

水平 2 方向に地震力を受ける免震橋脚の応答性状に関する研究

Response of isolated piers subjected to strong ground motions in horizontal 2 directions

永田和寿*、尾関孝人**、渡邊英一***、杉浦邦征****、山口隆司*****

Kazutoshi Nagata, Takato Ozeki, Eiichi Watanabe, Kunitomo Sugiura and Takashi Yamaguchi

- * 博士 (工学) 名古屋工業大学大学院助教授 工学研究科社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)
- ** 工修 大成建設株式会社 土木本部土木設計部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿 新宿センタービル)
- *** Ph. D.、工博 京都大学名誉教授 (財)大阪地域計画研究所理事長 (〒561-0834 豊中市庄内栄町2-21-1)
- **** Ph. D. 京都大学大学院助教授 工学研究科都市環境工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
- ***** 博士 (工学) 大阪市立大学大学院助教授 工学研究科都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

Isolated structures have been adopted in elevated bridges to reduce severe damages due to huge earthquakes after the Hyogoken-Nanbu Earthquake. In this paper, the seismic response of isolated piers subjected to strong ground motions in horizontal 2 directions was assessed. At first, 2 dimensional mechanical behaviors of isolated bearings were evaluated by static loading tests. Secondly, pseudo-dynamic tests were carried out to evaluate the seismic response of isolated piers. It is found that the equivalent damping constant of isolated bearings may be reduced and the stiffness tends to increase, compared to these values in 1 direction input. Moreover, it was verified that the response displacement of isolated piers tends to decrease under 2-D earthquake input.

Key Words: isolated piers, seismic response behavior, horizontal 2 directions, pseudo-dynamic test

キーワード: 免震橋脚、地震時応答性状、水平2方向、ハイブリッド実験

1. はじめに

従来、橋や建物、その他の構造物に対して、地震による応答を小さくするため長年にわたり耐震構造に係わる設計・施工法が開発されてきた。しかし、近年においては、大規模の地震力が作用する場合、構造部材の強度を上げ、構造物の剛性を向上させることで地震力に抵抗することには限界があると考えられている。これは、1995年に発生した兵庫県南部地震において、想定外の地震力発生によって構造物が多大な被害を受けた事実が証明している¹⁾。そのため、構造物の剛性の向上ではなく、構造物にエネルギー吸収性能をもつ部材を積極的に構造物にとり入れることで損傷を最小限に抑え、構造系システムとしての安定性が失われないようにする免震、制震という考え方が構造設計の分野に多く導入されている。1995年の兵庫県南部地震以降、高架橋の既設の支承を免震支承に据え替えや新設の高架橋の多くで免震支承が採用されており、多くの構造物で免震化が行われている。

水平面内の地震時挙動に対して現行の道路橋示方書²⁾では、任意方向の慣性力は水平2方向の慣性力の作用として表すことができ、これら2方向の慣性力を独立に作

用させてよいと規定されている。このことから橋軸方向と橋軸直角方向に対して別々に橋梁の耐震性能が検討されているのが一般的である。しかし、1995年の兵庫県南部地震において、水平2方向の慣性力が同時に作用したために大きな被害を受けたと考えられる事例が多くみられたことから分かるように、地震力が3次的に作用することにより構造物は複雑な挙動を示す。そのため、高架橋に対する2方向地震動の作用に関する研究の必要性が指摘されており、既に2方向に地震動を受ける橋脚と1方向のみ地震動を受ける橋脚の弾塑性動的応答性状は大きく異なることが明らかにされている^{3), 4)}。また、免震支承に関しても水平1方向に地震力を受けた場合の挙動に関しては多くの検討がなされ、水平2方向に地震力を受けた場合についての研究⁵⁾も行われているものの十分な検討はなされていない。しかし、免震支承が構造物の中で果たす役割は重大であり、確実に機能し、橋梁全体の安定性を保つためには、水平2方向に地震力を受けた場合の挙動に対しても正確に把握しなければならない。このように、水平1方向のみではなく、水平2方向同時に地震力が作用する場合の、免震高架橋の挙動を解明する必要があると考えられる。

そこで、本研究では、減衰性能と高いエネルギー吸収性能を有する高減衰積層ゴム支承（HDR：High Damping Rubber Bearing）を対象として、静的繰り返し実験によりその水平2方向力学的性状を解明した。さらに、この支承によって免震化された橋脚に対する1方向および水平2方向地震動に対する同橋脚のハイブリッド地震応答実験を行い、免震橋脚が水平2方向に地震力を受けた際の応答性状について検討を行った。

2. 実験概要

2.1. 対象構造物

本研究では、文献6)において示されている都市内の標準的な高架橋モデルの金属支承を全て免震支承 HDR に取替えた免震高架橋のうち、図-1 に示すような1本の橋脚と1個の免震支承 HDR 群（1個の支承群は2個の免震支承からなる）、上部構造を対象モデルとして研究を行った。橋脚は薄肉円形断面の鋼製橋脚であり、橋脚高さは18.5m、直径は3.0mである。これらの構造要素の基本的な諸量を表-1 に示す。

2.2. 実験供試体

本研究で対象とした高減衰積層ゴム支承 HDR は、内部ゴムとして減衰性の高い特殊配合のゴム材料を使用したものであり、バネ機能（復元力機能）とともにエネルギー吸収機能を併せ持つ積層ゴム支承である。ゴム材料は、天然ゴムを主体としたゴムに特殊な充填材、補強材、樹脂などを配合したもので、分子間などに特殊な素材を配合することで得られる粘性減衰要素、ゴム分子がもつバネ要素と分子同士が摩擦をおこす摩擦減衰要素を付与したものである。ゴム配合により性能が異なることから、各製作会社からそれぞれ復元力モデルが提案されている⁷⁾。積層ゴム支承の設計・選択は免震構造物の地震時応答と密接な関係があるため、期待する免震性能が実現されるように積層ゴム支承の形状や特性を決定しなければならない。本研究では、表-1 に示した基本諸量を有する高減衰積層ゴム支承 HDR の 1/5 モデルの実験供試体を製作し、この試験体の2方向繰り返し载荷実験ならびに図-1 に示した免震橋脚の2方向ハイブリッド地震応答実験を行った。この実験供試体の写真ならびに詳細図と諸元をそれぞれ写真-1、図-2、表-2 に示す。

2.3. 実験装置と载荷・計測方法

本研究では、京都大学と島津製作所によって開発された写真-2 および図-3 に示す三次元構造物試験装置⁸⁾を使用した。この実験装置は、構造物もしくは構造部材の変形として、X-Y-Z 軸方向並進3成分およびX-Y-Z 軸回り回転3成分の合計6自由度の変位を任意に組み合わせて高精度な载荷を可能とするためのマルチ油圧ジャッキシステム、デジタル制御・計測装置、油圧供給装置、および

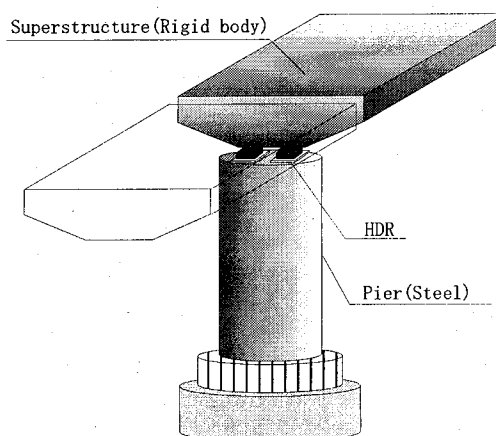


図-1 対象モデル

表-1 構造諸元

	質量 (kN)	一次剛性 K_1 (kN/mm)	二次剛性 K_2 (kN/mm)	降伏荷重 Q_y (kN)
Pier	440	40.4	4.04	5,217
HDR	-	29.3	2.78	353
上部工	13,054	-	-	-



写真-1 HDR 実験供試体

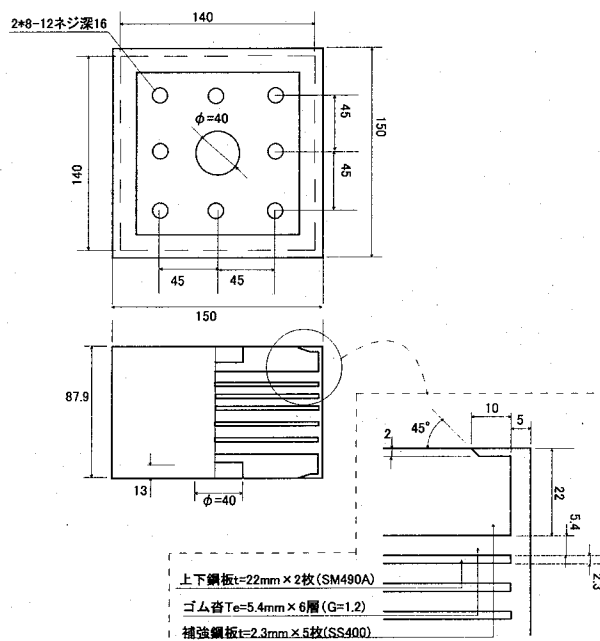


図-2 HDR 実験供試体詳細図

表-2 HDR 実験供試体の諸元

一次剛性 K_1 (kN/mm)	二次剛性 K_2 (kN/mm)	降伏荷重 Q_y (kN)
5.85	0.56	14.1

自己釣り合い形式のフレームを組み合わせたものである。

この試験装置では、実験供試体基部を上、頭部を下に設置した。そして、X軸とY軸に並進の方向の2本のアクチュエータ（図中のFXおよびFY）を用いて、水平面内の载荷を行い、Z軸に並進の方向のアクチュエータ（図中のFZ）により、軸方向の载荷を行った。

本実験では、変位制御により水平1方向および水平2方向の载荷を行った。この際、実験供試体の正確な変形量により実験を制御するため、実験供試体の基部が基準となるように設置した外部変位計を用いて荷重載荷位置の変位を計測することにより、変形量を正確に計測した。また、鉛直（Z軸）方向の载荷は荷重一定制御とした。



写真-2 三次元構造物試験装置

3. 免震支承 HDR の水平2方向力学特性

3.1. 繰り返し载荷実験

繰り返し载荷実験の試験方法は日本道路公団規格のゴム支承の特性に関する試験方法を参考に行った⁹⁾。鉛直方向の荷重は、87.02(kN)とした。また、最大水平変位はHDR 供試体のゴム層厚 32.4mm の 175%となる±56.7mmとした。ここで、175%はHDR の限界せん断ひずみであり、その性能が確保される250%に安全率の0.7を掛けたものである。水平加振回数は11回とし、水平加振周期は100秒（0.01Hz）とした。等価剛性・等価減衰定数・一次剛性・二次剛性は、载荷試験の結果をもとに以下の式より2～11回の各サイクルでの値を算出し、平均値をとった。

$$K_{eq} = \frac{F(\delta_{H1}) - F(\delta_{H2})}{\delta_{H1} - \delta_{H2}} \quad (1)$$

$$H_{eq} = \frac{2\Delta W}{\pi K_{eq} (\delta_{H1} - \delta_{H2})^2} \quad (2)$$

$$K_2 = \frac{(F(\delta_{H1}) - F(\delta_{H2})) / 2 - Q_d}{(\delta_{H1} - \delta_{H2}) / 2} \quad (3)$$

$$K_1 = 10.5 K_2 \quad (4)$$

ここで、 K_{eq} はHDR の水平等価剛性（kN/mm）、 H_{eq} はHDR の等価減衰定数、 K_2 はHDR の二次剛性（kN/mm）、 K_1 はHDR の一次剛性（kN/mm）、 δ_{H1} と δ_{H2} はHDR の最大と最小水平変位（mm）、 $F(\delta)$ はHDR に水平変位 δ を与えるのに必要な水平力（kN）、 ΔW はHDR が吸収するエネルギーで履歴曲線の面積（kN・mm）、 Q_d はHDR の降伏荷重（kN）である。

HDR 供試体に対する繰り返し载荷実験より得られた水平変位-水平荷重履歴曲線を図-4に示す。また、この結果をもとに上記の式から得られた等価剛性・等価減衰定数・一次剛性・二次剛性を表-3に示す。図-4からわかるように、第1サイクルの履歴ループが突出して大きい復元力を示している。これはHDR の荷重履歴依存性のためであるが、履歴ループは繰り返し载荷回数が増加するにつれ徐々に小さくなり、第4、5サイクル以降は安定したループを描いている。同様に水平剛性も繰り返し载荷回

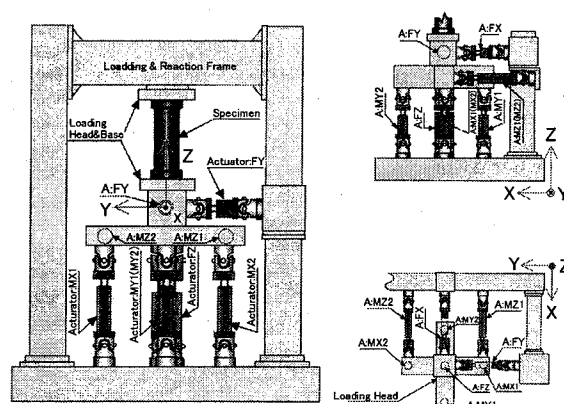


図-3 試験装置図

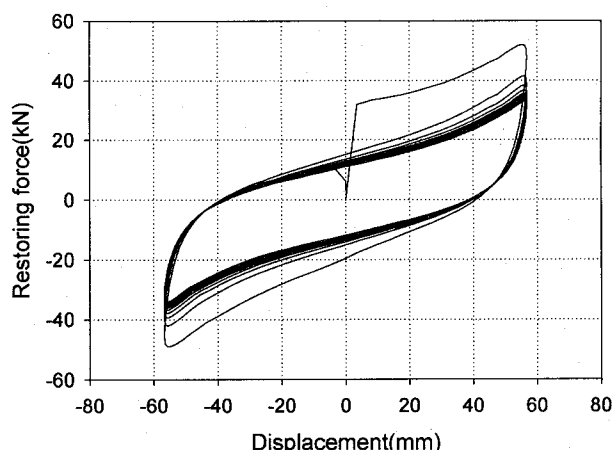


図-4 水平変位-水平荷重履歴曲線（繰り返し载荷実験）

表-3 繰り返し载荷実験から得られたHDR の力学特性

	等価 剛性 (kN/mm)	等価 減衰定数 (%)	一次 剛性 (kN/mm)	二次 剛性 (kN/mm)
繰り返し 载荷実験	0.635	20.8	3.89	0.37
設計値	0.744	15	5.85	0.556

数が増加するにつれて徐々に低下しているのがわかる。また、表-3 からわかるように、等価減衰定数の値が設計値よりも大きい値を示しており、要求されているエネル

ギー吸収性能は十分発揮できていると考えられる。

3.2. 方向依存性確認実験

本実験供試体HDRは写真-1からわかるように角型であり、その断面形状による方向依存性の有無が、水平2方向の挙動を検討する上で重要であると考えられる。そこで、このHDRに対して図-5に示すように、45度方向（対角方向）に繰り返し載荷実験を行った。そして、この結果と0度方向（辺方向）、つまり3.1.で行った繰り返し載荷実験結果とを比較し、方向依存性の確認を行った。

3.1.で行った繰り返し載荷実験と同様に軸方向荷重は、87.02(kN)、最大水平変位は HDR 供試体中のゴム層厚32.4mmの175%となる $\pm 56.7\text{mm}$ 、水平加振回数は11回、水平加振周期は100秒（0.01Hz）とした。

HDR 供試体に対する45度方向の繰り返し載荷実験から得られた水平変位-水平荷重履歴曲線と、0度方向の繰り返し載荷実験から得られた水平変位-水平荷重履歴曲線を図-6に重ねて示す。またこれらの結果から得られたHDR 供試体の等価剛性・等価減衰定数・一次剛性・二次剛性といった力学特性を表-4に示す。45度方向の履歴曲線と、0度方向の履歴曲線を比較すると、その形状は両者の間で大きな違いはなく、履歴面積も変わらない。また、実験結果から得られた各種力学特性を見ると、等価減衰定数は45度方向と0度方向とではほぼ等しい値となっており、同様のエネルギー吸収性能を示していると考えられる。また等価剛性・一次剛性・二次剛性については、45度方向の方が0度方向と比較して若干低い値を示しているが、10%程度の差で収まっている。（社）日本免震構造協会規格で与えられている各剛性のばらつきの許容範囲としてロット内平均値に対して $\pm 10\%$ というような目安⁷⁾を考えると、このように若干の誤差はあるものの概ね許容範囲内にあるといえる。以上の結果より、本研究の供試体であるHDRは45度方向と0度方向の繰り返し載荷実験において同様の挙動を示しており、断面形状による方向依存性がないことが確認された。

3.3. オフセット実験

3.2.において、HDR 供試体には断面形状による方向依存性はないことが確認されたが、2方向に同時に水平力を受ける事により、その挙動にどのように影響が出るのかを把握する必要がある。そこで、図-7に示すように、Y方向にあらかじめ所定のオフセット変位を付与し、その状態からX方向に繰り返し載荷をするオフセット実験を行った。また、その結果とオフセット変位が0の状態から繰り返し載荷した場合、つまり3.1.で行った繰り返し載荷実験とを比較した。載荷手順としては、3.1.で行った繰り返し載荷実験と同様に87.02(kN)の荷重を軸方向に載荷し、HDR 供試体中のゴム層厚32.4mmの175%となる $\pm 56.7\text{mm}$ までY方向にオフセット変位を与えた。その後X方向に最大水平変位 $\pm 56.7\text{mm}$ 、水平加振回数は11

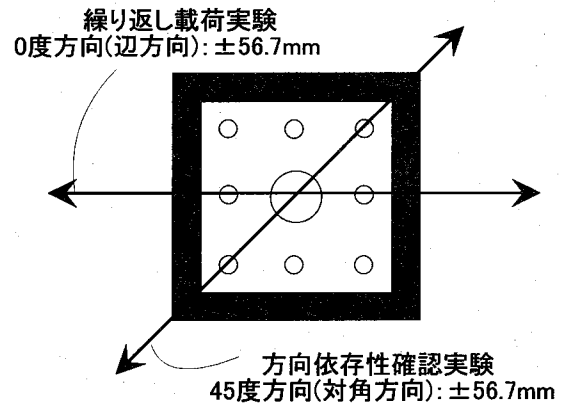


図-5 載荷方法（方向依存性確認実験）

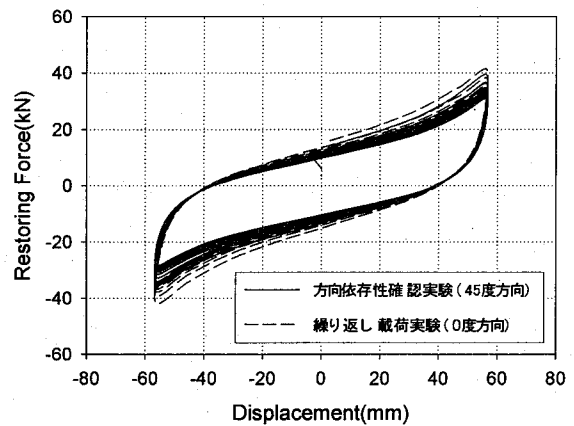


図-6 水平変位-水平荷重履歴曲線（方向依存性確認実験）

表-4 方向依存性確認実験から得られたHDRの力学特性

	等価剛性 (kN/mm)	等価減衰定数 (%)	一次剛性 (kN/mm)	二次剛性 (kN/mm)
方向依存性 確認実験 (45度 方向)	0.565	20.7	3.52	0.336
繰り返し 載荷実験 (0度方向)	0.635	20.8	3.89	0.37

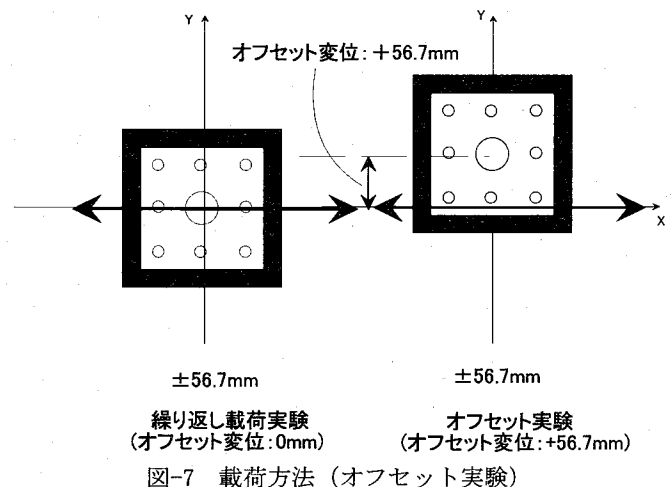


図-7 載荷方法（オフセット実験）

回、水平加振周期は 100 秒 (0.01Hz) の繰り返し載荷を行った。

HDR 供試体に対するオフセットした状態からの繰り返し載荷実験から得られた水平変位-水平荷重履歴曲線と、通常の状態からの繰り返し載荷実験から得られた水平変位-水平荷重履歴曲線を図-8 に重ねて示す。また、これらの結果から得られた HDR 供試体の等価剛性・等価減衰定数・一次剛性・二次剛性といった力学特性を表-5 に示す。オフセットした場合の履歴曲線と通常の場合の履歴曲線を比較すると、その形状が違っているのが分かる。オフセットした場合の方が、オフセットがない場合よりもある領域から剛性が高くなっている。一般に積層ゴムは、あるせん断ひずみ (HDR の変形量/HDR 中のゴム層厚) 領域において、ひずみの増加に伴い剛性が急激に増加し、履歴曲線が逆 S 字形を示すハードニングという現象を起こす⁷⁾。しかし、図-8 を見ても分かるように、オフセットした場合は通常の場合と比較してせん断ひずみが小さい領域において、このハードニング現象が発生している。また、実験結果から得られた各種力学特性を見てみると、等価減衰定数は、オフセットした場合の方が通常の場合と比較して低い値を示しているのが分かる。一方で、等価剛性・一次剛性・二次剛性については、オフセットした場合の方が通常の場合と比較して、20%以上大きくなっている。これは先にも述べたようにオフセットした場合は、通常の場合よりも小さいせん断ひずみ領域において、剛性が増加するハードニング現象を起こしているためと考えられる。この結果より、水平 2 方向に同時に力が作用した場合、水平 1 方向のみに力が作用した場合よりも、減衰性能が低下し、剛性が増大することが分かった。

4. 水平 2 方向に地震力を受ける免震橋脚の応答性状

4.1. ハイブリッド地震応答実験システム

図-9 に本ハイブリッド地震応答実験システムの概略図を示す。この実験システムは三次元構造物試験装置とその制御用パソコンおよび応答計算用パソコンから構成されている。また、データの流はこの図に示すように、はじめに、計算用パソコンにおいて、前ステップで検出した免震支承 HDR 供試体の 2 つの復元力 (X 方向と Y 方向) を用いて免震橋脚の地震時応答解析を行い、免震支承 HDR 供試体の 2 方向の応答変位を算出し、ハードディスクに書き込む。次に、応答変位が書き込まれた時点で、制御用パソコンはこの値を読み取る。そして、制御パソコンはこの値を目標変位として、三次元構造物試験装置により実験供試体に載荷を行い、載荷終了後に復元力を検出して、ハードディスクに復元力を書き込む。最後に、計算用パソコンは復元力が書き込まれた時点でその値を読み取り、次ステップへと進む。これを所定の回数だけ繰り返すことにより、免震橋脚の応答性状を評価することができる¹⁰⁾。なお、この実験では応答計算用パソコン

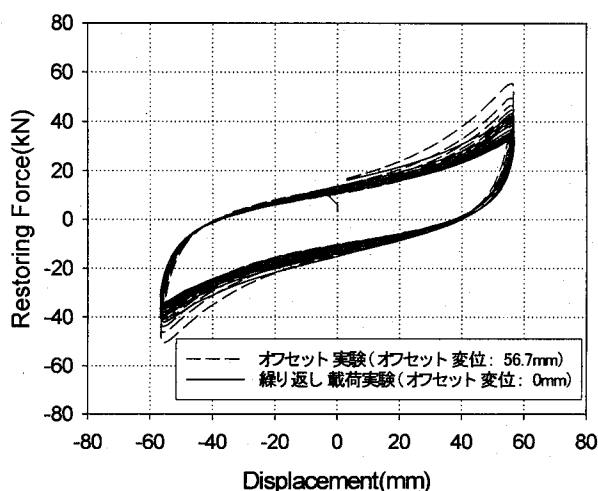


図-8 水平変位-水平荷重履歴曲線 (オフセット実験)

表-5 オフセット実験から得られた HDR の力学特性

	等価剛性 (kN/mm)	等価減衰定数 (%)	一次剛性 (kN/mm)	二次剛性 (kN/mm)
オフセット 実験 (オフセット 変位: 56.7mm)	0.764	17.9	5.44	0.518
繰り返し 載荷実験 (オフセット 変位: 0mm)	0.635	20.8	3.89	0.37

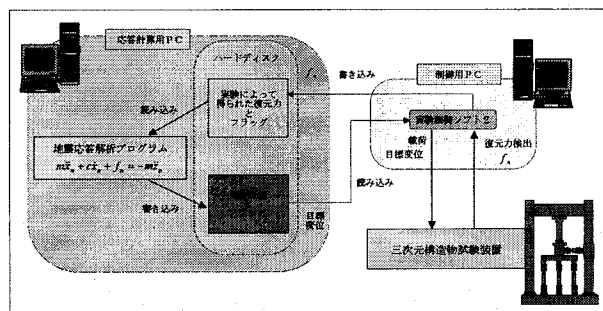


図-9 ハイブリッド地震応答実験システム

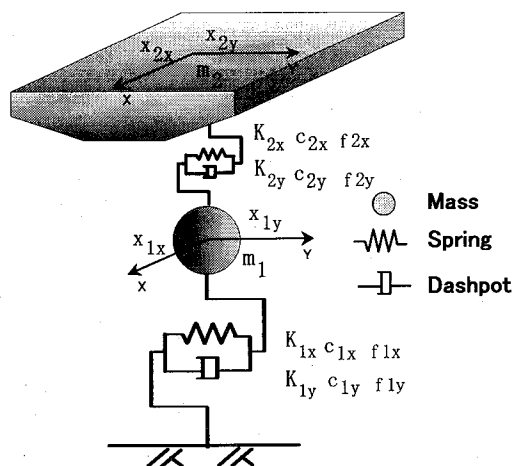


図-10 2自由度-バネ質点系モデル

のハードディスクをコンピュータネットワーク上で共有させた。また、応答変位や復元力が書き込まれた時点でフラッグを立てることにより、計算用パソコンと制御用パソコンがタイミングを狂わせることなく、これらの値の読み込みを行った。

4.2. モデル化および地震応答解析

水平2方向に地震力を受ける免震橋脚の応答性状を説明するため、その動的特性を図-10に示すように2自由度-バネ質点系でモデル化した。この2自由度系の運動方程式を式(5)に示す。

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + F = -M\ddot{Z} \quad (5)$$

ここで、

$$M = \begin{pmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} x_{1x} \\ x_{2x} \\ x_{1y} \\ x_{2y} \end{pmatrix}, \quad \dot{X} = \begin{pmatrix} \dot{x}_{1x} \\ \dot{x}_{2x} \\ \dot{x}_{1y} \\ \dot{x}_{2y} \end{pmatrix}, \quad \ddot{X} = \begin{pmatrix} \ddot{x}_{1x} \\ \ddot{x}_{2x} \\ \ddot{x}_{1y} \\ \ddot{x}_{2y} \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} c_{1x} + c_{2x} & -c_{2x} & 0 & 0 \\ -c_{2x} & c_{2x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{1y} + c_{2y} & -c_{2y} \\ 0 & 0 & -c_{2y} & c_{2y} \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} f_{1x} - f_{2x} \\ f_{2x} \\ f_{1y} - f_{2y} \\ f_{2y} \end{pmatrix}, \quad \ddot{Z} = \begin{pmatrix} \ddot{z}_x \\ \ddot{z}_x \\ \ddot{z}_y \\ \ddot{z}_y \end{pmatrix}$$

と表される。ただし、 X 、 $\dot{X}$ 、 $\ddot{X}$ は変位、速度、加速度、であり、 M 、 C 、 F はそれぞれ質量マトリックス、減衰マトリックス、復元力ベクトル、 $\ddot{Z}$ は入力地震加速度である。この解析においては各構造要素の減衰定数を0.05とした。本研究においては、橋脚の応答は免震化により弾性範囲に収まるとしてその復元力特性を弾性とし、免震支承HDRの非線形復元力特性はハイブリッド実験および実験の妥当性を検証するための解析においてはそれぞれ載荷実験およびバイリニアモデルにより評価した。

入力する地震波として、1995年の阪神大震災においてポートアイランド内地盤上で観測された2方向の地震波（レベル2、Ⅲ種地盤）を用いた。橋軸方向とするX方向には、図-11に示すようなN-S成分を、橋軸直角方向とするY方向には、図-12に示すようなE-W成分をそれぞれ入力した。N-S成分の最大加速度は543gal、E-W成分の最大加速度は619galである。これらの地震波の0.01秒を1stepとして25秒間、計2,500step入力し、免震橋脚の2方向応答性状を調べた。

4.3. 水平1方向ハイブリッド実験

水平2方向ハイブリッド実験を行う前に、水平1方向のみから地震力を受けたハイブリッド実験を行った。X方向（橋軸方向）にN-S成分の地震波を単独に入力したときの対象モデルの、上部構造時刻歴応答変位を図-13に、上部構造時刻歴応答加速度を図-14に、HDRの実構造スケールでの水平変位-水平荷重履歴曲線を図-15に解析結果と比較して示す。同様にY方向（橋軸直角方向）にE-W成分の地震波を単独に入力したときの対象構造物

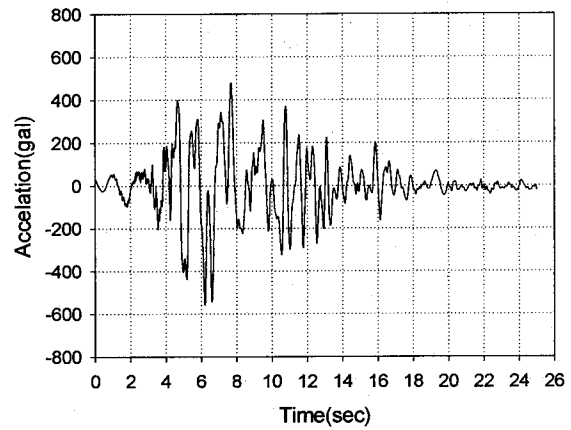


図-11 入力地震波 (X 方向) (N-S 成分)

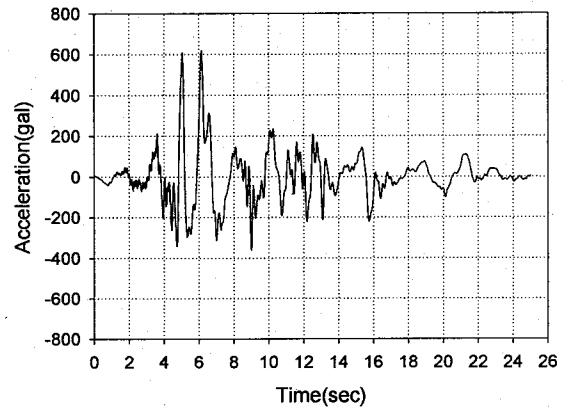


図-12 入力地震波 (Y 方向) (E-W 成分)

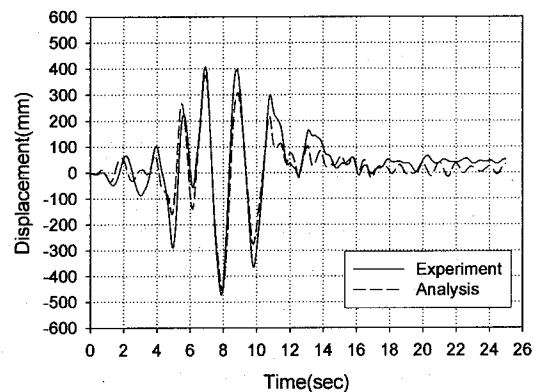


図-13 上部構造時刻歴応答変位 (X 方向) (1 方向単独入力)

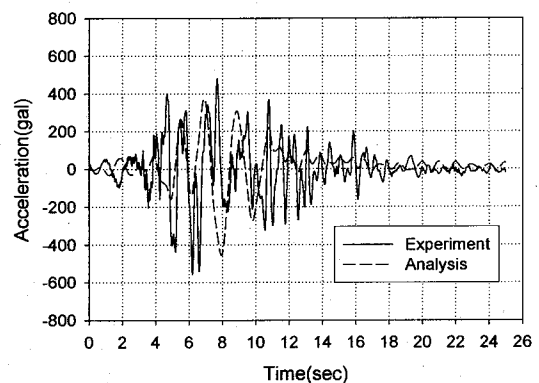


図-14 上部構造時刻歴応答加速度 (X 方向) (1 方向単独入力)

の、上部構造時刻歴応答変位を図-16 に、上部構造時刻歴応答加速度を図-17 に、HDR の実構造スケールでの水平変位-水平荷重履歴曲線を解析結果と比較して図-18 に示す。

X 方向（橋軸方向）については、上部構造が 7.9(sec) 付近で最大変位-473(mm)、HDR も 7.9(sec) 付近で最大変位-372.5(mm)を記録した。Y 方向（橋軸直角方向）については、上部構造が 7.7(sec) 付近で最大変位+478(mm)、HDR も 7.7(sec) 付近で最大変位 383.5(mm)を記録した。上部構造最大応答変位・HDR 最大応答変位のどちらも Y 方向の方がわずかではあるが大きい値を示している。これは、X 方向に入力した N-S 成分の地震波よりも、Y 方向に入力した E-W 成分の地震波の方が、最大加速度が大きかったためと考えられる。

X 方向・Y 方向の HDR の水平変位-水平荷重履歴曲線において、両結果とも 3.1. で述べたように、繰り返し載荷回数が増加するにつれて、徐々に水平剛性が低下していくといった現象は殆ど見られなかった。これは、この水平 1 方向のハイブリッド実験においては、3.1. の繰り返し載荷実験のときほど、大変形での繰り返しの多くを受けていないためと考えられる。しかし、一方で、両結果とも小さいひずみ領域において、サイクルを重ねる毎に剛性が低下している現象がみられる。これは、HDR は初期加力時の小ひずみ領域において等価剛性が高いのに対して、大変形経験後では小ひずみ時の履歴が最大経験ひずみの履歴ループの中に入るために剛性が低くなる⁷⁾といった HDR のせん断ひずみ依存性による影響と思われる。つまり、HDR は経験した範囲のひずみ領域では剛性が低下する。また、両結果とも 3.2. で述べたような変位が大きい領域に入ると急激に剛性が増大するハードニングという現象を起こしていることが確認できる。

4.4. 水平2方向ハイブリッド実験

水平 2 方向に地震力を同時に受けたハイブリッド実験を行った。4.3. における 1 方向のみ地震波を入力した際の結果と比較して、対象モデルの X 方向（橋軸方向）の上部構造時刻歴応答変位を図-19 に、上部構造時刻歴応答加速度を図-20 に、HDR の実構造スケールでの水平変位-水平荷重履歴曲線を図-21 に示す。同様に対象モデルの Y 方向（橋軸直角方向）の上部構造時刻歴応答変位を図-22 に、上部構造時刻歴応答加速度を図-23 に、HDR の実構造スケールでの水平変位-水平荷重履歴曲線を図-24 に示す。また、この水平 2 方向ハイブリッド実験の様相、並びに HDR 供試体の変形状況を写真-3 に示す。

X 方向（橋軸方向）については、上部構造が 7.7(sec) 付近で最大変位-440(mm)、HDR も 7.8(sec) 付近で最大変位-354.3(mm)を記録した。Y 方向（橋軸直角方向）については上部構造が 6.8(sec) 付近で最大変位-434(mm)、HDR も 6.8(sec) 付近で最大変位-358(mm)を記録した。Y 方向に関しては、1 方向のみ地震波を入力した場合は

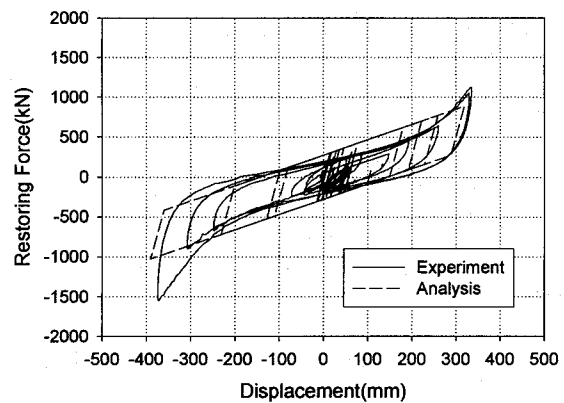


図-15 水平変位-水平荷重履歴曲線 (HDR)
(X 方向) (1 方向単独入力)

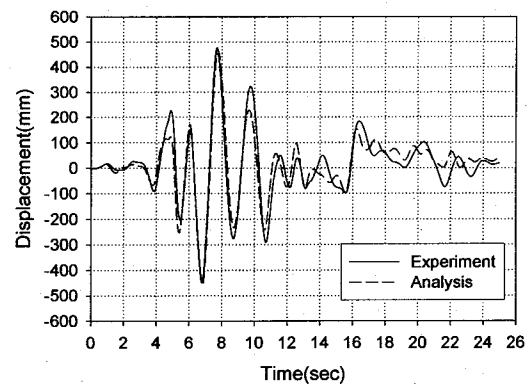


図-16 上部構造時刻歴応答変位 (Y 方向)
(1 方向単独入力)

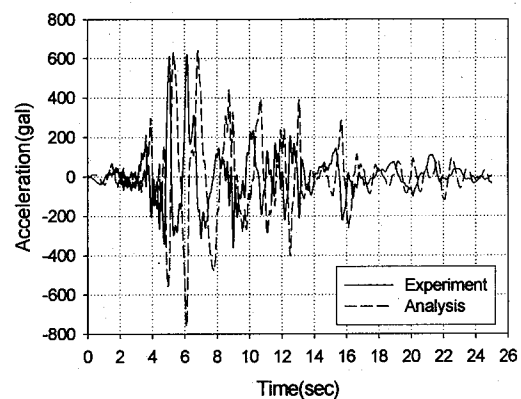


図-17 上部構造時刻歴応答加速度 (X 方向)
(1 方向単独入力)

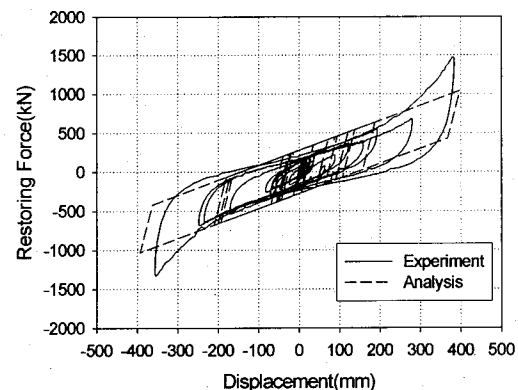


図-18 水平変位-水平荷重履歴曲線 (HDR)
(Y 方向) (1 方向単独入力)

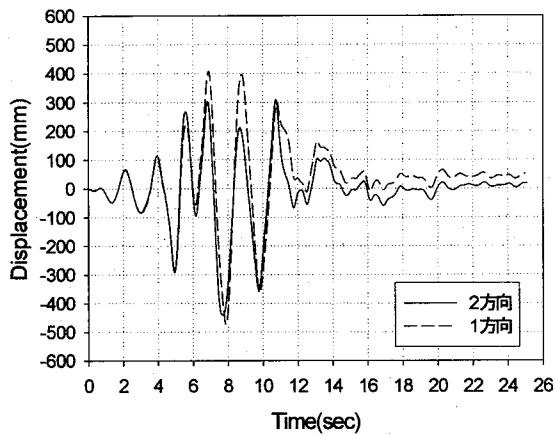


図-19 上部構造時刻歴応答変位 (X 方向)
(2 方向同時入力)

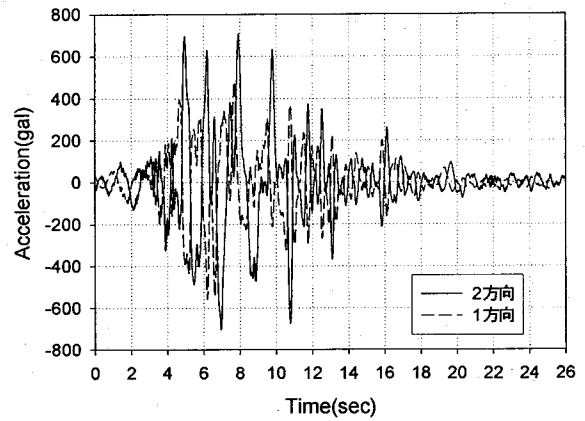


図-20 上部構造時刻歴応答加速度 (X 方向)
(2 方向同時入力)

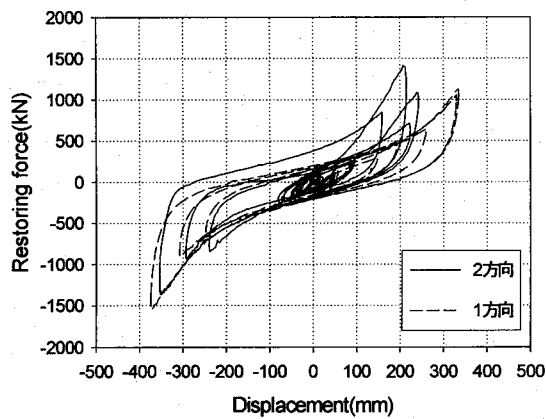


図-21 水平変位-水平荷重履歴曲線 (HDR)
(X 方向) (2 方向同時入力)

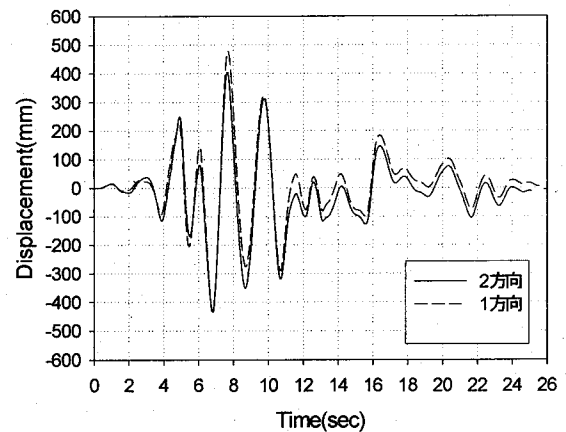


図-22 上部構造時刻歴応答変位 (Y 方向)
(2 方向同時入力)

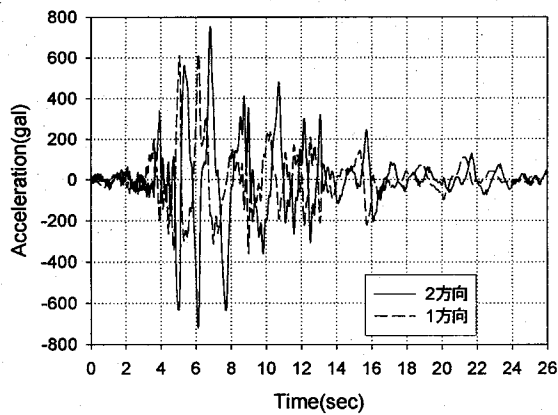


図-23 上部構造時刻歴応答加速度 (Y 方向)
(2 方向同時入力)

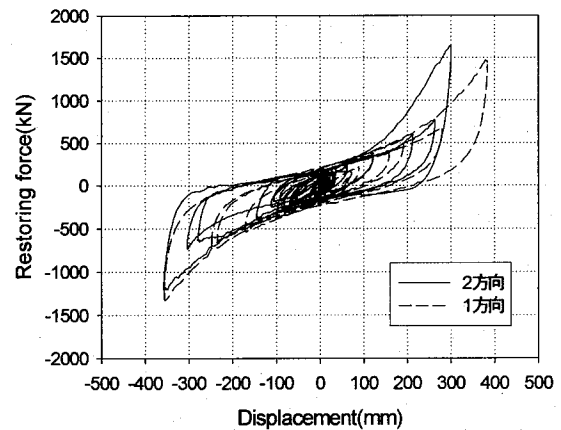


図-24 水平変位-水平荷重履歴曲線 (HDR)
(Y 方向) (2 方向同時入力)

最大応答を示す時刻が異なっているのがわかる。

上部構造応答変位・HDR 応答変位のどちらも、1 方向の場合と比較して小さく収まっていることが分かる。これは、水平 2 方向に同時に地震力が作用することで、水平 1 方向のみに地震力が作用する場合と比較して、HDR の剛性

が増大したためと考えられる。また、微小変形領域での挙動は水平 2 方向に同時に入力した場合と、1 方向のみに入力した場合とで、ほぼ一致しているが、変形が大きくなるにつれて、両者の挙動は大きく異なっている。HDR の挙動を見てみると、3.3. のオフセット実験でも述べたよ

うに、1方向のみの場合よりも小さいせん断ひずみ領域において、ハードニングを起こし剛性が急激に高くなっている。しかし、それ以外にも、履歴ループがサイクル毎に全く異なる部分を通っており、剛性が局所的に変化しているなど、3.3.のオフセット実験のときは、明らかに異なる挙動を示していることもわかる。これは3.3.のオフセット実験のときのように、HDR 供試体に一定のオフセット変位を与えられているのではなく、2方向にハイブリッド実験を行うことによりランダムにオフセット変位が変化することや、ねじりの影響があると考えられる。このように、1方向のみに地震波を入力した場合とは明らかに異なる現象が起きており、実際の地震では2方向から同時に地震波を受けるため、注意が必要である。

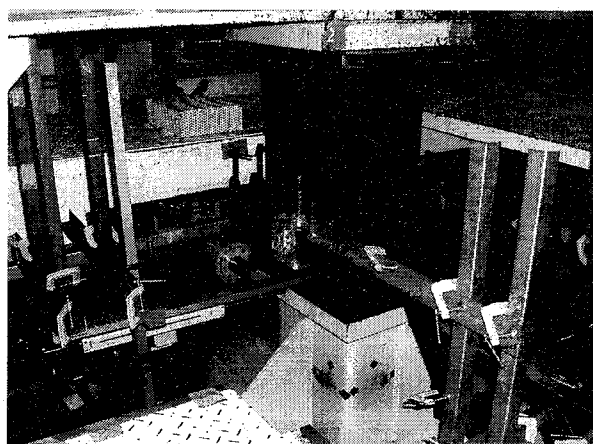
5. まとめ

本研究では、水平2方向に地震力を受ける免震橋脚の応答性状を解明することを目的とし、免震支承 HDR の水平2方向載荷実験および水平2方向入力による免震橋脚のハイブリッド地震応答実験を行った。以下に本研究で得られた結論を示す。

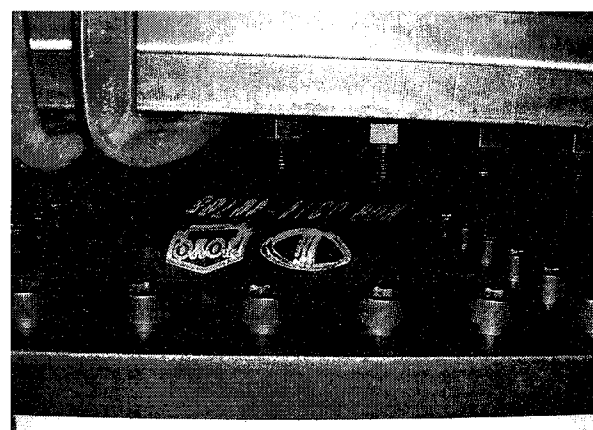
- 1) 角形の免震支承 HDR に対して、45度方向と0度方向に載荷し、断面形状の違いによる方向依存性を確認するための繰り返し実験を行った。その結果として、断面形状に起因する方向依存性は無いことがわかった。
- 2) オフセット実験を行い、HDR 供試体が水平2方向に同時に水平2方向力を受けた際の挙動を調べた。その結果、オフセットしない場合と比較して、オフセットした場合は、通常の場合よりも剛性が高くなるが、一方で等価減衰定数が減少し、エネルギー吸収性能が低下することが確認された。
- 3) 免震橋脚の水平2方向ハイブリッド実験を行った。その結果、上部構造・HDR の応答変位は、1方向のみ地震波を受けた場合と比較して、小さく収まった。また、上部構造・HDR の挙動は、微小変形領域においては、1方向単独入力の場合と2方向同時入力の場合で、ほぼ一致した。しかし、変形が大きくなるにつれて、両者の応答性状は大きく異なった。したがって、実際の地震では2方向から同時に地震力を受けるため、注意が必要である。

参考文献

- 1) (社)建設コンサルタンツ協会：阪神・淡路大震災被害調査報告書、1995年5月。
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、丸善、2002年3月。
- 3) 永田和寿、渡邊英一、杉浦邦征：水平2方向に地震力を受ける角形鋼製橋脚の弾塑性応答性状に関する



(a) 水平2方向ハイブリッド実験の様相



(b) HDR の変形状況 (7.8 秒付近)



(c) HDR の変形状況 (9.6 秒付近)

写真-3 水平2方向ハイブリッド実験の様子と HDR 供試体の変形状況

- 研究、構造工学論文集、土木学会、第 50A 巻、pp.1427-1436、2004年3月。
- 4) 後藤芳顕、江坤生、小畑誠：2方向繰り返し荷重を受ける薄肉円形断面鋼製橋脚柱の履歴特性、土木学会論文集、No. 780/I-70、pp.181-198、2005年7月。

- 5) 吉田純司・阿部雅人・藤野陽三：高減衰ゴムの構成則、土木学会論文集、No. 710/I-60、pp. 209-224、2002年7月。
- 6) (社)土木学会・(社)日本鋼構造協会：橋梁システムの動的解析と耐震性、2000年4月。
- 7) 社団法人 日本ゴム協会 免震用積層ゴム委員会：設計者のための免震用積層ゴムハンドブック、理工図書、2000年1月。
- 8) 京都大学土木系専攻教室：マルチフェイズダイナミックス実験システムパンフレット、1997年11月。
- 9) 本道路公団：日本道路公団規格、ゴム支承の特性に関する試験方法、418-2003、2003年7月。
- 10) 伯野元彦、岡田恒雄、高梨晃一、土岐憲三、池田尚治、家村浩和、方田敏夫：ハイブリッド実験の応用マニュアル、1990年3月。

(2005年9月10日受付)