

2011年東北地方太平洋沖地震と南海トラフで発生する地震に対する動的相互作用を考慮した建物応答評価

Building response evaluation considering the dynamic soil-structure interaction

under the hypothetical Nankai Trough earthquake and The 2011 of the pacific coast of Tohoku Earthquake

2. 構造 -2 振動

地震応答解析

被害予測

相互作用

SR モデル

杭基礎

鉄骨造

正会員

正会員

正会員

○丹羽智是*

護雅史**

福和伸夫***

Niwa Tomoyuki

Mori Masafumi

Fukuwa Nobuo

1. 研究の背景と目的

2011年東北地方太平洋沖地震では日本の広範囲にわたって震度6以上の強い揺れが観測された。津波被害は甚大だったものの、揺れの大きさに比べ地震動による建物の倒壊など大きな被害は多く報告されていない。その理由として従来から建物の評価していない余力、建物と地盤の動的相互作用等があげられている。

また、東海地方では南海トラフによる巨大地震の発生が迫っており、2012年3月31日に発表された内閣府より発表された揺れの結果¹⁾では広範囲で震度6強、一部で震度7が推定されている。

本論では東海地方での大地震における建物被害を想定するため、M9クラスの地震動として観測された東北地方太平洋沖地震における観測記録、及び南海トラフで発生することを想定した模擬地震動を用いて東海地方の一般的な建物を対象とした地震応答解析を行う。また、地盤と建物の動的相互作用を考慮するため、基礎固定モデルによる解析だけでなく、スウェイ・ロッキングモデル（以下SRモデル）での解析を行い、応答結果の違いを検討する。

また、軟弱地盤上に多く立地する建物については、杭基礎構造とした上で、杭基礎をSRばねにモデル化して、基礎固定モデルとの比較を行う。

2. 建物のモデル化と解析条件

建物モデルは多くの人々が利用する事務所ビルを対象とし、3階建て建物と14階建て建物の解析を行う。（図1参照。以降、3階モデル、14階モデルと呼ぶ。）。モデル化は図2に示すような多質点系等価せん断型モデルとし、非線形性を考慮して復元力特性にノーマルトリリニアを用いる。骨格曲線は静的増分解析に基づき設定した。減衰定数は初期剛性に対して2%の瞬間剛性比例型とする。建物モデルの解析諸元を表1に、固有周期を表2に示す。SRモデルでは地盤条件から地盤を半無限一様地盤として、地表面直接基礎の水平と回転の地盤ばねを算出する。

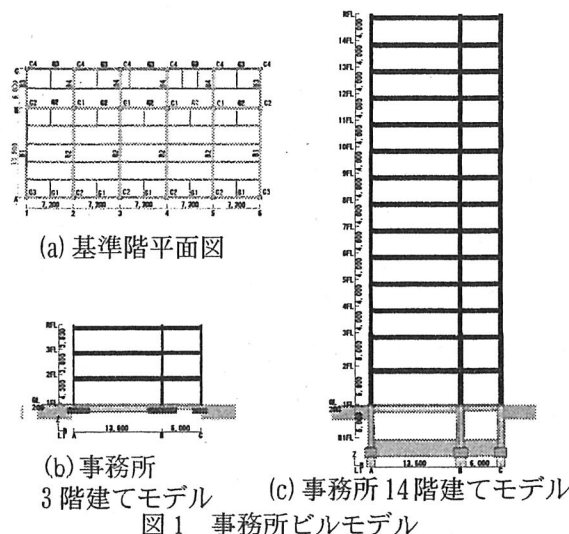
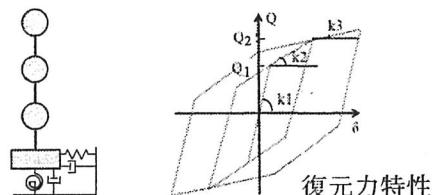


図1 事務所ビルモデル



復元力特性

図2 多質点系せん断型モデル（SRモデル）

表1 事務所3階建てモデル（長辺）の解析諸元

階数	重量 (kN)	階高 (cm)	長辺方向(X方向)				
			剛性(kN/m)			強度(kN)	
			K_1	K_2	K_3	Q_1	Q_2
3	5443	380	1.93×10^5	1.49×10^5	7.23×10^4	3379	5511
2	4982	380	1.76×10^5	1.13×10^5	4.18×10^4	3515	5556
1	5383	430	1.76×10^5	5.74×10^4	6.73×10^3	5215	7083

表2 事務所3階モデルでの1次固有周期（長辺）

事務所3階モデル	MYG006	MYG007	MYG010	MYG011	MYG015
基礎固定モデル(s)			0.777		
SRモデル (G/G0=1.0) (s)	0.797	0.803	0.781	0.784	0.785
SRモデル (G/G0=0.5) (s)	-0.816	0.829	0.784	0.789	0.792

*名古屋大学大学院・大学院生

**名古屋大学減災連携研究センター・准教授・博士（工学）

***名古屋大学減災連携研究センター・教授・博士（工学）

Graduate Student, Nagoya Univ.

Assoc. Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr. Eng.

Prof., Disaster Mitigation Research Center, Nagoya Univ., Dr. Eng.

地震動による地盤の塑性化を考慮するため、せん断弾性係数を初期値の2分の1とする。これに伴いせん断波速度（以下 V_s ）を初期値の $\sqrt{2}$ 分の1として地盤ばねを算出する。地盤ばねを算出する式は

$$K_h = \frac{8\rho V_s^2 r_h}{2-\nu}, K_r = \frac{8\rho V_s^2 r_r^3}{3(1-\nu)} \quad K_h: \text{水平地盤ばね} \quad K_r: \text{回転地盤ばね}$$

である。ここで ρ 、 r_h 、 r_r 、 ν はそれぞれ、地盤の密度、面積等価半径、断面2次モーメント等価半径、ポアソン比である。 ρ 、 ν 、 V_s は、各層の V_s が 400m/s に達しないまでの深さまでの数値をそれぞれ平均化して使用する。また、根入れ（1.5m）を考慮した解析も行う。

杭基礎を用いた建物では、臨海部の軟弱地盤地域である碧南市に立地した場合を想定する。使用した初期の地盤定数を表3に示す。杭の杭径は3階モデルでは ϕ -600のPHC杭を用い20.5mの深さで支持している。14階モデルでは ϕ -1400~2000の場所打ちコンクリート杭を用い42mの深さで支持している。杭基礎はSRばねによってモデル化するが、その地盤ばねは薄層要素法と有限要素法のハイブリッド法²⁾により算定した。その際解析に用いたせん断波速度は、深さ50mの工学的基盤とした表層地盤の逐次非線形地震応答解析を実施して得られた各層の最大せん断ひずみから、HDモデルを仮定して算定した。この際、各層のせん断ひずみは、古山田ら³⁾の方法に依った。減衰定数も同様に設定した。地盤の地震応答解析後の地盤定数を表4に示す。次に、表4の値を用いて杭基礎のインピーダンスを求め、地盤ばね剛性については、0.1Hzにおける実部の値を用い、減衰係数については、建物の連成系での1次固有振動数における虚部の値から算定した。求めた地盤ばね剛性と減衰係数を表5に示す。

3. 解析に用いる入力地震動

解析には、K-NETの中で東北地方太平洋沖地震の際に震度6以上の計測震度を観測した地点の地震動を用いる。それらの観測点を図3に示す。

軟弱地盤上に立地する杭基礎建物への入力地震動としては、碧南市の某地点において推定された南海トラフの地震による模擬地震動を採用する。この模擬地震動は、経験的グリーン関数法により作成した。

震源モデルに2003年の中央防災会議における震源モデルから、東海・東南海の震源域を用いて再設定したモデル⁴⁾を用いた。入力地震動の加速度波形の一例、及び減衰定数5%のトリパタイトスペクトルを図4、及び図5に示す。

4. 東北地方太平洋沖地震での解析結果

図6に3階モデルの累積塑性倍率を示す。これから、相互作用効果を考慮する

表3 表層地盤の初期地盤定数

地層種別	深さ(m)	S波速度(m/s)	P波速度(m/s)	密度(t/m ³)	減衰定数(%)	N値
砂	2.0	170	700	1.80	3.00	11
砂	4.0	210	700	1.80	3.00	9
砂	9.0	210	1520	1.80	3.00	5
粘土	16.0	170	1480	1.60	3.00	3
砂	18.5	220	1480	1.60	3.00	48
砂	21.0	280	1700	1.80	3.00	21
砂	24.0	330	1700	1.75	3.00	50
砂礫	26.0	360	1880	2.00	3.00	28
粘土	33.0	310	1530	1.70	3.00	12
粘土	37.0	240	1530	1.70	3.00	12
粘土	40.0	330	1530	1.70	3.00	43
砂	43.0	360	1740	1.90	3.00	50
砂礫	44.0	570	2280	2.00	3.00	50
粘土	50.0	460	1720	1.85	3.00	50
基盤		500	1720	2.00	3.00	50

支持層深さ(20.5m)
3階建モデル
支持層深さ(42m)
14階建モデル

表4 逐次非線形地震応答解析後の地盤定数

地層種別	深さ(m)	S波速度(m/s)	P波速度(m/s)	密度(t/m ³)	減衰定数(%)
砂	2.0	141	584	1.80	6.64
砂	4.0	157	526	1.80	9.11
砂	8.5	118	842	1.80	14.22
粘土	16.0	88	747	1.60	12.23
砂	18.5	98	667	1.60	16.64
砂	21.0	196	1190	1.80	9.49
砂	24.0	247	1257	1.75	8.26
砂礫	26.0	227	1186	2.00	6.70
粘土	33.0	214	1064	1.70	8.76
粘土	37.0	126	789	1.70	12.12
粘土	40.0	218	1021	1.70	10.51
砂	43.0	256	1248	1.90	9.22
砂礫	44.0	122	491	2.00	3.00
粘土	50.0	378	1518	1.85	3.00
基盤		500	1720	2.00	3.00

表5 各モデルにおけるインピーダンス（碧南）

使用した地盤ばね	事務所3階モデル	事務所14階モデル
水平地盤ばね（実部）(kN/m)	3.66×10^6	5.49×10^6
水平地盤ばね（虚部）(kN・s/m)	2.05×10^6	2.98×10^6
回転地盤ばね（実部）(kN・m/rad)	2.24×10^9	5.51×10^9
回転地盤ばね（虚部）(kNscm/rad)	3.00×10^8	5.73×10^8

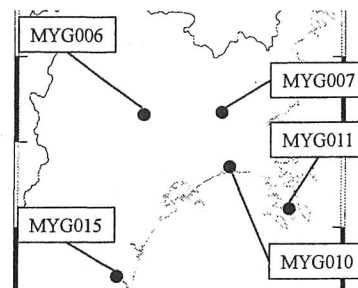


図3 解析に用いた観測点

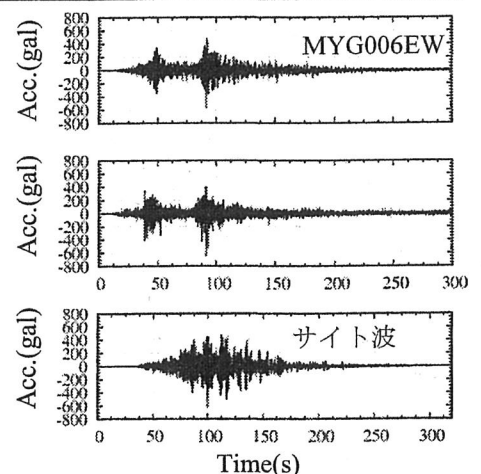


図4 解析に用いた加速度

ことでア,イ:MYG006、ウ,エ:MYG007のEW・NS両成分では、基礎固定モデルよりも累積塑性変形倍率の値が小さくなる事が分かる。また、地盤の塑性化によってもア,イ:MYG006、ウ,エ:MYG007のEW・NS両成分では累積塑性変形倍率の値がより小さくなっている。しかし、それ以外の観測点では相互作用効果は明瞭には表れていない。また、図7に最大層間変形角を示すが、両モデルで応答に大きな違いは認められなかった。また、図8に解析結果の一部としてア:MYG006EW成分において、累積塑性変形倍率が大きかった3階モデルの2階の履歴ループを示す。ア:MYG006EW成分の場合、(b)SRモデルとすることで履歴ループが小さくなっている、さらに僅かではあるが、(c)根入れ(1.5m)を考慮することで応答がさらに低減していることが分かる。累積塑性変形倍率は、繰り返し入力が長く続くほど大きくなることが考えられる。このことから地震動入力の際に慣性の相互作用の効果である逸散減衰効果のためSRモデルでは値が低減したと推定できる。

次に、弾性地震応答解析による二種地盤相当のベースシア係数と累積塑性変形倍率の関係を示した図8を見ると、図中の○で示すように、相互作用効果を考慮することでベースシア係数が小さくなっている。しかし、累積塑性変形倍率の値は大幅な低減は見られない。また、ベースシア係数が1を超えるような大きな応答を示す地点も存在し、設計を超えるような入力作用する可能性も示唆している。さらに、ベースシア係数が1以下でも累積塑性変形倍率が40以上と、大きくなっている地点もある。これは長時間繰り返し入力を受けたためであると考えられる。図10は、MYG006EW成分の加速度波形と時刻歴の累積塑性変形倍率の時間変化を示した図である。SRモデルでは基礎固定モデルに比べ大きく塑性が進むと

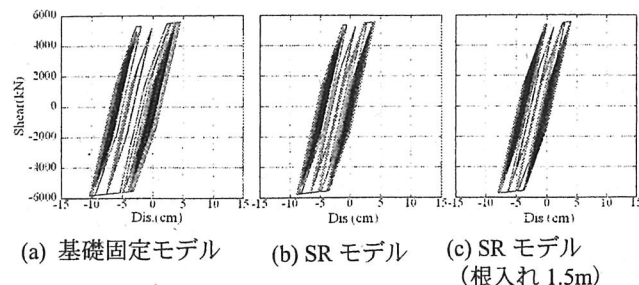


図8 事務所3階モデルにおける相互作用の有無を考慮した2階履歴ループの比較 (MYG006EW成分)

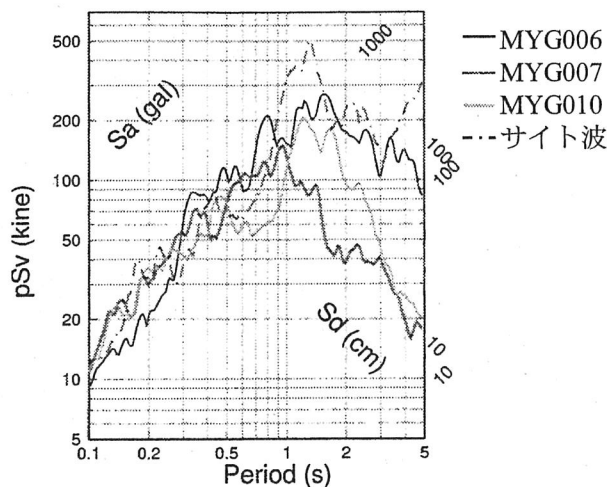


図5 入力地震動の減衰定数5%トリパタイトスペクトル

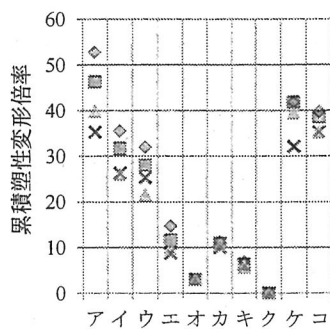


図6 事務所3階モデル(長辺)の累積塑性変形倍率の比較

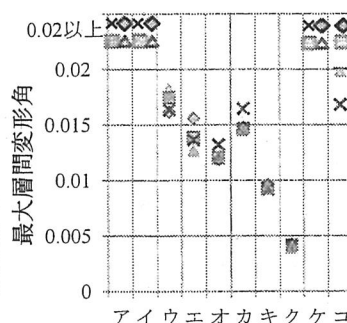


図7 事務所3階モデル(長辺)の最大層間変形角の比較

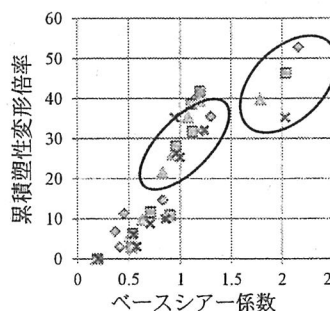


図9 ベースシア係数と累積塑性変形倍率の関係 (事務所3階モデル(長辺))

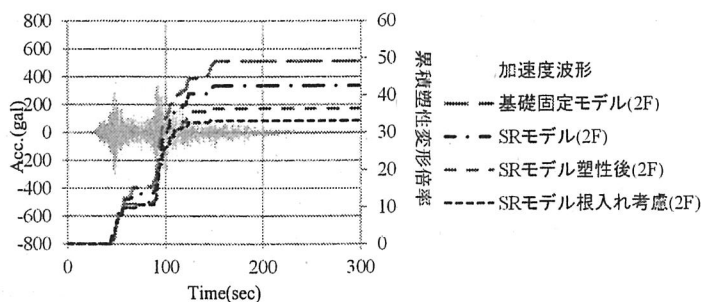


図10 事務所3階モデルにおける累積塑性変形倍率の時刻変化 (MYG006EW成分)

ここで変形の進展が小さくなっていることが分かる。このことから、今回の解析の範囲内では、相互作用効果は累積塑性変形倍率に大きく表れることが分かった。

5. 軟弱地盤上に立地する杭基礎建物の解析結果

表6、7と図11、12に軟弱地盤上に立地する杭基礎建物の解析結果を示す。表6よりSRモデルにすることによる周期の伸びは小さいことがわかる。3階モデルでは基礎固定モデルでもSRモデルでも最大層間変形角は0.02(rad)を超えており層塑性率も大きく、大きな被害となることが予想される。14階モデルではSRモデルとすることで累積塑性変形倍率はやや低減しているが、被害の程度を変えるほど大きな変化ではない。地盤への逸散減衰による効果で応答値が変化したと考えられる。一方、ベースシア係数はSRモデルとすることで少し大きくなっているが、これは碧南のサイト波が長周期側に大きな成分を持っているためと考えられる。

図11は、骨格曲線の第2折れ点におけるせん断強度(図2中の Q_2)と最大応答層せん断力との比較結果である。基礎固定モデルに着目すると、3階モデルでは1層の応答値が Q_2 を超えている。一方、14階モデルでは、3階モデルと異なり、1層では Q_2 以内に収まっているが、2～8層目では Q_2 を上回る応答値を示している。また、SRモデルとした場合の応答は、3階モデル、14階モデルともに基礎固定モデルと同程度となっており、明瞭な相互作用効果は認められない。軟弱地盤上の杭基礎をSRモデルによりモデル化したが、基礎固定における建物の固有周期が比較的最長いため、地盤への逸散減衰や固有周期の伸びといった慣性の相互作用効果は小さかったと考えられる。

6. まとめ

本論では東海地方での大地震における建物被害を想定するため、東北地方太平洋沖地震における観測記録、及び南海トラフで発生することを想定した模擬地震動を用いて、一般的な建物を対象とし、地盤と建物の動的相互作用を考慮した非線形地震応答解析を実施した。以下に結果の要約を示す。

東北地方太平洋沖地震の解析を用いた検討では、数地点でSRモデルを用いて相互作用効果を考慮することで累積塑性変形倍率が低減される効果が認められた。さらに、累積塑性変形倍率の時刻変化から、建物が大きく変形している時間において、動的相互作用を考慮することでその変化量が小さくなることがわかった。ただし、累積塑性変形倍率の値自体はそれほど小さくなく、大きな損傷を生じる可能性がある。また長時間繰り返し入力を受けるため、ベースシア係数が小さな地点でも、累積

塑性変形倍率が大きくなった可能性が考えられる。

臨海部の軟弱地盤上に立地する杭基礎建物では、東海・東南海地震に対する模擬地震動を用いて応答解析を実施した。その結果、3階建て、14階建てのいずれの建物においても、損傷の可能性がある応答結果となった。SRモデルによる解析では、解析対象建物の基礎固定時の固有周期が比較的最長だったため、地盤と建物の相互作用効果はあまり認められなかった。

今後は、東海地方で想定されている南海トラフの巨大地震による想定地震動を入力とした場合の、軟弱地盤上の杭基礎建物や防災拠点として重要な小学校等を含めた各種建物の建物応答について検討していく予定である。

参考文献

- 1) 内閣府中央防災会議：南海トラフの巨大地震による震度分布・津波高について、南海トラフの巨大地震モデル検討会（第15回）資料、2012.3
- 2) 文学章：地盤と構造物の動的相互作用における基礎形式・基礎形状・隣接建物の影響に関する解析的研究、博士論文、2006
- 3) 古山田耕司：多地点での原位置採取資料から評価した表層地盤の非線形特性、第38回地盤工学回研究発表会、2003
- 4) 内閣府中央防災会議：東南海、南海地震等に関する専門調査会
- 5) 彦坂智基、曾我裕ほか：高機能社会における既存建物の耐震性能評価（その2）地震応答解析結果、日本建築学会大会論文、2010

表6 各モデルにおける1次固有周期（碧南）

碧南	事務所3階モデル	事務所14階モデル
基礎固定モデル(s)	0.777	1.789
SRモデル(s)	0.787	1.815

表7 各モデルの応答（碧南）

		層間変形角 (rad)	層塑性率	累積塑性変 形倍率	ベースシア 係数(二種地盤)
事務所3階モデル	基礎固定モデル	<0.02	<6	<30	1.02
	SRモデル	<0.02	<6	<30	1.09
事務所14階モデル	基礎固定モデル	<0.02	5.29	29.1	1.23
	SRモデル	<0.02	5.53	28.5	1.32

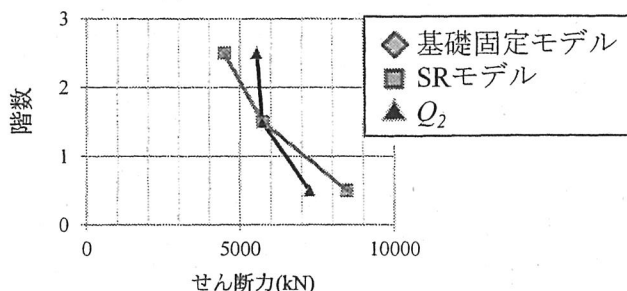


図11 事務所3階モデルにおける層せん断力と Q_2 の関係

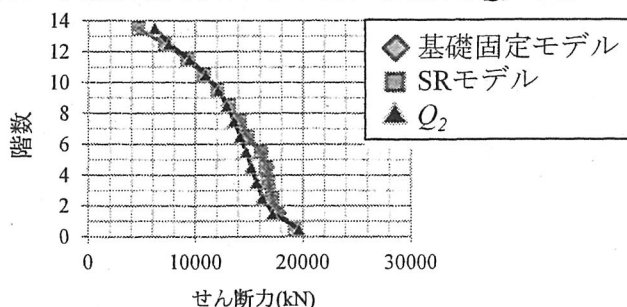


図12 事務所14階モデルにおける層せん断力と Q_2 の関係