼板巻き立て工法が適用できない場合が想定される。このような橋脚は、橋脚自身を補強することができないため、上部工による地震時水平力を低減できる免震工法が有力な工法として上げられる。

免震工法は、構造物を長周期化、および高減衰化させ地震力を低減するため、耐震性を向上させる有効な工法の一つである。設計法も確立しており<sup>2)</sup>国内における実績もかなりの数に上る<sup>3)</sup>。

しかし、耐震性向上のため、既設橋梁に免震化工法を適用する場合、機能的にも施工的にも問題点が発生する。筆者らは、その問題点をクリアーした免震化工法を開発し実用化を行った<sup>1)</sup>。

開発時に行われた性能確認実験<sup>1)</sup>では、本工法を適用した試験体と非免震の試験体の時刻歴応答波形を比較することにより本工法の有効性を確認しているが、振動数領域の応答に着目した検討は行っていない。最大加速度の低減効果を時刻歴応答波形から押さえれば、設計的には十分であるが、本工法の基本特性を明らかにするために、振動数領域において地震力の低減効果を調べてみた。

また、本工法では既存の支承をすべり支承化して使用することを前提としている。すべり速度の影響で、摩擦係数が変化することが知られている。また、支承部の経年劣化で摩擦面が影響を受けることも予想される。そこで、支承部の摩擦係数の変化が橋梁の応答特性に

どのように影響を与えるか把握しておく必要がある。ここでは、PC単純桁の橋梁を例にとり、支承部の摩擦係数と入力地震動をパラメータとして非線形動的応答解析を用いて検討を行った。

本報文では、以上の検討結果について報告する。

## 2. 性能確認実験の再検討

本工法の開発時に行った性能確認実験について、振動数領域の面から試験体の応答特性を検証する。検証の前に、本工法の概要、性能確認実験について概説するものとする。

### (1) 本工法の特徴

図-1に本工法の概念図を示す。本工法の特徴は、以下に示す3点である。

#### a) 既存支承の利用と改造

既設橋梁を免震化する際の難点の1つは、既存支承の撤去に伴うアンカーボルトのはつりだしである。この間に橋桁の仮受けが必要になり交通規制も発生する。したがって、既存支承は撤去せず、桁自重と活荷重に抵抗するように残しておくものとした。ただし、免震化に伴う地震時変位の増大に追随するように既存支承の移動制限装置は撤去し、すべり支承化するものとした。

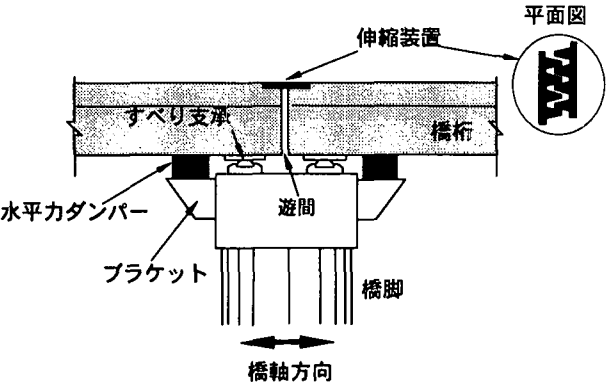
#### b) 免震装置の設置方法

免震支承の取り付けに関しても、桁の仮受けによる交通規制や狭隘な空間での取り付け作業が必要になり、大きな問題であった。しかし、支承は、既存支承が存在しており、免震ゴムを支承として使用する必要がない。そこで、減衰付加、長周期化させるための免震装置は

橋脚前面に取り付けたブラケットを介して橋桁と橋脚間に設置するものとした。これにより橋脚天端での作業はほとんど不要となる。

c)既存支承による摩擦の考慮

既設橋梁の遊間についても問題となる。遊間は、およそ、数 cm のオーダーである。免震橋では震度法レベルの地震時変位が数 cm となるので、桁の衝突や、伸縮装置の取り替えが発生することが予想される。再現期間が構造物の供用期間中に数回発生するような中小規模の地震に対して、桁端部の切断や、伸縮装置の取り替えが必要になり、非常に不経済であり、実用性にかける面がある。そこで、本工法では、変位抑制方法として既存支承部の上沓と下沓間の摩擦による摩擦減衰効果を取り込むものとした。



図—1 本工法の概念図

(2)性能確認実験

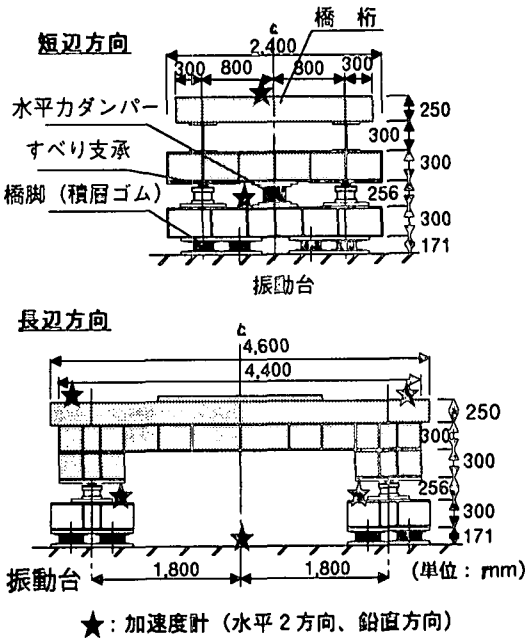
本工法の有効性を確認するために3次元振動台実験を行った。実験には図—2に示す重量 250kN の試験体を用いた。試験体は、支間 20m、幅員 10m の RC 橋を想定し、1/16 に分割したモデルである。

実験は、この試験体を用いた免震実験と非免震時の動的特性を把握するための非免震実験の2ケースである。

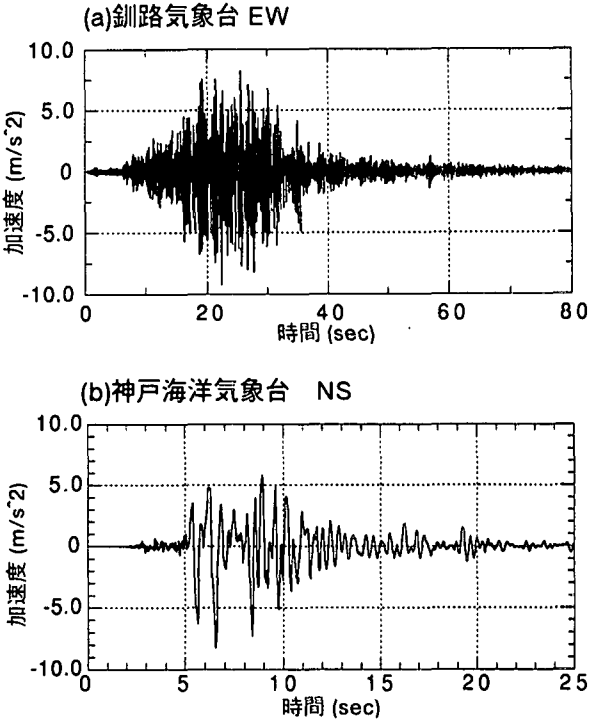
非免震実験は、試験体の橋桁と橋脚間が相対変位しないようにプレースにより橋桁と橋脚間を固定して行った。

用いた地震波は、1993 年の釧路沖地震で釧路気象台で観測された EW 波と 1995 年の兵庫県南部地震で神戸海洋気象台で観測された NS 波の2波である。加速度波形を図—3に示す。

この2波について、それぞれ3段階に加速度を調整して試験体に入力した。試験体への入力波の一覧を表—1に、減衰定数5%で計算した入力波の加速度応答スペクトルを図—4に示す。



図—2 試験体一般図



図—3 入力加速度波形

表—1 入力波一覧

|      | 非免震            | 免震              |
|------|----------------|-----------------|
| レベル1 | 釧路EW波<br>神戸NS波 | 釧路EW波<br>神戸NS波  |
| レベル2 | 釧路EW波<br>神戸NS波 | 釧路EW波<br>神戸NS波  |
| 原波形  | -<br>-         | 釧路EW波<br>神戸NS波* |

\*)最大加速度を7.0m/s<sup>2</sup>に調整

ここで、レベル2とは、道路橋示方書 V.耐震設計編<sup>4)</sup> (以下、道示 V)でいうところの地震時保有水平耐力照査法レベルの地震波にあたり、最大入力加速度が約  $4.0\text{m/s}^2$  で減衰定数 5%の加速度応答スペクトル上で非免震時の試験体の固有周期 0.4 秒での応答加速度が  $10.0\text{m/s}^2$  程度になるように原波形の加速度を調整した入力波である。

また、レベル 1 とは、道示 V<sup>4)</sup>の震度法レベルの地震波に相当し、最大入力加速度が約  $1.0\text{m/s}^2$  で非免震時の試験体の固有周期 0.4 秒での応答加速度を  $2.0\sim 3.0\text{m/s}^2$  程度になるように調整した入力波である。

### (3)実験結果の再検討

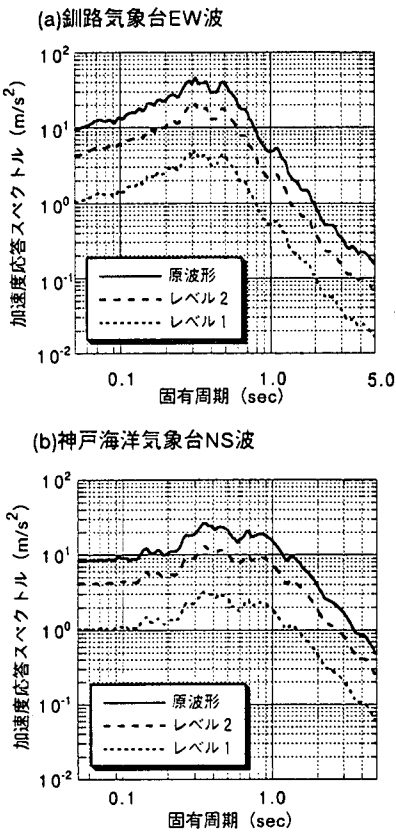
#### a)非免震時

図一5～6に加振方向加速度に関する振動台と橋桁間の伝達関数を示す。加速度センサーの位置は、図一2に示したとおりである。

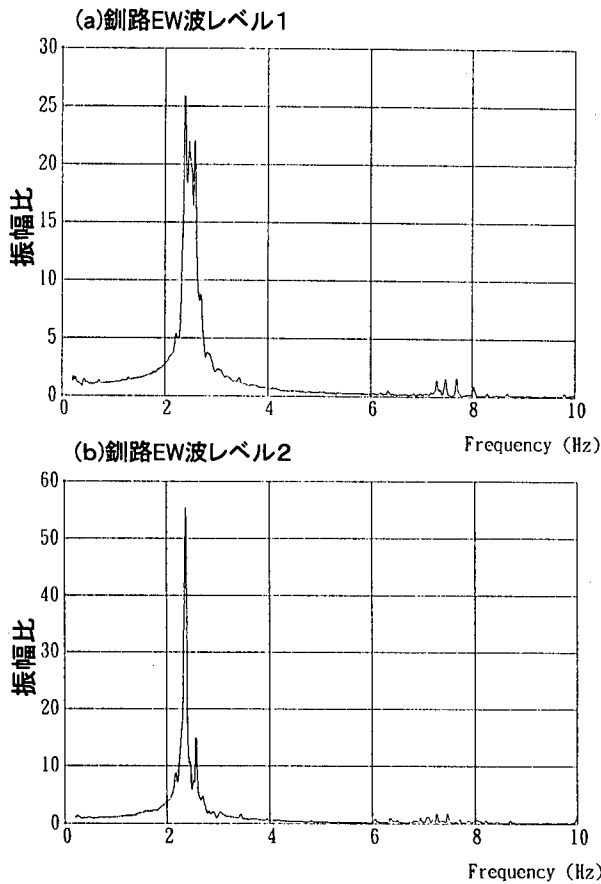
この図より、入力された地震波は、レベル1、レベル2ともに試験体の固有振動数である  $2.5\text{Hz}$  の近傍で大幅に増幅しており、また、伝達関数の形状も同じ地震波であれば、加速度レベルが違っててもほぼ同様であった。

#### b)免震時

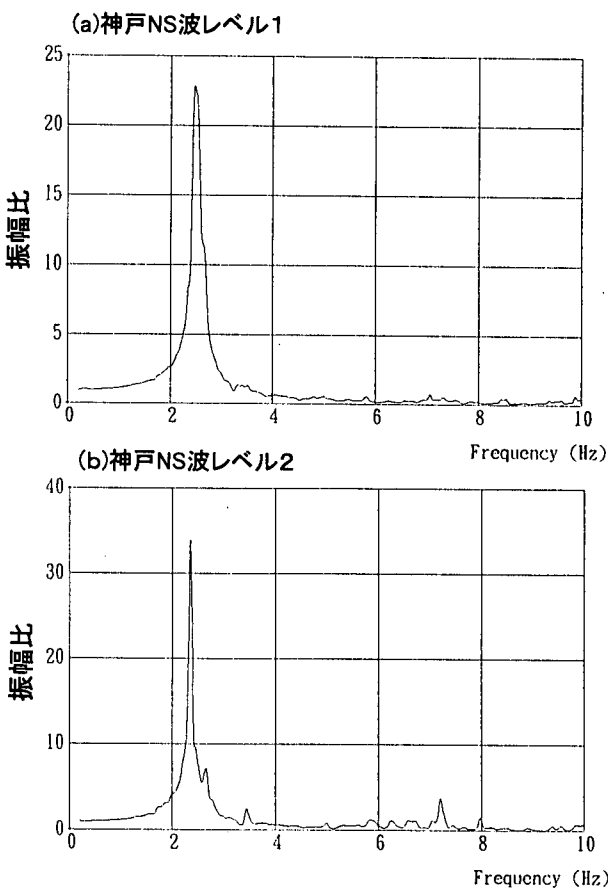
図一7～8に非免震時と同様に加振方向加速度に関する振動台と橋桁間の伝達関数を示す。



図一4 入力波の加速度応答スペクトル



図一5 振動台一橋桁間の伝達関数

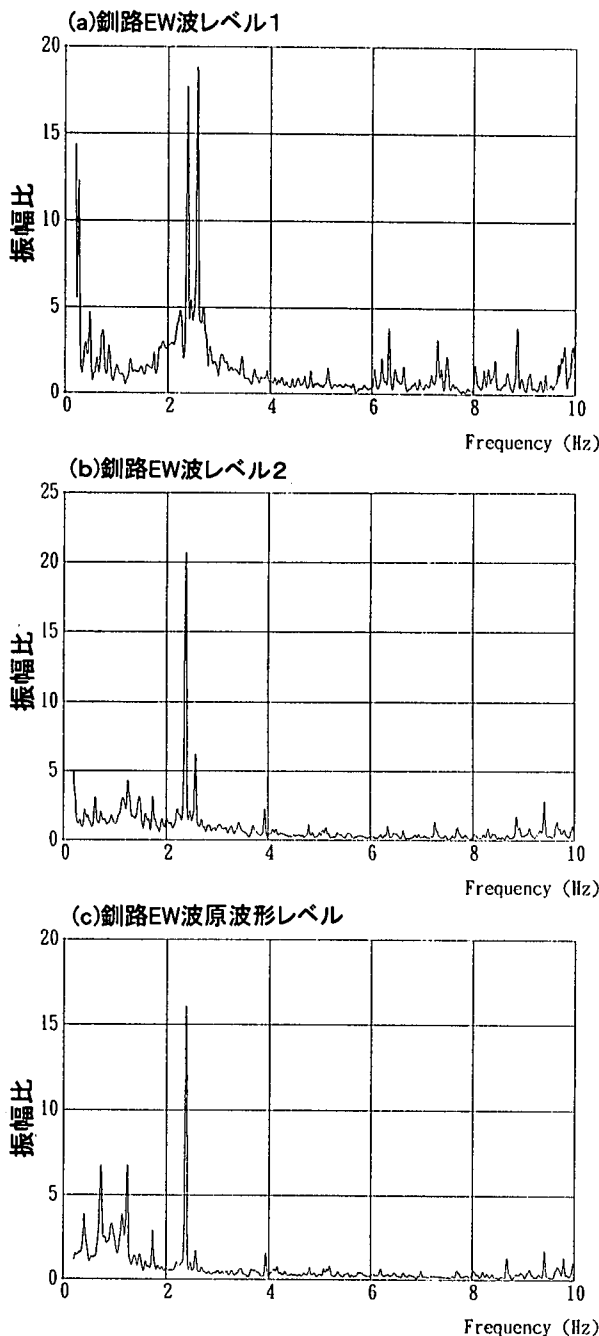


図一6 振動台一橋桁間の伝達関数

### ①釧路波

非免震時の試験体の固有振動数に相当する 2.5Hz で、入力地震波に対して橋桁の応答が増幅していることがわかる。しかし、振幅比は、非免震時と比較してレベル1、レベル2ともに、1/2 以下に低減され、原波形レベルでは、さらに、レベル2よりも低減されている。

一方、2.5Hz 以下の長周期成分をみると、入力加速度のレベルが大きくなるに従い、振幅比が大きくなり、原波形レベルではその傾向がよく現われている。このことは、水平力ダンパーによる上部工の長周期化により、加速度レベルが大きくなるほど応答が増幅したものと考えられる。とくに、原波形を入力した場合の振動は、橋脚の変形が卓越したモードの他に支承部の変形が卓越し



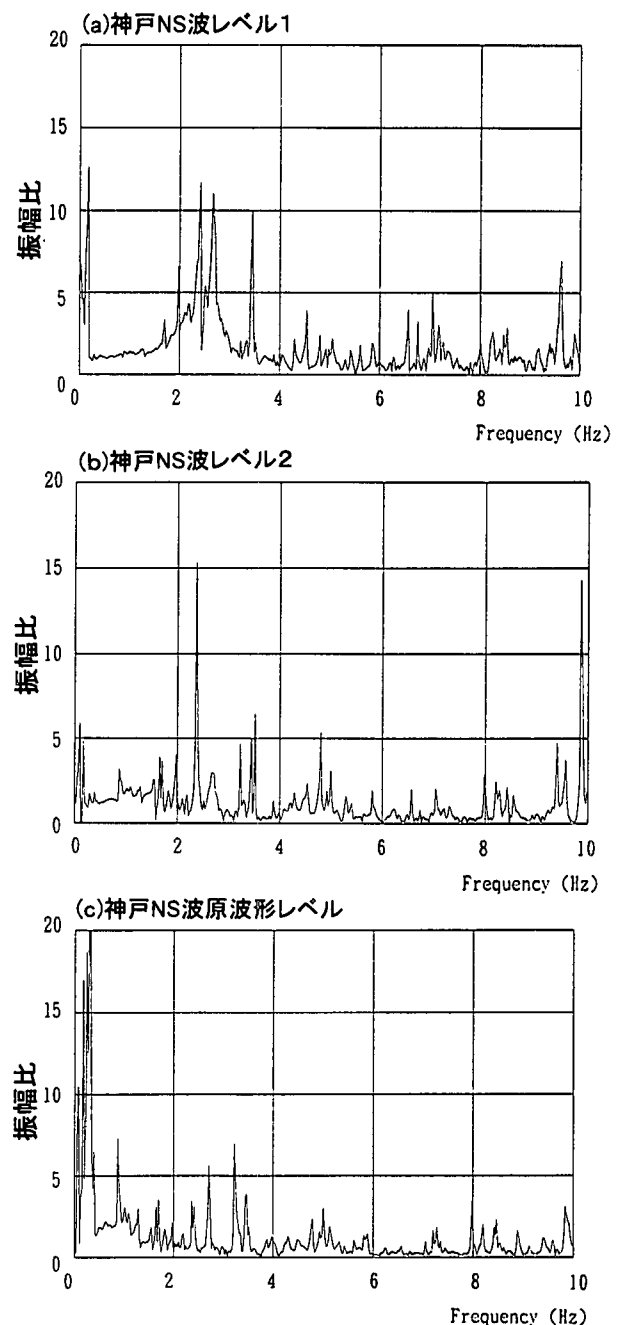
図—7 振動台—橋桁間の伝達関数

たモードが同時に発生している状態であると考えられる。

しかし、振動数領域全体において、非免震時の振幅比よりも大きな振幅比を示すものがないことから、地震力の低減が有効に行われていると考えられる。

### ②神戸波

釧路波を入力した場合と同様に、非免震時の試験体の固有振動数に相当する振動数での応答が非免震時に比べ低減されている。さらに、2.5Hz 以下の長周期成分の振幅比が増加し長周期化の影響が現われている。とくに、原波形レベルにおいては、非免震時試験体の固有振動数部の振幅比より、支承部より上の部分の振動による低振動数領域における振幅比の方が大きく、



図—8 振動台—橋桁間の伝達関数

以上、本工法における振動特性を振動数領域の面から検討を行った。釧路波、神戸波いずれの場合においても、非免震時の試験体の固有振動数領域において、応答の振幅比が  $1/2$  程度になり、十分な応答の低減効果が確認できた。また、地震波の入力レベルが大きくなるほど低減率が大きくなることがわかった。ただし、地震力のレベルが大きくなるほど長周期成分が増幅される傾向にあるので、その点を十分配慮した設計が必要である。

地震時のすべり速度の影響や支承部の経年劣化によりすべり面の摩擦係数が変化することが予想される。それにより地震時の橋梁の応答特性は影響を受けることが考えられるが、どのように橋脚の応答特性が変化するのか把握しておくことが重要である。ここでは、本工法を適用した PC 単純桁を例にとり、摩擦係数の値と、入力地震波を変化させて、非線形時刻歴応答解析により、橋脚の応答の変化を検討した。

### a) 橋梁概要

対象とした橋梁は、支間約 18m、有効幅員 10m の PC 単純桁橋であり、橋脚は張出し式の RC 橋脚である。構造一般図を図—9 に示す。P1 橋脚、P2 橋脚ともに部材形状は同一であるが、P2 橋脚の支承は、橋軸方向固定となっており、支承条件の違いにより橋脚柱の配筋が P1 橋脚と P2 橋脚とでは異なっている。なお、隣接橋梁についても、本工法を適用し免震化するものとする。

### b) 水平力ダンパー

水平力ダンパーは、高減衰積層ゴムを用いる。図—10 に示す寸法のを橋脚に4個ずつ設置する。

### c) 解析モデル

解析は、図—11 に示すフレームモデルを用いて行うものとする。隣接橋梁についても本工法を適用することから、隣接橋梁による支点反力を集中質量としてモデル化した。橋脚の非線形性については、図—12 に示す剛性低下を考慮したトリリニアモデル(武藤モデル)を用いる。上部構造は、非線形性の影響が小さいと考えて線形部材としている。

支間長=17750

φ2000

9550

2000

7000

L=14000 φ=1000

n=6本

P 1 橋脚

平均 N = 15

L=14000 φ=1000

n=6本

P 2 橋脚

P 1 橋脚

総幅員11650

有効幅員10000

800

1800

4000

4000

10000

7550

9550

2000

5500

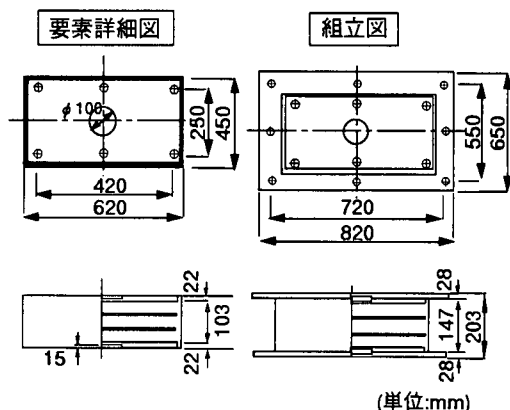
φ2000

L=14000 φ=1000

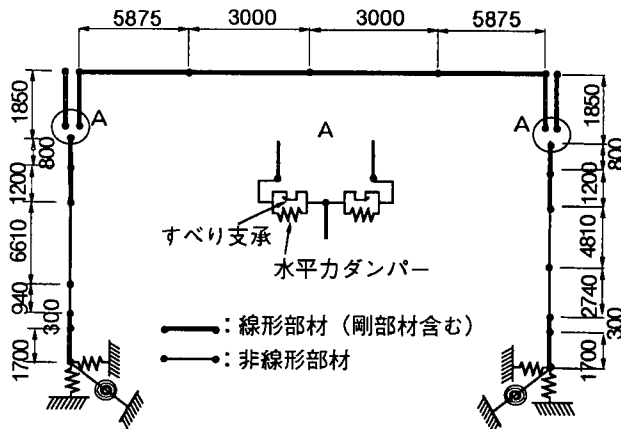
n=6本

(単位:mm)

図—9 モデル橋一般図



図—10 水平力ダンパー一般図



図—11 解析モデル図

水平力ダンパーは、高減衰ゴムのバイリニア型モデルを用いた。また、すべり支承は、一次勾配が非常に大きく、二次勾配が非常に小さいバイリニア型のモデルを用いた。

すべり支承の摩擦係数は、 $\mu=0.15、0.10$  の2種類を用いることにした。このことは既往の実験データにより<sup>5)</sup> 摩擦係数は、すべり速度の影響で  $0.08\sim0.13$  程度の間を変動すると考えられている。今回の解析では経年劣化の影響を考えて、それよりも若干大き目の値を用いることにした。

d) 入力地震波

入力地震波は、表一2に示す6波を用いた。解析方向は橋軸方向および、直角方向の2方向とした。

(2) 解析結果

橋脚の応答は、以下に示す3項目に着目して検討した。

- ① 水平力ダンパーの変位量
- ② 橋脚基部の曲げモーメント
- ③ 橋脚基部のせん断力

a) 水平力ダンパーの変形量

摩擦係数と地震波の違いによる水平力ダンパーの応答変位の変化を図一15(a)に示す。縦軸に  $\mu=0.15$  で計算された場合の水平力ダンパーの変位と  $\mu=0.10$  で計算された場合の変位の比を、横軸にはそれに対応する入力地震波を示している。

この図より、水平力ダンパーの変位は、地震波を変化させても摩擦係数が  $\mu=0.1$  の場合の方が  $\mu=0.15$  の場合より大きい、最大加速度の大きい地震波(免震マニュアル標準波、兵庫県南部地震観測波)になるにしたがい、変位量の比は  $1.0$  に近づく傾向にある。

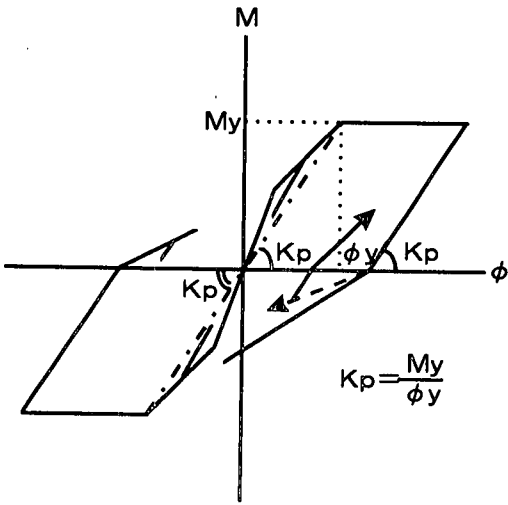
b) 橋脚基部の曲げモーメント、せん断力

図一15(b),(c)にそれぞれ橋脚基部の曲げモーメント、せん断力の応答の変化を示す。

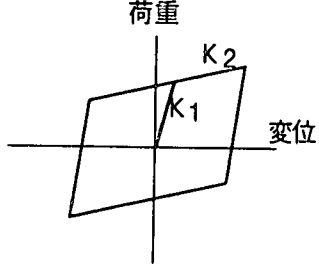
断面力については、加速度レベルが小さい地震波(道示V標準波)では、摩擦係数が高いほど断面力も大きくなるが、最大加速度が大きい地震波になるにつれ、摩擦係数の違いによる断面力の差はなくなる傾向にある。

(3) 摩擦の影響について

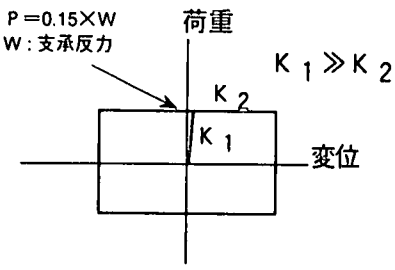
すべり支承の摩擦係数の変化による応答の違いについて検討を行ったが、最大加速度が大きい地震波では摩擦係数の違いによる影響は小さくなり、両者の比は  $1.0$  に近づく傾向にある。逆に最大加速度が小さい地震波の場合、変位、断面力ともに摩擦係数の違いによる影響を強く受ける。これは、橋脚の応答は水平力ダンパーの復元力とすべり支承の摩擦による復元力に支配さ



図一12 橋脚非線形モデル (武藤モデル)



図一13 水平力ダンパー荷重－変位関係



図一14 すべり支承荷重－変位関係

表一2 解析用入力地震波一覧

| 入力地震波               | 最大加速度(m/s <sup>2</sup> ) |
|---------------------|--------------------------|
| I 種地盤用道路橋示方書標準地震波   | 1.02                     |
| II 種地盤用道路橋示方書標準地震波  | 1.18                     |
| I 種地盤用免震マニュアル標準地震波  | 3.59                     |
| II 種地盤用免震マニュアル標準地震波 | 4.17                     |
| JR鷹取駅NS波(兵庫県南部地震)   | 6.42                     |
| 神戸海洋気象台NS波(兵庫県南部地震) | 8.17                     |

れると考えられるが、すべり支承の復元力は摩擦係数に応じてほぼ一定値であり、最大加速度(地震力のレベル)が小さい地震波を入力した場合では、水平力ダンパーの復元力よりすべり支承の復元力が支配的になり、摩擦係数の違いで橋脚の応答が変化しやすくなるものと思われる。逆に最大加速度が大きい地震波では、すべり支承の復元力は相対的に小さくなり水平力ダンパーの復元力が支配的になる。その結果、摩擦係数の違いでは、橋脚の応答は影響を受けにくくなるものと考えられる。

したがって、断面力の照査においてはすべり速度や経年劣化の影響を考慮して摩擦係数は $\mu=0.15$ 程度を使用し、変形量の照査には摩擦係数 $\mu=0.1$ 程度を使用することが合理的であるといえる。

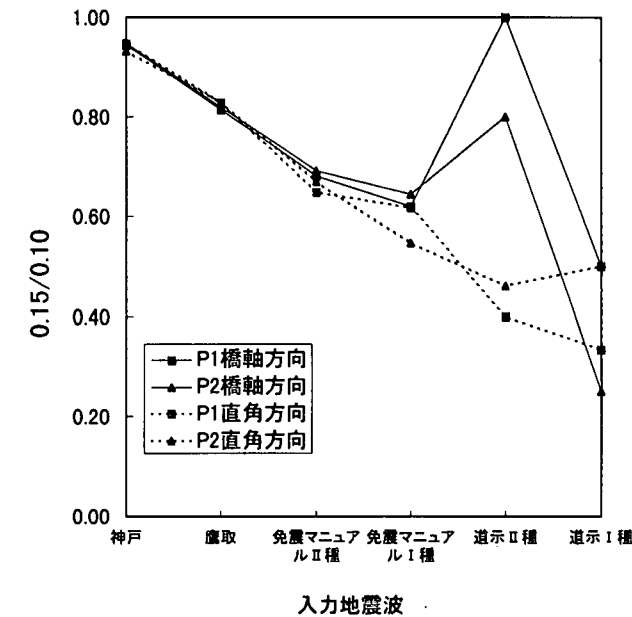
### 5. おわりに

既設橋梁を対象に免震化工法を開発した。今回、その適用性と汎用性を再確認するために、開発時に行った性能確認実験の結果を用い、振動数領域における応答特性の検討を行った。また、地震時のすべり速度や支承部滑動面の経年劣化により摩擦係数の変化が予想されるので、摩擦係数と入力地震動を変化させた非線形時刻歴応答解析を用い、橋脚の応答の違いを検討した。以下に得られた知見を上げる

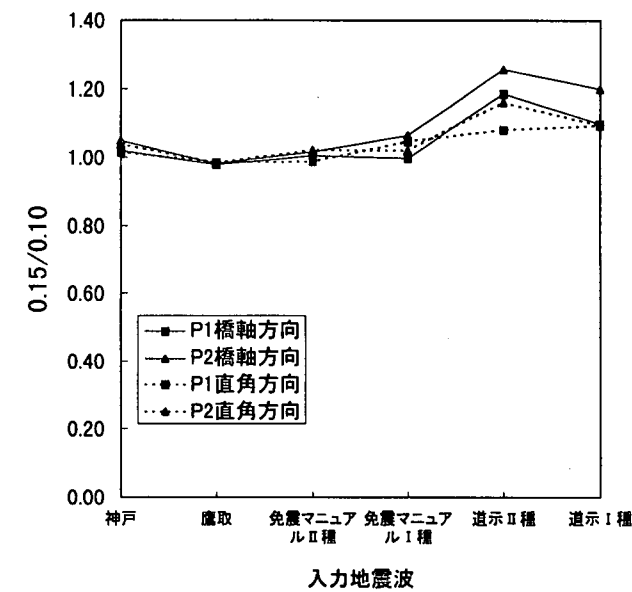
- ①非免震時および免震時の振動台と橋桁間の伝達関数を比較することにより、橋脚の一次振動数領域における免震化による応答の低減が確認できた。
- ②入力波の加速度レベルが高いほど、水平力ダンパーの非線形性により低減効果が大きいことも確認された。
- ③ただし、従来工法と同様に長周期成分を多く含む地震波に対しては共振の可能性があるため、十分な配慮が必要である。
- ④最大加速度が小さい入力地震波(震度法レベル)では、橋脚の断面力や桁の変位は、支承の摩擦係数の影響を大きく受け、摩擦係数が0.10から0.15に変わった場合、断面力は増加し水平力ダンパーの変位は減少する傾向にある。
- ⑤最大加速度が大きい地震波(地震時保有水平耐力照査法レベル以上)では、橋脚の断面力や、水平力ダンパーの変位は摩擦係数の違いに影響を受けにくくなる。
- ⑥設計上、断面力の検討については、摩擦係数 $\mu=0.15$ を用い、変位の検討には摩擦係数 $\mu=0.10$ を用いることが合理的であるといえる。

今後、耐震補強工事が全国的に展開されていくなかで、施工的な理由から、RC巻き立てや鋼板巻き立てが

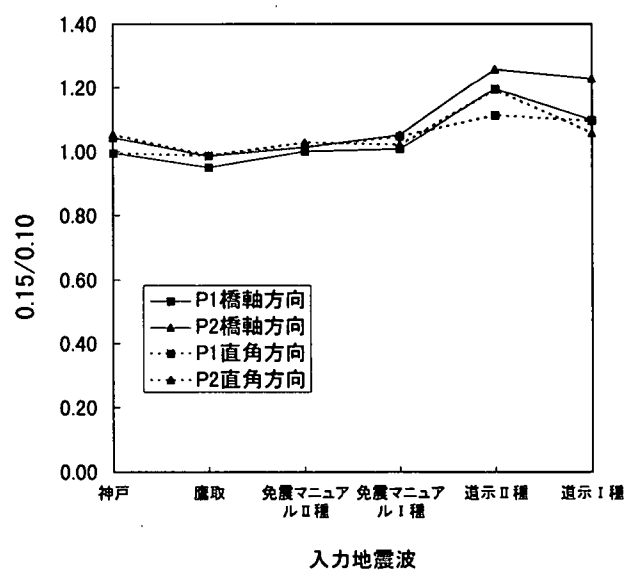
(a)水平力ダンパーの変位の変化



(b)橋脚基部曲げモーメントの変化



(c)橋脚基部せん断力の変化



図一15 摩擦係数と地震波の違いによる応答の変化

できない橋脚に対して、本工法は非常に有効であると  
考えられるが、今回の検討によりその汎用性が十分に  
示せたと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 竹田他：既設橋梁に適した免震化工法の開発、阪神・淡  
路大震災に関する学術講演会論文集、pp.537 -  
544, 1996

- 2) 建設省土木研究所：道路橋の免震設計マニュアル(案)、  
平成4年3月  
3) たとえば、松尾他、宮川橋の設計と施工、橋梁と基礎、  
1991年2月  
4) 道路橋示方書V. 耐震設計編、(社)日本道路協会、平成  
2年2月  
5) 既設橋梁に適した免震化工法技術資料：鹿島建設(株)、  
オイレス工業(株)、(株)ブリヂストン、平成7年9月

(1996.9.14 受付)

## Verification of Vibration Characteristics of a New Base-Isolation System

Hiroyuku NAGUMO, Yoshihiro HISHIKI, Tetsuo TAKEDA

A new base isolation system for existing bridges was developed by the authors. The fundamental characteristics of the system were confirmed by the shaking table test. In this paper, to confirm the applicability of the system, the analysis of the experimental data are carried out to investigate the characteristics of responses in frequency domain. Moreover, the non-linear dynamic analysis for PC bridge with the system applied is executed to evaluate how seismic responses of the bridge would change by varying the friction coefficient of existing bearings and the seismic motion, because the estimation of friction coefficient of existing bearings is important when applying this system. As a result, it is found that the system is effective in reducing seismic response of pier in frequency domain, and the change of seismic responses due to the variation of friction coefficient is revealed.