

方向依存性のないリング型滑り面を有する 摩擦振子型免震機構付き RC 橋脚の水平二方向震動実験

早稲田大学 学生会員 ○矢島 美季, 檜山 大樹, Benjamin Brito 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

摩擦振子型免震機構付き RC 橋脚は、**図-1** に示すように橋脚中間部に滑り面を設けることで、橋脚下部に伝達される地震時慣性力の大幅な低減と残留変位の抑制を可能とする。既往研究では、コンクリート製の臼型滑り面と鋼製摩擦振子を組み合わせた提案構造において、滑り面に斜面角度 11° を与えたとき、優れた免震効果を発揮することを確認している^{1),2)}。一方、臼型の滑り面形状は、橋脚間の不同変位や桁の回転に脆弱な恐れがある。また、提案構造を実橋梁へ適用する際には、伝達される地震時慣性力を橋脚の弾性域に留める必要がある。

本稿では、臼型同様に斜面と底面で構成されるリング型の滑り面を提案し、その地震時挙動を確認する。なお、複雑な滑り面形状と低摩擦を実現する材料として、3D プリンター製プラスチックの活用を試みた。

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 33 とした供試体を設計した。供試体は鋼製上部工、プラスチック製摩擦振子、およびリング型滑り面を有する RC 橋脚から構成される。**図-2** に滑り面の各部の名称、**図-3** に提案構造の骨格曲線を示す。コンクリート製滑り面の斜面角度 θ は 11° とし、摩擦振子幅 10 mm に対して、可動幅 d が 5 mm, 10 mm, 20 mm となる 3 種類の供試体を製作した。力のつり合いから、本機構の骨格曲線はテトラニア型となる。**写真-1** に ABS 製摩擦振子を示す。摩擦振子は、ボルトを用いて上部工と剛結する構造とし、熱溶解積層方式 (FDM) による ABS と粉末焼結積層方式 (SLS) による Nylon の 2 種類の素材を用いて、3D プリンターにより造形した。加震前には摩擦振子の軸ひずみを計測することで、上部工の重量が概ね均等に作用していることを確認した。1 つの摩擦振子にかかる軸力は 3.68 kN である。震動実験には、2007 年能登半島地震の際に石川県輪島市鳳至町で観測された地震波を用い、必要に応じて加速度振幅を 1~1.75 倍にした。

3. 実験結果

水平一方向 (橋軸方向)、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を確認した。**図-4** に水平荷重一水平変位関係の一例を示す。一方向入力では、摩擦力を上回るせん断力が作用した際に摩擦振子が滑り出し、良好な滑りが確認された。一方で、接地面が底面から斜面へ切り替わる際には、静止摩擦力を上回る衝突荷重が発生した。二方向入力では、上部工が橋軸直角方向には滑らずに、滑り面を支点として振動する現象が見られた。**図-5** は、本機構において、重心から接地点までの橋軸直角方向の距離 r が転倒モーメントを考えるうえで重要なパラメータとなっており、橋軸方向に滑った場合には r が 0 に近づくことで、橋軸直角方向に挙動が不安定化することを示している。

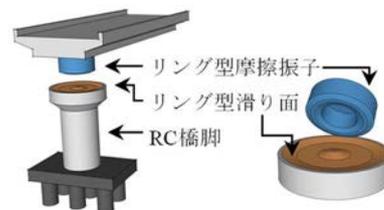


図-1 摩擦振子型免震機構付き橋脚

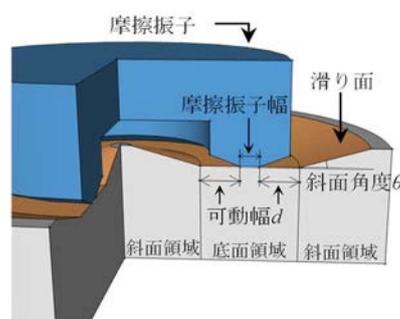


図-2 リング型滑り面の断面

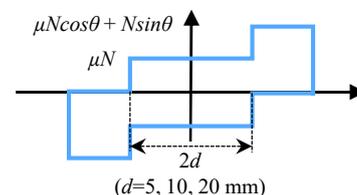


図-3 リング型滑り面の骨格曲線



写真-1 ABS 製リング型摩擦振子

キーワード 摩擦振子, 震動実験, 橋梁, 免震機構, 3D プリンター, レジリエンス

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学創造理工学部社会環境工学科 TEL 03-5286-2694

したがって、二方向入力時の橋軸方向の荷重増加は衝突によるものである一方で、橋軸直角方向の荷重増加は上部工の不安定挙動によるものと考えられる。

図-6 に、水平一方向入力時の衝突荷重—滑り速度関係を示す。ここで、衝突荷重は骨格曲線からの増分と定義する。本機構の衝突荷重は、運動量保存の法則に従い、滑り速度の増加に比例することが示された。また、その傾きは、摩擦振子の材料によって異なり、弾性係数の影響を受けることが確認された。

図-7 に、水平二方向入力時の残留変位を示す。本機構の残留変位抑制効果は、可動幅に応じて発揮されることが確認された。一方で、可動幅 5 mm の供試体では、Nylon 製摩擦振子を用いると加震後に斜面上で振子が停止する状況が見られ、摩擦係数の小さい ABS 製摩擦振子の方が復元性能に優れることが示唆された。

図-8 に、水平一方向入力において 0.005 秒間隔で計測された加速度データを基にした、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併せて示す。

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

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、 μ_k ：動摩擦係数、 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。

本機構の摩擦係数は、静止状態において ABS で 0.34、Nylon で 0.45 であり、滑り速度の増加に伴って ABS で 0.2、Nylon で 0.3 に漸近する速度依存性を有していることが示された。また、複数回载荷を行っても、摩擦振子の摩耗や損傷の程度は小さかったことから、面圧が約 0.9 MPa の条件下では、プラスチック素材は十分な耐摩耗性を有していることが確認された。

5. まとめ

リング型滑り面を有する摩擦振子型免震機構に対して震動実験を実施し、地震時挙動を検証した。コンクリートとプラスチックの摩擦を利用することで、水平一方向入力においては、良好な滑りが確認できたものの、衝突荷重が静止摩擦力を卓越する結果となった。水平二方向入力においては、橋軸方向の滑りを受けて、橋軸直角方向に挙動が不安定化する課題が確認された。衝突の低減と構造の安定を可能とする滑り面形状の開発に、今後取り組みたい。

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) Brito, M.B., Akiyama, M., Ichikawa, Y., Yamaguchi, H., Honda, R. and Ishigaki, N.: Bidirectional shaking table tests of a low-cost friction sliding system with flat-inclined surfaces, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.49, pp.817-837, 2020. 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.

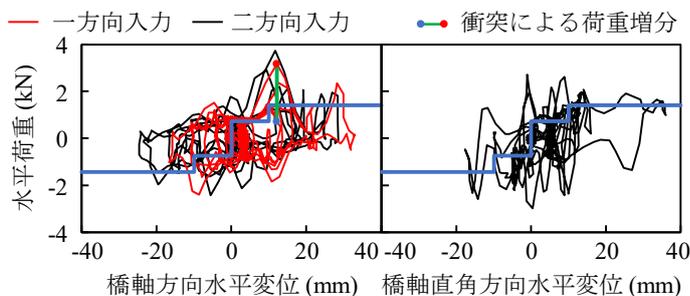


図-4 水平荷重—水平変位関係の比較（一方向と二方向）

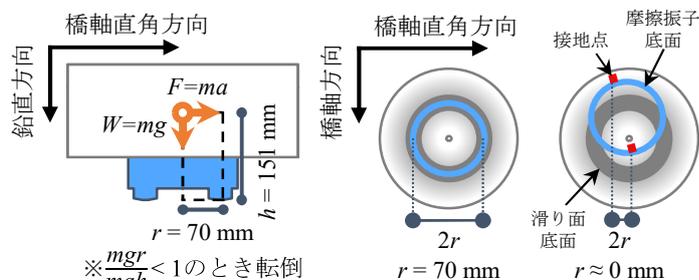


図-5 不安定挙動（安定モーメントと転倒モーメント）

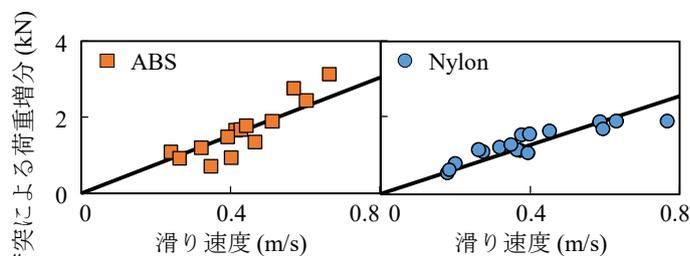


図-6 衝突荷重—滑り速度関係

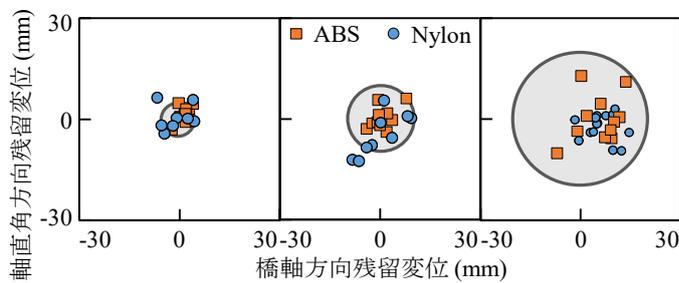


図-7 残留変位

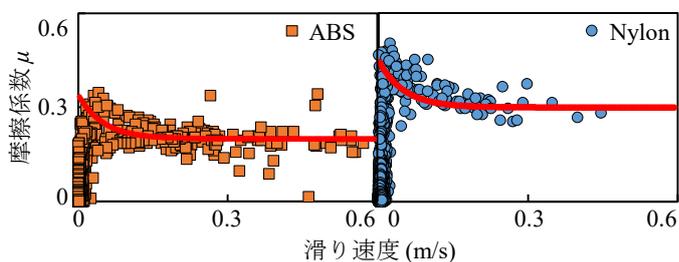


図-8 摩擦係数の速度依存性