

岩石の脆性破壊のモデル化に関する研究

Modeling of brittle failure in rocks

竹村 貴人^{1*}、小田 匡寛¹、鈴木 健一郎²
Takato Takemura¹, Masanobu Oda², Kenichiro Suzuki²

¹ 埼玉大学 工学部建設工学科

Department of Civil and Environmental Engineering, Saitama University

² 大林組 技術研究所

Technical Research Institute, Obayashi Corporation

Abstract

Microcracks-related fabric, determined using a stereological method, is represented quantitatively by means of the crack tensor introduced by, and brittle failure of granitic rock (Inada granite) is discussed based on the crack tensor analysis. Orientation of stress-induced microcracks doesn't change much during brittle failure, depending primarily on the orientation of pre-existing microcracks. Inelastic volumetric strain at failure decrease with increasing confining pressure due to the fact that crack opening is controlled by the confining pressure.

Key Words: Brittle failure, Damage growth, Microcrack

1. はじめに

近年、高レベル放射性廃棄物の地層処分場やエネルギー地下備蓄施設などの建設に際し、大深度における地下空間利用が行われている。このような、地下空間構造物を建設する際、その安全性を確保するためにも構造物の周辺岩盤にかかる地圧や地下水圧の問題は必ず考慮しなければならない特に放射性廃棄物の地層処分に関しては、1) 放射性核種が地質環境中に移動した場合、岩盤の割れ目や空隙における相互作用において核種が遅

延・分散あるいは希釈されること、2) 岩盤の破壊などによる処分場への重大な影響を及ぼさないこと、3) 設置環境を長期間維持できること、を考慮する必要がある。

花崗岩質岩石は我が国の国土の約40%を占めており、その性質は堅牢であるため高レベル放射性廃棄物の処分場やエネルギー地下備蓄等に使用される地下空間の対象とされる。また、花崗岩質岩石には力学・水理学的な異方性があることが指摘されている^{[1]-[3]}。このような異方性は花崗岩質岩石内に存在するマイクロクラックの構造に起因すると考えられているが、力学・水理学的な異方性とクラックの構造異方性の関係は必ずしも明らかになってはいない。また、構造物の建設時や長期的に

* 〒338-8570 浦和市下大久保255
電話：048-858-3545 FAX：048-858-7374
Email：takemura@post.saitama-u.ac.jp

見た広域応力の変化などに伴う岩石の変形・破壊に伴うクラックの増加は確実に透水係数を変化させるであろう。同時に変形・破壊に伴うクラックの増加は確実に岩石の破壊強度を低下させ、トンネル掘削時の山はねや岩盤の崩落を引き起こす要因となる。

このような岩石の破壊現象をモデル化する上で、クラックの進展則、破壊基準を定量的に決めることが重要である。本研究では花崗岩質岩石の脆性破壊に伴うクラックの3次元構造の変化をクラックテンソル^{[4]-[6]}により定量化し、破壊の進行に伴うクラックの進展をクラックの密度と多方向の弾性波速度から明らかにすることを試みる。

2. クラックの3次元構造解析

クラックの幾何学的特徴を体積密度 ρ (単位体積当たりのクラック数)、大きさ r 、方向 \mathbf{n} 、開口幅 t によって記述する。今、クラックの中心が体積 V の領域内に $m^{(V)}$ 個あるとすれば、クラック体積密度 ρ は次式で定義される。

$$\rho = \frac{m^{(V)}}{V} \quad (1)$$

クラックの方向はクラック主面に立てた単位法線ベクトル \mathbf{n} で記述され、その方向余弦 (n_1, n_2, n_3) は、その走行 α と傾斜 β を使って次のように書くことができる

$$\mathbf{n} = \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha \sin \beta \\ \sin \alpha \sin \beta \\ \cos \beta \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、各クラックは、方向の逆な二つの法線ベクトル \mathbf{n} と $-\mathbf{n}$ を持っている。ここでは便宜上、 \mathbf{n} と $-\mathbf{n}$ を単に \mathbf{n} と記す。クラックの方向分布はベクトル \mathbf{n} の集合で置き換えられる。 \mathbf{n} の集合を特徴付けるには、例えばその単純な平均値が有力な候補に挙げられよう。しかしただ単なる平均値は、容易に確かめられるように零ベクトルとなり、意味をなさない。そこでベクトル \mathbf{n} のダイアド $\mathbf{n} \otimes \mathbf{n}$ の平均値を取ると、2階のテンソル N (ファブリッ

クテンソルと呼ぶ) が定義でき、次の成分を持っている。

$$N = \frac{1}{2m^{(V)}} \sum_{k=1}^{2m^{(V)}} \mathbf{n}^{(k)} \otimes \mathbf{n}^{(k)} \quad (3)$$

上の式で $2m^{(V)}$ 個の平均になっているのは、1つのクラックに2つの単位ベクトルが割り当てられていることによる。また上付きの添え字 (k) は k 番目の単位ベクトル $\mathbf{n}^{(k)}$ を意味している。方向余弦 (n_1, n_2, n_3) は、その走行 α と傾斜 β を使って書けることから、ユニバーサルステージ付き顕微鏡でクラックの走行・傾斜を測定することで N の成分 N_{ij} を直接決定することができる。

クラックは方向だけでなく、面積 $s^{(k)}$ や寸法 $r^{(k)}$ を持っているため、その集合は体積密度 ρ によっても特徴付けられる。このように考えると、(3)式のファブリックテンソルは、クラックの集合が作る幾何学的な性質の一面を近似的に表しているに過ぎないといえる。この問題には、各クラックに $\rho s^{(k)} r^{(k)}$ の重みを付けてダイアド $\mathbf{n} \otimes \mathbf{n}$ の平均を取ることによって解決できる^{[4]-[6]}。(1)式を考慮すると、次の表現が得られる。

$$\begin{aligned} F_{ij} &= \frac{1}{2m^{(V)}} \sum_{k=1}^{2m^{(V)}} (\rho s^{(k)} r^{(k)}) n_i^{(k)} n_j^{(k)} \\ &= \frac{1}{2V} \sum_{k=1}^{2m^{(V)}} s^{(k)} r^{(k)} n_i^{(k)} n_j^{(k)} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで F_{ij} は2階の対称テンソルであり、クラックテンソルと呼ばれる。

定義はさて置き次に答えるべき問題は、(4)式がクラックの構造を定量的に表しているかであり、以下のようにまとめることができる。

(1)クラックテンソルは応力テンソルと同じように2階の対称テンソルである。このことは、三次元空間に必ず互いに直交する三本の主軸と、主軸方向に三つの主軸 (F_1, F_2, F_3) とが存在することを意味している。主軸方向はクラックの構造の異方性の主軸とみなしてよい。

(2) F_{ij} の縮約は F_{ii} ($=F_{11}+F_{22}+F_{33}$) で定義され、 F_{ij} の不変量の一つである $F_0(F_{ii})$ が得られる(今後、ア

インシュタインの総和規約を採用する。すなわち、一つの項に同じ添え字が 2 度現れれば、その添え字について 1 から 3 までの総和をとるものとする。テンソルの成分、例えば F_{11} は座標軸の選択によって変わる。不変量は、このような座標軸の選択に依存しないスカラー量であって、2 階の対称テンソルには、常に三つ存在する。クラックを直径 $r^{(k)}$ の円盤で表し、 $s^{(k)} = (\pi/4)(r^{(k)})^2$ に注意すれば、不変量 F_0 は次式で与えられる。

$$F_0 = F_{ii} = \frac{\pi}{4V} \sum_{k=1}^{m^{(V)}} (r^{(k)})^3 = \frac{\pi}{4} \rho \langle r^3 \rangle \quad (5)$$

ただし $\langle r^n \rangle$ は

$$\langle r^n \rangle = \frac{1}{m^{(V)}} \sum_{k=1}^{m^{(V)}} (r^{(k)})^n \quad (6)$$

で定義され、クラック直径の n 乗、 r^n の平均値を表している。この無次元のスカラー量 F_0 は、以下の理由からクラック密度の指標と考えられる。(1) クラックに沿う水の流れを論じたパーコレーション理論では、 $\rho \langle r^3 \rangle$ はクラック密度を表しており、クラック相互の連結性を測る指標として使われている^{[7][8]}。(2) クラックの開口幅を $t^{(k)}$ とすれば、 k 番目のクラックの間隙体積は $(\pi/4)(r^{(k)})^2 t^{(k)}$ に等しい。すると間隙率 ϕ は次式で定義できる。

$$\phi = \frac{1}{V} \sum_{k=1}^{m^{(V)}} \frac{\pi}{4} (r^{(k)})^2 t^{(k)} \quad (7)$$

今、開口幅 $t^{(k)}$ がクラックの寸法 $r^{(k)}$ に比例しているとすれば ($t^{(k)} = \eta r^{(k)}$)、(7) 式は次式となる。

$$\phi = \frac{\eta}{V} \sum_{k=1}^{m^{(V)}} \frac{\pi}{4} (r^{(k)})^3 = \eta \frac{\pi}{4} \rho \langle r^3 \rangle = \eta F_0 \quad (8)$$

すなわち、 F_0 は間隙率 ϕ と同じ意味を持つこととなる。(8) 式は、開口幅と寸法との比例関係を前提としているが、このことについては後述することとする。

(3) クラックテンソル F_{ij} には既に述べたように三つの主値 (F_1, F_2, F_3) が存在する。その主値を座標軸とする構造空間を導入する。すると与えられたクラックの構造は、構造空間のベクトル \overline{OA} とし

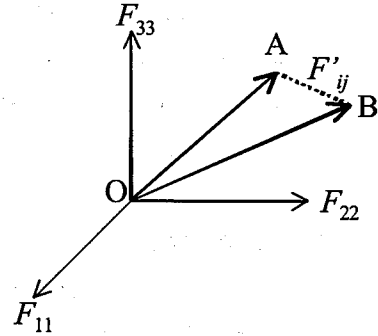


図 1 構造空間

て表せる。ベクトル \overline{OA} は更にベクトル \overline{OB} とベクトル \overline{BA} に分解できる(図 1)。このときベクトル \overline{OB} は $F_1 = F_2 = F_3$ で示される等方軸 (破線) への投影成分であり、その大きさは $(1/\sqrt{3})F_0$ に等しいことから、クラック密度の大きさに比例している。一方ベクトル \overline{BA} は等方軸からのずれを与えており、その大きさは

$$|\overline{BA}| = \frac{1}{\sqrt{3}} [(F_1 - F_2)^2 + (F_2 - F_3)^2 + (F_3 - F_1)^2]^{1/2} = \sqrt{2J_2} \quad (9)$$

で与えられる。ただし J_2 は偏差テンソル $F'_{ij} (= F_{ij} - \frac{1}{3}F_0\delta_{ij})$ の第 2 不変量である (ただし δ_{ij} はクロネッカーのデルタ記号であり、 $i=j$ の時 $\delta_{ij}=1$ 、 $i \neq j$ の時 $\delta_{ij}=0$ である)。クラックの作る構造異方性は次式 AI で定義できる。

$$AI = \frac{|\overline{BA}|}{|\overline{OB}|} = \frac{\sqrt{6J_2}}{F_0} = \frac{[(F_1 - F_2)^2 + (F_2 - F_3)^2 + (F_3 - F_1)^2]^{1/2}}{F_1 + F_2 + F_3} \quad (10)$$

AI は 0 と 1.414 の間の値をとり、0 で等方性を、また 1.414 で完全な定方向配列を表している。本研究ではクラックの方向は N_{ij} 、密度は F_0 、異方性は AI を使って表す。ここで、 N_{ij} 、 F_0 は 3 次元量であるため、直接決定することはできない。そこで、本研究ではステレオロジーの手法^{[6][9]}を用いて、これらの量を推定した。最近の研究ではステレオロジーの手法とユニバーサルステージによる直接的な方法で決定されたクラックテンソルはほぼ同じであることが示されている^[10]。

3. 岩石試料

稲田花崗岩の構成鉱物は XRD 分析(Philips 社製)の結果より体積分率で石英 39.72%, 斜長石 30.73%, 正長石 24.75%, 黒雲母 3.98%, および 0.82%の粘土鉱物である。平均粒径は 2-4mm 程度であるが、石英、長石類はクラスター状^[3]になっているため肉眼での観察では大きな粒径に見える。稲田花崗岩は採石場において、3つの割れやすい面 Rift, Grain, Hardway が、それぞれ N70° E90°, N20° W90°, 水平面に一致している(図 2)。

稲田花崗岩において、マイクロクラックは石英内クラック、長石内クラックと粒界クラックの3つの開口クラックに分類することができる。これらのクラックの他に国内の花崗岩質岩石に多く見られる流体包有物により癒合されているクラックを観察することができる。しかしながら、稲田花崗岩の場合、癒合クラックの多くは開口クラックに比べ非常に小さい。また、癒合クラックは弾性波速度や破壊に関与していないとされている^[11]。これらの開口クラックに対して顕微鏡下でクラックの観察(拡大率 40 倍)を行いマイクロクラックのトレース図を作成した。上記で作成したインタクトな稲田花崗岩のマイクロクラックのトレース図に対し、3次元構造解析を行い、インタクトな稲田花崗岩のクラックテンソルを求めた(表 1)。その結果、クラックによる初期異方性を確認する

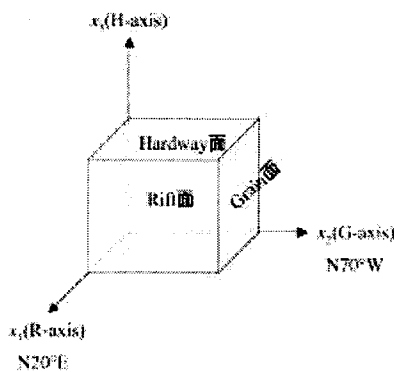


図2 稲田花崗岩の座標系と石目

表1 インタクトな稲田花崗岩のクラックテンソル

	x_1	x_2	x_3	Symm.			Symm.			d_1
x_1 -plane	1.00	1.11		0.47	0.35	0.50	0.67	0.10	0.06	
x_2 -plane	0.89	0.90	0.01	0.40	0.41	0.01	0.42	0.02		0.14
x_3 -plane	0.92	1.16		0.33			0.12			

ことができた。

4. 実験方法および結果

4.1. 三軸圧縮試験

脆性破壊に伴い発生・進展するマイクロクラックの構造変化を明らかにするために、Oda *et al.*^[12] が報告した三軸圧縮試験から4本の供試体(H-5, H-6, H-7, H-8)を選んで構造解析を行った。供試体は円柱で、その直径と高さはそれぞれ 50mm, 120mm である。試験装置(MTS 社製 Model 801)は、高剛性のフレームと周変位の高い制御機能によって、破壊前後の制御に優れている。三軸圧縮試験は、室温かつ封圧 80MPa の下で、周変位 5.0×10^{-6} mm/sec の条件で行われた。また載荷方向は x_3 軸に平行である。三つの供試体のうち H-5, H-6 と H-7 はそれぞれ破壊応力の 90%, 98%, 100% まで載荷後、除荷したものである。また H-8 は、破壊応力を過ぎ約 2% 応力降下を経た後に、除荷したものである。少なくとも H-8 は不安定破壊の領域にあり、鈴木・高橋^[13]のレプリカ法で観察する限り、微小な初期せん断面が形成されている^[12]。H-5, H-6, H-7, H-8 の供試体は実験終了後に三軸セルから回収され、真中のほぼ 1/2 部分が構造解析用として切り出された。三つの x_i -面に平行に、それぞれ 2~4 枚の薄片が作られた。また、封圧の増加に伴う破壊時の応力・歪みの変化を知るため、0 から 140MPa までの間における数段階の封圧下で実験を行った。

図 3 に、三軸圧縮試験から得られた軸差応力($\sigma - \sigma_3$)、軸歪み ϵ_3 、横歪み ϵ_1 、体積歪み ϵ_v の関係を示した。図中の点は H-0,5,6,7,8 の載荷終了時の歪である。 $\sigma - \epsilon_1$ の関係(図 3(a))は、破壊応力付近を除けばおおむね線形的であるが $\sigma - \epsilon_3$ の関係(図 3(b))に

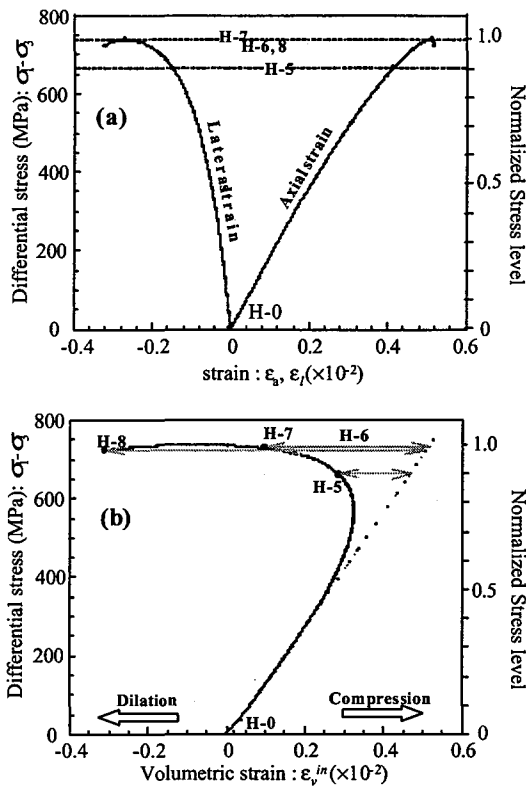


図3 応力-歪み図

は、特に軸差応力で 50%過ぎあたりから際立った非線形性が認められる。すなわち体積歪みは、最初ほぼ線形弾性的な圧縮(+)であるが、軸差応力 50%あたりで非弾性のダイラタンスーが顕著となり、膨張(-)に大きくシフトしている。この場合、非弾性の体積歪み ϵ_v^p は、初期の線形関係からのずれで定義され、マイクロクラックの生成・成長を量的に表している。

また、弾性波測定用試料として構造解析用に作られた試料と同じ実験条件・応力履歴を持つ試料 5つに加え応力レベル 60%, 70%, 80%, 85%の 4つの試料を作成した(供試体名 WH-シリーズ)。表 2には各試料の実験条件がまとめられている。なお、使用した試料は構造解析用試料を採取した岩石ブロックと隣接した 250mm×250mm×250mm の岩石ブロックから採取したものをを使用した。

表2 試料名と実験条件

		応力レベル 非弾性体積歪み ($\times 10^{-2}$)	
構造解析	H-0	0%	0.00
	H-5	90%	-1.69
	H-6	98%	-3.64
	H-7	100%	-4.01
	H-8	100%(-2%)	-8.22
弾性波速度	WH-0	0%	0.00
	WH-1	60%	-0.01
	WH-2	70%	-0.03
	WH-3	80%	-0.07
	WH-4	85%	-0.11
	WH-5	90%	-0.18
	WH-6	95%	-0.22
	WH-7	98%	-0.29
	WH-8	100%	-0.38
WH-9	100%(-2%)	-0.49	

4.2. 弾性波速度

これらの供試体は実験終了後に三軸セルから回収され、中央部直径 50mm 高さ 50mm の円柱供試体を岩石カッターにより切り出し、弾性波速度測定用試料とした。弾性波速度測定用試料は研削盤(株式会社岡本製作所製)により、 $x_{1,2,3}$ 軸に直交する面を一辺 48mm の正方形に、おのおのの軸に 45度に関わる面が六角形になるような十八面体を作成した(図 4)。

5. 花崗岩質岩石の脆性破壊機構

5.1. 破壊基準

クラック密度 F_0 は、H-0 の 1.41 から H-8 の 17.31 へと着実に増加している。この増加は、図 5 に示す

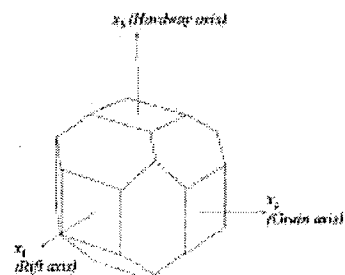


図4 弾性波測定用 18 面体試料

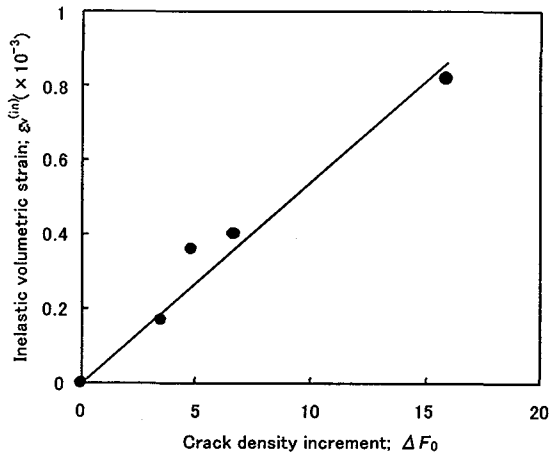


図5 クラック密度の増分

通り非弾性体積歪みの累積と関係付けられる。図5には三軸圧縮試験中の非弾性体積歪み ϵ_v^{in} が、次式で定義する全クラック密度の増分 ΔF_0 に対してプロットされている。

$$\Delta F_0 = F_0^{(H-i)} - F_0 \quad (11)$$

ここで $F_0^{(i)}$ の添え字H-i ($i=0, 5, 6, 7, 8$)は、供試体H-i ($i=0, 5, 7, 8$)の F_0 を表している。図の関係から明らかなように、全クラック密度の増加は非弾性体積歪み(ダイレタンシー)の大きさに比例している。また非弾性体積歪みは圧縮試験中の間隙率の増加 $\Delta\phi$ であることに注意すれば、この関係は次のように表せる^[12]。

$$-\epsilon_v^{in} = \Delta\phi = \eta\Delta F_0 \quad (12)$$

ここで、 η はマイクロクラックのアスペクト比と呼ばれ、三軸圧縮変形中に発生・進展するマイクロクラックの開口幅 t がその寸法 r に比例するとした時の比例定数である。 η の値はマイクロクラックの開口幅を推定する上できわめて重要な役割を担い、図5から $\eta=5.28 \times 10^{-4}$ の結果が得られる。低封圧下では横方向から拘束される応力が小さいため、幅の広いマイクロクラックが発生・進展し、その非弾性体積歪みを増加させる。その一方で、高封圧下では横方向からの拘束圧が大きいため、幅の狭いマイ

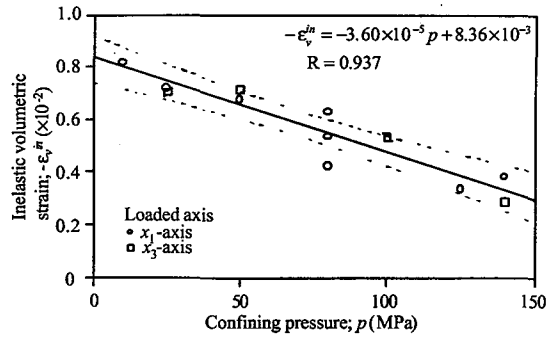


図6 異なる拘束圧での破壊時の非弾性体積歪み

クロクラックが発生・進展し、非弾性体積歪みをそれほど増加させない。従って、先に求めた η の値は封圧に依存すると考えられるが、このことについては別の機会に報告することにする^[14]。

圧縮応力場における脆性材料のクリープ破壊基準の一つとして、非弾性体積歪み ϵ_v^{in} 一定説がある^{[15][16]}。

$$\epsilon_v^{in} = C \quad (13)$$

ここで C は材料によって決まる定数である。この破壊基準は、封圧を一定に保った三軸圧縮試験に限れば、その強度を説明するのに極めて有力である。しかし封圧 p が変化する場合、(13)式は次のように変更されなければならない(図6)。

$$-\epsilon_v^{(p)} = C_1 p + C_2 \quad (14)$$

ここで C_1, C_2 は定数であり、稲田花崗岩の場合 $C_1 = -3.60 \times 10^{-5} \text{ (MPa}^{-1}\text{)}$ 、 $C_2 = 8.36 \times 10^{-3}$ であった(本研究では圧縮を正としているため、体積歪みの値が小さくなることは体積が膨張していることを意味する)。このように、破壊時の非弾性体積歪みは封圧に依存することがわかる。

5.2. 弾性波速度の視点から見た花崗岩質岩石の脆性破壊機構

圧縮応力の载荷によりダメージを受けた岩石を透過する弾性波速度は着実に減少する^{[17][18]}。本節では80MPaでの拘束圧下における脆性破壊の進行に伴う内部構造の変化について弾性波速度を用い

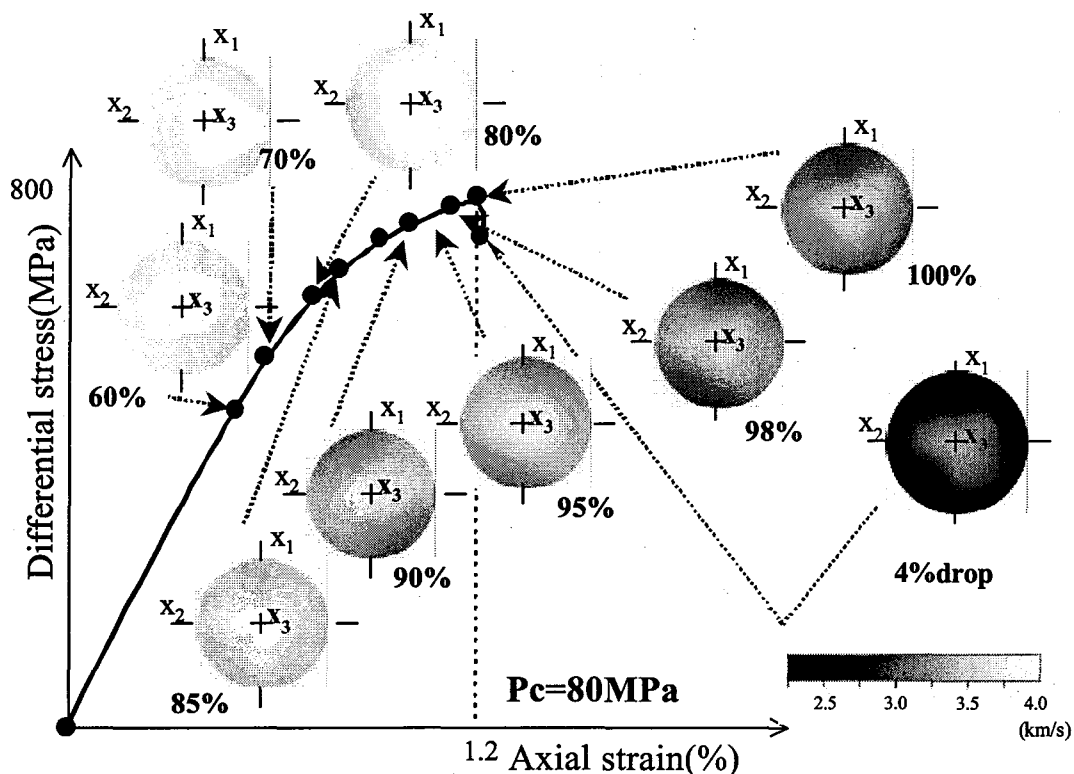


図7 脆性破壊の進行に伴う弾性波速度の変化

て議論を行う。

表2にあるWH-シリーズの18面体試料について各方向でのP波速度を測定し、その結果をステレオネット上にプロットした。本試料からは9点しかプロットされないが、残りの各点についてはクリギング法にて推定を行い図7にあるようなコンターマップを作成した。その結果、P波速度はどの応力レベルにおいても、 x_3 軸が最も速く、次いで x_2 軸、最も遅いのが x_1 軸となっている。このことは、初期異方性を維持しながら脆性破壊が進行していることを強く示唆している。また、三軸圧縮試験により形成されたせん断断面の方向も常に一定であることが報告されている^{[3][19]}。従って、稲田花崗岩の場合、少なくとも拘束圧80MPaまでの脆性破壊に伴うクラックの進展は初期マイクロクラックに規定されているといえる。また、破壊応力80%以

下では、弾性波速度に変化は見られない。このことは、少なくとも弾性波速度から見たクラックの進展は80-85%付近から活発になると考えられる。

6. おわりに

本論では稲田花崗岩の脆性破壊の進行に伴い発生・進展するクラックの3次元構造について、クラックテンソル理論を基礎として、構造解析・圧縮応力試験・弾性速度試験からの検討を行った。その結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 3次元構造解析の結果、脆性破壊の進行に伴うクラック密度の増加と非弾性体積歪みの関係を得ることができた。また、三軸圧縮変形中に発生・進展するマイクロクラックのアスペクト比 η を推定することができた。
- 2) 破壊時の非弾性体積歪みは拘束圧に依存する

ことが示された。

- 3) 脆性破壊の進行に伴う P 波速度の変化からマイクロクラックの方向は、既存のマイクロクラックの方向を維持しながら進展していくことが明らかにされた。これは、初期マイクロクラックの異方性がダイラタンシーや破壊面の異方性に決定的な影響を及ぼしていることを示唆している。

参考文献

- [1] 工藤洋三・橋本堅一・佐野 修・中川浩二 (1986) 石工の経験則と花崗岩の力学的性質, 土と基礎, **34**, 47-51.
- [2] 陳 友晴・西山 孝・喜多治之・佐藤稔紀 (1997) : 微小クラックの分類による稲田花崗岩と栗橋花崗岩の力学的弱面について, 応用地質, **38**, 196-204.
- [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] Oda, M., 1982, Fabric tensor for discontinuous geological materials. *Soils and Foundations*, **22**, 96-108.
- [5] Oda, M., 1984, Similarity rule of crack geometry in statistically homogeneous rock masses. *Mechanics of Materials*, **3**, 119-129.
- [6] Oda, M., 1988, An experimental study of the elasticity of mylonite rock with random cracks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **25**, 59-69.
- [7] Robinson, P. C., 1984, Connectivity, flow and transport in network models of fractured media. Ph. D. dissertation, Oxford Univ., Oxford, 1984
- [8] Suzuki, K., Oda, M., Yamazaki, M. & Kuwahara, T., 1998, Permeability changes in granite with crack growth during immersion in hot water. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **35**, 907-921.
- [9] Kanatani, K., 1984, Distribution of directional data and fabric tensors, *Int. J. Engrg. Sci.*, **22**, 149-164.
- [10] 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, 地質学雑誌, **108**, 453-464.
- [11] Takemura, T., Golshani, A., Oda, M., Suzuki, K., 2003. Preferred orientations of open microcracks in granite and their relation with anisotropy elasticity. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* **40**, 443-454.
- [12] 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**, ECV9-1-17
- [13] 鈴木清史・高橋 学, 1994, レプリカフィルムを用いた空隙、亀裂の可視化法, 応用地質, **35**, 77-78.
- [14] Oda, M., Takemura, T., Aoki, T., 2002b. Damage growth and permeability change in triaxial compression tests of Inada granite. *Mechanics of Materials* **34**, 313-331.
- [15] Scholz, C. H., 1968, Microfracturing and the inelastic deformation of rock in compression. *J. Geophys. Res.*, **73**, 1417-1432.
- [16] Kranz, R. L. & Scholz, C. H., 1977, Critical dilatant volumetric of rocks at the onset of tertiary creep. *J. Geophys. Res.*, **82**, 4893-4898.
- [17] Hudson, J. A. (1980) Wave speeds and determination of elastic waves in material containing cracks, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **64**, 133-150.
- [18] Yukutake (1992) Fracturing process of granite inferred from measurements of spatial and temporal variations in velocity during triaxial deformation. *J. Geophys. Res.*, **94**, 6,840-6,858.
- [19] 梶川 昌三・増田 幸治・山田 功夫・出原理(1990) : 粒径の異なる花崗岩に発生する微小クラックの特徴, 地震, 第2輯, **43**, 179-188