

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760361

研究課題名(和文) 粒子法による地震発生時の地震動シミュレーション

研究課題名(英文) Numerical simulation of strong ground motion induced by earthquakes using a particle method

研究代表者

武川 順一 (Takekawa, Junichi)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：70463304

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円、(間接経費) 480,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、地震発生時の地震動(各地がどれだけの揺れに見舞われるか)を予測するための新しい手法の提案をおこなった。本手法には簡便に精度よく計算がおこなえるという潜在的な特徴があるが、地震動予測の分野への適用性はまだまだ議論されていなかった。そこで、本研究ではこの手法を揺れの予測に適用するための基礎的な検討をおこなったものである。その結果、従来法よりも簡便で精度よく複雑な地盤モデルに対して揺れの予測をおこなえることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：In the present study, we propose to use a new method for the prediction of strong ground motion induced by earthquakes. Although the method has a potential to predict accurate ground motion in a simple manner, the method has not been applied to the estimation of ground motion yet. Therefore, we investigated the applicability of this method to the estimation of strong ground motion. Our results revealed that this method can predict ground motion more accurately than the conventional methods in a simple manner.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：粒子法 強震動予測 地震動シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

近年に発生した多くの被害地震により、我が国における地震対策の重要性は再認識されてきており、国や多くの地方自治体において被害想定や復旧シミュレーションなどがおこなわれている。これらをおこなう上で最も基礎となる情報が、実際に地震が発生した際にどの程度の揺れが対象地域を襲うかということである。原子力発電所の耐震性評価や市民啓発用の予測震度分布図の作成、上下水道の復旧シミュレーションなども、この基礎情報がなければ成り立ちえない。よって、各行政が想定する将来発生するであろう地震に対して、正確な地震動シミュレーションがおこなえるということの重要性は言を俟たない。

地震動シミュレーションをおこなう上で中核となっている技術が数値シミュレーションである。これは、地震波動伝播を支配する方程式を何らかの方法によって離散化し、数値的な代数計算によって方程式を近似的に解くものである。この分野の数値シミュレーションの歴史は古く、主に差分法によって解析がおこなわれてきた。現在では有限要素法や境界要素法などの手法も適用され始めているが、依然として実務では差分法が用いられることが多い。その理由として、計算負荷の少なさや理論の簡便さが挙げられる。近年においても、スタガード格子や不連続格子の開発などで差分法は進化してきたが、本質的な問題として複雑な自由表面が扱いにくいこと、格子のランダムな改良ができないことが問題点として挙げられる。これは、山や谷などの地形や、盆地などの局所的な低速度領域が扱いにくいことを意味する。これらの問題点は地震動予測をする上で大きな欠点となり得る。なぜなら、地表面を伝播する表面波は大きなエネルギーを有しており、また、盆地構造などによる低速度領域が局所的な地震動の増幅を招くことが知られているからである。このことより、差分法が有する上記の問題点はより正確な地震動再現のために改善されることが望ましく、新しいアプローチの開発が待たれているところである。

2. 研究の目的

申請者は粒子法による地震波動伝播シミュレーションに着目し、上記の問題を解決することを試みた。粒子法では規則的に並んだ格子ではなく、空間に任意に分布させた粒子で離散化をおこなう。これにより、計算効率では差分法に比べ分が悪くなるが、計算の自由度を向上させることが可能となり、上記の問題も解決できるようになると考えられる。粒子法を地震波動伝播シミュレーションに適用するにあたり、まず、地震により発生する地震動を再現するために、地震の震源である

必要がある。差分法では既にスタガード格子差分法にダブルカップル震源が導入されているが、粒子法による地震動シミュレーションがあまり普及していない現在では、粒子法におけるダブルカップル震源の表現方法から新たに考案する必要がある。続いて、粒子法を用いて任意の地形や地下構造を容易に表現できることを確かめた後、具体的な精度について検討をおこなう。一般に、任意の地形を階段状に表現した場合、表面波の再現精度は大きく低下することが知られている。粒子法ではメッシュフリーの概念を用いて滑らかに境界を表現できると考えられるため、従来法よりも精度良く表面波の伝播を再現できることが期待される。そこで、具体的にどの程度の精度改善が見られるかを定量的に評価する。

3. 研究の方法

最初にダブルカップル震源の粒子法への導入を試みる。差分法では隣り合った格子を用いてダブルカップル震源の導入をおこなうが、粒子法では規則配置を仮定しないため隣り合う粒子という概念が無い。そこで、影響半径内の粒子を用いてダブルカップル震源の導入を試みた。その結果を Graves の方法による差分法などの従来法による結果と比較することで検証をおこなう。その後、任意の速度構造を有する解析対象にも適用しやすくするように、粒子の分割手法について新しく開発をおこない、従来手法では難しい簡便で任意の構造にも対応可能なモデル化の実現を検討する。また、任意の地形を表現する際の表面波伝播再現精度について具体的に検討するため、傾斜した斜面を階段状の粒子で表現した際の表面波伝播の計算結果を解析解と比較し、傾斜角と精度の関係を詳細に調べる。

4. 研究成果

研究初年度では、影響半径を用いたダブルカップル震源の導入について検証した。粒子法による計算結果を差分法による結果と比較したところ、両者は良い一致を示した。また、簡便な方法で効率良く計算精度を向上させるため、地表面付近の粒子だけを細かく分割する方法を適用した。この方法では、有限要素法のようなメッシュの作業が必要ないため、簡便に解像度を上げることが可能である。その結果、自由度をあまり増やすことなく効率的に精度を向上させることが可能となった。しかし、計算コストに関しては差分法よりも大きくなることが明らかとなり、これを解決することが次年度での重要課題であることがわかった。以上の成果は、Takekawa et al., *GJI*, (2012)にまとめられている。

2 年目では、初年度で明らかとなった計算

時間や精度に関する問題を解決するため、スタガード粒子の概念を新たに考案した。これは、互いに微分の関係にある変数同士を、同一点上ではなく互い違いに配置することで精度と安定性の向上を図るものである。半無現媒質を伝播する表面波の問題に対して得られた結果を初年度で開発した手法による結果と比較したところ、大幅な精度と安定性の改善が見られた。また、結果として計算コストも改善されることがわかった(Takekawa et al., *PAGEOPH*, in press)。続いて、スタガード粒子を用いて任意の地形を表現した際に、表面波伝播の再現精度がどのように変化するか検討をおこなった。傾斜した斜面を表現する際に、地表面より上方にある粒子を格子状配置から取り除くことで再現した。この方法だと、斜面は階段状に並んだ粒子で再現されることになる。計算結果を解析解と比較したところ、本手法は従来法である差分法よりも精度良く表面波伝播を再現できることが示された(Takekawa et al., *GEOPHYSICS*, in press)。

本研究では、地震発生による強震動予測のための新しい数値シミュレーション手法として粒子法を提案し、その精度や安定性・計算コストについて詳細に検討をおこなった。その結果、任意の地形を有するモデルに対しても、従来法である差分法よりも精度良く表面波伝播が再現できることがわかった。また、自由度の高い計算粒子の解像度向上が可能であることがわかった。以上の結果から、提案手法が新しい数値シミュレーション手法として強震動予測に適用可能であることが示された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 7 件)

- Takekawa, J., Madariaga, R., Mikada, H., Goto, T., Numerical simulation of seismic wave propagation produced by earthquake by using a particle method, *Geophysical Journal International*, **191**, 3, 1305-1316, 2012.
- Takekawa, J., Mikada, H., Goto, T., Sanada, Y., Ashida, Y., Coupled simulation of elastic wave propagation and failure phenomenon using a particle method, *Pure and Applied Geophysics*, **170**, 4, 561-570, 2013.
- 武川順一, 三ヶ田均, 後藤忠徳: 表面波伝播シミュレーションにおける粒子法の精度評価, *物理探査*, **66**, 2, 85-95, 2013.
- Takekawa, J., Mikada, H., Goto, T., Computational rock physics using a Hamiltonian particle method for effective elastic properties of cracked media, *Proc. 16th International Symposium on Recent*

Advances in Exploration Geophysics in Kyoto, **16**, 1-4, 2012.

- Takekawa, J., Mikada, H., Goto, T., A Hamiltonian particle method with a staggered particle technique for simulating seismic wave propagation, *Pure and Applied Geophysics*, in press. doi:10.1007/s00024-013-0763-x
- Takekawa, J., Mikada, H., Goto, T., An accuracy analysis of a Hamiltonian particle method with the staggered particles for seismic wave modeling including surface topography, *GEOPHYSICS*, in press. doi:10.1190/GEO2014-0012.1
- Takekawa, J., Mikada, H., Goto, T., A Hamiltonian particle method with staggered technique for simulating strong ground motion, *Recent Advances in Exploration Geophysics*, **17**, 13-16, 2013.

〔学会発表〕(計 3 件)

- Takekawa, J., Mikada, H., Goto, T., Computational rock physics using a Hamiltonian particle method for effective elastic properties of cracked media, *16th International Symposium on Recent Advances in Exploration Geophysics*, 1-4, 2012.
- Takekawa, J., Mikada, H., Goto, T., Application of a particle method for estimating effective elastic properties in cracked media, *AGU Fall Meeting*, MR43A-2302, 2012.
- Takekawa, J., Mikada, H., Goto, T., A Hamiltonian particle method with staggered technique for simulating strong ground motion, 地球惑星科学連合大会(招待講演), STT11-04, 2013.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:

国内外の別：

〔その他〕
特になし

6．研究組織

(1)研究代表者

武川 順一 (京都大学)

研究者番号：70463304

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：