

支承部軸力変動に着目した滑り免震橋梁の振動台実験

家村浩和¹・高橋良和²・柳川智史³・日比雅一⁴

¹京都大学工学研究科都市社会工学専攻教授 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail: iemura@catfish.kuciv.kyoto-u.ac.jp

²京都大学工学研究科都市社会工学専攻助手 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail: yos@catfish.kuciv.kyoto-u.ac.jp

³東海旅客鉄道株式会社

⁴京都大学工学研究科大学院修士課程 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail: hibi@catfish.kuciv.kyoto-u.ac.jp

本研究では、滑り免震橋梁を対象として振動台実験を実施し、地震動により支承部に軸力変動が生じた場合の応答性状を検討した。入力地震動は橋軸直角方向を基本とし、鉛直地震動同時入力や桁重心高さをパラメータとした実験を実施した。その結果、大きなロッキング振動が発生し、支承部に生じる軸力が減少する場合でも、橋桁全体の応答に対する影響は小さいことを確認した。さらに、摩擦力の変動を考慮した地震応答解析を行い、既往の地震記録レベルでは、軸力変動が生じる場合でも、応答値及び滑り型免震支承のエネルギー吸収特性にはほとんど変化はないが、特に大きな上下動が作用すると、免震効果が発揮できなくなる可能性があることを確認した。

Key Words : frictional isolated bridge, shake table tests, variational vertical load of isolator

1. はじめに

免震構造は兵庫県南部地震を契機にその利点が認識され、ゴム系免震支承を中心に橋梁や建築物に積極的に採用されている。一方、滑り系免震支承は滑り摩擦による免震効果を期待するものであり、滑り免震支承とゴムバッファを併用した機能分離型免震システムなどが開発されている。

滑り免震支承の免震効果は摩擦現象によるものであるため、支承部に作用する軸力や速度に大きく影響を受ける。摩擦係数の滑り速度依存性による影響については岡本ら¹⁻³⁾により検討がなされているが、軸力が摩擦係数に及ぼす影響まで考慮した検討は多くない^{4,5)}。これらの摩擦特性が及ぼす影響が明確でないために、滑り系免震支承は積極的には採用されてはこなかった。しかしゴム系免震支承は、大きな地震力への対応に伴い肥大化する傾向にあり、設置スペースの確保や交通振動など、設計・施工およびコスト面での問題が顕在化し、滑り系免震支承が注目されてきている。本研究では、地震応答により支承部に軸力・速度変動が生じた場合の滑り免震橋梁の地震時応答特性を検討するため、振動台実験を実

施するものである。さらに面圧・速度依存性を考慮した支承モデルを用いた地震応答解析を実施し、水平方向の地震時性能に対する影響を検討する。

2. 機能分離型免震システム

機能分離型免震システムは、滑り型免震支承とゴムバッファを組み合わせたものである。全上部工重量を滑り支承で支持するため、復元力および周期特性と復元力機能を期待するゴムバッファは必要最小限の体積で要求機能を満たすことができ、従来のゴム支承と比較してコンパクトな形状を実現できる。機能分離型免震システム構造例を図-1に示す。

従来のゴム系免震支承ではアイソレーターとダンパーが一体となっており、ゴムの変形能やひずみを考慮した設計が必要となる。しかし機能分離型免震システムでは、常時の設計と地震時の設計を別々に行うことができ、簡素で自由度の高い設計を可能にしている⁶⁾。またコンパクトな形状により、狭い桁下遊間への設置が可能であり、コスト縮減効果も期待できる。

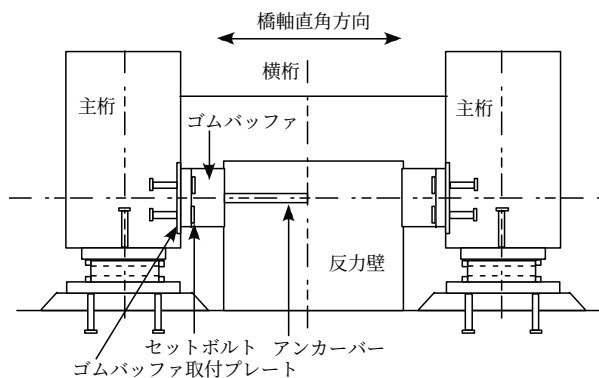


図-1 機能分離型免震支承構造図一例

3. 滑り免震支承の特徴と適用に際する問題点

摩擦法則として知られているCoulombの法則は、摩擦係数は摩擦面に作用する面圧に関わらず一定であり、速度の影響も受けない、というものであるが、現実の摩擦現象ではCoulomb摩擦が成り立たないことも多い。滑り支承によく使用されるPTFE(テフロン)とSUS(ステンレス)間の滑り現象に関する過去の研究からも、摩擦係数の速度および面圧依存性が確認されており、低滑り速度時と高滑り速度時では摩擦係数が異なること¹⁾、また鉛直荷重が大きくなるほど摩擦係数が小さくなること⁷⁾などが報告されている。また、摩擦係数は材料の組み合わせ、表面の粗さ、汚れの有無や温度によっても変化する。

滑り免震支承を構造物に採用することを考えると、支承部に速度変化が生じるのはもちろん、上下地震動などの影響により支承部に作用する軸力も変化する。一般に連続桁橋の場合、免震支承に生じる軸力変動の発生メカニズムの主なものとして、以下の要因が挙げられる⁵⁾ (図-2)。

- A) 上下地震動に起因する橋桁の鉛直慣性力
- B) 水平地震動に起因する橋軸直角方向の橋桁のロッキング振動
- C) 上下地震動に起因する橋桁のたわみ振動

支承部の軸力変動は、摩擦係数も変動させ、その積で表される滑り摩擦は複雑に変化する。そのため、水平方向の地震応答性能に悪影響を及ぼすことが考えられ、特に、長周期かつ大振幅の軸力変動が生じ、最も軸力が抜ける瞬間に大きな水平地震動が作用するケースを想定すると、橋梁の耐震安全性上に大きな問題が生じる可能性がある。

4. 振動台実験概要

本研究では、上述したような滑り型免震支承に伴う問題点を検討するため、京都大学防災研究所3次元大型振動台を用いて、道路橋上部工模型の振動台

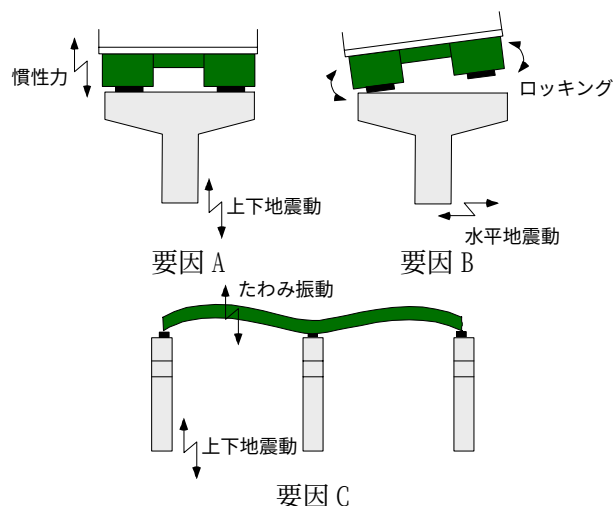


図-2 支承部軸力変動発生要因

表-1 相似則

項目	模型/実橋	項目	模型/実橋
長さ	$1/S$	加速度	1
面圧	1		
時間	$1/\sqrt{S}$	速度	$1/\sqrt{S}$
質量	$1/S^2$	重量	$1/S^2$
周期	$1/\sqrt{S}$	振動数	$\sqrt{S}$
ばね剛性	$1/S$	慣性力	$1/S^2$

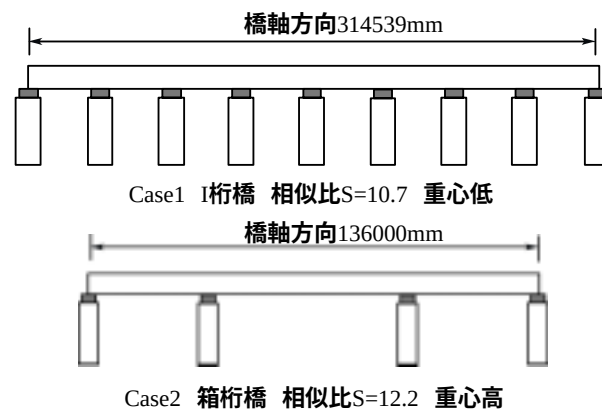


図-3 対象橋梁

実験を行った。実験では特に滑り免震支承部に軸力変動が生じた場合の床組系の水平地震応答性状を検討した。以下に実験概要について述べる。

(1) 考慮する軸力変動と相似則

実験では上記軸力変動発生要因のうち、要因A)、B)に着目した。これら要因の影響が実橋と同じようになるよう、桁重心高さ/桁幅比、加速度および滑り支承の面圧を実橋と模型で一致させた。用いた相似則を表-1に示す。

(2) 実験対象橋梁

本実験では、滑り型免震支承の採用を予定している以下の橋梁を対象とした (図-3)。

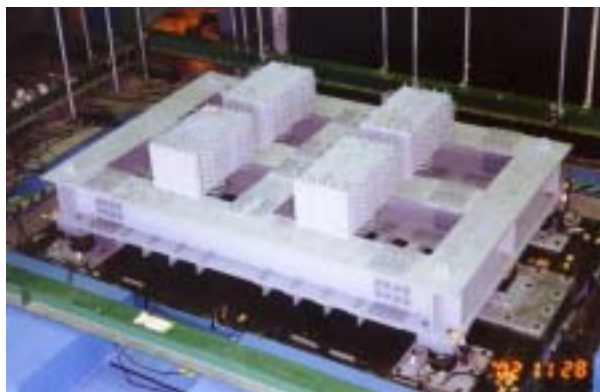


図-4 実験供試体全景

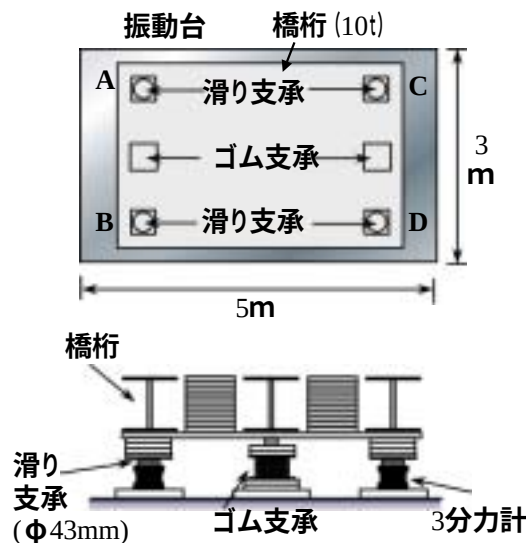


図-5 実験供試体詳細

- 8径間連続非合成鋼I桁橋 (Case 1)
- 3径間連続非合成鋼箱桁橋 (Case 2)

これらの橋梁はともに機能分離型免震支承を採用しようとするものである。これらの橋梁を選択した理由は、桁幅/桁重心高さ比(h/b)が異なるため(I桁： $h/b=0.122$ ，箱桁：0.244)，ロッキング振動による軸力変動の影響が異なると考えられるためである。

(3) 実験供試体

a) 全体モデル

本実験で使用した供試体は、10 tonの橋桁及び4つの滑り型免震支承と2つの積層ゴム支承からなる上部工モデルである(図-4, 5)。ここで、上部工モデルは、相似比の制約から、橋梁一連ではなく、中間支点部を対象としている。相似比 S はCase 1が10.69，Case 2が12.17である。実験ではウェイトの設置高さ等を実験ケース毎に変更・調整することで重心高さを設定した。

b) 滑り免震支承

滑り免震支承供試体の滑り材は繊維補強型PTFE板で、上査下面はSUS板である。また滑り免震支承は荷重支持の役割も果たしており、橋桁は4つの滑り支承により支持されている。供試体の寸法は、滑

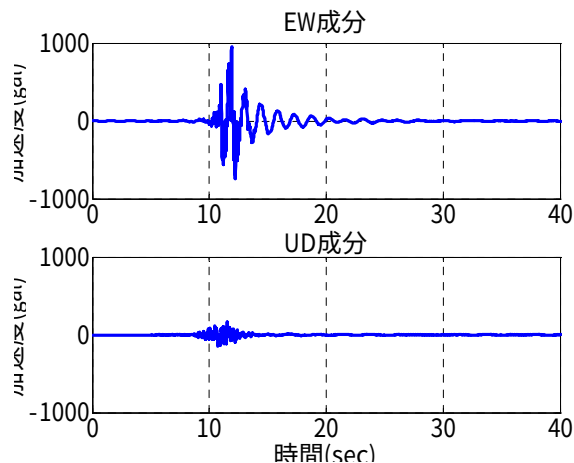


図-6 入力地震動

り支承の面圧(16.9MPa)より算出し、直径43mmとした。

振動台実験に先立ち実施した基本特性確認試験の結果、速度依存性および面圧依存性が確認された。

c) ゴム支承

ゴム支承は天然ゴムを用いた積層ゴム支承である。ゴム支承の剛性は、実橋でI桁橋が18.5 (kN/mm)，箱桁橋が13.7(kN/mm)のものをを用いており、相似則に従い供試体を作成した。

なお、上部工荷重をできるだけ支持しないよう、実験ではゴム支承上部に隙間を設けて鉛直力が作用しない構造とした。また、上部工水平力はせん断キーによりゴム支承に伝達させた。

(4) 振動台入力波

本研究では、床組系のみを用いて実験を行うため、振動台入力波として、地震動をそのまま入力するのではなく、想定する地震動(図-6)を用いた橋梁全体系の応答解析を実施し、支承部における水平・鉛直方向の水平・上下応答加速度を入力加速度として用いた。

(5) 計測項目

橋桁および滑り支承の水平および上下変位をレーザー変位計により計測した。また橋桁の3成分加速度も計測している。滑り免震支承に働く荷重を正確に把握するため、4箇所の滑り支承下面に3分力計を設置し、滑り面に生じる x ， y 方向の水平荷重(摩擦力)と z 方向の鉛直荷重(軸力)を測定した(図-5)。

6. 実験結果および考察

(1) 軸力変動

Case 1, 2において支承Aに生じた軸力変動を図-7に示す。ここでは計測した軸力を、発生要因別に分解して示している。鉛直慣性力はほとんど差はないが、要因(B)による軸力変動は重心位置の高いCase 2の方が大きくなっている。また、Case 1の振動方向

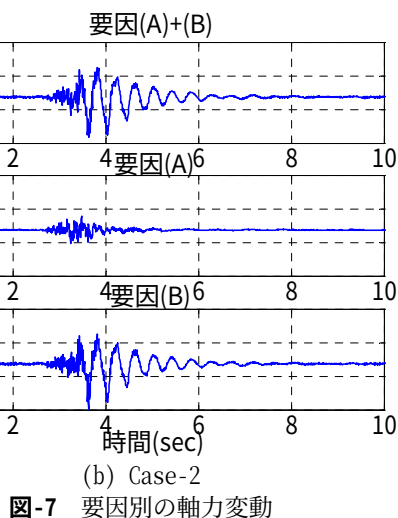
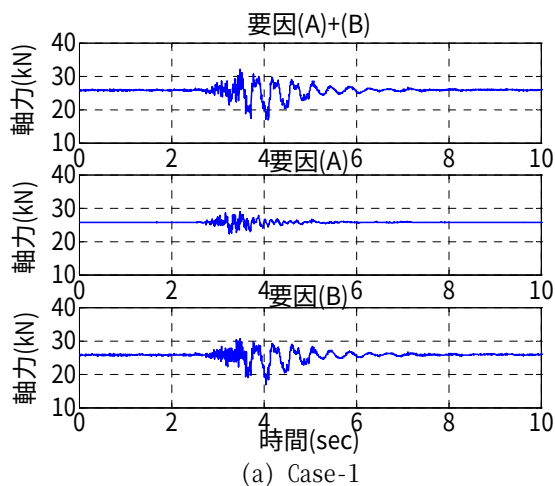


図-7 要因別の軸力変動

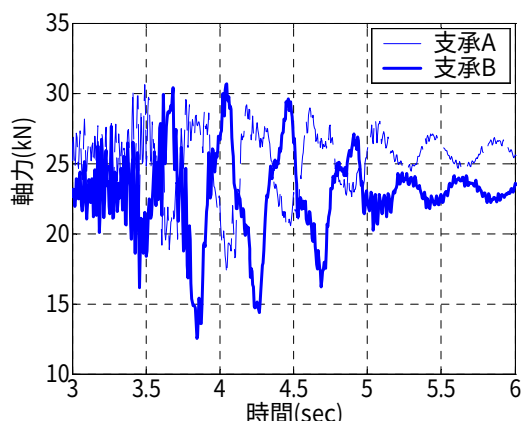


図-8 支承A, Bにおけるロッキングによる軸力変動

の隣り合う支承A, Bの要因(B)による軸力変動を重ね合わせたものを図-8に示す。ロッキング振動の影響により一方の軸力が増加するときに他方は減少していることが分かる。

(2) 履歴曲線

Case 1の支承A～Dの履歴曲線を図-9に示す。履歴曲線が台形をしているのはロッキング振動の影響であり、支承の逆方向に振動する場合には、浮くよ

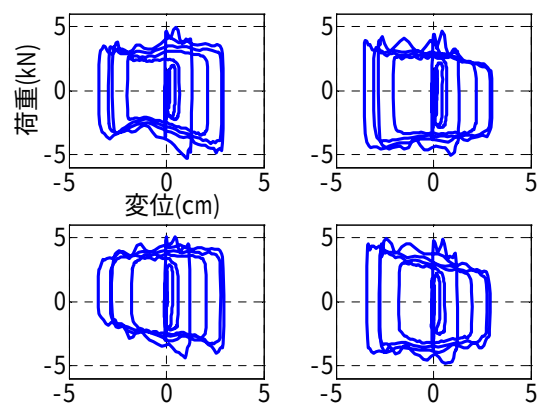


図-9 各支承の履歴曲線

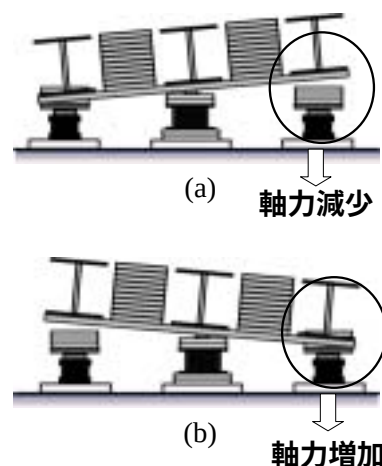


図-10 ロッキングと軸力の増減

うな動き(図-10(a))をするため軸力が減少し、摩擦力は小さくなる。逆の場合には橋桁が滑り支承を押しつけるような動き(図-10(b))をするため軸力、摩擦力は大きくなる。これより摩擦型免震支承は複雑な挙動をしているように見えるが、支承A～Dの履歴を足し合わせると、ほぼ左右対称の履歴を描いている(図-11)。これは、ロッキング振動によって一方の支承の軸力が減少するとき、隣り合う支承の軸力が逆に増加するため、トータルではロッキング振動の影響がキャンセルし合うためである。このように個々の支承においては複雑な挙動を示すものの、橋桁全体を考えるとロッキング振動はキャンセルされ、結果水平地震応答性状に大きな影響はないと考えられる。

(3) 上下地震動の影響

Case 1の上下動がない場合(要因(B)のみ考慮)の支承4個分の履歴曲線を図-12に示す。上下動がある場合(要因(A)+(B)を考慮)と比べると履歴曲線の凹凸が小さいが、これは上下動がある場合には鉛直慣性力による影響で摩擦力が変動したからである。また、応答値に多少差はあるものの、上下地震動がある場合の4支承全体の履歴吸収エネルギーが532 kNcmであったのに対し、上下地震動がない場合でも531 kNcmであり、本実験で用いた入力波では大

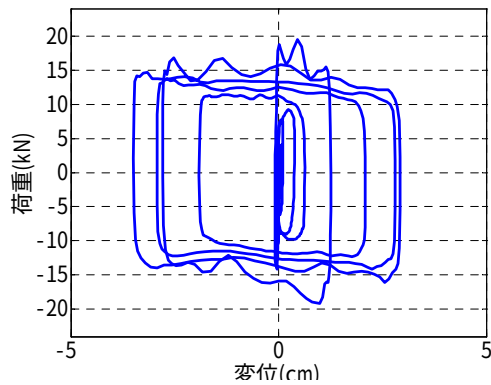


図-11 4支承の履歴の合計(上下動あり)

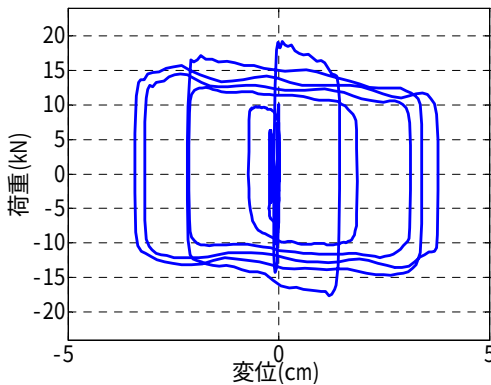


図-12 4支承の履歴の合計(上下動なし)

きな影響はなかった。

6. 地震応答解析

(1) 解析方法

実験で実施できなかった大きな上下動が作用した場合の影響を検討するため、地震応答解析を実施した。上下動の大きさを実験に用いた波形の振幅を変化させることで、上部工の加速度、変位および支承の吸収エネルギーに着目する。

解析では、実験Case 1の上部工を一質点にモデル化した。これは軸力変動要因のうち、ロッキングによるものは全体応答を考えるとキャンセルされることが確認されたため、上下地震動による要因(A)のみを考えることになる。

(2) 滑り免震支承モデル

本解析に用いた滑り免震支承モデルは、摩擦力の速度・面圧依存性を表現できるものである⁷⁾。本モデルは、工学的に滑らかな面でもミクロに見ると凹凸があり、Hertz接触をしている個々の接触点における凝着部が確率的に分布している面接触状態(図-13)と、PTFEとSUSの材料特性を考慮したものである。解析に用いる摩擦係数 μ は速度(V)、面圧(P)を用いて次式のようになる。

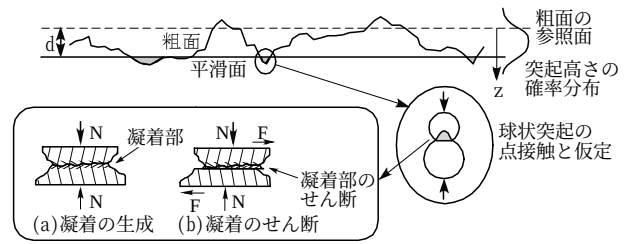


図-13 摩擦発生モデル(凝着・粗面の面接触)

$$\mu(V, P) = s' [1 - \exp(-nV)] \cdot \frac{[1 - \exp(-kP)]}{P} + \alpha \quad \dots (1)$$

ここで、パラメータは実験結果より同定し、 s' 、 n 、 k および α はそれぞれ、1.379、0.197、0.102、0.046とした。上式に軸力を乗じた摩擦力を降伏力としたバイリニアモデルを支承モデルとして用いた。二次剛性はゴム支承の剛性に設定した(初期剛性は二次剛性の10,000倍)。

(3) 解析結果

図-14, 15に、上下動がない場合と上下動振幅500%の場合の支承部の軸力変動および履歴曲線を示す。これを見ると、支承部の軸力が大きく変化すれば支承履歴は変化するものの、履歴形状は大きく変化しているようには見えない。これは(1)式からも分かるように、摩擦係数は面圧(軸力)が大きくなると逆に小さくなる傾向を示すため、積である摩擦力は大きく変動しないことが原因の一つであると考えられる。

図-16に、上下動の加速度を変化させた場合の応答倍率(上下動がない場合を1とする)を示す。加速度振幅が大きくなるにつれて、上部工の加速度、変位の応答倍率は大きくなる傾向を示しているものの、本解析に用いたモデル、地震動では、上下地震動の振幅が1000 galを超えても著しい免震性能の低下は生じなかった。これは上下動が大きい場合でも、軸力が変動している時間が一瞬であるため水平応答に大きな影響は見られなかったためと考えられる。

7. 結論

- 振動台実験により、地震動により発生する支承部の軸力変動により、個々の支承は複雑な挙動を示すものの、免震橋梁床組全体を考えると橋桁のロッキング振動による影響がキャンセルされ、水平応答には大きな影響を及ぼさないことが分かった。
- 滑り免震支承の面圧・速度依存性を考慮した地震応答解析の結果、対象とする橋梁に対しては上下動の振幅を変化させても大きな影響は確認されなかった。ただし支承の軸力が抜けないよう注意する必要がある。

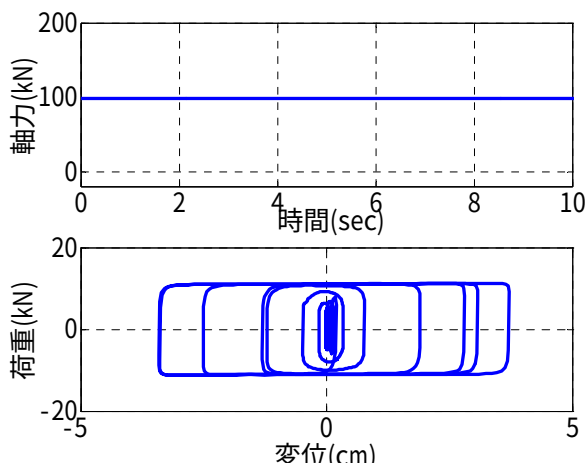


図-14 軸力と支承履歴（上下動無し）

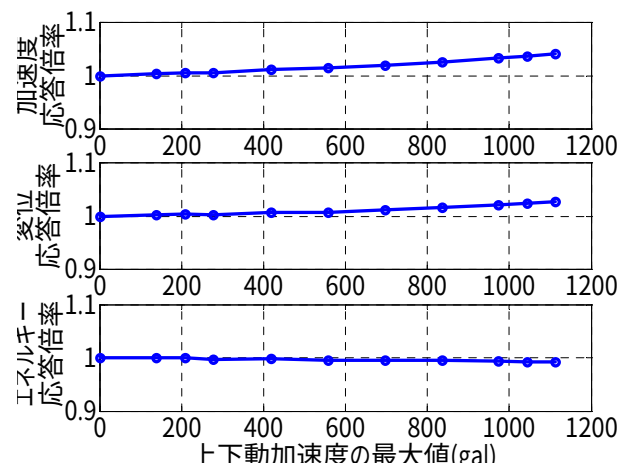


図-16 上下動による応答比率

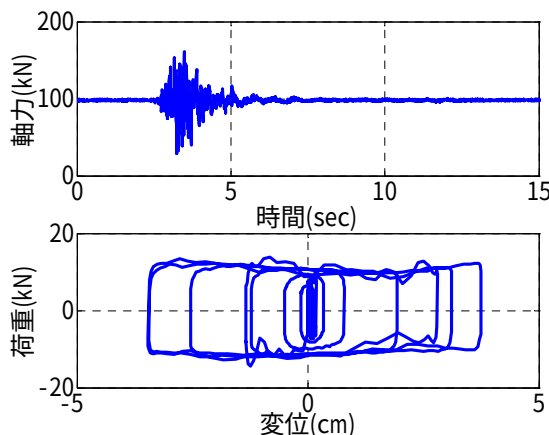


図-15 軸力と支承履歴（上下動 500%）

謝辞：本研究を進めるにあたり、阪神高速道路公団に御協力をいただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 岡本晋, 藤井俊二, 尾崎大輔, Constantinou, M., Tsopelas, P.: すべり方式免震システムを有する橋梁

の動特性に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.507/I-30, pp. 167-177, 1995.

- 2) 岡本晋, 深沢泰晴, 藤井俊二, 尾崎大輔: すべり方式免震システムを有する橋梁の地震時挙動特性, 土木学会論文集, No.513/I-31, pp. 191-200, 1995.
- 3) 岡本晋: すべり方式免震システムの地震時挙動に及ぼす上下動の影響に関する基礎的研究, 第23回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 517-520, 1995.
- 4) 家村浩和, 高橋良和, 中島一浩, 小川一志: 上下動を受ける摩擦減衰型免震支承の地震応答特性, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 737-740, 1999.
- 5) 高橋良和, 家村浩和, 平井崇士: 滑り型免震支承の軸力変動が連続桁橋の地震応答に及ぼす影響, 第26回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 1077-1080, 2001.
- 6) 伊津野和行, 袴田文雄, 中村一平: 機能分離型支承装置の動特性と設計手法に関する研究, 土木学会論文集, No.654/I-52, pp. 233-244, 2000.
- 7) 高橋良和, 家村浩和, 日比雅一: 滑り型免震支承の速度・面圧依存型数値モデルの提案, 土木学会関西支部年次学術講演概要, pp. I-62, 2003.

(2003. 6. 29 受付)

SHAKE TABLE TESTS FOR FRICTIONAL ISOLATED BRIDGE

Hirokazu IEMURA, Yoshikazu TAKAHASHI, Satoshi YANAGAWA
and Masakazu HIBI

In order to investigate the effect of variational vertical load of isolators on seismic response of bridges, the shake table tests and the numerical analysis were conducted. In these tests, the variational vertical load was produced by the combination of the vertical inertia force and the rocking behavior of the girder. From the results, the hysteretic shape of each isolator was trapezoid and the frictional coefficient varied during tests, but the resultant of hysteresis loops of all isolators was rectangular shape and relatively smooth. As the results it is found that the seismic responses of the bridges were stable and the large amount of hysteretic damping of frictional isolators can be expected even under the variational vertical load.