

# 3D プリンターを活用した ローコスト摩擦振子型免震橋梁の 地震時応答に及ぼす寸法効果の影響

檜山 大樹<sup>1</sup>・銭 城<sup>2</sup>・Miguel B. Brito<sup>3</sup>  
石垣 直光<sup>4</sup>・秋山 充良<sup>5</sup>・本田 利器<sup>6</sup>

<sup>1</sup>学生会員 早稲田大学大学院 創造理工学研究科 建設工学専攻修士課程  
(〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)  
E-mail: hiroki\_kashiyama@toki.waseda.jp

<sup>2</sup>非会員 早稲田大学大学院 創造理工学研究科 建設工学専攻修士課程  
(〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)  
Email: qian96@toki.waseda.jp

<sup>3</sup>非会員 早稲田大学大学院 創造理工学研究科 建設工学専攻博士課程  
(〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)  
Email: brito@toki.waseda.jp

<sup>4</sup>日本工営株式会社 コンサルティング事業統括本部 交通運輸事業本部 道路事業部  
(〒102-8539 東京都千代田区麴町 5-4)  
Email: a3568@n-koei.co.jp

<sup>5</sup>正会員 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)  
Email: akiyama617@waseda.jp (Corresponding Author)

<sup>6</sup>正会員 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)  
Email: rhonda@k.u-tokyo.ac.jp

ダメージフリー橋梁の開発を目指し、著者らは摩擦振子型免震機構を有する RC 橋脚を提案するとともに、その震動実験を行ってきた。提案構造は、橋脚中間部に滑り面を設けることで橋脚下部に伝達される地震時慣性力を大幅に低減することができる。特徴は 3D プリンターで製作したコンクリート型枠を用いることで、複雑な形状を有する滑り面を安価に製作できる点にある。本研究では、過去に用いた橋梁模型を大型化し、提案構造の地震応答に及ぼす寸法効果の影響を検討するための震動実験を実施し、提案構造で生じる応答加速度の低減効果や残留変位の大きさが供試体寸法に依存しないことを確認した。また、得られた実験結果に基づき、提案構造で生じる最大応答変位、および残留変位の予測式を提案した。

**Key Words:** 3D printer, friction sliding system, size effect, seismic isolation, RC bridge pier

## 1. はじめに

コンクリート系構造物の耐震設計では、部材間の耐力を階層化し、地震後の補修・補強が容易な位置に最弱部を誘導し、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、高靱性 RC 柱部材の開発が進められてきた。例えば、石橋ら<sup>1)</sup>は、矩形鉄筋を軸方向鉄筋の内側に配置し、軸方向鉄筋のはらみ出しやその破断後の荷重低下を抑えることで、RC 柱の変形能を改善している。幸左ら<sup>2)</sup>は、塑性ヒンジ部に高靱性セメントを用いることにより、地震時保有水平耐力と終局変位を大きくする耐震補強工法を提案している。しかしながら、コンクリート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、橋脚には相当の残留変位が発生し、地震後、長期間にわたり修復作業が必要となる懸念がある<sup>3),4)</sup>。橋梁は、地震後の地域の復興、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、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。昨今、レジリエンス<sup>5)</sup>や危機耐性<sup>6)</sup>など、新しい性能指標に基づく耐震設計法の再構築の議論が行われており、二段階設計法からの脱却を可能にする構造が求められていることにも対応する。

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、コンクリート系柱部材について、摩擦振子型免震支承（FPS）の構造形態を参考にしたダメージフリー構造を提案している<sup>7)-11)</sup>。摩擦振子型免震機構を有する RC 橋脚の概略図を図-1に示す。FPS は、球面状のステンレス製滑り面を PTFE（ポリテトラフルオロエチレン）製スライダが滑る構造であり、滑り面の曲率半径の調整によ

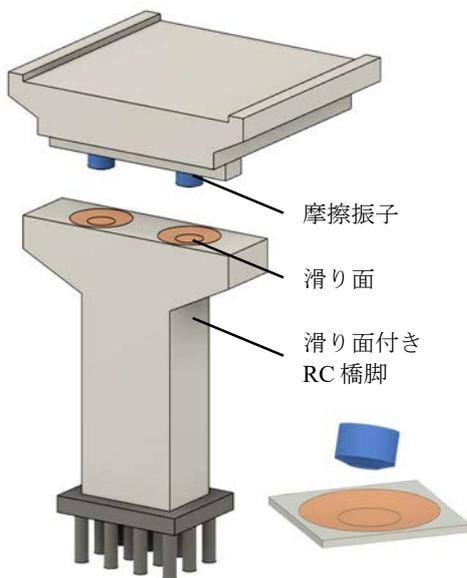


図-1 摩擦振子型免震機構を有する RC 橋脚の概略図



図-2 滑り面形状の一例

り、長周期化による地震時慣性力の低減と残留変位の抑制のバランスを取っている。海外では橋梁への適用例<sup>12)</sup>がある一方、コンクリートや鋼などの一般の建設材料よりも高価な材料を必要とする<sup>13)</sup>ことから、コスト面に大きな課題がある。

図-1 に示す提案構造は、コンクリート、および鋼部材のみで摩擦振子型免震機構を実現している点に特徴がある。予備検討の段階では、図-2 に代表される様々な滑り曲面を製作し、震動実験を繰り返し実施してきた。初期には、水平一方向载荷を想定し、図-2(a)に示す滑り面を用いた実験を行い、コンクリートや鋼を使用した場合であっても、摩擦振子型免震機構によって地震力の大幅な低減、および残留変位の抑制は可能であることを確認した<sup>7)</sup>。次いで、水平二方向入力を受ける場合への適用を目指し、図-2(a)に示す滑り曲面の組み合わせを工夫したり、あるいは、図-2(b)のような球面の滑り面を使用したりした。ただし、コンクリートや鋼は耐摩耗性が十分になく、球面を用いると摩擦振子と滑り面の点接触部が大きく傷つき、安定した挙動を得ることができなかった<sup>8),9)</sup>。

実験的な試行錯誤の結果、図-2(c)に示す臼型滑り面を開発した<sup>10)</sup>。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。3D プリンターを用いて製作した型枠により、コンクリートを使用した場合でも安価に本機構の滑り面は製作可能であり、かつ、点接触を避けることで摩耗の影響を小さくできている。参考文献 10)では、小型模型を用いた震動実験により、提案構造に最適な滑り面形状を実験的に同定している。

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<sup>14)</sup>。例えば、幸左ら<sup>15)</sup>は、1/3 縮尺と 1/10 縮尺の橋脚模型に対して正負交番载荷実験を実施し、両者の靱性率の差は小さいものの、フーチングからの軸方向鉄筋の抜け出し量の影響が鉄筋径に依存することを指摘している。川島ら<sup>16)</sup>は、RC 橋脚の震動実験を実大スケールで実施し、従来の幾何学的相似則に従った小型橋脚模型実験では、破壊性状を正しく再現できないことを示している。本研究では、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 10)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震動実験を実施する。

## 2. 3D プリンターを活用した摩擦振子型免震機構を有する RC 橋脚の概要

### (1) 滑りのメカニズム

図-3 に滑り面の断面図、図-4 に本機構の骨格曲線を示す。橋脚は滑り面を境に上下に2つに分かれており、上部工に剛結された摩擦振子が下側に位置する滑り面上を滑る構造となっている。常時状態では、滑り面の底面において摩擦振子の鉛直荷重を支持する。一方、静止摩擦力を上回るせん断力をもたらす地震時には、摩擦振子が底面、および斜面を滑ることで、橋脚基部に伝達される地震時慣性力を低減する。この際、摩擦振子が斜面に位置するときには、自重による復元力が作用するため、残留変位が抑制される。

図-4 (a) に、摩擦振子が水平一方向に動く際の骨格曲線を示す。底面、および斜面での水平荷重  $Q_0$ 、および  $Q_1$  はそれぞれ以下の式で表される。

$$Q_0 = \pm \mu N \quad (1)$$

$$Q_1 = \pm \mu N \cos \theta \pm N \sin \theta \quad (2)$$

ここに、 $\mu$ ：摩擦係数、 $N$ ：垂直抗力、 $\theta$ ：斜面角度である。

一方、摩擦振子が水平二方向に動く場合には、円を描くような軌跡を示し、一方向入力時の骨格曲線には従わない。図-5 に、滑り面の立体図を示す。本機構の斜面領域における水平荷重は、 $\mu N$  を含む摩擦項と  $N \sin \theta$  を含む自重項で構成される。図-5 に示すように、自重による復元力は常に滑り面の中心

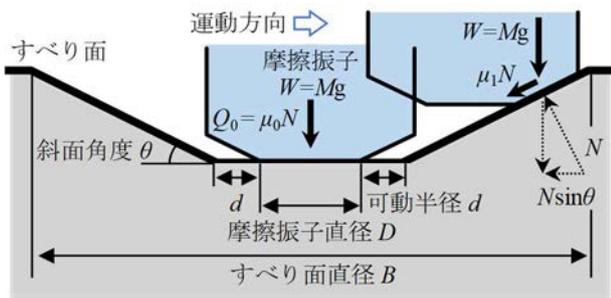


図-3 滑り面の断面図

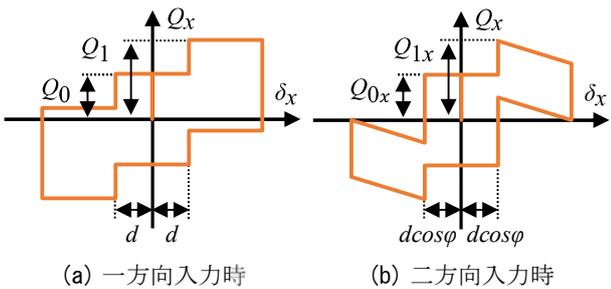


図-4 水平荷重—水平変位関係 (骨格曲線)

に向かって働く一方、摩擦力は運動方向と反対の方向に働くため、摩擦振子が水平二方向に挙動する際には、水平荷重の評価に摩擦振子の位置関係を考慮する必要がある。橋軸方向を  $x$ 、橋軸直角方向を  $y$  としたときに、水平二方向入力時の本機構の骨格曲線は図-4 (b) となり、底面での水平荷重  $Q_{0x}$  と  $Q_{0y}$ 、および斜面での水平荷重  $Q_{1x}$  と  $Q_{1y}$  は、それぞれ以下の式で表される。

$$\begin{bmatrix} Q_{0x} \\ Q_{0y} \end{bmatrix} = \pm \mu N \begin{bmatrix} \sin \alpha \\ \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} Q_{1x} \\ Q_{1y} \end{bmatrix} = \pm \mu N \cos \theta \begin{bmatrix} \sin \alpha \\ \cos \alpha \end{bmatrix} \pm N \sin \theta \begin{bmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left| \frac{v_x}{v_y} \right| \quad (5)$$

ここに、 $\alpha$ ：速度の  $x, y$  成分の逆正接関数で表される角度、 $\phi$ ：滑り面中心から摩擦振子位置までの偏角 (図-5 参照) である。

テトラリニア型の骨格曲線の特徴は、斜面における荷重  $Q_{1x}$  と  $Q_{1y}$  が一定値  $Q_1$  以下となる点にある。図-6 に示されるとおり、バイリニア型で二次剛性が正の傾きを持つ FPS の機構とは異なり、水平変位の大きさによらず水平荷重を頭打ちにできる。本機構を RC 橋脚に適用することで、レベル 2 地震動クラスの強震動を受ける場合でも、下部構造に作用する地震時慣性力は、強震動の大きさに関係なく、摩擦係数、自重、および滑り面の形状のみに依存させることができる。

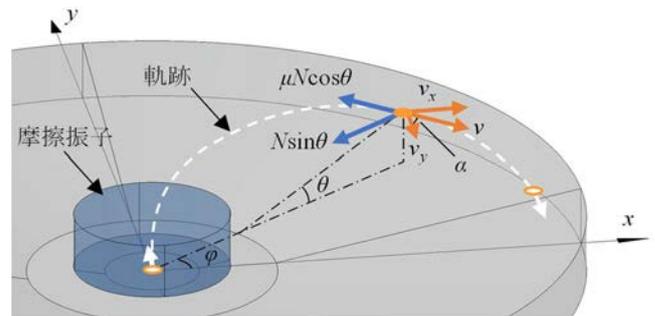


図-5 滑り面の立体図

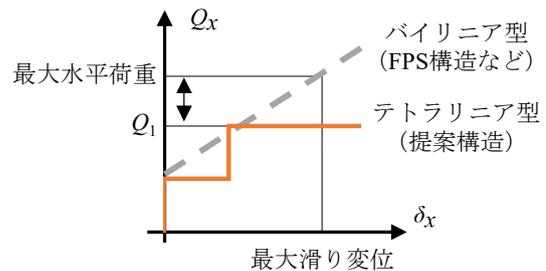


図-6 構造別の骨格曲線の比較

(2) 小型橋梁模型を用いた震動実験結果の概要<sup>10)</sup>

Brito et al.<sup>10)</sup>は、前節で示した滑りのメカニズムに従って摩擦振子が挙動することを実験的に確認するため、1/33 スケールの小型橋梁模型を用いた震動実験を行っている。小型橋梁模型は、鋼製上部工、4つの摩擦振子、および4基の滑り面付き RC 橋脚で構成される。コンクリート製滑り面は、3D プリンターで出力したアクリル板を型枠に用いて製作されている。表-1 に、小型橋梁模型の供試体一覧を示す。水平二方向震動実験で用いた入力波は、1993年の北海道南西沖地震<sup>17)</sup>、1995年の兵庫県南部地震<sup>17)</sup>、および2007年の能登半島地震<sup>17)</sup>で観測された地震波の加速度振幅をレベル2地震動相当まで増幅させたものである。

実験結果の一例として、図-7 に、斜面角度が 11° で可動半径が 10 mm である F-11-d10 供試体の水平荷重-水平変位関係を示す。初期位置、および運動方向変化位置での静止摩擦力由来の荷重増加に加えて、滑り面が底面から斜面へ変化する位置での水平荷重の増加が確認された。これは、摩擦振子の接地面が変化する際の衝突現象によるものであり、その

滑りのメカニズムから水平一方向荷重で顕著となる。全体としては、二方向入力に対して想定通りの滑らかな挙動が確認されており、応答加速度の十分な低減、かつ残留変位の抑制が実験的に確かめられた。

図-8 に、表-1 に示す供試体から得られた上部工位置での応答加速度と残留変位の関係を示す。縦軸は、応答加速度を震動台上で観測された最大加速度 (PGA) で除し、また、横軸は、残留変位の大きさを図-3 に示す可動半径  $d$  で除して無次元化している。参考文献 10) では、図-8 に示す結果などに基づき、応答加速度の低減と残留変位の大きさから、斜面角度が 11 度、かつ可動半径が摩擦振子半径と等しい滑り面形状が本機構に最適であると結論付けている。

ただし、参考文献 10) では小型模型が用いられており、その相似則から、大きな応答速度を得ることができていない。摩擦係数には速度依存性があることが報告されており<sup>18)</sup>、大きな速度領域での滑り挙動を確認する必要がある。また、同定された斜面角度や可動半径がより大きな供試体を用いた場合でも良好な滑り性能 (応答加速度の低減・残留変位の抑制) が得られるのかを実験的に確かめる必要がある。

表-1 小型橋梁模型の供試体一覧

供試体名	斜面角度 $\theta$	可動半径 $d$	摩擦振子直径 $D$	上部工質量	面圧	相似比 $S$
F-4-d10	4°	10 mm	20 mm	750 kg	5.9 MPa	33
F-7-d10	7°	10 mm	20 mm	750 kg	5.9 MPa	33
F-11-d5	11°	5 mm	20 mm	750 kg	5.9 MPa	33
F-11-d10	11°	10 mm	20 mm	750 kg	5.9 MPa	33
F-11-d20	11°	20 mm	20 mm	750 kg	5.9 MPa	33
F-18-d10	18°	10 mm	20 mm	750 kg	5.9 MPa	33

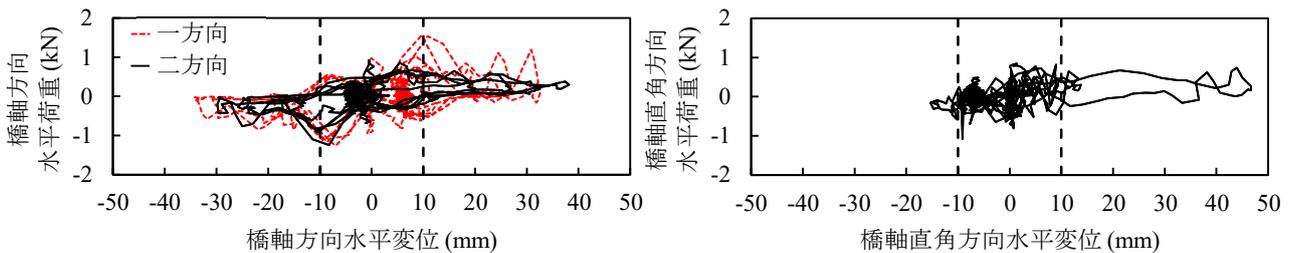


図-7 F-11-d10 供試体の水平荷重-水平変位関係

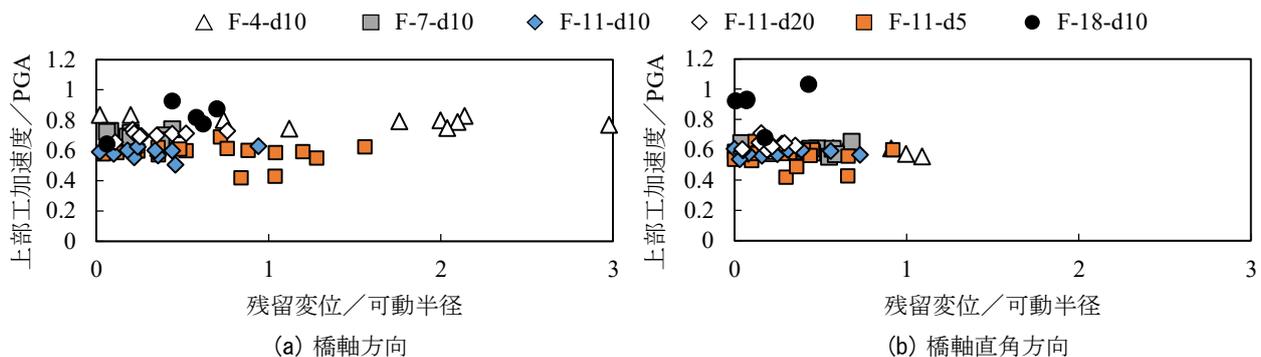


図-8 上部工位置での応答加速度と残留変位の関係

### 3. 実験概要

#### (1) 3D プリンターを用いた大型滑り面の製作

3Dプリンティング技術は、設計した3Dデータを入力するだけで、従来は製作に専門的な加工技術を要していた複雑な形状の物体を容易に製作でき、金型などが不要となることから製作費の大幅な縮減が可能である。本研究では、参考文献 10)と同じく、打設の際に利用する臼型滑り面の型枠を早稲田大学所有のポリジェット方式 3D プリンターを利用してアクリルにより製作することで、臼型形状を有するコンクリート製滑り面を安価に実現した。滑り面付き RC 橋脚の製作フローを図-9 に、また滑り面付き RC 橋脚の概略図を図-10 に示す。

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、滑り面に表面強化材を塗布している。使用した薬剤は、小型橋梁模型実験<sup>10)</sup>と同じエポキシ樹脂製コンクリート補修材である。なお、打設・塗布作業後であっても所定の斜面角度が確保されていることを確認するため、早稲田大学所有の三次元座標測定器による計測を行い、全ての供試体において、斜面角度が規定値から $\pm 0.3^\circ$ 以内に収まっていることを確認した。



図-9 滑り面付き RC 橋脚の製作フロー

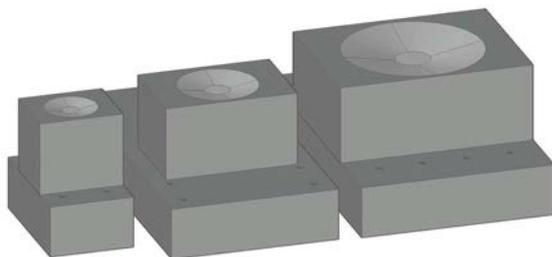


図-10 滑り面付き RC 橋脚の概略図\*

(\*実スケール比 左から小型<sup>10)</sup>，中型，大型橋梁模型)

#### (2) 震動実験

##### a) 供試体諸元

震動実験における相似則を表-2 に示す。また、本実験で用いた供試体一覧を表-3 に示す。本研究では、参考文献 19)に示される実橋梁（鋼桁+RC 橋脚）を想定しており、加速度の相似比を 1 として他の諸量を決定している。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で形式となっており、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・摩擦振子を一体化している。

以降では、相似比  $S=33$  の供試体を小型橋梁模型、 $S=23.3$  の供試体を中型橋梁模型、そして  $S=16.5$  の供試体を大型橋梁模型と称す。このうち、2F-11-d14 供試体と 4F-11-d20 供試体は、前記した参考文献 10)において、最適な形状を有する供試体として同定された F-11-d10 供試体を異なる相似比で再現したものである。このほか、可動半径や摩擦振子の大きさを変えた供試体を用いることで、2. (1)に示した滑りのメカニズムが供試体寸法によりどのように変化するかを実験的に確認する。

表-2 相似則

物理量	相似比 $S$
加速度, 面圧	1
長さ, 変位, 剛性	$1/\sqrt{S}$
時間, 速度	$1/S$
質量, 慣性力	$1/S^2$

表-3 供試体一覧

名称	供試体名*	斜面角度 $\theta$	可動半径 $d$	摩擦振子直径 $D$	上部工質量	面圧	相似比 $S$
小型	F-11-d18	$11^\circ$	18 mm	20 mm	750 kg	5.9 MPa	33
中型	2F-11-d14	$11^\circ$	14 mm	28 mm	1500 kg	5.9 MPa	23.3
大型	4F-11-d20	$11^\circ$	20 mm	40 mm	3000 kg	5.9 MPa	16.5
大型	4F-11-d26	$11^\circ$	26 mm	28 mm	3000 kg	11.7 MPa	16.5
大型	4F-11-d30	$11^\circ$	30 mm	20 mm	3000 kg	23.4 MPa	16.5



写真-1 大型橋梁模型の設置状況 (左右：橋軸方向)

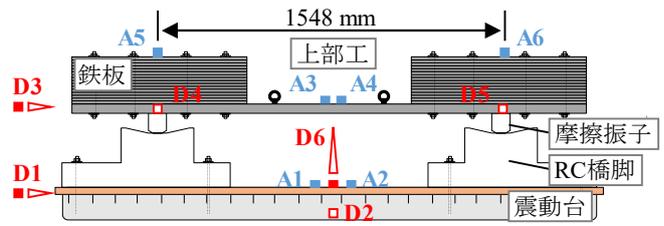


図-11 測定器の配置図 (左右：橋軸方向)

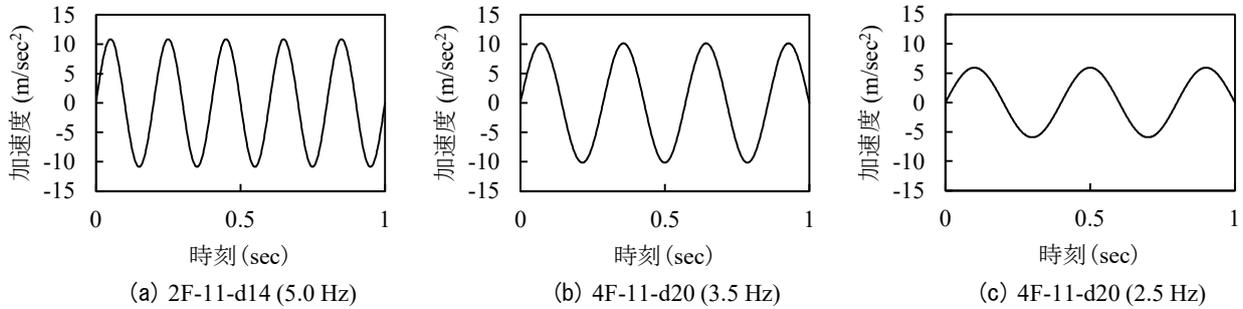


図-12 震動実験に用いた目標加速度波形の一例

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）。なお、提案構造では、後述されるように、地震時慣性力の大幅な低減が可能であることから、滑り面より下部に位置する橋脚基部の断面などは、相当に絞り込むことが可能と思われる。

### b) 計測項目

測定器の配置図を図-11 に示す。レーザー変位計 (D1～D6) と加速度センサー (A1～A6) を用いることにより、震動台と上部工に生じる橋軸・橋軸直角方向、および鉛直方向の変位と加速度をそれぞれ測定した。以降に示す橋軸方向、および橋軸直角方向の水平変位とは、変位計から得られる上部工圆心位置での各方向の相対水平変位である。また、橋軸方向、および橋軸直角方向の水平荷重とは、上部工加速度の値 (A3, A4) に上部工質量の 1/4 をかけることで得られた橋脚一基に作用する各方向の水平荷重である。

なお、各摩擦振子には、ひずみゲージを貼り付けている。これは、上部工質量を 4 基の橋脚で概ね均等に支えていることを加震前に確認するためである。

### c) 入力波と加震手順

本研究では、水平一方向（橋軸方向）、および水平二方向（橋軸・橋軸直角方向）震動実験を行う。著者らは、過去、水平+鉛直地震動を用いた震動実験を行い、本機構の動的挙動に鉛直地震動が及ぼす影響は小さいことを確認していることから<sup>20)</sup>、本研

表-4 加震条件

ケース	対象橋梁模型	周波数 $f$	目標最大加速度
1	小型	7.0 Hz	0.5～1.8g
2	中型	5.0 Hz	0.5～1.8g
3	大型	3.5 Hz	0.5～1.8g
4	大型	2.5 Hz	0.5～0.8g

\*g は重力加速度

究では水平方向のみの入力を行うものである。震動台は、日本大学大型構造物試験センターにある多入力振動試験装置を使用した。入力波には試験装置の制約から周波数  $f$  を持つ正弦波を用いており、水平二方向入力を与える場合には位相差が生じないようにした。加震条件を表-4 に、入力波の加速度波形の一例を図-12 に示す。表-4 に示す周波数  $f$  の値は、橋梁模型の寸法に応じて、表-2 に示す相似則に従い変化させている。なお、大型橋梁模型では、より長周期な入力波に対する応答を確認するため、 $f = 2.5$  Hz も用いている。

加速度振幅は、徐々に大きくし、目標値に達した後はその加速度振幅を維持したまま挙動を観察し、その後に加震を停止している。水平二方向入力の場合、震動台の性能から橋軸方向と橋軸直角方向で入力波の最大加速度に差が生じることがあった。実験結果の整理の際には、震動台上で実測された加速度値を用いている。加震後に残留変位が生じた場合には、上部工をクレーンで吊り上げ、滑り面の損傷状況を記録した後、摩擦振子が滑り面の中心に位置するように再設置した。なお、滑り面に塗布した表面強化材の耐摩耗性を検証する目的で実施した連続載荷実験では、残留変位が生じていても再設置を行わず、同一の正弦波を 5 回連続して入力した。

## 4. 実験結果

### (1) 加速度時刻歴

震動台と上部工位置で観測された加速度時刻歴の一例をそれぞれ図-13 に示す。震動台加速度が 0.5g 程度以下であると、上部工は滑らずに橋脚と一体となって挙動することが確認される。さらに入力波の加速度振幅が大きくなると、静止摩擦力を上回る地震時慣性力が作用し、摩擦振子がコンクリート滑り面上を運動するようになり、動摩擦係数 (< 静摩擦係数) に相当する応答加速度が上部工に生じている。

図-14 には、中型・大型橋梁模型を用いた一連の実験において、震動台上で観測された地動最大加速度 (PGA) と上部工位置で生じた最大加速度の比較を示す。ある一定以上の加速度入力に対して、提案構造では加震力に関係なくほぼ一定の応答加速度が生じており、2. (1) に示した滑りのメカニズムは、供試体寸法によらず発揮されることが確認できる。なお、図-14 の上部工最大加速度は、静止している

摩擦振子が動き出す際に観測されており、静止摩擦力に相当している。

### (2) 表面強化材と滑り性能

目標最大加速度 1g を持つ波を連続载荷して得られた実験結果のうち、载荷 1 回目と 5 回目の载荷から得られた水平荷重-水平変位関係を図-15 に示す。図-15 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。中型橋梁模型においては、1 回目と 5 回目の载荷で概ね同様の最大滑り変位、および最大荷重が得られ、滑り面に目立った損傷は確認されなかった。大型橋梁模型においては、連続载荷の過程で斜面角度変化点付近において表面強化材の剥離が生じ、その結果として 1 回目の载荷で得られた最大滑り変位に比べて 5 回目の载荷時に生じた値は減少した。一方で、最大荷重に関しては、1 回目と 5 回目の载荷で概ね等しい値が得られた。また、静止摩擦力由来の荷重増加が载荷 5 回目においても原点付近で生じることから、本機構の滑り性能は複

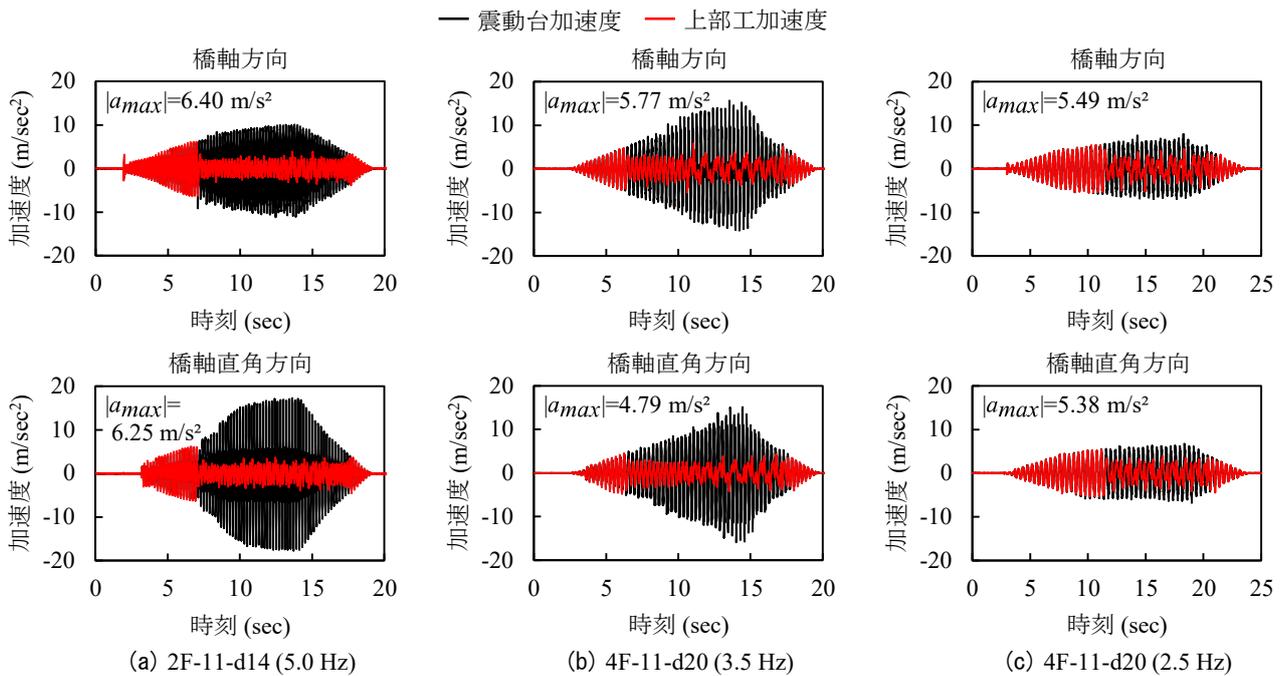


図-13 震動台と上部工位置で観測された加速度時刻歴の比較

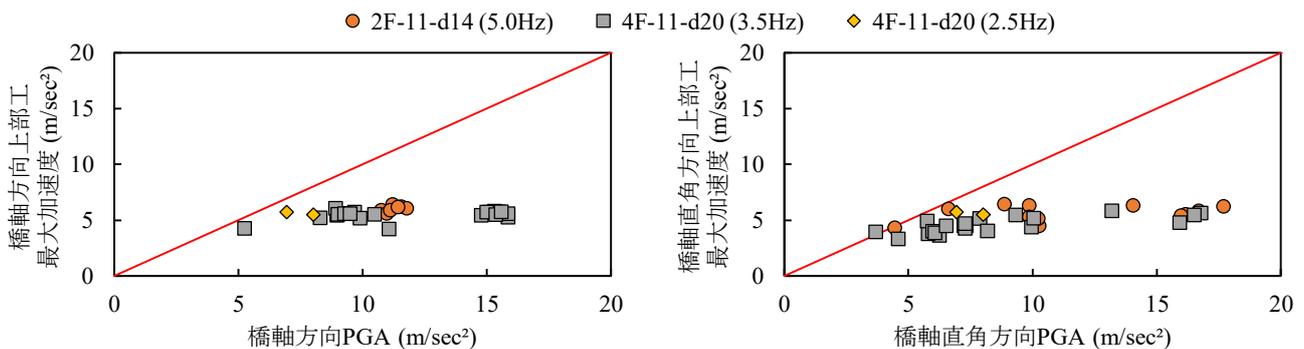


図-14 PGA と上部工最大加速度の関係

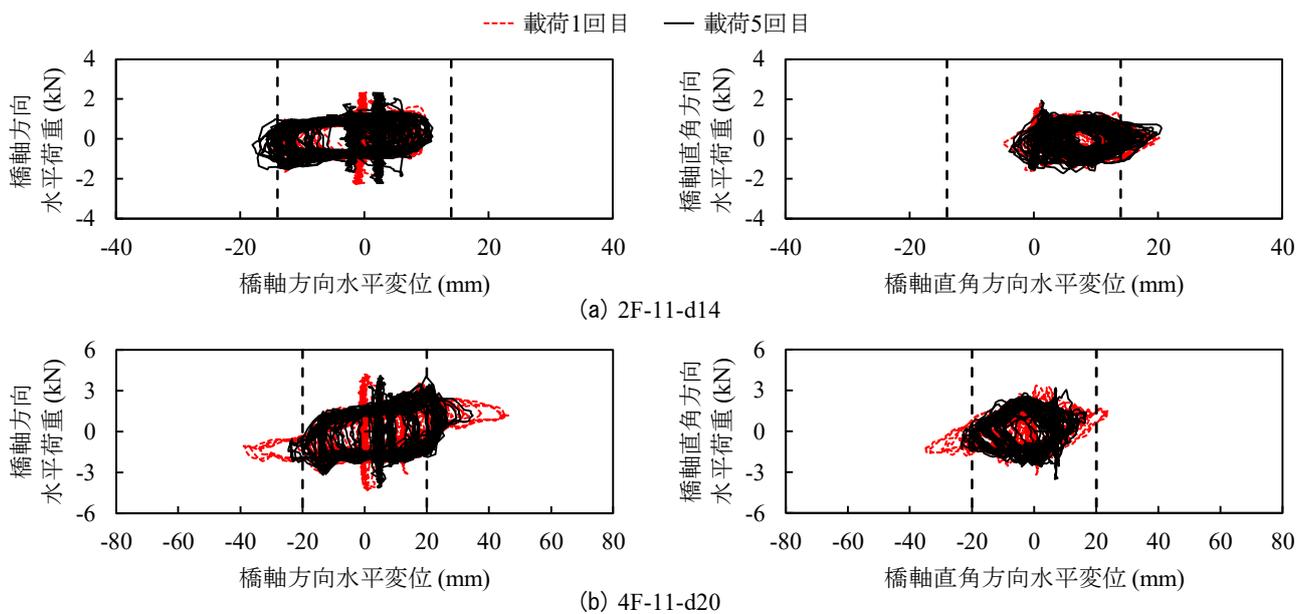


図-15 水平荷重－水平変位の比較（連続載荷1回目と5回目）

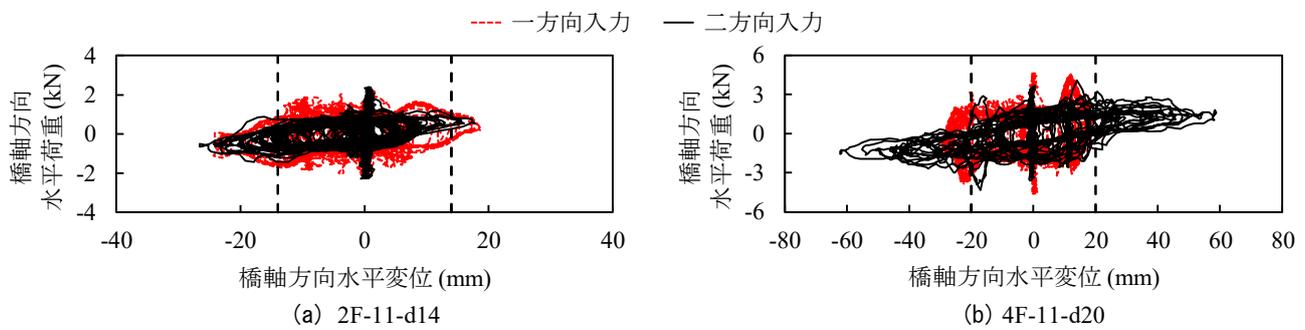


図-16 水平荷重－水平変位の比較（一方向入力と二方向入力）

数回載荷を受ける場合でも、大きく低下することはないことが確認できた。

提案構造の耐用期間内で、これほどの滑りを生じさせる地震動が複数回発生する可能性は小さいことを考えると、本実験で用いた表面強化材によってコンクリートの摩耗は十分に防ぐことができ、滑り性能は確保されていると考える。ただし、その耐久性や想定する地震動の回数などによっては、他の材料の使用も検討する必要がある、表面強化材の選択は今後も継続して行いたい。

### (3) 供試体寸法の影響評価

#### a) 水平荷重－水平変位関係

図-16 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-16 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。図-16 (b) に示されるように、摩擦振子が平坦な底面から斜面に近づく（橋軸方向水平変位±15 mm 近辺）、水平荷重が大きく増加している。これは摩擦振子の一端が斜

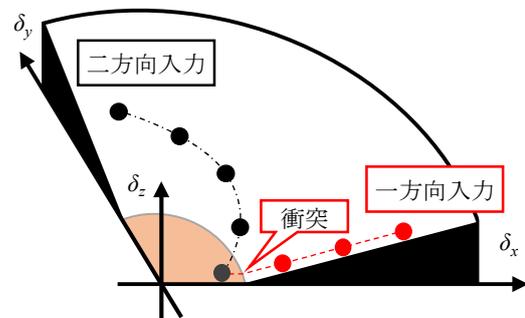


図-17 摩擦振子の運動の概念図

面に当たる際（衝突）に生じるものである。そして、増加の程度は、二方向入力よりも一方向入力で顕著となり、このことが一方向入力の際の応答変位が二方向入力よりも小さくなっている原因である。一方向入力の方が水平荷重の増加が大きいのは、図-17 に示すように、摩擦振子が斜面に突入するときの入射角が二方向入力よりも一方向入力が大きくなり、衝突の影響を受けやすいためである。

小型模型、および図-16 (a) に示す中型橋梁模型では、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。本機構と同様に水平面と斜面で構成される UPSS 支承の研究では、上部工重量を 10 t としたときに静止摩擦力の約 6 倍の衝突荷重の発生が報告されている<sup>21)</sup>。本研究で用いた橋梁模型の大きさでは、図-14 に示したように、生じる最大加速度は静止摩擦力によって決まっており、滑り出した後の応答加速度はそれを下回り、応答加速度の低減効果に寸法依存性は確認されていない。しかし、より大型の供試体を用いた場合には、衝突の影響が顕著となり、応答加速度の低減効果を失わせてしまう可能性がある。その場合には、斜面角度を小さくして衝突の影響を緩和する必要があり、参考文献 10) で同定された最適形状の修正が必要となる。衝突の影響評価については、今後、さらなる実験的検証が求められる。

### b) 残留変位

2F-11-d14 供試体と 4F-11-d20 供試体に対して、目標最大加速度を 0.5g~1.8g まで変化させた入力波を用いた二方向震動実験により得られた残留変位の大きさを図-18 に示す。図中、色を付けている部分は、可動半径  $d$  (図-3 参照) を半径とする底面領域である。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-18 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、斜面角度 11 度かつ可動半径が摩擦振子半径に等しい滑り面を有するとき、残留変位の値は可動半径  $d$  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っている。地震後に生じる残留変位は、本機構に限らず、通常の RC 橋脚を対象とする場合でもその発現メカニズムは複合的な要因に支配され、推定には大きなばらつきを伴う<sup>3), 4)</sup>。限られた実験供試体を用いた検討ではあるが、斜面角度 11 度かつ可動半径が摩擦振子半径に等しい滑り面を有するように設計すれば、寸法に関係なく、摩擦振子は自由震動後に底面領域に戻る可能性が示されたことは、地震後の即時の供用開始を目指す本構造にとって極めて有益な実験成果である。

### c) 摩擦係数

摩擦係数は材料や表面状態の影響を受け、速度や面圧に依存することが知られている<sup>18), 22)-24)</sup>。本機構においても、供試体寸法の大型化に伴う上部工の滑り速度や質量の増加が摩擦係数に及ぼす影響を検討する必要がある。

4F-11-d20 供試体から得られた摩擦係数と滑り速度の関係を図-19(a) に示し、また、面圧の影響を見るため、4F-11-d26 供試体と 4F-11-d30 供試体の結果

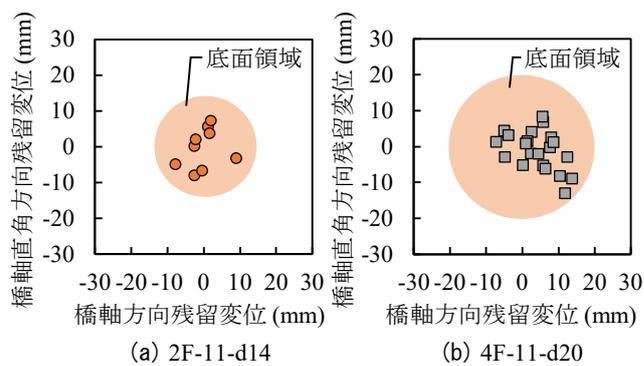
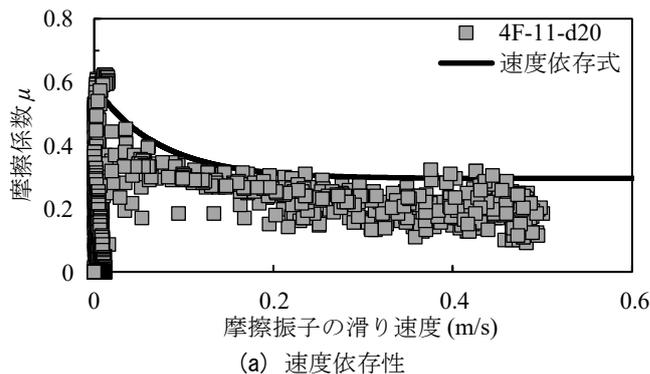
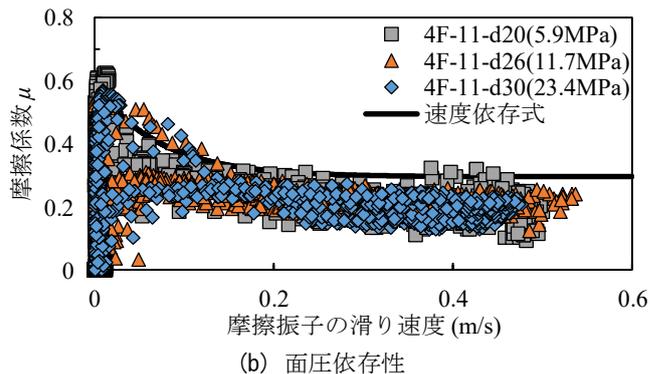


図-18 残留変位



(a) 速度依存性



(b) 面圧依存性

図-19 摩擦係数と滑り速度の関係

を重ねたものが図-19(b)である。図-19 の各点は、衝突の影響を除くため、摩擦振子が底面領域を運動するときの実験データ (サンプリング間隔: 0.005 秒) をプロットしている。

図-19 には、すべり方式免震システムの研究で実験的に導出された以下の岡本ら<sup>18)</sup>の速度依存性を併せて示している。

$$\mu(V) = a\mu_{max} + b\mu_{max} \exp(-n'|V|) \quad (6)$$

ここに、 $\mu(V)$ : 速度依存性を考慮した摩擦係数、 $\mu_{max}$ : 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、 $n'$ : 速度依存性を規定する定数である。式(6)を図-19 に適用する際には、 $a = 0.5$ 、 $b = 0.5$ 、 $n' = 15$  とした<sup>18)</sup>。

図-19(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を有している。

また、図-19(b)より、本機構の摩擦係数は、面圧の増加に伴って減少する面圧依存性が確認される。摩擦係数の減少に伴い、4F-11-d26 供試体において4F-11-d20 供試体よりも大きな速度が生じている。一方で、滑り速度が約 0.2 m/s を超えると、面圧によらず摩擦係数は 0.3 程度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(6))により評価可能と思われる。

#### (4) 最大滑り変位と残留変位の簡易推定式

##### a) 概説

摩擦振子型免震機構を有する RC 橋脚の耐震設計では、想定地震動により生じる最大滑り、および残留変位の大きさを推定する必要がある。ここでは、非線形時刻歴動的解析などではなく、入力波の強度(最大速度)からエネルギー保存則に基づいて最大滑り変位を推定する。また、残留変位に関しては、前記したように、斜面角度 11 度かつ可動半径が摩擦振子半径に等しい滑り面を有するように設計すれば、最大でも、その値は可動半径  $d$  に収まることを確認した。残留変位の実験値は、極めてばらつきが大きいですが、ここでは、統計分析により、代表的なパーセンタイル値に対する残留変位を算定するための分位点回帰分析を行う。

##### b) 最大滑り変位

摩擦振子が底面から斜面を登り、最大滑り変位に達する過程の模式図を図-20 に示す。摩擦振子が有する運動エネルギー  $E_k$  は、摩擦によるエネルギー損失  $E_f$ 、衝突によるエネルギー損失  $E_i$  を受けつつ、位置エネルギー  $E_p$  に変換される。この過程は、以下の式で表される。

$$E_p = E_k - E_f - E_i \quad (7)$$

$$E_p = m_1 g \tan \theta (\delta_{max,e} - d) \quad (8)$$

$$E_k = \frac{1}{2} m_1 (v_1 - v_2)^2 = \frac{1}{2} m_1 v_r^2 \quad (9)$$

$$E_f = \mu_k m_1 g \delta_{max,e} \quad (10)$$

$$E_i = \frac{1}{2} m_1 (v_1^2 - v_1'^2) + \frac{1}{2} m_2 (v_2^2 - v_2'^2) \quad (11)$$

ここに、 $\delta_{max,e}$  : 最大滑り変位の実測値、 $d$  : 可動半径、 $\mu_k$  : 動摩擦係数、 $m_1$  : 上部工質量、 $v_1$  : 衝突前の上部工速度、 $v_1'$  : 衝突後の上部工速度、 $m_2$  : 橋脚と震動台の質量、 $v_2$  : 衝突前の震動台速度、 $v_2'$  :

衝突後の震動台速度、 $v_r$  : 衝突前の上部工相対速度、である。

実験で得られた  $\delta_{max,e}$ 、 $v_r$ 、および  $\mu_k$  から、 $E_k$ 、 $E_f$ 、 $E_p$  をそれぞれ算出し、式(7)を用いて非弾性衝突によるエネルギー損失  $E_i$  を評価した。この際、 $E_k$  に対する各エネルギーの比  $E_f/E_k$ 、 $E_i/E_k$ 、および  $E_p/E_k$  の平均はそれぞれ 0.70、0.15、および 0.15 であった。

本実験において、上部工の質量は、橋脚と震動台の質量に比べて小さいことから、式(11)は、反発係数  $e$  を用いた次式に変形できる。

$$e = - \frac{v_1' - v_2'}{v_1 - v_2} \quad (12)$$

$$E_i \doteq (1 - e^2) \frac{m_1 m_2 (v_1 - v_2)^2}{2(m_1 + m_2)} \doteq (1 - e^2) \frac{m_1 v_r^2}{2} \quad (13)$$

本検討では、 $v_r$  に上部工相対速度の最大値を代入することで、最大滑り変位に対応する反発係数が寸法によらず 0.92 であると同定した。よって、最大滑

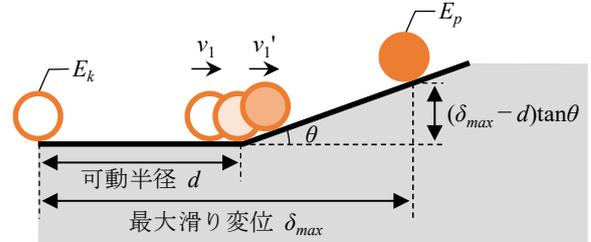
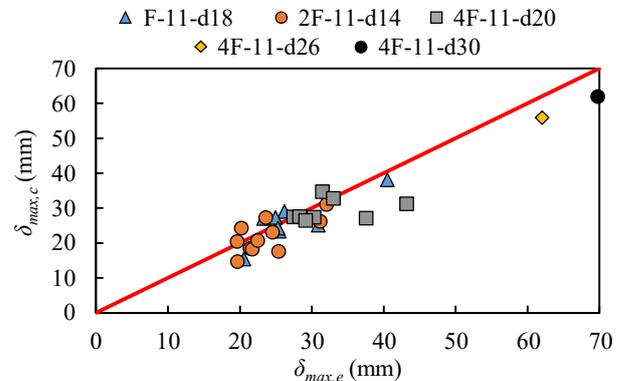
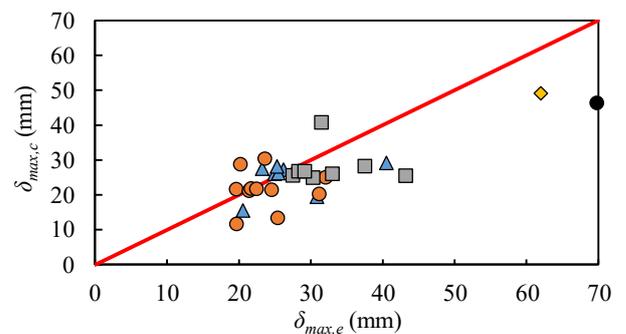


図-20 摩擦振子の運動の模式図



(a) 上部工相対速度の最大値を用いた場合



(b) 震動台最大速度を用いた場合

図-21 最大滑り変位の算定結果

り変位の計算値  $\delta_{max,c}$  は式(14)により求まり、その簡易推定式は式(15)で表される。

$$\delta_{max,c} = \frac{E_k - \mu_k m_1 g \delta_{max,c} - E_i}{m_1 g \tan \theta} + d \quad (14)$$

$$\delta_{max,c} = \frac{e^2 v_r^2}{2g(\mu_k + \tan \theta)} + \frac{d \tan \theta}{\mu_k + \tan \theta} \quad (15)$$

図-21(a)に、最大滑り変位の実測値と計算値の関係を示す。図-21(a)を得る際、 $v_r$ には震動実験で得られた上部工相対速度の最大値を用いており、これにより、生じる最大滑り変位を概ね推定可能であることが確認される。

一方、相対速度  $v_r$  を時刻歴解析を行うことなく求めるため、ここでは、震動台最大速度 (PGV) と提案構造に生じる上部工相対速度の関係式を以下のように単純化した。

$$v_r = PGV / \alpha \quad (16)$$

ここに、 $\alpha$  : 震動台最大速度 (PGV) と上部工相対速度の関係を規定する定数である。

参考文献 10)、および本実験で得られた PGV と  $v_r$  の関係を整理すると、概ね線形関係が確認され、 $\alpha=0.85$  が同定された。この  $\alpha$  を用いることで、PGV から直接、最大滑り変位の算定が可能になる。このときの結果を図-21(b)に示す。 $v_r$  に実験値を用いた場合に比べて、式(16)を用いるため精度が低下しているものの、提案構造に生じる最大滑り変位の大小の予測は可能である。

### c) 残留変位

自重による復元力は斜面上の変位の大きさに依存することに着目し、最大滑り変位と残留変位の関係を整理した。結果を図-22 に示す。縦軸は、最大滑り変位  $\delta_{max}$  に対する残留変位  $\delta_{res}$  の比であり、復元力の指標となる。横軸は、可動半径  $d$  に対する最大滑り変位  $\delta_{max}$  の比であり、入力波に対する応答の指標となる。図-22 より、 $\delta_{max}/d$  の値が 1 前後となる入力波に対して、復元力は小さいことが確認できる。これは、摩擦振子の変位が可動半径以下のとき、自重による復元力が生じないためである。一方、 $\delta_{max}/d$  の値が 2 を超える入力波に対しては、大きな復元力が見込まれることが確認できる。

さらに、各供試体の残留変位の分布が正規分布に従うと仮定し、図中には、残留変位の 90 パーセントイル値をターゲットとした分位点回帰<sup>25)</sup>による以下の式を赤線で併せて示している。

$$\frac{\delta_{res,c}}{\delta_{max,c}} = 0.79 \left( \frac{\delta_{max,c}}{d} \right)^{-0.94} \quad (17)$$

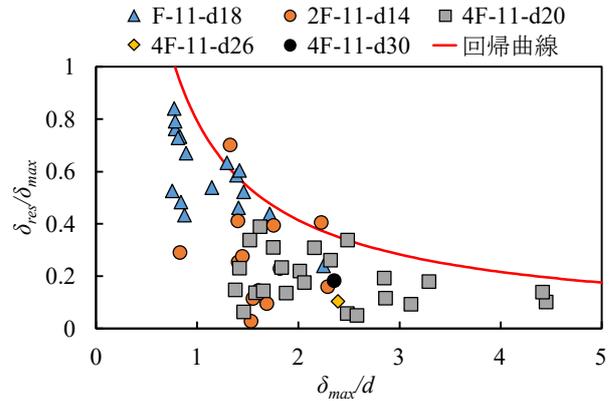


図-22 最大滑り変位と残留変位の関係

式(17)は、可動半径と最大滑り変位で残留変位を定義している。前記の検討を踏まえると、上部工相対速度  $v_r$  が求められれば、式(15)より最大滑り変位  $\delta_{max,c}$  が求まる。得られた  $\delta_{max,c}$  を式(17)に代入することで、残留変位  $\delta_{res,c}$  が推定され、その値は実験値を 90% の確率で包含する。

以上より、本機構は可動半径を上回る最大滑り変位をもたらす地震動の作用下では、寸法によらず残留変位の抑制が可能であり、残留変位の最大値は上部工相対速度、および最大滑り変位から概ね推定可能であることが示された。

## 5. 結論

摩擦振子型免震機構を有する中型・大型橋梁模型に対する震動実験を実施し、本機構の実橋梁への適用に向けた基礎検討を行った。本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 構造形態を工夫することで、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、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。本機構は 3D プリンターを活用することで、複雑な形状を有する滑り面をコンクリートにより低コストで製作することができる。また、その性能は入力波の周期特性によらず発揮されることを確認した。
- 2) 提案構造に生じる上部工加速度は、供試体寸法に依存せず、また、入力地震動の大きさに関係なく、静止摩擦係数に応じて低減される。
- 3) 提案構造に生じる残留変位は、摩擦振子と滑り面の形状を工夫することで、寸法によらず滑り面の底面領域内に生じさせることができる。
- 4) 摩擦振子の接地面が変化する際の衝突荷重は、供試体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。

- 5) 本機構における摩擦係数は、供試体寸法と摩擦振子の滑り速度に依存することが確認された。ただし、摩擦係数の変化は、既存式により推定可能であることを確認した。
- 6) 想定する入力地震動の地動最大速度を与条件とした、最大滑り変位、および残留変位の簡易算定式を提示した。提案式を用いることにより、生じ得る最大滑り変位や残留変位の大よその推定は可能であるが、推定精度の改善が引き続き必要である。今後、非線形時刻歴解析などにも取り組みたい。

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

- 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, No.732/V-59, pp.27-38, 2003.
- 2) 幸左賢二, 小川敦久, 合田寛基, 脇田和也: 高靱性セメント巻き立て厚に着目した耐震補強実験, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1024-1035, 2009.
- 3) 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.
- 4) 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分析, 第 25 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.909-912, 1999.
- 5) Bruneau, M., Chang, S.E., Eguchi, R. T., Lee, G.C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A.M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W.A. and von Winterfeldt, D.: A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities, *Earthquake Spectra*, Vol.19, No.4, pp.733-752, 2003.
- 6) 本田利器, 秋山充良, 片岡正次郎, 高橋良和, 野津厚, 室野剛隆: 「危機耐性」を考慮した耐震設計体系一試案構築に向けての考察一, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.72, No.4 (地震工学論文集第 35 巻), pp.I 459-I 472, 2016.
- 7) 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.
- 8) 脊戸鉄太, 服部琳太郎, 石垣直光, 末崎将司, 秋山充良: 水平二方向入力を受ける摩擦振子型免震機構付き柱の震動実験, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.385-396, 2017.
- 9) 市川義高, 服部琳太郎, 脊戸鉄太, 石垣直光, 末崎将司, 秋山充良: 球面状滑り面を有する摩擦振子型免震機構付き橋梁の二方向震動実験, 第 20 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.331-334, 2017.
- 10) Brito, M. B., Akiyama, M., Ichikawa, Y., Yamaguchi, H., Honda, R., 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.
- 11) Tsopelas, P., Constantinou, M. C., Kim, Y. S. and Okamoto, S.: Experimental study of FPS system in bridge seismic isolation, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.25, No.1, pp.65-78, 1996.
- 12) Imbsen, R. A.: Use of isolation for seismic retrofitting bridges, *Journal of Bridge Engineering*, Vol.6, No.6, pp.425-438, 2001.
- 13) 独立行政法人土木研究所と民間 8 社による共同研究報告書: すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法の開発に関する共同研究報告書「すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計法マニュアル(案)」, 共同研究報告書整理番号第 351 号, 2006.
- 14) 川島一彦, 梶原浩一: E-ディフェンスを用いた実大橋梁の震動実験研究プロジェクト, コンクリート工学, Vol.47, No.11, pp.9-15, 2009.
- 15) 幸左賢二, 小林和夫, 村山八洲雄, 吉澤義男: 大型 RC 橋脚模型試験体による塑性変形挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.538/V-31, pp.47-56, 1996.
- 16) 川島一彦, 佐々木智大, 右近大道, 梶原浩一, 運上茂樹, 塚淳一, 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.
- 17) 気象庁強震観測データ: <https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/index.html> (2020 年 5 月 9 日閲覧)
- 18) 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.
- 19) 日本道路協会: 道路橋の耐震設計に関する資料, 1997.
- 20) 石橋寛樹, 金井晴弘, 秋山充良, 小野潔, 坂柳皓文: 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, 第 17 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.477-480, 2014.
- 21) 五十嵐晃, 森本慎二, 加地淳志, 樋口匡輝, 足立幸郎, 河内山修, 佐藤知明: 反重力すべり支承の動的挙動の振動台実験による検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.65, No.1 (地震工学論文集第 30 巻), pp.426-433, 2009.
- 22) 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.

- 23) 遠藤和男, 岡田太賀雄, 運上茂樹 : すべり系支承を有する免震橋梁の振動台実験, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.3, pp.396-410, 2007.
- 24) 榎田竜太, 池永昌容, 長江拓也, 中島正愛 : 鋼とモルタルのすべり面をもつ柔・剛構造物の動摩擦特性と地震応答特性, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.661, pp.527-534, 2011.
- 25) Cardone, D., Gesualdi, G., Brancato, P. : Restoring capability of friction pendulum seismic isolation systems, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol.13, pp.2449-2480, 2015.

(Accepted ?)

SHAKING TABLE TEST TO INVESTIGATE THE SIZE EFFECT  
ON DYNAMIC BEHAVIOR OF RC COLUMNS  
WITH A LOW-COST SLIDING SYSTEM FABRICATED BY 3D PRINTER

Hiroki KASHIYAMA, Qian CHENG, Miguel B. Brito,  
Naomitsu ISHIGAKI, Mitsuyoshi AKIYAMA and Riki HONDA

To ensure the seismic resilience of bridges with a low-cost solution, a novel friction isolation system has been developed based on the traditional friction pendulum system. The proposed system possesses a spherical flat-inclined concrete surface with the aid of three-dimensional (3D) printer. Concrete surface was lubricated with resin material to prevent abrasion from multiple-input ground motions. In this study, size effect on dynamic behavior of the proposed bridge under bidirectional ground motion was investigated by shaking table test. Experimental results demonstrate that independent of specimen size, response acceleration reduction and small residual displacement could be observed due to the combination of flat and inclined shapes. In addition, simplified method to estimate seismic demand (i.e. maximum response displacement and residual displacement) of proposed system was presented.