

白型滑り面を有する FPIS 橋脚の地震時挙動の寸法依存性に着目した 震動実験およびその解析的検討

早稲田大学 学生会員 ○樫山 大樹, 山口 大貴, Benjamin Brito, 銭 城 正会員 秋山 充良
日本工営(株) 石垣 直光, 高橋 宏和 東京大学大学院 正会員 本田 利器

1. はじめに

FIPS (Friction Pendulum Isolation System) 橋脚は、**図-1** に示す中間部に滑り面を設け、その位置より上部を摩擦振子として滑らせることで滑り面より下部に伝達される地震時慣性力を低減させるとともに、過大な残留変位の発生を抑制することを目的としている。既往の震動実験により、本橋梁が高い免震性能を有しており、斜面角度 11° で摩擦振子半径の2倍の底面半径を与えたとき、最も優れた地震時挙動が得られることを確認している^{1),2)}。一方、本機構の動的挙動の寸法依存性や摩擦係数の速度・面圧依存性の検討は十分ではなく²⁾、本機構の実用化に向け、供試体寸法や重量を変えた震動実験による検証が必要である。

本稿では、上部工重量と寸法の異なる橋梁モデルを製作し、提案構造の地震時挙動の寸法依存性について、震動実験による評価とその再現解析を試みる。

2. 震動実験の概要

本実験では、橋脚高さ 10 m の実橋梁を想定し、震動台の寸法および加震能力から相似比を 23.3 および 16.5 とした2種類の供試体を設計した。上部工の重量はそれぞれ 1500 kgf と 3000 kgf である（以降、1500 kg 実験、3000 kg 実験と称す）。供試体は鋼製上部工、摩擦振子、および白型滑り面を有する RC 橋脚から構成される。**図-2** に滑り面の諸元、**写真-1** に実際の滑り面を示す。白型滑り面の底面の大きさは相似則に従って修正されており、斜面角度は 11° である。摩擦振子は上部工と一体となり挙動するように剛結されている。橋脚は RC 構造で、

1500 kg 実験では高さ 170 mm、断面 300 mm×202 mm、3000 kg 実験では高さ 180 mm、断面 440 mm×338 mm の寸法を有する。1つの摩擦振子にかかる軸力は 1500 kg 実験で 3.68 kN、3000 kg 実験で 7.35 kN である。なお、加震による摩擦係数の増加を抑えるため、滑り面にはエポキシ樹脂製コンクリート補修材を塗布した。入力正弦波は相似則に従い、1500 kg 実験で最大振幅 11 mm、周波数 5.0 Hz、3000 kg 実験で最大振幅 21 mm、周波数 3.5 Hz である。

3. 実験結果

水平一方向および水平二方向震動実験を行い、提案構造の地震時挙動の寸法依存性を確認した。**図-3** および **図-4** に示す水平荷重-水平変位関係より、いずれの寸法においても上部工加速度は低減されている一方で、斜面との衝突により生じる水平荷重の局所的な増加は、二方向入力より一方向入力で顕著になっている。これは、摩擦振子が斜面に突入する際の入射角が二方向入力では小さくなるためである。また、寸法が大きくなると衝突荷重が大きくなっている。これは、上部工重量の増大および入力正弦波の時間軸修正による上部工速度の増大が原因と考えられる。基本的な滑り性能は供試体寸法に関係しないが、衝突荷重の大きさは上部工重量に依存したものとなっている。**図-5** は摩擦振子の残留変位を示す。図中の円の内側は、底面半径から摩擦振子の半径を引いた底面領域である。本実験では、何れの入力波に対しても加震後に摩擦振子は底面領域内に戻り、残留変位の大きさに寸法依存性は確認されなかった。

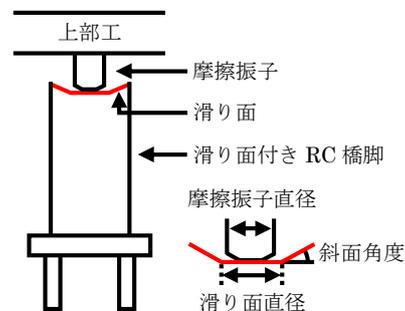


図-1 摩擦振子型免震機構付き橋脚

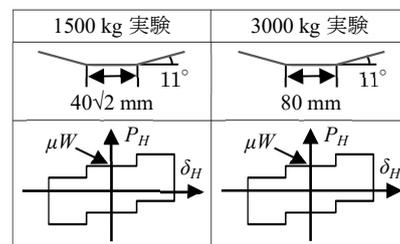


図-2 滑り面諸元

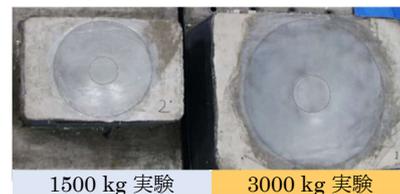


写真-1 滑り面付き RC 橋脚

図-6 に、3000 kg 実験の加震中に 0.005 秒間隔で得られた摩擦係数と上部工の滑り速度の関係を示す。図中には、岡本ら³⁾の研究を参考に導出した以下の速度依存式を面圧 6.0MPa のときの実験結果と併せて示す。

$$\mu(V) = 0.5\mu_{max} + 0.5\mu_{max} \exp(-n'|V|) \quad (1)$$

ここに、 $\mu(V)$: 速度依存性を考慮した摩擦係数、 μ_{max} : 最大摩擦係数、 V : 滑り速度、 n' : 摩擦係数の速度依存性を規定する定数、である。

図-6 から、面圧により静止摩擦力は変化し、滑り速度が 0.2 m/s を超えると、いずれの面圧においても摩擦係数は 0.3 に漸近している。これらの結果から、本機構における摩擦係数は、低速度域では面圧に依存し、加震中の摩擦振子の滑り速度の増大に伴って摩擦係数が低減する速度依存性が確認される。

4. 解析結果

摩擦振子を質点に置換し、臼型の斜面を運動する際の橋軸(x)方向および橋軸直角(y)方向に作用する慣性力を式(2)で求めた。そして、式(1)の摩擦係数の速度依存性を考慮した時刻歴動的解析を実施した。

$$\begin{vmatrix} P_x \\ P_y \end{vmatrix} = \pm \mu N \cos \theta \begin{vmatrix} \sin \beta \\ \cos \beta \end{vmatrix} \pm N \sin \theta \begin{vmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{vmatrix} \quad (2)$$

ここに、 β : x, y 速度成分の比の逆正接関数で表される角度、 φ : 滑り面中心から摩擦振子位置までの偏角、 N は摩擦振子に作用する軸力、 θ は斜面角度、である。

解析結果と実験結果の比較の一例を図-7 に示す。本解析により水平荷重-水平変位関係は概ね再現可能であることが確認される。ただし、摩擦振子が斜面に突入する際に生じる衝突は本解析で考慮されておらず、今後の課題である。

5. まとめ

摩擦振子型免震機構を橋脚に適用することで、供試体寸法によらず、地震時慣性力を低減でき、残留変位を抑制できることを確認した。一方、摩擦係数は供試体寸法と滑り速度に依存するが、その変化は既存式により推定可能である。また、斜面形状と摩擦振子の位置関係、および速度依存性を考慮した時刻歴動的解析を行うことで、本震動実験の結果は概ね再現できる。

参考文献 1) Brito, M.B, Ishibashi, H. and Akiyama, M.: Shaking table tests of a reinforced concrete bridge pier with a low-cost sliding pendulum system, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.48, pp.366-386, 2019. 2) 山口大貴ほか：摩擦振子型免震機構付き RC 橋脚に用いる滑り面形状の最適化と寸法効果に関する実験的研究, 第 22 回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp.295-298, 2019. 3) 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.

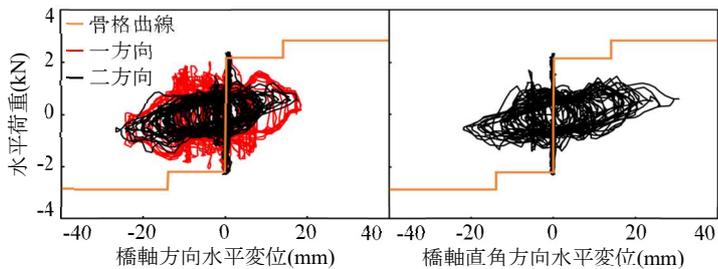


図-3 水平荷重-水平変位関係(1500 kg 実験, 周波数 5.0 Hz)

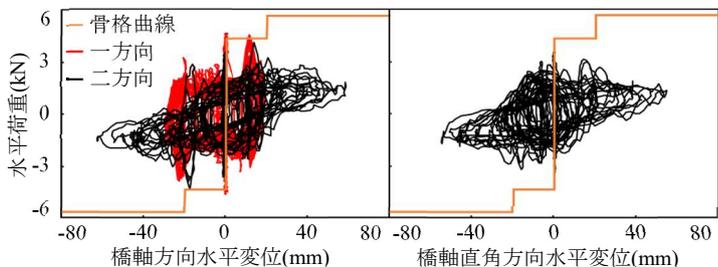


図-4 水平荷重-水平変位関係(3000 kg 実験, 周波数 3.5 Hz)

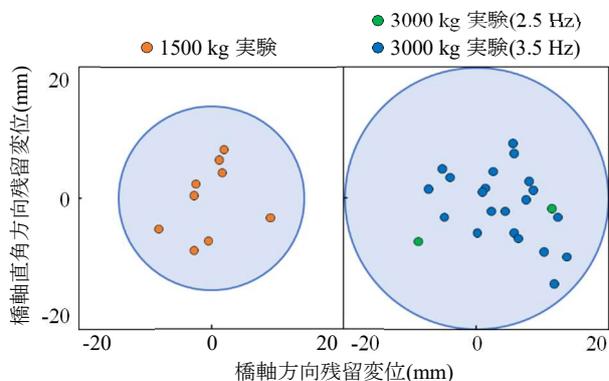


図-5 残留変位

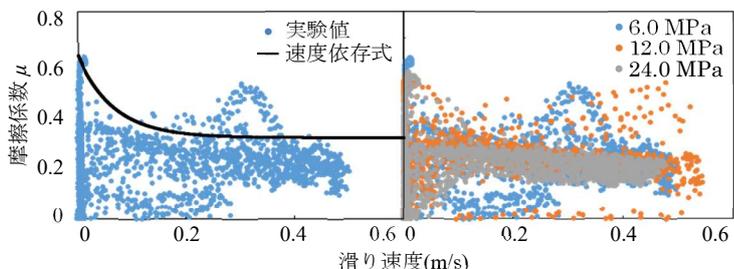


図-6 面圧と滑り速度が摩擦係数に及ぼす影響

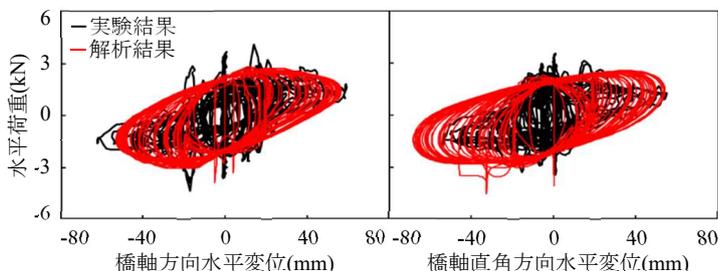


図-7 水平荷重-水平変位関係の比較 (3000 kg 実験)