

摩擦振子型免震機構付きRC橋脚に用いる滑り面形状の 最適化と寸法効果に関する実験的研究

山口大貴¹・市川義高¹・中川恵吾²・
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 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日本工営（株）コンサルタント国内事業本部交通都市事業部（〒102-8539 東京都千代田区九段北 1-14-6）

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（〒277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5）

1. はじめに

摩擦振子型免震機構を有する橋脚は、図-1 に示すように、橋脚中間部に滑り面を設け、その位置より上部を摩擦振子として滑らせることで、系の長周期化、および滑り面より下部構造（フーチング・基礎）に伝達される地震時慣性力の低減を可能にする構造である¹⁾。特徴は、既往の摩擦振子型免震支承と異なり、一般的な建設材料であるコンクリートと鋼のみで製作されているところにある。設計地震動を上回る強震動の作用を受ける場合にも、地震後に補修・補強を必要とせず、即時に供用可能なダメージフリー構造の開発を目指している。

著者らは既存研究として、臼型滑り面を有する摩擦振子を用いた震動実験を行うことで、本機構により橋脚に作用する地震時慣性力を大幅に低減できることを確認している²⁾。一方で、滑り面の形状を臼型にした場合、滑り面の斜面角度や底面領域の大きさにより、応答加速度の低減効果や残留変位の大きさが異なり、それらが提案構造の地震応答に及ぼす影響の定量的評価が課題として残されている。

また、摩擦振子型免震機構から構成される提案構造の地震動挙動は、当然、滑り面形状だけではなく摩擦係数の大きさに支配されることになる。一般に、摩擦係数は Amonton-Coulomb の法則に従うとされているが、例えば、岡本ら³⁾のすべり方式免震システムの研究によると、応答速度の増加に伴い摩擦係数は大きくなり、やがて一定値に収束する速度依存性が確認されている。摩擦係数は物体間の接触状況に

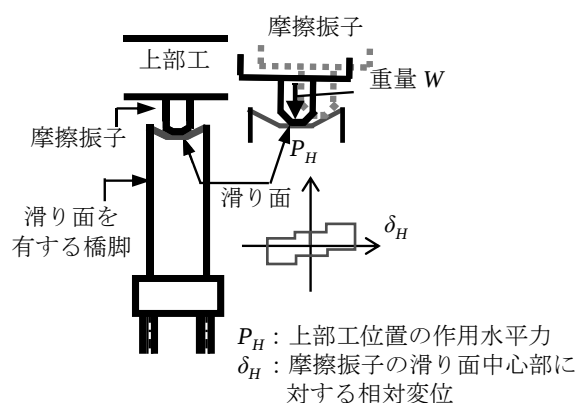


図-1 摩擦振子型免震機構付き橋脚

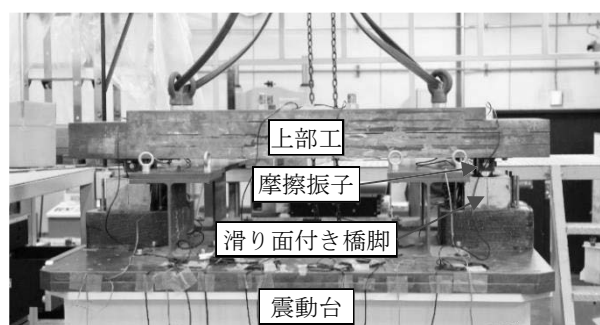


写真-1 4本柱供試体設置状況（左右方向：橋軸）

より変化する場合があり、本機構においても、摩擦振子（鋼）と滑り面（コンクリート）間の接触状況が異なる場合に摩擦係数の違いが生じる可能性を検証する必要がある。

本実験では、複数の滑り面形状を用いた震動実験を行い、地震応答特性を比較することで、最適な滑り面形状の同定を試みる。さらに、接触状況の違い

LL11_40 (LL11_40√2)	LL7_40 (LL7_40√2)	LL4_40 (LL4_40√2)	LL11_30 (LL11_30√2)	LL11_60 (LL11_60√2)

図-2 本実験で用いた滑り面形状の一覧

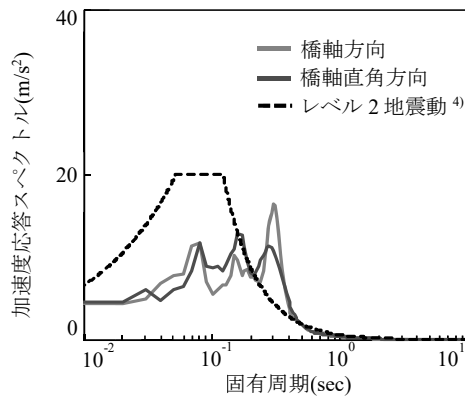


図-3 加速度応答スペクトル

として、滑り面に作用する軸力をパラメータとした実験も行い、寸法効果が滑り面形状および摩擦係数に及ぼす影響を検証する。

2. 最適滑り面形状同定のための震動実験

(1) 実験概要

本章では、滑り面の最適形状の同定を目的とした震動実験について述べる。写真-1に、供試体の設置状況を示す。上部工は4本の橋脚で支えられており、それぞれの橋脚に摩擦振子と滑り曲面が与えられている。震動実験には、早稲田大学材料実験室所有の三次元震動台を使用した。

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ている。供試体は、上部工（鋼製の鍾）、滑り面を有するRC橋脚、および摩擦振子から構成される。RC橋脚の高さは230mmであり、その断面寸法は150mm×190mmである。摩擦振子は上部工と一体となって挙動するように剛結されている。

図-2に臼型滑り面の形状を示す。臼型滑り面は、底面領域と斜面領域で構成される。図-2に示されるように、斜面角度が11°、7°、および4°の滑り面を製作し、斜面角度が滑り挙動に及ぼす影響を検証した。

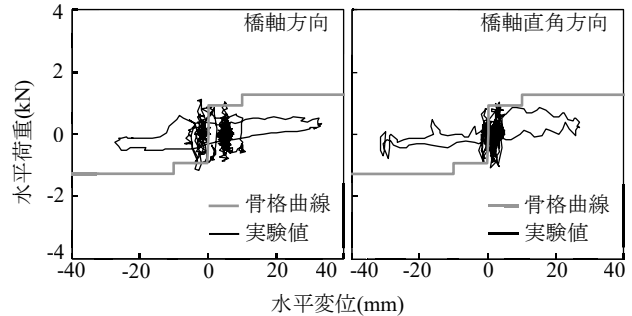


図-4 水平荷重-水平変位関係（振幅175%）

さらに底面領域の直径は、30mm、40mm、あるいは60mmとし、底面領域の大きさの違いが滑り挙動に及ぼす影響を評価した。なお、加震に伴う摩耗により、コンクリート表面に凹凸が生じ、摩擦係数が加震中に変化することが予想されたため、全ての滑り面にエポキシ樹脂製のコンクリート補修材を塗布した。このコンクリート補修材が摩耗を防ぐ効果は既往の実験で確認済みである²⁾。

震動実験には、2007年能登半島地震の際に石川県輪島市鳳至町で観測された地震波を用いた。図-3に、実験に使用した橋軸方向および橋軸直角方向の地震動（振幅100%）、および道路橋示方書が定めるレベル2地震動タイプII（I種地盤）の加速度応答スペクトルを示す⁴⁾。なお、本稿では、加速度振幅を100%～200%の範囲で増幅した地震波を入力して得られた震動実験結果を示す。

(2) 実験結果・考察

摩擦振子型免震機構付きRC橋脚を用いた水平二方向震動実験を行い、斜面角度と底面領域が地震応答特性に及ぼす影響を評価した。

図-4に、LL11_40の滑り面において得られた水平荷重-水平変位関係を示す。図-4に示されるように、水平荷重が骨格曲線を上回ることはなく、滑り面形状を工夫することで、滑り面より下部に伝達される地震時慣性力を抑制できることが確認される。

図-5に、残留変位と滑り面形状の関係を示す。ここで、基準線を超えるプロットは斜面領域で残留変

位が生じたことを示す。図-5 より、斜面角度が大きくなるほど、また底面領域が小さくなるほど残留変位が抑制されていることが確認できる。ただし、底面領域が小さい場合には、地震後に摩擦振子が底面領域まで戻らず、斜面領域にとどまる場合が多くなっている。

入力地震動の最大加速度（PGA）に対する上部工の最大応答加速度の比と、最大滑り変位に対する残留変位の比の関係を図-6 に示す。縦軸は安全性に関する指標、横軸は地震後の供用性に関する指標となり、いずれも値が小さいほど優れた滑り性能を有していることを示す。図-5 および図-6 より、斜面角度を 11° 、底面領域の直径を 30mm とした場合に、最も優れた滑り性能を示していることが確認される。ただし、前述した通り、底面領域の直径が小さくなるほど、地震動の主要部を過ぎた後の減衰の過程で摩擦振子が底面部に戻らず、斜面部にとどまる可能性が高くなる。斜面部に摩擦振子がとどまると、水平方向だけではなく、鉛直方向にも残留変位を生じさせるため、上部工に損傷を与える可能性がある。

残留変位は、構造が単純な単柱式の RC 柱であっても、構造諸元だけではなく、地震動特性など、様々な要因によって決定されており^{5),6)}、その予測は未だ極めて困難な状況である。最適な底面領域の大きさの同定にはさらなる実験的検討が必要である。本実験の範囲で言えば、斜面角度は 11° 、底面領域の直径は $30\text{mm}\sim 40\text{mm}$ に設定することで、地震時の安全性（最大応答変位）、および地震後の供用性（残留変位）の確保に有効であると判断される。

3. 寸法効果の確認のための震動実験

(1) 実験概要

本章では、橋脚を中央位置に 1 本設置し、その橋脚にのみ摩擦振子型免震機構を与えることで、滑り面に作用する軸力を大きくし、提案構造における寸法効果を確認する。使用する三次元震動台と地震波は、前章に示した 4 本柱供試体を用いた実験と同様である。なお、本実験では、橋軸方向にのみ地震動を入力している。

供試体の設置状況を写真-2 に示す。上部工の下面中央に摩擦振子を剛結し、上部工の両端をローラー支承で支持することにより、1 つの滑り面に作用する軸力を 4 本柱供試体を用いた場合の 2 倍とした。また、摩擦振子と滑り面間の面圧を一定にするために、摩擦振子および底面領域の接触面積を 4 本柱供試体の 2 倍とした。なお、RC 橋脚の高さは 290mm 、

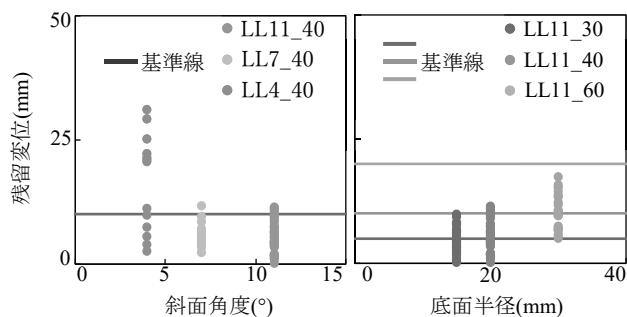


図-5 残留変位と滑り面形状の関係

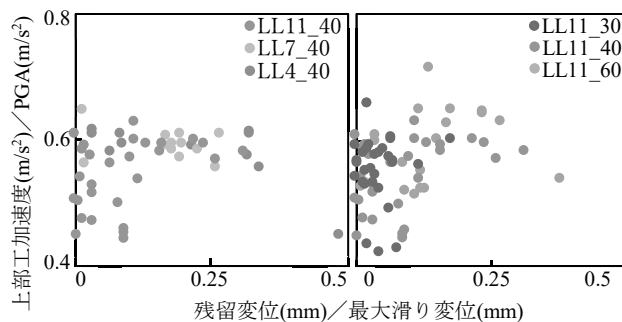


図-6 上部工の加速度低減効果と残留変位の関係

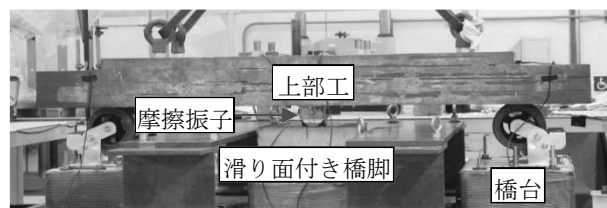


写真-2 1本柱供試体設置状況（左右方向：橋軸）

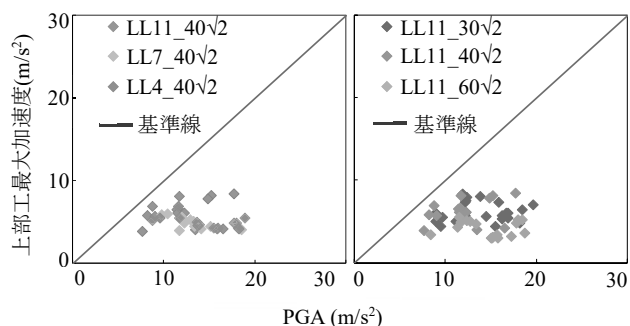


図-7 上部工最大加速度と PGA の関係（1 本柱供試体）

断面寸法は $202\text{mm} \times 300\text{mm}$ である。

(2) 実験結果・考察

滑り面に作用する軸力を増大させた供試体の震動実験を行い、4 本柱供試体を用いた実験と比較することで、本橋梁における寸法効果を検討した。

a) 滑り面形状の大きさが地震応答に及ぼす影響

図-7 に、上部工最大加速度と PGA の関係を示す。図-7 より、滑り面に作用する軸力が 4 本柱供試体の

2 倍となる場合でも、本橋梁は滑り面より下部に伝達される地震時慣性力を低減できている。

次に、残留変位と滑り面形状の関係を図-8 に示す。図-8 より、斜面角度が大きいほど、また底面領域が小さいほど残留変位が抑制されることが確認できる。この結果より、斜面角度と底面領域が残留変位に及ぼす影響の傾向は、滑り面に作用する軸力の大きさにより変化しないことが示された。

以上より、本実験の範囲では、滑り面形状が提案構造の地震応答に及ぼす影響に寸法効果は確認されず、残留変位は斜面角度と底面領域の組合せによって決定されている。ただし、寸法効果の有無を確定するためには、より大きな供試体を用いた震動実験による検証が必要である。

b) 摩擦係数の寸法依存性

図-9 に、加震中の摩擦係数と上部工の滑り速度の関係を示す。なお、図-9 には、速度依存性を考慮した摩擦係数を岡本らの研究³⁾を参考に式(1)を用いて導出した結果も併記している。

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

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。

図-9 より、上部工の滑り速度が増加するのに伴って摩擦係数は低下し、一定値に漸近することが確認される。この結果より、本機構においても摩擦係数の速度依存性が存在するといえる。さらに、本実験で得られた静止摩擦係数は、4 本柱供試体の実験において得られた静止摩擦係数よりも小さい。摩擦係数が本橋梁に与える影響には寸法効果が存在する可能性が示唆された。ただし、摩擦係数には速度のほかにも面圧や温度に依存することも指摘されている⁷⁾。今後、継続的に実験を行い、それらの影響を定量的に評価する必要がある。

4. まとめ

摩擦振子型免震機構を橋脚に適用することで、レベル 2 地震動に相当する地震動が作用する場合にも安定した挙動が得られることを確認した。残留変位は摩擦振子や滑り面の大きさによらず、斜面角度と底面領域の適切な組合せにより抑制できることが示された。本機構を活用することで、ダメージフリー橋梁を実現できる可能性がある。なお、本研究で実施した震動実験の範囲では、摩擦係数が供試体寸法に依存する可能性が示唆された。

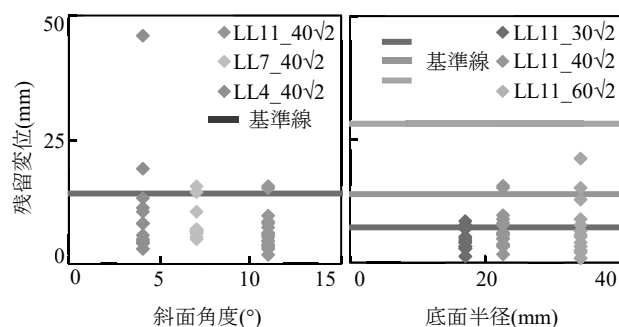


図-8 残留変位と滑り面形状の関係（1 本柱供試体）

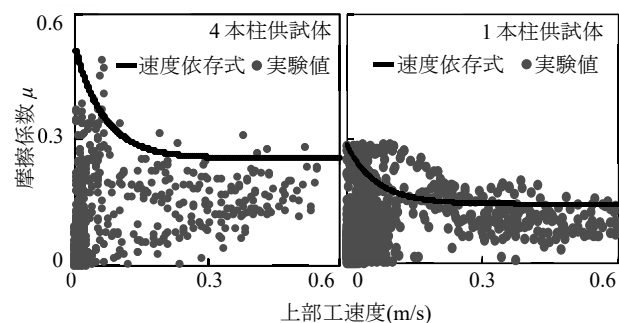


図-9 摩擦係数と上部工速度の関係

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。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 山口大貴, 脊戸鉄太, 市川義高, 石垣直光, 末崎将司, 秋山充良, 本田利器：滑り曲面の形状と耐摩耗性が摩擦振子型免震機構付き橋梁の地震応答性状に及ぼす影響, 第 21 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.261-264, 2018.
- 3) 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.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2017.
- 5) 阿部哲子, 藤野陽三, 阿部雅人：1995 年兵庫県南部地震による阪神高速高架橋の被害と 2,3 の分析, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.181-199, 1999.
- 6) 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.
- 7) 高橋良和, 日比雅一, 家村浩和：各種依存性を考慮した滑り型免震支承の数値モデルに関する一考察, 応用力学論文集, Vol.8, pp.701-708, 2005.