加熱破壊による花崗岩の機械的劣化と動/静ヤング率比の変化

今井忠男*・杉本文男*・山下 秀**・樋口知幸**・古住光正***

要 旨

本研究では、花崗岩の機械的風化過程を加熱破壊実験によってモデル化し、加熱による花崗岩の力学的物性の変化およびき裂の発達について検討した。実験の結果、加熱破壊による花崗岩の機械的劣化過程は、薄片の顕微鏡観察から、主にマイクロなき裂の発達に支配されており、き裂は、粒子内、粒子境界、粒子貫通型へと発達していくことがわかった。さらに、花崗岩の弾性波速度は、マイクロなき裂の発達によって減少するが、圧縮強度は、マイクロなき裂の発達にあまり影響を受けないことがわかった。とくに、動的ヤング率と静的ヤング率との比は花崗岩の劣化に対応して低下することがわかった。

Key words : 花崗岩 granite, 機械的劣化 physical deterioration, P波速度 primary wave velocity, 加熱破壊 fracture due to heating

1. は じ め に

花崗岩は、鉱物として化学的に安定な石英を多く含んでいるにもかかわらず、他の岩石に比較し、風化しやすい場合が多いといわれている¹⁾。さらに、風化した花崗岩は粒状化しやすく、この結果、花崗岩の風化土は、わが国にも多く産出し、とくに、まき土とよばれている。

岩石の風化は、機械的風化と化学的風化の2つの作用に分類されるが、花崗岩の風化について、従来の研究では、化学的風化過程を中心に調べられてきた^{2)~6)}。しかし、花崗岩の主な風化の要因が、斜長石や黒雲母の変質(粘土化)とすれば、花崗岩は大半を占める安定な石英によって、簡単には粒状化し難いと考えられる。しかし、実際には、風化した花崗岩は、破壊および粒状化しやすい。すなわち、花崗岩が破碎され粒状化するには、化学的風化作用よりも、き裂の発達などによる、機械的な風化作用が必要と考えられる⁷⁾。実際、高地や砂漠地帯など、化学的風化が進み難い場所でも、機械的な風化によって、岩石は破碎し、粒状化することが知られている⁷⁾。

露出した花崗岩が、頻繁に受ける機械的風化作用の1つ

として、日射による熱破壊があげられる。いくつかの花崗岩では、実験的に50℃程度の加熱によって、破壊に伴うAcoustic-Emission(AE)の活動が活発になることがわかってきている⁸⁾。また、繰り返し加熱・冷却することによって(熱疲労試験)、花崗岩は破壊し、粒状化していくことも、実験によって知られている^{9), 10)}。以上のことから、露出した花崗岩は、日射による熱破壊およびその繰り返しによって、破碎し粒状化していくことが推察される。

また、花崗岩の機械的風化の要因には、応力除荷作用⁷⁾によるき裂の発達も注目される。地下深部など大きな地圧を受けていた花崗岩では、応力が解放(除荷作用)されると膨張し、熱膨張と同様にき裂が発達する。とくに、花崗岩は粘・弾性的性質によって、外部からの応力除荷後も膨張し破壊が続くことが知られている¹¹⁾。上述のように、花崗岩は、日射による加熱や応力除荷作用などによる、膨張過程でき裂が発達し、機械的に劣化していくと考えられる。ただし、花崗岩は、節理性の岩盤に分類され、節理面の状態が岩盤全体の強度を支配していると考えられている。しかし、節理面の摩擦強度もまた、岩石の劣化程度に影響を受けて低下することから、節理性岩盤においても岩石の劣化程度を把握することは、重要であると考えられる。

本研究では、日射や応力除荷作用などによる花崗岩の機械的風化を想定し、花崗岩の機械的な劣化過程について、加熱破壊によるモデル実験を行った。この実験から、花崗岩の力学的物性に及ぼす機械的劣化の影響について、とく

* 秋田大学工学資源学部 Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University
 E-mail: imai@ipc.akita-u.ac.jp. (会員)

** 秋田大学工学資源学部 Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University

*** 岩手大学工学部 Faculty of Engineering, Iwate University

に動/静ヤング率比の変化に注目して考察した。

2. P波速度による風化した花崗岩の岩盤分類

ここでは、田中¹²⁾の岩盤分類にしたがって、風化した花崗岩のP波速度および圧縮強度について検討する。

図-1は、一定領域内における風化した花崗岩の岩盤分類とコアおよび岩盤測定によるP波速度との関係を示したものである^{13), 14)}。また、花崗岩の岩盤分類に対して、木宮⁹⁾の風化分帯も示した。図より、花崗岩の風化程度に対し、P波速度は一定の割合で減少していくことから、P波速度による風化の評価は、同類の花崗岩ではある程度妥当と考えられる。しかし、花崗岩の組成や性状が異なると、新鮮な花崗岩同士でもP波速度が異なるため、図-1のP波速度による岩盤分類を普遍的な指標として用いるには、問題が多い。

さらに、同図に風化機構の変遷を模式的に表した。化学的な風化が進みやすい環境でも、花崗岩は、はじめ機械的な風化によってき裂、空隙を発達させ、水溶液を含みやすい状態に変化する必要がある。このうち、化学的風化が支配的になると考えられる。

次に、風化した花崗岩のP波速度と一軸圧縮強度との関係を図-2に示す¹⁵⁾。図より、一軸圧縮強度が50MPa以下では、P波速度と一軸圧縮強度とは、多少の正の相関がみられるものの、50MPa以上では相関はほとんどない。一軸圧縮強度が50MPa以下の花崗岩は、経験的には、岩盤分類C_M以下に分類できる。このことから、岩盤分類C_H以上の、機械的風化が支配的な領域では、風化によってP波

図-2 花崗岩の一軸圧縮強度とP波速度との関係⁵⁾

速度は減少するが、圧縮強度はばらつきが大きく、明確な傾向がみられないことがわかる。すなわち、一軸圧縮強度が50MPa以上の花崗岩は、P波速度と一軸圧縮強度の2つのパラメータだけで、岩質の劣化程度を評価することは難しいと考えられる。

本研究では、この領域を花崗岩の初期風化領域と定義し、これを花崗岩の加熱破壊実験でモデル化した。なお、本論文では、岩石が破壊・変質することを劣化とし、とくに自然に劣化する場合を風化とした。

3. 実験方法

実験試料には、風化の進んでいない新鮮な姫神花崗岩(岩手県玉山村産)を用いた。表-1に本試料の力学的物性値を示す。この試料から、圧縮試験用(円柱形: $\phi 33.4 \times 66.5$ mm)と圧裂引張試験用(円板形: $\phi 33.4 \times 16.4$ mm)の2通りの試験片を作製し、実験に使用した。

本実験では、花崗岩を熱破壊によって機械的に劣化させ、劣化に伴う力学的物性の変化およびき裂の発達について調べた。具体的な手順を以下に示す。試験片は100℃で乾燥したのち、マッフル炉によって150~500℃まで数段階の加熱温度を設定し、試験片内に大きな温度勾配が生じないよう2.5℃/分の昇温速度でゆっくり加熱し熱破壊させた。図-3に加熱前と500℃加熱後の花崗岩の顕微鏡写真を示す。加熱前では透明感のある試料が、加熱後では白濁し、き裂の発達によって、結晶は分割され小さくなっていることが認められる。なお、加熱温度が600℃を越えると、花崗岩は急激に破壊が進み、試験片の表面が崩壊し形状を保てなくなる。

熱破壊によって劣化させた試験片は、室温まで冷却したのち、P波(500kHz)およびS波(100kHz)速度、P波振幅、ショア硬度(反発硬度)を計測し、続いて一軸圧縮試験およ

図-1 P波速度による花崗岩の岩盤分類および風化分帯^{6), 12)}

表-1 姫神花崗岩の力学物性値

密度 (g/cm ³)	空隙率 (%)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	P波速度 (km/s)	S波速度 (km/s)	動的ポアソン比
2.66	0.32	247.6	11.7	5.22	2.81	0.296

加熱前 (100℃) 加熱後 (500℃)

図-3 加熱前および加熱後の花崗岩

び圧裂引張試験によって、圧縮および引張強度を測定した。

さらに、試験片のき裂発達の程度を蛍光法によって観察するため、次の手順で顕微鏡薄片を作製した¹⁶⁾。はじめに、熱破壊させた試験片のき裂・空隙に蛍光樹脂(蛍光剤を含む樹脂)を真空で蒸発させて充填させる。この後、加熱によって蛍光樹脂を固化させてから切断し、薄片を作製した。この薄片に顕微鏡下で紫外線を照射すると、蛍光樹脂を含んだき裂・空隙が発光するため、微細なき裂・空隙の観察が可能となる。また、新鮮な試料および熱破壊させた試料をX線分析によって調べ、加熱による鉱物の化学的变化の程度についても検討した。

4. 実験結果

4.1 熱破壊による力学的物性の変化

図-4 に、加熱温度に対する花崗岩のP波およびS波速度の変化を示す。図より、加熱温度の上昇に対しP波およびS波速度は直線的に減少し、500℃ではそれぞれ40～35%程度減少していることがわかる。この傾向は、図-1 に示した花崗岩の岩盤分類とP波速度との関係と類似している。また、図-5 に、加熱温度に対する花崗岩のP波振幅比の変化を示す。ここで、P波振幅比とは、100℃の振幅に対する加熱したときの振幅の割合であり、おおむねP波の減衰を示している。図より、加熱温度の上昇に対しP波振幅比は直線的に減少し(相関係数 $r=0.78$)、300℃以上では減少割合が大きくなる($r=0.99$)。次に、図-6 に

図-4 加熱温度に対する花崗岩のP波速度およびS波速度の変化

図-5 加熱温度に対する花崗岩のP波振幅比の変化

図-6 加熱温度に対する花崗岩の圧縮および引張強度の変化

図-7 100℃で乾燥した花崗岩のき裂画像

図-8 250℃に加熱した花崗岩のき裂画像

図-9 300℃に加熱した花崗岩のき裂画像

加熱温度に対する花崗岩の圧縮および引張強度の変化を示す。図より、加熱温度の上昇に対し圧縮強度は多少の減少傾向(500℃で約5%減)を示している。これに対し、引張強度は300℃まではバラツキが大きくあまり変化しないが($r=0.26$)、300℃を越えるあたりから明らかな減少傾向(500℃で約50%減, $r=0.82$)がみられる。

4.2 熱破壊によるき裂の発達

図-7は、100℃で乾燥した花崗岩の顕微鏡写真である。左がクロスニコル、右が蛍光法による画像である。両者とも、き裂はほとんど確認できない。次に、図-8は250℃に加熱した花崗岩の顕微鏡写真である。蛍光法の画像では、き裂が多少発達し、大きなき裂もいくつか見受けられる。クロスニコルの画像と比較すると、小さなき裂は斜長石内に発達し、比較的大きなき裂は粒界に沿って発達していることがわかる。図-9は300℃に加熱した花崗岩の顕微鏡写真である。蛍光法の画像から、熱破壊によるき裂が密に発達していることが観察できる。また、同クロスニコル画像と比較すると、斜長石内のき裂発達は密になり、また粒子を貫く大きなき裂が発達していることがわかる。

以上の観察から、花崗岩は、300℃以下の加熱では、粒子内および粒子境界のみにき裂が発生し、300℃以上の加熱においては、粒子を貫く大きなき裂が発達することが確認できた。

4.3 加熱による鉱物の変化

図-10は、100、300、500℃に加熱した試料をX線分析した結果である。図のスペクトルパターンから、二者ともほとんど違いがないことがわかる。花崗岩では化学的風化が

図-10 加熱した花崗岩のX線分析結果

Am: 角閃石, B: 黒雲母, Ch: 緑泥岩, Fl: 長石,
Q: 石英

進むと、黒雲母と角閃石が減少する傾向があるが²⁾、本図ではその傾向は認められない。なお、緑泥石は加熱すると焼結によって減少する傾向がみられた。よって、本分析結果より、花崗岩を加熱し劣化させても、熱破壊によるき裂の発達以外、鉱物の化学的変化はほとんどないと考えられる。すなわち、花崗岩は500℃の高温に加熱しても、き裂の発達による機械的な劣化が進むだけであると推察される。

5. 考 察

5.1 き裂発達と強度および弾性波速度との関係

線形破壊力学では、材料の引張強度はき裂長の $-1/2$ 乗に比例することになる。しかし、花崗岩と類似した、空隙を含む多結晶構造のセラミック材料等では、新たに発生したき裂長さが固有き裂長さ以下であると、引張強度はほとんど変化しないことが知られている¹⁷⁾。この事実は、300℃までの加熱では引張強度の低下は見られないが、300℃以上に加熱すると粒子間を貫く大きなき裂が発達し、引張強度が低下するという本実験結果と一致する。すなわち、花崗岩の引張強度は、単純にき裂の発達に関係するのではなく、き裂のサイズに大きく影響を受けると考えられる。これに対し、弾性波(P波、S波)速度はき裂の発達(分布密度)に大きく影響を受け減少すると考えられる。P波振幅比(減衰率)も速度と同様の傾向がみられるが、300℃以上で多少減少割合が大きくなる現象もみられた。よって、P波振幅比はき裂の分布密度とサイズの両方に影響を受けると考えられる。

また、本研究によって、花崗岩の圧縮強度は、ミクロなき裂の分布密度やサイズにはあまり影響を受けないことがわかった。この原因は、圧縮強度は、試験片内のミクロなき裂の発達よりも、鉱物粒子の強度や粒子間およびき裂面の摩擦力に大きく支配されているためと考えられる。したがって、花崗岩の圧縮強度は、き裂の発達などで単純に推定することは難しい。

5.2 花崗岩の弾性と動/静ヤング率比の変化

ここでは、熱破壊による花崗岩の劣化過程をP波速度で整理し、P波速度に対応する力学的に意味のある相対値について検討する。図-11は、熱破壊によって劣化させた花崗岩におけるP波速度とショア硬度との関係である。参考までに圧縮強度も示した。このP波速度の範囲では、ショア硬度(反発硬度)は、劣化によって少ししか変化しないことがわかる。すなわち、反発によって示される花崗岩の弾性は、熱破壊におけるき裂発達にあまり影響を受けないと考えられる。

次に、図-12は、P波速度と圧縮試験で測定した静的ヤング率(1/2接線)および弾性波速度から算定した動的ヤング率との関係である。図より、P波速度の減少に対し静的ヤング率はあまり変化しないが、動的ヤング率は急激に減

図-11 劣化過程における花崗岩のP波速度と圧縮強度・ショア硬度との関係

図-12 劣化過程における花崗岩のP波速度と動および静的ヤング率との関係

図-13 劣化過程における花崗岩のP波速度と動/静ヤング率比との関係

図-14 自然の風化花崗岩における動/静ヤング率比の分布 (林田²⁰⁾のデータ)

少することがわかる。また、P波速度が5 km/s以上の加熱温度の低い試験片では、両者はほぼ一致し、P波速度の減少とともに両者の値は離れる傾向にあることがわかる。ただし、多くの岩石では、動的ヤング率は静的ヤング率より大きく、花崗岩でも化学的風化の進んだ試料では、同様の傾向を示す⁵⁾。しかし、一部の花崗岩では、逆の場合も見受けられることが知られている¹⁸⁾。

この実験結果は次のように考察できる。一般に、き裂の多く発達した岩石では、圧縮応力によってき裂が閉塞するため、応力-ひずみ線図がS字形となり、载荷のはじめは、岩石は見かけ上硬化する。このとき、き裂が閉塞した圧縮応力下では、岩石の弾性波速度は、増加しているものと推測される。実際、き裂の多い花崗岩岩盤の弾性波速度は、地圧によって大きく変化することが知られている¹⁸⁾。すなわち、本実験における静的ヤング率は圧縮応力下で測定し、動的ヤング率は無負荷の状態で測定した値であることから、静的ヤング率の方が大きくなったと考えられる。よって、花崗岩は、ある程度き裂が発達していても、地圧など圧縮応力によって、き裂が閉塞されるならば、力学的物性は新鮮な状態と同程度と推測される。

さらに、図-12の関係から、動的ヤング率と静的ヤング

率の比は熱破壊による花崗岩の機械的劣化およびき裂発達の程度を表すことができると考えられる。図-13は、動的ヤング率と静的ヤング率の比とP波速度との関係である。また、図中には、従来のS波速度とP波速度との比によるき裂発達インデックス¹⁹⁾も参考に示した。図より、劣化が進んでいない場合、動/静ヤング率比は約1であり、動的ヤング率と静的ヤング率はほぼ一致している。すなわち、花崗岩では、機械的劣化が進むと動/静ヤング率比は1より小さくなり、P波速度が10%減少すると約0.1減少することがわかる。なお、従来のS波速度とP波速度との比によるインデックスは、P波速度の減少に対し変化が小さく、データのバラツキに影響されやすいことがわかる。よって、熱破壊による花崗岩の機械的劣化の場合、動的ヤング率と静的ヤング率の比は、従来のき裂発達インデックスに比較し、より正確に劣化の程度を評価できるものと考えられる。

5.3 自然の風化花崗岩における動/静ヤング率比の分布

林田²⁰⁾は、日本各地から採取した花崗岩の動的ヤング率と静的ヤング率(1/2接線)との関係について調べている。その結果、花崗岩は動的ヤング率の方が静的ヤング率より小さい場合が多く、これは、他の岩石ではあまり見られない傾向であると述べている。このことは、本実験結果と同

様な傾向である。図-14は、林田のデータから動/静ヤング率比を求め、横軸に動的ヤング率をとってプロットしたものである。なお、図中に本実験結果も示した。図より、林田のデータでは、本実験結果と同様に、傾向が図中の直線で示されるような、動的ヤング率が低下(劣化)するにしたがい動/静ヤング率比が直線的に減少するデータと、斜線で囲ったような、動的ヤング率が低い領域で、動/静ヤング率比が1より大きく、一定の傾向をなさないデータとの2つのグループに分かれることがわかる。

この結果は、次のように考察できる。本実験結果と同様の傾向を示すグループの試料岩石は、機械的風化あるいは力学的な作用によってき裂が発達し、劣化しつつあるものと推察される。また、静的ヤング率が小さく動/静ヤング率比が1より大きくなる(斜線で囲ったデータ)グループは、化学的風化が進み、変質して花崗岩の力学的性質を失いつつあるものと推察される。

以上のことから、実際の花崗岩を測定し、P波速度が低く岩盤分類で C_H 以下と判断された場合、強度が低く、動/静ヤング率比が1より小さければ、機械的風化だけが進みつつある風化初期段階と判断でき、1より大きければ、機械的風化に加え化学的に変質していると予想される。

ただし、林田のデータでは、動的ヤング率が75GPaを超える領域で、動/静ヤング率比が1より大きくなっている。この要因については、使われた試料が明かでないので、硬い花崗岩について普遍的な現象なのか、用いた試料固有の現象なのか判断できない。よって、ここでは、これ以上の言及を避ける。

なお、斉藤ら⁵⁾の研究においても、花崗岩の風化について、動的ヤング率と静的ヤング率を求めて検討している。しかし、この研究では、静的ヤング率の算定が、一定ひずみ量における割線の傾きによるものであり、本研究結果や林田の結果とは、単純に比較できない。さらに、斎藤らの研究では、岩盤分類 C_H の領域のデータが少ないことなどの理由から、ここでは議論しなかった。

6. お わ り に

本研究では、風化など花崗岩の機械的な劣化過程について検討するため、熱破壊させた花崗岩の力学的物性、き裂の発達、鉱物組成の変化について調べた。その結果、以下のことがわかった。

- ①花崗岩の機械的劣化は、ミクロなき裂の発達に支配されており、き裂の発達は破壊の進展に対応し、粒子内、粒子境界、粒子貫通タイプへと変化する。
- ②ミクロなき裂の発達によって、花崗岩の動的弾性は減少するが、圧縮強度への影響は小さく、引張強度は比較的大きなき裂に影響を受け減少する。
- ③動的ヤング率と静的ヤング率の比は、熱破壊による花崗

岩の機械的劣化に対応して変化する。

謝辞 花崗岩のX線分析にあたっては、秋田大学応用地球科学教室の大学院生西村孝一氏にご協力いただきました。ここに記して感謝申し上げます。

引 用 文 献

- 1) 池田碩(1998): 花崗岩地形の世界, 古今書院, pp.26-41.
- 2) 鈴木隆介・平野昌繁・高橋健一・谷津栄寿(1977): 六甲山における花崗岩類の風化過程と地形発達の相互作用, 中央大学理工学部紀要, Vol.20, pp.343-389.
- 3) 松倉公憲・前門晃・八田珠郎・谷津栄寿(1983): 稲田型花崗岩の風化による諸性質の変化, 地形, Vol.4, No.1, pp.65-81.
- 4) 九里尚一・阿部司・斉藤徳美(1971): 花崗岩類の風化に関する研究(I), 物理探鉱, Vol.24, No.1, pp.6-17.
- 5) 斉藤徳美・阿部司・九里尚一(1971): 花崗岩類の風化に関する研究(II), 物理探鉱, Vol.24, No.5, pp.222-227.
- 6) 木宮一邦(1975): 花こう岩類の物理的風化指標としての引張強度-花こう岩の風化・第1報-, 地質学雑誌, Vol.81, No.6, pp.349-364.
- 7) OLLIER, D. C.(1971): 風化-その理論と実際-, ラティス, pp.6-124.
- 8) 江原昭次・寺田孚(1984): 加熱・冷却にともなう岩石のAE発生特性, 第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.403-408.
- 9) SIMMONS, G., COOPER, H., (1978): Thermal Cycling Cracks in Three Igneous Rocks, *Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech.*, Abstr. Vol.15, pp.145-148.
- 10) 小林良二・酒井昇・松木浩二(1983): 岩石の熱疲労に関する実験的研究, 日本鉱業会誌, Vol.99, No.1140, pp.81-86.
- 11) 加藤春実・水田義明・佐野修(1994): ボーリングコア側面の非弾性ひずみと初期応力の関係について, 資源と素材, Vol.110, No.1, pp.80-86.
- 12) 田中治雄(1964): 土木技術者のための地質学入門, 山海堂, pp.28-36.
- 13) 本州四国連絡橋公団(1977): 尾道〜今治地区海峡部地質調査(その15), pp.1.
- 14) 本州四国連絡橋公団(1972): Eルート地質調査報告, K₂-3p.
- 15) 本州四国連絡橋公団(1973): 尾道〜今治地区海峡部地質調査(その3), 因島大橋, pp.1.
- 16) 西山孝・楠田啓・北川元紀(1990): 蛍光剤を添加した樹脂による微小割れ目の可視化と自動抽出, 資源と素材, Vol.106, No.10, pp.573-579.
- 17) 北住順一・谷口佳文・星出敏彦・山田敏郎(1989): 各種セラミック材料における強度特性およびその欠陥寸法分布との関係, 材料, Vol.38, No.434, pp.1254-1260.
- 18) 土質工学会編(1979): 風化花崗岩とまさ土の工学的性質とその応用, 土質工学会, pp.87-93.
- 19) TOURENQ, Q., FOURMAINTRAUX, D.(1974): L'indice de qualite des roches, quelques applications, *Proc. 2nd Cong. IAEG*, San Paulo, Vol.8, pp.4-20.
- 20) 林田精郎(1973): 岩石の動弾性係数と静弾性係数について, 応用地質, Vol.14, No.3, pp.103-111.

(1999年10月6日受付, 2000年9月13日受理)

Jour. Japan Soc. Eng. Geol., Vol.41, No.5, pp.279-285, 2000

The Physical Deterioration of Granite by Fracture due to Heating and Ratio of Dynamic and Static Young's Modulus

Tadao IMAI, Fumio SUGIMOTO, Shigeru YAMASHITA , Tomoyuki HIGUCHI
and Mitsumasa FURUZUMI

Abstract

The purpose of this study is to explain the mechanism of physical deterioration process of granite. The physical weathering process of granite was modeled by fracture due to heating. The relationship between heating temperature and the mechanical properties were examined and subsequent growth of crack due to heating was observed with a microscope.

Results obtained from this study shows that granite is deteriorated physically by the growth of micro cracks. The growth of these cracks was observed to be in three distinct stages. Crack is initiated within the intracrystalline, this is then proceeded by intracrystalline crack or grain-boundary crack and finally, intercrystalline cracks were observed. Elastic wave velocity of the granite decreases by the growth of micro-crack. However, the growth of micro crack does not affect the compressive strength of the granite. Furthermore, ratio of dynamic and static Young's modulus decreases by physical deterioration.

Key words : granite, physical deterioration, primary wave velocity, fracture due to heating