

弾性波速度とクラックテンソルによる岩石の脆性破壊機構

埼玉大学 正会員 ○竹村 貴人・小田 匡寛
大林組 正会員 鈴木健一郎

埼玉大学(現：会計検査院) 亀田 篤
核燃料サイクル開発機構 正会員 中間 茂雄

1. はじめに

岩石の脆性破壊は、クラックの発生・進展により引き起こされることが知られている^[1]。このようなクラックは岩盤の強度を低下させるだけでなく、水みちとしての役割を果たす。従って、脆性破壊（ダメージ）の進行に伴うクラックの変化を定量的に捉えることは、岩盤の強度、坑道周りの透水係数を考える上で必要となる。従来、クラックの幾何は多大な労力をかけてクラックを直接観察し、その情報をクラックテンソル F_{ij} などで定量化してきた^[2]。本研究では、ダメージ進展を直接観察ではなく弾性波速度変化から捉えることを試みる。さらに、弾性波速度変化をダメージ進展として表すため、 F_{ij} に結び付け、脆性破壊に関する考察を行う事を目的とする。

2. 岩石試料および実験方法

本研究では、岩石試料として稲田花崗岩を用いた。稲田花崗岩には、互いに直交する3つの割れやすい面が存在し^[3]、割れやすい順から Rift、Grain、Hardway 面と呼ばれ、これらの面に直交する軸をそれぞれ R,G,H 軸と呼ぶ（図1）。実験は、拘束圧 80MPa ・ 6つの応力レベル（破壊応力の 85,90,95,98,100%および破壊後）の下、载荷軸方向を H 軸として行われた。実験終了後、回収された供試体の中央部から弾性波測定用の 18 面体試料を作成し（図1）、9 方向の弾性波(P 波)速度 v を測定した。得られた v を用いて、次式で定義される 2 階のテンソル V_{ij} を算出した。

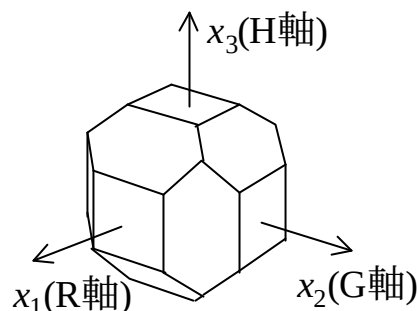


図1 弾性波測定用試料

$$\left(\frac{v}{v_0}\right)^2 = V_{ij} p_i p_j$$

ここで、 v_0 は全てのクラックが閉じている時の P 波速度、 p_i, p_j は測定方向の方向余弦である。

3. 弾性波速度からみたクラックの進展

ダメージ進展中に変化する P 波速度分布を図2に示す。ここでは、拘束圧 80MPa の条件でダメージを与えられた試料に対して行われた実験結果がステレオネットで表現されている。図より、破壊の進行に伴い载荷軸方向（H 軸）と、インタクト（初期状態）な試料でマイクロクラックの集中している方向 R 軸で顕著な P 波速度の減少が見られる。このことは、破壊の進行が初期異方性により制約されていることを示唆しているといえ

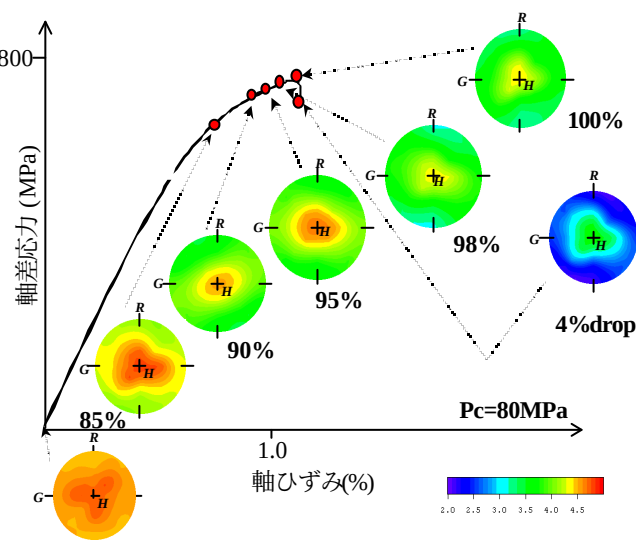


図2 ダメージ進展に伴う P 波速度分布の変化。ステレオネットは下半球投影。

キーワード：弾性波速度、クラックテンソル、脆性破壊

連絡先: 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255 埼玉大学工学部 E-mail: takemura@dice.dr5w.saitama-u.ac.jp

る。このことは、同じく P 波速度分布から決定された V_{ij} を用いることで定量的に示すことができる。例として、インタクトな供試体と、载荷軸を H 軸、拘束圧 80MPa 下でピーク応力まで载荷した供試体の V_{ij} を以下に示す。

$$V_{ij}^{(\text{インタクト})} = \begin{pmatrix} 0.55 & 0.00 & 0.02 \\ & 0.57 & -0.02 \\ \text{symm.} & & 0.62 \end{pmatrix}$$

$$V_{ij}^{(\text{ピーク})} = \begin{pmatrix} 0.25 & -0.01 & 0.03 \\ & 0.29 & 0.00 \\ \text{symm.} & & 0.39 \end{pmatrix}$$

共に $V_{33} > V_{22} > V_{11}$ となり、初期異方性を維持している事が分かる。拘束圧 80MPa 下における各応力レベルでの V_{ij} の主値の逆数と、クラックの観察から得られた F_{ij} [4] の主値を比較し、両者の関係を得た(図 3)。この関係から、各供試体のクラック密度 F_0 を推定した。载荷軸を H 軸、拘束圧 80MPa 下において、 F_0 はダメージが進展すると増加する(図 4)。ただし、ダメージ進展は塑性体積ひずみで表現しており、クラック密度との関係は $\varepsilon_{ii}^{(p)} = 5.91 \times 10^{-4} \Delta F_0$ となる。ここで、 ΔF_0 はクラック密度の増分であり、インタクトからの F_0 の増分を意味している。一方で $\varepsilon_v^{(p)}$ は実験から得られた、塑性体積歪みである。また、その比例定数は拘束圧下での载荷中におけるクラックの平均的なアスペクト比を表していると考えられる [2] [4]。

4. おわりに

三軸圧縮応力下での応力レベルごとの多方向の P 波速度分布から以下のことが明らかにされた。1) 花崗岩質岩石では初期のクラック異方性を保ちながらダメージの進展が進行していく。2) P 波速度の分布から決定された V_{ij} は観察から得られたクラック密度と高い相関があることが示された。このことは、多方向の P 波速度分布からクラック密度、クラックテンソルが推定できることを示唆している。3) ダメージの進展過程でのクラックのアスペクト比を推定することは、透水係数を推定する際の重要な情報となりえる。今後の課題として、P 波速度分布からのクラックテンソルの推定精度の向上が挙げられる。

参考文献

- [1] Brace, W. F., Paulding, B. W. Jr. & Scholz, C. (1966): Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. *J. Geophys. Res.*, 68, 3709-3713.
- [2] Oda, M., Katsube, T. & Takemura, T. (2002): Microcrack evolution and brittle failure of Inada granite in triaxial compression tests at 140MPa, *J. Geophys. Res.*, 107 (B10), ECV9, 1-17
- [3] 長田昌彦・山辺 正・吉中龍之進 (1999): 稲田花崗岩の初期マイクロクラック, *応用地質*, 39, 500-510.
- [4] 竹村貴人・小田匡寛 (2002): マイクロクラックの 3 次元構造解析による花崗岩質岩石の脆性破壊機構, *日本地質学会誌*, 108, 453-464.

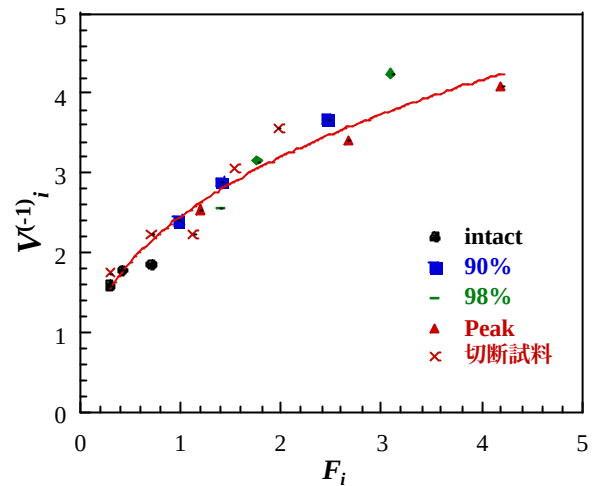


図 3 V_{ij} の主値の逆数 $V_i^{(-1)}$ と、クラックの観察から得られた F_{ij} の主値 (F_i)。ここで、切断試料は試料を切断することでクラック密度を増加させた試料。

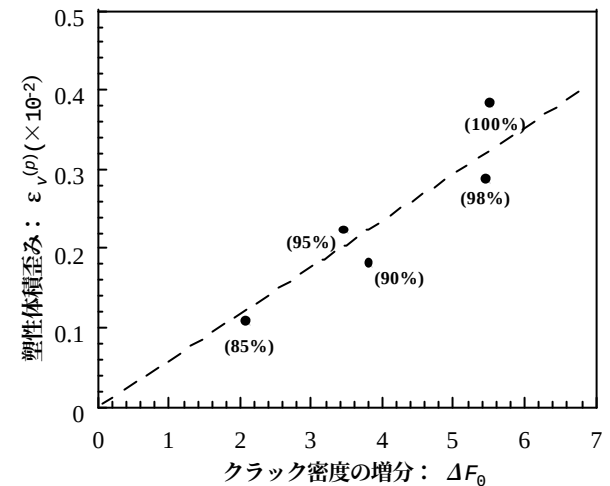


図 4 ダメージ進展に伴うクラック密度 F_0 の変化 (括弧内は応力レベルを示す)