

強震動予測に基づく想定東海・東南海地震時に予想される建築物のベースシア係数分布
—経験的グリーン関数法に基づいて—

Estimation of Base Shear Coefficient of Buildings during Hypothetical Tokai-Tonankai Earthquake
—Based on the Empirical Green's Function Method—

2. 構造

強震動予測 想定東海・東南海地震
動的応答解析 経験的グリーン関数法
構造設計 ベースシア係数

正会員 ○鶴ヶ野 翔平^{*1} Shohei Tsurugano
正会員 高橋 広人^{*2} Hirohito Takahashi
正会員 福和 伸夫^{*3} Nobuo Fukuwa
正会員 護 雅史^{*4} Mori Masafumi
正会員 曾我 裕^{*5} Yutaka Soga

1. はじめに

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、地震力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 、標準せん断力係数 C_0 により設定される。一方、国の機関等で提示される強震動予測結果は応答スペクトルや最大加速度分布等により提示される場合が多く、一般的な構造設計者には馴染みが薄いものと考えられる。したがって応答スペクトル等ではなく、実設計で用いているベースシア係数 C_b として予測結果を表示することで、構造設計者にとって強震動予測結果が身近なものとなり、また現在の設計で考えられている標準せん断力係数 $C_0=0.2$ (1次設計)、 1.0 (2次設計) との比較が可能となり、予測結果に対する理解につながるのではないかと考えている。

以上のことから、本研究では、まず経験的グリーン関数法を用いて名古屋市域の強震観測地点における想定東海・東南海地震を対象とした強震動予測を行う。次いで得られた予測結果から、地震時に予想されるベースシア係数 C_b を推定する。

2. 想定東海・東南海の強震動予測

2.1 要素地震、震源モデル及び予測対象地点

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に対象観測点の位置図をそれぞれ示す。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。したがって、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。応力降下量は、Evt.5については震央位置が近接する2地震のスペクトル比¹⁾を用いてコーナー周期を読み取り設定し、その他の地震については、愛知県三の丸地点の推定波策定時²⁾のパラメータを採用した。

また、Evt.5はM6.9と規模が大きく、中央防災会議³⁾による東海・東南海地震の要素断層の断層サイズへの適用が難しい。そのため震源モデルは、要素地震にこの地震を適用可能とするため、図1に示すように、要素断層

表1 要素地震の震源パラメータ

	Date	Lat (d)	Lon (d)	Depth (km)	M_0 (Nm)	σ (MPa)
Evt.1	2000.10.31 01:43	34.20	136.40	38.00	1.70×10^{17}	41.30
Evt.2	2001.02.23 07:23	34.80	137.50	32.00	2.43×10^{16}	60.00
Evt.3	2001.04.03 23:57	35.00	138.10	35.00	8.17×10^{16}	22.20
Evt.4	2004.01.06 14:50	34.20	136.70	40.00	6.74×10^{16}	10.00
Evt.5	2004.09.05 19:07	33.00	136.80	14.00	2.83×10^{19}	10.32

表2 地点ごとの観測記録の有無

	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	-	○	○	-	○

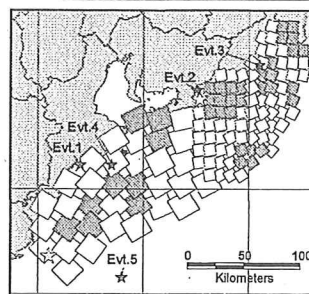


図1 推定に用いた震源モデルと要素地震の震源

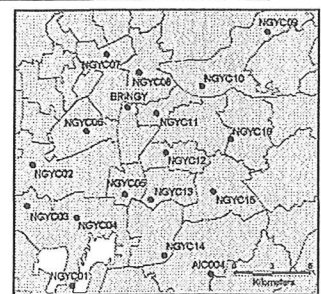


図2 評価対象とした観測点モデルと要素地震の震源

*1 名古屋大学大学院環境学研究科 大学院生

*2 応用地質株式会社 博士 (工学)

*3 名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博

*4 名古屋大学大学院環境学研究科 准教授・博士 (工学)

*5 株式会社竹中工務店 設計部

Grad.Student, Grad.School of Env. Studies, Nagoya Univ.

OYO Corporation, Dr.Eng.

Prof., Grad.School of Env. Studies, Nagoya Univ., Dr.Eng.

Assoc.Prof., Grad.School of Env. Studies, Nagoya Univ., Dr.Eng.

Building Design Department, Takenaka Corporation

の大きさを長さ、幅ともに中央防災会議の震源モデル要素断層の約2倍になるように再設定した高橋他⁴⁾(2010)のモデルを用いた。なおこの震源モデルは、愛知県三の丸地点において波形合成を行い、中央防災会議モデルを用いた結果と比較し、その妥当性を確認している。また、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震源断層のサイズを大きくしたモデルを用いている。それに伴い、Evt.1 及び Evt.4 は M7 相当の地震動とした上で要素地震に用いている。

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

2.2 対象地点での強震動予測結果

図 2 に挙げた名古屋市の観測地点における、経験的グリーン関数法を用いた強震動予測を行った。経験的グリーン関数法には壇・佐藤⁵⁾による手法を用いた。大振幅時の地盤の非線形性については、得られた強震動予測結果を用いて、地点毎の歪レベルにより、等価線形解析及び非線形応答解析を行った。各地点の表層地盤モデルは、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らを基に設定し、実施されていない地点については、名古屋市のハザードマップ作成時の 50m メッシュモデル⁶⁾より引用した。動的変形特性は、砂質土層及び粘土層には古山田・他⁷⁾(2003)の式を用い、H-D モデルとして設定した。礫質土層には今津・福武⁸⁾(1986)の式を用いた。なお室内試験結果のある地点ではそれらに基づき、H-D モデルにより設定した。

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工学的基盤面での地震動を算出した。なお減衰は、 $Q=V_s/10$ として $h=1/2Q$ と設定した。続いて各地点で表層地盤の非線形性を考慮した地震応答解析を行い、地表での地震動を求めた。解析は、各層を層厚概ね 1.0m 程度に細分割し、各層に非線形パラメータを設定した。また、本検討では地盤の拘束圧依存性を考慮していない。

図 3(a)に予測結果の速度波形(NS 方向)を、図 3(b)に擬似速度応答スペクトル(NS 方向、 $h=5\%$)をそれぞれ示す。また、非線形を考慮した表層地盤の卓越周期の変化(NS 方向)を図 4 に、名古屋市での工学的基盤の深度分布を図 5 に、深部地盤の卓越周期分布を図 6 にそれぞれ示す。速度波形は、南西部で大きな値を示しており、継続時間も長く、反対に北東部ほど最大値は小さく、継続時間も短くなる傾向が見られる。また、約 25km 離れるだけで 100kine 程度の差が見られる地点がある。これは図 5 や図 6 から分かるように、対象地域の地盤特性の違いに起因すると考えられる。擬似速度応答スペク

トルのピークは、図 4 に示す表層地盤の卓越周期と、図 6 に示す深部地盤の卓越周期辺りにそれぞれ見られた。予測結果の比較として、図 7 に愛知県の被害予測結果(2003)と本結果の計測震度を示す。なお、本結果の計測震度は水平 2 成分より推定している。全体的に対応はしているが、一部ではやや大きい結果となっており、今後更なる検討が必要である。

3. 標準層せん断力係数 C_b の推定

3.1 対象とする建物概要

検討の対象建物は、地下 1 階、地上 14 階、高さ 60m 級の S 造建物(以下 15 層モデル)と地下 1 階、地上 8 階、高さ 30m 級の S 造建物(以下 9 層モデル)、及び地下 1 階、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る。図 8 に各モデルの軸組図、図 9 に基準階床伏図を示す。3 つのモデルは同様の基準階形状を有する架構としている。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た。表 3 に建物モデルの解析パラメータを示す。なお、地下部は剛体としてモデル化している。解析は基礎固定系とし、地盤と建物の動的相互作用効果は考慮していない。

3.2 地震応答解析結果

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、建物の固有周期及び地盤種別毎に振動特性係数 R_t を算出し、地盤種別・建物モデル毎の C_b を推定した。なお、建物の固有周期は設計用固有周期の計算式($T=0.03 \times h$ 、 h =建物高さ)を用い、観測点ごと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。推定した建物モデル毎の一次固有周期及び振動特性係数 R_t を表 4 に、建物モデル毎の C_b 推定結果を図 10 に示す。

15 層モデルでは南西部において、推定 C_b 値 2.0 近くの地点が南西部に多いことが分かる。この辺りの表層地盤の卓越周期と建物の固有周期が近接しているためと考えられる。他にも NGYC11 でもやや高い数値を示しているが、NGYC11 では長周期域の卓越周期が建物の固有周期に近接しているためと考えられる。9 層モデルと 3 層モデルは 15 層モデルに比べ、やや東側に C_b の高い地域が見られる。これは、15 層モデルの南西部同様、表層地盤の卓越周期が建物の固有周期に近いと考えられる。

4. まとめ

経験的グリーン関数法を用いて、名古屋市域を対象に想定東海・東南海地震の強震動予測及び建物の線形地震応答解析を行い、ベースシア係数 C_b を推定した。しかし

強震動予測結果の更なる検討や、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。

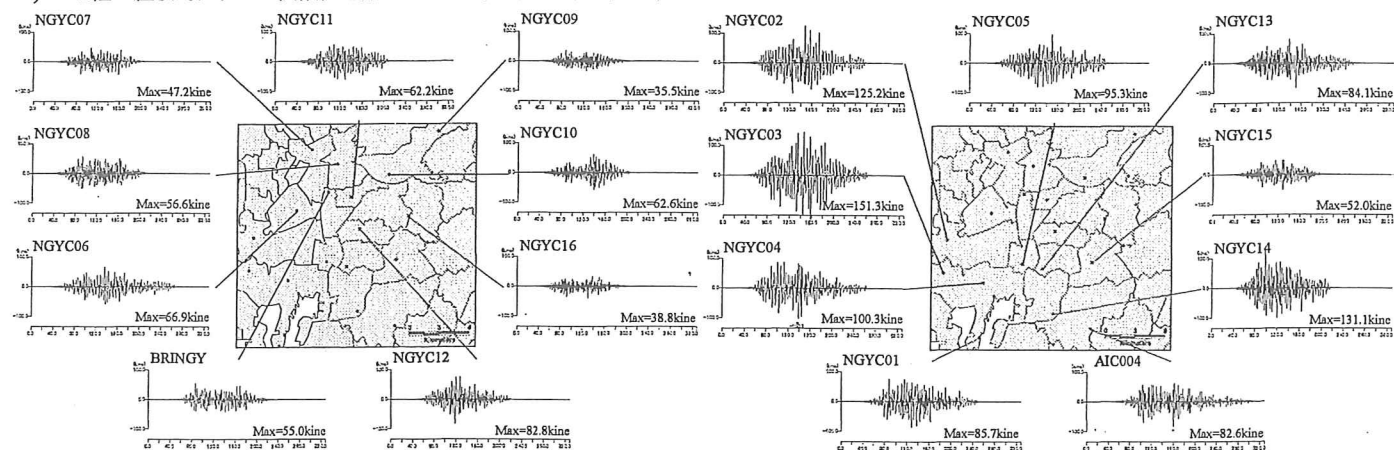
謝 辞

本研究を進めるにあたって、建築研究所の地震観測記録、防災科学技術研究所の K-NET の地震観測記録及び F-net の震源情報を使用させて頂きました。ここに記して、謝意を表します。

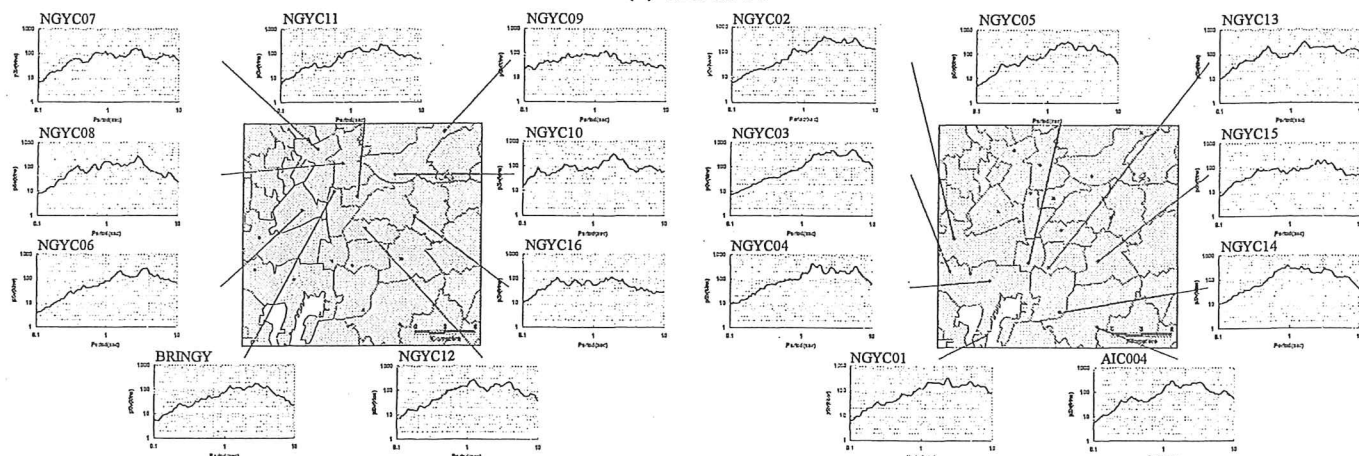
参考文献

1) 三宅他：経験的グリーン関数法を用いた 1997 年 3 月 26 日 (M6.5)

及び 5 月 13 日 (M6.3) 鹿児島県北西部地震の強震動シミュレーションと震源モデル,地震第 2 輯,51,pp.431-442,1999.2) 国土交通省中部地方整備局他：名古屋市三の丸地区における地域特性を考慮した耐震改修のための基盤地震動の作成(概要版),p.48,2004. 3) 中央防災会議：東南海,南海地震等に関する専門調査会 4) 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震動予測,日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2 分冊,pp.945-946,2010. 5) 壇他：断層の非一様すべり破壊



(a) 速度波形



(b) 擬似速度応答スペクトル ($h=5\%$)

図 3 強震動予測結果 (NS 方向)

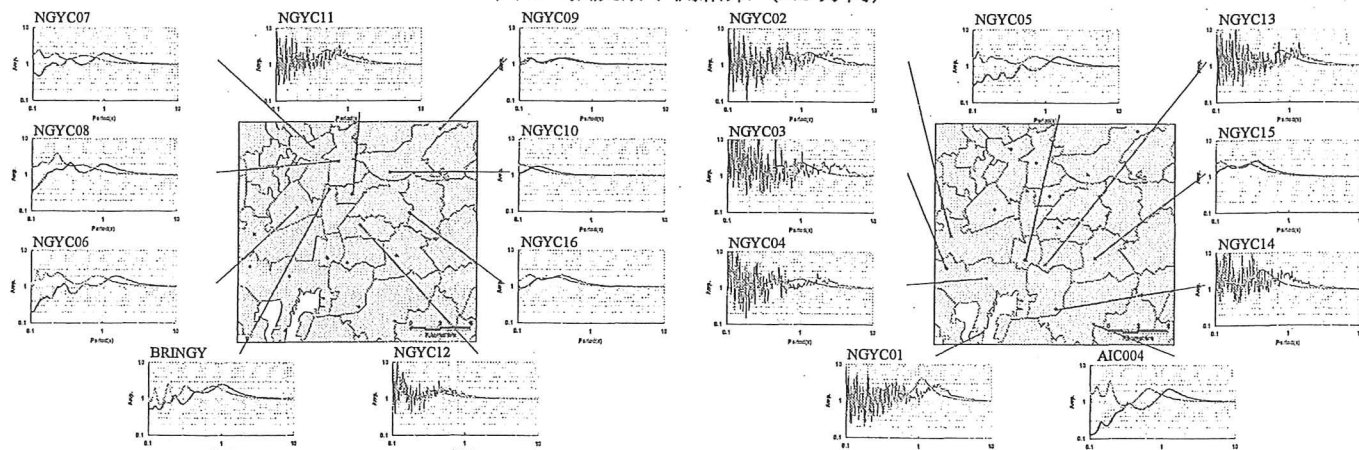


図 4 表層地盤の卓越周期の変化 (NS 方向 赤線：非線形、緑：線形)

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,49-60,1998.7.6) 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,第599号,51-59,2006.1.7) 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.2077-2078,2003.7.8) 今津他:砂礫材料の動的変形特性,第21回地盤工学研究発表会,pp.509-512,1986.

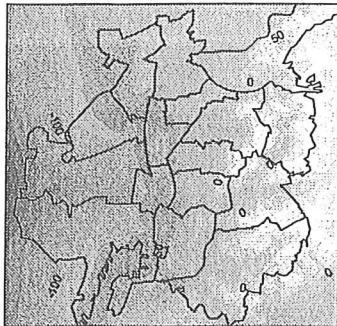


図5 工学的基盤の深度分布

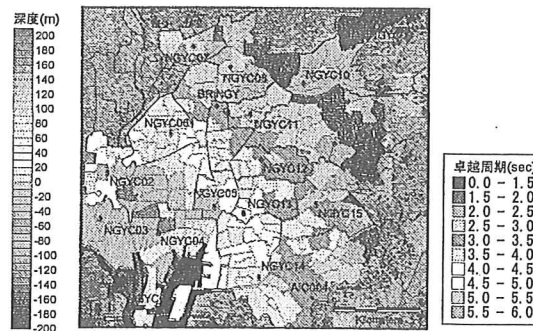


図6 深部地盤の卓越周期

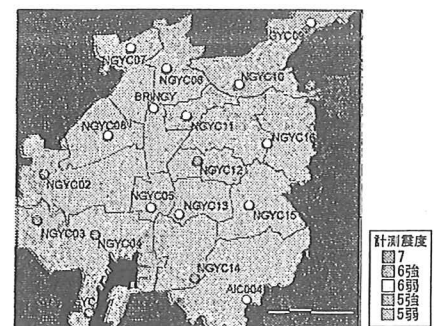


図7 推定した計測震度と愛知県(2003)の結果との比較

表4 推定した建物の一次固有周期と R_t

	15層モデル		9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3 建物モデルの解析パラメータ

(a) 15層モデル

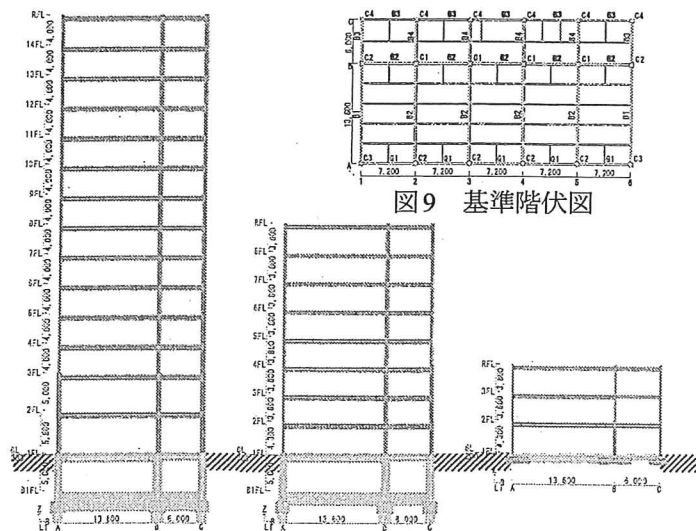
階数	階高 (cm)	重量 (kN)	剛性(kN/m)	
			X方向	Y方向
14	400	6790.1	4.23E+05	2.71E+05
13	400	5210.9	4.31E+05	2.91E+05
12	400	5200.4	4.62E+05	3.26E+05
11	400	5210.0	4.93E+05	3.50E+05
10	400	5235.9	5.19E+05	3.68E+05
9	400	5235.9	5.31E+05	3.84E+05
8	400	5253.9	5.53E+05	4.10E+05
7	400	5272.8	5.65E+05	4.27E+05
6	400	5279.0	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) 9層モデル

階数	階高 (cm)	重量 (kN)	剛性(kN/m)	
			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

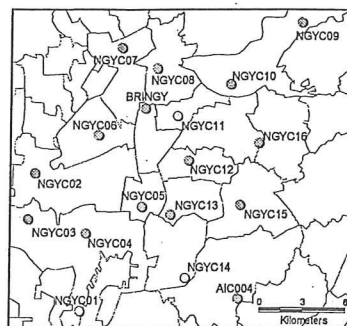
(c) 3層モデル

階数	階高 (cm)	重量 (kN)	剛性(kN/m)	
			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



(a) 15層モデル (b) 9層モデル (c) 3層モデル

図8 建物モデル軸組図



(a) 15層モデル



(b) 9層モデル



(c) 3層モデル

図10 建物高さ毎の推定した C_b の分布