

変動曲面上を滑る摩擦振子を有する橋梁の開発に関する基礎的研究

早稲田大学 正会員 ○秋山充良 国土交通省 正会員 阿部遼太
 東日本高速道路(株) 正会員 青木直 東北大学 学生会員 黒田千砂子

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定性が存在する。このような不確定性に対峙し、構造物の地震時安全性を確保するためには、地震動の不確定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。これまでの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。既に、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 系の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、地震後に相当の塑性変形が残留する。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、その振動台実験により、基本的な性能を確認した。しかし、参考文献1)では、摩擦振子が定曲面上を滑るため、大きな地震力を受けると、桁の水平移動に伴いその上方への変位（アップリフト）や、橋脚下端に作用する地震時慣性力が大きくなり、それら部位・部材が損傷する可能性がある。これを避けるためには、半径の大きな曲面を用いることが考えられるが、その場合には、摩擦振子の原点回帰が期待できず、地震動作用後の大きな残留変位の発生が懸念される。そこで、本研究では、摩擦振子が滑る曲面の形状を工夫することで、これらの問題の解決を試みた。これにより、地震時の安全性に加え、地震後の修復性や使用性までも確保した橋梁（ダメージフリー橋）が実現される。

2. 実験概要

供試体諸元の一覧を表-1に示す。また、供試体の設置状況の一例を写真-1に示す。橋脚中間部に滑り曲面を設け、滑り曲面の上側に位置する部材が摩擦振子の挙動を示す。本研究では、参考文献1)で指摘された前記の問題点を解決するため、写真-1(供試体 PF-1)に示されるように、円弧と直線の組み合わせからなる滑り曲面を使用する。これにより、仮に大きな地震力を受けたとき、摩擦振子は円弧から直線の上を滑るようになり、柱下端に作用する地震時慣性力はある一定値以上にならない。一方で、ある程度大きな半径を持つ円弧を使用できることから、地震後の残留変位も抑えられる。入力地震波は卓越周期帯の異なる 2 種類の実地震波を用意し、相似則に応じて修正したものを用いた。図-1にその加速度応答スペクトルを示す。卓越周期帯の小さいものを短周期波、大きいものを長周期波と呼ぶ。摩擦振子は鋼で製作した。滑り曲面には、厚さ約 3mm の滑り曲面と同形状の鋼板を貼付している。つまり、摩擦振子と滑り曲面は、鋼同士で接触している。

表-1 供試体一覧

供試体名	C-1	C-2	C-3	PF-1	PF-2	F-1
すべり曲面の形状	円弧			円弧 直線	円弧 直線	平面
荷重-変位関係						
半径 R (mm)	80	130	260	80	80	-
周期 T (sec)*1	3.3	4.1	5.9	3.3	3.3	∞

*1 円弧部分の半径 R を用いて算出した実橋スケールの固有周期

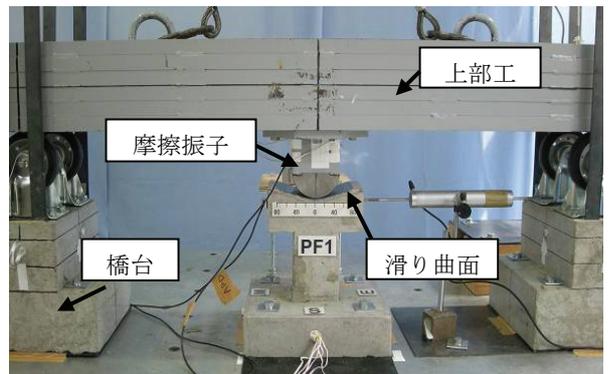


写真-1 供試体設置状況 (供試体 PF-1)

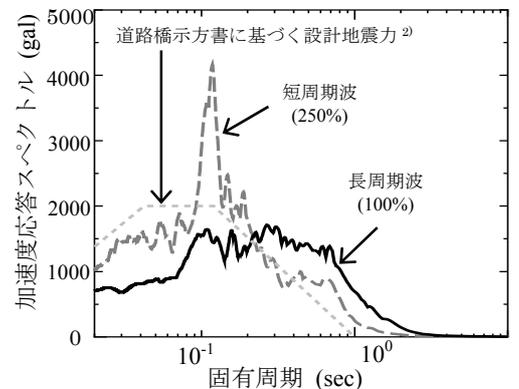


図-1 入力波の加速度応答スペクトル (h=5%)

Key Words : 摩擦振子, 長周期構造, 振動実験, 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

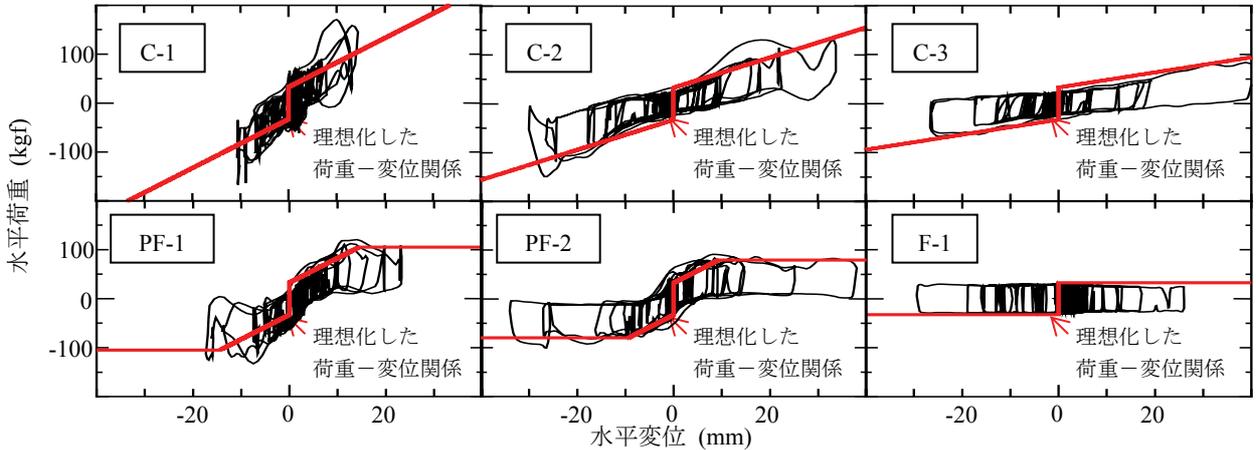


図-2 水平荷重-水平変位関係(短周期波 250%入力時)

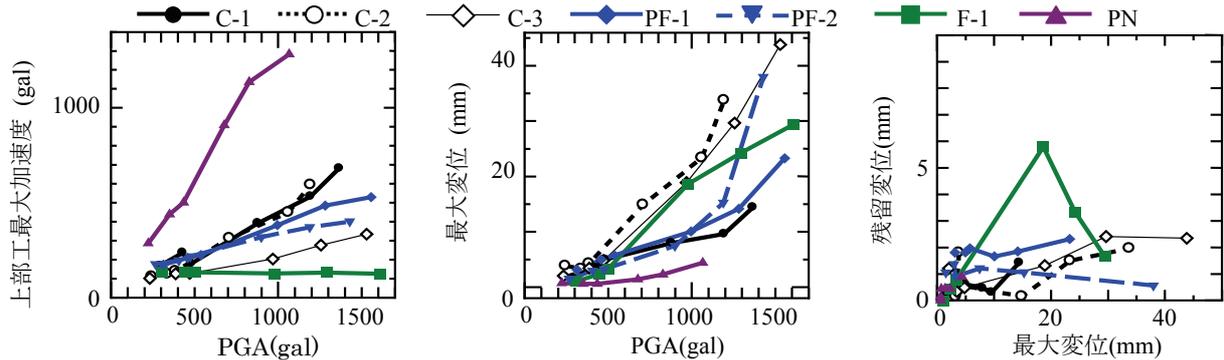


図-3 各供試体の応答値の比較(短周期波入力時)

3. 実験結果

図-2 に、実験結果より得られた摩擦振子の水平荷重-水平変位関係を示す。ここに、水平荷重とは、摩擦振子に作用する軸力として 250kgf を仮定し、上部工位置の応答絶対加速度と掛け合わせたものである。また水平変位とは、摩擦振子の滑り面に対する相対水平変位を表す。図中には、滑り面の形状および摩擦係数から算出される骨格曲線も示している。鋼同士の摩擦係数は、供試体 F-1 の実験結果より同定した値 (0.13) を用いた。実験結果は、摩擦振子を質点と見なして得られる計算上の骨格曲線(図中の赤線)に近い値を示した。つまり、本構造の地震時挙動をモデル化する際、その骨格曲線はバイリニアあるいはトリリニアで表現できる。

図-3 に、上部工位置での最大絶対加速度、振動台に対する最大相対変位、および加振後の残留変位の供試体ごとの比較を示す。滑り曲面付橋脚は、供試体 PN と比べて優れた加速度低減効果を発揮している。供試体 C-1~C-3 を比較すると、滑り発生後の固有周期が最も大きい C-3 供試体が上部工加速度を大きく低減している。しかし、最大変位は大きく発生しており、上部工位置の最大加速度を抑制すれば相対変位が大きくなるなど、これらは相互にトレードオフの関係を有している。一方、供試体 F-1 は最も最大加速度を低減しているが、勾配を持たないため残留変位が極端に大きく場合がある。供試体 PF-1, PF-2 は、加振レベルが大きい場合に上部工位置で生じる最大加速度が供試体 C-1 や C-2 と比べて低減されている。これは、ある加振レベルを超えると、円弧部から直線部の上を摩擦振子が滑るようになり、直線部では、上部工の水平変位の大きさに関係なく、水平荷重の値が決まるためである。また、これらの供試体では、桁の水平移動に伴い生じるその上方への変位(アップリフト)が定曲面を持つ供試体 C-1~C-3 に比べて小さく、さらに、加振後に生じる残留変位も小さい。供試体 PF-1 や PF-2 は、地震時の安全性の確保、さらには地震後の修復性や使用性の確保に適した構造と言える。

4. まとめ

橋梁の地震時安全性を満足し、かつ、地震後の修復性や使用性を確保する構造として、変動曲面上を摩擦振子が滑る免震機構を組み入れた橋脚構造を開発した。変動曲面の形状の工夫により、橋脚基部などへの地震時慣性力の低減、上部工のアップリフトの低減、さらには地震後の残留変位を低減できることが振動台実験により確認された。

参考文献 1) 黒田千砂子, 青木直, 秋山充良ほか: 摩擦振子型免震機構を有する橋脚の開発に関する基礎的研究, 土木学会第 65 回年次学術講演会, pp.67-68, 2010. 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説(耐震設計編 V), 2002.