

既設橋梁に適した免震化工法

鹿島技術研究所 竹田哲夫*, 日紫喜剛啓*

○南雲広幸*, 新原雄二*

オイレス工業(株) 長谷川治**

(株)ブリヂストン 水津洋二***

免震工法は、地震時の応答を大幅に低減できることから耐震性を向上させるのに有効な工法の一つである。しかし、既設道路橋に適用する場合、橋桁の遊間が少なく、地震時には橋桁の変位が拘束されるため免震効果が十分発揮されない。また、橋梁の支承を取り替えることは、橋脚や主桁の大規模なはつり工事、長期間の交通規制を必要とするため社会的な影響が大きなものとなる。今回、開発した免震工法は、これらの課題を解決するもので、その概要、性能、設計方法、施工方法について報告するものである。

1. はじめに

阪神淡路大震災以降、既設橋梁を対象として耐震補強が急がれているが、その中で免震工法は、構造物の長周期化と高減衰化を行い地震力を低減できるため、耐震性を向上させる有効な工法の一つである。

しかし、既設道路橋に免震工法を適用した場合、以下の問題点が想定される。すなわち、橋桁の遊間が少なく、地震時には伸縮装置の破損や、桁同士の衝突が起こり免震効果が十分に発揮されない。また、免震化には、既存支承を免震支承に取り替える工事が必要になるが、取り替え工事には、橋脚天端や主桁底版の大規模なはつり工事、長期間の交通規制が必要となり、非常に難しい工事になる。

本報告は、これらの課題をクリアーできる免震工法を開発したのでその概要、性能、本工法を用いた場合の設計法、施工法について報告するものである。

2. 本免震化工法の概要

今回提案する工法の概要について以下に述べる。

(1) 構造上の特徴

本工法における免震装置は、すべり支承と水平力ダンパーから構成されている(図-1参照)。免震ゴム支承を用いた従来の免震化工法との相違点は、す

キーワード：免震工法、耐震補強、既設橋梁

* 鹿島建設(株)技術研究所, 0424-89-7077

** オイレス工業(株), 0466-44-4818

*** (株)ブリヂストン, 045-825-7589

べり支承の摩擦減衰と、水平力ダンパーの履歴減衰という2重の減衰付加により、橋桁変位を抑制しつつ免震化によって地震力の低減を図ることである。

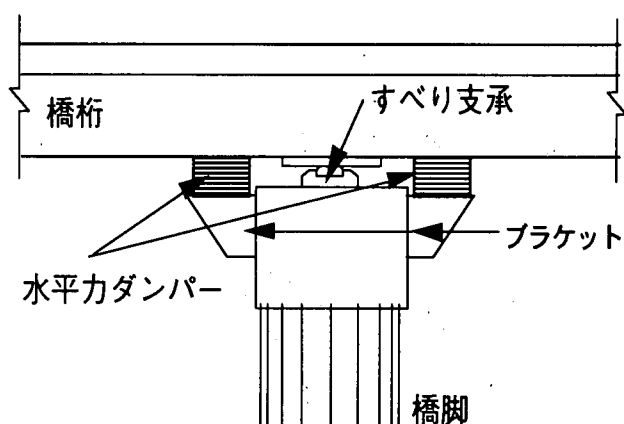


図-1 工法概要図

すべり支承は、橋桁重量を支持しながら免震化に伴う変位に対応できるように、既存支承(鋼製支承やゴム支承など)を改造する。

水平力ダンパーは、免震支承として実績のある高減衰ゴムや鉛プラグ入り積層ゴムを用いる。水平力ダンパーは、橋桁の重量を支持しておらず、支承の範疇に属さない。そのため、大変形時における鉛直力による座屈や転倒の心配がなく従来の免震支承よりも設計の自由度が上がると考えられる。その結果、水平力ダンパーの積層数を低減でき、コストダウンにつながると考えられる。

免震橋では橋桁の変位が大きくなるために、橋軸

直角方向に免震化すると小規模地震において伸縮装置の損傷が予想される。これに対して本工法では橋桁の変位を小さく抑えることができるために、小規模地震による伸縮装置の破損を免れることができ、橋軸直角方向の免震も可能になる。

(2) 施工上の特徴

施工的には、既存の支承を利用してすべり支承に改造するため、アンカーボルトの付け替えなどに生ずる橋脚や主桁のはつり工事は、ほとんど必要ない。また、水平力ダンパーは、橋脚に取り付けたブラケットを利用することにより設置スペースの制約を受けずに施工できる。したがって、作業性確保のため既設の橋桁をジャッキアップする必要がなく、交通規制がほとんど不要である。

3. 振動台実験による基本特性の確認

本工法の免震特性を把握し、その基本特性を確認するために、実地震波を用いた振動台実験を行った。

(1) 使用した試験体

a) 実橋との対応関係

振動台実験で使用する試験体は図-2に示すような一般的な高架道路橋をモデル化したものである。

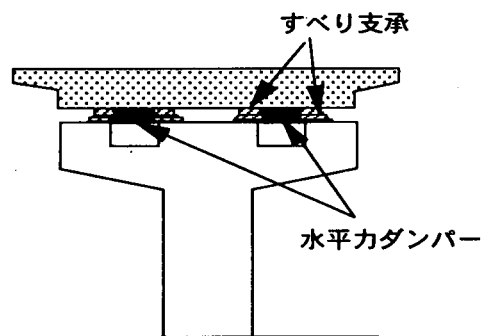


図-2 想定した高架橋

表-1 モデル橋の概要

幅員	11m (2車線)
スパン	20m (連続橋の1スパン)
1支承の支持荷重	100tf (4支承/1橋脚)
地盤	道路橋示方書のII種地盤相当
固有周期	0.4秒 (非免震)

想定した高架道路橋の条件を表-1に、試験体の寸法及び部位の説明を図-3、表-2に示す。

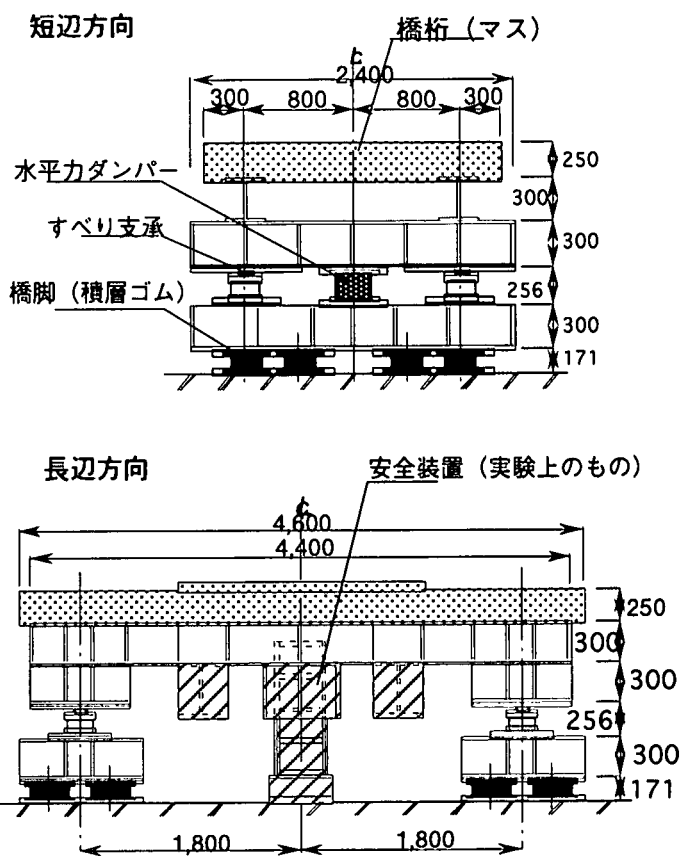


図-3 試験体一般図 単位(mm)

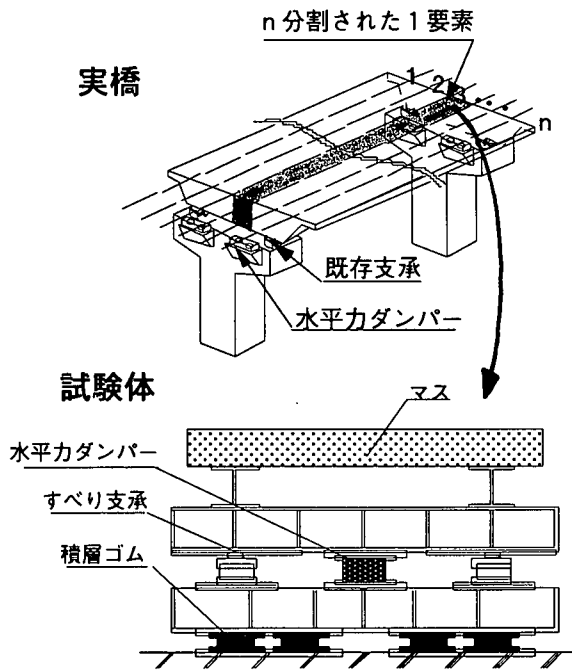
表-2 試験体部位の説明

マス、載荷フレーム	橋桁に相当するもので、マスと載荷フレームの重量は約25tfであり4支承で受け持っている。
すべり支承	テフロン板(φ64mm)とステンレス板から構成されており実橋と同じ接地圧になるように支承面積を設定した。試験体には4支承を設置。
水平力ダンパー	免震支承として実績のある高減衰ゴムを用いている。すべり支承の摩擦がないものとし、免震マニュアルに従い設計している。寸法(高さ×幅×奥行き)が146×240×240mmの直方体で試験体に2個設置している。
積層ゴム	橋脚柱に対応するもので、非免震時の固有周期が0.4秒程度になるよう剛性を定めた。

b) 相似則

実物を縮小した模型実験では、実物と模型の物理量を対応させるために、相似則を用いる必要がある。免震装置の寸法は相似比を用いて実物の免震装置と同じ面圧になるように決定される。しかし、本振動台実験では水平力ダンパーに作用する鉛直力が0であることにより水平力ダンパーの寸法は相似則を考慮する必要がない。このことは、試験体の大きさを以下の様に考えれば今回の実験が縮尺実験ではなく実規模の実験に対応していることを意味している。すなわち、想定した実橋の上部工重量が400tfであるが、振動台の性能が確保できる重量になるまで

上部工（支承や免震装置を含めて）を等分割にする（図一4参照）。分割したモデルであるので観測される加速度や変形は実橋の振動性状を表しており、実橋モデルと1対1に対応する。この考え方に基づき試験体重量を実橋上部工重量の1/16となる25tfにした。



図一4 実橋と試験体の対応関係

(2) 実験の概要

a) 実験ケース

免震実験に先立ち、免震実験における免震効果を比較するため、また、非免震時の動的特性を把握するため非免震の実験を行った。非免震の実験は、試験体のマスと橋脚の間の相対変位が生じないようにブレースによりフレームを固定した。

また、水平力ダンパーには橋桁重量による鉛直荷重が作用しないためゴム体内部の鉄板の数を減らすことができる。そこで、一般的な免震装置と同等の積層数をもつ7層構造のものと、それよりも積層数を減らした3層構造のもの2種類を用いて実験を行った。

b) 入力波形

各実験ケースに用いた入力地震波を表一3に示す。なお、L1レベルとは、道路橋示方書V耐震設計編で言うところの震度法レベルに相当し減衰定数5%の加速度応答スペクトル上で試験体の固有周期0.4秒に相当する応答加速度が、200~300Gal程度に

なるように原波形の加速度を調整した地震波で、入力地震波の最大加速度が100Galである。

L2レベルとは、道路橋示方書V耐震設計編で言うところの地震時保有水平耐力法レベルに相当し減衰定数5%の加速度応答スペクトル上で試験体の固有周期0.4秒に相当する応答加速度が、1000Gal程度になるように原波形の加速度を調整した地震波で、入力地震波の最大加速度が400Galである。

表一3 実験ケースと入力波形

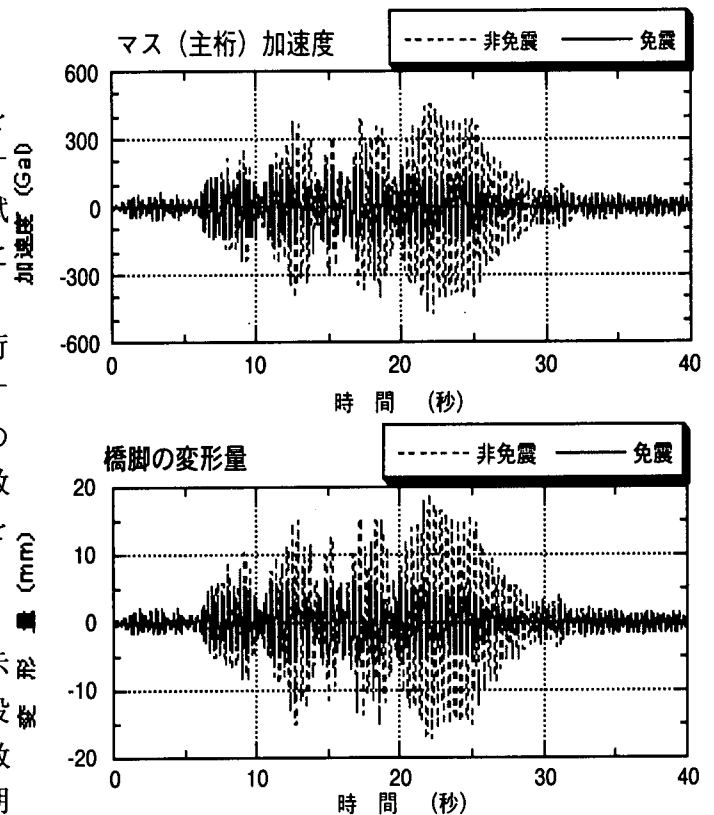
	非免震実験	免震実験
L1レベル	釧路気象台地震波 神戸海洋気象台地震波	釧路気象台地震波 神戸海洋気象台地震波
L2レベル	釧路気象台地震波 神戸海洋気象台地震波	釧路気象台地震波 神戸海洋気象台地震波
原波形レベル		釧路気象台地震波 神戸海洋気象台地震波 (注)

注) 最大加速度を700Galに調整して入力

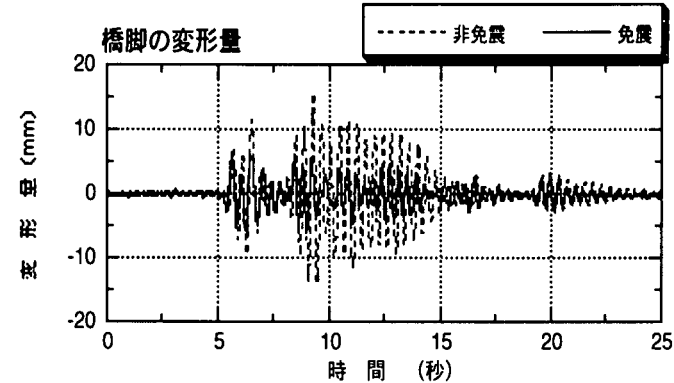
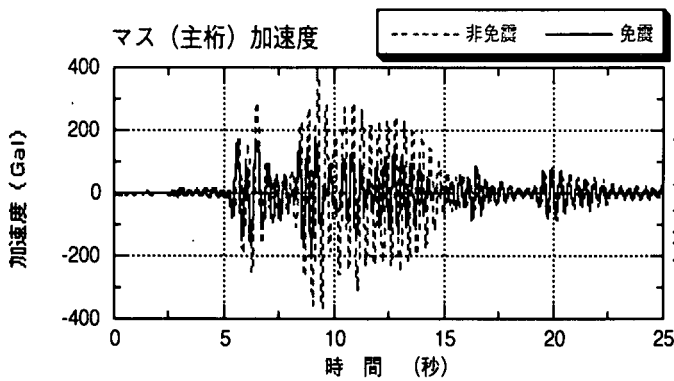
(3) 実験結果

a) 時刻歴応答波形の比較

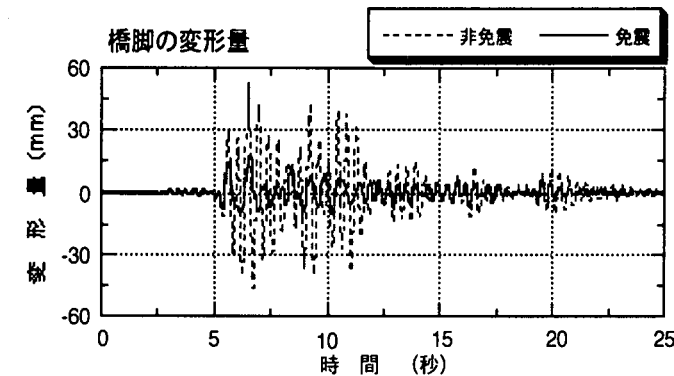
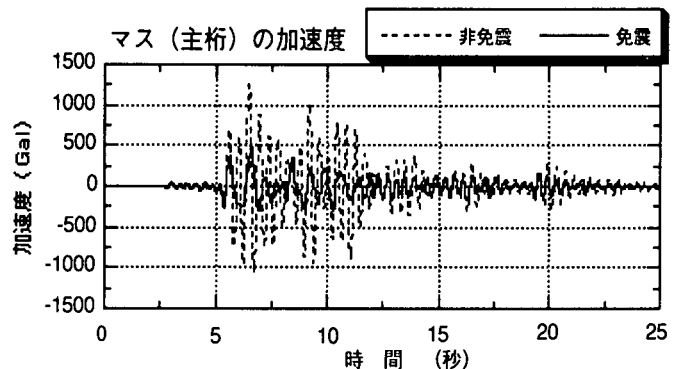
図一5~8に釧路気象台地震波、神戸海洋気象台地震波を入力した場合のマスの加速度と積層ゴム（橋脚）の変形の時刻歴波形について、非免震時と免震時を比較して示す。なお、水平力ダンパーにつ



図一5 時刻歴応答波形(釧路L1レベル)



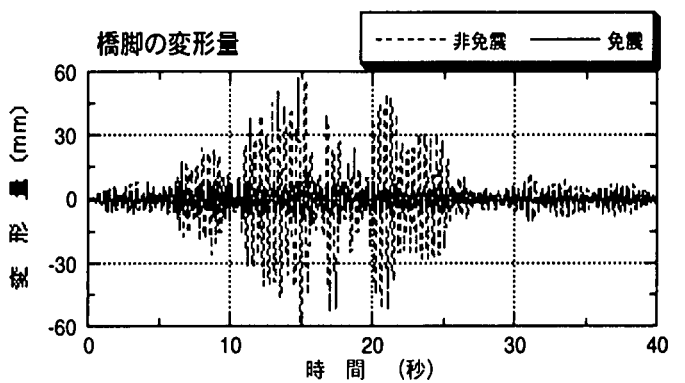
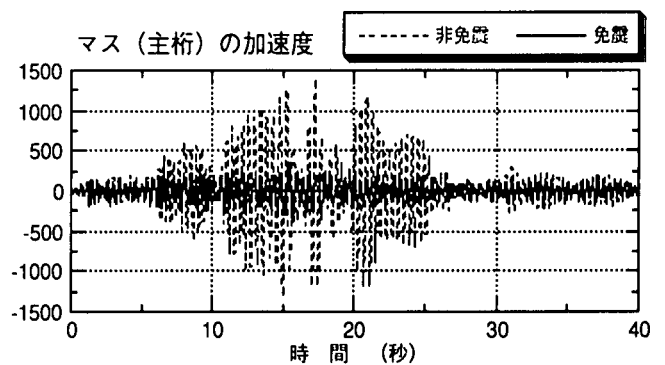
図—6 時刻歴応答波形(神戸L1レベル)



図—8 時刻歴応答波形(神戸L2レベル)

いては、3層構造のものと7層構造のものとは振動特性に違いは見られなかったため、ここでは3層構造の水平力ダンパーを使用した試験体の実験結果を示す。

L1, L2レベルともに橋桁の加速度、橋脚の変形量が免震の効果で低減されている。低減度合は、入力



図—7 時刻歴応答波形(釧路L2レベル)

加速度の大きいL2レベルの方が大きく、水平力ダンパーの履歴減衰の効果が現れている。L1レベルにおいても、橋脚の変形量が非免震時に比べ1/2以下になっており橋脚に作用する水平力が大幅に低減されている。

b) 免震効果

表—4, 5にマス(橋桁)の加速度と積層ゴム(橋脚)の変形の最大応答値を示す。波形の違いにもよるが免震時の加速度や変形量は、非免震時の1/2~1/3程度になっていることがわかる。

表—4 マスの加速度の最大値

入力波形		非免震	免震	免震/非免震
L1 レベル	釧路波	466.2	200.0	0.43
	神戸波	393.3	183.6	0.47
L2 レベル	釧路波	1396.0	367.8	0.26
	神戸波	1262.1	474.9	0.38
原波形 レベル	釧路波	2900.0	531.9	0.18
	神戸波	1870.0	1026.4	0.55

単位: Gal

表—5 橋脚の変形量の最大値

入力波形		非免震	免震	免震/非免震
L1 レベル	釧路波	19.0	6.9	0.36
	神戸波	15.9	6.5	0.41
L2 レベル	釧路波	63.4	12.5	0.20
	神戸波	57.3	16.2	0.28

単位: mm

表一6に水平力ダンパーの変形量（橋桁と橋脚の相対変位量）を示す。L1レベルにおいては5mm以下であり、本工法の特徴である変位抑制効果がよく現れている。

表一6 水平力ダンパーの変形量

入力波形		変位
L1 レベル	釧路波	4.9
	神戸波	3.7
L2 レベル	釧路波	35.0
	神戸波	56.9
原波形 レベル	釧路波	91.0
	神戸波	183.8

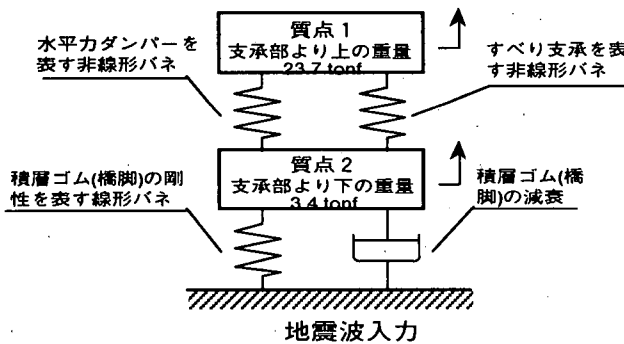
単位：mm

(4) シミュレーション解析

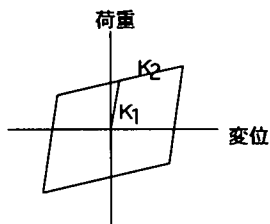
a) 解析モデル

振動台実験の結果を非線形時刻歴応答解析でシミュレートできることを確認する。解析モデルを図一9に示す。

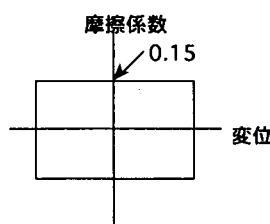
すべり支承より上の橋桁に相当する試験体の質量を質点1、すべり支承より下の試験体の質量を質点2とする2質点系モデルである。水平力ダンパーは、バイリニア型の履歴特性を持つ非線形バネで表した（図一10）。水平力ダンパーは高減衰ゴムを用いており、その履歴特性は「道路橋の免震設計マニュアル(案)」¹⁾に従って求めた。高減衰ゴムの履歴特性を算出するためには、高減衰ゴムのせん断ひずみを与える必要があるが、今回の解析では、振動台実験で得られた最大せん断ひずみを用いた。すべり支承は、摩擦係数を0.15とし、変位-荷重関係が長方形となるような剛塑性モデルで表した（図一11）。



図一9 解析モデル



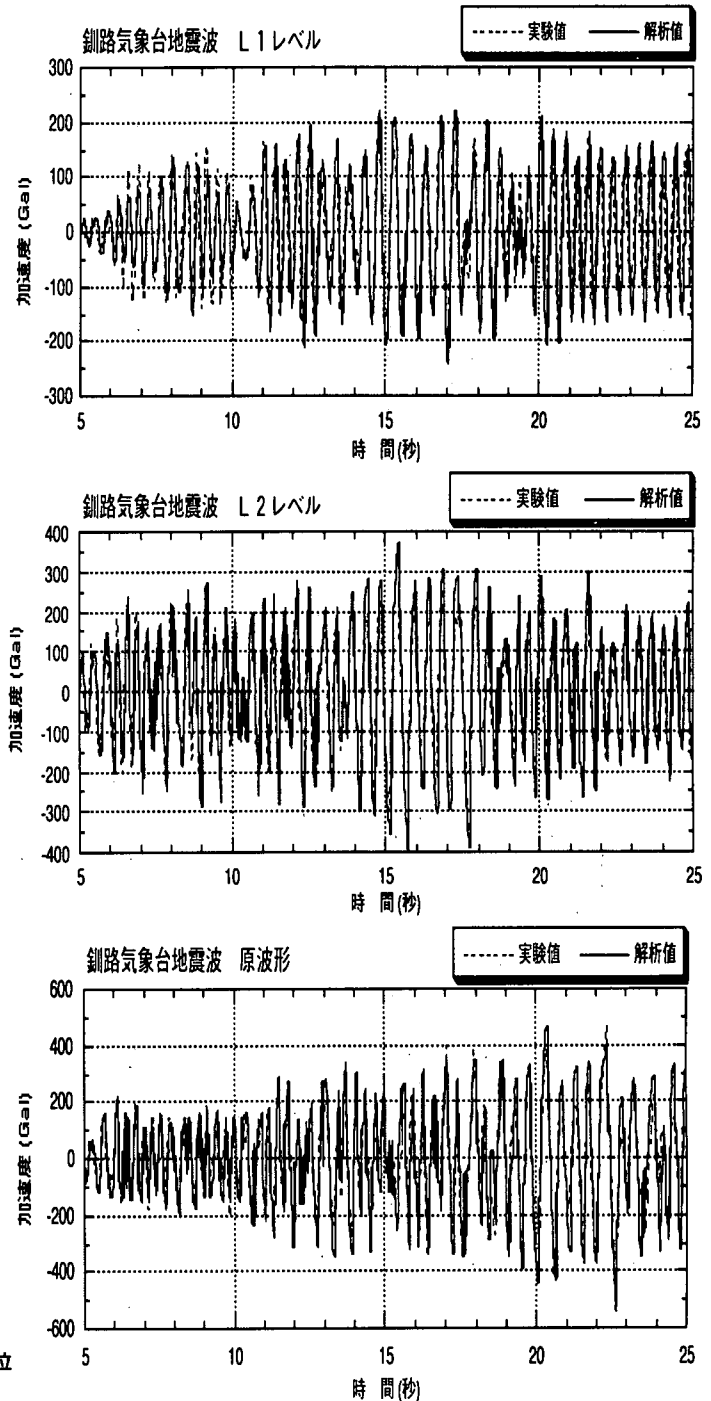
図一10 解析における水平力ダンパーの履歴特性



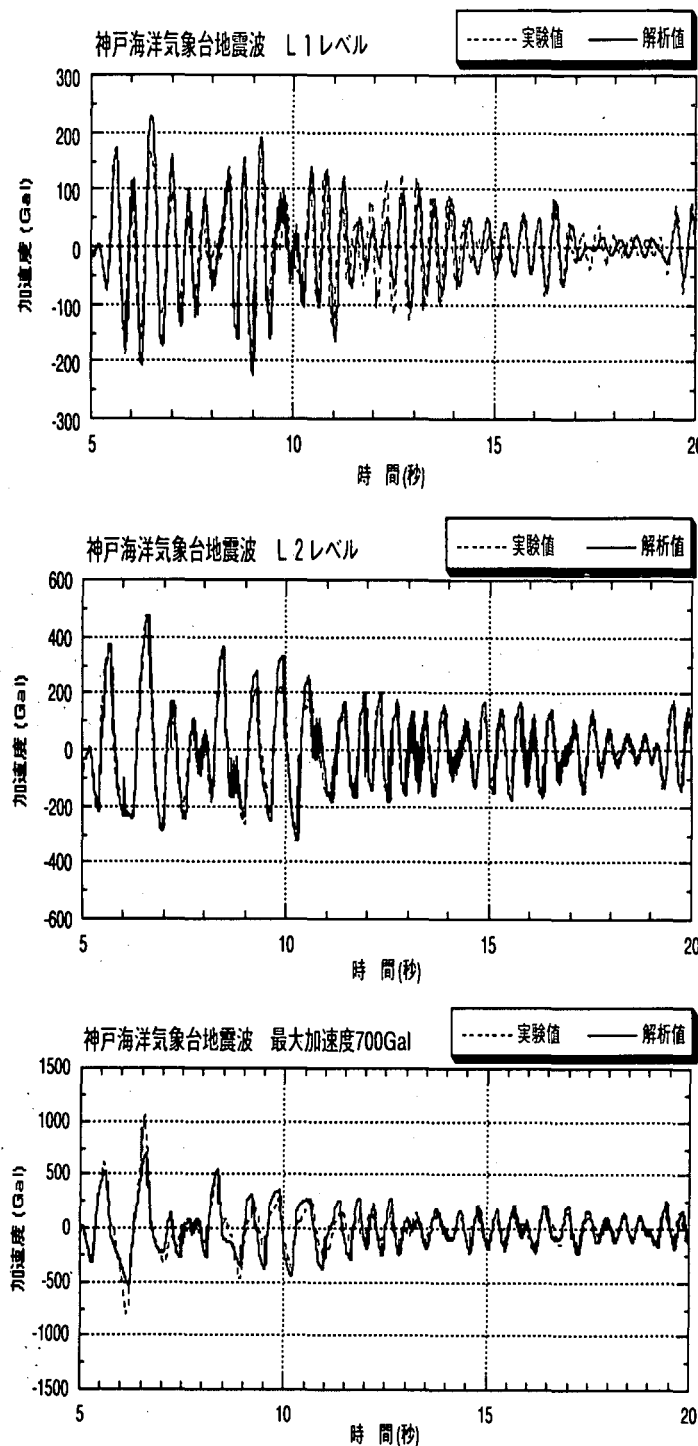
図一11 解析におけるすべり支承の変位-摩擦係数曲線

橋脚を表している積層ゴムは、非免震時に動的特性の確認を行い固有周期が0.4秒、減衰定数0.03の特性を有していることを把握しているので固有周期が0.4秒となる線形バネと、減衰定数0.03のダッシュポットで表した。積層ゴムは天然ゴムを用いた弾性ゴムであり、振幅依存性がほとんどないと考えられたので、計算の簡略化のため線形バネとダッシュポットで表した。

解析ケースは、免震実験ケースと同様である。



図一12 解析値と実験値の比較 (釧路気象台地震波)



図一13 解析値と実験値の比較
(神戸海洋気象台地震波)

b) 解析結果

非線形時刻歴応答解析による質点1(橋桁)の応答加速度を振動台実験結果と合わせて図一12~13に示す。両地震波とも実験値と解析値がほぼ一致している。このことから、すべり支承と水平力ダンパーに関して、このようなモデル化をすれば実用上十分な精度で解析でシミュレートできることが確認できた。

c) 従来工法との比較

本工法と免震ゴム支承を用いた従来工法との比較を解析的に行ったのでその結果を表一7に示す。従来工法の解析モデルは図一9に示した本工法の解析モデルからすべり支承を表した非線形バネを取り除いたモデルである。入力波形は釧路気象台地震波と神戸海洋気象台地震波のL1レベルを用いている。

表一7 本工法と従来工法の比較

入力波形	本工法		従来工法	
	釧路	神戸	釧路	神戸
積層ゴムの変形 (橋脚の変形)	9.5mm	9.8mm	8.6mm	8.5mm
質点1の加速度 (橋桁の加速度)	239Gal	230Gal	233Gal	217Gal
質点1と2の相対変位 (支承部の変形)	3.8mm	3.0mm	16.6mm	14.2mm

すべり支承と水平力ダンパーを用いた本工法の場合、従来型の免震工法に比べて橋脚の変形量がわずかに大きいですが、質点1(橋桁)の加速度を比較するとほぼ同程度であり免震効果が同程度であると思われる。一方、支承部における相対変位は、本工法の場合、従来工法に比べて約2割に低減されており、本工法が橋桁の変位を抑制しつつ免震効果を発揮することが示されている。

4. 本工法の設計法

本工法を用いた場合の設計の考え方について、以下に示す。

(1) 設計上のポイント

a) 照査事項

設計照査は、次の3段階で行うものとする。

①震度法レベル

既設橋梁では震度法による設計が非免震の状態で行われているため、本工法の場合は主桁変位量を算定し、桁同士が衝突しない遊間が確保されていることを照査する。

②地震時保有水平耐力法レベル

従来方法と同じものとする。ただし、水平力ダンパーの変形がすべり支承の可動範囲以内に収まっていることを確認する。

③兵庫県南部地震で記録した波形を用いた照査

「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に

関わる仕様」²⁾に準じる。ただし、水平力ダンパーの変形がすべり支承の可動範囲以内に収まっていることを確認する。

b) すべり支承との組合せ

すべり支承を剛塑性としてモデル化して図-14の方法で等価剛性、等価減衰を求める。これを別途求めた水平力ダンパーの特性と組み合わせる。

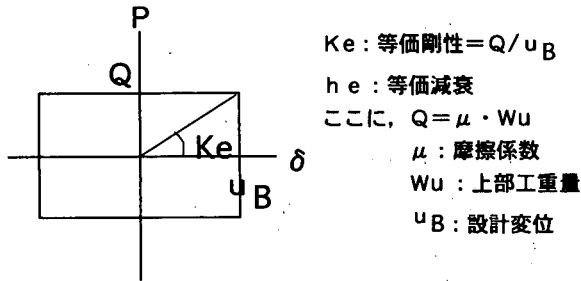


図-14 すべり支承の荷重—変位関係

(2) 非線形解析による大地震時の安全性の照査
本工法を適用した場合の安全性の確認をするために、モデル橋を想定し上記③の照査を行った。

a) 解析条件

モデル橋の一般図を図-15に示す。モデル橋の上部工はRCホロー桁、下部工はRC橋脚を想定している。水平力ダンパーは「道路橋の免震設計マニュアル(案)」¹⁾に従って設計し、固定支承のあったP3, P4橋脚に設置する。大きさは、厚さ6cmで41cm×80cmの寸法の高減衰ゴムを1橋脚に4個配置する。なお、ゴムの層数は1層である。支承部の摩擦係数は0.15とした。解析モデルを図-16に示す。入力地震波は神戸海洋気象台地震波を用いた。

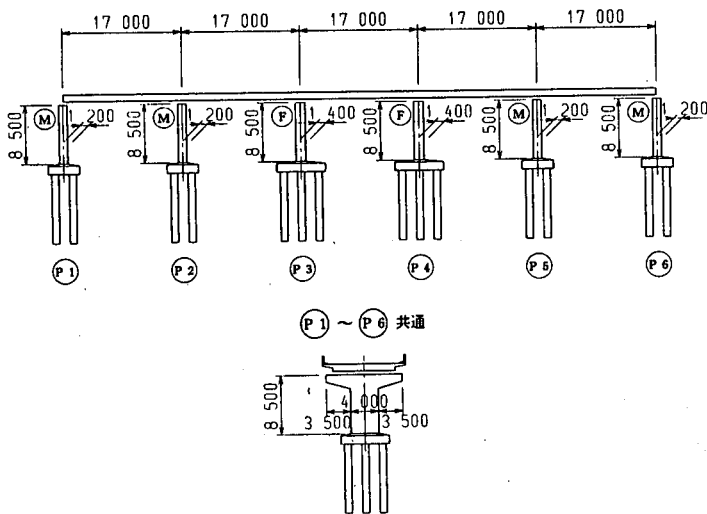


図-15 モデル橋一般図

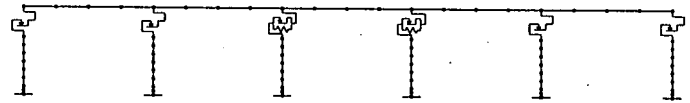


図-16 モデル橋解析モデル図

b) 解析結果

非免震時と免震時におけるP3橋脚基部のM—φ曲線をそれぞれ図-17, 18に示す。

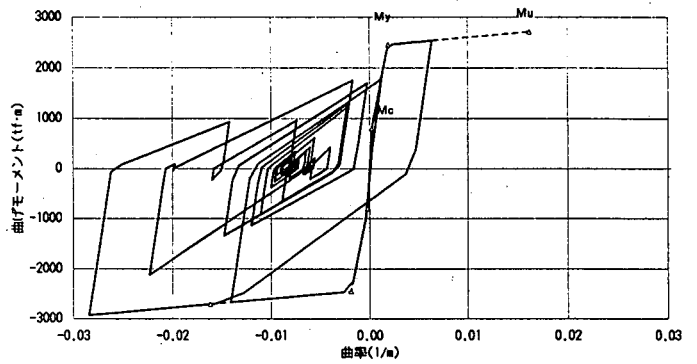


図-17 非免震時のM-φ曲線(P3橋脚基部)

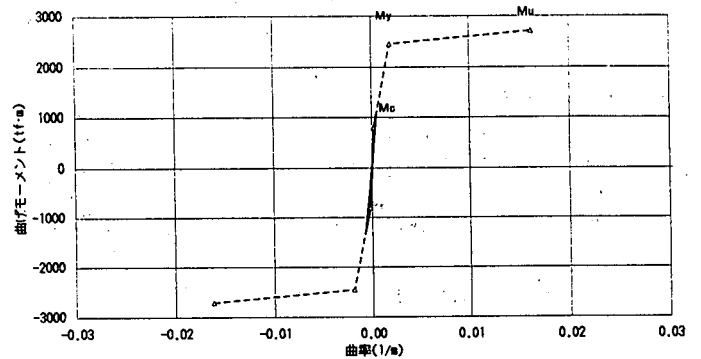


図-18 免震時のM-φ曲線(P3橋脚基部)

解析の結果、非免震では終局耐力を超えているが、免震では降伏耐力に達していない。また、主桁と橋脚の最大相対変位は10cmでありベアリングプレートの一部が既設の上沓からわずかにはみだす程度であった。したがって、本工法によりモデル橋は十分な安全性を確保できることが示された。

5. 施工法

(1) 施工手順

本工法の施工手順について説明する。

①足場工

枠組足場、高所作業車等を作業足場として使用する。

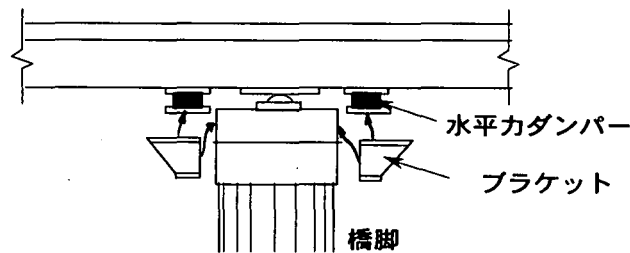
②すべり支承化：次節参照。

③水平力ダンパー取付

樹脂アンカー等を使用して水平力ダンパーを橋桁底面に取り付ける。図一19参照。

④ブラケット取付

PC鋼棒、樹脂アンカー等を使用して橋脚にブラケットを取り付ける。図一19参照。



図一19 施工概要図

(2) すべり支承化の例

①BP支承

サイドブロックを切断撤去する。図一20参照。

②ローラー支承

橋桁をジャッキアップ、仮受けしローラー支承を撤去する。その後、すべり支承を溶接して取り付ける。図一20参照。

6. まとめ

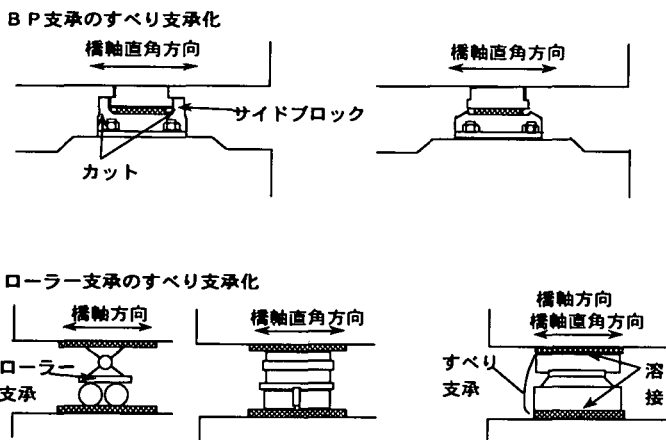
現在、橋脚の耐震補強工事が急がれている中で、地震力の低減を目的とした免震工法が注目されている。しかし、既設橋梁を免震化する場合、いくつかの問題点が生じてくる。

今回、その問題点を解決し既設橋梁に適した免震化工法を開発した。その基本特性について実験的、解析的に検証した後、モデル橋を想定して非線形時刻歴応答解析を行い安全性の照査を行ったところ、本工法を適用すれば十分な安全性を確保できることが確認できた。

今後は、実施工を行い振動実験などにより振動性状の検証、確認を行っていきたいと考えている。

【参考文献】

- 1) 建設省土木研究所：道路橋の免震設計マニュアル（案），1992年3月
- 2) 建設省：兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に関わる仕様，1995年3月



図一20 すべり支承化の例

Development of a base isolated system for the existing bridges

Tetsuo Takeda, Yoshihiro Hishiki, Hiroyuki Nagumo, Yuji Niihara, Osamu Hasegawa, Yoji Suizu

In case of applying the base isolated system to existing bridges, it often could not satisfactorily function because of the narrow space between girders. In addition, the replacement of steel bearing to the rubber one is generally difficult. This is because a considerable amount of chipping work on the top of pier is required and the traffic should be stopped during worktime.

In this paper, a new base isolated system is introduced, which solves the problems in applying base isolated system to existing bridges. The characteristics and design and implementation method of the system are explained.