

摩擦振子型免震機構を有する橋脚の 地震応答特性に関する実験的研究

金井 晴弘¹・阿部 遼太²・秋山 充良³

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）

³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）

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。これまでのコンクリート系の橋梁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。例えば、インターロッキング式帯鉄筋を有する鉄筋コンクリート（RC）橋脚¹⁾、コアコンクリート内にスパイラル鉄筋を配筋するなどの工夫をしたRC橋脚²⁾、そして、鉄骨鉄筋コンクリート橋脚³⁾などの研究がある。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、地震後に相当の残留変位が生じる可能性がある。例えば、橋梁は、地震後の救助・救急活動や、都市の復興に非常に重要な役割を果たすことを考えると、単に橋梁の地震中の安全性を確保するだけではなく、地震後の供用性までを考慮した部材開発が求められる。

この背景のもと、著者らは、参考文献⁴⁾において、摩擦振子型免震機構を有するコンクリート柱を提案し、その振動台実験により、基本的な性能を確認した。考案した橋脚の模式図を図-1に示す。橋脚を2つの部位に分割し、分割した位置に滑り曲面を設けている。上側にある部位（摩擦振子）が滑り曲面上を滑り、下側にある部位（滑り曲面を有する橋脚や基礎など）に作用する地震時慣性力を低減する。従来の曲げ破壊型のRC橋脚は、橋脚天端部に水平力が作用するとその下端部に大きな曲げが作用するのに対して、本構造は、滑りにより力の伝達を遮断し、

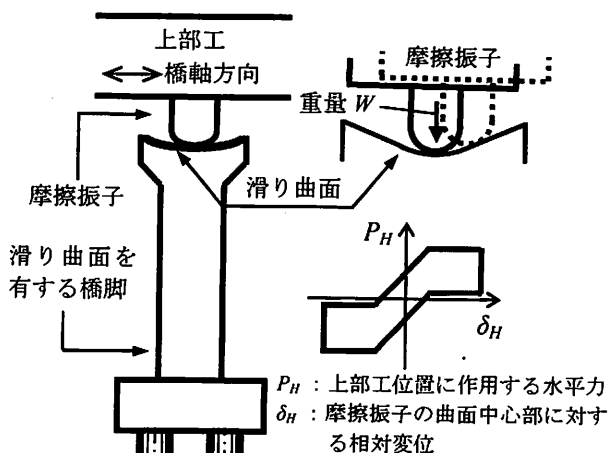


図-1 摩擦振子型免震機構を有する橋脚の模式図

さらに曲面の存在により地震後の残留変位を抑えることを期待している。

本研究では、参考文献⁴⁾で提案した摩擦振子が半径一定の曲面（定曲面）上を滑る場合に加え、水平変位が小さいときには、下に凸の小さな半径の曲面上を摩擦振子は滑り、さらに大きな地震力の作用を受けて水平変位が大きくなったときには上に凸の曲面、あるいは直線上を滑るように曲面形状を変更した場合の検討を行う。このような工夫をしたコンクリート柱を持つ橋梁模型を作製し、その振動台実験により地震応答特性を確認する。

2. 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、変位計や加速度センサーの配置状況を図-2に示す。本実験では、橋脚高さ10mの実橋梁（鋼鈑桁+RC橋脚）を、振動台の寸法および加振能力から相似比を33に

表-1 供試体諸元の一覧

供試体名	C-1	C-2	C-3	F-1	PN
滑り曲面の形状	円弧 1 	円弧 1 	円弧 1 	平面 	上部工 橋脚 振動台
荷重-変位関係					
円弧 1 の半径	$R_1 = 80\text{mm}$	$R_1 = 130\text{mm}$	$R_1 = 260\text{mm}$	平面	滑り面なし
固有周期(供)	0.35s	0.53s	0.92s	∞	0.08
固有周期(実)	2.0s	3.3s	5.3s	∞	0.48

供試体名	PF-1	PF-2	PE-1	PE-2
滑り曲面の形状	円弧 1 直線 直線 	円弧 1 直線 直線 	円弧 1 円弧 2 円弧 2 	円弧 1 円弧 2 円弧 2
荷重-変位関係				
円弧 1 の半径	$R_1 = 80\text{mm}$	$R_1 = 80\text{mm}$	$R_1 = 80\text{mm}$	$R_1 = 80\text{mm}$
円弧 2 の半径	$R_2 = \infty$	$R_2 = \infty$	$R_2 = 130\text{mm}$	$R_2 = 200\text{mm}$
$D_v^a)$	23.0mm	15.3mm	23.0mm	23.0mm

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

設定した。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500kgfであり、摩擦振子に作用する常時の軸力は約0.25MPaである。両端の橋台上にはローラーを設置している。

摩擦振子は鋼であり、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。滑り曲面を有する橋脚は鉄筋コンクリートである。滑り曲面には、厚さ約3mmの鋼板を貼付しているため、摩擦振子と滑り曲面は、鋼と鋼で接触している。

供試体C-1～3、そして供試体F-1については、その振動台実験の結果の一部を参考文献⁴⁾で報告している。表-1に示すように、供試体C-1～3の滑り曲面（円弧1）の半径 R_1 は、相似則から想定される実橋での滑り発生後の固有周期が約3秒～6秒となるように定めた。摩擦振子を質点に置換すると、力の釣合いより、滑り発生荷重、滑り発生後の復元力および滑り発生後の固有周期は次式で求められる。

$$Q = \mu W \quad (1)$$

$$K = W / R \quad (2)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (3)$$

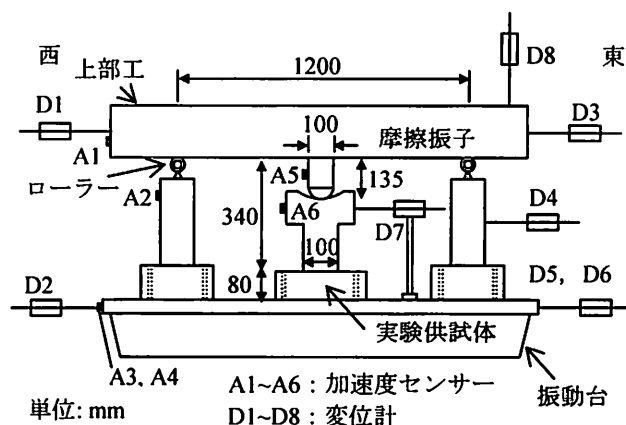


図-2 供試体設置状況

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F-1は、摩擦振子が平坦な鋼板上（ $R=\infty$ ）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に作用する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ず、大きな残留変位が発生する可能性がある。

供試体PF-1とPF-2、および供試体PE-1とPE-2が本

研究で提案する滑り曲面を有する供試体である。滑り曲面の形状をコンクリートで製作可能な範囲で加工し、供試体C-1～3からの耐震性能の向上を図ったものである。表-1に示されるように、中心にある円弧の半径は、供試体C-1と同じであり、摩擦振子の水平変位が D_v より小さいと、その地震応答は供試体C-1と同じになる。供試体PF-1とPF-2は、中心にある円弧から水平変位 D_v だけ離れた箇所で、その接線方向に直線とした変動曲面を滑り曲面として与えている。そのため、摩擦振子の水平変位が D_v 以上になり、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、摩擦振子を質点に置換したモデルでは、その水平荷重 P_H - 水平変位 δ_H 関係の骨格曲線はトリリニア型となる（表-1）。供試体PE-1とPE-2は、中心にある円弧（下に凸）から水平変位 D_v だけ離れた箇所で、上に凸の円弧に変化する変動曲面を滑り曲面として与えている。上に凸の円弧上にある質点の水平方向剛性 K_2 は、 $K_2 = -1.0 K$ である。そのため、その $P_H - \delta_H$ 関係の骨格曲線は、水平変位が D_v 以上になると負勾配を持つ（表-1）。上に凸の円弧の半径が小さいPE-1で、大きな負勾配となる。

(2) 実験に用いた地震波

本実験には、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、入力地震波）⁵⁾を使用し、この時間軸を相似則に基づき修正した。加振は、橋軸方向への1方向入力である。水平2方向力を同時に受ける場合、さらには、上下動が作用する場合は、今後の課題である。

加振順序は、入力波の加速度値を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を入力した。なお、振幅を250%に拡大したときの加速度応答スペクトルを図-3に示す。道路橋示方書⁶⁾が規定するレベル2地震動タイプII（I種地盤）（固有周期の値は相似則を考慮して修正）の加速度応答スペクトルも比較のために示している。

3. 振動台実験の結果と解析的検討

図-4に、各供試体の水平荷重-滑り変位関係をそれぞれ示した。入力地震波の振幅は250%に拡大したときのものである。水平荷重は、上部工加速度に摩擦振子に作用する軸力（500kgf）を掛けて算定している。

図中にある「解析結果」は、摩擦振子を質点に置

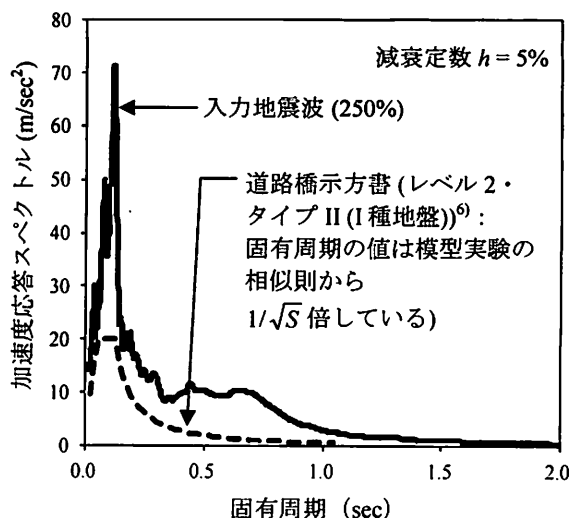


図-3 入力地震波の加速度応答スペクトル

換し、滑り曲面上を運動する質点の力の釣り合いから求められる水平荷重-滑り変位関係を骨格曲線として用いた動的解析結果である。骨格曲線の設定の際に必要な摩擦係数は、摩擦振子が平坦な鋼板上を滑る供試体F-1から同定した値の中の最大値(0.26)を用いている。

動的解析結果と実験結果の比較の前に、摩擦振子を質点に置換して得られる骨格曲線と振動台実験から求められた水平荷重-滑り変位関係の包絡線を比較する。図-4に示されるように、計算で得られる赤の骨格曲線と振動台実験で得られる水平荷重-滑り変位関係の包絡線は概ね一致している。摩擦振子の水平変位が D_v より大きくなったときに滑り曲面の形状を直線としたPF-1やPF-2、あるいは上に凸としたPE-1やPE-2の供試体は、滑り曲面を半径一定の円弧としたC-1供試体に比べ、水平荷重の増加を抑えることができており、想定した水平荷重-滑り変位関係が概ね得られている。例えば、PF-1とPF-2の比較に示されるように、 D_v が小さく、早めに定曲面から直線に移行するPF-2供試体の方が水平荷重の最大値は小さい半面、大きな水平変位が発生することになる。大きな水平変位が発生する場合には、桁間衝突⁷⁾なども懸念され、地震時に許容する最大応答変位についての別途の検討が今後必要である。

図-4に示されるように、コンクリート柱の中間部に滑り曲面を設け、その位置より上にある部位を振子として振動させることで、コンクリート構造物の耐震安全性を大きく向上できる可能性がある。曲げ破壊型のRC橋脚では、レベル2地震動作用時には塑性ヒンジに意図的に損傷を誘導し、そこで地震エネルギーの吸収を図るのに対して、本構造は、摩擦振子が滑り曲面上を運動するのみであるから、特に、地震後に損傷が生じるわけではない。図-3に示さ

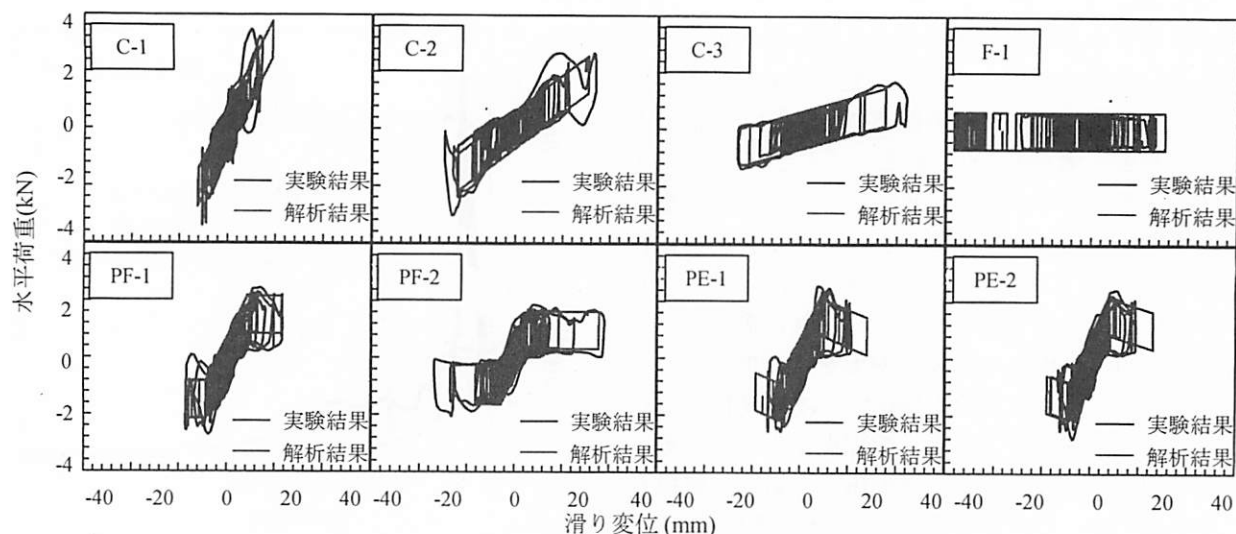


図-4 水平荷重-滑り変位関係(入力地震波の振幅:250%, 摩擦振子:鋼, 滑り曲面:鋼)

れるように、現行の耐震設計規準においてレベル2地震動として用いられる地震波の加速度応答スペクトルを上回る作用を与えても、滑り曲面を有する橋脚に損傷は観察されなかった。

次に、動的解析と振動台実験の結果を比較する。摩擦振子の水平荷重-滑り変位関係の包絡線は質点に置換した後の力の釣り合いから求められる骨格曲線と概ね一致したことから、摩擦振子を1質点の運動と見なして解析した。質点の重量は、摩擦振子に作用する軸力から求める。骨格曲線は、表-1に示されるものであり、除荷・(再)載荷の剛性は質点が摩擦によって静止しているのを表現するために十分に剛な値を与えた。減衰は特に考慮せず、数値積分にはNewmarkの β 法を用いた。動的解析結果は前記の図-4に示している。滑り曲面が平坦で、摩擦の状態のみで摩擦振子の運動が決定されるF-1供試体で滑り変位を過大評価しているが、それ以外の供試体は単純化した1質点系の運動方程式を解くことで概ね実験結果を再現できることが示された。

4. まとめ

鉄筋コンクリート橋脚の耐震設計では、レベル2地震動の作用時に、橋脚下端部に塑性ヒンジを誘導し、そこで地震エネルギーの吸収を図ることで橋梁全体系の安全性を確保している。これに対して、本研究では、構造形態を工夫することで、既存構造に比べて耐震安全性を大きく高め、さらに地震後の即時の供用を可能にする橋梁の基本的な考え方を示した。具体的には、コンクリート橋脚の中間部に滑り曲面を設け、その位置よりも上にある部位を摩擦振子として滑らせることで、滑り曲面位置よりも下部に伝達される上部工からの地震時慣性力や上部工の

アップリフトを抑制している。滑り曲面の形状は、半径一定の定曲面よりも変動曲面とする方が上部工からの地震時慣性力の低減に有効であり、一方で、地震後の残留変位は、定曲面とした場合と大差ないことを振動台実験により確認した。

なお、本構造の実現には、幾つかの課題が残されている。特に、2方向入力や鉛直動を入力した場合の地震応答特性を検証する必要がある。今後も継続的に振動台実験による検討を重ねたい。

参考文献

- 1) 柳下文夫, 田中仁史, R. Park: インターロッキングスパイラル鉄筋を有する鉄筋コンクリート橋脚の耐震性能, 土木学会論文集, 662/V-49, pp.91-103, 2000.11
- 2) 石橋忠良, 小原和宏, 菅野貴浩, 小林薫, 木野淳一: 矩形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/V-59, pp.27-38, 2003.5
- 3) 村田清満, 池田学, 川井治, 瀧口将志, 渡邊忠朋, 木下雅敏: 鉄骨鉄筋コンクリート柱の変形性能の定量評価に関する研究, 土木学会論文集, 619/I-47, pp.235-251, 1999.4
- 4) 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, Vol. 33, No.2, pp. 877-882, 2011.7
- 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/>
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V・耐震設計編, 2002.
- 7) 玉井宏樹, 園田佳巨, 後藤恵一, 梶田幸秀, 濱本朋久: 桁端衝突による橋台の損傷度評価および衝突ばね特性に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.3A, pp.1219-1226, 2007.3