強震動予測手法に関するベンチマークテスト：数値解析手法の場合（その3）

BENCHMARK TESTS FOR STRONG GROUND MOTION PREDICTION METHODS: CASE FOR NUMERICAL METHODS (PART 3)

吉村智昭 — * 1 永野正行 — * 2
久田嘉章 — * 3 青井 真 — * 4
岩城麻子 — * 5 早川 崇 — * 6
Seckin Ozgur CITAK — * 7 松島信一 — * 8
川辺秀憲 — * 9

Chiaki YOSHIMURA — * 1 Masayuki NAGANO — * 2
Yoshiaki HISADA — * 3 Shin AOI — * 4
Asako IWAKI — * 5 Takashi HAYAKAWA — * 6
Seckin Ozgur CITAK — * 7 Shinichi MATSUSHIMA — * 8
Hidenori KAWABE — * 9

キーワード：

地震動, 断層モデル, ベンチマークテスト, 数値シミュレーション, 有限差分法, 有限要素法

Keywords:

Seismic ground motion, Fault model, Benchmark test, Numerical simulation, Finite difference method, Finite element method

We performed a benchmark test for strong motion simulation methods using numerical methods (finite difference method and finite element method). We simulated four observed earthquakes considering a Kanto basin model. All the results calculated by six teams from different institutions generally show good agreement to each other. We found that the choice of grid space makes difference of allocation of soil parameters near the surface. It generates difference of waveforms.

1. はじめに

近年、構造物の設計用入力地震動を策定するための強震動予測手法が体系化されつつある¹⁾²⁾。その中で、数値解析手法（三次元有限差分法や三次元有限要素法）は平野における長周期地震動の計算などによく用いられる。ただし、これらの手法では地盤モデルや震源モデルの設定の違いにより、計算結果にかなりの違いが生じる。また、手法の特性や各プログラムの計算条件による違いも生じる。

そこで、本ベンチマークテストでは、2009年度より3年計画で、複数の機関の計算コードにより、同一の震源と地盤モデルで強震動の計算を行い比較している。2009年度は、米国でのDay et al. (2001³⁾、2003⁴⁾によるCode Testを踏襲し、半無限及び2層の平行成層地盤を対象としたステップ1、2を実施した⁵⁾。2010年度は、4層地盤、対称盆地、傾斜基盤盆地を考慮したステップ3、4を実施した⁶⁾。

本稿では、関東平野の3次元地盤モデルを用いて実地震のシミュレーションを行った2011年度の結果を報告する。ステップ5では3つの中小地震、ステップ6では1923年関東地震を対象とした。

なお、数値解析手法のほかに、理論的手法、統計的グリーン関数法のベンチマークテストも並行して行われている^{7) 8) 9) 10)}。

2. 検討モデルの概要

2.1 検討ケースと対象地震

表1にステップ5、ステップ6の検討ケースの概要を示す。ステップ5で対象とした地震は、N51では1990年神奈川県西部の地震(点震源)、N52では1990年伊豆大島近海地震(面震源)、N53では1992年東京湾の地震(点震源)である。N51はSato et al. (1998)¹¹⁾、N52とN53は山田・山中(2003)¹²⁾の震源を参照した。なお、N54は、N51で格子間隔や物性配置が参加者により異なっていたのを可能な限り統一して再計算したものである。

ステップ6のN61は、1923年関東地震を対象とした。Sato et al. (2005)¹³⁾のインバージョン結果を震源モデルとして用いた。なお、震源が正しく入力されているかの確認のため、地盤を $V_s=3.53\text{km/s}$ の半無限地盤としたN62も行った。

表1 検討モデル一覧

モデル名	ステップ5				ステップ6	
	N51(必須)	N52(任意)	N53(任意)	N54(追加)	N61(必須)	N62(追加)
対象地震	1990年神奈川県西部の地震 (Mj5.1)	1990年伊豆大島近海の地震 (Mj6.5)	1992年東京湾の地震 (Mj5.7)	格子間隔を0.3km一様にしてN51を再計算	1923年関東地震 (Mj7.9)	半無限地盤にしてN61を再計算
震源	点震源 ¹¹⁾	面震源 ¹²⁾	点震源 ¹²⁾		面震源 ¹³⁾	
地盤	関東平野の3次元モデル (長周期地震動予測地図2009年度試作版 ¹⁴⁾ より作成)					
減衰	あり					
有効振動数	0~0.33Hz (周期3.0秒以上)					
出力点	19点					

¹⁾ 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 准教授・博士 (工学)
(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)
²⁾ 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士 (工学)
³⁾ 工学院大学建築学部まちづくり学科 教授・工博
⁴⁾ 防災科学技術研究所地震・火山防災研究ユニット 主任研究員・博士 (理学)
⁵⁾ 防災科学技術研究所災害リスク研究ユニット 特別研究員・博士 (理学)
⁶⁾ 清水建設(株)技術研究所 主任研究員・工修
⁷⁾ 海洋研究開発機構地震津波・防災研究プロジェクト
特任技術研究副主任・博士 (工学)
⁸⁾ 京都大学防災研究所 准教授・博士 (工学)
⁹⁾ 京都大学原子炉実験所 助教・博士 (工学)

¹¹⁾ Assoc. Prof., Osaka Univ., Dr. Eng.
¹²⁾ Prof., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.
¹³⁾ Prof., Dept. Urban Design and Planning, Kogakuin Univ., Dr. Eng.
¹⁴⁾ Senior Researcher, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Sci.
¹⁵⁾ Research Fellow, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Sci.
¹⁶⁾ Senior Research Engineer, Shimizu Corporation, M. Eng.
¹⁷⁾ Deputy Senior Researcher, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Dr. Eng.
¹⁸⁾ Assoc. Prof., DPRI, Kyoto Univ., Dr. Eng.
¹⁹⁾ Assist. Prof., Research Reactor Inst., Kyoto Univ., Dr. Eng.

2.2 地盤モデル

地盤モデルは、地震調査研究推進本部の長周期地震動予測地図で、想定東海地震の計算に用いられた地盤モデル¹⁴⁾を修正して用いた。層境界データ (LPGM2009_tokai_tonankai.str) を各自ダウンロードし、層境界データの深さと、差分法の格子や有限要素法の要素の深さとを比較して、それぞれの格子や要素がどの層に属するか判定して物性値を割り当てた。また、各自作成する差分格子の水平位置において、層境界深さを補間する必要があるが生じるので、共通の補間プログラムを配付して、可能な限り地盤モデルに差が出ないようにした。

物性値を表2に示す。長周期地震動予測地図の物性を次のように修正した。表層の第1層は、第2層と同じ物性 ($V_s=0.5\text{km/s}$) とし、工学的地盤が露頭するとした。また、深部地盤については、第16層の下部地殻 ($V_s=3.94\text{km/s}$) より深い第17、18、19、20層は第16層と同じ物性にし、下部地殻以下は下部地殻の物性が続くとした。Q値は振動数 f (Hz) に比例とし、基準振動数は $f_{\text{ref}}=0.2\text{Hz}$ とした。

2.3 解析領域と出力点

図1に吸収ゾーンを除く計算領域 ($210\text{km} \times 270\text{km}$) と対象地震と出力点 (19点) を示す。右手系のデカルト座標で、+Xを北、+Yを東、+Zを鉛直下方にとる。必要な吸収ゾーンを各自この領域の外に設けるとした。計算領域の緯度経度の範囲は (東経、北緯) = (138.65、34.2) — (140.9646、36.6335) である。地球楕円体 (GRS-80) の北緯

表2 地盤物性値 (太字は修正部分。fは振動数(Hz))

層番号	P波速度 (km/s)	S波速度 (km/s)	密度 (g/cm ³)	Q値	備考
1	1.8	0.50	1.95	100f/f_{ref}	
2	1.8	0.50	1.95	100f/f _{ref}	
3	2.0	0.60	2.00	120f/f _{ref}	
4	2.1	0.70	2.05	140f/f _{ref}	
5	2.2	0.80	2.07	160f/f _{ref}	
6	2.3	0.90	2.10	180f/f _{ref}	
7	2.4	1.00	2.15	200f/f _{ref}	付加体
8	2.7	1.30	2.20	260f/f _{ref}	
9	3.0	1.50	2.25	300f/f _{ref}	
10	3.2	1.70	2.30	340f/f _{ref}	
11	3.5	2.00	2.35	400f/f _{ref}	
12	4.2	2.40	2.45	400f/f _{ref}	
13	5.0	2.90	2.60	400f/f _{ref}	地震基盤 (近畿)
14	5.5	3.20	2.65	400f/f _{ref}	地震基盤
15	6.0	3.53	2.70	400f/f _{ref}	
16	6.7	3.94	2.80	400f/f _{ref}	下部地殻
17	6.7	3.94	2.80	400f/f_{ref}	マントル
18	6.7	3.94	2.80	400f/f_{ref}	海洋性地殻第2層
19	6.7	3.94	2.80	400f/f_{ref}	海洋性地殻第3層
20	6.7	3.94	2.80	400f/f_{ref}	海洋性マントル

表3 計算出力点 (緯度経度は世界測地系) ○: 観測記録あり
—: 観測記録なし

出力点	AIJ-DB 観測点	観測機関	伊豆 大島	神奈 川	東京 湾	E (°)	N (°)	X (km)	Y (km)
大島	OSM	802-21	地震研	○	—	139.3614	34.7494	60.961	64.544
八幡野	YHN	802-19	地震研	○	○	139.1022	34.8686	74.182	41.030
下多賀	STG	802-20	地震研	○	○	139.0797	35.0472	93.999	38.988
久野	RNO	802-1	地震研	○	○	139.1219	35.2739	119.148	42.819
寒川	SMK	113-2	西松建設	○	○	139.3756	35.3639	129.133	65.829
長津田	NGT	803-7	東工大	○	○	139.4847	35.5128	145.653	75.734
浅川	ASK	803-2	東工大	○	○	139.2800	35.6386	159.614	57.159
飛田給	TBK	104-3	鹿島	○	○	139.5267	35.6575	161.710	79.539
清瀬	KYS	103-4	大林組	○	○	139.5347	35.7900	176.411	80.270
江ノ島	ENS	803-10	東工大	○	○	139.4783	35.2994	121.983	75.154
横須賀	YKS	501-2	NTT	○	—	139.6475	35.2200	113.169	90.502
横浜	YKH	803-4	東工大	○	○	139.6528	35.4400	137.578	90.981
川崎	KWS	803-3	東工大	○	○	139.7086	35.5108	145.437	96.047
越中島	ECJ	101-1	清水建設	○	○	139.7972	35.6622	162.234	104.086
地震研	JSK	606-2	消防研	○	○	139.7594	35.7186	168.490	100.659
浦安	UYS	807-3	早稲田大	—	—	139.9017	35.6558	161.525	113.562
千葉	CHB	606-5	消防研	○	○	140.1211	35.5661	151.570	133.472
姉崎	ANG	606-6	消防研	○	○	140.0189	35.4814	142.170	124.198
富津	FUT	606-7	消防研	○	○	139.8353	35.3442	126.945	107.539

35.5°における値を用いて、北緯1°あたり110.950km、東経1°あたり90.729kmとして、緯度経度からXY座標に変換した。出力点は、日本建築学会・デジタル強震データ集¹⁵⁾で記録の得られている地点から19点選んだ。表3に観測点の概要を示す。

2.4 格子間隔、境界処理など

格子間隔Hは、有効振動数 $f_{\text{max}}=0.33\text{Hz}$ (周期3.0秒以上) を満たすように各自設定するとした。空間4次精度の差分法では、一波長5格子必要であるので、たとえば最表層の $V_s=0.5\text{km/s}$ では、 $H=V_s/(5f_{\text{max}})=0.3\text{km}$ となる。不連続格子、可変格子が可能なプログラムは、 V_s の大きい地下部分で粗い格子間隔としてもよいとした。

境界処理については、吸収ゾーンを指定計算領域 $0 \leq X \leq 270$ 、 $0 \leq Y \leq 210$ (km) の外側に設け、モデル最外面に吸収境界を設けるとした。時間刻み0.02秒の速度波形を提出し、0.33Hzから0.4Hzに直線のスロープをもつローパスフィルターにかけた。

3. 参加チームの手法と計算条件

表4に参加チームの手法および計算条件をまとめた。参加チームは、吉村、永野、早川、Citak・松島・Graves、岩城・青井、川辺の6チームである。手法は吉村のみ三次元有限要素法で、他は三次元有限差分法である。なお、久田・松本は比較参考のため波数積分法により平行成層モデルで計算した結果を提供した。参考文献の欄に、各手法の詳細を記した論文を挙げている。

表4には、各チームの格子間隔もまとめており、後ほど議論する。なお、格子間隔の選択はチームにより異なり、永野と岩城らは不連続格子で計算可能、早川と川辺は水平固定、鉛直可変である。Citakらは一様格子である。減衰は、Citakらが振動数に対してQ値一定としているのを除き、他はすべて振動数に比例するQ値としている。

以下、紙面の都合により、N51、N54、N61、N62の結果を示す。

4. 神奈川県西部の地震 (N51、N54)

N51では、1990年8月5日の神奈川県西部の地震 (Mj5.1) をシミ

図1 解析領域、計算地点および震源 (N51、N52、N53) の位置

表 4 各参加チームの手法と計算条件

参加チーム	吉村	永野	早川	Citak, 松島, Graves	岩城・青井	川辺	久田・松本
手法	有限要素法	有限差分法					波数積分法
参考文献	Bao (1998) ¹⁶⁾	永野 (2004) ¹⁷⁾	Pitarka (1999) ¹⁸⁾	Graves (1996) ¹⁹⁾ Graves&Day (2003) ²⁰⁾	Aoi&Fujiwara (1999) ²¹⁾ 青井・藤原 (1998) ²²⁾ 青井・ほか (2004) ²³⁾	Pitarka (1999) ¹⁸⁾	久田 (1997) ²⁴⁾
N51, N52, N53 の格子間隔	要素サイズが 0.15, 0.3, 0.6, 1.2 (km)	水平0.3km、 鉛直可変 25.5km以浅で 0.3km	水平0.3km、 鉛直可変 3km以浅で0.2km	0.25km一様	0.3km一様	水平0.3km、 鉛直可変 3km以浅で0.3km 物性値を格子の 中心	(平行成層)
N54, N61 の格子間隔	同上	同上	同上	0.3km一様	同上	0.3km一様 物性値を格子位置	(平行成層)
減衰導入方法	質量比例減衰	Graves (1996) ¹⁹⁾	Graves (1996) ¹⁹⁾	Graves&Day (2003) ²⁰⁾	Graves (1996) ¹⁹⁾	Graves (1996) ¹⁹⁾	地盤速度の虚部 にQ値を導入
Q値の振動数依存	Q値は振動数に比例			Q値は一定	Q値は振動数に比例		

ュレーションした。震源は、Sato et al. (1998)¹¹⁾を参照して、点震源を設定した。表5に震源パラメータを示す（北緯・東経は世界測地系に変換）。モーメントレート関数は図2のように台形とした。

図3に岩盤サイトの計算結果の例として、STG(下多賀)のX(NS)成分とASK(浅川)のY(EW)成分の速度波形を示す。これらの岩盤地点では、実体波部分が主で表面波はほとんどなく、参加チーム間の波形はよく一致した。また、波数積分法による久田の結果もほぼ同じであり、平行成層近似がこれらの地点では有効であることがわかる。図には数値解析の有効振動数と同じ0.33Hzのローパスフィルターをかけた観測波の速度波形も示す。STGでは、最初のパルスの振幅は模擬できていないものの、波形は観測記録をあまり模擬できなかった。ASKでは、観測記録の振幅、波形ともよく模擬している。

一方、関東平野の内部に入ると、後続の表面波が卓越してきて、チームによる差がみられるようになった。図4(a)は、関東平野に少し入ったSMK(寒川)におけるN51モデルのY(EW)成分の速度波形の比較である。最初の10秒付近の実体波部分はよく一致しているが、後続波においてチーム間で差がみられる。図4(b)は、関東平野の中ほどのYKH(横浜)のX(NS)成分を示す。後続の表面波が発達しており、この部分でチーム間の差が目立つ。

原因として、参加チームにより、格子間隔が異なっていたため、表層付近の地盤のモデル化が異なってしまったことが考えられる。共通の層境界データを配布し、表層付近では推奨格子間隔を0.3kmとしたが、各チームが選択した格子間隔は前述の表4にまとめた通りとなった。すなわち、当初Citakらは0.25km一様、岩城らは0.3km一様であった。永野、川辺、早川は水平方向が0.3km一様だが深さ方向は可変で、永野は25.5km以浅で0.3km、川辺は3km以浅で0.3km、早川は3km以浅で0.2kmであった。以上のように表層付近では深さ方向の格子間隔が小さい順に、早川が0.2km、Citakらが0.25km、岩城ら、永野、川辺が0.3kmとなっていた。なお、吉村は有限要素のサイズを0.15、0.3、0.6、1.2kmと変化させており、表層付近では0.15~0.3kmである。

また、川辺は物性値の定義位置が他チームと深さ方向に半格子(0.15km)ずれた位置であった。つまり、地表面の格子には、川辺は深さが0.15kmの物性値、他のチームは地表面の物性値を採用していた。

そこでN54では、可能な限り格子間隔および物性配置を統一してN51を再計算した。Citakらと川辺が格子間隔を0.3km一様で再計算

表 5 1990 年神奈川県西部
の地震の震源パラメータ

北緯(°)	35.2133
東経(°)	139.0998
X(km)	112.426
Y(km)	40.810
深さ(km)	15.3
strike(°)	215
dip(°)	35
rake(°)	40
地震モーメント(Nm)	3.3×10^{16}

図 2 N51 の震源のモーメントレート関数

(a)STG の X(NS)成分

(b)ASK の Y(EW)成分

図 3 N51 における岩盤サイトの速度波形

した。また、川辺は格子への物性配置を他チームと同じにして再計算した（その他のチームは再計算を行わず N51 と同じ）。図 5(a)に SMK、図 5(b)に YKH の再計算結果を示す。Citak らと川辺の結果が他チームに近づいたことがわかる。

格子間隔の違いによる物性値配置の違いの例を図 6 に示す。SMK を通る東西鉛直断面の物性値配置を示す。早川の水平 0.3km×鉛直 0.2km、Citak の N51 (0.25km 一様)、Citak の N54 (0.3km 一様)、吉村の有限要素を比較した。差分格子を比較すると、深さ方向に 1 格子、水平方向に数格子の物性配置の差がみられる。格子間隔の選択により、特に表層付近で物性値配置が変わることがわかる。

図 7 では、Citak の N51 (0.25km 一様) と N54 (0.3km 一様) の結果を比較し、格子間隔の違いにより結果がどの程度違うか調べた。SMK の 20 秒弱、YKH の 30 秒程度までは、差は小さいが、それ以降の表面波が卓越する部分は差が大きいことがわかる。理由として、実体波は直下の構造のみ影響するのに対し、表面波は水平に伝播距離が長いので地盤モデルの差が蓄積しやすく、また到来方向の異なる波も混じり合うため差が出やすいと考えられる。以上より、格子間隔の選択による物性値配置の違いが計算結果の波形に違いをもたらすことがわかった。安定した結果を得るためには、特に地表付近で、薄い層のモデル化精度を上げるために深さ方向の格子間隔を小

さくするのが有効と考えられる。

なお、図 4、図 5 では平行成層モデルによる久田・松本の結果も示している。波形の最初の部分は他の数値解析手法と似ているが、表面波が卓越する後続波形が再現されていない。図には観測波形も示しているが、後続波の再現性は、数値解析手法のほうが優れており、堆積盆地において三次元の不整形性を考慮する必要性がわかる。

5. 関東地震 (N61、N62)

N61 では 1923 年関東地震のシミュレーション解析を行った。震源モデルは、Sato et al. (2005)¹³⁾ のモデルを用いた。図 8 に解析領域と震源モデルを示す。断層の大きさは 130km×70km であり、10×7 に分割されている。分割された領域の中心に点震源が与えられている。なお、70 個の点震源のうち、2 点 (図 8 の×) を除いた 68 個を用いた。Sato et al. (2005) の震源はインバージョン解析により平行成層モデルで求められたものであるが、これを三次元モデルに適用すると、2 点が相模湾の堆積層内に位置し、地震波が異常に増幅する現象が起こるのでこれを避けるためである。

Sato et al. (2005) の震源モデルの strike 方向と dip 方向のすべり関数を参加者に配布した。関数は、すべり速度が一定の 1.5 秒間の区間 10 個で表現されている。例えば、東側のアスぺリティ付近 (図

図 4 N51 における平野内部の観測点における速度波形

図 5 N54 (格子間隔、物性配置を統一した N51 の再計算) の結果

8の○)のすべり速度関数は図9のようになる。支配面積 $S=13\text{km} \times 10\text{km}$ と地盤剛性をこれに乗ずるとモーメントレート関数となる。インバージョン解析では地盤剛性 $\mu=3 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 一定で計算されているが、三次元モデルでは場所により地盤剛性が変化するので、地震モーメントが維持されるよう滑り量を調整した。地盤モデルは条件をそろえた N54 と同じモデルを用いた。

図10に計算結果の例として、JSK(東大地震研、本郷)のY(EW)成分の速度波形を示す。後続波部分で若干違いがみられるが、各チーム相互によく一致した波形が得られた。図11では、表層付近の格子間隔が 0.3km で物性配置の一致度が高いと考えられる永野、岩城ら、Citakら、川辺の結果を重ね描きしたところ、波形もよく一致していた。多くの計算地点でこの程度の良い一致度が得られたが、一部一致度の悪い地点もあった。例として図12にOSM(大島)のX(NS)成分を示す。付近に相模湾の軟弱層が広がっており、ここで発達する表面波に、地盤のモデル化の違いの影響が現れた可能性が考えられる。なお、JSK(本郷)の今村式2倍強震計の波形が復元され、EW成分は 25.6cm/s と算定されているが²⁵⁾、今回の計算波は 50cm/s と大きい。 10km 間隔の粗い震源を用いたので、観測と直接比較するためには震源を再分割して、なめらかな面震源にする必要がある。図13は、N62のJSKの結果である。 $V_s=3.53\text{km/s}$ の半無限地盤にして、各チームの震源モデルが正しいかチェックした。各チーム相互によく一致しており、各チームの震源モデルは正しく導入されており、また、計算結果において震源モデルが原因で違いが生じていないことがわかる。N54、N61でまだ残っている違いは地盤モデルによる違いと考えられる。

図6 SMKを通る東西鉛直断面における物性値配置

6. まとめ

三次元有限差分法と三次元有限要素法による計6チームが参加して、関東平野の3次元地盤モデルを考慮した1990年神奈川県西部地震、1923年関東地震等のベンチマークテストを行った。概ね各チーム相互に一致した結果が得られたが、格子間隔の違いや格子の物性値の選択方法の違いにより、地表付近の物性値配置がチーム間でやや異なり、これが計算波形、特に後続の表面波部分で差を生じた。格子間隔や物性値を統一して再計算すると一致度は高まった。表層付近の地盤のモデル化において格子間隔や格子の物性値選択方法は計算結果に影響を及ぼすので注意が必要であることが分かった。

図7 CitakらのN51(0.25km格子)とN54(0.3km格子)の比較

図8 解析領域と関東地震の震源(N61、N62)

図9 すべり速度関数の例

図 10 N61 の JSK での Y(EW) 成分の速度波形

図 12 N61 の OSM での X(NS) 成分の速度波形

図 13 N62 の JSK での Y(EW) 成分の速度波形

図 11 N61 の JSK での Y(EW) 成分の速度波形の重ね描き

なお、Citak らのみ Q 値が振動数一定で他チームと条件が異なっていたので補足する。解析条件が似た永野、岩城ら、川辺と比べ、後続波の後ろの方で若干振幅が小さくなる傾向がみられたが（例えば図 5(b) の 70 秒以降、図 12 の 100 秒以降）、それほど目立たなかった。

本稿では割愛した N52、N53 の結果について簡単に述べる。N52 では震源が浅く、東京湾周辺の地点では継続時間の長い表面波が卓越し、この部分でチーム間の差が N51 よりさらに大きく現れた。N53 は震源が深く、メカニズムにより EW 成分に単純な実体波パルスが現れてチーム間の差が小さかった。ただし、振幅は小さいが東京湾周辺の地点では後続波が現れ、この部分ではチーム間で差がみられた。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費基盤研究(B)「設計用入力地震動作成のための強震動予測手法の適用と検証」(代表:久田嘉章、平成 21-23 年度)の研究助成で行われ、日本建築学会・地盤震動小委員会及び工学院大学・総合研究所・都市減災研究センターとの連携のもと行われた。佐藤俊明博士、山田伸之博士、小林励司博士に震源データを提供して頂いた。大学院生の松本俊明君(現篠塚研究所)に計算に参加頂いた。Robert W. Graves 博士にプログラムを提供して頂いた。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本建築学会：最新の地盤震動研究を活かした強震波形の作成法、2009。
- 2) 日本建築学会：地震荷重・性能設計への展望、「第 II 編 地震動評価の現状」、2008。
- 3) Day, S. M., J. Bielak, D. Dreger, S. Larsen, R. Graves, A. Pitarka, K. B. Olsen, Tests of 3D Elastodynamic Codes, Final Report to Pacific Earthquake Engineering Research Center, Lifelines Program TASK 1A01, pp.1-24, 2001.
- 4) Day, S. M., J. Bielak, D. Dreger, S. Larsen, R. Graves, A. Pitarka, K. B. Olsen, Tests of 3D Elastodynamic Codes, Final Report to Pacific Earthquake Engineering Research Center, Lifelines Program TASK 1A02, pp.1-32, 2003.
- 5) 吉村智昭・他：強震動予測手法に関するベンチマークテスト：数値解析手法の場合(その 1)、日本建築学会技術報告集、第 17 巻、第 35 号、pp. 67-72、2011. 2。
- 6) 吉村智昭・他：強震動予測手法に関するベンチマークテスト：数値解析手法の場合(その 2)、日本建築学会技術報告集、第 18 巻、第 38 号、pp. 95-100、2012. 2。

- 7) 久田嘉章・他：強震動予測手法に関するベンチマークテスト：理論的手法の場合(その 1)、日本建築学会技術報告集、第 17 巻、第 35 号、pp. 43-48、2011. 2。
- 8) 久田嘉章・他：強震動予測手法に関するベンチマークテスト：理論的手法の場合(その 2)、日本建築学会技術報告集、第 18 巻、第 38 号、pp. 101-106、2012. 2。
- 9) 加藤研一・他：強震動予測手法に関するベンチマークテスト：統計的グリーン関数法の場合(その 1)、日本建築学会技術報告集、第 17 巻、第 35 号、pp. 49-54、2011. 2。
- 10) 加藤研一・他：強震動予測手法に関するベンチマークテスト：統計的グリーン関数法の場合(その 2)、日本建築学会技術報告集、第 18 巻、第 38 号、pp. 67-72、2012. 2。
- 11) Sato, T. et al.: Estimates of regional and local strong motions during the great 1923 Kanto, Japan earthquakes(Ms 8.2). Part 1: Source estimation of a calibration event and modeling of wave propagation paths, Bull. Seismo. Soc. Am., Vol.88, No.1, pp.183-205, 1998.
- 12) 山田伸之・山中浩明、関東平野における地下構造モデルの比較のための中規模地震の地震動シミュレーション、地震 2、Vol. 56, pp. 111-123, 2003.
- 13) Sato, H. et al.: Earthquake source fault beneath Tokyo, Science, 309, pp. 462-464, 2005.
- 14) 地震調査推進本部 HP:http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_choshuki/index.htm
- 15) 日本建築学会編：日本建築学会・デジタル強震データ集、1996. 3。
- 16) Bao, H., J. Bielak, O. Ghattas, L. F. Kallivokas, D. R. O'Hallaron, J. R. Shewchuk, and J. Xu: Large-scale simulation of elastic wave propagation in heterogeneous media on parallel computers, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 152, pp.85-102, 1998.
- 17) 永野正行：グリッド間隔と時間刻みを可変とする 3 次元差分法を用いた 2000 年鳥取県西部地震時の神戸地域における強震動評価、日本建築学会構造系論文集、第 580 号、pp. 43-50、2004. 6。
- 18) Pitarka, A.: 3D Elastic Finite-Difference Modeling of Seismic Motion Using Staggered Grids with Nonuniform Spacing, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.89, No.1, pp.54-68, February 1999.
- 19) Graves, R. W., Simulating Seismic Wave Propagation in 3D Elastic Media Using Staggered-Grid Finite Differences, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 86, No. 4, pp. 1091-1106, August 1996.
- 20) Graves, R. W. and S. M. Day: Stability and Accuracy Analysis of Coarse-Grain Viscoelastic Simulations, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93, No. 1, pp. 283-300, February 2003.
- 21) Aoi, S. and H. Fujiwara: 3D finite difference method using discontinuous grids, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 89, pp. 918-930, 1999.
- 22) 青井真・藤原広行：不連続格子を用いた 4 次精度差分法による波形合成、第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集、Vol. 1, pp. 879-884, 1998.
- 23) 青井真・早川俊彦・藤原広行：地震動シミュレータ：GMS、物理探査、Vol. 57, No. 6, pp. 651-666, 2004.
- 24) 久田嘉章：成層地盤における正規モード解及びグリーン関数の効率的な計算法、日本建築学会構造系論文集、第 501 号、pp. 49-56、1997. 11。
- 25) 横田治彦・片岡俊一・田中貞二・吉沢静代：1923 年関東地震のやや長周期地震動-今村式 2 倍強震計記録による推定-、日本建築学会構造系論文報告集、401、35-45、1989。

[2012 年 6 月 20 日原稿受理 2012 年 8 月 7 日採用決定]