

高温の温度履歴を受ける岩盤内空洞に関する一二の考察 A FEW REMARKS ON OPENINGS IN ROCK MOUNTAIN UNDERGONE THERMAL HYSTERESIS

稲田善紀*・木下尚樹**・松嶋信行***・成行惇****

Yoshinori INADA, Naoki KINOSHITA, Nobuyuki MATSUSHIMA & Atsushi NARIYUKI

The authors have proposed temporary storage of heated water in openings excavated in rock mountain. In this case, the rock mass around openings will receive the affects of thermal hysteresis of high temperatures. In this study, strength and deformation characteristics of rocks were examined at high temperatures and after undergoing thermal hysteresis of high temperatures by using a thermal cycle apparatus. Using these values, stress distribution around openings were analyzed theoretically, and the affect of thermal hysteresis of high temperatures on rock mass around openings for storage of heated water was discussed. Then, countermeasures for preventing leakage of heated water from openings and reduction of thermal stress around openings are also discussed.

1. 緒 言

筆者らはこれまで「岩盤内熱水貯蔵システム」を提案し、種々の検討を行ってきた。このシステムは省エネルギーの一環としてゴミ焼却場からの廃熱を利用して水を熱湯に変え、各家庭への給湯、地域暖房、温水プール等多目的に利用するというもので、質の高い生活を享受できる点で地域の過疎化対策やゴミ焼却場の立地等に有効であると考えられる。この場合、熱水の使用量は一日の時間帯や季節によって変動するため、安定供給のための一時的貯蔵を行う施設が必要となってくる。貯蔵方法としては土地の立体的有効利用、環境保全等の利点を持つ、地山岩盤内に空洞を設け熱水を直接貯蔵する方法を提案している。この場合、空洞周辺岩盤は熱水の貯蔵量の変動により熱の影響を繰り返し受けることとなるため、空洞の安定性を検討する際には熱の繰り返しの影響を受けた岩石の力学特性を把握する必要がある。また、岩盤に存在する亀裂からの熱水の漏出防止や熱応力の軽減も重要な課題となってくる。

本研究では熱サイクル試験装置を用いて岩石試料に温度履歴を与えた後、室温下および高温下において圧縮強度試験および圧裂引張強度試験を行い、温度履歴回数、雰囲気温度、含水状態、空隙率等が岩石の強度・変形特性に及ぼす影響について考察した。次に得られた値を用いて空洞周辺岩盤の温度分布および応力分布を解析により求め、熱水の影響を受けた空洞周辺岩盤の挙動について考察した。また、熱水の漏出防止および熱応力軽減対策として高分子系材料のライニングと断熱材を併用した場合について検討し、有効性を考察した。

*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

***学生会員 愛媛大学大学院理工学研究科博士前期課程 土木海洋工学専攻

****正会員 東急建設(株) 技術研究所 副所長 (現 東興建設(株) 営業本部 部長)

2. 高温の温度履歴を受けた岩石の強度・変形特性

2. 1 実験に用いた供試体

実験に用いた岩石は愛媛県越智郡宮窪町産の花崗岩（通称：大島みかげ）および栃木県宇都宮市産の凝灰岩（通称：大谷石）である。一般的に花崗岩にはほぼ直交する3つの潜在的亀裂面が存在すると言われている¹⁾。最もマイクロクラックが発達した面をrift plane、次いで2番目にマイクロクラックが発達した面をgrain plane、両者に直交する面をhardway planeと分類されており、本研究でもこの分類に従うものとする。岩石ブロックの弾性波伝播速度を測定することによりこれらの面を推定し、ここではhardway planeに垂直となる方向にコアドリルで試料を採取した。凝灰岩についても岩石ブロックの弾性波伝播速度を測定し、堆積層に対し平行となる方向にコアを採取した。

試料は一軸圧縮強度試験用は $\phi 3 \times 6\text{cm}$ 、圧裂引張試験用は $\phi 3 \times 3\text{cm}$ 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（以下Dryと呼ぶ）と、この状態のものを真空ポンプを用いて5時間脱気しながら試料に蒸留水を浸潤させた湿潤状態のもの（以下Wetと呼ぶ）の2種類用意した。各岩石の物理的性質を表1に示した。花崗岩では空隙率が小さいため空隙が互いにつながっておらず、供試体をDryにしても中心までは乾燥していないことが推察される。また一旦Dryにした供試体を真空ポンプを併用して吸水させても水は浸入しにくいものと考えられる。凝灰岩では空隙率が大きいため空隙がつながっており、供試体中心まで乾燥・湿潤状態になったものと考えられる。このことが飽和度の違いに現れたものと考えられる。

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	28.54	2.65	2.67
granite(Wet)	0.80	0.24	81.32	2.65	2.67
tuff(Dry)	37.09	1.39	5.76	1.56	2.45
tuff(Wet)	37.09	24.01	99.62	1.91	2.45

2. 2 実験方法

試料に温度履歴を与えるには熱サイクル試験装置を用いた。装置の概念図を図1に示す。熱サイクル試験装置は液体窒素、冷凍機およびヒーターの3種類の熱源を持ち、 $-170^{\circ}\text{C} \sim +150^{\circ}\text{C}$ の範囲で任意の温度幅、履歴回数、保温時間および $0.2 \sim 5.0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の任意の昇温・降温速度で試料に温度履歴を与えることができる。

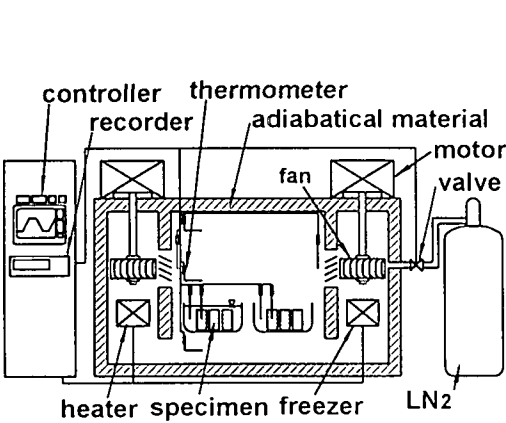


図1 熱サイクル試験装置の概念図。

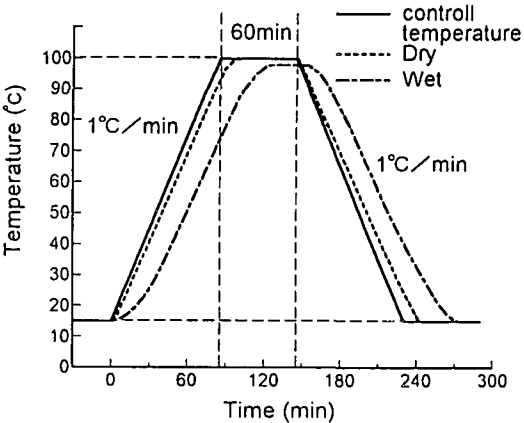


図2 温度履歴を与えた場合の供試体中心の温度。

実験に先立ち装置の精度を確認するため制御温度と槽内温度を測定した結果、制御温度と槽内の平均温度との差は $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内で槽内の温度差も $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内であった。

Wetの試料は蒸留水に浸した状態で、Dryの試料はそのままの状態で槽内に入れ、実験中の温度を測定するために温度センサーをWet, Dryそれぞれ1個の供試体の中心ならびにWetの試料を浸した水槽内3箇所および槽内25箇所に設置した。この状態で 15°C の試料を 100°C 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ている。昇温速度は熱衝撃による影響を受けないとされている $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ とした²⁾。図2に制御温度と供試体の中心温度の実測値の一例を示す。本実験では、蒸留水が沸騰しない程度に加熱したため、実際の加熱温度は 100°C 未満であったが便宜上 100°C と呼ぶこととする。試料の中心の温度が 100°C であることを確認しながら60分間保温した後、 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で降温させ 15°C の状態では60分間保温した。ここまでの過程を1サイクルとする。供試体は温度履歴を与えないものから最高10サイクル温度履歴を与えたものの6種類とした。

以上のように、温度履歴を与えた後一軸圧縮試験と圧裂引張試験を行った。強度試験の概念図を図3に示す。実験中の雰囲気温度は室温（ここでは 15°C ）および 100°C とした。 100°C の雰囲気温度で行う際には、温度履歴を与える場合と同条件で加熱した。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で行った。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。この際、温度変化がひずみゲージやリード線に与える影響をキャンセルするためにダミーゲージを併用した。各実験の供試体数はそれぞれ5個とした。

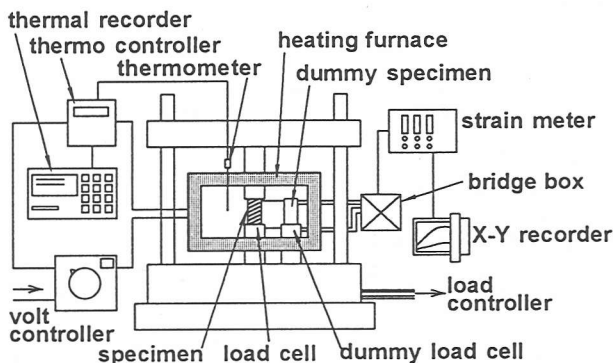
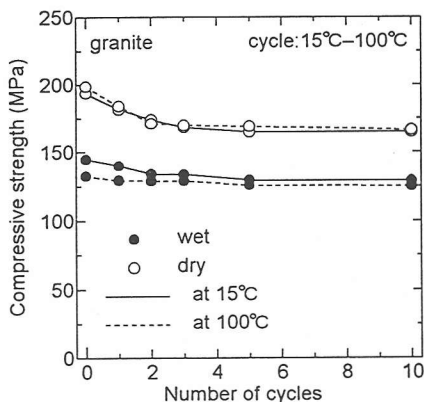


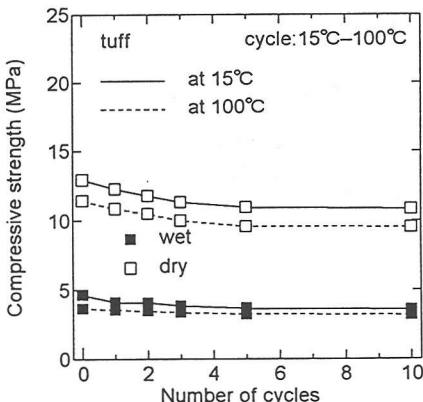
図3 高温下における強度試験装置の概念図。

2. 3 実験結果および考察

図4(a),(b)および図5(a),(b)は高温の温度履歴を与えた後、圧縮強度試験および圧裂引張強度試験を行った結果をとりまとめたものである。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、強度が低下し

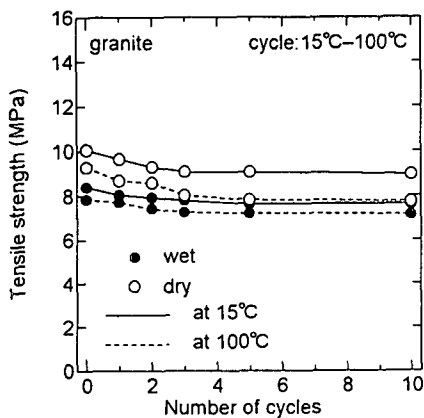


(a) 花崗岩

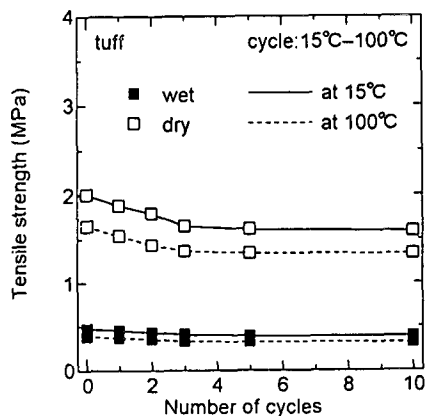


(b) 凝灰岩

図4 温度履歴を受けた岩石の圧縮強度。

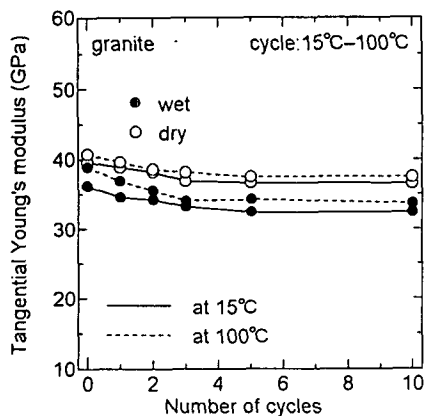


(a) 花崗岩

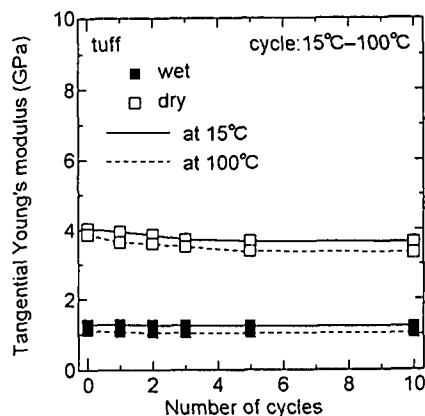


(b) 凝灰岩

図5 温度履歴を受けた岩石の引張強度.

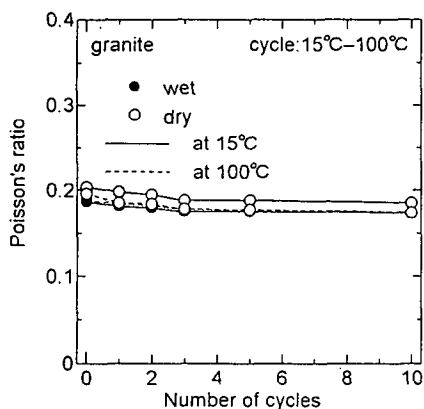


(a) 花崗岩

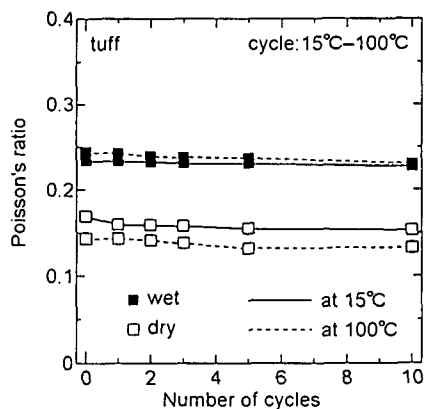


(b) 凝灰岩

図6 温度履歴を受けた岩石の接線弾性係数.



(a) 花崗岩



(b) 凝灰岩

図7 温度履歴を受けた岩石のポアソン比.

ている。これは岩石の構成鉱物粒子が温度履歴を受けた際、それぞれの膨張、収縮量が異なり、鉱物粒子間のマイクロクラックが拡大されたためと考えられる。しかし、温度履歴回数が増加するに伴い強度の低下の割合が減少している。これは履歴の温度幅が決まっているため膨張、収縮量が履歴の回数に関わらず一定しており、マイクロクラックもある一定量以上にはならないためと考えられる。このことから今回の温度履歴幅ではいずれはある値に収束することがうかがえる。

WetとDryの試料で比較すると、Wetの方がいずれの場合にも圧縮強度が小さい。Wetの供試体は真空ポンプで脱気・吸水させたため水圧がはたらき、供試体表面付近の間隙内に水が浸入する際にマイクロクラックが拡大されたことによるものと考えられる。また試験時に供試体に荷重がかかると間隙水圧としてはたらき、強度低下の原因となったものと考えられる。凝灰岩では供試体をWetにすることで構成鉱物粒子間の結合が弱くなったものと考えられる。

次に、圧縮強度試験時に得られた応力-ひずみ曲線から破壊応力の30%付近の接線弾性係数およびポアソン比を求め、とりまとめたものが図6(a),(b)および図7(a),(b)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に伴い値が低下しており、温度履歴によるマイクロクラックの拡大がこの結果からもうかがえる。また、花崗岩に比べ凝灰岩ではWetとDryの接線弾性係数の値の差は大きい。

ポアソン比は温度履歴回数が増加するに伴いわずかながら低下しているが今回の実験結果からは大きな変化はみられなかった。また、花崗岩においては室温と100℃でのポアソン比にはあまり差がなかった。

2. 4 ひずみ

強度特性は温度履歴に伴う試料の膨張、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。このことは試料の温度の履歴に伴うひずみにも影響を与え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⁾により高温の温度履歴に伴う試料のひずみを測定した。供試体はφ3×10cmに成形し、温度履歴を与える条件は前述の強度試験の場合と同様にした。温度履歴回数は10回とした。代表例として花崗岩の場合の結果を図8および図9に示す。雰囲気温度が上昇するに伴い、ひずみはほぼ直線的に増大し、降下すると小さくなっているが、温度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、残留ひずみが見られる。しかし、温度履歴回数が増加する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。残留ひずみが発生するのは岩石が熱膨張する際に構成鉱物粒子の膨張量がそれぞれ異なるため、構成鉱物粒子間のマイクロクラックが拡大され、温度を室温に戻しても拡大されたマイクロクラックは完全には元に戻らないことに起因しているものと考えられる。

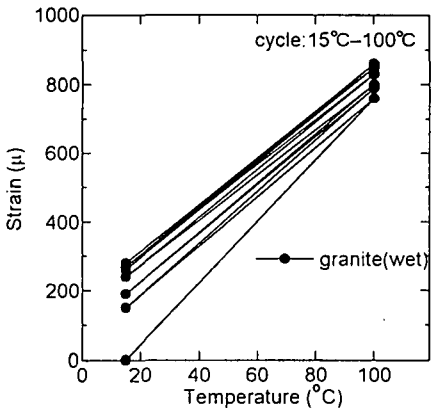


図8 温度履歴に伴う花崗岩のひずみの変化。

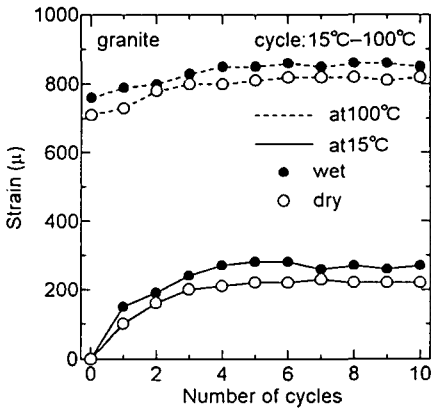


図9 温度履歴に伴う残留ひずみの変化。

3. 温度履歴を受けた空洞周辺岩盤の挙動の解析

3. 1 空洞周辺の温度分布

土被り100mの花崗岩の地山岩盤内に直径10mの円形空洞を設け、熱水を貯蔵する場合を想定する。まず、貯蔵時の空洞周辺の温度分布の経時変化を要素分割法⁴⁾により求めた。この場合、以下に示す3通りの場合を想定した。

- Case 1 地山の初期温度が15℃の状態に熱水を貯蔵し、時間の経過に伴う温度変化を実用上無視できるいわゆる準定常状態になるまで求める。ただし、熱水の温度は常に100℃とする。
- Case 2 地山の温度が準定常状態で熱水の貯蔵をメンテナンス等の理由により1ヶ月間停止する。この場合、空洞内の温度は15℃とする。
- Case 3 Case 2の状態から熱水を貯蔵し、再び準定常状態となるまで求める。

解析に必要な花崗岩の熱物性値については実験により求めた値を用いた。表2に花崗岩の熱物性値を示す。

温度分布の解析結果を図10(a)-(c)に示す。Case 1の場合、初期の時間には急激な温度勾配を示しているが、時間の経過とともに緩慢になり、空洞周辺に影響が及ぶことがうかがえる。貯蔵1年後には温度変化が極めて小さい、準定常状態となる。Case 2の場合、貯蔵を停止した直後から空洞表面付近の温度が低下し、急激な温度勾配を示している。Case 3の場合、再び貯蔵を開始した直後から急激な温度勾配を示し、約1年でCase 1よりは温度の及ぶ範囲が広がる。

表 2 解析に用いた花崗岩の熱物性値。

Heat capacity (cal/(cm ³ ・℃))	Thermal diffusivity (×10 ⁻³ cm ² /s)	Thermal conductivity (×10 ⁻³ cal/(s・cm・℃))
0.632	12.3	7.77

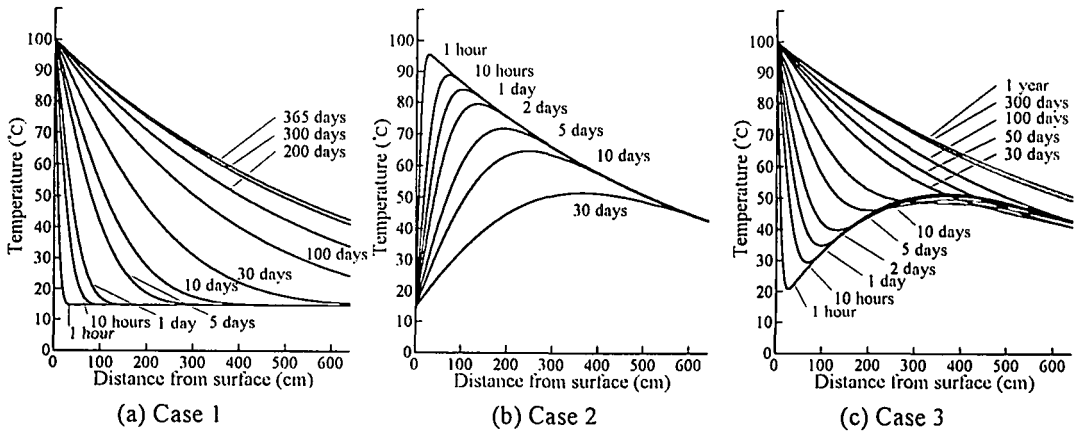


図 10 空洞周辺の温度分布の経時変化。

3. 2 空洞周辺の応力解析

前述の温度分布の解析結果をもとに熱応力を考慮した有限要素法を用いて応力解析を行った。この場合、解析に必要な強度・変形特性は前述の実験結果を用いた。Case 1およびCase 2の場合には温度履歴を受けていない場合の結果を、Case3の場合には温度履歴を受けた場合の結果を用いた。解析に用いた花崗岩の物性値はそれぞれ表3および表4に示した。

解析結果を図11(a)-(c)および図12(a)-(c)に示す。まず、Case 1の場合、岩盤の熱膨張により空洞の接線方向

表3 解析に用いた花崗岩の物性値.

Temperature (°C)	Expansion coefficient (1/°C) × 10 ⁻⁵ (kgf/cm ²) × 10 ⁶	Young's modulus (kgf/cm ²) × 10 ⁶	Poisson's ratio	Compressive strength (kgf/cm ²)	Tensile strength (kgf/cm ²)
10~20	0.000	0.360	0.186	-1453.9	84.2
20~30	0.892	0.363	0.186	-1438.5	83.5
30~40	0.892	0.367	0.186	-1423.1	82.8
40~50	0.892	0.370	0.187	-1407.7	82.1
50~60	0.892	0.374	0.187	-1392.4	81.4
60~70	0.892	0.377	0.187	-1377.0	80.8
70~80	0.892	0.380	0.187	-1361.6	80.1
80~90	0.892	0.384	0.188	-1346.3	79.4
90~100	0.892	0.387	0.188	-1330.9	78.7

表4 解析に用いた温度履歴を受けた花崗岩の物性値.

Temperature (°C)	Expansion coefficient (1/°C) × 10 ⁻⁵ (kgf/cm ²) × 10 ⁶	Young's modulus (kgf/cm ²) × 10 ⁶	Poisson's ratio	Compressive strength (kgf/cm ²)	Tensile strength (kgf/cm ²)
10~20	0.000	0.323	0.174	-1291.1	76.4
20~30	0.686	0.325	0.174	-1286.1	75.8
30~40	0.686	0.327	0.174	-1281.0	75.2
40~50	0.686	0.328	0.174	-1276.0	74.6
50~60	0.686	0.330	0.174	-1270.0	74.0
60~70	0.686	0.331	0.174	-1265.8	73.4
70~80	0.686	0.333	0.174	-1260.8	72.8
80~90	0.686	0.334	0.174	-1255.7	72.2
90~100	0.686	0.336	0.174	-1250.7	71.6

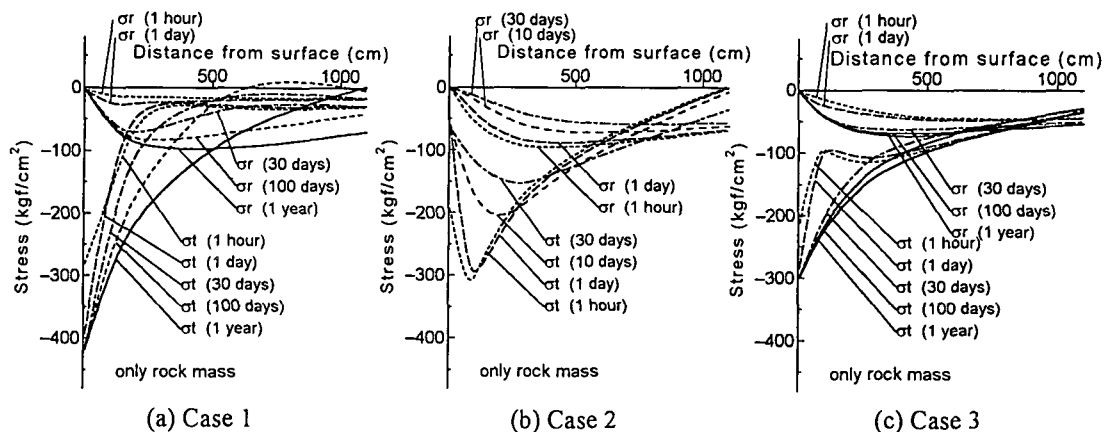


図1 1 水平軸に沿った空洞周辺の応力分布の経時変化.

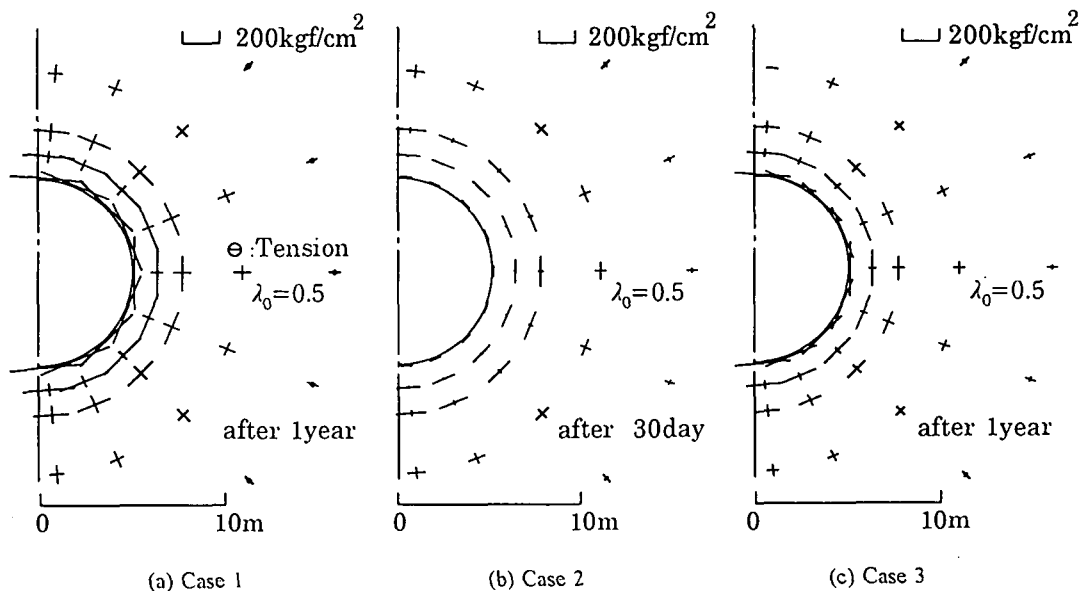


図1 2 空洞周辺の最大および最小主応力の分布.

に大きな圧縮応力が発生し、時間の経過とともに増大している。次にCase 2の場合、空洞表面の温度が低下するため熱応力が減少し、空洞から約3m付近で接線方向の圧縮応力が最も大きくなっている。Case 3の場合、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。いずれの場合にも空洞は安定しており、空洞周辺岩盤が温度履歴を受けても空洞は安定しているものと考えられる。このことは以下の理由によるものと考えられる。すなわち、前述の実験結果から花崗岩は温度の履歴を受けると100℃の下では圧縮強度は約94%になる。しかし、接線弾性係数は約87%、線膨張係数は約77%となるため、解析によって得られた空洞表面付近で発生する熱応力は約25%減少している。このことから空洞は安定している結果となったものと考えられる。

4. 貯蔵時の問題点と対策に関する一考察

前述のように空洞周辺岩盤が高温の温度履歴を受けても空洞は安定していることが解析の結果からわかったが、地山の強度が小さい場合や岩盤に亀裂が存在する場合には熱水の貯蔵によって発生する熱応力の軽減や空洞からの熱水の漏出防止対策について検討を行う必要がある。

ここではそれらの対策の一方法として熱応力の軽減を目的として空洞表面に断熱材の層を設け、さらに熱水の漏出防止対策として高分子系材料の層を断熱材の表面に設けた場合について検討を行った。解析モデルは前述の場合と同様に花崗岩の地山内に円形空洞を設ける場合を想定し、空洞表面に厚さ10cmの断熱材を施し、さらに高分子系材料を3cmの厚さでライニングして空洞の仕上りの内径が10mとなる場合を想定し

表 5 解析に用いた高分子系材料および断熱材の熱物性値.

	Heat capacity (cal/(cm ³ ·°C))	Thermal diffusivity (cm ² /s)	Thermal conductivity (cal/(cm·s·°C))
urethane resin	0.18	0.44x10 ⁻³	0.08x10 ⁻³
vinyl ester resin	0.35	1.0x10 ⁻³	0.35x10 ⁻³
adiabatical material	9.0x10 ⁻³	5.2x10 ⁻³	0.47x10 ⁻⁴

た。この場合、高分子系材料、断熱材および岩盤はそれぞれを防水シート等で互いに分離し、それぞれが自由に伸縮できる場合を想定している。用いる断熱材および高分子系材料については種々考えられるが、数種類の断熱材および高分子系材料の高温下における強度・変形特性、熱物性値を実験により求め比較し、とりわけ熱水貯蔵に有利であると考えられるものを選定した。断熱材はA社製の硬質ウレタンフォームを高分子系材料はM社製のビニルエステル樹脂およびT社製のウレタン樹脂を用いることとした。解析に用いた断熱材および高分子系材料の熱物性値を表5に示した。また、高分子系材料の強度・変形特性については表6および表7に示した。

表 6 解析に用いたビニルエステル樹脂の物性値.

Temperature (°C)	Expansion coefficient (1/°C)x10 ⁻⁶	Young's modulus (kgf/cm ²)x10 ⁴	Poisson's ratio	Compressive strength (kgf/cm ²)	Tensile strength (kgf/cm ²)
10~ 20	0.0000	3.159	0.430	-891.0	660.0
20~ 30	0.6900	3.061	0.430	-790.0	607.0
30~ 40	0.6900	2.962	0.430	-697.0	550.0
40~ 50	0.6900	2.792	0.430	-608.0	491.0
50~ 60	0.6900	2.703	0.430	-518.0	427.0
60~ 70	0.6900	2.658	0.430	-445.0	360.0
70~ 80	0.6900	2.613	0.430	-382.0	285.0
80~ 90	0.6900	2.568	0.430	-330.0	206.0
90~100	0.6900	2.523	0.430	-275.0	115.0

表 7 解析に用いたウレタン樹脂の物性値.

Temperature (°C)	Expansion coefficient (1/°C)x10 ⁻⁶	Young's modulus (kgf/cm ²)x10 ²	Poisson's ratio	Compressive strength (kgf/cm ²)	Tensile strength (kgf/cm ²)
10~ 20	0.0000	1.793	0.432	-14.2	118.4
20~ 30	1.3000	1.725	0.433	-13.4	110.4
30~ 40	1.4000	1.657	0.435	-12.7	102.5
40~ 50	1.5167	1.590	0.437	-12.0	94.6
50~ 60	1.6375	1.522	0.438	-11.3	86.7
60~ 70	1.7300	1.454	0.440	-10.8	79.8
70~ 80	1.7750	1.386	0.441	-10.6	74.1
80~ 90	1.7928	1.319	0.443	-10.4	68.3
90~100	1.7500	1.251	0.444	-10.2	62.6

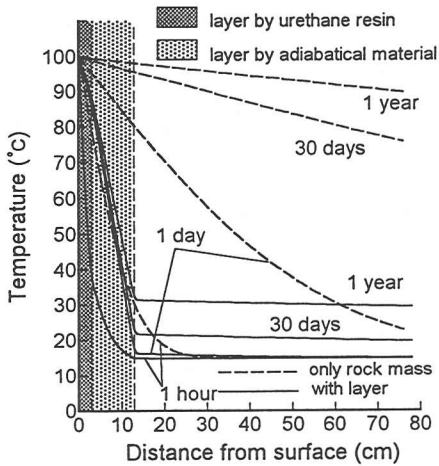


図 1 3 空洞周辺の温度分布の経時変化.

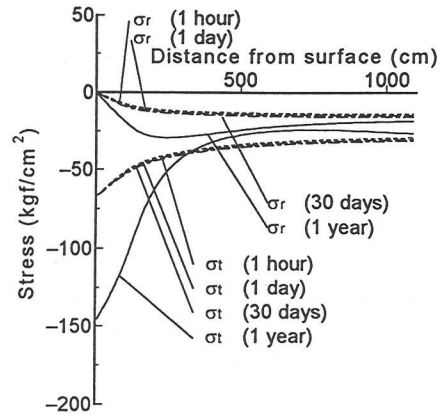


図 1 4 水平軸に沿った応力分布の経時変化.

まず温度分布の経時変化を求めた結果を図13に示す。尚、この場合、岩盤、断熱材および高分子系材料と異なる材料に温度が伝導する、いわゆる複合材料問題となるためこれに対応した要素分割法⁵⁾を用いて解析を行った。ここでは代表例として高分子系材料はウレタン樹脂を用いた場合についてのみ示している。高分子系材料部分、断熱材部分、岩盤部分においてそれぞれ温度勾配が異なっており、断熱材部分では急激な温度勾配を生じていることがわかる。また断熱材の効果により熱伝導に遅れがみられる。また極端な例として50年間常に100℃の熱水を貯蔵した場合においても、断熱材を設けた場合には熱伝導に遅れがみられた。このことから断熱材を設けることは熱応力軽減に有効な手段と推察される。

次にこの温度分布の解析結果をもとに応力分布の経時変化を求めた。結果を図14および図15に示した。空洞表面付近の岩盤には空洞の接線方向に圧縮応力が発生しているが、断熱材の効果により岩盤のみの場合に比べ、熱応力が軽減されている。一方、高分子系材料は熱膨張するが破壊に至るような応力は発生せず安定していることがわかった。

以上の結果から今回用いた方法は熱応力軽減と熱水の漏出防止対策として有効な手段となり得るものと考えられる。

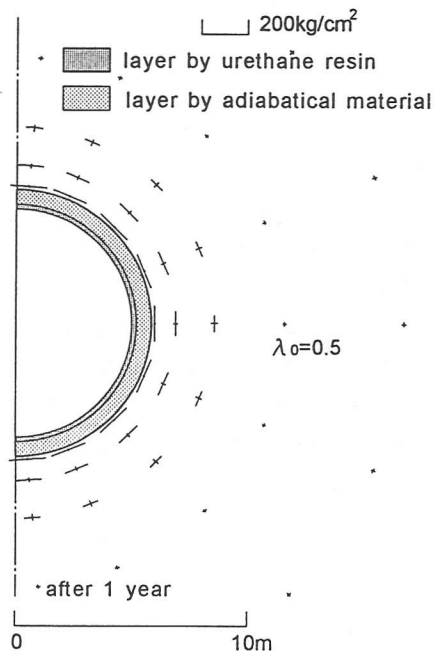


図 1 5 貯蔵 1 年後の応力分布.

5. 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) 岩石の圧縮および引張強度は温度履歴回数が増加するのに伴い小さくなる。これは岩石の構成鉱物粒子が温度履歴を受けた際、それぞれの熱膨張、収縮量が異なり、鉱物粒子間のマイクロクラックが拡大されたためと考えられる。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) 温度履歴に伴う試料のひずみを測定した結果、温度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見られた。しかし、温度履歴回数が増加するの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。

(3) 解析の結果、花崗岩の地山内に熱水を貯蔵した場合、岩盤の熱膨張により空洞の接線方向に大きな圧縮応力が発生することがわかった。この場合、空洞は安定していた。また、温度履歴を受けた場合についても解析した結果、空洞は安定していた。

(4) 熱応力軽減と熱水の漏出防止対策を同時に行う方法として、断熱材と高分子系材料の層を空洞表面に設けることについて解析により検討した結果、有効な方法となり得ることがわかった。

参考文献

- 1) 工藤洋三・橋本堅一・佐野修・中川浩二：花崗岩の力学的異方性と岩石組織欠陥の分布，土木学会論文集，No.370/Ⅲ-5，pp.189-198，1986。
- 2) 山口梅太郎・宮崎道雄：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，Vol.86，No.986，pp.347-348，1970。
- 3) 稲田善紀・寺田孚・伊藤一郎：岩石の線膨張係数について，水曜会誌，Vol.17，No.5，pp.200-203，1971。
- 4) 稲田善紀・重信純：液化天然ガスを地下岩盤内空洞に貯蔵した場合の空洞周辺の温度分布，日本鉱業会誌，Vol.99，No.1141，pp.179-185，1984。
- 5) 稲田善紀・関正造：低温物質貯蔵時の液漏れおよび冷気漏れ対策としての高分子系材料の適用性，土木学会論文集，No.554/Ⅲ-37，pp.259-268，1996。