

石目と花崗岩の力学的性質

工藤 洋三¹⁾・佐野 修²⁾

1. はじめに

かなり古くから知られた経験的事実が学術の分野には反映されないことがある。経験的には紀元前にすでに認識されながら(Dale, 1923), 学術的には最近まで注目されることのなかった花崗岩の石目もこのような範疇に属するものであろう。石目というのは、岩石を加工する際の「割りやすい面」のことで、採石場で石工職人によって経験的に使用されている用語である。石目の方向を理解しておかないと岩石を加工する際に歩留まりが悪く採算に影響するため、この石目を識別する能力は花崗岩採石場では特に重要とされている。「割りやすい」ということ自体が、何らかの欠陥の存在を示唆しているが、裸眼での観察ではその方向の判断が一般に困難であるた

め、従来熟達した石工職人のみが判別可能であるとされてきた。本稿では、この石目についての経験則や筆者らのこれまでの研究成果の一端を紹介する。

2. 石目の呼称について

石目あるいは単に「目」という用語は多くの岩種について用いられる。建設現場などでは、節理のような肉眼でははっきり認められる割れ目にまでこの「目」という用語が用いられることもある。以下の議論ではこの石目という用語を花崗岩に限定して、しかも裸眼では一般に判別不可能な構造に対して用いることにする。

ここで以下の議論を簡単にするために、花崗岩の「割りやすい面」に関する呼称について整理してお

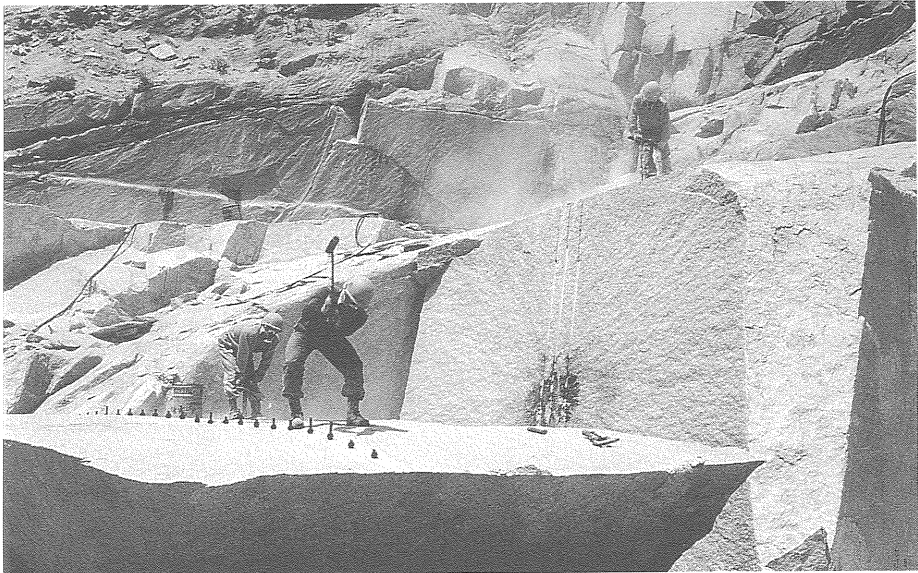


写真1 稲田花崗岩の採石場。中央の壁面は石目(rift面)に沿って割られている。平面性も高く、少ない火薬量で割ることができる。

1) 徳山工業高等専門学校土木建築工学科：
〒745 徳山市久米3538
2) 山口大学工学部

キーワード：花崗岩, 石目, クラック, 強度, 弾性波

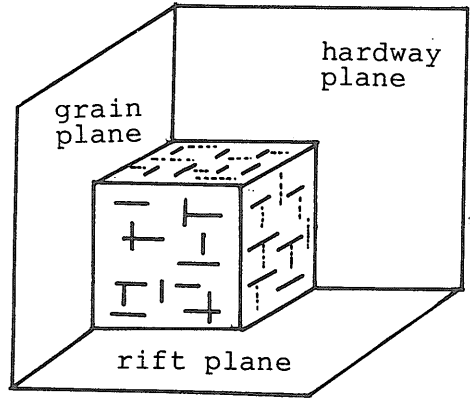
第1表 花崗岩採石場での石目の呼称

No	銘柄名	産地	岩石名	1	2	3
1	盛岡みかげ	岩手県 盛岡市	角閃石黒雲母 石英閃緑岩	一番	二番	おし
2	吾妻みかげ	福島県 梁川町	黒雲母花崗閃 緑岩	目	二番	三番
3	稲田みかげ	茨城県 稲田	黒雲母花崗岩	目	二番	重ね
4	庵治石	香川県 庵治町	黒雲母花崗岩	目	二番	重ね
5	北木石	岡山県 笠岡市	黒雲母花崗閃 緑岩	目	二番	しわ むり
6	大島石	愛媛県 宮窪町	角閃石黒雲母 花崗閃緑岩	目	二番	しわ
7	議院石	広島県 倉橋島	黒雲母花崗岩	一番	二番	こあ
8	徳山みかげ	山口県 徳山市	黒雲母花崗閃 緑岩	目	二番	しわ

(岩石名は小島丈児氏による)

く、日本の採石場における代表的な石目の呼称を第1表に示した。表よりも明らかなように、石目は、一般に、一番割れやすい面が「一番」、あるいは単に「目」と呼ばれており、この面に直交する二番目に割れやすい面が「二番」または「二の目」と呼ばれることが多い。これら二つの面と直交する面については地方によりさまざまな呼称がある。

アメリカやカナダの一部など英語圏の採石場では、一般に、花崗岩の一番割れやすい面を rift 面、この面にほぼ直交し次に割れやすい面を grain 面と呼び、rift 面と grain 面に直交する面を hardway 面と呼ぶことが多い。これは、今世紀の初頭にアメリカのニューイングランド地方を舞台に精力的な花崗岩研究を行った Dale の業績(1923)に基づいているものと考えられる。厳密には rift は「割れやすい」という以外の意味を有しないため、そこには「一番割れやすい」という意味は込められていない場合もある。たとえば Barre(アメリカ合衆国バーモント州)では、採石方法と関連して水平面が lift 面と呼ばれており(White, 1946)、鉛直面の中で割れやすい面が rift 面と呼ばれている。その際 lift 面と rift 面のどちらが割れやすい面かということはいずれも問題にならない。また grain 面という呼称も、これが厳密に「二番目に割れやすい面」を意味するものでもない。“grain”の代わりに“headgrain”と呼ばれ



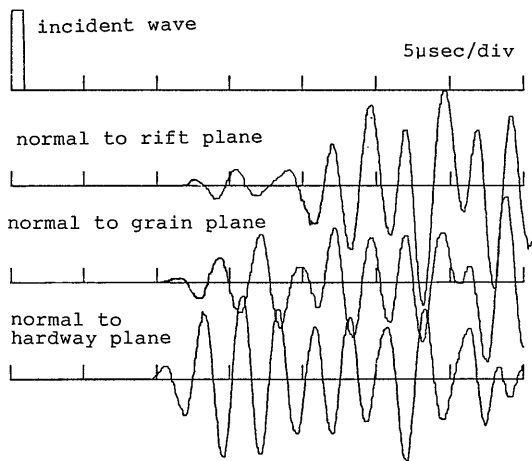
第1図 石目の概念図

ることもあり、その意味は「リニアメント(線状構造)が最も強い」ということを意味するらしい。したがってリニアメントのあまり認められないあるいはほとんど認められない岩石についてこの用語を使用することは適当でないかもしれない。さらに、hardway 面という呼称は一般的に用いられているが、後に述べるように、日本の花崗岩では筆者らが hardway 面と呼んでいる面が、本来の意味での「割れにくい」という範疇に入らないものもある。これはこうした用語が採石場での経験的な呼称で、明確な定義を持つ学術用語として定着していないことと関連していると考えられる。

本研究では表記上の互換性を保つ上から、英語圏の表記法に従う。すなわち割れやすい面を rift 面、この面に垂直に割れやすい面を grain 面、さらにこれら二つの面に直交する面を hardway 面と呼ぶ。またこれらの面に垂直な軸を主軸と定義し、それぞれ R 軸、G 軸、H 軸と定義する。つまりここで用いている三つの面は直交しているのが前提である。実際の物性がこれらの面と平行あるいは垂直な面と関係した特徴を持っているか否かはここでは問わない。

3. 気燥状態における縦波速度の異方性

日本では花崗岩が広範囲にわたって分布するため構造物もこれらの岩盤が使用されることが多い。したがって花崗岩の力学的性質を調べておくことは岩盤の安全性を検討したり、あるいは逆に岩盤を破碎することを検討する上で重要である。工学的に石目が重要なのは、「割れやすい面」の存在が岩石の種



第2図 大島花崗岩内を伝播する縦波の波形

々の力学的性質に異方性が存在することを意味するためである。物体に力が作用した場合の物体の挙動を記述することは力学の重要な課題であるが、このような目的のためには物体が等方的(isotropic)で均質(homogeneous)であることが望ましい。石目の存在はこの等方性という仮定が成立しないことを示している。したがって、石目の存在様式や成因を明らかにすることは地質学のみならず工学的にも重要な課題である。筆者らの花崗岩の石目の研究は岩石の力学的な性質を反映すると考えられる弾性波速度の測定を通して始まった。

岩石内を伝播する弾性波の代表的なものとして縦波と横波がある。いずれの弾性波も石目の存在に敏感であり、岩石の内部構造に関する多くの情報を得ることができる。特に縦波は測定が簡単であり手軽に石目に関する情報を得ることができる。

第2図は、気乾状態(空気乾燥状態)において、直径42 mmの大島花崗岩(愛媛県宮窪町)を用いてrift面, grain面, およびhardway面に垂直な3方向の縦波速度を測定した例であり、横軸に時間、縦軸に圧電振動子の出力(電圧)を示している。rift面に垂直な方向に測定した縦波は入射波の周波数特性や振幅が同一であるにもかかわらず、受信された縦波は速度、振幅がともに小さい。これに対して採石時に割りにくいとされるhardway面に垂直に進行する縦波は振幅が大きく、速度振幅も大きい。すなわちただか直径42 mm程度の供試体の気乾状態において認められる大きな速度異方性は、岩石内部

の空隙の存在とその空隙の分布の異方性を示唆していた。次に必要なのはこうした異方性を生じる構造を直接観察することであった。室内実験に使用される数十mm程度の岩石供試体の力学的性質は、これより下の階層の構造から説明できると考えられたからである。

4. 石目の直接観察

4.1 西南日本内帯の花崗岩の石目

採石場の職人は自分のテリトリー内では、花崗岩の特徴を熟知しており、彼らへのインタビューは石目を特徴づける構造や岩石の力学的性質を検討する上での参考になる。しかしこうした経験的な知識は、方位や呼称について若干の混乱がある場合も少なくない。したがって、石目を特徴づける構造を検討するためには、採石場での石目の情報が残っているサンプルの顕微鏡による直接観察や力学試験が必要となる。したがって筆者らのサンプルの採取は、必ず岩盤から剝離させることを基本とし、可能な場合は大きめのサンプルを採取し弾性波速度試験や力学試験を行った。

石目を特徴づける岩石内の構造を直接観察しようとする我々の最初の試みは、まずそれぞれの石目に平行あるいは垂直な岩石薄片を用意し、どんな構造が石目に平行であるかという点を検討することであった。最初は倉橋島花崗岩(広島県)や大島花崗岩(愛媛県)、北木島花崗岩(岡山県)、黒髪島花崗岩(山口県)、庵治花崗岩(香川県)など主に西日本内帯の花崗岩を検討の対象とした。こうした花崗岩には葉状構造や縞状構造など巨視的に顕著な構造は認められない。これらの岩石の偏光顕微鏡観察の結果明らかになったことは、いずれの岩石においても、石英粒内に石目と平行な面にクラックが卓越して分布することである。このことを示すために北木島花崗岩を例にその特徴について示す。

北木島花崗岩は比較的粗粒の黒雲母花崗岩である。写真2に北木島花崗岩に認められる典型的なクラックの分布を示す。これはhardway面の写真であり、長軸方向はrift面に平行な方向であり、短軸方向がgrain面に平行である。写真からも明らかに、ほとんどの石英粒内に多くのクラックが認められ、このクラックの方向はrift面および

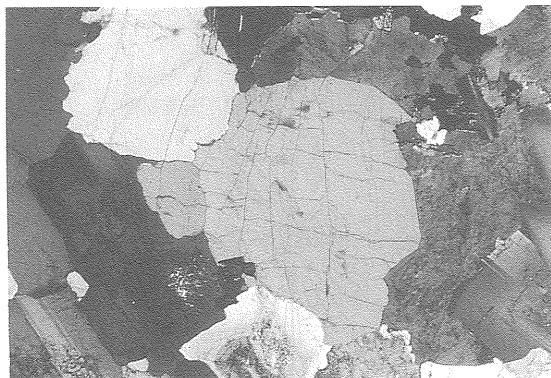


写真2 北木島花崗岩の石英粒内のクラック。
長辺(左右), 短辺(以下)はそれぞれ, rift 面, grain 面に平行. 写真の左右約3.5 mm. 同試料内の石英にこのようなクラックが普遍的に認められる.

grain 面に平行に分布したものが多い. これらのクラックは, 単一の石英粒内に存在することもあり, 石英粒集合体内を貫いて存在することもある. またこれらのクラックが, 長石内まで延長して存在することもあるが, 長石を貫いて存在することは稀である. すなわち, 石英粒内の大部分のクラックは, 石英粒内か粒界が端部となる. 写真3に青木島花崗岩の rift 面を特徴づける石英粒内のクラックを示した.

以上に述べた開口したクラックとは別に, 花崗岩内には, 写真4に示すような癒着したクラックが認められる. これらのクラックは巨視的には線状構造を示しているが, 実際には写真に認められるような液滴(液体包有物)の集合となっている. Tuttle (1949)は, こうした構造を, 生成当時は開口していたクラックが熱水やその中に含まれる鉱物などにより長い時間をかけて癒着した構造であると説明しており, 筆者らもこの見解を肯定的に理解し「癒着したクラック」という表現を用いている. これらの癒着したクラックの方向も多くの場合石目の方法と一致している.

一方, 倉橋島花崗岩や大島花崗岩には, hardway 面と平行な方向のカリ長石内および斜長石内に癒着したクラックが卓越して分布する(写真5). 癒着したクラックは, カリ長石と斜長石が隣接して存在する場合は両者を貫く形で存在するが石英内に連続して伸長することはない. これに対して, hardway 面に直交する rift 面あるいは grain 面に平行な

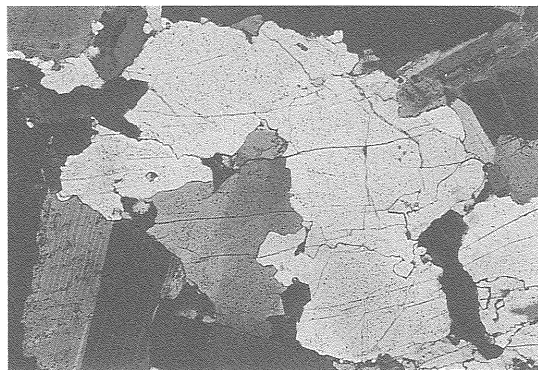


写真3 青木島花崗岩の石英粒内に認められるクラック. 左右約3.5 mm.

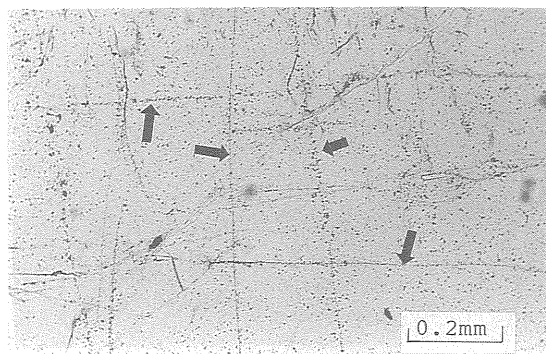


写真4 北木島花崗岩の石英粒内に認められる癒着したクラックの分布. 長辺, 短辺方向はそれぞれ, grain 面, hardway 面に平行.

方向には, 長石内の癒着したクラックの存在はほとんど認められない. したがって倉橋島花崗岩や大島花崗岩においては, これら長石粒内の hardway 面に卓越して分布する癒着したクラックは, hardway 面を同定する際の有力な構造となる.

さらに大島花崗岩の hardway 面の観察によると, hardway 面にはほぼ垂直で, rift 面および grain 面に斜交する癒着したクラックの存在が見られる. 写真6は, これらの癒着したクラックを示すもので, 石英粒内に存在し, hardway 面にはほぼ垂直で rift 面および grain 面と約30°程度斜交する互いにほぼ直交する癒着したクラックである. これらの癒着したクラックは長石内に存在する癒着したクラックと比較すると, 密度がかなり低い.

花崗岩内に存在する各種のクラックを定量化することは容易ではない. それは前述したような, 開口したクラックと癒着したクラックの区別や各鉱物粒

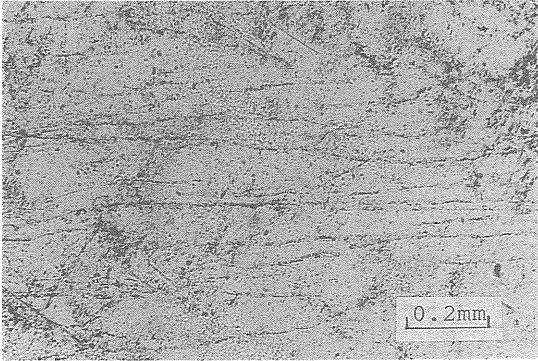


写真5 倉橋島花崗岩のカリ長石内に認められる hard-way 面に平行な癒着したクラック。

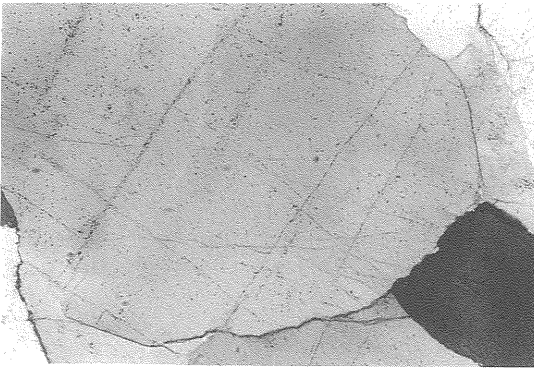


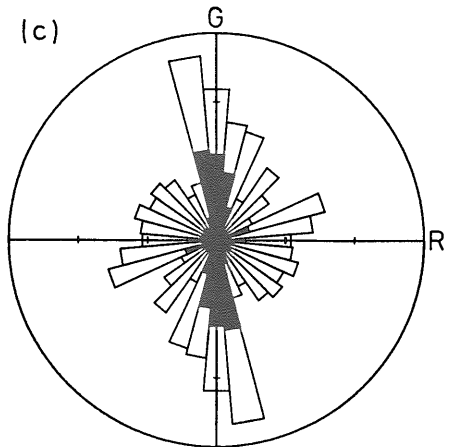
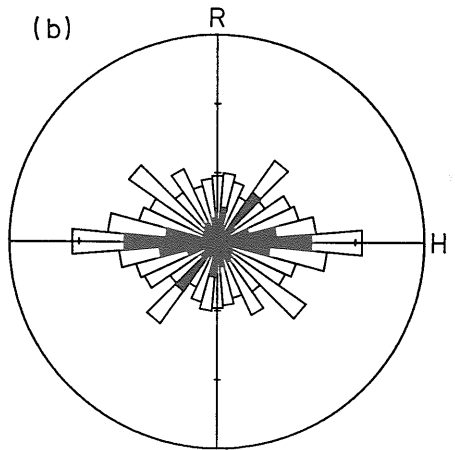
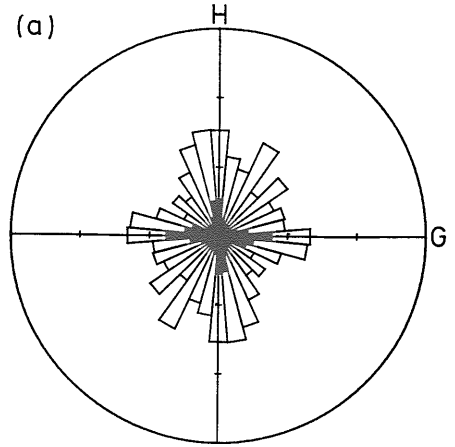
写真6 大島花崗岩の石英粒内に認められる石目の方向(長辺方向)に斜交する癒着したクラック。左右約1.4 mm。

との関係、さらには計数の方法によりデータが異なってくる可能性があるからである。第3図は、これらの制約を考慮した上で、クラック観察にいくつかのルールを設定し測定した例である。

4.2 Barre 花崗岩の石目

これまでの筆者らの調査で、わが国のほとんどの採石場の花崗岩に石目が存在することが明らかになった。また石目を特徴づける構造に癒着したクラックの存在が認められるということは、これが採石場に固有の現象ではなく、広く花崗岩帯に認められることを示している。海外の花崗岩の石目についても多くの国でその存在が確認されている。ここでは花崗岩採石場としては世界最大の規模を誇るアメリカ合衆国ニューイングランド地方の Barre 花崗岩を例にとって石目を特徴づける構造について述べる。

Barre の採石場は、長い採石の歴史の中で深く掘り下げられており、その深さは深いところで130



第3図 大島花崗岩のクラック分布(Sano et al., 1992). それぞれの石目に平行な面内の薄片の観察によって得られたクラック長を合計したもの。円の半径は54 mm, 内側の黒く塗りつぶした部分は粒内クラック長, 外側は全クラック長を示す。

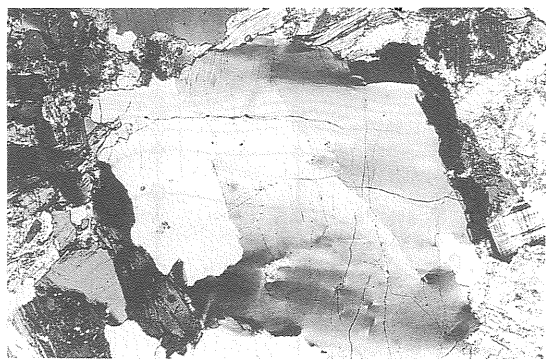


写真7 Barre 花崗岩の石英粒内に認められるクラック。
長辺方向が水平面(ほぼ grain 面に平行)に平行で、短辺方向が rift 面に平行。左右端が約2.5 mm.

m に及ぶ。Barre ではほぼ水平に近い面とこれに直交する面の一つが割りやすい。前述したように、水平面は採石上最後に剝離する面となるため lift と呼ばれており、鉛直方向の割りやすい面が rift と呼ばれている。この2つの面に直交する面が hardway 面である。Barre では現在5か所の採石場が稼働しているが、筆者らは、同地域で最大規模の採石場である「Rock of Ages」社の採石場の花崗岩を採取した。アメリカの花崗岩の力学的異方性に関する初期の論文に用いられている花崗岩には、多くの場合葉状構造や片麻状構造が認められ、またこのことが花崗岩の異方性に関する研究を容易にした側面がある。しかし、Barre 花崗岩には雲母や他の鉱物粒の平行配列は認められていない。写真7にこの岩石の薄片の観察結果を示す。写真から、Barre 花崗岩の石英粒内には著しい波動消光が認められ、この岩石が過去にたどった大きな応力履歴がうかがえる。写真よりも明らかなように、採石場で rift と呼ばれている面と平行な方向には石英粒内にクラックの分布に異方性が認められる。また lift と呼ばれているほぼ水平に近い面にはやはり石英粒内のクラック分布に異方性が認められる。クラックの種類は水平内に配向したものがほとんど開口しているのに対して鉛直面内のは開口したクラックと癒着したクラックが併存している。クラックの密度は鉛直面に配向したクラックの密度が高い。こうした石目の方向に垂直に伝播する縦波速度もそれぞれ rift 面、lift 面、hardway 面に垂直に進行する波動の順序で遅い。薄片の観察および縦波速度のいずれからも、

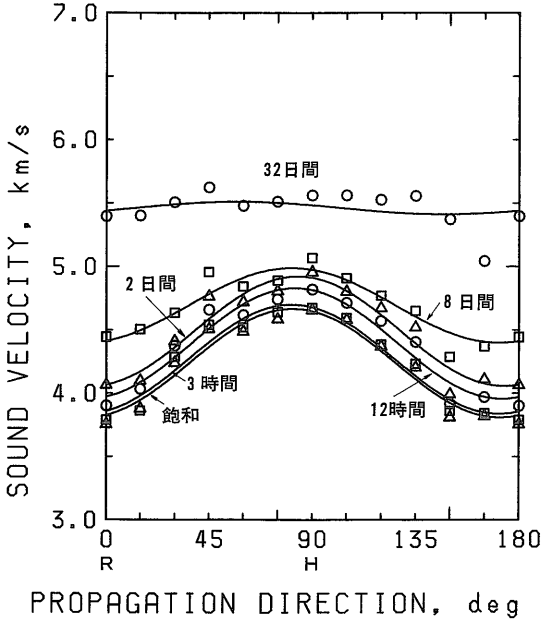
採石場で rift と呼ばれている面が rift 面、lift と呼ばれている面がここでいう grain 面であると考えられる。rift 面、grain 面が石英粒内のクラックの卓越した分布によって特徴づけられるという点では、Barre 花崗岩は、日本の花崗岩の特徴とよく一致している。しかしながら Barre 花崗岩の hardway 面にはクラックの顕著な分布は認められない。

Barre 花崗岩の構造に関しては Douglass and Voight (1969) に詳しく報告されている。彼らの観察によれば開口したクラックと癒着したクラックよりなる石英内のクラック密度は rift 面と平行な方向が最も高く、次いで grain 面に平行な方向の密度が高い。これらの観察結果と一軸圧縮試験の結果より、クラック分布の異方性が圧縮荷重下での変形挙動の異方性の主要因であることが明らかにされている。また石英の c 軸にわずかながら hardway 面に平行に分布しており、rift 面に平行な方向にもこうした傾向が認められている。同じ Barre 花崗岩を用いた Schedl et al. (1986) の観察では c 軸の方位は grain 面にはほぼ平行なものが最大で、hardway 面に関するものが次に多い。採石場では、rift 面はほぼ垂直で N30°E の走行を有し、grain 面はほぼ水平面、hardway 面は、rift 面と grain 面に直交する面である (Engelder et al., 1977)。石目の方向に関するこうした観察結果は、Dale (1923) の New England 地方の花崗岩の調査結果と主要な点ではほぼ一致している。

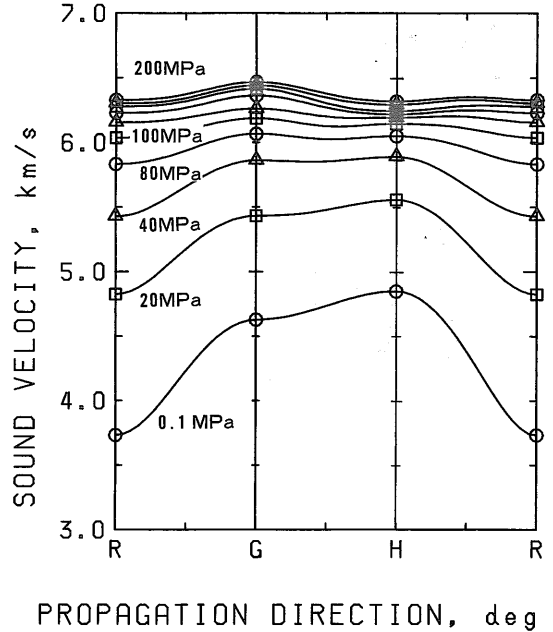
5. 石目と花崗岩の力学的性質

岩石の力学的性質に関する試験法に関しては種々の試験法がある。その中で筆者らがこれまで行ってきた試験法について、石目の存在が花崗岩の力学的性質に与える影響との関連で述べてみたい。

気乾状態における縦波速度の異方性についてはすでに述べた。第4図は水分の存在が縦波速度に及ぼす影響について示したものである (河嶋, 1988年)。これは十分に長い時間水中に置いた直径55 mm の円柱の試験片を水中から取り出した瞬間からの時間と縦波速度の変化を示したものである。図中0度の方向は縦波の進行方向が rift 面に垂直であり、90度は hardway 面に垂直な場合である。水中から取り出した直後の試験片には方向の違いによる縦波



第4図 水の存在が縦波速度に及ぼす影響(河嶋, 1988)



第5図 静水圧の変化に伴う縦波速度の変化.

測定は、rift 面, grain 面, hardway 面に垂直な方向でのみ行っている. 実線は大島花崗岩を直交異方性体と仮定して算出した 9 個の弾性係数 (Sano et al., 1992) を用いて縦波速度を計算し内挿したもの.

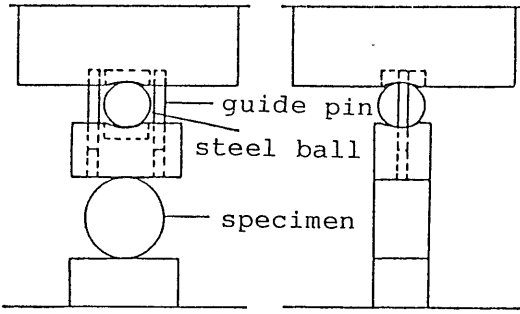
上に、載荷時に発生するわずかな曲げやねじりなどによって試験の結果が大きな影響を受ける. このため方向による違いを議論する場合のように、多くの試験片を要する試験には不向きである.

これに対して間接的に引張強度を求める方法として第6図に示す圧裂試験法がある. この方法は破断予定面に生じている引張応力を計算してそれから引張強度を計算する方法である. こうして求められた引張強度は、実際の一軸引張強度にほぼ一致することが確かめられている (Mellor and Hawkes, 1971). 第7図はこの圧裂強度試験によって求められた大島花崗岩の圧裂強度と対応する縦波速度を示したものである (工藤ほか, 1986年). rift 面を破断する際の引張強度は著しく小さく, hardway 面を破断する場合はかなり高い引張強度となり, grain 面を破断する場合はその中間の値をとる. この実験結果は、割りやすい順序が rift 面, grain 面, hardway 面であるという経験的な事実とよく一致している. 第7図の各図が各石目に平行な面を極としてほぼシンメトリーを示しており、大島花崗岩の力

の違いは比較的小さい. 時間の経過に伴って、全ての方向で速度が低下するとともに異方性が認められるようになる. すなわち、気乾状態における縦波速度の異方性は、供試体に水分を浸潤させることにより著しく小さくなる.

気乾状態における大気圧下での縦波速度の大きな異方性は、静水圧などの拘束圧をかけることによって減少する. 第5図は、大気圧下における縦波速度が静水圧下でどのように変化するかを示したものである. 静水圧の増加にともなって縦波速度も増加し、異方性の程度は著しく小さくなる. 前述した吸水による縦波速度の増加と異方性の減少および静水圧下での縦波速度の同様の傾向は、顕微鏡観察で認められた開口したクラックの特定の方向への卓越した分布から説明できる.

石目の存在に敏感な力学量として次に考えられるのは引張強度である. これは岩石の引張強度が圧縮強度に対して著しく小さいことや、割岩の際の応力場が主に引張応力場であることなどを考慮すれば容易に理解できる. 引張強度とは、一般に一軸引張強度のことをいい、試験片の軸方向に引張荷重を作用させて試験片が破壊を起こしたときの最大荷重を試験片の荷重軸に垂直な方向の断面積で割った値で与えられる. しかしこの方法は試験片の製作が煩雑な

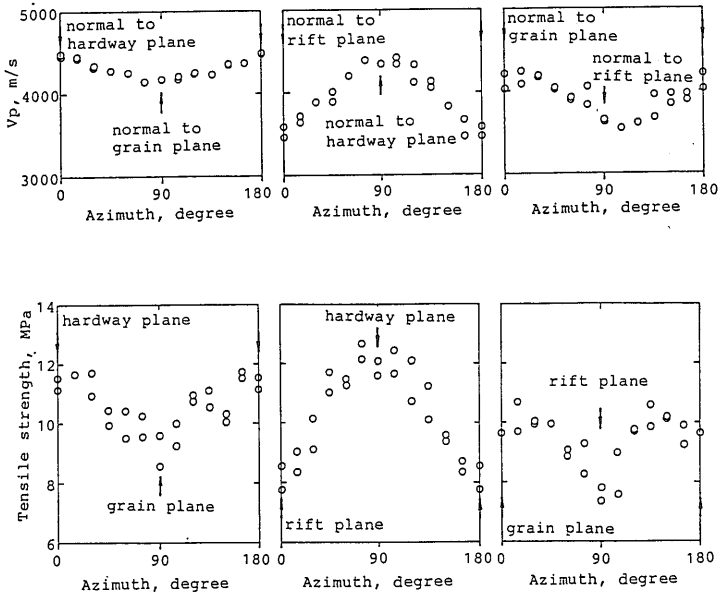


第6図 引張強度を求める圧裂試験

学的性質がほぼ直交異方性を示し、その主軸が石目の方向とほぼ平行であることがわかる。

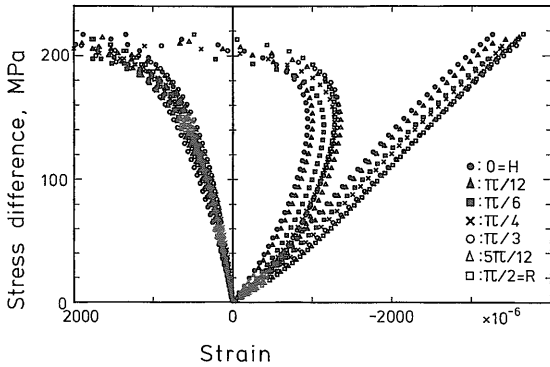
引張強度と並ぶ一般的な岩石試験法として一軸圧縮強度がある。筆者らは、石目が花崗岩の一軸圧縮荷重下での変形・破壊挙動に及ぼす影響を調べるために、黒髪島花崗岩を用いて一軸圧縮試験を行った(佐野ほか, 1988年)。これは載荷軸が必ず grain 面内になるように載荷したもので、載荷軸が rift 面に垂直な場合、および hardway 面に垂直な場合の両者を含んでいる。すなわち載荷軸が grain 面を一周するような載荷を15度間隔で行っている。実験の結果得られた応力-ひずみ線図を第8図に示す。等

方性体の場合、あるいは載荷軸が異方性の軸に対して同じ方向である場合は軸ひずみ、横ひずみとも同一線上にプロットされるが、石目の方向に対して載荷方向を変化させると、図のように応力-ひずみ曲線は大きく異なる。まず縦ひずみは、rift 面に垂直に載荷した場合に載荷初期における非線形性(直線からの隔たり)が最も大きく、rift 面が垂直に近づくにしたがってこの非線形性は小さくなる。このことは、開口したクラックが rift 面あるいはこれにほぼ平行な面内に卓越して分布しているため、載荷によるクラックの閉塞の程度が rift 面に垂直に載荷した場合が最も大きくなることを示している。図からは読み取れないが、横ひずみの挙動もまた石目の方向の影響を受ける。すなわち、側面に90度間隔に貼られた横ひずみ測定用の4枚のひずみゲージの出力にも石目の方向と関連した系統的な異方性が認められる。例えば、hardway 面に垂直に載荷する場合、横ひずみの測定は rift 面に垂直なもの、grain 面に垂直なものになるが、rift 面に垂直に貼られたひずみゲージの出力が grain 面に垂直なものより常に大きい。このことは載荷にとまって生じるクラックもまた石目の影響を受けていることを示している。同様に、rift 面に垂直に圧縮する場

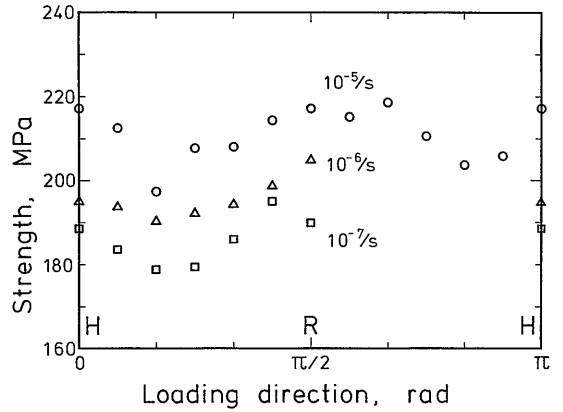


第7図 大島花崗岩の引張強度の異方性に対応する縦波の速度(工藤ほか, 1986b)。

- (a) 弾性波速度
- (b) 引張強度



第8図 一軸圧縮加重下における黒髪島花崗岩の応力-ひずみ関係(佐野ほか, 1988). 载荷軸を石目に垂直な軸から変化させてある. $\pi=180^\circ$

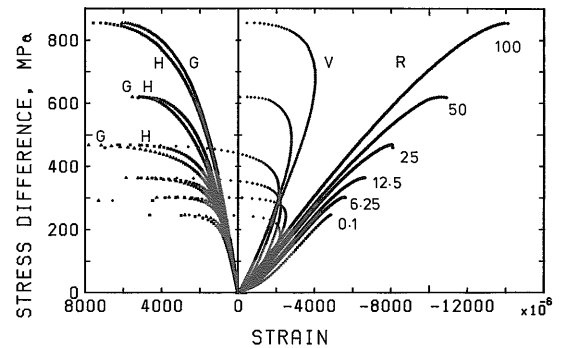


第9図 黒髪島花崗岩の一軸圧縮強度の異方性(佐野ほか, 1988). 図中の数字はひずみ速度を示す. $\pi=180^\circ$

合は、それぞれ grain 面と hardway 面に垂直な方向の横ひずみが測定できるが、この場合は grain 面に垂直な方向の横ひずみの値が大きい。この傾向は载荷の最終段階まで続き、試験片の破壊によって生じる破断面の方向も石目と関連している。このことは、逆に、石目の方向を知っておけば、载荷を始める前に破断面を予測することができることを示している。

第9図は、一軸圧縮試験の結果得られた一軸圧縮強度の測定結果を示したものである。図より明らかなように、圧縮強度の結果もまた、黒髪島花崗岩の力学的性質が直交異方性を示すことを示唆している。またいずれのひずみ速度においても、载荷軸と異方性軸が一致する場合に強度が極大値を示しており、rift 面が最終破断面(fault 面)と一致する場合に最小となっている。こうした傾向は片理の発達した岩石の強度特性(Donath, 1964)とよく類似している。

第10図は、大島花崗岩を用いて、载荷軸が rift 面に垂直になるように固定して、封圧の影響について調べたものであり、封圧を2倍ずつ100MPaまで増加させた場合の応力-ひずみ線図である。静水圧の変化に伴う縦波速度の変化からも予測されたように、封圧の増加にともなって载荷初期における応力-ひずみ曲線の勾配は大きくなる。封圧の大きなものでは、grain 面や hardway 面に垂直に载荷したものとほぼ同様の変化を示すようになる。しかし、このことは岩石の変形・破壊挙動が完全に等方的になることを意味しない。図よりも明らかなよう



第10図 封圧下の大島花崗岩の変形・破壊挙動(佐野による). 図中の数字は封圧(MPa)を示す. 载荷軸は rift 面に垂直.

に、高い封圧下でも、石目の方向と関連した横ひずみの系統的な差異は消滅せず圧縮強度や最終破断面の方向に影響を与える。

6. おわりに

我々が目にすることができる岩石内の構造は、広域的に一般性を有する構造と局所的な特徴が組み合わされたものと考えられる。したがって石目を特徴づける構造を語る場合にも、これらの点に留意することが必要である。これまで述べてきたように、我々はこうした点に留意して、日本の花崗岩の石目や一部海外の花崗岩の石目について、顕微鏡観察、弾性波速度試験、引張強度試験や圧縮強度試験、静水圧試験などの力学試験を行って来た。花崗

岩の石目を特徴づける岩石内の構造について共通していることは、どの岩石にも少なくとも一つの面、一般には直交する二つの面内に石英粒内にクラックの卓越した分布が認められることである。そして、弾性波速度、引張強度、圧縮強度のいずれの力学試験においても、これらのクラックの卓越して存在する面と関連した異方性が認められる。

執筆を依頼された当初は、石目の成因に関するこれまでの文献の紹介や花崗岩内を伝播する横波の性質、異方性体としての花崗岩の弾性率などに関する著者らの到達点についても述べる予定であったが、いくつかの制約のために次回の課題となった。

ここで紹介した筆者らの研究の多くは、全国の多くの石材関連業者の協力によって初めて可能になったものである。特に北木島(岡山県)の馬越道也さん、伊予大島(愛媛県)の大島石協同組合、徳山市(山口県)の黒髪石材(株)には、石材の提供などでお世話になった。岐阜大学金折裕司先生、山口大学工学部中川浩二先生には多くの有益な助言をいただいた。広島大学名誉教授の小島丈兒先生は、本稿の寄稿をすすめてくださった。以上の皆様に謝意を表す。

文 献

Dale, T. N. (1923): The commercial granite of New England, Bull. U.S. Geol. Surv., **738**, 22-103.
 Donath, F. A. (1964): Strength variation and deformational behavior in anisotropic rock. In: State of stress in the earth's crust.

Judd, W. R. (ed.). New York: American Elsevier, 281-297.
 Douglass, P. M. and Voight, B. (1969): Anisotropy of granites, *Geotechnique*, **19**, 376-398.
 Engelder, T., Sbar M. L. and Kranz, R. (1977), A mechanism for strain relaxation of Barre granite: opening of microfractures, *Pure Appl. Geophys.*, **115**, 26-40.
 河島 智(1988): 異方性岩石の弾性率に関する研究, 山口大学工学部修士論文, 189p.
 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.
 工藤洋三・橋本堅一・佐野 修・中川浩二(1986): 花崗岩質岩石の力学的異方性と岩石組織欠陥の分布, 土木学会論文集, 第370号/Ⅲ-6, 189-198.
 Mellor, M. and Hawkes, I. (1971): Measurement of tensile strength by diametral compression of discs and annuli, *Eng. Geol.*, **5**, 173-225.
 佐野 修・工藤洋三・水田義明・中川浩二(1988): 花崗岩の異方性を考慮した変形・破壊特性に関する研究, 土木学会論文集, 第400号/Ⅲ-10, 179-188.
 Sano, O., Kudo, I. and Mizuta, Y. (1992): Experimental determination of elastic constants of Oshimagranite, Barre granite, and Chelmsford granite, *Jour. Geophys. Res.*, **97**, B3, 3367-3379.
 Schedl, A., Kronenberg, A. K. and Tullis, J. (1986): Deformation microstructures of Barre granite: an optical, SEM and TEM study, *Tectonophysics*, **122**, 149-164.
 Tuttle, O. F. (1949): Structural petrology of planes of fluid inclusions, *Jour. Geol.*, **57**, 331-356.
 White, W. S. (1946): Rock bursts in the granite quarries at Barre, Vermont, *U.S. Geol. Survey Circ.* **13**, 1-15

KUDO Yozo and SANO Osam (1993): Mechanical behavior of granitic rocks associated with rifting.

〈受付: 1993年6月25日〉