

III-192

不連続岩盤の動力学特性に関する基礎的研究

名古屋大学工学部(学) ○韓 思雄

名古屋大学工学部(正) 京谷 孝史

名古屋大学工学部(正) 市川 康明

名古屋大学工学部(正) 川本 脩万

1. はじめに

分布不連続面を持つような岩盤の力学特性を解明するには、最近いろいろな研究が行われている。とくに波動のような荷重に対しては、現在の段階で、解析の力学モデルがまだ完全と言いにくい。本研究では損傷力学理論に基づいて、不連続岩盤の動的力学モデル(損傷力学モデル)を提案した。数値実験結果を損傷モデルにより数値シミュレートし、損傷力学の動力学への適用性について検討した。

2. 不連続岩盤の動的解析

まず、岩盤中の亀裂がない部分に働く実質応力 $\underline{\sigma}^*$ と見掛けのCauchy応力 $\underline{\sigma}$ の間に

$$\underline{\sigma}^* = \underline{\sigma} (\underline{I} - \underline{\Omega})^{-1} \quad (1)$$

という関係を与えた。ここで $\underline{\Omega}$ が岩盤の不連続性を表すパラメータで、損傷テンソルと呼ばれる。¹⁾

式(1)を運動方程式に代入することにより、損傷場における波動方程式はつぎのようになる。

$$\nabla \cdot \underline{\sigma}^* (\underline{I} - \underline{\Omega}) + \underline{f} = \rho \ddot{\underline{u}} \quad (2)$$

ここに、 $\underline{u}$ が変位ベクトルで、 $\underline{f}$, ρ がそれぞれ単位テンソル、物体力および密度を表す。

物体力を無視した場合、無限体に対する平面波は

$$\underline{u} = \underline{A} \exp[i K (\underline{x} \cdot \underline{n} - c t)] \quad (3)$$

と書けるが、これに減衰を導入すると²⁾

$$\underline{u} = \underline{A} \exp(-\alpha_L \underline{x} \cdot \underline{n}) \exp[i K (\underline{x} \cdot \underline{n} - c^* t)] \quad (4)$$

となる。ここに、 $\underline{A}$ は波動の振幅ベクトル、 α_L は減衰係数、 $\underline{n}$ は波動の進行方向、 K は波数である。また、 c と c^* はそれぞれ連続岩盤と不連続岩盤における $\underline{n}$ 方向の波動の進行速度である。

一次元を考えれば、構成式 $\sigma^* = E \epsilon$ により、式(2)、(3) から、速度 c 、減衰係数 α_L と損傷係数 Ω の間に

$$\alpha_L^2 = 1 - \frac{\rho c^{*2}}{E(1 - \Omega)} \quad (5)$$

という関係式が得られる。 Ω が大きくなるにつれて波動の速度がだんだん減っていき、 $\Omega = 1$ の場合に、波動が伝播しないことは図1に示している

式(5) から、 c と c^* の間に

$$c^* \leq c \sqrt{(1 - \Omega)} \quad (6)$$

という不等式が得られる。これによって、波動の伝播速度が岩盤の不連続性によって減少することがわかる。ここに、 $c = \sqrt{E/\rho}$

3. 数値シミュレーション

運動方程式は仮想仕事の原理によって

$$\int_{\rho} \rho \ddot{\underline{u}} \cdot \delta \underline{u} dV + \int_V \underline{\sigma} \cdot \delta \underline{\epsilon} dV = \int_{St} \underline{t} \cdot \delta \underline{u} dSt + \int_V \underline{f} \cdot \delta \underline{u} dV \quad (7)$$

と書かれる。ここに、 $\underline{u}$ は仮想変位、 $\underline{t}$ は境界面 S_t に作用する表面力である。また、形状関数 $\underline{N}$ 、変位-ひずみマトリックス $\underline{B}$ 、節点変位 $\underline{U}$ を用いて離散化し、構成式 $\underline{\sigma} = \underline{D}^* \underline{\epsilon}$ にすると³⁾

$$\underline{M} \ddot{\underline{U}} + \underline{K}^* \underline{U} = \underline{F} \quad (8)$$

が得られる。ここに

$$\underline{M} = \int_V \rho \underline{N}^T \underline{N} dV, \quad \underline{K}^* = \int_V \underline{B}^T \underline{D}^* \underline{B} dV$$

$$\underline{F} = \int_{St} \underline{N}^T \underline{t} dS + \int_V \underline{N}^T \underline{f} dV$$

がそれぞれ質量マトリックス、剛性マトリックスおよび外力ベクトルである。

図2に示すような複数の亀裂が存在する岩質材料に対してNewmark β 法で直接積分を実施した結果、および、この物体に式(8)で示した損傷モデルを導入して同様に直接積分によって解いた結果も図(3)-(5)に示す。減衰率は、加速度、速度、変位の各々について最大振幅の変化によって定義した。これらの結果から、損傷力学モデルは動的な問題に対してはほぼ妥当な結果を与えることがわかる。また、亀裂の角度と波の散乱による減衰の間に、ほぼ線形な関係があり、(図3、図4)、波動速度が伝播距離にそって対数則に従って変化することもわかる(図5、図6)。

4. おわりに

ここでは、波動が不連続岩盤を伝わる時の力学特性を弾性範囲で取り扱ったが、今後、波動の散乱現象の特性についての精密な実験を実施し、その結果に基づいて減衰特性等を決めていくことが必要である。さらに、強震時における破壊挙動についても考えなければならない。

参考文献

- 1) 京谷孝史：岩質材料および岩盤に対する弾塑性損傷モデルに関する基礎的研究，第18回土質工学研究発表会(1983)，pp777-780.
- 2) Piau, M: Attenuation of a plane Compressional Wave by a Random Distribution of Thin Circular Cracks, Int. J. Engng. Sci., Vol. 17 (1979), pp. 151-167
- 3) 高木 淳：損傷理論による岩盤の変形・破壊過程に関する実験的および理論的研究，名古屋大学修士論文(1985)

YOUNG'S MODULUS (GPa)	1.0×10^2
POISSON'S RATIO	0.2
SPECIMEN SIZE (cm ²)	27×27
NUMBER OF CRACKS	1
CRACK LENGTH (cm)	5

Table 1 Material Constants

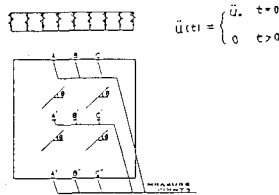


Fig.2 Crack model and Study points

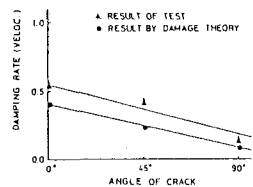


Fig.3 Relation between VELOC., damping rate and angle of Crack

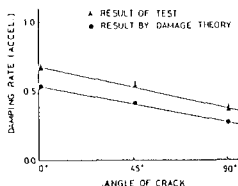


Fig.4 Relation between ACCEL., damping rate and angle of Crack

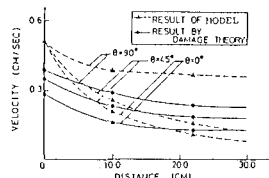


Fig.5 Comparison of damage theory and crack model results (VELOC.)

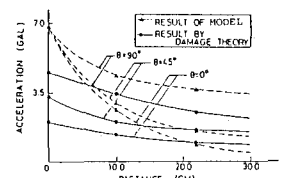


Fig.6 Comparison of damage theory and crack model results (ACCEL.)