

# 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

## KINEMATIC FRICTION AND SEISMIC RESPONSES OF FREE STANDING STEEL STRUCTURES ON MORTAR BASE

榎田 竜太\*, 池 永昌容\*\*, 長江 拓也\*\*\*, 中島 正愛\*\*\*\*

*Ryuta ENOKIDA, Masahiro IKENAGA, Takuya NAGAE  
and Masayoshi NAKASHIMA*

Under large earthquakes, the first floor columns sustain severe damage and these damages may cause collapse in the first floor. To decrease the damage of the columns, free standing structures whose first floor columns are not fixed are a choice. The seismic response of the structure is greatly influenced by the kinematic friction at the base. This paper studies the kinematic friction between steel and mortar, which are widely used in construction. Two shaking table tests were conducted by putting a rigid structure or flexible structure on a mortar base. The test results showed that stick-slip phenomenon changed the kinematic friction greatly. A parametric study for a free standing structure subjected to ground motions showed that types of kinematic friction affected the sliding displacement, but it was not so influential to the damage of structures.

**Keywords:** shaking table test, steel and mortar, kinematic friction, velocity dependency, stick-slip phenomenon

振動台実験, 鋼とモルタル, 動摩擦, 速度依存性, スティックスリップ現象

### 1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震においては、鋼構造物の1階柱脚の被害が多数報告された<sup>1)</sup>。大地震時において、露出柱脚にはアンカーボルトの破断をとまなう重度の被害が生じ<sup>2,3)</sup>、埋込固定柱脚においても高軸力状態において塑性回転を被れば、その損傷は著しい<sup>4,5)</sup>。建物を考えるとき、梁崩壊メカニズムを呈していても、1階柱脚に強度低下が生じると、1階の層崩壊メカニズムを誘発し建物としての耐震性を大きく減じることになる<sup>6)</sup>。その一方で、基礎と柱脚など建物の基礎部分が一定の条件下で変形することで、上部構造物の損傷が抑制されるという指摘もある<sup>7-9)</sup>。既存鋼構造柱脚の諸問題を踏まえつつ、鋼構造物の新たな可能性を考えると「露出柱脚を基礎に置くだけという条件を利用した損傷抑制型鋼構造物を実現できれば」という着想が生まれる。本研究では、中低層の鋼構造物を対象とし、鋼製柱脚と基礎モルタル間の摩擦で一定のせん断力を負担し、最大静止摩擦係数に相当するせん断力を上まわる地震外力に対して柱脚はすべり、上部構造物部材の損傷が抑制されるという機構の実現をめざす。

その端緒として、筆者らは、摩擦特性に関する実験を実施してきた。静止摩擦係数に関しては、露出柱脚ベースプレートと基礎モルタル間に対する静的繰返しせん断実験<sup>9)</sup>を実施し、すべりの繰返しに関わらず、最大静止摩擦係数は0.7~0.8程度であることを確認している。また、提案する構造形式では、すべることで上部構造物の

損傷が低減されても、過大なすべり変位によって配管類を含むライフラインの破壊<sup>10)</sup>や擁壁への衝突が生じかねない。このような建物に対しては免震建物と同様にすべり最大変位・すべり速度の検討が必要であり、その検討には動摩擦特性の設定が重要となる。そこで、動摩擦特性に関して、剛体コンクリート錘に鋼製柱脚を取り付けた振動台実験<sup>11)</sup>を実施し、すべり最大速度0.1 m/s以下においては鋼とモルタル間の動摩擦係数がほぼ一定であることを確認している。しかし、トライボロジー分野では、多くの場合、すべり速度が動摩擦係数に影響すると認識されており<sup>12)</sup>、鋼とモルタルの動摩擦特性も大速度領域においては大きく変わる可能性が高い。

本研究では大速度領域における鋼とモルタル間の動摩擦特性の検証を目的とし、先の振動台実験の10倍以上のすべり速度(1m/s)を想定した振動台実験を行う。この振動台実験では剛体と弾性体の二種類によって上部構造物を模擬し、それらの構造物下における鋼とモルタル間の動摩擦特性を検討する。また、本論の後半においては、建物モデルに動摩擦特性を反映した地震応答解析から、上部構造物の損傷とすべりの最大変位の傾向を概観することによって、本研究の目的である新構造形式の実現への布石とする。

### 2. 剛体試験体を用いた振動台実験

#### 2.1 実験条件

上部構造物には、図1のような剛体とみなせるコンクリート錘を

\* 京都大学大学院工学研究科 大学院生・修士(工学)  
(日本学術振興会特別研究員 DC)

\*\* 東北大学大学院工学研究科 助教・博士(工学)

\*\*\* 独立行政法人防災科学技術研究所

主任研究員・博士(工学)

\*\*\*\* 京都大学防災研究所 教授・Ph. D.

Graduate Student, Graduate School of Engineering, Kyoto University, M. Eng.  
(JSPS Research Fellow)

Assistant Prof., Graduate School of Engineering, Tohoku University, Dr. Eng.

Senior Researcher, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Eng.

Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Ph. D.

用いる。両者の4隅角部をPC鋼棒で圧着し、鋼製フレームの4隅角底部に柱脚部をボルトで取り付け、上部構造物から生じる鉛直力と水平力を柱脚底部まで伝達する。コンクリートスラブと鋼製平面フレームの合計重量は77.8 kNである。上部構造物の接触面には鋼材を、もう一方の接触面にはモルタルを用い、そのモルタルはH型鋼台座によって支持される。材料試験によるモルタルの圧縮強度は35 N/mm<sup>2</sup>である。上部構造物の接触面の鋼材は、図2に示す鋼製箱型支持要素によって覆われ、鋼材接触要素によって支持される。また、基礎モルタルの摩擦面が75 mm×75 mmの正方形断面となるように鋼材接触要素を加工しており、摩擦面に接触する4個の鋼材接触要素の平均面圧は3.7 N/mm<sup>2</sup>である。

振動台に対して水平方向可振とし、入力波は1 Hz 正弦波を基本とする。入力波の振幅に対しては、すべり速度が1 m/sを超えるように振幅を調整する。すべり速度は、計測時間刻み(0.01 秒)において測定されたすべり変位の増分から計算する。摩擦係数は、柱脚に作用する水平せん断力をその上の全重量で除した値である。

## 2.2 実験結果

1 Hz 正弦波(振幅 12 m/s<sup>2</sup>)を剛体試験体に入力した実験結果を図3に示す。図3(a)はすべり変位の時刻歴波形である。最初の5秒ほどはすべりが一方方向に集中する傾向にあり、変位が約0.5 mに達している。その後は、約0.25 mの振幅で定常的なすべりを示している。図3(b)は摩擦係数とすべり変位の関係である。摩擦係数が約0.8のときにすべり出し、すべりの進行とともに摩擦係数が0.3程度まで減少している。すべり止るときには再び0.8付近まで回復している。図3(c)は摩擦係数とすべり速度の関係である。すべり始めてから速度が上昇するにつれて摩擦係数が減少することが分かる。すべり速

度が約0.5 m/sにおいて摩擦係数が0.4程度まで減少し、すべり速度1 m/s以上では約0.3を保持している。すべり出した直後における摩擦係数の低下が比較的顕著で、その後、変化は鈍くなり、そして、速度が増える過程(加速過程)と速度が減る過程(減速過程)においては、ほぼ同じ軌跡を通過する、という特徴を有している。

## 2.3 摩擦力の数値解析モデル

### (a) 動摩擦係数の速度依存性

動摩擦係数には、図4に示すように最大静止摩擦係数 $\mu_s$ から定常動摩擦係数 $\mu_d$ への移行が連続的に進み、低速度領域から速度の増大にともなって摩擦係数は次第に低下し、定常動摩擦係数に落ち着くという速度依存性が一般に認められている<sup>13,14)</sup>。このような動摩擦特性は、一般に式(1)で表され<sup>15)</sup>、本論ではこのモデルを弾性速度依存モデルと称す。

$$|\mu(v)| = \mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-\gamma|v|} \quad (1)$$

$\mu_s$ : 最大静止摩擦係数,  $\mu_d$ : 定常動摩擦係数,  $\gamma$ : 動摩擦係数の速度依存性を決めるパラメータである。すべる剛体に対して弾性速度依存モデルの動摩擦特性を用いると、その運動方程式は式(2)となる。また、微小速度においては式(3)が成り立つ。

$$m(\ddot{x} + \ddot{x}_g) + mg\{\mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-\gamma\dot{x}}\} = 0 \quad (2)$$

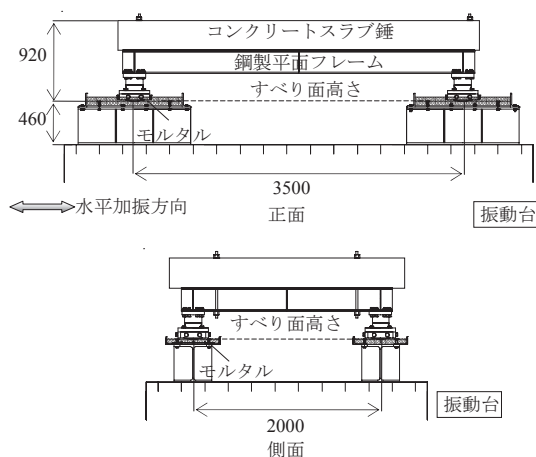


図1 剛体試験体の立面図(単位:mm)

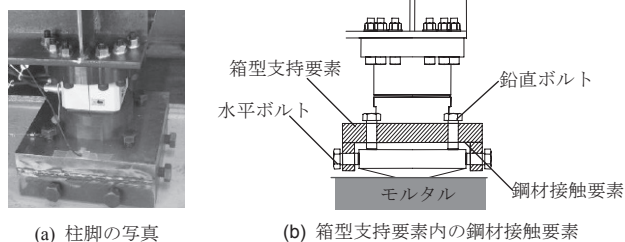


図2 基礎接触面詳細

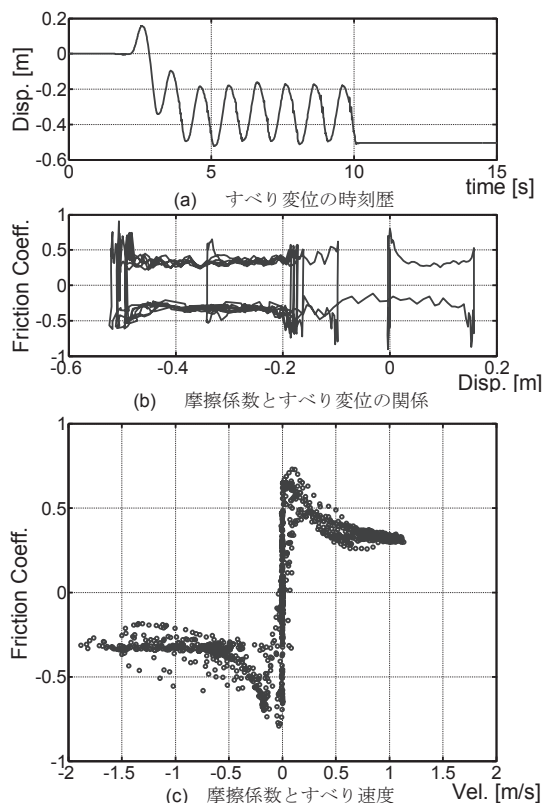


図3 剛体試験体を用いた振動台実験

$$m(\ddot{x} + \ddot{x}_g) + mg\mu_s - mg(\mu_s - \mu_d)\gamma\dot{x} = 0 \quad (3)$$

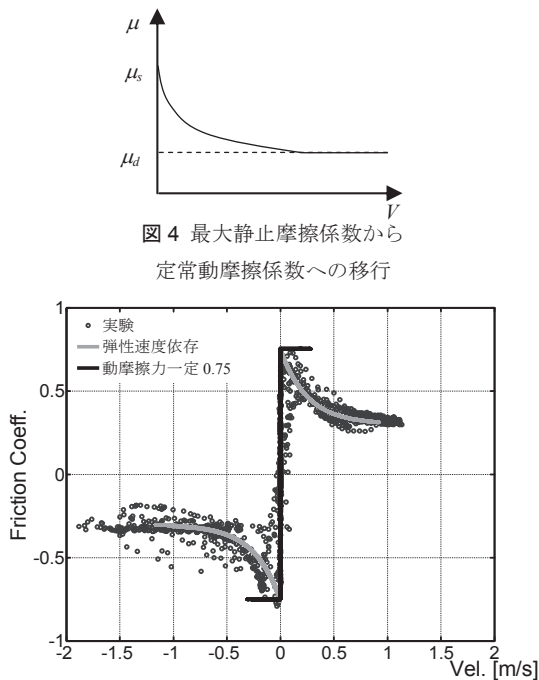
$$(\because e^{-\gamma\dot{x}} \approx 1 - \gamma\dot{x})$$

$m$ : 質量,  $g$ : 重力加速度,  $x$ : 相対変位,  $x_g$ : 地動変位, である。図4のような斬減型の速度依存性を示す場合に、最大静止摩擦係数  $\mu_s$  は定常動摩擦係数  $\mu_d$  よりも大きくなるため、式(3)における速度項の係数は負となる。式(3)の定数項がすべりを抑える力として安定的に作用していることから、剛体はいずれ停止するが、負の減衰力は相対的に運動を増進させる力が作用しているとみなせる。また、負の減衰を持つ系に剛性が付与されることで振動系が成立すると、不安定な振動現象である自励振動<sup>10)</sup>を生じる場合がある。

#### (b) 実験結果の再現

数値解析では、最大静止摩擦係数 0.75 に相当するすべりをバネ剛性 2940 kN/mm と弾制限変位 0.001 mm に設定したバイリニア型の完全弾塑性モデルで表現する。このときのバネ剛性に対する固有振動数は 430Hz となり、近似的に剛塑性として見なせる。本論では、このモデルを動摩擦係数一定モデルと称す。弾性速度依存モデルに対しては、実験結果を参照して、最大静止摩擦係数  $\mu_s$  と定常動摩擦係数  $\mu_d$  を決定し、動摩擦係数の減少度合いを支配するパラメータ  $\gamma$  を実験結果(図5)に添うように決定した。ここでは、弾性速度依存モデルの各係数を  $\mu_s=0.75, \mu_d=0.35, \gamma=4$  に設定する。両モデルに対する数値解析において、入力波は実験時に振動台上で計測された加速度を用いる。

この数値解析で得られる摩擦係数とすべり速度の関係を実験結果とともに図5に示す。最大静止摩擦係数を 0.75 とする動摩擦係数一定モデルにおいて、その最大速度は実験結果の 1/5 程度にとどまる。一方、弾性速度依存モデルは、実験結果の摩擦係数とすべり速度の関係をとりえており、最大すべり速度は実験結果(1.5 m/s)に対し



て 1.2 m/s となる。すべり変位に関する解析結果を図6に示す。図6(a)はすべり変位の時刻歴波形である。弾性速度依存モデルでは、すべり初期段階においては実験結果との差異があるものの、全般的に実験結果をよく再現しており、残留変位も一致している。動摩擦係数一定モデルではすべり振幅が 0.05 m と、実験結果の定常状態となったときのすべり振幅 0.25 m の 1/5 程度になっている。図6(b), (c)は摩擦係数とすべり変位の関係である。動摩擦係数一定モデルの場合、実験結果と履歴形状が大きく異なるのに対して、弾性速度依存モデルでは、動摩擦係数の低下する傾向をよくとらえている。

### 3. 弾性試験体を用いた振動台実験

#### 3.1 実験条件

柔性のある鋼構造建物を模擬するために、図7の各層 1 ton の鋼製フレームと積層ゴムを3段に重ねた弾性試験体を用いる。積層ゴム1基の水平剛性の公称値は 100 N/mm であり、試験体の1次振動数が約 2 Hz (周期 0.5 秒) になるように、1層目に 8 基、2層目に 6 基、3層目に 4 基を配置する。剛体試験体と同じモルタル付 H 型鋼台座は継続して使用する。入力波は、剛体試験体のときと同じく、水平一方向の 1Hz 正弦波である。

#### 3.2 実験結果

ここでは、剛体試験体と同程度のすべり速度に達した、1Hz 正弦波の入力振幅 7 m/s<sup>2</sup> の実験結果を図8に示す。図8(a)はすべりの時刻歴波形である。約 0.15 m の振幅のすべりを繰り返し、片方向に流れている。図8(b)は動摩擦係数とすべり変位の関係である。すべり出すときには摩擦係数が 0.8 程度であるが、すべりの途中には摩擦係数が 0.3 程度まで減少する。ただし、剛体試験体のときに比べれば、動摩擦係数の減少は比較的緩やかである。また、剛体試験体のときには、すべり止る直前に動摩擦係数が 0.8 付近まで回復していたが、本実験結果ではすべり止るときの摩擦係数がおおよそ 0.5 と、

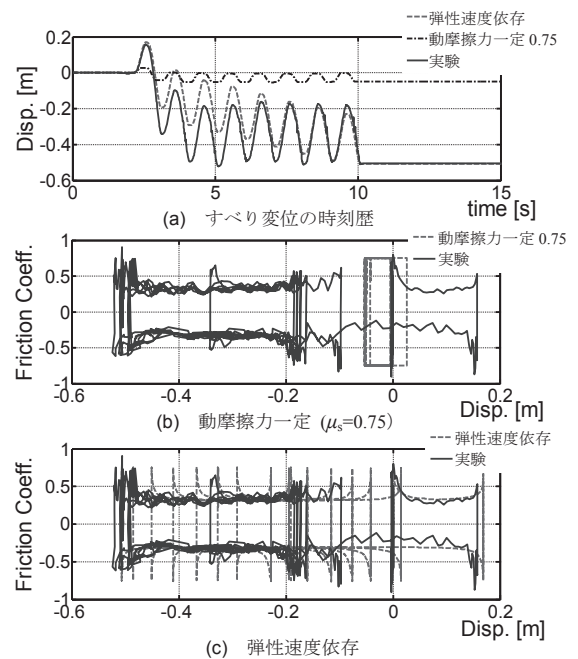


図6 摩擦係数とすべり変位  
(剛体試験体の実験結果と解析結果)

すべり出す動摩擦係数よりも小さくなる。図 8(c)は動摩擦係数とすべり速度の関係である。すべり出してから 0.2 m/s 付近までは動摩擦係数が一定に保たれ、その後、速度の上昇とともに摩擦係数が時計回りに低下している。減速過程においては、摩擦係数は 0.3~0.4 付近で比較的安定した値をとり、すべり止る前では 0.5 程度となっている。

### 3.3 摩擦力の数値解析モデル

#### (a) スティックスリップ現象

上部構造物が剛体から弾性試験体になることで、「すべり止る動摩擦係数はすべり出す動摩擦係数まで回復しない」という特徴が生まれる。この特徴は、負の減衰によって引き起こされる不安定な振動現象（自励振動）の代表例、いわゆるスティックスリップ現象を参照することによって説明できる。スティックスリップ現象のモデルは、図 9 のようにバネ付きの質点を想定し、そのバネ端を徐々に引っ張るというものである。バネが伸びるにつれて復元力が大きくなり、その復元力が最大静止摩擦以下であれば、質点は停止した

ままである。復元力が最大静止摩擦を超えると、質点はすべり、復元力が最大静止摩擦以下、すべり速度がゼロ、という二つの条件を満たすことで質点は止まる。

スティックスリップ現象に関わる実験資料では、本実験における弾性試験体の動摩擦特性と共通する特徴が多数報告されている<sup>15,17-22</sup>。その一般的な動摩擦特性は図 10 に示すように、最大静止摩擦係数を元に、時計回りに摩擦係数が低下し、停止するときには最大静止摩擦係数までに回復しないというものである。これは、スティックスリップ現象のすべり面の物理特性がすべる剛体のときとは異なることを示しており、その差異は漸減型の動摩擦特性における不安定な振動現象に由来している<sup>15,17,18</sup>。そもそも、漸減型の動摩擦特性を持つ場合にスティックスリップ現象が生じるが、このとき、すべり始めにおいては蓄えられた復元力が動摩擦力よりも大きくなり、質点を加速させるように作用する。また、復元力が動摩擦力よりも小さくなると、質点を減速させるように作用する。このように、復元力によってすべり速度が剛体の場合に比べて急激に変化するこ

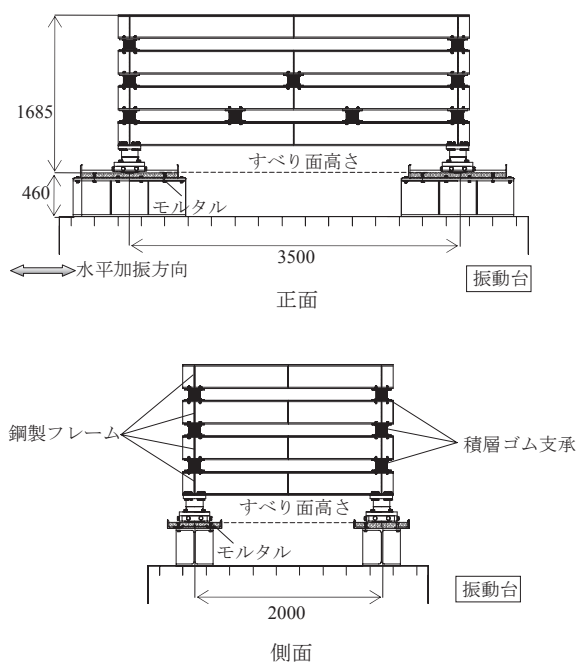


図 7 弾性試験体の立面図（単位：mm）

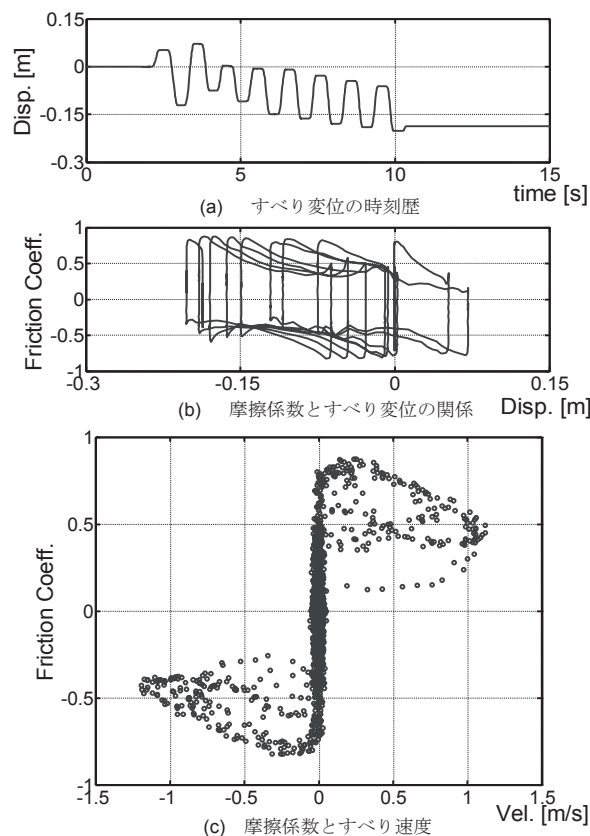


図 8 弾性試験体を用いた振動台実験

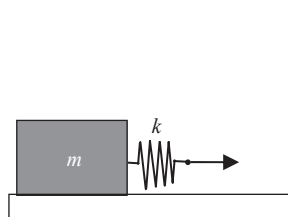


図 9 スティックスリップ現象のモデル

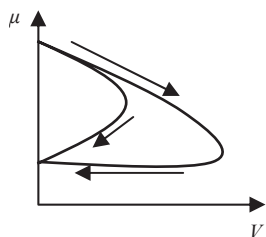


図 10 スティックスリップ現象による動摩擦係数

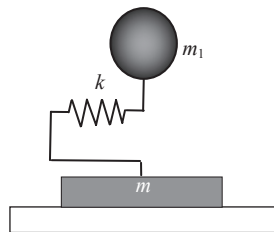


図 11 すべる弾性体の質点モデル

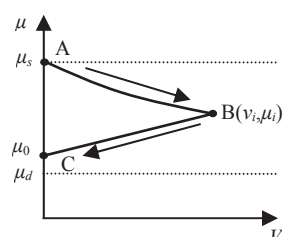


図 12 履歴速度依存モデル

とで、すべり面の変化が相対的に遅れ、加速過程においては最大静止摩擦力を維持するように低下し、減速過程においては緩やかに低下するか、定常動摩擦力を維持するという図 10 の履歴を持つこととなる。

スティックスリップ現象の運動方程式を式(4)に、図 11 のすべる弾性体の運動方程式を式(5)に示す。

$$m(\ddot{x} + \ddot{x}_g) + f_r - kz = 0 \quad (4)$$

$$\begin{cases} m_1(\ddot{x} + \ddot{x}_g) + k(x_1 - x) = 0 \\ m(\ddot{x} + \ddot{x}_g) + f_r - k(x_1 - x) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$m$ : すべる質点の質量,  $x$ : 相対変位,  $x_g$ : 地動変位,  $f_r$ : 摩擦力,  $k$ : バネ剛性,  $z$ : バネ変形,  $m_1$ : 弾性体の質量,  $x_1$ : 弾性体の相対変位, である。式(5)のすべりに関する釣合式に対して,  $z = x_1 - x$  とすれば, スティックスリップ現象の式(4)と一致する。これは, すべる弾性体ではスティックスリップ現象が伴うことを示している。本研究の弾性試験体を用いた実験においても, 上部構造の復元力によってスティックスリップ現象が生じ, 動摩擦係数は速度に対して図 10 のような履歴となった。

#### (b) 履歴速度依存モデル

スティックスリップ現象では不安定な振動現象となり, すべり面の微小な変化が動摩擦特性に大きく影響するので, すべり面の変化を考慮する状態変数を用いたモデルが提案されている<sup>23,24)</sup>。しかし, その状態変数はすべり面に関する詳細な実験に基づいて決められなければならない, そのモデルの適用は容易ではない。そこで, 本研究では, 図 10 の履歴となるということを前提に, スティックスリップ現象の動摩擦特性を速度のみの関数として表現する。図 12 に示す履歴を式(6)によって定義し, これを履歴速度依存モデルと称する。

$$|\mu(v)| = \begin{cases} \mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-\gamma(|v| - v_i)} & \text{加速過程} \\ \mu_0 + Kv & \text{減速過程} \end{cases} \quad (6)$$

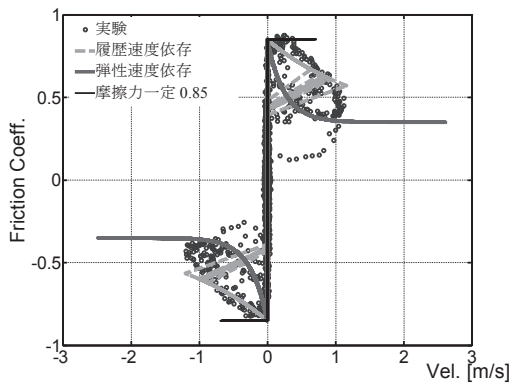


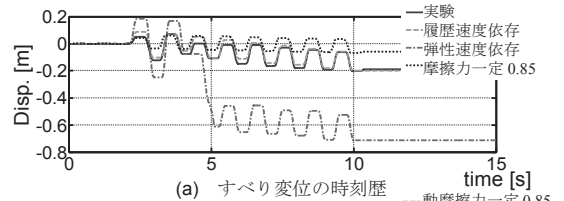
図 13 摩擦係数とすべり速度  
(弾性試験体の実験結果と解析結果)

$$\begin{aligned} \mu_0 &= \mu_s \zeta + \mu_d (1 - \zeta) \\ \zeta &= \left( \frac{\mu_i - \mu_d}{\mu_s - \mu_d} \right)^\eta, \quad K = \frac{\mu_i - \mu_0}{v_i} \end{aligned} \quad (6a)$$

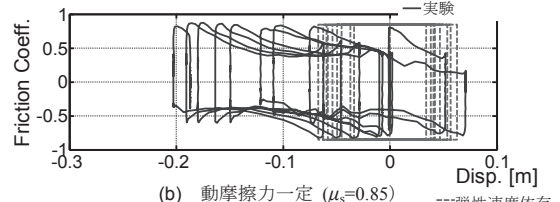
$\mu_s$ : 最大静止摩擦係数,  $\mu_d$ : 定常動摩擦係数,  $\mu_i$ : 加速過程と減速過程が切り替わる  $i$  点における動摩擦係数,  $v_i$ :  $\mu_i$  となるときの速度,  $\mu_0$ : 減速過程における収束先となる動摩擦係数,  $\gamma$ : 加速過程における摩擦係数の速度依存性を決めるパラメータ,  $\zeta$ : 減速過程における収束先を決定するパラメータ,  $\eta$ :  $\zeta$  の重み係数である。このモデルは, 加速過程においては弾性速度依存モデルに従い,  $\mu_i$  (滑り出すときには  $\mu_s$ ) から  $\mu_d$  へ指数関数的に漸進し, 減速過程においては  $\mu_i$  から  $\mu_0$  へ線形的に収束する。履歴速度依存モデルは弾性速度依存モデルに対して  $\eta$  というパラメータを一つ増やすことで, 減速過程の履歴を実現している。

#### (c) 実験結果の再現

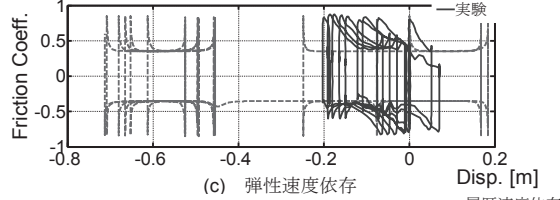
剛体試験体を用いた実験では最大静止摩擦係数が 0.75 程度であったが, 弾性試験体の場合には 0.85 程度となる。これは, 剛体試験体の実験を多数回繰り返した後に, 弾性試験体の実験と同じすべり面を用いて実施したことによるすべり面の変化等が原因である。数値解析では最大静止摩擦係数を 0.85 に設定するが, 剛体試験体に対する数値解析と等しい弾性限変位 (0.001 mm) を付与することを前提とし, 初期剛性 3330 kN/mm を用いる。定常動摩擦係数は, 剛体試験体の場合と同様に, 0.35 とする。その他の係数については, 実



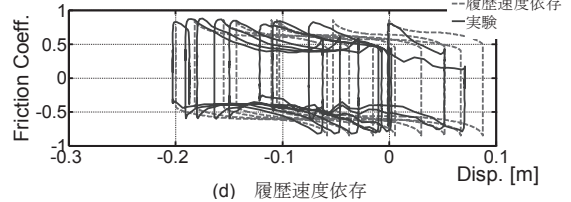
(a) すべり変位の時刻歴



(b) 動摩擦係数一定 ( $\mu_s=0.85$ )



(c) 弾性速度依存



(d) 履歴速度依存

図 14 摩擦係数とすべり変位  
(弾性試験体の実験結果と解析結果)

験結果と解析結果を比較しながら決定し、履歴速度依存モデルの係数には $\mu_s=0.85$ ,  $\mu_d=0.35$ ,  $\gamma=0.7$ ,  $\xi=3.0$ を用いる。さらに、比較のために剛体試験体で得た弾性速度依存モデルに対して、最大静止摩擦係数 $\mu_s$ のみを0.85に変更したモデルを用いる( $\mu_s=0.85$ ,  $\mu_d=0.35$ ,  $\gamma=4$ )。弾性試験体を模擬する3質点系の各層の剛性は実験から得られる各層の復元力と変形から導出した(1層:0.45kN/mm, 2層:0.67kN/mm, 3層:0.87kN/mm)。また、弾性試験体の減衰定数は1次固有振動数(1.7Hz)に対して3%であることを実験結果の自由振動波形から確認している。数値解析でも上部構造物の減衰は1次固有振動数に対して3%を想定し、初期剛性比例型を用いる。入力波は実験時に振動台上で計測された加速度を用いる。

この数値解析で得られる動摩擦係数とすべり速度の関係を図13に示す。動摩擦力一定モデルでは、速度の増大に伴う動摩擦係数の減少を表現できず、その最大速度は実験結果(1 m/s)の2/3程度にとどまる。弾性速度依存モデルでは、速度依存性が比較的強く動摩擦係数が急激に低下し、その結果、最大速度も実験結果の3倍ほどに過大評価されている。これに対して、履歴速度依存モデルでは、実験結果の最大速度とほぼ等しく、実験結果の動摩擦特性を表現できている。すべり変位の時刻歴を図14(a)に示す。すべり変位に関して、動摩擦力一定モデルでは実験結果の半分以下となっており、弾性速度依存モデルでは3倍以上になっている。履歴速度依存モデルのすべり変位は実験結果とよい対応を示しており、特に残留変位がほぼ一致している。摩擦係数とすべり変位に関して、弾性速度依存モデル(図14(b))と摩擦力一定モデル(図14(c))ではすべり止るときには最大静止摩擦係数まで回復しているが、履歴速度依存モデル(図14(d))では実験結果に比較的良好に対応している。

#### 4. 動摩擦特性変化による建物応答評価

3.において、スティックスリップ現象によって動摩擦特性が大きく変わること示し、その影響を履歴速度依存モデルによって考慮することで、すべり変位・速度を正当に評価できること示した。こ

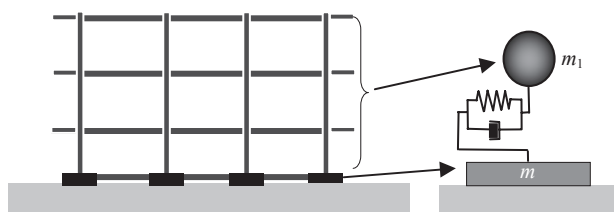


図15 建物解析のモデル化

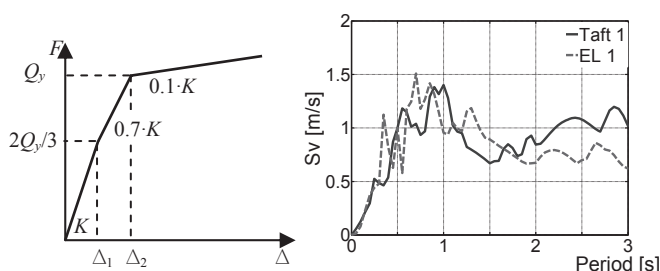


図16 上部構造物の骨格曲線

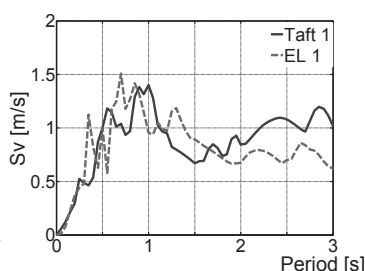


図17 入力地震動の速度応答スペクトル

こでは、「露出柱脚を置くだけの損傷抑制型の鋼構造物」に地震動を入力し、動摩擦特性(動摩擦モデル)の違いによる柱脚のすべり変位と上部構造物の損傷への影響を検討する。

#### 4.1 解析条件と評価指標

##### (a) 解析方針

解析では、中低層程度の建物を想定し、固有周期0.5秒の構造物を想定する。ここではすべる柱脚の上に上部構造物を代表する1質点形モデルをのせ、全体としては2質点モデル(図15)を用いて、地震応答解析を実施する。想定する構造物に対して、柱脚の質量は上部構造物の質量の1/3程度になると仮定し、柱脚の質量と上部構造物の質量比を設定する(この値は、3.で説明した弾性試験体を用いた実験の質量比に相当する)。

##### (b) 建物の強度と入力地震動

摩擦力とすべりの関係について、弾性試験体の実験結果に基づいた履歴速度依存モデル、弾性速度依存モデル、動摩擦力一定モデル( $\mu_s=0.85$ )の3つを用いる。上部構造物の層せん断力-層間変形関係は図16のトリリニア型の骨格曲線とし、第2分枝と降伏後の剛性低下率は、それぞれ初期剛性に対して0.7, 0.1とする。すべり柱脚の最大静止摩擦係数 $\mu_s$ を0.85に固定し、上部構造物の降伏ベースシア係数 $C_{by}$ を0.5~1.7の範囲で変化させる。上部構造物の降伏耐力と最大静止摩擦力の比を降伏耐力比とすると、式(7)として表される。

$$\frac{Q_y}{F_s} = \frac{1}{1 + m/m_1} R \quad (7)$$

$m$ : 基礎質量,  $m_1$ : 上部構造物の質量,  $x_1$ : 弾性体の相対変位,  $R$ : 強度比(最大静止摩擦係数に対する上部構造物の降伏ベースシア係数)である。なお、この解析において、質量比( $m/m_1$ )は1/3であり、降伏耐力比 $=0.75R$ の関係となる。

入力波としてエルセントロ NS, タフト NS を用いる。この地震動2波の速度応答スペクトル $S_v$ ( $h=0.03$ )を基準にし、固有周期0.5秒の速度応答スペクトルが1.0 m/s, 2.0 m/s, 3.0 m/s になるように調整したエルセントロ波 NS を EL1, EL2, EL3 と、同じくタフト波を Taft 1, Taft 2, Taft 3 と表記する。図17に、EL1とTaft1の速度応答スペクトル $S_v$ ( $h=0.03$ )を示す。なお、EL3は原波(地動最大速度0.32 m/s)の約4倍、Taft 3は原波(地動最大速度0.15 m/s)の約8倍である。EL1とTaft1が地動速度0.5m/sの地震動レベルに概ね相当する。

##### (c) 損傷評価

構造物の損傷評価に関して、すべり柱脚は経験した最大すべり変位を、上部構造物は総エネルギー入力を対象とする<sup>25)</sup>。建物への総エネルギー入力 $E$ は式(8)となるが、構造物の損傷に寄与するエネルギー入力(損傷累積量に相当) $E_D$ は式(9)となる。

$$E = m_1 \int_0^t \ddot{y} dy + c_1 \int_0^t \dot{y} dy + \int_0^t F_k(y) \dot{y} dy \quad (8)$$

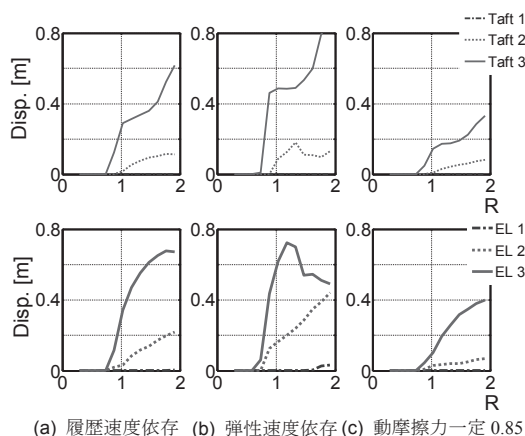
$$E_D = m_1 \int_0^t \ddot{y} dy + \int_0^t F_k(y) \dot{y} dy (= E_e + E_p) \quad (9)$$

$m_1$  : 上部構造物質量,  $c_1$  : 上部構造物減衰係数,  $y$  : 柱脚からの変位,  $F_k$  : 剛性による復元力である. この損傷に寄与するエネルギー入力には, 弾性振動エネルギー  $E_e$  と累積塑性エネルギー  $E_p$  の 2 種類が含まれる. 柱脚がすべることによる損傷率を「柱脚固定時の損傷に寄与するエネルギー入力  $E_{D_{fix}}$ 」に対する「すべり柱脚による損傷に寄与するエネルギー入力  $E_{D_{free}}$ 」の比として表す.

## 4.2 解析結果

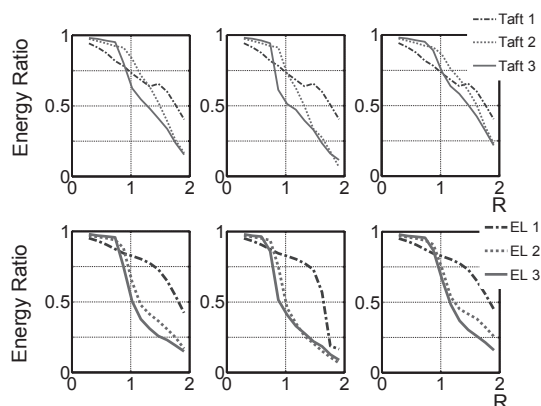
### (a) 柱脚の最大すべり変位

入力地震動 2 波に対して, 3 つのモデルを用いた解析から得られた, 柱脚が経験した最大すべり変位を図 18 に示す. いずれの場合も, 降伏耐力比が 0.5 (強度比  $R=0.75$  に相当) を超え, 上部構造物の耐力がすべり面の耐力の半分程度になるとすべりが生じ,  $R$  が大きくなるに従い最大すべり変位も大きくなる傾向がある. 降伏ベースシア係数と最大静止摩擦係数が等しくなる  $R=1$  に着目して, 最大経験すべり変位を検討する. 履歴速度依存モデル (図 18(a)) では, EL3 と Taft3 に対して 0.3 m となる. 弾性速度依存モデルでは, EL3 に対して 0.6m, Taft3 に対して 0.5m となり, 履歴速度依存モデルに比べて 2 倍程に過大評価する. 一方, 動摩擦力一定モデル (図 18(c)) では, Taft3 や EL3 に対して 0.1 m となり, 履歴速度依存モデルのおよそ 1/3 程度と小さい値を示している.



(a) 履歴速度依存 (b) 弾性速度依存 (c) 動摩擦力一定 0.85

図 18 最大経験すべり変位



(a) 履歴速度依存 (b) 弾性速度依存 (c) 動摩擦力一定 0.85

図 19 上部構造物の損傷率

### (b) 上部構造物の損傷

上部構造物の損傷率を図 19 に示す. 上部構造物の損傷率は, 降伏耐力比の 0.5 (強度比  $R=0.75$  に相当) を境に大きく減少する. これは, 降伏耐力比が 0.5 を下回るとき, 柱脚固定の場合と同じエネルギー吸収となり, 0.5 を上回ると柱脚がエネルギー吸収を肩代わりすることで, 上部構造物の損傷が減少する. つまり, 最大静止摩擦係数に対して, 上部構造物がその半分に相当する降伏耐力があつて始めて, すべりによる損傷低減機能が発揮される. それ以下の降伏耐力では, 上部構造物が相対的に弱すぎて, 地震による入力エネルギーが上部構造物に集中してしまう. また, 最小の地震動レベル (EL1 や Taft1) の場合には, 他のレベルの場合とは異なり, 損傷率の形状が上に凸となる傾向がある. これは, 最小の地震動レベル時には弾性エネルギーの減少率が損傷率に大きく影響し, それ以上の地震動レベルでは累積塑性エネルギーの減少率が損傷率に影響するからである.

最大経験すべり変位と同じく, 強度比  $R=1$  に着目して, 上部構造物の損傷率を検討する. 履歴速度依存モデルでは, EL3 や Taft3 に対して損傷率が 0.5~0.7 程度になっており, 弾性速度依存モデルも概ね等しい値を示している. これは, 降伏ベースシア係数が最大静止摩擦係数と等しい場合には, 上部構造物とすべりによるエネルギー吸収がほぼ等しくなることを示している. 動摩擦力一定モデルでは速度依存性を考慮する二つのモデルよりも損傷率が高くなる傾向があるが, 3 種類のモデルの損傷率は概ね等しく, 最大経験すべり変位ほどモデルの違いによる影響を受けていない. このように, 上部構造物の損傷率は, 最大静止摩擦係数と上部構造物の降伏ベースシア係数の関係に大きく影響され, 動摩擦係数の変化に対してはそれほど大きな影響を受けないということである. これに関して, 通常, 摩擦は減衰として捉えられることから, すべることによって吸収されるエネルギーは, 式(8)のような減衰エネルギーに相当する. 漸減型の速度依存性を示す動摩擦力は速度増加に伴って摩擦力が減少するが, 同時に, 速度に関しては動摩擦力一定モデルよりも増大する. そのため, 3 種の動摩擦モデルによる減衰エネルギーの総量はあまり変動せず, 各動摩擦モデルによる損傷率に大きな差異が生じなかったと考えられる.

## 5. まとめ

本論では鋼柱脚とモルタル基礎間の大速度領域における動摩擦特性の検証を目的として, 上部構造物を剛体とする振動台実験と固有周期約 0.5 秒の弾性試験体を用いた振動台実験を実施した. 剛体試験体の場合には, 最大静止摩擦係数 (0.75) から速度の増大にともなって摩擦係数は次第に低下し, すべり速度 1.0 m/s 程度から定常動摩擦係数 0.35 に落ち着くという傾向が示された. これを, 弾性速度依存モデルとして定式化し, 実験における動摩擦特性を精度よく再現できることを確認した. 一方, 弾性試験体 (固有周期: 約 0.5 秒) の場合には, 剛体試験体のときには見られなかった「すべり止る動摩擦係数はすべり出す動摩擦係数まで回復しない」という動摩擦特性が現れた. これをスティックスリップ現象と関連付けて考察し, この動摩擦特性を履歴速度依存モデルによって定式化し, 実験結果を精度よく再現できることを確認した.

実験で得られた動摩擦特性を参照して, 一次固有周期 0.5 秒のす

べる柱脚を有する構造物に関して地震応答解析を実施した。降伏ベースシア係数と最大静止摩擦係数が等しくなる（強度比  $R=1.0$ ）場合には、地動速度が  $1.2\text{m/s}$  になるような地震動に対して、履歴速度依存モデルでは、最大経験すべり変位は  $0.3\text{ m}$  程度になる。その場合に、剛体試験体から導出した弾性速度依存モデルでは  $0.5\text{m}$  に過大評価し、速度依存性を表現できない動摩擦係数一定モデルでは  $0.1\text{m}$  に過小評価してしまう。上部構造物の損傷率に関しては、最大静止摩擦係数と降伏ベースシア係数の比（強度比）によってほぼ決まり、動摩擦特性の速度依存性は比較的小さい。また、地動速度が  $1.2\text{m/s}$  になるような地震動に対しても、強度比  $R$  を  $1.0$  にすれば、上部構造物の損傷率は柱脚が固定された場合の半分以下にまで低減される。

提案する露出柱脚を基礎に置くだけの損傷抑制型鋼構造建物を実現するに当たり、今後の課題として、以下の三つが挙げられる。

- (1) 鉛直動の動摩擦特性への影響評価
- (2) 鋼とモルタル間の最大静止摩擦係数低減
- (3) すべり変位を抑制するストッパーの開発

提案する鋼構造建物の地震時のすべり挙動や上部構造物の応答をより正確に評価するためには、地震動の上下動や上部構造物の転倒モーメントなどのすべり面に対する鉛直力の影響を考慮する必要がある。今後は、このような鉛直力が鋼とモルタル間の動摩擦特性に及ぼす影響を検証する予定である。

強度比  $R$  が  $1$  付近においてすべりによる損傷低減効果が表れるため、鋼とモルタルの最大静止摩擦係数  $0.8$  を前提とすると、上部構造物にも降伏ベースシア係数  $0.8$  に相当する降伏耐力が要求されるが、通常の構造物には高すぎる値となる。今後、鋼とモルタルのすべり面に潤滑剤等を用いて最大静止摩擦係数を  $0.4\sim0.5$  程度に低減させることで、相対的に強度比を大きくする仕組みの開発をめざす。

地動速度が  $1.0\text{m/s}$  以上になる地震動に対して、上部構造物の損傷を半減させる場合には、最大経験すべり変位は  $0.3\text{m}$  を超える可能性がある。このようなすべり変位に対しては、通常の免震建物と同等の配慮が要求されるため、構造物への損傷低減効果を維持しつつ、すべり変位を抑制するストッパー類の開発に取り組みたい。

## 謝辞

この研究を遂行するにあたり、Jason McCormick 助教授（ミシガン大学）、勝尾美香氏（新日本製鐵（株））、張鵬程准教授（厦門大学）にご協力いただきました。ここに記して、感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 1995 年兵庫県南部地震鉄骨造建物被害調査報告書、日本建築学会近畿支部鉄骨構造部会、1995.5.
- 2) 秋山宏、黒沢稔、和国信之、西村功：鋼構造露出型柱脚の強度と変形、日本建築学会論文報告集、No.342、pp.46-54、1984.8.
- 3) 角屋治克、川口淳、森野捷輔：曲げモーメントを受ける露出型固定柱脚の弾塑性挙動及び終局耐力に関する研究、日本建築学会学術論文、No.583、pp.123-130、2004.9.
- 4) 倉田真宏、中島正愛、吹田啓一郎：固定柱脚を想定した角形鋼管柱の大変形繰返し載荷実験、日本建築学会学術論文、No.598、pp.149-154、2005.12.
- 5) 山本遼太、倉田真宏、長江拓也、寺田岳彦、吹田啓一郎、中島正愛：繰返し載荷実験と最大耐力評価法 浅い埋込み柱脚の弾塑性挙動と保有性能 その 1、日本建築学会学術論文、No.613、pp.147-153、2007.3.

- 6) 松宮智央、中島正愛、吹田啓一郎、劉大偉：鋼構造骨組の崩壊に至る挙動と非線形骨組解析—実大 3 層鋼構造骨組を用いた耐震性能実証実験、日本建築学会構造系論文、No.606、pp.203-208、2006.8.
- 7) 壁谷澤寿一、壁谷澤寿海、松森泰造、壁谷澤寿成、金裕錫：実大 3 層鉄筋コンクリート建物の振動実験、日本建築学会学術論文、No.632、pp.1833-1840、2008.10.
- 8) 曾田五月也、宮本恵美、園田純：すべり基礎構造の応答加速度抑制効果に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.357-358、2008.
- 9) 長江拓也、池永昌容、中島正愛、吹田啓一郎：鋼構造露出柱脚におけるベースプレートと基礎モルタル間の摩擦抵抗力、日本建築学会構造系論文、No.606、pp.217-213、2006.8.
- 10) 日本免震構造協会：免震構造入門、オーム社、1995.
- 11) 池永昌容、長江拓也、ジェイソン マコーミック、勝尾美香、中島正愛：鋼構造露出柱脚と基礎モルタル間の摩擦性状に関する振動台実験、日本建築学会学術論文、No.629、pp.1185-1191、2008.7.
- 12) 田中久一郎：摩擦のおはなし、日本規格協会、1985.
- 13) 岡本純三、中山景次、佐藤昌夫：トライボロジー入門 摩擦・磨耗・潤滑の基礎、幸書房、1990.
- 14) 日高芳樹、甲斐昌一、松川宏：液晶のパターンダイナミクス/滑りと摩擦の科学、培風館、2009.
- 15) 加藤仁、松林恒雄：案内面の摩擦特性とスティックスリップ振動、精密機械、Vol.39、No.467、pp.1192-1200、1973.
- 16) 日本機械学会：機械工学便覧、日本機械学会、1987.
- 17) C.H.ショルツ（柳谷俊訳）：地震と断層の力学、古今書院、1993.
- 18) 岡村健二郎、松原十三生、野呂周平、山根 崇宏：摩擦振動の理論的解析、精密機械、Vol.34、No.406、pp.731-736、1968.
- 19) J. B. Sampson, F. Morgan, D. W. Reed, M. Muskat: Studies in Lubrication XII. Friction Behavior During the Slip Portion of the Stick-Slip Process, *Journal of Applied Physics*, Vol. 14, pp.689-700, 1943.12.
- 20) A.K. Banerjee : Influence of kinetic friction on the critical velocity of Stick-Slip motion, *Wear*, **12** (2) pp. 107-116. 1968.8
- 21) S.S. Antoniou, A. Cameron and C.R. Gentile: The friction speed relation from Stick-Slip data, *Wear*, **36** (2), pp. 235-254. 1976.
- 22) F.Van de Velde, P.De Baets: Comparison of Two Stick-Slip Testers and Recommendations for Repeatable and Significant Stick-Slip Testing, *Tribotest* **3-4** 3, pp. 361-392, 1997.
- 23) Andy Ruina: Slip Instability and State Variable Friction Laws, *journal of geophysical research*, 88 pp.10359-10370, 1983.
- 24) Rice, J. R., and J.-C. Gu: Earthquake aftereffects and triggered seismic phenomena, *pure Appl. Geophysics.*, **121**, pp.187-219, 1983.
- 25) 秋山宏：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計、技報堂出版、1999.

(2010年10月5日原稿受理、2010年11月25日採用決定)