

摩擦振子型免震機構付き橋脚を持つ橋梁の 3 次元非線形地震応答解析

早稲田大学 学生会員 ○金井 晴弘 早稲田大学 正会員 秋山 充良

1. はじめに

橋梁は、地震後の救助・救急活動や、都市の復興に重要な役割を果たすことを考えると、単に構造物の安全性を確保するだけではなく、地震後の即座の使用性までを考慮した部材開発が必要である。この背景のもと、参考文献1)では、摩擦振子型免震機構を有するRC柱を開発し(図-1)、その橋軸方向への1方向振動台実験、および数値解析的検討により、相当に大きな地震波を入力しても、本機構を有するRC柱は無損傷であり、地震後に滑り曲面に生じる残留変位もそれほど大きくならないことなどを確認した。ただし、上下動の影響や、水平2方向加振を受けたときの提案構造の地震時挙動は今後の課題としていた。本研究では、この影響を検証する振動台実験に先立ち、提案構造の3次元非線形動的解析を実施し、3方向入力を受けたときの基本的な振動特性を把握する。

2. 解析概要

本検討では、両端に摩擦振子型免震機構を有する橋脚を持つスパン 30m の単純橋を想定した。橋脚高さは 10m、上部工重量は 1200tonf とした。橋脚と摩擦振子はともにコンクリートで製作され、摩擦振子と滑り曲面の表面は鋼板で覆われる。つまり、振子の挙動は鋼板同士の接触で生じる摩擦力の大きさに支配される。図-1 に示す滑り曲面の形状は、表-1 の 3 つを想定した。表-1 に示す形状は、滑り曲面の中心位置(橋脚の図心位置)を通る鉛直平面で見たものである。橋脚 C は、鉛直平面では半径 $R=2.0\text{m}$ の円弧を描いている。これを鉛直軸周りに回転してできる球面上を摩擦振子は滑ることになる。橋脚 PF は、鉛直平面では、水平変位が小さい時には半径一定の円弧、ある水平変位以上になると直線になる形状である。これを鉛直軸周りに回転すると、水平変位が小さい時には橋脚 C と同じ球面上を摩擦振子は滑り、水平変位が大きくなると円錐面上を滑ることになる。橋脚 F は、曲面を持たず、平坦な面の上を摩擦振子が滑ることを想定している。

表に示す固有周期は、摩擦振子を質点に置換し、その質点が中心位置付近の球面上を滑るときの力の釣り合いから得られる水平方向剛性を用いて計算した値である。摩擦振子型免震機構を持つ橋脚では、滑り曲面の形状を工夫することで、長周期化のためのデバイスを付加することなく、固有周期 2.5 秒以上の構造を容易に実現できる。また、橋脚 C と PF では、滑り曲面が存在することで、地震後の原点復帰も期待できることが特徴である。

参考文献 1)では、橋軸方向への 1 方向加振のみを実施しており、水平方向剛性を水平変位の関数として事前に決定できるため、水平荷重-水平変位関係の骨格曲線を定められる。しかし、表-1 に示すように、球面や、球面+円錐面上を滑る場合には、摩擦振子が置かれる位置の曲面の曲率に応じた剛性の計算が必要となる。剛性は、以下の式で計算する。

$$K = \frac{W}{\sqrt{R^2 - x^2 - z^2}} \tag{1}$$

ここに、 W : 摩擦振子に作用する軸力、 K : 滑り発生後の剛性、 R : 滑り曲面半径、 x : 橋軸方向滑り変位、 z : 橋軸直角方向滑り変位である。

動的解析では、摩擦振子が静止しているときには非常に剛な剛性を与え、摩擦振子が運動を始めた後は摩擦振子の位置に応じて式(1)から逐一剛性を計算している。数値積分には Newmark の β 法を用いる。摩擦係数は、参考文献 1)の実験結果から鋼板と鋼板が接触して滑るときの摩擦係数 0.262 を用いる。なお、摩擦係数には、速度依存性

Key Words : 摩擦振子, 長周期構造, 非線形動的解析, 橋梁

連絡先 : 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学理工学部社会環境工学科 TEL : 03 (5286) 2694

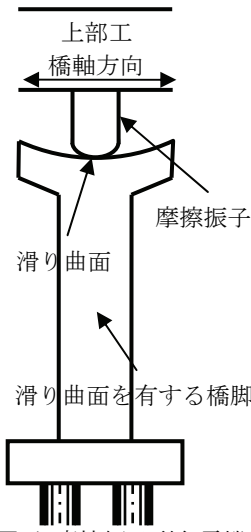


図-1 摩擦振子型免震機構を有する橋脚の模式図

表-1 滑り曲面一覧

	C	PF	F
滑り曲面形状	球面	球面 円錐面	平面
半径 R	2.0(m)	2.0(m)	—
周期 T	2.8(sec)	2.8(sec)	∞

があることが指摘されており、また、鉛直動の大きさによる摩擦振子と滑り曲面の接触の状態により摩擦係数が変化することも考えられる。これらは、今後、振動台実験の中で検証していきたい。

入力地震波は、2003年十勝沖地震の際に幕別町本町で観測された地震波（以下、単に観測波）²⁾を用いた。本研究は、図-1に提案する構造が3方向入力を受けたときの基本的な応答性状の把握が目的であるため、同じ地震波を橋軸方向、橋軸直角方向、そして上下方向に入力する。ただし、振幅の大きさは、上下方向は水平方向の半分とする。

図-2の加速度応答スペクトルに示すように、現行の道路橋示方書のレベル2・タイプII（I種地盤）の値を対象橋梁の固有周期2.8秒以上の領域で上回るように、観測波の振幅を250%に拡大したものを入力する。

3. 解析結果

橋軸方向および橋軸直角方向ともに振幅を250%、上下方向に振幅を125%に拡大した観測波を同時に入力した時の水平荷重-水平変位関係を図-3に示す。ここに、水平荷重とは、上部工重量の半分の値に絶対加速度を乗じて求めている。水平変位とは、摩擦振子の滑り曲面の中心位置からの橋軸方向、あるいは橋軸直角方向に対する相対水平変位である。橋脚ごとに与えた滑り曲面の形状を反映した水平荷重-水平変位関係が得られている。橋脚Cでは、摩擦振子は一定の球面上を滑るため、水平変位の増加とともに、一定の剛性を保ちながら水平荷重が大きくなる。一方で、発生する最大水平変位を小さく抑えることができる。

橋脚Pでは、水平変位が大きくなると、球面から円錐上を滑るようになる。式(1)から推測されるように、円錐上では剛性がゼロとなるため、水平変位がある値以上になると水平荷重の増加を抑えることができる。滑り曲面より下部に位置する部材で生じる地震時断面力を抑え、さらに、地震中の上下方向の移動量を小さくする目的からは、橋脚PFの方が橋脚Cよりも優れた応答性状を示していると言える。橋脚Fは、最も水平荷重を小さくできるが、曲面が存在しないことから、非常に大きな水平変位が発生する。

最適な曲面の形状は、図-3に示される水平荷重や水平変位の最大値のほかに、摩擦係数の大きさや地震後の残留変位の大きさも考慮して見出す必要がある。参考文献¹⁾に示されるように、地震後の残留変位は、動的解析で実験結果を再現することができていない。今後、振動台実験を実施し、さらに実験データの蓄積を重ね、最適な曲面の形状を橋梁の設計条件ごとに数値解析的に見出せるような計算モデルの改善が必要である。

4. まとめ

摩擦振子型免震機構を橋脚に付与することで、橋脚下端に塑性ヒンジ部などを設ける必要がなくなり、地震中の安全性と地震後の即時の供用性を確保した橋梁を設計できる可能性がある。今後、多方向入力を受ける場合の振動実験と解析的検討を重ねることで、本構造の地震応答特性の把握とその耐震性能照査法を確立していきたい。

参考文献 1) 秋山充良, 青木直ほか: 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. 2) 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/> 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説(耐震設計編 V), 2002.

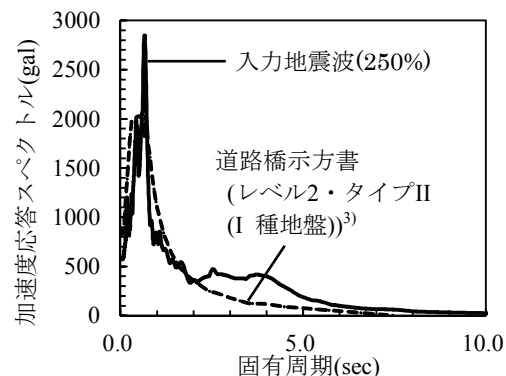


図-2 入力波の加速度応答スペクトル ($h=5\%$)

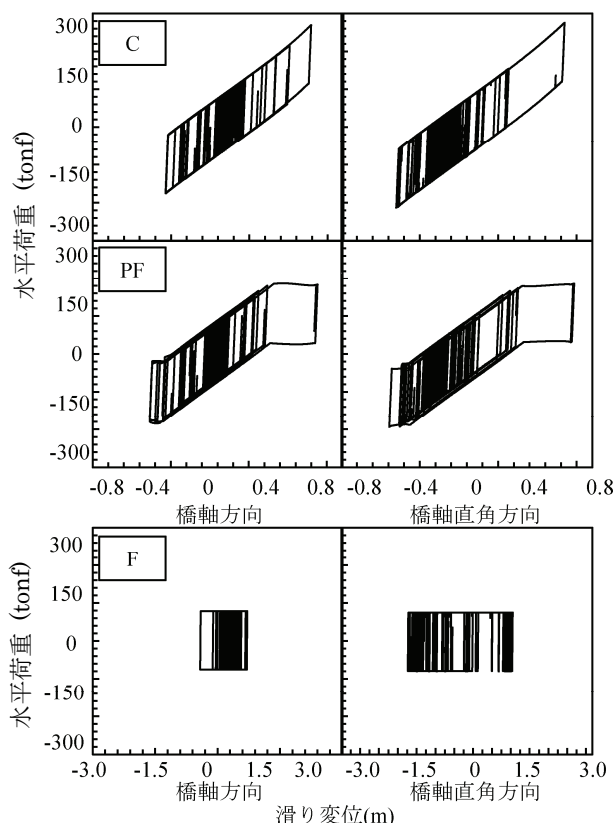


図-3 水平荷重-滑り変位関係