日本建築学会技術報告集　第18巻　第38号，95-100，2012年2月
AIJ J. Technol. Des. Vol. 18, No.38, 95-100, Feb., 2012

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）

BENCHMARK TESTS FOR STRONG GROUND MOTION PREDICTION METHODS: CASE FOR NUMERICAL METHODS (PART 2)

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　川辺秀憲 ――＊8
上林宏敏 ――＊9

Chiaki YOSHIMURA ―― ＊1　Masayuki NAGANO ― ＊2
Yoshiaki HISADA ―― ＊3　Shin AOI ―― ＊4
Takashi HAYAKAWA ―― ＊5　Seckin Ozgur CITAK― ＊6
Shinichi MATSUSHIMA ― ＊7　Hidenori KAWABE ―― ＊8
Hirotoshi UEBAYASHI ―― ＊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 considered a four-layered model, a symmetric basin model and a slant basement basin model. All the results calculated by six teams from different institutions generally show good agreement to each other. We found minor differences of phase arrival time between institutions and minute differences between FDM and FEM for some models.

１．はじめに

構造物の設計用地震動として用いるサイト波を計算するため、断層モデルを考慮した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）は長周期成分を計算する手法としてよく用いられる。関東、濃尾、大阪平野の堆積盆地構造といった不整形な地盤が考慮でき、海溝型巨大地震の長周期地震動なども波動論に基づき精度良く計算できる。ただし、地盤モデルや震源モデルの設定の違いにより、計算結果がかなり異なるという問題点がある。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ある。

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、複数の機関が各々保有する計算コードを用いて、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。既報 [3)] のとおり、2009 年度は、6 チームが参加し、米国での Day et al.(2001[4)], 2003[5)]) による Code Test を踏襲し、半無限および２層の平行成層地盤を対象とした。ステップ１で点震源、ステップ２で面震源を考慮した。

本論文では、２年目となる 2010 年度に実施した検討結果を示す。地盤モデルをさらに複雑にし、４層地盤、対称盆地、傾斜基盤盆地を考慮した検討を行った。いずれも震源は点震源とした。６チームが参加し、対称盆地では Aki-Larner 法 [6)] との比較も行った。

２．検討モデルの全体概要

表１にステップ３，ステップ４で検討した５つの計算モデルの概要を示す。N31、N32 モデルは４層地盤の検討を行った。以前のステップ１，ステップ２で用いたモデルは 2 層地盤(Vs=2000m/s, 3464m/s)であった。今回の検討では、実務的に必要となる工学的基盤(Vs=400m/s)まで考慮して正しく計算されるか調べた。地盤減衰を考慮し、震源は点震源とした。N31 の震源はモデル中央に配置した。N32 は境界寄りに配置し、反射波の影響を調べた。有効振動数が 2.5Hz まで確保されるように格子間隔や要素サイズを調節するとした。地表面の 19 点または 21 点を提出し相互比較した。

N33 モデル以降は堆積盆地構造を対象とした。このような不整形地盤は、平行成層を対象とした理論的手法や統計的グリーン関数法では考慮出来ず、数値解析手法の大きな利点である。N33 モデルでは台形状の対称盆地を考慮した。N41,N42 モデルでは、基盤が傾斜した非対称な盆地構造を考慮した。点震源 C,D とは、傾斜の深い方と浅い方に配置して違いを調べた。減衰を考慮し、有効振動数は 2.5Hz、出力点は 21 点とした。

表１　検討モデル一覧

	ステップ３			ステップ４	
モデル名	N31	N32	N33	N41	N42
地盤	４層地盤		対称盆地	傾斜基盤盆地	
減衰	あり			あり	
震源	点震源 A	点震源 B	点震源 C	点震源 C	点震源 D
有効振動数	0～2.5Hz			0～2.5Hz	
出力点	21 点	19 点	21 点	21 点	21 点

*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　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　京都大学原子炉実験所　助教・博士（工学）
*9　京都大学原子炉実験所　准教授・工博

*1　Senior Research Engineer, Taisei Corporation, Dr. Eng.
*2　Prof., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.
*3　Prof., Dept. Urban Design and Planning, 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　Assist. Prof., Research Reactor Inst., Kyoto Univ., Dr. Eng.
*9　Assoc. Prof., Research Reactor Inst., Kyoto Univ., Dr. Eng.

３．N31,N32 モデル（４層地盤）

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、吸収ゾーンを除き、30km×30km×17km（-15≦X≦15, -15≦Y≦15, -17≦Z≦0：単位 km）とした（図 1 ではその 4 分の 1 を示す）。4 層地盤を考慮し、物性値を表 2 のように設定した。最下層(Vs=3464m/s)は地震基盤であり、最上層(Vs=400 m/s)は工学的基盤である。Q 値は振動数 f(Hz)に比例するとした。

震源は、N31 ではモデル中央の深さ 2 km、即ち(X,Y,Z)=(0, 0, 2)(km)に、N32 では(6, 8, 2)(km)にダブルカップル点震源を配置した。モーメント・テンソルの非ゼロ成分は Mxy（＝Myx）のみとした。断層メカニズムで書くと、(strike, dip, rake)=(0°、90°、0°）または（90°、90°、180°）となり、横ずれ断層に相当する。地震モーメントは $Mo=10^{18}$Nm とした。

モーメント・レートの時刻歴関数 $\dot{M}(t)$ はガウス型とし、(1)式で与えた（図 2a に図示する）。

$$\dot{M}(t) = M_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad \cdots(1)$$

ただし、σ=0.2(s), μ=4σ=0.8(s)

ここで、t は時刻(s)、σ、μ は定数である。μ がピークの時刻を与える。(1)式は t を小さくしても完全に 0 にならないので、便宜的にピークから 4σ (0.8 秒)を破壊開始時刻とした。ライズタイムは 8σ (1.6 秒)となる。

なお、(1)式のフーリエ変換は(2)式となる（図 3 に図示する）。

$$\dot{M}(\omega) = M_0 \cdot \exp\left(-\frac{(\sigma\cdot\omega)^2}{2}\right) \cdot \exp(+i\omega\cdot\mu) \quad \cdots(2)$$

ここで i は虚数単位である。

モーメントの時刻歴関数 M(t)は(3)式となる(図 2b に図示する)。

$$M(t) = M_0 \cdot \frac{1}{2}\left(1 + erf\left(\frac{t-\mu}{\sqrt{2}\sigma}\right)\right) \quad \cdots(3)$$

ただし、σ=0.2(s), μ=4σ=0.8(s)

ここで erf()は誤差関数であり、(4)式で表される。

$$erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x \exp(-t^2)dt \quad \cdots(4)$$

なお、前回 [3]のステップ１，２では指数型のモーメント・レート関数を用いたが、立ち上がりに高振動数成分が多く、差分法で高振動数ノイズが出やすかったので、今回は滑らかなガウス型にした。

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(-6,-8,0)(km)～+010(6,8,0)(km)について提出するとした。提出成分は、X,Y 成分を(5)(6)式で変換した Radial 成分(R)、Transverse 成分(T)と UD 成分(Up を+、Down を－)とした。

-010～-001 点(X<0, Y<0)の変換式：

R=－0.6X－0.8Y, T=＋0.8X－0.6Y …(5)

+000～+010 点（X≧0,Y≧0）の変換式：

R=＋0.6X＋0.8Y, T=－0.8X＋0.6Y …(6)

グリッドサイズは、有効振動数 0～2.5Hz 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 グリッド必要とし、第 1 層でグリッド間隔 H を 25m した場合、有効振動数は、f=Vs/(6H)=400/(6*25)=2.7Hz となる。同様に、第 2～4 層では、H=50, 100, 200m とすると 2.5Hz 以上を確保でき、これらを推奨値とした。

境界処理は、モデルの側面と底面に幅 2km 以上の吸収ゾーン（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。）を設け、さらにモデル最外面には吸収境界（Absorbing boundary）を設けるとした。提出された結果には、図 4 に示す 2.5Hz のローパスフィルターを施した。

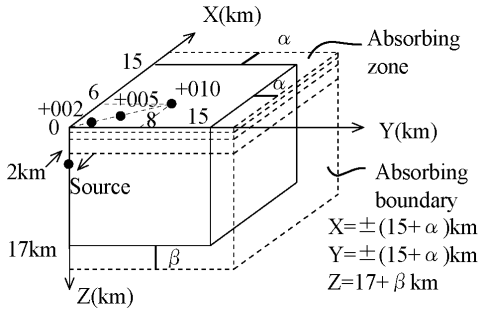
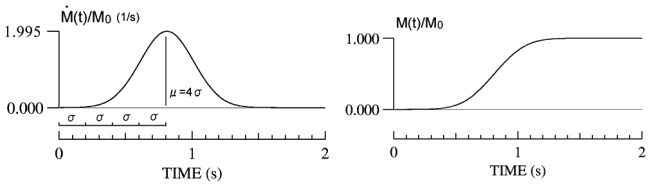


図 1 N31,N32（4 層モデル）の概要（1/4 対称部分）

表 2 4 層地盤（N31,N32）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/m³)	Q 値 Qp	Q 値 Qs
1層目	200	1600	400	2000	$20f^{1.0}$	$20f^{1.0}$
2層目	400	2600	1000	2400	$30f^{1.0}$	$30f^{1.0}$
3層目	1000	4000	2000	2600	$40f^{1.0}$	$40f^{1.0}$
4層目	∞	6000	3464	2700	$70f^{1.0}$	$70f^{1.0}$



(a)モーメント・レート関数　　(b)モーメント関数

図 2 モーメント・レートとモーメントの時刻歴関数（Mo で基準化）

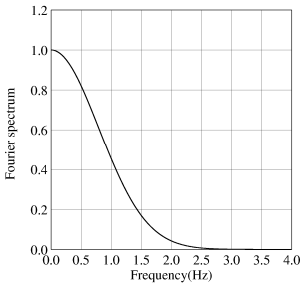


図 3 モーメント・レート関数のフーリエ振幅スペクトル

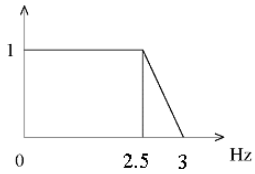


図 4 ローパスフィルター

４．各参加チームの手法と計算条件

表 3 に各参加チームの手法およびステップ３，４の計算条件をまとめた。参加チームは、青井、永野、吉村、早川、Citak・松島・Graves、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あり、他は三次元有限差分法である。なお、N33 のみ、かつて多用された境界法との比較という観点から、上林が Aki-Larner 法 [6]で参加している。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。

吸収ゾーンは、各チームとも 2km 以上との規定に従い、側面および底面に 2～9km の厚さで設けている。モデル最外面で人工的な反射波を除くため吸収境界を設けるが、差分法は Clayton and Engquist[16]の方法、有限要素法は Lysmer and Kuhlemeyer[17]の方法に従っている。吸収ゾーンでの波の減衰のさせ方は、青井、川辺は Cerjan et al.[18]の方法を用い、他は Q 値で与えている。

グリッド間隔は、プログラムにより、水平方向または鉛直方向で可変かどうかで異なる。青井は水平、鉛直とも可変で、深さ 1.25km を境に、上部と下部でグリッド間隔を 1:3 としている。永野は水平、鉛直とも可変で、水平は深さ 1km または 1.5km を境に 1:2 にし、鉛直方向は細かく 4～5 段階に変化させている。吉村は有限要素法で柔軟性があり、４層地盤でも不整形の盆地モデルでも、物性値の分布にほぼ追随して要素サイズを変えている。早川と川辺は、水平は固定で、鉛直方向は可変である。Citak らは一様グリッドである。

有効振動数は、各チームとも規定の 0～2.5Hz を満たすとしている。時間刻みは 0.00125 から 0.0035s の値となっている。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、指定震源の作用位置と実際の応力テンソルのグリッド位置が異なるが、作用点周りの複数の応力テンソルを組み合わせて作用中心が指定震源位置になるよう工夫しているチームが多い。吉村の有限要素法では四面体を用いているので、指定震源の最寄りの四面体の重心が実際の作用位置である。減衰は、差分の多くのチームが Graves(1996)[13]に従い、吉村は質量比例減衰としており、Q 値は振動数 f の 1 乗に比例する。Citak らのみ Graves & Day (2003)[14]の方法で、f に対して一定の Q を導入している。

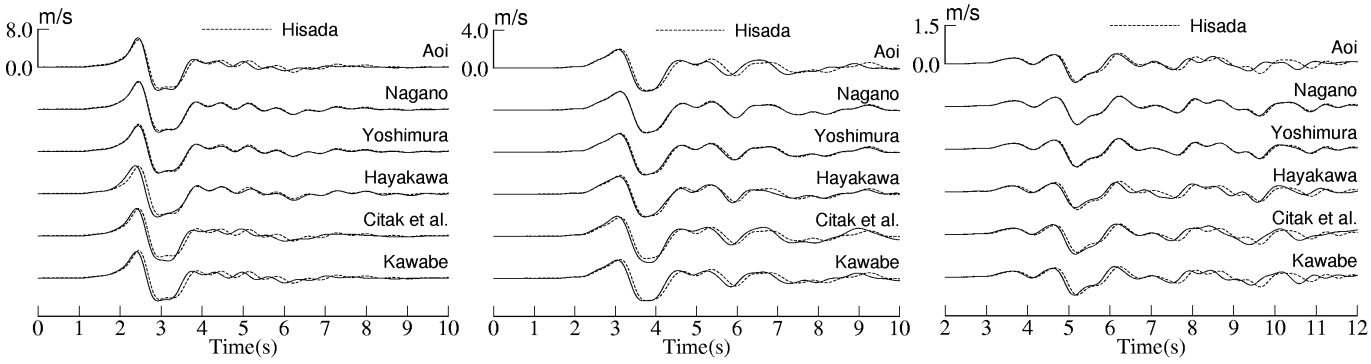
５．N31（4 層地盤）の結果

紙面の都合によりステップ３は N31 の結果を示す。図５に観測点 +002、+005、+010（震央距離 2、5、10km。図１参照。）における Radial 成分の速度波形の比較を示す。久田の波数積分法[19]による理論波形をリファレンスとして点線で示す。大局的には、各チームともほぼ理論波形と一致しており、実用的には同等の結果が得られているといえる。但し、微細に見ると、永野、吉村は理論値と一致度が高いが、他は理論値に対して僅かに位相が早い（波の到達が早い）。

前報[3]の２層地盤の検討では、層境界のグリッドに上層の物性値、下層の物性値、その平均値のいずれを配置するかで位相差が見られた。今回の検討で各チームのモデル化を確認すると、早川は上層の値、永野と Citak らは平均値、青井と川辺は下層の値であった。吉村の有限要素法は、要素に物性値を与えるので、問題の層境界に忠実である。波の到達時刻が、青井・川辺＜永野・Citak ら＜早川となると期待されたが、４層地盤では２層地盤のように単純な結果とはならなかった。

表 3　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	Citak, 松島, Graves	川辺	上林
手法		差分法	差分法	有限要素法	差分法	差分法	差分法	AL法
参考文献		Aoi&Fujiwara(1999)[7] 青井・藤原(1998)[8] 青井・ほか(2004)[9]	永野(2004)[10]	Bao(1998)[11]	Pitarka(1999)[12]	Graves(1996)[13] Graves&Day(2003)[14]	Pitarka(1999)[12]	Uebayashiet al.(1992)[15] 境界法との比較の目的でN33のみ参加
吸収ｿﾞｰﾝ 側面[底面]	N31,N32	3 [4.5] km	2 [4] km	2.2 [2.2] km	2 [2] km	2 [2] km	2 [8] km	
	N33	3 [9] km	2 [4] km	2.2 [2.2] km	2 [2] km	2 [2] km	2 [2] km	
	N41,N42	3 [9] km	2 [4] km	2.2 [2.2] km	2 [2] km	2 [2] km	2 [2] km	
境界処理	吸収境界	Clayton and Engquist(1977)[16]	Clayton and Engquist(1977)[16]	Lysmer and Kuhlemeyer(1969)[17]	Clayton and Engquist(1977)[16]	Clayton and Engquist(1977)[16]	Clayton and Engquist(1977)[16]	無限遠方での放射条件を定式化において理論的に満足する。空間周期長38.4km
	吸収ｿﾞｰﾝ	Cerjan et al.(1985)[18]	40または80グリッドでQ=5～50に漸増	吸収ｿﾞｰﾝの減衰は計算領域と同じ	Q=25	40または80グリッドでQ=5～50に漸増	Cerjan et al.(1985)[18]	
グリッド間隔	N31, N32	25m(0≦Z≦1.25 km) 75m(1.25≦Z≦21.5 km)	(km) (水平) (上下) Z<1km 25m 25,50,100m Z>1km 100m 100,200m	16.7, 33.3, 66.7, 133.3m	(水平) (上下) 25m 25,50, 100,200m	25m	(水平) (上下) 25m 25,50, 100,200m	境界面の水平方向サンプリング間隔 0.15km
	N33,N41,N42	50m(0≦Z≦1.25km) 150m(1.25≦Z≦21.5km)	Z<1.5 50m 50, 100m Z>1.5 100m 100,200m	33.3m(盆地), 133.3m(基盤)	(水平) (上下) 50m 50,100m	50m	(水平) (上下) 50m 50,100m	
有効振動数	N31, N32	0～2.5Hz	0～2.5Hz	0～2.5Hz	0～2.5Hz	0～3.05Hz	0～2.7Hz	0～1.2Hz
	N33,N41,N42					0～3.88Hz	0～2.9Hz	
時間刻み	N31, N32	0.0025s	0.0035s	0.0025s	0.00143s	0.00125s	0.002s	周波数刻み 0.02Hz
	N33,N41,N42				0.0025s	0.0025s	0.0025s	
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	連続関数(σ=0.4s)
指定震源位置に対する実際の震源位置		一致	周辺応力ｸﾞﾘｯﾄﾞにﾓｰﾒﾝﾄﾚｰﾄを重み付け配分	最寄りの四面体要素の重心	周囲の４つの応力ｸﾞﾘｯﾄﾞに重みつけ配分	一致	Mxx,Myy,Mzzは一致 他は半ｸﾞﾘｯﾄﾞずれる	一致
減衰の導入法		Graves(1996)[13]	Graves(1996)[13]	質量比例減衰	Graves(1996)[13]	Graves & Day(2003)[14]	Graves(1996)[13]	P,S波速度の虚数部に導入



(a)+002　(b)+005　(c)+010

図 5　N31 の Radial 成分の速度波形

６．N33（対称地盤）の出題と結果

図６にN33モデルの平面図と断面図を示す（後述の傾斜基盤盆地も同時に示す）。堆積盆地の形状は、上林・他(1989)[20]の台形盆地とした。盆地底部がLx=Ly=8km、cos関数を用いた傾斜部の幅がVx=Vy=2.4km、地表に現れた幅はLx+2Vx=Ly+2Vy=12.8km、深さは1kmである。水平位置(X,Y)での盆地底面の深さ分布Z(X,Y)を次式で与えた。

$$Z(X,Y)=H/4\cdot(1+\cos(\pi A(X))(1+\cos(\pi B(Y)) \quad \cdots(7)$$

ただし，$A(X)=(-Lx/2-X)/Vx$　$(-Lx/2-Vx < X < -Lx/2$ のとき)

$A(X)=(X-Lx/2)/Vx$　$(Lx/2 < X < Lx/2+Vx$ のとき)

$A(X)=1$　$(X<-Lx/2-Vx$ または $X> Lx/2+Vx$ のとき)

$A(X)=0$　$(-Lx/2\leqq X\leqq Lx/2$ のとき)

$B(Y)=(-Ly/2-Y)/Vy$　$(-Ly/2-Vy < Y < -Ly/2$ のとき)

$B(Y)=(Y-Ly/2)/Vy$　$(Ly/2< Y < Ly/2+Vy$ のとき)

$B(Y)=1$　$(Y<-Ly/2-Vy$ または $Y> Ly/2+Vy$ のとき)

$B(Y)=0$　$(-Ly/2\leqq Y\leqq Ly/2$ のとき)

表４に物性値を示す。堆積盆地はVs=1000m/s、地震基盤はVs=3464m/sとした。震源は、点震源Cを盆地の南西角（Xが北）の直下3km、即ち(X,Y,Z)=(-6.4,-6.4,3)(km)に置く。メカニズムは(strike, dip, rake)=(45, 90, 90)(度)とし、鉛直縦ずれ断層に相当する。地震モーメントは$Mo=10^{18}$Nmとした。

盆地底部の堆積層と基盤が接する層境界上のグリッドの物性値は、プログラムの都合により、チームによりやや異なった。青井、永野は平均値、早川は上層の値、Citakらと川辺は下層の値になっていた。吉村の有限要素法は、境界の上下で要素に物性値を与えている。

図７にモデル中央のXY+0.0地点（位置は図６参照）のX,Y,Z成分を示す。解析的な正解がないので、相対比較のため永野の結果をレファレンスとして点線で示した。実用的にはほぼ同等の結果が得

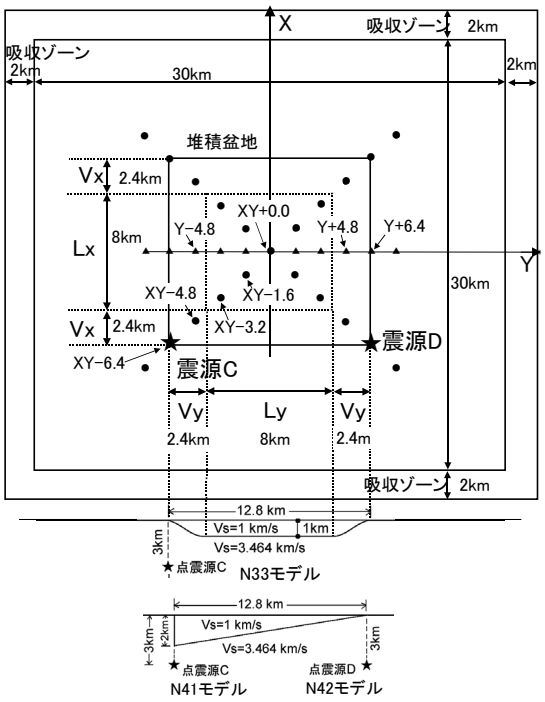
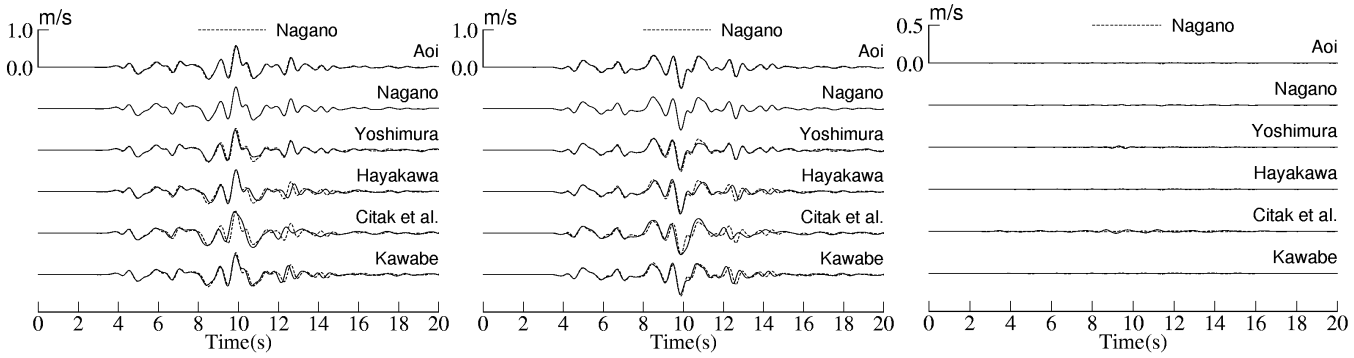


図６　対称盆地と傾斜基盤盆地の平面図と断面図(X=0)

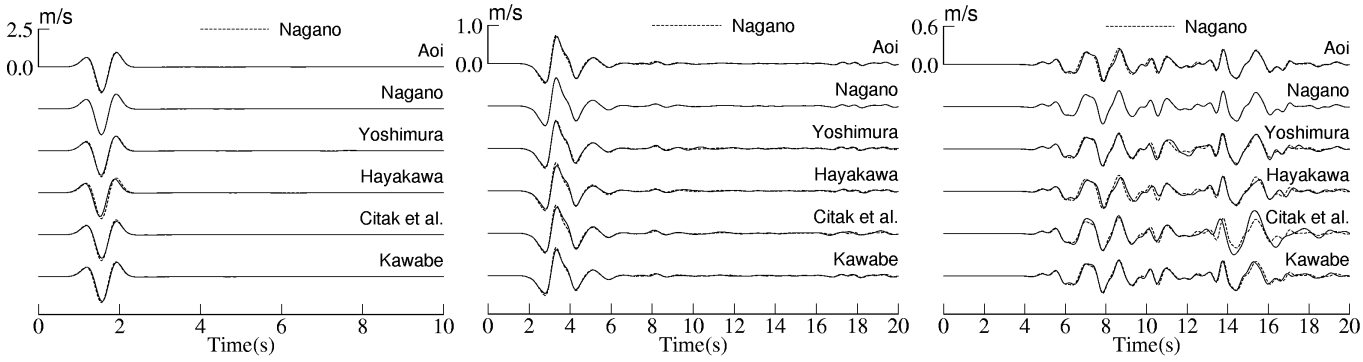
表４　対称盆地(N33)と傾斜基盤盆地(N41,N42)の物性値

	P波速度 Vp (m/s)	S波速度 Vs (m/s)	質量密度 ρ (kg/m³)	Q値 Qp (fは振動数Hz)	Q値 Qs (fは振動数Hz)
堆積盆地	2600	1000	2400	$30f^{1.0}$	$30f^{1.0}$
基盤	6000	3464	2700	$70f^{1.0}$	$70f^{1.0}$



(a)X成分　(b)Y成分　(c)Z成分

図７　N33のXY+0.0における速度波形



(a)XY-6.4　(b)Y-4.8　(c)Y+4.8

図８　N33のX成分の速度波形

られているといえる。図(a)(b)のX,Y成分を詳細にみると、永野、青井、吉村は比較的よく一致していた。XY+0.0では10秒付近以降は表面波が卓越しているが、早川は僅かに位相が遅れ、Citakらと川辺は僅かに位相が早い。これは盆地底部の層境界グリッドの物性値配置から予想される傾向と一致している。なお、Citakらは減衰が他チームと異なることによる違いも結果に含まれている。問題の対称性により、直線X=Y上ではZ成分がゼロとなることが期待されるが、図(c)を見ると各チームほぼゼロとなっており、十分精度が確保されていることがわかる。

図8は、その他の場所のX成分を示した。(a)のXY-6.4は震源直上の岩盤と盆地の境界部分であり、(b)のY-4.8はY軸上で震源側の傾斜部であり、いずれも実体波が卓越し、各チームともよく一致している。(c)はY軸上の震源と反対側の傾斜部で、15秒付近に盆地生成表面が観察されるが、減衰の違いの影響が含まれるCitakらを除いて、相互によく一致している。

現在、3次元不整形地盤の解析では、差分法や有限要素法等の領域法が主流であるが、かつては境界要素法やAki-Larner法に代表される境界法が広く用いられていた。そこで、N33モデルでは、解の検証も兼ねつつ、従来の境界法との比較という観点から、上林によるAki-Larner法と川辺による差分法を比較した。図9に結果を示す。なお、(1)(3)式でσ=0.4とした震源で計算した。X=Y上の5点でX成分を比較した。13秒以前で両者は概ね一致している。AL法は、境界を離散化して周波数領域で解き、差分法は領域を離散化し時間領域で解いている。N33モデルでは厳密解はなく、AL法も離散化の誤差があり、いずれが厳密解に近いかは言えないが、異なった手法で解いて、ほぼ同じ結果が得られ、差分法がAL法と同程度に実用的に正しい解が得られているといえる。なお、13秒以後、AL法で大きな波が到来しているのはAL法が水平方向に同じ地盤と震源が周期的に繰り返すモデルを解いており、隣の震源の影響が現れたためで(ラップラウンド現象)、空間周期長を大きく取れば到来を遅くできる。

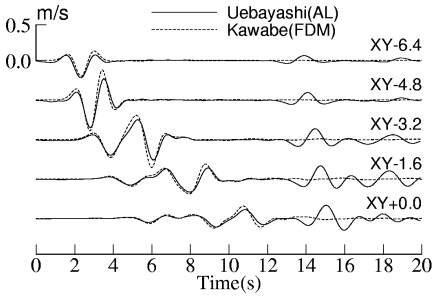


図9 Aki-Larner法と差分法の速度波形の比較

7. N41、N42（傾斜基盤盆地）の出題と結果

N41、N42モデルの盆地の基盤深度Z(km)は(8)式で与えた。

$$Z(Y)=1-Y/6.4 \quad (-6.4\leqq Y\leqq 6.4\text{km かつ}-6.4\leqq Y\leqq 6.4\text{km})$$
$$Z(Y)=0 \quad (\text{上記以外の範囲}) \qquad \cdots(8)$$

Y=-6.4kmで深さ2km、Y=6.4kmで深さ0kmとなる傾斜構造を有している。盆地堆積層と地震基盤の物性値は表4で示したN33のものと同じである。N41の震源はN33と同じである。

図10にN41の結果を示す。X=0上の3点におけるX成分の速度波形である。永野を相対比較のレファレンスとして点線で示す。(a)のY-4.8では4秒付近にS波のピークが明瞭である。(b)XY+0.0の10秒付近、(c)Y+4.8の14秒付近では盆地生成表面波が伝播している。減衰の違いの影響が含まれるCitakらを除いて、各チームほぼ同じ結果が得られている。(c)を微細にみると、これまで理論波や永野の結果とよく一致していた吉村の結果で、少し差が現れた。

N42モデルは、地盤モデルはN41と同じであり、震源を基盤の浅い方の南東角に置いた。座標は(X,Y,Z)=(-6.4,6.4,3)(km)、メカニズムは(strike,dip,rake)=(-45,90,90)(度)で、地震モーメントはN41と同じである。

図11にN42の結果を示す。Y軸上で、震源に近い方の盆地と岩盤の境界の地点である(c)Y+6.4では、実体波の短いパルスが卓越しており、各チーム相互によく一致している。モデル中央の(b)XY+0.0では、吉村は僅かに位相が早くなっている。震源から遠い(c)Y=-4.8では、表面波が卓越する10秒以降で、僅かな位相差が見られる。吉村は少し波形が違っている部分も見られる。

吉村で差が見られた原因として、差分法と有限要素法の物性値の配置の違いが考えられる。図12に浅くなっている方の盆地端部の鉛直断面(X=0)を示す。差分法（永野）は50mグリッドの段差構造になっているのに対し、有限要素法（吉村）では33m幅の四面体要素で比較的滑らかに斜面をモデル化している。傾斜基盤が浅くなっている盆地端部の方がモデル化の差が大きく、震源をこの直下に置いたN42の方が強くその効果が現れている可能性も考えられる。

Citakらは、減衰の与え方が違うため、他のチームと差が目立った。そこで、N41モデルで地盤減衰をなしにして計算した。図13に結果を示す。青井、永野、吉村の結果とよく一致しており、これまでの差は減衰によることがわかる。

8. まとめ

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。工学的基盤(Vs=400m/s)を考慮した4層地盤、不整形地盤である対称盆地、傾斜基盤盆地でも精度良く計算されることを確認した。なお、詳細にみると、傾斜基盤盆地で有限要素法と差分法の差がみられた。原因として物性値配置の違いが考えられる。最終年度の2011年度は、関東平野などの実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

本研究は文科省・科研費・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(前主査：加藤研一、現主査:久田嘉章)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頂いた。

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) 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.
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 1A01, pp.1-24, 2001.
5) 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.
6) Aki , K. and K. L. Larner: Surface motion of a layered medium having an irregular interface due to incident plane SH waves, J. Geophys. Res., 75, pp.933-954, 1970.
7) 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.
8) 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.
9) 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.
10) 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
11) 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.
12) 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.
13) 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
14) 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.
15) Uebayashi H., M. Horike and Y. Takeuchi: Seismic motion in a three-dimensional arbitarily-shaped sedimentary basin, due to a rectangular dislocation source, J. Phys. Earth, 40, pp.223-240, 1992.
16) Clayton, R. and B. Engquist : Absorbing boundary conditions for acoustic and elastic wave equations, Bull. Seism. Soc. Am., 67, pp.1529-1540, 1977.
17) Lysmer, J. and R. L. Kuhlemeyer: Finite dynamic model for infinite media, J. of Engineering Mechanics Division, Proc. ASCE, Vol. 95, No. EM4, 859-876, 1969.
18) Cerjan, C., D. Kosloff, R. Kosloff and M. Reshef: A nonreflecting boundary condition for discrete acoustic and elastic wave equations, Geophysics, 50, pp.705-708, 1985.
19) 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.
20) 上林宏敏・堀家正則・竹内吉弘：断層震源による不規則境界を有する三次元堆積盆地の地震応答、平成元年度日本建築学会近畿支部研究報告集、pp. 65-68，1989.

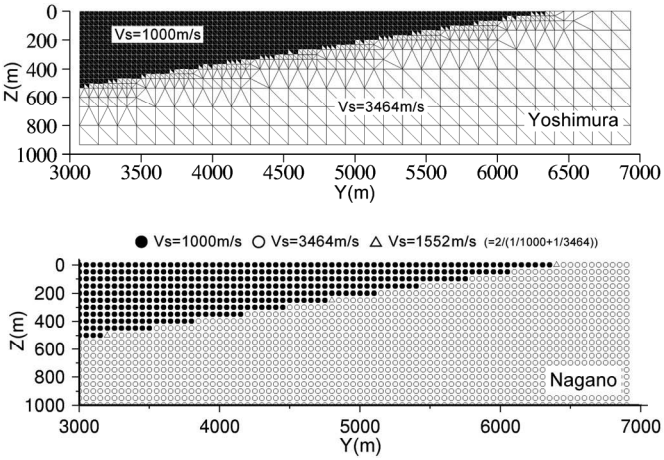


図 12　傾斜基盤盆地の端部の物性値配置（X=0 鉛直断面）

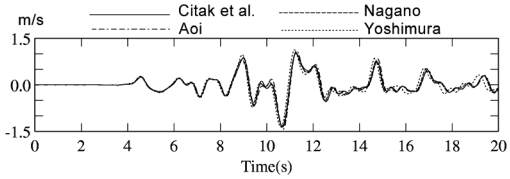
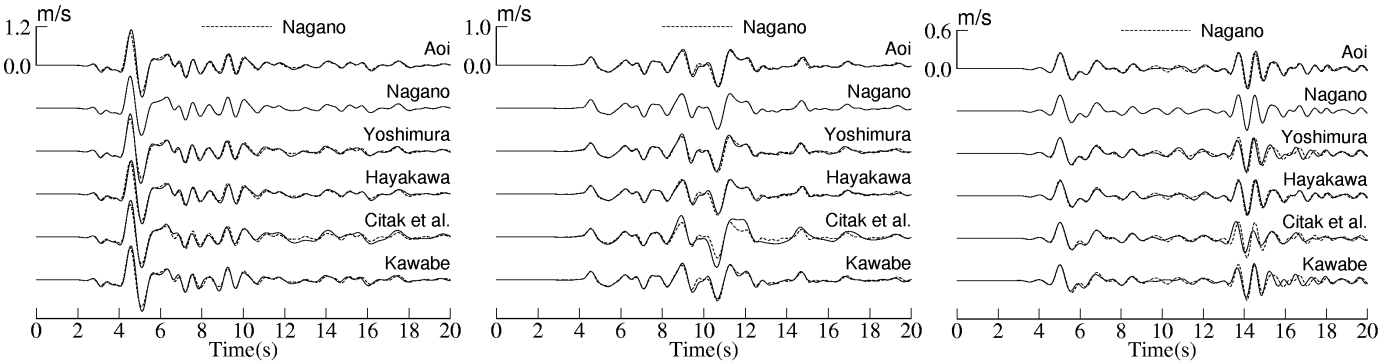
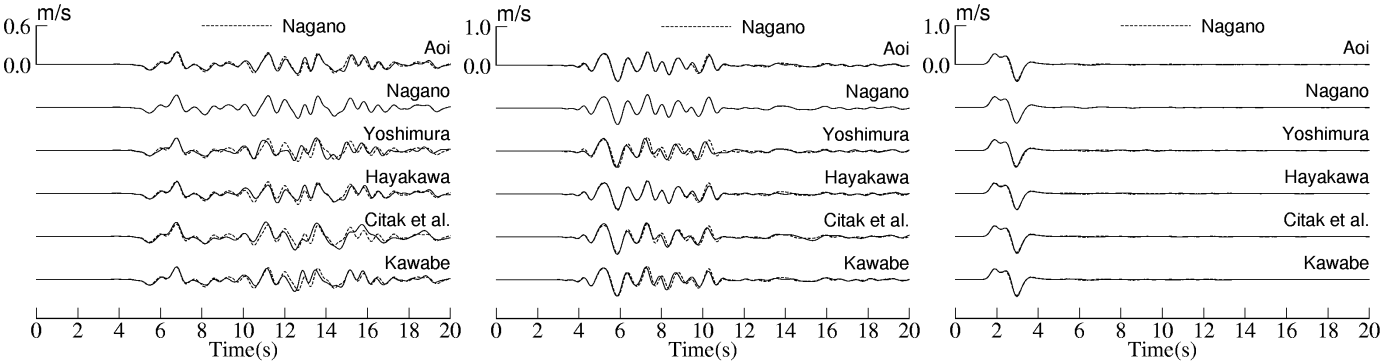


図 13　N41 で無減衰にした結果（XY+0. 0 での X 成分）



(a)Y-4.8　(b)XY+0.0　(c)Y+4.8

図 10　N41 の速度波形（X 成分）



(a)Y-4.8　(b)XY+0.0　(c)Y+6.4

図 11　N42 の速度波形（X 成分）

［2011 年 6 月 20 日原稿受理　2011 年 8 月 17 日採用決定］