

建物固有周期と入力動周期の建物滑動量への影響

Influence of Natural Period and Earthquake Dominant Period to the Slide of a Wooden Structure

山田耕司¹・向坊恭介²・鈴木祥之³

Koji Yamada, Kyosuke Mukaibo, and Yoshiyuki Suzuki

¹豊田高専准教授 建築学科 (〒471-8525愛知県豊田市栄生町2-1)

Associate Professor, Toyota National College of Technology, Dept. of Architecture

²立命館大学 理工学部 建築都市デザイン学科・助教 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Assistant Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Architecture and Urban Design

³立命館大学 立命館グローバル・イノベーション研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Ritsumeikan-Global Innovation Research Organization

In this paper, we argue the slide phenomenon between the footing of floor post and the upper structure by numerical analysis. An analysis model consists of both 1 DOF structure and a perfect plasticity friction model. The results may be summarized as follows: the short natural period and the high base shear coefficient of structure make the slide distance long. And the long term of input sine motion also makes the slide distance long. Slides make no increase of structure deformation, and base isolation effect was not observed. The vertical component of a ground motion has strong influence on the distance of slide.

Key Words : Slide phenomenon, Footing of floor post, friction factor, Traditional wooden house, Seismic response

1. 序

旧来の日本家屋である伝統構法木造建物では、建物上部構造を束石上に設置し、基礎（もしくは地盤）に固定していない。このような建物では、強震時に建物上部構造が束石上を滑っていることが過去の震災調査で確認されている。束石上の滑動による上部構造への影響は、あまり研究されていない。滑動に関する研究は、免震構造物の滑り支承において多い。しかし、これらの研究は、低摩擦係数を想定しており、上部構造は剛と見なせる場合が多い。一方、筆者らは、実験^{1)~5)}を通じた基礎研究を行ったが、定量的な傾向を掴めるまでには至らなかった。そこで本報では、強震時における建物上部構造の束石上の滑動現象把握を目的として、簡易なモデル・簡易な入力動における滑動の定性的把握を行う。加えて、実地震動に対する応答解析を行い、簡易な入力動における滑動と比較する。

2. 各種仮定・使用する既存建物の壁量

(1) 建物モデルの仮定

本報で用いる建物モデルは、図1の2質点系とし、第一層は滑り摩擦の復元力特性と基礎を示し、第二層は建物上部構造を一質点系で置き換えている。建物上部構造では、固有周期($T=0.2\sim 1.5s$, $0.1s$ 毎)、ベースシア係数($C_0=0.2\sim 0.6$, 0.1 毎)をパラメータとした。復元力特性は、線形、完全弾塑性、Slip型を扱う。建物上部構造と基礎部質量の比は、建物モデルにより変動する。しかし、本報では現象理解を重点に置いて問題を簡単にするため、質点質量を100kg、基礎部質量を100kgと仮定した。減衰定数は5%とした。

摩擦部は、降伏変形量0.02cmの完全弾塑性モデルで近似する。固体摩擦係数は、石・金属間で0.3～0.4、木・石間で0.4、木・金属間で0.2（湿）～0.6（乾）と言われている。そこで本報では、摩擦係数0.4を基準に0.3～0.5の範囲を対象とする。

(2) 入力動の仮定

本報で用いる入力動(\ddot{x})は、周期($T_g = 0.2 \sim 1.0s$, 0.1s毎)、最大加速度($A_H = 400 \sim 1000gal$, 200gal毎)をパラメータとした図2、式(1)のような正弦波を変化させた波形（2周期まで線形に加速度を増加後、最大加速度一定で2周期加えた波形）とする。また、実地震動波形は、兵庫県南部地震神戸海洋気象台波NS成分およびUD成分を用いる。なお、本報で記述する基礎の滑り量は、図3で規定するように、変位応答の正負最大値の差を示す。

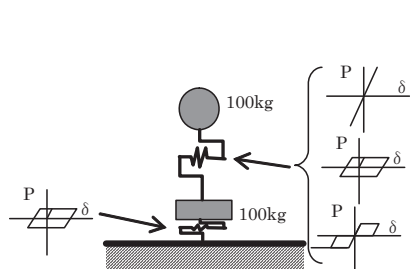


図1 解析モデル

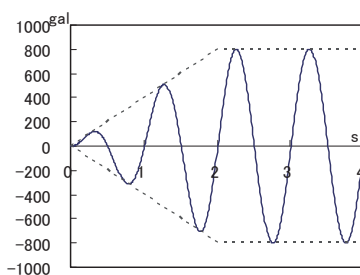


図2 入力動の例（周期1秒，最大加速度800gal）

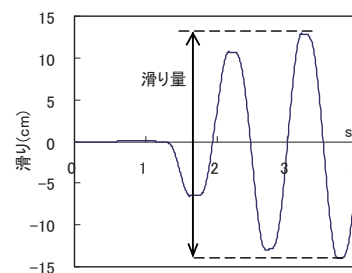


図3 滑り量の定義

$$\ddot{x} = A_H \cdot Env(t) \cdot \sin\left(2\pi \frac{1}{T_g} t\right) \quad (1)$$

$$Env(t) = \begin{cases} t/(2T_g) & (0 < t < 2T_g) \\ 1 & (2T_g \leq t < 4T_g) \\ 0 & (4T_g \leq t) \end{cases}$$

3. 線形系の応答

(1) 入力最大加速度と滑り量

線形系の解析結果として、先ず、図4に摩擦係数 (μ) 0.4時の滑り量と上部構造の固有周期(T_0)、入力周期(T_g)の関係を示す。図より、滑り量は入力加速度に比して増大すること、地震動周期が長いほど滑り量が増大すること、固有周期未満の地震動周期ではあまり滑らないこと、が分かる。

(2) 摩擦係数と滑り量

次に固有周期0.4時の摩擦係数 (μ)、入力周期(T_g)と滑り量の関係を図5に示す。図より、摩擦係数が0.4,0.5の場合には、入力加速度400gal時に構造物と共振する周期0.4sの地震動で最大滑り量が計算されていることが分かる。しかし、最大加速度の増加、もしくは、摩擦係数の減少に伴い、最大滑り量は入力地震動の周期に比して増大している。

4. 弾塑性系の応答

(1) 最大滑り量と上部構造の固有周期・ベースシア係数の関係

本節では、弾塑性系の応答を論じる。先ず、入力地震動の周期を変化させた時の最大滑り量と上部構造の固有周期・ベースシア係数の関係を図6～8に示す。全般的に摩擦係数が大なるほど滑り量は減少する。また、固有周期が短いほど、ベースシア係数(C_0)が大なるほど、滑り量が増大し、復元力特性による差はあまり認められない。一方で、ベースシア係数(C_0)が大きく、かつ、最大加速度が400, 600galの場合では、上部

構造の固有周期 0.7s あたりで最大滑り量となる。これは、上部構造の共振による上部構造絶対加速度の増大の影響である。

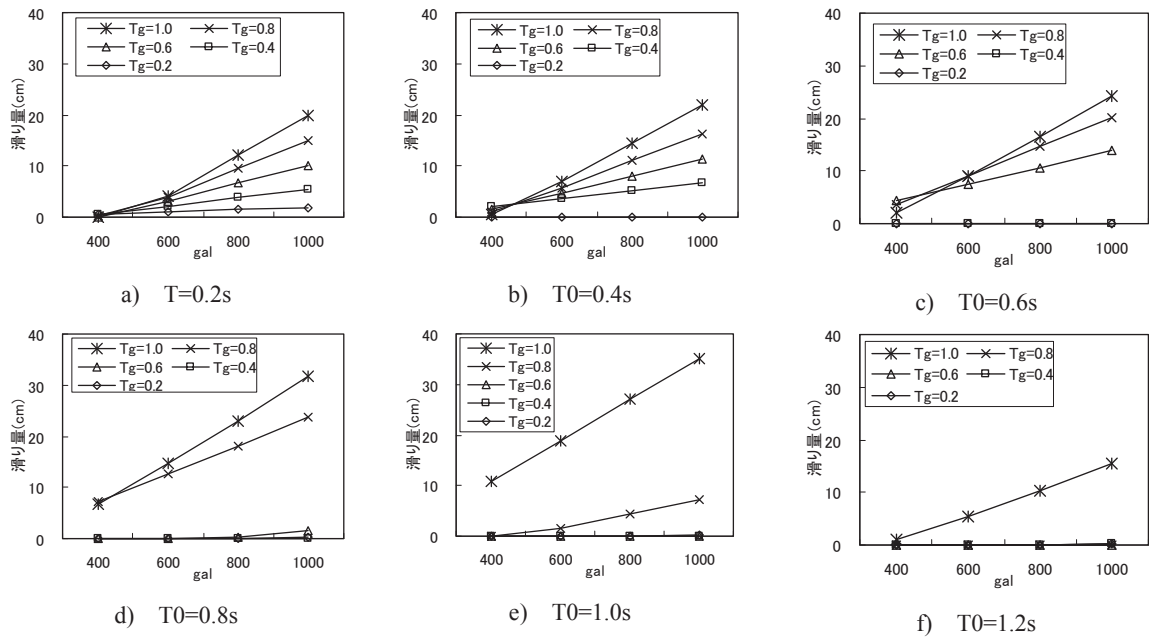


図4 滑り量と固有周期，入力周期の関係 ($\mu=0.4$)

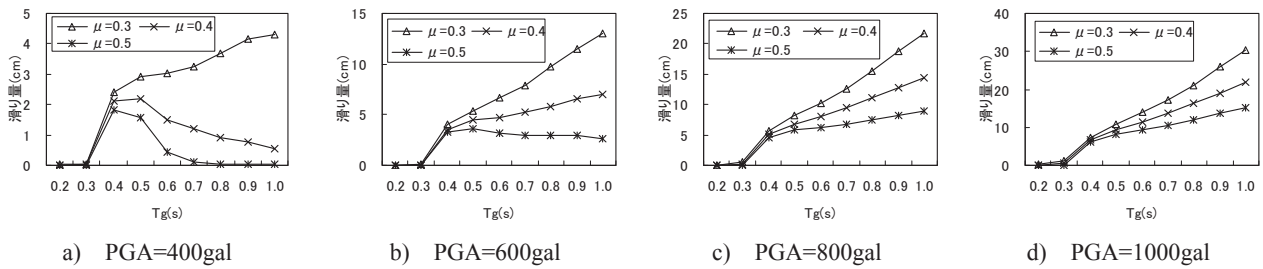


図5 滑り量と摩擦係数の関係 ($T_0=0.4$)

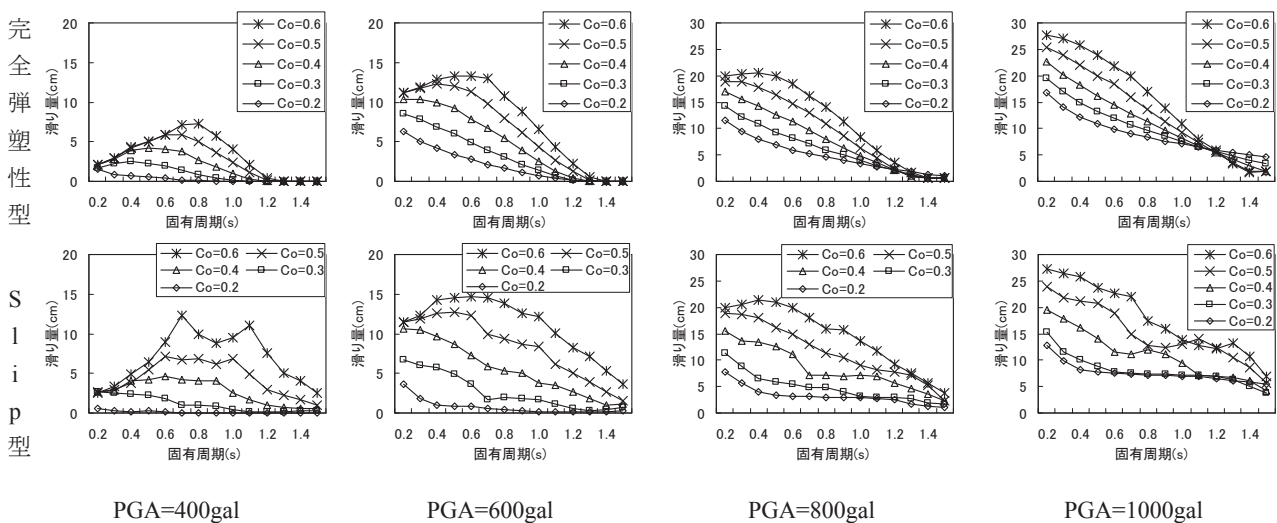


図6 滑り量と固有周期，ベースシア係数の関係 ($\mu=0.3$)

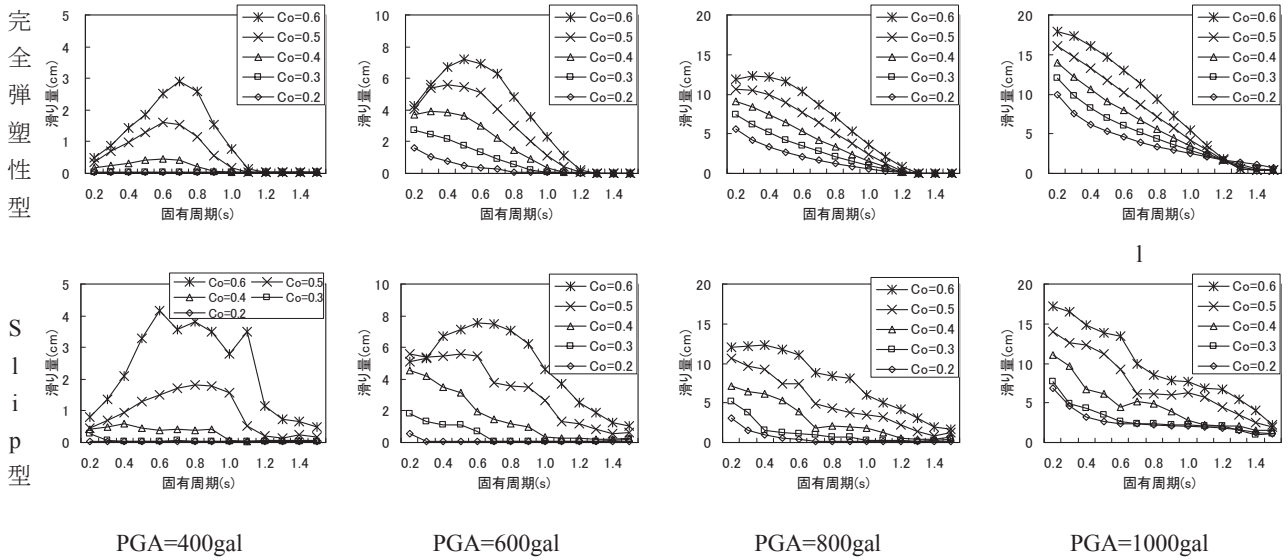


図7 滑り量と固有周期，バースシア係数の関係 ($\mu=0.4$)

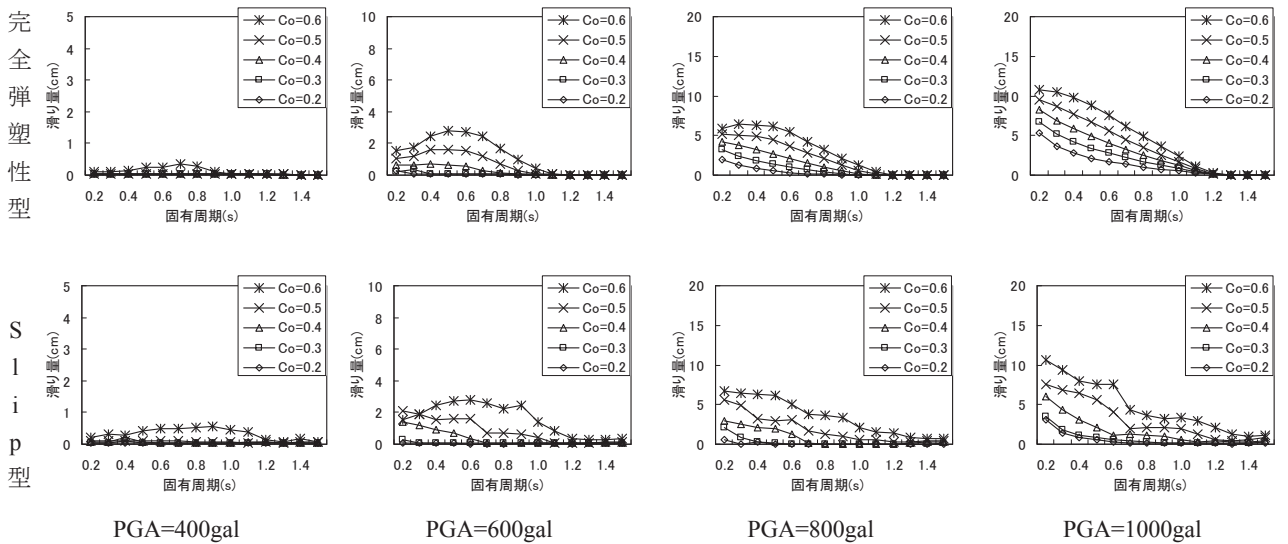


図8 滑り量と固有周期，バースシア係数の関係 ($\mu=0.5$)

(2) 滑動による上部構造最大塑性率の変化

基礎固定時最大塑性率に対する滑動考慮時最大塑性率を基礎固定時最大塑性率10以下の場合を図9に示す。ほとんどのケースで滑動考慮時最大塑性率は基礎固定時最大塑性率以下となる。また、摩擦係数が小なるほど滑動考慮時最大塑性率は基礎固定時最大塑性率以下になるケースが多い。したがって、上部構造が滑ることによる上部構造の最大変位減少を期待することは出来ないが、上部構造の最大変位が増大することはほとんどあり得ないと言える。

図10に滑り量と基礎固定時最大塑性率に対する滑動考慮時最大塑性率の比を示す。この図からも、滑動による上部構造に対する免震効果が得られる保証は見受けられない。

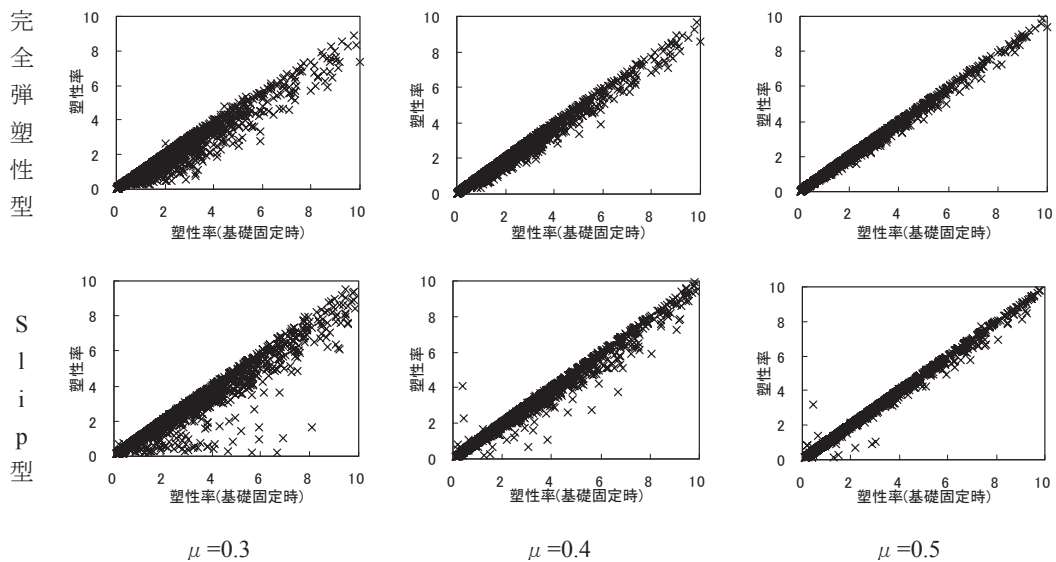


図9 基礎固定時の塑性率と塑性率の比

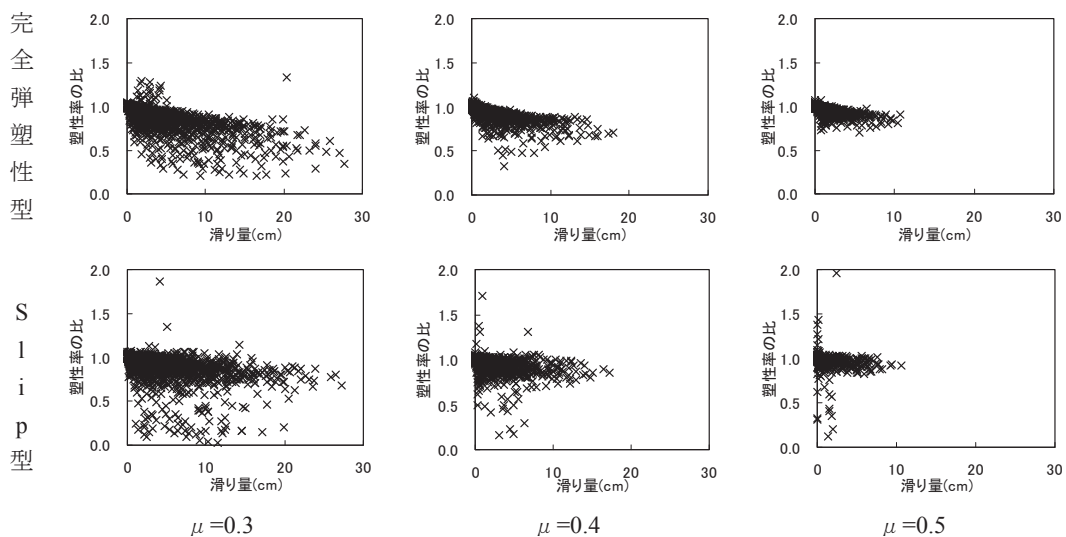


図10 滑り量と塑性率の比

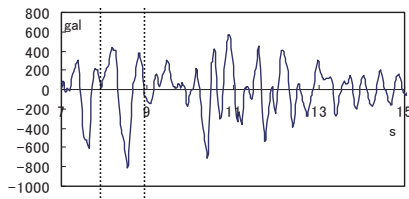
5. 上下動の滑り量への影響

本章では、上下動の影響について考察する。先ず、実地震動を用いた計算例により検討する。図11に兵庫県南部地震神戸海洋気象台波NSおよびUD成分を用いた解析結果を示す。ここで上下動の影響は、摩擦力を表す完全弾塑性モデルの降伏耐力の変化として考慮した。また、上部構造は固有周期0.2s、ベースシア係数0.6、摩擦係数0.4としている。

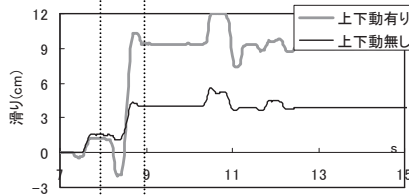
次に正弦波による滑り量と地震動による滑り量を比較する。入力正弦波の周期は、先の地震動（水平成分）の8～9秒間卓越周期0.6sを用いた。周期0.6秒の正弦波に対する応答を図13に示す。滑り量は復元力特性に寄らず摩擦係数(μ)0.4の場合で7cm程度、（図12の上下動の最大値300gal分を考慮した）摩擦係数(μ)0.28の場合で10cm弱程度である。摩擦係数(μ)0.4の場合の滑り量の50%は、図11の上下動の無い場合の8～9秒間滑り量にほぼ等しい。しかし、摩擦係数(μ)0.28の場合の滑り量の50%は、図11の上下動の有る場合の8～9秒間滑り量より小さく、上下動の正しい評価が必要であることが分かる。

図より分かるように上下動の影響は、滑り量の増大と復元力特性による相違の顕在化がある。滑り量の増大は、上部構造の復元力特性に関わらず発生する。これは、図12に示す8～9秒間の海洋気象台波NS成分およびUD成分波形から分かるように、NS成分最大加速度時に300gal程度の下方向加速度が働き見かけ上の摩擦力が減少したためである。復元力特性による相違は、水平動のみ考慮した場合はほとんど見られないが、

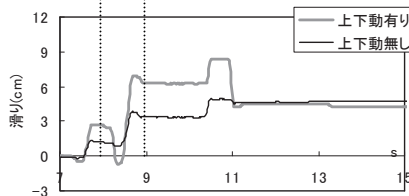
水平・上下2成分の加振により完全弾塑性型モデルはSlip型モデルの1.5倍の滑り量が発生した。



a) 入力波形 (NS成分)



b) 完全弾塑性型



c) Slip型

図11 兵庫県南部地震神戸海洋気象台波に対する滑動

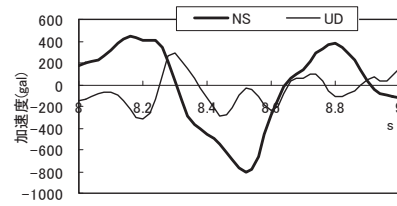
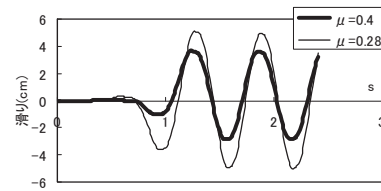
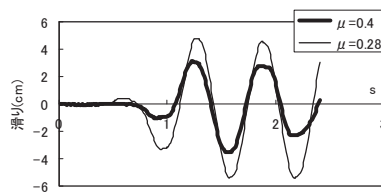


図12 海洋気象台波 NS成分とUD成分 (8~9秒間)



a) 完全弾塑性型



b) Slip型

図13 周期0.6s, 最大地動加速度806galに対する滑動

次に上下動の影響を定性的に検討するため、上下動の最大加速度、位相差を考慮した応答解析を行った。上下動 (\ddot{z}) は、上下動の最大加速度 (A_V)、周期(T_V)水平動との位相差 (ϕ) を用いて、式(2)のように定義した。

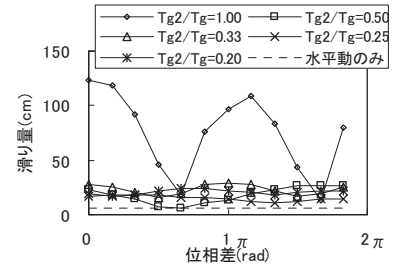
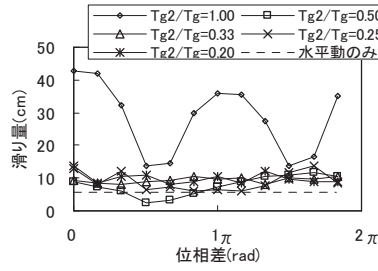
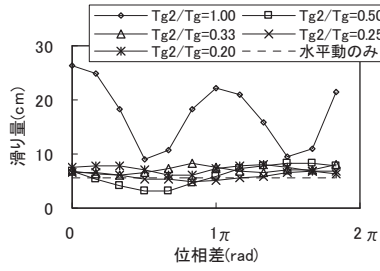
$$\ddot{z} = A_V \cdot \text{Env}(t) \cdot \sin\left(2\pi \frac{1}{T_V} t - \phi\right) \quad (2)$$

結果を図14に示す。図中、横軸は水平動に対する上下動の位相差、縦軸は滑り量を示す。上下動の振動数は、水平動の振動数(1.0Hz)の1,2,3,4,5倍とした。図より、上下動が加わることで、水平動より滑動が大きくなること、上下動の周期、位相が水平動と同調することにより大きく滑動が生じること、水平動に対する上下動の最大加速度比の増大に伴い滑動が飛躍的に増加すること、が分かる。

以上の結果より、上下動の水平動に対する最大加速度比、位相差、周期比が、滑り量に重要なパラメータと判明した。しかし、実地震動におけるこれらのパラメータの値は未だ推測すらできず、今後の研究が必要である。一方、実用上は、滑り量の片振幅の最大値を設定できれば良い。そこで主要な観測地震動を用いて、最大滑り量を計算した。使用した地震動は、兵庫県南部地震神戸海洋気象台波 (kobe_ew,kobe_ns)、兵庫県南部地震鷹取波(tak000.a,tak090a)、ノースリッジ波(syl090.a,syl360.a)、台湾集集地震石岡波(TCU068-N,TCU068-W)であり、それぞれ南北動+上下動、東西動+上下動で計算を行った。ベースシア係数0.5、摩擦係数0.4、の場合を図15に示す。結果として、特定地震の特定方向(兵庫県南部地震神戸海洋気象台波のNS成分、台湾集集地震石岡波EW成分)が卓越した滑り量を与えることが分かる。

そこで本報では参考値として、兵庫県南部地震神戸海洋気象台波NS成分および台湾集集地震石岡波EW成分に対する最大滑動片振幅を図16,17に示す。図より、建物固有周期、復元力特性の影響が強いといえるが、摩擦係数0.3で最大滑動片振幅が30cm強、摩擦係数0.4で最大滑動片振幅が20cm強、であることから、摩擦係数を安全側にとらえ、摩擦係数0.3以上であれば、片振幅30cmを想定すれば良いと考える。

完全弾塑性型



Slip型

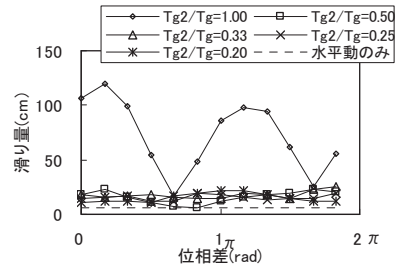
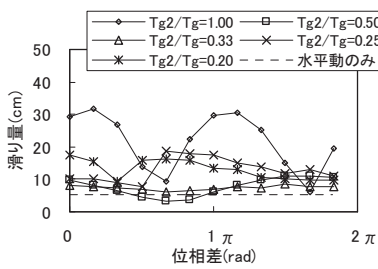
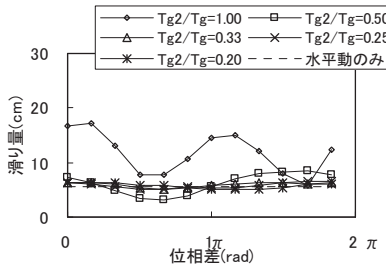
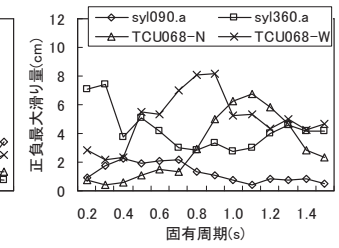
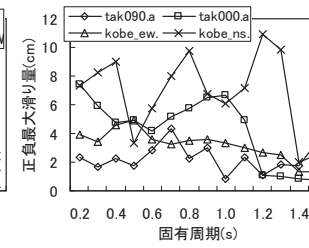
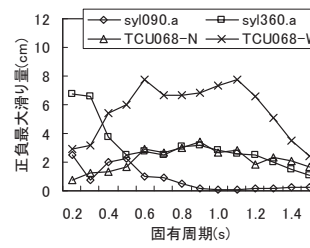
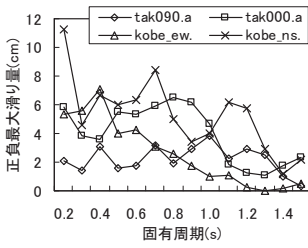


図14 上下動の影響： α =上下動最大加速度/水平動最大加速度

(固有周期 0.4 s, ベースシア係数 0.5, 摩擦係数 0.4, 入力水平動の周期 $T_g=1.0$ s, T_{g2} : 上下動の周期)

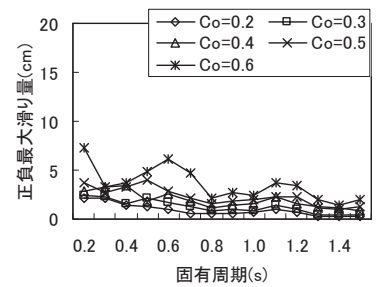
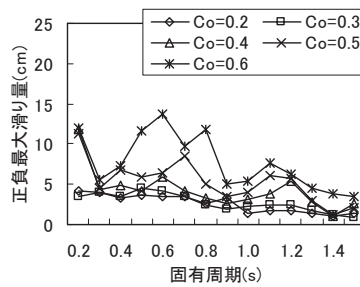
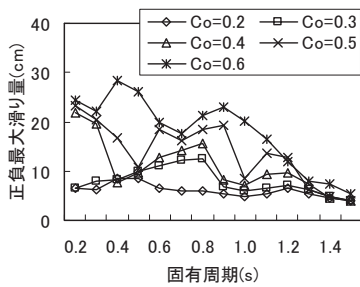


完全弾塑性型

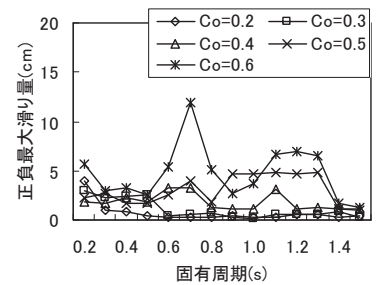
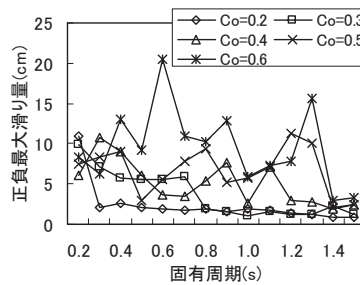
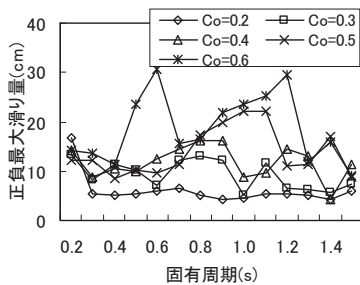
Slip型

図15 観測地震動による最大滑動片振幅 (ベースシア係数 0.5, 摩擦係数 0.4)

完全弾塑性型



Slip型



$\mu=0.3$

$\mu=0.4$

$\mu=0.5$

図16 最大滑動片振幅 (海洋気象台波NS成分とUD成分)

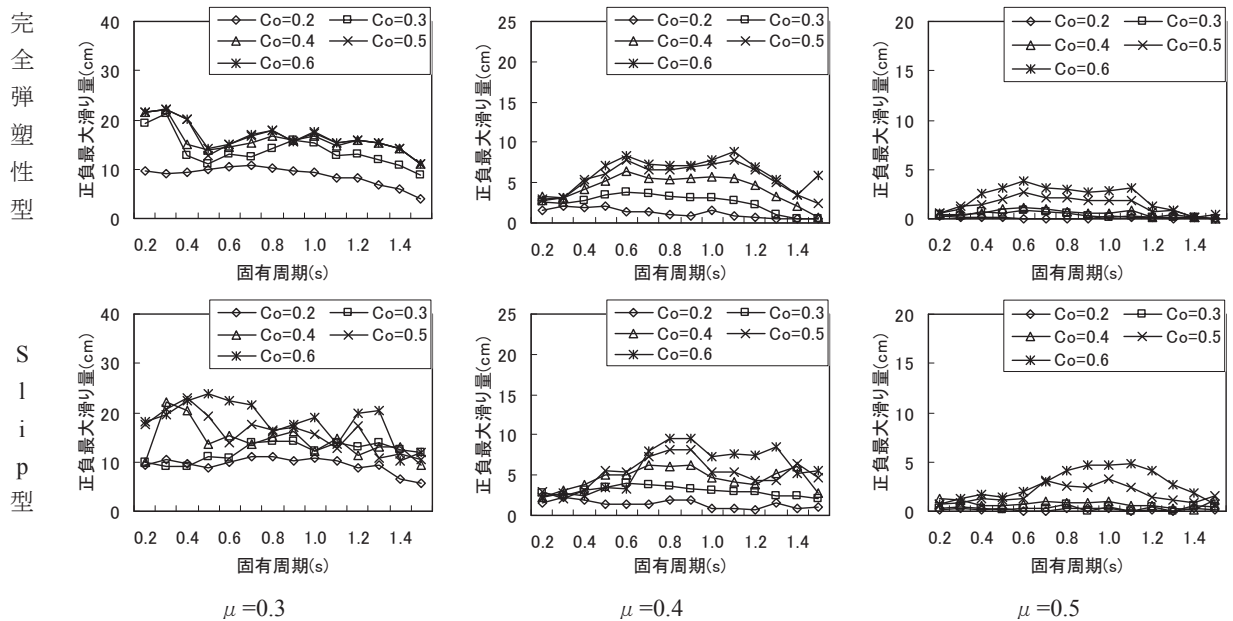


図 17 最大滑動片振幅（台湾集集地震石岡波 EW 成分と UD 成分）

6. 結語

本報では、強震時における建物上部構造の滑動現象把握を目的として、簡易なモデル・簡易な入力動における定性的把握を試みた。その結果、レベル2地震動を超える過大入力地震動に対しては、滑動が発生すること、建物固有周期の短周期化・ベースシア係数の増加・入力地震動周期の長周期化は滑り量を増加させること、滑動による免震効果は大きくないこと、滑動により建物最大変形の増大はほとんど無いこと、が判明した。また、兵庫県南部地震神戸海洋気象台波を用いた解析より、地震動の上下動の影響が大きいこと、が示された。

以上の結果、建物の滑動は、水平動と上下動の関係、建物特性の影響を受けやすいことが判明した。今後は、実地震動の水平動と上下動の分析、実験による検証などが必要である。

謝辞：本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金・基盤研究(S)（課題番号19106010）により行われた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 山田耕司：東立て床の滑動免震効果に関する実験的研究，日本地震工学会大会－2003梗概集,pp.2-3,2003
- 2) 川上沢馬，向坊恭介，山田耕司，鈴木祥之：柱脚を固定しない木造建物のロッキングと滑動，日本地震工学会・大会－2007 梗概集，pp.286-287,2007
- 3) 向坊恭介，川上沢馬，鈴木祥之：礎石建て構法木造建物の地震時挙動に関する研究 その1振動台実験，日本建築学会講演梗概集C-1，pp.175-176，2008
- 4) 川上沢馬，向坊恭介，鈴木祥之：礎石建て構法木造建物の地震時挙動に関する研究 その2地震応答解析，日本建築学会講演概要集C-1，pp.177-178，2008
- 5) 吉田尚弘，向坊恭介，大岡優，伊津野和行：礎石建て構法木造建築物の柱脚滑り挙動の解析的研究，日本建築学会講演梗概集C-1，pp.561-562，2009