

I-73

ランダム波形入力時の鋼製免震支承の動的特性

パシフィックコンサルタンツ ○F会員 林 亜紀夫
 北海道開発局開発土木研究所 正会員 三田村 浩
 日本製鋼所 室蘭製作所 正会員 別所 俊彦
 北海道開発局開発土木研究所 正会員 佐藤 昌志

1. はじめに

著者らは鋼製免震支承の特性を調べ、免震装置としての有効性を検証して来た。これまでには、鉛直荷重を与えながら正弦波状の上下部相対変位を与える実験¹⁾²⁾³⁾、振動台上で正弦波状の加速度を与える実験⁴⁾⁵⁾、および、リニアウェイ上を滑走させた上で急停止させる実験⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾を行い、それぞれの実験結果と、装置の幾何学的形状と摩擦の効果を元に作成した理論式による結果を比較した結果を報告した。

本論文では、上部構造に相当するマスと鋼製免震支承によって構成する供試体を用いて、振動台上でランダムに加振する実験を行い、その結果を報告している。実際の地震動は複雑で多様な特性を有しているので、単純な調和波形が続く場合や、振巾の大きい $1/2 \sim 1$ サイクルの波のみで完全に模擬できるものではなく、入力の振巾や周期が変化することと構造がそれに追従呼応する過渡振動の様相についても知る必要があると考えたからである。非線形動的解析と等価線形法によって加振時の供試体挙動を再現することを試み、理論式に用いる定数を求めている。

2. 実験方法

実験に用いた供試体および振動台を図-1に示す。振動台はリニアウェイ上に設けられ、水平方向に可動である。アクチュエーターがテコ比1:3のテコを介して設けられ、加振を行った。

免震装置は、表-1のAに示す諸元を有する装置を上部構造の4隅に設けたケースと、Bに示す諸元を有する装置を上部構造の2隅に設けて、残る2隅にはキャスターを設けたケースとした。本論文で用いている鋼製免震支承は、鉛直荷重に比例する水平方向反力を生じるものであるが、Bのケースは、鉛直荷重に比例する水平方向反力の約2倍の慣性力を分担した場合に相当する。

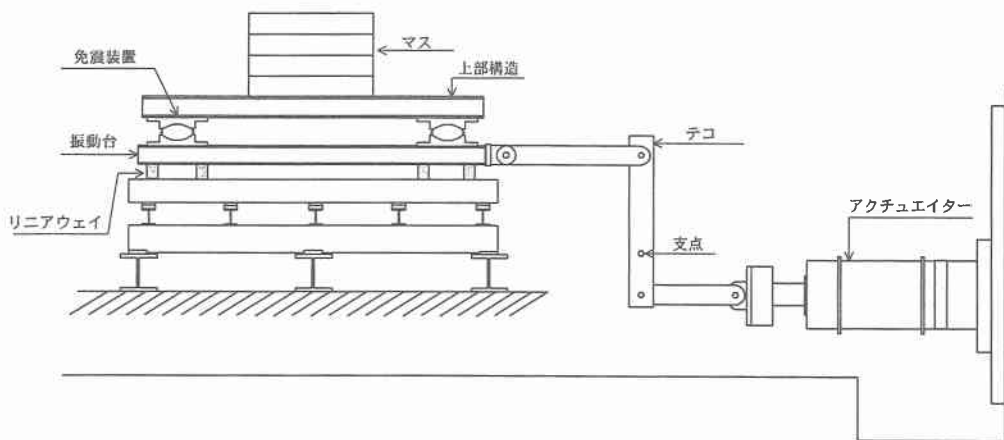


図-1 供試体および振動台

A study on a behavior of a seismic-isolation device under random excitations
 by Masashi SATOH, Toshihiko BESSHO, Hiroshi MITAMURA, and Akio HAYASHI

表-1

ケース	回転体の曲率半径 R	回転体の厚さ t	すべり面の材質
A	30 cm	18 cm	純テフロン
B	25 cm	25 cm	充填材グラファイトを含むテフロン

表-2

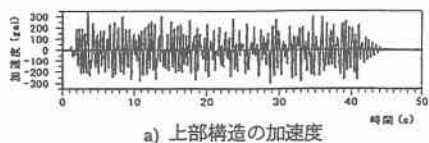
ケース	波形の説明
ピンクノイズ	0.5Hz～10.0Hzの範囲で一定の振動数成分を有する
ピンクノイズ×2	上記を2倍の振巾に正規化したケース
温根沼大橋	1994年10月4日北海道東方沖地震を温根沼大橋P3橋脚付近地盤において測定した波形NS成分
模擬波	文献10)に報告された模擬波形
神戸海洋気象台	1995年1月17日兵庫県南部地震を神戸海洋気象台において測定した波形NS成分

なお、ステンレス鋼製の回転体を受けるすべり面は、Aのケースでは純テフロンを用いており、Bのケースでは充填材グラファイトを含むテフロンを用いている。アクチュエーターの制御は変位制御とし、表-2に示すようなピンクノイズと、地震動観測波形をアクチュエーターの能力に合わせて振巾を正規化したものを用いた。表-2に示したピンクノイズは、入力振巾や周期が変化することと構造がそれに追従呼応する過渡振動の様相を知る目的で作成したものである。本論文で取り上げているような摩擦系の免震装置は、静摩擦に相当する以上の慣性力が働くまでは動かず、上下部構造間は固定支承と同等である。したがって、振動台の能力が許す範囲で、最大の加速度振巾を生じ、しかも振動数成分が偏らないような入力が必要とされる。振動台を駆動するアクチュエーターの制御能力は、ポンプの能力、アキュムレイタの能力、制御バルブの能力、および、コントローラの制御側の能力の影響を受けるが、この実験ではアキュムレイタおよび関連機器の性能票を参考に、速度振巾が5.0kineとなる場合を能力限界と考えた。さらに予備実験の結果から、10.0Hz以上の範囲における制御が十分でないことがわかった。0.5Hz～10.0Hzの範囲で均等な加速度振巾成分とランダムな位相成分を持つ正弦波を逆フーリエ解析によって時刻歴波形とし、アクチュエーターの制御において過大な始動と停止とならないように、漸増部と漸減部を包絡曲線として与えた。また、制御の精度低下を容認しながら加速度振巾が高いケースとしてピンクノイズ4を2倍の振巾に正規化したケースを設けた。

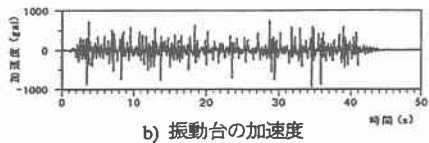
温根沼大橋波形は、北海道における地震動の特性を端的に再現するものであり、しかも地震動の主要動部分が比較的長いと言う特徴を持っている。これに較べると、神戸海洋気象台波形は、短周期の成分が多く、地震動の主要動部分が比較的短いと言う特徴を持っている。模擬波形は、道内の地震の平均像を表現する試みとして文献10)に報告されたものである。アクチュエーターの制御能力を考えて、何れの観測波形も原波形をそのまま制御波形とするのではなく、速度振巾が5.0kineとなるように正規化したものを用いた。

3. 実験結果と考察

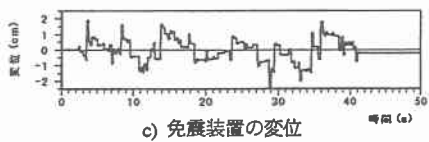
実験によって得られた結果の内から代表的な記録波形を選び、免震装置を上部構造の4隅に設けたAのケースを図-2～図-5に、2隅の免震装置ををキャストに置き換えたBのケースを図-6～図-9に示す。いずれのケースにおいても上部構造の加速度は振動台の値に較べて低減されている。



a) 上部構造の加速度

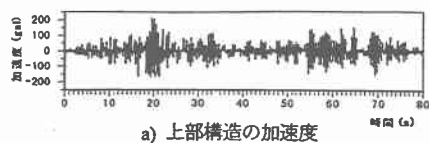


b) 振動台の加速度

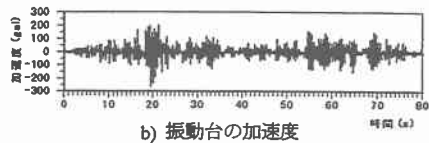


c) 免震装置の変位

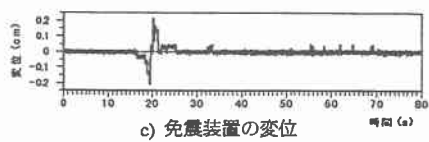
図-2 実験値 ケース:A(免震装置4基使用)
入力:ピンクノイズ×2



a) 上部構造の加速度

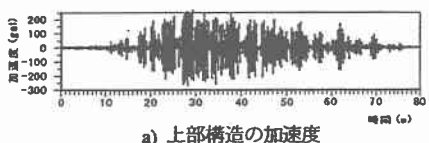


b) 振動台の加速度

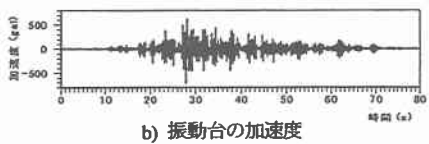


c) 免震装置の変位

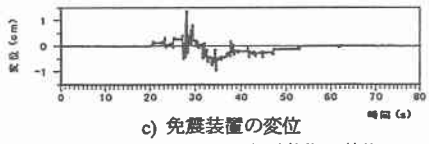
図-3 実験値 ケース:A(免震装置4基使用)
入力:模擬波



a) 上部構造の加速度

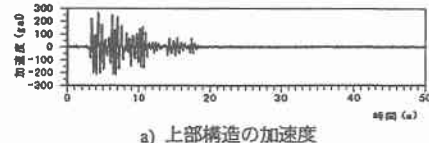


b) 振動台の加速度

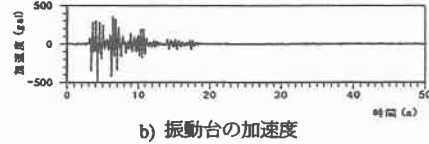


c) 免震装置の変位

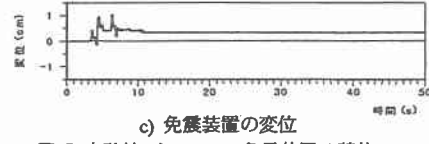
図-4 実験値 ケース:A(免震装置4基使用)
入力:温根沼大橋



a) 上部構造の加速度

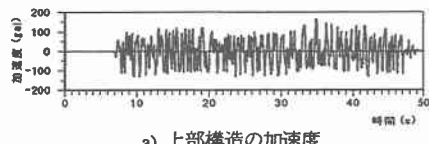


b) 振動台の加速度

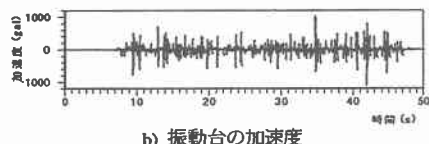


c) 免震装置の変位

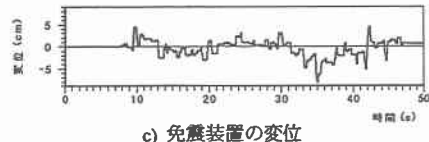
図-5 実験値 ケース:A(免震装置4基使用)
入力:神戸海洋気象台



a) 上部構造の加速度

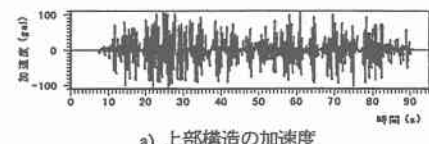


b) 振動台の加速度

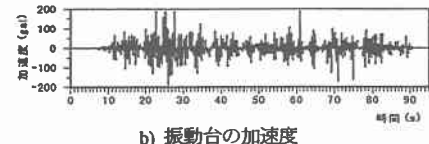


c) 免震装置の変位

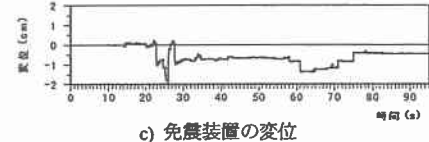
図-6 実験値 ケース:B(免震装置2基使用)
入力:ピンクノイズ×2



a) 上部構造の加速度



b) 振動台の加速度



c) 免震装置の変位

図-7 実験値 ケース:B(免震装置2基使用)
入力:模擬波

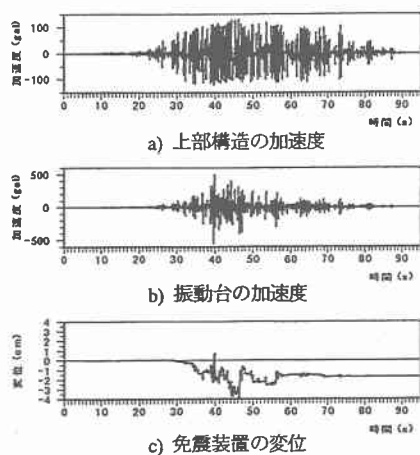


図-8 実験値 ケース:B(免震装置2基使用)
入力:温根沼大橋

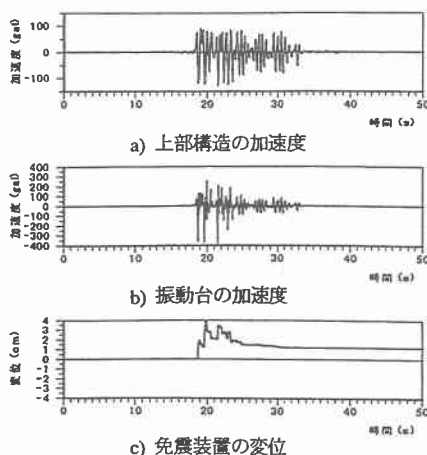


図-9 実験値 ケース:B(免震装置2基使用)
入力:神戸海洋気象台

4. 動的解析による近似

振動台の加速度時刻歴を入力と考え、上部構造に相当するマスと免震装置で構成される1質点1自由度のモデルを用いて、次の2通りの動的解析を行い実験の再現を試みた。解析結果の内から代表的なものを図-10～図-13に示し、比較のために、実験結果による絶対加速度-変位関係を図-14～図-15に示す。免震装置の変位の図中で、太線は解析値、細線は実験値である。

①バイリニアモデル：式(1)～式(5)に示した理論式により求められる特性を免震装置の復元力特性として与える非線形時刻歴解析（動的解析による照査に相当する）図-10～図-11

②等価線形法モデル：免震装置の復元力特性として与える等価剛性 K_B と等価減衰定数 h_B を式(6)～式(7)によるものとし、線形時刻歴解析による（一般的な免震橋梁の設計計算手法に相当）図-12～図-13

$$K_2 = \frac{V \cdot (1 + \tan(\alpha + \rho)^2)}{(2 - C_B) \cdot R \cdot \cos \alpha} \quad \text{式(1)}$$

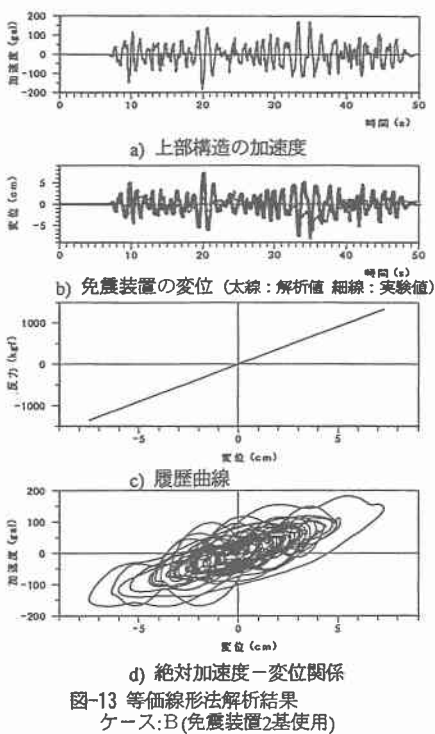
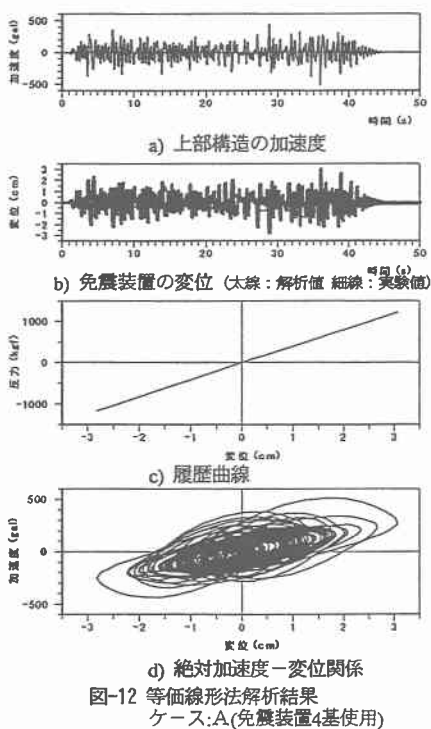
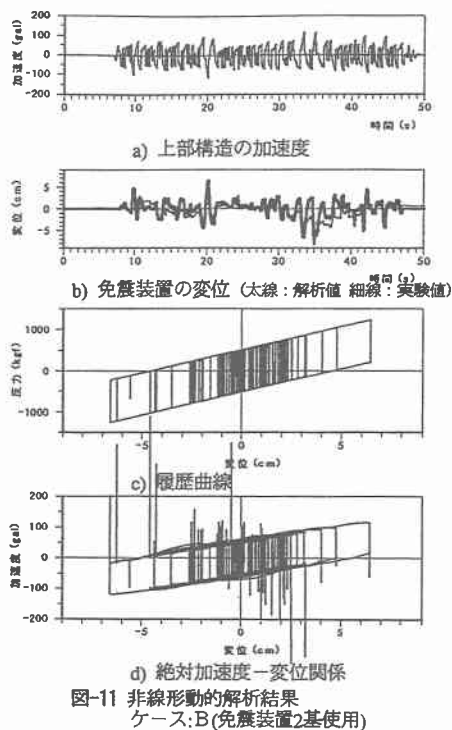
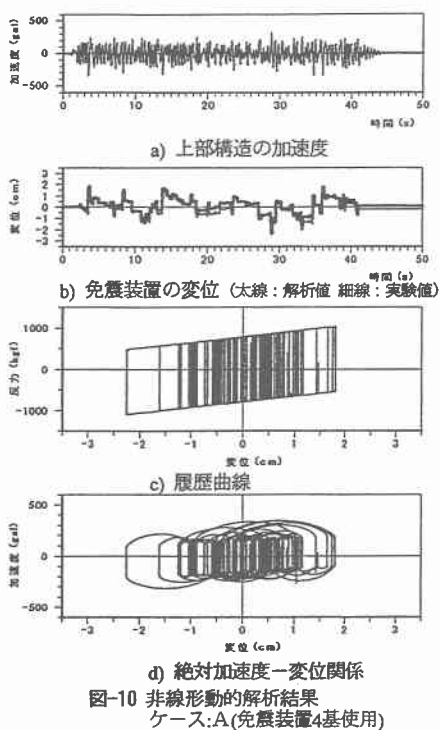
$$Q_D = V \cdot \tan \rho \quad \text{式(2)} \quad \alpha = \sin^{-1} \frac{u_B}{R(2 - C_B)} \quad \text{式(3)}$$

$$\rho = \frac{2\mu}{(2 - C_B) \sqrt{1 + \mu^2}} \quad \text{式(4)} \quad C_B = \frac{tr}{R} \quad \text{式(5)}$$

ここに、 V は免震装置に働く鉛直力、 ρ は式(4)による係数、 C_B は式(5)による係数、 α は回転板の回転角、 R は回転板の曲面の半径、 t は回転板の厚さ、 u_B は免震装置の有効変位であり、最大変位の0.7倍とした。

テフロン摩擦係数 μ と、免震装置の復元力の速度依存性を見込むために設定した粘性減衰係数 C の値を変化させながら解析し、免震装置の変位挙動が最も良く一致したケースを選ぶと、Aの純テフロンのすべり面を用いたケースでは $\mu=0.1$ 、 $C=35 \text{ Kg} \cdot \text{s/cm}$ 、Bの充填材グラファイトを含むテフロンのすべり面を用いたケースでは $\mu=0.1$ 、 $C=5 \text{ Kg} \cdot \text{s/cm}$ であった。等価線形法による場合の等価固有周期 T_B および等価減衰定数 h_B は、図-12のケースで $T_B = 0.662 \text{ sec}$ 、 $h_B = 46.5\%$ 、図-13のケースで $T_B = 1.422 \text{ sec}$ 、 $h_B = 29.7\%$ であった。

$$K_B = \frac{Q_D}{u_B} + K_2 \quad \text{式(6)} \quad h_B = \frac{2 \cdot Q_D}{\pi(Q_D + K_2 \cdot u_B)} \quad \text{式(7)}$$



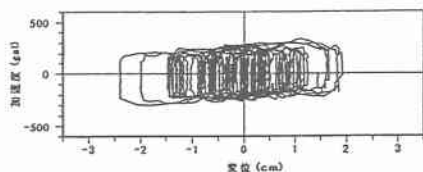


図-14 履歴曲線 実験結果
ケース:A(免震装置4基使用)

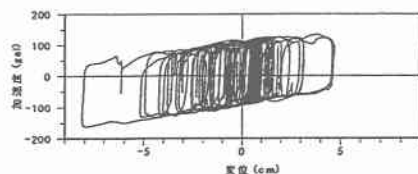


図-15 履歴曲線 実験結果
ケース:B(免震装置2基使用)

5.まとめ

上部構造に相当するマスと鋼製免震支承によって構成する供試体を用いて、振動台上でランダムに加振する実験を行い、理論式に従ったモデル化と動的解析によって、ほぼ正確に免震装置の変位挙動をシミュレートできた。その結果わかったことは次の通りである。

- ①鋼製免震支承の理論式に用いるテフロン摩擦係数 μ は0.1であった。
- ②非線形動的解析では、摩擦係数 μ の速度依存性を見込むために純テフロンのすべり面を用いたケースで $C=35 \text{ Kg} \cdot \text{s/cm}$ 、充填材を含むケースで $C=5 \text{ Kg} \cdot \text{s/cm}$ の粘性係数 C を見込むことによって良い近似を得た。純テフロンの場合より充填材を含む方が速度依存性が少ないとする既往の報告¹⁾の傾向とも一致する。
- ③免震橋梁の設計計算手法として一般に用いられる等価線形法による変位応答値は、実験による値や非線形動的解析による値よりやや大きめの値が算出される。このことは、設計の側から見ると安全側に働く。
- ④また、鋼製免震支承のように矩形に近い履歴曲線を持つ免震装置の減衰性能は、等価線形仮定による評価よりも高いことがわかる。

参考文献

- 1) 別所俊彦, 小山田欣裕, 佐藤昌志, 谷本俊充: 寒冷地域の気象条件を配慮した鋼製免震支承の開発, 土木学会北海道支部論文報告集 第52号(A), pp.190~193, 1996.2.
- 2) 別所俊彦, 小山田欣裕, 佐藤昌志, 谷本俊充: 幾何学特性を利用した免震装置の開発, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集 第1部(B), pp.114~115, 1996.9.
- 3) 小山田欣裕, 佐藤昌志, 谷本俊充, 別所俊彦: 幾何学特性を利用した免震装置の開発, 土木学会耐震工学委員会 第1回免震・制震コロキウム講演論文集, pp.269~274, 1996.11.
- 4) 別所俊彦, 小山田欣裕, 中井健司, 佐藤昌志: 橋脚の剛性を考慮した鋼製免震支承の慣性力低減効果に関する一実験, 土木学会北海道支部論文報告集 第53号(A), pp.364~367, 1997.2.
- 5) 別所俊彦, 小山田欣裕, 中井健司, 佐藤昌志: 鋼製免震支承の動的特性と慣性力低減に関する基礎実験, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集 第1部(B), pp.690~691, 1997.9.
- 6) 林亜紀夫, 小山田欣裕, 谷本俊充, 中井健司: 衝撃的載荷重を受ける免震支承を有する橋脚模型の動的挙動について, 土木学会北海道支部論文報告集 第53号(A), pp.50~53, 1997.2.
- 7) 林亜紀夫, 小山田欣裕, 谷本俊充, 中井健司: 免震支承を有する模型橋脚の動的挙動に関する一実験, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集 第1部(B), pp.686~687, 1997.9.
- 8) 別所俊彦, 村井正光, 小山田欣裕, 二宮嘉朗: 実規模2径間連続桁を用いたリンク式免震支承の慣性力低減効果に関する実験計画, 土木学会北海道支部論文報告集 第54号(A), pp.218~221, 1998.2.
- 9) 別所俊彦, 熱海明彦, 山口登美男, 佐藤昌志: 実規模2径間連続桁を用いたリンク式免震支承の慣性力低減効果に関する一実験, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集 第1部(B), pp.690~691, 1998.10.
- 10) 畑一洋, 島田武, 小林将, 金子孝吉: 北海道の3大地震を用いた動的解析に用いる確率加速度と擬似地震波, 土木学会北海道支部論文報告集 第54号(A), pp.180~183, 1998.2.
- 11) 玉木利裕, 小川一志, 河東鎬, 西田徹, 比志島康久, 鶴野禎史, 和田正明: 摩擦減衰型免震装置の摩擦特性に関する実験的検討, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集 第1部(B), pp.688~689, 1998.10.