

低層 RC 造事務所建物の実被害に影響を与える諸要因に関する研究
非線形動的相互作用効果が建物応答に与える影響

Various factors concerning seismic damage of low-rise RC office building
-Effect of nonlinear soil-structure interaction on structural response-

2. 構造 -2. 振動

RC 造建物 入力地震動 被害予測
相互作用 内部摩擦角 建物耐力

正会員 ○杉本 浩一*
正会員 護 雅史**
正会員 福和 伸夫***

SUGIMOTO Koichi
MORI Masafumi
FUKUWA Nobuo

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、設計時の想定を上回るレベルの地震動を記録したが、1981年の新耐震設計法施行以降の建物の多くは大破以内の被害にとどまった。特に中低層 RC 造建物の被害は比較的少なかった。また、最近の被害地震においては、大きな加速度記録、計測震度が観測されているが、それから推定されるほどの建物被害が発生していない場合もある。その理由の1つとして、設計上、考慮していない諸要因により、意図した耐震性能以上の余力を有している可能性が挙げられる。あるいは、滑りや浮上りといった接触非線形の影響の可能性も指摘されている¹⁾。

したがって、今後、大地震時の建物応答を精度良く予測するためには、建物の真の耐震性能を適切に評価する必要がある。これには上部構造のモデル化の方法や、こ

れまで解析モデルに十分考慮されてこなかった余力、さらには基礎周辺地盤-建物の非線形相互作用効果、入力地震動の特性など検討すべき項目が非常に多い。

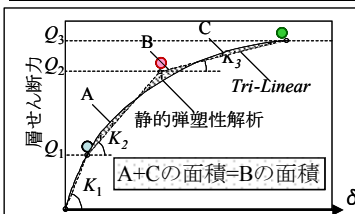
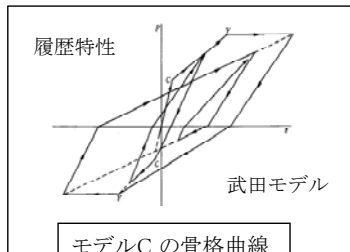
本論では、名古屋市内に立地する低層 RC 造事務所建物を対象として、地盤-基礎-建物の非線形動的相互作用効果(滑り)を考慮した弾塑性地震応答解析を行い、建物の耐力、動的相互作用効果、地盤条件、入力地震動の特性の違いが建物応答値に与える影響について検討する。

2. 数値解析対象となる建物概要

名古屋市中村区に位置する事務所建物を解析対象とする。本建物は、RC 造 3 階建て耐震壁付きラーメン構造で、平面形状は、桁行 48m、張間は 16m の長方形である。建物概要を表 1 に示す。壁の配置は桁行方向、張間方向で明確な差異はなく、雑壁が多く配置されている。図 1、図 2 に各方向の代表的な軸組図を示す。

表1 建物概要

竣工年	1978年
建築面積	800m ²
階数	地上3階 地下1階
階高	3.9m
各階重量(t)	基礎 1階 2階 3階
	1150 1090 1170 1240
基礎構造	直接基礎
最小I _s 値	桁行 0.64(1階) 張間 0.75(1階)



モデルC (kN/mm)				(kN)	
	階	K1	K2/K1	K3/K1	Q3
桁行 (X)	1	6824	0.18	0.0028	17062
	2	6258	0.19	0.0069	17065
張間 (Y)	1	6468	0.45	0.0118	20948
	2	6685	0.35	0.0092	18788
	3	5493	0.21	0.0058	11901

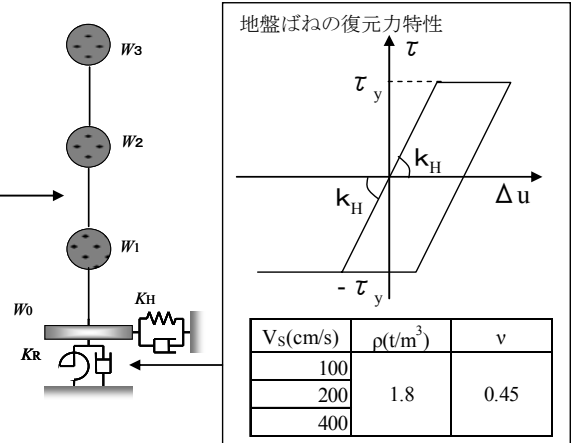


図3 地震応答解析モデル

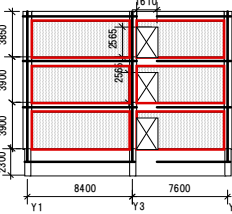


図1 張間方向の軸組図

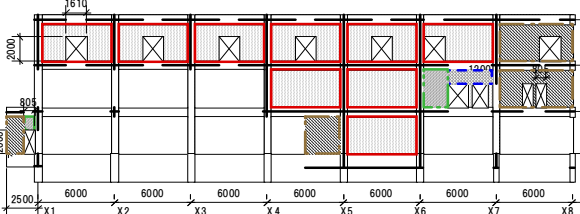


図2 桁行方向の軸組図

- ...耐震壁とみなし開口は開口周比で耐力を落とす
- ...垂壁として梁の耐力・剛性に加えて評価する。
- ...両端または片端が躯体の柱にくっついていない壁を示し、壁厚と同じ柱を仮想的に立てて、耐震壁としてモデル化する。
- ...袖壁として柱の剛性・耐力に加えて評価する。
- ...剛域を示す

* 名古屋大学環境学研究所 大学院生
** 名古屋大学環境学研究所 准教授・博士(工学)
*** 名古屋大学環境学研究所 教授・工博

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

3. 地震応答解析モデルの作成

3.1 上部建物のモデル化

地震応答解析は、図3に示す、多質点系等価せん断型モデルを用いて行う。まず、3次元立体フレームモデルを用いた静的増分解析²⁾を行い、得られた各層のQ- δ 関係からTri-Linear型の骨格曲線を作成する。各階質量や、コンクリート強度などは設計図書等を参考に設定する。減衰は、3%の瞬間剛性比例型とし、履歴特性には武田モデルを適用する。なお、接触非線形形としては、基礎の浮上りも重要な要因として考えられるが、本論では桁行方向を対象として滑りの影響のみを考慮する。また、張間方向に基礎浮上りに伴う桁行方向の水平地盤ばねの低減効果については、今後の課題としたい。

3.2 地盤ばねのモデル化

地盤-建物連成系の動的相互作用を考慮するために、基礎部に水平方向と回転方向の地盤ばねを設置したスウェー・ロッキング(SR)モデルを用いる。水平ばね、回転ばねには、半無限一様地盤上の円形剛基礎の静的ばね剛性と波動インピーダンスから算定した減衰係数を用いる³⁾。ここで、式(1)、(2)中の G 、 V_s 、 ρ 、 ν は地盤のせん断弾性係数、せん断波速度、密度、ポアソン比であり、 b 、 c は基礎幅(b は振動直交方向、 c は振動方向)である。本論では、図3に示す値を用いる。

$$k_H = \frac{8Gr_H}{2-\nu} \quad c_H = \rho V_s \pi r_h^2 \quad r_h = \sqrt{\frac{bc}{\pi}} \quad (1)$$

$$k_R = \frac{8Gr_R^3}{3(1-\nu)} \quad c_R = \rho \frac{3.4V_s^3}{\pi(1-\nu)} \frac{\pi r_r^4}{4} \quad r_r = \sqrt[4]{\frac{bc^3}{3\pi}} \quad (2)$$

さらに、基礎滑りを考慮するために、水平方向の地盤ばねに非線形性を考慮する(以降、滑り考慮モデル)。復元力特性としては、図3に示す、完全弾塑性モデルを用いる。滑り始めるせん断応力は次式で表される降伏せん断耐力 τ_y とする。

$$\tau_y = c + \sigma_n \cdot \tan \phi^4) \quad (3)$$

ここに、 τ_y はMohr-Coulombの法則に従うものとする。 c 、 σ_n 、 ϕ はそれぞれ粘着力、平均垂直応力及び内部摩擦角であり、本論では地盤を砂地盤と仮定して、 $c=0$ 、 $\phi=30$ (N値=10に相当)⁵⁾として数値解析を行う。

3.3 解析概要

本解析では、1章で示した諸要因が建物応答値に与える影響について検討する。解析モデルは基礎固定モデル、SRモデル、基礎滑り考慮モデルの3つを使用する。また、図3に示すように、地盤のせん断波速度 V_s は100m/s、200m/s、400m/sの3つをパラメータとし、動的相互作用効果の違いを考察する。さらに、対象建物の終局耐力を1.2倍したモデルも作成し、併せて検討する。

入力地震動としては、レベル2の告示スペクトルをターゲットとして、1968年十勝沖地震の八戸港湾における観測記録(EW成分)の位相特性、1995年兵庫県南部地震のJMA神戸における観測記録(EW成分)の位相特性、ランダム位相特性+日本建築センターによる経時特性をそれぞれ与えて作成された入力波を用いる。上記の3つの加速度波形とトリパタイトスペクトルを図4に示す。また、それぞれの地震波の最大速度を120cm/sに基準化して用いる。入力方向は桁行方向とする。

4. 解析結果

表2に桁行方向の基礎固定時(fix)と地盤-建物連成系(SR)の固有振動数を、用いた地盤のせん断波速度毎に示す。また、図5から図7に弾塑性地震応答解析結果を示す。図5には、地盤のせん断波速度 $V_s=200$ m/sの場合の各入力地震動に対する最大応答加速度、最大応答層間変形角を基礎固定、SRモデル、滑り考慮モデルを比較して示す。これよりまず、いずれの入力地震動においても、全てのモデルで層間変形角が0.01を超えていることが分かる。また、ランダム位相の地震波を入力した場合の応

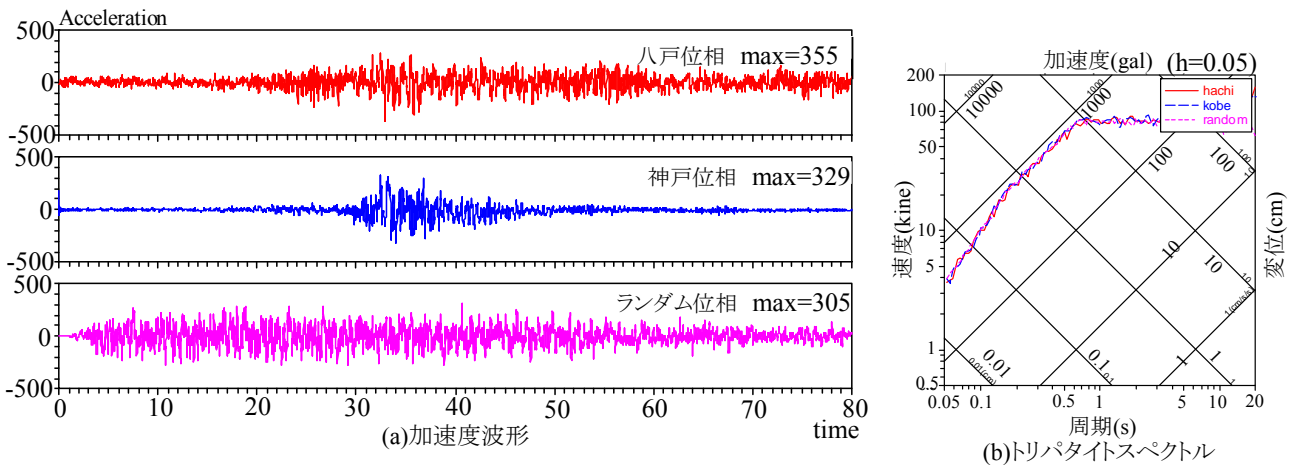


図4 入力地震動の加速度波形とトリパタイトスペクトル

答が、最も大きい。これは、最大速度を 120cm/s に基準化したために、ランダム位相の加速度レベルが大きくなっていることが考えられる。また、図 5 の(a)より、最大応答加速度は基礎固定モデルに比べて、動的相互作用効果を考慮したモデルの方が小さくなっていることが分かる。(SR モデルと滑り考慮モデルの応答値は、ほぼ重なっている)

図 6 では、基礎固定モデルに対する SR モデルと基礎滑りを考慮したモデルの建物 1 階の塑性率の比を地盤のせん断波速度 V_s 毎に示している。この図からも、地盤が柔らかくなるほど、建物応答値が低減していることが分かる。これは、動的相互作用効果を考慮することによって、基礎の水平成分が卓越し、地下逸散減衰が大きくなり応答値が低減したと考えられる。また、SR モデルと基礎滑り考慮モデルを比較すると、地盤が硬くなるほど応答値に差が見られ、ランダム位相の応答値を除いては、基礎滑りを考慮したモデルの方が、応答値はやや小さくなっていることが分かる。図 7 には V_s 毎に基礎の滑り限界変位 ($\tau_y W/k_H$) に対する最大変位の比をとったものを示しているが、この図からも地盤が硬くなることによって、基礎滑りが進行することが分かる。これは、地盤ばねの降伏せん断耐力を一定と考えているため、地盤が硬くなり、ばね剛性が大きくなるほど降伏に至る変位が小さくなるためと考えられる。さらに、この傾向は建物のせん断耐力を 1.2 倍したモデルの方が顕著である。これは、図 8 に示す、神戸位相とランダム位相による、基礎と 1 階のせん断応力の時刻歴応答波形より、建物耐力が小さい場合、基礎が滑る前、もしくは同時に建物の塑性化が進展したためと考えられる。また、同図より本検討では、位相特性の違いが基礎滑りによる建物応答値の低減効果に明確な差異が無いことが分かる。ここで、基礎が滑る条件は基礎のせん断耐力が降伏せん断耐力 τ_y に達することであるが、 τ_y の値は式(3)より内部摩擦角 ϕ に依存する。 $\tan\phi$ は摩擦係数に相当し、1 階のベースシア係数よりも小さい場合には、建物振動数にも依存するが、建物の塑性化が進展する前に滑る可能性があると考えられる。本建物の降伏ベースシア係数は 0.5 で、内部摩擦角 ϕ を 30° ($\tan\phi=0.57$) としたため、基礎は滑らなかった。また、建物耐力を 1.2 倍してベースシア係数を 0.6 とした場合についても、滑りによる明瞭な応答低減は認められなかった。つまり、本検討対象である低層建物に対して、基礎が滑ることにより建物応答値が低減するためには、建物のせん断耐力が十分大きくなければならないと考えられる⁶⁾。

5. まとめ

本論では、名古屋市内に立地する低層 RC 造事務所建物を対象として、地盤－基礎－建物の非線形動的相互作用効果を考慮した、非線形地震応答解析を行い、建物の耐力、動的相互作用効果、地盤条件、入力地震動の特性が建物応答値に与える影響を検討した。その結果を以下にまとめる。

- 1) 基礎固定モデルに比べて、動的相互作用効果を考慮したモデルの方が建物応答値は低減される。
このとき、地盤が柔らかいほど、またそれに比して建物が硬いほど低減効果は大きい。
- 2) 基礎滑りによる建物応答値の低減効果は、基礎が滑ることにより、建物の応答に占めるスウェイ成分の割合が増大することによってもたらされる。この効果は地盤が硬いほど顕著である。しかし、建物耐力が大きくなければ、上部構造が降伏する前に基礎が滑ることは無く、結果的に建物の効果的な応答低減にはつながらない。
- 3) 入力地震動の位相特性の違いが建物応答値に与える影響としては、明確な差異は見られなかった。

以上のことから、地震時の建物応答の説明を行うには、動的相互作用効果の考慮が不可欠であることが分かる。ただし、基礎滑りを考慮する場合、内部摩擦角から推定される地盤のせん断耐力に比べて、上部構造の耐力が小さい建物に対しては、滑りによる建物応答の低減効果は少ないと考えられる。

滑りの復元力特性については、今回、内部摩擦角を用いたモデル化を実施したが、直交方向の浮上りの影響や地盤の局所的な材料非線形性など、考慮すべき点が残されているので、今後の検討課題としたい。また、張間方向のロッキングや浮上りの影響についても今後検討していきたい。

謝辞

本論の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システム 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

- 1) 林康裕：基礎の浮上り・滑りを考慮した構造物の地震応答、pp.39-46.1995.構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム
- 2) 杉本浩一 他：低層 RC 造事務所建物の地震被害予測に関する研究、その 1、建築学会大会、Vol.B-2、pp.707-708、2008.
- 3) 柴田明徳：最新 耐震構造解析 第 2 版、pp.240-243.
- 4) 林康裕：浮上りとすべりを考慮した非線形 FEM 地震応答解析、建築学会大会、Vol.B-1、pp.763-764、1985.
- 5) 畑中宗憲・内田明彦・田屋裕司：砂質地盤の内部摩擦角 ϕ_d と正規化された標準貫入試験の N 値 (N_{11}) の関係、土と基礎 47(8)、5-8、1999.
- 6) 護雅史：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、建築学会東海支部報告集、2008.

表2 桁行方向の基礎固定時と連成系の固有振動数の比較

fix		SR					
-		Vs100		Vs200		Vs400	
振動数	周期	振動数	周期	振動数	周期	振動数	周期
(Hz)	(s)	(Hz)	(s)	(Hz)	(s)	(Hz)	(s)
5.3	0.19	2.5	0.41	3.9	0.25	4.9	0.21

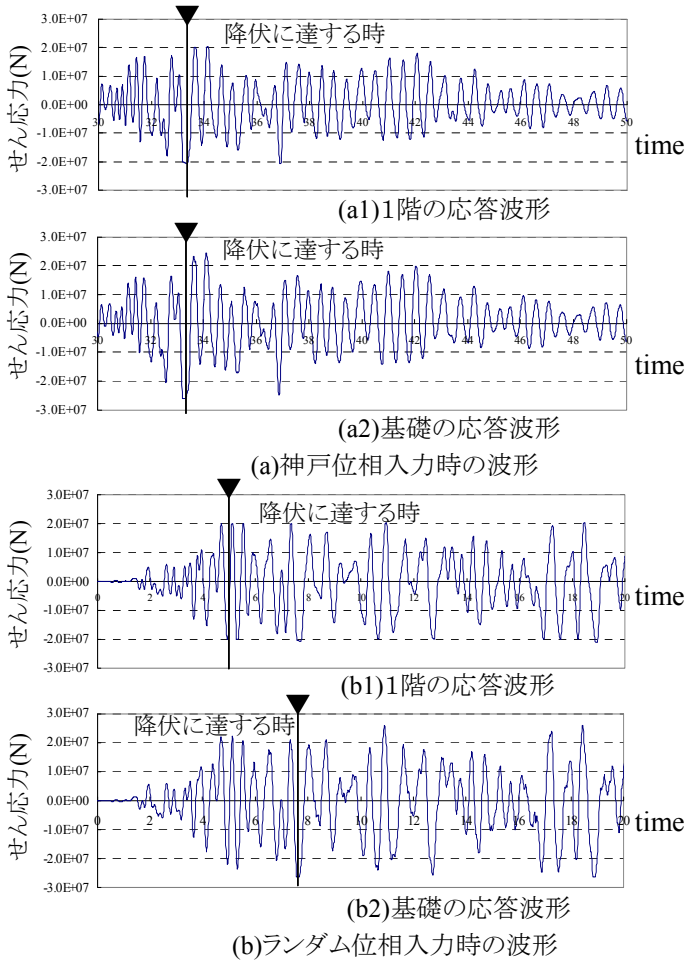
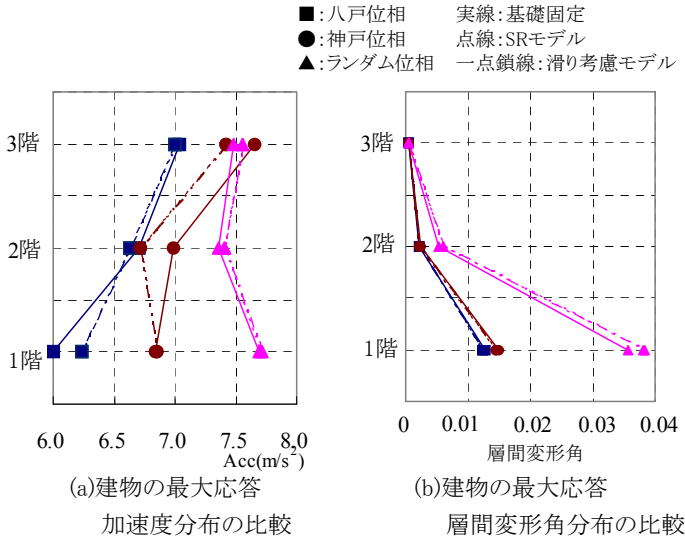


図8 基礎と1階の時刻歴せん断応力波形

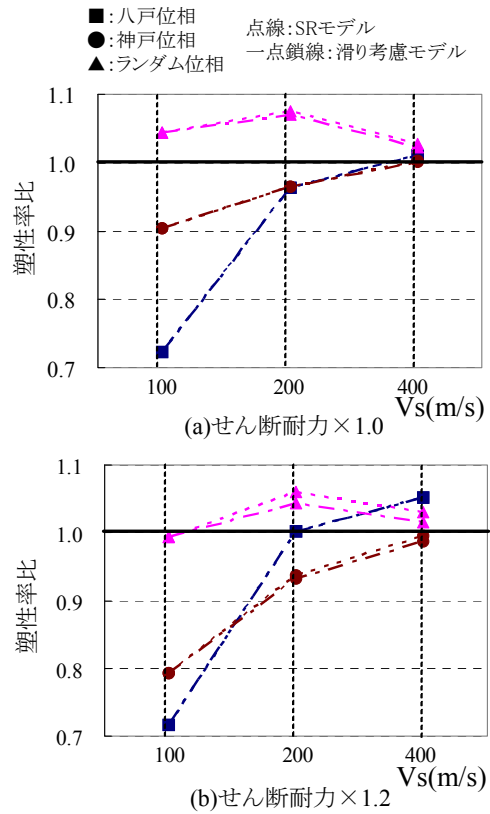


図6 SRモデル,基礎滑り考慮モデルの基礎固定モデルに対する塑性率の比

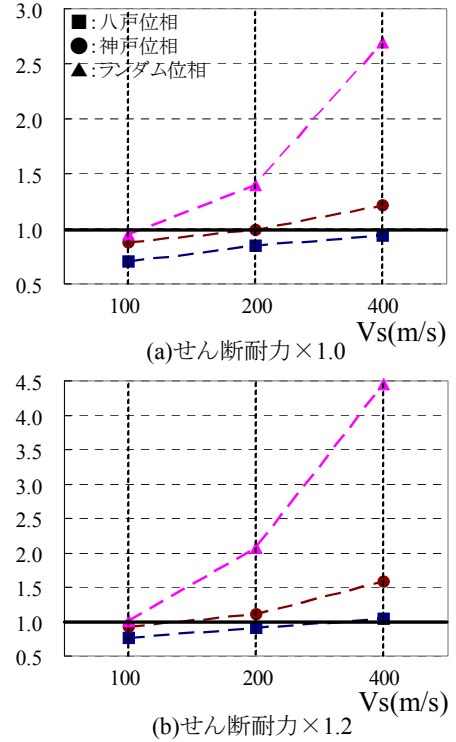


図7 基礎滑り考慮モデルの基礎の滑り限界変位に対する最大変位の比