

微動計測に基づく中低層 RC 造 建物の振動特性とその耐震安全性評価

那仁満都拉

1. 序論

1995年兵庫県南部地震は神戸市城のRC造構造物に甚大な被害をもたらした。この地震における建物被害の主な原因として、旧基準によって設計されていた建物の耐力が不足していたこと、予測された以上の強震動が建物に作用したことなどが挙げられている¹⁾。一方、中低層RC造建物は事務所、学校建物、共用住宅などに適用され、都市に欠かせない建物として数多く建設されている。現存する建物の中にも、旧基準によって設計された耐震性の低い建物や老朽化した建物が数多く存在しており、その建物の振動特性を解析し、耐震性能を把握することは都市の地震安全性対策では極めて重要である。

本研究では先ず、九州大学の旧基準によって建設された中低層RC造建物(今後九大建と称略)の微動解析を行い、我々の既に把握しているモンゴルや台湾のRC造建物と比較しながら、その建物の振動特性を把握する。次に、この建物の設計図及び微動観測データから建物剛性を求めて、設計図書から推定された建物剛性が建物の実際(観測)の剛性をどの程度まで表現できているかについて検討する。さらに、長戸・川瀬(2001)の方法に基づいて地震応答解析も行い、建物の降伏耐力まで推定する。最後に、推定した降伏耐力から建物モデルを作成し、このモデルに、将来福岡に起こりえる仮想福岡地震の箱崎サイトでの強震動を入力して、九大RC造建物の耐震安全性を評価する。

2. 観測概要及び解析方法

2.1. 観測建物及び観測方法

観測建物は2階から6階にかけての22棟RC造建物である。観測方法は常時微動計を自由地表面、建物の中間階の各階、最上階もしくは屋上にそれぞれ1点を設置し、1階だけに三角形の3地点で計測を行った。観測では0.1倍から10,000倍のアンプつき、可変型の3成分加速度計(SMA-R6A3P)を用いて、ハイカットフィルター周波数を 30Hz あるいは 50Hz 、サンプリング周波数を 100Hz とし、15分を2セット計測することとした。時刻校正はGPS時刻信号から各セット開始前に行い、各地点の同時性を確保した。

2.2. 解析方法

解析方法としては、微動計測から得られたデータを50%オーバーラップさせて40.96秒の小区間に切り出した。そしてそのフーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比を求め、そのアンサンブル平均値を計算した。次にその最上階

と基礎のフーリエスペクトル比の1次ピークを建物の梁間方向(最/基・梁と表す)や桁行方向(最/基・桁と表す)の共振周期をそれぞれに読み取った。または、地盤と建物の相互作用の効果を評価するために、同じ方法で建物の各階又は屋上と地盤上の観測点のフーリエスペクトル比の1次ピークから、建物の梁間方向(最/地・梁と表す)の共振周期、桁行方向(最/地・桁と表す)の共振振動数を得た。さらにピークが明瞭でない場合にはフェイズが 0° 付近から 180° 近くまで激しく変化する振動数域の中で、 90° 付近の振動数やコヒーレンスの急激に低下する振動数であることも判定の根拠とした。

3. 微動計測によるRC造建物振動特性

3.1. RC造建物の共振周期

解析結果から表1に示すような建物の共振周期が得られた。図1に計測された建物の階数別共振周期を示す。図2に示す同じ階数、形状の建物では建築年代が新しくなるほど共振周期が短くなり、新しい建物ほど剛性が高くなっているといえる。

3.2. 建物の梁間と桁行方向の共振周期の比較

最上階/基礎、最上階/地盤のフーリエスペクトル比から得られた梁間方向の共振周期を縦軸に、桁行方向の共振周期を横軸にとったのが図3である。図の直線は1:1の直線である。常識では梁間方向の壁量が桁行方向の壁量より多く、従って梁間方向の剛性が桁行方向より大きいように思われるが、観測結果からわかるように梁間方向の共振周期は桁行方向の共振周期より殆どの場合等しいか長くなっており、相対的に建屋剛性は低いと推定される。一方、桁行方向ではスパンが短いので剛性が相対的に高く、共振周期が短くなっているものと思われる。

3.3. 建物-地盤の相互作用

地震応答評価では建物と地盤の相互作用を適切に評価することは非常に重要である。図4では建物と地盤の相互作用効果を示す。図から中低層建物の地盤との相互作用効果が梁間方向では小さく、桁行方向では大きいことが分かる。また階数が増加すると(周期が長くなると)地盤との相互作用効果が小さくなる傾向が見られる。図5は中低層RC造の建築面積と相互作用効果の関係を示した図であるが、もともと梁間方向ではあまり相互作用効果が明瞭でないので面積との関係ははっきりしないが、桁行方向では面積が小さくなると相

相互作用効果が増大していく傾向が見られる。なお、杭基礎と直接基礎など基礎形式が違うことが相互作用に与える効果はあまり見られなかった。

3.4. モンゴル、台湾の RC 造建物の共振周期との比較

図6はモンゴル、台湾の建物の共振周期とその共振周期の回帰直線を比較した図である。図から階数別共振周期が大きい方からモンゴル、台湾、日本の順番になっている。もし、階数や構造が同じ建物でその床面積1㎡当りの重量も同じで、降伏時の層間変形も同じとしたとき、建物の共振周期の自乗とその建物の耐力は反比例関係にあるといえる。ここで日本や台湾及びモンゴルの中低層 RC 造建物の微動計測で得られた共振周期からそれら建物の耐力をこの反比例関係を前提に推定したら建物耐力は日本、台湾、モンゴルの順と推定される。台湾の RC 造は台湾集集地震を受けて、共振周期が伸びたものであろうことを考慮すると台湾の RC 造と日本の RC 造の耐力にそれほど違いはないと考えられる。

4. RC 造建物の耐力推定

4.1 設計規準による耐力の推定

対象とする 22 棟建物の中で 15 棟建物の設計計算書や設計図面を見つけてきた。それにより建物の階高、重量、柱と梁のサイズ及び剛比、壁の厚さなどを読み取り、武藤の D 値法を用いて、それぞれの建物の階ごと、梁間及び桁行方向に柱剛性と壁剛性を求めた。ある建物は何回も増築されており、設計図表が不十分なので、そういう場合はこの建物剛性の精度は高くないと考えられる。

4.2 微動観測による耐力の推定

建物の実際の剛性を推定する目的で、設計図表から求めた壁剛性を 0.0001 倍ずつ増加しながら固有値解析を行う。これは柱剛性には誤差は少ないので間仕切壁などの効果を評価したものである。もし、解析共振周期が微動計測から得られた観測共振周期と同じように一致したら、そのときの剛性を建物の持っている実際の剛性とする。表2にこうして求めた建物の桁行、梁間方向の実剛性と設計剛性の比、壁倍率を示す。殆どの建物は桁行方向の実際壁剛性が設計用壁剛性より 3~5 倍大きく、2 階建ての建物と 4 階建ての 075 (一階が他の建物と繋がっている) では 7~10 倍もなっており、全体剛性は平均で 3.5 倍になっている。梁間方向の実際の壁剛性は設計用壁剛性より大体 1~3 倍 (075 は約 6 倍) で、全体剛性は平均で 2 倍になっていることが分かった。また、桁行方向の倍率のほうが梁間方向の倍率より大きく、低層建物ほど大きくなっている傾向が見られる。これは低層建物のほど耐力算定には考慮されていない非構造壁の寄与が大きいものと考えられる。桁行方向の剛性倍率が梁間方向より大きいことは、梁間方向の壁は開口などが少なく、殆どの壁剛性が計算されるが、桁行き方向の壁は扉と窓など開口が多くて、

無視される壁が多いためと思われる。また建物の桁行方向では腰壁と垂れ壁が柱の内法寸法を短くする効果があり、この効果が建物の剛性に大きな影響を与えとも考えられる。

4.3 地震応答解析により建物の降伏耐力の推定

(1) 建物モデルの構築手法及び入力地震動

得られた剛性をもとに建物耐力を評価する。モデルのせん断バネの非線形特性は Degrading tri-linear 型²⁾で、第 1 次降伏点に対応する建物剛性を建物耐力と考えることにする。第二剛性は第一剛性と剛比 (長戸・川瀬建物群モデル³⁾の第 1 次降伏時の剛比を参考にした) から求める。第 3 剛性は第 1 剛性の 1/1000 と仮定する。破壊クライテリオンに関して最大層間変形角が 1/30 (rad) 以上になったモデルが大破以上の被害を受けたものとする。区別するためこのモデルをマンドラ・川瀬モデルと呼ぶ。

入力地震動としては、松島・川瀬 (2000) による兵庫県南部地震の再現波⁴⁾を用いた。

(2) 建物の降伏耐力の推定

長戸・川瀬らは兵庫県南部地震の被害率により、神戸市の建物の耐力を推定して、建物群モデルを作成している。今回は長戸・川瀬モデルとマンドラ・川瀬モデルに同じ強震動を入力して、解析を行い、同じ被害率となる降伏耐力を比較推定した。このモデルの妥当性を検討するために、1.5 倍の強震動を入力した結果、降伏耐力の誤差が 0.001~0.171 の間で、誤差の範囲と考えられ、かなりの精度で降伏耐力を表現できていると思われる。表3では推定した建物降伏耐力と神戸市の標準的な RC 造建物の降伏耐力をベースシア係数として比較を示す。

5. RC 造建物の被害予測

福岡市直下を走る警固断層に我々が今まで経験した最大級の都市直下型地震である兵庫県南部地震が発生するとした仮想地震を想定した。比較のために兵庫県南部地震の松島・川瀬再現強震動のうち最強の地震動も入力した。中道・川瀬ら⁵⁾により推定されている仮想福岡地震の九大位置の強震動をマンドラ・川瀬モデルに入力した場合、その結果大破を受ける建物はなかった。一方、兵庫県南部地震の場合は、15 棟建物のうち 10 棟が大破を受けるという結果となった。この原因は兵庫県南部地震の再現最大速度 124cm/sec に対して、中道・川瀬らによる仮定福岡地震の九州大学位置での最大速度は 82cm/sec しかなかったことによるものと考えられる。図7、図8と図9、図10ではそれぞれ仮想強震動と仮想強震動による建物の最大応答変形角分布を示す。

6. まとめ

本論では先ず、微動計測を用いて中低層 RC 造建物の振動解析を行い、共振周期を得た。得られた共振周期の建設年別の変化、建物の梁間と桁行方向の振動特性、地盤との相互

作用などの面から検討を行った。さらに、モンゴルや台湾の同じ階数別共振周期とも比較を行った。次に、設計図表及び微動観測から、建物の階ごと、梁間と桁行ごとに剛性を求めて、設計剛性が実際剛性より小さいことを明らかにした。また、地震応答解析から九大建物の降伏耐力が得られ、神戸市の建物の降伏耐力と比較すると2階建はほぼ同じで、3、4階建は2割程小さく、5、6階建は1割大きいことが分かった。

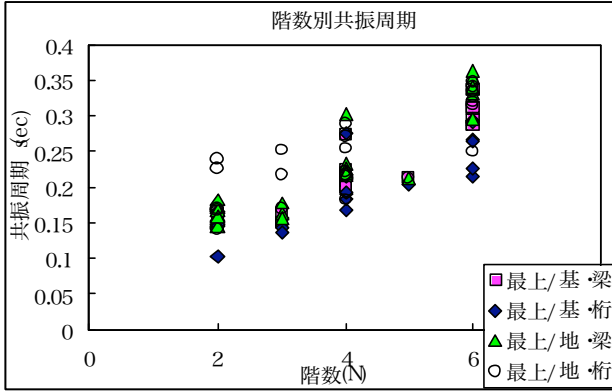


図1 建物の階数別共振

最後に、福岡に起こりえる仮想福岡強震動と推定した建物降伏耐力の関係から、仮想福岡地震では九大のRC造建物は大破が生じないことを予測できた。

参考文献：

- 1)：阪神・淡路大震災調査報告 鉄骨造建築物シェル・空間構造容器構造，日本建築学会，1997
- 2) 深田泰夫，鉄筋コンクリート造建物の復元力特性に関する研究，建築学会
- 3)：長戸健一朗，「被害予測用数値解析建物群モデルの構築とシナリオ地震への適用」2002
- 4)：松島信一，川瀬博：1995年兵庫県南部地震の複数アスペリティモデルの提案とそれによる強震動シミュレーション，日本建築学会構造系論文集，第534巻，2000
- 5)：中道聡，「福岡市における3次地下構造を考慮した広周波数帯域強震動予測」2002

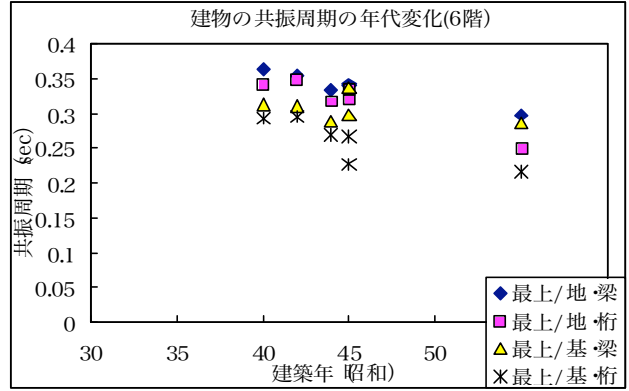


図2 共振周期の建築年代

表1 建物の共振周期

(単位：sec)

番号	階数	建築物の名称	最上階/基礎		最上階/地盤		番号	階数	建築物の名称	最上階/基礎		最上階/地盤	
			梁間	桁行	梁間	桁行				梁間	桁行	梁間	桁行
1	2	207農学部防音講義室	0.160	0.102	0.162	0.225	12	4	103工学3号館	0.207	0.218	0.213	0.220
2	2	126工学部防音室	0.151	0.148	0.149	0.236	13	4	108応用物質化学分	0.222	0.192	0.226	0.186
3	2	010日本文理学教室	0.164	0.151	0.173	0.163	14	4	4022講義室	0.268	0.193	0.299	0.247
4	2	425石炭研資センター	0.165	0.170	0.158	0.162	15	4	075留学生センター	0.202	0.196	0.213	0.218
5	2	136超伝導科学研究	0.151	0.154	0.183	0.145	16	5	002事務局第2庁舎	0.212	0.207	0.216	0.213
6	3	4041経済学部本館	0.149	0.155	0.159	0.169	17	6	4042経済学部本館	0.284	0.218	0.297	0.249
7	3	4021講義室	0.149	0.139	0.174	0.259	18	6	201農学部1号館	0.280	0.270	0.323	0.320
8	3	426臨床心理センター	0.165	0.153	0.175	0.221	19	6	202農学部2号館	0.307	0.295	0.352	0.347
9	4	107応用物質化学機能	0.214	0.176	0.231	0.263	20	6	203農学部3号館	0.305	0.279	0.341	0.337
10	4	105工学部建築学部	0.218	0.279	0.224	0.285	21	6	302理学部3号館	0.295	0.229	0.334	0.290
11	4	104工学4号館	0.228	0.220	0.230	0.219	22	6	031情報基盤センター	0.330	0.268	0.338	0.299

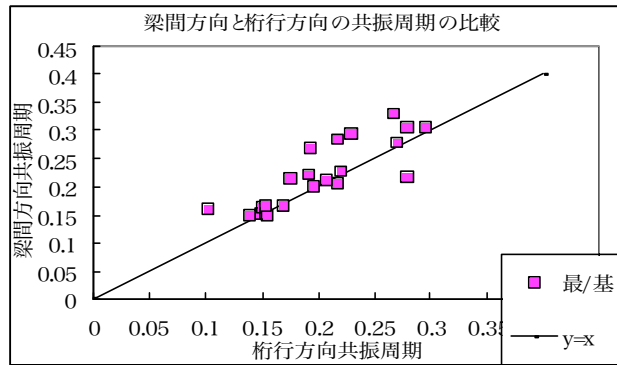


図3 梁間と桁行方向の共振周期の比較

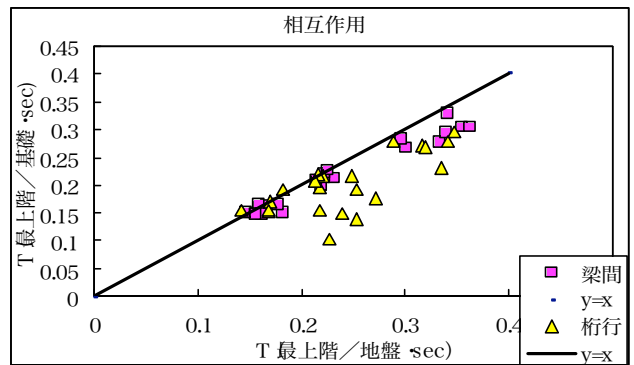


図4 建物と地盤の相互作用

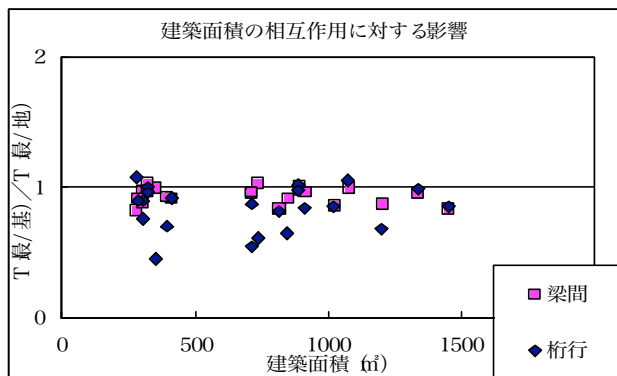


図5 相互作用と建物建築面積

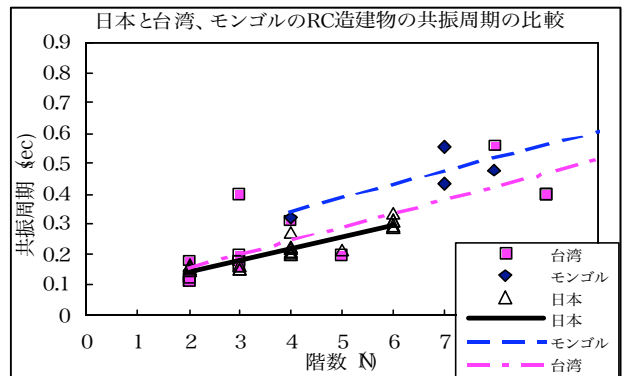


図6 モンゴル、台湾と建物共振周期の比較

表2 観測剛性と設計剛性の比

名称	階数	方向	観測剛性 (t/cm)	設計剛性 (t/cm)	壁倍率	柱+壁倍率	平均倍率	方向	観測剛性 (t/cm)	設計剛性 (t/cm)	壁倍率	柱+壁倍率	平均倍率
(207)農学部防音講義室	2	桁行	9134	1068	10.0	8.5	3.5	梁間	4163	1798	3.0	2.3	2.1
(126)工学部防音室	2	桁行	5298	957	8.5	5.5		梁間	5496	2838	2.5	1.9	
(4041)経済学部本館	3	桁行	13935	4296	4.6	3.2		梁間	14100	6557	2.5	2.2	
(426)発達心理センター	3	桁行	29012	10799	3.4	2.7		梁間	15310	4455	3.5	3.4	
(105)工学部建築学部	4	桁行	9106	5645	2.8	1.6		梁間	14630	12959	1.2	1.1	
(104)工学4号館	4	桁行	49078	15071	5.1	3.3		梁間	33475	25952	1.4	1.3	
(103)工学3号館	4	桁行	31432	18731	2.0	1.7		梁間	32886	31343	1.1	1.0	
(108)応用物質化学分	4	桁行	14568	3789	5.2	3.8		梁間	10111	6797	1.7	1.5	
(075)留学生センター	4	桁行	14706	2610	7.9	5.6		梁間	13420	2702	5.7	5.0	
(002)事務局第2庁舎	5	桁行	74236	16395	5.2	4.5		梁間	59549	17386	4.1	3.4	
(4042)経済学部本館	6	桁行	86504	32281	3.5	2.7		梁間	51094	33254	1.7	1.5	
(201)農学部1号館	6	桁行	113465	38189	4.7	3.0		梁間	102901	50057	2.3	2.1	
(202)農学部2号館	6	桁行	57769	25672	3.5	2.3		梁間	50264	46036	1.1	1.1	
(203)農学部3号館	6	桁行	67100	34781	2.3	1.9		梁間	57276	42632	1.4	1.3	
(302)理学部3号館	6	桁行	124553	46132	3.9	2.7		梁間	75990	47532	1.8	1.6	

表3 ベースシア係数で示した九大建物の降伏耐力と神戸市の建物の降伏耐力の比較

番号	名称番号	階数	梁間耐力	桁行耐力	降伏耐力	神戸市の建物の降伏耐力
1	(207)農学部防音講義室	2F	0.86	2.20	0.86	1.05
2	(126)工学部防音室		1.20	1.29	1.20	
3	(426)発達心理センター	3F	0.92	1.24	0.92	新:1.41 0.96
4	(4041)経済学部本館		1.27	0.88	0.88	
5	(105)工学部建築学部	4F	0.77	0.51	0.51	0.88
6	(104)工学4号館		0.62	0.54	0.54	
7	(103)工学3号館		0.84	0.67	0.67	
8	(108)応用物質化学分		0.75	1.17	0.75	
9	(075)留学生センター	5F	0.92	1.05	0.92	新:1.30 0.79
10	(002)事務局第2庁舎		1.35	1.24	1.24	
11	(4042)経済学部本館	6F	0.87	1.74	0.87	0.70
12	(201)農学部1号館		0.89	1.02	0.89	
13	(202)農学部2号館		0.68	0.64	0.64	
14	(203)農学部3号館		0.71	0.99	0.71	
15	(302)理学部3号館		0.86	1.53	0.86	

Maximum Amplitude

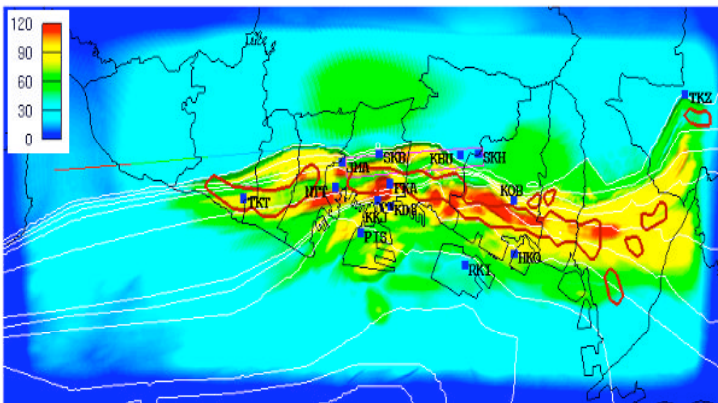


図7 松島・川瀬による兵庫県南部地震の再現強震動の最大速度分布

PGV (cm/s)

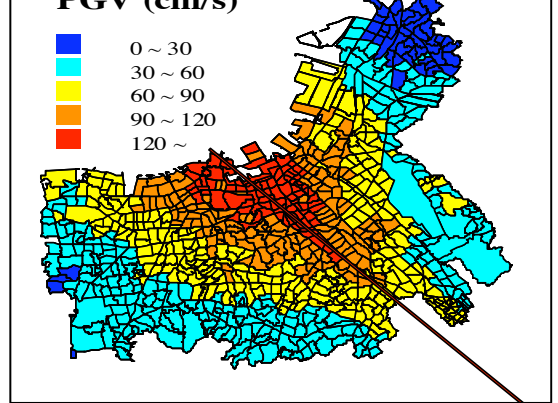


図8 中道・川瀬による仮想福岡地震の最大速度分布

九大建物の被害予測

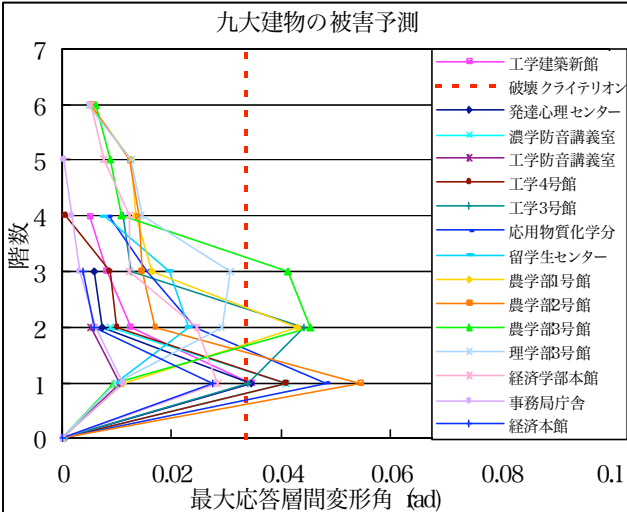


図9 仮想兵庫県南部地震の最大強震動による最大応答層間変形角

九大建物の被害予測

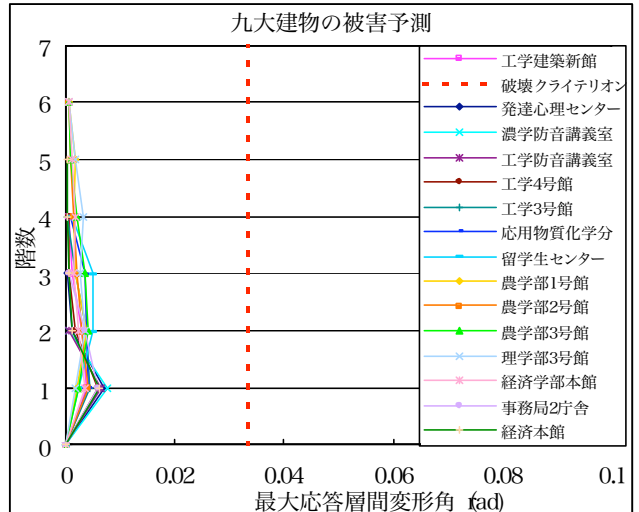


図10 仮想福岡地震の最大強震動による最大応答層間変形角