

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

脊戸鉄太¹・服部琳太郎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3-4-1）

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（〒102-0083 東京都千代田区麹町4-2）

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）

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、その位置より上にある部位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としている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柱の実験では、橋軸方向への一方向加震を与えた場合、あるいは橋軸方向に加えて鉛直方向に加震を与えた場合には、滑らかに摩擦振子が滑り曲面上を運動し、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震動実験³では、上部工の浮き上がりやがたつきが確認され、摩擦振子の運動が滑らかにならず、また、想定以上の水平荷

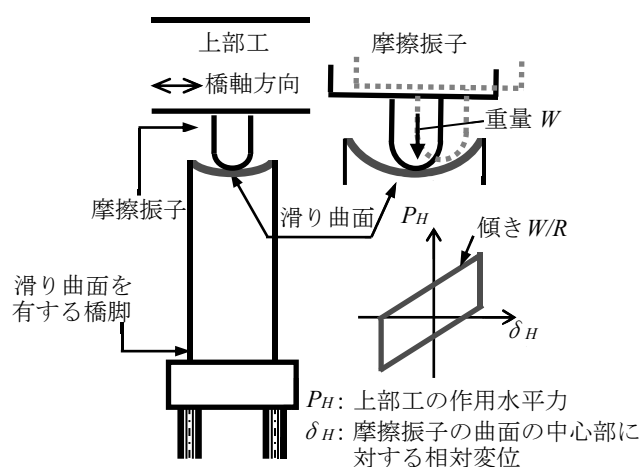


図-1 摩擦振子型免震機構付き橋脚

重が記録された。本研究では、滑り曲面の形状と配置を変更することで、摩擦振子の滑り性能の改善を図り、震動実験によりその動きを検証した。さらに数値解析により一連の実験結果の再現を試みた。

2. 実験概要

(1) 実験供試体

摩擦振子型免震機構付きRC柱の橋軸直角方向および橋軸方向の設置状況を写真-1および写真-2にそれぞれ示す。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（鉄の錘）、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。また、滑り曲面と同じ形状の鉄板を橋脚の滑り曲面に取り付けた。これは滑り

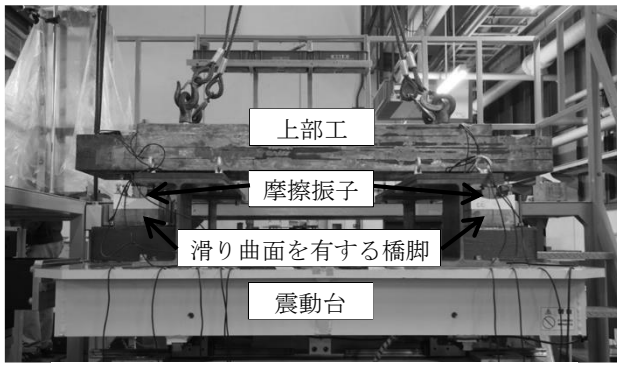


写真-1 供試体設置状況（橋軸直角方向）



写真-2 供試体設置状況（橋軸方向）

曲面がコンクリートであると、加震の継続に伴い滑り曲面の摩耗が大きくなり、摩擦係数が変化し、実験条件が加震毎に変化してしまうからである。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、滑り曲面を有する橋脚は、高さ 100mm、断面 150×150mm のRC構造となっている。

(2) 滑り曲面の形状・配置

図-2 に滑り曲面の形状と、想定される荷重－変位関係の骨格曲線を示す。滑り曲面の形状が曲面－直線の組み合わせの場合は、摩擦振子に生じる水平変位が D_v 以下では円弧、 D_v 以上では直線とした。直線部では剛性が 0 となり、橋脚に作用する水平力を一定値以下に抑えることが可能になる。また、曲面－曲面の組み合わせの場合は、滑り出しの挙動を安定させるため、摩擦振子に生じる水平変位が D_v 以下で大きな半径（200mm）の曲面を用いている。

図-3 には、滑り曲面の配置を示す。パターン1では橋軸直角方向に異なる向きの滑り曲面を有する配置、パターン2では橋軸直角方向に同じ向きの滑り曲面を有する配置とした。

なお、実験供試体の滑り発生後の固有周期は、滑り曲面の形状が曲面－直線の組み合わせにおいて約 0.375 秒、曲面－曲面の組み合わせにおいて約 0.839 秒である。実橋スケールに換算すると、前者で約 2.15 秒、後者で約 4.82 秒となる。

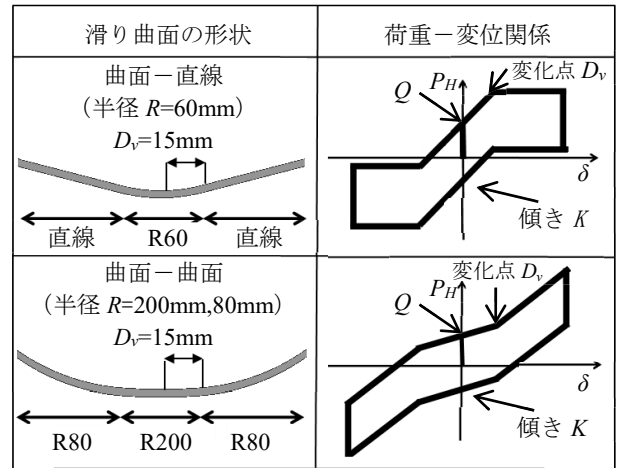


図-2 滑り曲面の形状と骨格曲線

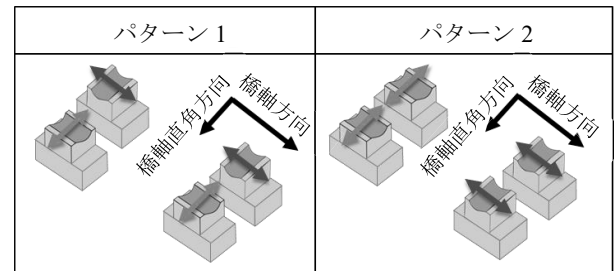


図-3 滑り曲面の配置

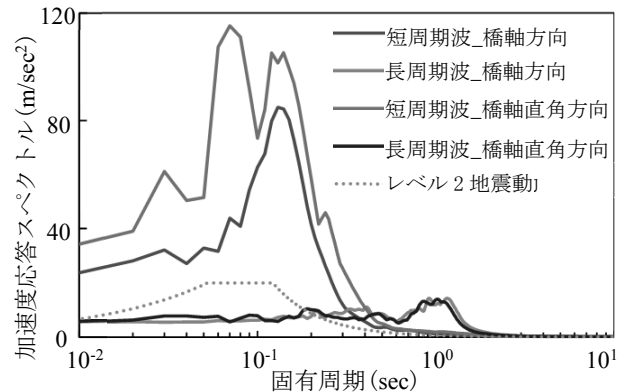


図-4 加速度応答スペクトル

(3) 震動実験に用いた地震動

震動実験には、短周期波として、1995 年兵庫県南部地震の際に神戸市中央区で観測された地震波、長周期波として、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を相似則に基づいて修正して用いた⁴⁾。なお、長周期波は、長周期成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。図-4 にこれらの加速度応答スペクトルを示す。図-4 には、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も示している。本震動実験では、2 方向入力を受ける場合の滑り性能の改善を目的としていることから、図-4 に示されるように、現行の耐震設計基準で規定される設計地震力を大きく上回る地震力を与えている。なお、後述されるように、このような地震波を受けたとしても、本構造はほぼ無損傷である。

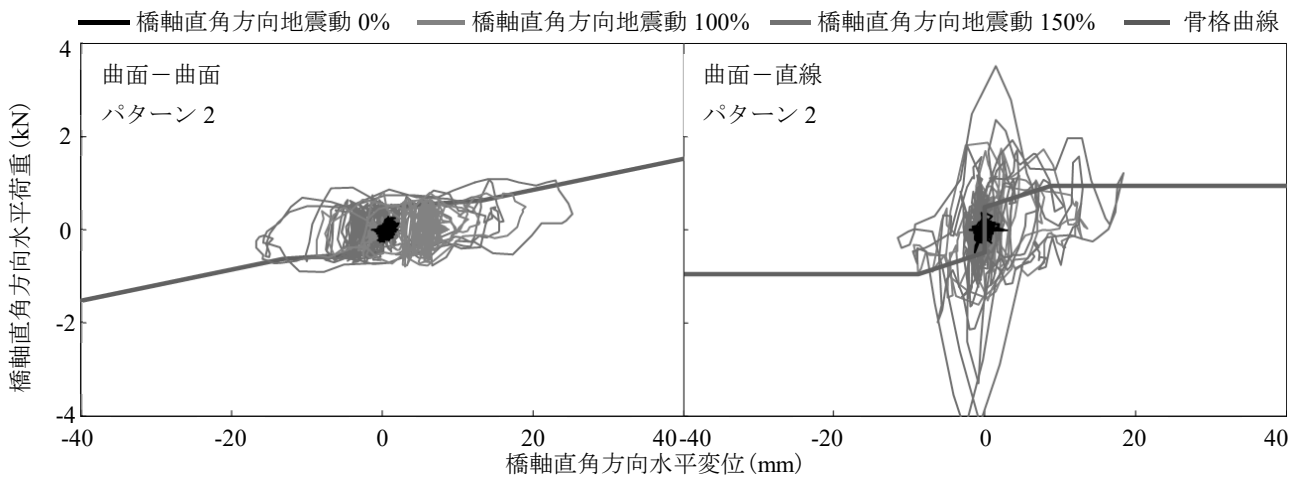


図-5 水平荷重－水平変位関係(短周期波)

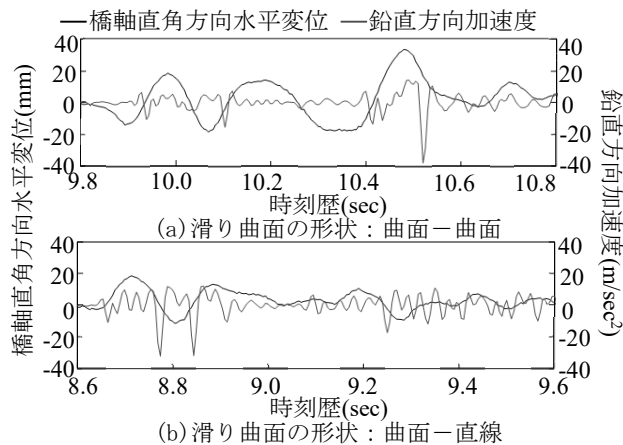


図-6 上部工鉛直方向加速度と水平変位の時刻歴

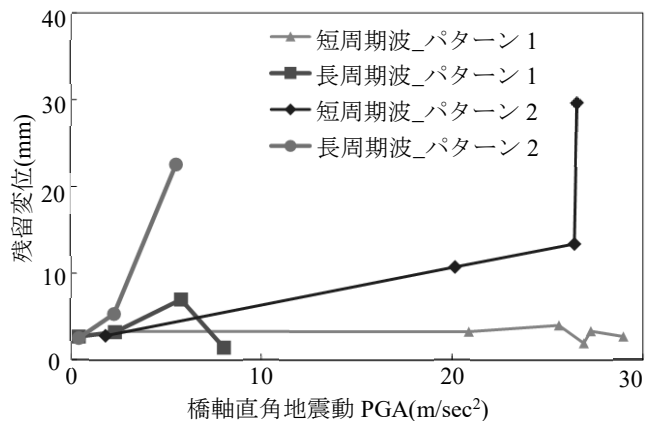


図-7 残留変位－橋軸直角方向 PGA 関係

3. 実験・解析結果

(1) 概説

水平二方向震動実験を行い、滑り曲面の形状と配置が橋梁の地震応答特性に与える影響を評価する。実験は、橋軸方向の地震動を一定とし、橋軸直角方向に入力する地震動の振幅を徐々に大きくすることにより二方向入力の影響を評価している。また、供試体を多質点系に置換した非線形動的解析も実施し、実験結果の再現も試みる。

(2) 水平荷重－水平変位関係

図-5 に、パターン 2 の配置(図-3)で短周期波を入力したときに得られた上部工位置の水平荷重－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 200% に固定し、橋軸直角方向の入力地震動を大きくしていくと、滑り曲面の形状が曲面－直線の組み合わせの場合と比較して、曲面－曲面の滑り曲面を用いた場合には、概ね想定通りの挙動となっていることが確認

される。図-6 には、短周期波を入力したときの上部工の鉛直方向加速度と橋軸直角方向に生じる水平変位の時刻歴を示す。鉛直方向には地震動を入力していないが、上部工の挙動にがたつきが生じると鉛直方向に加速度が生じる。曲面－曲面の組み合わせの場合と比較して、曲面－直線は相対変位が小さい範囲においても鉛直方向の加速度が生じている。これは、曲面－曲面の場合、中心位置の半径が 200mm と大きいため、摩擦振子の水平方向の運動に伴うアップリフト量が低減でき、上部工に生じるがたつきや浮き上がりが抑制されたことが原因と推察される。

(3) 残留変位

図-7 には、橋軸直角方向に入力した地震動の最大加速度(PGA)と残留変位の関係を示す。滑り曲面の配置がパターン 2 のとき、橋軸直角方向から入力される地震動が大きくなるにしたがって、残留変位も大きくなった。これはパターン 2 で上部工が橋軸直角方向に滑るとき、滑り曲面の配置の偏りから鉛直方向周りの回転が生じるからであり、残留変位を抑制する観点からはパターン 1 の配置が望ましい。

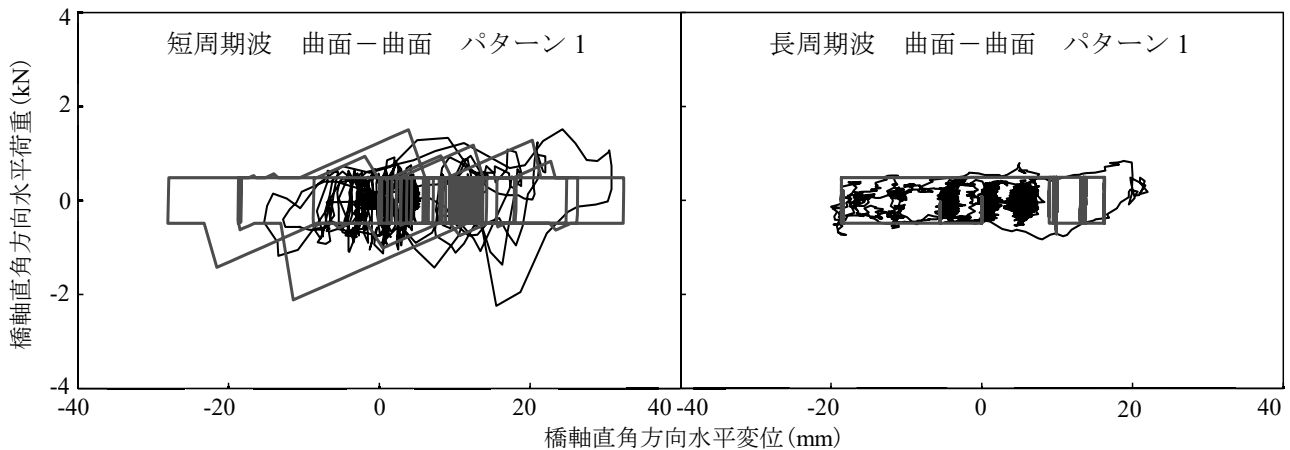


図-8 水平荷重-水平変位関係(再現解析)

(4) 解析結果

摩擦振子を質点に置換し、その地震時の挙動は水平方向の力の釣り合いから計算される骨格曲線に従うと仮定した3次元動的解析の結果を図-8に示す。数値積分法にはNewmarkの β 法を使用し、減衰は数値減衰のみを考慮した。参考文献2)や3)の解析モデルを基本として、短周期波に関しては実験時に観察された衝突の影響、長周期波に関しては摩擦係数の速度依存性をそれぞれ次のように考慮した。

短周期波では曲面-曲面において、曲面-直線と比較すると安定した挙動を示した。しかし、水平変位が大きくなると、摩擦振子が滑り曲面を滑らかに滑らず、がたつく現象が確認されたため、滑り曲面と摩擦振子の衝突による水平荷重の増加を考慮した。また、長周期波に関しては、岡本らの研究⁵⁾を参考に、摩擦係数の速度依存性を考慮した。式(1)に軸力変動の算定式を、式(2)に速度依存性を考慮した摩擦係数の算定式をそれぞれ示す。

$$W(t) = W \{1 + \alpha_{UD}(t)/g\} \quad (1)$$

$$\mu(V) = \mu_{max} - (\mu_{max} - \mu_{min}) \exp(-n' |V|) \quad (2)$$

ここに、 W ：橋脚一基が支持する軸力(=375kgf)、 α_{UD} ：上部工鉛直応答加速度、 g ：重力加速度、 $\mu(V)$ ：速度依存性を考慮した摩擦係数、 μ_{max} ：最大摩擦係数、 μ_{min} ：最小摩擦係数、 V ：滑り速度、 n' ：パラメータである。なお、本検討では、震動実験より $\mu_{max}=0.265$ 、 $\mu_{min}=0.040$ 、 $n'=3.00$ として算出した。

図-8 に示される通り、解析結果は実験結果を概ね再現していることが確認される。

5. まとめ

滑り曲面の形状と配置の工夫により、滑り性能が改善され、残留変位が抑制されることを震動実験に

より確認した。このような工夫により、塑性ヒンジを柱基部に誘導し、その箇所での地震エネルギーの吸収を前提とした従来の RC 構造と異なり、摩擦振子部での滑りのみにより地震力を低減するダメージフリー構造が可能になる。また、摩擦振子と滑り曲面の衝突の影響や摩擦係数の速度依存性を考慮した数値解析により、本構造の地震時挙動を概ね再現できることを示した。

ダメージフリー構造は、摩擦振子型免震機構を活用した構造以外でも、構造の形態や配置の工夫、あるいは新材料の活用など、様々なものが想定される。従来型の耐震構造を是とするのではなく、レベル 2 地震動に対して使用性の確保が要求されたとしても、それを合理的かつ経済的に実現できる構造の開発を目指したい。

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) 服部琳太郎, 石橋寛樹, 石塚直光, 秋山充良：摩擦振子型免震機構付き RC 橋脚を持つ橋梁の水平二方向地震動に対する地震応答特性, 第 18 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.73-76, 2015
- 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/>
- 5) 岡本晋, 深沢泰晴, 藤井俊二, 尾崎大輔：すべり方式免震システムを有する橋梁の地震時挙動特性, 土木学会論文集, No.513/I-31, pp.191-200, 1995.