

摩擦振子型免震橋梁に用いるリング型滑り面の改良と 二方向震動実験による地震応答性状の確認

臼井 駿矢¹・矢島 美季¹・樫山 大樹¹
石垣 直光²・高橋 宏和²・秋山 充良³・本田 利器⁴

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 東京都千代田区麴町5-4）

³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）

⁴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

コンクリート系構造物の耐震設計では、費用対効果の観点から部分的な塑性化を許容し、一方で、地震後の補修・補強作業の容易さを勘案した上で地震エネルギーの吸収を図る犠牲部材を選定し、他部材はそれを上回る耐力を与えて弾性応答させるキャパシティデザインの考えが導入されている。しかしながら、レベル2地震動クラスの強震動を受けた橋脚には、相当の残留変位が生じ、長期間にわたって復旧作業が必要となる懸念がある。道路ネットワークは、被災地の復興や緊急支援物資の搬送に必要不可欠であり、地震後の即時の供用が求められることを考えると、橋梁はダメージフリー構造であることが望ましい。この背景のもと、著者らは摩擦振子型免震機構付き橋脚（図-1）の開発に取り組んできた。これは、橋脚頂部に滑り面を設けることで、上部工に剛結された摩擦振子が滑り面上を運動する仕組みを有する橋脚である。滑りによって橋脚下部に伝達される地震時慣性力の大幅な低減を図り、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制することで、即時供用性を確保しようとするものである。

既往研究では、リング型形状の滑り面と摩擦振子を組み合わせた提案構造において震動実験が行われている¹⁾。リング型形状において、斜面角度を11°とすることで、残留変位を適切な大きさに抑制できることが実験的に確認されている。一方で、摩擦振子が滑り面の斜面に突入する際の衝突時に生じる大き

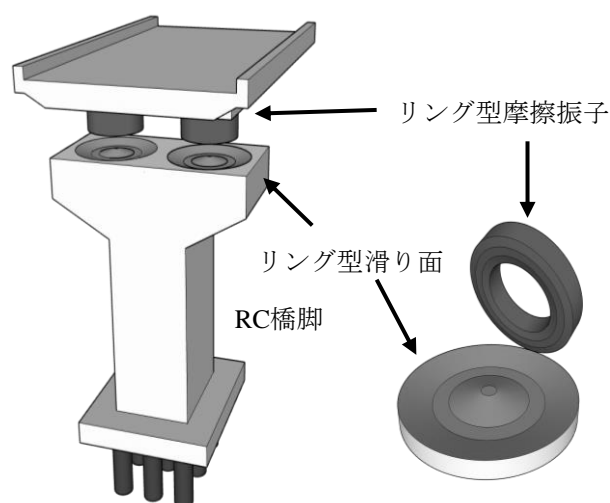


図-1 摩擦振子型免震機構付き橋脚

な荷重が課題となっていたが、それを低減するために斜面角度を小さくした場合、残留変位が大きくなるトレードオフの関係が観察されている。つまり、加速度の低減効果、および残留変位の抑制効果の両立という点において改善の余地がある。

そこで、本研究では、リング型滑り面の改良を試みる。具体的には、摩擦振子が斜面に突入する際の衝突力と斜面角度には相関関係があることから¹⁾、衝突力を緩和しつつ、残留変位を抑制するために、二段階の斜面角度を有する滑り面を使用する。そして、リング型滑り面を有する摩擦振子型免震橋梁に対して水平二方向震動実験を実施し、滑り面の斜面角度や形状が本機構の地震時挙動に与える影響を検証することで、残留変位の抑制と衝突力の低減を両立させるリング型滑り面の形状の同定を試みる。

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とした供試体を製作した。供試体は、写真-1に示されるように、鋼製上部工、4つのプラスチック製摩擦振子、および4基のリング型滑り面を有するRC橋脚から構成される。紙面の都合上、詳細は記載しないが、摩擦振子およびリング型滑り面ともに3Dプリンターを用いて製作している。

図-2にリング型滑り面の各部の名称を、図-3に摩擦振子とリング型滑り面の断面形状の詳細を示す。滑り面の断面形状は、既往研究を踏まえ、可動幅 d を10 mmとして供試体を製作した。斜面角度については、既往研究において斜面角度 11° を与えた場合は斜面に突入する際の衝突現象が課題となることを踏まえ、本実験ではその改善を目指し、図-3(a)に示す斜面角度が一段階の滑り面について、 $\theta_1 = 4^\circ, 7^\circ, 11^\circ$ となる3種類を製作した。以降では、滑り面の名称を、R-(斜面角度の値)と呼ぶ。これに加えて、図-3(b)に示すような斜面角度が $\theta_1 = 4^\circ$ と $\theta_2 = 7^\circ$ を組み合わせた二段階の滑り面も2種類製作した。斜面角度を二段階とすることで、斜面に突入する際の衝突力を緩和し、その先に大きな斜面角度($\theta_2 = 7^\circ$)を与えることでセンタリング機能も確保し、衝突力の緩和と残留変位の抑制の両立を試みる。斜面一段階目の 4° の領域 d_1 が10 mmと15 mmの2種類の供試体を製作し、それぞれR-4S7、R-4L7と以降では称する。

図-4に静的な力のつり合いから求まる骨格曲線を示す。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、自重による復元力は $N \sin \theta$ を含む項で表される。摩擦振子が滑り面の底面、あるいは斜面領域に位置する際、せん断力は一定となる。斜面角度が一段階の場合での骨格曲線は実線で示す通り、テトラリニア型となる。斜面角度が二段階の場合では、滑り面の角度切り替わり点の一つ増えることから、点線で示す通り、ヘキサリニア型となる。

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。載荷ごとに上部工をチェンブロックで吊り上げ、摩擦振子と滑り面の中心が一致するように再設置を行った。震動実験で使用した正弦波は、周波数を2.5Hz、および3.0Hzとし、震動台の目標加速度 $0.5 \sim 0.8g$ (g : 重力加速度)の範囲で加震を行った。地震波は、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、および1995年兵庫県南部地震の際に兵庫県神戸市中央区で観測され



写真-1 供試体の設置状況

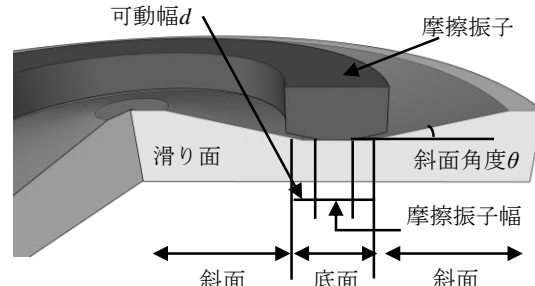


図-2 リング型滑り面の各部名称

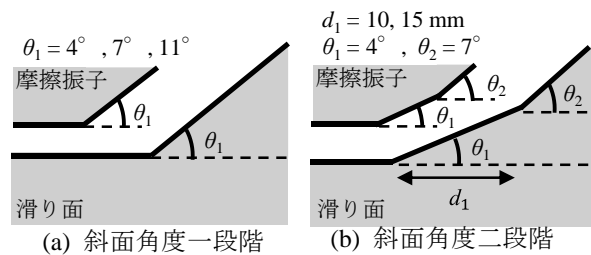


図-3 摩擦振子とリング型滑り面の断面形状

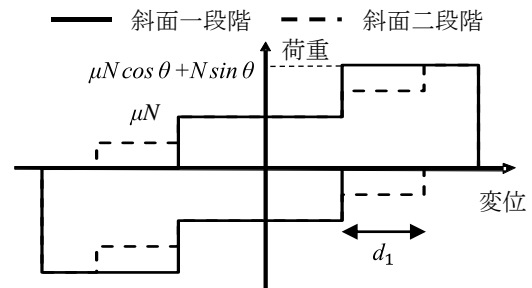


図-4 リング型滑り面の骨格曲線

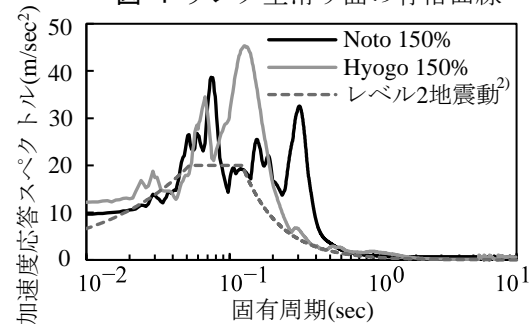


図-5 実地震動（振幅1.5倍）

た地震波を用いた。地震動の時間軸は、橋梁模型の縮尺に適合するように相似則に従って修正した。また、縮尺調整したオリジナルの地震動の加速度振幅の大きさを100%と定義し、能登半島地震に関しては、150%、175%、200%、225%の振幅を有する地震動を、兵庫県南部地震に関しては、125%、150%、175%、200%の振幅を有する地震動を使用した。図-5に、実験に使用した実地震動（代表として振幅1.5倍）、および道路橋示方書²⁾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。

3. 実験結果

(1) 水平荷重－水平変位関係

水平一方向（橋軸方向），および水平二方向震動実験を実施し，提案構造の地震時挙動を観察した．**図-6**にR-7における水平荷重－水平変位関係を，**図-7**にR-4S7における水平荷重－水平変位関係を示す．正弦波入力において，一方向入力では，摩擦振子が底面から斜面に突入する際に，大きな衝突荷重が生じており，最大水平荷重は，摩擦係数，斜面角度，および自重から求まる摩擦現象には依らず，衝突発生時に生じている．一方で，二方向加震では，顕著な衝突現象は生じず，なめらかな滑りが見られた．これは，**図-8**に示されるように，二方向入力によって入射角度が緩和されることにより，斜面突入時に摩擦振子が滑り上がる角度が一方向入力時よりも緩やかになっているためである．

図-7より，斜面角度を二段階とすることで，衝突の影響が緩和されることが確認された．**図-6**と**図-7**を比較すると，R-4S7の方が衝突荷重が小さくなっていることがわかる．これは，斜面角度を二段階とすることで，斜面角度が切り替わる際の差分が4°と3°に分散されていること，および4°の領域での摩擦によるエネルギー逸散の影響を受けて，7°に突入する際の速度が小さくなるためと考えられる．

(2) 残留変位

図-9に能登半島地震，および兵庫県南部地震を水平二方向に入力した一連の実験において計測された，5種類の滑り面から得られた残留変位を示す．**図中**の黒色の円は，半径が可動幅 d と等しい円であり，この円よりも内側に残留変位が生じた場合には摩擦振子が滑り面の底面領域内で停止したことを示す．一方で，この円よりも外側に残留変位が生じた場合には，摩擦振子が滑り面の斜面領域で停止したことを示す．摩擦振子が斜面領域で停止した場合，鉛直方向にも残留変位が発生するため，路面の平坦性が失われ，橋梁の即時供用性に影響を与える懸念がある．さらに，底面領域で接地する場合に比べ，接地面が大幅に小さくなり，地震後の常時の面圧が過大となるほか，安定性にも欠けるため，残留変位は底面領域内に収まることが望ましい．

図-9より，斜面一段階の滑り面においては，斜面角度7°と11°の場合，残留変位は底面領域内に収まるが，4°の場合，残留変位が斜面領域に生じるケースが見られた．また，斜面角度二段階の滑り面においては，斜面角度4°の場合と同様，残留変位が斜面領域に生じるケースが見られた．このことから，残

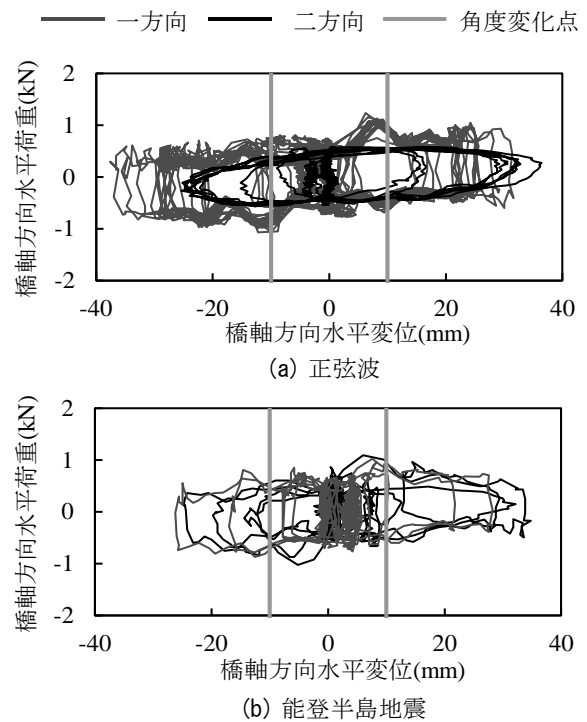


図-6 水平荷重－水平変位関係（R-7）

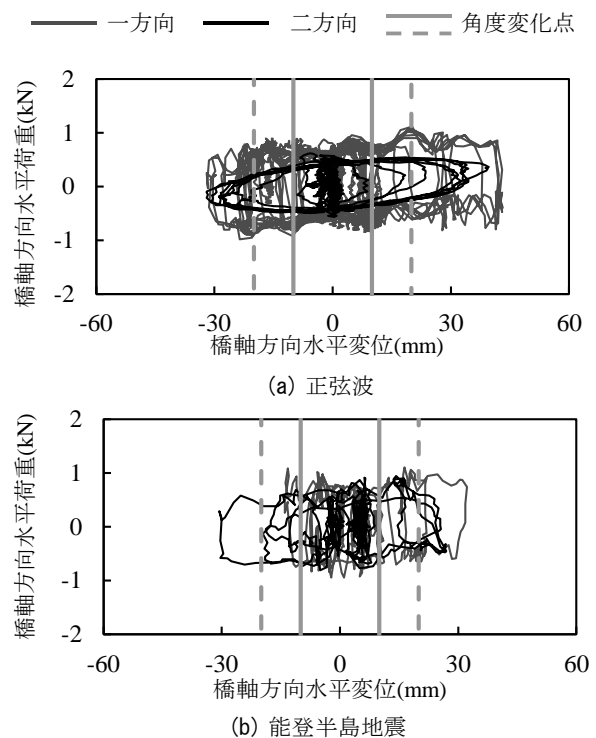


図-7 水平荷重－水平変位関係（R-4S7）

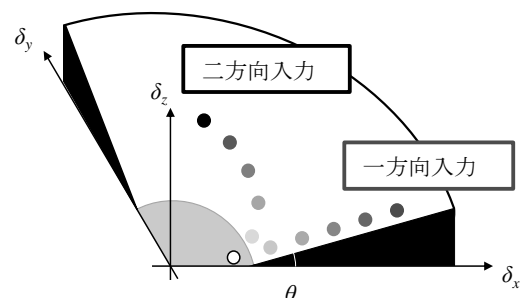


図-8 一方向入力と二方向入力の衝突力の違い

留変位の抑制には、一段階目の斜面角度が重要であり、残留変位を底面領域内に収めるには、斜面角度7°以上が必要であることが示された。これを摩擦力と復元力の関係に換算して考えると、摩擦力に対して0.34倍 ($= \tan\theta/\mu$) の復元力を与えれば本機構の残留変位は底面領域内に収まることになる。

(3) 最適斜面角度の同定

図-10に、震動実験で用いた2つの実地震波から得られた全ての残留変位と上部工最大加速度の関係を示す。既往研究で観察されたように、本実験でも残留変位抑制と加速度低減にはトレードオフの関係が認められる。ダメージフリーを目指す提案構造においては、応答加速度と残留変位は共に即時の供用が可能な程度までに小さいことが望ましく、同図においては原点に近いほど、良好な滑り性能を発揮しているといえる。ここでは、応答加速度については一般的なRC橋脚の弾性限界点となる震度0.6以下、残留変位については底面領域の大きさである10 mm以下を目安として、望ましい斜面形状を考える。

R-7は、応答加速度は最大でも0.6g程度であり、残留変位も全て底面領域に収まっている。したがって、斜面角度を一段階とした供試体においては、R-7が最適な供試体であると結論付けられる。二段階の斜面角度を有する供試体においては、R-4と同程度の加速度低減効果、かつR-4よりも優れた残留変位抑制効果を発揮しており、斜面を二段階にすることで、加速度と残留変位の低減をある程度まで両立できることを確認できた。しかしながら、図-10に示されるように、一部において残留変位が斜面領域に達するケースがあった。斜面角度を二段階にすることに加えて、例えば、摩擦係数の一段の低減を図ることで、このようなケースは排除できると思われる。今後の検討課題である。

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、地震時応答性状を検証した。提案構造の製作に3Dプリンターを活用することで、任意の形状と低摩擦な特性を有する摩擦振子型免震橋梁を安価に実現できる。震動実験より、残留変位抑制と加速度低減の効果はトレードオフの関係にあり、残留変位の抑制を優先する場合には斜面角度を7度にするのが良い。しかしながら、提案構造における寸法効果³⁾を加味すると、実橋梁スケールでは衝突力が卓越する恐れがあり、衝突を緩和する斜面形状やその摩擦係数について、更なる検証が必要で

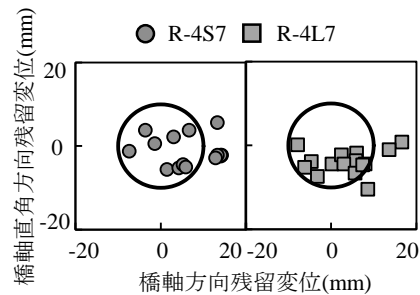
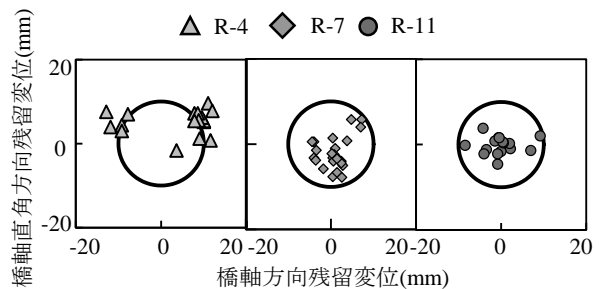


図-9 残留変位

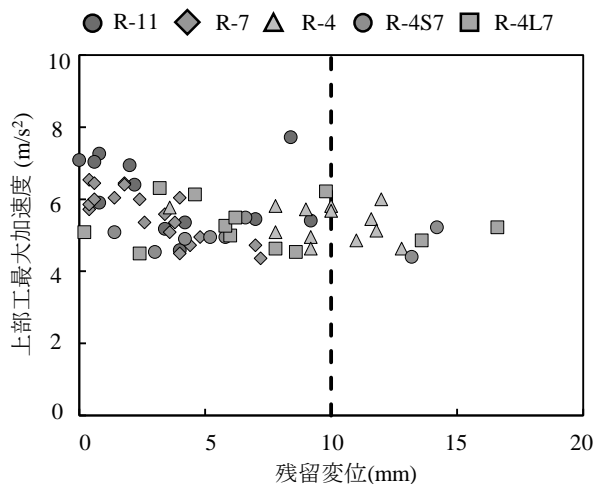


図-10 最大加速度と残留変位の関係

ある。

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) 矢島美季, 檜山大樹, Benjamin Brito, 石垣直光, 高橋宏和, 秋山充良, 本田利器：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, 第24回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp.213-216, 2021.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書 (V耐震設計編)・同解説, 2017.
- 3) 檜山大樹, 錢城, 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, Vol.77, No.4 (地震工学論文集第40巻), pp.I_1-I_13, 2021.