

複数の摩擦面を有する滑り型免震支承の開発と 水平二方向振動台実験による性能検証

高橋良和¹・合田裕一²・配野英朗²・田中健司²・小泉貴宏²・杉山洋²

¹正会員 工博 京都大学准教授 工学研究科社会基盤工学専攻（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）

²正会員 ビービーエム（〒103-0027 東京都中央区日本橋3-11-1 HSBCビルディング3F）

1. はじめに

我が国では、兵庫県南部地震を契機に、橋梁の減衰機能の付加と長周期化を目的として、橋脚上に設置した免震支承で橋桁を支持する橋梁が多く建設されている。支承部には、荷重伝達機能、変位追従機能、等複数の機能が求められる。道路橋示方書^{1,2)}には、免震支承として鉛プラグ入りゴム支承や高減衰ゴム支承などのように複数の機能を同一の構造部分に集約されたゴム系免震支承の設計式が示されている。機能集約型の支承は、一般に構造規模が大きくなる傾向にあるため、滑り型支承による鉛直荷重支持機能とゴムバッファによる水平荷重支持機能に分離させた機能分離型支承が開発されてきた。機能分離型支承による地震時機能としては、滑り型支承の摩擦減衰機能が期待されている。摩擦減衰機構には、速度依存性や面圧依存性などが確認されている³⁾ものの、一般にCoulombの法則として知られる摩擦係数と鉛直荷重の積で表される摩擦力による完全剛塑性型荷重-変位履歴によって表現することができる。

ゴム系免震支承は、ゴム層厚や支承寸法、また鉛プラグ量を変化させることで、様々な大きさの復元力を有する支承を設計することが可能であるのに対し、滑り型免震支承は、上部構造重量を変化できないとすると、その特性は滑り面の摩擦係数にのみ強く依存することになり、設計自由度が高くなかった。そこで本研究では、支承構造の工夫により複数の摩擦面を有する滑り型免震支承を開発することにより、その設計自由度を高めるとともに、振動台実験により二方向復元力特性を把握し、そのメカニズムを明らかにしようとするものである。

2. 高摩擦材料による摩擦試験結果と問題点

従来、滑り型支承は可動支承として採用されてきたため、安定した変位追従機能を発揮できるPTFEとステンレス板による組み合わせが採用され、その摩擦係数は0.1～0.15程度である。滑り型免震支承の設計自由度を高めるためには、滑り面の摩擦係数を変化させることが有効であり、減衰性能を高めるためには、高摩擦係数を有する滑り面が求められる。そこで、ポリアミドイミド系、ポリフェニレンサルファイド系などの各種剛性樹脂材料と仕上げ荒さの異なるステンレスの組み合わせによる摩擦試験を行った。

図-1に、高摩擦係数を有する組み合わせの例を示す。ここには11回の変位一定正負交番载荷結果を示しており、2回目から11回目までの10サイクルの平均摩擦係数は0.2以上の高摩擦係数が安定して発揮されていることが分かる。一方で、高摩擦係数を発揮するためには、凝着部の塑性変形や摩耗が大きくなり、図-2のように不安定な履歴を示すものも少なくない。橋梁の支承部には、温度変形に伴う桁伸縮

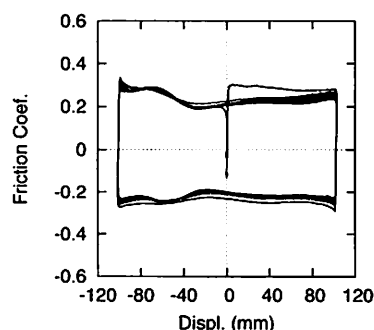


図-1 安定した高摩擦履歴を有する組み合わせの例

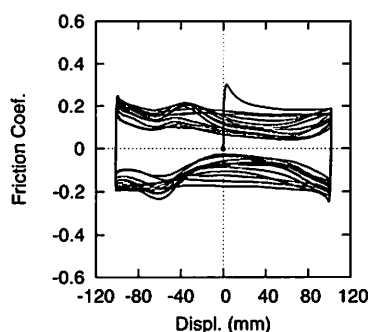


図-2 高摩擦であるが不安定な履歴を有する例

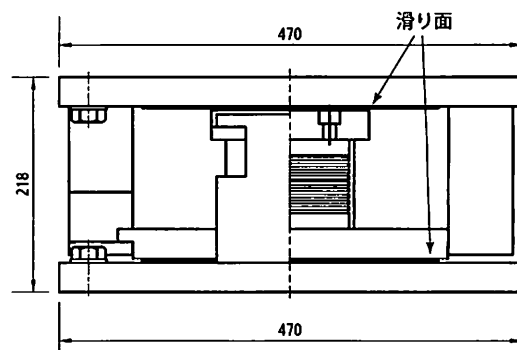
が常時発生しており、安定した性能の発揮が求められる。つまり、安定した高摩擦材料の追求だけでなく、構造的工夫による高摩擦力を実現する方法も検討することが重要である。

2. 複数の摩擦面を有する滑り型免震支承

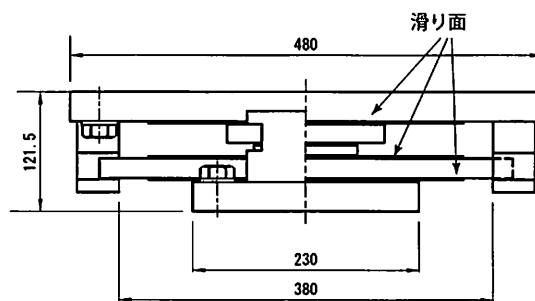
支承構造の工夫により摩擦力を変更させる方法の一つとして、2枚の摩擦面を有する支承を開発していた¹⁾。これは、2枚の摩擦面を鉛直方向に直接に配置し、強制的に同時に滑らせることにより、上部構造重量を変化させることなく、摩擦力を2倍にしようとするものである。本研究では、近年、二方向免震の採用が増えてきたことを踏まえ、同様のメカニズムにより複数の摩擦面を有しながら、水平二方向の変位に追従することができる滑り型免震支承を開発した(図-3)。2面スライド支承は、2面の摩擦面に加えて弾性ゴム支承を内蔵した機能集約型であり、3面スライド支承は、3面の摩擦面で構成され、別途水平荷重支持機構としてのゴムバッファと併用して用いる機能分離型である。摩擦面を多層にすることにより、1つの摩擦面は従来用いられてきた程度の摩擦係数を有しながら、摩擦力は2倍、3倍に安定して大きくすることが可能となる。

本研究では、これら滑り型免震支承の性能を確認するため、上記2種類の支承に加え、通常の機能分離型支承(1面の摩擦面)と、分散ゴム支承(ゴムバッファ)を用意し、計4種の支承で同じ特性のゴムバッファを用いることにより、分散支承剛性と3つの滑り型免震支承の二次剛性が同じとなるように設計した。

本研究で用いた摩擦面は、半径63 mm、厚さ3 mmのPTFEとステンレス板により構成され、摩擦係数は約0.20である。1ゴムバッファは平面寸法が130 mm角、ゴム層が3 mm×10層であり、剛性は0.48 kN/mm²である。



(a) 2面スライド支承



(b) 3面スライド支承

図-3 複数の摩擦面を有する滑り型免震支承試験体

2. 振動台実験概要

(1) 三次元振動台

本研究では、京都大学防災研究所に設置されている強震応答実験装置を用い、振動台実験を行った。強震応答実験装置は、水平方向2軸と上下方向の振動および各軸回りの回転動が同時あるいは単独に加振可能な3次元6自由度の振動台システムであり、搭載可能重量は150 kNである。本研究では、水平二方向に振動台を加振させた。

(2) 実験システム

本研究では、約10.5 tonの桁型重錘の四隅に滑り型支承/分散支承を設置するシステムを基本とする(図-4)。また、機能分離型の場合には、摩擦支承部を四隅に設置し、2つのゴムバッファを2カ所に設置することにより、いずれの支承の場合にも、桁型重錘は4つのゴムバッファにより水平支持されるようにした。四隅の支承と振動台の間には三分力計を設置し、直接支承反力を計測するとともに、桁型重錘に加速度計を設置し、支承部に作用する慣性力を計測することができる。その他、桁重錘の変位を計測するために、四隅にレーザー変位計を設置している。支承の設置にあたり、四隅の支承の鉛直反力が同じになるよう調整している。

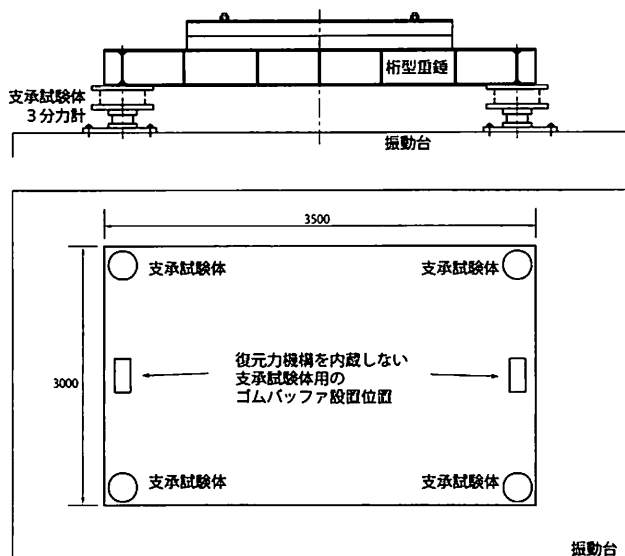


図-4 実験システム

(3) 加振方法

振動台を水平一方向、斜め45度一方向、そして円形に加振させることで慣性力を発生させ、载荷システムを振動させる。一方向に入力する波形は3Hzあるいは2Hz、振幅10回の正弦波の前後にテーパをつけた波形を基本とし、斜め45度一方向加振、円形加振のために、X、Y軸に入力する波の位相を、それぞれ90度、180度ずらして入力することにより実現した。実験は振幅を徐々に大きくし、試験体のせん断ひずみが約175% (52.5mm)になるよう調整した。

3. 摩擦面の違いによる履歴形状の比較

本論ではまず、水平一方向加振の実験結果をもとに、新しく開発した複数の摩擦面を有する滑り型免震支承の特徴を整理する。

2章で示した試験体のうち、機能分離型支承である、摩擦面1枚、3枚の滑り型免震支承については、摩擦支承下部に三分力計が設置してあるため、直接復元力を計測できる。一方向加振時の計測荷重を摩擦係数に変換したものを図-5に示す。右には、摩擦面1枚の時の摩擦係数を3倍したものと、摩擦面3枚の時の摩擦係数を比較した図を示すが、これより、同じ鉛直荷重を支持した場合でも、摩擦面の数を変化させることで、支承のみかけの摩擦係数を倍数的に変化させることができることが分かる。

図-6に、摩擦面1～3枚を有する免震支承全体の一方方向载荷による履歴の比較を示す。この荷重は、桁型重錘に取り付けられた加速度計による値と質量との積による慣性力であり、摩擦支承部とゴムパツファの復元力の総和に相当する。これより、摩擦面

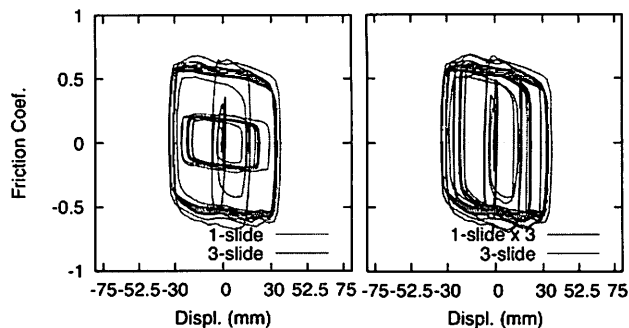


図-5 摩擦面1枚、3枚の滑り型支承の摩擦係数の比較 (左：原図、右：摩擦面1枚の時の値を3倍にしたもの)

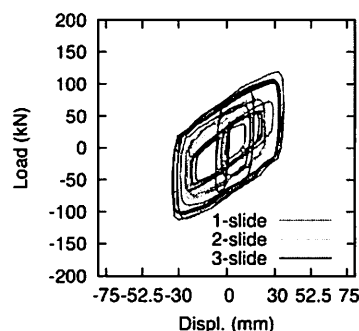


図-6 摩擦面枚数の異なる免震支承の履歴の比較

2枚の場合も、摩擦面1枚の時の2倍の摩擦力となっていることが分かる。また、いずれも同一数のゴムパツファを設置しており、その剛性より決定される二次剛性が同一となっていることが分かる。

以上より、本支承の一方方向加振に対する設計モデルを考える場合、支承の(みかけの)摩擦係数は各摩擦面の摩擦係数を加算したものとなり、降伏荷重はその摩擦係数と鉛直支持荷重を乗じた値、また二次剛性はゴムパツファの剛性、と単純にモデル化することができることが分かる。また、本研究では、いずれの摩擦面にも同一の摩擦材を使用しているが、異なる摩擦係数を有する安定した摩擦材を組み合わせることにより、多様な降伏荷重を有する滑り型免震支承を実現できると考えられる。

4. 二方向応答特性

(1) 分散ゴム支承

図-7に、分散ゴム支承の水平一方向加振実験(X、Y軸)、斜め45度一方向、そして円形加振による変位オービットおよび荷重-変位関係を示す。変位オービット上の円は、それぞれゴムの100%、175%せん断ひずみに相当する変位を示す。実験システムを1自由度としてみなし、4つの支承の荷重の総和で表している。また、水平一方向加振については、それ

それX、Y軸に対する方向の履歴を示し、斜め45度一方向については、斜め45度方向（変位オービット第4象限にある矢印の方向）に投影した履歴、また円形加振については、X、Y、45度、-45度方向へ投影した履歴を示す。

これより、一方向加振（X、Y、斜め45度）および円形加振において、ほぼ同じ履歴を示している。ここで用いた分散コムが、ほぼ線形と見なせることを意味し、載荷方向の依存性がないことが分かる。

(2) 機能分離型支承（摩擦面1枚）

図-8に、機能分離型支承の水平一方向加振実験（X、Y軸）、斜め45度一方向、そして円形加振による変位オービットおよび荷重-変位関係を示す。

まず、一方向加振（X、Y、斜め45度）においては滑り型免震支承特有の剛塑性履歴を示しており、いずれもほぼ同じ形状をしている。一方、円形加振においては、楕円形の履歴を示し、滑り型免震支承特有の大きな一次剛性も確認できない。通常の設計では、支承の二方向挙動をモデル化するにあたり、水平一方向の荷重-変位履歴モデルを各軸に独立に設定しているが、実際には二方向が密接に関連しあっていることを意味しており、二方向免震を設計する際には、この影響を考慮できるモデルを使用しなければならぬことを示唆している。

(3) 2面スライド支承（摩擦面2枚）

図-9に、2面スライド支承の水平一方向加振実験（X、Y軸）、斜め45度一方向、そして円形加振による変位オービットおよび荷重-変位関係を示す。

まず、摩擦面2枚にすることにより、摩擦面1枚の機能分離型支承に比べて摩擦力がほぼ倍となったことが分かる。また、載荷方向特性についても、機能分離型と同様、一方向加振（X、Y、斜め45度）においては方向に依存せず、滑り型支承特有の剛塑性履歴を示し、円形加振については楕円型履歴を示している。

(4) 3面スライド支承（摩擦面3枚）

図-10に、3面スライド支承の水平一方向加振実験（X、Y軸）、斜め45度一方向、そして円形加振による変位オービットおよび荷重-変位関係を示す。

まず、摩擦面3枚にすることにより、摩擦力がさらに大きくなり、載荷方向特性についても、一方向加振（X、Y、斜め45度）においては方向に依存せず、滑り型免震支承特有の剛塑性履歴を示すのに対し、円形加振については楕円型履歴を示している。

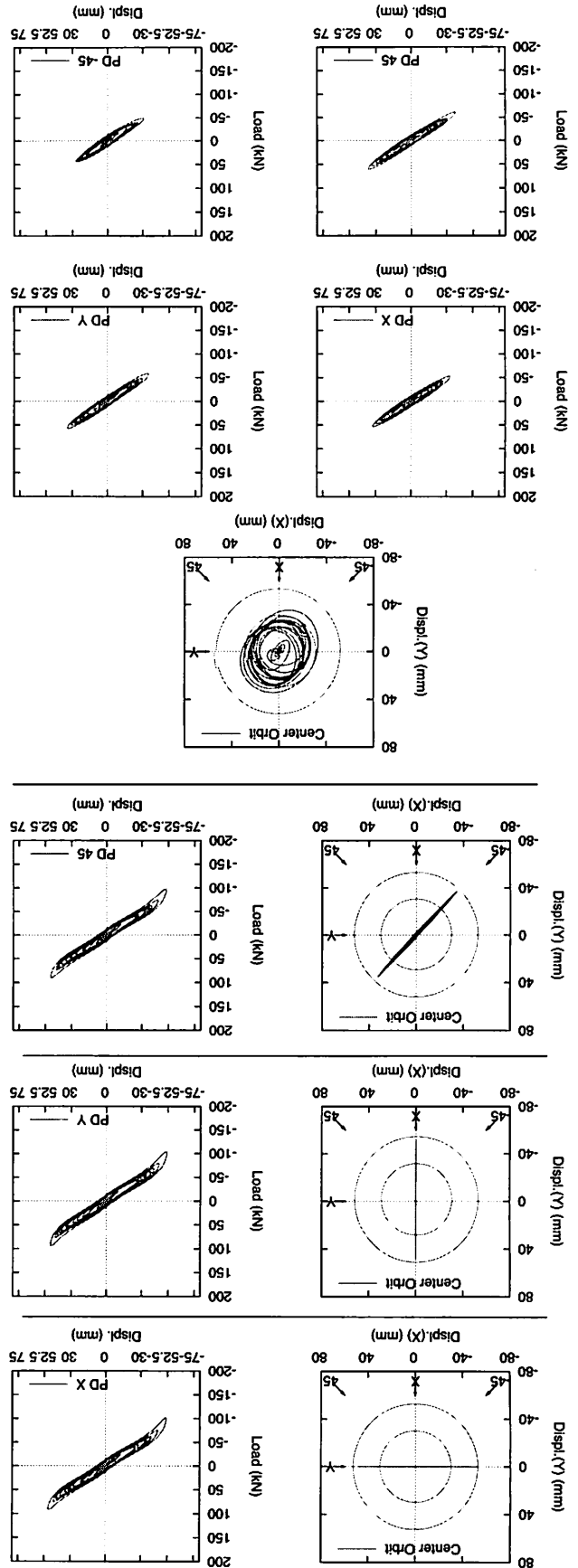


図-7 分散コム支承の荷重-変位履歴

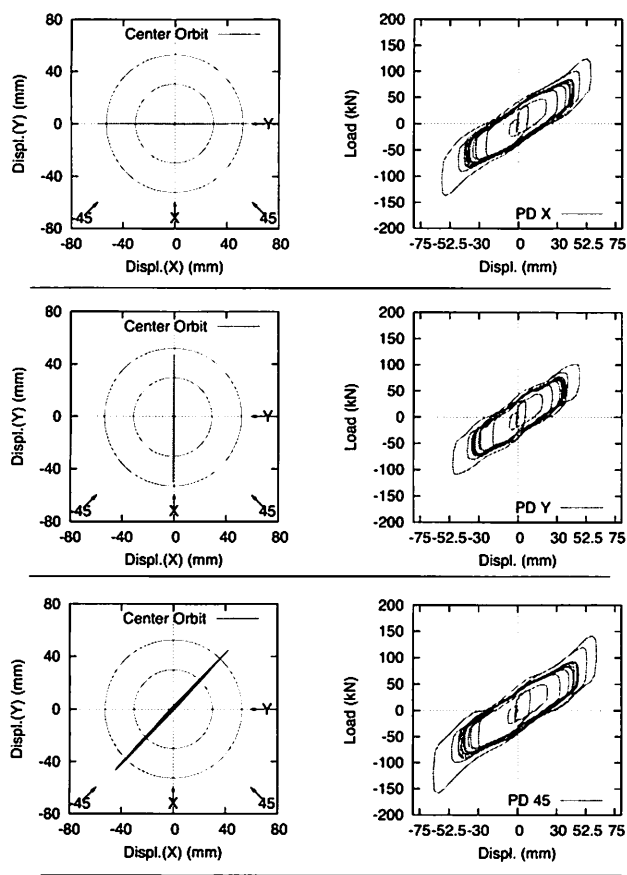


図-8 機能分離型支承（摩擦面 1 枚）の荷重-変位履歴

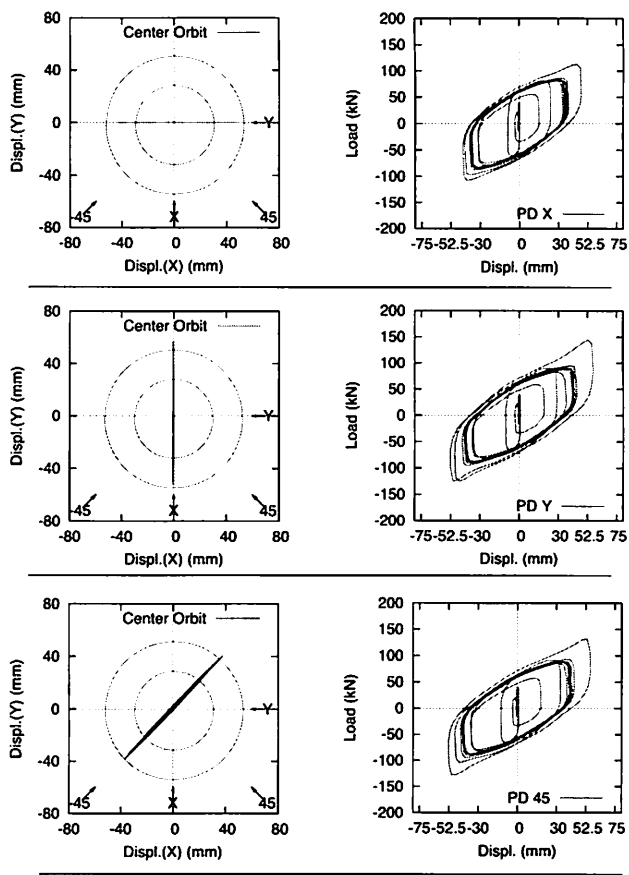
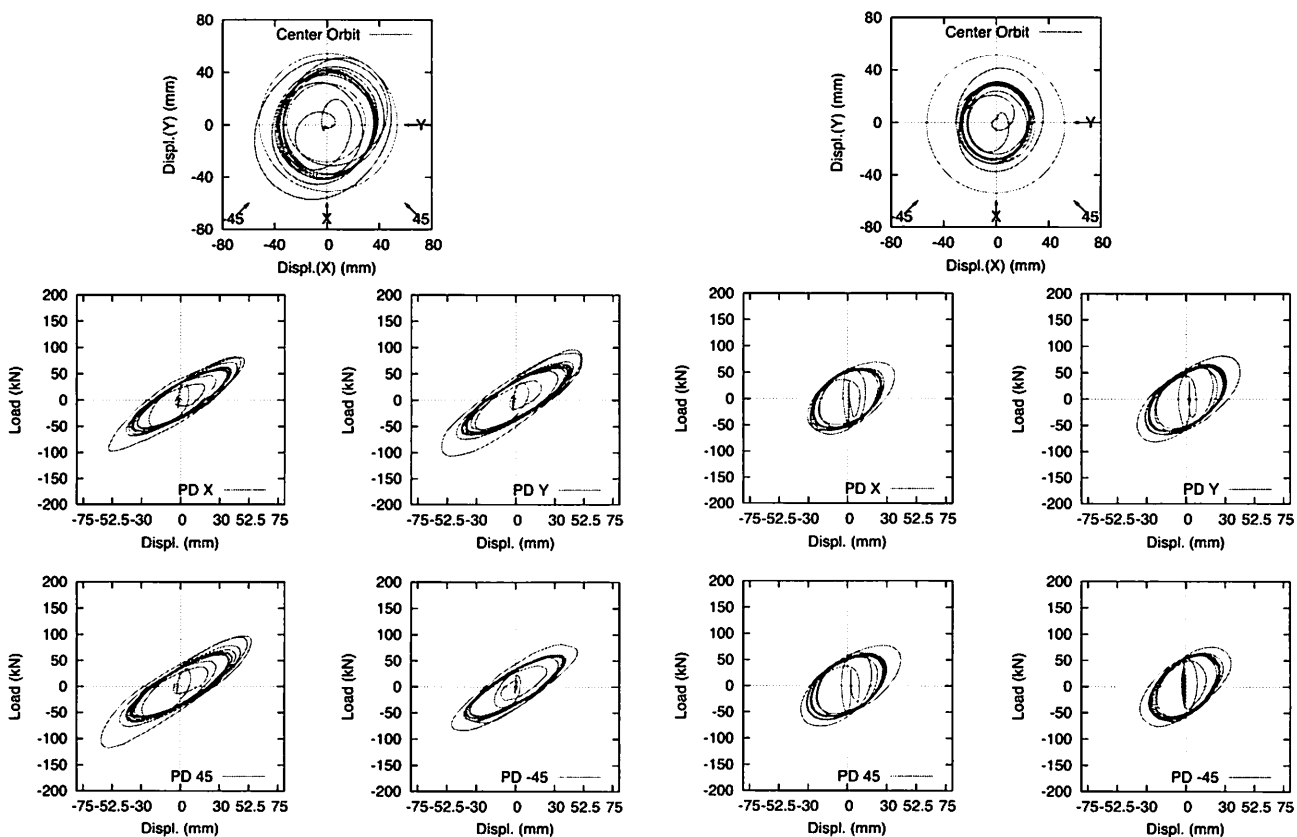


図-9 2面スライド支承（摩擦面 2 枚）の荷重-変位履歴



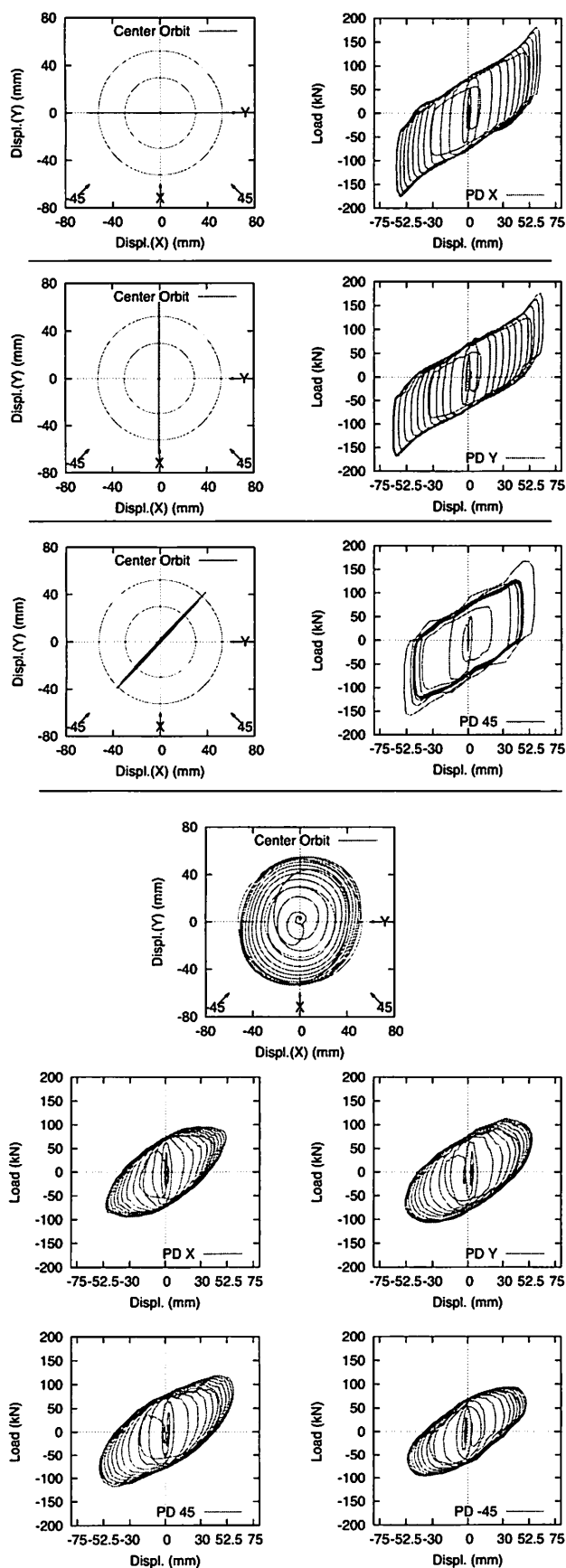


図-10 3面スライド支承（摩擦面3枚）の荷重-変位履歴

(5) ゴム系免震支承（高減衰ゴム支承）

滑り型免震支承の二方向復元力特性の比較として、ゴム系免震支承である高減衰ゴム支承に対しても同様の载荷を行った。この高減衰ゴム支承は、機能分離型免震支承とほぼ同等の性能を持つよう、平面寸法145 mm角でG8の高減衰ゴム層厚が3 mm×10層とした。図-11に、高減衰ゴム支承の水平一方向加振実験（X軸）および円形加振による変位オービットおよび荷重-変位関係を示す。

一方向加振について、滑り型免震支承に比べて一次剛性は柔らかいものの、ほぼバイリニア型モデルとみなせる履歴を示しているが、円形载荷に対しては、楕円型履歴を示している。つまり、円形载荷で楕円型履歴を示すのは滑り型免震支承固有の特性ではなく、ゴム系支承も同様の特性を有していることが分かる。

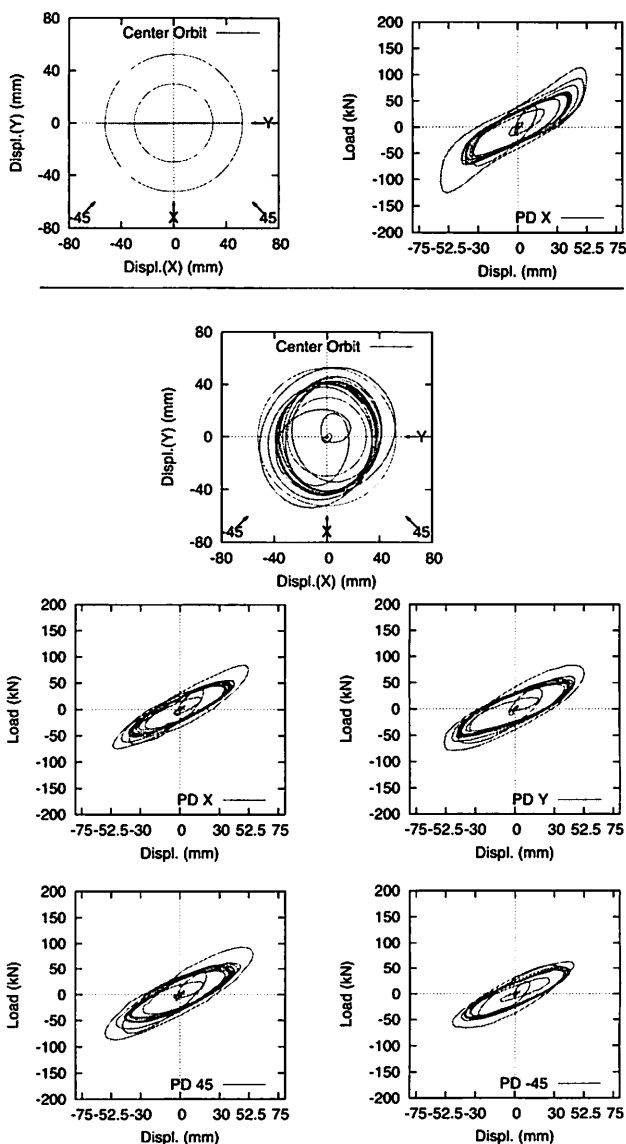


図-11 高減衰ゴム支承の荷重-変位履歴

(5) 二方向復元力メカニズム

一方向加振した場合に剛塑性型履歴を示す滑り型免震支承が円形加振では楕円型履歴を示すことについて、水平二方向荷重空間における荷重軌跡を用いて説明する。図-12に、図-10で示した3面スライド支承の一方方向(X方向)および円形加振における摩擦支承部のみの荷重-変位関係および荷重空間上での荷重軌跡を示す。荷重空間上の円は、摩擦係数0.6の摩擦力に相当する降伏曲面である。まず、一方向加振の場合は荷重空間でも一方向の軌跡を示し、降伏曲面近傍で頭打ちになっている。円形加振の場合も同様に荷重軌跡は降伏曲面近傍内を動くとともに、ほとんどの軌跡が降伏曲面上にあること（降伏曲面内の軌跡が少ないこと）が分かる。これは、一次剛性が非常に大きいため、直ぐに降伏曲面上に移動していることを意味している。つまり、楕円型履歴を示しているように見えるが、本質は二次元に拡張した完全弾塑性型履歴に従っているとみて良い。

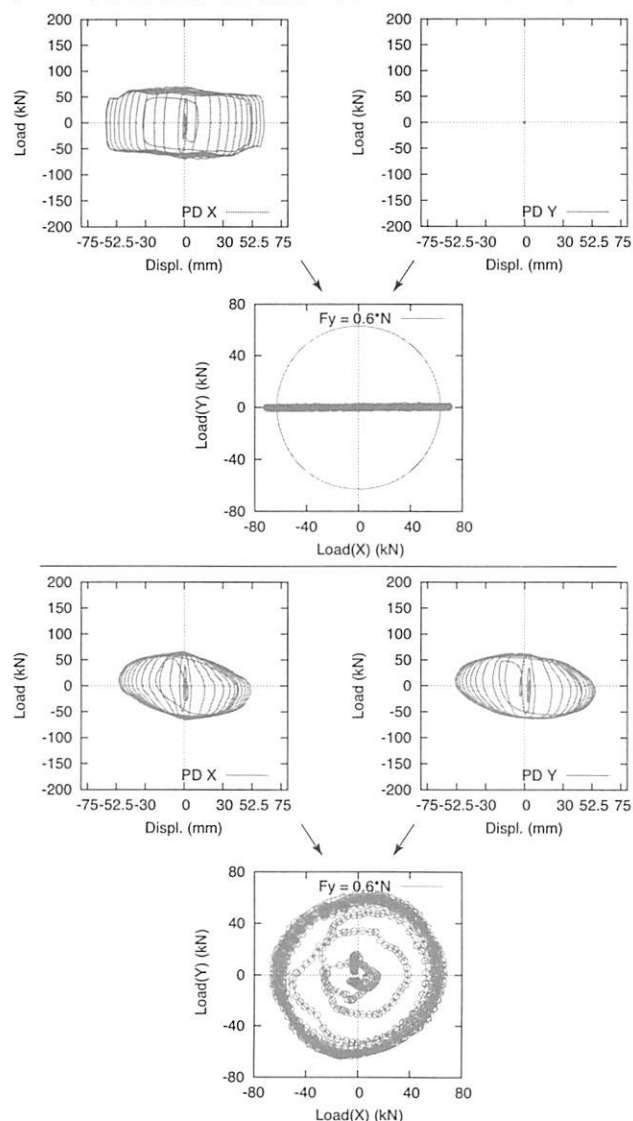


図-12 水平二方向荷重空間上の荷重軌跡

次に、円形加振の結果を用い、復元力ベクトルを算出する。機能一体型支承の場合には三分力計により、機能分離型支承の場合には、支承全体の復元力ベクトルを桁型重錘の質量と計測加速度より、摩擦支承部の復元力ベクトルを三分力計によりそれぞれ求め、ゴムバッファの復元力ベクトルは上記の2つのベクトルの引き算により算出する。

まず、分散支承について、円形加振を行った際の最大変位オービット上に各位置での復元力ベクトルを描いたものを図-13に示す。まず、分散支承の場合、復元力ベクトルはいずれも原点方向を指向しつつも、やや原点からずれている。完全な弾性体の場合は原点指向となるが、図-7より分かるように小さいながらも非線形履歴を示しており、そのため原点からややずれた復元力ベクトルになったと考えられる。また、ベクトルの大きさは、原点（正しくは原点近傍）からの距離と支承剛性の積で求めることができる。

滑り型免震支承について、摩擦面の数（摩擦力）以外に二方向加振時の履歴特性に大きな差異は見受けられなかったため、ここでは3面スライド支承を代表として選び、復元力ベクトル図により二方向復元力メカニズムを検討する。図-14に最大変位オービット上に描いた復元力ベクトル図を示す。まず、摩擦支承部の復元力ベクトルは、ほぼ変位オービットの接線方向を向き、支承が移動した方向に依存しているが、ゴムバッファの復元力ベクトルは、図-11とほぼ同様の傾向を示し、原点近傍を指向している。そして、その合力として支承全体の復元力ベクトルが描くことができる。また、図-15に最大変位より内側の変位オービット上に描いた復元力ベクトルズを示す。図-13と図-14を比較してみると、摩擦支承部の復元力ベクトルの大きさは同じであるが、ゴムバッファの復元力ベクトルの大きさは小さく、支承全体の復元力ベクトルは、最大変位オービット上に比べて原点から離れた方向を指向している。これは、摩擦支承部の復元力は摩擦係数と鉛直支持荷重にのみ依存しているため、いずれの位置においても大きさは同一であるが、ゴムバッファの復元力は原点（近傍）との距離に依存するためである。

以上より、滑り型免震支承の二方向復元力メカニズムは以下ようになる。

- 摩擦支承部の復元力の大きさは（みかけの）摩擦係数と鉛直支持荷重により決まる一定値であり、その方向は移動方向の逆を向く。

- b) ゴムバッファの復元力の大きさは原点（近傍）からの距離と支承剛性に依存し、その方向は原点（近傍）を向く。
- c) 免震支承全体の復元力は、摩擦支承部とゴムバッファの復元力ベクトルの和で表される。

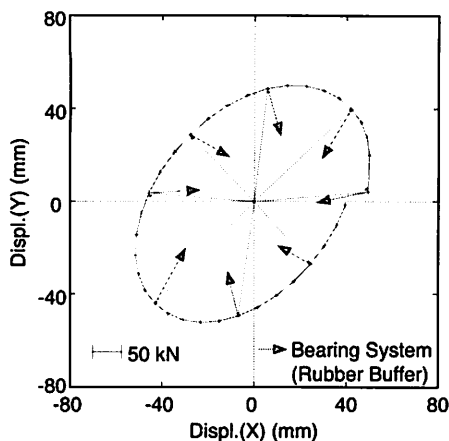


図-13 分散支承の復元力ベクトル図
(最大変位オービット上)

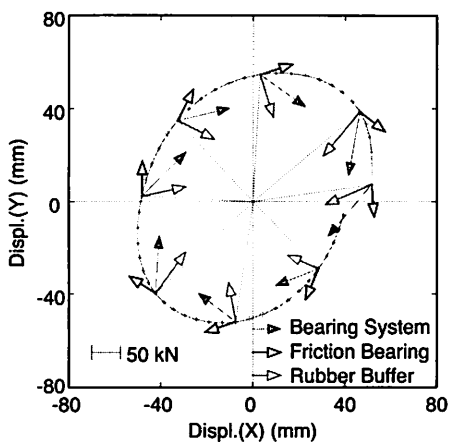


図-14 3面スライド支承の復元力ベクトル図
(最大変位オービット上)

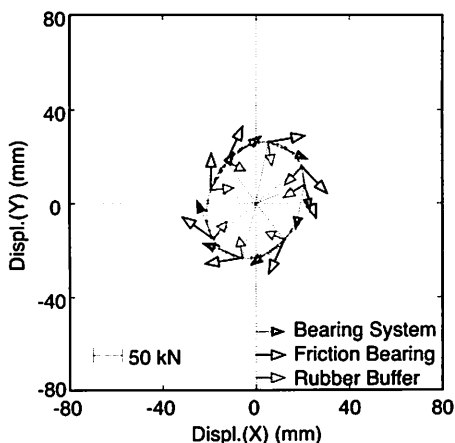


図-15 3面スライド支承の復元力ベクトル図
(最大変位より内側の変位オービット上)

6. まとめ

本研究では、複数の摩擦面有する滑り型免震支承を開発し、二方向に対する復元力特性について、振動台実験によって確認した。本研究で得られた知見を以下に述べる。

- ・ 摩擦係数と鉛直支持荷重で特性が規定される滑り型免震支承の設計自由度を高めるため、複数の摩擦面を有する滑り型免震支承を開発した。同じ摩擦材料を採用した場合、摩擦面の枚数に応じて摩擦力が大きくなることを確認し、それぞれの摩擦面に異なる摩擦係数を有する材料を用いることにより、安定した大きな摩擦力を発揮できる支承が設計可能となる。
- ・ 滑り型免震支承を振動台実験により二方向加振を行い、支承の向きに関わらず、直線状（一次元的）に変形した場合には摩擦型支承特有の剛塑性型履歴を示すこと、また平面状（二次元的）に変形した場合には丸みを帯びた楕円型履歴を示すことを確認した。この楕円型履歴は、摩擦支承部を二方向に拡張した完全弾塑性型として考えることで説明できる。また、ゴム系免震支承である高減衰ゴム支承でも円形加振の場合には同様の楕円型履歴を示す。
- ・ 滑り型免震支承の二方向復元力メカニズムについて、支承全体、摩擦支承部、ゴムバッファそれぞれの復元力ベクトルに基づき検討した。摩擦支承部は支承の変形方向と逆方向に摩擦力を発揮し、ゴムバッファは原点からの距離に応じた復元力を原点方向に発揮する。そして、そのベクトルの組み合わせとして、支承全体の復元力が表現できる。履歴を有する免震支承は、支承全体の復元力ベクトルが原点を向かない（線形ではない）が、ゴム系支承に比べて滑り型免震支承は単純明快なメカニズムで説明できる。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V 耐震設計編，2012.3.
- 2) (社)日本道路協会：道路橋支承便覧，2004.4.
- 3) 高橋良和，日比雅一，家村浩和：各種依存性を考慮した滑り型免震支承の数値モデルに関する一考察，応用力学論文集，Vol. 8, pp. 701-708, 2005.
- 4) 高橋良和，家村浩和，配野英朗，陳友真：ハイブリッド実験による両面スライド型免震支承の地震応答特性に関する検討，第24回地震工学研究発表会講演論文集，Vol. 1, pp. 313-316, 1997.