

滑り曲面の形状と耐摩耗性が摩擦振子型免震機構付き橋梁の 地震応答性状に及ぼす影響

山口大貴¹・脊戸鉄太¹・市川義高¹・石垣直光²・末崎将司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 3-4-1）

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

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系の長周期化を図り、滑り面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 地震動に対する現行の耐震設計では、基本的に、RC 橋脚の非線形応答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としている。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必要がある。

著者らは、球面状滑り面を有する摩擦振子を用いた震動実験を実施しており、水平一方向載荷の場合と同様に、水平二方向載荷を受ける場合でも、上部工に作用する地震時慣性力を大幅に低減できることを確認した²⁾。一方で、本橋梁の地震応答性状は、摩擦係数、あるいは摩擦振子と滑り面の形状に強く依存しており、その組み合わせにより、地震時慣性力の低減効果、地震時最大応答変位、および地震後の残留変位の大きさは変化する。また、球面状の摩擦振子を用いると、滑り面が点接触となり、その位置に大きな軸力が発生することが原因で挙動が安定しないことがあった。

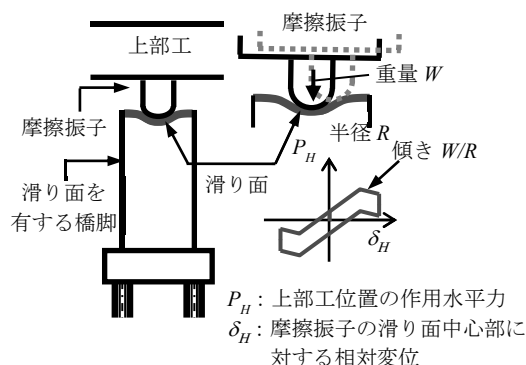


図-1 摩擦振子型免震機構付き橋脚

本研究では、新たに臼型形状の摩擦振子を使用し、さらに加震中の摩耗に伴う摩擦係数の増加を抑えるため、コンクリート製の滑り面に表面強化材を塗布した上で、提案橋梁の水平二方向震動実験を実施し、これらの効果を確認した。

2. 実験概要

(1) 実験供試体

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。供試体の震動台への設置状況を写真-1に示す。なお、写真-1の左右方向は橋軸方向である。

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 に設定することで供試体を設計した。供試体は、上部工（鉄の鍾）、滑り面を有する橋脚、および摩擦振子から構成される。摩擦振子は上部工と一体となり挙動するように剛結されており、橋脚高さは 230 mm、断面は 150 mm×190 mm

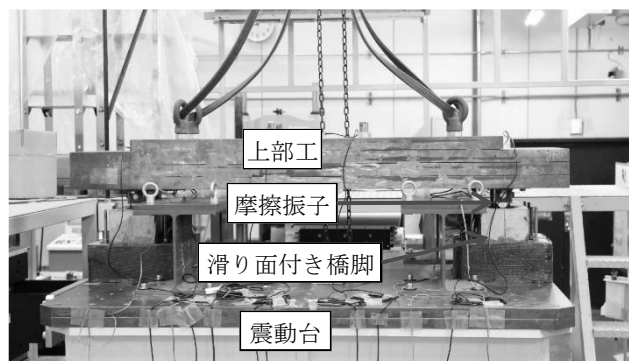


写真-1 供試体設置状況 (左右方向：橋軸)

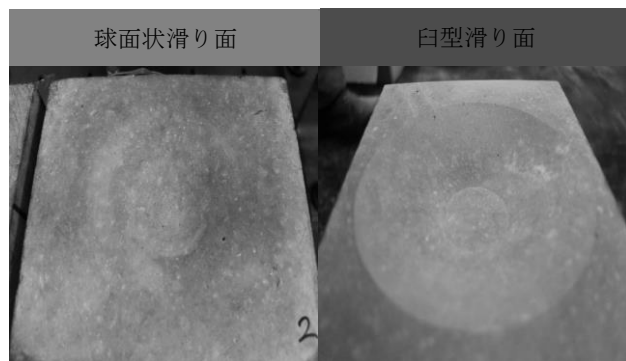


写真-2 球面状滑り面と臼型滑り面

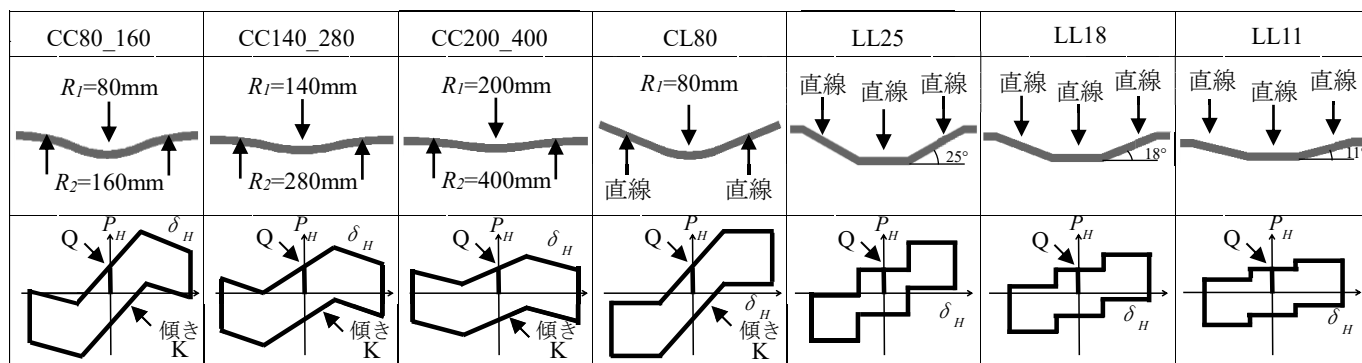


図-2 本実験で用いた滑り面形状の一覧

のRC構造となっている。

図-2に滑り面の形状を示す。本研究ではまず、滑り面形状の相違による挙動の変化を確認するために、複曲面を採用した球面形状を4種類用いた。また、滑り面と摩擦振子を面接触とすることで面圧を低減し、摩耗の低減を図った3種類の臼型形状を用いて震動実験を行った。臼型形状の滑り面は、図-2に示すように底版と斜面の勾配が異なり、水平軸とのなす角度を25度、18度、および11度に設定した。RC橋脚上の滑り面は、3Dプリンタで加工したアクリル板を型枠として使用し、コンクリートを打設することで、任意の滑り面形状を有するRC橋脚を製作した。写真-2に球面状滑り面と臼型滑り面の形状の一例を示す。

震動実験では、加震に伴うコンクリート面の摩耗による摩擦係数の増加が予想されたため、滑り面の表面にそれを防ぐための表面強化材を塗布した。使用した薬材はケイ酸塩系コンクリート表面強化材、エポキシ樹脂製コンクリート補修材、およびエポキシ樹脂製コンクリート保護材の3種類である(以降それぞれを表面強化材A、表面強化材B、表面強化材Cとする)。

(2) 震動実験に使用する地震動

震動実験には、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の橋軸方向および橋軸直角方向の加速度振幅をそれぞれ150%増幅したものを入力波として用いた。図-3に実験に用いた地震波の加

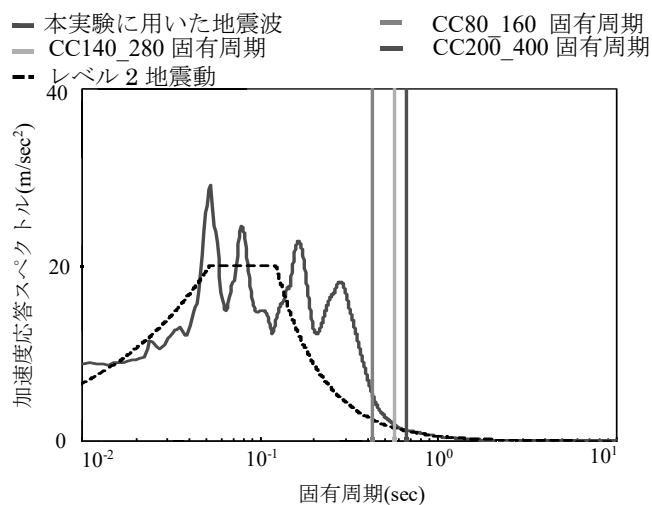


図-3 加速度応答スペクトル

速度応答スペクトルを、球面状滑り面をもつ供試体の滑り発生後の固有周期、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。なお、臼型の滑り面を持つ供試体に関しては、計算上の固有周期が無限大となるため、図-3にその値は示していない。

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方向実験を行い、表面強化材および滑り面形状の違いが

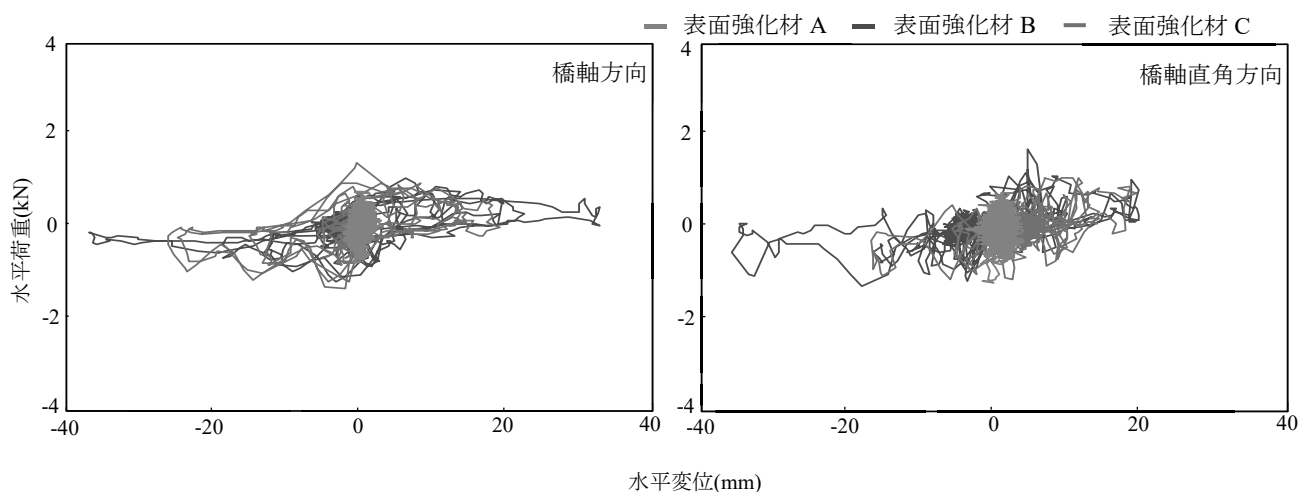


図-4 水平荷重—水平変位関係(CC80_160)

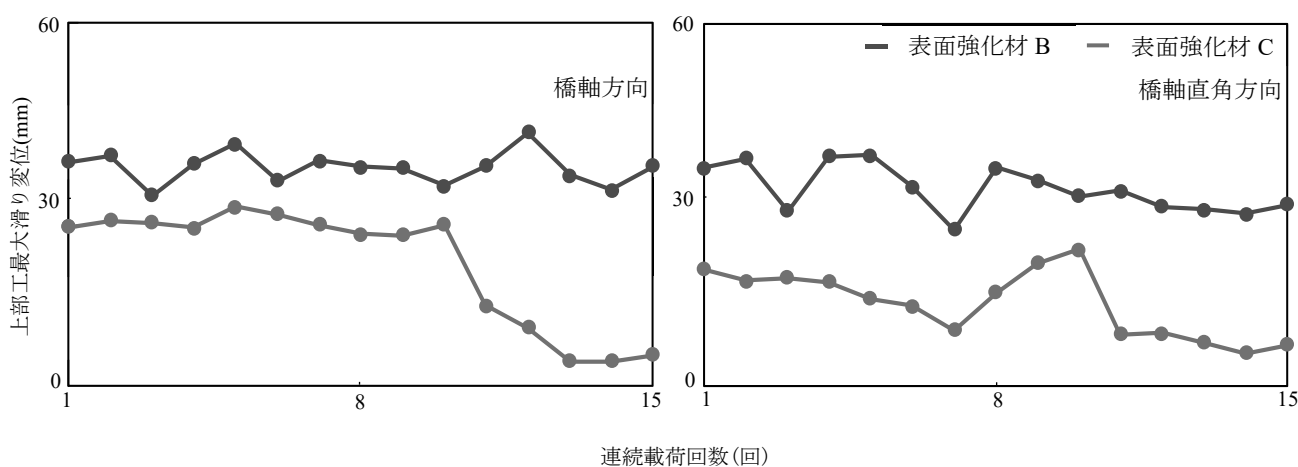


図-5 上部工最大滑り変位—連続載荷回数関係

地震応答特性に与える影響を評価した。本節では、まず提案橋梁に最適な表面強化材を同定する。次に、その表面強化剤を使用した条件で、地震時慣性力を低減でき、一方で残留変位を小さくすることができる滑り面形状を検討する。

(2) 表面強化材の違いが地震応答に及ぼす影響

CC80_160 の滑り面に 3 種類の表面強化材を塗布した場合に得られた橋軸方向および橋軸直角方向の水平荷重—水平変位関係を図-4 に示す。また、表面強化材 B と C を用いた供試体に同じ地震波を連続して与えたときの上部工滑り変位の変化を図-5 に示す。

図-4 より、表面強化材 B を塗布したときに最も大きな応答変位が得られ、高い滑り性能（地震作用の遮断効果）が発揮されることを確認した。一方、表面強化材 A は、滑りがほとんど生じず、提案構造に不適であった。図-5 では、表面強化材 B は優れた滑り性能を発揮するとともに、連続加震に対しても摩擦の影響による変位の減少（摩擦係数の増大）が小さく抑えられていることを確認できる。一方で、表面強化材 C は載荷回数が 10 回

を超えると滑り性能が低下し、連続して入力される地震動への耐性は表面強化材 B に及ばないことがわかる。

以上より、本実験で用いた 3 種類の表面強化材の中では、表面強化材 B が提案橋梁に最も適当な表面強化材であるといえる。

(3) 臼型滑り面における形状の違いによる影響

3 種類の臼型滑り面の形状が水平荷重—水平変位関係、および滑り変位と残留変位の関係に及ぼす影響をそれぞれ図-6 および図-7 に示す。

図-6 より、底版と斜面のなす角度が大きい LL25 では、水平変位 10mm 付近で局所的に荷重が増大していることが分かる。これは底版と斜面のなす角度が大きくなると、鉛直方向に生じる変位が大きくなり、斜面から底版に戻るときなどに鉛直方向に大きな加速度が生じるためと考えられる。その角度が最も小さい LL11 の供試体においてはそのような現象は確認されず、加震中、滑らかに挙動することを確認している。

図-7 より、臼型滑り面の形状の違いが残留変位に及ぼす影響は確認されない。しかし、すべての滑り面形状

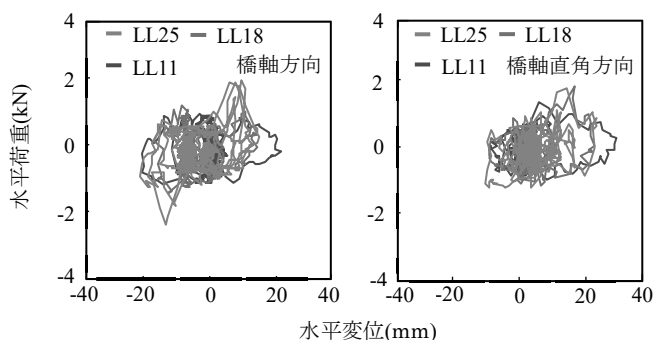


図-6 水平荷重-水平変位関係(臼型振子使用)

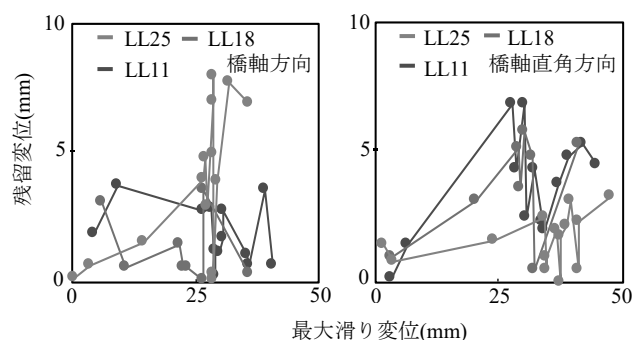


図-7 残留変位-最大滑り変位関係(臼型振子使用)

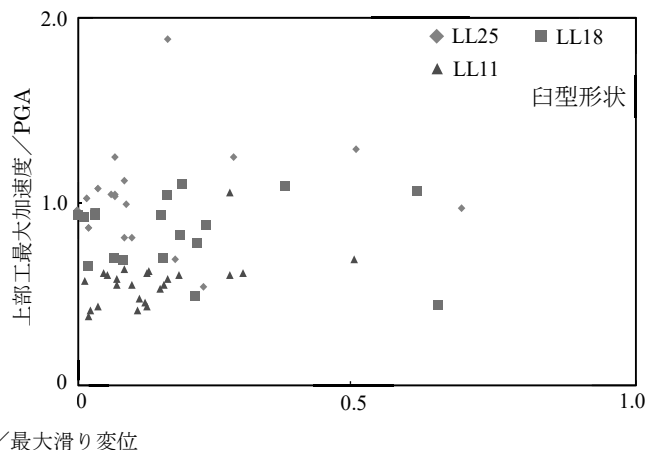
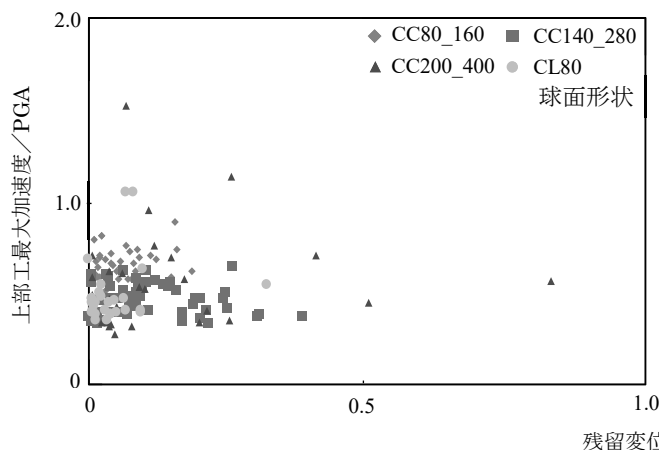


図-8 上部工加速度低減-復元性能関係

において底面部分の半径である 10mm 以内に収まっており、地震動の作用後、底面部分に摩擦振子は戻ることが確認された。臼型形状の滑り面を用いた本実験の範囲においては、LL11 の挙動が最も優れていると言える。

(4) 滑り面形状の違いによる考察

最も高い滑り性能が得られた表面強化材 B を塗布した場合の全ての震動実験結果から、上部工最大加速度と入力最大地震動 (PGA) の比と、残留変位と最大滑り変位の比の関係をまとめたものを図-8 に示す。縦軸は、入力加速度に対して上部工の絶対応答加速度がどの程度低減されるのかを示している。横軸は、最大滑り変位に対して残留変位がどの程度抑制されているのかを表しており、地震後の即時供用性に関する指標となる。

図-8 を見ると、形状の違いが横軸の値に及ぼす影響は小さい。中でも供試体 CC80_160, CL80, および LL11 は、縦軸の値が小さくなっており、高い加速度の低減効果を発揮している。現段階では、提案構造の耐震設計法の確立には至っていないが、横軸に形状の違いによる差が明確に表れておらず、一方で、臼型形状を用いた場合には、加震後に摩擦振子が底版位置に全ての場で戻ったことを考えると、臼型形状の滑り面を使用し、かつ、底版と斜面のなす角度を小さくした滑り面を使用することが本実験結果の範囲からは望ましいと言える。

今後、さらに底版と斜面のなす角度を小さくした実験を行うなどして、最適な滑り面形状の同定を行うとともに、適切な設計手法についても開発していきたい。

4. まとめ

摩擦振子型免震機構を RC 橋脚に適用することで高い免震効果が得られることを、水平二方向震動実験により確認した。特に、エポキシ樹脂製コンクリート補修材の塗布と臼型形状の摩擦振子の採用により滑り性能が改善され、レベル 2 地震動に相当する地震動が連続して作用する場合にも安定した挙動を示すことを示した。

謝辞：本研究の一部は、JSPS 科研費 JP16H02357 の助成を受けて行ったものです。

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) 市川義高, 服部琳太郎, 脊戸鉄太, 石垣直光, 末崎将司, 秋山充良: 球面上滑り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, 第 20 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.331-334, 2017.