第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

コンクリートブロック組積造橋脚上に設けた二重滑り面を持つ摩擦振子の正負交番載荷実験およびその脆弱性評価

疋田　翔悟[1]・矢島　美季[1]・臼井　駿矢[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 東京都千代田区麹町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

橋梁の耐震設計にはキャパシティデザインの考えが導入されている[1)]．これは，レベル2地震動に対しては，地震後の補修・補強の容易さなどを勘案して犠牲部材を選定し，その部材の塑性化により確実にエネルギーの吸収を図ることで，倒壊などの致命的な状態に陥ることを防ぐ考えである．しかし，レベル2地震動クラスの強震動を受けた場合には，橋脚には相当の残留変位が生じ，大規模な修復作業が必要になる可能性があり，長期間，使用不可能になることが懸念される．橋梁は被災地の復興において，支援物資の搬送などの極めて重要な役割を担うため，レベル2地震動クラスの作用を受けた直後であっても供用性を維持することが望まれる．

この背景のもと，著者らは，ダメージフリー構造の開発を目指し，摩擦振子型免震機構のコンクリート橋脚構造への応用に取り組んできた．これは，橋脚上に滑り面を設け，その滑り面上を摩擦振子が運動することで，コンクリート橋脚基部に伝達される地震時慣性力の大幅な低減を図り，滑り面が持つ傾斜によるセンタリング機能によって地震後の残留変位を抑制し，即時供用性の確保を図るものである[2)]．既往研究では，リング型の滑り面と摩擦振子を組み合わせた場合での震動実験が行われ，斜面角度を7°にすることで，地震時慣性力を低減するとともに残留変位を抑制できることを実験的に確認した．一方で，摩擦振子の滑りが滑り底面から斜面へと変化する際の衝突時に生じる大きな水平荷重が及ぼすRC橋脚への負担が課題であった．

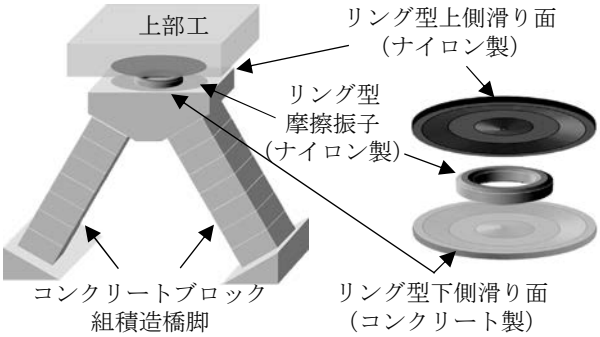


図-1　組積造橋脚上にある二重滑り面を持つ摩擦振子

そこで，本研究では，ダメージフリー構造の実現に向け，提案構造の一段の高性能化を試みる．具体的には，**図-1**に示すように，リング型摩擦振子に接する滑り面を上下面のどちらにも設ける二重化を図り，地震時のエネルギー吸収量の増大を図る．また，新たに設ける上側滑り面の材料として，ナイロンを用いることで滑りの低摩擦化を図る．さらに，橋脚部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で，摩擦振子が滑り面の斜面に突入する際に生じる大きな横荷重（衝突）に対しても弾性応答する構造形態とした．本稿では，この構造に対して，水平一方向の正負交番載荷実験を実施し，コンクリートブロック組積造橋脚上に設けた二重滑り面を持つ摩擦振子の基本的な応答性状を確認する．また，正負交番載荷実験により得られた水平荷重－水平変位関係から簡易な動的解析モデルを構築し，多数の地震動と摩擦係数の不確定性を考慮した脆弱性評価により得られた結果も報告する．

2. 実験概要

本実験では，10 mの実橋梁を想定し，これと載荷位置の制約から実橋梁の約1/15スケールである高さ633 mmの橋脚模型を製作した．**図-2**に橋脚模型の設置状況を示す．**図-2**に示されるように，橋脚模型は鋼製上部工，上側ナイロン製滑り面，ナイロン製摩擦振子，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．ナイロンは，強化プラスチックの一つであり，その材料特性は橋梁構造の使用に耐えるものである．なお，上部工と上側滑り面は剛結されている．**図-3**に滑り面の各部名称，および**図-4**に滑り面の断面形状を示す．本実験では，**図-4**に示す3種類のθ_1'を持つ滑り面形状を用いている．上側滑り面，および摩擦振子は，3Dプリンターにより造形している．摩擦振子の上側はナイロン同士の摩擦が生じ，下側はナイロンとコンクリートの摩擦が生じることになる．

図-5に提案構造の各滑り面における静的な力のつり合いから求まる骨格曲線と，それらを組み合わせた全体系での骨格曲線を示す．本機構に生じる水平荷重は，摩擦係数，斜面角度，および上部工の重量によって決定づけられる．提案構造における骨格曲線は，上側滑り面ではテトラリニア型，下側滑り面ではヘキサリニア型となり，**図-5**に示すように変位に応じて段階的に荷重が増加する．水平荷重を受けると，上下の滑り面の各骨格曲線の荷重が小さい領域から順に滑りが生じ，上下の滑り面に変位が分散される．加えて，上側滑り面のθ_2'は，**図-4**に示されるように30°と他の斜面角度よりも大きくしてあり，その抵抗により，以降では，下側滑り面上のみを摩擦振子が滑り，上側滑り面と摩擦振子には相対変位が生じない．橋脚は，反力床に固定された傾斜のある鋼製治具の上に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アーチ機構を形成する．

正負交番載荷実験には，早稲田大学所有の大型二軸構造物評価装置を使用した．正負交番載荷実験では，載荷が終わるたびに上部工をクレーンで吊り上げ，上側滑り面，摩擦振子，および下側滑り面の中心がすべて一致するように再設置を行い，次の載荷に移っている．**表-1**に実験条件を示す．橋脚角度（2種類），θ_1'（3種類），鉛直荷重（2種類），および載荷速度（2種類）を実験パラメータとした24種類の実験条件に対し，二重滑り面を持つ摩擦振子の限界変位である65 mmまで，正負の水平方向に5 mmずつ変位を漸増させる交番載荷実験を行い，荷重－変位関係など，応答性状の違いを観察した．

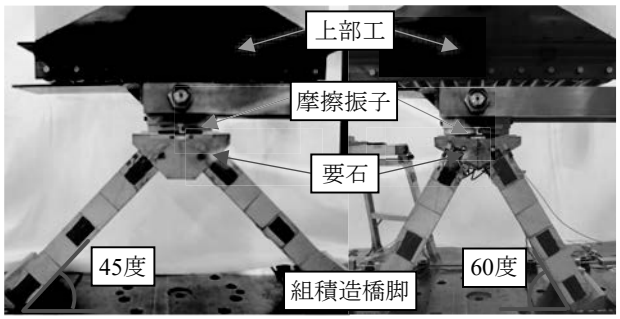


図-2　橋脚模型の設置状況

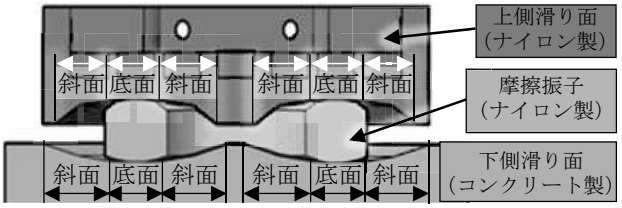


図-3　二重滑り面をもつリング型摩擦振子の各部名称

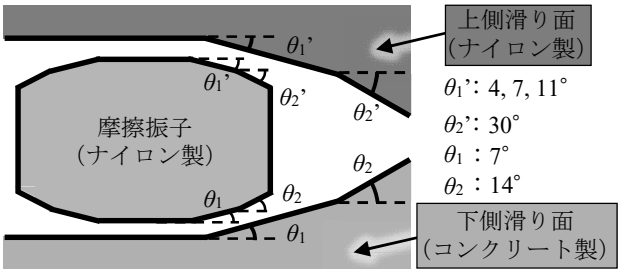


図-4　摩擦振子型免震機構の断面形状

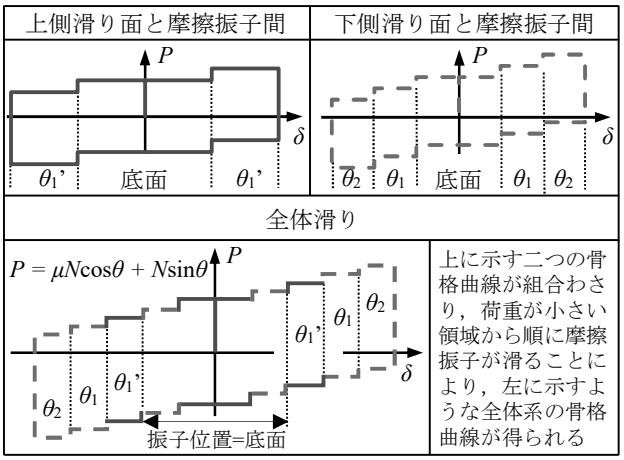


図-5　各滑り面における骨格曲線

表-1　実験条件

橋脚角度	θ_1'	鉛直荷重 kN	水平載荷速度 mm/sec
45°	4°	25	1.0
	7°		
60°	11°	50	3.0

3. 実験結果

(1) 水平荷重－水平変位関係

図-6に上側滑り面と摩擦振子間，および下側滑り面と摩擦振子間の水平荷重－水平変位関係，また，**図-7**には，両者の変位を足して得られる全体の水平荷重－水平変位関係を示す．なお，両図は，橋脚角度45°，θ_1' =4°，鉛直荷重25 kN，および水平載荷速度1.0 mm/secの条件で得られた結果である．**図-6**には各滑り面の動摩擦係数と斜面角度より得られる理論的な骨格曲線を併せて示す．**表-1**に示すパラメータの範囲の組合わせの中では，摩擦係数と滑り面の形状（角度）から力のつり合いにより求められる骨格曲線と実験値の差は**図-6**に示す程度であり，実験前に想定した挙動を概ね得ることができた．

図-6より，滑り面を摩擦振子の上下に設けて二重化することで変位が両滑り面に適切に分散されていることが確認される．なお，上側滑り面がテトラリニア型となっているのは，2. で述べたように，θ_2を大きな値に設定しており，摩擦振子が上側滑り面のその角度に達した後は，摩擦振子と下側滑り面の間でのみ滑りが生じているからである．**図-7**に示すように，上下滑り面を組み合わせた全体の水平荷重－水平変位関係は，変位の増加に伴って水平荷重が段階的に漸増する．既往研究では，摩擦振子とその下側の滑り面でのみ変位を生じさせていたが，それに比べ，二重滑り面とすることで荷重の増加が緩やかになり，剛性の小さいバイリニア型の挙動を実現できている．今後，震動台を用いた動的載荷実験も行い，この剛性低下に伴う長周期化が提案構造の応答性状に及ぼす影響を検証したい．なお，**図-3**の滑り面上を摩擦振子が運動する際に問題となる，摩擦振子と斜面が衝突する際に発生する大きな水平荷重は，静的な正負交番載荷実験では生じないため，今回用いたアーチ形状のコンクリートブロック組積造橋脚の有効性は検証できていない．正負交番載荷実験中は，組積造橋脚に変形はほぼ生じず，剛体に近い状態を維持したが，この形状の有効性も今後，動的実験により確認する必要がある．

(2) 動摩擦係数

図-8に，24種類の実験条件それぞれでの正負交番載荷実験から得られた，各滑り面における動摩擦係数を示す．また，**図-8**には，実験結果より得られた各動摩擦係数の対数平均と対数標準偏差から求めた対数正規分布の累積分布曲線を併せて示す．**図-8**より，動摩擦係数の値はばらつきを有しているものの，

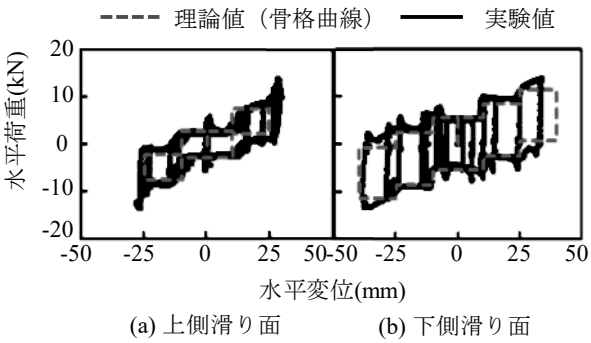


図-6　各滑り面に着目した水平荷重－水平変位関係

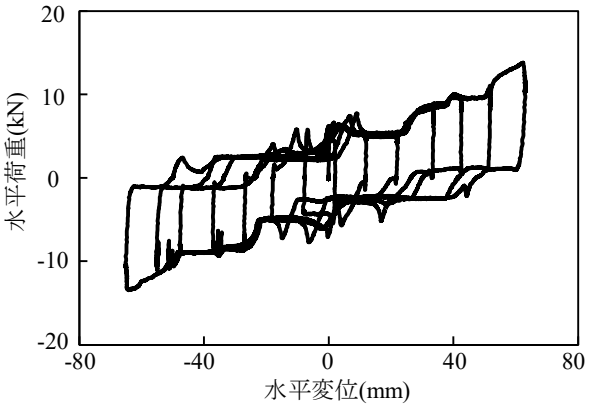


図-7　全体の水平荷重－水平変位関係

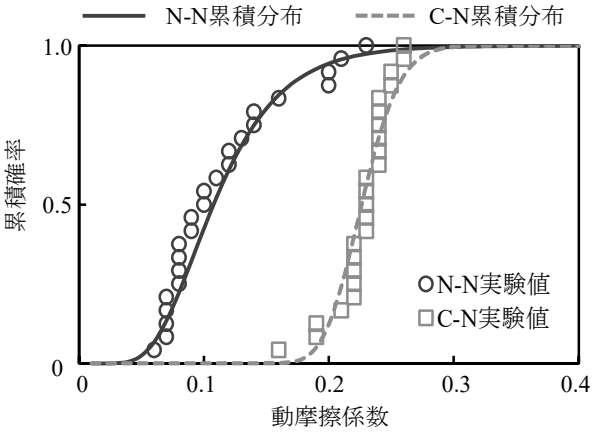


図-8　正負交番載荷実験で得られた動摩擦係数の分布

上側滑り面と摩擦振子がともにナイロンの場合（図中N-N）には，下側滑り面（コンクリート）と摩擦振子（ナイロン）の場合（図中C-N）よりも小さい摩擦係数が得られることを確認できる．**図-8**に示す2つの対数正規分布が互いに独立であるとすると，C-Nの条件の動摩擦係数は，N-Nに対して96％の確率で大きくなっている．N-Nは意図した通りに摩擦力の低減が可能であり，上側滑り面と下側滑り面の斜面角度の組合わせに加えて，動摩擦係数の違いも利用することで，さらに多様な水平荷重－水平変位関係を得ることが可能である．

なお，一般に滑り支承に関する既往研究では，摩

擦係数の速度依存性や面圧依存性が指摘されており，それらが地震時応答に及ぼす影響が検討されている[3]．本研究では，水平載荷速度，および鉛直荷重を変えた正負交番載荷実験も行っているが，それらが水平荷重－水平変位関係に及ぼす影響は確認できなかった．当然のことながら，これらの影響を確認するには，実地震動などを用いた動的載荷実験が必要であり，その検証は今後の課題である．

4. 提案構造の脆弱性評価

ここでは，提案構造の脆弱性評価の結果を示す．その解析にあたり，水平荷重－水平変位関係をトリリニアモデルで表現した（**図-9**）．トリリニアモデルは，**図-5**で示した滑り面全体での骨格曲線内の履歴面積が等価となるようにその骨格曲線をモデル化している．なお，本実験の条件では，アーチ型の組積造橋脚に変位は生じていないことから，摩擦振子のみの挙動に着目した解析を行う．脆弱性評価では，各摩擦係数が互いに独立で**図-7**に示した対数正規分布に従うと仮定し，また，気象庁より公開されている水平地震動100波[4]を用いた動的解析を繰り返し行い，モンテカルロシミュレーション（MCS）により，着目する限界変位（正負交番載荷実験における水平変位65 mmに相当）を超える確率を算定した．動的解析の際には，Newmarkのβ法を使用し，脆弱性評価における地震動強度には，各波の固有周期2.0秒に相当する加速度応答スペクトル$S_a(2.0)$を用いた．つまり，MCSでは，すべての波について，入力前に$S_a(2.0)$が同じ値となるように振幅調整している．

図-10に，得られたフラジリティカーブを示す．同図には，道路橋示方書のレベル2地震動[5]の加速度応答スペクトル$S_a(2.0)$も併せて示す．**図-10**に示すように，提案構造は現行のレベル2地震動に対して損傷確率は極めて小さくできており（MCS上は限界変位を超えるサンプルが発生していない），二重滑り面を持つリング型摩擦振子は，高い耐震性能を有していることが確認された．

5. まとめ

コンクリートブロック組積造橋脚上に設けた二重滑り面をもつ摩擦振子の橋脚模型に対して水平一方向の正負交番載荷実験を実施し，基本的な応答性状を検証した．正負交番載荷実験より，滑り面を二重

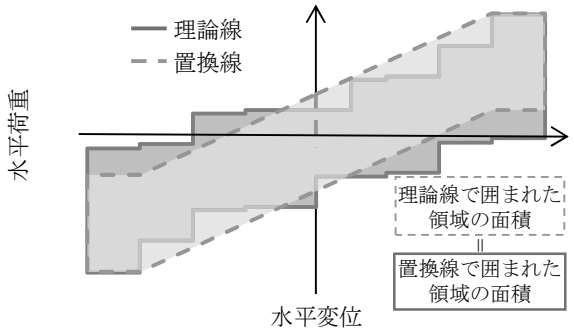


図-9 トリリニアモデルへの置換

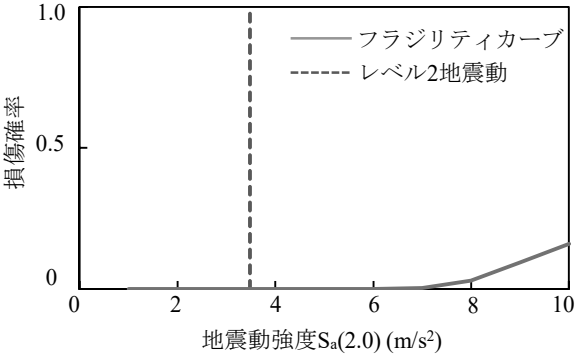


図-10 フラジリティカーブの一例

化し，かつアーチ形状の組積造橋脚を用いることで，極めて大きな地震動強度の範囲までダメージフリーであることを確認した．

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) 幸左賢二，小野紘一，藤井康男，田中克典：被災RC橋脚の残留変位に関する研究，土木学会論文集，No. 627/V-44. pp. 193-203, 1999.
2) 臼井駿矢，矢島美季，樫山大樹，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.
3) 樫山大樹，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.
4) 気象庁ホームページ：強震観測データ，https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/index.html
5) 日本道路協会：道路橋示方書（V耐震設計編）・同解説，2017.