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

EVALUATION OF STRONG GROUND MOTIONS IN KOBE AREA DURING THE 2000 TOTTORI-KEN SEIBU EARTHQUAKE USING 3D FINITE DIFFERENCE METHOD WITH VARIABLE GRID SPACING AND TIME INCREMENT

永野 正行*

Masayuki NAGANO

This paper describes an analytical evaluation of strong ground motions in Kobe City during the 2000 Tottori-ken Seibu earthquake. A numerically efficient finite-difference technique combining nonuniform and discontinuous grid spacing is applied for the 3D wave propagation analysis. The entire soil region is divided at particular depth into two regions modeled by different nonuniform grids. Grids in the bottom region for bedrock are coarser than the top region including sediments, which largely cut down on the number of grids. The computational steps for calculation can be reduced to one-sixth by the coupling effects of the grid reduction and variable time steps. Three-dimensional analysis simulates well the velocity seismograms recorded in both mountain and sedimentary sites in the Kobe area. The PGVs in sediments gradually amplify from the basin edge to Osaka bay, which can be seen in both observed and synthetic motions. Site amplification near the basin edge is found to be different for the predominant period of the incident seismic wave.

Keywords: *finite difference method, grid, sedimentary layer, strong ground motion, Kobe, 2000 Tottori-ken Seibu earthquake*
差分法、グリッド、堆積地盤、強震動、神戸、2000年鳥取県西部地震

1. はじめに

2000年鳥取県西部地震時には長周期成分の卓越した地震動が発生し^{例え¹⁾}、震源からかなり離れた場所に建つ長周期構造物の応答にも影響を与えた。1995年の兵庫県南部地震時に大きな被害を受けた神戸中心部でも多くの観測記録が得られ、神戸直下の深部地盤構造が超高層建物²⁾や免震建物³⁾等の長周期構造物の応答特性に影響を与えたことも報告されている。このときの神戸地域における地盤増幅を含む地震動特性を忠実に再現するためには、震源から神戸サイトを含む大阪平野までを包括した地盤構造を用い応答解析を行う必要がある。この場合、地盤構造のモデル化に要するメッシュやグリッドの数が膨大となり、計算効率を向上させた解析手法の開発が不可欠となる。

近年では計算機能力の急速な向上と、差分法(Finite Difference Method、以下FDMと記す。)を代表とする陽解法に基づく計算手法^{例え⁴⁾}の普及を背景に、震源断層と不整形性を含む極めて広大な3次元地盤構造を同時に考慮した地震動評価が盛んに行われている。FDMについては3方向に不均等なグリッド間隔(不等間隔グリッド)を用いる手法⁵⁾や、全体領域を深さ方向に2分割してグリッド間隔を不連続(不連続グリッド)に設定した手法⁶⁾、不連続格子領域の時間ステップを変化させることによって演算回数を少なくす

る手法⁷⁾、等が提示されており、より大領域の地盤構造、より短周期の地震動を評価できる環境が整いつつある。計算機環境に関しても、比較的安価な計算機を複数導入し並列処理で計算させる技法⁸⁾や大規模な並列計算機を導入する⁹⁾などの方向性も見られる。

従来工学の分野で用いられてきた有限要素法(Finite Element Method、FEM)についても、FDMと同様の計算技法を導入することにより、FDMと同等の規模の問題を解くことができるように改良されている。筆者ら¹⁰⁾は大領域地盤構造を対象とした3次元地震動評価にFEMを適用し、領域毎にグリッド間隔、時間刻みを変化させた効率的な計算手法を提案した。FDMに対するFEMの利点として、①地盤物性のずれが発生するスタッガードグリッドに対し、要素による地層境界のモデル化が明快であること、②記憶すべき状態量は、FDMが速度、応力で9成分であるのに対し、FEMは変位、節点力の6成分であり、少ない計算容量で済むこと、が挙げられる。一方、FDMに関しては、①空間4次近似のFDMは2次精度相当のFEMに比べ離散化による計算精度の劣化が小さい¹¹⁾、②アイソパラメトリック要素を用いた場合に8つの積分点で節点力を評価するFEMに比べ計算時間が短い、の2点が数値計算上の利点として挙げられる。FEMに適用した効率的な計算手法を組み合わせることにより、このようなFDMの利点をさらに生かすことが

* 鹿島 小堀研究室 博士(工学)

Kobori Research Complex, Kajima Corporation, Dr. Eng.

できると考えられる。

本論文では最初に不均等かつ不連続となるグリッド間隔を有し、領域毎に時間刻みを変化させた FDM について、そのグリッドモデリングの概念と計算手順を示した。また検証事例として矩形の堆積盆地を用いた波動伝播解析を行い、提案手法の効率性、計算精度を調べた。次に 2000 年鳥取県西部地震時の神戸地域における強震動を評価した。震源～神戸間や神戸市の中心部で得られた観測記録を対象にシミュレーション解析を実施し、速度波形や応答スペクトルを比較した。また 1995 年兵庫県南部地震時の「震災の帯」の一原因となった深部地盤構造による地震動の増幅特性^{例え}¹²⁾を検討した。趙・香川¹³⁾は大阪平野における地盤構造の精度向上を主目的として同様の解析を行っているが、本検討は神戸直下の六甲断層系の段差、逆断層形状を含む盆地端部構造を詳細にモデル化し、盆地端部における地震動増幅に着目した点に特徴がある。

2. グリッド間隔と時間刻みを可変とする3次元差分法

2.1 解析モデルと仮定条件

図-1 に示すように、解析領域全体をある深さ位置で上部、下部領域に分割し、各領域で異なるグリッド間隔、時間刻みを与える。

図-1 提案するグリッドモデリングのイメージ

図-2 重ね合わせ部のモデル化

ここでは下部領域に波動速度の大きい地盤が存在するものと仮定し、グリッド間隔と時間刻みを上部領域より大きく設定する。上部、下部領域のグリッド間隔は空間 3 方向で可変とし、下部領域の時間刻みは上部領域の整数倍で与える。各領域では空間を 4 次精度近似で、時間を 2 次精度近似で表現するスタaggered グリッド^{例え}¹⁴⁾を用い、各グリッドで 3 成分の速度と 6 成分の応力を保持する。不等間隔グリッドで空間方向の偏微分を差分近似するときの係数の設定には Pitarka の手法⁵⁾を用いる。

不連続グリッドに関しては、深さ方向の不連続面を挟んで重ね合わせ領域を設定し、速度を空間的に線形補間する手法を採用した。本手法では上下領域の時間刻みも可変とするため、時間が半ステップずれる速度と応力の両者を同時に補間することは難しい。このため図-2 に示すように境界部を挟み上部、下部領域に 2 グリッド分の重ね合わせ領域を設定し、各領域で空間、時間に関し速度を線形補間した後、速度から応力成分を逐次算定する方法を採用した。水平方向のグリッド位置は各領域で任意とし、両端では共通のグリッドとした。深さ方向のグリッド位置は上下領域で共通とした。重ね合わせ領域における一部の速度、応力成分の z に関する偏微分項については 2 次近似を仮定した。

本手法は不等間隔グリッドのみ、もしくは不連続グリッドのみを用いた場合に比べ、差分計算の対象となるグリッド数、計算ステップ数が軽減される。青井・藤原¹⁵⁾も同様の手法を提案しているが、本手法では上下領域のグリッド間隔をほぼ完全に任意としている点、上下領域で時間刻みを可変としている点に特長がある。また既報¹⁰⁾の 3 次元 FEM では、全体領域に埋め込まれた一部の領域に対しグリッド、時間刻みを変化させ計算効率の向上を図ったが、本手法では解析領域全体で地表近傍の低速度層もモデル化できるように、深さレベルで領域を分割した。

2.2 計算手順

各領域での速度の計算手順を表-1 に示す。最初に時間 $t=n\Delta t_1$ で全領域における状態量を既知とする。ここで、 Δt_1 は下部領域の時間刻み、 n は時間ステップ数である。また $\Delta t_2=\Delta t_1/M$ を上部領域の時間刻み、 $m(=1\sim M)$ を $n\sim n+1$ 間の上部領域におけるサブステップ数とし、以下に具体的な手順を示す。

(a) $t=(n+1)\Delta t_1$ の下部領域グリッドの速度 (応力) を算定する (表-1 中、①)。(b) $t=(n+1)\Delta t_1$ における上部領域の下部重ね合わせグリッドの速度を、下部領域より空間的に補間して求める (表中②)。このとき深さ方向のグリッド位置は共通であるため、空間補間は平面座標上で行う。補間には空間 2 方向の 1 次結合関数を用い、図-3 に示すように各速度成分を囲む 4 つの速度成分と位置関係を考慮して係数を設定する。(c) $t=n\Delta t_1+\Delta t_2$ における上部領

表-1 各領域の速度成分の計算手順

時間 t	I	II	III	IV
$n\Delta t_1$	既知			
$n\Delta t_1+\Delta t_2$	—	—	④	③
$n\Delta t_1+2\Delta t_2$	—	—	⑥	⑤
...	—	—	⑧	⑦
$n\Delta t_1+(M-1)\Delta t_2$	—	—	⑩	⑨
$(n+1)\Delta t_1$	①	⑫	⑪	②

域の下部重ね合わせグリッドの速度を、(b)で評価した速度を時間軸上で線形補間して求める(表中③)。(d) $t=n\Delta t_1+\Delta t_2$ における上部領域のグリッドの速度(応力)を、差分スキームにより算定する(表中④)。(e) $t=n\Delta t_1+m\Delta t_2$ ($m=2\sim M-1$) について(c)~(d)の作業を行う(表中⑤~⑩)。(f) $t=(n+1)\Delta t_1$ における上部領域の速度(応力)を算定する(表中⑪)。(g) $t=(n+1)\Delta t_1$ における下部領域の上部重ね合わせグリッドの速度を、上部領域の速度を空間補間して求める(表中⑫)。

2.3 減衰、境界条件、震源のモデル化

地盤の材料減衰は時間ステップ更新時に低減係数を掛けるGravesの方法⁹⁾により考慮した。解析領域境界で発生する人工的な

$$V_x = \sum_{i=1}^4 \alpha_{xi} \cdot V_{xi}, \quad V_y = \sum_{i=1}^4 \alpha_{yi} \cdot V_{yi}, \quad V_z = \sum_{i=1}^4 \alpha_{zi} \cdot V_{zi}$$

ここで α_{xi} , α_{yi} , α_{zi} は空間位置に応じた係数

図-3 上部領域重ね合わせ部の速度成分の空間補間

図-4 検証用の堆積盆地モデル

図-5 堆積盆地内外の地点における速度波形の比較

反射波(境界反射波)の影響を小さくするための差分領域の外周境界に関しては、波動吸収境界¹⁰⁾と10~20グリッドの減衰領域⁷⁾を併用した。ダブルカップルで表現される震源すべり破壊は、等価物体力⁴⁾、もしくは応力⁵⁾の形で導入した。重ね合わせ部を含む各グリッド領域では、既往の研究成果と同じ安定条件や離散化精度^{例えば5)}が適用される。

2.4 解析手法の検証

図-4に示す矩形の堆積盆地を有する地盤構造を用いて本手法の検証を行った。深さ3kmに点震源を仮定し、走行20°、傾斜角70°、すべり角20°とした。震源時間関数は立ち上がり時間1秒のベル型のすべり速度で、最終すべり量を1mとした。上部、下部領域の境界は深さ1.75kmとした。下部領域では均等のグリッド間隔とし、上部領域では堆積盆地を含む領域をせん断波速度の比に合わせ下部グリッド間隔の1/5~1/6とした。時間刻みは下部領域で $\Delta t_1=0.02s$ 、上部領域で $\Delta t_2=0.005s$ である。減衰は0とした。

提案手法で差分計算の対象となるグリッド数は58.4万(上部37.7万、下部20.7万)で、不等間隔グリッドのみを用いた場合(105.3万)の約1/1.8となる。提案手法の演算ステップ数(差分計算のグリッド数×時間ステップ数)は時間刻みを可変とすることにより 3.42×10^9 (上部 3.02×10^9 、下部 0.40×10^9) となり、不等間隔グリッドのみを用いた場合 (8.42×10^9) の約1/2.5となる。提案手法は、重ね合わせ領域における速度の線形補間に伴う計算時間が若干増加する点を考慮しても、不等間隔グリッドのみの場合に比べ計算効率の点で有利であるものと考えられる。

盆地内外の2観測点(図-4中、P-1とP-2)における速度波形を図-5に示す。同図には不等間隔グリッドのみを用いて算定した結果を比較して示す。両者は最大値を含めほぼ一致しており、少ないグリッド数、計算ステップ数で同等の解析結果が得られる。

3. 2000年鳥取県西部地震時の神戸地域の強震動

3.1 解析領域の設定

2000年10月6日に発生した鳥取県西部地震(Mj7.3、北緯35°16.5'、東経133°20.9')を対象に、震源断層から大阪平野までの地盤構造をモデル化し波動伝播解析を行い、神戸地域における強震動を評価する(図-6)。最初に震源断層から大阪平野を含む解

図-6 解析領域の設定

析領域を設定するための予備検討として、境界反射波の影響を調べた。

予備解析では後出の表-2の平行成層構造を仮定し、図-10の震源断層モデルを用いた。このときのFDMで得られた神戸大学(KBU)位置(図-6中、□印)における速度波形を、平行成層構造の理論解として算出した薄層法(TLM)¹⁸⁾による解と比較した。FDMは不等間隔グリッドモデルを用いた。基本ケース(CASE-1)では水平方向を等間隔(0.9km)、深さ方向を不等間隔(0.9km以上)としたグリッドとした。領域側面、底面では、波動吸収境界と20グリッド分の減衰領域を併用した。減衰領域では領域内部より外部境界に向かって徐々に減衰定数を大きくし、最外殻部で減衰定数が10%(Q値で5)となるように設定した。このときのグリッド領域は342km(EW)×261km(NS)×101km(UD)である。TLMとCASE-1で得られたEW方向の速度波形を図-7(a)、(b)に比較する。CASE-1では後続部にTLMでは見られない振幅の大きな位相が現れる。これは南側の境界面より反射し当該地点に伝播した波であり、アニメーションでも別途確認している。境界反射波が大きくなる原因として、震源より伝播する波動が南側の外周境界に斜め方向から入射し波動の吸収効率が低かったこと、地震動の卓越周期が長く波長も長くなるため通常の減衰領域では減衰効果が十分に効かないことが考えられる。

次にこのモデルを修正し、減衰領域の水平方向のグリッド間隔を外部領域に向かって徐々に拡幅したモデル(CASE-2)を作成した。

図-7 各解析モデルによる速度波形の比較

(b) 六甲断層を含む南北断面

(a) 大阪平野の基盤深度分布

(c) 上町・生駒断層を含む東西断面

図-9 大阪平野の地盤構造

表-2 地盤物性一覧

No.	V_s (km/s)	V_p (km/s)	ρ (t/m ³)	Q	備考
1	0.5	1.8	1.8	33	大阪層群
2	0.6	1.9	1.9	40	"
3	0.8	2.2	2.0	53	"
4	1.0	2.5	2.1	67	"
5	3.2	5.4	2.7	100	上面深度(km)
6	3.5	6.0	2.8	300	5.7
7	3.8	6.6	3.0	400	16.5
8	4.5	6.8	3.2	500	33.5
9	4.6	8.0	3.25	500	71.0
10	1.0	2.5	2.1	67	風化層
11	1.35	3.1	2.2	90	"

(No.5~9を平行成層構造の地盤物性として利用)

図-8 本検討に用いたグリッドモデル

図-10 震源断層モデル

図-11 速度 (EW 方向) のスナップショット

S 波速度に合わせて不等間隔とした。上部領域に関し大阪平野を含む 90km (EW) $\times 72\text{km}$ (NS) の領域のグリッド間隔は 0.15km とし、それ以外は 0.9km とした。時間刻みは下部領域で 0.052s 、上部領域で 0.013s とした。神戸地域については、六甲断層系の段差、逆断層形状を含む地盤構造¹⁹⁾をなるべく忠実に反映させ、堆積層である大阪層群に対し S 波速度 $V_s=0.5, 0.6, 0.8, 1.0\text{km/s}$ の 4 層構造とした。地盤物性を表-2 に示す。大阪地域のモデル化については、上町、生駒断層の断層形状を詳細にモデル化した堀川・他²⁰⁾の地盤構造に基づき 4 層構造に分け、神戸地域の地層と滑らかに結合させた。大阪湾周辺については、宮腰・他²¹⁾、栗本・他²²⁾を参考に作成した。 $V_s=3.2\text{km/s}$ 以上の地震基盤の深度分布を図-9 に示す。同図に六甲、上町、生駒の各断層を含む断面モデルを併せて示す。地震基盤より深い地盤や大阪平野部以外は $V_s=3.2\sim 4.6\text{km/s}$ の平行成層とし、大阪平野周辺の基盤構造の地表近傍には $V_s=1.0, 1.35\text{km/s}$ の風化層をそれぞれ 1 グリッド分(0.15km)設けた。1 せん断波長当たり 5 グリッドを波動透過限界とすると、最小 S 波速度から解析最小周期は 1.5 秒となる。

震源断層は池田・他²³⁾によりまとめられているインバージョン結果を参考に、図-10 に示す単一アスペリティモデルとした。震源時間関数、すべり速度等は成層地盤構造を用いた予備解析に基づき設定し、震源時間関数の立ち上がり時間は 4 秒とした。波動伝播解析の継続時間は破壊開始から 150s とした。なおこのグリッドモデルを用い平行成層構造を仮定して計算した速度波形(図-7(d), CASE-3)は、TLM や CASE-2 と概ね一致しており、領域を分割することによる計算精度の劣化は小さいことが分かる。

図-12 震源～神戸間の速度波形 (EW 方向) の比較

提案手法で差分計算の対象となるグリッド数は 2099 万 (上部 1157 万、下部 942 万) で不等間隔グリッドのみを用いた場合 (6270 万) の約 $1/3.0$ となる。演算ステップ数は提案手法で 1.61×10^{11} (上部 1.33×10^{11} 、下部 0.27×10^{11}) となり、不等間隔グリッドのみを用いた場合 (1.01×10^{12} 、時間刻みを 0.0093 秒として評価) の約 $1/6.3$ となる。下部領域の演算ステップ数が相対的に小さくなることにより、高い計算効率を得られることが分かる。

3.3 波動伝播特性と観測記録との比較

震源から大阪平野方面に伝播する地震波について、断層直交方向に近い EW 方向の速度コンターのスナップショットを図-11 に示す。震源断層で発生した地震波は同心円状に拡がり、ディレクテ

(上段:観測, 下段:解析で上からNS, EW, UD成分)

図-13 観測記録と計算による速度波形の比較

イビティ効果により生じた振幅の大きな波群が大阪平野側に伝播する(図-11(a))。最初は大阪平野の西端より入射し、平野内の堆積地盤中を増幅しながら神戸地域に伝播する(同図b,c)。大阪平野内では波群が通過した後も、地震波が堆積地盤内で増幅し停留する(同図d)。

震源から神戸地域に至る観測地点で、観測記録と計算による速度波形を図-12に比較した。図-6の△印で示す7地点はいずれもKiK-net²⁴⁾の地中記録であり、地表記録を規準とした設置方位の補正角¹⁾を考慮してEW方向の速度波形を評価した。計算では、後に示す神戸地域の地震動を含め、観測記録の1~2秒前後で卓越するやや短周期の地震動成分を再現することができなかったため、観測、解析ともに25秒のローパスフィルターを与え速度波形を比較した。最も震源に近いOKYH11ではやや差異が見られるものの、その他の地点では計算波形により主要動の到達時間、振幅や位相特性が良好に捉えられている。

次に神戸市の中心部で得られた観測記録と計算波形を比較して図-13に示す。比較対象地点は図-14に示す7地点であり、関西地震観測研究協議会²⁵⁾による神戸大学(KBU)、本山第一小学校(MTY)、気象庁²⁶⁾による神戸海洋気象台(JMA)、魚崎北町(UZK)、K-net²⁷⁾による鳥原町(HYG021)、港湾地域強震観測システム²⁸⁾による麻耶埠頭(MYG)、文献²⁾で示した兵庫駅前(HGS、地表面)である。計算では $V_s=0.5\text{km/s}$ より小さい表層地盤による増幅の影響は無視した。波形は観測記録の刻時を考慮して並べているが、刻

図-14 神戸地域の強震観測点位置

図-15 擬似速度応答スペクトル ($h=5\%$) の比較

時情報がない場合や十分な較正が行われていない場合(MYG, HGS)は計算波形の主要動部に合わせて調整した。六甲山側に位置するKBUやJMA、HYG021では1~2cm/sレベルの小さい振幅となっており、波動の到達時間や振幅、位相特性が解析により良好に再現されている。堆積地盤側に位置するHGSやMYG、UZKでは、観測記録に振幅の大きい1~2つのパルス波が見られる。計算波形でも同様の傾向が見られ、神戸直下の深部地盤構造により地震動が増幅したことが分かる。

神戸中心部の西側に位置するHGS、HYG021地点の擬似速度応答スペクトル(減衰定数5%)を図-15に示す。当該地域では5秒前後の長周期成分が卓越し、山地側のHYG021に対し堆積地盤側のHGSで増幅する点が、観測と計算で共通に見られる。

3.4 盆地端部近傍の地盤増幅特性

HGS地点を通り六甲断層に直交する断面の最大速度分布を、断

図-16 神戸中心部西部の断層直交断面における最大速度分布

図-17 立ち上がり時間 1 秒時の HGS における速度波形(EW 方向)と擬似速度応答スペクトル (h=5%)

図-18 立ち上がり時間 1 秒時の断層直交断面における最大速度分布

面近傍の観測記録と比較して図-16に示す。観測記録はHGS、HYG021、JMAの他、気象庁²⁶⁾による荒田町、細田町、また六甲山側に位置するKBU、MTYを加え、盆地端部からの距離で整理して示した。●▲で示す観測、太実線、太点線で示すFDMの解析結果には2.5秒のローパスフィルターを掛けている。

観測記録の振幅レベル、分布性状は解析により良好に再現されている。解析結果では1995年兵庫県南部地震時に見られた「震災の帯」域での地震動増幅と異なり、盆地端部より大阪湾に向かって徐々に最大速度が大きくなる傾向が見られる。また同図には、5Hzまでの振動数成分を含む観測記録(○△)と、当該断面を対象に2次元FEMによるシミュレーション解析を実施したときの最大速度分布²⁾(細実線、細点線)を併せて示す。短周期成分を考慮す

(a) 立ち上がり時間 4s.

(b) 立ち上がり時間 1s.

(数値は cm/s。コンター線は 0.25cm/s 刻みで表示。色の濃淡レベルは各ケースで変えている。)

図-19 神戸地域の最大速度分布 (EW 方向)

ることにより最大振幅が1.5~2倍程度大きくなり細かい凸凹は現れるが、盆地端部より徐々に最大速度が大きくなる傾向は共通に見られる。この現象は、東灘地域の断層直交断面を対象に検討した神戸大学~六甲アイランド間の観測記録や、S波鉛直入射を仮定して計算した最大速度分布にも同様に見られ²⁹⁾、当該地域で卓越する5~6秒の長周期地震動による影響が大きいものと考えられる。

3.5 やや短周期地震動による地盤増幅特性の変化

1995年兵庫県南部地震時には、1秒前後の卓越周期を有する地震波が入射し、盆地端部より約1km離れた位置で地震動が増幅した。2000年鳥取県西部地震の震源断層は神戸地域より遠方に位置するため、地震波の入射場は震源断層が直下に存在しほぼ真下より入射する1995年兵庫県南部地震時とは異なるものと考えられる。ここでは、より短周期の地震波が入射したときの盆地端部近傍における地盤増幅特性の変化を調べるため、仮想の震源モデルとして鳥取県西部地震時の震源時間関数の立ち上がり時間を4秒から1秒に変えた。立ち上がり時間は解析最小周期(1.5秒)を考慮して設定した。最大すべり速度は同じ(最終すべり量は1/4)とし、震源時間関数に1.5秒のローパスフィルターを掛け計算を行った。

HGS地点の速度波形と応答スペクトルを図-17に示す。当該地点での地震動の卓越周期は約2.5秒となっている。次にHGS地点を通り六甲断層に直交する断面上の最大速度分布を図-18に示す。NS方向ではそれほど顕著ではないが、EW方向では盆地端部寄りにピークが現れ、水平2方向の波形を時間軸上で合成し最大値を評価した場合でも同様の傾向が得られる。立ち上がり時間4秒、1秒のケースで神戸地域におけるEW方向の最大速度分布を比較した結果を図-19に示す。神戸地域全体で最大速度のピークが現れる位置

が盆地端部側に寄っており、地震動の有する卓越周期によって盆地端部における地盤増幅特性が変化する様子が分かる。短周期の地震波が入射する場合に端部寄りに地震動の増幅域が現れる傾向は、単純な盆地端部構造とパルス波を用いて検討したSV波鉛直入射時の増幅特性¹²⁾にも同様に見られる。これは地震波の入射条件に関わらず、周期特性によって「震災の帯」域で地盤動が増幅する可能性を示唆する。

4. まとめ

大領域地盤の波動伝播解析に要する計算負荷を軽減するために、不均等、不連続となるグリッド間隔を用い、領域毎に時間刻みを変化させた3次元差分法を提案した。解析領域全体をある深さ位置で上部、下部領域に分割し、各領域で異なるグリッド間隔、時間刻みを与えることにより、グリッド数や計算ステップ数を従来の差分法に比べ、低減させることができた。また堆積盆地を含む地盤構造を用いた検証解析により、提案手法の妥当性を示した。次に提案手法を用い2000年鳥取県西部地震時の神戸地域における強震動評価を行った。神戸市内で得られた観測記録のシミュレーション解析を実施するとともに、1995年兵庫県南部地震時の「震災の帯」の一原因となった、盆地端部構造による地盤増幅特性を検討した。これより得られた知見を以下にまとめる。

①震源断層から大阪平野を含む解析領域を設定するための予備検討を行った結果、減衰領域の水平方向のグリッド間隔を外部領域に向かって徐々に拡張したグリッドモデルを用いることにより、解析領域境界で発生する人工的な反射波の影響が小さくなることが分かった。

②グリッド間隔と時間刻みを可変とする3次元差分法を用いることにより、不等間隔グリッドのみを用いた場合に比べグリッド数が約1/3.0に、計算ステップ数が約1/6.3となり、高い計算効率を得られた。

③2000年鳥取県西部地震時に神戸中心部で得られた観測記録のシミュレーション解析では、震源-神戸間の速度波形の他、神戸地域における六甲山側、堆積地盤部における観測地点の速度波形や応答スペクトルを良好に再現することができた。

④六甲断層に直交する断面の最大速度分布を断面近傍の観測記録と比較した結果、大阪湾に向かって徐々に最大速度が大きくなる傾向を解析により捉えることができた。より短周期の地震動に対する地盤増幅に着目した検討を行った結果、最大速度のピークの現れる位置が盆地端部寄りとなる傾向が現れ、地震動の有する卓越周期によって盆地端部構造の増幅特性が変化する事が分かった。

謝辞

本研究では防災科学技術研究所(K-net, KiK-net)、気象庁、関西地震観測研究協議会、都市基盤整備公団、港湾地域強震観測システムによる観測記録を利用させていただきました。また産業技術総合研究所・活断層研究センター・堀川晴央氏、地域地盤環境研究所・宮腰 研氏より大阪平野の地盤構造に関する情報を提供していただきました。本論文の作成過程では鹿島小堀研究室、武村雅之博士より貴重な御助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。一部の図の作成に GMT3.3 を利用しました。

参考文献

1) 加藤研一、山添正稔、武村雅之：中国・四国地方を対象とした KiK-net 地中埋設地震計の設置方位の推定—鳥取県西部地震、

- 芸予地震の強震記録に基づく検討一、地震第2巻、第54巻、pp.421-429、2001
- 2) 永野正行、山田有孝、辻 幸二、小田 聡：高層 RC 建物の地震応答シミュレーション解析と深部地盤構造の影響、日本建築学会構造系論文集、第560号、pp.75-82、2002.10
- 3) 服部宏治、渋谷孝男、長田勝幸、中澤俊幸：2000年鳥取県西部地震における郵政施設の免震建物地震観測記録、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.555-556、2002
- 4) Graves, R. W., 1996, Simulating Seismic Wave Propagation in 3D Elastic Media Using Staggered-Grid Finite Differences, Bull. Seism. Soc. Am., 86, 1091-1106
- 5) Pitarka, A., 1999, 3D Elastic Finite-Difference Modeling of Seismic Motion Using Staggered Grids with Nonuniform Spacing, Bull. Seism. Soc. Am., 89, 54-68.
- 6) Aoi, S., and H. Fujiwara, 1999, 3D Finite-Difference Method Using Discontinuous Grids, Bull. Seism. Soc. Am., 89, 918-930.
- 7) 大湊隆雄：非均一格子による3次元差分法を用いた波形合成の効率化、S081-P009、地球惑星科学関連学会 2002年合同大会予稿集
- 8) 林 宏一、斎藤秀樹、引間和人：差分法による三次元地震波動シミュレーションにおける PC クラスタの利用、S081-017、地球惑星科学関連学会 2002年合同大会予稿集
- 9) Furumura, T.: Large Scale Parallel 3D Simulation of Seismic Wave Propagation and Strong Ground Motions Using The Earth Simulator, SS04/07, IUGG2003
- 10) 山田有孝、永野正行、山添正稔、三浦賢治：領域別に要素分割と時間刻みを可変とする大領域三次元地盤の地震応答解析法、日本建築学会構造系論文集、第561号、pp.73-80、2002.11
- 11) 藤原広行：3次元動弾性解析のためのボクセル有限要素法、第11回日本地震工学シンポジウム、94、pp.487-492、2002
- 12) 永野正行：2次元盆地端部構造の地震動増幅と表面波の干渉、日本建築学会構造系論文集、第552号、pp.85-92、2002.2
- 13) 趙 伯明、香川敏生：大阪堆積盆地モデルの高精度化及びその応用—2000年鳥取県西部地震(M_{JMA}7.3)の強震動シミュレーション、第11回日本地震工学シンポジウム、97、pp.501-504、2002
- 14) Virieux, J.: SH wave propagation in heterogeneous media: Velocity-Stress Finite-Difference Method, Geophysics 51, pp.889-901, 1984
- 15) 青井 真、藤原広行：不連続格子による3次元差分法を用いた波形合成(その5) —不連続格子と不等間隔格子の併用—、地球科学惑星合同大会、SI-003、2000
- 16) Clayton, R. W. and B. Engquist: Absorbing Boundary Conditions for Acoustic and Elastic Wave Equations, Bull. Seism. Soc. Am. 67, pp.1529-1540, 1977
- 17) 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.
- 18) 渡辺哲史、永野正行：薄層法による震源断層解の精度向上と大規模想定地震への適用、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.247-248、2003
- 19) 永野正行、山田有孝：3次元盆地端部構造の境界近傍における地震動増幅特性、日本建築学会構造系論文集、第560号、pp.51-58、2002.10
- 20) 堀川晴央、水野清秀、佐竹健治、関口春子、加瀬祐子、杉山雄一、横田 裕、末廣匡基、A. Pitarka、大阪平野の3次元地盤構造モデルの作成、活断層・古地震研究報告、No.2、291-324、2002
- 21) 宮腰 研、香川敏生、趙 伯明、徳林宗孝、澤田純男、大阪堆積盆地における深部地盤構造のモデル化(その3)、第25回地震工学研究発表会講演論文集、pp.185-188、1999
- 22) 栗本 修、奥田 暁、田中清和、若松邦夫：大阪平野の3次元地下構造モデルと地震動シミュレーション、大林組技術研究所報、No.60、pp.1-8、2000
- 23) 池田隆明、釜江克宏、三輪 滋、入倉孝次郎：経験的グリーン関数法を用いた2000年鳥取県西部地震の震源のモデル化と強震動シミュレーション、日本建築学会構造系論文集、第561号、pp.37-44、2002.11
- 24) 防災科学技術研究所：基盤強震観測網、<http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>
- 25) 関西地震観測研究協議会事務局：関西地震観測研究協議会地震記録 CD-ROM 資料集、2001
- 26) 気象庁：95型震度計波形データ(平成12年鳥取県西部地震) 気象業務支援センター、2000
- 27) 防災科学技術研究所：強震ネットワーク、<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>
- 28) 港湾地域強震観測システム、<http://www.eq.ysk.nilim.go.jp/>
- 29) 永野正行、大野 晋、菊地利喜郎、小林啓美：深層アレイ観測記録のシミュレーション解析と基盤の不整形性の影響、日本建築学会構造系論文集、第570号、pp.45-52、2003.8

(2003年9月8日原稿受理、2004年3月12日採用決定)