

摩擦振子型免震機構を有する橋脚の震動台実験 と残留変位の評価

金井 晴弘¹・榎本 佑矢²・阿部 遼太³・秋山 充良⁴・小野 潔⁵

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早稲田大学大学院 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）

³正会員 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）

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）

⁵正会員 博（工） 大阪大学准教授 大学院工学研究科地球総合工学専攻（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1）

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、部材靱性率を大きくするために、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柱が開発されている^{例えは1)}。しかし、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は、基本的に地震後にある程度の修復作業を必要とする。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、地震中の安全性と地震後の供用性をともに確保できる技術開発が必要である。

この背景のもと、著者らは、摩擦振子型免震機構を有するコンクリート橋脚を提案し、震動台実験により、基本的な地震時の応答特性を確認した^{2),3)}。図-1に摩擦振子型免震機構を有するコンクリート橋脚の模式図を示す。図-1にある摩擦振子が滑り曲面上を運動することで、上部工に作用する慣性力の下部構造への伝達が遮断され橋脚基部に作用する断面力を大幅に低減することが可能である。さらに、本機構は構造形態の工夫のみにより長周期構造を実現するため、免震化によるコストの増加を抑えることができる。参考文献^{2),3)}で実施した震動台実験により、地震中の橋梁の安全性を確保する上で、摩擦振子型免震機構を有するコンクリート橋脚の有用性を確認した。ただし、地震後の供用性を本構造が確保できていることを示すには、摩擦振子と滑り曲面間で生じる地震後の相対変位（残留変位）について

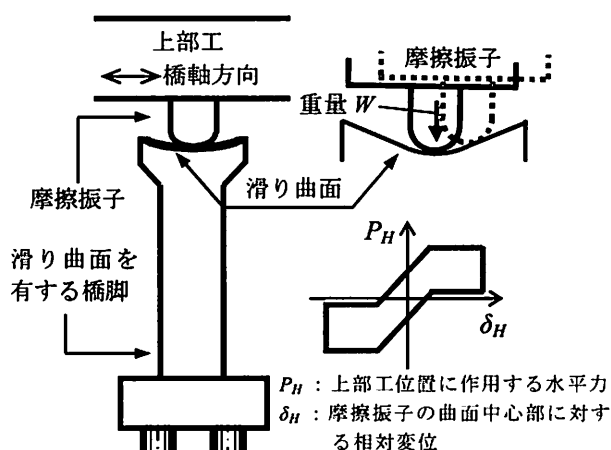


図-1 摩擦振子型免震機構を有する橋脚の模式図

の検証が必要である。そこで、本研究では、摩擦振子型免震機構を有するコンクリート橋脚の震動台実験を実施し、滑り曲面の形状、あるいは地震動特性などが残留変位やそのバラツキの大きさに与える影響を確認する。

2. 実験概要

(1) 実験供試体

実験に使用した供試体の設置状況を写真-1に示す。橋脚高さ10mの橋梁を相似比33として作成した模型橋梁である。加速度の相似比を1.0として、他の諸元を決定している。上部工重量は494kgfであり、摩擦振子に常時作用する軸力は0.25MPaである。本実験で使用した供試体は、参考文献³⁾で使用した供試体と同じである。使用した供試体の一覧を表-1に示す。供試体C-1～C-2は滑り曲面が一定の定曲面であり、摩擦振子を質点に置換した後の力の釣り合いにより、滑り発生後の摩擦振子の復元力および固有周期は次式で求められる。

表-1 供試体諸元の一覧

供試体名	C-1	C-2	F-1	PF-1	PF-2	PE-1
滑り曲面の形状	円弧 1	円弧	平面	円弧 1 直線 直線	円弧 1 直線 直線	円弧 1 円弧 2 円弧 2
荷重-変位関係						
円弧 1 の半径	$R_1 = 80\text{mm}$	$R_1 = 130\text{mm}$	平面	$R_1 = 80\text{mm}$	$R_1 = 80\text{mm}$	$R_1 = 80\text{mm}$
円弧 2 の半径	—	—	—	$R_2 = \infty$	$R_2 = \infty$	$R_2 = 130\text{mm}$
$D_v^{\text{a)}$	—	—	—	23.0mm	15.3mm	23.0mm
固有周期(供)	2.0s	0.53s	∞	0.35s	2.0s	2.0s
固有周期(実)	0.35s	3.3s	∞	2.0s	0.35s	0.35s

a) 円弧 1 の中心位置から円弧 1 と直線の境界、あるいは円弧 1 と円弧 2 の境界までの水平距離

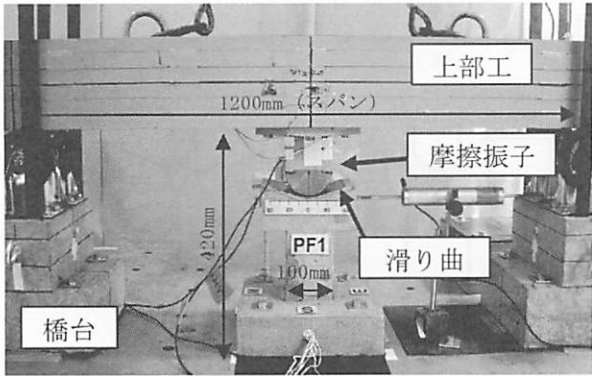


写真-1 供試体設置状況 (供試体 PF-1)

$$Q = \mu W \tag{1}$$

$$K = W / R \tag{2}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \tag{3}$$

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。

供試体PF-1とPF-2は、曲面中心部が円弧であり、中心部から設定する曲面の変化点以降では直線となる変動曲面を有する供試体である。摩擦振子が大きく変位して直線部に入ると、摩擦振子の水平移動に対する剛性はゼロとなり、その水平荷重 P_H —水平変位 δ_H 関係の骨格曲線は、表-1に示すようなトリニア型となり、橋脚基部へ作用する慣性力を一定値以下に抑え、水平移動に伴うアップリフトの抑制が期待できる。一方で、定曲面の場合に比べ大きな応答変位が生じ、残留変位が大きくなる可能性がある。

摩擦振子部材は鋼製であり、コンクリートで作製した滑り曲面の表面には鋼板が貼付しているため、

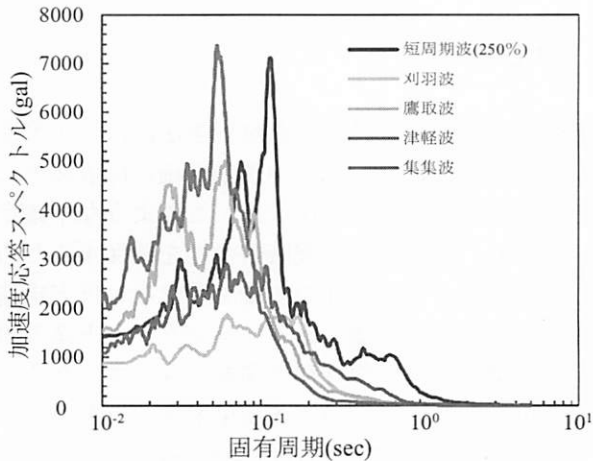


図-2 加速度応答スペクトル

摩擦振子と滑り曲面は鋼と鋼で接触している。骨格曲線に使用する摩擦係数は、参考文献³⁾によりF-1供試体の実験結果から同定した0.262とする。摩擦係数の速度依存性を指摘する研究⁴⁾も報告されているが、以降の検討では、摩擦振子の速度によらずにこの摩擦係数を用いている。

(2) 震動台実験に使用する地震動

参考文献^{2), 3)}では、2003年十勝沖地震の幕別町で観測された地震波（以下、短周期波⁵⁾の振幅の大きさを50%～250%の範囲で大小させて震動台実験に使用した。本研究では、短周期波250%を入力したときに摩擦振子に生じる最大滑り変位に近い応答を与える4つの地震波を用意した。具体的には、2007年中越沖地震の際に刈羽村役場で観測されたNS成分（刈羽波）、1995年兵庫県南部地震の際にJR鷹取駅構内で観測されたNS成分（鷹取波）、1983年日本海中部地震の際に津軽大橋周辺で観測されたEW成分（津軽波）、および1999年台湾で発生した集集地震で観測された地震波（集集波）である。これら

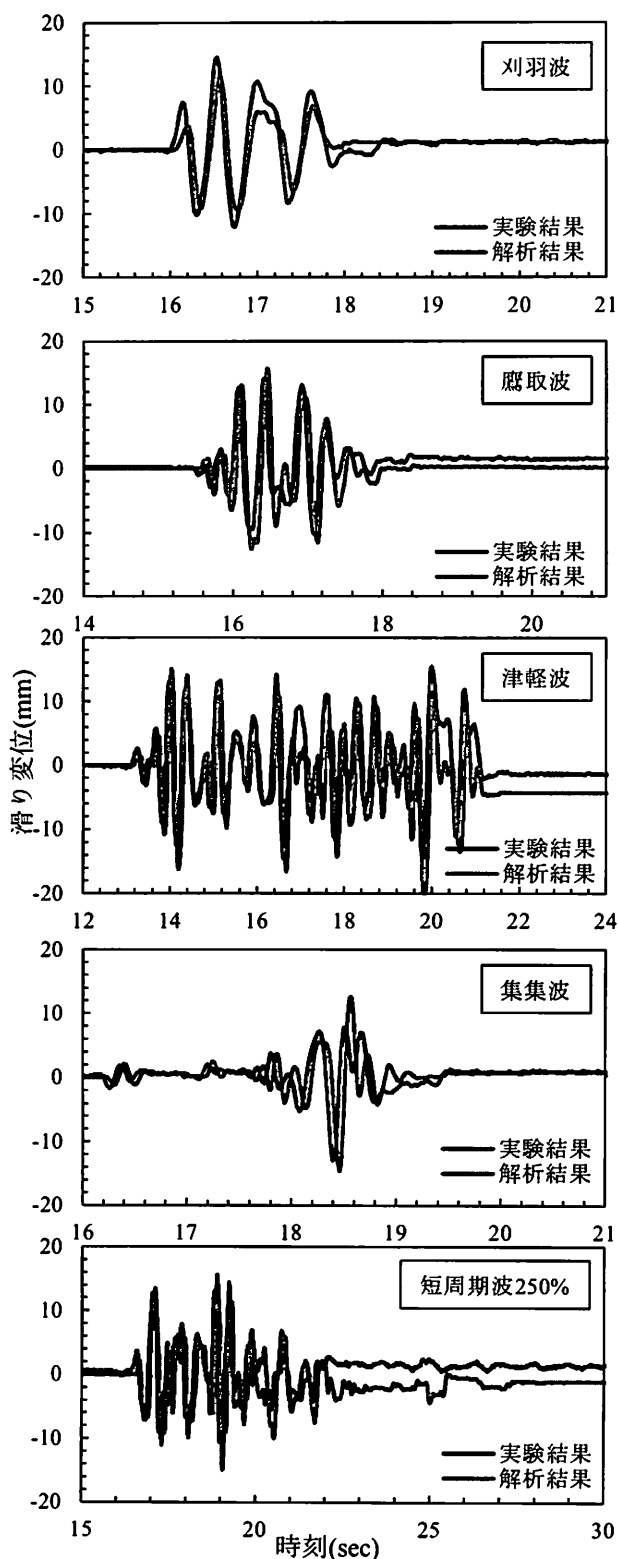


図-3 摩擦振子の滑り変位の時刻歴波形
(C-1 供試体)

3. 摩擦振子免震機構を有するコンクリート橋脚に生じる地震後の残留変位

(1) 概説

摩擦振子型免震機構を有するコンクリート橋脚の震動台実験により、摩擦振子と滑り曲面間に生じる残留変位の大きさを実験的に検討する。また、摩擦振子を1質点に置換し、表-1に示す骨格曲線を与えることで摩擦振子の滑り曲面上の運動を表現した。そして、この1質点系の運動方程式を解くことで、残留変位の大きさを解析的に算定する。なお、除荷・(再)载荷の剛性は摩擦振子が摩擦によって静止していることを表現するために十分に剛な値を与えている。数値積分法はNewmarkの β 法である。解析モデルの詳細は参考文献³⁾に示されている。

(2) 残留変位と地震動特性

供試体C-1について、各入力地震波に対して最大の滑り変位が発生する時刻を含む範囲で作成した摩擦振子の滑り変位の時刻歴波形を図-3に示す。供試体C-1で生じた最大の滑り変位は10～15mm程度である。解析的に得られる滑り変位の時刻歴波形は、刈羽波や集集波では比較的良好な精度で実験結果を再現できているが、津軽波や短周期波250%の地震波では、時刻が進むにつれ実験結果と解析結果で残留変位に大きな差異が生じている。実験において、滑りが収束し、摩擦振子が原点回帰する際の動きは滑らかなものではなく、その過程で停止と滑りを繰り返しながら収束し、残留変位が生じている。この動きを再現するためには、さらなる解析モデルの改善が必要であり、今後の課題である。

(3) 地震後の供用性と可能最大残留変位

図-4に残留変位の実験値を示す。短周期波に関しては、振幅の大きさを50%～250%まで大小させたときの結果を示している。図中、最も大きな最大滑り変位を与えているのが振幅250%のときの結果である。滑り曲面が変動曲面となるPF-1、PF-2、あるいはPE-1では、残留変位は何れも2.5mm以下である。

前節で示したように、この残留変位を時刻歴応答解析により定量的に評価することは現状では困難であったため、本節では、各供試体の荷重-変位関係の骨格曲線から求められる可能最大残留変位を求め、それと実験結果との比較を行う。可能最大残留変位 $\delta_{R,max}$ は、摩擦力と復元力の釣り合いより求めた、式(4)を満たす点である。

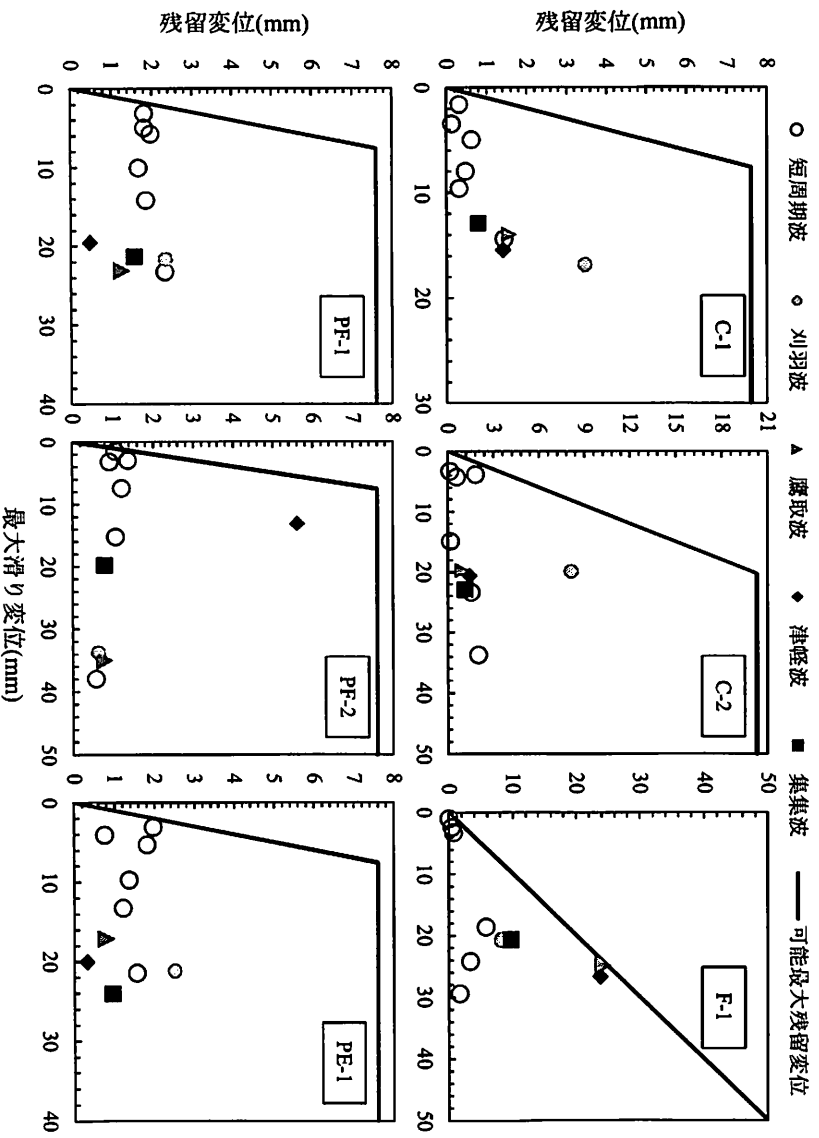


図-4 最大滑り変位-残留変位関係

$$\delta_{R, \max} = \frac{\mu R}{\sqrt{1 + \mu^2}} \quad (4)$$

この可能最大残留変位と実験結果の比較を図-4に示す。最大滑り変位が可能最大残留変位より小さい場合、発生しうる最大の残留変位は最大滑り変位と等しくなるため、可能最大残留変位は2直線で表現される。なお、平らな滑り曲面を持つF-1供試体では、発生し得る最大の残留変位は常に最大変位と等しい。図-4に示すように、可能最大残留変位は実験値と比べ課題になるため、算定式から求められる値をそのまま設計値とすることは不合理な設計結果をもたらすことになる。今後、モデルの高精度化、あるいは多くの地震動を用いた実験結果により残留変位を低減する係数などを見出す必要がある。

4. まとめ

本稿では、摩擦振子型免震機構を有するコンクリート柱に生じる残留変位について検討した。実験的に得られる残留変位は、地震動毎のバランスキが非常に大きいことを確認した。しかし、今回の検討に用いた短周期波250%は、現行の耐震設計で規定されるレベル2地震動よりも大きく、それによる最大滑り変位が生じた後にも、本構造に生じる残留変位は

小さい値に抑えられることを確認できた。今後の継続した実験的検討が必要なもの、本構造は、地震中の安全性と地震後の供用性を兼ね備えたダメージフリー橋梁の一つになり得るものである。

参考文献

- 1) 石橋忠良, 小原和宏, 菅野貴浩, 小林薫, 木野淳一: 矩形帯鉄筋を軸方向鉄筋の内側に配置した鉄筋コンクリート柱の正負水平交番載荷実験, 土木学会論文集, 732/N-59, pp.27-38, 2003.5
- 2) 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
- 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, 2012.7
- 4) 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, 2006.10
- 5) 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/>