

すべり摩擦型免震の振動応答に関する研究

—住宅と美術品の免震について—

柴田 耕一（数理情報工学科）

序論本研究は、戸建て住宅のように比較的軽量の構造物の免震システムを目指し、なるべく既存のすでに人類が経験したことのあ
る技術にヒントを得た全く新しい免震システムを研究し、完成さ
せたものであります。その中で、住宅が台風では静止し、地震時
にすべることが出来るように、すべり面の中心部で摩擦係数を大
きく、すべり出すとすべり面の周辺部で摩擦係数を小さくして、
住宅への地震の入力加速度を低くおさえるシステム、すなわち
「摩擦係数可変型」の免震支承を用いている。又、本システムは
地震時の構造物への応答変位、応答加速度をなるべく小さくする
ことが出来て、しかも、地震終了時の残留変位を小さくおさえる
ことを可能とするよう、復元力として免震支承を取り巻く薄いゴ
ム幕を使用している全く新しい免震システムであります。

次に、さらに軽量の美術品に対しては、室内の免震と云う事で台
風よりも、対地震のみ考えれば良い。しかも、どこにでも手に入
る安い材料を用いることによる手軽な免震支承の研究を行った。
すべり面は鋼の半球面上で、その上をフッ素支承がすべるように
し、この組合せの上に美術品が設置される。この研究は、重量の
大きな美術品に対してさらに研究を進める必要が残されている。

I. 住宅用の免震

すべり摩擦型免震構造の振動応答解析 文献1

I-1) 序

本論では、既に橋梁などに適用されており信頼性の高いテフロン
(PTFE)とステンレス盤を用いた、初期位置でのすべりも考慮に入れ
たすべり摩擦型免震についての研究を行う。

始めに、摩擦係数一定の支承盤および摩擦係数可変型支承盤を用
いた、すべり摩擦型免震装置による実大加振実験を行い、その結果
から免震効果の検証と本論で提示する水平2軸方向同時加振時の解
析手法の妥当性を考察する。

次に、今回の免震対象物である戸建て住宅等のように比較的軽量
な構造物にすべり摩擦型免震を適用する場合、免震効果を左右する
重要なポイントとなる摩擦係数の設定を行う。そのために中心部の
摩擦係数を高くして、風圧力など地震動以外の影響(風速 20[m/sec]
以下)によってすべり出すことを防ぎ、更に大地震時にはすべり出し、
中心部からずれることで摩擦力を小さくして、本論で提示する解析
手法を用いて応答加速度が 250[cm/sec^2]以下の免震効果を得るこ
とが出来よう、摩擦係数の分布を決定する。

I-2) 免震装置の構造

本免震装置は、面圧可変による摩擦係数可変型すべり支承(図 1,2)
である。その基本構造は PTFE 系すべり材とステンレス鏡面磨きを
施したディンプル支承盤から成り、中心位置への復元力機構として
薄肉円筒型ゴムをすべり支承の周りに設置してある。

摩擦係数を変動させるために、面圧が高くなるにつれて摩擦係数
が低くなるような摩擦材の面圧依存性(図 3,4)を利用している。そこ
で、中心位置では面圧が低くなる平面とし、中心位置以外では面圧
が高くなるように支承盤上に格子状に配置した孔を設けている。こ
の支承盤により、摩擦係数可変型のすべり支承となっている。

このすべり支承を用いることにより、風圧力に対して安全性およ
び居住性を高め、大地震時には免震効果が期待できるものと考えら
れる。

実験と解析との比較では固有周期 1.9 秒の試験体を用いているが、
応答を最小にする固有周期 3 秒以上に、より近い実際に可能な周期
2.5 秒を設定し摩擦係数分布のシミュレーションを行った。

I-3) 解析手法

1軸方向加振時の解析手法^{3),4)}を2軸方向同時加振時に対応した
手法とするために、すべりが生じていない場合とすべりが生じてい
る場合の切り替え条件と摩擦係数の算出時にベクトルを用いる。以

下にその手法を示す。

質点に摩擦力、ばね剛性、粘性減衰が作用する系に強制外力が加わる場合の運動方程式は以下ようになる。解析モデルを図2に示す。

① すべりが生じていない場合

$$\dot{X}_x = \text{constant} \quad (1) \quad \ddot{X}_x = 0 \quad (2) \quad \ddot{X}_x = 0 \quad (3)$$

$$\dot{X}_y = \text{constant} \quad (4) \quad \ddot{X}_y = 0 \quad (5) \quad \ddot{X}_y = 0 \quad (6)$$

② すべりが生じている場合

$$m(\ddot{X}_x + \ddot{Z}_x) + c\dot{X}_x + kX_x + \text{sign}(\dot{X}_x)F_x = 0 \quad (7)$$

$$m(\ddot{X}_y + \ddot{Z}_y) + c\dot{X}_y + kX_y + \text{sign}(\dot{X}_y)F_y = 0 \quad (8)$$

ここで、 F_x, F_y は式(9)から求めた摩擦力を各方向の成分に分けた値である。

$$F = \mu m(g + \ddot{U}), \quad F_x = F \cos \varphi, \quad F_y = F \sin \varphi \quad (9)$$

ただし、

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\dot{X}_y}{\dot{X}_x} \quad (10)$$

①、②の切り替え条件はベクトルを用いて摩擦力と慣性力の大きさを比較し、式(11),(12)により行う。

①→②の条件

$$|m(\ddot{X} + \ddot{Z}) + c\dot{X} + kX| > \mu_D m(g + \ddot{U}) \quad (11)$$

②→①の条件

$$|m(\ddot{X} + \ddot{Z}) + c\dot{X} + kX| \leq \mu m(g + \ddot{U}) \quad (12)$$

次に、本論で使用するテフロン(PTFE)とステンレスによるすべり摩擦の場合、摩擦係数は図3に示す速度依存性⁹⁾があり、任意の面圧について速度ベクトルを用いて式(13)より求める。

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{|\dot{X}| + 0.05}{|\dot{X}| + 0.6} \right) \quad (13)$$

また、摩擦係数 μ_0 は面圧依存性があり、静的な摩擦係数 μ_1, μ_2 については図4に示す特性がある。この性質を利用して、様々な摩擦係数分布が設定できる。本論では摺動子の変位により面圧が変化する支承盤を用いることで、面圧に依存した摩擦係数 μ_0 は変位(面積)依存型の摩擦係数 μ_D に置き換えることが出来、変位依存になった摩擦係数は式(14),(16)から求める⁹⁾。

i) 摺動子が摩擦係数の異なる μ_1, μ_2 上にまたがるとき(図5左)変位ベクトル $|X|$ に比例して摩擦係数が変動するような式(14)を用いる。

$$\mu_D = \frac{S_1}{\pi r^2} \mu_1 + \left(1 - \frac{S_1}{\pi r^2} \right) \mu_2 \quad (14)$$

ただし、

$$S_1 = r^2(\theta - \sin \theta), \quad \theta = 2 \cos^{-1} \frac{|X|}{2r} \quad (15)$$

ii) 摺動子全体が μ_2 上にあるとき(図5右)式(16)を用いる。

$$\mu_D = \mu_2 \quad (16)$$

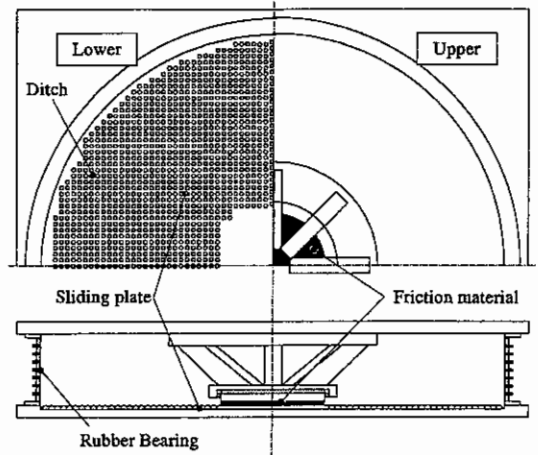


図1 すべり摩擦型免震装置

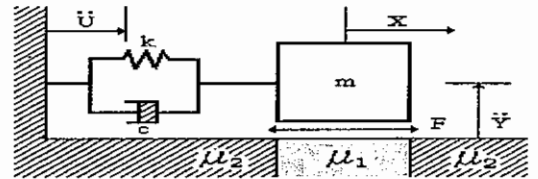


図2 解析モデル

表1 摺動子諸量

Friction material	Main	Sub
Load [N]	1.96×10^4	4.9×10^3
Diameter [mm]	92	46
Material	PTFE	

表2 薄肉円筒型ゴム諸量

	Value
Load [N]	3.92×10^4
Natural period [sec]	1.9
Stiffness [N/m]	4.3×10^6

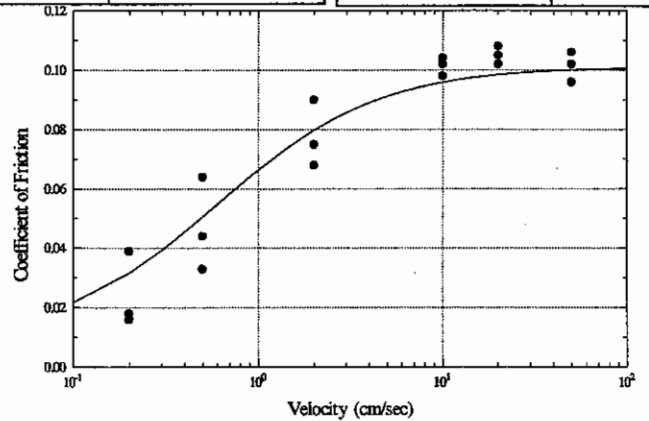


図3 摩擦係数の速度依存性(面圧 1.794×10^7 [N/m²])

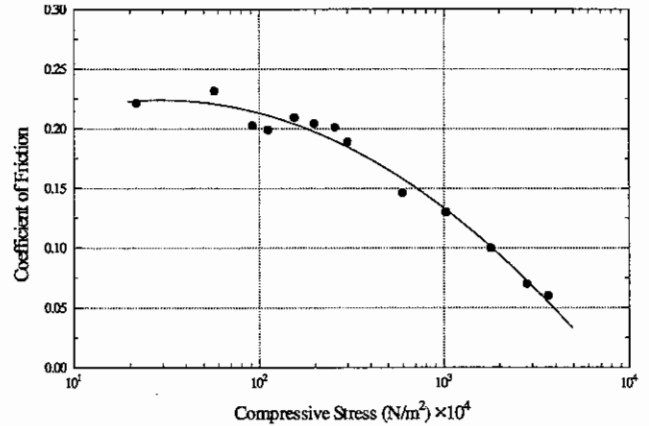


図4 摩擦係数の面圧依存性

I-4) 実験概要

振動台は日本大学理工学部理工学研究所多入力振動試験装置(2軸)を使用。重錘 3.92×10^4 [N]。実験装置全体の中心部における静摩擦係数は 0.220 である。また、中心部以外のディンプル部の静摩擦係数は 0.176 (中心部の 80%) である。1 軸方向による最大速度を 70 [cm/sec] に比例調整した 4 種類の地震波 (EL Centro (1940), Hachinohe (1968), Taft (1952), JMA Kobe (1995)) を入力加速度とする。変位の最大値を小さく抑え、更に復元力の付加や残留変位を小さくするために薄肉円筒型ゴム(図 1) を免震装置の周辺を覆うように設置する。この実験装置の固有周期は 1.9 秒である。

I-5) 地震応答解析と振動台上実験結果との比較

摩擦係数が一定となる平面盤とばねを組み合わせた場合と、初期位置では摩擦係数が高く、その他の位置では摩擦係数が低くなるようなディンプル盤とばねを組み合わせた場合の実大振動実験(固有周期 1.9 秒)から得られた結果と、振動実験により加振テーブル上から観測された入力加速度波形を用いた本解析手法による解析値との比較を行った。なお、解析に使用した減衰定数は $h = 0.05$ とした。

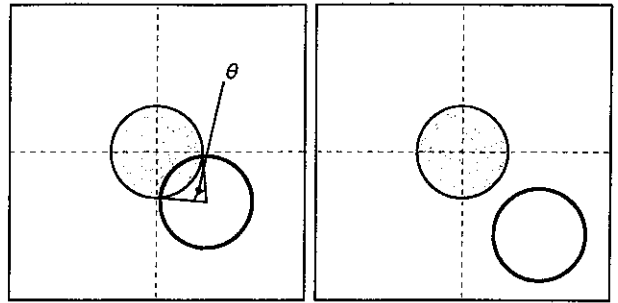
ディンプル盤における最大応答加速度(図 6)は摩擦係数一定の平面盤に比べ約 40 [cm/sec²] 低減している。ただし、最大応答変位はディンプル部の摩擦係数が中心部に比べ低いため約 1.7 [cm] 増大している。

2 種類の減衰定数 ($h = 0.00, 0.05$) による相対応答変位の軌跡(図 7)、絶対応答加速度—相対応答変位関係(図 8)から 2 つの解析値は共に実験値と同様な傾向を示しており、2 方向同時加振に対する本解析手法の妥当性が確認できる。

I-6) 摩擦係数分布の検討

本来、応答加速度を最小にする固有周期は 3~4 秒であるが、最大応答変位や残留変位を考慮して固有周期 2.5 秒のすべり摩擦型免震システムで解析した。この時、風速 20 [m/sec] 以下で上部構造がすべり出すことがなく、風速 25~30 [m/sec] (風荷重 $39.2 \sim 58.8 \times 10^3$ [N]) ですべり¹⁰⁾、更に大地震時には上部構造の最大応答加速度が 250 [cm/sec²] 以下となる免震システムを考える。小規模な住宅では支持荷重 3.92×10^4 [N] 用すべり免震装置 6 基を用いるとするならば、1 基当たりの風荷重は $6.53 \sim 9.80 \times 10^3$ [N] となる。この条件下ですべり出すためには初期位置における静摩擦係数は $0.166 \sim 0.250$ が望ましいと考えられる。そこで、今回は初期位置における静摩擦係数の高い部分は $\mu = 0.180$ 、摩擦係数の低い部分(ディンプル部)は、PTFE—ステンレス盤の組み合わせで得られる可能な静摩擦係数で $\mu = 0.144$ としシミュレーションを行う。

各地震波とも、摩擦係数が高い中心部の円の直径に関わらず最大応答加速度はほぼ一定の値となっているが、摩擦係数の高い中心部の直径が 10 [cm] 以上になると NS, EW 方向ともに増大する傾向が見られる。また、最大応答変位についても摩擦係数が高い中心部の円



※太線は摺動子の位置、灰色部は μ_1 部、白色部は μ_2 部を示す。

図 5 摺動子の位置

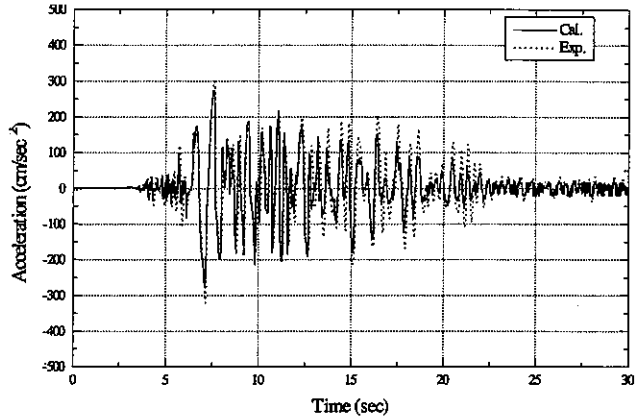


図 6 絶対応答加速度波形 (ディンプル盤 EW 方向)

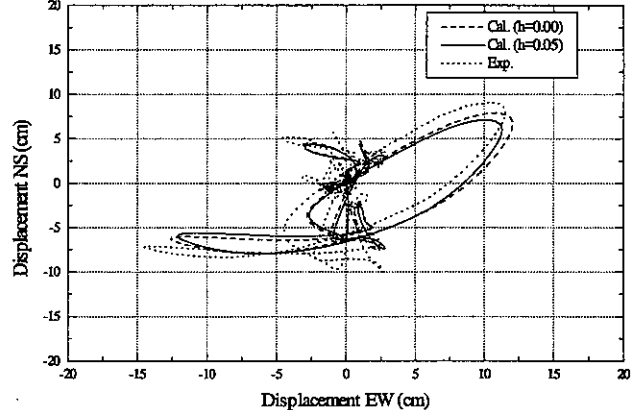


図 7 相対応答変位の軌跡 (ディンプル盤)

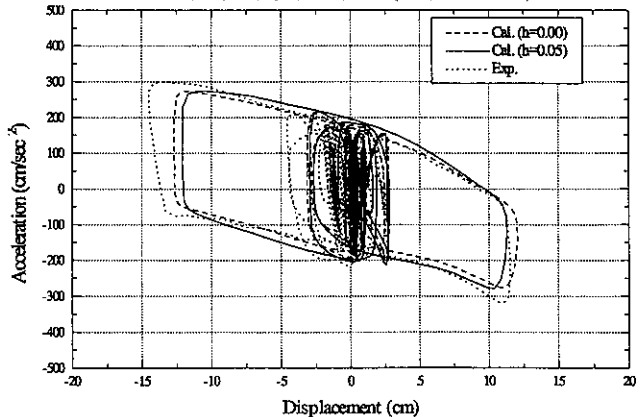


図 8 絶対応答加速度—相対応答変位関係 (ディンプル盤 EW 方向)

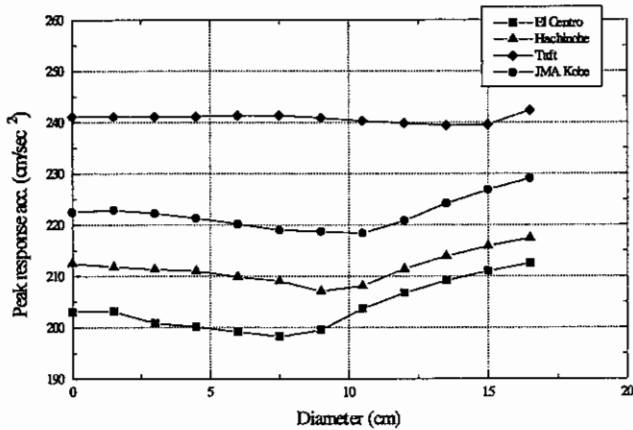


図9 最大応答加速度 (2方向合成)

の直径が変化することによる影響は小さい。2方向合成した結果(図9,10)からも同様のことが言える。

したがって、異なる周波数成分を含む4種類の入力加速度によるシミュレーションの結果、応答加速度の最大値は全て $250 [cm/sec^2]$ 以下に抑えられていることから、本論のすべり摩擦型免震システムの有効性が確認できた

以上の結果から考えられることは、中心部の円の直径は $0 \sim 10 [cm]$ が適していると言える。

I-7) 結論

- (1) 2軸方向同時加振実験により解析手法の妥当性が示された。
- (2) 実大加振実験による結果から、最大応答加速度が低減され免震効果も得られ、軽量な構造物に対しての免震システムに適していることが分かった。

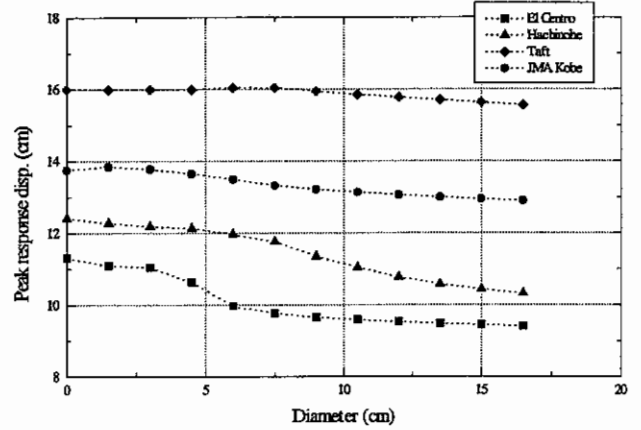


図10 最大応答変位 (2方向合成)

(3) 免震効果を高め、風圧力など地震動以外の影響(風速 $20 [m/sec]$ 以下)によってすべり出さないようにするためには

減衰を加え、図1の様な平面的な転がり振り子に見立てた2次元初期位置の摩擦係数を高く、周辺部では低くなる摩擦係数の分布が適していることが分かった。

(4) 摩擦係数分布のシミュレーションから、摩擦係数の高い中心部の円の直径に関わらず、応答加速度は $250 [cm/sec^2]$ 以下と安定した応答を示したが、直径 $10 [cm]$ 以上では応答加速度が増大する傾向にあるため、中心部の摩擦係数の高い円の直径は $10 [cm]$ 以下が適していることが分かった。

(5) 初期位置で摩擦係数がより高くなる面圧を与え、それ以外の場所では摩擦係数が低くなる面圧の分布にすることにより、必要な免震効果を得ることが出来た。

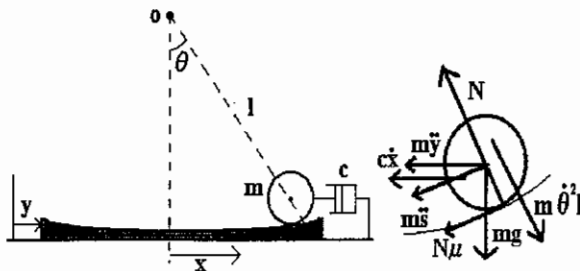


図1 解析モデルと自由体図

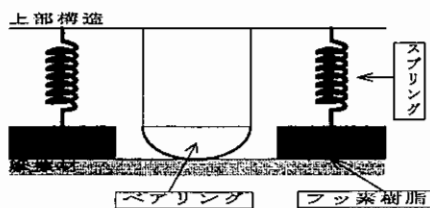


図2 免震支承モデル図

II. 美術品の免震

すべり摩擦型免震に関する研究 文献2

II-1) 序

本論では、すべり支承は摩擦係数の比較的高いフッ素樹脂と摩擦係数の低いベアリング支承を組み合わせたものである(下部すべり板は鋼製)。その支承を用いて速度に依存した摩擦係数を把握し、振動応答解析を行った。また荷重(面圧)に依存した摩擦係数の関数や水平方向に粘性減衰を加えた解析モデルを考え、地震動入力による振動応答解析を行った。

II-2) 解析モデル

本論では摩擦材の表面が曲面のために重力による復元力をもつすべり摩擦型免震システムに、水平方向に速度に比例する粘性

の解析モデルを使用した。この系に強制外力 \ddot{y} が働いた場合、

水平方向の釣合式

$$-m(\ddot{y} + \ddot{s} \cos \theta) - N \sin \theta - \text{sign}(\dot{\theta}) \mu N \cos \theta - c l \cos \theta \dot{\theta} + m \dot{\theta}^2 l \sin \theta = 0 \quad (1)$$

上下方向の釣合式

$$-m \ddot{s} \sin \theta - mg - \text{sign}(\dot{\theta}) \mu N \sin \theta + N \cos \theta - m \dot{\theta}^2 l \cos \theta = 0 \quad (2)$$

抗力(曲線に垂直な)方向の釣合式

$$N + m \ddot{y} \sin \theta - mg \cos \theta - m \dot{\theta}^2 l + c l \cos \theta \dot{\theta} \sin \theta = 0 \quad (3)$$

質点の運動方程式は(1),(2)式より

$$I_0 \ddot{\theta} + m g l \sin \theta + \text{sign}(\dot{\theta}) \mu N l + c l^2 \cos^2 \theta \dot{\theta} = -m \ddot{y} l \cos \theta \quad (4)$$

となる。ただし、 $c = 2 h m \sqrt{g/l}$ とする。

水平方向に粘性減衰を加えない運動方程式は、(1)~(4)式の粘性減衰を $c=0$ とすることで導く。

よって、粘性減衰がない場合の運動方程式は

$$I_0 \ddot{\theta} + m g l \sin \theta + \text{sign}(\dot{\theta}) \mu N l = -m \ddot{y} l \cos \theta \quad (5)$$

$$N + m \ddot{y} \sin \theta - mg \cos \theta - m \dot{\theta}^2 l = 0 \quad (6)$$

となる。

応答解析は、(3),(4)式(または、(5),(6)式)に地動加速度 \ddot{y} と必要なパラメータ(質量 m 、曲率半径 l 、摩擦係数 μ 、減衰定数 h)を与え、そのときの抗力 N と地動応答として θ を逐次求める。

II-3) 実験概要

試験体の上部支承は摩擦材を同心円上かつ放射線状に3箇所配置し、下部すべり板は曲率のある鋼製とする。上部重量は約3kgf~7kgf、一本の支承(フッ素とベアリングを組み合わせた)(図2)の中のスプリングの強さは、1.8cmに縮めたとき0.3kgfの圧力がかかるものを3本使用している。また、本研究で使用した免震支承の寸法を図3、表1に示す。

II-4) 摩擦係数の算出

摩擦係数の算出は、粘性減衰がない運動方程式で行う。解析モデルが(5)、(6)式で成り立つと仮定し、(5)式を摩擦係数 μ について解くと、

$$\mu = \frac{I_0 \ddot{\theta} + m g l \sin \theta + m \ddot{y} l \cos \theta}{\text{sign}(\dot{\theta}) N l} \quad (7)$$

となる(図4)。



表1 支承の寸法

	直径2r (mm)	フッ素厚みr' (mm)
TYPE0	5.00	1.50
TYPE1	5.50	1.75
TYPE2	6.00	2.00
TYPE3	6.50	2.25
TYPE4	7.00	2.50

図3 支承の寸法

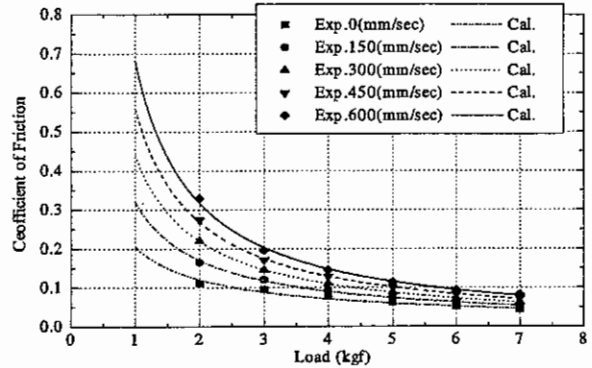


図4 摩擦係数荷重依存性(TYPE4)

表2 入力地震波形

地震波	方向	最大加速度(gal)
JMA-KOBE	E-W	570.7
EL-CENTRO		396.3
HACHINOHE		340.0
TAFT		771.5

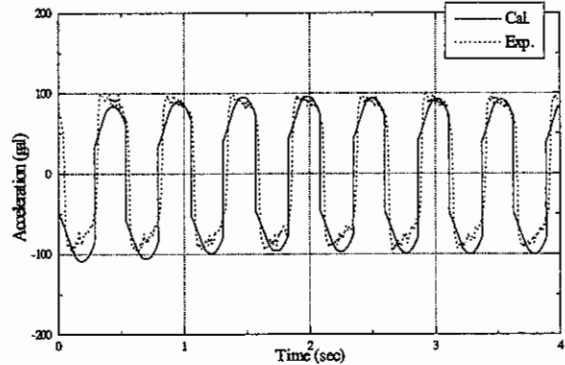


図5 絶対応答加速度(w=5.0kgf 0.5G 2.0Hz TYPE4)

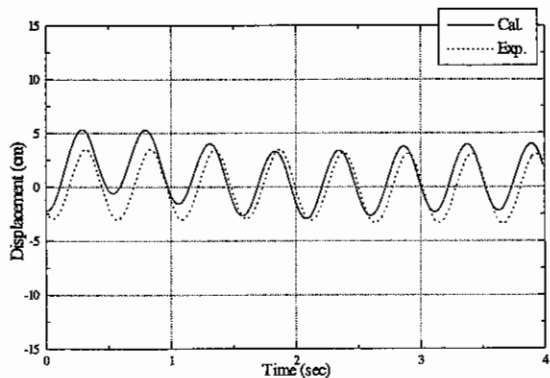


図6 相対応答変位(w=5.0kgf 0.5G 2.0Hz TYPE4)

II-5) 解析モデルの検証 (解析値と実験値の比較)

解析モデルの妥当性を検証するため、振動応答解析の結果と振動台上加振実験の結果を比較検証した。解析及び実験の条件は、摩擦材の曲率半径 200cm、上部重量 5kgf (上部台座 2kgf+錘 3kgf)、入力波に正弦波 2Hz,0.5G を用いた。比較した結果を図 5,6 に示す。変位波形に傾き等の過渡現象が生じているが、絶対応答加速度及び相対応答変位ともほぼ対応した解析結果が得られた。よって解析モデルと摩擦係数の関数はほぼ妥当であると言える。

II-6) 地震応答解析

入力地震波の速度を最大 70(kine)に比例調整した地震波を用いた(表 2)。また上部重量を 1.00kgf~3.00kgf として、免震支承を TYPE0 から TYPE4 についての地震応答解析を行った。

II-7) 結論

本論では、すべり摩擦型免震システムの免震支承と振動応答について述べた。解析モデルの検証では、解析値と実験値が正弦波において対応した結果が得られ、解析モデルと摩擦係数の関数化の妥当性が確認された。また地震応答解析では、免震支承のフッ素部分の面積を大きくすることにより、相対応答変位を抑えることができることが確認された。摩擦材の曲率半径が 200cm、上部重量 3.00kgf の場合、直径 5.00cm の免震支承(TYPE0)と直径 7.00cm の免震支承(TYPE4)とでは、絶対応答加速度が若干大きくなるものの、相対応答変位を TYPE0 の約半分に抑えている。文献 1 は上部重量が 1~2kgf に限定されていたが、今後この方法によるとフッ素部分の面積を増加させることにより、摩擦係数を変化させてより重い美術品の免震が可能になると思われる。

以上 I, II 項の研究の結果、すべり摩擦力で入力地震動の振動応答をコントロール出来ることが解かった。すなわち、固有周期、摩擦係数、ばね力を調整することにより、我々が許容出来る範囲以内に地震入力を制御することが出来た。

本報告の以前に、日本鋼管との共同研究で完成していた床免震の技術は今回、そのまま一方では美術品に応用し、一方では東洋ゴム工業との共同研究である住宅の摩擦係数可変型の免震に応用し、1つの新しい技術を完成することが出来た事は、日大の4年、大学院修士、同博士の学生と企業との血と汗の結晶と云っても

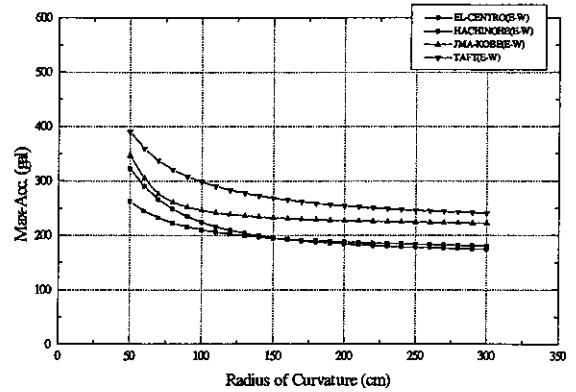


図 7 加速度応答スペクトル(w=3.0kgf TYPE4)

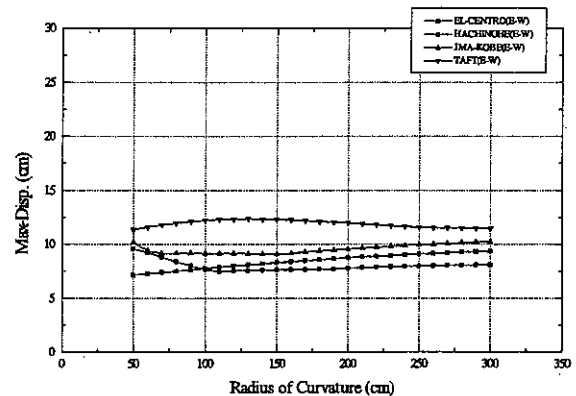


図 8 変位応答スペクトル(w=3.0kgf TYPE4)

過言ではありません。

ここに感謝してしめくりたいと思います。

参考文献

- 1) 柴田康弘、奥岳史、坂田利文、岡本修一、柴田耕一：すべり摩擦型免震構造の振動応答解析に関する研究(摩擦係数の分布とディンプルすべり支承上の地震応答解析)，日本建築学会構造系論文集，第 545 号，63-69，2001 年 7 月
- 2) 成川祥一、金子靖、柴田耕一：すべり摩擦型免震に関する研究(免震支承と振動応答について)，日本大学生産工学部第 34 回学術講演会，p9~12，2001，12.1