

鉛直動が摩擦振子型免震機構を有する鋼製橋脚の 地震応答に及ぼす影響

石橋 寛樹¹・金井 晴弘²・秋山 充良³・小野 潔⁴・坂柳 皓文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 創造理工学研究科建設工学専攻（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

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）

⁴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）

⁵正会員 日本工営株式会社 コンサルタント国内事業本部交通運輸事業部（〒102-0083 東京都千代田区麹町4-2）

1. はじめに

コンクリート系部材の技術開発においては、特に1995年の兵庫県南部地震以降、変形能を大きく確保することで鉄筋コンクリート（RC）橋脚など、その耐震設計を合理化できることから、部材靱性率を改善するための研究が行われてきた。降伏変位の10倍を大きく超える応答変位が生じて、安定した曲げ挙動を呈する柱部材が提案されている。例えば、インターロッキング式帯鉄筋を有するRC橋脚、軸方向鉄筋や帯鉄筋の配筋方法、あるいは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、そして、鉄骨鉄筋コンクリート橋脚などの研究である。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¹⁾。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も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、図-1に示すような橋脚中間部に滑り曲面を設け、その位置より上にある部位を摩擦振子として滑らせることで、滑り曲面位置より下部に伝達される地震時慣性力を低減することを目的とした構造（摩擦振子型免震機構を有する橋脚）を提案した^{2), 3)}。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。既に著者らは、震動実験により、本橋梁の基本的な地震応答特性を確認しており、想定通りに免震化により高い耐震性能が付与されることを確認している。一方で、実施した全ての震動実験は、橋軸一方向入力に対する提案橋梁の地震応答特性の評価を目的としていた。本研究では、水平動と上下動を同時に受ける摩擦振

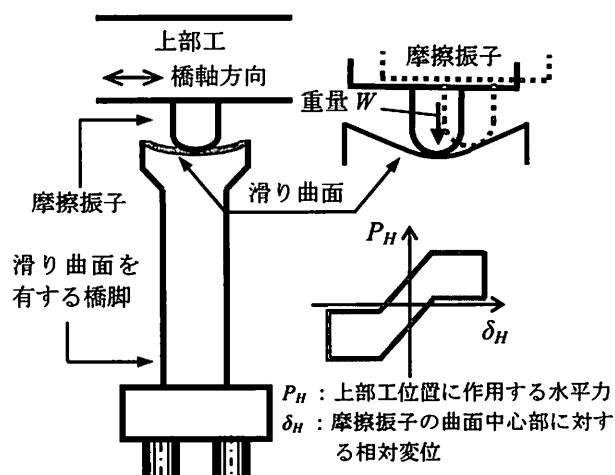


図-1 摩擦振子型免震機構を有する橋脚の模式図

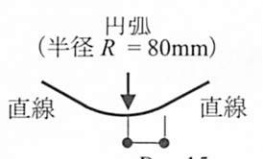
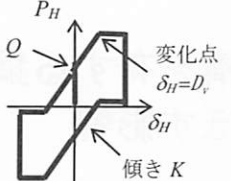
子型免震機構付き鋼製橋脚の震動実験を実施し、特に上下動が提案橋梁の水平方向の応答に及ぼす影響を実験および解析により評価する。

2. 実験概要

(1) 実験供試体

供試体諸元を表-1に示す。また、供試体設置状況を写真-1に、摩擦振子・滑り曲面設置図を写真-2に示す。本実験では、橋脚高さ10mの実橋梁を想定し、震動台の寸法および加震能力から相似比を33に設定することで供試体を設計した。また、加速度および橋脚の躯体に作用する面圧の相似比は1.0とした。供試体は、上部工（鉄の鍾）、橋台、滑り曲面を有する橋脚、および摩擦振子部材から構成される。上部工重量は750kgfであり、摩擦振子に作用する軸力は約1.47MPaである。摩擦振子は上部工と一体となり挙動するように剛結されており、滑り曲面との接触部は半径25mmの半円となっている。橋脚の外径は60.5mm、板厚は2.3mm、材質はSKK490

表-1 供試体諸元

滑り曲面形状	荷重-変位関係
 円弧 (半径 $R = 80\text{mm}$) 直線 $D_v = 15\text{mm}$	 P_H Q 変化点 $\delta_H = D_v$ 傾き K

※ 円弧の中心位置から円弧と直線の境界までの水平距離

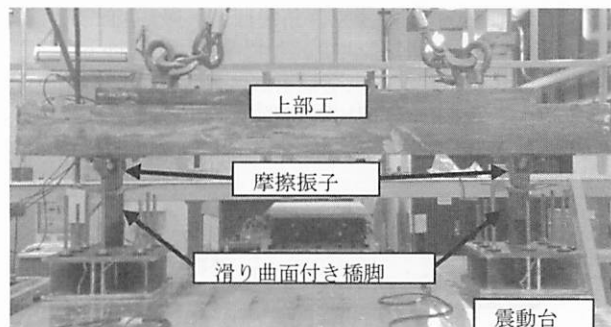


写真-1 供試体設置状況

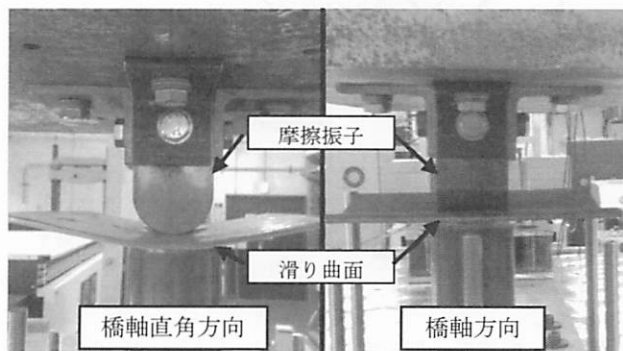


写真-2 摩擦振子・滑り曲面設置図

の電縫鋼管である。また、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。

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

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

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

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。

表-1に示すように、滑り曲面は摩擦振子に生じる水平変位が D_v 以下では円弧、 D_v 以上では直線形状となっており、骨格曲線は水平荷重が水平変位の大きさに関係なく一定値となるトリリニア型でモデル化される²⁾。なお、実験供試体の滑り発生後の固

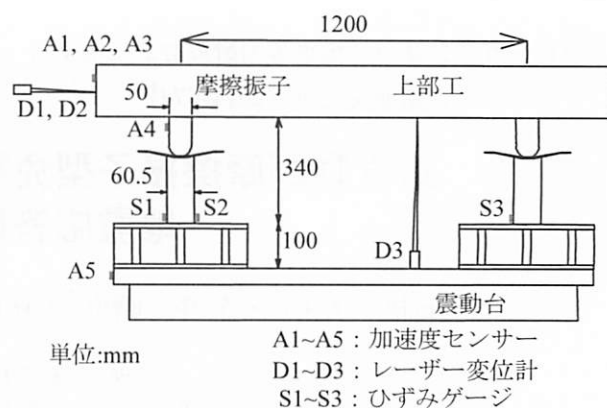


図-2 測定器設置状況 (側面)

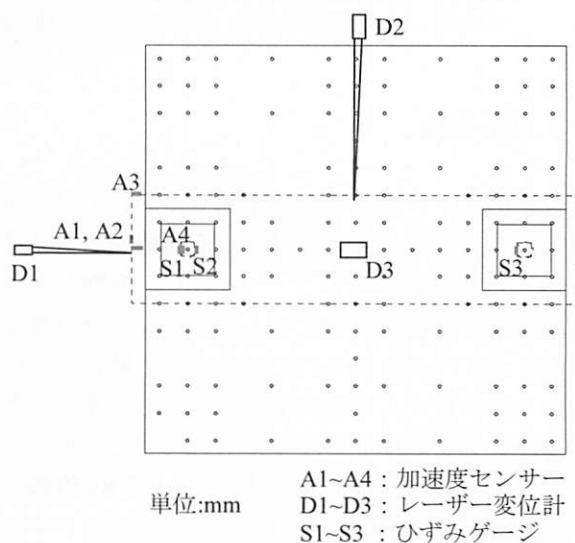


図-3 測定器設置状況 (上面)

有周期は供試体スケールで約0.47秒、実橋スケールで約2.7秒である。

(2) 測定項目

レーザー変位計や加速度センサー、ひずみゲージの配置状況を図-2と図-3に示す。上部工には、その水平二方向および鉛直方向加速度を測定するため加速度センサーを3つ(A1, A2, A3)設置した。また、摩擦振子には橋軸方向の上部工加速度を測定するための加速度センサー(A4)を取り付けた。震動台の時刻歴と、取り付けしたレーザー変位計や加速度センサー、およびひずみゲージの時刻歴を同期するため、震動台にも加速度センサー(A5)を設置した。また、レーザー変位計を用いて、上部工の橋軸方向の水平絶対変位(D1, D2)、および鉛直相対変位(D3)を計測した。鋼製橋脚には、その応答量を確認するため、橋脚基部から40mmの位置にひずみゲージ(S1, S2, S3)を設置した。計測されたひずみから、平面保持の仮定のもと、橋脚基部の曲率を算定している。鋼製橋脚の応答は本実験のすべての加震に対して弾性

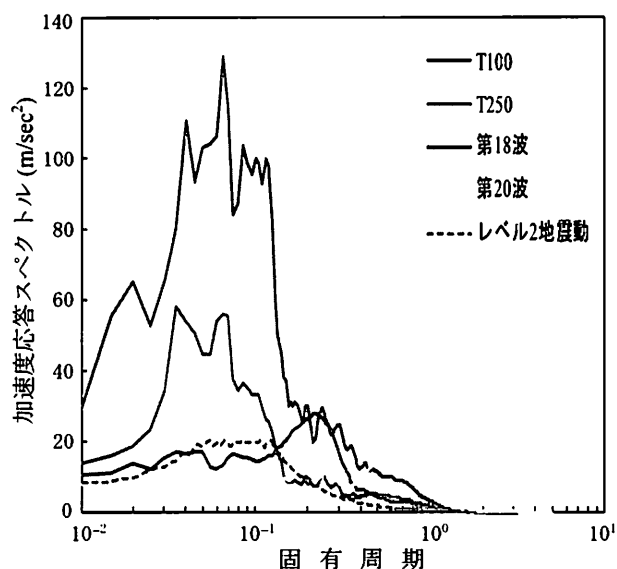


図-4 加速度応答スペクトル

域に留まっていることを確認している。

(3) 震動台実験に使用する地震動

本実験には、短周期波としてT100とT250、長周期波として第18波と第20波の計4種の地震動を用いた⁴⁾。T100とは、2003年十勝沖地震の際に幕別町本町で観測された地震波を相似則に基づき修正したものであり、T250とは、T100波の加速度振幅倍率を水平と上下方向ともに2.5倍に拡大した地震波である。第18波および第20波は著者らが作成した模擬地震動である。これら4種の地震動の加速度応答スペクトルを図-4に示す。図-4には、道路橋示方書のレベル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. 実験・解析結果

(1) 概説

摩擦振子型免震機構を有する鋼製橋脚を用いた二方向震動実験を行い、上下動が提案橋梁の地震応答特性に与える影響を評価する。また、供試体を多質点系に置換した非線形動的解析により実験結果の再現解析も行う。本実験では、T250と第20波に関しては、水平動の加速度振幅倍率を一定にしたまま上下動の加速度振幅のみを150%、200%と増加させた場合の実験も行った。なお、以降では、例えば、T250の上下動加速度の振幅倍率が100%の場合を「T250 (UD100)」，上下方向へ地震動を入力しない場合は「T250 (UD0)」と表記する。

(2) 水平荷重－水平変位関係

図-5に各地震動入力に対する水平荷重－水平変位関係 (実験値比較) を示す。図には、摩擦振子を質点系に置換し、力の釣合いより求めた骨格曲線も併せて示している。図-5の骨格曲線を得る際に必要な摩擦係数は、速度依存性を考慮せず、実験から得られた値 (0.391) を用いた。

図-5より、T250以外の地震動においては、水平荷重－水平変位関係が骨格曲線に概ね従っていることが分かる。長周期波に着目すると、水平変位が滑り曲面の曲面変化点以下では、水平変位に比例して水平荷重が漸増するが、曲面変化点以降では、水平荷重が頭打ちとなり、荷重の増加を抑制できている。T250波を入力する場合、上下動の振幅倍率が大きくなるにつれて、骨格曲線を上回る形で水平荷重の最大値が観測されている。T250は他の地震動に比べて上部工に作用する上下動が大きく、水平方向の力の釣り合いのみで定めた骨格曲線と大きな乖離が生じたと考えられる。また、上下動が増加するにつれて、水平変位も増加する傾向がある。摩擦振子と滑り曲面間の摩擦力が上下動の影響により時々刻々と変化したことが原因と考えられる。

図-6にT250 (UD100)および第20波 (UD100)を入力した動的解析より得られる水平荷重－水平変位関係を示す。解析において、軸力変動は上部工に生じる鉛直方向慣性力を考慮することで算定し、摩擦係数の変動は岡本らの研究⁵⁾を参考に、速度依存性を考慮することで算出した。以下、式(4)に軸力変動の算定式を、式(5)に速度依存性を考慮した摩擦係数の変動の算定式を示す。

$$W(t) = W \{1 + \alpha_{UD}(t)/g\} \quad (4)$$

$$\mu(V) = \mu_{max} - (\mu_{max} - \mu_{min}) \exp(-n' |V|) \quad (5)$$

ここに、 W ：橋脚一体が支持する軸力 (=375kgf)， α_{UD} ：上部工鉛直応答加速度， g ：重力加速度， $\mu(V)$ ：速度依存性を考慮した摩擦係数， μ_{max} ：最大摩擦係数， μ_{min} ：最小摩擦係数， V ：滑り速度， n' ：パラメータである。なお、本検討では、震動実験より、 $\mu_{max} = 0.391$ ， $\mu_{min} = 0.100$ ， $n' = 0.015$ と定めた。

図-6より、短周期波では、軸力変動の影響が大きく、長周期波では、摩擦係数の変動がそれぞれの応答に大きな影響を与えていることがわかる。本実験では、短周期波では上部工に作用する上下動が大きくなったため軸力変動の影響を強く受け、長周期波では上部工の滑り速度が小さくなったため摩擦係数の変動による影響が大きくなったと考えられる。

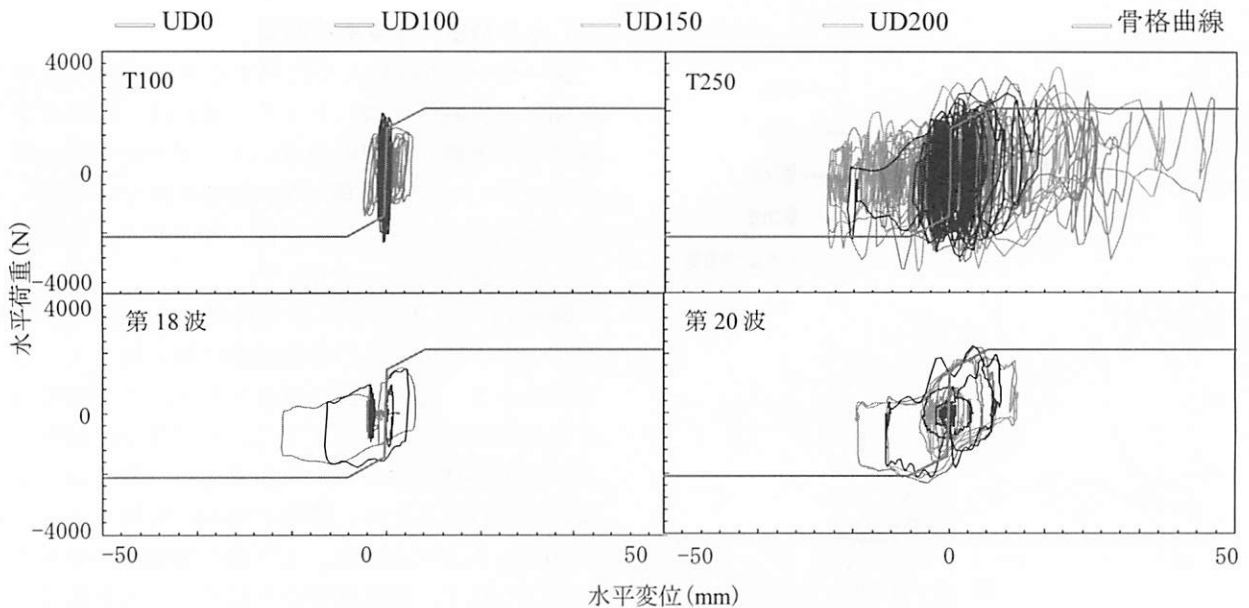


図-5 水平荷重-水平変位関係 (実験値比較)

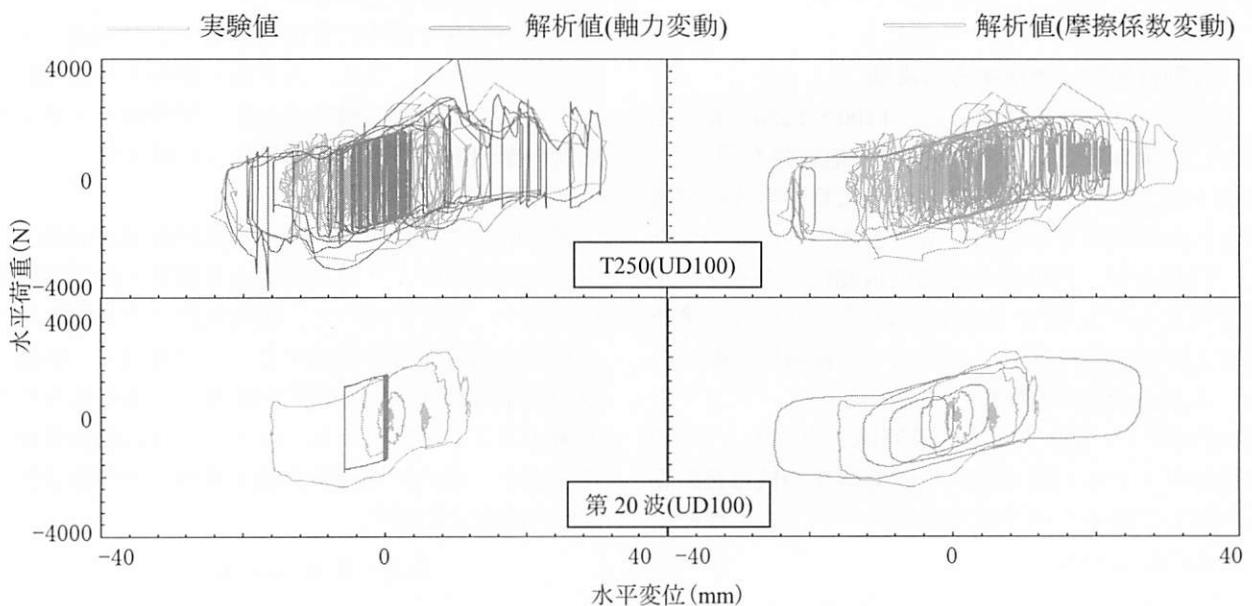


図-6 水平荷重-水平変位関係(再現解析)

4. まとめ

本研究では、上下動が提案橋梁の水平方向の応答に及ぼす影響を評価した。摩擦振子と滑り曲面間の摩擦力により地震時挙動が支配される提案橋梁では、上下動により摩擦の状態が変化するため、これが橋梁の水平方向の応答に及ぼす影響は小さくない。提案橋梁の地震応答解析では、時々刻々と変化する摩擦振子と滑り曲面間の軸方向力と摩擦の状態を考慮したモデルを用いる必要がある。

参考文献

- 1) 川島一彦, Gregory A. MACRAE, 星隈順一, 長屋和宏: 残留変位応答スペクトルの提案とその適用, 土木学会論文集, No.501/I-29, pp.183-192, 1994.
- 2) 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.
- 3) 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
- 4) 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/>
- 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.