

高温下岩石の力学特性に関する研究

木下直人¹・安部 透²・若林成樹³・石田 毅⁴

¹正会員 理修 清水建設(株) 技術研究所 主席研究員 (〒135 東京都江東区越中島3-4-17)

²正会員 清水建設(株) 技術研究所

³正会員 工修 清水建設(株) 技術研究所

⁴正会員 工博 山口大学助教授 地域共同研究開発センター (〒755 山口県宇部市常盤台2557)

3種類の岩石(稲田花崗岩, 三城目安山岩, 大谷凝灰岩)を用いて, 温度最高300℃, 拘束圧最大30MPaまでの範囲における力学特性の温度および拘束圧に対する依存性を明らかにするために, 室内岩石試験を実施した。その結果, 岩石の種類によって, 力学特性の温度依存性を支配する要因が異なるため, 高温になるにしたがって, 破壊強度や弾性係数が低下する岩石と, ほとんど変化しないかまたは増加する岩石とがあることがわかった。ただし, 今回試験を行った岩石では, 300℃までの温度範囲では, 力学特性の温度依存性はあまり大きくなく, 拘束圧や含水状態の影響の方を大きく受けている。また, 今回試験を行ったような温度, 圧力条件の下では, 拘束圧は, 物性値の温度依存性を減少させる方向で作用する。

Key Words : rock, high temperature, mechanical properties, laboratory test, acoustic emission

1. はじめに

地下空間利用の多様化に伴い, 岩石・岩盤の高温特性に関する研究が重要になってきている。

高温下における各種岩石の力学特性の温度依存性に関する既往の研究の多くは, 大気圧下で行われた試験に基づいている。高温, 高圧下における岩石の力学特性に関する研究も, 海外では活発に行われてきているが, それらは地球科学上の諸問題に関連して行われた場合が多いため, 温度700~1,000℃, 圧力500~1,500MPaといった超高温, 超高压下における岩石の力学特性を調べている場合が多い。室温~300℃, 拘束圧50MPa以下といった比較的低い温度, 圧力条件下において, 岩石の三軸圧縮試験を行う例がみられるようになってきたのは, 地熱開発や放射性廃棄物処分などの工学的課題に関連して, 高温, 高圧下における岩石の力学特性に関する研究が行われるようになってきてからであり, まだ研究例はあまり多くない。わが国では, この種の研究は全て大気圧下で行われてきており, 地球科学上の諸問題を対象にした研究を除けば, 高温下における岩石の力学特性に対する拘束圧の影響を調べた例は皆無である。

したがって, 室温~300℃, 拘束圧50MPa以下といった, 工学的に重要であると考えられる温度, 圧力範囲における岩石の力学特性に関しては, まだまだ全体的に実

験データが少なく, ごく一部の種類の岩石を除いてはよくわかっていない。そこで, 筆者らは, わが国において比較的広く分布している3種類の岩石(花崗岩, 安山岩および凝灰岩)について, 温度最高300℃, 拘束圧最大30MPaまでの範囲における力学特性を明らかにするための試験を, わが国において初めて行った。試験の実施に際しては, 高温下岩石の力学特性の異方性についても調べた。その結果いくつかの新しい知見が得られたので, 報告する。

2. 高温下岩石の力学特性に関する既往の研究

工学的に重要であると考えられる温度, 圧力範囲における岩石の力学特性に関する実験的研究は, 岩石の種類別にみると, 大気圧下においても, 拘束圧下においても, 花崗岩質岩石を対象にして行われている場合が最も多く, 次いで安山岩や玄武岩といった火山岩を対象にした研究が多くみられる。

大気圧下における花崗岩の力学特性の温度依存性に関しては, 比較的实验データが多く, それらは, Heuze¹⁾および北野ら²⁾によってまとめられている。それによれば, 花崗岩の一軸圧縮強度, 圧裂引張強度および静弾性係数は, いずれも温度上昇に伴って低下している。このように, 花崗岩の強度や弾性係数が温度上昇に伴って低

下するのは、花崗岩を構成している鉱物粒子間の熱膨張率の不一致により、ある温度以上になると、微小クラックが発生し始め、その量が温度の上昇とともに増加するためであると考えられている。

大気圧下における安山岩の強度・変形特性に関する既存の試験結果についても北野ら²⁾によってまとめられている。それによれば、一軸圧縮強度、圧裂引張強度および静弾性係数は、いずれも温度上昇に伴って増加するか又はほとんど変化しないという結果が得られている。強度や弾性係数が増加する原因としては、石基の部分がガラス質である場合や粘土鉱物が含まれている場合には、焼成と類似の現象が生じ、粒子の結合が強くなること^{3), 4)}、加熱に伴う脱水により粒子がすべりにくくなること^{3), 4)}、および体積膨張により空隙充填が進むこと⁵⁾などが考えられている。

室温～500℃、拘束圧50MPa以下といった温度、圧力条件下における岩石の三軸圧縮試験も、花崗岩質岩石を対象に行われた場合が最も多い。Bauerら⁶⁾は、Chacoal花崗閃緑岩の破壊強度に対する温度と圧力の影響を調べ、拘束圧0（大気圧下）では、温度400℃における破壊強度は、室温における値の約40%にまで低下しているのに対して、拘束圧50MPaでは、約80%程度に低下しているだけであるという結果を得ている。ElliotとBrown⁷⁾は、Carnmenellis花崗岩の力学特性に対する温度の影響を調べ、Bauerらと同様に、一軸圧縮強度は温度上昇に伴って減少するのに対して、拘束圧下での破壊強度は、温度の影響を少ししか受けないという結果を得ている。また、200℃までの温度範囲では、弾性係数は温度の影響を受けないという結果を得ている。HeardとPage⁸⁾は、Westerly花崗岩およびStripa花崗岩について、拘束圧7.6～55.2MPa、温度19～300℃の条件下で、静弾性係数を測定し、二種類の岩石の静弾性係数は、150℃までの温度範囲ではほとんど温度の影響を受けないが、それ以上の温度になると、温度上昇とともに低下するという結果を得ている。このように、花崗岩質岩石の場合、300℃から400℃までの温度範囲では、拘束圧が作用することによって、強度・変形特性の温度依存性は小さくなる傾向がみられる。

Lauら⁹⁾は、200℃、35MPaまでの温度、圧力範囲におけるLac du Bonnet grey花崗岩の力学特性を調べ、内部摩擦角は温度に依存しないのに対して、粘着力は、温度上昇に伴ってわずかに低下するという結果を得ている。一方、Heuze¹⁾は、温度最高900℃、拘束圧最大1,500MPaといった超高温、超高压下で行われたWesterly花崗岩の三軸圧縮試験結果から、粘着力および内部摩擦角の温度依存性を求め、400℃以下の温度では、粘着力はほとんど温度依存性を示さないのに対して、内部摩擦角は、温度上昇に伴って顕著に低下すると

いう結果を得ており、両者の結果は全く異なっている。

安山岩や玄武岩については、花崗岩と比べると、拘束圧下での試験例が少ない。Bauerら⁶⁾は、Mount Hood安山岩の破壊強度に対する温度と圧力の影響を調べているが、温度400℃以下、拘束圧50MPa以下における破壊強度の温度依存性は、花崗岩質岩石よりも小さいという結果を得ている。Miller¹⁰⁾は、Hanfordサイトから採取した玄武岩試料を用いて、温度20～500℃、拘束圧0～10,000psi (69.0MPa)の条件下で、一軸圧縮試験および三軸圧縮試験を行い、強度・変形特性に対する温度、拘束圧および含水状態の影響を調べているが、論文の著者自らが指摘しているように、試験方法が適切でない（例えば、室温の場合と高温の場合とでひずみの測定方法が異なっている）こともあって、強度・変形特性と温度の関係については明解な結論が得られていない。

堆積岩のなかでは、凝灰岩についての試験が最も多く行われている。外尾⁴⁾、酒井⁹⁾によって実施された試験結果によれば、凝灰岩の一軸圧縮強度は、温度上昇に伴って単調に増加する場合と、いったん強度が低下した後、ある温度以上になると増加する場合とがある。一方、Price¹¹⁾は、温度23℃～200℃、拘束圧0～20.7MPaの条件下で実施された、Nevada Test Site内の凝灰岩についての三軸圧縮試験結果をまとめて、その破壊強度は、温度が上昇しても変化しない場合もあるが、一般的には、温度上昇に伴って低下するとしている。特に間隙率の大きい（25%以上）岩石では、温度が23℃から200℃に上昇すると、30～40%といった顕著な強度低下を示すことを指摘している。

凝灰岩以外の堆積岩については、例えば、外尾⁴⁾によって砂岩の一軸圧縮試験が行われているが、全体的には大気圧下においても、拘束圧下においても、試験データが少なすぎるため、一般的な傾向について議論することはできない。

Zeuch¹²⁾は、コロラド州内にあるアメリカ鉱山局の試験鉱山から採取したオイルシェールを用いて、温度最高300℃、拘束圧最大40MPaの条件下で、その力学特性に対する温度および拘束圧の影響を調べている。その結果、温度の上昇に伴って、オイルシェールの強度および弾性係数は大幅に低下している。また、拘束圧が大きくなると、温度上昇に伴う破壊ひずみの増加が顕著になること、および一軸に近い状態では、層理面に垂直な方向の強度の方が平行な方向のそれより大きいのに対して、高拘束圧（20MPa）では、逆の結果になることを指摘している。

このように、高温下岩石の力学特性に対する温度と拘束圧の影響に関しては、全体的に実験データが少なく、ごく一部の岩石を除いてはよくわかっていない。

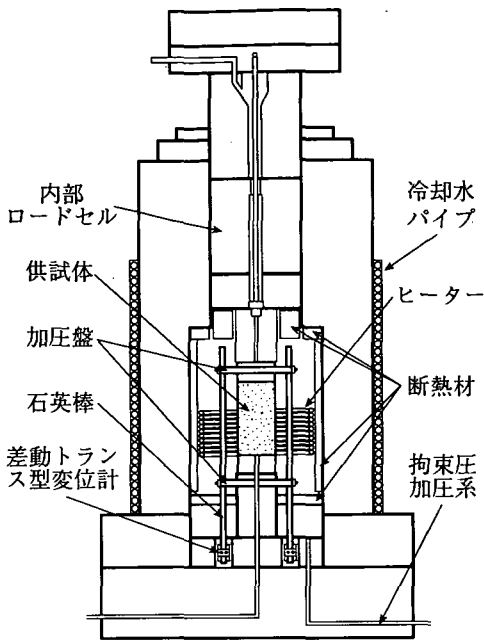


図-1 高温下試験用三軸室

3. 試験の概要

試験に用いた岩石は、茨城県産の稲田花崗岩、福島県産の三城目安山岩および栃木県産の大谷凝灰岩の3種類である。稲田花崗岩は、間隙率約1%の硬質岩石であり、石英、斜長石、微斜長石、黒雲母を主成分鉱物としている。三城目安山岩は、間隙率約19%と稲田花崗岩のそれよりもずっと大きい、やはり硬質岩石であり、斜長石、単斜輝石の他に、X線回折により、クリストバライトが含まれていることが確認されている。大谷凝灰岩は、間隙率約40%の軟質岩石であり、その主な造岩鉱物は沸石(クリノプチロライト)である。

実施した試験は、一軸圧縮試験、圧裂引張試験、多段階三軸圧縮試験およびA E測定である。いずれの試験においても、デシケータ内で1週間以上乾燥させた後試験を行った。一軸圧縮試験および圧裂引張試験は、室温、100℃、200℃および300℃の各温度で実施した。異方性を調べるために、大谷凝灰岩では全ての温度で、また稲田花崗岩と三城目安山岩では室温および200℃で、直交する3方向について試験を実施した。一軸圧縮試験のための供試体寸法は、直径50mm、高さ100mm、圧裂引張試験のための供試体寸法は、直径50mm、高さ50mmとした。また、200℃以下の温度における一軸圧縮試験時には、供試体に縦、横各2枚のひずみゲージを貼付してひずみの測定を行い、それを用いて静弾性係数およびポアソン比を求めた。今回試験を行った岩石には、稲田花崗岩のように鉱物粒子の粒径が大きい岩石が含まれてい

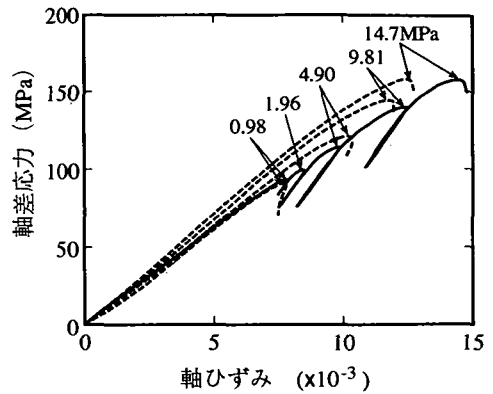


図-2 多段階三軸圧縮試験法と従来の三軸圧縮試験法との比較

るので、安定した測定結果を得るためには、ゲージ長をある程度長くする必要がある。そこで、室温における測定では、ゲージ長30mmのものを用いた。しかし高温用のゲージに関しては、長さの短いものしか市販されていなかったもので、100℃および200℃における測定では、やむを得ず長さ5mmのものを用いた。接着剤は、室温では、シアノアクリレート系接着剤を、100℃および200℃では、ポリエステル系接着剤を用いた。

高温での試験は、載荷装置に高温恒温槽を取り付け、その中に供試体を設置して行ったが、昇温過程における供試体内の温度ができるだけ一樣になるように、20℃/hの昇温速度で所定の温度まで加熱した。昇温速度が遅いので、所定の温度に到達してからごく短時間の間に、供試体内部の温度は平衡に達するが、充分に余裕をみて、30分以上その温度に保持してから試験を行った。

三軸圧縮試験に用いた三軸室の概要を図-1に示す。三軸室内を高温用シリコンオイルで満たし、所定の拘束圧を作用させた状態で、三軸室内に設置されているヒーターを用いて、供試体を所定の温度まで加熱した。供試体寸法は、直径50mm、高さ100mmとした。昇温速度は、一軸圧縮試験や圧裂引張試験時と同様に20℃/hとし、所定の温度に達した後は、30分以上その温度に保持してから試験を行った。試験時の軸荷重の測定にはロードセルを、また軸ひずみの測定には差動トランス型変位計を用いたが、いずれも精度の良い測定を行うために、三軸室内に設置した。試験温度は、室温、100℃、200℃および300℃とした。側圧は岩石の強度に応じた値とし、稲田花崗岩では最大29.4MPa、三城目安山岩では14.7MPa、大谷凝灰岩では9.8MPaとした。また、異方性を調べるために、稲田花崗岩については、室温および200℃で、直交する2方向の供試体を、大谷凝灰岩については、室温および300℃で直交する3方向の供試体を用いて試験を実施した。試験個数は、稲田花崗岩および

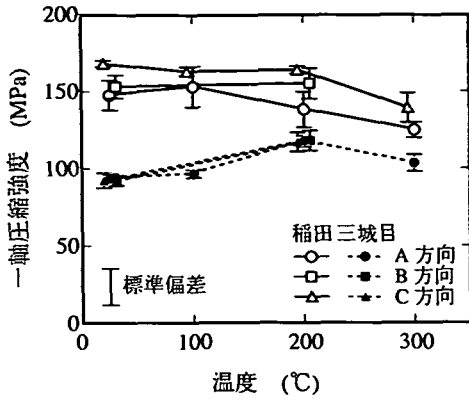


図-3 稲田花崗岩および三城目安山岩の一軸圧縮強度と温度の関係

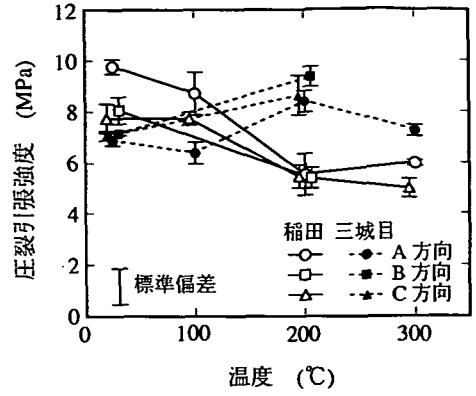


図-5 稲田花崗岩および三城目安山岩の圧裂引張強度と温度の関係

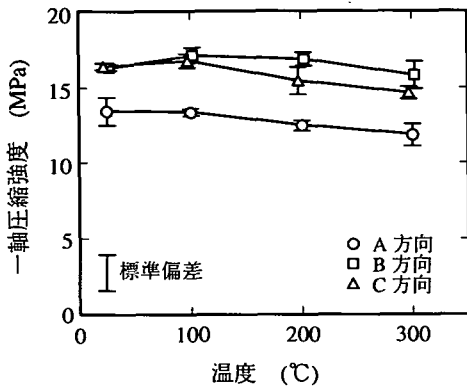


図-4 大谷凝灰岩の一軸圧縮強度と温度の関係

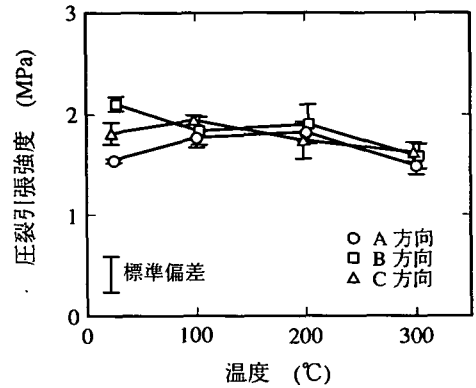


図-6 大谷凝灰岩の圧裂引張強度と温度の関係

三城目安山岩では各条件毎に2個、大谷凝灰岩では各条件毎に1個とした。なお、三城目安山岩については、一軸圧縮試験および圧裂引張試験用岩石ブロックと三軸圧縮試験用岩石ブロックとを異なった時期に採取しており、両者の力学特性がやや異なっていた可能性がある。

高温下における試験は、一般に1本当たりの試験時間が長くなるため、従来の三軸圧縮試験方法に従った場合、様々な条件下で試験を行うには非常に多くの時間を要する。そこで、今回は、効率的に試験を行うために、多段階三軸圧縮試験法を用いた。その場合強度破壊点以降の急激な破壊の進行を避けるため、大久保と西松¹³⁾が提案している応力帰還制御法を用いた。なお、多段階三軸圧縮試験の適用性について検討するため、室温において三城目安山岩を用いて従来の方法による三軸圧縮試験を行い、多段階三軸圧縮試験結果との比較を行った。その結果を図-2に示す。多段階三軸圧縮試験法によって得られた三城目安山岩の粘着力と内部摩擦角はそれぞれ18.8MPa、45.0°であるのに対して、従来の三軸圧縮試験法によって得られた粘着力と内部摩擦角はそれぞれ

18.7MPa、45.4°であり、両者は良く一致している。

A E測定は、大気圧下でのみ実施した。稲田花崗岩、三城目安山岩および大谷凝灰岩について、圧電型のA Eセンサーを用いて、加熱に伴うA Eリングダウン累積計数の変化を調べた。高温恒温槽内に、直径30mm、高さ100mmの円柱供試体を設置し、無荷の状態、30°C/hの昇温速度で300°Cまで加熱した際のA Eの発生状況を測定した。昇温速度を30°C/hとやや速くしたのは、供試体の直径が30mmと小さく、一軸圧縮試験や三軸圧縮試験の場合よりも短時間で供試体内の温度が一樣になるためである。100kHz~200kHzの周波数帯域を対象とし、プリアンプとメインアンプによる増幅率は60dBとしている。試験個数は、各岩種毎に1個とした。

4. 試験結果

(1) 一軸圧縮試験および圧裂引張試験結果

稲田花崗岩、三城目安山岩および大谷凝灰岩の一軸圧縮試験結果を図-3と図-4に、圧裂引張試験結果を図

一5と図一6に示す。これらの図では、直交する2方向または3方向について試験を実施した結果を、A方向、B方向、C方向と区別して示している。A、B、Cは、単に直交する3方向を区別するための記号として用いている。

標準偏差の値からわかるように、全体的に試験結果のばらつきは小さい。高温における試験でも、ほぼ室温における試験と同じ程度のばらつきに収まっている。

100℃および200℃における稲田花崗岩の一軸圧縮強度は、図一3に示すように、室温における値とほぼ同じであるが、300℃では強度が低下しており、室温における値の約80%になっている。圧裂引張強度は、図一5に示すように、温度上昇に伴って低下しており、例えば、300℃における値は、室温におけるその約70%である。一軸圧縮強度に関しても、圧裂引張強度に関しても、やや異方性がみられる。そして室温での異方性はそのまま高温になっても維持されている。

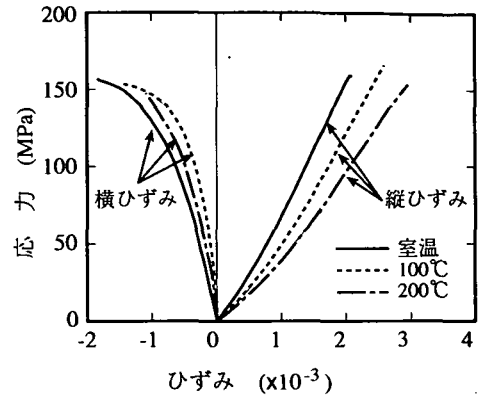
三城目安山岩の100℃における一軸圧縮強度および圧裂引張強度は、図一3、図一5に示すように、室温における値とほぼ同じである。200℃における一軸圧縮強度および圧裂引張強度は、室温における値よりもかなり大きく、約1.2~1.3倍の値を示している。300℃では、200℃における値よりも小さく、室温における値の1.0~1.1倍程度である。稲田花崗岩とは異なり、一軸圧縮強度に関しても、圧裂引張強度に関しても、ほとんど異方性はみられない。

大谷凝灰岩の100℃における一軸圧縮強度は、図一4に示すように、室温における値とほぼ同じであるが、200℃および300℃になると、わずかに強度が低下している。圧裂引張強度に関しても、図一6からわかるように、あまり温度依存性は明瞭ではなく、300℃における強度がわずかに低下しているだけである。

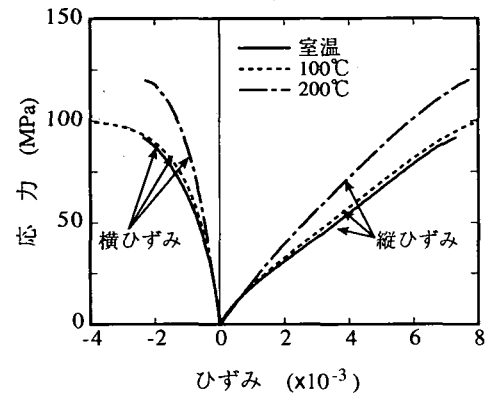
大谷凝灰岩の一軸圧縮強度に関しては、顕著な異方性がみられ、室温から300℃までの全ての温度において、A方向の強度は、他の2方向の強度よりも約20%小さな値を示している。圧裂引張強度に関しては、室温では異方性がみられるが、100℃以上の温度ではほとんど異方性がみられない。

このように、今回の試験では、岩石の一軸圧縮強度および圧裂引張強度と温度の関係は、岩石の種類毎に異なっている。

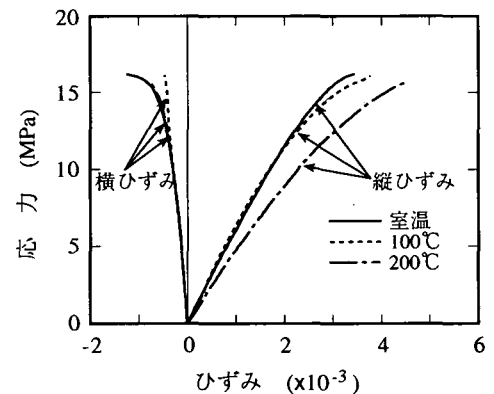
3種類の岩石のそれぞれについて、一軸圧縮試験の際に得られた応力-ひずみ関係の中から、各温度毎に代表的なものを選び、まとめたものを図一7~図一9に示す。稲田花崗岩の場合、高温になるにしたがって、比較的低応力レベルにおいて、縦ひずみの非直線性が顕著になっていることがわかる。三城目安山岩の場合は、室温および100℃では、比較的低応力レベルにおいて、稲田



図一7 稲田花崗岩の応力-ひずみ曲線 (A方向)



図一8 三城目安山岩の応力-ひずみ曲線 (A方向)



図一9 大谷凝灰岩の応力-ひずみ曲線 (C方向)

花崗岩とは逆に、応力-縦ひずみ曲線が上に凸になっているのに対して、200℃ではこの非直線性はあまり顕著ではなくなっている。大谷凝灰岩の場合は、図一9に示したC方向では、200℃の縦ひずみが室温と100℃の場合とやや異なっているが、それ以外の方向では、温度による応力-ひずみ曲線の顕著な変化はみられない。

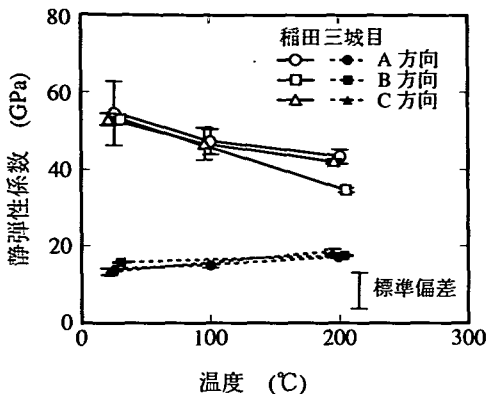


図-10 稲田花崗岩および三城目安山岩の静弾性係数と温度の関係

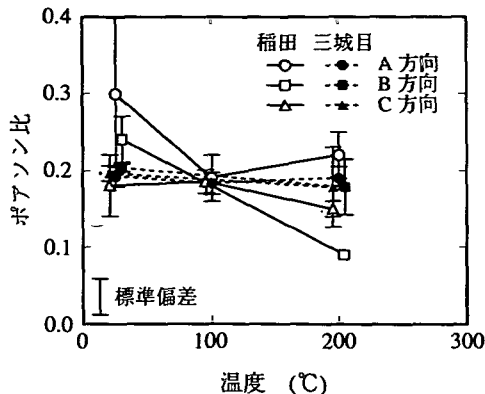


図-12 稲田花崗岩および三城目安山岩のポアソン比と温度の関係

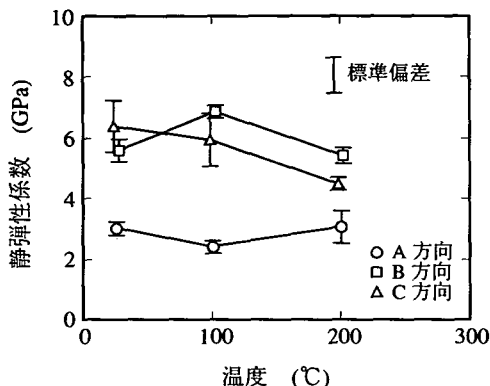


図-11 大谷凝灰岩の静弾性係数と温度の関係

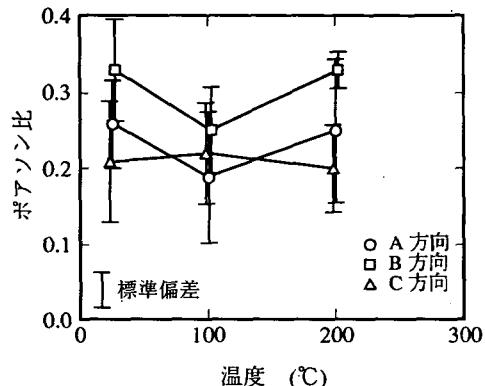


図-13 大谷凝灰岩のポアソン比と温度の関係

このような応力-ひずみ曲線から静弾性係数とポアソン比を求める方法はいろいろあり、稲田花崗岩や三城目安山岩では、応力-ひずみ曲線の非直線性が著しいので、その求め方によって値はかなり異なる。ここでは、破壊応力の50%における割線の傾きから静弾性係数およびポアソン比を求めた。その結果を図-10～図-13に示す。

稲田花崗岩の静弾性係数は、図-10に示すように、温度上昇に伴って低下しており、例えば、200℃における静弾性係数は、室温におけるその約75%の値を示している。また、ポアソン比も、図-12に示すように、温度上昇に伴って概ね低下する傾向がみられる。

三城目安山岩の静弾性係数は、図-10に示すように、温度上昇に伴って増加しており、例えば、200℃では、室温における値の約1.2倍になっている。一方、ポアソン比は図-12に示すように、ほとんど温度依存性を示さない。

大谷凝灰岩の弾性係数およびポアソン比と温度の関係は、測定する方向によって少し異なっているが、全体としては、弾性係数に関しても、ポアソン比に関しても、

あまり明瞭な温度依存性はみられない。大谷凝灰岩の弾性係数で最も特徴的なことは、室温においても高温においても顕著な異方向性がみられるということであり、A方向の弾性係数は、他の2方向のそれよりもずっと小さな値を示している。

(2) 三軸圧縮試験結果

多段階三軸圧縮試験によって得られた3種類の岩石の軸差応力と軸ひずみの関係の測定結果例をそれぞれ図-14～図-16に示す。また、3種類の岩石について破壊強度(ピーク強度)と温度の関係の求めた結果(2個の平均値)を図-17～図-19に示す。そして、3種類の岩石のそれぞれについて、各拘束圧毎に求めた破壊強度比(各温度における破壊強度を室温での破壊強度で規格化した値)と温度の関係を図-20～図-22に示す。

稲田花崗岩のA方向の破壊強度は、図-17、図-20に示すように、全ての拘束圧条件において、温度上昇に伴って低下している。また、拘束圧が大きくなるにしたがって、破壊強度の温度依存性が小さくなっている。図には示していないが、C方向についての試験結果も同じ傾

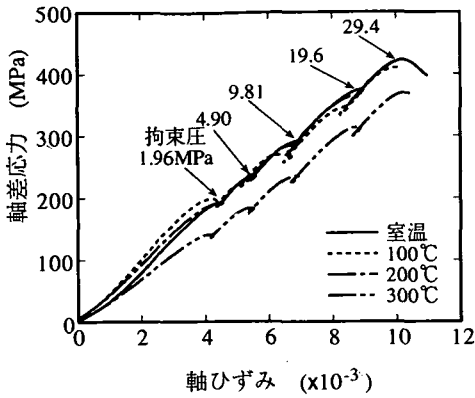


図-14 稲田花崗岩の軸差応力-軸ひずみ関係の測定例 (A方向)

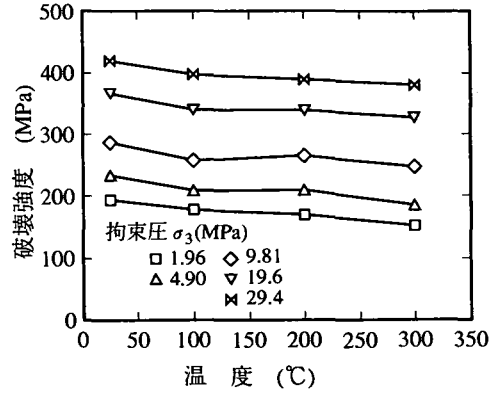


図-17 稲田花崗岩の破壊強度と温度の関係 (A方向)

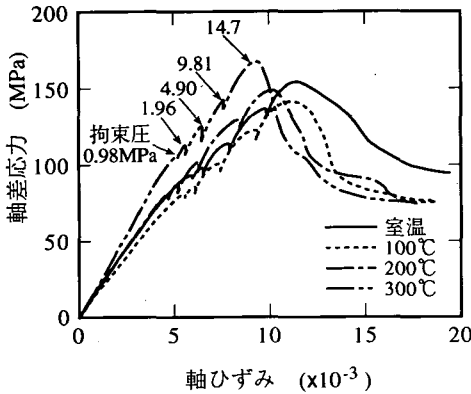


図-15 三城目安山岩の軸差応力-軸ひずみ関係の測定例 (C方向)

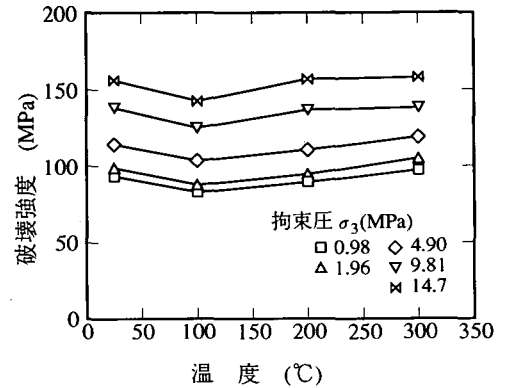


図-18 三城目安山岩の破壊強度と温度の関係 (C方向)

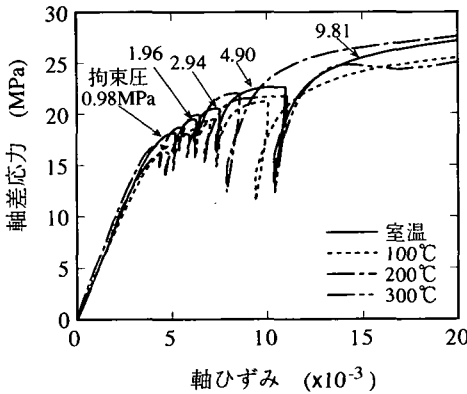


図-16 大谷凝灰岩の軸差応力-軸ひずみ関係の測定例 (A方向)

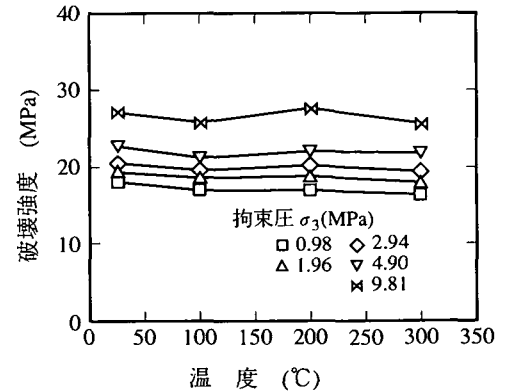


図-19 大谷凝灰岩の破壊強度と温度の関係 (A方向)

向を示している。

三城目安山岩の破壊強度は、図-18、図-21からわかるように、100°Cにおいて最も小さな値を示している。そして、それ以上の温度では、温度上昇に伴ってやや強度は増加する傾向を示している。ただし、全体として破壊強度の温度依存性はあまり大きくない。

大谷凝灰岩の破壊強度は、図-19、図-22に示したA方向だけでなく、B、Cのいずれの方向の試験においても、全ての拘束圧条件において、温度上昇に伴ってわずかに低下する傾向がみられる。稲田花崗岩と同様に、拘束圧が大きくなるにしたがって、破壊強度の温度依存性が小さくなっている。

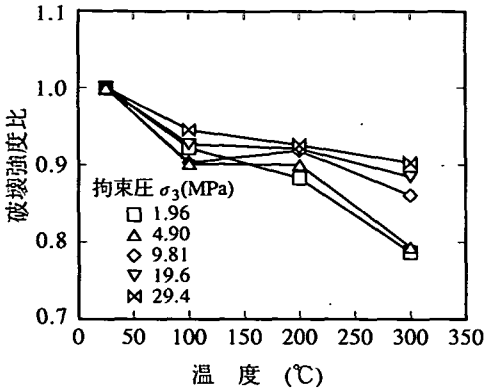


図-20 稲田花崗岩の破壊強度比と温度の関係 (A方向)

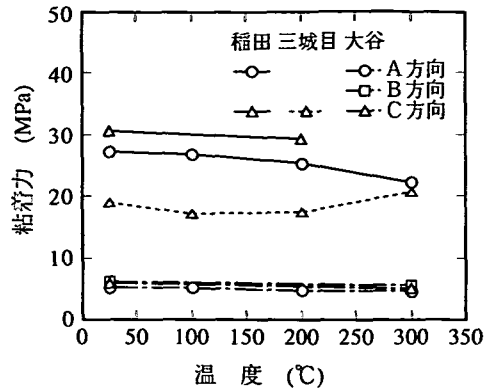


図-23 粘着力と温度の関係

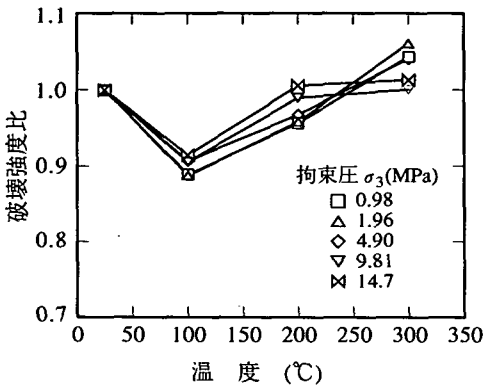


図-21 三城目安山岩の破壊強度比と温度の関係 (C方向)

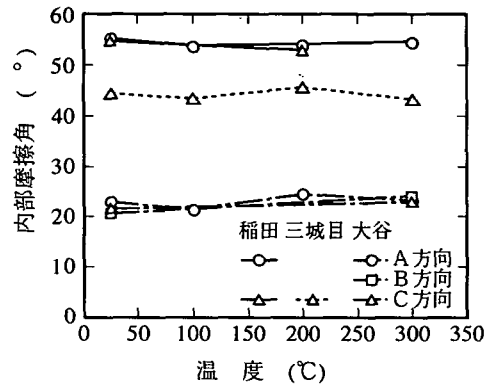


図-24 内部摩擦角と温度の関係

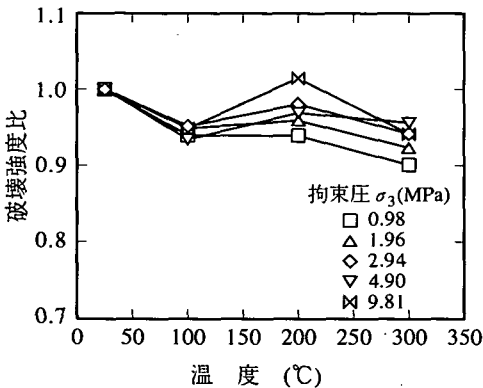


図-22 大谷凝灰岩の破壊強度比と温度の関係 (A方向)

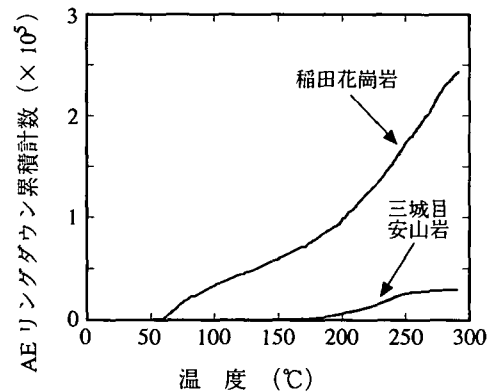


図-25 加熱に伴う岩石のAE発生挙動

多段階三軸圧縮試験から求められた破壊強度から、モール円の包絡線を直線近似して、粘着力と内部摩擦角を求めてみた。その結果を図-23および図-24に示す。稲田花崗岩の粘着力は、温度上昇に伴って少し低下するのに対して、内部摩擦角は、300°Cまでの温度範囲では温度依存性を示さない。また、内部摩擦角は全く異方性

を示さないのに対して、粘着力は異方性を示している。そして、室温での粘着力の異方性は、そのまま高温でも維持されている。

三城目安山岩の場合、粘着力は100°Cにおいて最も小さな値を示し、それよりも高い温度では温度上昇に伴って増加している。一方、内部摩擦角は、300°Cまでの温

度範囲では温度依存性を示さない。

大谷凝灰岩の場合は、粘着力も内部摩擦角も、300℃までの温度範囲ではほとんど温度依存性を示さない。異方性に関しては、稲田花崗岩と同様であり、内部摩擦角には全く異方性がみられないのに対して、粘着力には室温でも高温でもわずかな異方性がみられる。

(3) A E 測定結果

図-25は、稲田花崗岩および三城目安山岩について、加熱に伴うA Eリングダウン累積計数の変化を調べた結果である。大谷凝灰岩は、300℃までの温度範囲では、全くA Eが発生しなかったため、図には示していない。

稲田花崗岩は、約55℃でA Eが発生し始めている。既存の測定結果^{14)~17)}でも、花崗岩の場合60~70℃前後からA Eが発生している場合が多く、今回の測定結果はそれとはほぼ一致している。加熱に伴ってA Eが発生するのは、岩石を構成している鉱物粒子間の熱膨張率の不一致により、ある温度以上になると、鉱物粒子の境界において作用する応力が強度を上回るようになり、微小クラックが発生するためである。粒子の境界で作用する応力は、温度上昇とともに大きくなっていくので、A E発生量は、温度上昇に伴って増加している。

三城目安山岩は、稲田花崗岩と比べて、A E発生開始温度が高く、またその後のA E発生頻度もあまり高くない。ただし、約200~250℃の温度範囲でA E活動が活発になっている。

5. 考 察

(1) 高温下岩石の力学特性を支配する要因の検討

今回の試験の結果、高温下岩石の強度や変形特性に対する温度の影響はあまり小さくなく、例えば、拘束圧の影響と比較しても、それよりもずっと小さいことがわかった。筆者らは、すでに岩石の熱膨張特性の温度依存性に関する研究を行っているが^{18), 19)}、それと比較しても、強度・変形特性に対する温度の影響は明らかにずっと小さい。

今回の試験の結果明らかになったもう一つの特徴は、岩石の種類によって強度や変形特性の温度依存性が異なるということである。そこで、各岩種について、その強度や変形特性の温度依存性を支配している要因について検討を行ってみた。

稲田花崗岩の一軸圧縮強度、圧裂引張強度、静弾性係数およびポアソン比は、既往の花崗岩質岩石の試験結果と同じように、いずれも温度上昇に伴って低下している。このように、高温下において、花崗岩質岩石の物性値が温度によって変化するのは、A Eの測定結果からも裏付けられたように、主として、鉱物粒子間の熱膨張率

の不一致により微小クラックが発生することによると考えられる。したがって、クラックの発生の影響を受けやすい引張強度、静弾性係数や粘着力は、温度の上昇に伴って低下する。また、一軸圧縮試験の際に得られた応力-ひずみ曲線において、高温になるにしたがって、比較的低応力レベルにおける非直線性が顕著になるのも、微小クラックの発生と閉塞の影響による。一方、同じ力学特性であっても、微小クラックの発生の影響をあまり受けないと考えられる内部摩擦角は温度に依存しない。

玄武岩や安山岩といった非花崗岩質岩石では、鉱物粒子間の熱膨張率の相違による微小クラックが発生しにくく、したがって、熱膨張にヒステリシスも残留ひずみも生じにくいことが江原ら²⁰⁾によって指摘されている。今回のA E測定結果でも、三城目安山岩は、稲田花崗岩と比べて、A E発生開始温度が高く、またその後のA E発生頻度も200℃までの温度範囲ではあまり高くないという結果が得られている。したがって、三城目安山岩の場合、200℃までの温度範囲では、微小クラックの発生による強度や弾性係数の低下はわずかしかないと考えられる。

大谷凝灰岩の強度特性はわずかに温度依存性を示し、高温になるにしたがって、少し強度が低下している。前に述べたように、A E計測結果によれば、大谷凝灰岩の場合は、300℃までの温度範囲では全くA Eが発生していない。したがって、強度が低下したのは微小クラックの発生によるものではない。凝灰岩の高温下力学特性に関する既往の研究結果によれば、前に述べたように、300℃までの温度範囲では、温度上昇に伴って強度が増加する場合と低下する場合の両方がある。温度上昇に伴って強度が低下したことが報告されている試験例としては、荻野凝灰岩⁵⁾およびNevada Test Site内の凝灰岩¹¹⁾がある。大谷凝灰岩を含めて、これらの凝灰岩に共通しているのは、火山ガラスが変質して生じた沸石を多く含んでいることである。沸石では、一般に、室温から約300℃の温度範囲で、吸着水や層間水の脱水がみられることが知られており、このような脱水の進行に伴い、その力学特性が変化すると考えられる。したがって、沸石を多く含んでいる凝灰岩では、沸石自体の力学特性が変化することにより岩石としての力学特性も変化すると考えられる。

三城目安山岩の場合、稲田花崗岩や大谷凝灰岩とは異なり、大気圧下における強度や弾性係数は、既往の安山岩に関する試験結果と同様に、200℃までの温度範囲では、温度上昇に伴って増加している。温度上昇に伴って岩石の強度や弾性係数が増加する理由としては、前に述べたように、焼成と類似の現象が生じ粒子の結合が強くなること、加熱に伴う脱水により粒子が滑りにくくなること、および体積膨張により空隙充填が進むことなどが

表一 岩石の一軸圧縮強度に対する含水状態の影響

	炉乾燥状態	デシケータ乾燥状態		含水飽和状態	
	σ_{c1} (MPa)	σ_{c2}	σ_{c2}/σ_{c1}	σ_{c3}	σ_{c3}/σ_{c1}
稲田花崗岩	187	180	0.96	153	0.82
三城目安山岩	117	93.2	0.80	67.7	0.58
大谷凝灰岩	17.7	16.1	0.91	6.08	0.34

考えられていた。筆者は、サクシジョンの影響が最も大きいと考え、それについて検討を行ってみた。

室温付近では、デシケータ乾燥させた岩石であっても、空隙内に必ず水分が残留している。こうした水分は、岩石を構成している鉱物粒子の接触点近傍で表面張力によって保持されている水分や、粒子表面で粒子からの吸着力によって保持されている水分であり、大気圧に対して負の圧力をもつ。この負の圧力はサクシジョンと呼ばれており、岩石の拘束力（粒子相互の結合力）として作用する。

岩石を乾燥させると、一般にサクシジョンにより強度が増加することが知られている。このような現象は、特に飽和度が非常に小さい（例えば0～10%）範囲で顕著であり、軟岩だけでなく、硬岩でもみられる^{21)～23)}。そして、サクシジョンによる強度の増加がみられる温度範囲では、弾性係数も増加する。デシケータ乾燥させた岩石を加熱すると、温度上昇に伴って水分が次第に減少していくので、その影響により岩石の強度や弾性係数は増加すると予想される。そこで、デシケータ内で2週間乾燥させた状態（以下デシケータ乾燥状態と記す）、110℃で24時間炉乾燥した後、デシケータ内で室温に戻した状態（以下炉乾燥状態と記す）、および72時間以上減圧水浸させた状態（以下含水飽和状態と記す）のそれぞれについて、一軸圧縮試験を実施し、一軸圧縮強度の比較を行った。試料は、稲田花崗岩、三城目安山岩および大谷凝灰岩の3種類で、試験個数は、各条件毎に3個とした。その結果を表一に示す。110℃で24時間炉乾燥させた状態を飽和度0とすれば、デシケータ乾燥状態での3種類の岩石の飽和度は、稲田花崗岩4.0%、三城目安山岩4.7%、大谷凝灰岩4.3%といずれも4～5%であった。

含水飽和状態における一軸圧縮強度と、デシケータ乾燥状態におけるそれとを比較すると、稲田花崗岩では前者が後者の約85%、三城目安山岩では約73%、大谷凝灰岩では約38%であり、今回試験対象とした岩石は、いずれも含水状態によって大きく強度が変化していることがわかる。また、炉乾燥状態における一軸圧縮強度とデシケータ乾燥状態におけるそれとを比較すると、前者の方が、稲田花崗岩では約4%、三城目安山岩では約26%、大谷凝灰岩では約10%強度が大きくなっている。三城目

安山岩を炉乾燥させたことによる強度の変化は、基本的には含水状態の変化のみによると考えられ、また、その強度の変化量は、室温から200℃まで加熱したときの一軸圧縮強度の変化量とほぼ対応している。したがって、三城目安山岩の強度や弾性係数が、大気圧下において、200℃までの温度範囲で、温度上昇に伴って増加する主な理由は、このサクシジョンの影響であると考えられる。

拘束圧下では、図-20～図-22からわかるように、3種類の岩石とも、全体的に100℃における破壊強度の方が室温におけるそれよりも小さくなっており、一軸圧縮試験結果とは異なっている。三軸圧縮試験の場合、メンブレンの外側で温度を制御しているため、実際の供試体内の温度は設定温度よりやや低くなっている。そのため、100℃で試験を実施した場合、供試体内の温度は100℃に達しておらず、供試体内に含まれていた水分はほとんどそのまま保持されていると考えられる。前に述べたように、飽和度が小さい場合には、わずかな水分量の差であっても、岩石の強度はその影響を受けやすい。したがって、一軸圧縮試験結果との相違は、主としてこのような含有水分量の差によると考えられる。

三城目安山岩は、既往の安山岩についての試験結果とは異なり、300℃における一軸圧縮強度および圧裂引張強度は200℃におけるそれよりも低下している。三城目安山岩の場合は、ガラス質の部分にクリストバライトを含んでいる。クリストバライトは、大気圧下では、220℃から277℃までの温度範囲で徐々に α 型から β 型に転移すること²⁴⁾および、クリストバライトが α 型から β 型に転移する際に体積膨張を伴うこと²⁵⁾が知られている。筆者ら¹⁸⁾は、三城目安山岩の熱膨張特性の測定結果に基づいて、拘束圧が小さい場合には、クリストバライトが α 型から β 型に転移する温度範囲において、微小クラックが発生していることを既に指摘しているが、今回のA E計測結果でも、約200～250℃の温度範囲でA E活動が活発になっており、それが裏付けられている。したがって、三城目安山岩の場合、既往の安山岩の試験結果とは異なり、300℃における一軸圧縮強度や圧裂引張強度が200℃におけるそれよりも低下しているのは、クリストバライトが α 型から β 型に転移する際に微小クラックが発生していることの影響によると考えられる。

以上のように、今回試験を行った岩石だけに限定して

も、高温下岩石の力学特性を支配する要因は岩石毎に異なっており、稲田花崗岩では、鉱物粒子間の熱膨張率の不一致による微小クラックの発生が、三城目安山岩では、サクシヨンの影響およびクリストバライトの相転移に伴う微小クラックの発生が、そして大谷凝灰岩では主要な構成鉱物である沸石の力学特性の温度変化が重要な要因になっていると考えられる。今回実験を行った岩石は3種類だけなので、それ以外の様々な岩石について実験を行えば、別のいくつかの要因がさらに追加されると考えられる。これらの結果から、岩石の種類によって強度や変形特性の温度依存性が異なるのは、それぞれの岩石の温度依存性を支配している要因が異なるためであると考えられる。

(2) 高温下岩石の力学特性に対する拘束圧の影響

次に、高温下岩石の強度・変形特性に対する拘束圧の影響について検討を行う。拘束圧が作用すると、鉱物粒子間の熱膨張率の不一致や鉱物の相転移にともなう微小クラックは発生しにくくなる。また、サクシヨンの影響も、拘束圧の増加に伴って減少すると考えられる。したがって、岩石の力学特性の温度による変化が主として微小クラックの発生やサクシヨンの影響に基づいている場合には、拘束圧の増大に伴って、力学特性の温度依存性は減少する。稲田花崗岩および三城目安山岩はその典型的な例である。

前に述べたように、花崗岩質岩石に関する既往の試験結果でも、300℃から400℃までの温度範囲では、拘束圧が作用することによって、強度・変形特性の温度依存性は小さくなる傾向がみられており、今回の試験結果は、それと一致している。一方、長²⁶⁾は、封圧500~1,500MPaといった超高压下における花崗岩の破壊強度の温度依存性に関する既往の実験結果から、破壊強度は、温度上昇に伴って、封圧に無関係に、100℃あたり約7%減少するという事を明らかにしている。したがって、上に述べたような拘束圧の効果は、比較的拘束圧が小さいときにだけ顕著に現れると考えられる。

大谷凝灰岩の場合、その力学特性が温度によって変化する理由は稲田花崗岩や三城目安山岩と異なっているのにもかかわらず、やはり、拘束圧が作用することによって、その力学特性の温度依存性は減少している。したがって、その具体的な理由は必ずしも明らかではないが、高温下において拘束圧が作用すると、岩石の力学特性の温度依存性が減少するという傾向はかなり一般性があると考えられる。

多段階三軸圧縮試験の結果、今回試験を行った3種類の岩石は、いずれも温度上昇に伴って、内部摩擦角はほとんど変化せず、粘着力だけが変化している。この試験結果は、前に述べた、200℃、35MPaまでの温度、圧力

範囲におけるLac du Bonnet grey花崗岩についてのLaur⁹⁾の試験結果と一致しているが、温度最高900℃、拘束圧最大1,500MPaといった超高温、超高压下で行われたWesterly花崗岩の三軸圧縮試験結果¹⁾とは明らかに異なっている。したがって、この場合も、高温下岩石の力学特性に対する拘束圧の影響は、今回試験を行ったような温度、圧力条件の場合と、超高温、超高压の場合とは異なっていると考えられる。

6. おわりに

わが国において比較的広く分布している3種類の岩石について、温度最高300℃、拘束圧最大30MPaまでの範囲における力学特性を明らかにするための試験を行った。試験の実施に際しては、高温下岩石の力学特性の異方性についても調べた。その結果以下のことが明らかになった。

- (1) 岩石の種類によって、強度や変形特性の温度依存性は異なり、高温になるにしたがって、破壊強度や弾性係数が低下する岩石と、ほとんど変化しないかまたは増加する岩石とがある。ただし、今回試験を行った岩石では、300℃までの温度範囲では、破壊強度や弾性係数の温度依存性はあまり大きくなく、拘束圧や含水状態の影響の方を大きく受ける。
- (2) 岩石の高温下における力学特性の温度依存性を支配している要因は様々であり、鉱物粒子間の熱膨張率の不一致による微小クラックの発生、鉱物の相転移に伴う微小クラックの発生、鉱物自体の力学特性の温度変化、サクシヨンの影響等の多くの要因がある。高温下岩石の強度や変形特性の温度依存性が岩種によって異なるのは、それぞれの岩石の温度依存性を支配している要因が異なるためである。
- (3) 大気圧下、室温において強度や変形特性の異方性がみられる岩石では、高温になっても同じように異方性がみられる場合が多い。
- (4) 今回試験を行ったような温度、圧力条件下では、超高温、超高压の場合とは異なり、拘束圧が作用すると、物性値の温度依存性は小さくなる。
- (5) 今回試験を行った岩石では、粘着力は、温度上昇に伴って増加する場合と減少する場合とがみられるのに対して、内部摩擦角はほとんど温度による変化がみられない。

参考文献

- 1) Heuze, F. E.: High - temperature mechanical, physical and thermal properties of granitic rocks - A review, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol. 20, No.1, pp. 3 - 10, 1983.

- 2) 北野晃一, 新 孝一, 木下直人, 奥野哲夫: 高温下岩石の力学特性, 熱特性および透水特性に関する文献調査, 応用地質, 29巻, 3号, pp. 36 - 47, 1988.
- 3) 外尾善次郎, 高島啓行: 高温度における岩石の強度に関する研究 (第1報), 日本鉱業会誌, 84巻, pp. 1071 - 1076, 1968.
- 4) 外尾善次郎: 資源火焰ジェット工学, ラテイス刊, 1976.
- 5) 酒井 昇: 一軸圧縮下における加熱岩石の力学的挙動, 応用地質, 第28巻, 第1号, pp. 19 - 24, 1987.
- 6) Bauer, S. J., Friedman, M. and Handin, J.: Effects of water - saturation on strength and ductility of three igneous rocks at effective pressures to 50 MPa and temperatures to partial melting, *22nd U. S. Symp. on Rock Mech.*, pp. 73 - 78, 1981.
- 7) Elliott, G. M. and Brown, E. T.: Laboratory measurement of the thermo-hydro-mechanical properties of rock, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, London, Vol.21, pp. 299 - 314, 1988.
- 8) Heard, H. C. and Page, L.: Elastic moduli, thermal expansion, and inferred permeability of two granites to 350 °C and 55 megapascals, *J. Geophys. Res.*, Vol. 87, No. B11, pp.9340-9348, 1982.
- 9) Lau, J. S., Jackson, R. and Gorski, B.: The effects of temperature and pressure on the mechanical properties of Lac du Bonnet grey granite, *32nd U. S. Symp. on Rock Mech.*, pp. 313 - 323, 1991.
- 10) Miller, R. J.: Determination of basalt physical and thermal properties at varying temperatures, pressures, and moisture contents, *RHO-BWI-C-54*, 1979.
- 11) Price, R. H.: Analysis of rock mechanics properties of volcanic tuff units from Yucca Mountain, Nevada Test Site, *Sandia National Laboratories*, Albuquerque, SAND82 - 1315, 1982.
- 12) Zeuch, D. H.: The mechanical behavior of Anvil Points oil shale at elevated temperatures and confining pressures, *Can. Geotech. J.*, Vol. 20, pp. 344 - 352, 1983.
- 13) 大久保誠介, 西松裕一: 応力速度のNegative Feed Backを用いた岩石の一軸圧縮試験, 日本鉱業会誌, 100巻, pp. 1052 - 1056, 1984.
- 14) Johnson, B., Gangi, A. F. and Handin, J.: Thermal cracking of rock subjected to slow, uniform temperature changes, *Proc. 19th U.S. Symp. on Rock Mech.*, No.1, pp. 259 - 267, 1978.
- 15) Yong, C. and Wang, C.: Thermally induced acoustic emission in Westerly granite, *Geophysical Research Letters*, Vol. 7, pp. 1089 - 1092, 1980.
- 16) Ehara, S., Terada, M. and Yanagidani, T.: Thermal properties of stressed rocks, *Proc. 5th Int. Cong. on Rock Mech.*, pp. E137 - E140, 1983.
- 17) 江原昭次, 柳谷 俊, 寺田 孚: 加熱・冷却にともなう大島花崗岩のA Eと熱膨張, 材料, 第35巻, pp. 490 - 495, 1986.
- 18) 木下直人, 安部 透, 奥野哲夫: 高温, 拘束圧下における火成岩の熱膨張特性, 土木学会論文集, No. 511 III-30, pp. 69 - 78, 1995.
- 19) 木下直人, 安部 透: 高温下における堆積岩の熱膨張・収縮特性, 土木学会論文集, No.517 III-31, pp.53 - 62, 1995.
- 20) 江原昭次, 柳谷 俊, 寺田 孚: 低温で熱サイクルをうける乾燥岩石の熱膨張について, 材料, 第34巻, 第382号, pp. 857 - 863, 1985.
- 21) Hawkins, A. B. and McConnell, B. J.: Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol. 25, pp. 115 - 130, 1992.
- 22) West, G.: Effect of suction on the strength of rock, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol. 27, pp. 51 - 56, 1994.
- 23) Brignoli, M., Santarelli, F. J. and Papamichos, E.: Capillary effects in sedimentary rocks: Application to reservoir water-flooding, *35th U. S. Symp. on Rock Mech.*, pp. 619 - 625, 1995.
- 24) Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussmann, J.: *Rock-forming minerals*, Vol. 4, Longman, pp. 179 - 230, 1975.
- 25) Johnson, W. and Andrews, K. W.: An X-ray study of the inversion and thermal expansion of cristobalite, *Trans. British Ceram. Soc.*, Vol. 55, pp. 227 - 236, 1956.
- 26) 長 秋雄: 岩石の破壊強度から求められた地殻強度と地殻での高圧型破壊の可能性, 地学雑誌, Vol. 102, No. 3, pp. 279 - 287, 1993.

(1996. 4. 9 受付)

MECHANICAL PROPERTIES OF ROCK AT HIGH TEMPERATURES

Naoto KINOSHITA, Tohru ABE, Naruki WAKABAYASHI and Tsuyoshi ISHIDA

The laboratory tests have been performed in order to investigate the effects of temperature up to 300 °C and pressure up to 30 MPa on the mechanical properties of three types of rocks, Inada granite, Sanjoume andesite and Oya tuff. The experimental results indicated that the significant differences in temperature dependence of mechanical properties exist between the three rocks, because of the difference of the factors which determine the mechanical properties of the rocks. The effect of temperature on the mechanical properties for the rocks is lower than that of pressure and water content. Temperature dependence of the mechanical properties is reduced by increase in pressure in the range of pressure and temperature investigated in this paper.