

関西大学大学院 学生員 ○杉野 友通
京都大学大学院 正会員 松岡 俊文

関西大学工学部 正会員 楠見 晴重
京都市 中西 真弓

1.はじめに

近年、数値解析手法による不連続体の解析がよく行われている。その中でも特に個別要素法は、地盤、岩盤等における不連続体の破壊シミュレーション解析に大変有用であり、注目されている。しかし、解析を行うにあたりパラメータの決定に任意性が残り、材料定数を客観的に定めることができないのが現状である。そこで、本研究では個別要素法を用いて、弾性波動のシミュレーション解析を行い、材料定数の客観的決定手法の確立を試みた。

2.解析手法

2.1 本研究で用いた解析モデルの特徴

個別要素法とは、個々の粒子間に仮想のばねを配し、その作用力から加速度、速度、変位を算出し粒子の挙動を追跡する解析手法である。このそれぞれ微小な粒子を集合体として巨視的に捉えることにより、岩盤などの動力学的挙動を解析する方法である。今回の解析ではばねの自然長を粒子の接触点とし、のびると引張力、縮むと圧縮力が働くように定義している。図.1に解析で用いた媒質のモデルを示す。粒子配置は最密充填となる六角形配置とした。

2.2 ラーメ定数の導出

図.2は垂直方向とせん断方向のばねについて示した図である。ここで、鉛直方向のばね定数を K_1 、水平方向のばね定数を K_2 とした。

媒質に変位を与えた時のエネルギーについて述べる。巨視的に見た弾性体としてのエネルギーと、微視的に見た粒子間のばねによるエネルギーが等しいと考えられる¹⁾。これより、ラーメ定数が以下のように定義される。

$$\lambda = \frac{\sqrt{3}}{4}(K_1 - 3K_2) \quad \mu = \frac{\sqrt{3}}{4}(K_1 + 3K_2) \quad (1)$$

(2)式は媒質のラーメ定数、粒子半径と粒子の重さから弾性波速度を導いたものである。

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = r_0 \sqrt{\frac{9(K_1 + K_2)}{8M}} \quad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = r_0 \sqrt{\frac{3(K_1 + 3K_2)}{8M}} \quad (2)$$

ここで、 ρ ：媒質の密度 M ：粒子の重さ r_0 ：粒子半径

これより、ラーメ定数が求まると、必要とする媒質の弾性パラメータを自由に決定することができる。

2.3 弾性波動シミュレーション

速度構造が一定である均質媒質のモデルについて、弾性波動現象のシミュレーションを行った。図.3に粒子配列と震源粒子を示す。粒子を横方向に400個、上下方向に462個六角形配列で並べる。ひとつの粒子は半径が10.0mで、媒質の密度は2000.0kg/m³に設定する。したがって粒子一個の重さは692820kgとなる。媒質は一辺が8kmの正方形媒質となる。媒質中央

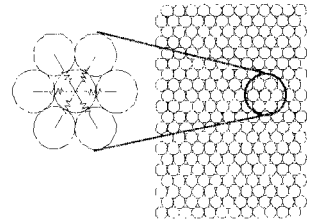


図.1 粒子配置

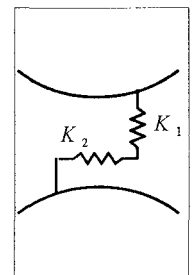


図.2 仮想ばね

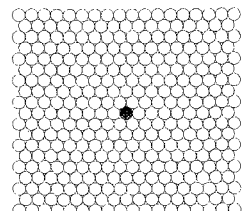


図.3 媒質と震源粒子

の粒子を震源粒子とし、強制的に変位を与え震源とした。震源関数には、リッカーウエブレットを使用した。

3.シミュレーション結果

3.1 受振波形

図.4 は受振点における変位の時間変化をプロットしたものである。これはy成分の波形である。実線は受振点における波形であり、鎖線は震源の波形である。また、重ねた波形から、震源波形が同位相で、減衰することなく伝播しているということがわかる。

3.2 変位のスナップショット

図.5 はx成分の変位についてのスナップショットである。左から 0.5、1.0、1.5、2.0 秒後の変位について示している。解析開始直後は P 波,S 波の違いが鮮明ではないが、時間が経つにつれてそれぞれ分離して伝播していることがわかる。

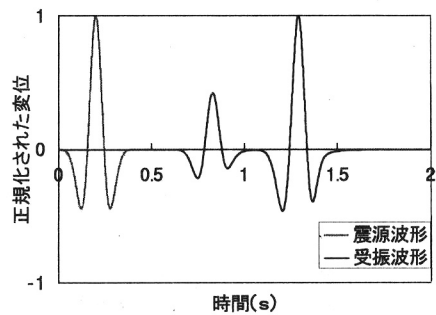


図.4 受振点での時間－変位曲線

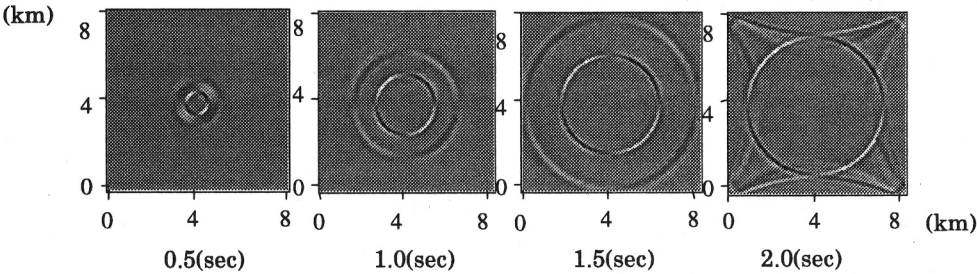


図.5 スナップショット

3.3 シミュレーション結果と理論値の比較

震源点における P 波と S 波の到達時間と、震源と受振点の距離から伝播速度を算出した。表.1 に理論式より求めた値とシミュレーションの結果を示す。

理論式より求めた弾性波速度とシミュレーション結果の速度はほぼ近い値となっている。しかし、これらの速度の間には多少の誤差が生じている。S 波の誤差は 0.3～1.8%と近い値となるが、P波のずれは 1.2～7.2%とばらつきがある。ポアソン比が大きくなるにつれて、誤差は大きくなる傾向が見られた。

表.1 シミュレーション結果

K_1 (kg/s ²)	K_2 (kg/s ²)	理論式より求めた値			シミュレーション結果		
		V_p (m/s)	V_s (m/s)	ν	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ν
1.299×10^{10}	0.087×10^{10}	3000.00	1837.12	0.20	2897.08	1814.50	0.18
1.386×10^{10}	0	3000.00	1732.05	0.25	2955.90	1710.10	0.25
1.485×10^{10}	-0.099×10^{10}	3000.00	1590.00	0.30	3036.35	1585.13	0.31
1.732×10^{10}	-0.346×10^{10}	3000.00	1224.74	0.40	3214.76	1214.17	0.42

4. まとめ

個別要素法を用いて弾性波動のシミュレーションを行った結果、P 波、S 波が観測された。また、シミュレーションで確かめた伝播速度は、パラメータとして設定した速度とほぼ一致した。このことにより、媒質の材料の決定が可能となった。今後は、一軸圧縮やせん断などといった破壊現象のシミュレーション解析を行い、静的なポアソン比との比較から本研究の妥当性を確認したい。

参考文献 1)Toomey,A and Bean,C.J : Numerical simulation of seismic waves using a discrete particles scheme Geophys.J.Int , vol.141,595-604,2000