

大地震における動的相互作用を考慮した広域的な建物応答評価に関する研究

名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻
博士課程前期課程 2年 護研究室 丹羽 智是

1. はじめに

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。

この地震の発生はマグニチュード9クラスの地震が日本でも起こりうることを示し、東海地方では南海トラフの巨大地震の発生が現実のものとして危惧されている。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. 入力波形

本論ではM9クラスの地震動として東北地方太平洋沖地震での観測波と、南海トラフの巨大地震の模擬地震動を用いて建物モデルの時刻歴応答解析を行う。東北地方太平洋沖地震での観測点とEW成分の減衰定数5%トリ

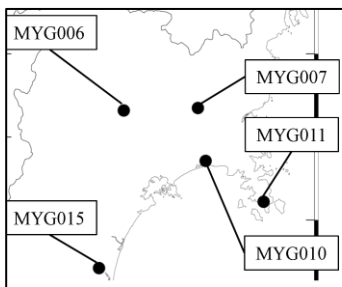


図1 東北地方太平洋沖地震で解析に用いた観測点の一例

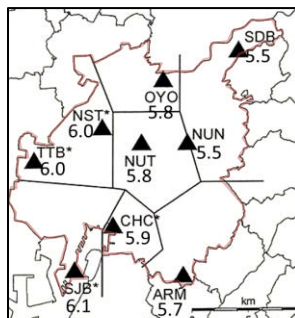


図3 評価対象名古屋市9地点と内閣府(2012)による工学的基盤の震度

パタイトスペクトルを図1,2に一例として示す。南海トラフの巨大地震の模擬地震動は名古屋市内の地質年代や地形などの既

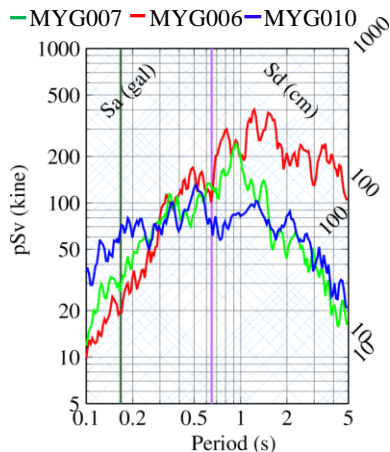


図2 トリパタイトスペクトル (EW成分 減衰定数5%)

存資料からグループ分けを行った9地点²⁾(図3)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動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)³⁾によるパラメータを用いることとした。解析に用いた入力波の減衰定数5%トリパタイトスペクトルの一部を図4に示す。

3. 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、8階、14階)、工場(1階)、商業施設(5階)、鉄筋コンクリート造(以降、RC造)の小学校建物(3階)とした。本検討で用いる建物モデルを図5に示す。

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⁴⁾。さらに、図6に示すような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一層間変形関係には非線形性を考慮し、ノーマルトリ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。表1に、一例として3階建て事務所建物の解析諸元を示す。減衰定数は、初期剛性に対して2%の瞬間剛性比例型とした。

RC造小学校建物については、文献⁵⁾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(図5)。解析モデルについては、S造建物と同様に多質点系せん断型モデルとした。復元力特性は I_s 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⁵⁾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、 I_s 値から各層で設定するが、本検討では、最小 I_s 値が $I_s \geq 0.6$ となる複数の建物の階数ごとの平均値を用いた。RC造小学校モデルの解析諸元を表2に示す。また、各建物の基礎固定時の一次固有周期を表3に示す。

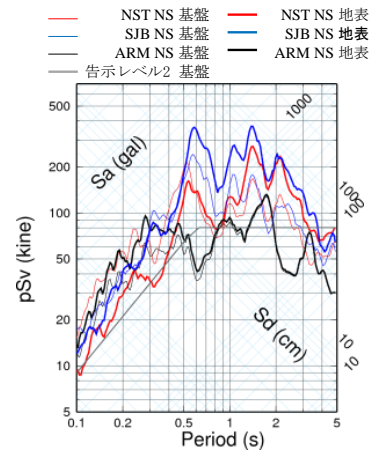


図4 トリパタイトスペクトル (南海トラフの巨大地震,減衰定数5%)

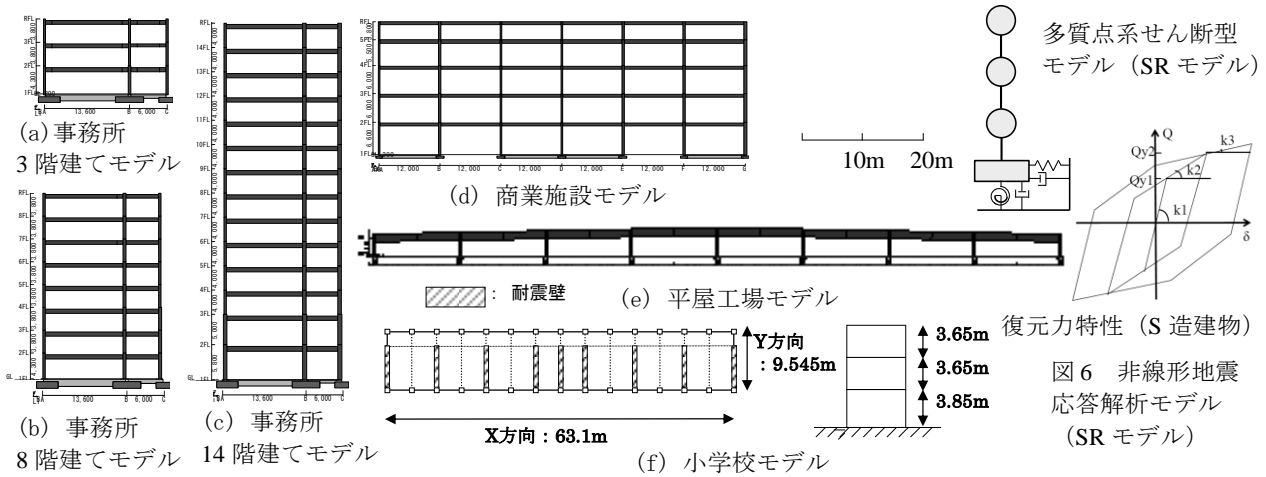


図5 解析対象とした各種建物モデル

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	1.93×10^6	1.49×10^6	7.23×10^2	3379	5511
2	4982	380	1.76×10^6	1.13×10^6	4.18×10^3	3515	5556
1	5383	430	1.76×10^6	5.74×10^4	6.73×10^3	5215	7083

表2 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)	桁行方向(X方向) II期Is値0.6~				
			剛性(kN/m)			強度(kN)	
			K1	K2	K3	Q1	Q2
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3 各種建物の一次固有周期 (基礎固定)

1次固有周期 (秒)	
事務所3階モデル	0.78
事務所8階モデル	1.18
事務所14階モデル	1.79
平屋工場モデル	0.65
商業施設モデル	1.47
小学校モデル	~

地盤と建物の動的相互作用効果として、根入れ (1.5m) を考慮した基礎入力動を入力に用いる場合や、SR モデルを用いた検討を行った。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。SR モデルの作成に用いる地盤ばねは以下の式により算定する。

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

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 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。密度、ポアソン比、 V_s は、各観測地点において値が 400[m/s] に達する深さまでのせん断波速度の平均値とした。また、地盤の塑性化を考慮するため地盤のせん断弾性係数を 1/2 とした解析を行った。

4. 解析結果

図 7~13 に東北地方太平洋沖地震での観測波を用いた建物地震応答解析結果を示す。

図 7 に各種建物の基礎固定とした場合の最大層間変形角分布を示す。この図から、事務所 3 階建物、平屋工場、RC 造小学校で広い範囲にわたり大きな応答となる事が分かり、非構造部材への損傷が予測される。実際の被害でも非構造部材への損傷が広い範囲で報告⁶⁾されている。

図 8~11 に事務所 3 階モデルにおける動的相互作用を考慮した SR モデルでの解析結果を示す。使用した波形は地盤特性が異なる MYG006、MYG007、MYG010、MYG011、MYG015 の 5 地点とした。

図 8 に基礎固定モデルと SR モデルの一次固有周期の比を示す。S 造では SR モデルとすることによる、周期の伸びは小さいことが分かる。図 9 に S 造 3 階事務所建

● 0~1/100 ● 1/100~1/50 ● 1/50~ [rad]

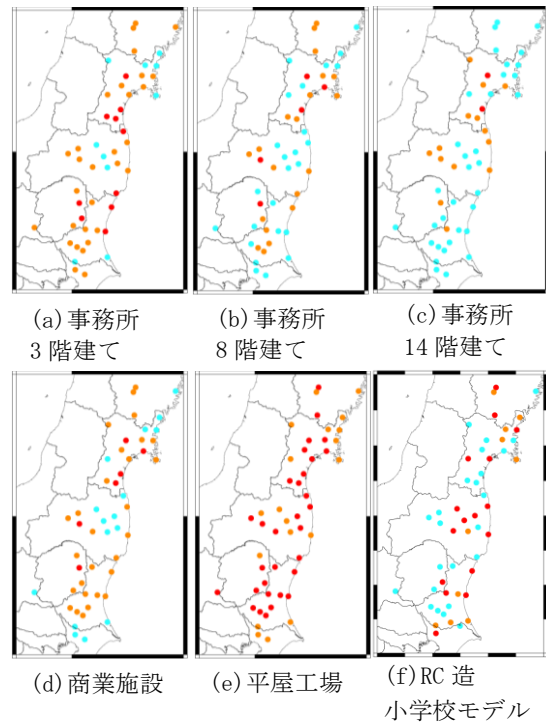


図7 各種建物の最大層間変形角分布

物の累積塑性倍率を示す。これから、SR モデルにより相互作用効果を考慮することで、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表れていない。

図 10 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 S 造 3 階事務所建物の 2 階履歴ループを示す。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更に低減している。今回の解析で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る。ここで、弾性解析による二種地盤相当のベースシアー係数と累積塑性変形倍率の関係を示した図 11 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累積塑性変形倍率が小さくなっている。しかし、ベースシアー係数の値は大きな値のままであることが分かる。ベースシアー係数が 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が入力した可能性を示唆している。さらに、ベースシアー係数が 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がある。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 8、図 12~13 に RC 造小学校モデルの解析結果を示す。図 8 からは RC 造で相互作用を考慮することで大きく固有周期が伸びていることが分かる。図 12 より SR モデルとすることで応答に大きな変化のあるケースがあり、キ、ク:MYG011EW・NS 両成分で最大層間変形角の値は小さくなっている。一方、イ:MYG006、ウ、エ:MYG007、オ、カ:MYG010、ケ、コ:MYG015EW・NS 両成分では大きな値になっている。これらの地点では図 2 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いることがわかり、このため大きな応答を示したと考えられる。

図 13 からも SR モデルとすることにより最大層間変形角が大きくなった地点でベースシアー係数が 1 以上になっていることが分かる。鉄筋コンクリート造建物では SR モデルとすることで応答の大きな変化が見られ最大層間変形角で顕著にその様子を見る事ができる。その中には、固有周期が伸びたことにより入力波のピークに近づいたため大きな応答になったと考えられるケースもあった。

図 14~16 に南海トラフの巨大地震の模擬地震動を用いた建物地震応答解析結果を示す。

表 4 に基礎固定モデルと動的相互作用を考慮したモデルの一次固有周期を示す。南海トラフの巨大地震の模擬地震動による解析を行う地点でも、S 造では固有周期の伸びが小さく、RC 造では大きい。

図 14~15 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変形倍率が 15 程度で中破相当の応答値⁷⁾となった。ただし、軟弱地盤であるウ:NST、ク:SJB、ケ:TTB ではさらに大きな値を示し、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き小さい事が分かる。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た。一方、上述の 3 地点に比べ比較的硬いア:ARM やイ:CHC、

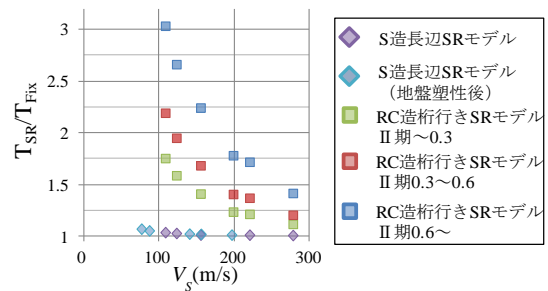


図 8 モデル別の固有周期とせん断波速度の関係

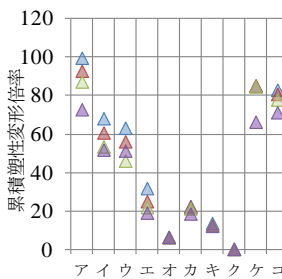
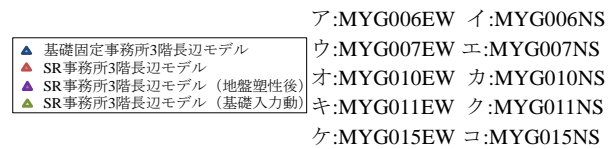


図 9 事務所 3 階モデル
累積塑性変形倍率の比較

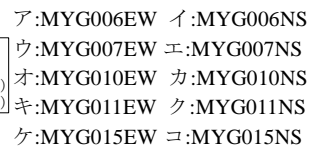


図 11 事務所 3 階モデル
最大層間変形角の比較

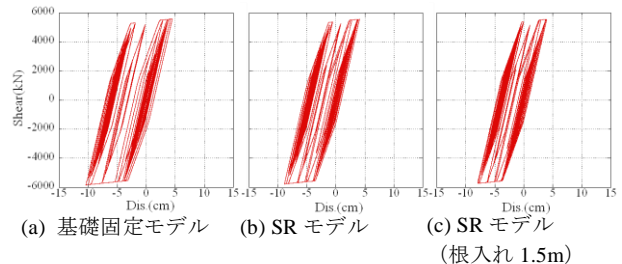


図 10 事務所モデルにおける相互作用の有無を考慮した 2 階履歴ループの比較 (MYG006EW 成分)

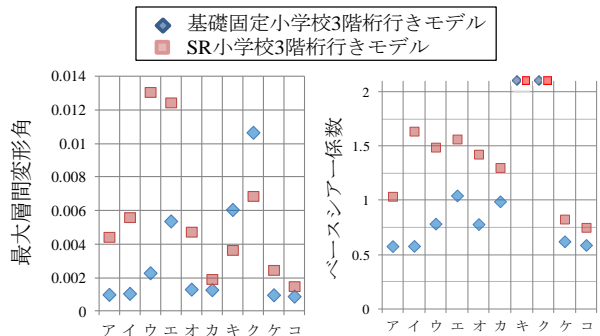


図 12 RC 造小学校モデル
最大層間変形角の比較

図 13 RC 造小学校モデル
ベースシアー係数の比較

オ:NUT、カ:OYO で基礎固定モデルに比べて応答が大きくなった。

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 以下となったが、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 以上となった。

図 15 よりベースシアー係数は、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ったウ:NST、ク:SJB、ケ:TTB では2程度の値を示している。

図 16 に RC 造小学校モデルの解析結果を示す。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。ベースシア係数については、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。低層 RC 造は SR モデルにすることによる、周期の増大が S 造に比べて大きいいため、応答が大きくなる傾向がある。

5. まとめ

本論文は大地震時における東海地方で一般的な建物の挙動を検討した。M9 クラスの地震動として東北地方太平洋沖地震の観測波と南海トラフの巨大地震での模擬地震動を用いて、動的相互作用を考慮し建物応答解析を行った。以下に得られた知見を示す。

(1) 東北地方太平洋沖地震では基礎固定モデルでは事務所3階、平屋工場、RC 造小学校モデルにおいて広い範囲で大きな応答を示し、非構造部材への損傷が予測される。実際の被害でも非構造部材への被害が報告されている。動的相互作用を考慮することで、事務所3階モデルでは、数地点で累積塑性変形倍率やベースシア係数が1より小さくなる場合があった。しかし、累積塑性変形倍率の値としては大きいため、大きな損傷を生じる可能性がある。ベースシア係数が小さな地点でも、東北地方太平洋沖地震では長時間繰り返し入力を受けるため、累積塑性変形倍率が大きくなったと考えられる。RC 造小学校モデルは相互作用効果を考慮することで応答が低減した地点も見られたが、地盤—建物連成系の固有周期の伸びの影響で、入力波の持つ周波数成分のピークに近づくことがあり、基礎固定時より応答が大きくなる地点もあった。

(2) 南海トラフの巨大地震の模擬地震動による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。

南海トラフの巨大地震では継続時間の長い揺れが予想されるため、S 造ではベースシア係数が1以下でも累

積塑性変形倍率が大きくなり損傷を受けることについても注意する必要がある。

表 4 各種建物モデル（長辺）の1次固有周期

	ARM	CHC	NST	NUN	NUT	OYO	SDB	SJB	TTB
事務所3階モデル									
基礎固定モデル	0.777								
SRモデル	0.781	0.784	0.782	0.782	0.782	0.782	0.782	0.784	0.784
SRモデル（地盤塑性後）	0.784	0.790	0.786	0.787	0.787	0.787	0.787	0.790	0.790
事務所14階モデル									
基礎固定モデル	1.790								
Sモデル	1.793	1.798	1.795	1.796	1.796	1.796	1.796	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	1.803	1.808	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

ア:ARM イ:CHC ウ:NST エ:NUN オ:NUT カ:OYO キ:SDB ク:SJB
ケ:TTB コ:MYG006 ア〜ケはNS成分 コはEW成分

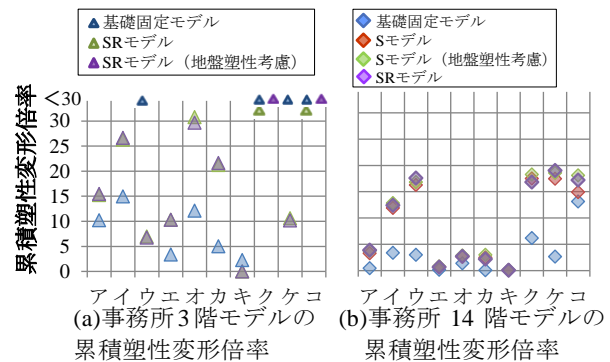


図 14 S 造各種建物の累積塑性変形倍率

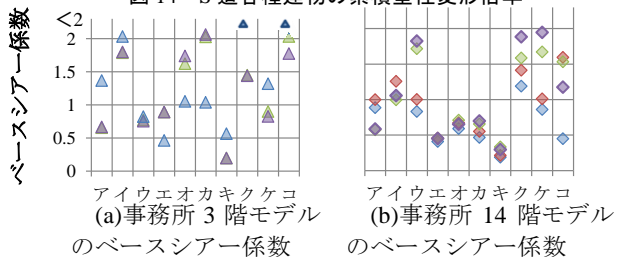


図 15 S 造各種建物のベースシア係数

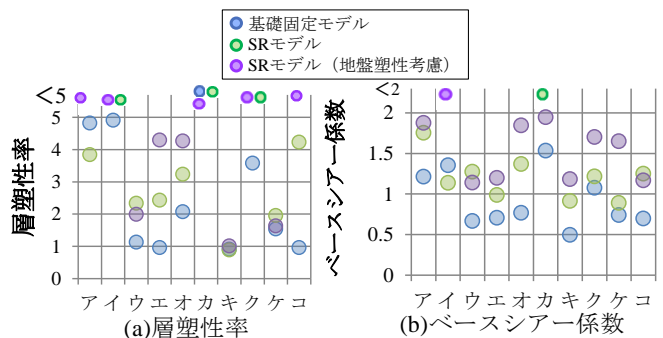


図 16 RC 造小学校建物の応答結果

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)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
- 3)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
- 4)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
- 5)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
- 6)日本建築学会 2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報 2011.7
- 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、StructureN0.75、2001.9