

球面状滑り曲面を有する摩擦振子型免震機構付き橋梁の 二方向震動実験

市川義高¹・服部琳太郎¹・脊戸鉄太¹・石垣直光²・末崎将司²・秋山充良³

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3-3-1）

²日本工営（株） コンサルタント国内事業本部交通運輸事業部（〒102-8539 東京都千代田区九段北1-14-6）

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3-3-1）

1. はじめに

著者らが過去に提案した摩擦振子型免震機構を有する橋脚は、図-1に示すように、その中間部に滑り曲面を設け、その位置より上部を摩擦振子として滑らせることで、滑り曲面位置より下部に伝達される地震時慣性力を低減することを目的とした構造である¹⁾。レベル2地震動に対する耐震設計では、基本的に、RC橋脚の塑性変形能による地震エネルギーの吸収を期待しており、地震後にある程度の修復作業が生じることを前提にしている²⁾。一方、図-1に示す摩擦振子型免震機構付きRC柱を用いることにより、ダメージフリー構造が実現され、レベル2地震動クラスの地震動を受けた後も即時の供用再開が可能になると期待される。地震後の救助・救急活動や、都市や地域の復旧・復興に橋梁が果たす役割の大きさを考えると、橋梁が置かれている状況によっては、レベル2地震動に対しても使用性の確保を目指すべきであり、その要求性能を満足できるダメージフリー構造を開発していくべきだと考える。

一方、著者らが過去に行った摩擦振子型免震機構付きRC柱の実験³⁾では、橋軸方向への一方向加震を与えた場合には、滑らかに摩擦振子が曲面上を運動し、上部工位置で測定される加速度や摩擦振子の滑り変位の大きさは、摩擦振子を質点に置換した力の釣り合いから予測される挙動と概ね一致した。地震後に生じる残留変位の大きさも許容範囲に収まっていた。これに対し、橋軸方向と橋軸直角方向に同時に地震動を入力した水平二方向の震動実験³⁾では、滑り曲面の形状によっては上部工が滑らかに運動せず、鉛直方向にばたつき、想定を上回る水平荷重が

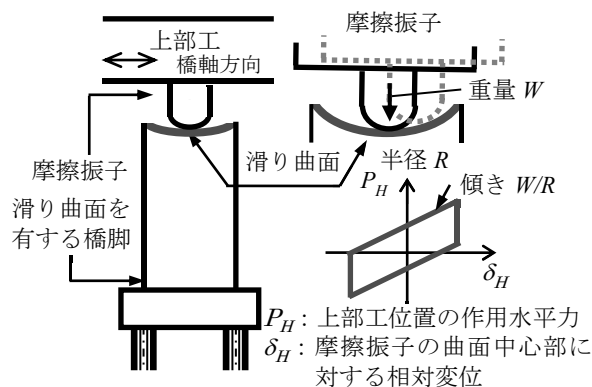


図-1 摩擦振子型免震機構付き橋脚

滑り曲面下部の部材に伝達されていた。本研究では、摩擦振子の滑り性能の改善を試み、震動実験によりその動きを検証する。

2. 実験概要

(1) 実験の供試体

震動実験には、早稲田大学所有の3次元震動台を使用する。供試体の震動台への設置状況を写真-1および写真-2に示す。写真-1および写真-2の左右方向は、それぞれ橋軸方向および橋軸直角方向である。供試体は、上部工（鉄の鍾）、摩擦振子（鋼製）、および滑り曲面を有する橋脚（RC製）から構成される。本実験では、橋脚高さ10m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に設定することで供試体を設計した。なお、加速度および橋脚の躯体に作用する面圧の相似比を1.0にしている。供試体は、上部工（鉄の鍾）、滑り曲面を有する橋脚、および摩擦振子から構成される。上

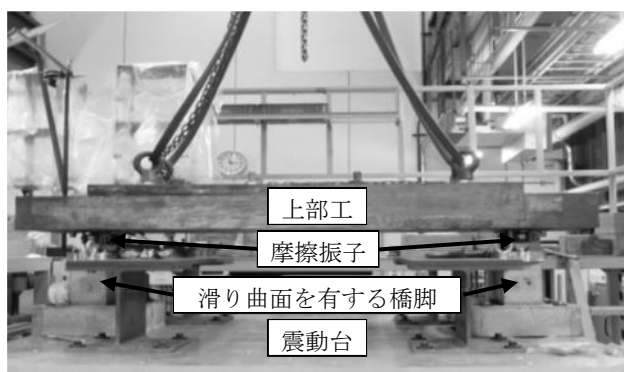


写真-1 供試体設置状況(左右方向：橋軸)



写真-2 供試体設置状況(左右方向：橋軸直角)

部工重量は 750kgf であり、摩擦振子に作用する軸力は約 1.47MPa である。摩擦振子は、断面 50mm × 50mm で長さ 65mm の鋼に半径 25mm の半球が溶接されており、もう一端は上部工と一体となり挙動するように上部工に剛結されている、橋脚高さは 150 mm、断面は 106 mm×106 mm の RC 構造となっている。図-2 に曲面の形状を示す。本研究では滑り性能の改善を図るため、写真-3 に示すように球面状滑り曲面を用いた。既往の実験と比較するために、滑り曲面の勾配が急となる半径 80 mm の曲面と、勾配が緩やかである半径 200 mm の曲面の 2 種類を用いて震動実験を行った。

(2) 震動実験に使用する地震動

二方向入力を受ける震動実験の実施にあたり、周期特性の異なる、短周期成分が卓越する地震動を 2 波と長周期成分が卓越する地震動を 2 波の計 4 種類の地震動を用意した⁴⁾。短周期波については、第 1 波として 1995 年兵庫県南部地震の際に兵庫県神戸中央区中山手で観測された地震波と、第 3 波として 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の 2 波を用いる。長周期波については、第 2 波として 2003 年十勝沖地震の際に北海道釧路町別保で観測された地震波と、第 4 波として 1993 年北海道南西沖地震の際に北海道稚内市開運で観測された地震波の 2 波を用いる。なお、十勝沖地震波は、長周期成

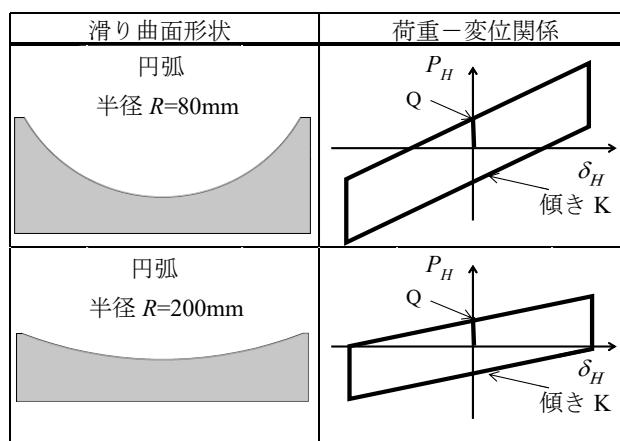


図-2 滑り曲面の形状

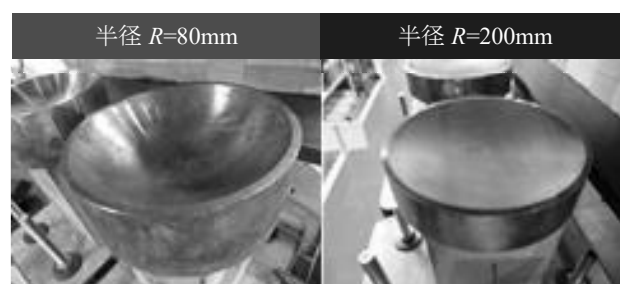


写真-3 実験に用いた滑り曲面

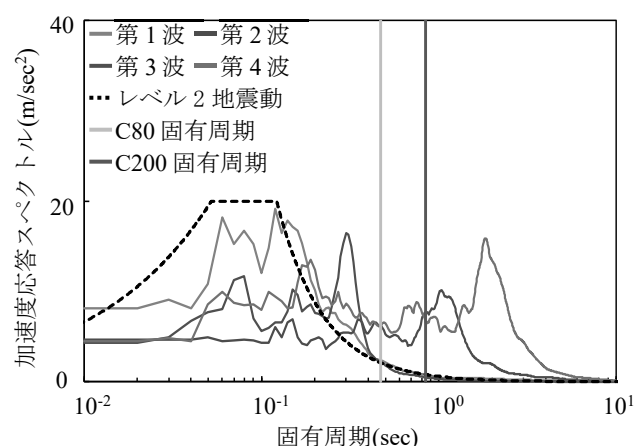


図-3 加速度応答スペクトル

分をより卓越させるため、観測波の時間間隔を調整している。また、北海道南西沖地震波は、十勝沖地震と加速度応答スペクトルのピーク値が等しくなるように振幅を大きくした。

図-3 に、実験に使用した地震波の加速度応答スペクトルを、それぞれの曲面の固有周期、および道路橋示方書のレベル 2 地震動タイプ II (I 種地盤) の加速度応答スペクトルとともに示す。

3. 実験結果

(1) 概説

摩擦振子型免震機構付き RC 橋脚を用いた水平二

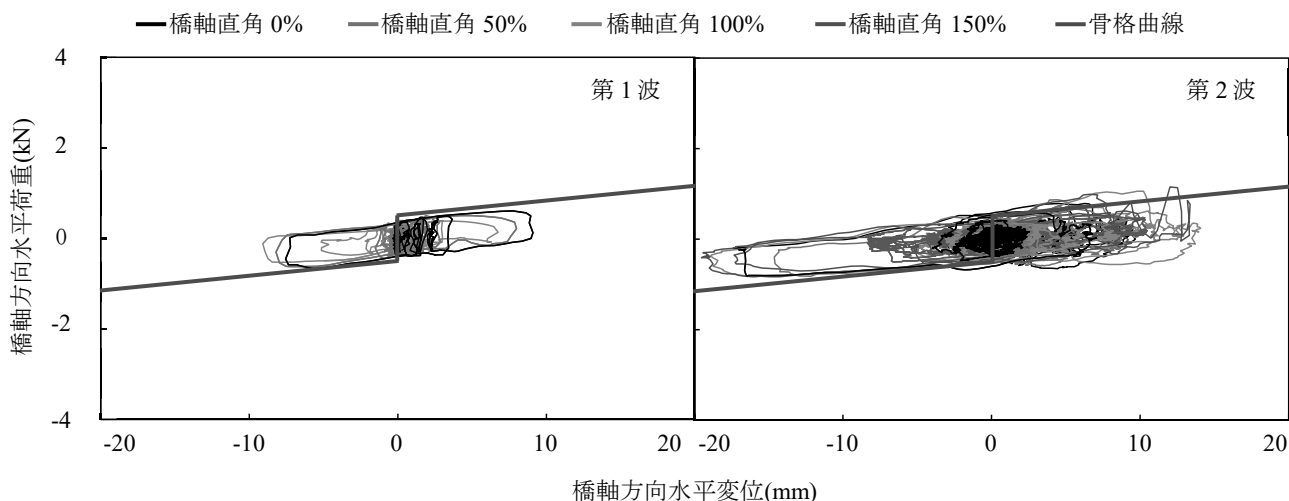


図-4 水平荷重—水平変位関係

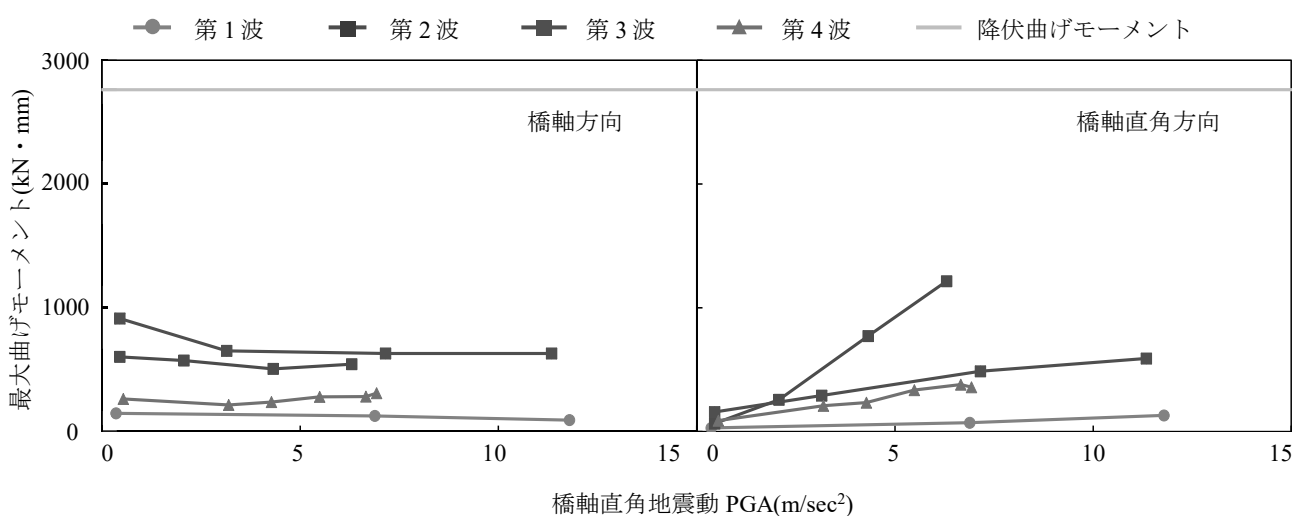


図-5 橋軸直角方向 PGA と橋脚基部最大曲げモーメントの関係

方向震動実験を行い、球面状滑り曲面が地震応答特性に与える影響を評価した。

本実験は、橋軸方向の地震動を固定し、橋軸直角方向に入力する地震動を漸増させることで、水平二方向入力の影響を観察している。

(2) 水平荷重—水平変位関係

図-4に、第1波と第2波を入力した際の水平荷重—水平変位関係を示す。図には、上部工重量、摩擦係数および曲面形状から計算される骨格曲線も示している。橋軸方向の地震動の加速度振幅を第1波では100%に、第2波では150%に固定し、橋軸直角方向の入力地震動を漸増させている。

図-4より、どちらの地震動においても摩擦振子は骨格曲線に沿って動いており、想定通りの挙動になっていることが確認される。

(3) 最大曲げモーメント・橋軸直角方向PGA関係

図-5に橋軸直角方向に入力した地動最大加速度(PGA)と、橋軸および橋軸直角方向の橋脚基部に作用した最大曲げモーメントの関係を示す。図には断面計算により求められる降伏曲げモーメントも示している。橋軸直角方向のPGAが増加したとしても、橋脚基部に発生する最大曲げモーメントは降伏曲げモーメントを大きく下回り、高い免震効果が発揮されていることが確認される。

(4) 摩擦振子の磨耗による影響

本実験では球面状滑り曲面を導入し実験を行った。そして、これまでの実験結果に対する考察により、従来の一方向対応型滑り曲面を使用していた場合に比べて水平二方向入力時において、滑らかに摩擦振子が滑り曲面上を運動していることが確認された。しかし、その一方で球面状滑り曲面を使用することにより、摩擦振子と滑り曲面の接地状況が既往の研

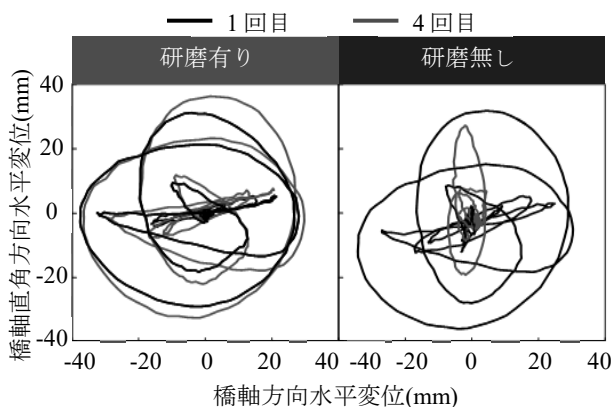


図-6 上部工軌跡図（磨耗の影響）

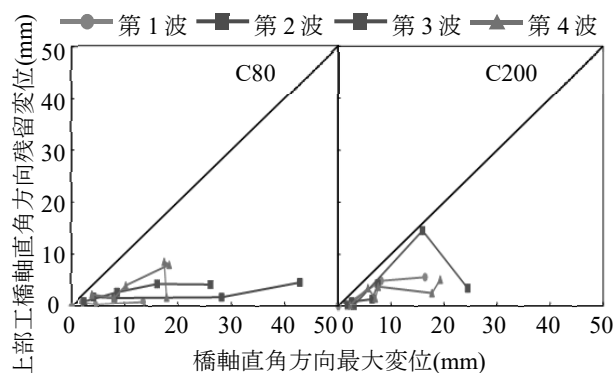


図-7 最大変位と残留変位の関係

究³⁾での線接触から点接触へと変化し、接触部に非常に大きな力が作用することで摩擦振子と滑り曲面はどちらも磨耗しやすくなる。そこで、摩擦振子の磨耗が上部工の挙動に与える影響を確認するために、同一地震波を連続して入力した。

図-6に上部工軌跡図の一例を示す。図は载荷終了のたびに、滑り曲面と摩擦振子を研磨した場合と、研磨しない場合の挙動の比較を示している。研磨有りの場合は载荷を重ねても上部工の軌跡は概ね同じであるのに対し、研磨無しの場合は、接触面の傷が累積し、応答変位が小さくなり、一方で、大きな水平荷重が発生してしまう。連続载荷に対する耐久性の向上は、今後の重要な課題である。

(5) 残留変位

図-7に、C80およびC200の供試体を使用した際の橋軸直角方向最大滑り変位と橋軸直角方向残留変位の関係をそれぞれ示す。図には、橋軸直角方向最大滑り変位と残留変位が一致する条件を直線で示している。図-7より、C80およびC200のどちらの供試体においても、曲面の存在により、最大滑り変位に対して生じる残留変位の値は小さくなっている。

(6) 滑り曲面形状の影響

図-8は滑り曲面半径の違い（C80とC200）によ

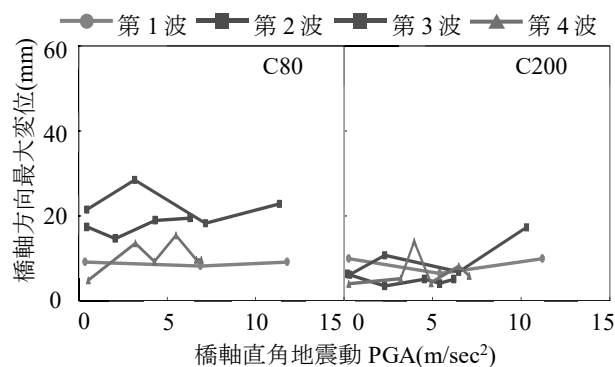


図-8 橋軸直角方向 PGA と上部工橋軸方向最大変位の関係

る応答変位の比較を示している。滑り曲面の形状を考えると、C200はC80に比べて剛性が小さいため、最大滑り変位は大きくなるはずであるが、得られた実験結果は、図-8に示されるように、逆の傾向を示した。これは、C80とC200では、摩擦振子と滑り曲面の接地面積が異なり、摩擦の状態に違いが生じているためと予想される。

4. まとめ

水平二方向入力を受ける場合であっても、提案する摩擦振子型免震機構付き柱は、滑りの発生により、滑り曲面より下端に位置する部位や部材に作用する地震力を低減できる。滑り曲面を球面化することにより、上部工は滑らかに運動するようになり、長周期波と短周期波のどちらに対しても橋梁は安定した地震時挙動を示すことができる。

謝辞：本研究の一部は、JSPS 科研費 JP16H02357（代表：本田利器教授（東京大学））の助成を受けております。

参考文献

- 1) 金井晴弘，阿部遼太，青木直，秋山充良：変動曲面上を滑る摩擦振子を有するコンクリート橋脚の地震応答特性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 34, No. 2, pp.817-822, 2012.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2012.
- 3) 脊戸鉄太，服部琳太郎，石垣直光，末崎将司，秋山充良：滑り曲面の形状と配置が二方向入力を受ける摩擦振子型免震機構付 RC 柱の地震応答に及ぼす影響，第 19 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.27-30, 2016.
- 4) 気象庁ホームページ：気象統計情報・強震観測結果・地震波形，<http://www.jma.go.jp/jma/>