

東北地方太平洋沖地震における動的相互作用を考慮した建物応答評価に関する研究

名古屋大学工学部社会環境工学科
建築学コース護研究室 丹羽智是

1. 研究の背景と目的

東北地方太平洋沖地震はマグニチュード9.0の日本観測史上最大の地震で、日本の広い範囲にわたって震度6弱以上の強い揺れが観測された。津波による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は報告されていない。南海トラフでも近い将来同様の大地震の発生が危惧されており、建物被害の予測は重要である。また兵庫県南部地震や新潟県中越沖地震において中低層RC造建物の被害がほかの建物に比べて小さかったことが報告されている。この理由として建物の評価していない余力や建物と地盤の相互作用が考えられている。

そこで本研究では、東海地方で大地震による建物被害を想定することを目的として、同地方で経済活動に大きな影響を与える建物に対して建物応答解析を行った。建物モデルは東海地方において標準的な事務所、工場、商業施設を対象として作成し、M9クラスの地震動である東北地方太平洋沖地震の観測波を用いて、弾性・弾塑性解析をした。また地盤と建物の動的相互作用の効果を考慮したスウェー・ロッキングモデル（以下SRモデル）についても併せて検討した。

2. 建物のモデル化と解析条件

本稿では上述した建物の標準的なモデル（図1）を作成して、K-NETで震度6弱以上を記録した主な地震動に対する（図2）非線形地震応答解析をする。上部構造のモデルは多質点系等価せん断型モデルとした。建物の復元力特性をノーマルトリニア（図3）で与え、骨格曲線は静的増分解析より得られた結果をもとに、表1

のようなパラメータを用いる。減衰定数は2%の瞬間剛性比例型とする。SRモデル（図4）では地盤を半無限一様地盤として、地盤条件から水平と回転の地盤ばねを算出する。地盤の塑性化した場合も考慮するため、せん断弾性係数を半分にした場合についても検討する。地盤ばねを算出する式は以下の通りである。

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

K_h : 水平地盤ばね
 K_r : 回転地盤ばね

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次モーメント半径、ポアソン比である。密度、ポアソン比、せん断波速度は、 V_s が400m/sに達するまでの深さを平均化して使用する。SRモデルの固有周期と基礎固定モデルの固有周期の比較を図5に示す。地盤ばねは V_s が小さいほど柔らかくなるので、SRモデルの固有周期は V_s の小さな地点で長周期化している。1.5mの根入れを考慮した場合については基礎入力動を用いて検討する。

地盤条件と入力波の一例として、SRモデルでも解析を行ったMYG006、MYG011のEW方向の波形を図6に、解析モデルと同じ減衰定数2%のトリパタイトスペクトルを図7に、地盤条件を図8に示す。トリパタイトスペクトルには3階モデルの一次固有周期を実線であわせて示す。図6と図7から加速度波形が同じ形でも、地震波の含む周波数の成分には大きな違いがあることが分かる。

3. 相互作用を考慮しない場合の解析結果

相互作用を考慮しない場合の解析結果を図9に示す。累積塑性変形倍率は3階モデル、平屋工場モデルにおいて多くの観測点で50を超える値を示しており損傷の危険性がある。また事務所8階モデル

表1 事務所3階モデル解析緒元

階数	重量(kN)	階高(cm)	長辺方向(X方向)			強度(kN)	
			剛性(kN/m)	K_1	K_2	K_3	Q_1
3	5443	380	1.93×10^6	1.49×10^5	7.23×10^2	3379	5511
2	4982	380	1.76×10^6	1.13×10^5	4.18×10^2	3515	5556
1	5383	430	1.76×10^6	5.74×10^4	6.73×10^2	5215	7083

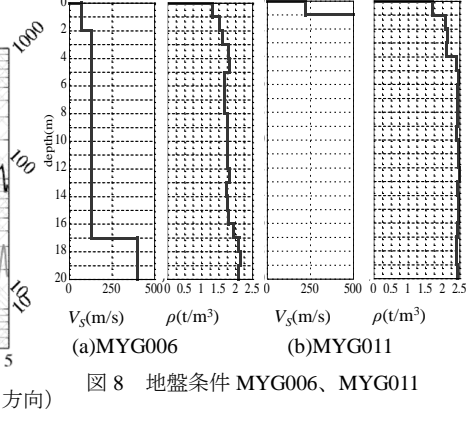
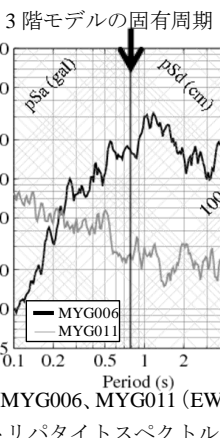
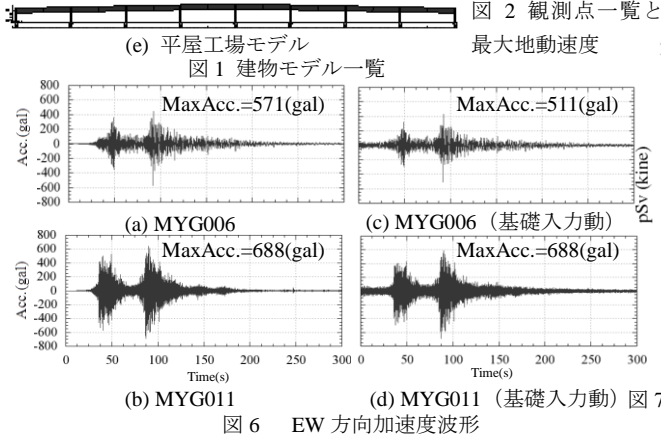
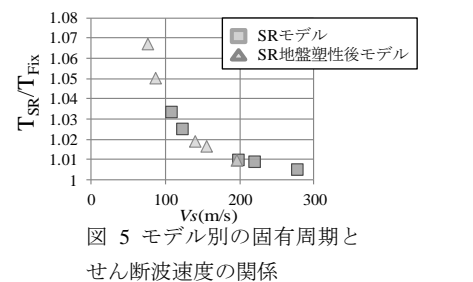
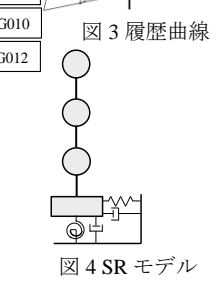
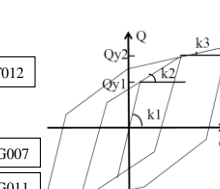
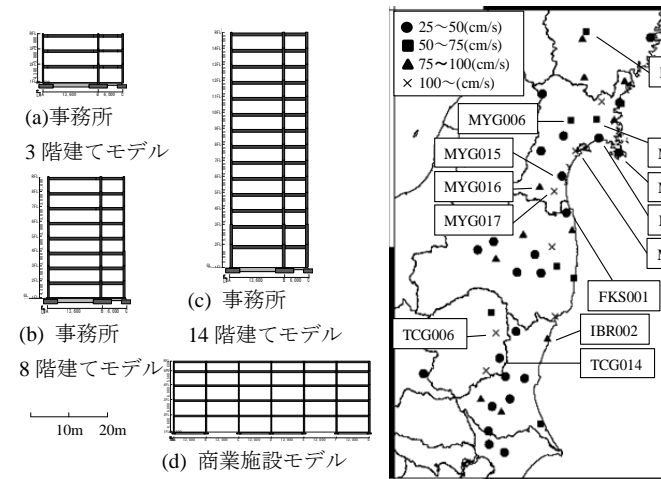


図8 地盤条件 MYG006、MYG011

図6 EW方向加速度波形

図7 MYG006、MYG011 (EW方向) トリパタイトスペクトル

ルや事務所 14 階モデル、商業施設モデルでも大きな値を示した MYG006 では、図 7 のトリパタイトスペクトルから長周期にも大きな成分を持っており、そのため大きな応答を示したと考えられる。

4. 相互作用を考慮した場合の解析結果

ここでは、相互作用の効果が大きいと思われる 3 階モデルを対象とする。解析地点は、地盤の硬軟差が大きな地点を選び、MYG006、MYG007、MYG010、MYG011、MYG015 とした。SR モデルの解析結果を図 10~14 に示す。図 10 より SR モデルとすることで MYG006、MYG007EW・NS 両方向で、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のがわかる。また、地盤の塑性の有無による影響を比較すると地盤の塑性化によって MYG006、MYG007EW・NS 両方向で累積塑性変形倍率の値がより小さくなる。図 11 に解析結果の一部として MYG006EW 方向において、累積塑性変形倍率が大きかった 2 階の履歴ループを示す。MYG006EW 方向の場合、SR モデルとすることで(b)履歴ループが小さくなっており、(c)根入れを考慮することでさらに小さくなっている。基礎の相対変位波形(図 12)を見ると地盤の塑性化によって基礎の相対変位が大きくなっている。これは地盤ばねが軟らかくなったためである。一方根入れを考慮したモデルでは応答が小さくなり入力損失の効果が現れている。しかし相互作用による効果は他の観測点では見づらい。SR モデルではいずれの場合も応答の値は小さくなっているが、顕著な変化ではなく、層間変形角でも SR モデルと基礎固定モデルの違いが見られる。しかしこちらも変化が小さく被害の度合いは同程度と考えられる。

弾性解析による二種地盤のベースシア係数と累積塑性変形倍率の相関を示した図 14 を見ると、相互作用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が大きな値であることに変わりはなく、被害が大きいままであることを示している。ベースシア係数が 1 を超える点も存在し、設計を超えた入力作用した可能性を示している。また、値が 1 以下でも累積塑性変形倍率が大きくなっている地点がある。これは繰り返し応答を受けたためだと考えられる。

今回の解析では相互作用による低減効果が見られたが、SR モデルにすることによる固有周期の伸びは、トリパタイトベクトルからも分かるように、入力波の持つ周波数成分のピークに近づくことがあり、設計を超えた入力になる可能性がある。

5. まとめ

基礎固定モデルの解析では 3 階モデル、工場モデルで累積塑性変形倍率が大きく損傷する危険性がある。しかし、実際の被害には非構造部材の被害が主に報告されているだけで、倒壊などの大きな被害については多く報告されていない。相互作用の効果は周期の伸びなどが見られたが、累積塑性変形倍率など応答が大きな値を示した地点では顕著な変化は見られず被害の度合いは変わらない。相互作用を考慮した場合の応答は地盤の条件に大きく影響するため、設計よりも大きな地震動が入力される可能性がある。相互作用を考慮することで、ベースシア係数が 1 を切る地点に変化があったが累積塑性倍率の値に大きな変化はなく大きな値を示したままであるため、損傷の危険性は依然としてある。東北地方太平洋沖地震のように繰り返し入力が続く地震動では建物の応答が大きくなる可能性があり、そのために累積塑性変形倍率が大きくなったのだと考えら

れる。南海トラフでの地震も長時間揺れが続くことが想定されているため、解析で応答が大きかった事務所 3 階モデルや平屋工場モデルだけではなく、他の建物モデルのようなものも大きな応答を示す可能性がある。

- (1)事務所 3 階モデル (2)事務所 8 階モデル
(3)事務所 14 階モデル (4)工場施設モデル (5)商業施設モデル

(1)	50<	50<	6.2	13.5	50<	19.4	50<	50<	50<	43.1	36.3	38.9
(2)	50<	7.3	49.8	2.3	18.5	5.5	13.2	13.0	0.7	24.1	17.7	11.0
(3)	27.8	0.8	10.2	1.4	22.3	6.0	17.8	0.0	7.0	8.3	2.8	2.6
(4)	50<	50<	20.9	10.0	50<	50<	50<	50<	50<	50<	50<	50<
(5)	50<	7.7	50<	3.0	29.1	12.0	32.7	5.2	0.0	20.8	6.4	17.6

図 9 各建物長辺モデルで最大値を持つ階の累積塑性変形倍率 (EW 方向)

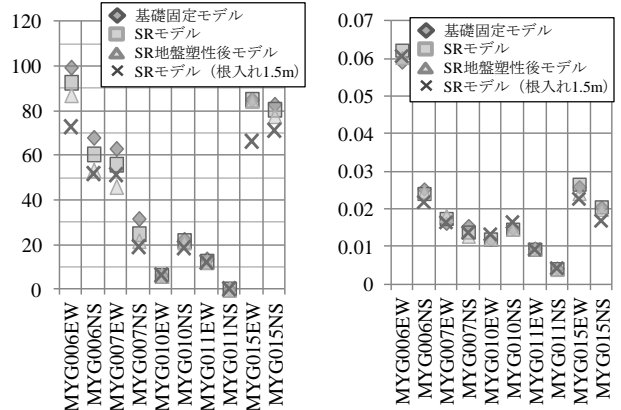


図 10 事務所 3 階モデル(長辺) 図 11 事務所 3 階モデル(長辺)

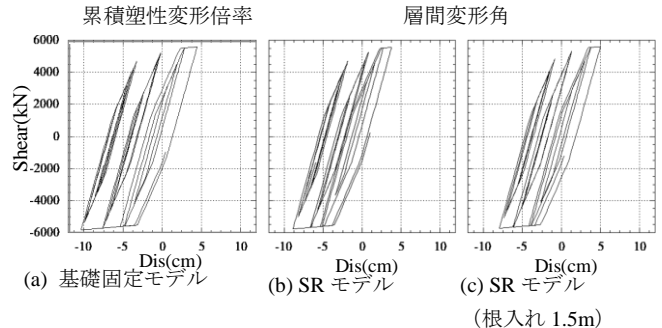


図 12 相互作用の有無を考慮した 2 階履歴ループ

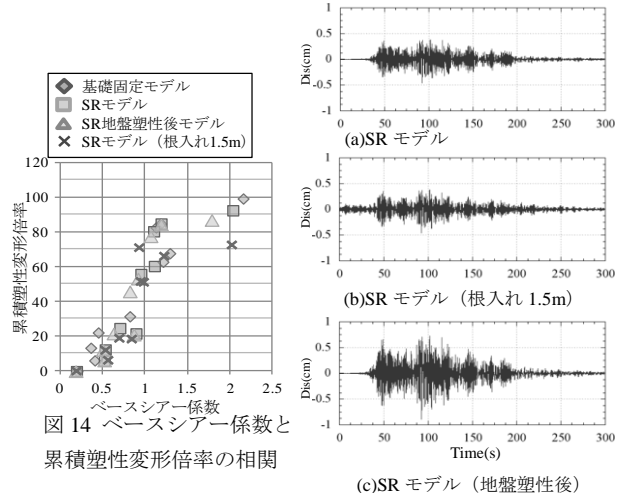


図 13 MYG006EW における地盤条件毎の基礎相対変位波形

図 14 ベースシア係数と累積塑性変形倍率の相関

