

真三軸圧縮破壊試験岩石試料中の 微小割れ目の性状（予報）

Microcracks in rock specimens fractured under general triaxial compression tests

三浦賢司*・加藤 碩一**
Kenji MIURA Hirokazu KATO

I. はじめに

自然界における岩石中に発達する断層や節理などの割れ目の性状と、それらが発生した時の応力状態との関係を把握することは、断層の形成過程や地震の前兆現象を考察する上で重要であることは論をまたない。

一般に、野外調査において用いられる研究手法は、小断層解析法・岩脈法・節理法などから求めた応力軌跡（古造構応力場）を地質構造発達史の中に位置づけていくため、断層面等を直接に観察・測定することを基としている。一方、室内での岩石破壊実験では、応力を制御した条件下で応力と割れ目の関係を探ることができる利点があるが、割れ目の発生状況は、弾性波速度・電気伝導度・微小破壊振動などの測定という間接的手法によって推定されるのが一般的であり、試料内部の割れ目の性状を直接観察報告した例は少ない。

従って、両者を比較検討する第一段階として、後者の肉眼的観察（顕微鏡下での）がより十分になされるべきであろう。さらに、近年、三主応力を独立に制御し、より一般的な応力場を実現できる実験（真三軸圧縮試験）が行われるようになってきた。そこで、本論では、この真三軸圧縮試験により破壊した岩石試料薄片の顕微鏡観察から、微小割れ目の形態・方向性・長さ・発達密度などについて若干の予察的検討を行った結果を報告する。

II. 岩石試料と真三軸圧縮試験

観察は、真三軸圧縮試験によって破壊された試料の、最終破断面（断層）に垂直な面で作成した薄片について行った。圧縮試験は、地質調査所（当時 北大工学部）の高橋学氏が強度試験として行ったもので、試験後の破壊試料を提供していただいた。

岩石試料は、米国ロードアイランド州産ウエスターリー花崗岩と山口県於福産大理石である。試料の形状は、縦35mm、横35mm、高さ70mmの四角柱で、各面の平行度は1/100mm以内、数か月の室内乾燥の後に供試体として用いられた。

試験は、封圧下で二軸を独立に制御して行われ、この試験方法は、従来の三軸圧縮試験に対して真三軸圧縮試験と呼ばれる。試料への応力の载荷は次のようにして行われた。封圧を負荷し（ σ_3 値）一定とした後、側圧を負荷し（ σ_2 値）一定とし、そして、軸歪速度が $10^{-5}/\text{sec}$ となるように（ σ_1 値）を上昇させ試料を破壊させた。第1表に、試料が破壊した時の主応力値を示

	specimen	stress kg/cm^2		
		σ_1	σ_2	σ_3
G 1	granite	5080	1707	200
G 2	granite	5710	1512	200
M 1	marble	1550	200	200
M 2	marble	2320	1400	200

第1表 岩石試料破壊時の主応力値

* 筑波大学理工学研究科

** 地質調査所環境地質部地震地質課

す。試料は、一般に、 σ_2 軸に平行で σ_1 軸と $10^\circ \sim 30^\circ$ をなす断層面を形成し破壊した。破壊した試料は、特殊な接着剤で固められ、破壊時の形状を保ったまま、圧縮応力下の σ_2 軸に垂直な面で薄片にされた。

Ⅲ. 観察・測定結果

1. 割れ目の形態

割れ目の入り方は一様でなく、その形態も単純ではない。以下に、暫定的な分類として8種類の代表的形態を記す(第1図)。

Type A (曲線状)

多くは σ_1 軸と高角度をなしS字状に曲がっている。薄片全面にわたり分布しており局在性はないが、数は非常に少ない。

Type B (直線・平行)

多くは σ_1 軸とほぼ平行であり、断層付近に多数発達している。

Type C (直交)

Type A と Type B が交差したものと、Type B に短く直交する割れ目がつながっているものがあり、後者は断層付近に多い。

Type D (鈍角交差)

2つの直線状の割れ目が鈍角をなし結合しているもので、一方は短く、長い方は σ_1 軸にはほぼ平行である。

Type E (鋭角交差)

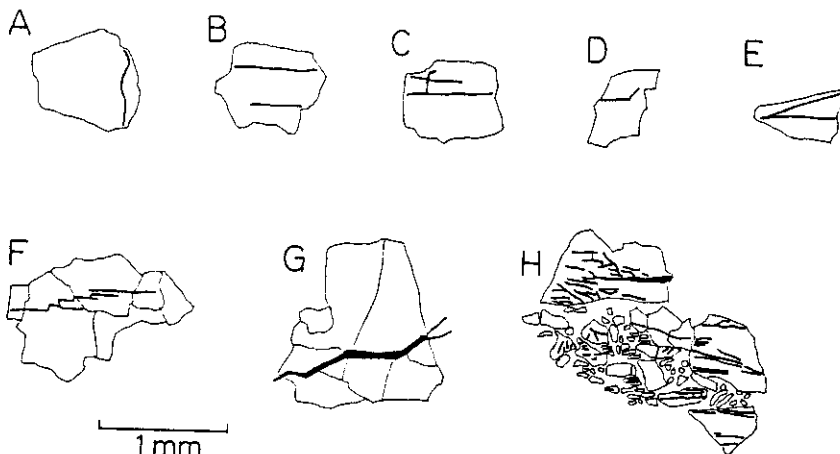
2つの割れ目が鋭角をなすもので、両者の長さはほぼ等しい。断層付近で観察されるが、数はあまり多くない。

Type F (階段状)

Type B の割れ目が、それらと高角度をなす短い割れ目によってつながり階段状になったもの。多くは断層付近で観察され、階段の方向は σ_1 軸と低角をなす。

Type G (長く開口)

大きく開口し、鉱物粒子を切って長く続く。断層とほぼ平行なものが多いが、ほぼ直交するもの



第1図 割れ目の代表的形態

もある。数は少ない。

Type H（破碎帯）

激しく破碎しており、割れ目が明瞭な方向性を示すものとうそでないものがある。

以上の割れ目は、Type G を除き開口の割合は小さい。Type C と Type F の割れ目は、構成鉱物の光軸方向や種類には無関係に発生している。花崗岩においては、Type A ～ Type H の割れ目がすべて存在し割れ方が複雑である。これに対して、大理石ではほとんどの割れ目が Type B を示す。

応力載荷前の試料の薄片観察では、Type A および Type B の割れ目がごく少数確認されたが、破壊後の試料中に存在する割れ目に比べるとはるかに少ない。

2. 割れ目の方向分布

薄片中に発達している割れ目の方向分布を明らかにするため、個々の割れ目の伸長方向を測定した。割れ目は一様に分布しているわけではなく、断層付近で多く観察されるので、断層付近の割れ目を測定の対象とした。

(i) 測定方法

偏光顕微鏡のクロスニコル下で、断層付近の写真を撮影した。割れ目は直線状のものがほとんどであり、一本の直線で近似できるものを1つの割れ目とし、近似した直線の方角をその割れ目の方向とした。そして、写真上で割れ目と σ_1 軸のなす角度を測定した。測定は、 -90° から $+89^\circ$ までとし 1° 間隔で行った。写真上だけでは、割れ目と粒子の境界や結晶の線構造などとの区別ができないことがあるので、割れ目の判定は顕微鏡で行った。割れ目は、花崗岩では断層に接する石英粒子内ものをG1で598個、G2で302個、大理石では断層から0.58mm（写真上で2cm）以内のものをM1で412個、M2で1,055個測定した。

(ii) 測定結果

測定した角度を、 5° ごとの頻度にして表したものが第2図である。これらの結果は、4枚の薄片中に発達する割れ目の方向が、 σ_1 軸方向に集中の傾向があることを示す。特に、M2においてはその傾向が著しい。G1およびG2においては、 σ_1 軸に対して高角度をなす割れ目の分布が見られるが、これはType C および Type F の割れ目による。

4枚の薄片中の割れ目の方向分布を比較するため、割れ目の数の累積頻度を σ_1 軸となす角度の関数として表したのが第3図である。この図では、分布の集中が高いところ程、傾きが大きくなる。これより、割れ目の方向分布は、花崗岩中よりも大理石中の方が σ_1 方向に対して高い集中を示すことがわかる。大理石どうしの比較では、破壊強度（ σ_1 の値）が大きいM2の方が、 σ_1 方向に対して集中が高い。花崗岩どうしても、同様の傾向を示す。

3. 割れ目の長さや鉱物粒子の大きさ

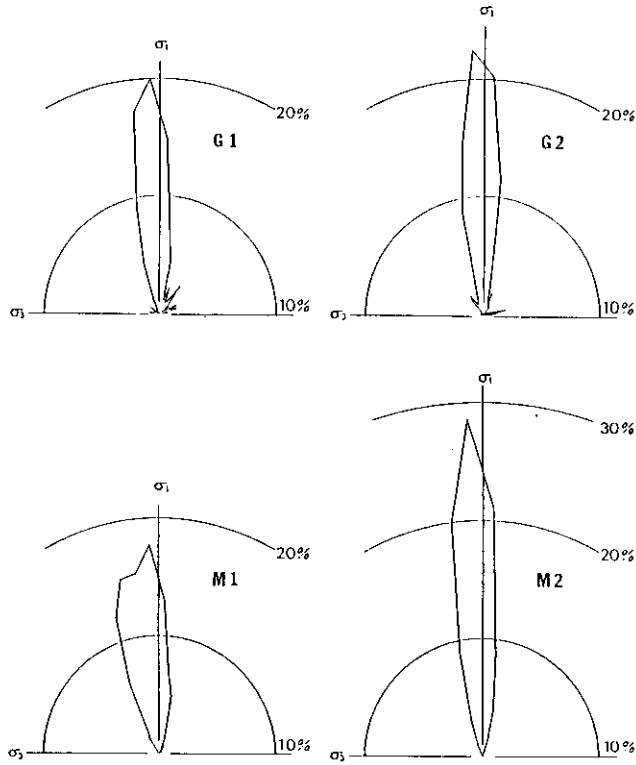
割れ目の長さは、1mm以下のものがほとんどで、鉱物粒子を貫通するものは少ない。一般的な傾向としては、方解石中の割れ目より、粒子が大きい石英中の割れ目の方が長い。

ここでは、割れ目の形態が単純な大理石中の、鉱物粒子の大きさと、そこに発達している割れ目の長さとの関係を調べた。

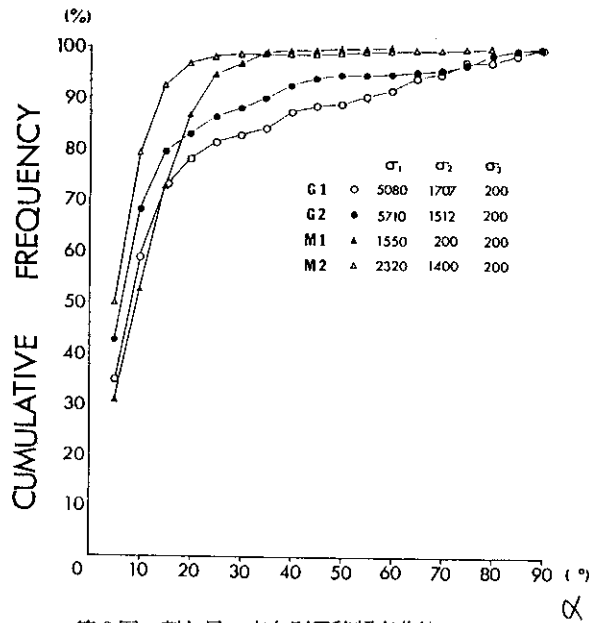
(i) 測定方法

2.同様に、撮影した写真から鉱物粒子の大きさと、そこに発達している割れ目の長さを、対応させて測定した。粒子の形状は、五角形もしくは六角形状のものが多く、長軸をa軸、a軸に直交し最も長い軸をb軸とし、a軸とb軸それぞれの長さaとbの幾何平均 \sqrt{ab} で粒子の大きさを表した。

(ii) 測定結果



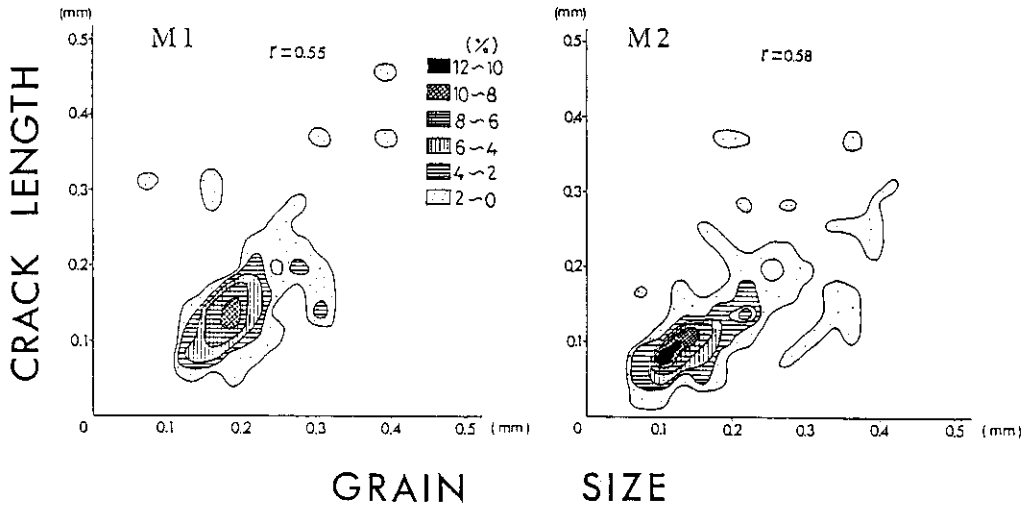
第2図 割れ目の方向分布



第3図 割れ目の方向別累積頻度曲線

横軸は割れ目と σ_1 軸のなす角度, 縦軸は σ_1 軸となす角度が α° 以内の割れ目の頻度。 α は 5° 間隔。

粒子の大きさと、割れ目の長さとの関係を第4図に示す。これは、M1では118点、M2では208点をプロットし、縦軸と横軸をともに0.029mmの間隔で区切ってできた格子内に入る点の数によって作成したコンター・ダイアグラムである。これより、鉱物粒子の大きさと割れ目の長さとの間には、正の相関関係があることがわかる。



第4図 割れ目の長さと鉱物粒子の大きさ

4. 割れ目の密度

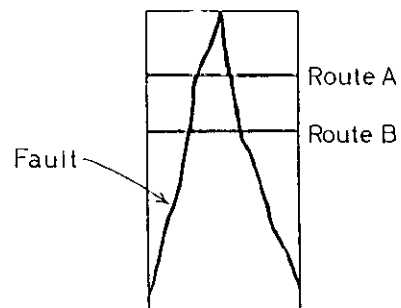
割れ目は、薄片全面に一樣に分布しているのではなく、断層付近に集中しているように見える。割れ目の密度が場所によってどのように異なるかを、G1について、断層を横ぎる σ_3 方向について調べた。

(i) 測定方法

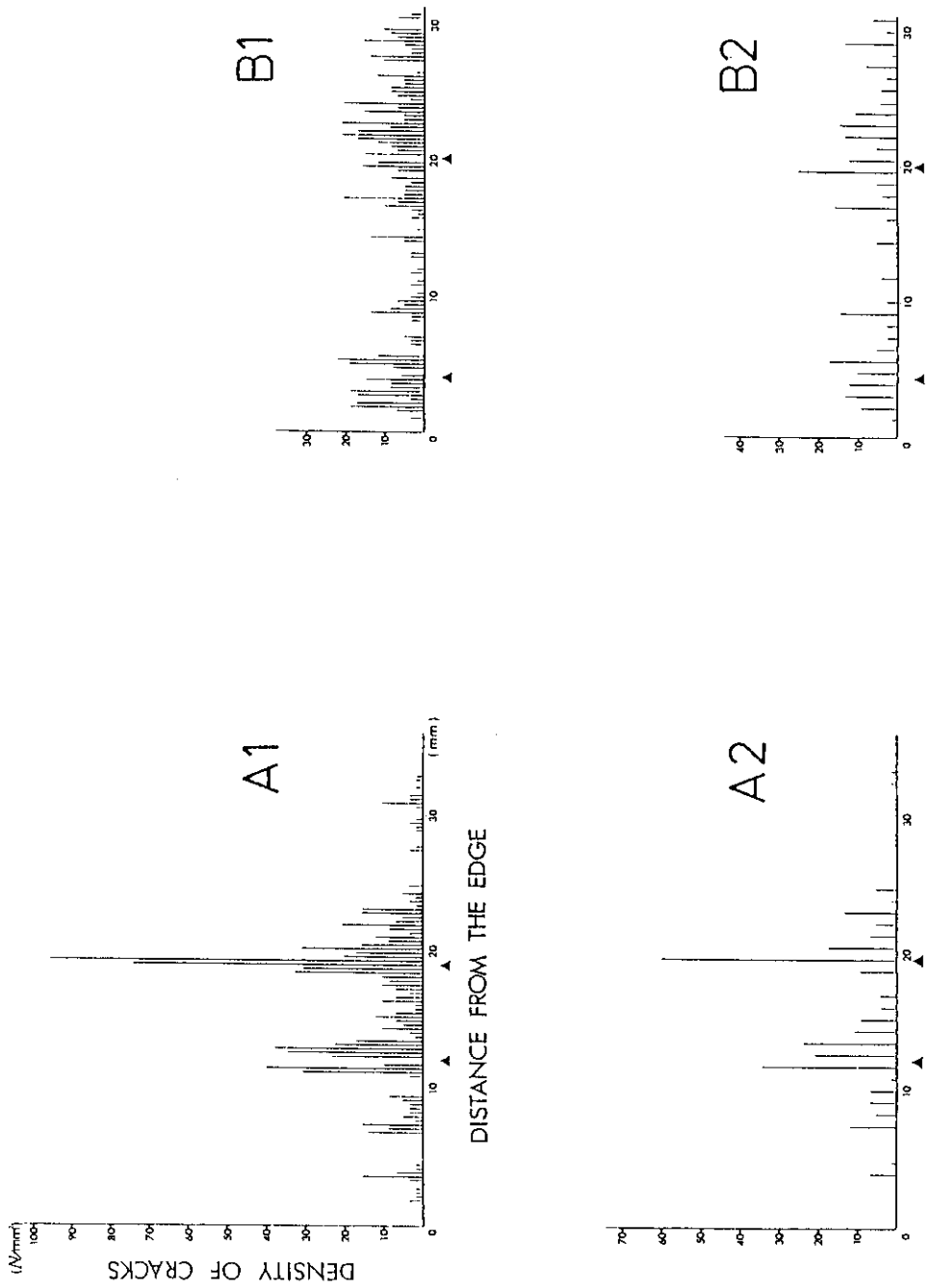
単位格子を設定し、その中に入る割れ目の数を数えた。数え方は2と同様、一方向の割れ目を1つとした。割れ目の位置は、割れ目の中心の位置とし、1つの割れ目が重複して数えられるのを避けた。格子中の割れ目の数を格子の面積（格子中に空間がある場合には、その部分を除いた面積）で除して、その値をその場所の割れ目密度とした。測定は、 σ_3 軸に平行な2つの道筋 Route A および Route B について行った（第5図）。単位格子は、 σ_1 方向に2.03mm・ σ_3 方向に0.29mmの辺をもつ長方形（格子1）と、 σ_1 方向および σ_3 方向に0.87mmの辺をもつ正方形（格子2）との2種類を、それぞれの道筋に隙間なく設定した。

(ii) 測定結果

第6図に、測定の結果を示す。これより、断層付近では割れ目密度が大きいことがわかる。AとBを比較すると、断層付近での割れ目密度の違いが認められる。Aでは、断層付近で割れ目密度が非常に大きい、Bでは、割れ目の著しい集中は見られない。断層付近以外でも、まわりに比べて、割れ目密度が大きい場所が数箇所認められる。



第5図 割れ目の密度を調べた道筋



第6図 割れ目の密度分布
 横軸は薄片の端からの距離を、縦軸は1 mm²あたりの割れ目の数を表す。
 ▲は断層の位置

IV. おわりに

今回観察された多くの割れ目は、 σ_1 方向を向いており、破断面に沿う変位が認められないことから、第一近似的には引張型の割れ目であると考えられる。高橋他(1984)は、真三軸圧縮応力下の弾性波速度の減少は σ_1 方向に比べて σ_3 方向の方が著しいという結果を得ているが、今回観察されたように、 σ_1 方向を向く割れ目が卓越することと調和的である。最終破断面付近には多数の割れ目が発達しているが、自然界においても同様な例が報告されている(例えば垣見・加藤, 1977)。

大理石では、割れ目の長さ、割れ目が発生した場所の鉱物粒子の大きさとの間には、正の相関関係があることが明らかになった。これより、割れ目の長さは、鉱物粒子の大きさに規制されるものと考えられる。しかし、花崗岩のように割れ方が複雑な試料の場合には、あわせて破断のタイプを考慮すべきであろう。

謝 辞

本研究を行うにあたり、地質調査所小出仁氏・西沢修氏・高橋学氏には、多大な御指導と御協力を頂いた。また、筑波大学地球科学系佐藤正教授・小林洋二助教授・滝沢茂助手には、有益な御指導と御助言をして頂いた。ここに、深く感謝の意を表する次第である。

文 献

- 垣見俊弘・加藤碩一, 1977: 小笠山礫層(第四系)における礫の破断。第84年, 地質学会講演要旨, 114.
高橋学・木下重教・西沢修・小出仁・千葉洋, 1984: 真三軸圧縮下でのウェスタリー花崗岩の弾性波速度異方性について。地震, 37, 67-79.