摩擦振子型免震機構を有する RC 橋脚の 地震時挙動に及ぼす寸法効果に関する実験的研究

樫山 大樹¹・山口 大貴¹・Miguel B. Brito² 石垣 直光³・高橋 宏和³・秋山 充良⁴・本田 利器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非会員 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) ³日本工営(株) コンサルティング事業統括本部交通運輸事業本部(〒102-8539 東京都千代田区麹町 5-4) 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)東京大学大学院教授 新領域創成科学研究科(〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

1. はじめに

コンクリート系構造物の耐震設計では、地震後の 補修・補強が容易な位置に最弱部を誘導するように 部材間の耐力を階層化し,その位置で確実に地震エ ネルギーの吸収を図るキャパシティデザインの考え が導入されている.橋梁では、一般に、犠牲部材と して鉄筋コンクリート (RC) 橋脚が選択され、そ の基部に塑性ヒンジを設ける.この考えのもと、兵 庫県南部地震以降, 高靭性 RC 柱部材の開発が進め られてきた. しかしながら, RC 柱の変形能に期待 した耐震設計の場合、レベル2地震動クラスの強震 動を受けると,橋脚には大きな残留変位が発生し, 地震後,相当の修復作業が必要となる懸念がある¹⁾. 橋梁は、地震後の被災地の復興、あるいは緊急支援 物資の搬送などに必要不可欠であり、地震後の即時 の供用が求められることを考えると、もう一段の耐 震性能の向上が必要であり、これが著者らのダメー ジフリー構造の開発の動機づけとなっている.

二段階設計法の最大の利点は、レベル2地震動に 対して、一部の部材の塑性化を許容することで、経 済的(ローコスト)な設計解を得ることができる点 にある.したがって、ダメージフリー構造の開発に あたっては、即時供用を可能にする構造を従来と同 程度のコストにて実現することが望ましい.この背 景のもと、著者らは、図-1に示す摩擦振子型免震 機構を有する RC 橋脚を提案している²⁾.提案構造 は、コンクリート、および鋼部材のみで摩擦振子型



写真-1 大型橋梁模型の設置状況(左右方向:橋軸)

免震機構を実現している点に特徴がある.既往研究 では,提案構造に最適な臼型の滑り面形状を実験的 に同定している³⁾.静止状態では,摩擦振子は底面 に位置し,強震動を受ける場合に,底面から斜面に 移動することで摩擦振子は抵抗を受け,地震後には 斜面の存在により底面に戻ることができる.

一方, RC 構造物の耐震実験では, 寸法効果の影響を考慮する必要性が指摘されている⁴⁾. そこで本稿では, 著者らの既往研究に対して, 寸法を大きくした模型を用いた震動実験を実施し, 参考文献 3)で確認された応答加速度の低減効果や残留変位の大きさなどが, 同じ滑り面形状にて実現されるのかなど, 寸法効果に着目した検討の結果を報告する.



2. 実験概要

本実験では、実橋梁(鋼鈑桁+RC橋脚)を想定 し、震動台の寸法、および加震能力から相似比を 23.3、および16.5とした2種類の供試体を設計した (以降、中型橋梁模型,大型橋梁模型と称す).橋 梁模型は、写真-1に示されるように、鋼製上部工, 鉄板、4つの鋼製摩擦振子、および4基の滑り面を 有するRC橋脚で構成される.上部工に載せる鉄板 の量の増減と摩擦振子の着脱が可能な形式となって おり、供試体毎に所定の鉄板量と摩擦振子を取り付 け、ボルトを用いて上部工・鉄板・摩擦振子をつ体 化している.図-2に滑り面の諸元、写真-2に製作 した滑り面付きRC橋脚を示す.

滑り面は,既往研究³において同定された最適な 臼型形状を異なる相似比で再現したものである.滑 り面の型枠には 3D プリンターで造形したアクリル 板を利用することで,複雑な滑り面形状を安価に, かつ高い精度で実現した.本研究では,摩擦振子と コンクリート滑り面間の挙動に着目することにし, RC 橋脚の断面積は,震動台テーブルに固定する関 係で,想定したモデル橋梁よりも大きくなっており, また,橋脚高は小さくなっている(中型橋梁模型: 高さ 170 mm,断面 202 mm×300 mm,大型橋梁模 型:高さ 180 mm,断面 338 mm×440 mm).加震前 に各摩擦振子の軸ひずみを計測し,上部工重量が均 等に作用していることを確認した.なお,加震中に 摩擦振子がコンクリート滑り面を削り出し,摩擦係 数が変動する影響を小さくするため,滑り面にはエ ポキシ樹脂製コンクリート補修材を塗布している.

震動実験には、日本大学大型構造物試験センター 所有の多入力振動試験装置を利用した.入力波は試 験装置の制約から正弦波としており、加速度振幅を 徐々に大きくし、目標値(0.5~1.8g,gは重力加速 度)に達した後はその加速度振幅を維持したまま動 的挙動を観察し、その後に加震を停止している.周 波数は、相似則に従って中型橋梁模型では 5.0 Hz, 大型橋梁模型では 3.5 Hz とした.

3. 実験結果

図-3 に、中型・大型橋梁模型から得られた水平 一方向、および水平二方向震動実験の水平荷重-水 平変位関係をそれぞれ示す(入力波の目標最大加速 度は1.5g).図中には、滑り面が底面から斜面に変 化する変位を点線で示している.いずれの寸法にお いても、静止摩擦力に相当する水平荷重が生じた後 に摩擦振子が滑り出すことで、上部工加速度が低減 されている.滑り面変化点における水平荷重の局所 的な増加は、摩擦振子の一端と斜面との衝突による ものである.衝突現象は二方向入力より一方向入力 で顕著に見られ、滑り変位の減少をもたらした.こ れは、図-4 に示すように、摩擦振子が斜面に突入



図-6 摩擦係数と滑り速度の関係

するときの入射角が二方向入力よりも一方向入力で 大きくなり、衝突の影響を受けやすいためである. また、中型橋梁模型では、衝突の影響は小さいのに 対して、大型橋梁模型では、上部工重量の増大によ り、衝突の際に静止摩擦力と同程度の水平荷重が生 じる結果となった.以上より、本機構の加速度低減 効果は寸法に依存しないことが確認された.一方で、 供試体寸法をさらに実橋梁スケールに近づけた場合、 衝突荷重が静止摩擦力を上回る可能性が示された.

図-5 に、二方向震動実験により得られた残留変 位の分布を示す. 図中, 色を付けている部分は, 可 動半径 d (図-1 参照)の底面領域である. つまり, この色のついた箇所の外は, 摩擦振子が斜面上に停 止することを意味しており, 鉛直方向にも残留変位 が生じることになる. 図-5 に示されるように, 残 留変位の大きさは載荷毎に異なり, 大きなばらつき が確認されるが, その値は可動半径 d を超えること はなく, 自由震動後, 摩擦振子は底面領域に戻るこ とが示された.

図-6 に、大型橋梁模型の底面領域における摩擦 係数と滑り速度の関係(サンプリング間隔:0.005 秒)を示す.図中には、岡本ら⁵⁾の研究を参考に導 出した以下の速度依存式を併せて示している.

$$\mu(V) = a\mu_{max} + b\mu_{max} \exp(-n'|V|) \tag{1}$$



図-7 滑り面と摩擦振子の位置関係図

ここに、 $\mu(V)$:速度依存性を考慮した摩擦係数、 μ_{max} :最大摩擦係数、V:滑り速度、a、b:実験結 果より得られる定数、n':摩擦係数の速度依存性を 規定する定数である.式(1)を図-6 に適用する際に は、a=0.5、b=0.5、n'=15とした.

図-6(a)より、本機構の摩擦係数は、静止状態に おいて約 0.6 であり、速度の増加に伴って次第に減 少し、0.3 程度に漸近する速度依存性が確認される. また、図-6(b)より、面圧によって静止摩擦係数は 変化するものの、滑り速度が約 0.2 m/s を超えると、 面圧条件によらず摩擦係数は 0.3 に漸近することか ら、面圧依存性の影響は低速度域に限定されている. 以上より、本機構における摩擦係数は、速度依存性 と面圧依存性を有していることから、寸法効果が存 在することになるが、本実験で得られた摩擦係数の 変化を見る限り、それは既存の実験式(式(1))に より評価可能と思われる.



4. 解析的検討

(1) 解析概要

摩擦振子を質点に置換して作成した三次元骨組解 析モデルを用いて非線形動的解析を実施し,実験結 果の再現性を検証する.震動実験中に震動台上で測 定された加速度を入力波とする地震応答解析を行い, 臼型の滑り面を運動する際の橋軸(x)方向,および 橋軸直角(y)方向に作用する慣性力を導出する.数 値積分法には Newmark のβ法を用いた.

斜面領域における慣性力の評価式を式(2)に示す. この際,摩擦係数には式(1)の速度依存式を用いる.

$$\begin{vmatrix} P_x \\ P_y \end{vmatrix} = \pm \mu(V) N \cos \theta \begin{vmatrix} \sin \alpha \\ \cos \alpha \end{vmatrix} \pm N \sin \theta \begin{vmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{vmatrix}$$
(2)

ここに、N:摩擦振子に作用する垂直抗力, α :速度のx,y成分の比の逆正接関数で表される角度, θ :斜面角度, φ :滑り面中心から摩擦振子位置まで の偏角である. **図-7**に, θ , α ,および φ の関係を示 す.大型橋梁模型の実験結果より,速度依存式に用 いる最大摩擦係数は 0.59 とした.

(2) 解析結果・考察

図-8 に、大型橋梁模型を用いた震動実験の再現 解析の結果を示す.静止摩擦力,および最大滑り変 位において、実験結果と解析結果に大きな乖離は見 られなかった.本機構を有する摩擦振子型免震機構 は、式(1)を用いて摩擦係数の速度依存性を考慮し, かつ、斜面領域での力の釣り合いを式(2)で表現し た時刻歴動的解析により、概ね、その動的挙動を表 現できる.ただし、現時点のモデルでは、摩擦振子 と斜面の衝突を考慮できず、また、残留変位の再現 性は著しく低い状況にある.今後の継続した改善が 必要である. 5. まとめ

一般的な建設材料のみを用いた摩擦振子型免震機 構を有する RC 橋脚であっても、寸法によらず、地 震時慣性力の低減、および残留変位の抑制が可能で あることを示した.一方、摩擦振子の接地面が変化 する際の衝突荷重は寸法に依存することが示唆され た.今後、斜面角度の調整と併せ、より大型の供試 体を使用した実験的検証が必要である.摩擦係数は 供試体寸法と摩擦振子の滑り速度に依存するが、そ の変化は既存式により推定できることが示された.

また,解析的検討から,斜面形状と摩擦振子の位 置関係,および摩擦係数の速度依存性を考慮するこ とで,震動実験より得られた水平荷重-水平変位関 係は概ね再現可能であることが示された.

謝辞:本研究の一部は,JSPS 科研費 JP16H02357 の 助成を受けて行ったものです.

参考文献

- 幸左賢二,小野紘一,藤井康男,田中克典:被災 RC 橋脚の残留変位に関する研究,土木学会論文集, No. 627/V-44. pp. 193-203, 1999.
- Brito, M.B, Ishibashi, H. and Akiyama, M.: Shaking table tests of a reinforced concrete bridge pier with a low-cost sliding pendulum system, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 48, pp. 366-386, 2019.
- 3) Brito, M.B, Akiyama, M., Ichikawa, Y., Yamaguchi, H., Honda, R. and Ishigaki, N.: Bidirectional shaking table tests of a low-cost friction pendulum sliding system with flat-inclined surfaces, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 49, No. 8, pp. 817-837, 2020.
- 川島一彦,佐々木智大,右近大道,梶原浩一,運上 茂樹,堺淳一,幸左賢二,高橋良和,矢部正明,松 崎裕:現在の技術基準で設計した RC 橋脚の耐震性 に関する実大震動台実験及びその解析,土木学会論 文集 A, Vol. 66, No. 2, pp. 324-343, 2010.
- 5) 岡本晋, 深沢泰晴, 藤井俊二, 尾崎大輔: すべり方 式免震システムを有する橋梁の地震時挙動特性, 土 木学会論文集, No. 513/I-31, pp. 191-200, 1995.