

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

服部 琳太郎¹・石橋 寛樹²・石垣 直光³・秋山 充良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）

³日本工営株式会社 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）

⁴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

兵庫県南部地震以降、耐震解析手法には長足の進歩が見られるのに対して、地震動評価には依然として圧倒的な不確実性が存在する。このような不確実性に対峙し、構造物の地震時安全性を確保するためには、地震動の不確実性の影響を受けないほど構造物の性能を高める必要がある。コンクリート系の耐震部材の開発では、この手段として部材靱性率を大きくしてきた。配筋の工夫や合成構造の採用などにより、降伏変位の約 20 倍までの応答変位が生じて、安定した曲げ挙動を呈する RC 柱も開発されている。しかし、このような部材変形能により地震エネルギーの吸収を期待した構造では、地震後に相当の残留変位が生じる可能性がある²⁾。橋梁は、地震後の救助・救急活動や、都市の復興に非常に重要な役割を果たすことを考えると、単に橋梁の地震中の安全性を確保するだけではなく、地震後の供用性までを考慮した部材開発が求められる。

この背景のもと、著者らは、図-1に示すように、橋脚の中間部に滑り曲面を設置し、滑り曲面より上の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の部材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（摩擦振子型免震機構を有する橋脚）を提案した^{3), 4)}。本機構は構造形態の工夫のみにより構造物の長周期化を実現するため、免震化を行うことによるコストの増加を抑制できる。既に著者らは、震動実験により、本橋梁の基本的な地震応答特性を確認しており、免震化により提案構造は高い耐震性を有していることを確認している。一方で、過去の震動実験では、橋軸方向のみ、ある

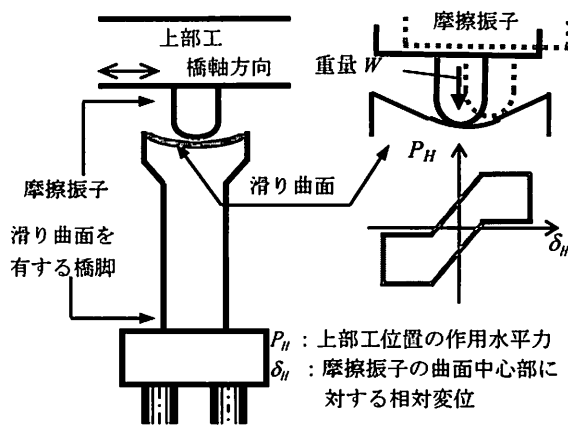


図-1 摩擦振子型免震機構付橋脚

いは橋軸方向+鉛直方向の地震動入力に対する提案橋梁の地震応答特性を評価してきた⁵⁾。

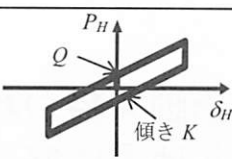
本研究では、橋軸方向と橋軸直角方向の地震動を同時に受ける摩擦振子型免震機構付RC橋脚の震動実験を実施し、特に橋軸直角方向入力が本機構を有する橋梁の応答に及ぼす影響を実験的に評価する。

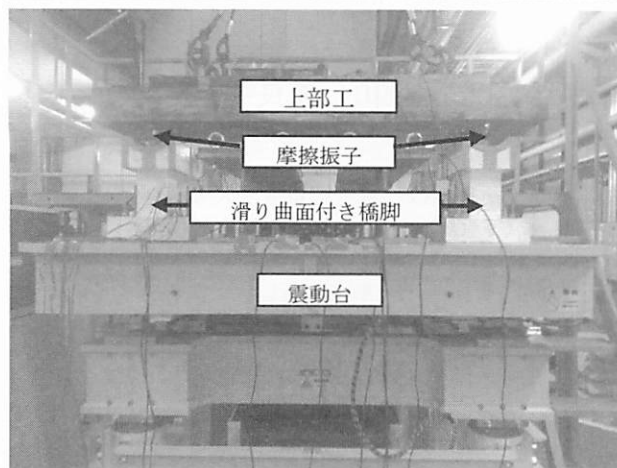
2. 実験概要

(1) 実験供試体

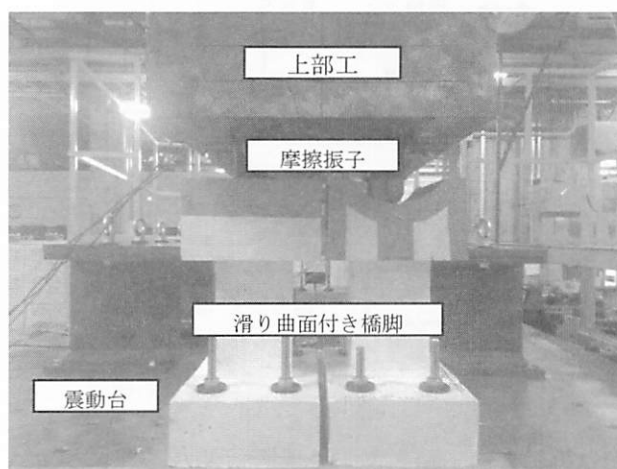
供試体諸元を表-1に示す。また、供試体設置状況を写真-1に示す。本実験では、橋脚高さ10mの実橋梁を想定し、震動台の寸法および加震能力から相似比を33に設定することで供試体を設計した。その際、加速度および橋脚の躯体に作用する面圧の相似比を1.0とした。供試体は、上部工（鉄の錘）、RC橋台、滑り曲面を有するRC橋脚、および摩擦振

表－1 実験に使用した滑り曲面の形状

滑り曲面形状	荷重－変位関係
円弧 (半径 $R = 80\text{mm}$)	



(a) 橋軸直角方向



(b) 橋軸方向

写真－1 供試体設置状況

子から構成される。

滑り曲面を有するRC橋脚は4基製作しており、写真－1に示すように配置した。この配置では、例えば、橋軸方向のみに上部工が移動する場合、2つの橋脚上の摩擦振子は、円弧を持つ滑り曲面上を動き、橋軸方向への移動に伴い鉛直方向に浮き上がるのに対して、他の2つの橋脚上の摩擦振子は、単に水平に移動することになる。

上部工重量は750kgfであり、1つの摩擦振子に作用する常時の軸力は約1.84 kN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、滑り曲面との接触部は半径25mmの半円となっている。RC橋脚はせん断スパン比4.74、軸方向鉄筋比

2.65%である。なお、RC橋脚は、帯鉄筋を密に配筋することで曲げ破壊型となるように設計した。使用した鉄筋はSD295Aである。

摩擦振子を質点に置換した後の力の釣り合いより、摩擦振子の滑り発生後の復元力および固有周期は次式で求められる。

$$Q = \mu W \quad (1)$$

$$K = \frac{W}{R} \quad (2)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (3)$$

ここに、 Q ：滑り発生荷重、 μ ：摩擦係数、 W ：摩擦振子に作用する軸力、 K ：滑り発生後の剛性、 T ：滑り発生後の固有周期、 R ：滑り曲面の半径、 g ：重力加速度、である。

表－1に示すように滑り曲面は半径80mmの円弧であり、荷重 Q を超えると滑りは始める。なお、実験供試体、および対応する実橋において、摩擦振子に滑りが発生した後の固有周期は、式(3)よりそれぞれ0.567秒、および3.26秒となる。

(2) 測定項目

測定にはレーザー変位計、加速度センサーおよびひずみゲージを使用した。まず上部工には、橋軸方向、橋軸直角方向および鉛直方向加速度を測定するための加速度センサーを3つ設置した。また、上記の加速度センサーとは別に、摩擦振子に加振中に発生する軸力を求めるために、摩擦振子の真上の位置に鉛直方向の加速度を測定するセンサーを取り付けている。上部工の橋軸方向、橋軸直角方向、および鉛直方向の変位はレーザー変位計により測定した。RC橋脚の応答が弾性範囲内に留まっていることを確認するため、RC橋脚基部の軸方向鉄筋には、ひずみゲージを貼付している。

(3) 震動台実験に使用する地震動

本実験には、特性の異なる4つの地震動を用意した。短周期波としては、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を使用した。長周期波としては、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の加速度振幅を1.75倍し、さらに固有周期の大きい領域での加速度応答スペクトルが大きくなるように調整した波を用いた。

本実験に使用した4つの地震動の加速度応答スペクトルを図－2に示す。なお、図－2には、道路橋示

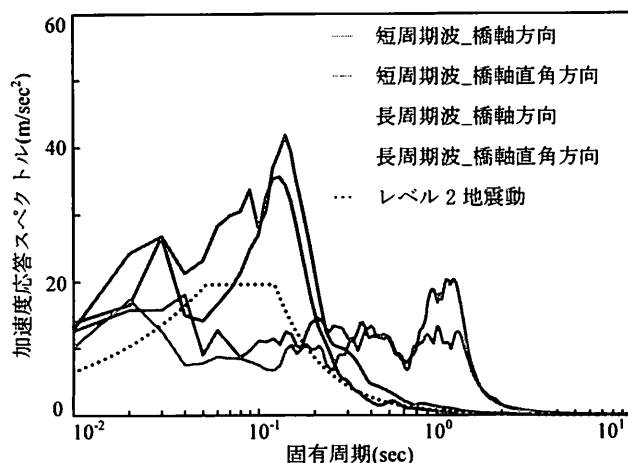


図-2 加速度応答スペクトル

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比較のために示している。地震動の時間軸は全て相似則に基づき修正している。

3. 実験結果

(1) 概説

摩擦振子型免震機構付 RC 橋脚に対して、水平二方向震動実験を行い、橋軸直角方向の地震動が本機構を有する橋梁の地震応答特性に及ぼす影響を評価する。本実験では、短周期波、および長周期波のどちらを用いる場合も、橋軸方向の地震動の加速度振幅を一定にしたまま、橋軸直角方向の地震動の加速度振幅のみを変化させることで、橋軸直角方向から地震動を入力する影響を確認する。なお、震動台の加震能力の関係で、橋軸直角方向の地震動の振幅は、短周期波では最大 200%まで、長周期波では最大 150%まで拡大して実験を行っている。

(2) 水平荷重－水平変位関係

図-3に、短周期波および長周期波の入力に対する橋軸方向の水平荷重－水平変位関係を示す。図には、摩擦振子を質点に置換し、力の釣合いより求めた計算上の骨格曲線も併せて示している。骨格曲線を求める際に用いた摩擦係数は、速度依存性を考慮せず、実験より同定された値 (約0.397) をそのまま用いている。橋軸直角方向の地震動を入力しても、長周期波と短周期波のどちらの場合でも、橋軸方向から得られる水平荷重－水平変位関係に大きな影響を及ぼさないことが確認できる。

図-4には、長周期波の入力において、橋軸方向のみに地震波を入力した場合の上部工の橋軸方向および橋軸直角方向の水平変位の時刻歴応答値を示す。当然のことながら、この場合、橋軸直角方向にはほ

とんど変位が生じていない。一方、図-5には、橋軸方向と橋軸直角方向に地震動を同時に入力した場合の橋軸方向および橋軸直角方向の水平変位の時刻歴応答値を示す。図-3と同様、橋軸直角方向の地震動の入力の有無は、橋軸方向の応答値に大きな影響を及ぼしていないことが確認できる。

なお、図-3において、短周期波を用いた場合に、橋軸直角方向から入力する地震動の加速度振幅の倍率を200%にしたとき、振幅の倍率が150%より小さい場合と比較して、震動実験で得られた水平荷重－水平変位関係と、摩擦振子を質点に置換した後の力の釣り合いより求められる骨格曲線との乖離が大きくなっている。この理由は、計算では、提案する橋梁が地震動を受け、上部工が滑り曲面上を運動し始めた後、滑り曲面と摩擦振子の接触状態は一体であり、滑らかに運動することを想定しているのに対し、震動実験では、一部の橋脚上で摩擦振子が滑り曲面から浮き上がるなど、上部工がばたつく挙動を示したことにある。骨格曲線は水平方向の力の釣合いのみで求めており、上部工のばたつきにより鉛直方向に挙動した影響で、実験値と骨格曲線の間に大きな乖離が生じたと考えられる。上部工がばたついた原因としては、表-1の滑り曲面の形状に示すように、本実験では、半径一定の定曲面タイプの滑り曲面を使用しているため、水平方向に大きな変位が発生すると、上部工は初期状態に対して鉛直方向に大きく移動する。さらに橋軸直角方向に慣性力を受けたとき、初期不正などの影響により、4つのRC橋脚の滑り曲面上での鉛直変位の大きさが位置ごとに異なることで、上部工のばたつきが生じたと思われる。対策としては、滑り曲面を変動曲面タイプとして鉛直方向への移動量を抑えるなどの工夫が必要である。

(3) 最大曲げモーメント - 橋軸直角方向PGA関係

図-6にひずみゲージの測定値から平面保持を仮定して求めた橋脚基部の最大曲げモーメント (加震中に生じた曲げモーメントの最大値) と橋軸直角方向から入力した地震動の地動最大加速度 (PGA) の関係を示す。図-6には、実験で用いたコンクリートと鉄筋の材料試験から得られた圧縮強度と降伏強度を用いて RC 橋脚の断面計算より求めた降伏曲げモーメントの値も比較のために示している。

図-6より、最大曲げモーメントの値は降伏曲げモーメントを大きく下回っていることが確認できる。図-2に示すように、実験で用いた入力地震動は設計地震動と比較して非常に大きいが、このような地震動に対しても摩擦振子型免震機構を有する RC 橋脚は弾性応答することが確認できる。

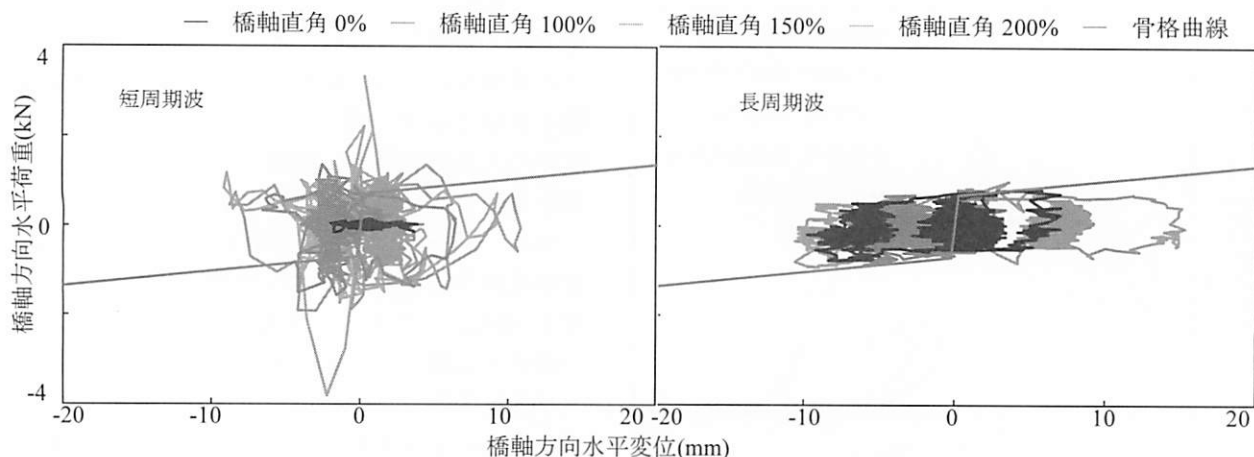


図-3 橋軸方向の水平荷重 - 水平変位関係

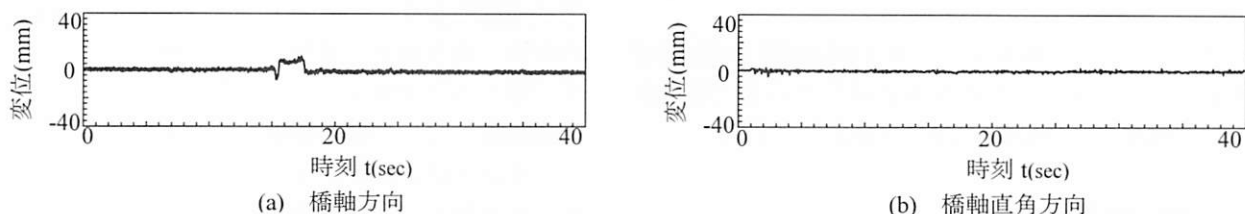


図-4 長周期波_橋軸直角方向の地震動を入力しなかったときの上部工の変位時刻歴

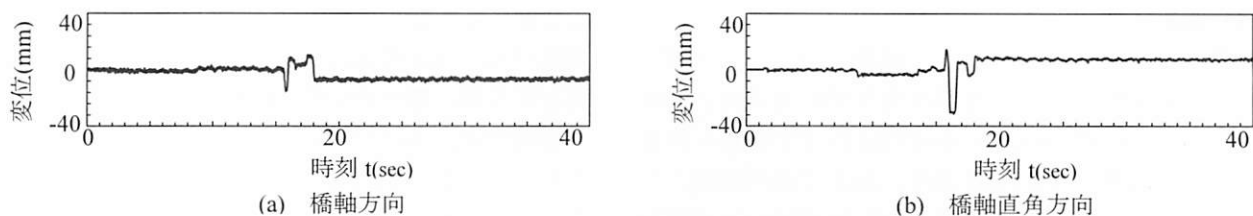


図-5 長周期波_橋軸直角方向の地震動を入力したときの上部工の変位時刻歴

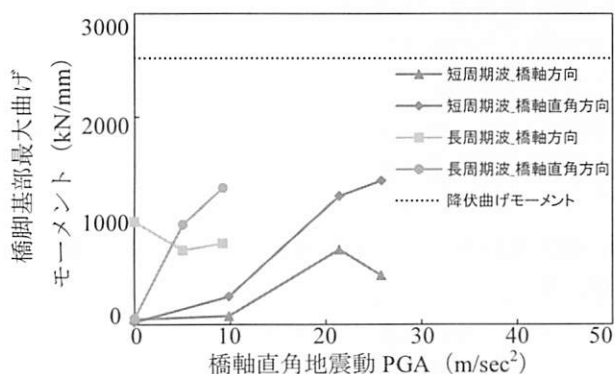


図-6 橋脚基部最大曲げモーメント
- 橋軸直角方向 PGA 関係

4. まとめ

本研究では、橋軸方向と橋軸直角方向の水平二方向入力を与える震動実験により、特に橋軸直角方向から入力する地震動の大きさが摩擦振子型免震機構を有する橋梁の地震応答特性に及ぼす影響を実験的に評価した。

本実験で観察されたような上部工のばたつきを抑え、そして摩擦振子が滑らかに滑るための工夫や、

また、提案橋梁の地震時挙動を解析により評価できるような検討も今後必要である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，2012.
- 2) 川島一彦，Gregory A.MACRAE，星隈順一，長屋和宏：残留変位応答スペクトルの提案とその適用，土木学会論文集，No.501/I-29，pp.183-192，1994.
- 3) 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.
- 4) 秋山充良，青木直，阿部遼太，黒田千砂子：構造形態の工夫によるコンクリート構造の長周期化に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.2，pp.859-864，2011.7
- 5) 石橋寛樹，金井晴弘，秋山充良，小野潔，坂柳皓文：水平動と鉛直動を同時に受ける摩擦振子型免震機構付き鋼製橋脚の振動実験