

# 摩擦係数が速度依存性を持つ滑り支承によって支持された 免震住宅の地震応答に関する研究

A Study on the Earthquake Response for the Base Isolated House Supported by Sliding Bearings  
of which Coefficient of Friction has Characteristics to Depend on Velocity

中村満喜男

Makio NAKAMURA

Abstract : The base isolated buildings with the sliding supports vibrate to repeat stick mode and sliding mode by the earthquake motion. It is necessary to estimate the time of mode's change exactly, therefore 4 time levels are provided on the numerical analysis, and those times are obtained with the accuracy to  $0.01 \times 10^{-3}$  sec. When the coefficient of sliding friction does not depend on velocity, maximum values of absolute response acceleration are small and agree with theoretical value. When the coefficient of sliding friction depends on velocity, the maximum values of absolute response acceleration increase and the maximum values of response displacement decrease with intensity of velocity dependence, and those two values are relatively sensitive to the velocity dependence.

## 1 序

木造住宅のように軽量の建物を免震化する装置として、滑り支承が使われ始めている。滑り支承の摩擦係数は支承上に置かれた建物が滑り状態(滑りモード)と貼り付き状態(貼り付きモード)を分ける重要な値であり、このとき建物に生ずる力と変位の関係は剛-塑性復元力特性として取り扱われなければならない。これまでの研究において、この剛-塑性復元力特性は有限の大きさを持った第 1 勾配を有する復元力特性によって近似化され、応答解析が行われてきた。しかし本論は、建物の振動状態を滑りモードと貼り付きモードに分離して捕え、実際の状態と考えられる剛-塑性復元力特性による応答解析を可能にしている。従って、滑りモードから貼り付きモード或いは貼り付きモードから滑りモードへの一連の状態変化<sup>1)</sup>を生ずる時刻が出来るだけ正確に把握される必要がある、このために数値解析上考えられた方法が示されている。

さらに、滑り支承の摩擦係数が速度依存性を持つ場合の応答解析が行われ、速度依存性によって地震応答解析結果が受ける影響について、分析が行われている。得られた数値解析結果より、摩擦係数の速度依存性が大きくなると、建物に生ずる力すなわち絶対加速度の最大値が

増大すると共に最大応答変位が小さくなることが確認され、その影響の量的な大きさが明らかにされている。

## 2 滑り支承を有する建物の振動性状

ここで扱われる建物は木造住宅のように軽量の建物であり、免震層は滑り支承のみである。木造住宅は一般におよそ 0.1 秒から 0.3 秒の固有周期を持っており、これに比較して滑り支承による免震層の固有周期は十分に長いことが期待される。従って免震層に対して建物全体は剛体すなわち一つの質点として扱われても、滑り支承における摩擦係数の速度依存性が応答系に及ぼす影響は十分に解明されることになる。

### 2.1 速度依存性を持つ摩擦係数

滑り支承の滑り特性は、滑り摩擦係数が本来持っている物理特性によって特徴付けられるべきである。これまでの解析において変形と力の関係を示す復元力特性がこの代りに用いられている。滑り摩擦係数がクーロンの摩擦に関する 3 つの法則を満たしていれば、従来の扱い方で何ら問題は生じない。しかし第 3 法則“動摩擦力は滑り速度に依存しない”は一般的に成立しない場合<sup>2)</sup>が多いことが知られている。そこで滑り支承の摩擦係数は

図 1 に示されるように取り扱われる必要<sup>3)</sup>がある。速度依存性を示さない上限速度  $v_0$  とその摩擦係数  $\mu_0$  が与えられ、速度依存性を有する上界速度として仮に 100 kine が考えられ、このときの速度と摩擦係数が記号  $v_{100}$  と  $\mu_{100}$  で示される。摩擦係数の速度依存性はそれ程敏感ではなく、速度の横軸は対数目盛である。上限速度  $v_0$  と上界速度  $v_{100}$  の間の摩擦係数は直線補間で与えられる。以上より、滑り支承の摩擦係数は滑り支承の相対速度  $\dot{u}$  に対して次式より得られる。

$$\begin{aligned} \mu(\dot{u}) &= \mu_0 & |\dot{u}| < v_0 \\ \mu(\dot{u}) &= \mu_0 + a \cdot \log(|\dot{u}|/v_0) & |\dot{u}| > v_0 \end{aligned} \quad (1)$$

ここに  $a$  : 速度依存性の大きさを示す傾き

### 2.2 貼り付きと滑りを繰り返す滑り支承の性質

滑り支承上にある建物は、貼り付き状態(貼り付きモード)と滑り状態(滑りモード)を繰り返しながら振動する。これらの状態を正確に捕える方法が確立されるべきである。各状態における建物部の振動方程式が図 2 を参照して導かれる。滑り摩擦係数は速度依存性を有すると考えられ、次式が得られる。

$$\begin{aligned} m_s \ddot{y}_0 + f(u, 0) &= 0 \\ m_s (\ddot{u} + \ddot{y}_0) + f(u, \dot{u}) &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

ここに  $f(u, \dot{u})$  : 摩擦力  $m_s$  : 建物質量  
 $y_0$  : 地震動

式(2)の第 1 式は貼り付きモード、第 2 式は滑りモードに対応する振動方程式である。摩擦力は変位  $u$  には依存せず、速度のみに依存する摩擦係数  $\mu(\dot{u})$  によって次式より得られる。

$$f(u, \dot{u}) = \pm m_s \cdot g \cdot \mu(\dot{u}) \quad (3)$$

ここに  $g$  : 重力加速度 ( $9.8\text{m/sec}^2$ )

次に各モードにおける振動方程式が詳細に検討される。貼り付きモードにおいて、建物は基礎に変位  $u$  で貼り付いており、このモードにある間建物に生ずる慣性力は  $-m_s \cdot \ddot{y}_0$  の値となる。この値は摩擦力と釣り合っているはずである。すなわち次式が成立する間、応答系は貼り付きモードにある。

$$|\ddot{y}_0| \leq g \cdot \mu_0 \quad (4)$$

次に滑りモードにおいて、建物は基礎を速度  $\dot{u}$  で滑っており、変位は時間と共に変動する。式(2)の第 2 式は速度が正と負のそれぞれに対し、次の振動方程式となる。

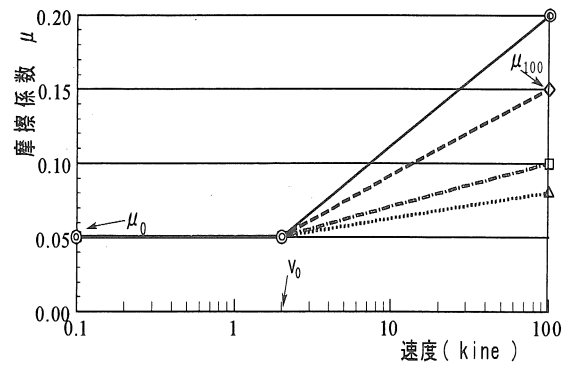


図 1 滑り支承摩擦係数の速度依存性

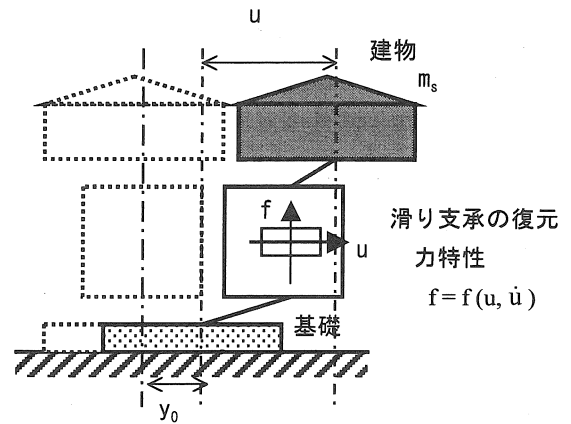


図 2 滑り支承を有する免震住宅

$$\begin{aligned} \ddot{u} + g \cdot \mu(\dot{u}) &= -\ddot{y}_0 & \dot{u} > 0 \\ \ddot{u} - g \cdot \mu(\dot{u}) &= -\ddot{y}_0 & \dot{u} < 0 \end{aligned} \quad (5)$$

### 3 数値解析について

滑り支承は貼り付きモードと滑りモードの各状態にあるとき、支配振動方程式が変わる。従って状態変化を生ずる時刻が高い精度で求められる必要がある。

#### 3.1 数値解析法

地震応答解析の数値計算法として、基本的に線形加速度法が使われている。前時刻( $t$ )と次時刻( $t+\Delta t$ )に対して、線形加速度法が適用される。滑り摩擦係数が速度依存性を持つとき、前時刻加速度・速度・変位より次時刻の速度の近似値が予測される。次に次時刻における加速度の第 1 近似値が式(5)の時刻( $t+\Delta t$ )における展開式より求められ、次時刻の加速度と前時刻速度・変位より次時刻の速度・変位が求められる。得られた次時刻速度より摩擦係数が求められ式(5)の展開式より次時刻加速度の第 2 近

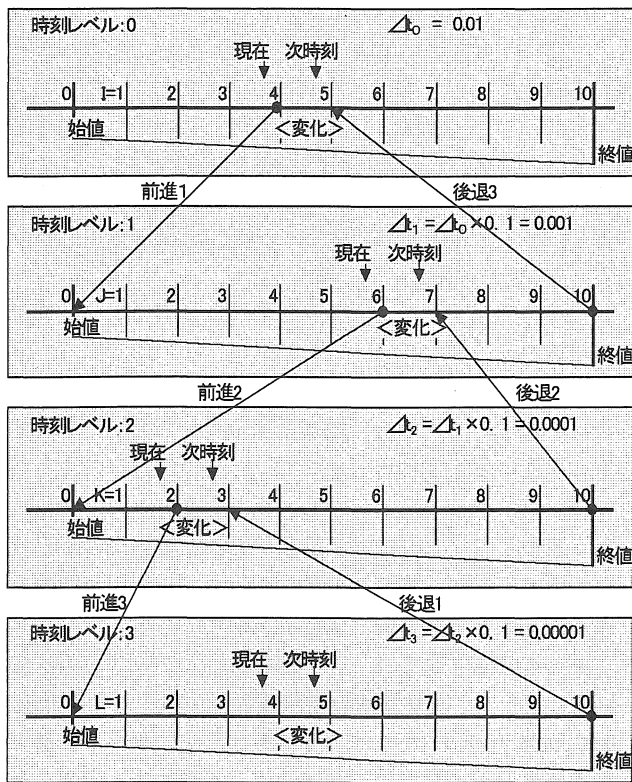


図 3 状態変化の時刻を特定するための時刻レベルの考え方と刻み時間  $\Delta t$

似値が得られる。加速度の変動が限界値より小さくなるまで、繰り返し計算が行われる。次時刻の加速度・速度・変位が得られると、時刻が1つ繰り上がり、地震の継続

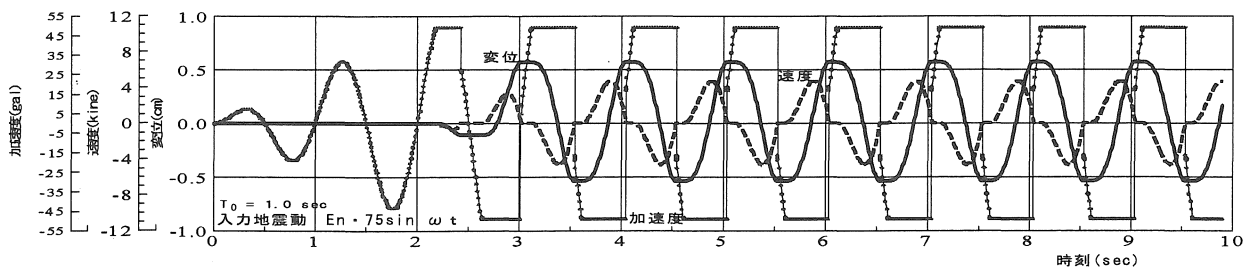
時間全体の応答が得られる。

### 3.2 数値解析における刻み時間について

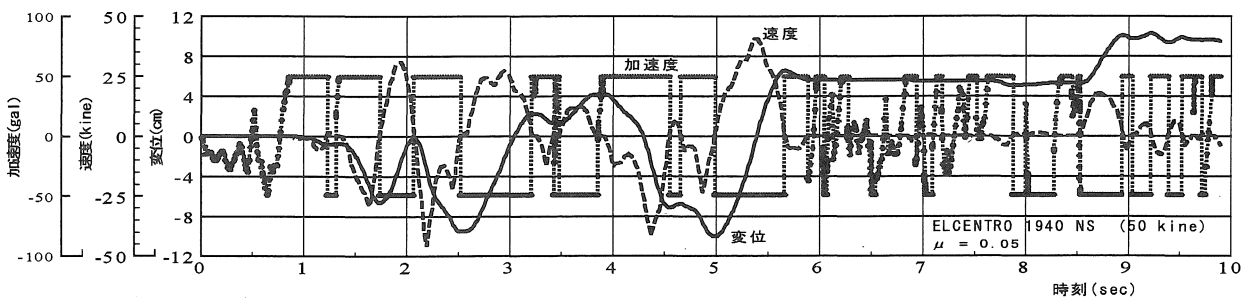
滑りモードと貼り付きモードにおける状態変化を生ずる時刻は出来るだけ正確に評価される必要がある。しかしむやみに数値計算における刻み時間  $\Delta t$  が短くなることは、全体の応答計算における丸め誤差を増加させることになる。そこで状態変化の時刻が正確に特定されるため、図3に示されるように、時刻レベルが0から3まで4つの段階が設けられた。状態変化が生ずると時刻レベルが1つ下がり刻み時間が前の時刻レベルの刻み時間の1/10となる。時刻レベル3において、状態変化の時刻が0.01秒の1/10<sup>3</sup>の精度で特定される。状態変化があると時刻レベルが0から順に1つずつ下がって前進し、状態変化の時刻が特定されると、時刻レベルが3から順に1つずつ後退し、状態変化のない時刻レベル0に戻って数値計算は継続される。状態変化の時刻が高い精度で求められるため、数値計算はすべて倍精度で行われている。

### 4 応答解析結果とその考察

免震装置として滑り支承を有する建物の地震応答解析が次の順で行われた。滑り支承の滑り摩擦係数が速度依存性を持たない場合がまず解析され、滑り支承と建物が貼り付きモードと滑りモードを繰り返して振動する応答



(a) 包絡定常波の場合



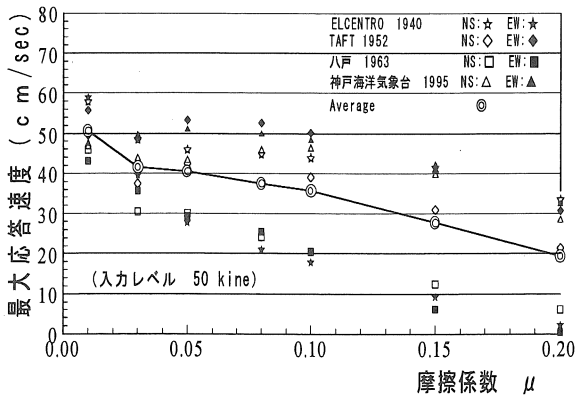
(b) ELCENTRO 1940 NS (50 kine)の場合

図 4 応答として得られた絶対加速度と速度と変位の時刻歴

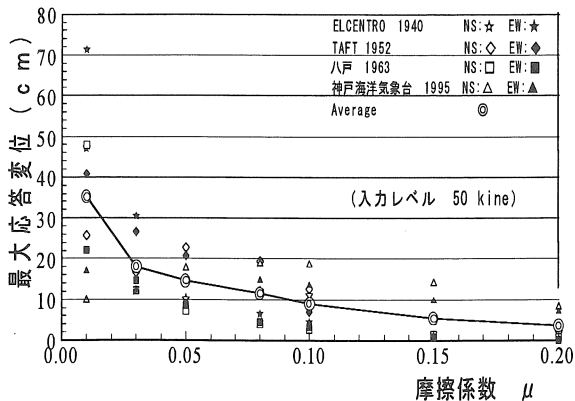
の性質が詳細に検討され、基本的な応答特性が把握されている。次に滑り摩擦係数が速度依存性を持つ場合について、解析が行われ、速度依存性が応答系に及ぼす影響について検討がなされ、基本的な応答の速度依存性が把握されている。応答解析に用いられる地震動として ELCENTRO 1940 NS・EW TAFT 1952 NS・EW 八戸 1963 NS・EW 神戸海洋気象台 1995 NS・EW の 8 成分が採用されている。入力レベルとして 3 つの場合 25kine, 50kine, 75kine がそれぞれの地震動の最大速度として採用されている。またここで採用された解析方法が、滑り支承に生ずる貼り付きと滑り状態を正しく追跡していることの確認が必要である。このため、地震動として、時刻が 0 秒から 3.0 秒において振幅が 0 から 1.0 まで直線的に増加し、時刻が 3.0 秒を超えると 1.0 で一定となる包絡線で包絡された周期 1.0 秒の定常波 ( $E_n \cdot 75 \sin \omega t$ ) が考えられている。

4.1 摩擦係数が速度依存性を持たない場合

滑り摩擦係数  $\mu_0$  は 0.05 である。入力地震動として包



(a) 最大応答速度



(b) 最大応答変位

図 5 最大応答速度と最大応答変位

絡線で包絡された地震動 ( $E_n \cdot 75 \sin \omega t$ ) が採用されたとき、応答における絶対加速度と速度と変位の各時刻歴が図 4(a)に示されている。絶対加速度はほぼ  $\pm 49\text{gal}$  の値で最大値となり、最大値が連続する時刻において滑りモードが発生しており、速度と変位の大きさが時間と共に変動している。絶対加速度が  $+49\text{gal}$  から  $-49\text{gal}$  の間にある時刻歴の間で、貼り付きモードが発生しており、この時間で速度は 0 であり、変位の変動は生じていない。絶対加速度の最大値  $\pm 49\text{gal}$  は理論値  $\pm g \cdot \mu_0$  と一致している。

地震動として ELCENTRO 1940 NS (50 kine) が用いられたとき、応答の各時刻歴が図 4(b)に示されている。絶対加速度の最大値は  $\pm 49\text{gal}$  であり、最大値が連続する時刻において滑りモードが生じ速度と変位が時刻と共に大きく変動している。応答変位は示された時刻歴の終わりにかけて正側に片寄って振動している。速度は時間軸を挟んで正側と負側に同じように振動している。

4 つの地震による 8 つの地震動成分、入力レベル 50 kine に対して、滑り支承の摩擦係数が横軸 7 つの値 0.01, 0.03, 0.05, 0.08, 0.10, 0.15, 0.2 であるとき、建物の各最大応答速度とその平均値が図 5(a)に、各最大応答変位とそ

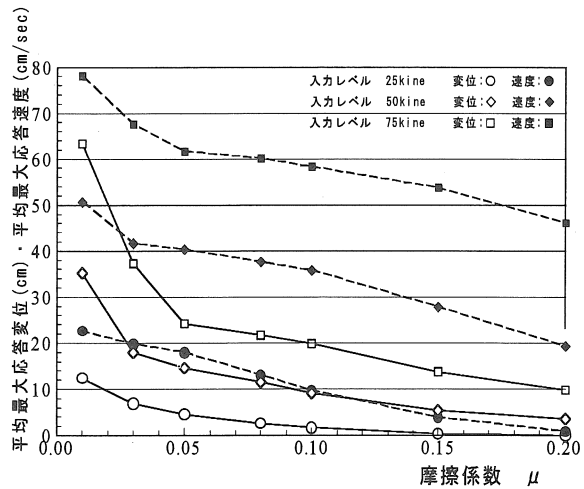


図 6 平均の最大応答速度と平均の最大応答変位

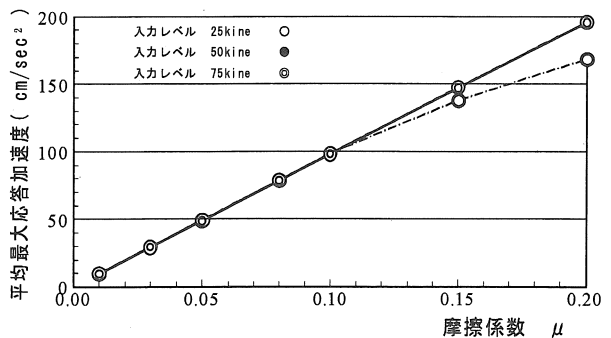


図 7 平均の最大絶対応答加速度

の平均値が図 5(b)に示されている。図 5(a)より摩擦係数が比較的大きい 0.1 から 0.2 の間で、最大応答速度は地震動の違いによる大きな変動を示している。摩擦係数が 0.03 から 0.08 の値の間で、最大応答速度は入力地震動のレベル 50 kine の値とほぼ同等の値となっている。図 5(b)より最大応答変位は摩擦係数が 0.2 の値に近付くと急速に小さくなっており、振動状態はほとんど貼り付きモードにあることが分かる。また摩擦係数が大変小さい 0.01 において、最大応答変位は地震動の各成分に対して大きな変動を示している。

各入力レベルに対して、摩擦係数の違いによる平均最大応答速度と平均最大応答変位の変化が、図 6 の折線によって示されている。点線で結ばれた黒塗りの印が平均最大応答速度である。折線はやや緩やかな右下がりであり、折線の値は入力レベルの順になっている。入力レベルが 25 kine で、摩擦係数が 0.2 であると、滑り支承は建物に対してほとんど貼り付きモードにある。実線で結ばれた白抜きの印が平均最大応答変位である。入力レベルが大きい 50 kine と 75 kine において、摩擦係数の値が小さい 0.01 から 0.05 の範囲で、平均最大応答変位は摩擦係数の大きさに敏感であり、摩擦係数の増加に伴って急速に小さくなる。

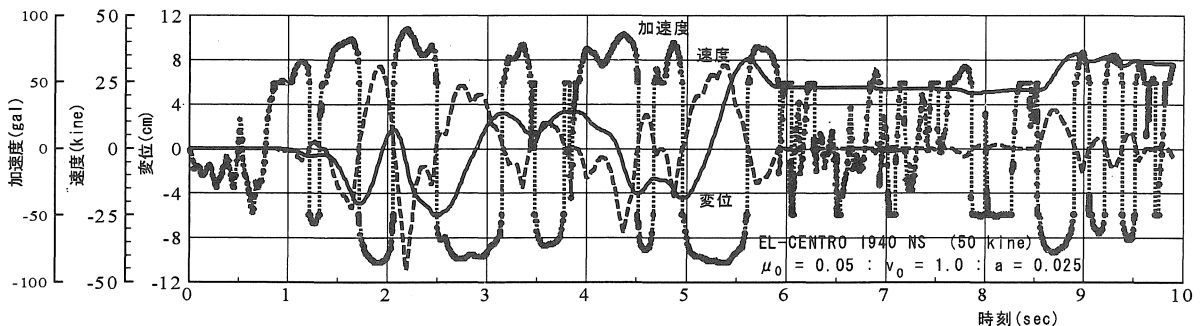
平均最大応答加速度が図 6 と同じ方法で図 7 に示され

ている。最大応答加速度は理論値  $g \cdot \mu_0$  となるため、折線は傾きが重力加速度  $g$  の直線となっている。入力レベル 25kine において、摩擦係数が大きい範囲で、直線が折れて下がっているのは、地震動成分によって滑り支承が滑りモードを生じない場合があることを示している。

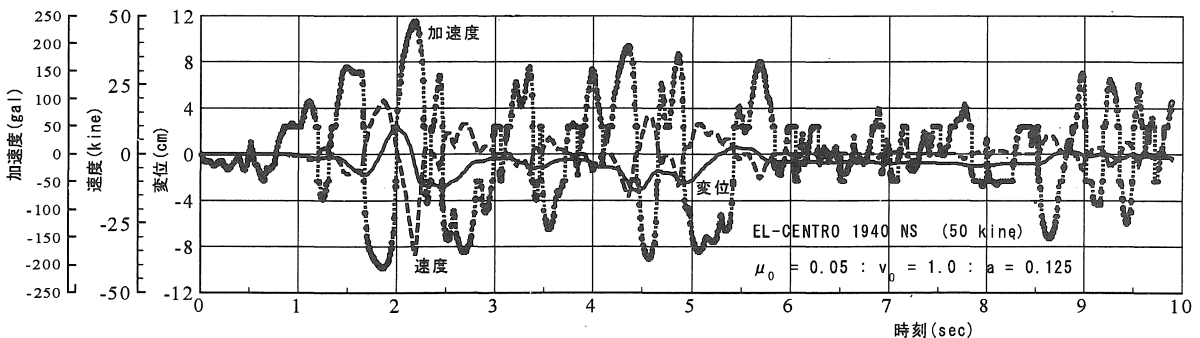
#### 4.2 摩擦係数が速度依存性を持つ場合

滑り支承が持つ摩擦係数の速度依存性として、式(1)における摩擦係数  $\mu_0$  は 0.05 であり、速度依存性を持たない速度の上限値  $v_0$  (kine)として 3 つの値 1.0, 10.0, 20.0 が採用され、速度の仮の上界値 100 kine における摩擦係数  $\mu_{100}$  として 4 つの値 0.08, 0.10, 0.15, 0.20 が用いられている。摩擦係数の値 0.05 は滑り支承に良く用いられる PTFE (四ふっ化エチレン) の値である。上限速度  $v_0$  と上界摩擦係数  $\mu_{100}$  の各組み合わせによって得られる摩擦係数の速度依存性が応答系に及ぼす影響について、次の順で検討が行われている。

まず摩擦係数が速度依存性を持つとき、応答の時刻歴が代表的な地震動 ELCENTRO 1940 NS (50 kine) に対して図 8 に示されている。図 8 で用いられた摩擦係数の速度依存性は、上限速度  $v_0$  は 1.0 kine、上界摩擦係数  $\mu_{100}$  が 0.1 と 0.3 である。摩擦係数の 2 つの値は傾き  $a$  の値と



(a) 弱い速度依存性の場合



(b) 強い速度依存性の場合

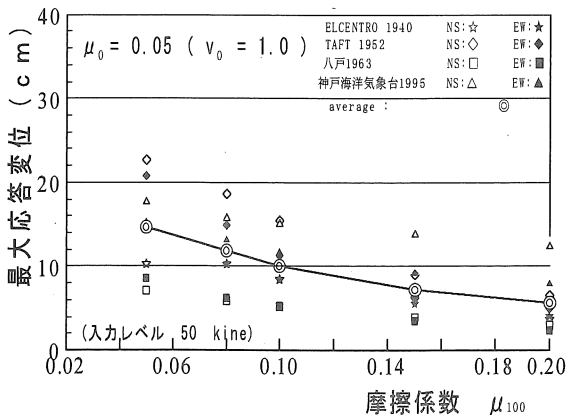
図 8 速度依存性を有する応答系の絶対加速度と速度と変位の時刻歴

して 0.025 と 0.125 に対応している。前者は比較的速度依存性が小さい場合で、図 8(a)に示されるように、速度依存性がないとき絶対加速度が最大値±49gal で連続していた時刻において、絶対加速度が時間経過と共に増加して変動している。すなわち速度に依存して摩擦係数が増加し、結果として絶対加速度が大きくなるためである。変位の時刻歴は速度依存性が比較的弱いため、値が正側に片寄って緩やかに振動している。速度依存性が強い場合が図 8(b)に示されている。絶対加速度の最大値は±49gal と比較するとかなり大きくおよそ 250gal に近い値となる。変位の時刻歴は時間軸を挟んで緩やかに振動しており、正側または負側に片寄って振動することはなく、最大応答変位は小さくなる。

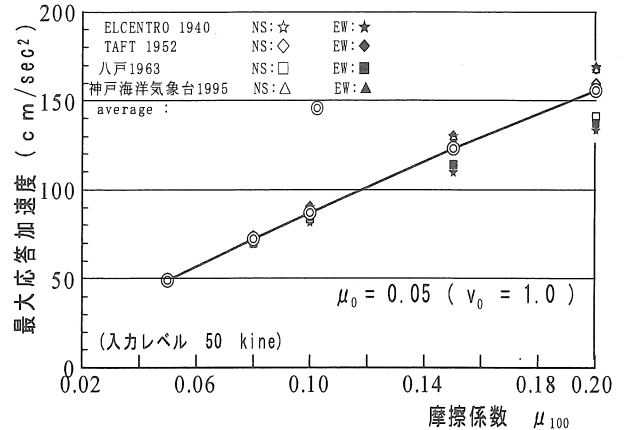
速度依存性として上限速度  $v_0$  が 1.0 と 20.0 で、上界摩擦係数  $\mu_{100}$  が 4 つの値を有するとき、最大応答の変化が図 9 の(a)と(b)に示されている。図 9(a)は上限速度が 1.0 であり、図 9(b)は上限速度が 20.0 である。図 9 の(a)と(b)共に、上界摩擦係数が大きくなるすなわち速度依存性が

大きくなると最大応答変位は次第に小さくなっている。図 9(a)より上界摩擦係数が 0.2 になって速度依存性が強いと、平均最大応答変位は速度依存性がない場合のほぼ 1/3 になることが分かる。図 9(b)の上限速度が 20.0 の場合は、速度依存を生ずる時間領域が短くなり、速度依存性は小さくなり、上界摩擦係数の違いによる大きな変動はなく、最大応答変位の折線は緩やかな右下がりである。

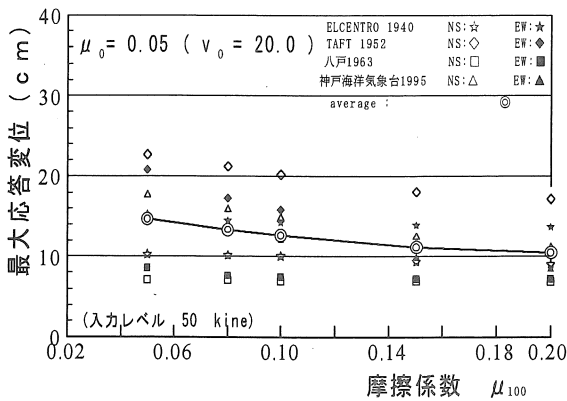
図 10 の(a)と(b)は最大加速度を図 9 と同じように示している。図 10(a)は速度依存性が強く応答における摩擦係数が大きくなるため、折線は上界摩擦係数の増加と共に右上がりではほぼ直線的である。摩擦係数が速度依存性を持たないとき最大応答加速度の値は理論的に値  $g \cdot \mu_0$  である。図 10(a)の各上界摩擦係数に対する最大応答加速度の値はこの理論値より若干づつ小さくなっている。この違いは、応答の継続時間中に摩擦係数が応答速度によって  $\mu_{100}$  の値より小さい値で変動するため、生ずる。図 10(b)は上限速度が 20 kine の場合であり、摩擦係数の速度依存性は小さく、上界摩擦係数の増加に伴う平均応答



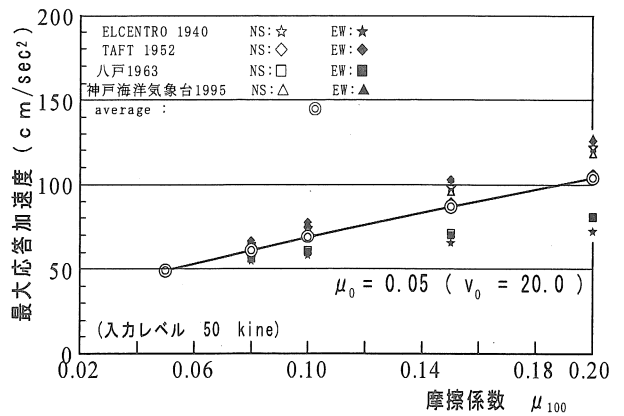
(a) 速度依存性のない上限速度  $v_0$  が 1.0 の場合



(a) 速度依存性のない上限速度  $v_0$  が 1.0 の場合



(b) 速度依存性のない上限速度  $v_0$  が 20.0 の場合



(b) 速度依存性のない上限速度  $v_0$  が 20.0 の場合

図 9 速度依存性を有する応答系の最大応答変位

図 10 速度依存性を有する応答系の最大絶対応答加速度

加速度の折線は図 10(a)と比較すると、傾きが緩やかである。すなわち最大応答加速度は上限速度と上界摩擦係数の組み合わせ速度依存性によって比較的敏感に変動する。

## 5 むすび

滑り支承上にある建物は地震時に、貼り付きと滑りを繰り返して振動する。これらの状態変化を生ずる時刻が高い精度で確定され、地震応答解析が行われた。まず滑り摩擦係数が速度依存性を持たないとき、絶対加速度の最大値は理論値と同じであり、最大値が連続する時間に滑りモードが発生し、速度と変位が生ずる。最大応答変位は、摩擦係数が特に小さいとき地震動の違いによって大きく変動するが、PTFE（テフロン）の摩擦係数の値でほぼ妥当な値となっている。滑り摩擦係数が速度依

存性を有すると、絶対応答加速度の最大値は速度依存性の強さによって敏感に変動し、速度依存性が強くなると絶対加速度の最大値は大きくなる。最大応答変位もやはり速度依存性によって比較的強く影響を受け、速度依存性が強いとその値は小さくなることが明らかである。

## 参考文献

- 1) A. Vafai, M. Hamidi and G. Ahmadi: Numerical modeling of MDOF structures with sliding supports using rigid-plastic link, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol.30, pp.27-42, 2001
- 2) 田中久一郎：摩擦のお話，日本規格協会, pp.123-128
- 3) 日本潤滑学会編：新材料のトライボロジー，養賢堂 pp.62-66, 1991

(受理 平成15年3月19日)