

大地震時において直接基礎の滑り現象が上部建物応答に与える影響
Effects of foundation slide on building responses under strong ground motions

正会員 ○護 雅史*

Masafumi MORI

2. 構造 - 2. 振動

直接基礎 動的相互作用 接触非線形
内部摩擦角 滑り抵抗 建物耐力

1. はじめに

2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震などでは、非常に大きな加速度記録が得られたが、その周辺に建つ低層RC造建物では、その記録から経験的に推定され得るような甚大な構造的被害が報告されていない。この原因を解明するための検討が、これまでに行われてきている（例えば、文献1）が、未だ全容は解明されていない。これは、裏を返せば、我々自身が実建物の真の耐震性能（いわば、余力）を十分に評価するための方法論を確立できていないということも出来る。大地震時の建物応答の適切な予測のためには、真の耐震性能を評価する必要があるが、これには、上部建物のモデル化手法はもちろんのこと、建物耐力の余力、地盤—基礎—建物の非線形動的相互作用効果、地盤の非線形応答評価、入力地震動など、検討すべき項目が多い。

このうち、地盤—基礎—建物の非線形動的相互作用効果に関しては、基礎の滑りや浮き上がりなど、接触非線

形問題として以前から検討が行われてきている（例えば 2)~5)。特に、基礎の浮き上がりについては、精力的な検討が行われているが、それに比して滑りに対する検討は少ない。

そこで本論では、接触非線形問題のうちの滑り現象に着目し、大地震時において直接基礎の滑りが上部建物応答に与える影響について、解析的な検討を行う。

2. 解析モデルの概要

2.1 解析モデル

解析モデルの概要を図1に示す。解析モデルでは、上部建物を1質点系のせん断型モデルとし、これに基礎と水平方向の地盤ばねを付加した。建物形状は、半径 $r=10\text{m}$ の円形とした。上部建物、及び基礎の質量は、単位体積質量 2.4t/m^3 、スラブ厚さを 0.2m と仮定して算定した。地盤は、半無限弾性体とし、その密度、及びせん断波速度をそれぞれ、 $\rho=1.5\text{t/m}^3$ 、 $V_s=200\text{m/s}$ とし、地盤ばねの剛性、及び減衰係数を(1)式により算定する。

$$k_H = \frac{8Gr}{2-\nu}, c_H = \rho V_s \pi^2 \quad (1)$$

上部建物については、同図に示すように $Q-\delta$ 関係に非線形性を考慮して、復元力特性として武田モデルを採用する。一方、すべりについては、完全弾塑性型のバイリニアモデルとし、滑りはじめの変位 δ_s を(2)式により設定する。

$$\delta_s = Q_s / k_H \quad (2)$$

ここに、 Q_s は滑りを生じ

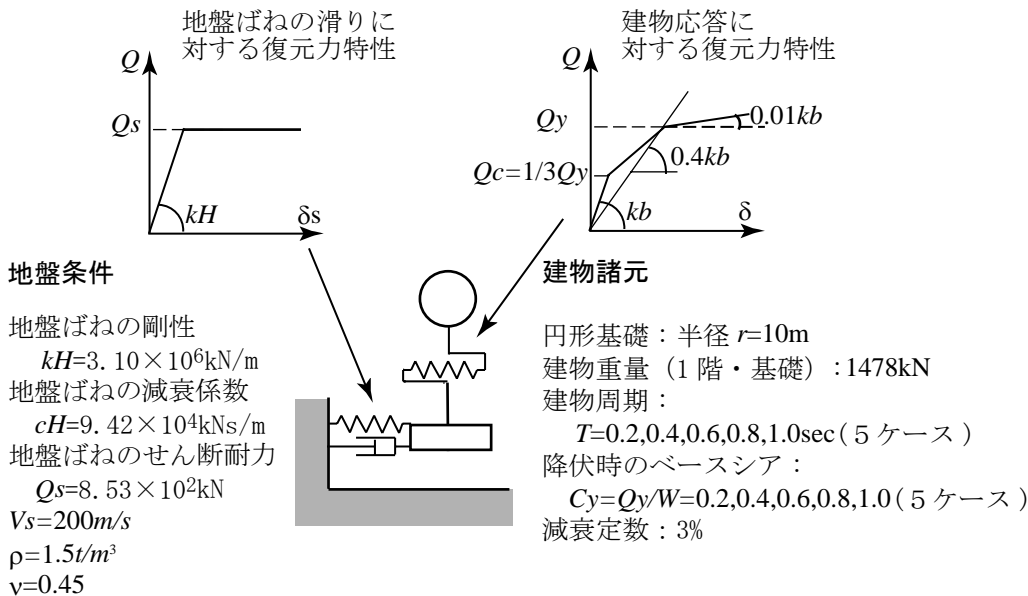


図1 検討に用いる解析モデル及び地盤、建物の諸条件

* 名古屋大学大学院環境学研究所・准教授・博士 (工学)

* Assoc. Prof., Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr.Eng.

始める水平地盤ばねのせん断力で、Mohr-Coulomb の法則に従い²⁾、 A を基礎面積、 c 、及び ϕ を、支持地盤の粘着力、及び内部摩擦角として、(3)式で与える。

$$Q_s = A \cdot (c + \sigma_n \tan \phi) \quad (3)$$

今回は、砂地盤として $c=0$ とすることにより、 Q_s は最終的に次式で与える。

$$Q_s = W \cdot \tan \phi \quad (4)$$

ここで、 W は建物全重量であるので、 $\tan \phi$ は摩擦係数に相当する。砂質土の内部摩擦角を $25^\circ \sim 35^\circ$ とすると、摩擦係数としては、 $0.47 \sim 0.7$ となる。また、仮に無質量基礎と仮定すると、(4)式は建物の降伏時の耐力とベースシア係数 C_y の関係と読みかえることが出来るので、上部建物が降伏する前に基礎が滑り出すためには、

$$\tan \phi < C_y \quad (5)$$

なる関係が必要となる。すなわち、降伏時のベースシア係数が摩擦係数を上回らなければ、滑りによる上部建物の応答低減は期待できないことになる。

摩擦係数と降伏時のベースシア係数の関係としては、例えば、壁谷澤ら⁶⁾は、実大3層鉄筋コンクリート建物の振動実験において推定された摩擦係数として、滑り始めが0.8程度、繰り返し滑り時は0.4~0.5としている。このとき用いられた試験建物1階における最大応答層せ

ん断力係数は1.3程度あり、摩擦係数に比べて大きいことが示されている。

解析に当たって、地盤ばねの減衰係数は減衰定数に換算し、振動数によらず一定値として与える。また、内部摩擦角は 30° ($\tan \phi=0.57$) とし、その他のパラメータとして、建物周期 T を $T=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ 秒、建物降伏時のベースシア C_y を $C_y=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ とする。また、比較のため、滑りを考慮しない場合についても解析を行う。以降では、各モデルをスウェイモデル、滑り考慮モデルと呼ぶ。

2.2 入力地震動

入力地震動としては、位相特性の違いによる影響を検討するために、レベル2の告示スペクトルをターゲットとして、1995年兵庫県南部地震のJMA神戸における観測記録の位相特性(以降、kobe)、1968年十勝沖地震の八戸港湾における観測記録の位相特性(以降、hachi)、ランダム位相特性+日本建築センターによる経時特性(以降、random)をそれぞれ与えて作成された人工地震波を用いる。上記の3つの入力地震動の加速度波形とトリパタイトスペクトルを図2に示す。解析では、滑りの効果を確認するための事前検討を行った結果、最大加速度を2倍して用いることとした。

3. 解析結果と考察

滑り考慮モデルにおける各入力地震動に対する最大加速度応答を比較して図3に示す。横軸は、建物降伏時のベースシア係数である。建物周期が $T=0.8$ sec、 $T=1.0$ sec でかつ降伏耐力が大きい場合に、入力地震動の違いによる差が若干認められる。

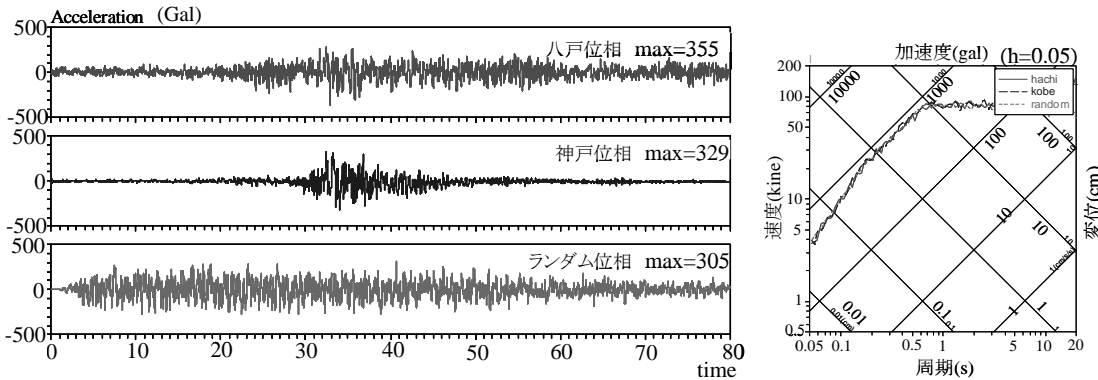


図2 解析に用いた入力地震動の加速度波形(左)とトリパタイトスペクトル(右)

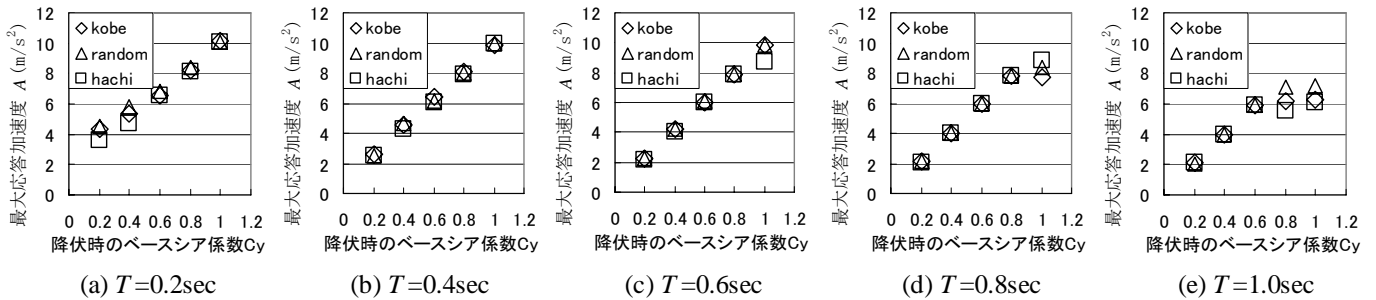


図3 滑り考慮モデルによる最大応答加速度(入力地震動、建物周期での比較)

図4は、 $T=0.6\text{sec}$ での最大応答層せん断力と最大塑性率を各モデルで比較した結果である。図には、解析において設定した上部建物の降伏耐力 Q_y (黒丸) をあわせて示している。これより、ほとんどのケースで降伏耐力を上回り、あるいは塑性率が 1.0 を上回っていることが確認できる。また、この結果から、モデルの違いによる応答値の明瞭な違いは認められなかった。また、他のケースにおいても同様の結果が得られている。

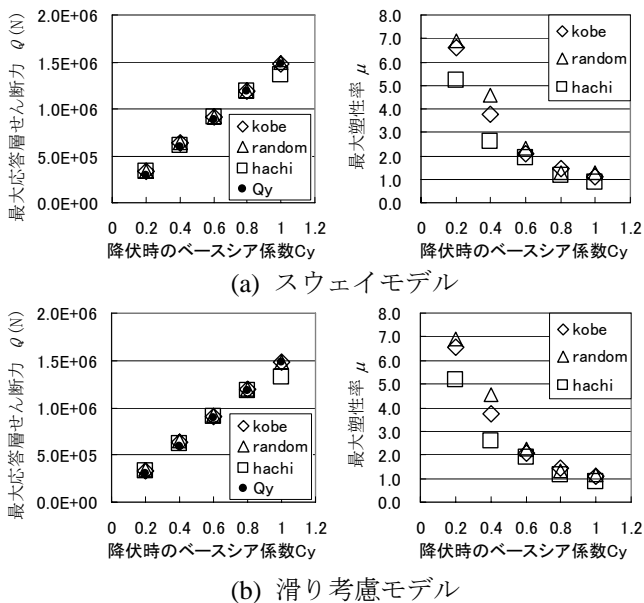


図4 最大応答値の各モデルでの比較 ($T=0.6\text{sec}$)

図5、及び図6に、建物の降伏耐力とスウェイモデルに対する滑り考慮モデルの最大応答層せん断力の比、及び最大応答塑性率比を建物周期毎に示す。最大応答層せん断力の比より、いずれの建物周期においても、降伏時のベースシア係数 C_y が 0.6 以上、すなわち、地盤の摩擦係数 0.57 を上回ると一部を除いて滑り考慮モデルの応答が、スウェイモデルに比べて低減されている。さらに C_y が大きいほど、その低減効果が大きくなる傾向が、特に $T=0.4\text{sec}$ 、 $T=0.6\text{sec}$ 、 $T=0.8\text{sec}$ で認められ、本検討内では、最大で 7~8%程度である。また、入力地震動による違いも現れている。最大応答塑性率比でも同様の傾向が認められるが、特に $T=0.2\text{sec}$ 、 $C_y=1.0$ において、20%程度と最も低減効果が大きい。そこで、最も低減効果が大きかった $T=0.2\text{sec}$ 、八戸位相の入力地震動 (hachi) を用いた場合の、上部建物、および地盤ばねの $Q-\delta$ 関係を滑り考慮モデルとスウェイモデルで比較して図7に示す。ここでは、建物降伏ベースシア係数 ($C_y=0.2$ と $C_y=1.0$) の結果も併せて比較するが、 $C_y=0.2$ は地盤の摩擦抵抗に対して建物耐力が非常に小さい場合、逆に $C_y=1.0$ は建物耐力が大きい場合に対応している。これらの図から、 $C_y=0.2$ では、滑りの有無による上部建物の履歴曲線の性状の違いは小さく、逆に $C_y=1.0$ では、スウェイモデルの方が滑り考慮モデルに比べると大きな履歴曲線を描いている。一方、地盤ばねについては、これとは逆に滑り考慮モデルの方がスウェイモデルより大きな履歴曲線となっている。この結果から、滑り考慮モデルで

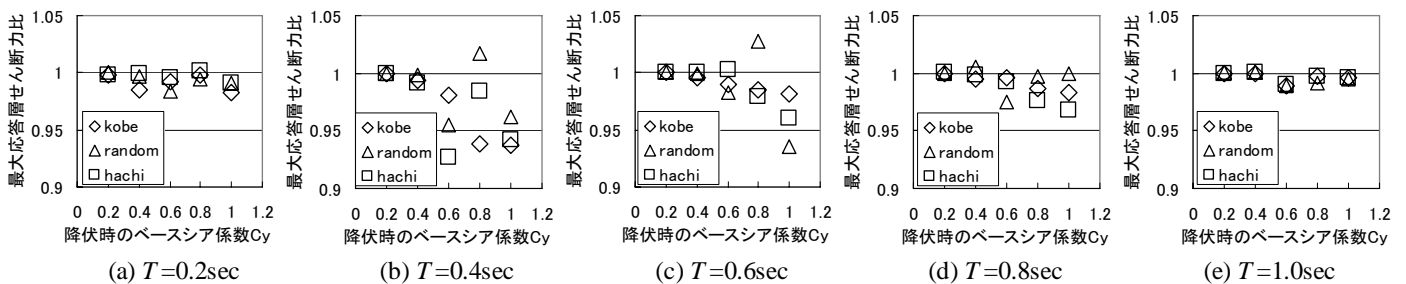


図5 建物の降伏耐力とスウェイモデルに対する滑り考慮モデルの最大応答層せん断力の比 (入力地震動、建物周期での比較)

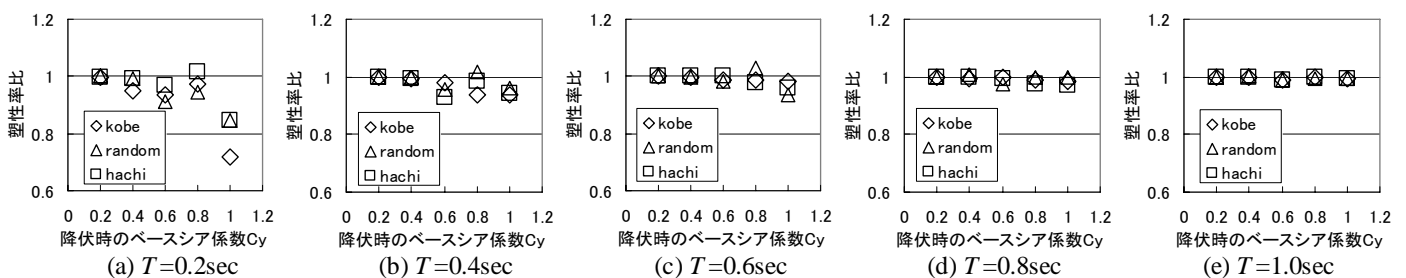


図6 建物の降伏耐力とスウェイモデルに対する滑り考慮モデルの最大応答塑性率比 (入力地震動、建物周期での比較)

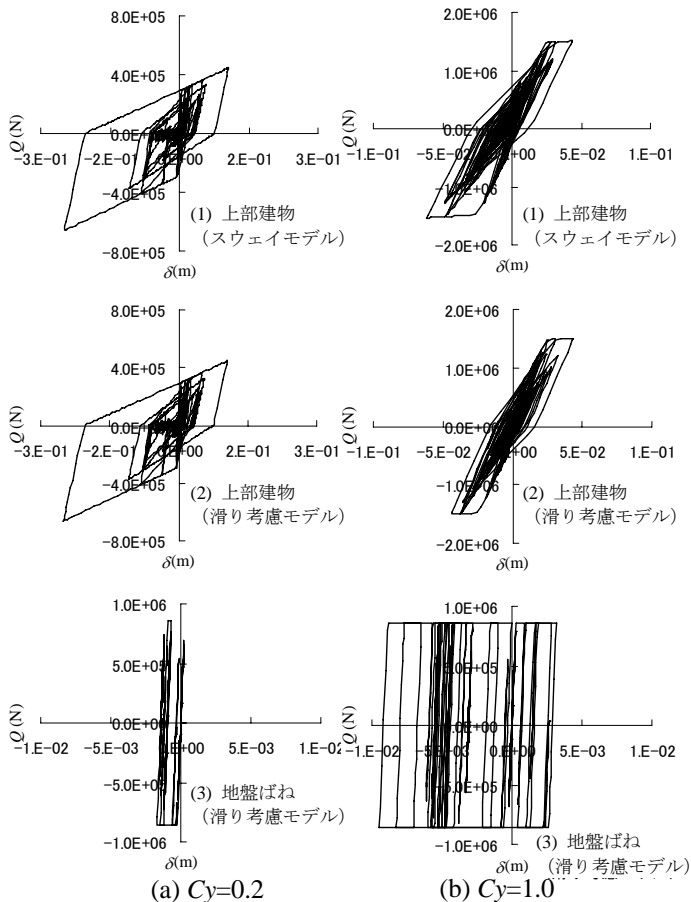


図7 建物耐力の違い、滑りの有無による上部建物とスウェイばねの $Q-\delta$ 関係の比較 ($T=0.2\text{sec}$)

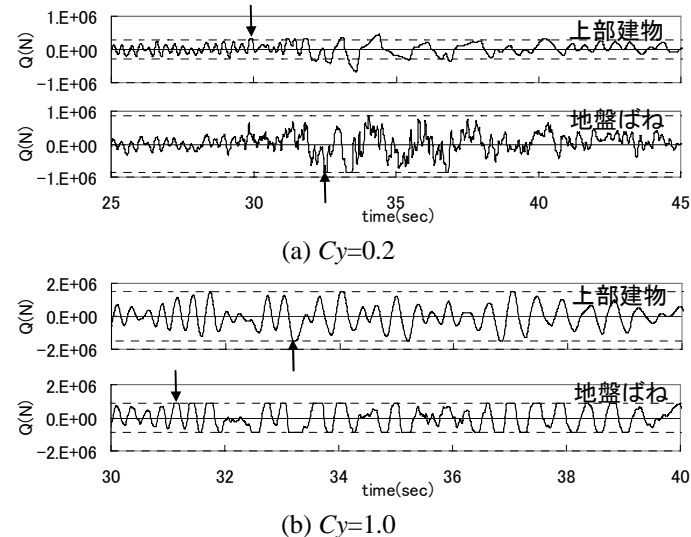


図8 上部建物と地盤ばねに生じる応答せん断力の時刻歴波形 (破線: 降伏せん断耐力、矢印は、降伏、及び滑り出す時刻)

は、地盤ばねの滑りに伴うエネルギー吸収により、上部建物の応答が低減されたと推察される。反対に、建物耐

力が地盤の摩擦係数よりも小さい場合には、滑り出す前に上部建物が降伏耐力に達してしまい、滑りを生じさせ得るだけのせん断力が基礎に作用しなくなるため、滑りにくくなるものと考えられる。図8に、図7で示した結果のうち、上部建物と地盤ばねに生じるせん断力の時刻歴波形の降伏開始時間周辺を拡大して示す。図中に矢印で示すように、 $C_y=0.2$ では上部建物が、 $C_y=1.0$ では地盤ばねが他に先行して降伏 (あるいは、滑り出し) しており、この違いが最終的な応答結果に影響を及ぼしていると考えられる。

4. まとめ

本論では、地盤と建物の接触非線形問題の一つである滑り現象に着目し、大地震時において直接基礎の滑りが上部建物応答に与える影響について、建物周期や耐力、地震動特性をパラメータとした解析的検討を行った。本検討内での結果をまとめると、①顕著ではなかったが、滑りによる上部建物応答低減効果が認められたこと、②建物の降伏耐力が、地盤の摩擦係数を上回り、かつ大きいほど、建物応答低減効果が大きいこと、③地震動入力や建物周期の違いが、滑りによる建物応答低減効果に与える影響は小さいこと等が明らかとなった。

なお、滑りには、地盤の局所的な材料非線形性や上下動入力の影響なども考えられるので、今後はこれらについても検討を行っていく予定である。

【謝辞】

本研究の実施に当たっては、名古屋大学環境学研究所福和伸夫教授に貴重なご意見を賜った。また、地震応答解析を実施するに当たっては、清水建設(株)所有の3次元非線形地震応答解析プログラム「idac」を利用させていただいた。ここに記して感謝の意を表する。

【参考文献】

- 宮本裕司、土方勝一郎他：2004年新潟県中越地震での地震動と建物応答に関する研究(その1~3)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造II、pp.455-460、2006.9
- 林 康裕、市川 隆之、小柳 義雄：浮上りとすべりを考慮した非線形 FEM 地震応答解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 I、pp.763-764、1985.10
- 山田 正明、高木 政美、河村 壮一：建屋基礎の動的浮き上がり性状に関する研究：解析モデルと浮き上がり時の減衰値に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 I、pp.1105-1106、1989.10
- 福和伸夫、小柳義雄、市川隆之：動的地盤ばねの幾何学的非線形性を考慮した基礎浮上り解析、構造工学論文集、Vol.32B、pp.11-18、1986
- 林 康裕：直接基礎構造物の基礎浮上りによる地震被害低減効果、日本建築学会構造系論文集、No.485、pp.53-62、1996
- 壁谷澤寿一、壁谷澤寿海、松森泰造、壁谷澤寿成、金 裕 錫：実大3層鉄筋コンクリート建物の振動実験、日本建築学会構造系論文集、No.632、pp.1833-1840、2008