

ステンレス面を用いたすべり型免震支承の 摩擦係数の同定と応答低減効果



技術解説

西村 春美*, 橋 英三郎**

Identification of Frictional Coefficient and Response Reduction
of the Metal-Touched Type of Base-Isolator

Key Words : Base isolator, Metal-touched Type, Experimental testing,
Identification, Simulation

1. はじめに

「建物は豆腐より弱い」と言えばびっくりするかもしれない。建物にとって地震が最大の脅威であるが、中低層建物の通常の設計では水平地震力は建物重量の20%が想定されている。ということは、約 11.3° 建物が傾けば建物自体にとって水平力が20%相当になるので壊れても仕方がないということだ。一方、豆腐は約 11.3° 傾けても壊れはしない。少し荒っぽい話ではあるが、一見頑丈そうに見える建物も意外と弱いことを知っていただきたい。それならば 90° 傾けても、つまり水平力を自重の100%想定しても壊れないように設計すればよいと思われるかも知れない。もちろん設計可能である。ただし建物の価格は少なくとも3倍程度に跳ね上がるであろう。建築構造の最大の眼目は地震に対して安全でしかも値段を抑えるところにある。この一見相矛盾したテーマ

に光明を与えたのはなんと地震がほとんど揺れないフランスの研究者マルフォス氏であった¹⁾。基本的な考えは建物と基礎との間にドラム状のゴム支承を設置し、建物の固有周期を伸ばし、地震の卓越固有周期との共振を避け、地震入力エネルギーを低減するところにある。こうした考えは古くから免震構造と呼ばれ、多くの提案がなされてきたが、実現には至らなかった。マルフォス氏のものは、ゴム支承のままだと、地震のない時も建物のロッキングでふらふら揺れるので、それをなくすため20枚程度の鉄板をゴム支承にサンドイッチ状に挿入して接着し、上下方向に剛で水平方向のみ柔らかくしているところがミソである。この積層ゴムを用いた建物は兵庫県南部地震(1995)以降急速に普及し、既に1000棟以上建設されている。

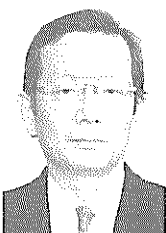
ところで積層ゴムを用いた免震構造は、十分な免震効果を得るために $100\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度以上の面圧が必要となる。そうした面圧が得られないような住宅免震や軽量構造物では滑り支承を用いた形式が普及しつつある。この形式の特徴は、支承部の面圧にさほど影響されず、広い周波数域にわたり免震効果を期待できるところにある。そのため、軽量構造物のみならず長周期成分を含むような超高層建築物にも滑り支承が用いられている(大阪梅田DTタワービル)。

滑り面における摩擦係数については実験的、解析的研究がなされ²⁻⁵⁾。面圧、速度及び振幅などに依存することが知られている。滑り支承の性能は滑り面の摩擦係数が小さい程良いとされ、通常、0.05~0.1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、テフロンには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。またその他にも鋼球を用いた転

* Harumi NISHIMURA
1979年4月生
2004年大阪大学大学院工学研究科建築
工学専攻修了
現在、大阪大学大学院工学研究科建築
工学専攻 博士後期課程1年、工学修
士、建築力学・耐震工学
TEL 06-6879-7631
FAX 06-6879-7634
E-Mail nishimura_harumi@arch.
eng.osaka-u.ac.jp



** Eizaburo TACHIBANA
1942年10月生
現在、大阪大学・大学院・工学研究科・
建築工学専攻、教授、工学博士、建築
力学・耐震工学
TEL 06-6879-7631
FAX 06-6879-7634
E-Mail orange@arch.eng.osaka-u.
ac.jp



がり支承などがあるが、地震の上下動で付加された接触面の応力集中による損傷によりその効果を発揮できない恐れがある。

筆者らは摩擦係数が0.001~0.5の場合についての滑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⁶⁾、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。0.2という数字は1次設計用における標準せん断係数 C_0 であり、地震動入力が200Gal以内に収まれば建物は弾性範囲にとどまるはずである。また0.2という大きな摩擦係数ならば強風時のすべりも十分抑える事ができ、さらにコストの低減も大幅に期待できる。

本報告では、ステンレスの摩擦係数がおおよそ0.2前後であることに着目し、ステンレスの板に載せるだけという低価格で簡便な免震構造の実現を目指し、地震動を用いた実験を行い、摩擦係数の同定を行うとともに、同定した摩擦係数を用いて多質点系の応答解析を行い、ステンレスの支承による応答低減効果を調べ、その結果を報告する。

2. 振動実験

2.1 実験装置と実験方法

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20cm)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、滑り面の上に台車(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)。台車の総重量は120.54Nである。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(モリコネクF100)を用いた。実験装置の写真をPhoto 1に示す。実験条件をTable 1に示す。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)を用いる。また同時に潤滑剤による応答への影響も調べる。入力波と潤滑剤の条件を組み合わせ、6通りの実験を行った。実験は次の手順で行った。(1)振動台を静止した状態で滑り面を設置し、その上に台車を載せ

る。(2)地震動を入力する。(3)レーザーセンサーにより、振動台と台車の加速度、振動台の変位、振動

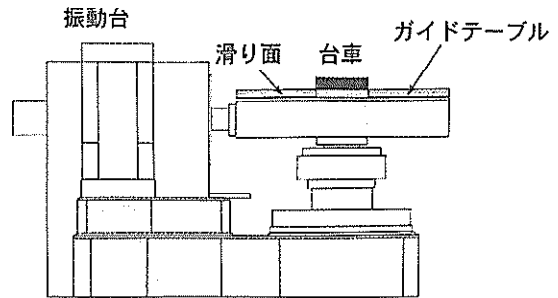


Fig. 1 実験装置

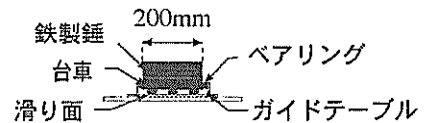
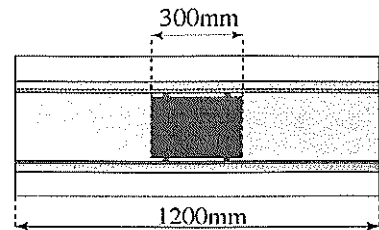


Fig. 2 台車の詳細

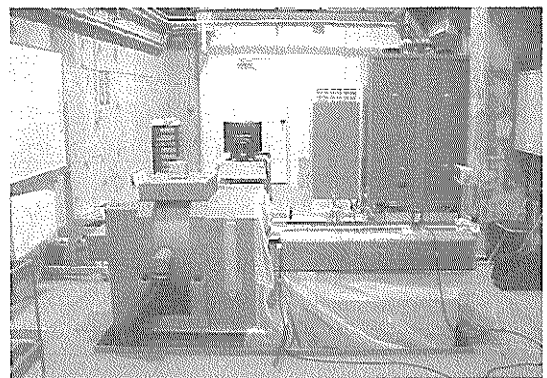
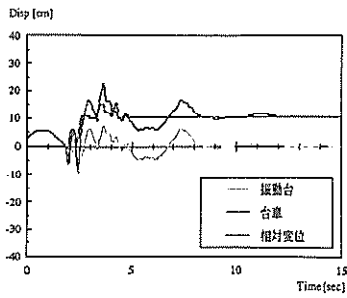


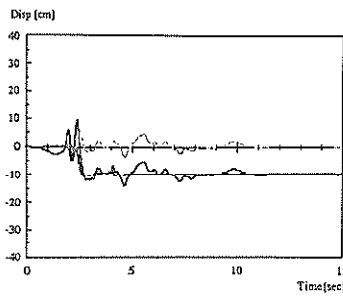
Photo 1 実験装置

Table 1 実験条件

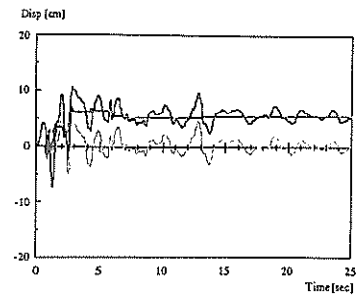
入力波	修正 JMA KOBE-NS波		修正 JMA KOBE-EW波		修正 El Centro-NS波	
	なし	あり	なし	あり	なし	あり
潤滑剤	なし	あり	なし	あり	なし	あり
計測	振動台の変位、振動台と台車の相対変位、 振動台の加速度、台車の加速度					



(a) 修正JMA KOBE NS波潤滑剤なし

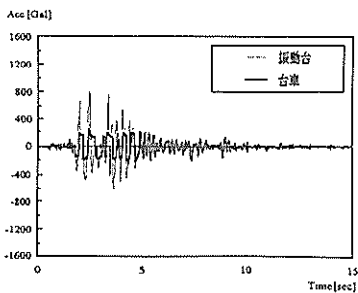


(b) 修正JMA KOBE EW波潤滑剤なし

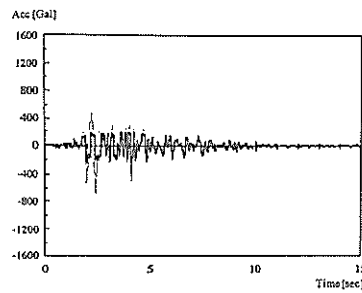


(c) 修正El Centro NS波潤滑剤なし

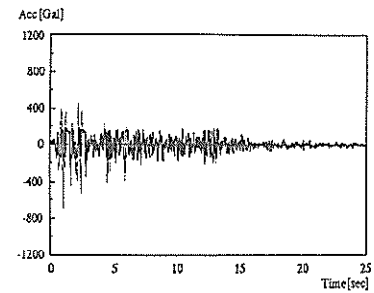
Fig. 3 変位応答



(a) 修正JMA KOBE NS波潤滑剤なし

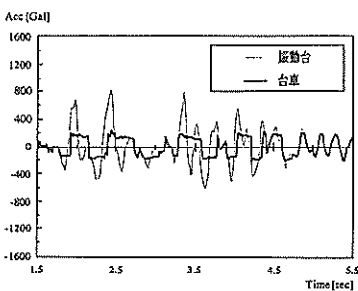


(b) 修正JMA KOBE EW波潤滑剤なし

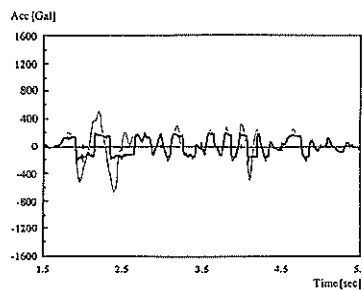


(c) 修正El Centro NS波潤滑剤なし

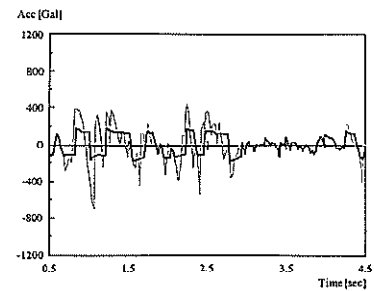
Fig. 4 加速度応答



(a) 修正JMA KOBE NS波潤滑剤なし



(b) 修正JMA KOBE EW波潤滑剤なし



(c) 修正El Centro NS波潤滑剤なし

Fig. 5 加速度応答(時間軸拡大)

台と台車の相対変位を計測する。以上を各ケースについて3回ずつ繰り返す。

2.2 実験結果

振動台の変位、台車の変位、振動台と台車の相対変位をFig. 3に示す。振動台と台車の相対変位から分かるように2.5秒前後にすべりが発生しており、5秒以降はほとんどすべりは生じていない。最大相対変位は修正JMA KOBE NS波の場合15.1~15.3 cm、修正JMA KOBE EW波の場合10.1~11.4 cm、修正El Centro NS波の場合6.0~7.1 cmであった。

Fig. 4に振動台の加速度と台車の加速度を示す。Fig. 5は最大加速度の発生する付近の時間軸を拡大したものである。いずれの入力波においても台車の

加速度応答は200Gal以内に低減されている。このことから、重力加速度は約980Galなので摩擦係数は約0.2であることがおおよそ推定される。RMS値比〔(台車の加速度のRMS値)/(振動台の加速度のRMS値)〕は修正JMA KOBE NS波で58.4~59.2%、修正JMA KOBE EW波で69.9~71.0%、修正El Centro NS波で73.9~77.5%となった。潤滑剤の有無は応答にはほとんど影響しなかった。

3. 摩擦係数の同定

3.1 同定方法

実験で得られた変位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 は重力加速度である. 摩擦係数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), (3)で仮定する⁷⁾.

ここで v は相対速度であり, v_{lim} は $v=0$ 前後で摩擦係数の値が急変し, 応答が発散することを防ぐ為

$$\mu = \begin{cases} \mu^* & v < -v_{\text{lim}}, v_{\text{lim}} \leq v \\ \frac{v}{v_{\text{lim}}} \mu^* & -v_{\text{lim}} \leq v < v_{\text{lim}} \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu^* = \mu_d + (\mu_s - \mu_d) \exp(-c|v|) \quad (3)$$

に仮定した値であり, $v_{\text{lim}} = 1.0 \text{ cm/sec}$ とした. $\mu-v$ 関係を Fig. 6 に示す. 未知パラメータ μ_s, μ_d, c を変数 $\mathbf{p} = \{p_1, p_2, p_3\}^T$ ($p_1 = \mu_s, p_2 = \mu_d, p_3 = c$) とおき, 試行パラメータを用いて式(1)~(3)および Newmark β 法による応答解析により相対変位 $\mathbf{x}^k = \{x_1^k, x_2^k, x_n^k\}^T$ (ここで x_i^k は時刻 $t = \Delta t \times i$ における変位応答, Δt は時間刻み) を求める. Newmark β 法による応答解析により求めた相対変位 $\mathbf{x}^k = \{x_1^k, x_2^k, x_n^k\}^T$ と実験で観測した相対変位 $\mathbf{x}^* = \{x_1^*, \dots, x_i^*, \dots, x_n^*\}^T$ の差の二乗の全ステップにおける総和をターゲット関数 $f(\mathbf{p}^k)$ とする.

$$f(\mathbf{p}^k) = \sum (x_i^* - x_i^k)^2 \quad (4)$$

$f(\mathbf{p}^k)$ を最小化することで μ_s, μ_d, c を同定する. 最小化手法には次に示す減速ニュートン法を用いた.

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 $\Delta \mathbf{x}^k$ 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.

$$\Delta f \equiv f(\mathbf{x}^k + \Delta \mathbf{x}^k) - f(\mathbf{x}^k) \cong \mathbf{g}^T(\mathbf{x}^k) \Delta \mathbf{x} + \frac{1}{2} (\Delta \mathbf{x}^k)^T \mathbf{H}(\mathbf{x}^k) \Delta \mathbf{x} \quad (5)$$

ここに

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}^k) = \left\{ \frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n} \right\}^T \quad (\text{勾配ベクトル}) \quad (6)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}^k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{bmatrix}_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^k} \quad (\text{ヘシアン}) \quad (7)$$

である. (5) を最小化する $\Delta \mathbf{x}^k$ は, (5) を微分することにより, 次式で与えられる.

$$\Delta \mathbf{x}^k = -\mathbf{H}^{-1}(\mathbf{x}^k) \mathbf{g}(\mathbf{x}^k) \quad (8)$$

(8) 式により $\Delta \mathbf{x}^k$ を求め,

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + \Delta \mathbf{x}^k \quad (9)$$

として, 次の点 \mathbf{x}^{k+1} を決定し, $\Delta \mathbf{x}^k$ が十分小さい値になるまで繰り返す方法をニュートン法という. こ

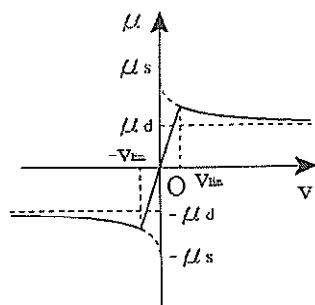
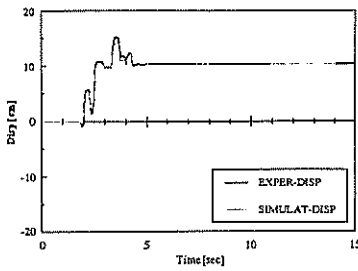


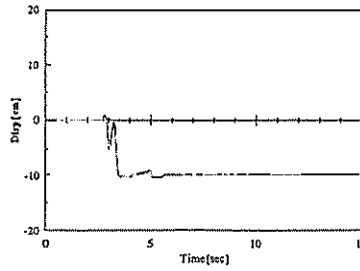
Fig. 6 $\mu-v$ 関係

Table 2 同定結果

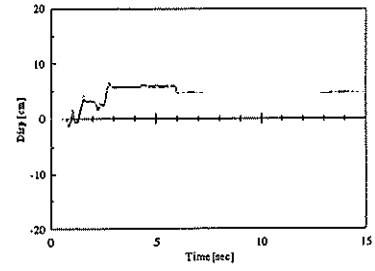
(a) 修正 JMA KOBE NS 波 (潤滑剤なし)					(b) 修正 JMA KOBE NS 波 (潤滑剤あり)				
	1回目	2回目	3回目	平均		1回目	2回目	3回目	平均
μ_s	0.198	0.193	0.239	0.210	μ_s	-	0.217	0.212	0.214
μ_d	0.027	0.047	0.071	0.048	μ_d	-	0.014	0.037	0.037
c	0.019	0.019	0.040	0.026	c	-	0.019	0.023	0.023
(c) 修正 JMA KOBE EW 波 (潤滑剤なし)					(d) 修正 JMA KOBE EW 波 (潤滑剤あり)				
	1回目	2回目	3回目	平均		1回目	2回目	3回目	平均
μ_s	0.156	0.194	0.201	0.184	μ_s	0.201	0.170	0.184	0.185
μ_d	0.071	0.107	0.101	0.093	μ_d	0.094	0.073	0.080	0.080
c	0.035	0.191	0.120	0.115	c	0.169	0.191	0.111	0.111
(e) 修正 El Centro NS 波 (潤滑剤なし)					(f) 修正 El Centro NS 波 (潤滑剤あり)				
	1回目	2回目	3回目	平均		1回目	2回目	3回目	平均
μ_s	0.197	0.131	0.142	0.157	μ_s	0.171	0.141	0.132	0.148
μ_d	0.088	0.060	0.114	0.087	μ_d	0.094	0.041	0.087	0.074
c	0.049	0.002	0.007	0.019	c	0.035	0.006	0.012	0.018



(a) 修正 JMA KOBE NS 波

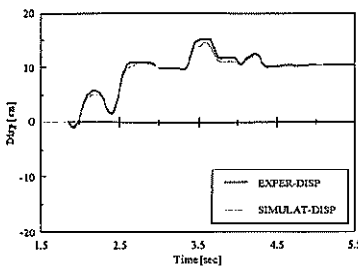


(b) 修正 JMA KOBE EW 波

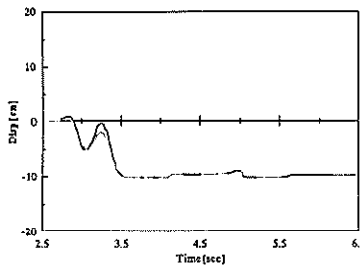


(c) 修正 El Centro NS 波

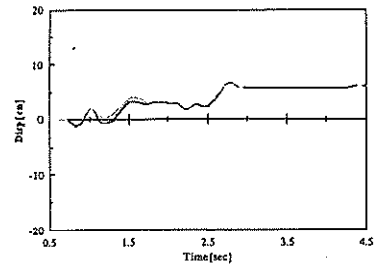
Fig. 7 変位の比較



(a) 修正 JMA KOBE NS 波



(b) 修正 JMA KOBE EW 波



(c) 修正 El Centro NS 波

Fig. 8 変位の比較(時間軸拡大)

の方法では解が発散するケースが多く、今回はこれを少し改良し

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + 0.1 \Delta \mathbf{x}^k \quad (10)$$

とし、減速ニュートン法と名付けた。また、収斂条件は

$$\|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}^{k+1}\|_{\infty} < \varepsilon \cdot \max\{1, \|\mathbf{x}^k\|_{\infty}\} \quad (11)$$

$$\text{であり、ここで } \|\mathbf{x}^k\|_{\infty} = \max\{|x_1^k|, |x_2^k|, \dots, |x_n^k|\} \quad (12)$$

である。

3.2 同定結果

同定結果をTable 2に示す。静止摩擦係数 μ_s は0.15~0.21程度となり、動摩擦係数 μ_d は0.04~0.1程度となった。このことは台車は200Gal程度を越えると滑り出すことを意味し、実験結果での応答加速度が抑制されていることを裏付けている。修正 JMA KOBE-NS波の潤滑剤ありの1回目が空欄であるのは、実験の失敗による。次に同定結果の精度を調べるために実験による変位応答と同定された摩擦係数を用いた変位応答の比較を行い、その結果の1例をFig. 7に示す。Fig. 8はすべりの発生する時刻付近を時間軸に拡大したものである。このグラフより同定結果は十分な精度を有していることがわかる。

4. 応答解析

同定した摩擦係数を用いてNewmark β 法による多質点系の応答解析を行い、滑り支承による応答低減効果を調べた。

4.1 解析条件

解析モデルはFig. 9に示すような4質点系水平せん断モデルおよび11質点系水平せん断モデルを使用した。モデルの質量および剛性をTable 3に示す。解析に用いた運動方程式を式(13)に示す。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} + \mathbf{E} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \text{sgn}(\dot{\mathbf{x}}) \mu M_{all} g \end{Bmatrix} = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}_g \quad (13)$$

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、 $\ddot{\mathbf{x}}_g$ は入力加速度である。減衰行列 \mathbf{C} は剛性行列 \mathbf{K} の0.05倍とした。入力加速度としてJMA KOBE-NS(最大加速度=818Gal)、JMA KOBE-EW(最大加速度=617Gal)の原波とし、El Centro NSについては原波の加速度を2倍にした修正El Centro NS波(最大加速度=683Gal)を用いた。支承のない場合はモ

デルの m_0 と式(13)の第4項を取り除き、 m_1, k_1 を第1層として解析を行い(時間刻み $\Delta t=0.01$, $v_{lim}=10\text{cm/sec}$), 各層の絶対加速度と層間変位を求めた.

4.2 解析結果

4質点系モデルにJMA KOBE-NS波を入力した場合の時刻歴応答の1部をFig.10に示す. 支承なしの場合と比較して, 支承ありの場合が絶対加速度, 層間変位とも大幅に低減している事が分かる. 4質点系モデルにJMA KOBE NS波を入力した場合の最大値とRMS値をそれぞれFig.11,12に示す. 同様にJMA KOBE-EW波の4質点系モデルの結果, 修正El Centro NS波の4質点系モデルの結果, JMA KOBE-NS波の11質点系モデルの結果, JMA KOBE-EW波の11質点系モデルの結果, 修正El Centro NS波の11質点系モデルの結果をそれぞれFig.13~16に示す. 潤滑剤の有無による差はほとんど見られず, 4質点系モデルの最大値はすべり部分を除いて65~

86%程度, RMS値は44~68%程度低減され, また11質点系モデルの最大値は11~71%程度, RMS値は30~57%程度低減された.

5. おわりに

摩擦係数が0.2程度のステンレスを用いた滑り支承を想定した実験を行った. ステンレス製の滑り面の上にステンレス製の台車を載せ, 時間圧縮した地震動を入力して加速度と変位を計測し, 摩擦係数を同定した. 摩擦係数を式(2), (3)で仮定し, 同定した結果, 静止摩擦係数は0.15~0.21程度, 動摩擦係数は0.04~0.1程度であることが分かった. 次に同定した摩擦係数を用いて4質点系および11質点系の応答解析を行い, 支承の応答低減効果を調べた. その結果, 絶対加速度, 層間変位とも約5割前後低減されることが分かった. なお式(2)による速度0前後における摩擦係数のスムージングの是非については検討の余地を残しているが, Fig. 8で見える限りでは実現象をよく表している.

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得ました. 記して謝辞といたします.

Table 3 質量及び剛性

(a) 11質点系モデル

story	0	1	2	3	4	5
mg_i [kN]	9898	9898	7938	7938	5978	5978
k_i [kN/cm]	0	10486	8526	8526	7448	6860
story	6	7	8	9	10	
mg_i [kN]	5978	5880	5880	5880	5880	
k_i [kN/cm]	6664	6272	6174	6027	5782	

(b) 4質点系モデル

story	0	1	2	3
m_i [kg]	100	100	100	50
k_i [kN/cm]	0	294	196	147

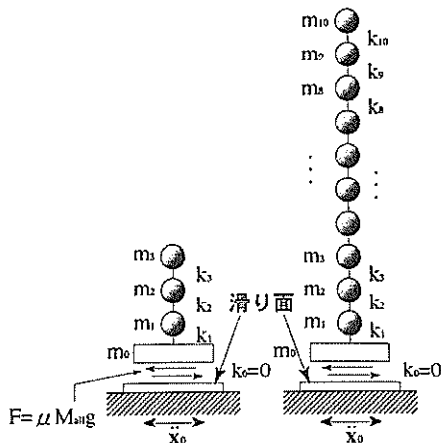
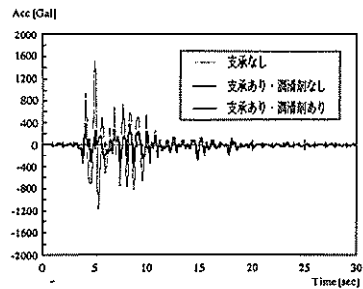
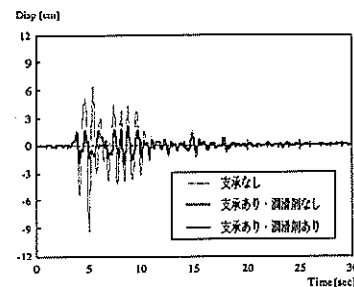


Fig. 9 解析モデル



(a) 3層加速度



(b) 2-1層層間変位

Fig.10 JMA KOBE NS波-4質点系-時刻歴応答

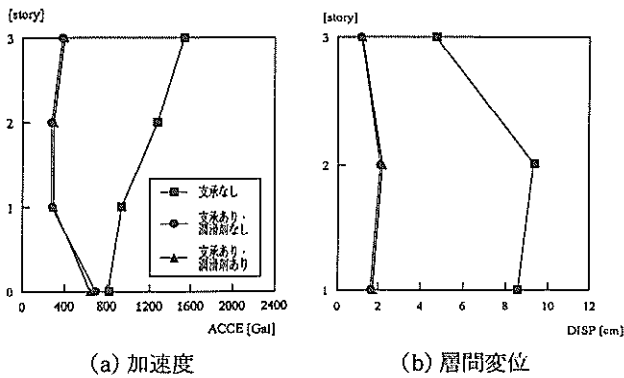


Fig.11 JMA KOBE NS波-4質点系-最大値

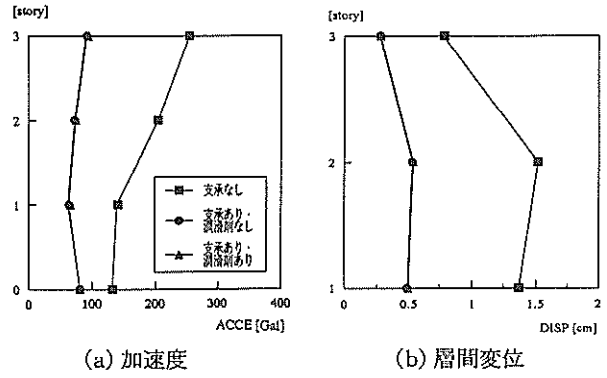


Fig.12 JMA KOBE NS波-4質点系-RMS値

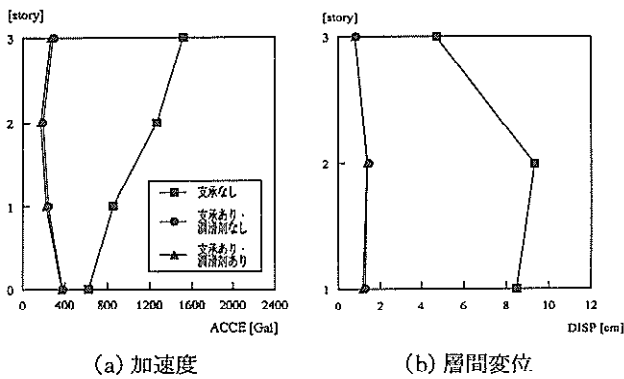


Fig.13 JMA KOBE EW波-4質点系-最大値

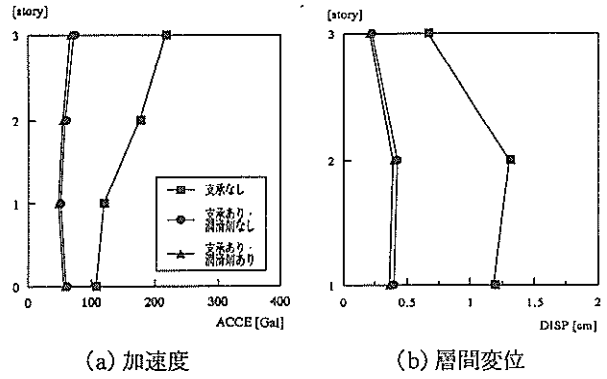


Fig.14 JMA KOBE EW波-4質点系-RMS値

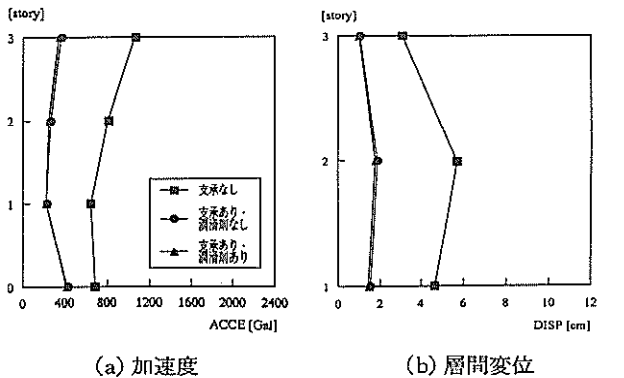


Fig.15 El Centro NS波-4質点系-最大値

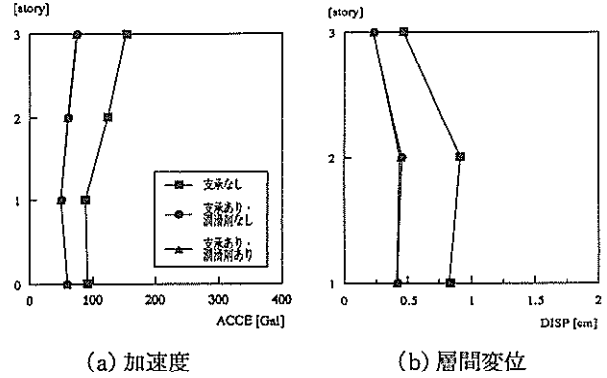
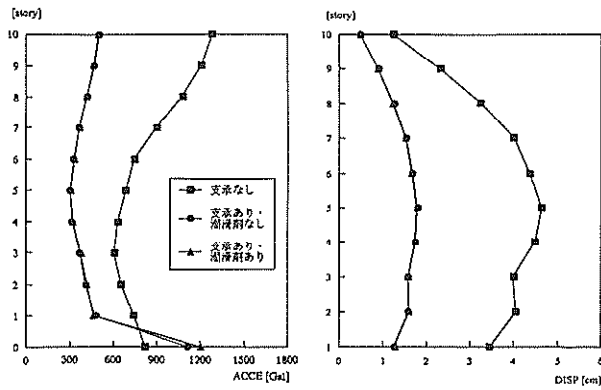


Fig.16 El Centro NS波-4質点系-RMS値

参考文献

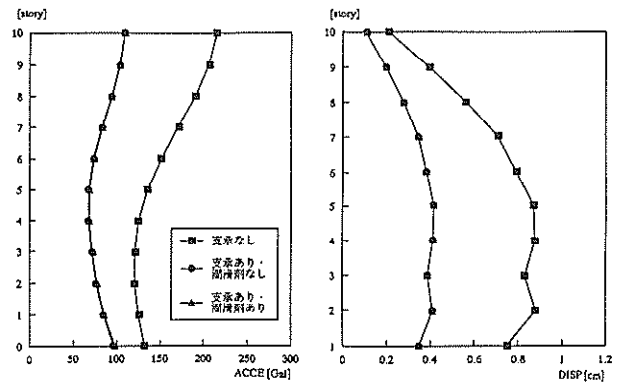
- 1) 多田英之：免震-地震への絶縁状，小学館1996
- 2) 富島誠司，大橋智樹，佐藤啓治：すべり支承方式の免震に用いるすべり材の摩擦係数に関する研究，日本建築学会技術報告集No.1, pp.140~145, 1995.12
- 3) 山本利弘，藤谷義信，藤井大地：摩擦，接触要

- 素を含む構造物の非線形振動解析について，日本建築会構造系論文集No.493, pp.41~48, 1997.3
- 4) 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 掲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, pp.503~504. 2002



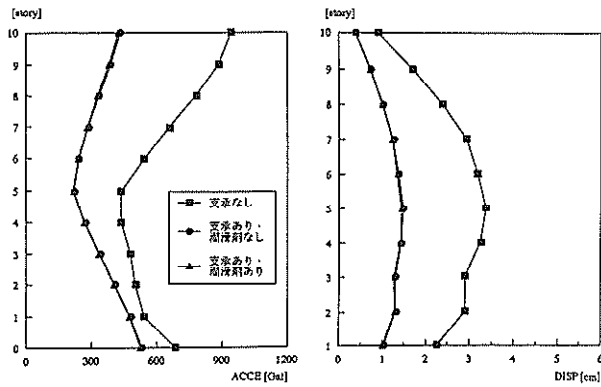
(a) 加速度 (b) 層間変位

Fig.17 JMA KOBE NS波最大値



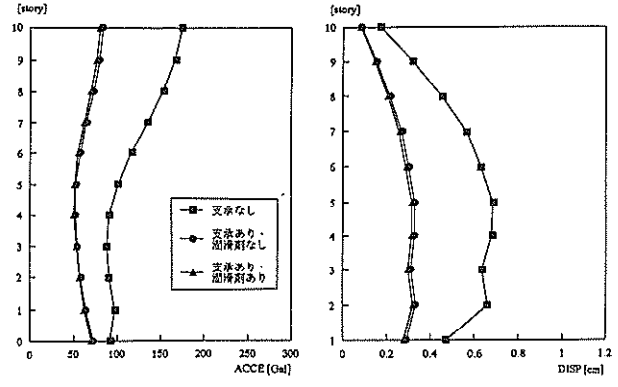
(a) 加速度 (b) 層間変位

Fig.18 JMA KOBE NS波RMS値



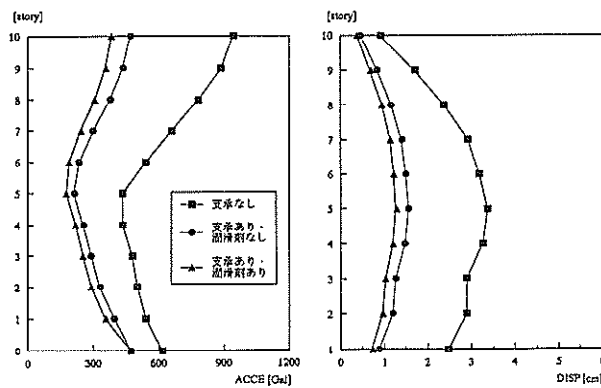
(a) 加速度 (b) 層間変位

Fig.19 JMA KOBE EW波-11質点系-最大値



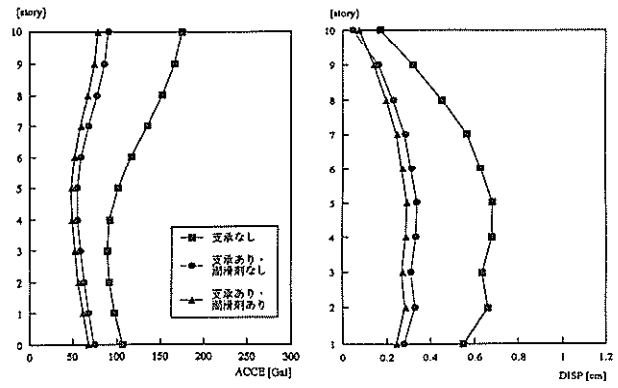
(a) 加速度 (b) 層間変位

Fig.20 JMA KOBE EW波-11質点系-RMS値



(a) 加速度 (b) 層間変位

Fig.21 修正El Centro NS波-11質点系-最大値



(a) 加速度 (b) 層間変位

Fig.22 修正El Centro NS波-11質点系-RMS値

- 5) 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 p.487-488, 1998
- 6) 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pp.653~654, 2000

- 7) John Hallquist, : Nonlinear Dynamic Analysis of Structures LS-DYNA user's manual