

大成建設(株) 里 優 亀村 勝美

1. 緒 言

岩石が示すダイラタンシーは、岩盤の力学的安定のみならず、地下水の流れを研究する上で、あるいは地震予知などの面からも興味を持たれている。これは、ダイラタンシーが岩石内部での新しい空隙(クラック)の発生に起因していることや、巨視的な破壊への引き金になっていると考えられるため、このことは岩石の圧縮試験中に観測されるAEや弾性波速度の変化などにより間接的にはあるが裏付けられている。筆者らも、ここ数年、岩石が示すダイラタンシーに着目し、この発生機構について検討を進めているが、最近の研究で明らかになってきた、ダイラタンシーを示す岩石でみられる弾性波速度の異方性について、若干の考察を加えてみたのでここに報告する。

2. 弾性波速度の異方性

近年、計測技術の進歩に伴って、圧縮荷重下の岩石が発生するAE(微小破壊音)の頻度や発生源の位置、あるいは、弾性波速度の変化などを調べることが可能となった。これによって、岩石の示す変形挙動の非線形性が岩石内部の微小な破壊に起因していることが実証されるに至った訳であるが、これらの計測結果の中で特に目を引くのは、圧縮試験中に見られる弾性波速度の異方性である。図-1は、高橋らが行なった実験例であるが、岩石の弾性波速度は、加えた最大圧縮応力方向にはあまり変化せず、最小圧縮応力方向に大きく変化することがわかる。一方、茂木らの研究では、ダイラタンシーがこれと同様の異方性を呈することが示されており、ダイラタンシーと弾性波速度の異方性が密接な関係を持つことを示唆している。先に述べたごとく、ダイラタンシーは岩石の微小破壊にその原因があることが明らかとなっており、したがって、微小破壊の形態がこの弾性波速度の異方性を生ぜしめていると考えることに無理はない。そこで、次のような仮説をもとに、弾性波速度の異方性を説明してみた。

3. クラックの進展について

まず、圧縮荷重下では岩石内部で微小破壊が生じ、この破壊はクラックの進展を伴っていると看する。さらに、このクラックの進展を生じさせる母体として、図-2に示すような、薄く、主応力軸に対し傾き、すべりに対して抵抗しないクラックを仮定する。このような場合、幾つかの検討により、母体となるクラックの端部から引張の応力集中によって新しいクラックが発生し、この新しいクラックはほぼ最大圧縮応力方向に向かって開口しながら進展していくことがわかった。このとき、この新しいクラックの進展量や、これによりもたらされる体積変化は、新しいクラックを図-3のようにモデル化することによって、破壊力学の手法に基づき、容易に求めることができる。結果だけを示すと、次のとおりである。

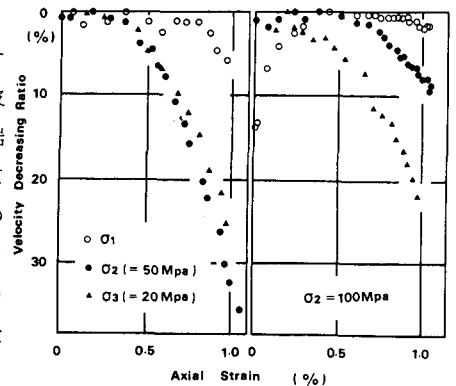


図-1 弾性波速度の異方性

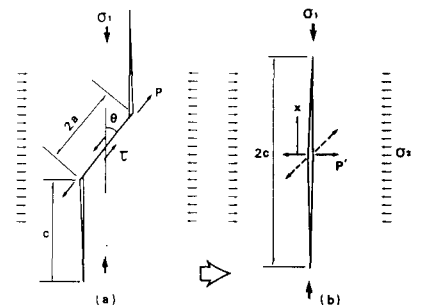
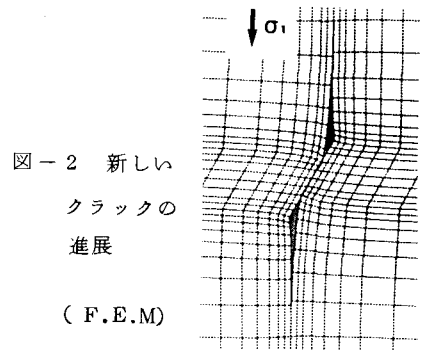


図-3 クラック進展のモデル化

$$C = \frac{|2a \sin \theta \cos \theta (\sigma_1 - \sigma_2)|}{\pi |\sigma_2|} \quad (1)$$

$$\Delta V = \frac{8(1-\nu^2)}{E} \frac{a^2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta}{\pi} \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2}{|\sigma_2|} \quad (2)$$

ここに、 C は新しいクラックの進展長、 ΔV はこれによる体積変化であり、 a は母体となるクラックの長さを表わしている（ただし平面ひずみ）。

このような場合、岩石中の弾性波速度はどのように変化するであろうか。この問題に対しても、新しいクラックを直線状でかつ開口していると仮定することによって簡単に求めることができる。

4. クラックの方向、長さや弾性波速度

図-4のように開口したクラックを含む弾性媒体中を弾性波が進行する場合、弾性波速度の遅れは、回折に伴う経路長の変化として求めることができる。弾性波速度の減少率としては、

$$\frac{V_p'}{V_p} = 1 / \left\{ \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{C}{\ell} \sin \phi + \left(\frac{C}{\ell}\right)^2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{C}{\ell} \sin \phi + \left(\frac{C}{\ell}\right)^2} \right\} \quad (3)$$

で与えられる。即ち、クラックが大きくなればなるほど、またクラックの角度が弾性波の進行方向に対して大きくなればなるほど弾性波の遅れが大きくなる（図-5）。参考までに、有限要素法を用いた弾性波の遅れの様子を調べた例を図-6に示す。

このことを参照し、先に述べた弾性波速度の異方性を説明すると次のようになる。圧縮荷重下では岩石内部に開口を伴ったクラックの進展が生ずる。このクラックの進展が最大圧縮応力方向に対し低い角度で生ずるため、最大圧縮応力方向の弾性波速度はさほど変化せず、これと直交する方向に大きな弾性波速度の低下が生ずる。このようなクラックの進展がダイラテンシーの異方性を生ぜしめることも想像に易いであろう。

(1)式及び(3)式を用いて応力と弾性波速度の関係を求めたものを図-7に示す。

5. 結 言

本報告では、圧縮荷重下の岩石内では新しいクラックの進展が生じ、このクラックの進展が最大圧縮応力方向に生ずると仮定すれば弾性波速度の異方性を説明できることを示した。今後、ここで行なった仮定の妥当性を実験的に検証するとともに、このような異方性を岩石が示す場合の岩盤内構造物の安定性についても検討していく予定である。

(参考文献)

- (1) 高橋、他 “真三軸応力下における岩石の弾性波速度の挙動”、第6回岩の力学国内シンポ、1984。
- (2) 茂木、他 “三軸圧縮応力下の岩石の変形、破壊”、第5回岩の力学国内シンポ、1977

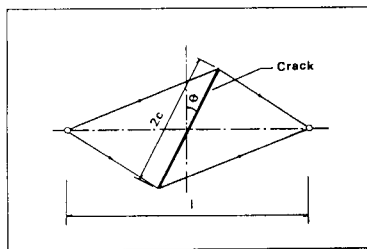


図-4 クラックと弾性波の進行

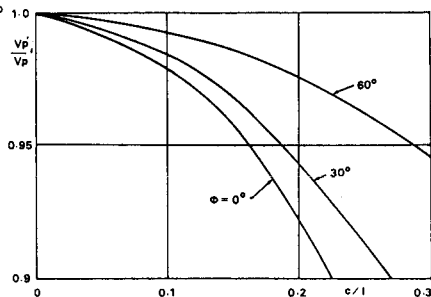


図-5 クラックと弾性波速度

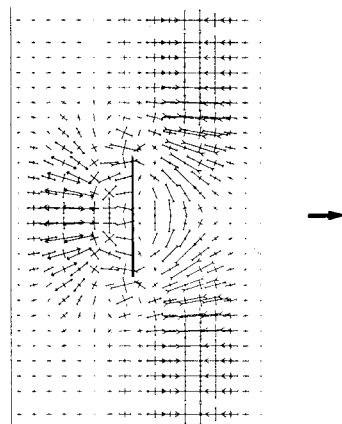


図-6 弾性波の遅れ (F.E.M)

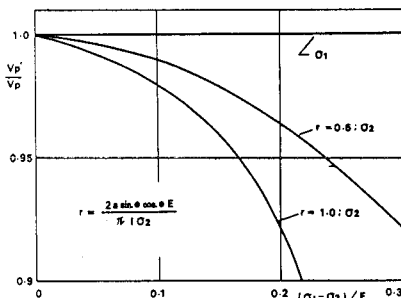


図-7 弾性波速度の異方性