

(67) 熱水および高温の影響を受けた岩石の強度・変形について

愛媛大学工学部 正会員 稲田 善紀

“ “ 横田 公忠

“ “ 時川 忠

1. 緒言

熱エネルギーの有効利用の一環として、地熱、太陽熱、発電所やゴミ焼却場の排熱などを熱源として水を熱水に変え、地域暖房・給湯システムなど都市部の人口集中地域での生活に利用することや、農漁業および融雪道路など多目的に利用することが考えられる。¹⁾ この場合、多量の熱水を季節や時間帯に関係なく安定して供給するために、大型消費地近傍に熱水を一時的に貯蔵しておく必要があり、一つの方法として地下岩盤内に空洞を設け熱水を貯蔵することが考えられる。この方法は周辺への影響も少なく、また、土地の立体的有効利用をはかれるという利点がある。ただし、空洞は熱水や高温による影響を受けるのでその安定性が問題となる。本研究では、それらの基礎資料を得るため、熱水の影響を受けている岩石ならびに乾燥状態で高温の影響を受けている岩石の強度・変形特性をそれぞれ実験によって求め、比較検討した結果について報告する。

2. 実験に用いた岩石試料

本実験に使用した岩石は、花崗岩（愛媛県越智郡大島産）ならびに安山岩（愛媛県上浮穴郡久万町産）の2種類である。供試体は直径3cmの円柱形とし、

表-1 試料の空隙率、含水比、飽和度および比重

	Dry			Wet			Specific gravity (Dry)	
	Porosity (%)	Water content (%)	Degree of saturation (%)	Porosity (%)	Water content (%)	Degree of saturation (%)	True specific gravity	Bulk specific gravity
Granite	1.99	0.16	20.67	1.99	0.54	70.86	2.673	2.625
Andesite	5.60	0.91	41.02	5.60	1.94	88.33	2.665	2.549

圧縮試験用のものは長さ6cm、引張試験は圧裂試験で代用したので長さ3cm、高温下でのひずみ測定用のものは長さ10cmとした。なお、試料端面の平行度ならびに平坦度は、5/100mm以内になるように留意して成形した。実験に先立ち、成形した試料を次の2通りの方法で処理した。①室内で1週間以上自然乾燥し、さらにデシケータ内で1週間乾燥した（以下“Dry”の試料と呼ぶ）。②この乾燥状態の試料を用い、デシケータ内を真空状態にしたまま蒸留水を入れて浸潤させ、さらに水中の気泡が試料内部に水が浸入するのを妨げないように真空を併用しながら24時間抜気した（以下“Wet”の試料と呼ぶ）。処理された試料の空隙率、含水比、飽和度および比重を表-1に示す。

3. 熱水および高温の影響を受けた岩石の強度の変化

3・1 実験方法

実験は次の2通りの方法で行うこととした。①Dryの試料を用い常温および雰囲気温度100℃の空气中で試験を行う（Dry試験）。②Wetの試料を用い常温および約100℃の水中で試験を行う（Wet試験）。実験方法を概念的に示したものが図-1である。実験に際し試料は表面から中心まで所要の一定温度になっていることが必要である。直径3cmの円柱試料の場合、表面を約20分間一定に保つと中心まで同じ温度になることが報告されているが²⁾、本実験では念のため40分間以上所要の温度に保った後実験に供した。なお、熱衝撃による影響を与えないように昇温速度を2℃/minとした³⁾。試験時の荷重速度は、圧縮試験では

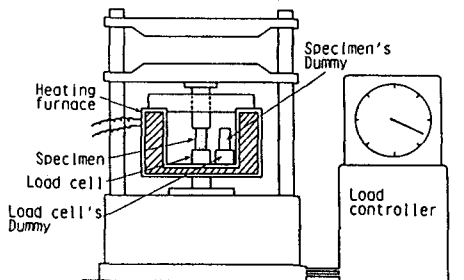


図-1 実験方法の概念図

1～10 kgf/cm²/secの範囲内であれば強度に影響を及ぼさないことが報告されているので⁴⁾ここでは荷重速度を7 kgf/cm²/secに一定に保って実験を行った。引張試験は圧裂試験で代用し、荷重速度を3 kgf/secに一定に保って実験を行った。また、圧縮試験の際、試料表面にあらかじめ貼付したひずみゲージにより岩石の変形特性を求めた。

3・2 実験結果および考案

図-2および図-3はそれぞれ圧縮強度および引張強度の変化をとりまとめたものである。これらの値は、いずれも試料10～12個の平均であり、同時に標準偏差も示した。

圧縮強度の変化は、花崗岩、安山岩ともDry試験ではほとんど見られないが、Wet試験ではまず常温下でDryのものよりも強度が低下し、高温下でさらに強度が低下している。これは常温下ではDryの試料をWetにする際に吸水によって生じたマイクロクラック⁵⁾によってまず強度が低下することや、圧縮することによって間隙水がさらに油圧のように働き、強度が低下するものと考えられる。次に、高温下では構成鉱物粒子の熱膨張が異なるため粒子間に熱応力が発生し、隣接粒子間の境界や粒子自身の弱面にマイクロクラックを生じたり、潜在的マイクロクラックの拡大が行われるが、100℃程度では強度に影響を及ぼすほど顕著には発生しなかったと考えられる。しかし、熱水中では間隙に浸入した熱水が圧縮によって油圧のように働き楔のような作用をし、さらに強度が低下するものと考えられる。

次に、引張強度は、Dry試験およびWet試験において両岩石とも高温下で常温よりも低下している。これは、引張強度は岩石内部の弱面の増加に、より影響を受け易いので、このことが圧縮強度よりも敏感に強度低下となって現われたものと思われる。また、Wet試験では、常温下でDryのものよりもわずかながら引張強度が低下しているが、これは、前述のとおり、吸水によるマイクロクラックの拡大が原因となっているものと考えられる。

また、次式によってぜい性度を求めた結果を図-4に示す。

$$Br = Sc / St \quad (1)$$

ただし、Br：ぜい性度， Sc：圧縮強度， St：引張強度

高温下ではいずれも値が増加し、ぜい性化してゆく様子がうかがえる。

図-5(a)，(b)は圧縮試験時に得られた応力-ひずみ曲線から破壊応力の30%付近，70%付近の接線弾性係数を求めとりまとめたものである。両図には値に多少のばらつきがあるが、全体としてWetの岩石は高温下では常温下のそれと比べ値が増加する傾向がみられ、Dryのそれよりも大きな値を示している。また、花崗岩はさらに荷重が加えられた70%付近で30%付近に比べ、それぞれその値が全体に大きくなっている。

次に、ポアソン比の変化を示したものが図-6(a)，(b)である。両図より、高温下ではポアソン比の値は、

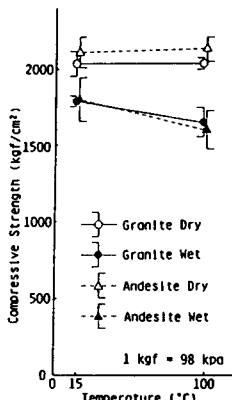


図-2 高温下における岩石の圧縮強度の変化

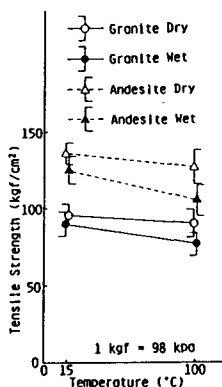


図-3 高温下における岩石の引張強度の変化

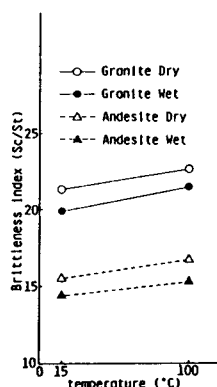
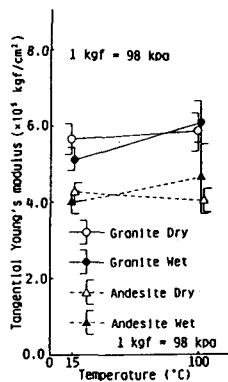
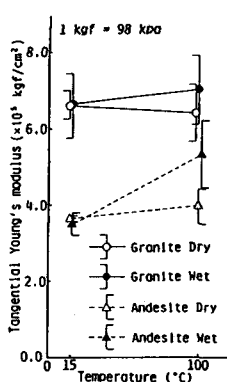


図-4 高温下における岩石のぜい性度の変化

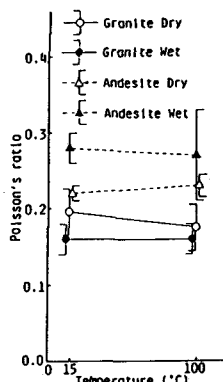


(a)破壊応力の30%付近

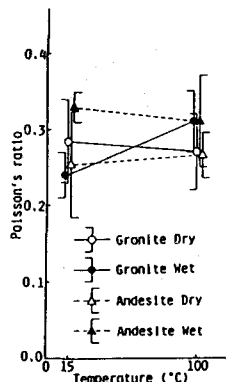


(b)破壊応力の70%付近

図-5 高温下における接線弾性係数の変化



(a)破壊応力の30%付近



(b)破壊応力の70%付近

図-6 高温下におけるポアソン比の変化

常温下でのそれと比べて、花崗岩ではDryのものはやや低下するが、Wetのものはとくに70%付近において増加する傾向が見られる。安山岩ではDryのものはわずかながら値が増加し、Wetのものは低下する傾向が見られる。

以上を総合的に考察すると、花崗岩については、高温下では岩石内で構成鉱物粒子の熱膨張の差によってマイクロクラックが生じたり、また、潜在的マイクロクラックが生成しているものと考えられる。また、膨張によって空隙がある程度密になり、みかけ上弾性係数が大きくなるものと思われる。Wetの場合はさらに間隙内に熱水が浸入することにより、Dryの場合よりは岩石内部が密になると同時に圧縮試験時に熱水が油圧のように働くため、みかけ上弾性係数が増加し、軸方向へ加えられた荷重も横方向へ伝わりやすくなることから破壊応力の30%付近でポアソン比がわずかながら増加し、より荷重が加えられた70%付近で顕著に見られる。安山岩については上述のほか、別の実験から、Wetにした場合構成鉱物中の粘土鉱物の一部が軟化することや溶出することが確められているので、このことも強度低下の一因となっているものと思われる。

4. 熱水および高温の影響を受けた岩石のひずみの変化

4・1 実験方法

熱水中および高温下における岩石のひずみの変化を石英ガラス棒を用いた比較法によって測定した。測定方法を概念的に示したものが図-7である。試料の伸びは1/1000mmで測定可能なダイヤルゲージを用いて20℃ごとに測定した。試料が熱衝撃を受けるのを避けるため昇温速度2℃/minで加熱し、所要温度に達した後約40分間保つと伸びの量に変化しなくなったので、その伸びを測定した。

4・2 実験結果および考察

図-8は岩石のひずみの温度依存性を示している。両岩石とも温度上昇にともないひずみの値は増加しているが、花崗岩のひずみは安山岩のそれよりも大きいことがわかる。また、温度履歴を2回与えた場合のひずみの変化を図-9(a)、(b)および図-10(a)、(b)

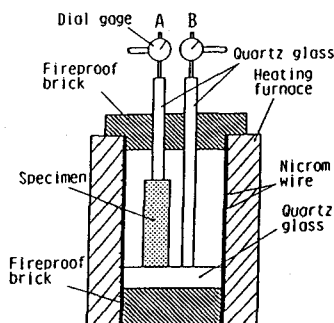


図-7 実験方法の概念図

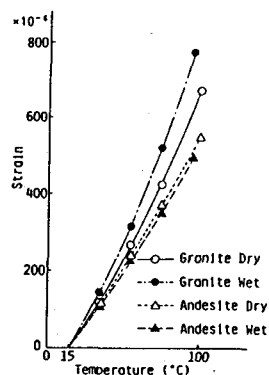


図-8 高温下における岩石のひずみの変化

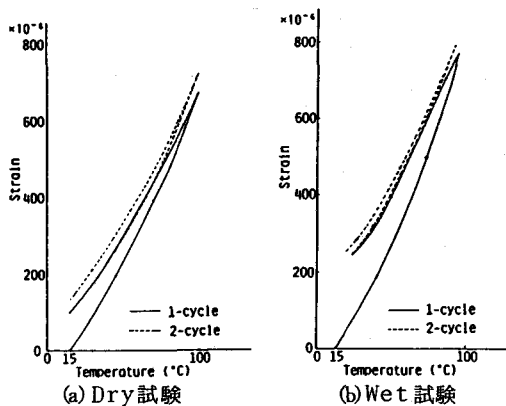


図-9 高温下における花崗岩のひずみの変化

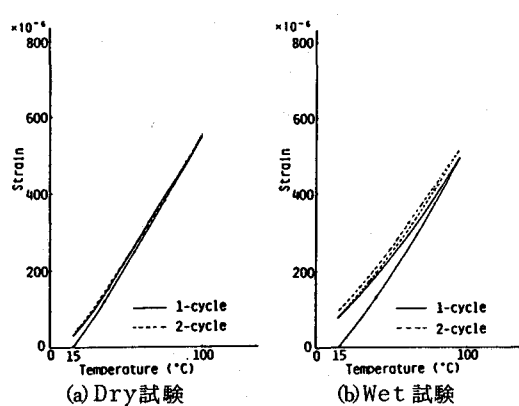


図-10 高温化における安山岩のひずみの変化

に示した。温度履歴を1回与えた後の常温での残留ひずみを比較すると、両岩石ともにDryよりWetの方が、花崗岩で2.5倍、安山岩で3倍大きく、また花崗岩のDryおよびWetは、安山岩のそれぞれの約4倍および約6倍であることがわかる。これは、花崗岩の場合構成鉱物粒子が安山岩よりはるかに大きいので、熱膨張によって粒子間に発生する熱応力も大きく、従って発生するマイクロクラックの量も多くなり、このことがひずみの値に影響を及ぼしているものと考えられる。とくにWetにした場合には、間隙水の影響も加わるため、Dryよりもひずみの値や残留ひずみの値を大きくしているものと思われる。以上のほか、別の実験により安山岩には構成鉱物中にモンモリロナイトを主成分とする粘土鉱物が体積にして約1.7%含まれていることがわかっているため、これらの吸水、膨張、軟化が安山岩の熱水中でのひずみの変化に影響を与えているものと考えられる。

5. 結 言

今回得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- 1) 花崗岩および安山岩の圧縮強度は、常温下ではDryの試料をWetにすることにより強度が低下する。また、高温下(100℃)ではDryのものは強度がほとんど変化しないがWetのものは強度が低下する傾向が見られる。
- 2) 花崗岩および安山岩の引張強度は、常温下ではDryの試料をWetにすることにより強度が低下する。また、高温下(100℃)ではいずれも強度が低下する傾向が見られる。
- 3) 花崗岩および安山岩は、高温下(100℃)でぜい性度が大きくなり、ぜい性化してゆくことがわかる。
- 4) 花崗岩および安山岩の接線弾性係数は、Wetのものは間隙水の影響により、みかけ上高温下(100℃)で値が増加する傾向が見られる。
- 5) 花崗岩および安山岩は、温度上昇とともにひずみの値が大きくなる。また、温度履歴を与えた岩石の常温での残留ひずみは、Wetのものの方がDryよりも数倍大きくなる。

引 用 文 献

- 1) エネルギーレビュー, 1, PP.12~14, 1985
- 2) 稲田善紀, 八木則男, 材料, 28, P.980, 1979
- 3) 日本鉱業会誌, 86, 1986, P.348, 1970.
- 4) (社)日本鉱業会, 岩石強度測定法特別委員会, 岩石強度試験に関するシンポジウムテキスト, 1966
- 5) 稲田善紀, 八木則男, 材料, 29, P.1222, 1980

(67) A STUDY OF THE DEFORMATION AND STRENGTH CHARACTERISTICS
OF ROCKS AFFECTED BY HEATED WATER AND HIGH TEMPERATURE

Yoshinori INADA

Kinutada YOKOTA

Tadashi TOKIKAWA

Dept. of Civil Engng., Ehime University

The demand for multiple-purpose utilization of heated water which is produced by utilizing the exhausted heat from waste incineration equipment, solar energy and geothermal energy has increased recently in Japan. One of the possible measures is temporary storage of heated water which is sent up from underground openings excavated in rock mass near the ground-surface. In this case, as the rock mass around openings would be affected by heated water and high temperature, the stability of openings is an important problem. Therefore, we need to investigate the strength and deformation characteristics of rocks affected by heated water and high temperature.

This paper describes the changes of strength and deformation characteristics of rocks that were measured in heated water and at high temperature.

Main results obtained are as follows:

- 1) The compressive strength of granite and andesite has a tendency to become lower by making the specimen from Wet to Dry and becomes lower in Wet Test at high temperature.
- 2) The tensile strength of both rocks have a tendency to become lower remarkably in Wet and Dry Test at high temperature.
- 3) As the brittleness index of both rocks becomes higher in Wet and Dry Test at high temperature, so it is estimated that the brittleness advances with rising temperature.
- 4) The tangential elastic modulus of both rocks in Wet Test shows a tendency to increase by influence of pore water in rocks.
- 5) The value of strain of both rocks becomes higher with rising temperature. The value of residual strain at room temperature becomes higher by receiving thermal hysteresis. And these values are several times higher in Wet Test than those of in Dry Test.