

論文 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

秋山 充良^{*1}・青木 直^{*2}・阿部 遼太^{*3}・黒田 千砂子^{*4}

要旨：橋梁の免震化では、鉛プラグ入り積層ゴム支承などのゴム系の装置を上部工と橋脚の間に設置し、長周期化と減衰性能の増大により地震時慣性力の低減を図っている。本研究では、装置の付加などを行うことなく、構造形態のみの工夫でコンクリート構造の長周期化の実現を試みる。具体的には、摩擦振子型免震機構をコンクリート橋脚の中間部に設けることで、地震時に滑りを発生させ、系全体の長周期化を図るものである。2 径間橋梁を模した小型模型による振動台実験により、本構造は地震時慣性力を大きく低減でき、さらに、滑り面を曲面としていることから、地震後の残留変位も小さく抑えられることを確認した。

キーワード：摩擦振子、長周期構造、コンクリート橋脚、振動台実験

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. 摩擦振子型免震機構を有する橋脚の基本概念

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)~5)}。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。

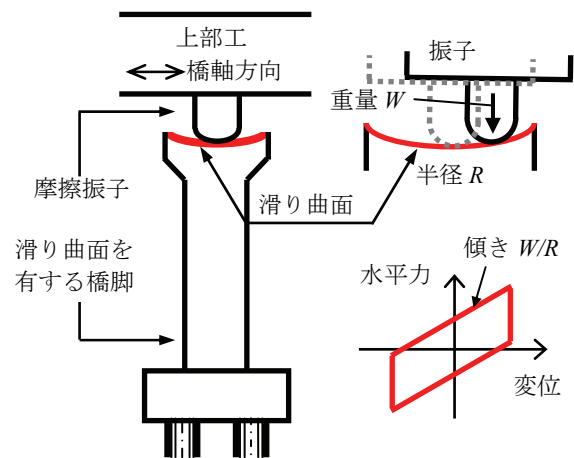


図-1 摩擦振子型免震機構を持つ橋脚の模式図

- (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、橋梁全系の長周期化が実現される。本研究では、この構造の基本的な地震時の振動特性を把握するため、小型模型を作製し、その振動実験を実施する。

なお、本来は、常時の荷重状態や、摩擦振子の水平移動に伴い桁を上方に押し上げる力が桁の安全性に及ぼ

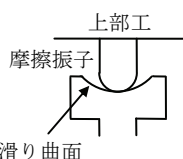
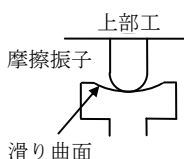
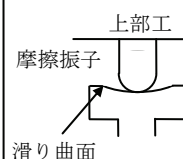
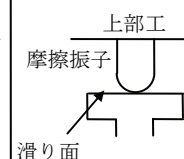
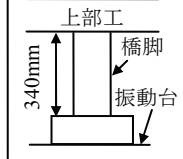
*1 早稲田大学 理工学部社会環境工学科教授 博士（工学）（正会員）

*2 東日本高速道路（株）関東支社さいたま工事事務所三郷工事区 修士（工学）

*3 国土交通省 港湾局計画課（正会員）

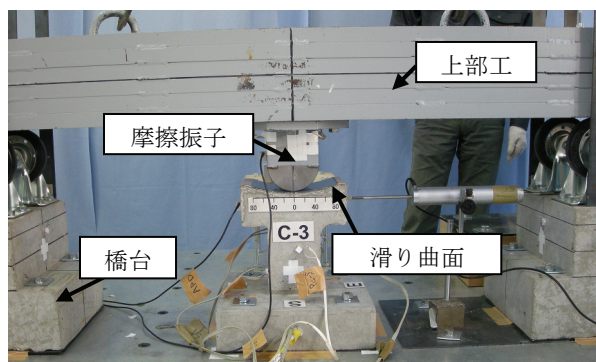
*4 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻

表一 供試体諸元一覧

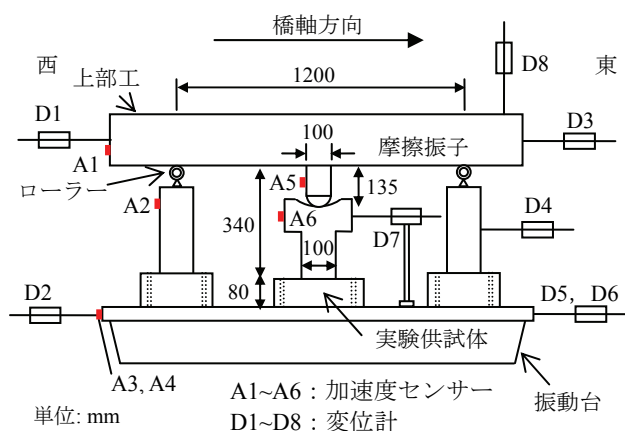
供試体名	C-1	C-2	C-3	F-1	PN
形状					
曲面半径	$R=80\text{mm}$	$R=130\text{mm}$	$R=260\text{mm}$	平面	滑り面なし
固有周期 T_s	0.57 秒	0.72 秒	1.02 秒	∞	0.08
固有周期 T_R	3.3 秒	4.1 秒	5.9 秒	∞	0.48

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



写真一 供試体設置状況 (供試体 C-3)



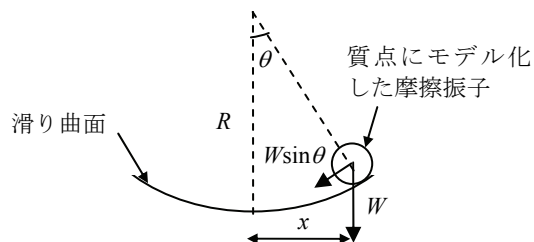
図一 供試体設置状況

す影響などを検討する必要がある。本研究では、これらは今後の課題とし、地震時の摩擦振子の挙動や上部工慣性力の大きさに焦点を当て議論を展開する。

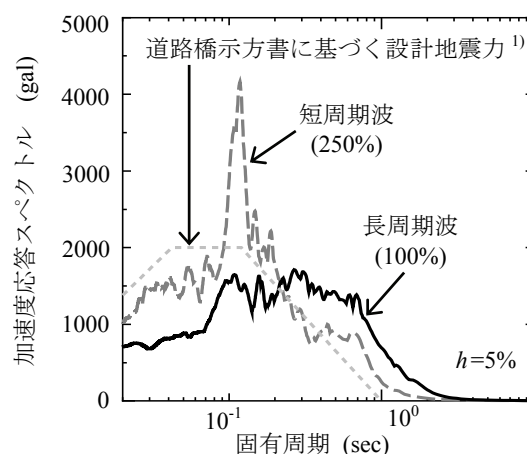
3. 実験概要

3.1 実験供試体

供試体諸元の一覧を表一に示す。また、供試体の設置状況の一例を写真一に、変位計や加速度センサーの配置状況を図一に示す。本実験では、参考文献 6) に示される実橋梁 (鋼鈑桁+RC 橋脚) と、振動台の寸法および加振能力から相似比 S を 33 に設定して模型を製作し



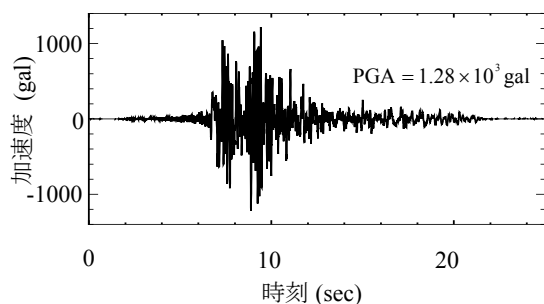
図一 摩擦振子型免震機構における質点の運動



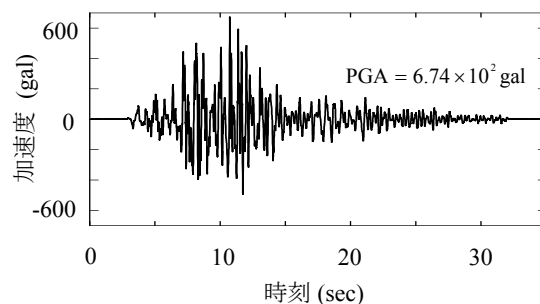
図一 加速度応答スペクトルの比較

た。相似則は、加速度の相似比を 1.0 とし、他の諸量を決定している。上部工重量は 4.84 kN であり、摩擦振子に作用する常時の軸力は約 0.25MPa である。本実験の第一の目的は、摩擦振子型免震機構を有する橋脚において、摩擦振子が想定した通りに滑ることを確認する点にあるため、摩擦振子の滑りを拘束しないように、両端の橋台上にはローラーを設置している。

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、鋼と鋼の組合わ



(a) 短周期地震動（振幅倍率 250%）



(b) 長周期地震動（振幅倍率 100%）

図－5 入力波形（加速度時刻歴）

せ、およびコンクリートと鋼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。

なお、この固有周期は、地震時に作用する水平力が大きくなり、摩擦振子と滑り曲面間に滑りが生じた後の状態から求められる値である。図－3 に示すように、摩擦振子を質点に置換すると、力の釣り合いから、滑り発生後の質点の固有周期は次式で求められる。

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K}} = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}} \quad (1)$$

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

ここに、 R ：曲面半径、 W ：上部工重量、 g ：重力加速度。

固有周期は、上部工重量によらず曲面半径 R によって一意に決定される。これは摩擦振子型免震機構の特徴の一つである。水平剛性 K は、曲面半径 R が大きいほど小さくなる。そのため、滑り曲面付橋脚の下端に作用する地震時慣性力の低減が期待できるが、逆に、摩擦振子と滑り曲面間の摩擦の状態によっては、地震後の残留変位が大きくなる可能性がある。

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限大となる。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%）。

表－2 実験条件の組合せ一覧

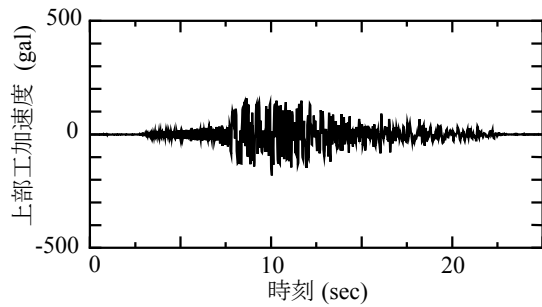
供試体	摩擦振子の材料	入力地震波
C-1 C-2 C-3 F-1	鋼 コンクリート	短周期波 50%, 75%, 100%, 150%, 200%, 250%
PN		長周期波 75%, 100%

摩擦振子型免震機構を用いれば、後述の実験結果に示されるように、滑り曲面付橋脚の鉄筋量は現行規準に従い設計される通常の RC 橋脚よりも相当に削減することが可能と思われる。橋脚の設計の合理化や、免震支承を用いないことによるコストダウンの程度は別途報告する。

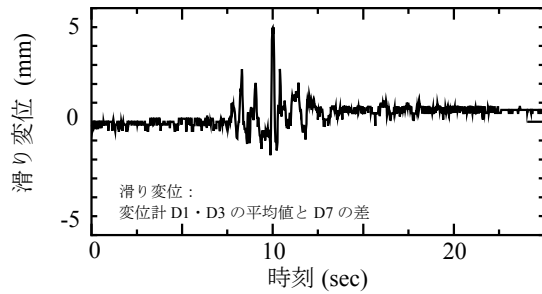
3.2 入力地震動

本実験では、2 種類の入力地震動を準備した。図－4 にその加速度応答スペクトルを示す。図中、短周期波は、2003 年十勝沖地震の際に幕別町本町で観測された地震波⁷⁾の加速度を 2.5 倍し、それを相似則に基づき修正したものである。前記したように、相似則に従い想定される実橋の固有周期は約 3～6 秒であるが、このような長周期構造に大きな応答をもたらす適当な観測波がなかったため、本研究では、模擬地震動を使用した。それが図－4 に示す長周期波である。道路橋示方書が規定するレベル 2 地震動タイプ II（I 種地盤）（相似則を考慮し修正）の加速度応答スペクトルとの比較から明らかなように、長周期波は、相当に長周期構造物に大きな応答をもたらすものである。本研究の目的が、摩擦振子型免震機構を有する橋脚の地震時挙動の確認にあることから、このような模擬波を用いた振動実験も実施する。短周期波と長周期波の加速度時刻歴を図－5 に示す。

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。ただし、使用した振動台の制約から、例えば、入力の設定上は同じ短周期波 100%でも、振動台の加速度センサーから得られる加速度時刻歴の絶対値は、加振毎に異なっていた。

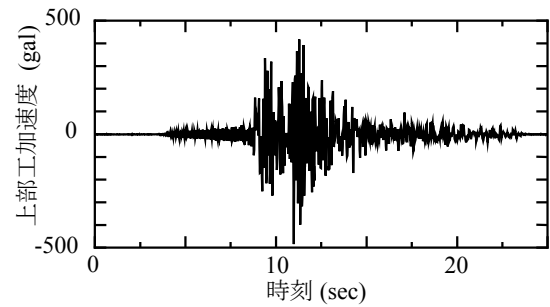


(a) 上部工加速度

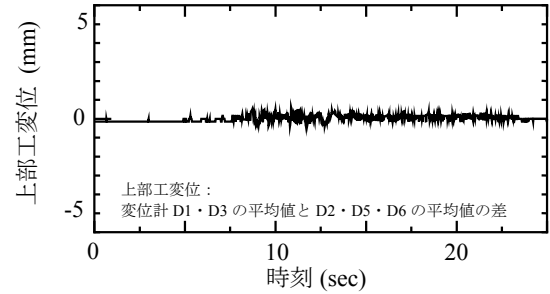


(b) 滑り変位

図-6 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-7 PN 供試体時刻歴応答 (短周期波 100%)

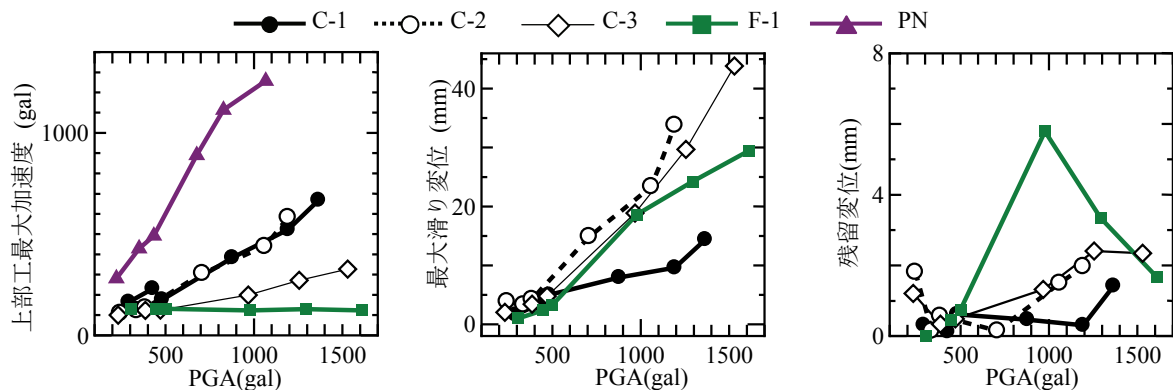


図-8 各供試体の応答値の比較 (地震波: 短周期波, 摩擦振子: 鋼製)

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-6 および図-7 に示す。なお、本研究で行った全ての振動実験において、上部工と摩擦振子に貼付した 2 つの加速度センサー (図-2 の A1 と A5) は、ほぼ同じ値を示しており、摩擦振子はロッキングなどすることなく、上部工と一体となり滑り曲面上を滑ることが確認されている。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-6 に示されるように残留変位はそれほど大きくならない。

図-8 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。前記したように、同じ短周期波 100%を与えても、振動台で計測される PGA の値は供試体毎に異なるが、その波形から作成される加速度応答スペクトルは、縦軸が PGA の違いで大小するのみで、その形状は図-4 とほぼ同形である。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

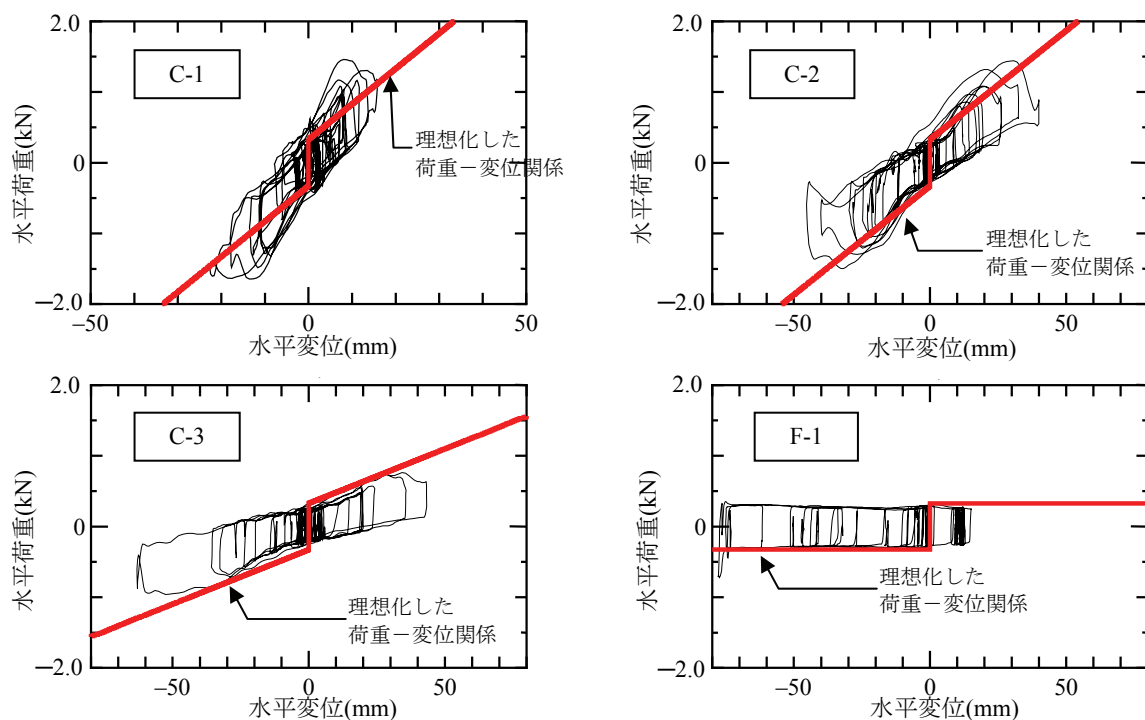


図-9 各供試体の水平荷重-水平変位関係（長周期波 100%）

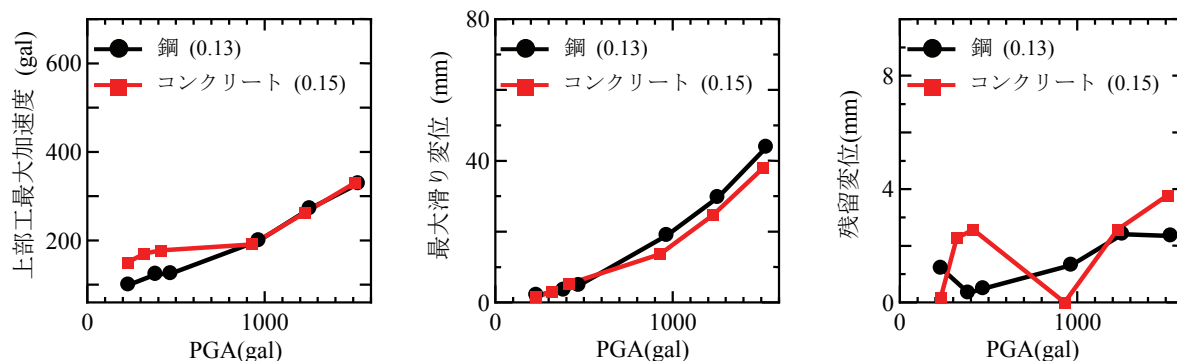


図-10 摩擦振子の材料の違いの比較（短周期波，供試体 C-3）

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良い。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-9 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。図中、式(2)に示す水平剛性 K と、摩擦係数 μ 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。過去、滑り支承の研究では、摩擦係数の速度依存性が議論されているが^{8), 9)}、ここでは、簡単のため、速度によらず一定の摩擦係数を仮定した。なお、摩擦係数は、後述するように、摩擦振子と滑り曲面の接触面積に依存している。つまり、本構造では、摩擦係数が供試体寸法に依存する可能性があるた

め、今後、これに対する検討が別途必要である。

図-9 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、図-3 に示すように、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。ただし、滑り曲面の半径が小さい C-1 では、実験値とバイリニア曲線の差が大きい。これは、図-3 に示すモデルでは、摩擦振子の最下端で摩擦振子と滑り曲面が接触すると仮定しているが、滑り曲面の半径が小さくなると、実際には、摩擦振子の最下端ではない位置で摩擦振子と滑り曲面が接触する。接触位置の仮定が実際とモデルで異なるため、この誤差を生んでいると思われる。

図-10 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くなっている。摩擦振子と滑り曲面は「面」ではなく「線」に近い状態で接触しているため、摩擦係数の材料による差が小さくなったと思われる。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。残留変位は、前記したように、入力が非常に小さくなった後の自由振動への移行の過程でその大きさが決定されるが、コンクリート製の摩擦振子を用いた場合には、さらに、加振毎のバラツキが大きくなっている。これは、コンクリート表面の微妙な凹凸の違いが残留変位の大きさに影響を与えたと思われる。表面の微妙な凹凸の状態は加振毎に異なるため、これが残留変位の大きさにバラツキをもたらすと推察された。

5. まとめ

本研究により得られた結論は、以下の通りである。

- (1) 摩擦振子型免震機構を有する RC 橋脚を開発した。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。本構造は、免震支承などの特別な装置を付加することなく、地震時慣性力の低減を可能にし、曲面の存在により地震後の残留変位も大き

くならない点が特徴であり、地震に対する橋梁構造の安全性の向上に寄与することが期待される。

- (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を確認した。これらは相互にトレードオフの関係となっており、最適な曲面形状を決定するためには、今後、動的解析等による詳細な検証が必要である。

なお、本研究では、本構造の常時の荷重状態に対する有用性や、摩擦振子が水平挙動するのに伴い発生する、桁を上方に押し上げる力が桁の安全性に及ぼす影響、さらには桁に大きな水平変位が発生したときの桁衝突の可能性、などは検討できていない。これらは、今後の課題である。

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，2002.
- 2) 鯉淵崇任，斉藤賢二，栗田哲，千葉大輔：地震応答記録に基づいた球面滑り支承の低速時の復元力特性，日本建築学会東北支部研究報告集，Vol. 68, pp. 105-108, 2005.6
- 3) 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, May 2003
- 4) 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, Aug. 2005
- 5) Tsopelas, P., Constantinou, M. C., Kim, Y. S. and Okamoto, S. : Experimental study of FPS system in bridge seismic isolation, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.25, pp.65-78, Dec. 1996
- 6) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997.
- 7) 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/index.html](http://www.jma.go.jp/jma/index.html) (Accessed May 2010).
- 8) 伊津野和行，袴田文雄，中村一平：機能分離型支承装置の動特性と設計手法に関する研究，土木学会論文集，No.654/I-52, pp.233-244, 2000.7
- 9) 金治英貞，鈴木直人，家村浩和，高橋良和，美濃智広，高田佳彦：低摩擦型すべり支承の面圧・速度依存性検証と床組免震構造の設計モデル構築，土木学会論文集 A Vol.62 No.4, pp.758-771, 2006.