

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）

BENCHMARK TESTS FOR STRONG GROUND MOTION PREDICTION METHODS: CASE FOR NUMERICAL METHODS (PART 1)

吉村智昭 — * 1 永野正行 ————— * 2
久田嘉章 — * 3 青井 真 ————— * 4
早川 崇 — * 5 Seckin Ozgur CITAK — * 6
松島信一 — * 7 大西良広 ————— * 8

Chiaki YOSHIMURA — * 1 Masayuki NAGANO — * 2
Yoshiaki HISADA — * 3 Shin AOI — * 4
Takashi HAYAKAWA — * 5 Seckin Ozgur CITAK — * 6
Shinichi MATSUSHIMA — * 7 Yoshihiro ONISHI — * 8

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

We performed a benchmark test for the strong motion simulation methods using numerical methods (finite difference method and finite element method). All the results calculated by six teams from different institutions generally show good agreement to each other. We found minor differences are generated by the choice of property on the grid just at the boundary of layers. The performance of absorbing zone makes differences in terms of artificial reflection waves from the model boundary.

1. はじめに

近年、断層モデルを考慮した強震動予測手法により、建設地点の地域性を反映した「サイト波」を作成し、超高層ビルや免震建築物の時刻歴応答解析における設計用入力地震動として用いることが行われている¹⁾。また、原子力分野においても耐震設計指針²⁾が改定され、断層モデルによる検討が義務づけられた。

このような背景から、日本建築学会からも、断層モデルによる地震波形の作成法をまとめた出版物が刊行されている³⁾⁴⁾。それらにもある通り、地震波は短周期から長周期まで広帯域の成分を有しており、短周期、長周期それぞれに適した手法で地震波形を作成し、それらを足し合わせてハイブリッド波を作成することがよく行われる。短周期では経験的グリーン関数法や統計的グリーン関数法が用いられ、長周期では数値解析手法（三次元有限差分法や三次元有限要素法）がよく用いられる。成層地盤を仮定できる場合は、波数積分法や薄層法などの理論的手法も用いられる。

数値解析手法は、関東、濃尾、大阪平野などの不整形な堆積盆地構造を忠実にモデル化し、海溝型巨大地震で発生が危惧されている長周期地震動なども精度良く計算できる手法である。ただし、これらの手法では、地盤モデルや震源モデルの違いにより、計算結果がかなり異なる。また、それらを同一にしても、手法の特性による違いや各プログラムの計算条件による違いもある。

そこで、本研究では、複数の機関より6チームが参加し、それぞれが保有する数値解析手法のプログラムを用いて、同一の問題を解くベンチマークテストを行った。単純な地盤モデルと震源モデルからスタートし、より複雑なモデルに変化させ、手法やプログラムに

より、結果がどの程度一致するか調べた。なお、統計的グリーン関数法、理論的手法のベンチマークも別途検討が行われている⁵⁾⁶⁾。

2. 検討モデルの全体概要

検討モデルは、Day et al. (2001⁷⁾, 2003⁸⁾)によるCode Testをほぼ踏襲した。表1に示すように、ステップ1(モデルN11, N12, N13)、及びステップ2(N21, N22)の計5つのモデルを計算した。ステップ1では、点震源を考慮し、N11では一様地盤による計算、N12, N13では2層地盤による計算を行った。N13のみ減衰を考慮し、他のモデルでは減衰なし($Q=\infty$)とした。ステップ2では、面震源を考慮し、N21では横ずれ断層を、N22では逆断層の計算を行った。いずれも2層地盤で減衰なし($Q=\infty$)とした。すべてのモデルにおいて、0～5Hzの有効振動数を確保できるよう、格子間隔や要素サイズを調節するものとした。

表1 検討モデル一覧

モデル名	ステップ1			ステップ2	
	N11	N12	N13	N21	N22
地盤	一様地盤	2層地盤		2層地盤	
減衰(Q値)	なし		あり	なし	
震源	点震源			横ずれ断層	逆断層
有効振動数	0～5Hz			0～5Hz	
出力点	-10～10km(1km間隔の21点)			-10～10km(21点)	
参考モデル	UHS. 1	LOH. 1	LOH. 3*	LOH. 2	LOH. 4*
Day他2001	UHS. 2				
Day他2003*					

¹⁾ 大成建設技術センター 主任研究員・博士(工学)
(〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)
²⁾ 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)
³⁾ 工学院大学建築学科 教授・工博
⁴⁾ 防災科学技術研究所地震研究部 主任研究員・博士(理学)

⁵⁾ 清水建設技術研究所 主任研究員・工修
⁶⁾ 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)
⁷⁾ 京都大学防災研究所 准教授・博士(工学)
⁸⁾ 地域地盤環境研究所地震防災グループ 主任研究員・博士(工学)

¹⁾ Senior Research Engineer, Taisei Corporation, Dr. Eng.
²⁾ Prof., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.
³⁾ Prof., Kogakuin Univ., Dr. Eng.
⁴⁾ Senior Researcher, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Sci.
⁵⁾ Senior Research Engineer, Shimizu Corporation, M. Eng.
⁶⁾ Deputy Senior Researcher, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Dr. Eng.
⁷⁾ Assoc. Prof., DPRI, Kyoto Univ., Dr. Eng.
⁸⁾ Senior Researcher, Geo-Research Institute, Dr. Eng.

3. ステップ1の出題

3.1 N11 モデル(点震源、一様地盤、減衰なし)

計算領域は、図1に示すように右手系のデカルト座標で、+Xを北、+Yを東、+Zを鉛直下方にとり、境界処理に必要な部分を除いて、30km×30km×17km ($-15 \leq X \leq 15$, $-15 \leq Y \leq 15$, $-17 \leq Z \leq 0$: 単位 km) とした(図1では、4分の1を示している)。一様地盤とし、物性値を表2のように与える。減衰なし ($Q_s=Q_p=\infty$) とする。

震源は、中央の深さ 2 km、即ち $(X, Y, Z)=(0, 0, 2)$ (km) にダブルカップル点震源を配置する。モーメント・テンソル⁹⁾の非ゼロ成分は M_{xy} ($=M_{yx}$) のみとし、絶対値は $M_0=10^{18}$ Nm とする。

モーメント・レートの時刻歴関数 $\dot{M}(t)$ は(1)式で与える(図2a)。

$$\dot{M}(t) = M_0 \cdot \frac{t}{T^2} \cdot e^{-\frac{t}{T}}, \quad T=0.1 \text{ (s)} \quad \cdots (1)$$

ここで、 t は時刻 (s)、 T は定数 ($=0.1$ s)、 e は自然対数の底である。ちなみに(1)式のフーリエ変換は次式となる(図3)。

$$\dot{M}(\omega) = \frac{M_0}{(1-i\omega T)^2} \quad \cdots (2)$$

モーメントの時刻歴関数 $M(t)$ は(3)式となる(図2b)。

$$M(t) = M_0 \cdot \left(1 - \left(1 + \frac{t}{T}\right) \cdot e^{-\frac{t}{T}}\right), \quad T=0.1 \text{ (s)} \quad \cdots (3)$$

計算結果は、時間刻み 0.01 秒の速度の時刻歴波形(単位 m/s)を、自由表面上のベクトル $(X, Y, Z)=(0.6, 0.8, 0)$ (km) に沿う 1 km 間隔の 21 点 ($-010 \sim +010$) について提出するとした。提出成分は Radial(R)、Transverse(T)、UD(Up を+, Down を-)とした。X、Y 成分から R、T 成分への変換式は(4)(5)式の通りである。

-010~-010 点 ($X<0, Y<0$) の変換式:

$$R = -0.6X - 0.8Y, \quad T = +0.8X - 0.6Y \quad \cdots (4)$$

+000~-010 点 ($X \geq 0, Y \geq 0$) の変換式:

$$R = +0.6X + 0.8Y, \quad T = -0.8X + 0.6Y \quad \cdots (5)$$

グリッドサイズは、有効振動数を 0~5 Hz を確保するように決める。空間 4 次精度差分法の場合、1 波長 6 グリッド必要とすると、100m で有効振動数は $f=V_s/(6H)=3464/(6 \cdot 100)=5.8$ Hz となる。

境界処理は、モデルの側面と底面に吸収境界を設けるとし、吸収ゾーン(反射波を低減するためにモデル周辺に設ける高減衰ゾーン。図1の Absorbing Zone。)を用いる場合は $X=\pm 15$ km、 $Y=\pm 15$ km、 $Z=17$ km

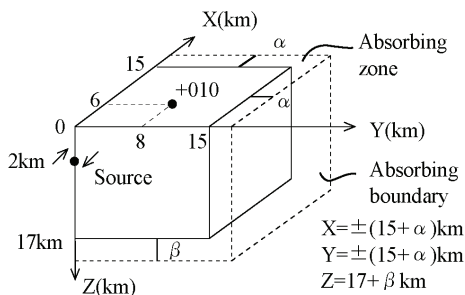


図1 一様地盤モデルの概要 (1/4 対称部分)

表2 一様地盤の物性値

	P波速度	S波速度	質量密度	Q 値	
	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ρ (kg/m ³)	Q_p	Q_s
半無限媒質	6000	3464	2700	∞	∞

の外側に設けるとした。提出された結果は、図4に示す 5 Hz のローパスフィルターにかけた。

3.2 N12 モデル(点震源、2層地盤、減衰なし)

図5に示す2層地盤を考慮する。表層 1km に $V_s=2000$ m/s の層が加わっている。表3に物性値を示す。震源は N11 モデルと同じとする。

表層は地震波速度が小さく、同じ振動数でも波長が短くなるので、グリッドサイズを小さくする必要がある。1層目と2層目でグリッドサイズを変える可変グリッドとするのを推奨し、1層目を 50m、2層目を 100m とするのを推奨値とした。

3.3 N13 モデル(点震源、2層地盤、減衰あり)

N12 モデルに減衰を導入したモデルである。表4に物性値を示す。 $Q_s=Q_p$ とし、 Q 値は振動数 (f) の 1 乗に比例するとした。 $f=1$ Hz で 40 と 70 になるようにした (ほぼ $Q_s=0.02V_s$)。

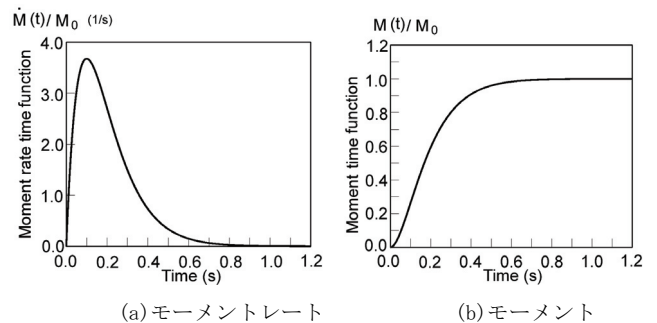


図2 モーメント・レートとモーメントの時刻歴関数 (M_0 で基準化)

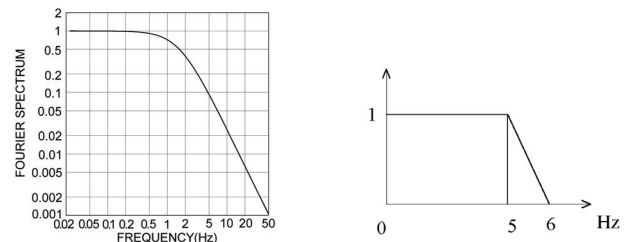


図3 モーメント・レートの時刻歴関数のフーリエ変換

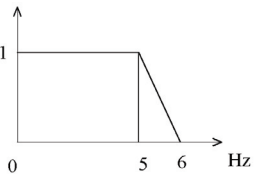


図4 ローパスフィルターの時刻歴関数のフーリエ変換

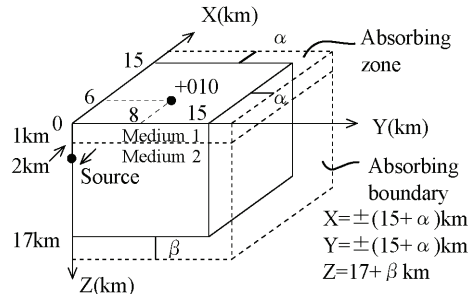


図5 2層地盤モデルの概要 (1/4 対称部分)

表3 2層地盤の物性値

層厚 D (m)	P波速度 V_p (m/s)	S波速度 V_s (m/s)	質量密度 ρ (kg/m ³)	Q 値	
	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ρ (kg/m ³)	Q_p	Q_s
1層目	1000	4000	2000	2600	∞
2層目(半無限)	∞	6000	3464	2700	∞

表 4 2 層地盤 (Q 値あり) の物性値

	層厚 D (m)	P波速度 Vp (m/s)	S波速度 Vs (m/s)	質量密度 ρ (kg/m ³)	Q 値	
					Qp	Qs
1層目	1000	4000	2000	2600	40f ^{1.0}	40f ^{1.0}
2層目(半無限)	∞	6000	3464	2700	70f ^{1.0}	70f ^{1.0}

4. 各参加チームの手法と計算条件

表 5 に各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、青井、永野、吉村、早川、大西、Citak らの 6 チームである。手法は、吉村のみ三次元有限要素法であり、他は三次元有限差分法である。参考文献の欄に各手法の詳細を記した文献を挙げている。

解析領域の欄には、吸収ゾーンを含む解析領域を示す。出題の領域は $-15\text{km} \leq X \leq 15\text{km}$ 、 $-15\text{km} \leq Y \leq 15\text{km}$ 、 $0 \leq Z \leq 17\text{km}$ である。吉村を除いて出題の領域の外に 1~6km の吸収ゾーンを設けている。グリッド間隔の欄に、2 層地盤 (N12、N13) と一様地盤 (N11) で用いられたグリッド間隔を示す (N11 は 2 層地盤の基盤と同じ物性値)。2 層地盤では、Citak らは一様グリッド、早川と大西は鉛直方向に可変で、表層が狭く基盤は広いグリッド、その他は水平・鉛直方向とも可変のグリッドを採用している。有効振動数は各チームとも規定の 0~5Hz を満たしているとしている。時間刻みは、0.002~0.005s である。

震源関数は、早川のみ三角形の重ね合わせで表現しており、他は連続関数を用いている。差分法では、コードにより応力テンソルのグリッド位置が異なるが、各チームとも作用点周りの複数の応力テンソルを組み合わせて、正確な作用中心が表の点震源位置の値となっている。吉村の有限要素法では最寄りの四面体の重心である。自由地表面の導入は、有限要素法では定式上自動的に入るが、差分法では zero-stress formulation (地表の応力の法線成分ゼロ) で導入している。面震源 (後述 6 章参照) の分割サイズも示す。減衰は多くのチームが Graves(1996)¹⁶⁾ に従い、吉村は質量比例減衰とし、Q 値は振動数 f の 1 乗に比例する。Citak らのみ Graves & Day (2003)¹⁷⁾ の方法で、f に対して一定の Q を導入している。

差分法では格子点に離散化されるため、表層 (1 層目) と基盤 (2 層目) の境界 (Z=1km) 上の格子に、表層と基盤のどちらの物性値を入れるか問題となる。青井は表層の物性値、永野と Citak らは表層と基

盤の平均値、早川と大西は基盤の物性値を与えた。吉村は有限要素法なので、上下の有限要素にそれぞれの物性値を振り分けている。物性値の付与を問題に忠実にできる点は有限要素法の利点である。

5. ステップ 1 の結果

図 6 に N11 モデルの結果を示す。図 1 で +010 と示す、座標 (X, Y, Z) = (6, 8, 0) (km) の地表点における速度波形を示す。震央距離は 10km、震源距離は 10.2km である。Radial 成分、Transverse 成分、UD 成分について、6 チームの結果を比較した。久田 (1997)¹⁸⁾ による波数積分法の理論値も比較した。一様媒質で点震源であるため、非常に単純な波形となっており、Radial 成分の 1.7 秒には P 波が、Transverse 成分の 2.9 秒には S 波が認められる。6 チームのプログラムより、ほぼ同じ波形が得られていることがわかる。図 7 では、さらに厳密に比較するために、これらを重ね描きした。振幅、位相ともすべてのチームの結果はよく一致していることがわかる。

図 8 に N12 モデルの結果を示す。同じく、+010 点の速度波形を示す。2 層地盤になるだけで、かなり波形は複雑になるが、各チームによる波形はほぼ同じである。図 9 に Radial 成分を拡大して重ね描きした。波の形状、振幅は各チームとも一致しているが、わずかな位相のずれがみられる。波形の先頭は全チームとも位相が一致しているが、時間の経過とともにパルスの到達時刻が早くなる傾向が大西にみられた。例えば、理論波 (久田) の 4.57 秒のピークに対し、青井 0.02 秒、永野 0.01 秒、吉村 0.01 秒、早川 0.07 秒、大西 0.12 秒、Citak 0.05 秒、到達が早い。大西以外では早川がこれに次ぐ。

原因として、大西、早川は表層と基盤の境界に位置する格子に、基盤の物性値を与えているため、地震波の伝播速度がわずかに早くなっていることが考えられる。そこで、図 10 に、大西において、層境界格子の物性値を表層の値にして再計算した結果を示す。波形の山谷の到達時刻と形状が理論波 (久田) に近づき改善されたものの、今度は逆に到達時刻が徐々に遅くなる傾向がみられ、大西の手法では、表層と基盤の中間の値が適するようである。以上、地層境界付近での物性値の付与の仕方に注意が必要であることがわかる。

図 11 に N13 モデルの結果を示す。+010 点における Radial 成分を重ね合わせたものを示す。N13 モデルは N12 モデルに減衰を導入し

表 5 各参加チームの手法と計算条件

参加チーム	青井	永野	吉村	早川	大西	Citak, 松島, Graves	
手法	三次元有限差分法	三次元有限差分法	三次元有限要素法	三次元有限差分法	三次元有限差分法	三次元有限差分法	
作成者	青井	永野	CMU/大成	Pitarka/清水	香川・大西	Graves	
参考文献	Aoi&Fujiwara (1999) ¹⁰⁾ 青井・藤原 (1998) ¹¹⁾ 青井・ほか (2004) ¹²⁾	永野 (2004) ¹³⁾	Bao (1998) ¹⁴⁾	Pitarka (1999) ¹⁵⁾	Graves (1996) ¹⁶⁾ Pitarka (1999) ¹⁵⁾	Graves (1996) ¹⁶⁾ Graves&Day (2003) ¹⁷⁾	
解析領域 水平 上下 () は吸収ゾーンの幅	±17km (2km) 23km (5km)	±17 (2) 19 (2) ステップ 1	±21 (6) 23 (6) ステップ 2	±15km (0km) 17km (0km)	±17 (2) ±16 (1) 19 (2) 18 (1) 一様地盤 2層地盤	±17.5km (2.5km) 19.6km (2.6km)	±17km (2km) 19km (2km)
グリッド 2層地盤表層 2層地盤基盤 間隔 一様地盤 (N11)	100/3m 100m 2層地盤とグリッド 共用	50m 100m 100m	100/3m 200/3m 200/3m	50m 水平50m, 鉛直100m 100m	50m 水平50m, 鉛直100m 100m	50m 50m 100m	
有効振動数	0～5Hz	0～5Hz	0～5.2Hz	0～5Hz	0～5Hz	0～7Hz	
時間刻み	0.0025s	0.005s (一様地盤) 0.004s (2層地盤)	0.002s	0.005s	0.005s	0.005s (一様地盤) 0.0025s (2層地盤)	
震源関数	連続関数	連続関数	連続関数	三角形重ね合わせ	連続関数	連続関数	
点震源位置 (m)	(0, 0, 2000)	(0, 0, 2000)	(-17, -33, 1983)	(0, 0, 2000)	(0, 0, 1900) (N11) (0, 0, 2000) (N12, 13)	(0, 0, 2000)	
面震源の分割 (m)	100m	50m	200/3m	100m	100m	50m	
減衰の導入法	Graves (1996)	Graves (1996)	質量比例減衰	Graves (1996)	Graves (1996)	Graves & Day (2003)	
表層と基盤の境界 (Z=1km) の格子の物性	表層の物性値	基盤と表層の平均 値	境界の上下の有限 要素に各物性値	基盤の物性値	基盤の物性値	基盤と表層の平均値	

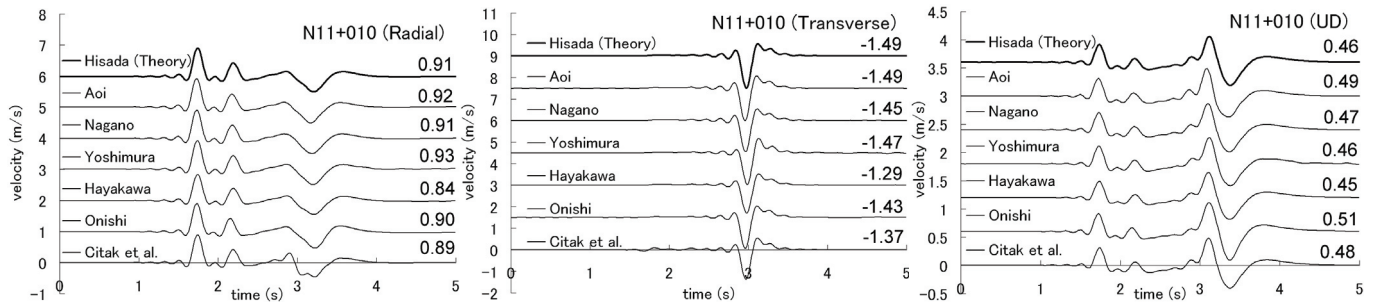


図6 N11モデルの+010点における速度波形（数字は最大振幅）

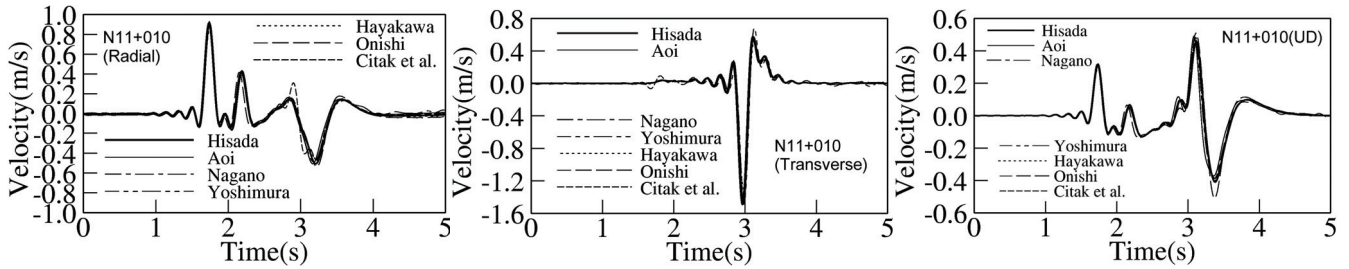


図7 N11モデルの+010点における速度波形（重ね描き）

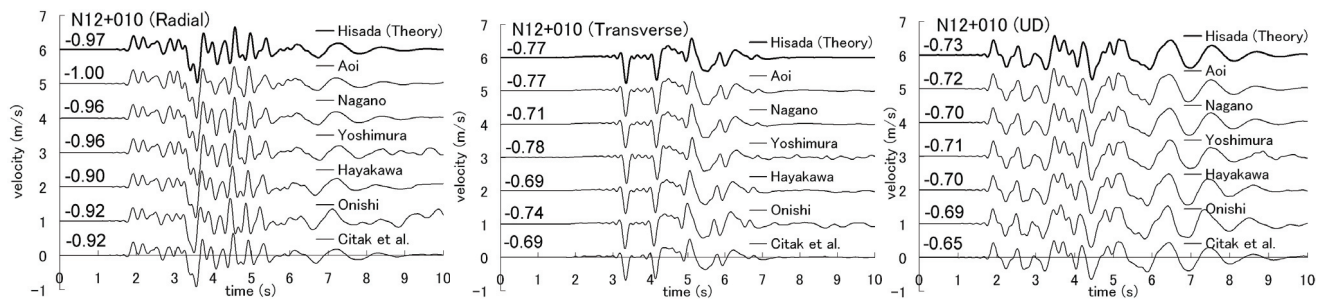


図8 N12モデルの+010点における速度波形（数字は最大振幅）

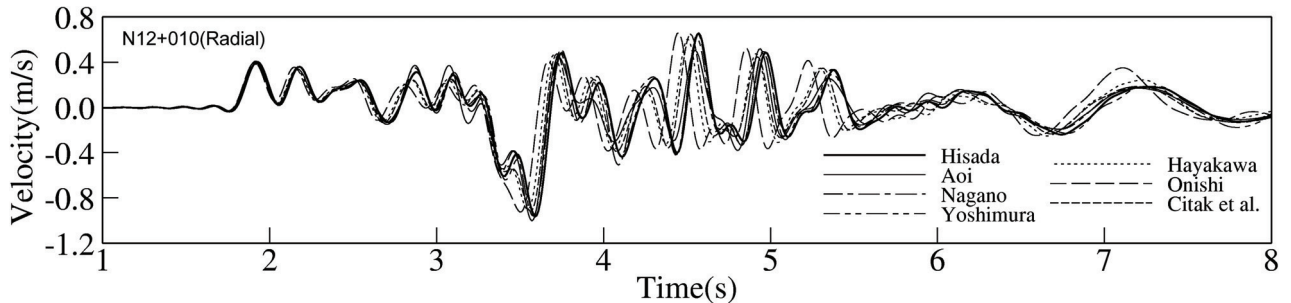


図9 N12モデルの+010点における速度波形（拡大）

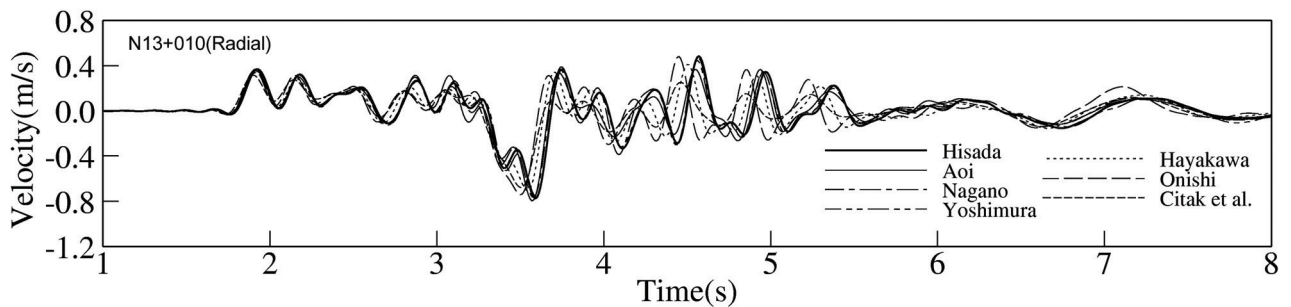


図11 N13モデルの+010点における速度波形（拡大）

たモデルであり、図9のRadial成分の図と比較するとわかるように、波形はほぼ同じであるが、地盤減衰により振幅が8割程度になっている。減衰が導入されても、各チーム間の振幅、位相はよく一致しており、減衰が各プログラムで正しく導入されているのがわかる。なお、Citakらのみ、振動数 f に対して一定の Q 値が導入されており、4～5秒付近で顕著であるが、他チームより振幅が小さい。

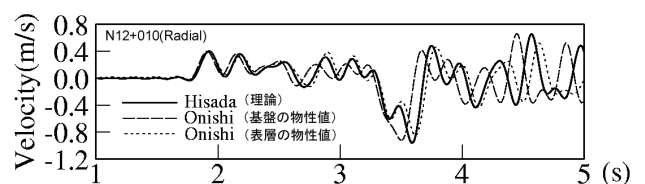


図10 大西による層境界格子の物性値による影響の検討

6. ステップ2の出題

6.1 N21 モデル (横ずれ断層)

図 12 に示すように、鉛直右横ずれ断層を考慮する。地盤の物性値は N12 モデル(表 3) と同じである。断層面の基準点は (0, 0, 2) (km)、断層長さ 8km、断層幅 4km、strike=90°、dip=90°、rake=180° である。破壊伝播様式は、破壊開始点 $H(H_x, H_y, H_z)=(0, 1, 4)$ (km) から同心円状に破壊伝播速度 $V_{rup}=3\text{km/s}$ で破壊が伝播するとした。

断層面上の点 (X, Y, Z) におけるすべり関数 $S(X, Y, Z, t)$ を (6) 式で与える。単位 m で、 t は時刻 (秒) である。

$$S(X, Y, Z, t) = S_0 \left[1 - \left(1 + \frac{\tau}{T} \right) e^{-\frac{\tau}{T}} \right] \quad (\tau \geq 0), \quad \dots(6)$$

$$S(X, Y, Z, t) = 0 \quad (\tau < 0)$$

ここで τ は破壊フロントが到達する時刻であり、(7) (8) 式で与える。

$$\tau = t - \xi / V_{rup} \quad \dots(7)$$

$$\xi = \sqrt{(X - H_x)^2 + (Y - H_y)^2 + (Z - H_z)^2} \quad \dots(8)$$

ここで定数 S_0 、 T を以下のように定める。

$$S_0 = 1(\text{m}), T = 0.1(\text{s}) \quad \dots(9)$$

ちなみにすべり速度関数は (10) 式となる。

$$\dot{S}(X, Y, Z, t) = S_0 \left[\frac{\tau}{T^2} e^{-\frac{\tau}{T}} \right] \quad (\tau \geq 0), \quad \dots(10)$$

$$\dot{S}(X, Y, Z, t) = 0 \quad (\tau < 0)$$

(6)、(10) 式を S_0 で基準化した関数形は、図 2b、図 2a と同じである。

なお、差分法、有限要素法では、面震源を離散化する必要があるが、連続破壊を模擬できるように離散点をなるべく密に置くとした。

6.2 N22 モデル (逆断層)

図 13 に示す逆断層を考慮する。地盤の物性値は N12 モデル(表 3) と同じである。断層長さは 6km、断層幅は 6km であり、断層面の基準点は①である。strike=115°、dip=40°、rake=70° である。破壊伝播様式は、破壊開始点 $H(H_x, H_y, H_z)=(0, 0, 6)$ (km) から同心円状に破壊が破壊伝播速度 $V_{rup}=3\text{km/s}$ で伝播するとした。すべり関数は N21 モデルと同じである。

7. ステップ2の結果

N21 モデルは広がりを持つ面震源であり、数値解析手法ではこれを複数の点震源で近似して離散的な格子点上に配分する必要がある。表 5 に示したように、各チームは、グリッドサイズと同程度の 50~100m 四方の小断層に分割し、各小断層を点震源で表現した。破壊伝播に伴う時間遅れを考慮して破壊させた。

図 14 に N21 モデルの結果を示す。これまでと同様の +010 点 (6, 8, 0) (km) のほかに、+002 点 (1.2, 1.6, 0)、-010 点 (-6, -8, 0) における Transverse 成分の速度波形を示す。+010 点は破壊開始点からみて、破壊進行方向にあり、Directivity 効果 (破壊の進行方向で地震波が同じ位相で重なり地震動が大きくなる現象) が現れている。+002 点の波形と比べると、周期が長いパルスが現れているのがわかる。一方、-010 点では破壊伝播の後方にあり、振幅が小さい。

各チームとも、+010、+002、-010 点において、理論波形と振幅、位相ともよく一致した波形が得られている。面震源の連続破壊を表現するには、小断層サイズ dx (km) が破壊フロントの波長 λ (km) より

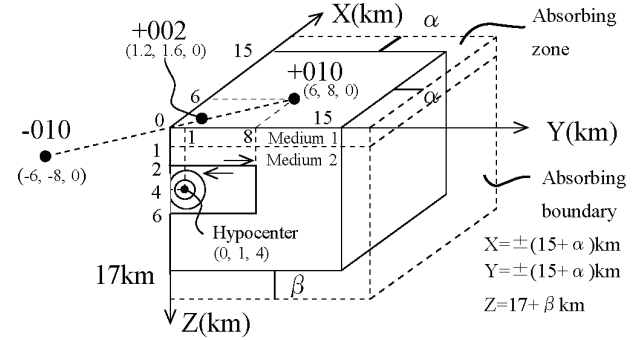


図 12 N21 モデルの概要 (1/4 対称部分)

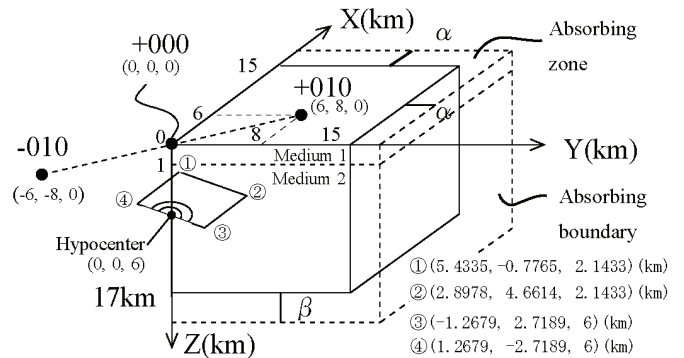


図 13 N22 モデルの概要 (1/4 対称部分)

十分小さい必要がある。 $\lambda = V_{rup}/f = 3/5 = 0.6\text{km}$ (f は有効振動数 5Hz) であり、また各チームの dx は表 5 の通り 50~100m であるので、 $dx \ll \lambda$ となっており、連続破壊が十分表現できていると考えられる。

なお、+010 点の 8 秒以降の部分や、+002、-010 点の 10 秒以降の部分では、理論波にみられない波形の乱れが、程度の差があるが、各チームともみられる。これはモデル境界からの人工的な反射波だと考えられる。N21 モデルでは面断層が +Y 側のモデル境界に近く、境界からの人工的な反射波が特に出やすい条件である。数値解析手法では、吸収ゾーンを設置したり解析領域を大きめにとったりして、反射波の影響をなるべく小さくする配慮が必要である。なお、早川は当初吸収ゾーンの減衰を $Q_s = Q_p = 25$ として、内部計算領域と比べ非常に強い吸収特性を付与していたが、大きな反射波がみられたため、無限衰 ($Q_s = Q_p = \infty$) にした結果を採用した。図 15 に、早川による N21 モデルの -010 点における $Q_s = Q_p = 25$ と ∞ の場合の比較を示す。以上のように、計算領域と吸収ゾーンの境界で急激に減衰特性を変化させると、反射波が生じるので注意が必要であることもわかった。

図 16 に N22 モデルの結果を示す。+010 点 (6, 8, 0) (km) のほかに、+000 点 (0, 0, 0)、-010 点 (-6, -8, 0) の Transverse 成分の速度波形を示す。破壊の進行側の +010 点では 0.46m/s 程度の大きな振幅である。+010 点、+000 点では、各チームの波形はよく一致している。一方、破壊の背後の -010 点では 0.013m/s 程度のわずかな振幅である。8 秒付近から相対的に人工的な反射波が目立っている。

8. まとめ

強震動予測手法において、周期 1~2 秒以上の長周期成分の計算によく用いられる数値解析手法 (三次元有限差分法、三次元有限要素法) のベンチマークテストを実施した。6 チームのプログラムを比

較し、実用上ほぼ同等の結果が得られることを確認した。なお、詳細にみると、差分法で層境界上に格子が位置する場合、この格子に上の層、下の層または平均のうちの物性値を与えるかで、波形がわずかに異なった。また、断層がモデル境界に近いケースでは、境界からの反射波がみられ、吸収ゾーンによる反射波の低減が重要であることがわかった。吸収ゾーンの性能の定量的な検討は今後の課題としたい。なお、全ての結果はホームページ¹⁹⁾に公開されている。

今回は一様地盤と2層地盤を対象としたが、今後、4層地盤や不整形地盤を対象にベンチマークテストを実施する予定である。

謝辞

本プロジェクトは文科省・科研費・基盤研究 (B)「設計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(主査: 加藤研一)及び工学院大学・総合研究所・都市減災研究センター(代表: 久田嘉章)との連携のもと行われた。Robert W. Graves 博士にプログラムを提供して頂いた。

参考文献

- 1) 日本建築センター: 時刻歴応答解析建築物性能評価業務方法書 (BR 構-02-02), 平成 19 年 6 月 20 日, 2007.
- 2) 原子力安全委員会: 発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針, 平成 18 年 9 月 19 日, 2006.
- 3) 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.
- 4) 日本建築学会: 地震荷重一性能設計への展望, 「第 II 編 地震動評価の現状」, 2008.
- 5) 久田嘉章ほか: 強震動予測手法に関するベンチマークテスト (その 1), 日本地震学会秋季大会, A12-8, 2009.
- 6) 久田嘉章ほか: 強震動予測手法に関するベンチマークテスト (その 2), 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 予原集, Disc2, SCG081-13, 2010.
- 7) 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.
- 8) 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.

- 9) Aki, K. and P. G. Richards: Quantitative Seismology Second Edition, p.50, University Science Books, 2002.
- 10) Aoi, S. and H. Fujiwara: 3-D finite difference method using discontinuous grids, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 89, pp. 918-930, 1999.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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
- 14) 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.
- 15) Pitarka, A., 3D Elastic Finite-Differences Modeling of Seismic Motion Using Staggered Grids with Nonuniform Spacing, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.89, No.1, pp.54-68, 1999.
- 16) Graves, R., 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
- 17) Graves, R. and S. 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
- 18) 久田嘉章: 成層地盤における正規モード解およ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.
- 19) ベンチマーク HP: <http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/benchmark/index.htm>

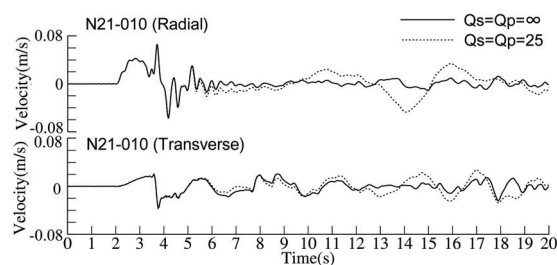


図 15 早川による吸収ゾーンの Q 値の影響の比較

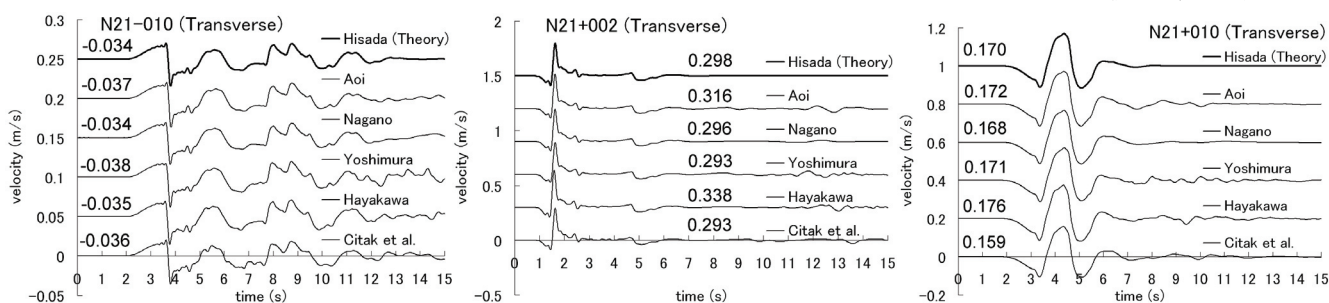


図 14 N21 モデルの-010, +002, +010 点における速度波形 (数字は最大振幅)

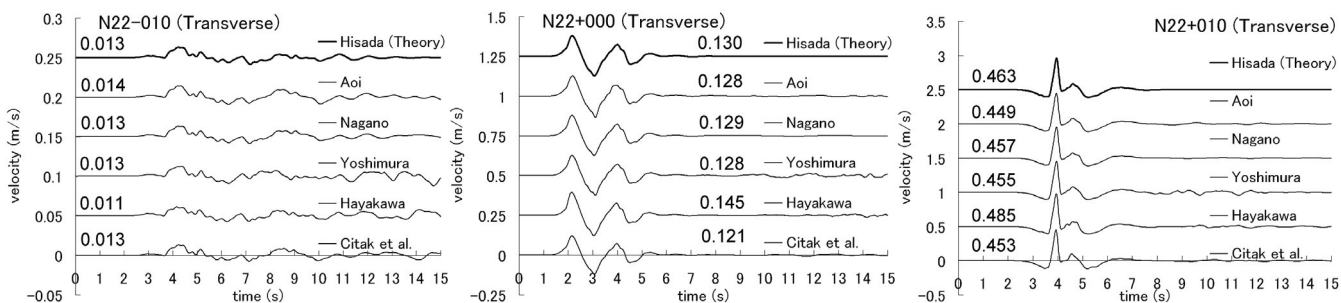


図 16 N22 モデルの-010, +000, +010 点における速度波形 (数字は最大振幅)

[2010 年 6 月 17 日原稿受理 2010 年 9 月 1 日採用決定]