大阪市立大学大学院　都市系専攻
修士論文梗概集 2004 年 3 月

ハイブリッド実験による免震高架橋システムの地震時応答挙動に関する基礎的研究

橋梁工学　　山﨑　桂司

1. はじめに

兵庫県南部地震のような大規模な地震に対して、高架橋の被害を小さくするためには、橋脚への地震入力を低減できる免震高架橋が有効であると考えられている。しかしながら、免震高架橋の地震時挙動を把握し、効果的な免震橋梁とするためには、橋脚、上部構造のみならず、隣接高架橋も含めた高架橋システムとしてシステム全体の応答に注目して検討する必要があるが、地震時における免震高架橋システム全体としての研究を行ったものはそれほど多くない。これは、対象範囲をシステム全体に広げることで、主として規模の制約から、これまでの構造要素を中心とした解析手法や実験手法をそのまま適用することが困難であることに起因している。本研究では、インターネットによる遠隔操作実験制御システムを応用した「インターネットを用いた並列ハイブリッド実験手法」を用いて、高架橋システムの応答をシミュレーションし、免震高架橋システムの設計に必要な基礎的資料を提供する。特に、以下に示す 2 点を目的としている.

① インターネットを用いた並列ハイブリッド実験システムの国際化対応・複数サイト対応版の動作確認および有効性の確認を行い、同システムの構築・整備に役立てる。

② 現行設計法で設計された免震支承の有効性の検討、及び免震橋梁における桁間緩衝材の効果と要求性能に関する検討をう。

2. インターネットを用いたハイブリッド実験のシステム構成

インターネットを用いたハイブリッド実験(以下 INHBex)はインターネット又は LAN を介して複数の載荷システム，解析システムを制御するシステムである．2 箇所の実験施設間で INHBex を行うと仮定した場合のデータフロー図を**図-1** に示す．本システムでは，クライアント・サーバー方式を採用している．クライアントは，地震応答計算・データ通信の制御を行い，サーバーは，データの受信・認識・送信を行う．まず，地震応答解析プログラムであるクライアント(WS0)が，任意の時刻 t における各部材の変位を計算する．世界中に点在する複数のサーバー(WS1，WS2)が，得られた変位のデータをインターネット又は LAN を介して WS0 から受け取る．加力・計測システムの中の実験制御機(PC1，PC2)がサーバー内に送られてきた変位のデータを認識する．加力・計測システムでは PC1，PC2 が認識したデータをもとに，アクチュエーターを介して強制変位を実験供試体に与え，得られた復元力のデータをサーバーに返す．その後，WS1，WS2 が，この復元力のデータを WS0 に送り，WS0 は，そのデータをもとに次の時刻 $t+\Delta t$ における部材の変位を計算する．なお，加力・計測システムは，それと同等な解析プログラム等に変更することもできる．

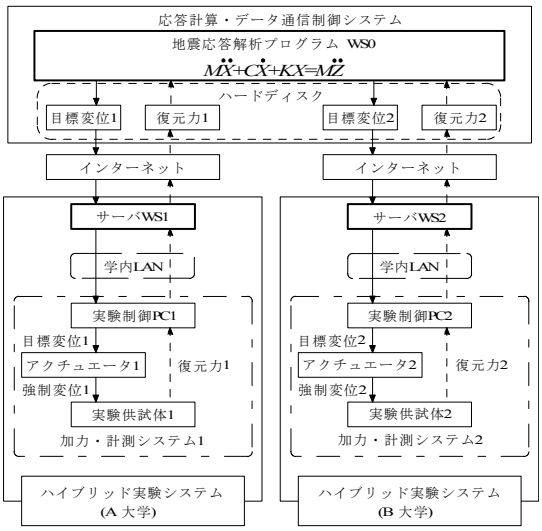


図-1 INHBex におけるデータの流れ

本研究における INHBex による地震時応答挙動シミュレーションは，大阪市立大学，京都大学および韓国科学技術院(以下それぞれ OCU，KU および KAIST)の 3 大学間にて行った．各サイトでは加力・計測システムと，動的弾塑性有限変位解析プログラム USSPD をそれぞれ実行した．

3. 免震構造と高減衰積層ゴム支承

免震構造は，地震に耐え得るように構造物の強度・剛性を上げるのではなく，積層ゴム支承等を用いて構造物自体に地震力を作用させないようにする構造である．免震構造物は，構造物の基礎部または中間層に免震装置を設置することによって，構造物の固有周期を長くし，かつ減衰性を高めている．すなわち，地震の強い揺れを与える短い周期での共振を避け，長周期で揺れることにより構造物が受ける地震力を弱める．免震構造物の振動性状の大きな特徴として，長周期，高

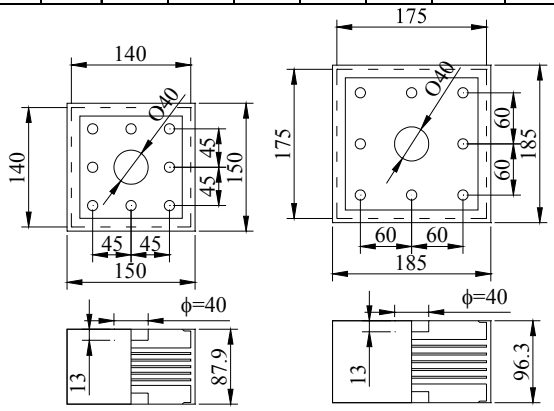
減衰性，変形集中が挙げられる．積層ゴム支承は，鋼板と薄いゴムを交互に積層・接着したもので，これにより鉛直方向の荷重に対しては，ゴムの横方向変形が鋼板で拘束されることにより高い鉛直剛性と耐力が得られる．一方，水平方向の荷重に対しては，ゴム部分のせん断変形は拘束されないので，低い水平剛性と大きな変形能力が得られる．

高減衰ゴム支承(以下 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．

本研究では，KU と KAIST にてそれぞれ HDR 供試体に載荷を行うため，各施設における試験機の載荷能力を考慮して，スケールが異なる 2 種類の HDR 供試体を製作した．表-1 に実構造物スケールでの HDR の諸元と 1/5 および 1/4 スケールでの HDR の各大学の供試体諸元をそれぞれ示す．また，それぞれのスケールでの HDR 供試体の形状を図-2 に示す．

表-1 HDR の諸元

基数 縮尺	支承 番号	橋軸(m) a(m)	橋軸直角 b(m)	ゴム総厚 t(m)	一次剛性 k_1(kN/m)	二次剛性 k_2(kN/m)	降伏荷重 Q_d(kN)	等価剛性 k_{eff}(kN/m)	等価減衰定数 h_{eff}
n=2 s=1	HDR1	0.600	0.600	0.168	37530	3560	419.90	4560	0.14
	HDR2	0.700	0.700	0.162	58500	5560	638.60	7437	0.15
	HDR3	0.700	0.700	0.162	59010	5600	645.20	7452	0.15
	HDR4	0.600	0.600	0.168	37530	3560	419.90	4560	0.14
n=1 s=1/5	HDR1	0.120	0.120	0.0336	3753	356	8.40	456	0.14
	HDR2	0.140	0.140	0.0324	5850	556	12.77	744	0.15
	HDR3	0.140	0.140	0.0324	5901	560	12.90	745	0.15
	HDR4	0.120	0.120	0.0336	3753	356	8.40	456	0.14
n=1 s=1/4	HDR1	0.150	0.150	0.0420	4691	445	13.12	570	0.14
	HDR2	0.175	0.175	0.0405	7313	695	19.96	930	0.15
	HDR3	0.175	0.175	0.0405	7376	700	20.16	932	0.15
	HDR4	0.150	0.150	0.0420	4691	445	13.12	570	0.14



(a) 1/5model　　(b) 1/4model

図-2 HDR 供試体図(単位：mm)

製作した供試体は，HDR2 と HDR3 であり実構造物に対してそれぞれ 1/5 と 1/4 のスケールである．HDR1，4 には載荷は行わない．

写真-1 HDR 供試体

対象としている高架橋モデルは，2 箱桁橋であり，1 橋脚あたりの支承は 2 個であるので，n=2 である．各橋脚の支承の数は 2 個であるが，実験では 1 個の供試体に対して載荷を行うので，各スケールにおける支承 1 個(n=1)あたりの諸元を示している．

4. 対象高架橋

4.1 基本モデル

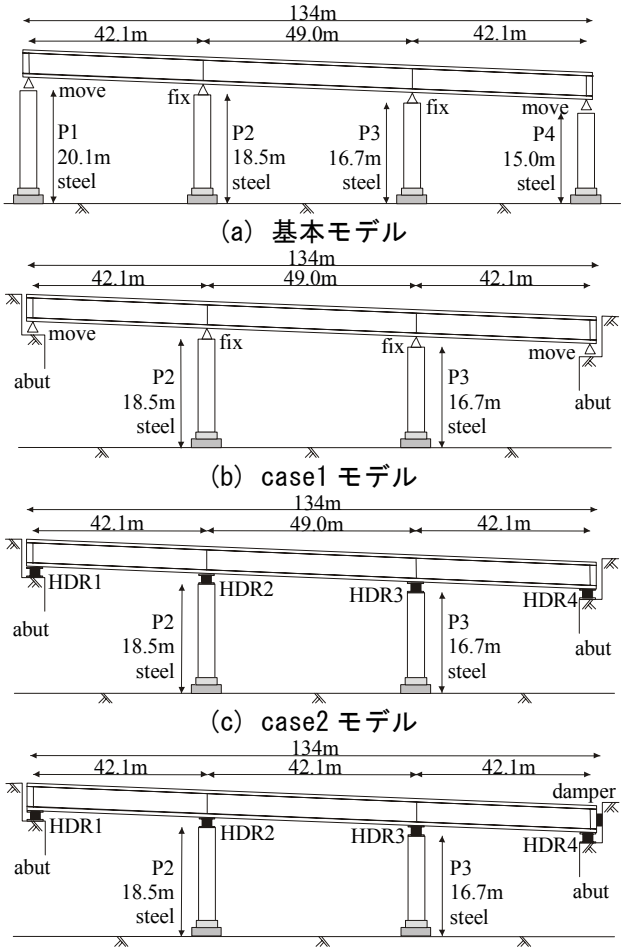
都市内における高架橋の地震時応答挙動を調べるため，文献 1)において示されている都市内の標準的な高架橋モデルを基本モデルにモデル橋(case1～case3 モデル)を設定した．基本モデルの構造概要および支承条件をそれぞれ表-2，表-3 に示す．また，基本モデルを図-3(a)に示す．

表-2 基本モデルの構造概要

橋梁形式	3径間連続鋼箱桁橋
橋脚形式	円形断面鋼製橋脚
基礎形式	鋼管杭
橋長	134m
支間割	42.1+49.0+42.1m

表-3 基本モデルの支承条件

橋脚	P1	P2	P3	P4
支承数(数/基数)	2	2	2	2
支持条件	可動	固定	固定	可動



(a) 基本モデル

(b) case1 モデル

(c) case2 モデル

(d) case3 モデル

図-3 対象高架橋モデル

4.2 case1 モデル

図-3(b)に示した case1 モデルは，基本モデルにおける両端の橋脚を橋台に置き換えたモデルである．まず，免震化されていない高架橋の地震時応答挙動を調べるため，case1 モデルにおいては，その支承を金属支承(図中の fix および move)とした．

4.3 case2 モデル

図-3(c)に示した case2 モデルは，免震高架橋の地震時応答挙動と HDR の免震効果を調べるために，case1 における金属支承を HDR に置き換えたモデルである．

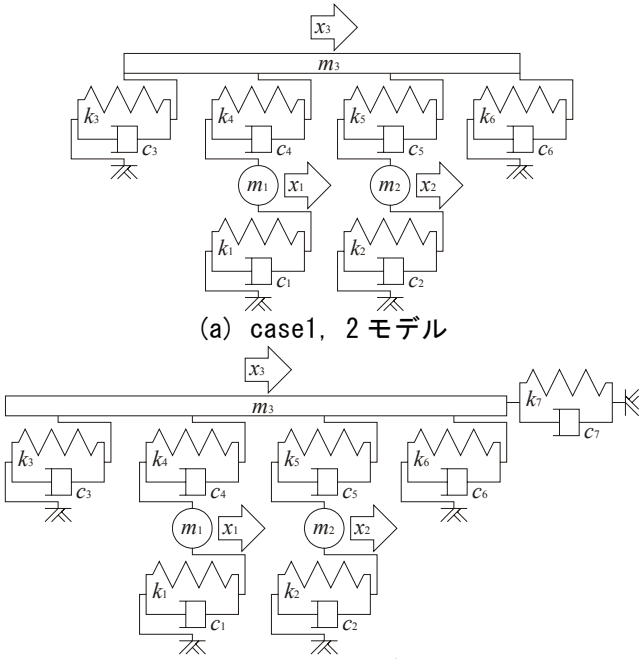
4.4 case3 モデル

図-3(d)に示した case3 モデルは，免震高架橋に設ける桁間緩衝材の性能・効果について検討するために，case2 モデルにおける桁端部に桁間緩衝材(図中の damper)を設置したモデルである．

5. 高架橋の地震時応答挙動シミュレーション

5.1 地震応答解析モデル

高架橋の地震時応答挙動を解析する力学モデルは，上部構造および 2 本の橋脚を質点とする 3 自由度系バネー質点系モデルである．各 case での力学モデルを図-4 にそれぞれ示す．また，入力地震波は東神戸大橋周辺(Ⅲ種地盤)で観測されたレベル 2，タイプⅡの地震動とした．



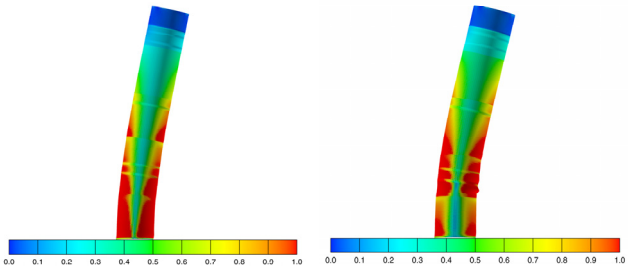
(a) case1，2 モデル

(b) case3 モデル

図-4 高架橋の地震応答解析モデル
(3 自由度系バネー質点系モデル)

5.2 case1

case1 ではまず，地震応答解析を行い，その後，INHBex により，地震応答シミュレーションを行った．case1 の INHBex では，載荷装置による加力・計測はなく，USSPD による橋脚に対する加力・計測のみとなる．図-5 に橋脚の相当応力分布図を示す．また，図-6 に case1 の地震時応答挙動を示す．



(a) P2　　(b) P3

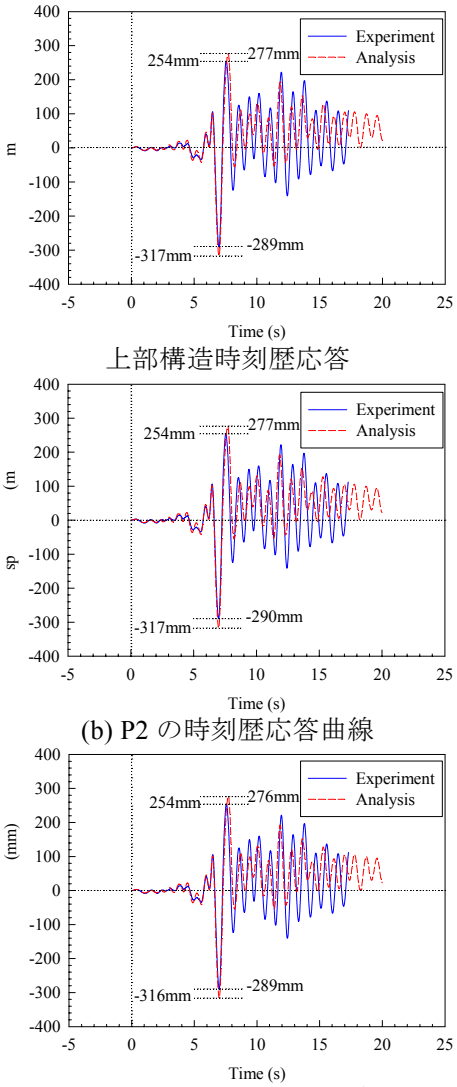
図-5 case1 での橋脚の相当応力分布図
(時刻：7 秒，変形倍率：10 倍)

5.3 case2

case2 モデルは，HDR を用いて免震化を図ったため，case1 モデルに比べて固有周期が長くなった．高架橋システムの長周期化により地震動との共振を避けることができ構造物の損傷・倒壊を防ぐと期待される．各高架橋モデルの固有周期を表-4 に示す．

case2 モデルでは，HDR の設計値での剛性を用いた

地震応答解析および INHBex を行った．INHBex は 3 施設間にて行った OCU では，USSPD により P2 および P3 の解析を，KU では，三次元加力システムにより HDR2 の載荷を，KAIST では，HDR3 の載荷をそれぞれ行った．図-7 に橋脚の相当応力分布図，図-8 に case2 の地震時応答挙動，および図-9 に載荷時における供試体の変形状況をそれぞれ示す．

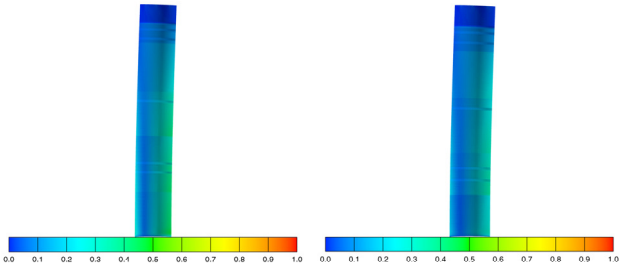


(c) P3 の時刻歴応答曲線

図-6 case1 の地震時応答挙動

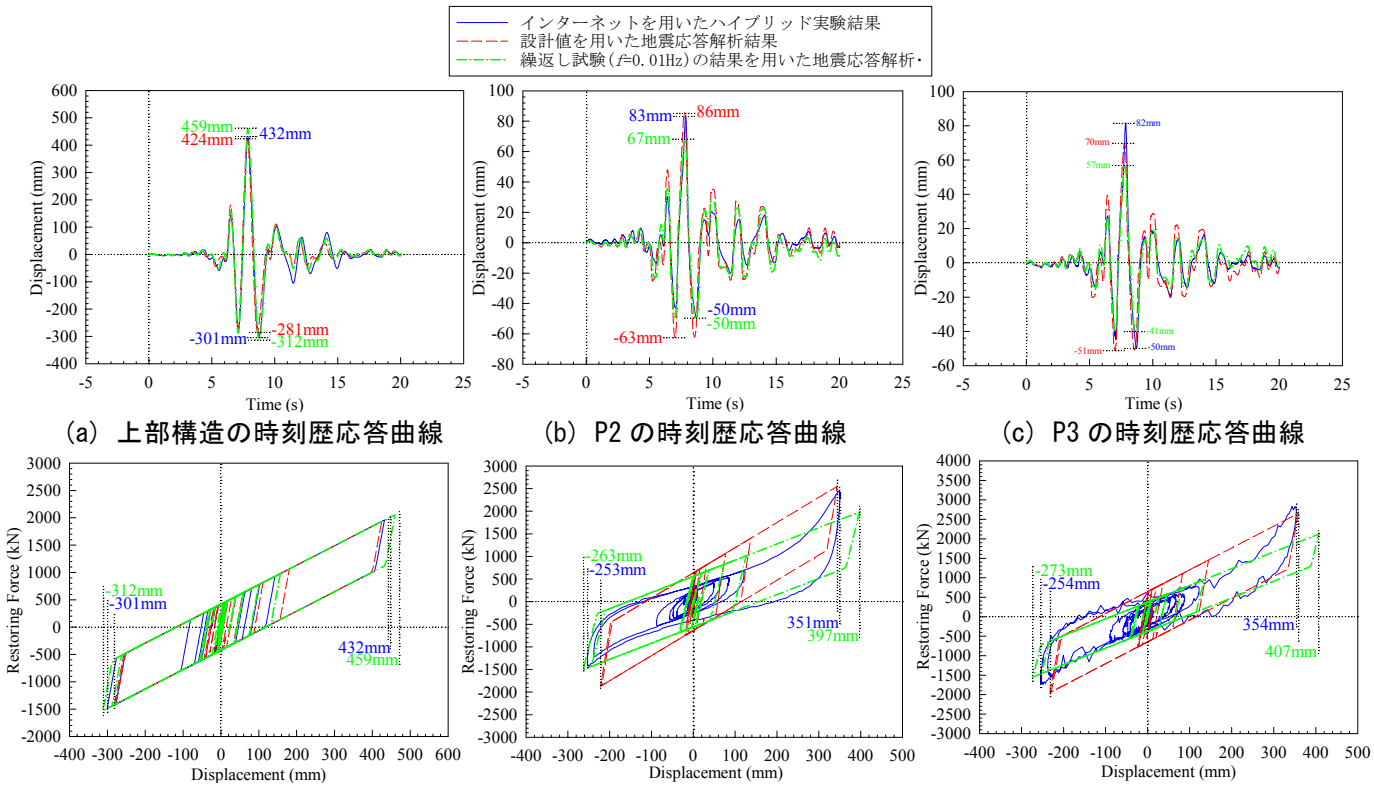
表-4 高架橋モデルの固有周期

モデル	固有周期(sec)
case1モデル	0.864
case2モデル	1.566



(a) P2　　(b) P3

図-7 case2 での橋脚の相当応力分布図
(時刻：7 秒，変形倍率 10 倍)



(a) 上部構造の時刻歴応答曲線　(b) P2 の時刻歴応答曲線　(c) P3 の時刻歴応答曲線

(d) HDR1，4 の荷重－変位曲線　(e) HDR2 の荷重－変位曲線　(f) HDR3 の荷重－変位曲線

図-8 case2 の地震時応答挙動

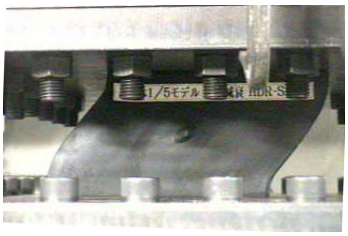
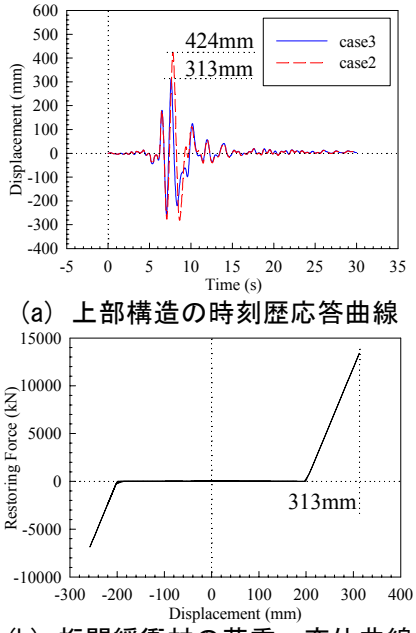


図-9 HDR 供試体の変形状況

5.4 case3

桁間緩衝材は，バネ剛性を HDR2(n=2，s=1)の等価剛性の 16 倍したものとした．桁遊間の余裕量は，15mm 程度とされており[2]，case1 モデル(既設構造物)における上部構造の最大応答変位は 316mm なので，遊間の長さは，330mm とした．緩衝材は，上部構造の応答変位が 200mm になった段階で復元力を返すように設定した．case3 での上部構造の時刻歴応答曲線を図-10 に示す．



(a) 上部構造の時刻歴応答曲線

(b) 桁間緩衝材の荷重－変位曲線

図-10 case3 の地震時応答挙動

6. まとめ

1) 非免震高架橋システムに対する，INHBex による地震時応答挙動シミュレーションでは，2 つの鋼製橋脚橋脚に局部座屈変形が生じた．

2) 免震化した高架橋モデルの固有周期は，非免震高架橋モデルの固有周期の 2 倍程度となった．

3) 免震高架橋システムに対する，INHBex にる地震時応答挙動シミュレーションでは，橋脚に局部座屈変形が発生せず，HDR の高い有効性が示された．

4) 桁間緩衝材を設置した免震高架橋モデルでは，緩衝材の剛性を適切に設定すれば桁衝突の回避が可能である．しかし，免震高架橋に桁間緩衝材を設置する際には緩衝材の力学的性能等を十分に検討する必要がある．

5) 3 大学間でインターネットを用いたハイブリッド実験を行い，国際間，複数サイト間での開発した同実験の適用性を確認した．

参考文献

1) (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，2000.4.

2) (社)日本道路協会：道路橋示方書(V 耐震設計編)・同解説，丸善，2002.3.