

# 弾性波が作り出す破壊現象とそのシミュレーション

松岡 俊文<sup>1</sup>・若月 然太郎<sup>1</sup>

<sup>1</sup>京都大学 工学研究科資源工学専攻 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

E-mail:matsuoka@kumst.kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

地下構造は不均質で不連続なものと考えた方が多い場合が多く、従来の連続体という仮定に基づいた計算法では、破壊現象などに対するシミュレーションは困難であった。

近年この様な問題点に対して、不連続体力学モデル<sup>1)</sup>あるいは粒状モデル<sup>2)</sup>と呼ばれる媒質のモデル化の研究が精力的に押し進められている。そこで本研究においても個別要素法<sup>3)</sup>を用いて、弾性波動伝播の問題に離散的視点からアプローチすることを試みた<sup>4)</sup>。

本論文では個別要素法を用いて弾性波の伝播の様子をシミュレーションし、有限差分法と比較することによってその有用性を調べた。さらに弾性波動が引き起こす破壊現象の例である、ホプキンソン効果のシミュレーションを試みた。

## 2. 個別要素法

### (1) 粒子配列及び相互作用

今回のシミュレーションでは、2次元モデルを考え、各粒子は円盤状として、図1のように隙間なく正六角形格子状に配列しているとする。そして隣り合う粒子同士は、ばね定数  $K$  を持つ仮想ばねでつながれているものとする。

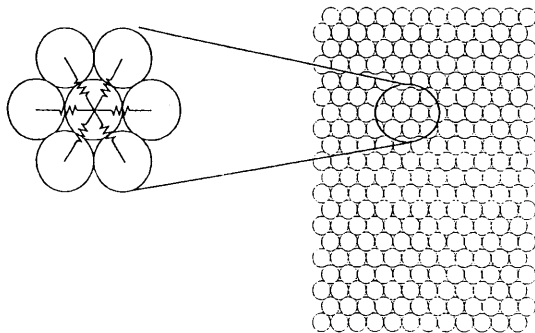


図-1 2次元粒子モデルの粒子配列

粒子同士は隣り合う粒子と、接点において放射状に相互作用を及ぼしあっていると考える。そしてこの関係はフックの法則で記述できるとする。また、各粒子の運動は全てニュートンの運動方程式に支配される。粒子に作用している力から、ニュートンの運動方程式によって、各々の粒子の加速度が求まる。

### (2) ラーメ定数

次に、同じ媒質を粒状体と連続体としてモデル化した2つの場合において、媒質に変形を与えたときに両者とも同じエネルギーを持つという考えより、最密充填された格子状媒質に対して、弾性体のパラメータであるラーメ定数  $\lambda, \mu$  が、粒子間の相互作用を表現しているバネ定数を用いて以下のように表現できる<sup>5)</sup>。

$$\lambda = \mu = \frac{\sqrt{3}}{4} K$$

したがって、ばね定数(マイクロパラメータ)を与えるとラーメ定数が決まり、逆にラーメ定数、又は弾性波速度(マクロパラメータ)を与えると、粒子モデルにおけるばね定数  $K$  が決まることがわかる。

## 3. 弾性波動現象シミュレーション

### (1) シミュレーションの内容

モデルとして、8km四方の媒質の中央で発震した時の、P波とS波の伝播の様子を調べた。いずれも個別要素法によるシミュレーション結果が妥当な結果であるかどうかを調べるために、弾性波動方程式に対する差分解との比較を行った。

なお震源粒子には下図のような変位を与えた。

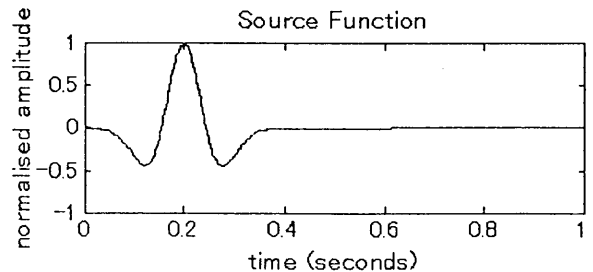


図-2 シミュレーションで用いた震源関数

### (2) シミュレーション結果

速度構造が一定である均質媒質の場合についてのシミュレーションでは、P波速度が3000m/s、S波速度が1732m/sで伝播する媒質を作成した。

図3、4に示すのは、発振してから1.0秒後の正規化した変位場のスナップショットを、同様の条件で行った有限差分法のシミュレーション結果と比較し

たものである。左図は個別要素法、右図は有限差分法によるものである。両者共にP波、S波がはっきりと現われており、ほぼ同形となっている。

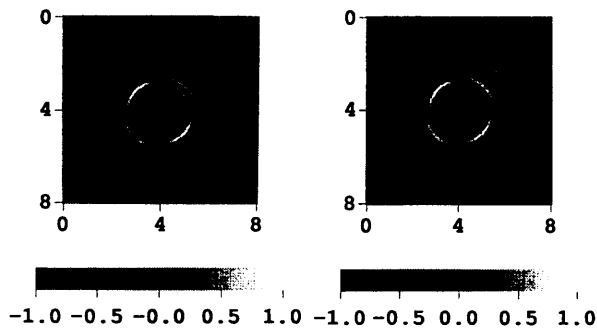


図-3 変位のスナップショットのx成分

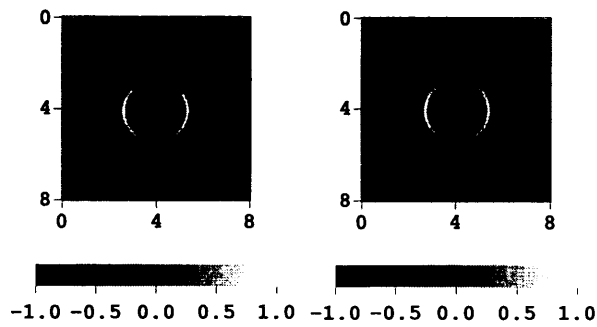


図-4 変位のスナップショットのy成分

#### 4. ホプキンソン効果のシミュレーション

##### (1) 破壊現象との組み合わせ

破壊現象と波動現象を同一のシミュレータで取り扱う試みとして、ここではホプキンソン効果<sup>6)</sup>のシミュレーションを行った。

##### (2) シミュレーションの内容

弾性棒は、半径が1.0mmの粒子を縦41個、横201個並べて縦65mm、横400mmのものを作った。弾性波伝播速度は、P波が5500m/sである。そしてこの弾性棒の片方の端面にある粒子に、図5のような衝撃力を与えた。この衝撃力の最大値は約13.8MNである。

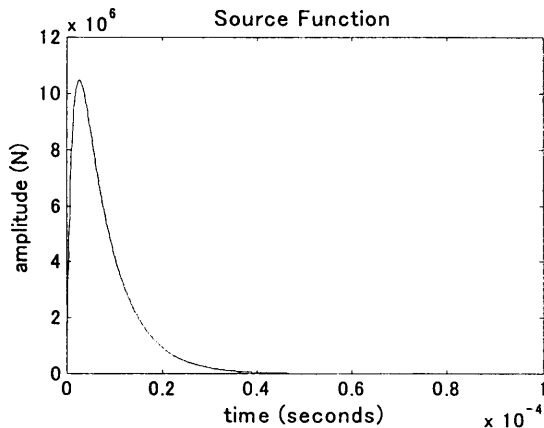


図-5 弾性棒に与えた衝撃力

##### (3) シミュレーション

最大振幅が13.8MNの衝撃を左端に与えた時の、シミュレーションの経過を図6に示す

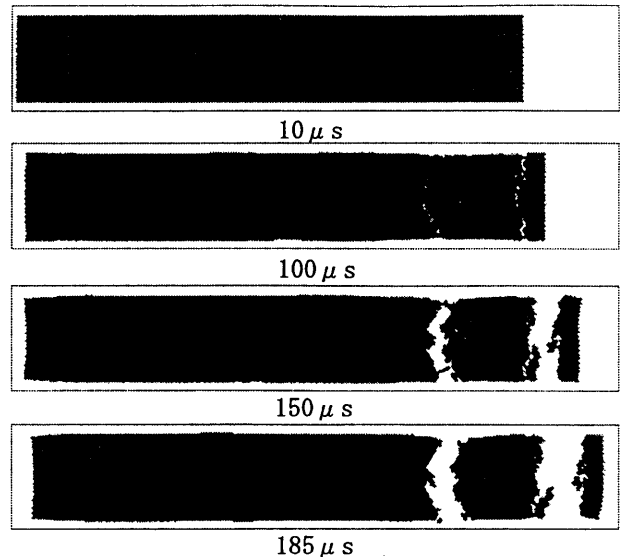


図-6 最大振幅13.8MN

応力波が弾性棒内を伝わって、弾性棒が破断した様子が再現された。

#### 5. まとめ

今回我々は媒質を不連続体力学モデル(粒状モデル)によって表現することで、連続体現象である弾性波動の伝播現象と、弾性波動が作り出す破壊現象であるホプキンソン効果のシミュレーションが、同一のプログラムを用いて、簡単にシミュレーション可能であることを示すことが出来た。この事は連続体内で生じている破壊、破断現象の解析において、また逆に破断面を持つような媒質中の波動伝播現象の解析において、非常に意味深い結果であると考えられる。今後はより複雑な場合を想定し本手法を用いた研究を進めていきたい。

#### 参考文献

- 1) 矢川元基, 吉村忍: 計算固体力学、岩波講座現代工学の基礎7, 岩波書店 91p, 2001.
- 2) Oda, M. and Iwashita, K.: An Introduction Mechanics of Granular Materials, Balkema, Netherlands, 381pp, 1999.
- 3) Cundall, P.A. and Strack, O.D.L.: A Discrete numerical model for Granular Assemblies, Geotechnique, 29(1), 47-65, 1979.
- 4) Toomey, A. and Bean, C. J.: Numerical simulation of seismic waves using a discrete particle scheme, Geophysics. J. Int. vol.141, 595-604, 2000.
- 5) Hoover, W.G., Ashurst, W.T. and Olness, R.J.: Two-dimensional computer studies of crystal stability and fluid viscosity, The Journal of Chemical Physics, vol.60, 4043-4047, 1974.
- 6) W. Johnson: Impact Strength of Materials, Edward Arnold, 59, 1972.
- 7) 馬貴臣, 三宅淳己, 小川輝繁, 和田有司, 緒方雄二, 瀬戸政弘, 勝山邦久: ホプキンソン効果による応力速度が大きい場合の材料の引張強度, 火薬学会誌, Vol.59, No.2, 49-55, 1998.