強震動予測結果に影響する各種要因の分析と標準せん断力係数による予測結果の評価

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 福和研究室　鶴ヶ野　翔平

1 序論

現在の中低層建築物の耐震設計では、動的応答解析ではなく静的解析が行われる。地震荷重は層せん断力係数により定義され、地震地域係数Zや層せん断力係数の高さ方向の分布係数A_i、振動特性係数R_t、標準せん断力係数C_0により設定される。現在の基準法における地震荷重は、関東地震の少ない観測事実と被害状況を参考に決められたが、基準の連続性を配慮し、法律の改正時においてもそのレベルが上げられることはなかった。しかし、近年懸念されている、南海トラフの地震に対する安全性が、現在の地震荷重に基づく設計で十分であるかは、あまり検討されていない。

強震動予測には、多くの手法が用いられるが、その中でも経験的グリーン関数法は、震源･伝播･地盤の増幅特性を考慮できるために、信頼性が最も高い強震動予測手法と言われている。しかし、想定震源域での地震観測記録がないと適用できないこと、想定する震源モデルや波形合成に用いる観測記録によって結果が大きく左右されるなどの問題点もある。加えて経験的グリーン関数法では、大地震の際に想定される表層地盤の非線形挙動は考慮されてないため、別途考慮する必要がある。表層地盤が地震被害･地震動に大きな影響を与えることは、過去の多くの被害事例や観測記録により確認されてきた。しかし、対象である地盤の構成や地盤材料の応力－歪み関係など、多くの要因が予測結果に影響を与えるため、まだまだ課題が多い。

このような背景から、本研究では、静的解析の行われる中低層建物の設計時に想定される地震力の妥当性の評価を目的として、まず経験的グリーン関数法を用い、名古屋市域を対象とした想定東海･東南海地震の強震動予測を行う。この際、波形合成に用いる要素地震の選択方法と表層地盤の動的変形特性のモデル化に着目し、各要因が予測結果に与える影響を比較検討する。次いで、得られた予測結果から、地震時に予想される標準せん断力係数C_0を推定する。

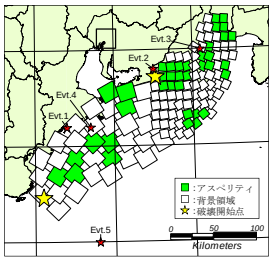


図 1　用いた震源モデルと中小地震の震源位置

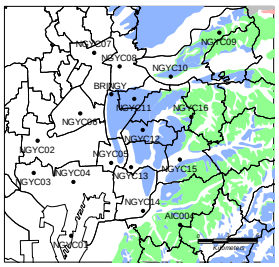


図 2　対象地点の位置図

表 1　中小地震の震源パラメータ

	Date	Lat (d)	Lon (d)	Depth (km)	*Mo* (Nm)	*Mw*
Evt.1	2000.10.31 01:43	34.2	136.4	38.0	1.70×10^{17}	5.4
Evt.2	2001.02.23 07:23	34.8	137.5	32.0	2.43×10^{16}	4.9
Evt.3	2001.04.03 23:57	35.0	138.1	35.0	8.17×10^{16}	5.2
Evt.4	2004.01.06 14:50	34.2	136.7	40.0	6.74×10^{16}	5.2
Evt.5	2004.09.05 19:07	33.0	136.8	14.0	2.83×10^{19}	6.9

表 2　各地点での地震観測記録の有無

	東南海			東海	
	Evt.1	Evt.4	Evt.5	Evt.2	Evt.3
AIC004	○	○	○	○	○
BRINGY	○	○	○	○	○
NGYC01	○	–	○	-	○
NGYC02	○	○	○	○	○
NGYC03	○	○	○	-	○
NGYC04	-	○	○	-	○
NGYC05	-	-	○	-	○
NGYC06	○	-	○	-	○
NGYC07	○	○	○	○	○
NGYC08	○	○	○	-	○
NGYC09	○	○	○	-	○
NGYC10	-	-	○	○	○
NGYC11	○	○	○	○	○
NGYC12	○	○	○	○	○
NGYC13	○	○	○	-	○
NGYC14	○	-	○	○	○
NGYC15	-	○	○	○	○
NGYC16	-	○	○	-	○

2 経験的グリーン関数法を用いた強震動予測

図 1 に震源モデルと推定に用いた要素地震の震源位置を、図 2 に対象地点の位置図をそれぞれ示す。また、表 1 に用いた要素地震と各要素地震の震源パラメータを示す。ただし、表 2 に示すように、これらの地震は Evt.3 と Evt.5 を除き全観測地点で記録が得られていないため、観測点毎に採用した要素地震は異なっていることに注意を要する。

震源モデルは、マグニチュードの大きいEvt.5 を要素地震に用いるために、中央防災会議の震源モデル[1)]の要素断層を長さ･幅ともに約 2 倍になるように再設定した高橋他[2)](2010)のモデルを用いた。それに伴い、Evt.1 とEvt.4 は M7 相当の地震動とした上で要素地震に用いた。

対象地点は名古屋市による観測地点 16 点と K-NET の AIC004、三の丸地点(BRINGY)の全 18 地点を対象とした。

2.1 要素地震が予測結果に与える影響

要素地震が複数得られている場合、どの要素地震を用いるかにより、強震動予測結果は大きく変わる。ここでは、BRINGY地点を代表地点とし、壇・佐藤[3)]による経験的グリーン関数法を用い、要素地震の選択方法が予測結果に与える影響を検討する。用いる要素地震は表 1 のEvt.1 を除く 4 地震とし、Evt.4 とEvt.5 を東南海地震震源域に、Evt.2 とEvt.3 を東海地震震源域にそれぞれ割り当てた。なお、検討は東南海地震震源域の 2 地震をそれぞれ単独で用いる 2 ケース(Case1:Evt.4、Case2:Evt.5)と、併用するケース(Case3:Evt.4+Evt.5)の 3 ケースとした。

波形合成結果の擬似速度応答スペクトル(NS 方向、h=5%)を図 3 に示す。東南海地震震源域に要素地震を単独で用いた Case1 と Case2 では、用いた要素地震の周期特性が顕著に現れることが確認できる。Case3 は、用いたそれぞれの要素地震の周期特性が見られた。これより、各震源域に要素地震を単独で用いると、その要素地震の特性がそのまま予測結果に反映されてしまい偏った結果となるため、対象地点で複数の利用可能な観測記録が得られている場合は併用した方がよいと考えられる。

2.2 名古屋市域における強震動予測結果

図 2 に挙げた観測地点における波形合成結果の速度波形(NS方向)を図 4 に示す。速度波形は、南部の結果が北部に比べ最大応答値、包絡形が大きいことが分かる。特に南西部で 100kine以上の大きな値を示しており、継続時間が長くなり、反対に北東部では最大値は小さく、継続時間が短くなる傾向が認められた。ここで、推定した地震動の妥当性を検討するため、司･翠川(1999)の距離減衰式[4)]による最大速度との比較を行った結果を図 5 に示す。Vs=600m/s相当層における最大速度は、司･翠川

による距離減衰特性に対し、ほぼ平均±標準偏差の範囲内にあることが確認できる。したがって、本推定結果は概ね妥当な結果と考えられる。

3 表層地盤の非線形性を考慮した地表地震動の推定

前節で推定した強震動予測結果を用いて、地盤の地震応答解析を実施した。まず設定した地盤モデルを用いて、地盤を線形弾性体とした重複反射解析により、地表面における地震動から解放工学的基盤面での地震動を算出した。なお減衰は、$Q=Vs/10$ として$h=1/2Q$と設定した。次いで得られた解放工学的基盤面における地震動を用いて、全応力非線形応答解析を行い、表層地盤の非線形性を考慮した地表地震動を推定した。なお、表層地盤モデルは、ボーリング調査結果やPS検層等の実施されている地点ではそれを基に設定し、実施されていない地点については、高橋他(2006)によるモデル[5]を用いた。動的変形特性は、室内試験結果がある層についてはその結果を、試験結果がない土層では、古山田他(2003)[6]の結果を用いた。なお、解析においては、非線形化を考慮して、設定した地盤モデルの各層厚を概ね 1.0m程度とした。また、本検討では地盤の初期剛性及び基準ひずみの拘束圧依存性を考慮しない。

3.1 動的変形特性のモデル化が予測結果に与える影響

表層地盤の非線形性を考慮する場合、対象である地盤の地層構成や地盤材料の応力－歪み関係など、多くの要因が予測結果に影響を与える。ここでは、本研究で対象としている 18 地点の内、軟弱地盤に位置する NGYC01 と台地上に位置する BRINGY を代表地点とし、動的変形特性のモデル化が予測結果に与える影響を比較検討する。なお、動的変形特性は、双曲線モデルと R-O モデルで設定した。図 6 に設定した動的変形特性の一例を示す。

計算結果の擬似速度応答スペクトル(NS 方向、h=5%)と最大ひずみの深度分布を図 7 及び図 8 に示す。BRINGY では、R-O モデルと双曲線モデルによる差異は、疑似速度応答スペクトル、最大せん断ひずみ共に見られない。NGYC01 では、擬似速度応答スペクトルに差異が見られ、双曲線モデルによる結果の方がやや小さめに評価している。これはせん断ひずみが 0.1%を超えた辺りから双曲線モデルの減衰が R-O モデルに比べ大きく、また双曲線モデルでは、終局強度が頭打ちになることでひずみが大きくなり、減衰が R-O モデルに比べ過大評価されることが原因と考えられる。以上より、双曲線モデルでは、NGYC01 のような表層地盤の非線形化が顕著である地点では、減衰を過大に評価してしまう可能性があると言える。ただし、対象とした NGYC01 地点では、液状化の可能性が危惧されるため、液状化を考慮した解析も今後の課題である。

3.2 非線形を考慮した強震動予測結果

図 2 に挙げた観測地点における強震動予測結果から表層地盤の非線形性を考慮した地表地震動を推定した。

工学的基盤以浅の弾性時の地盤増幅度と各観測点で複数の地震観測記録から推定したR/Vスペクトルを図 9 に、計算結果の擬似速度応答スペクトル(NS方向、h=5%)を図 10 にそれぞれ示す。擬似速度応答スペクトルは非線形性を考慮した結果に加え、考慮していない結果と解放工学的基盤面における結果及び地盤種別毎のR_tから算定した、設計時(C_0=1.0)に想定される入力地震動の速度応答スペクトルを併せて示す。なお、R/Vスペクトルは、地震基盤以浅の地盤増幅度に相当するため、工学的基盤以浅の地盤増幅度より長い周期は、深部地盤の卓越周期を示す。擬似速度応答スペクトルは、特に名古屋市南西部において、増幅特性の長周期化が見られ、表層地盤の非線形性の影響がよく現れていることが分かる。名古屋市北部では応答値の増幅がやや見られるものの、南部に比べ非常に小さく、非線形性による影響は小さい結果となった。また、R_tから算定したスペクトルを、表層地盤や深部地盤の卓越周期周辺の周期帯域で上回っている地点が多い。特に地盤の卓越周期の長い南西部では、周期 1 秒以上の広い周期帯域でその傾向が顕著に現れている。

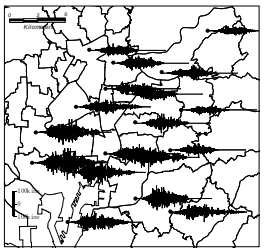


図 4 速度波形(NS 方向)

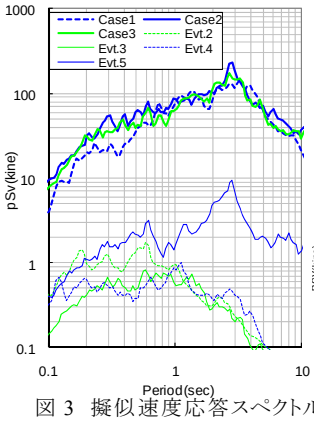


図 3 擬似速度応答スペクトル (NS 方向 h=5%)

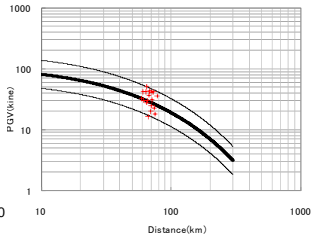


図 5 司・翠川(1999)の距離減衰式[8]との比較

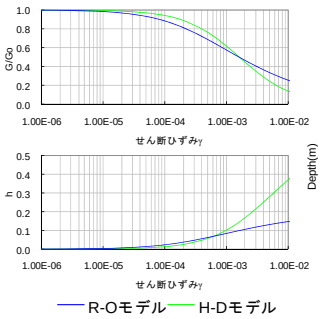


図 6 設定した動的変形特性の一例

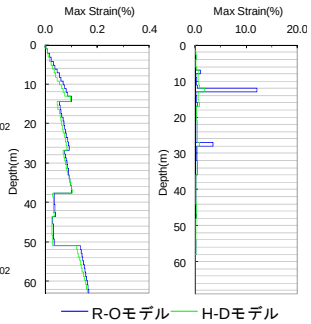


図 8 最大せん断ひずみ分布 (左:BRINGY 右:NGYC01)

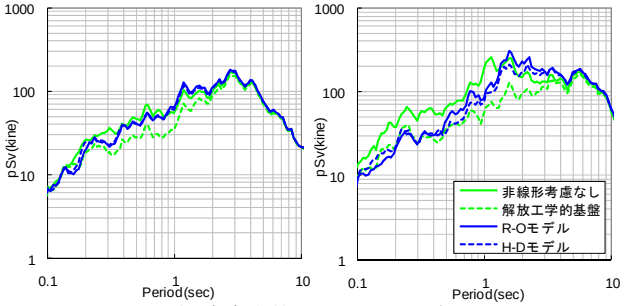


図 7 擬似速度応答スペクトル(NS 方向、h=5%) (左:BRINGY 右:NGYC01)

このことは、現在の地震荷重に基づく設計では十分でないと言える。また、本結果の妥当性を検討するために、高橋他(2006) [7]の想定東南海地震を対象とした強震動予測結果の計測震度との比較を行った。比較結果を表 3 に示す。本結果は想定東海･東南海地震を対象としているが、名古屋市域における東海地震の影響は小さいこと[8]から、比較の対象とした。なお、本結果の計測震度は水平 2 成分より推定した。両結果は、概ね対応はしているが、全体的にやや大きめの評価となっている。これは、用いている震源モデルの違いによる影響と考えられるが、表層地盤モデルの妥当性や、液状化の考慮がされていないなど、今後更なる検討が必要であると考えられる。

4 標準層せん断力係数C_0の推定

4.1 対象建物モデルの概要

対象建物は、地下 1 階、地上 14 階、高さ 60m 級の S 造建物(以下 14 層モデル)と地下 1 階、地上 8 階、高さ 30m 級の S 造建物(以下 8 層モデル)、地下階なし、地上 3 階、高さ 12m 級の S 造建物(以下 3 層モデル)の 3 通りとした。いずれも純ラーメン構造であり、3 つのモデルは同様の基準階形状を有する架構とする。各モデルの軸組図と基準階床伏図を図 11 に示す。建物モデルは、各階の重量を質点に集約した多質点系等価せん断型モデルとし、減衰は 3%とした。建物モデルの解析パラメータを表 4 に示す。なお、解析は基礎固定系とした。

4.2 標準層せん断力係数C_0の推定結果

各地点における強震動予測結果を用いて各モデルの弾性地震応答解析を行い、その結果からベースシア係数C_bを推定した。次いで、建物の固有周期と地盤種別毎に振動特性係数R_tを算出し、建物モデル毎の標準せん断力係数C_0を推定した。なお、C_0はNS･EWの最大値である。推定した建物モデル毎の一次固有周期及びR_tを表 5 に示す。建物の固有周期は設計用固有周期の計算式(T=0.03×h、h=建物高さ)を用い、観測点毎の地盤種別は各観測点における微動計測から推定される卓越周期の結果から判断した。

標準せん断力係数C_0の推定結果とその分布を表 6 及び図 12 にそれぞれ示す。14 層モデルでは、南西部の地点で大きい結果となり、同地域では、大きいところで想定の 2~3 倍の地震力となっていることが分かる。南西部では、14 層モデルの固有周期である 1.8 秒から 2.0 秒付近で工学的基盤以浅の増幅が大きく、表層地盤の影響であると考えられる。また、北東部のNGYC10 地点もC_0が 2.0 近くであるが図 9 のR/Vスペクトルより、深部地盤による影響であると考えられる。8 層モデル、3 層モデルでは、14 層モデルに比べ、C_0の高い地域が東側に見られ、主に南部では表層地盤の増幅特性の影響が、北部では深部地盤の影響が現れたと考えられる。また、計測震度と標準せん断力係数

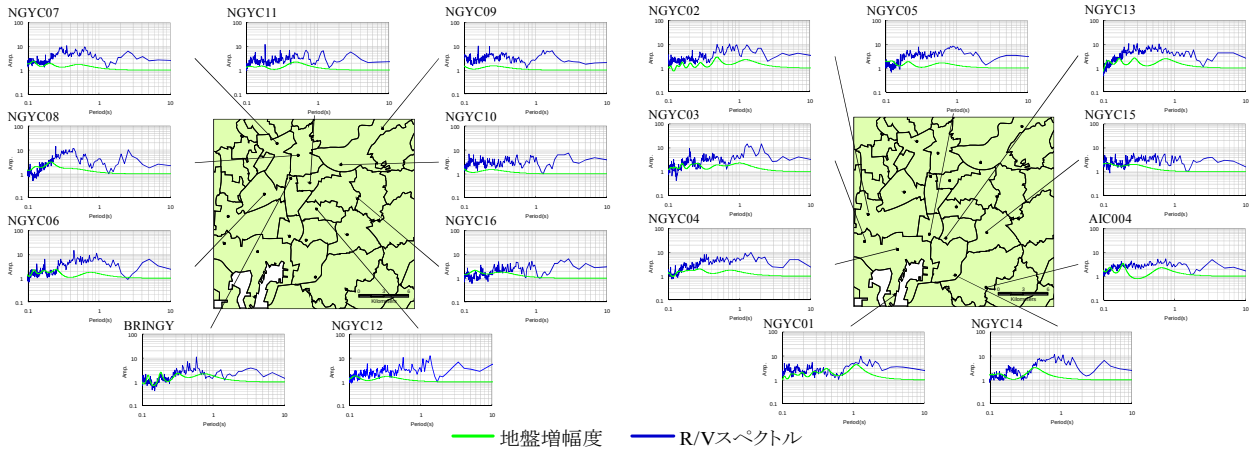


図 9　工学的基盤以浅の地盤増幅度と地震観測記録から推定した R/V スペクトル(左：北部、右：南部)

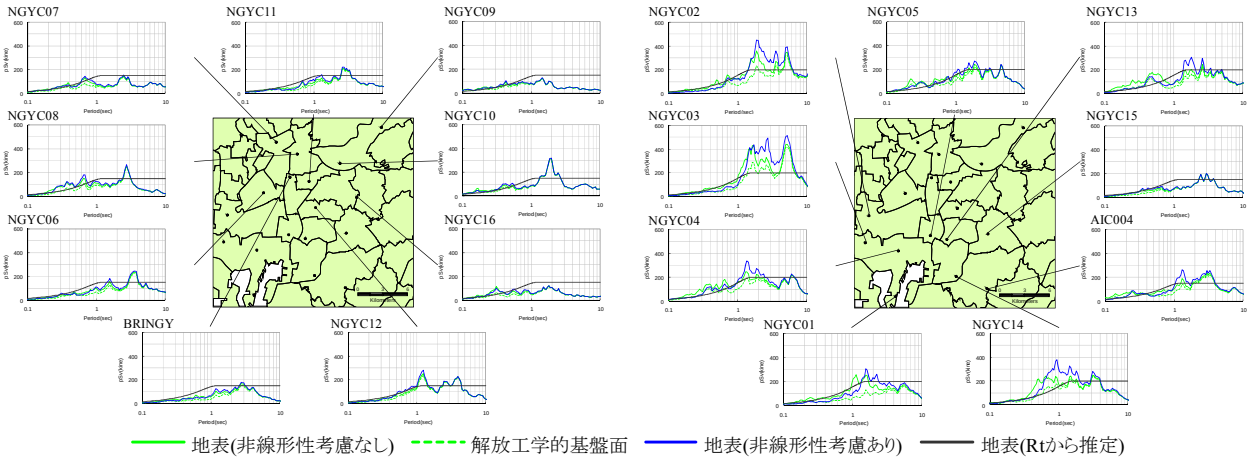


図 10 擬似速度応答スペクトル(NS 方向 h=5%　左：北部、右：南部)

C_0の関係を図 13 に示す。これより 3 層モデル、8 層モデルでは震度 6 弱の地点では概ねC_0=1.0 前後の範囲にあることが分かる。C_0=1.0 は震度 6 弱程度に対応していることを考えると、想定された地震力相当の応答値であると言える。震度 6 弱以上の地点においては一部大きい地点も見られるが、同様の傾向であると言える。しかし、14 層モデルは、他のモデルと比べやや大きめのC_0を示しており、特に第三種地盤において、ばらつきはあるものの、その傾向が見られる。現行のR_tは長周期帯域に対し、加速度応答スペクトルは低減し、速度応答スペクトルは一定としており、その結果想定した地震力を過小に設定していると考えられる。以上より、特に南西部のように、長周期域の地震動が卓越するような地域では、東海･東南海地震等の南海トラフで発生する地震に対しては、現行のR_t及びC_0による設計において想定された以上の地震力を受ける可能性があると言える。

5 まとめ

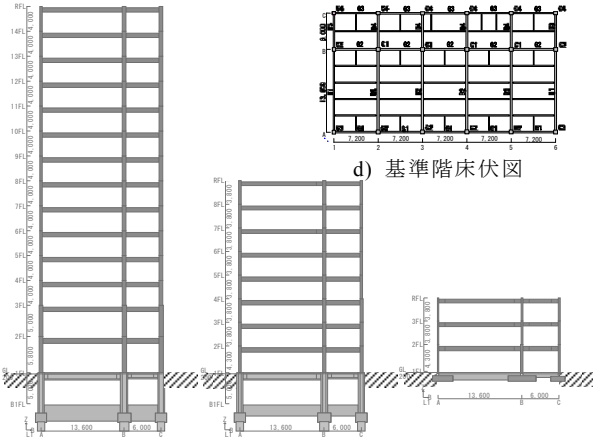
名古屋市域を対象に経験的グリーン関数法を用いた、想定東海･東南海地震の強震動予測及び建物の弾性地震応答解析を行い、標準せん断力係数C_0を推定した。その際、波形合成に用いる要素地震の選択方法と表層地盤の動的変形特性のモデル化に着目し、各要因が予測結果に与える影響を比較検討した。

要素地震の選択は、想定震源域に単独で用いると、その要素地震の特性がそのまま予測結果に反映されてしまい、対象地点で複数の利用可能な観測記録が得られている場合は併用した方がよいと考えられる。動的変形特性のモデル化では、双曲線モデルは、終局強度が頭打ちになることでひずみが大きくなるため、表層地盤の非線形化が顕著である地点では、減衰を過大に評価してしまう可能性がある。

強震動予測及びC_0の推定では、特に名古屋市南西部において、強震動予測結果に表層地盤の非線形性の影響が強く見られた。また、C_0は現行のR_tの長周期帯域の補正により、地震力を過小に想定している可能性が指摘された。しかし強震動予測結果の更なる検討や、地盤モデルの妥当性の検討、液状化の考慮、地盤と建物の動的相互作用効果等、より実現象を反映した解析の必要性がある。

参考文献

1) 中央防災会議:東南海,南海地震等に関する専門調査会 2) 高橋他:長周期地震動を受ける超高層建物と免震建物の床応答特性に関する研究 その 2 経験的グリーン関数法を用いた強振動予測,日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 分冊,pp.945-946,2010. 3) 壇他:断層の非一様すべり破壊を考慮した半経験的波形合成法による強震動予測,日本建築学会構造系論文集,第 509 号,49-60,1998.7 4) 司他:断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度･最大速度の距離減衰式,日本建築学会構造系論文集,No.523,63-70,1999.9 5) 高橋他:地震動予測のための表層地盤のモデル化手法の提案と検証,日本建築学会構造系論文集,No.599,pp.51-59,2006.1 6) 古山田他:多地点での原位置採取試料から評価した表層地盤の非線形特性,第 38 回地盤工学研究発表会,pp.2077-2078, 2003.7 7) 高橋他:疑似経験的グリーン関数法を用いた任意地点の強震動予測(その 2)想定東南海地震に対する名古屋市域の強震動予測,日本建築学会学術講演梗概集,pp.383-384,2006.8 8) 千賀:広域･高解像度評価に向けた強震動予測手法の高度化に関する研究,学位論文,2008.2



d) 基準階床伏図

a) 14 層モデル　b) 8 層モデル　c) 3 層モデル

図 11　建物モデル

表 5　建物の設計用一次固有周期とR_t

		14層モデル		8層モデル		3層モデル	
		X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向
建物の一次固有周期(s)		1.80	2.00	1.20	1.30	0.79	0.82
設計用一次固有周期(s)		1.76		0.93		0.36	
R_t	第一種地盤	0.363		0.690		0.998	
	第二種地盤	0.544		0.941		1.000	
	第三種地盤	0.726		0.995		1.000	

表 4　建物モデルの解析パラメータ

a) 14 層モデル

階数	階高	重量	剛性(kN/m)	
	(cm)	(kN)	X方向	Y方向
14	400	6790.1	4.23E+05	2.71E+05
13	400	5210.9	4.31E+05	2.91E+05
12	400	5200.4	4.62E+05	3.26E+05
11	400	5210.0	4.93E+05	3.50E+05
10	400	5235.9	5.19E+05	3.68E+05
9	400	5235.9	5.31E+05	3.84E+05
8	400	5253.9	5.53E+05	4.10E+05
7	400	5272.8	5.65E+05	4.27E+05
6	400	5279.0	5.77E+05	4.44E+05
5	400	5280.0	5.87E+05	4.65E+05
4	400	5287.3	6.00E+05	4.88E+05
3	400	5294.7	6.06E+05	5.13E+05
2	500	5476.2	5.38E+05	4.83E+05
1	580	6203.4	8.04E+05	7.39E+05

b) 8 層モデル

階数	階高	重量	剛性(kN/m)	
	(cm)	(kN)	X方向	Y方向
8	380	6586.0	2.86E+05	2.41E+05
7	380	5072.2	3.14E+05	2.68E+05
6	380	5083.7	3.26E+05	2.86E+05
5	380	5125.1	3.84E+05	3.42E+05
4	380	5140.6	4.10E+05	3.68E+05
3	380	5148.3	4.71E+05	4.19E+05
2	380	5184.2	5.03E+05	4.43E+05
1	430	5548.0	6.97E+05	6.24E+05

c) 3 層モデル

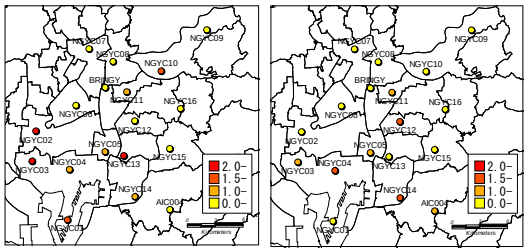
階数	階高	重量	剛性(kN/m)	
	(cm)	(kN)	X方向	Y方向
3	380	5443.0	1.93E+05	1.85E+05
2	380	4982.4	1.75E+05	1.62E+05
1	430	5383.4	1.65E+05	1.55E+05

表 3　計測震度の比較

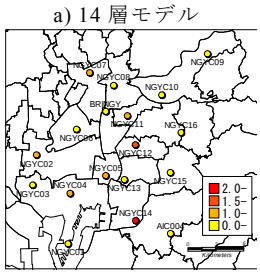
	計測震度	
	推定結果	高橋他(2006)
AIC004	5.83	6.00
BRINGY	5.52	5.42
NGYC01	5.83	5.85
NGYC02	6.17	5.90
NGYC03	6.36	5.52
NGYC04	6.31	5.90
NGYC05	5.99	5.92
NGYC06	5.64	5.50
NGYC07	5.73	5.54
NGYC08	5.83	5.65
NGYC09	5.82	5.26
NGYC10	5.87	5.67
NGYC11	5.87	5.59
NGYC12	5.98	5.89
NGYC13	6.12	6.19
NGYC14	6.49	6.28
NGYC15	5.63	5.24
NGYC16	5.59	5.52

表 6　各地点の推定したC_0値

	C_0		
	14層モデル	8層モデル	3層モデル
AIC004	0.998	1.326	0.789
BRINGY	0.817	0.832	0.457
NGYC01	1.596	0.870	0.987
NGYC02	2.164	0.868	1.039
NGYC03	3.114	1.229	0.777
NGYC04	1.395	1.833	1.192
NGYC05	1.238	1.067	1.296
NGYC06	0.825	0.899	0.737
NGYC07	0.570	0.934	1.191
NGYC08	0.890	0.782	0.765
NGYC09	0.607	0.926	0.804
NGYC10	1.951	0.805	0.877
NGYC11	1.188	1.330	1.302
NGYC12	0.970	1.629	1.587
NGYC13	3.196	0.786	0.591
NGYC14	1.397	1.538	3.185
NGYC15	0.740	0.625	0.584
NGYC16	0.844	0.400	0.967



a) 14 層モデル　b) 8 層モデル



c) 3 層モデル

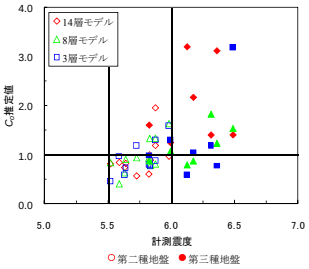


図 12　推定したC_0値の分布　図 13　計測震度とC_0の関係