

動的相互作用と地盤非線形性を考慮した南海トラフの巨大地震に対する建物応答評価

Building response evaluation considering the dynamic soil-structure interaction and
the soil nonlinearity under the hypothetical Nankai Trough earthquake

地震応答解析 動的相互作用 RC 造小学校
被害予測 SR モデル 液状化

正会員 ○丹羽智是*
正会員 護雅史**
正会員 福和伸夫***

NIWA Tomoyuki
MORI Masafumi
FUKUWA Nobuo

1. はじめに

東海地方では南海トラフによる巨大地震の発生が懸念されている。内閣府は2012年3月31日に広範囲で震度6強、一部で震度7が推定される揺れの結果¹⁾を発表した。本論では東海地方での大地震における建物被害を予測するため、南海トラフの地震に対する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。基礎固定モデルの他に地盤と建物の動的相互作用を考慮するためスウェイ・ロッキングモデルによる(以下SRモデル)解析も行う。また、地盤が軟弱で液状化危険度の高い解析地点において有効応力解析により推定した地震動を用いることにした。

2. 解析対象建物と地盤条件、及びそのモデル化

対象建物は、鉄骨造(以降、S造)の事務所建物(3階、14階)(図1(a)~(c)参照)と鉄筋コンクリート造(以降、RC造)の小学校建物(3階)とする(図1(d)参照)。

S造建物は東海地方において標準的とされるスパンや架構形式、部材断面を設定した²⁾。さらに、多質点系等価せん断型モデルに置換した。上部建物の層せん断力—層間変形関係には非線形性を考慮し、ノーマルトリニアモデルを適用した。骨格曲線については、静的増分解析により設定した。

一方、RC造小学校建物については、文献³⁾に従い、名古屋市内に立地する小学校建物の標準的なスパンや架構形式を採用した。解析モデルはS造建物と同様に多質点系せん断型モデルとした。本検討では、Is値が相対的に低い桁行方向に対する地震応答解析を実施することとし、骨格曲線は文献³⁾に従いモデル化した。ただし、降伏後の耐力低下は考慮していない。降伏耐力は、Is値から各層で設定するが、本検討では、最小Is値を、 $Is \leq 0.3$ 、 $0.3 < Is \leq 0.6$ 、 $Is \geq 0.6$ の3タイプに分け、それぞれに分類さ

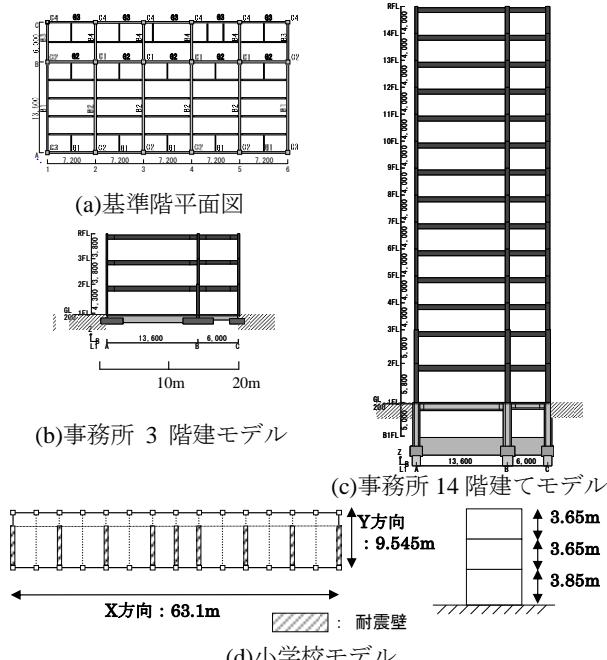


図1 解析対象とした各種建物モデル

れる複数の建物の階数ごとの平均値を用いた。

基礎固定モデルの他、事務所3階建てモデルとRC造小学校モデルについては、地盤と建物の動的相互作用を考慮したスウェイ・ロッキングモデル(以下SRモデル)による検討も行う。また、事務所14階モデルについてはSRモデルの他、軟弱地盤上では支持杭基礎を想定することで、ロッキングの影響が小さいと考え、スウェイモデル(以下Sモデル)による検討を行った。ここで、各種地盤ばねは以下の式により算定した。

$$K_h = \frac{8\rho V_s^2 r_h}{2-\nu}, K_r = \frac{8\rho V_s^2 r_r^3}{3(1-\nu)} \quad (1)$$

* 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・工博

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

ここに K_h は水平地盤ばね剛性、 K_r は回転地盤ばね剛性、 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、各地点において支持層までの平均値を用いた。また、せん断波速度については、地盤の塑性化を考慮した場合として、せん断弾性係数を 1/2 とした検討も行う。なお、本検討では入力損失効果は考慮しない。

各種建物モデルの解析諸元を表 1 に、基礎固定時と各地点での SR モデルでの 1 次固有周期を表 2 に示す。減衰定数は、どの建物のモデルについても初期剛性に対し 2% の瞬間剛性比例型とした。

入力地震動は名古屋市内の地質年代や地形等の既存資料からグループ分けを行った 9 地点⁴⁾とする。内閣府で 2012 年に公表された工学的基盤の模擬地震波に対して逐次非線形解析を行い、地表の模擬地震波を推定した。逐次非線形解析には修正 RO モデルを用い、地盤の基準歪 $\gamma_{0.5}$ 、最大減衰定数 h_{max} は、愛知県設計用に入力地震動研究協議会（2006）⁵⁾によるパラメータを用いることとした。一部の地点では液状化を考慮するため、東畠らによる 1 次元有効応力地震応答解析プログラムである YUSAYUSA⁶⁾を用いて地表の地震動を計算した。

3. 解析結果

図 7, 8 に S 造建物の解析結果を示す。事務所 3 階モデルの基礎固定モデルでは、多くの地点で累積塑性

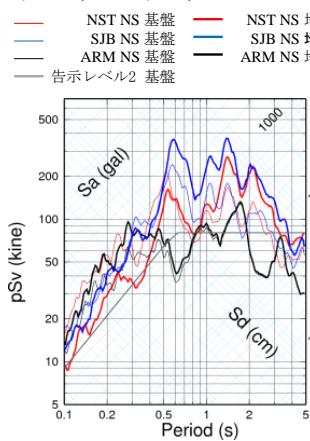
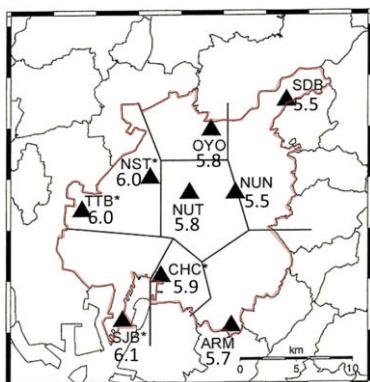
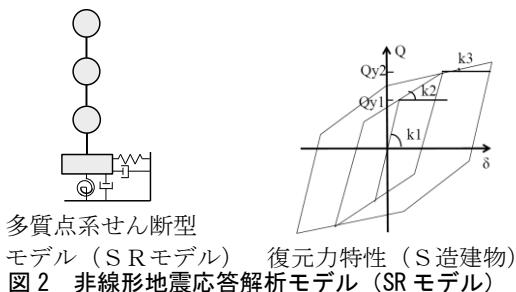


表 1 各種建物モデル (長辺) の解析諸元

(a) 事務所 3 階建てモデル (長辺) の解析諸元

階数	重量 (kN)	階高 (m)	長辺方向 (X方向)			強度(kN) Q1 Q2
			剛性(kN/m)			
3	5443	3.8	1.93×10^5	1.49×10^5	7.23×10^5	3379 5511
2	4982	3.8	1.76×10^5	1.13×10^5	4.18×10^5	3515 5556
1	5383	4.3	1.76×10^5	5.74×10^5	6.73×10^5	5215 7083

(b) 事務所 14 階建てモデル (長辺) の解析諸元

階数	重量 (kN)	階高 (m)	長辺方向 (X方向)			強度(kN) Q1 Q2
			剛性(kN/m)			
14	6790	4.0	4.23×10^5	1.74×10^4	0.0	6163 6199
13	5211	4.0	4.31×10^5	9.55×10^4	3.69×10^3	7013 7379
12	5200	4.0	4.62×10^5	2.20×10^5	7.61×10^3	7865 9232
11	5210	4.0	4.93×10^5	1.64×10^5	7.60×10^3	9326 10755
10	5236	4.0	5.19×10^5	2.06×10^5	1.62×10^4	9997 11724
9	5236	4.0	5.31×10^5	2.66×10^5	1.93×10^4	10291 12449
8	5254	4.0	5.53×10^5	3.16×10^5	1.96×10^4	10386 13106
7	5273	4.0	5.65×10^5	3.04×10^5	2.08×10^4	11130 13682
6	5279	4.0	5.77×10^5	2.81×10^5	2.43×10^4	11780 14153
5	5280	4.0	5.87×10^5	2.98×10^5	2.75×10^4	11850 14566
4	5287	4.0	6.00×10^5	2.75×10^5	2.85×10^4	12301 15064
3	5295	4.0	6.06×10^5	2.71×10^5	3.51×10^4	12667 15496
2	5476	5.0	5.38×10^5	2.42×10^5	3.05×10^4	12959 16338
1	6203	5.8	8.04×10^5	1.56×10^5	1.43×10^4	14797 19188

(c) 小学校 3 階建てモデル (長辺) の解析諸元

階数	重量 (kN)	階高 (m)	平行方向 (X方向) II 期 I s 値 0.6~			強度(kN) Q1 Q2
			剛性(kN/m)			
1	5721	3.85	1.38×10^7	3.32×10^6	2.77×10^4	1777 13777
2	6504	3.85	1.46×10^7	3.51×10^6	2.92×10^4	1877 14551
3	6504	3.85	1.42×10^7	3.40×10^6	2.84×10^4	1820 14111

表 2 各種建物モデル (長辺) の 1 次固有周期(sec)

事務所3階モデル	ARM	CHC	NST	NUN	NUT	OYO	SDB	SJB	TTB
基礎固定モデル	(kN)	(m)	K1	K2	K3				
SRモデル	0.781	0.784	0.782	0.782	0.782	0.782	0.784	0.784	0.784
事務所14階モデル									
基礎固定モデル									0.777
Sモデル	1.793	1.798	1.795	1.796	1.796	1.796	1.798	1.798	1.798
Sモデル (地盤塑性後)	1.798	1.807	1.802	1.803	1.803	1.803	1.808	1.807	1.807
SRモデル	1.816	1.842	1.826	1.830	1.831	1.829	1.831	1.843	1.842
小学校モデル									
基礎固定モデル									0.094
SRモデル	0.123	0.149	0.134	0.138	0.139	0.138	0.139	0.151	0.149
SRモデル (地盤塑性後)	0.249	0.249	0.249	0.249	0.249	0.249	0.249	0.249	0.249

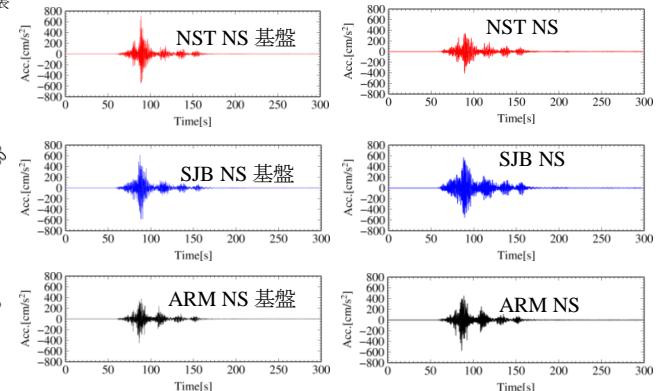


図 6 地表の加速度波形

変形倍率が 15 度で中破程度になる⁷。ただし、軟弱地盤であるウ:NST、ク:SJB、ケ:TTB では更に大きな値を示し、さらに大きな損傷を生じる可能性がある。東北地方太平洋沖地震で観測されたコ:K-NET 古川(MYG006)での EW 方向での記録を用いた解析結果と比較すると、今回用いた地震動に対する応答値は一部を除いて小さいことが分かる。また、SR モデルでは、基礎固定モデルで大きな応答を示した 3 地点での応答が小さくなっている。一方、上述の 3 地点に比べ比較的硬いア:ARM やイ:CHC、オ:NUT、カ:OYO で基礎固定モデルに比べて応答が大きくなつた。

事務所 14 階モデルの基礎固定モデルでは、累積塑性変形倍率が 10 以下となつたが、S モデルあるいは SR モデルの場合には、事務所 3 階モデルと同様に軟弱地盤であるウ:NST、ク:SJB、ケ:TTB で 15 以上となつた。

図 7 よりベースシア一係数は、1 以上となる地点が見られ二次設計で用いられる外力よりも大きな地震力が作用する可能性がある事が示唆される。また、SR モデルを用いることで累積塑性変形倍率が大きくなつたウ:NST、ク:SJB、ケ:TTB では 2 程度の値を示している。

図 9 に RC 造小学校建物の解析結果を示す。基礎固定モデルではア:ARM、イ:CHC、カ:OYO、ク:SJB で大きな層塑性率を示しており、大きな損傷が生じる可能性がある。これらの地点では応答スペクトルより、建物の固有周期付近に大きな入力があったためと考えられる。SR モデルでは、地盤建物連成系を想定した周期の増大が S 造に比べて大きいため、応答が大きくなる傾向がある。ベースシア一係数については、基礎固定モデルではどの地点でも 1 程度であり、入力のレベルには大きな差は見られない。SR モデルでは基礎固定モデルに比べて大きくなる傾向が見られる。

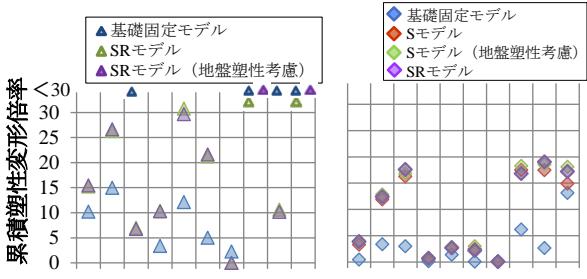
4. 液状化を考慮した解析

今回解析を行つた地点の中で SJB は地盤が軟弱で液状化危険度が高いため、液状化を考慮した有効応力解析による推定した波形を用いて別途検討を行つた。また解析対象は RC 造小学校モデルとする。

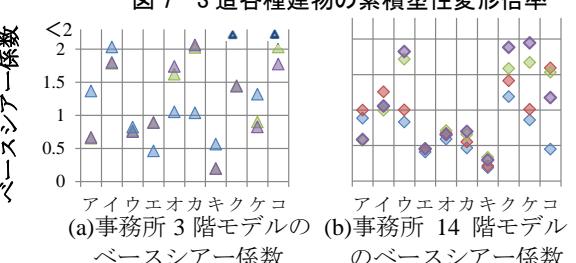
解析に用いた地盤条件を表 3 に示す。

図 9 に有効応力解析の結果を示す。SJB では深さ 10~20m でせん断波速度が他の地層に比べ小さくなつていると

ア:ARM イ:CHC ウ:NST エ:NUT カ:OYO キ:SDB ク:SJB
ケ:TTB コ:MYG006 (東北地方太平洋沖地震観測波)
ア~ケは NS 成分 コは EW 成分

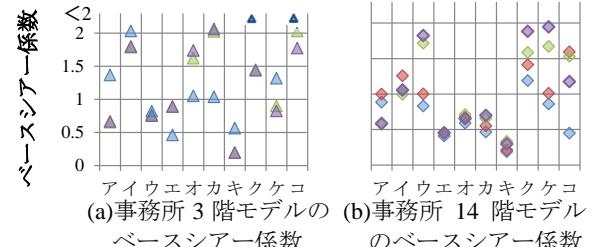


(a) 事務所 3 階モデルの累積塑性変形倍率



(b) 事務所 14 階モデルの累積塑性変形倍率

図 7 S 造各種建物の累積塑性変形倍率



(a) 事務所 3 階モデルのベースシア一係数



(b) 事務所 14 階モデルのベースシア一係数

図 8 S 造各種建物のベースシア一係数



(a) 層塑性率

(b) ベースシア一係数

図 9 RC 造小学校建物の応答結果

表 3 SJB 地点の地盤データ

液状化を考慮	土質	層厚 (m)	密度 $\rho(t/m^3)$	S波速度 $V_s(m/s)$	間隙率 n	有効上載圧 (kPa)	静止土圧係数 K_0	粘着力 $c(hPa)$	液状化抵抗比 τ/σ_v	透水係数 (m/s)
	砂質土	4	1.8	100	0.46	31.78	0.5			1.00E-05
○	砂質土	1	1.8	120	0.46	67.49	0.5		0.205	1.00E-05
	粘性土	3	1.8	120	0.57	81.62	0.5	43.29		1.00E-08
○	砂質土	2	1.8	140	0.44	97.71	0.5		0.169	1.00E-05
	粘性土	4	1.8	120	0.57	118.5	0.5	30.04		1.00E-08
○	砂質土	2	1.8	170	0.44	142.05	0.5		0.139	1.00E-05
○	砂質土	3	1.8	170	0.44	161.67	0.5		0.175	1.00E-05
	粘性土	19	1.6	170	0.57	229.46	0.5	113.69		1.00E-08
	砂質土	5	1.9	250	0.42	307.89	0.5			1.00E-05
	粘性土	7	1.7	240	0.52	353.55	0.5	126.32		1.00E-08
	砂質土	10	1.9	310	0.42	423.06	0.5			1.00E-05
	砂質土	7	1.9	390	0.42	499.43	0.5			1.00E-05
	砂質土	4	2.2	430	0.42	553.87	0.5			1.00E-03
	工学的基盤	10	2.1	700						

ころで最大応答加速度が小さくなっている。同様の層では、過剰間隙水圧が上昇し、歪みが増大していることから液状化がこの層で発生していると考えられる。これは図9(e)の過剰間隙水圧比の変化からも確認できる。

地表の加速度波形では全応力解析と比べ大幅に最大加速度が低減しており全応力解析で大きな応答を示した60~75秒で過剰間隙水圧が急激に増大している。トリバタイトスペクトルでは、全応力解析や工学的基盤のスペクトルに比べ短周期の値が小さくなっているが、長周期帯では有効応力解析による結果の方が大きくなっている。

表4~6に有効応力解析より得られるせん断波速度を用いた地盤ばね、解析ケース、各モデルでの固有周期を、図10にその解析結果を示す。SRばねは有効応力解析によって得た歪みから各地層のG/Go- γ 曲線より得られたせん断剛性を用いて(1)式より算出した。図10より入力地表波を有効応力解析のものとすることで全応力解析に比べ応答が低減していることが分かる。また地盤の塑性化を考慮しSRばねを変化させることでベースシアー係数は少し低減している。今回の解析ケースでは、地盤の塑性化による固有周期の変化は小さいため液状化による入力波の長周期化の影響が少なかったと考えられる。

5.まとめ

本論文は南海トラフの巨大地震に対する東海地方の一般的建物の応答性状について動的相互作用を考慮して検討をした。

(1)基礎固定モデルでの解析結果では設計範囲内であっても動的相互作用を考慮することにより2次設計で用いられるベースシアー係数を超える地点もあった。

特にRC造小学校のような建物は動的相互作用の効果により固有周期の伸びが大きく、長周期成分を多く含む地震波に対しては影響を受けやすいと考えられる。

(2)液状化を考慮した解析では、建物の固有周期が短かつたため応答が全応力解析と比べ低減した。ただし、液状化に伴う地盤の塑性化による地盤ばねの変化と、入力波の長周期化は建物によっては大きな応答を引き起こす可能性もある。また、地盤の歪みは1%近くまで増大することから杭の被害についても検討するため、Penzen型モデルによる検討も行う。

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資料、2012.3
- 2) 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
- 3) 白瀬陽一ほか：耐震診断結果に基づく低層鉄筋コンクリート造学校建物の地震被害率の予測に関する研究、日本建築学会構造系論文集607号pp.63-71、2006

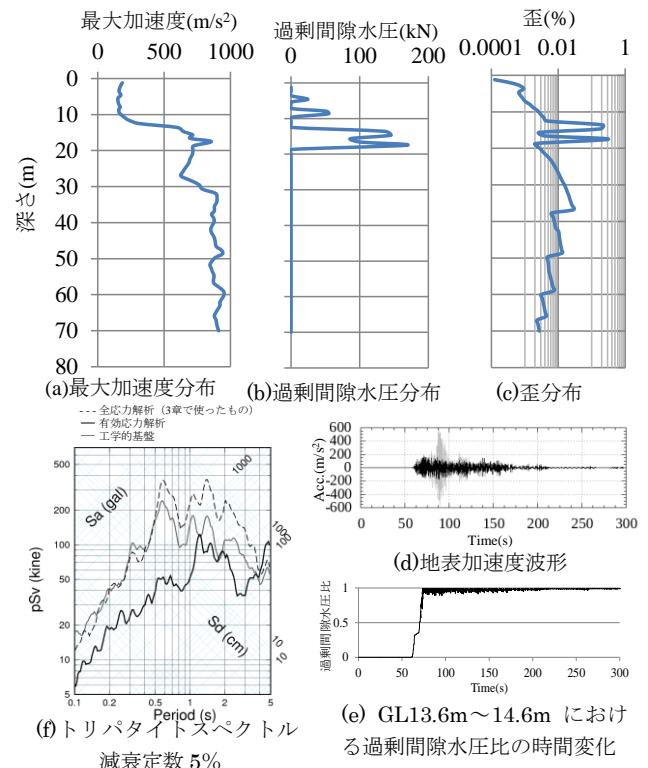


図9 有効応力解析の結果

表4 解析に用いた地盤ばね

スウェイばね	ロッキングばね	スウェイ減衰係数	ロッキング減衰係数
Kh (kN/cm)	Kr (kN・m/rad)	Ch (kN・s/m)	Cr (kNm/rad)
塑性後	6.12E+06	4.70E+09	2.36E+05
塑性前	6.80E+06	5.22E+09	2.48E+05
塑性後/塑性前	0.90	0.90	0.95

表5 解析ケース

解析ケース	液状化を考慮した波形	地盤の塑性化を考慮
1	×	×
2	○	×
3	○	○

表6 各モデルの固有周期

解析ケース	基礎固定	SRモデル	地盤の塑性化を考慮したときのSRモデル
	0.094	0.151	0.156

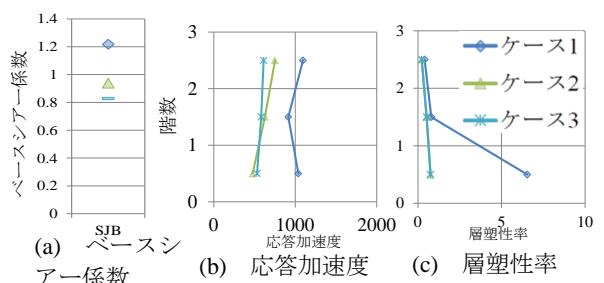


図10 有効応力解析を行った場合の建物応答解析結果

- 4) 飯田正憲ほか：強震記録、微動記録、地盤資料に基づいた名古屋市の地盤震動性状の総合的分析、日本建築学会大会論文、1999
- 5) 愛知県設計用入力地震動研究協議会：愛知県設計用入力地震動の作成 想定地震による強震動予測、2006
- 6) Ishihara,K.and Towhata,I. : Effective stress method in one-dimensional soil response analysis, Proceeding of the Seventh World Conference of Earthquake Engineering, Vol.3, pp.73-80, 1980
- 7) 北村春幸：目標性能と性能メニュー(案)、(社)日本建築構造技術者協会、目標性能WG、Structure No.75, 2001.9