

リング型滑り面を有する摩擦振子型免震橋梁の 地震応答特性に関する実験的研究

矢島 美季¹・檜山 大樹¹・Benjamin Brito²
石垣 直光³・高橋 宏和³・秋山 充良⁴・本田 利器⁵

¹学生会員 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

²早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

³日本工営（株）コンサルティング事業統括本部交通運輸事業本部（〒102-8539 東京都千代田区麹町5-4）

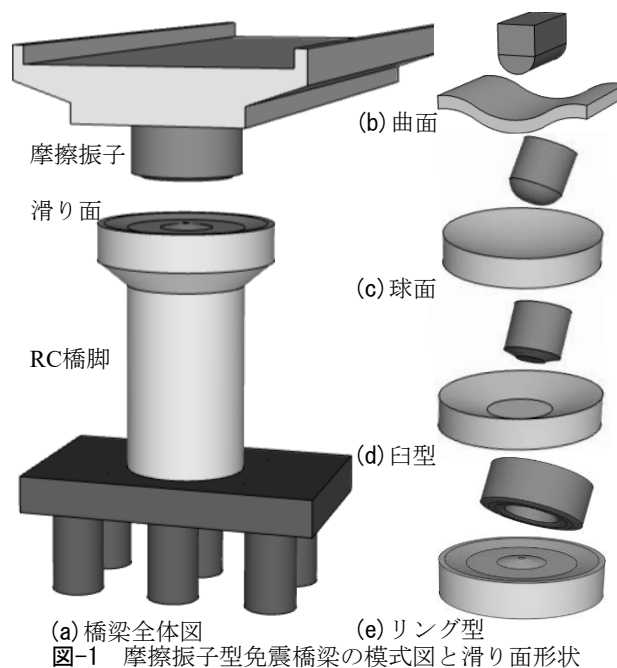
⁴正会員 博（工）早稲田大学教授 創造理工学部社会環境工学科（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

⁵正会員 博（工）東京大学大学院教授 新領域創成科学研究科（〒277-8561 千葉県柏市柏の葉5-1-5）

1. はじめに

橋梁の耐震設計では、部材間の耐力を階層化することで構造物全体の崩壊を防ぐキャパシティデザインの考えが用いられている。一般に、橋脚基部が犠牲部材に選択されるが、地震後には長期間にわたり修復作業が必要となる懸念がある。一方で、橋梁は、地震後に救急活動や被災地への緊急物資の輸送路として重要な役割を担うため、地震後のその機能低下をできるだけ抑制する必要がある。この背景のもと、著者らは、摩擦振子型免震機構を有するRC橋脚を提案し、ダメージフリー橋梁の開発に取り組んできた^{1), 2)}。提案構造は、図-1(a)に示すように、滑り面を境に上下2つに分かれており、上部工に剛結された摩擦振子が滑り面上を運動する。滑りによって橋脚基部に伝達される地震時慣性力が低減されることで、地震中の安全性を確保する。さらに、滑り面の傾斜によるセンタリング機能により、地震後の残留変位を抑えることで即時供用性も確保する。

既往研究では、様々な滑り面形状を実験的に検討してきた。水平一方向入力を想定した図-1(b)に示す曲面や、水平二方向入力に対応する図-1(c)に示す球面状を用いると、種々の要因により、加震中に安定した挙動が得られなかった。一方、図-1(d)に示す臼型滑り面は、水平な底面と斜面で構成されており、良好な滑り性能が確認された。さらに、寸法の異なる供試体を用いた震動実験による地震応答特性の検討がなされており、寸法によらず免震効果が発揮されることが確認され、最大せん断力や残留変



位の大きさから、斜面と底面のなす角度は 11° が最適であると結論付けられている²⁾。

一方で、臼型滑り面は、その幾何形状から、桁に回転が生じると各滑り面で生じる鉛直変位が異なる値となり、かつ、面圧の大きさから摩擦振子部には鋼材を用いる必要があり、摩擦係数を小さくできない理由となっていた。そこで、この問題を解決するため、臼型の断面形状を円状に配するリング型滑り面を、プラスチック材料を用いて3Dプリンターにより造形することを提案する(図-1(e))。本稿では、この滑り機構の有用性を震動実験により確認した結果を報告する。

2. 実験概要

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。橋梁模型は、写真-1に示されるように、鋼製上部工、2つのプラスチック製摩擦振子、および2基のリング型滑り面を有するRC橋脚から構成される。

図-2に一方向入力時の骨格曲線を示す。本機構に生じる水平荷重は、摩擦力と復元力で構成され、摩擦係数、斜面角度、および自重に依存する。摩擦力は μN を含む項で表され、運動方向と反対方向に働く。自重による復元力は $N\sin\theta$ を含む項で表され、滑り面の中心に向かって働く。摩擦振子が底面に位置する、あるいは斜面上に位置する際、せん断力は一定となり、骨格曲線はテトラリア型となる。

図-3にリング型滑り面の断面図を示す。滑り面の断面形状は、既往の臼型滑り面における研究²⁾を参考に、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。リング型滑り面においては、運動中にいずれの方向に滑り変位が生じた場合にも、内側と外側の2つの斜面上で上部を支持するため、2つの橋脚で異なる滑り変位が生じた場合でも安定した支持が可能となる。臼型滑り面と同様の免震効果が得られ、また、摩擦係数、および摩擦振子と滑り面の接触面圧が共に小さくなることから、摩擦を防ぐことができ、安定した挙動が得られると期待された。

写真-2に製作したリング型摩擦振子を示す。摩擦振子は、3Dプリンターで材料と出力方式の異なる2種類を製作し、摺動材料の違いによる地震応答特性への影響を検討した。ABS製摩擦振子は熱溶解積層方式(FDM)で、Nylon製摩擦振子は粉末焼結積層方式(SLS)でそれぞれ造形した。既往研究²⁾では、滑り面と摩擦振子の組み合わせは、表面強化材を塗布したコンクリートと鋼であったが、本稿では、より摩擦係数の小さい、コンクリートとプラスチックの接触とすることで、地震時慣性力の低減を図った。

震動実験には、早稲田大学所有の三次元震動台を使用した。加震前には、滑り面と摩擦振子のリングの中心が揃うように、橋脚上に上部工を設置した。この際、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。震動実験で用いた正弦波は、周波数3.0 Hz、目標最大振幅45 mm(加速度0.82 G)とし、徐々に振幅を大きくして、目標振幅に至った後はその振幅を維持した。実験では実地震動も用いており、2007年能登

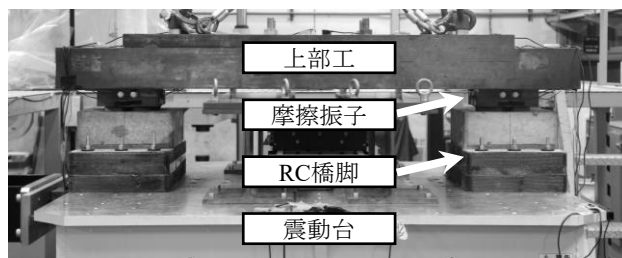


写真-1 震動実験の接地状況 (左右：橋軸方向)

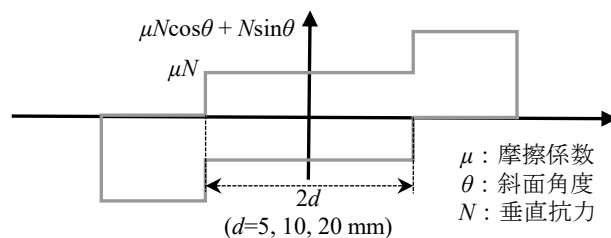


図-2 骨格曲線

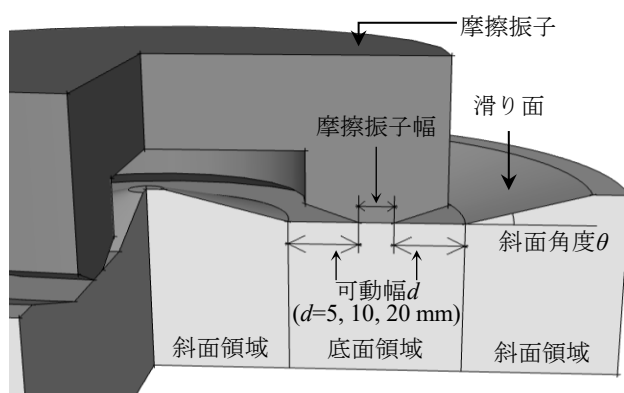
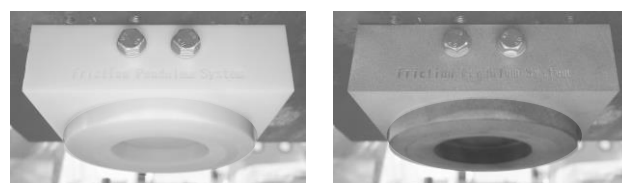


図-3 リング型滑り面の断面図



(a) ABS (FDM)

(b) Nylon (SLS)

写真-2 リング型摩擦振子

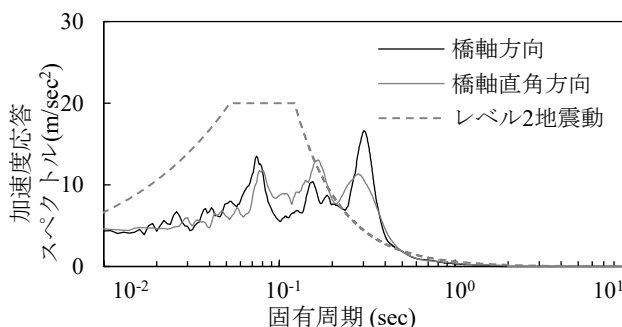


図-4 実地震動 (振幅1.0倍)

半島地震の際に石川県輪島市鳳至町で観測された波の加速度振幅を1~1.75倍の範囲で増幅した。図-4に、実験に使用した実地震動 (振幅1.0倍)、および道路橋示方書が定めるレベル2地震動タイプII (I種地盤)の加速度応答スペクトルを示す。

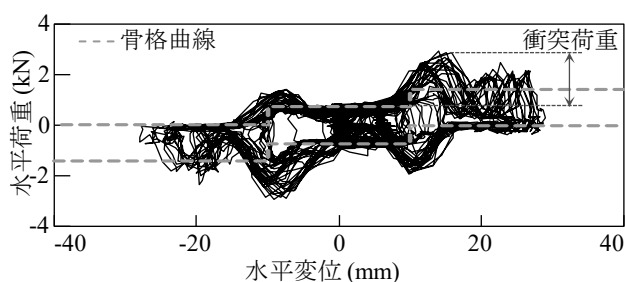


図-5 水平荷重－水平変位関係（正弦波）

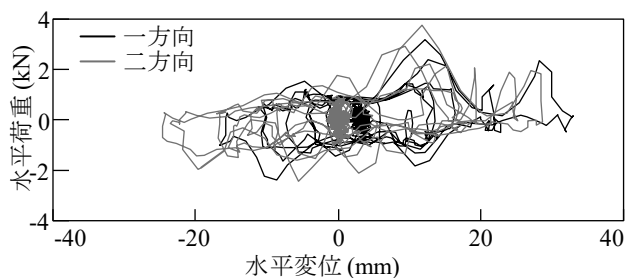


図-6 水平荷重－水平変位関係（橋軸方向）

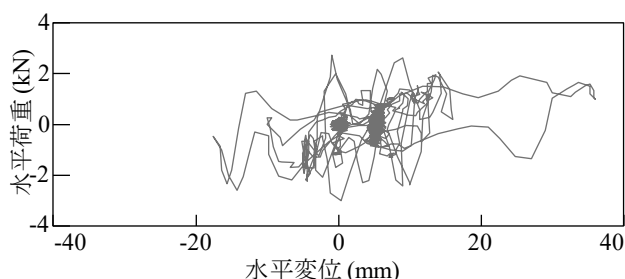


図-7 水平荷重－水平変位関係（橋軸直角方向）

3. 実験結果

(1) 水平荷重－水平変位関係

a) 正弦波入力に対する応答

水平一方向（橋軸方向）に正弦波を入力し、提案構造の滑り挙動を観察した。図-5に正弦波を入力した際の水平荷重－水平変位関係を示す（可動幅 $d = 10 \text{ mm}$ ，ABS製摩擦振子）。静止摩擦力を上回るせん断力が作用すると摩擦振子が滑り出し、良好な滑り挙動が確認された。ただし、接触面が底面から斜面へ切り替わる際に局所的に大きな荷重が生じた。これは、摩擦振子の一端が斜面上に衝突する際に観察され、静的な力の釣合いから求められる骨格曲線を上回る荷重が生じた。

b) 実地震動入力に対する応答

実地震動を用いて水平一方向（橋軸方向）、および水平二方向地震動実験を行い、提案構造の地震時挙動を確認した。図-6と図-7に加速度振幅1.5倍の地震動を与えた際の水平荷重－水平変位関係を示す（可動幅 $d = 10 \text{ mm}$ ，ABS製摩擦振子）。水平一方向入力では、正弦波入力の場合と同様に衝突の影響が見られた。水平二方向入力では、橋軸直角方向には滑らかに撓動せずに、上部工が接触面を支点に転倒

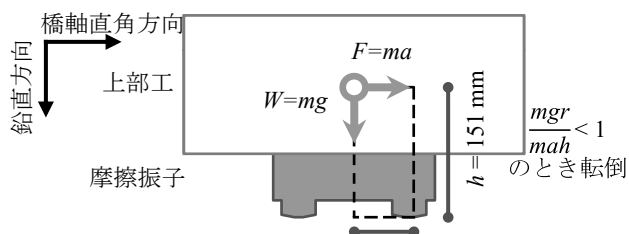


図-8 転倒モーメント

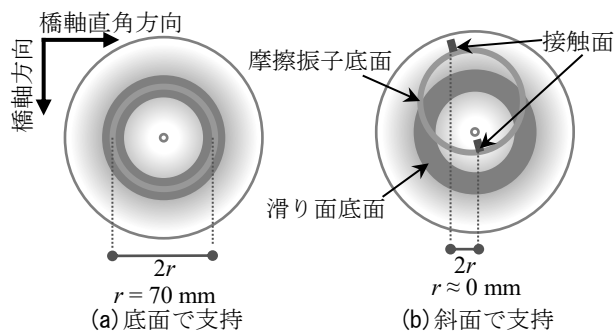


図-9 支持位置による距離 r の変化

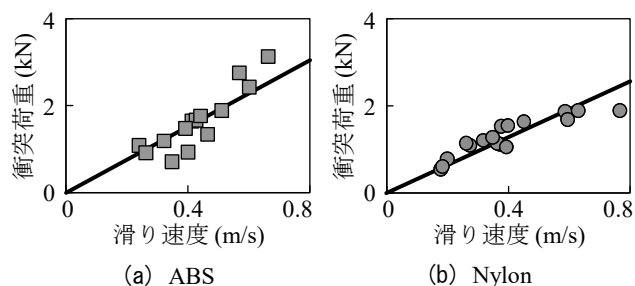


図-10 衝突荷重－滑り速度関係

するような傾きを伴った不安定な挙動が観察された。

図-8は、転倒モーメントを考えるうえで、重心から摩擦振子と滑り面の接触面までの橋軸直角方向の距離 r が重要なパラメータとなることを示す。橋軸直角方向には上部工を支持する摩擦振子が1つであるため、図-9に示すように、橋軸方向に滑った場合には r が0に近づくことで、橋軸直角方向に転倒しやすくなる。したがって、水平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。

(2) 衝突荷重

図-10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ることが確認された。参考文献2)では、上部工重量の増大に伴い衝突の影響がさらに大きくなることが指摘されており、提案構造で衝突の影響を緩和するための対策を、今後講じる必要がある。

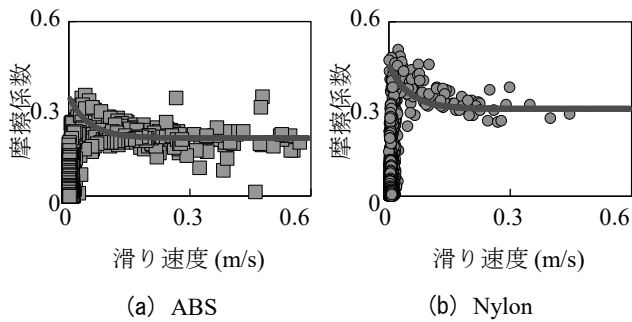


図-11 摩擦係数－滑り速度関係

(3) 摺動材料と摩擦係数

図-11に、摩擦係数と上部工の滑り速度の関係を示す。可動幅 $d=20$ mmの滑り面を用い、水平一方向地震動入力に対して0.005秒間隔で計測された加速度データを基にした。摩擦係数は滑り出し時に最大となり、滑り始めると速度の増加に伴って減少し、一定値に漸近する速度依存性を有することが示された。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。

$$\mu(V) = \mu_k + (\mu_s - \mu_k) \exp(-n'|V|) \quad (1)$$

ここに、 $\mu(V)$ ：速度依存性を考慮した摩擦係数、 μ_s ：静止摩擦係数、 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。

静止摩擦係数はABSで0.34、Nylonで0.45、動摩擦係数はABSで0.20、Nylonで0.30であり、いずれもABSの方がNylonよりも小さく、滑り性能に優れる結果となった。なお、静止摩擦係数は3回の震動実験の最大値の平均、動摩擦係数は滑り速度が0.2 m/sより大きい場合の平均とした。既往研究では、静止摩擦係数を基準として、ばらつきを伴う実験値を上回るように速度依存式を導出していた。本稿では、摺動材料による摩擦係数の違いを比較検討するため、動摩擦係数を静止摩擦係数から独立して求めた。

なお、複数回載荷を行っても、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。

(4) 残留変位

図-12に、水平二方向入力時の残留変位を示す。図中、色を付けている部分は、可動幅 d を半径とする円であり、底面領域を表す。残留変位の大きさは載荷毎に異なり、ばらつきを有するが、自由震動後、摩擦振子は概ね底面領域に戻っている。地震後の即時供用開始を目指すうえで重要な残留変位は、可動幅に応じて抑制できることが示された。一方で、可

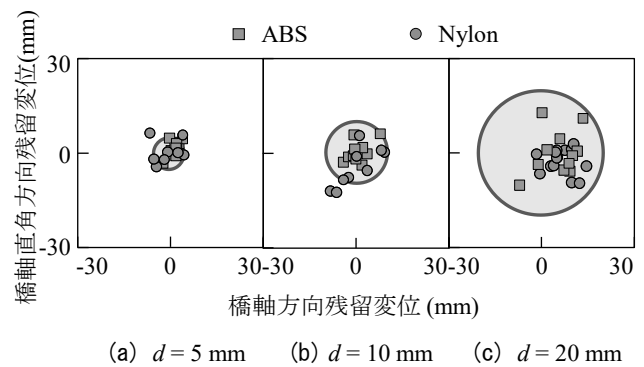


図-12 残留変位

動幅5 mm、および10 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摩擦振子が停止する場合が見られ、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。形状のみならず摺動材料が残留変位に与える影響については、今後更なる実験的検証が必要である。

4. まとめ

リング型滑り面を有する摩擦振子型免震橋梁に対して震動実験を実施し、地震応答特性を検証した。コンクリートとプラスチックの摩擦を利用することで、水平一方向入力に対しては、良好な滑りが確認された。一方、衝突荷重が静止摩擦力を上回る結果となり、衝突時に最大水平荷重が発現する結果となった。水平二方向入力に対しては、橋軸方向の滑り変位を受けて、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改良に、今後取り組みたい。

謝辞：本研究の一部は、JSPS科研費JP20H00258の助成を受けて行ったものです。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 檜山大樹, 銭城, Miguel B. BRITO, 石垣直光, 秋山充良, 本田利器: 3Dプリンターを活用したローコスト摩擦振子型免震橋梁の地震時応答に及ぼす寸法効果の影響, 土木学会論文集A1 (地震工学論文集第40巻), 2021.
- 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.