

高温の熱履歴を受ける岩盤空洞の安定性

STABILITY OF UNDERGROUND OPENINGS AFFECTED BY THERMAL HYSTERESIS OF HIGH TEMPERATURES

稲田善紀*・木下尚樹**

Yoshinori INADA & Naoki KINOSHITA

The authors have proposed and discussed heated water storage in opening excavated in rock mountains. Heated water produced by surplus heat from garbage burning plants, should be used for many purposes. This method has the advantages of efficient utilization of land, saving energy and environment, etc. In this case, rock mass around the opening receives thermal hysteresis of high temperatures as the quantity of heated water continually changed. In this study, strength and deformation of some types of rocks were examined after receiving thermal hysteresis. The results of the tests were used for analyzing temperature and stress distribution around openings. Then the effect of thermal hysteresis on thermal behavior of some types of rock mass was discussed.

1. 緒言

ゴミ焼却等の廃熱を利用して水を熱水に変え、地域暖房、給湯、農業等多目的に利用する場合の安定供給のための一時的な貯蔵方法として、筆者らはこれまで地山岩盤内に設けた空洞に直接貯蔵することを提案し、検討を行ってきた¹⁾。この場合、空洞周辺岩盤には高温の影響により熱応力が発生し、空洞の安定性が問題となる。

本研究では数種類の岩石試料を用い、室温から100℃の範囲での履歴温度幅、履歴回数、雰囲気温度等の温度条件や岩石の構成鉱物粒子の大きさ、含水状態等の物理的性質が力学的特性に及ぼす影響について考察した。次に求めた値を用いて、数種類の岩盤について熱水貯蔵時に空洞周辺に生じる非定常の温度および応力分布を求め、空洞の安定性について検討した。さらに岩盤が熱履歴を受けた場合の安定性についても考察した。

2. 熱履歴を受けた岩石の強度・変形特性

2.1 実験方法

実験に用いた岩石は花崗岩、安山岩、砂岩、凝灰岩および泥岩の5種類の岩石である。いずれの岩石についても、岩石ブロックから同一方向にコアドリルで試料を採取し、一軸圧縮強度試験用には $\phi 3 \times 6$ cm、圧裂引張試験用には $\phi 3 \times 3$ cmに成形した。各岩石は室内で1週間以上自然乾燥させた後、デシケータ内でさらに1週間乾燥させた乾燥状態のもの(dry)と、乾燥状態のものを真空ポンプを用いて真空状態にし、5時間脱

* フェロー会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科

** 正会員 工修 愛媛大学助手 工学部環境建設工学科

脱気しながら試料に蒸留水を浸潤させた湿潤状態もの(wet)の2種類用意した。各岩石の物理的性質を表-1に示した。

熱履歴を与える方法は以下のとおりとした。試料は含水状態が変化しないようにポリエチレンフィルムで覆い、熱サイクル試験槽に入れ、この状態で15℃の試料を100℃まで加熱した。この場合、槽内の温度を直線的に上昇、降下させる必要があるため、熱源はヒーターと冷凍機を併用した。昇温速度は熱衝撃による影響を受けないとされている1℃/minとした²⁾。水は1気圧の下では100℃で沸騰するため、実際の実験では沸騰する直前の温度で実験を行ったが、本研究ではこれを便宜上100℃と呼ぶ。試料の中心の温度が100℃であることを確認しながら60分間保温した後1℃/minで降温させ、15℃の状態でも60分間保温した。ここまでの過程を1サイクルとする。与えた熱履歴の概念図を図-1に示す。また、履歴温度幅が岩石の強度・変形特性に及ぼす影響を求めため、15℃から60℃までの履歴も与えた。

本研究では、温度変化による各構成鉱物粒子の熱膨張、収縮量の違いによって発生すると考えられるマイクロクラックが強度・変形特性に及ぼす影響について特に着目し、考察する。

供試体に熱履歴を与えた後、一軸圧縮試験と圧裂引張試験を行った。実験中の雰囲気温度は室温（ここでは15℃）および履歴の最高温度とした。なお、試験はwetの供試体については水中で、dryの供試体については空気中で行った。試験は荷重速度を一定として制御した。また、一軸圧縮強度試験の際には供試体に貼り付けたひずみゲージにより縦ひずみと横ひずみを同時に測定した。各試験に用いる供試体は1つの条件に付き5本とした。

2. 2 実験結果および考察

図-2は熱履歴を受けていない場合について高温下における圧縮強度を求めた結果である。いずれの岩石においても温度の上昇に伴い値が低下している。これは岩石の構成鉱物粒子の熱膨張の差異により、潜在的なマイクロクラックが拡大、増加したことが原因と考えられる。また、wetよりもdryの方が値が大きい。この圧縮試験の際に得られた応力-ひずみ曲線から破壊応力の30%付近における接線弾性係数を求めた結果を図-3に示す。接線弾性係数は温度の上昇とともに値が低下する傾向が得られたものの、花崗岩および安山岩においてはwetの供試体では温度上昇に伴う変化はほとんどない。図-4はwetの試料の熱履歴を受けた後の各岩石の圧縮強度(σ)を履歴を受ける前の圧縮強度(σ_0)で除した値を圧縮強度比(σ/σ_0)として示したものである。いずれの岩石も履歴回数の増加に伴い値は低下しているが、低下の割合は履歴とともに小さくなっている。また、凝灰岩では強度低下は大きいのに比べ、安山岩では小さい結果となった。図-5は供試体に与えた熱履歴の温度幅と圧縮強度比の関係である。履歴温度幅が大きい方が強度比も小さくなるのがわかる。図-6は接線弾性係数比である。いずれの場合においても温度履歴回数が増加するのに伴い接線弾性係数の値が低下し、収束する傾向がうかがえる。また、花崗岩に比べ安山岩では変化は小さい。

表-1 実験に用いた岩石の物理的性質

rocks	porosity (%)	moisture content ratio (%)	degree of saturation (%)	bulk specific gravity	true specific gravity
granite(Dry)	0.80	0.09	28.5	2.65	2.67
granite(Wet)	0.80	0.24	81.3	2.65	2.67
andesite(Dry)	5.60	0.91	41.0	2.55	2.67
andesite(Wet)	5.60	1.94	88.3	2.59	2.67
sandstone(Dry)	8.12	1.46	16.8	2.40	2.62
sandstone(Wet)	8.12	3.42	96.9	2.49	2.62
tuff(Dry)	37.09	1.39	5.8	1.56	2.45
tuff(Wet)	37.09	24.01	99.6	1.91	2.45
mudstone(Dry)	39.42	1.31	5.4	1.63	2.69
mudstone(Wet)	39.42	21.09	99.6	2.02	2.69

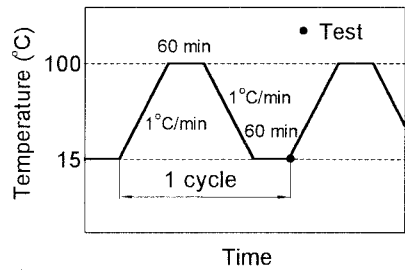


図-1 熱履歴の与え方

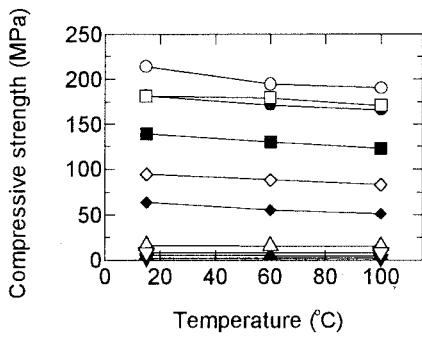


図-2 高温下における圧縮強度
(○, ●:花崗岩(dry),(wet), □, ■:安山岩(dry),(wet), ◇, ◆:砂岩(dry),(wet), △, ▲:凝灰岩(dry),(wet), ▽, ▼:泥岩(dry),(wet)).

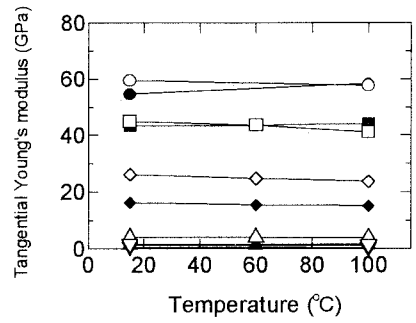


図-3 高温下における接線弾性係数

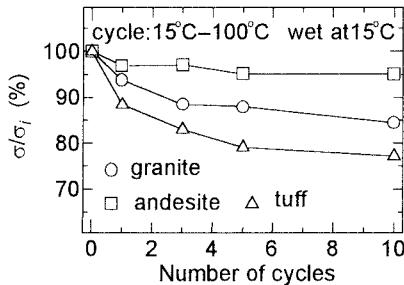


図-4 圧縮強度比

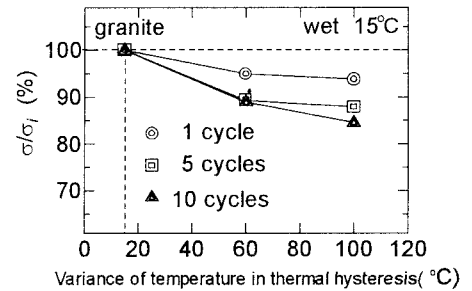


図-5 圧縮強度比と履歴温度幅の関係

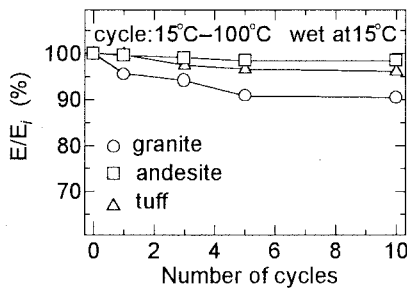


図-6 接線弾性係数比

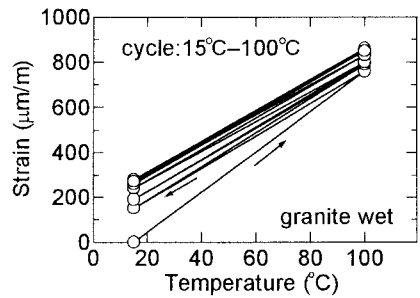


図-7 熱履歴に伴うひずみ

実験結果から熱履歴を受ける岩石の強度・変形特性は、試料の膨張、収縮の繰り返しによって発生するマイクロクラックの影響を大きく受けているものと考えられる。そこで石英ガラス棒による比較法³⁾により、温度履歴に伴う試料のひずみを測定した。代表例としてwetの花崗岩に履歴を与えた場合の結果を図-7に示す。履歴を受け室温に戻した場合には元のひずみの値にはならず、いわゆる残留ひずみがみられる。しかし履歴回数の増加に伴い、残留ひずみは無限に増大するのではなく一定値に収束することがうかがえる。また、弾性波伝播速度比

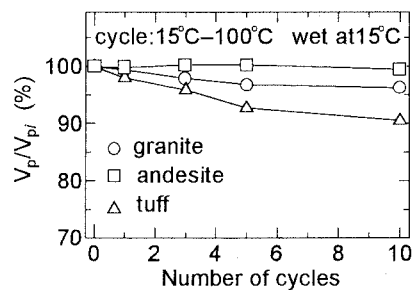


図-8 弾性波伝播速度比

(V_p/V_{pi})を図-8に示した。この結果からもマイクロクラックの増加が推察される。

以上の結果から、岩石が熱履歴を受けた際、各構成鉱物粒子の膨張、収縮量が異なり、鉱物粒子内および粒子間のマイクロクラックが拡大、増加したものと考えられる。履歴回数が増加するのに伴い、強度、弾性係数の低下の割合が減少し、収束する傾向がみられたのは、ひずみや弾性波伝播速度の測定結果からも裏付けられるように、熱履歴により発生したマイクロクラックは、温度を室温に戻しても完全には元に戻らないが、履歴の温度幅が一定であるために構成鉱物粒子の膨張、収縮量が履歴の回数に関わらず一定しており、発生するマイクロクラックもある一定以上にはならないためと考えられる。

3. 空洞周辺岩盤の挙動

3. 1 温度分布

土被り100mの地山岩盤内に直径10mの単一円形空洞を設け、熱水(100℃一定)を貯蔵した場合の空洞周辺岩盤の温度分布の経時変化を筆者らが提案している要素分割法⁴⁾により求めた。解析モデルの境界は空洞表面から100mの位置とし、温度は15℃とした。初期温度は岩盤部分で15℃、空洞内部は100℃とした。結果の代表例として、花崗岩(熱拡散率： $\kappa = 12.3 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$)および凝灰岩($\kappa = 4.0 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$)の岩盤内に熱水を貯蔵した場合の温度分布の変化を図-9に示す。貯蔵開始直後には空洞表面付近では急激な温度勾配になっており、空洞周辺には熱は及んでいないが、時間の経過とともに温度勾配は緩やかとなる。空洞表面から同一距離の温度変化は時間の経過に伴い小さくなり、空洞表面付近においては貯蔵1年後にはほとんど温度変化がみられなくなる。また、花崗岩に比べ凝灰岩では貯蔵開始直後は熱伝導に遅れがみられるが、その差は時間の経過とともに小さくなるのがうかがえる。

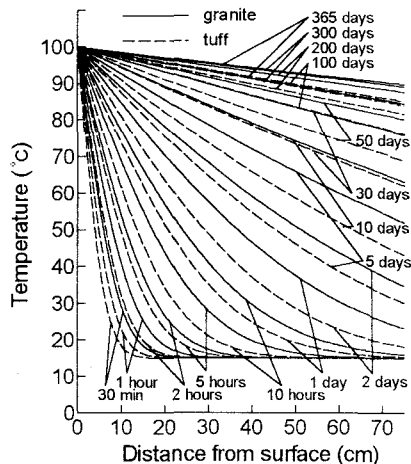
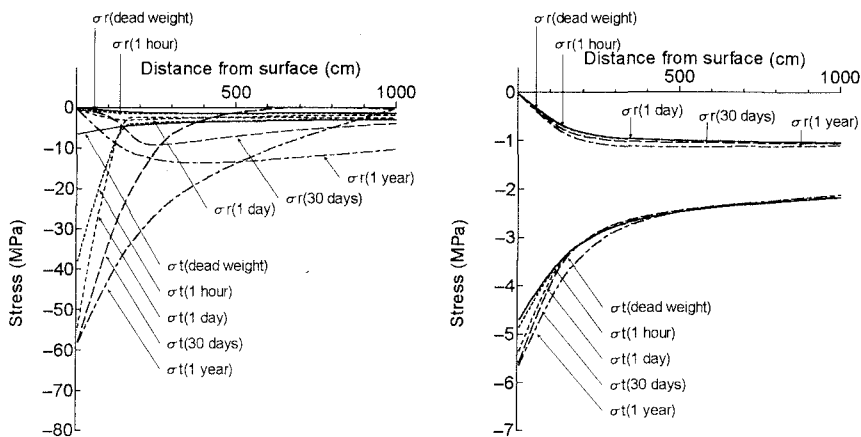


図-9 空洞周辺の温度分布

3. 2 応力分布

温度分布の解析結果を用いてFEMに時間の概念を取り入れた逐次破壊解析⁵⁾を行い、空洞周辺岩盤の応力分布を求めた。解析は平面ひずみ問題として取り扱い、破壊判定はMohrの破壊包絡線説に従うものとした。

初期応力は岩盤の自重と自重の1/2の側圧とし、そこに熱応力が重畳されるものとした。解析結果として空洞中心からの水平軸上に作用する空洞の半径方向および接線方向の応力の経時変化を図-10に、空洞の変形状態を図-11に示す。花崗岩岩盤では空洞周辺に生じた熱膨張により円周方向に圧縮応力が生じている。貯蔵1年後において空洞



(a)花崗岩

(b)凝灰岩

図-10 応力分布の経時変化

表面付近の熱応力は自重の8~10倍作用している。凝灰岩岩盤では空洞は自由面である空洞内部に張り出し、見かけ上空洞が収縮している。これは凝灰岩の接線弾性係数が高温下において低下することから、空洞周辺に温度が及ぶと変位が大きくなり空洞が収縮したものと考えられる。この場合、凝灰岩は花崗岩と比べ弾性係数が非常に小さいことから、発生する熱応力も自重に比べて小さい。しかし、凝灰岩は強度がもともと小さく高温下ではさらに低下するため、水平軸付近でせん断破壊することがわかった。

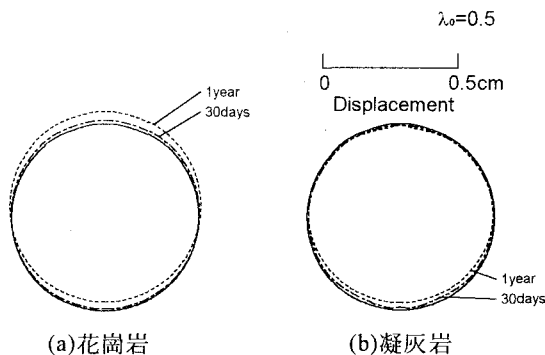


図-11 空洞の変形状態

3. 3 熱履歴を受けた場合の挙動

花崗岩岩盤について熱履歴を受けた場合の挙動を検討した。図-12は前述の貯蔵1年後の状態から貯蔵を1ヶ月間停止した場合の応力分布である。空洞内部の温度は15℃と仮定している。空洞表面付近で熱応力が減少し、空洞表面から約2mの位置で接線方向の圧縮応力が最も大きくなっている。図-13はこの状態から再び貯蔵を行った場合の応力分布である。再び空洞の表面付近の熱応力が増大し、空洞の接線方向の圧縮応力が増大している。しかし、履歴を受ける前と比べ熱応力は減少しており、空洞は安定していた。

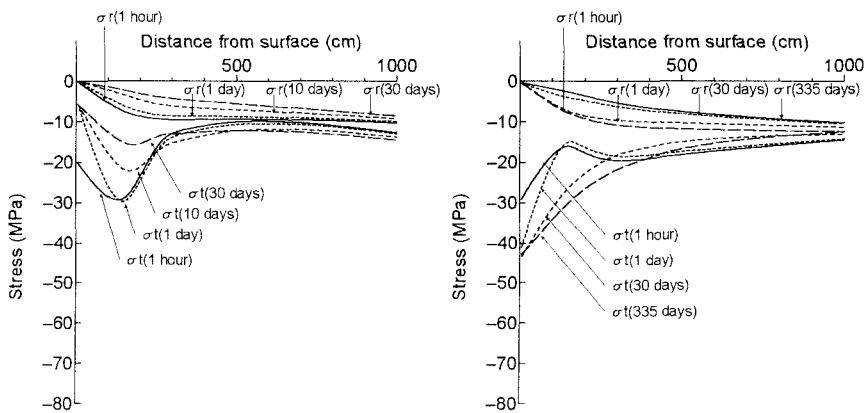


図-12 貯蔵を停止した場合の応力分布 図-13 再貯蔵した場合の応力分布

再び貯蔵を行った場合の応力分布である。

再び貯蔵を行った場合の応力分布である。再び空洞の表面付近の熱応力が増大し、空洞の接線方向の圧縮応力が増大している。しかし、履歴を受ける前と比べ熱応力は減少しており、空洞は安定していた。

4. 結 言

本研究で得られた結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 岩石の強度、弾性係数は温度履歴回数が増加するのに伴い小さくなる。しかし、強度の減少の割合は温度履歴回数が増加するのに伴い小さくなり、ある値へ収束する傾向がうかがえる。
- (2) 解析の結果、岩盤の種類の違いにより熱水貯蔵時の応力分布および挙動は異なっている。これは弾性係数の違いによって発生する熱応力が異なることによるものと考えられる。また、花崗岩地山の場合、熱履歴を受けても空洞は安定していた。

参考文献

- 1) 例えば稲田善紀・木下尚樹他：熱水の地山岩盤内貯蔵における一二の問題点と対策，土木学会論文集，610/Ⅲ-45, pp.57-67, 1998.
- 2) 山口梅太郎他：熱による岩石の変化あるいは破壊について，日本鉱業会誌，86, 986, pp.347-348, 1970.
- 3) 稲田善紀他：岩石の線膨張係数について，水曜会誌，17, 5, pp.200-203, 1971.
- 4) 稲田善紀：岩盤工学，pp.180-188, 森北出版，1997.
- 5) 稲田善紀：地下の空間利用，pp.112-119, 森北出版，1989.