

構造形態の工夫による橋梁の長周期化に関する基礎的研究

秋山充良¹・青木 直²・阿部遼太³

¹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）

²正会員 修（工）東日本高速道路（株）関東支社さいたま工事事務所（〒341-0056 埼玉県三郷市番匠免2-101-1）

³正会員 修（工）国土交通省 港湾局計画課（〒100-8918 東京都千代田区霞が関2-1-3）

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、免震橋梁の適用事例が増えている。免震橋梁は、アイソレーターとダンパーが一体となった鉛プラグ入り積層ゴム支承や高減衰積層ゴム支承などの免震支承を設置することで、長周期化と減衰性能の向上による地震時の上部構造慣性力の低減を図っている¹⁾。近年は、制振橋梁の開発も進められおり、鋼材の材料非線形を利用したエネルギー吸収装置やオイルによる粘性ダンパーを設置する例も見られる。現状は、免震や制振装置を付加することで、系全体の地震時の安全性を向上させている。本研究では、こうした装置の付加ではなく、コンクリート構造の構造形態の工夫により、地震時慣性力の低減を目的とした長周期化と地震後の残留変位の低減を実現する構造を提示する。また、その性能確認のため、2径間橋梁を模した振動実験を実施する。

2. 開発橋梁の基本設計概念

建築構造物を対象として、近年、摩擦振子型免震支承の利用による免震設計が試みられている^{2), 3)}。この支承は、ある摩擦力以上のせん断力の作用下において、曲面上を摩擦振子が振動することで、曲面半径 R に応じた長周期化と曲面の存在による地震後の残留変位の低減を図るものである。しかし、橋梁などの大型構造物では、曲面半径 R と、振子部に作用する軸力が過大なものとなり、同様の支承を設計することは困難である。

本研究は、「支承」にこの摩擦振子型免震機構を使うのではなく、同機構をコンクリート橋脚中間部に設けた構造を提案する。開発の際は、以下の3つの条件を考慮する。

- (1) 免震支承等の装置を用いず、構造形態のみの工夫により長周期構造を実現する。
- (2) 摩擦振子の挙動をする部材と滑り曲面に使用する材料の組み合わせを調整することで最適な摩擦力が得られる条件を見出し、橋脚（滑り曲面下端にあ

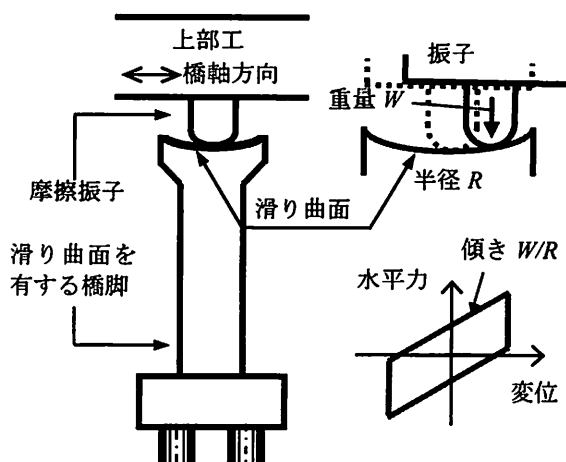


図-1 摩擦振子型免震機構を持つ橋脚の模式図

る部材）や基礎への地震時慣性力の低減を図る。

(3) 一般的な鉄筋コンクリート橋脚と同じ材料を使用することで、免震化に伴うコスト増を最小限に抑える。

図-1が摩擦振子型免震機構を用いた鉄筋コンクリート橋脚を持つ橋梁の模式図である。橋脚の中間部に設けた滑り曲面の上側に位置する部材が摩擦振子の挙動をすることで、橋梁全体系の長周期化が実現される。

3. 実験概要

(1) 実験供試体

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。摩擦振子はコンクリートと鋼で製作した。摩擦振子は、滑り曲面との接触部が半径50mmの半円になっている。摩擦振子は上部工と一体となり挙動するように剛結している（水平・鉛直方向変位、および橋軸直角方向周りの回転を拘束）。滑り曲面を有する橋脚（滑り曲面付橋脚）は鉄筋コンクリート（断面形状は100mm（橋軸方向幅）×120mm（橋軸直角方向幅））である。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、鋼と鋼の組み合わせ、およびコンクリートと鋼

表-1 供試体諸元一覧

供試体名	C-1	C-2	C-3	F-1	PN
形状	上部工 摩擦振子 滑り曲面	上部工 摩擦振子 滑り曲面	上部工 摩擦振子 滑り曲面	上部工 摩擦振子 滑り曲面	上部工 橋脚 振動台 340mm
曲面半径	$R=80\text{mm}$	$R=130\text{mm}$	$R=260\text{mm}$	平面	滑り面なし
固有周期 T_s	0.57 秒	0.72 秒	1.02 秒	∞	0.08
固有周期 T_R	3.3 秒	4.1 秒	5.9 秒	∞	0.48

T_s : 供試体の諸元から計算される摩擦振子滑り後の固有周期 (PN 供試体は初期剛性を用いた固有周期)

T_R : 相似比から計算される実橋での摩擦振子滑り後の固有周期

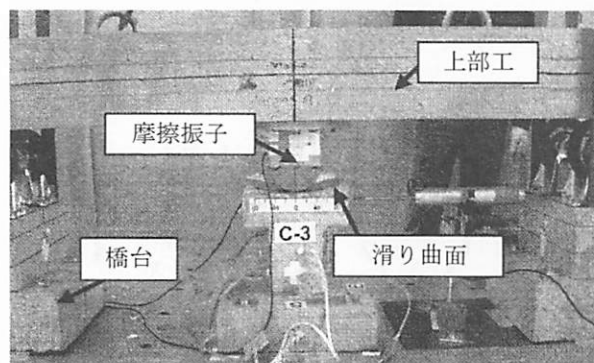


写真-1 供試体設置状況 (供試体 C-3)

の組合せで接触している。供試体C-1, C-2, およびC-3の滑り曲面の半径 R は、相似則から想定される実橋の固有周期が約3秒～6秒となるように定めた。

供試体F-1では、摩擦振子は平坦な鋼板上 ($R=\infty$) を滑るため、計算上の固有周期は無量大となる。地震時に作用する滑り曲面付橋脚の下端の慣性力を最も小さくできると予想されるが、一方で、曲面が存在しないため、地震後の原点回帰は期待できない。供試体PNは、比較のため、摩擦振子型免震機構を橋脚中間部に与えておらず、単柱式RC橋脚を模している。固定支承を用いた場合を想定し、上部工と橋脚天端の間に相対水平・鉛直変位が生じないように固定した (橋脚直角方向周りの回転は自由)。供試体PN、および供試体C-1～3とF-1の滑り曲面付橋脚は、全て同じ鉄筋量を有している。本実験の加振に対して弾性応答し、またせん断破壊を防ぐため、軸方向鉄筋と横拘束筋を計算上の必要量よりも密に配筋した (軸方向鉄筋比=1.88%, 横拘束筋体積比=4.00%)。

(2) 入力地震動

本実験では、2種類の入力地震動を準備した。図-2にその加速度応答スペクトルを示す。加振は、橋軸方向への1方向入力である。入力順序は、短周期波の加速度値を50%に縮小したものを最初に入力し、次いで75%, 100%, 150%, 200%, 250%に振幅調整した地震波、その後、長周期波の加速度値を75%と100%にしたものを入力している。供試体C-1～3とF-1では、各加振後に摩擦振子の残留変位の大きさを記録し、その後、次の地震波の入力前に、残留

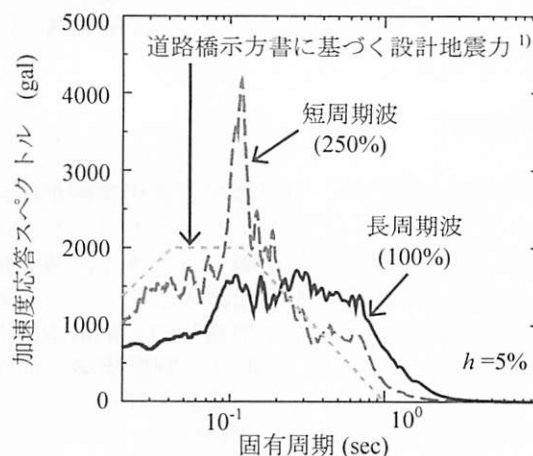


図-2 加速度応答スペクトルの比較

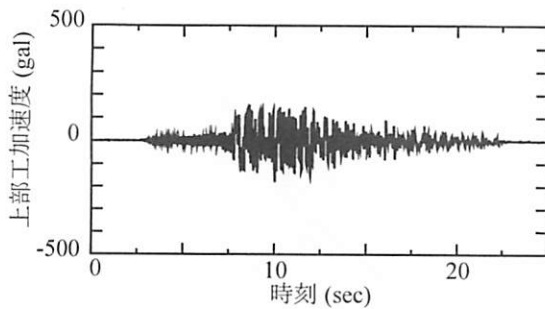
表-2 実験条件の組合せ一覧

供試体	摩擦振子の材料	入力地震波
C-1	鋼 コンクリート	短周期波
C-2		50%, 75%, 100%,
C-3		150%, 200%, 250%
F-1	PN	長周期波
		75%, 100%

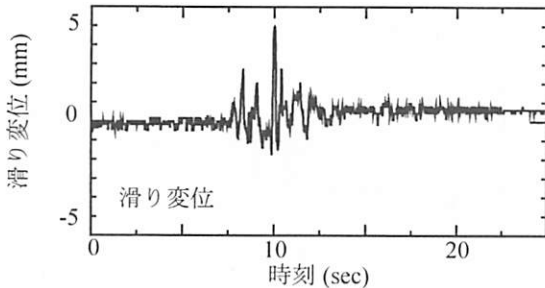
変位ゼロの状態に戻している。つまり、地震波入力前の摩擦振子の位置は、全ての加振において同じである。表-2に実験条件の組合せの一覧を示す。

4. 実験結果

短周期波100%の入力に対する供試体C-1およびPN (摩擦振子: 鋼製) の上部工の絶対応答加速度 (以降、上部工加速度)、摩擦振子と滑り曲面間の相対変位 (以降、滑り変位)、および上部工と振動台間の相対変位 (以降、上部工変位) をそれぞれ図-3および図-4に示す。弾性応答する単柱式RC橋脚を模した供試体PNに対し、供試体C-1は、滑りの発生により上部工加速度が大きく低減され、長周期化した挙動を示している。免震支承などの装置を付加しなくても、図-1に示す構造形態の工夫により、コンクリート構造の長周期化は可能であることを確認できた。また、曲面の存在により、摩擦振子は大きな応答変位が生じた後も、図-3に示されるように残留変位はそれほど大きくならない。

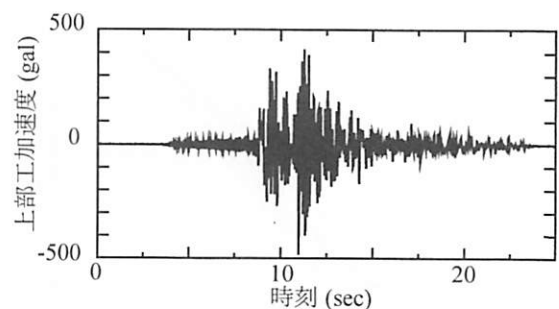


(a) 上部工加速度

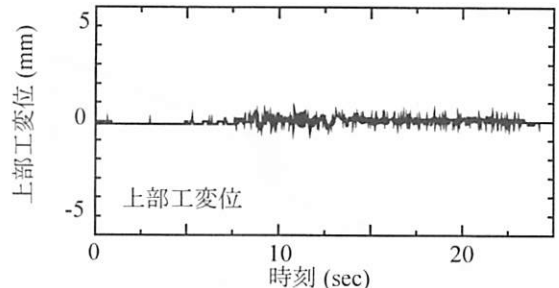


(b) 滑り変位

図-3 C-1 供試体時刻歴応答 (短周期波 100%)



(a) 上部工加速度



(b) 上部工変位

図-4 PN 供試体時刻歴応答 (短周期波 100%)

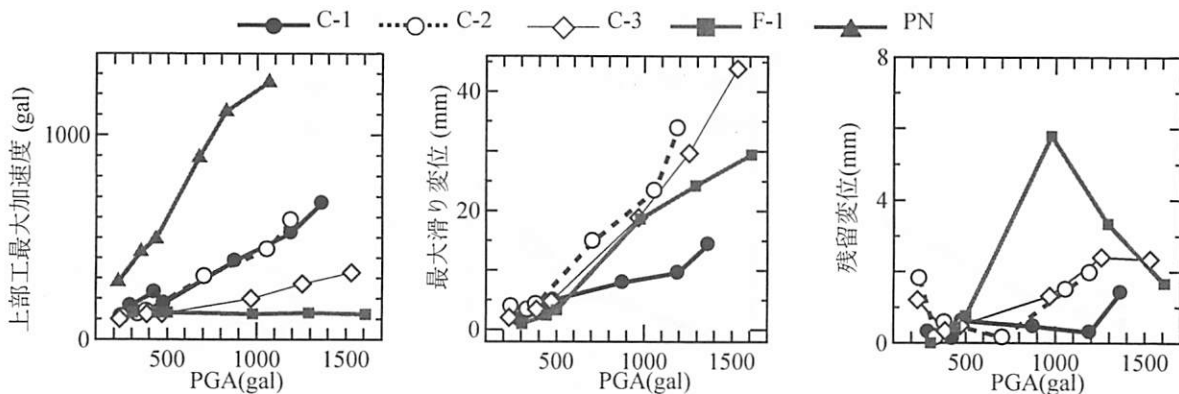


図-5 各供試体の応答値の比較 (地震波: 短周期波, 摩擦振子: 鋼製)

図-5に、短周期波の入力に対する各供試体 (摩擦振子: 鋼製) の応答値の推移を示す。なお、各図の横軸 (PGA) は、振動台に貼付した加速度センサーで計測される加速度時刻歴の最大値である。供試体毎の応答は、滑り曲面の半径の違いを反映している。つまり、曲面半径が小さくなると、後述の荷重-変位関係にも示されるように、水平方向の剛性が大きくなる結果として、大きな上部工最大加速度が生じるのに対して、滑り変位は小さくなる。なお、今回の入力地震動に対しては、水平方向剛性が小さい供試体C-2でも相当に大きな応答変位が生じたため、結果として、供試体C-1とC-2の上部工最大加速度の差は小さくなった。残留変位の大きさには加振毎のバラツキが認められるが、傾向としては、滑り曲面の半径が大きいほど (つまり、緩やかな滑り曲面を持つほど)、大きな残留変位が発生している。

このように、摩擦振子型免震機構を有する橋脚を用いた場合、滑り曲面付橋脚の下端に作用する地震時慣性力を抑えるには、滑り曲面の半径は大きくするのが良く、一方で、地震後の残留変位を小さくす

るためには、滑り曲面の半径は小さくした方がよい。これらは、相互にトレードオフの関係にあり、最適形状の決定は今後の課題である。また、残留変位は、主要動作用後の自由振動に移行する過程のわずかな入力の影響を受けており、その定量評価のためには、さらに詳細な検討が必要である。

図-6には、各供試体の水平荷重-水平変位関係を示す。長周期波100%の入力に対する結果であり、摩擦振子は鋼製である。実験結果より水平荷重を算出する際には、地震動入力前の摩擦振子に作用する軸圧縮力の大きさから、摩擦振子が負担する上部工重量は2.45 kNを仮定している。計算上求められる水平剛性と、摩擦係数から求められる剛塑性型のバイリニアを「理想化した荷重-変位関係」として示している。摩擦係数は、摩擦振子が平坦な鋼板の上を滑る供試体F-1から求めた。同定された値は $\mu=0.13$ である。図-6に示されるように、滑り曲面の半径により水平剛性は異なり、地震時の上部工加速度に違いをもたらしていることが確認される。上部工位置の絶対加速度と変位の関係の包絡線は、摩

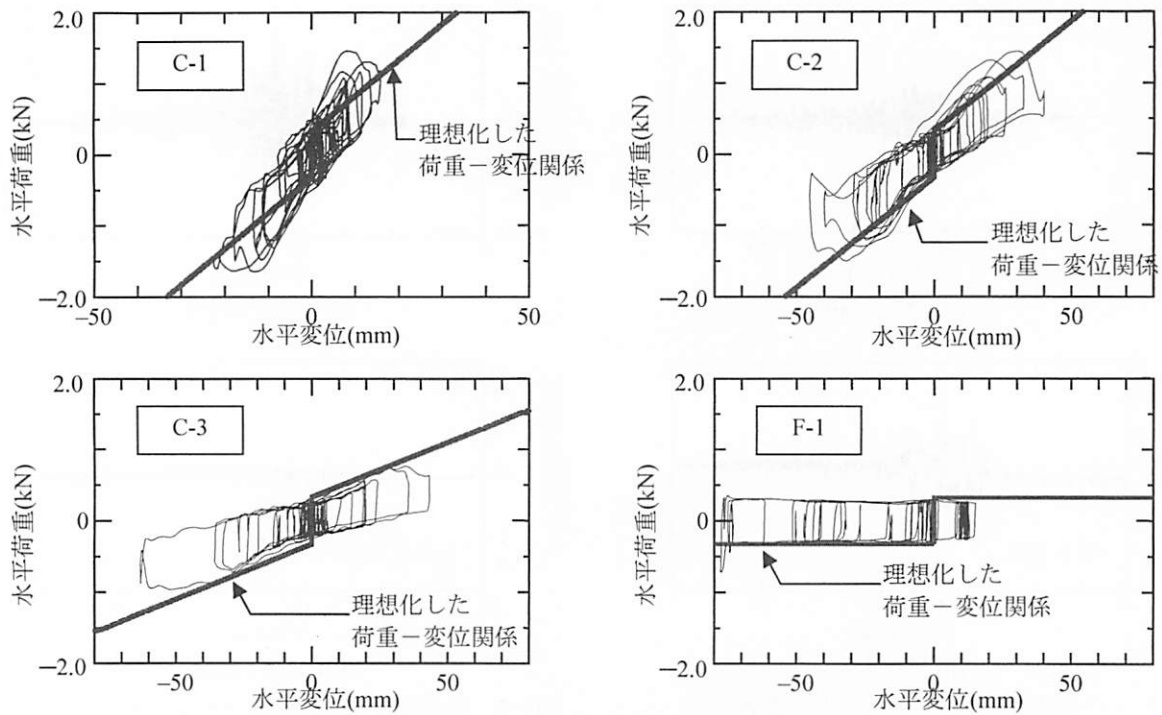


図-6 各供試体の水平荷重-水平変位関係 (長周期波 100%)

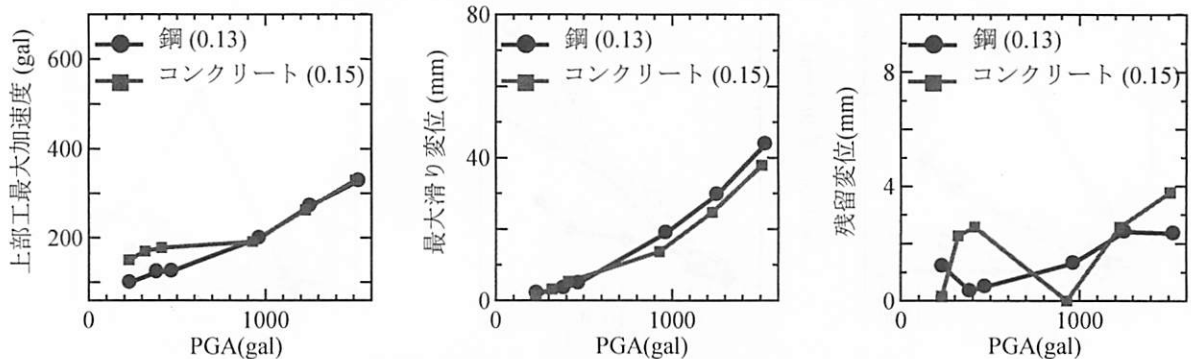


図-7 摩擦振子の材料の違いの比較 (短周期波, 供試体 C-3)

摩擦振子を質点に置換して得られるバイリニアに近い。これは、本構造は簡易な質点系にモデル化可能であり、バネの骨格曲線はバイリニアで近似できることを意味している。今後の解析的検討を進める上で、これは非常に重要な知見である。

図-7に摩擦振子がコンクリート製と鋼製の場合の応答値の違いを示す。これは、供試体C-3に短周期波を与えたときの結果である。前記と同様に、供試体F-1から同定された、コンクリート製の摩擦振子を用いた場合の摩擦係数 μ は、 $\mu=0.15$ である。本実験では、同定された摩擦係数の差が、摩擦振子の材料によらず小さいため、両者の応答値の差も小さい。ただし、摩擦係数が大きいほど、上部工加速度は大きく、滑り変位は小さく、また、残留変位は大きくなる傾向が確認される。

5. まとめ

(1) 摩擦振子型免震機構を有するRC橋脚を提示した。2径間橋梁を模した振動実験により、その挙動は、

理想化した質点の運動に近く、構造形態のみを工夫することで、コンクリート構造の長周期化は可能であることを示した。

(2) 滑り曲面の半径により、上部工加速度、最大滑り変位、さらには残留変位の大きさは変化すること、およびこれらは相互にトレードオフの関係にあることを確認した。

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，2002。
- 2) Dicleli, M. and Mamsour, M. Y. : Seismic retrofitting of highway bridges in Illinois using friction pendulum seismic isolation bearings and modeling procedures, Engineering Structures, Vol. 25, pp.1139-1156, 2003.
- 3) Ates, S., Dumanoglu, A. A. and Bayraktar, A. : Stochastic response of seismically isolated highway bridges with friction pendulum systems to spatially varying earthquake ground motions, Engineering Structures, Vol. 27, pp.1843-1858, 2005.