

剛体振動系におけるテフロンへの滑り動特性

SLIDING DYNAMIC CHARACTERISTICS OF TEFLON UNDER RIGID MASS VIBRATING SYSTEM

鳥野 清* 北川正一** 堤 一*** ソヘイル・クレスシ**** 宮原 慎*****

By Kiyoshi UNO, Shoichi KITAGAWA, Hajime TSUTSUMI, Sohail M. QURESHI and Shin MIYAHARA

Recent years have seen extensive applications of base isolation systems such as the Lead Rubber Bearings (LRB) and the Resilient Friction Base Isolator (R-FBI) utilizing the basic concept of dry friction. This paper describes the frictional characteristics of Teflon sheet interfaces for application in sliding bearings for the isolation of building and bridge structures. Laboratory tests were conducted to determine the effects of bearing pressure, shaking frequency, sliding acceleration and sliding velocity on the frictional properties of Teflon. It is concluded that friction drops with increasing pressure with the rate of reduction depending on the velocity of sliding. The responses of the model to three earthquake time histories using the testing results are also calculated.

1. まえがき

近年、中低層構造物の地震時の安全性が重要視されている。種々の地震動に対して、建物側でそれをコントロールしようとするシステムが免震構造である。耐震構造が地震によるエネルギーを建物の弾性および変形により吸収するのに対し、免震構造ではある種の装置または機構を設けることにより、上部構造や内部機器の安全性を確保している。基本的な原理は上部構造と地盤の間に滑り支承を設置して、構造物全体を長周期化し、地震動との共振を避けようとするものである。一方、長周期化することによって地盤と構造物の相対変位は増大するが、これはダンパーやストッパー等によって抑制される¹⁾²⁾³⁾。

本研究では、免震支承における滑り支承に注目し、温度、クリープ、縮み等の影響を受けにくく摩擦係数が小さいテフロンについて、その基本的な動特性を実験より明らかにすることを目的としている⁴⁾。一般に、構造物が地震を受けると基礎だけでなく上部構造も振動することから、基礎に慣性力がフィードバックされる。しかし、この場合応答が複雑となることから、本実験では1自由度系の剛体模型を用い、これにテフロン支承を直接設置する簡単な構造系とした。また、模型の支承部の面圧、入力加速度および入力周波数を種

*	工博	九州大学助教授	工学部土木工学科	(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)
**	理修	九州大学助手	工学部土木工学科	(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)
***	工博	九州大学教授	工学部土木工学科	(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)
****	M. Sc.	九州大学大学院生	工学部土木工学科	(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)
*****		九州大学大学院生	工学部土木工学科	(〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

々に変化させることにより、テフロン支承の滑り機構を明らかにした。次に、実験より得られたテフロン支承の動特性を用いて、地震応答解析を行い応答特性を検討した。

2. 実験概要

図-1に示すように、剛体模型底板の4隅にテフロン支承を設け、振動台上にセットしたテフロンシート(厚さ5mm)上をこの模型がスライドできるようにした。模型は厚さ8mmの鉄板で高さ30cm、底面40×30cmの中空の箱となっている。模型および振動台の加速度はサーボ加速度計で測定し、模型の変位は絶対変位と相対変位を模型の振動に影響を与えない接触型変位計(最大±50mm)により測定した。模型の回転の影響を調べるため、図-1に示すように絶対、相対の各変位に対し、模型の両端の変位を計った。この測定の結果、2つの変位の相違は誤差の範囲内にあり、回転の影響はないものと考えられ、2つの変位計の平均値を用いて模型の変位とした。

実験にあたっては、次の三項目に重点をおいた。

(1) 入力周波数の影響

通常耐震的に重要な周波数の領域は5.0Hz以下と考えられるが、振動台の性能上、1.0Hz前後において十分な入力加速度が得られなかった。そこで、入力周波数としては1.5、2.0、3.0、4.0、5.0Hzの5通りに限定して実験を行った。

(2) テフロン支承部の面圧の影響

模型は中空箱型になっており、内部に7枚の載荷板がセットできる。模型の重量(52.5kgf)に、載荷板の個数およびテフロン支承の面積を変えることにより、表-1に示すように支承部の面圧を6通りに変化させた。模型総重量にはサーボ加速度計1.54kgfと付属物の重量2.32kgfが含まれている。最大面圧81.8kgf/cm²はテフロンの圧縮強度120kgf/cm²以下であり、実験上問題はないと考えられる。

(3) 入力加速度の影響

表-1に示す各面圧に対して、入力周波数を5通りに変化させ、正弦波の入力加速度をゼロより徐々に直線的に増加させた。また、1.5Hz、2.0Hzにおいては振動台の性能上可能な範囲まで、3.0Hz以上では模型の応答加速度がほぼ一定の振幅になるまで、加速度を漸増させて実験を行った。模型の応答波形がローパスフィルターによって変形しないように遮断周波数を28.0Hzとした。

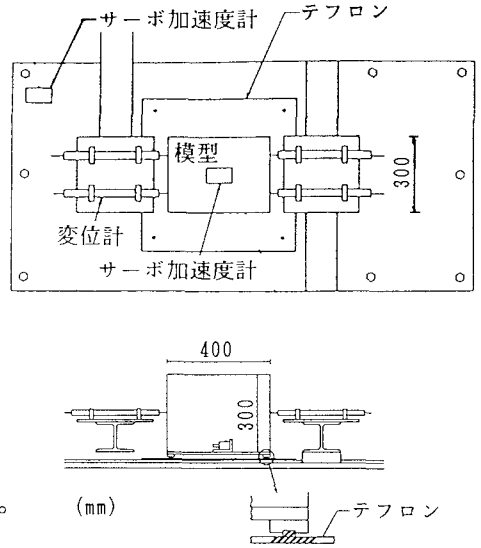


図-1 実験装置

表-1 面圧の変化

CASE	テフロン 支承面積	模型総重量 (kgf)	面 圧 (kgf/cm ²)
1	400mm ²	56.4	14.1
2		90.1	22.5
3		123.9	31.0
4	215mm ²	90.1	41.9
5		141.3	63.2
6		175.9	81.8

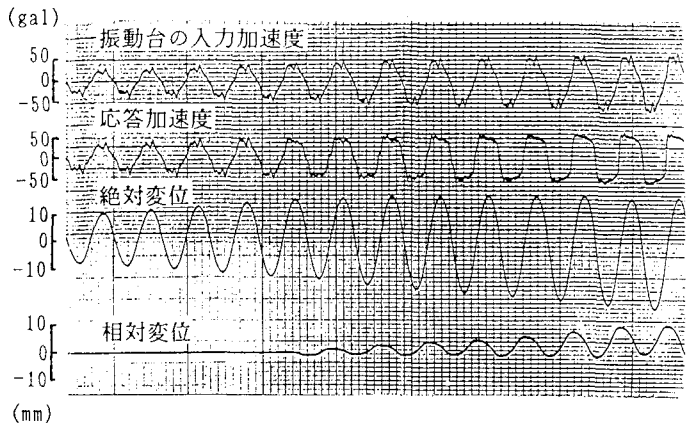


図-2 記録波形 (f=1.5Hz, 面圧31.0kgf/cm²)

3. 実験結果

図-2に実験により得られた振動台の入力加速度、模型の応答加速度、絶対変位、相対変位の実波形を例として示す。

(a) 入力周波数の影響

面圧 22.5kgf/cm^2 における模型の応答加速度と入力加速度の関係を、周波数をパラメータとして示したものが図-3である。入力周波数により多少異なるが模型が滑り始めてから0.08あるいは0.10Gまでの間は、応答加速度は入力加速度にほぼ比例して増加している。図中の直線は入力加速度と応答加速度が等しい場合を示しており、上記の範囲において、模型の応答加速度が入力加速度に比べ若干増幅されていることがわかる。入力加速度が0.10G以上になると、応答加速度はほぼ一定値に近くなり、免震効果が大きくなることを示している。また、入力周波数の増加にともない、応答加速度は多少小さくなる傾向がみられる。

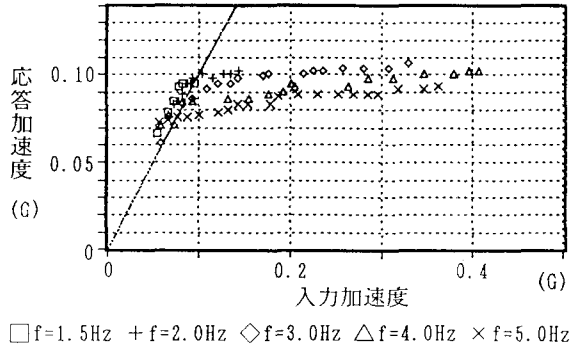


図-3 応答加速度の周波数特性 (面圧 22.5kgf/cm^2)

面圧 14.1kgf/cm^2 における入力加速度と絶対変位および相対変位の関係を図-4、図-5に示す。図-4によると、入力周波数1.5Hzでは入力加速度を実験上大きく出来なかったために現れていないが、絶対変位は入力加速度の増加と共にほぼ一定値に近づく傾向が見られる。この一定値は入力周波数が小さい場合において、入力加速度が小さいにも拘らず大きな値となっている。図-5をみると、入力加速度 0.06G前後から相対変位が生じており、模型が滑り始めていることがわかる。相対変位は各入力周波数において、入力加速度の増加にともないほぼ直線的に大きくなっており、絶対変位の

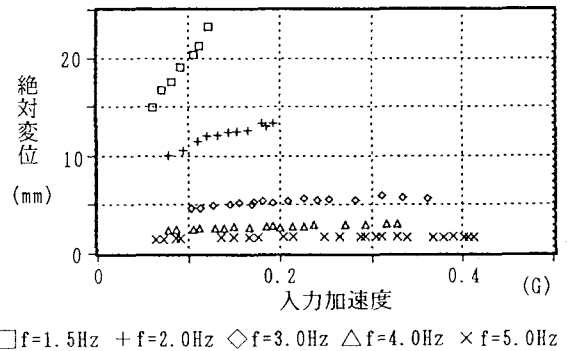


図-4 絶対変位の周波数特性 (面圧 14.1kgf/cm^2)

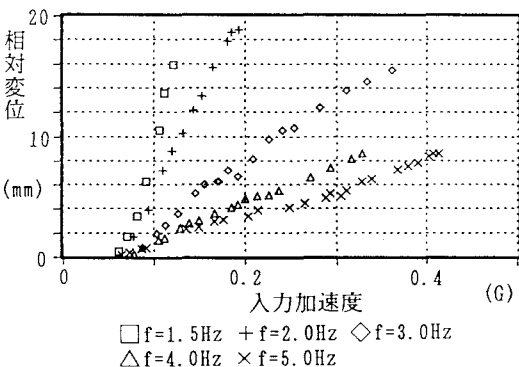


図-5 相対変位の周波数特性 (面圧 14.1kgf/cm^2)

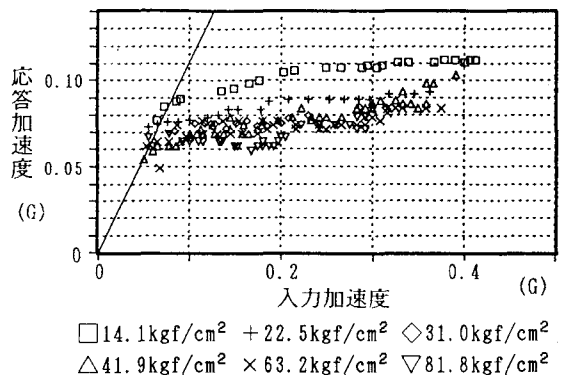


図-6 応答加速度の面圧特性 ($f=5.0\text{Hz}$)

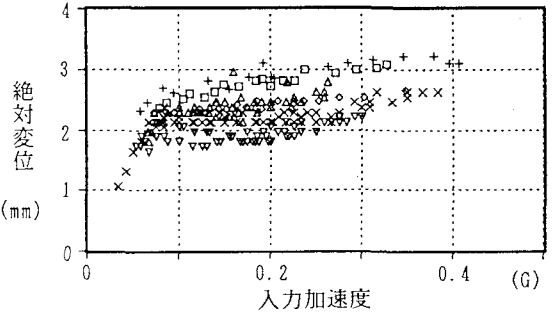
傾向とは異なる。特に、低周波領域では変位量も大きく、耐震上重要な問題となろう。

(b) 支承部の面圧の影響

図-6は入力周波数5.0Hzにおいて、支承部の面圧を14.1kgf/cm²~81.8kgf/cm²まで変化させたときの入力加速度と模型の応答加速度を示したものである。面圧の大きさによらず模型は0.06G前後で滑り始めていることがわかる。面圧が小さい場合には、入力加速度の増加とともに応答加速度に若干の増加傾向がみられるが、面圧が31.0kgf/cm²以上になると0.06G~0.08Gの間ではほぼ一定値に近づいている。このことは、面圧をある程度大きくすることによって、免震効果をより高められることを示しており、テフロン支承を用いる場合の重要な特性といえよう。

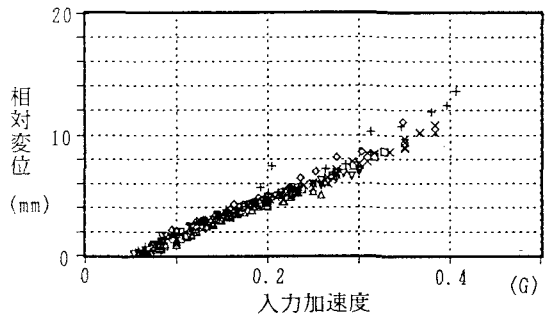
図-7は周波数4.0Hzにおけるおいて、入力加速度と絶対変位の関係を面圧をパラメータとして示したものである。入力加速度の増加に対して絶対変位量はほぼ一定値に近づいている。また、面圧が大きくなるにつれて絶対変位量は2mm程度となりかなり小さい。図-8は周波数4.0Hzで面圧を変化させたときの、入力加速度と相対変位の関係を示したものである。入力加速度の増加とともに相対変位は直線的に増加しているが、絶対変位に比べて面圧による影響は小さい。

図-9は入力速度に対する応答加速度の周波数特性を面圧14.1kgf/cm²の場合について示したものである。図によれば、模型が滑り始める時の入力速度は入力周波数で異なることがわかる。つまり、入力周波数が低いほど、模型が滑るためには大きな入力速度を必要とすることを示している。



□14.1kgf/cm² + 22.5kgf/cm² ◇31.0kgf/cm²
△41.9kgf/cm² ×63.2kgf/cm² ▽81.8kgf/cm²

図-7 絶対変位の面圧特性 (f=4.0Hz)



□14.1kgf/cm² + 22.5kgf/cm² ◇31.0kgf/cm²
△41.9kgf/cm² ×63.2kgf/cm² ▽81.8kgf/cm²

図-8 相対変位の面圧特性 (f=4.0Hz)

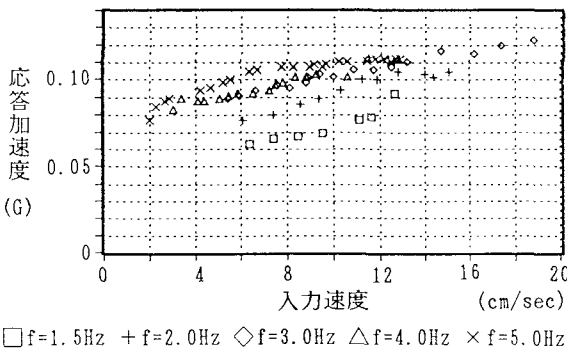


図-9 入力速度に対する応答加速度の周波数特性 (面圧14.1kgf/cm²)

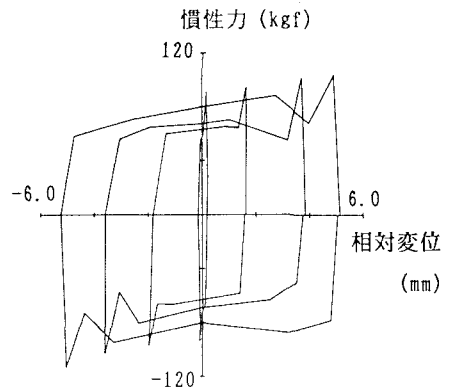


図-10 模型の慣性力に対する相対変位

図-10は模型の慣性力に対する相対変位の関係を示したもので、入力加速度を徐々に大きくしたときの記録より、代表的な時刻における値を示している。矩形ループ形状の復元力特性を持つ摩擦ダンパーの特性をよく示している。

4. 数値解析

実験より得られた応答加速度と入力加速度の関係をj用いて理論解析を行った。また、この実験にj用いた模型は4つのテフロンj支承でj支持した構造となっていることから、減衰はj支承部の摩擦力のみと考えられる。

(1) 非クーロン摩擦

実験結果によれば、図-11のように面圧が小さい場合には、模型の応答加速度は入力加速度の増加にともない多少大きくなる傾向を示した。そこで、模型の応答加速度が入力加速度に依存するものとして、模型が滑り始めた後の応答加速度を対数関数に近似することにした。以下のこの振動系の運動方程式を示す。

$$\ddot{x}_0 = A t \sin \omega t \quad (1)$$

$$\ddot{x}_1 = B_1 + B_2 \log | A t \sin \omega t | \quad (2)$$

(B_1, B_2 は曲線回帰より求まる定数)

$$\ddot{x} = -A t \sin \omega t \pm (B_1 + B_2 \log | A t \sin \omega t |) \quad (3)$$

(ただし $\omega t \neq 0$)

\ddot{x}_0 : 振動台の入力加速度

\ddot{x}_1 : 模型の応答加速度

\ddot{x} : 相対加速度

表-2に実験により得られた値を示す。(1)式に示す定数Aとしては、入力加速度の各波形よりAの増加割合を求め、その平均値とした。解析は入力周波数 $f=3.0\text{Hz}$ 、面圧 14.1kgf/cm^2 のデータに対して行ない、ルンゲクッタ法を用いて式(3)を解き、相対変位を計算した。図-12は模型の応答加速度と(2)式に示す近似式の結果を、図-13は模型の相対変位の解析結果と実験値を比較したものである。入力加速度が完全な正弦波でないことや変位計の誤差、また近似式の誤差等を考えると、両者はほぼ一致しているとみなせる。したがって、本解析法で模型の応答を十分解明できるものと思われる。基礎部分の減衰効果はj支承部の摩擦力にほとんど依存しているため、数多くのデー

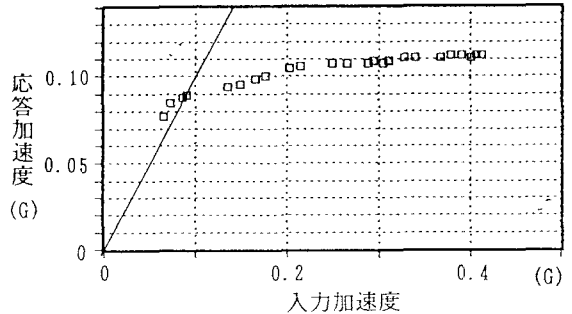


図-11 面圧が小さい場合の応答加速度 ($f=5.0\text{Hz}$, 面圧 14.1kgf/cm^2)

表-2 実験値による各定数の諸元 ($f=3.0\text{Hz}$, 面圧 14.1kgf/cm^2)

入力加速度	入力を開始してから の時間	A値	模型の応答 加速度
133gal	3.3sec	40.3	91gal
188	5.3	35.5	103
221	6.7	33.0	112
288	8.3	34.7	115
354	10.3	34.4	118
410	12.7	32.3	121
465	13.3	35.0	127
平均値		34.1	112

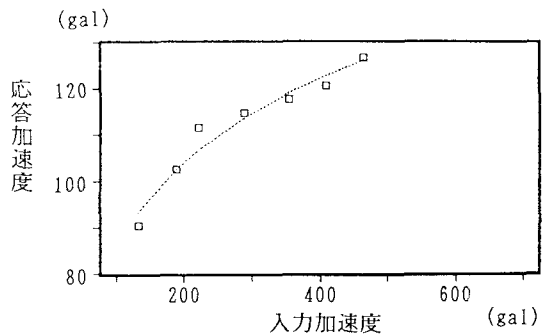


図-12 近似式と実験値の比較

タを基に、周波数および支承部面圧と動摩擦力の関係が特定できれば、非クーロン摩擦系においても容易に模型の応答を推定できるものと思われる。

(2) クーロン摩擦

図-14に示すように支承部の面圧が大きい場合、模型の応答加速度は振動台の入力加速度が増大しても、ほぼ一定値を示した。したがって、この応答加速度の一定値を動摩擦係数 μ_d に置き換えて解析することにした。また、模型はこの応答加速度までは滑らず、入力と同一の加速度が生じているものと仮定している。

$$\ddot{x}_0 = A t s \sin \omega t \quad (4)$$

$$\ddot{x}_1 = \pm \mu_d g \quad (5)$$

$$\ddot{x} = -A t s \sin \omega t \pm \mu_d g \quad (6)$$

μ_d : 動摩擦係数 g : 重力加速度

図-14に動摩擦係数 μ_d を求めるための応答加速度の平均値を示す。定数Aとしては表-2の値を用いている。

図-15に面圧31.0kgf/cm²、入力周波数f=3.0Hzにおける振動台の入力加速度、模型の絶対変位および相対変位の計算波形を示す。

図-16は面圧 14.1kgf/cm²および81.8kgf/cm²における相対変位の理論値を実験値と比較したものである。相対変位は実験値の方が理論値に比べてやや大きくなっているが、ほぼ一致しており、先に示した非クーロン摩擦の解析と比べても、全体的には大差がない。

クーロンの法則を用いて、動摩擦係数 μ_d を一定としているため、面圧が小さい場合、入力加速度の増大と共に応答加速度が増加するという現象をとらえるこ

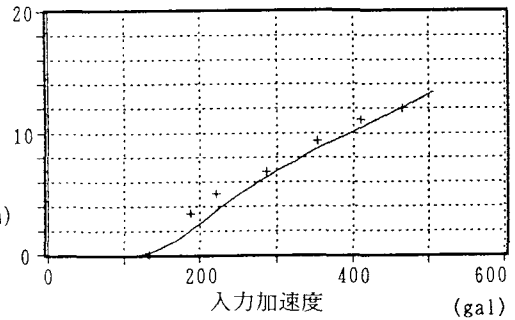


図-13 相対変位の実験値と理論値の比較 (対数近似法, f=3.0Hz, 面圧14.1kgf/cm²)

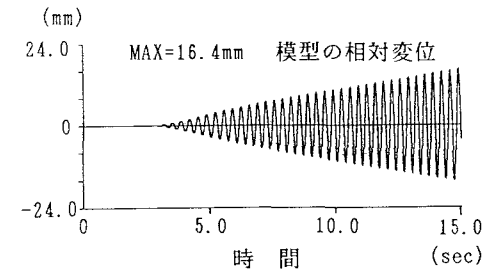
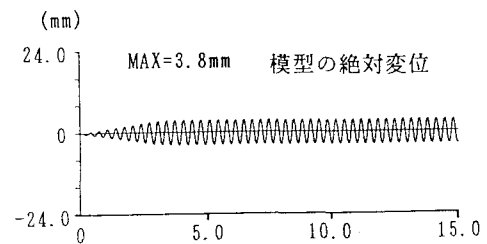
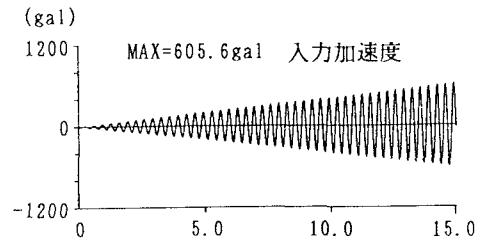


図-15 クーロン摩擦による理論波形

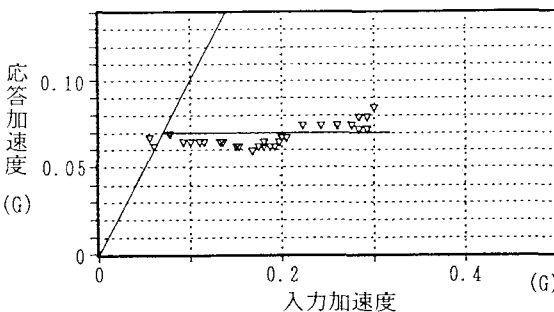


図-14 面圧が大きい場合の応答加速度 (f=5.0Hz, 面圧81.8kgf/cm²)

とができない。しかし、面圧および入力加速度が大きくなれば応答加速度が一定値に近づくことから、この場合にはクーロン摩擦を適用しても誤差は少ないと考えられる。したがって、模型の応答加速度を対数関数で近似した非クーロン摩擦系の方法は、入力加速度が 0.06~0.09G の範囲あるいは面圧が小さい場合の解析法として用いればよいと思われる。

(3) 地震応答解析

実験結果より、テフロン支承の動特性は支承面圧の影響を大きく受けることがわかった。実際の基礎にテフロン支承を用いた場合、テフロンの圧縮強度から考えて、本実験の面圧とほぼ同じ程度になるものと予想される。そこで、本実験より得られたデータを用いて地震応答解析を行った。

本解析における摩擦係数は文献⁵⁾より次式によって決定した。

$$\mu_{sliding} = f_{max} - (\delta f) \text{EXP}(-q | \dot{u} |)$$

f_{max} ; 滑っている速度が大きい状態での摩擦係数

δf ; 滑り始めの摩擦係数と f_{max} の差

\dot{u} ; 滑り速度

q ; 支承部の面圧

$\mu_{sliding}$; 滑り摩擦係数

さらに、広範囲な樹脂重合体の摩擦モデルは、viscoplasticity理論⁶⁾の原理に基づいて、Wenの方程式⁷⁾を用いて次のように表される。

$$YZ + \gamma | \dot{u} | Z | Z |^{n-1} + \beta \dot{u} | Z |^n - A \dot{u} = 0$$

\dot{u} ; 滑り速度

Z ; 履歴の無次元量

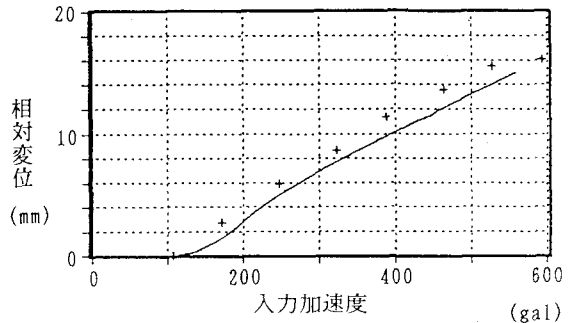
β, γ, A, n ; 無次元一定量

Y ; 変位量

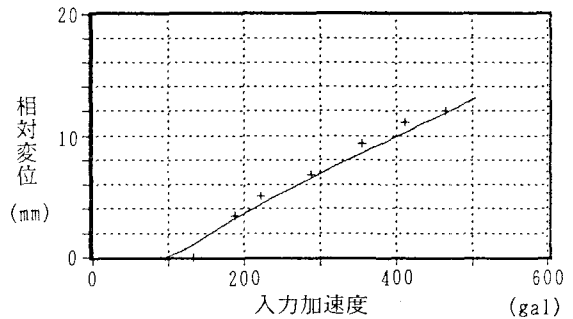
また、このときの摩擦力 F_f は模型の重量 W を用いて次式となる。

$$F_f = \mu_{sliding} W Z$$

以上の式を用いて、道路橋示方書に示されている修正開北橋記録 (I 種地盤用 $\phi_{max}=102\text{gal}$)、修正板島橋記録 (II 種地盤用 $\phi_{max}=117\text{gal}$)、修正津軽大橋記録 (III 種地盤用 $\phi_{max}=134\text{gal}$) の地震波に対する応答解析を表-3 に示す諸元を用いて行った。支承部面圧 31.0kgf/cm^2 の模型に、それぞれの地震波を入力したときの相対変位を図-17、



(1) (クーロン摩擦, $f=3.0\text{Hz}$, 面圧 14.1kgf/cm^2)



(2) (クーロン摩擦, $f=3.0\text{Hz}$, 面圧 81.8kgf/cm^2)

図-16 相対変位の実験値と理論値の比較

表-3 計算に用いた値

面圧 (kgf/cm^2)	f_{max}	δf	q (sec/cm)	\dot{u}_{max} (cm/sec)
31.0	0.105	0.03	0.20	30.0

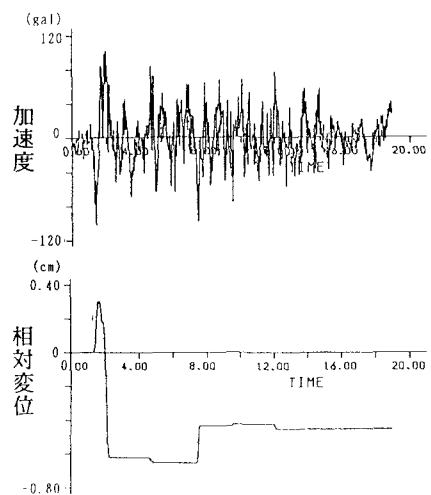


図-17 第1種地盤における相対変位 (面圧 31.0kgf/cm^2)

図-18、図-19に示す。図-17に示す修正開北橋記録では最大加速度が発生する2秒前後で相対変位が急に大きくなっている。図-18の修正板島橋記録では初めの8秒まで入力加速度が小さいため相対変位が生じず、その後、加速度が大きくなるにつれて相対変位が徐々に大きくなっている。また、3種類の地震波の中で最も相対変位が大きい。一方、図-19に示す修正津軽大橋記録では、およそ4秒間隔で大きな加速度が発生することから、相対変位もそれに対応して変化している。特に、相対変位が地震波形の影響で逆方向に変位したため、地震波の中で加速度が最も大きいのに拘らず、相対変位は最も小さくなっている。

以上の結果より、応答の相対変位は地震波の周波数成分や最大加速度よりも、むしろ地震波形の時刻歴そのものに強く影響を受けるものと思われる。

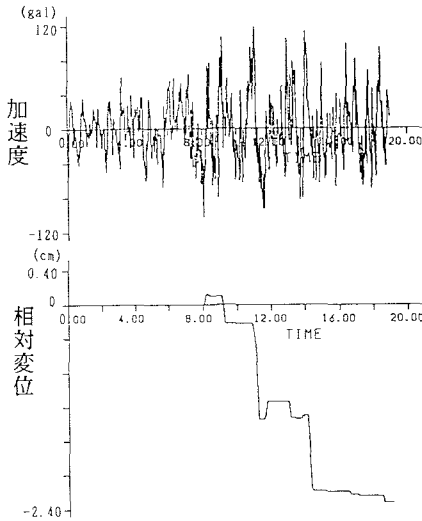


図-18 第2種地盤における相対変位
(面圧31.0kgf/cm²)

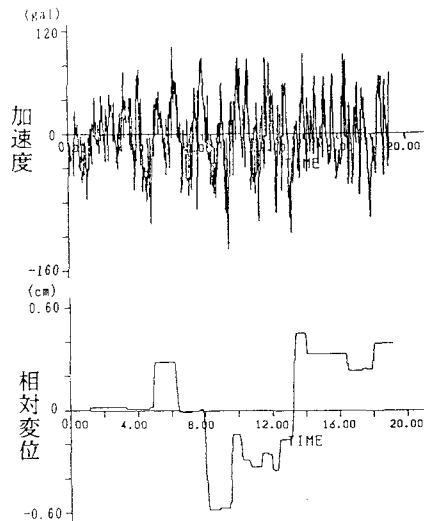


図-19 第3種地盤における相対変位
(面圧31.0kgf/cm²)

4. 結論

実験および解析より得られた結果をまとめると、以下の通りである。

- 1 模型の相対変位から滑り始める入力加速度を求めると、入力周波数で多少異なるものの0.06G前後である。
- 2 模型が滑り始めた後、入力加速度が0.08～0.10Gの範囲までは入力加速度と模型の応答加速度はほぼ比例して増加する。
- 3 入力加速度が0.10G以上になると、模型の応答加速度は多少の増加傾向を示しながら一定値に近づく。これは入力加速度が0.10G以上になっても、模型の応答加速度はあまり変化しないことを示しており、この現象は免震設計に非常に重要な特性である。
- 4 模型が滑り始めるときの入力速度は入力周波数が低いほど大きい。
- 5 面圧に関しては、入力周波数が1.5Hz、2.0Hzでは入力加速度を実験の制約上大きくできなかったために、明確な違いはみられなかった。一方、3.0Hz以上になると面圧が大きくなるにつれて、模型の応答加速度はより小さな一定値へと近づき免震効果が大きい。
- 6 模型の絶対変位と入力加速度の関係をみると、入力周波数が小さいほど絶対変位が大きくなる。このことは低周波領域の周波数成分をもつ振動が構造物の基礎に入力する場合、基礎の応答変位が大きくなる

ことが予想され、変位の制御を行う装置が必要となろう。

- 7) 模型の相対変位と入力加速度の関係は、入力周波数が小さいほど相対変位が大きくなっている。また入力加速度が大きくなるにつれて、模型の相対変位は直線的に増加している。
- 8) 非クーロン摩擦およびクーロン摩擦による解析法は、双方ともかなりの精度で実験値と一致した。今回のように模型の応答加速度を曲線回帰する等の手法を用いれば、テフロン支承における応答特性を正確に解析できることがわかった。

本実験によれば、剛体振動系におけるテフロンの滑り摩擦特性は多少の周波数特性はあるものの、面圧による影響が大きいことが明かとなった。滑り支承を用いた基礎を設計する場合、実物と同じ面圧を持つ模型に対して本研究と同様な試験を実施し、滑り摩擦の動特性を求めれば、この特性を用いて基礎の応答計算を正確に行うことができるものと思われる。

〈参考文献〉

- 1) ダイナミック・フロア・システムに関する実験的研究 ; 大林組技術研究所報 No.16 1978
- 2) 構造の異なる2種類の床免震システムの地震応答特性; 鹿島建設技術研究所年報 No.36 1988年6月
- 3) 武田 寿一編; 構造物の免震、防震、制震
- 4) M. C. Constantinou, J. Caccese and H. G. Harris, 'Frictional Characteristics of Teflon-Steel Interfaces under Dynamic Conditions', Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.15, 1987, pp 751-759.
- 5) N. Mostaghel and M. Khodaverdian, 'Dynamics of Resilient-Friction Base Isolator', Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.15, 1987, pp379-390.
- 6) A. Mokha, M. C. Constantinou and A. M. Reinhorn, 'Teflon Bearings in Aseismic Base Isolation: Experimental and Mathematical Modeling', NCEER-88-0038, December 1988.
- 7) Y. K. Wen, 'Method for Random Vibration of Hysteretic Systems', Proc. ASCE, Vol. 102, No. EM2, April 1976, pp 249-263.

(1990年10月12日受付)