金属接触型すべり免震支承の摩擦係数の同定と応答低減効果

IDENTIFICATION OF THE FRICTIONAL COEFFICIENT OF THE METAL-TOUCHED TYPE
OF BASE-ISOLATOR AND VERIFICATION OF ITS RESPONSE REDUCTION

西村 春美*, 安部 祥子**, 橘 英三郎***

Harumi NISHIMURA, Shoko ABE and Eizaburo TACHIBANA

The sliding bearings are used for lightweight structures instead of the laminated rubber bearings. In many studies, the frictional coefficients of sliding bearings are assumed as less than 0.10. However, even if frictional coefficient is about 0.20, it may be effective for a big earthquake (Max. acceleration > 200Gal). In this study, the efficiencies of sliding bearings made of stainless steel are examined. The static and the dynamic frictional coefficients were identified about 0.20 and 0.10, respectively. It demonstrated experimentally and analytically that the inter-story displacements decreased to 25~50%.

Keywords: Base isolation, Metal-touched slide type, Experimental testing, Frictional coefficient,

Identification, Simulation

免震、金属接触すべり形式、実験、摩擦係数、同定、シミュレーション

1. はじめに

免震構造において積層ゴム支承を用いた場合、十分な免震効果を得るためには、支承部の面圧が10MPa程度必要となるため、中低層の軽量構造物には鋼球を用いた転がり支承や10MPa以下でも有効となるすべり支承がしばしば用いられる。転がり支承については既に数多くの建物に導入されており、その有効性も確かめられているが鋼球の接触点において応力集中が常時生じているため、直下型地震などによる大きな上下動に対しての安全性にやや不安を残している。すべり支承についてはすべり面における摩擦係数について実験的、解析的研究がなされ¹⁾³⁾、面圧、速度及び振幅などに依存することが知られている。すべり支承の性能はすべり面の摩擦係数が小さい程良いとされ、通常、0.01~0.1程度の摩擦係数を有するテフロンなどがすべり面として用いられる。しかし、耐久性やクリープなどの面でまだ解決すべき問題点も少なからず残している。

筆者らは将来において低価格化が期待できるすべり型免震支承に着目し、摩擦係数が0.001~0.5の場合についてのすべり支承による大域的な範囲における応答低減効果を3次元有限要素法を用いて調べ⁴⁾、摩擦係数が0.2前後でも大規模な地震に対してかなりの応答低減効果の得られることが分かった。これは入力地震の水平加速度が200Galを越える場合にすべりが発生し、上部への水平加速度の伝達を抑える効

果があることを再確認した結果となった。ところでステンレスの摩擦係数はおおよそ0.2前後であることは知られており、もしステンレス同士によるすべり支承が有効であることが確認され、実用化されれば低価格の免震構造を実現する事ができる。しかしながら摩擦といった現象は一般に多くの因子に依存しており、実用化の為には摩擦係数の同定などを通じての詳細な検討が必要がある。金属同士の摩擦係数については一定圧で締め付けた後、定常繰返し荷重による押し引き実験により調べられている⁵⁾。これらはボルトによる摩擦接合などにおいて有効であるが、しかし建築構造物でのすべり支承を対象とする場合はすべり面において浮き上がりによる離間が発生する事も考えられ、これらも考慮した上でより実際に近い条件で摩擦係数を同定する必要がある。

こうした考えの基にステンレス製の台車をステンレス製の水平すべり台の上に載せ、水平漸増荷重および水平一定荷重による実験を行い、上下動や潤滑剤が摩擦係数に及ぼす影響を調べた⁶⁾。その結果、最大静止摩擦係数が約0.2程度であることを確かめる事が出来た。また上下動や潤滑剤が摩擦係数に及ぼす影響についてはバラツキが大きく定性的、定量的に把握することが困難であった。その理由としては、すべり台の長さが十分でなかった為、台車の滑走時間が1秒以内であり、滑走時におけるサンプリング数が少ない事も同定結果に大きなバ

* 大阪大学大学院工学研究科建築工学専攻 大学院生・工修

** 大阪大学大学院工学研究科建築工学専攻 大学院生

*** 大阪大学大学院工学研究科建築工学専攻 教授・工博

Graduate Student, Architectural Engineering Osaka University, M. Eng.

Graduate Student, Architectural Engineering Osaka University

Prof., Architectural Engineering Osaka University, Dr. Eng.

ラツキが生じた原因と考えられる。次に地震動入力による実験を行い、台車の応答加速度が当初予想した通り200Gal以内に抑えられるという結果を得た。さらに実験で観測された変位応答を用いて摩擦係数を同定し、静止摩擦係数 $\mu_s=0.17\sim0.21$ 及び動摩擦係数 $\mu_d=0.11\sim0.16$ を得た。これらの同定された摩擦係数を用いて多質点系の応答解析を行うことにより応答低減効果を調べ、すべり支承を用いた場合の水平層間変位が非免震の場合の20%~50%に低減することが分かった⁷⁾。なおこれらの実験では有明工業専門学校の装置を用いている。

本研究では、2003年2月に大阪大学に設置された高精度の動電式2軸同時型地震動再現装置により引き続きステンレス製の台車を用いて摩擦係数の面圧依存性を調べる実験を行うとともに摩擦係数を同定する。さらに3層フレームをすべり支承の上に載せた実験を行い、ステンレスのすべり支承による応答低減効果を調べ、シミュレーション結果との整合性について検討する。

2. 剛体モデルを用いた振動実験

2-1 実験装置

動電式2軸同時型地震動再現装置(株式会社振研製、最大変位 $\pm 10\text{cm}$)に着脱式すべり面(ステンレス製)を有するガイドテーブルを固定し、すべり面の上に台車(ステンレス製)を載せた装置を用いる(Fig. 1)。接触面の面圧を高めるため、3つの円錐台状の突起(総接触面積 1cm^2)を台車の下面に設けている(Fig. 2)。台車の上に鉄製の錘(1枚につき約100N)を複数枚載せることにより台車の重量は120.6~509.4Nの5段階に変化できる(Table 1)。相対運動する材料表面の損傷を防止および摩擦や摩耗を低減する為、潤滑剤として有機モリブデン(モリコンク F100)を用いた。

2-2 実験条件と実験方法

入力する地震波は振動台の変位の制限により、時間軸を半分に圧縮した修正JMA KOBE NS波(最大加速度=818Gal)と修正JMA KOBE EW波(最大加速度=617Gal)、時間軸を半分に圧縮しさらに加速度を元の2倍にした修正El Centro NS波(最大加速度=683Gal)を用いた。また同時に潤滑剤による応答への影響も調べるため、潤滑剤を塗布しないすべり面と塗布したすべり面の2種類を用いた。入力波、すべり面、台車の重量の条件をパラメータとし、30ケース(Table 2)について3回ずつ繰り返し実験を行い、加速度計及びレーザー変位計により、振動台と台車の加速度、振動台の変位、振動台と台車の相対変位を計測した。

2-3 実験結果及び考察

修正JMA KOBE NS波を入力した場合の振動台の加速度と台車の加速度を表すグラフの一例をFig. 3およびFig. 4に示す。Fig. 3は台車の重量が120.6N(面圧1.2MPa相当)における潤滑剤有無による比較、Fig. 4は台車の重量が509.4N(面圧5.1MPa相当)における潤滑剤有無による比較である。面圧が低い場合、台車の加速度は潤滑剤の有無に関わらず、瞬間的に大きな加速度が生じる部分があるものの全般的に台車の応答加速度は200Gal以内である。一方面圧が高い場合、潤滑剤を塗布しないすべり面の台車の加速度は面圧が低い場合と特に変化しないのに対し、塗布したすべり面は面圧が高くなると台車の加速度が全般的に小さくなった。Fig. 5およびFig. 6に修正JMA KOBE NS波を入力した場合の振動台の変位、台車の変位、振動台と台車の相対変位を表すグラフの一例を示す。振動台と台車の相対変位はすべり量を意味

し、最大加速度の発生する2~2.5秒に大きなすべりが生じ、5秒以降はほとんどすべりは生じていない。潤滑剤の有無によりすべり量に差が見られ、潤滑剤を塗布しないすべり面では最大で8cm程度であるのに対し、塗布したすべり面では15cm程度であった。また台車の重量の相違によるすべり量の違いはほとんど見られなかった。実験結果のまとめをTable 3に示す。Table 3より120.6~509.4Nの間ではすべり量は台車の重量の影響をほとんど受けないこと、加速度のRMS値比 $[\text{台}$

Fig. 1 実験装置

Fig. 2 台車の詳細

Table 1 台車の重量

No.	Weight [N]
1	120.6
2	217.4
3	310.7
4	410.1
5	509.4

Table 2 実験パラメータ

	No lubrication	Lubrication
JMA KOBE NS	KOBE NS-no-1~5	KOBE NS-lub-1~5
JMA KOBE EW	KOBE EW-no-1~5	KOBE EW-lub-1~5
El Centro NS	EL NS-no-1~5	EL NS-lub-1~5

(表中の1~5はTable 1の台車の各重量に対応する番号を表す)

Fig. 3 加速度時刻歴応答

(修正JMA KOBE NS入力時、台車の重量120.6N)

Fig. 4 加速度時刻歴応答

(修正JMA KOBE NS入力時、台車の重量509.4N)

(a) 潤滑剤なし

(b) 潤滑剤あり

Fig. 5 変位時刻歴応答

(修正 JMA KOBE NS 入力、台車の重量 120.6N)

(a) 潤滑剤なし

(b) 潤滑剤あり

Fig. 6 変位時刻歴応答

(修正 JMA KOBE NS 入力時、台車の重量 509.4N)

Table 3 実験結果

	Max. Acc.		RMS Acc.			Max. Disp. of Cart [cm]	Residual Disp. of Cart [cm]
	Shaking Table [Gal]	Cart [Gal]	Shaking Table [Gal]	Cart [Gal]	Cart / Shaking Table		
KOBE NS-no-1	764	388	163	110	0.671	8.76	5.57
KOBE NS-no-2	770	295	164	105	0.639	9.55	5.16
KOBE NS-no-3	767	314	163	114	0.700	9.06	6.06
KOBE NS-no-4	806	375	164	114	0.696	8.76	5.92
KOBE NS-no-5	814	357	167	116	0.694	8.35	4.97
KOBE NS-lub-1	781	285	163	96	0.588	14.86	10.86
KOBE NS-lub-2	758	233	162	87	0.537	14.24	9.76
KOBE NS-lub-3	784	229	163	85	0.522	14.88	11.00
KOBE NS-lub-4	782	263	164	85	0.516	16.72	13.13
KOBE NS-lub-5	790	249	164	82	0.502	15.56	12.30
KOBE EW-no-1	670	281	132	97	0.733	4.25	4.20
KOBE EW-no-2	675	300	131	105	0.801	4.25	4.19
KOBE EW-no-3	662	281	133	102	0.766	4.22	4.18
KOBE EW-no-4	665	364	131	108	0.823	4.67	4.60
KOBE EW-no-5	684	369	133	107	0.810	4.54	4.49
KOBE EW-lub-1	671	242	133	90	0.679	6.92	5.70
KOBE EW-lub-2	681	215	134	87	0.648	7.11	6.25
KOBE EW-lub-3	667	216	133	83	0.625	7.22	6.11
KOBE EW-lub-4	660	237	132	86	0.647	7.30	6.09
KOBE EW-lub-5	669	236	133	81	0.609	7.23	5.97
EL NS-no-1	761	449	134	120	0.895	1.22	0.85
EL NS-no-2	678	318	122	107	0.882	1.30	0.07
EL NS-no-3	698	402	124	116	0.935	1.21	0.51
EL NS-no-4	693	344	123	107	0.869	1.71	0.48
EL NS-no-5	702	394	123	110	0.892	1.26	0.30
EL NS-lub-1	696	211	121	91	0.749	3.32	2.35
EL NS-lub-2	666	232	121	92	0.761	4.26	3.11
EL NS-lub-3	697	227	122	89	0.723	4.72	3.14
EL NS-lub-4	682	251	122	89	0.725	4.00	2.50
EL NS-lub-5	689	266	122	89	0.727	4.23	2.65

車の加速度のRMS値]/(振動台の加速度のRMS値)]の結果から潤滑剤を塗布したすべり面では、全般的に面圧が高くなるに従い台車の加速度は小さくなる傾向にあることが他の入力波についても言える。

3. 剛体モデルの実験結果による摩擦係数の同定

3-1 同定に用いる運動方程式

実験で得られたデータを用いて摩擦係数の同定を行う。運動方程式は式(1)とする。

$$m\ddot{x} + \text{sgn}(\dot{x})\mu mg = -m\ddot{x}_g \quad (1)$$

ここで m は台車の質量、 x は振動台と台車の相対変位、 μ は摩擦係数、 g

は重力加速度、 $\ddot{x}_g$ は入力加速度である。摩擦係数 μ は速度依存性を考慮し、静止摩擦係数 μ_s 、動摩擦係数 μ_d 、指数減衰定数 c により表された式(2)~(4)で仮定する⁹⁾。

$$\dot{x}_{lim} < |\dot{x}| \text{ の時} \quad \mu = \mu^* \quad (2)$$

$$|\dot{x}| \leq \dot{x}_{lim} \text{ の時} \quad \mu = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{|\dot{x}|}{\dot{x}_{lim}}\right) \cdot \mu^* \quad (3)$$

$$\mu^* = \mu_d + (\mu_s - \mu_d) \exp(-c|\dot{x}|) \quad (4)$$

ここで $\dot{x}$ は相対速度である。 $\dot{x}_{lim}$ は $\dot{x} = 0$ 前後で摩擦係数の値が急変し、数値計算が不安定になることを防ぐ為に仮定した値であり、 $\dot{x}_{lim} = 1.0$ kine とした。式(2)~(4)で表される $\dot{x}$ と μ の関係を Fig. 7 に示す。未知パラメーター μ_s, μ_d, c を変数

$$\mathbf{p} = \{p_1, p_2, p_3\}^T (p_1 = \mu_s, p_2 = \mu_d,$$

$$p_3 = c) \text{ とおき、} k \text{ 番目の試行パラメータを}$$

$$\mathbf{p}^k \text{ とすると、Newmark}\beta \text{ 法により} \mathbf{p}^k \text{ に対}$$

$$\text{応する応答}(x_i^k, \ddot{x}_i^k) \text{ が求まる。ここでター}$$

$$\text{ゲット関数を式(5)とする。}$$

Fig. 7 すべり速度 $\dot{x}$ と摩擦係数 μ との関係

$f(\mathbf{p}^k) = \sum (x_i^* - x_i^k)^2 (\ddot{x}_i^* - \ddot{x}_i^k)^2$ (5)

$x_i^*, \ddot{x}_i^k$ はそれぞれ実験で観測した相対変位

及び k 番目の試行パラメータを用いて Newmark β 法により得られた相対変位を表す。添字 i は時刻 $t = \Delta t \cdot i$ (Δt は時間刻み)を意味する。 $f(\mathbf{p}^k)$ を最小化することにより、 μ_s, μ_d, c を同定することができ、最小化手法には次に示す減速ニュートン法を用いた。

3-2 減速ニュートン法

ニュートン法は、変数 $\mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_n\}^T$ の関数 $f(\mathbf{x})$ の極小値を求める方法であり、極小値の近似値 $\mathbf{x}^k$ の近傍で $\Delta \mathbf{x}$ の変化があれば、関数 f の変化 Δf は次式2番目の右辺で近似される。

$$\begin{aligned} \Delta f &\equiv f(\mathbf{x}^k + \Delta \mathbf{x}) - f(\mathbf{x}^k) \\ &\approx \mathbf{g}^T(\mathbf{x}^k) \Delta \mathbf{x} + \frac{1}{2} (\Delta \mathbf{x})^T \mathbf{H}(\mathbf{x}^k) \Delta \mathbf{x} \end{aligned} \quad (6)$$

ここに

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}^k) = \left\{ \frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n} \right\}^T \quad (\text{勾配ベクトル}) \quad (7)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}^k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{bmatrix}_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^k} \quad (\text{ヘシアン}) \quad (8)$$

である。式(6)を最小化する $\Delta \mathbf{x}^k$ は、式(6)を微分することにより、次式で与えられる。

$$\Delta \mathbf{x}^k = -\mathbf{H}^{-1}(\mathbf{x}^k) \mathbf{g}(\mathbf{x}^k) \quad (9)$$

式(9)により $\Delta \mathbf{x}^k$ を求め、

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + \Delta \mathbf{x}^k \quad (10)$$

として、次の点 $\mathbf{x}^{k+1}$ を決定し、 $\Delta \mathbf{x}^k$ が十分小さな値になるまで繰り返す。極小値を求める方法がニュートン法と呼ばれるものである。この方法では解が発散する場合が多く、今回はこれを少し改良し

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + 0.1 \Delta \mathbf{x}^k \quad (11)$$

とし、減速ニュートン法と名付けた。また、収束条件は

$$\|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}^{k+1}\|_{\infty} < \varepsilon \cdot \max\{1, \|\mathbf{x}^k\|_{\infty}\} \quad (12)$$

であり、ここで

$$\|\mathbf{x}^k\|_{\infty} = \max\{|x_1^k|, |x_2^k|, \dots, |x_n^k|\} \quad (13)$$

である。また、 ε は十分小さい値とする。本論における同定では $\varepsilon = 1.0 \times 10^{-6}$ とした。

3-3 同定結果及び考察

同定結果を Table 4 に、摩擦係数の散布図を Fig. 8 に示す。潤滑剤を塗布しないすべり面の静止摩擦係数 μ_s は 0.08~0.21、動摩擦係数 μ_d は 0.17~0.36、潤滑剤を塗布したすべり面の静止摩擦係数 μ_s は 0.09~0.19、動摩擦係数 μ_d は 0.03~0.20 と、かなりばらついた。潤滑剤を塗布したすべり面の動摩擦係数は塗布しないすべり面の動摩擦係数より、全てのケースにおいて小さくなっている。潤滑剤を塗布しないすべり面は台車の重量が大きくなる程や静止摩擦係数が増加し、潤滑剤を塗布したすべり面は台車の重量が大きくなる程若干動摩擦係数が減少しているように見えるが、台車の重量による顕著な影響はほとんど認められない。次に同定結果の精度を調べるために実験による応答と同定された摩擦係数を用いた応答との比較を行い、その一例を Fig. 9 に示

Table 4 同定結果

	μ_s	μ_d	c		μ_s	μ_d	c
KOBE NS-no-1	0.119	0.213	0.217	KOBE NS-lub-1	0.190	0.105	0.144
KOBE NS-no-2	0.160	0.169	0.125	KOBE NS-lub-2	0.150	0.051	0.052
KOBE NS-no-3	0.149	0.222	0.200	KOBE NS-lub-3	0.135	0.073	0.076
KOBE NS-no-4	0.152	0.175	0.103	KOBE NS-lub-4	0.137	0.028	0.032
KOBE NS-no-5	0.169	0.213	0.379	KOBE NS-lub-5	0.140	0.064	0.077
KOBE EW-no-1	0.163	0.244	0.076	KOBE EW-lub-1	0.108	0.159	0.124
KOBE EW-no-2	0.170	0.220	0.146	KOBE EW-lub-2	0.123	0.129	0.112
KOBE EW-no-3	0.205	0.276	0.056	KOBE EW-lub-3	0.105	0.140	0.048
KOBE EW-no-4	0.213	0.209	0.074	KOBE EW-lub-4	0.115	0.136	0.102
KOBE EW-no-5	0.197	0.238	0.104	KOBE EW-lub-5	0.113	0.139	0.061
EL NS-no-1	0.280	0.294	0.461	EL NS-lub-1	0.112	0.158	0.185
EL NS-no-2	0.082	0.277	0.323	EL NS-lub-2	0.145	0.201	0.012
EL NS-no-3	0.090	0.356	0.448	EL NS-lub-3	0.100	0.130	0.112
EL NS-no-4	0.098	0.248	0.489	EL NS-lub-4	0.104	0.151	0.130
EL NS-no-5	0.173	0.282	0.408	EL NS-lub-5	0.093	0.100	0.100

Fig. 8 摩擦係数の散布図

Fig. 9 実験と解析の応答の比較

す。このグラフよりシミュレーション結果は実験結果をよく再現出来ていると言える。

4. 多質点系モデルによる振動実験

4-1 実験装置と実験方法

次にすべり面を有するガイドテーブルを振動台の上に固定し、すべり面の上に3層フレームを載せ (Fig. 10)、振動実験を行った。柱の剛性の異なる2種類の3層フレーム Model-1(剛性小)、Model-2(剛性大)を用い、それぞれの重量と剛性を Table 5 に示す。入力する地震波は2.の実験で用いた地震波と同じく、修正 JMA KOBE 波と修正 El Centro NS 波とする。3層フレームを、1) 振動台に固定した場合、2) 潤滑剤を塗布しない滑り面上に載せる場合、3) 潤滑剤を塗布した滑り面上に載せる場合、の3種類の異なる設置条件について実験を行った。2.の実験と同様、潤滑剤として有機モリブデンを用いた。モデル、地震波、設置条件をパラメータとし計18ケース (Table 6) について3回ずつ実験を繰り返し、各層の絶対加速度と層間変位を加速度計とレーザー変位計により計測した。

Fig. 10 実験装置

Table 5 フレームの重量と剛性

	Model-1		Model-2	
	Weight [N]	Stiffness [N/cm]	Weight [N]	Stiffness [N/cm]
3rd Floor	54.1	316.1	54.1	749.3
2nd Floor	69.6	316.1	69.6	749.3
1st Floor	73.5	316.1	73.5	749.3
Base	256.8	0.0	256.8	0.0

Table 6 実験パラメータ

	Fixed	Sliding / No Lubrication	Sliding / Lubrication
JMA KOBE NS	KOBE NS- fix- M1, 2	KOBE NS- no- M1, 2	KOBE NS- lub- M1, 2
JMA KOBE EW	KOBE EW- fix- M1, 2	KOBE EW- no- M1, 2	KOBE EW- lub- M1, 2
El Centro NS	EL NS- fix- M1, 2	EL NS- no- M1, 2	EL NS- lub- M1, 2

(M1 は Model-1, M2 は Model-2 を示す)

4-2 実験結果及び考察

Model-1 に修正 JMA KOBE NS 波を入力した場合の層間変位の時刻歴応答の一部を Fig. 11 に示す。Fig. 11 の (a) は1層の層間変位であり、細線は固定した場合、実線は潤滑剤を塗布したすべり面に載せた場合を示している。潤滑剤を塗布したすべり面に載せた場合は固定した場合と比較して層間変位が大幅に減少し、最大値は固定した場合の25%以下にまで低減された。また Fig. 11 の (b) の細線は固定した場合の土台変位 (= 振動台の変位)、太線は潤滑剤を塗布したすべり面に載せた場合の土台変位 (= すべり量) を示している。実験結果のまとめを Table 7 に示す。それぞれの値は3回の繰り返しの平均値である。すべり量は地震波や潤滑剤の有無によりばらつきがあり、最大すべり量は11cm

(a) 1層間変位

(b) 土台変位

Fig. 11 実験結果 変位時刻歴応答 (Model-1 に修正 JMA KOBE NS を入力)

Table 7 実験結果

	Max. Acc. of Shaking Table [Gal]	Max. Acc. of Base [Gal]	Max. Acc. of 1F [Gal]	Max. Acc. of 2F [Gal]	Max. Acc. of 3F [Gal]	Max. Disp. of Base [cm]	Residual Disp. of Base [cm]	Max. Inter-story Disp. of 1F [cm]	Max. Inter-story Disp. of 2F [cm]	Max. Inter-story Disp. of 3F [cm]
KOBE NS-fix-M1	853	848	2224	2675	2923	8.12	-	1.97	1.20	0.58
KOBE NS-no-M1	845	1957	1170	1336	1552	10.24	9.12	0.74	0.51	0.27
KOBE NS-lub-M1	850	585	640	924	1218	8.93	4.07	0.46	0.42	0.20
KOBE EW-fix-M1	653	666	746	2526	2927	6.93	-	1.77	1.22	0.60
KOBE EW-no-M1	673	2682	1268	1618	1738	1.54	1.08	0.70	0.60	0.38
KOBE EW-lub-M1	700	571	584	950	1156	5.80	5.08	0.55	0.44	0.21
EL NS-fix-M1	711	719	1723	1961	2187	5.26	-	1.20	0.80	0.38
EL NS-no-M1	794	1312	1326	1182	1858	4.27	4.12	0.63	0.48	0.29
EL NS-lub-M1	759	412	568	658	813	4.05	0.98	0.31	0.24	0.14
KOBE NS-fix-M2	788	808	1801	2006	2585	8.61	-	0.60	0.42	0.20
KOBE NS-no-M2	836	1308	998	1276	1416	10.24	9.73	0.25	0.20	0.10
KOBE NS-lub-M2	829	392	521	579	841	10.78	6.04	0.15	0.13	0.06
KOBE EW-fix-M2	640	655	1477	1810	2023	7.54	-	0.50	0.32	0.15
KOBE EW-no-M2	655	1037	966	1007	1169	2.89	2.38	0.26	0.17	0.08
KOBE EW-lub-M2	646	450	504	560	915	7.89	6.57	0.16	0.13	0.07
EL NS-fix-M2	692	705	1959	2072	2330	5.77	-	0.57	0.36	0.18
EL NS-no-M2	734	1386	1177	1122	1536	2.13	2.13	0.29	0.20	0.10
EL NS-lub-M2	742	496	617	713	1010	3.12	0.31	0.18	0.14	0.07

程度、残留すべり量は10cm程度となった。加速度は1~3層においてすべり面に載せた場合、固定した場合の30~50%に低減されている。ただし潤滑剤を塗布しない場合において、土台の加速度が振動台の加速度よりも大きくなっている。これらのケースでは上下方向の跳ね上がりが目視されており、それが水平加速度計に何らかの影響を与えたものと考えられる。

5. 3層フレームの実験結果による摩擦係数の同定

5-1 同定に用いる運動方程式

3層フレームの実験結果を用いて3.の場合と同様に、摩擦係数の同定を行う。同定に用いる運動方程式を式(14)に示す。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \text{sgn}(\dot{x}_0)\mu M_{all}g \end{Bmatrix} = -\mathbf{M}\begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix}\ddot{x}_g \quad (14)$$

ここで $\mathbf{M}$ は質量行列、 $\mathbf{x}$ は相対変位、 $\mathbf{C}$ は減衰行列、 $\mathbf{K}$ は剛性行列、 μ は摩擦係数、 M_{all} は全質量、 $\ddot{x}_g$ は入力加速度である。減衰行列は剛性比例型とし、Model-1においては剛性行列の0.175%、Model-2においては0.1%とした。これらの値は台車を振動台に固定した場合の応答を最もよく近似する値を選んだものである。固定した場合は各層剛性の3つ(k_1, k_2, k_3)を、固定しない場合は各層剛性と摩擦係数の6つ($k_1, k_2, k_3, \mu_s, \mu_d, \phi$)をパラメータとし、同定を行った。同定のための最小化するターゲット関数は式(15)とした。

$$f(\mathbf{p}^k) = \sum_i \sum_m (x(m)_i^* - x(m)_i^k)^2 \quad (15)$$

ここで $x(m)_i^*$ 、 $x(m)_i^k$ はそれぞれ時刻 $t = \Delta t \cdot i$ における実験で観測した m 層の層間変位及び k 番目の試行パラメータを用いてシミュレーションにより得られた m 層の層間変位を表す。固定した場合は式(14)の免震層と摩擦力の項を取り除いて3自由度とし、すべりの場合は4自由度として計算を行った。

5-2 同定結果および考察

各層の剛性の同定結果をTable 8に、Fig. 12にTable 8をグラフ化したものを示す。剛性は実験条件による多少のばらつきが生じ、柱の形状、材料のヤング係数から概算した値(Table 5)より小さくなるという結果となった。静止摩擦係数 μ_s は0.16~0.18、動摩擦係数 μ_d は0.10~0.14が得られた。3.の同定と比較して摩擦係数のばらつきが小さくなった。この理由としては3.の同定が1質点の変位と加速度のみを追従すればよく、実際の摩擦係数とは異なる値であっても数値計算上、ある程度つじつまを合わせることができてしまう可能性があるのに対し、5.の同定においては、4質点の変位を追従するという厳しい条件となったためであると考えられる。また潤滑剤を塗布しないすべり面については台車の跳ね上がりが目視されていたため、式(14)の運動方程式による同定は不適切と判断し、Table 9には潤滑剤を塗布したすべり面のみの結果を載せている。Model-1に修正 JMA KOBE NS波を入力した場合の層間変位の時刻歴応答の一部をFig. 14(a)に示す。Fig. 14(a)のシミュレーション結果はFig. 11(a)の実験結果と対応しており、

Table 8 同定結果 (各層剛性)

	1F [N/cm]	2F [N/cm]	3F [N/cm]
KOBE NS-fix-M1	263.9	275.7	282.7
KOBE EW-fix-M1	257.4	272.1	292.4
EL NS-fix-M1	266.9	268.4	279.5
KOBE NS-lub-M1	258.1	268.1	271.2
KOBE EW-lub-M1	261.0	279.0	272.2
EL NS-lub-M1	281.3	269.8	272.5
KOBE NS-fix-M2	573.9	612.4	636.6
KOBE EW-fix-M2	562.6	613.3	634.0
EL NS-fix-M2	557.4	624.2	608.3
KOBE NS-lub-M2	582.5	599.5	616.8
KOBE EW-lub-M2	586.1	615.3	629.7
EL NS-lub-M2	599.5	593.0	574.5

Fig. 12 各層剛性

Table 9 同定結果 (摩擦係数)

	μ_s	μ_d	c
KOBE NS-lub-M1	0.161	0.142	0.190
KOBE EW-lub-M1	0.180	0.097	0.101
EL NS-lub-M1	0.159	0.132	0.121
KOBE NS-lub-M2	0.162	0.116	0.176
KOBE EW-lub-M2	0.181	0.101	0.139
ELNS-lub-M2	0.168	0.114	0.082

Fig. 13 摩擦係数の散布図

(a) 1層間変位

(b) 土台変位

Fig. 14 解析結果 変位時刻歴応答 (Model-1 に修正 JMA KOBE NS を入力)

細線は固定した場合、太線は潤滑剤を塗布したすべり面に載せた場合である。Fig. 14(b)はModel-1に修正 JMA KOBE NS 波を入力した場合の土台の変位時刻歴応答の実験とシミュレーションとの比較であり、グラフの概形をある程度再現出来ていると言える。

6. 結論

摩擦係数が0.2程度のステンレスを用いたすべり支承を想定した2種類の実験を行い、その有効性を検証した。まずステンレス製のすべり面の上にステンレス製の重量可変の台車を載せ、時間圧縮した地震動を入力する実験を行い、実験結果を用いて摩擦係数を同定した。その結果、すべり量は本実験で変化させた範囲においては、面圧に依存しないこと、面圧が高くなるにつれ台車の応答加速度が小さくなることが分かった。潤滑剤を塗布したすべり面の静止摩擦係数 μ_s は0.09~0.19、動摩擦係数 μ_d は0.03~0.20となり、面圧が高くなるにつれて若干動摩擦係数が減少する傾向にあった。次に台車の上に3層フレームを載せた実験を行い、実験結果を用いて摩擦係数を同定し、静止摩擦係数 μ_s は0.16~0.18、動摩擦係数 μ_d は0.10~0.14と得た。ステンレスの摩擦係数の値がおおよそ0.2であることを、実際に使用される状態を想定した2種類の実験により確かめることが出来た。この値は200Galを越えて初めてすべりが発生することを意味し、中小地震や強風ではすべりが発生しにくくなる。よって中小地震や強風時でのすべりを抑えるための装置が簡便な物になり、低価格化も期待できる。また0.2という摩擦係数でも各層の最大応答加速度は50%程度に、最大層間変位は25%以下にまで低減されることが分かった。尚、原波形を用いての実験は本実験装置では不可能であるが、摩擦係数が入力波形にそれ程依存しないとすれば、それらの同定された摩擦係数と種々の原波形を用いてのシミュレーションにより低減効果や残留すべり量のある程度評価できるものと考えられる。それらは今後の課題としたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、関西電力株式会社にはご協力を頂きました。記して謝辞といたします。

参考文献

- 1) 富島誠司, 大橋智樹, 佐藤啓治: すべり支承方式の免震に用いるすべり材の動摩擦係数に関する研究, 日本建築学会技術報告集 No.1, pp.140~145, 1995.12
- 2) 日比野浩, 高木政美, 勝田庄二, 室田伸夫, 原暢彦: 大口径弾性すべり支承の摩擦特性試験(その3 載荷振幅が摩擦係数に及ぼす影響), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 分冊, pp.503~504, 2002. 8
- 3) 江森純一, 山中久幸, 谷垣政治, 平田裕一, 山岸邦彰: 弾性すべり支承の基本性能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 分冊, pp.487~488, 1998. 9
- 4) 池内邦江, 村司真生, 橋英三郎: すべり支承型免震構造の応答に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 分冊, pp.653~654, 2000. 9
- 5) 大山秀美, 三山剛史, 増田圭司, 中山輝雄, 鳥居次夫, 上田栄, 河合俊直: 滑り支承を用いた免震構法の研究 その1. 滑り支承の概要と鉛直性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 分冊, pp. 691~692, 1999. 9
- 6) 西村春美, 小野聡子, 橋英三郎: 滑り型免震支承の摩擦係数に関する実験的及び解析的研究(潤滑剤及び上下動が摩擦係数に及ぼす影響), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 分冊, pp.557~558, 2003. 9
- 7) 西村春美, 安部祥子, 橋英三郎: 2軸振動実験による金属面すべり支承の摩擦係数の同定とそれによる応答低減効果, 第54回理論応用力学講演会講演論文集 pp.575~576, 2005. 1
- 8) The Japan Research Institute, Limited. LS-DYNA Ver.950 USER'S MANUAL 1999

(2005年5月10日原稿受理, 2005年10月8日採用決定)