

摩擦振子型免震機構を有するコンクリートブロック組積造橋脚の正負交番载荷実験

早稲田大学 学生会員 ○疋田 翔悟, 矢島 美季, 臼井 駿矢

早稲田大学 正会員 秋山 充良

日本工営(株) 高橋 宏和, 有馬 俊, 石垣 直光

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は、振子の滑りによる地震時慣性力の低減、および滑り面の傾斜により残留変位の抑制を図る構造である。レベル2地震動に相当する地震力を受けた後でも供用性を確保できるダメージフリー構造となり得る可能性を有している。既往研究^{1),2)}では、RC橋脚の中間部にコンクリート製の滑り面を設けることを想定し、震動実験により最適な滑り面の形状と材料の組み合わせを検討してきた。その結果、リング型の滑り面とナイロン製摩擦振子を用いた場合に高い免震効果が発揮されることを確認している。

一方で、高い摩擦係数や斜面に振子が衝突する際に生じる大きな荷重により、滑り面より下部に位置する橋脚が損傷する可能性があるなど、ダメージフリー構造の実現には、一段の工夫が求められていた。本研究では、コンクリート製の下側滑り面に加え、ナイロン製の上側滑り面を摩擦振子型免震機構に設け、上下二面で異なる摩擦滑りを実現することで、一面のみを滑らせるときよりも大きな地震エネルギーを吸収できる。さらに、摩擦振子型免震機構を支える橋脚をアーチ型のコンクリートブロック組積造橋脚とすることにより、滑り面から伝達される水平力に対して弾性応答する構造形態とした。本稿では、この提案構造の正負交番载荷実験と、それに基づく解析的検討の結果を報告する。

2. 正負交番载荷実験の概要

本実験で用いた供試体は鋼製上部工、上側ナイロン製滑り面、ナイロン製摩擦振子（リング型）、下側滑り面付きコンクリート製要石、およびコンクリートブロックで構成される。写真-1に橋脚模型の全景、図-1に滑り面の各部名称、および図-2に滑り面の断面形状を示す。本実験では、図-2に示す3種類の θ_1' の滑り面形状を供試体として用いた。上側滑り面と摩擦振子は、強化プラスチックの一つであるナイロンを材料として3Dプリンターにより造形した。上側はナイロン同士、下側はナイロンとコンクリートによる摩擦が生じる。図-3に提案構造の各滑り面における骨格曲線を示す。

本機構の骨格曲線は、摩擦係数と斜面角度に応じて変化し、二つの滑り面を組み合わせることにより、荷重が小さい領域から順に滑りはじめ、上下の滑り面に変位が分散される。上側あるいは下型の一面のみを滑らせるよりも、骨格曲線に囲まれる面積を大きくできる（図-3）。上側滑り面の θ_2' は大きな値とし、そこに到達した後は下側滑り面のみに滑りが生じるようにしている。橋脚は、反力床に固定された鋼製治具の上に100 mm × 100 mm × 300 mmのコンクリートブロックを積み上げ、頂部に要石を載せることで自立する。载荷条件は、鉛直荷重を25 kNで一定とし、変位制御にて正負交番载荷実験を行った。

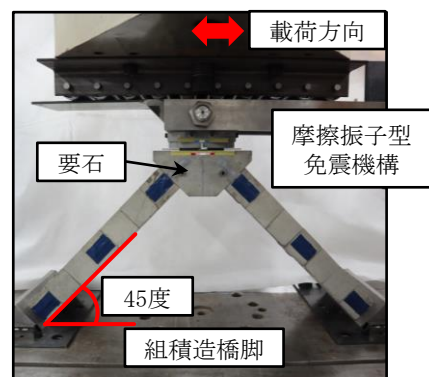


写真-1 橋梁模型の全景

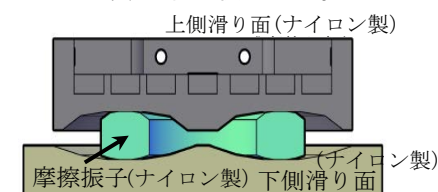


図-1 滑り面の各部名称

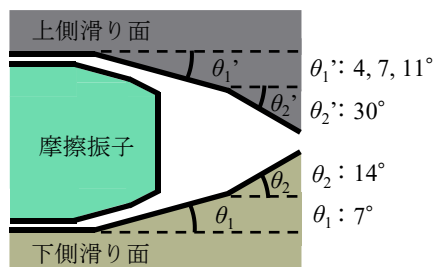


図-2 滑り面の断面形状

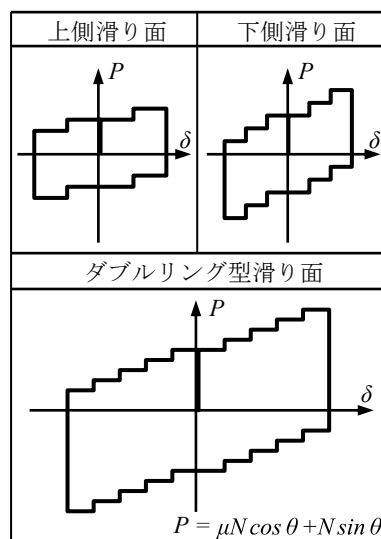


図-3 各滑り面における骨格曲線

キーワード 摩擦振子, 正負交番载荷実験, 橋梁, 免震機構, 組積造橋脚, 3Dプリンター, ダメージフリー構造
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

3. 正負交番载荷実験の結果

橋脚には損傷が発生せず、その構造形態の有用性が確認できたことから、本稿は、摩擦振子型免震機構の結果のみを報告する。図-4 と図-5 に、各滑り面とダブルリング型滑り面全体の水平荷重－水平変位関係の一例を示す。図-4 に示されるように、摩擦振子型免震機構に生じる全体変位は、意図した通りに上下の滑り面で分担されており、水平荷重は緩やかに漸増する。また、各滑り面の水平変位－水平荷重関係は、力の釣り合いから計算される骨格曲線（図中、理論値）に概ね一致した。

図-6 に、3 種類の供試体に対する 8 回の载荷実験で得られた計 24 個の動摩擦係数の分布を示す。図-6 より、ばらつきは確認されるが、上側滑り面を構成するナイロン同士 (N-N) の方が下側滑り面を構成するコンクリートとナイロン (C-N) よりも小さい動摩擦係数となることが多い。一般に、本研究で対象とする滑り機構では、摩擦係数の速度依存性や面圧依存性が指摘されている。本実験においても、载荷速度や鉛直荷重の大きさを変えた载荷も行っているが、繰り返し回数も含め、明確な依存性は認められなかった。ただし、本機構の地震応答を予測する際には図-6 の摩擦係数のばらつきを考慮する必要がある。

4. 解析的検討

図-7 に示すように、図-3 の骨格曲線内の面積が等価となるトリリニアモデルを作成した。このモデルを用いて摩擦振子型免震機構の最大変位について、摩擦係数と地震動の不確定性を考慮して動的解析を繰り返し行い、脆弱性を評価した。図-8 に fragility curve の一例を示す。ここで、 $S_a(2.0)$ は、固有周期 2.0 秒における加速度応答スペクトルの値である。図-8 より、設計地震力レベルでは提案構造は全く損傷せず、 $S_a(2.0)$ が 7m/s^2 まで損傷確率（摩擦振子が落下する限界変位に到達する確率）は極めて低いことが確認される。

5. まとめ

ダブルリング型滑り面を有するコンクリートブロック組積造橋脚の正負交番载荷実験を実施し、基本的な応答性状を確認した。ダブルリング型とすることで、滑り面の与え方や摩擦係数の設定の自由度が高まり、従来よりも多様な水平荷重－水平変位関係を持つ摩擦振子型免震機構を実現できる。ただし、摩擦係数のばらつきのため、耐震性能評価の際には、この影響を考慮する必要がある。また、本研究の範囲では、アーチ形のコンクリートブロック組積造橋脚には、ひび割れ等、一切の損傷は生じておらず、摩擦振子型免震機構を支える下部工として本構造を活用することで、ダメージフリー構造を実現できる可能性が示された。

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) 白井駿矢, 矢島美季, 檜山大樹, 石垣直光, 高橋宏和, 秋山充良, 本田利器: 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, 第 25 回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp.305-308, 2022. 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, Vol.77, No.4 (地震工学論文集第 40 巻), pp. I_1-I_13, 2021.

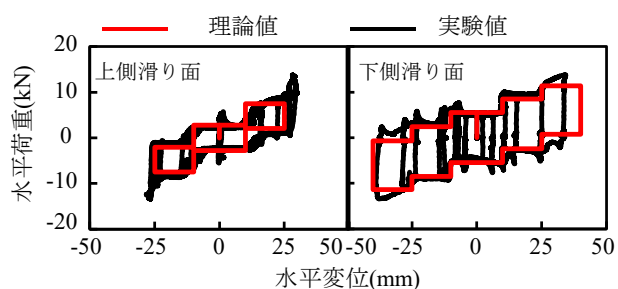


図-4 各滑り面の水平荷重－水平変位関係

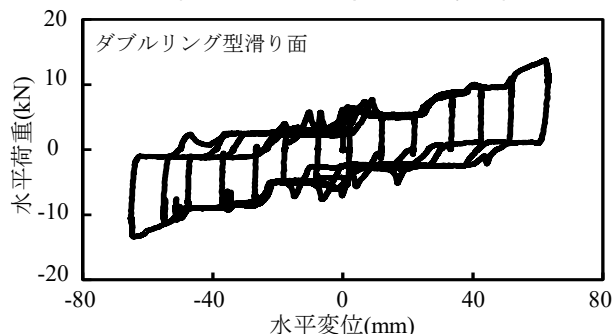


図-5 全体の水平荷重－水平変位関係

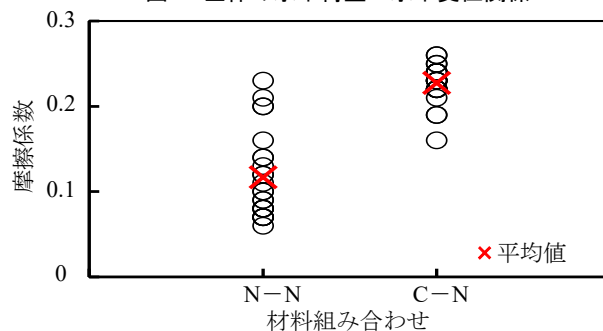


図-6 動摩擦係数の分布

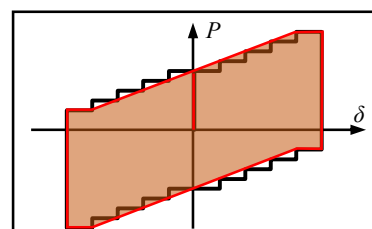


図-7 置換したトリリニアモデル

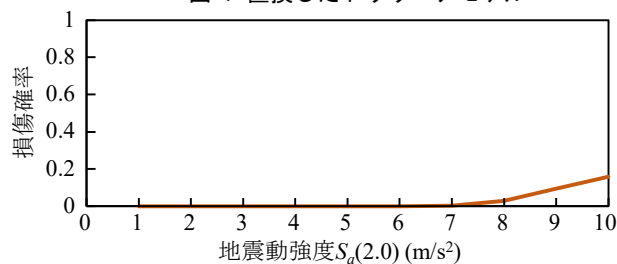


図-8 フラジリティカーブの一例