

熱水の岩盤内空洞貯蔵における岩盤の挙動 BEHAVIOR OF ROCK MASS DUE TO HEATED WATER STORAGE IN OPENINGS

稲田善紀*・木下尚樹**

Yoshinori INADA and Naoki KINOSHITA

The authors have proposed and discussed temporary storage of heated water in openings excavated in rock mountains. Heated water, produced by surplus heat from garbage burning plants, should be used for many purposes such as district heating, heated water supply, green houses, etc. This method has the advantages of efficient utilization of land, saving energy, preservation of the environment, etc. In this case, rock mass around the opening receives the affects of thermal hysteresis of high temperatures as the quantity of heated water continually changed according to its use. In this study, strength and deformation characteristics of some types of rocks were examined after receiving thermal hysteresis of high temperatures. The temperature and stress distribution around openings were analyzed by using FDEM and FEM. Then the effect of thermal hysteresis on thermal behavior of some types of rock mass around openings was discussed.

Key words : heated water storage, openings, thermal behavior, rock mass, thermal hysteresis

1. 緒 言

国土が狭く山地が多い, エネルギー資源が乏しい, 地震が多いなどの特殊事情を持つ我が国においては, 土地の立体的有効利用, エネルギーの大型貯蔵, 省エネ, 耐震性等を考慮した施設の建設は重要な課題であると考えられる. これらの条件を兼ね備えたものとして地下空間の利用が考えられ, その一つとしての岩盤内空洞はこれまでに主に地下発電所, 石油の備蓄などに用いられてきた. 近年, その他の新たな岩盤内空洞の利用が計画, 検討されてきているが, これまで筆者らは特に岩盤の断熱性というメリットを生かした高温物質・低温物質の貯蔵に岩盤内空洞を利用することについて提案し, 検討を行ってきている^{1), 2)}.

高温物質の岩盤内貯蔵としての「熱水貯蔵システム」はゴミ焼却等の廃熱を利用し熱湯を得, これを地域暖房や一般家庭への給湯, 融雪道路, 農漁業要など多目的に利用する場合の一時貯蔵施設として岩盤内空洞を利用するものであり, 土地の立体的有効利用や省エネだけでなく, 環境に与える影響も少ないことが挙げられる. 熱水の貯蔵した場合, 通常の常温の貯蔵と異なり, 空洞周辺岩盤は熱の影響を受けることとなる. そのため, 熱応力の発生に伴う周辺岩盤の熱的な挙動を把握しておく必要がある.

本研究では岩盤内空洞に熱水を貯蔵した場合を想定し, 代表的な数種類の岩盤について温度分布および応力解析を行い, 周辺岩盤の熱的な挙動を検討することとした. その際必要となる岩盤物性については, 解析に先立ち室内実験により高温の履歴を受けた岩石の諸物性を求め, 考察した後を用いることとした. これにより, 岩盤の物性の違いによる岩盤の熱的な挙動の違いについて考察した結果を述べる.

キーワード: 熱水貯蔵, 岩盤空洞, 熱的挙動, 熱履歴

* 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

2. 高温の履歴を受けた岩石の諸物性

2・1 熱履歴の与え方

実験に用いた岩石は2種類の花崗岩、安山岩、砂岩および凝灰岩である。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 $\phi 3 \times 6\text{cm}$ 、圧裂引張試験用には $\phi 3 \times 3\text{cm}$ 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(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時間脱気しながら試料に蒸留水を浸潤させた湿潤状態のもの(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。

表-1 実験に用いた岩石の物理的性質

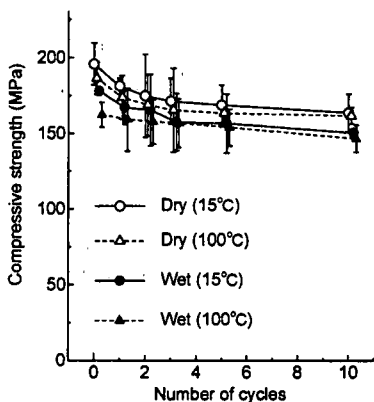
rocks	porosity (%)	moisture content ratio (%)	degree of saturation (%)	bulk specific gravity	true specific gravity
granite A(Dry)	0.8	0.09	28.5	2.65	2.67
granite A(Wet)	0.8	0.24	81.3	2.65	2.67
granite B(Dry)	1.5	0.03	5.5	2.63	2.67
granite B(Wet)	1.5	0.24	88.3	2.63	2.67
andesite(Dry)	2.7	0.90	41.4	2.60	2.67
andesite(Wet)	2.7	1.90	88.3	2.60	2.67
sandsotne(Dry)	3.8	1.01	20.5	2.54	2.64
sandsotne(Wet)	3.8	2.01	90.3	2.54	2.64
tuff(Dry)	37.1	1.39	5.8	1.56	2.45
tuff(Wet)	37.1	24.00	99.6	1.91	2.45

実験に先立ち供試体に熱履歴を与える方法は以下のとおりとした。供試体の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³⁾。水は1気圧の下では100℃で沸騰するため、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℃の状態では60分間保温した。ここまでの過程を1サイクルとする。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めるため、同条件で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。

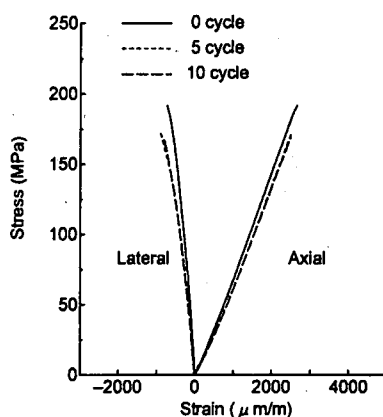
2・2 強度試験の結果および考察

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。

図-1～図-3は実験結果の内、代表例として大島花崗岩(granite A)、安山岩、凝灰岩について各履歴回数における圧縮強度と応力-ひずみ関係を求めた結果である。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。強度が低下した原因としては岩石の構成鉱物粒子の熱膨張・収縮量の差異により、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、この圧縮試験の際に

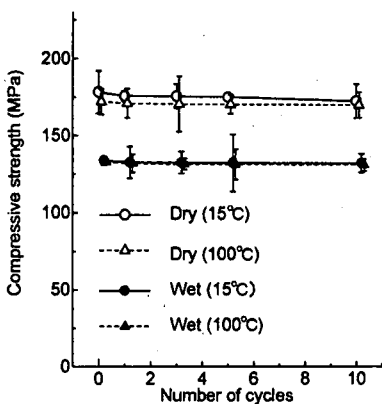


(a) 圧縮強度

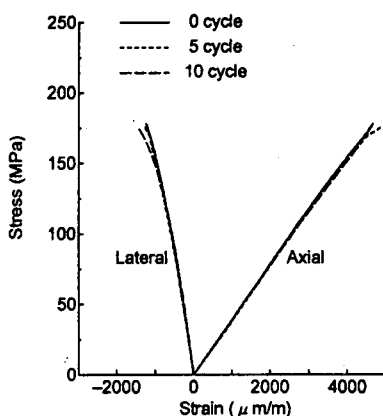


(b) 応力-ひずみ関係

図-1 熱履歴を受けた大島花崗岩の圧縮強度試験結果

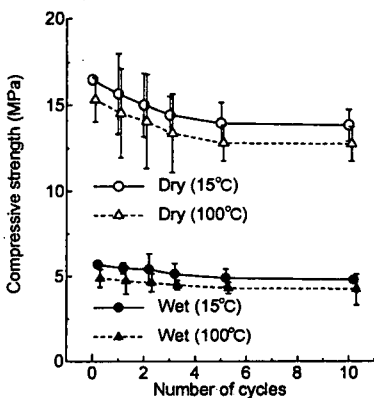


(a) 圧縮強度

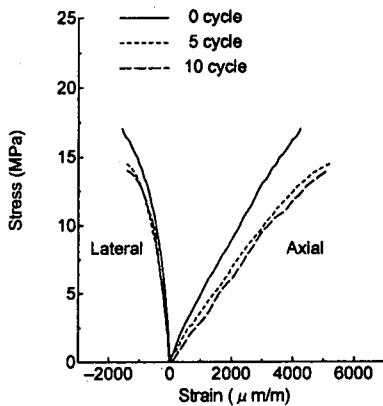


(b) 応力-ひずみ関係

図-2 熱履歴を受けた安山岩の圧縮強度試験結果



(a) 圧縮強度



(b) 応力-ひずみ関係

図-3 熱履歴を受けた凝灰岩の圧縮強度試験結果

得られた応力-ひずみ曲線から、履歴回数の増加に伴い同応力におけるひずみは増大しているが、これについても安山岩では変化は小さく、凝灰岩では変化が大きいことがわかった。これにより、弾性係数も熱履歴に伴い低下することがうかがえる。圧裂引張強度についても圧縮強度と同様の傾向が得られた。また、履歴温度幅が大きい方が強度に影響することがわかった。

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⁴⁾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-4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、履歴に伴う弾性波伝播速度の変化を図-5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。次に熱履歴によって発生するマイクロクラックを直接観察することを試みた。図-6は履歴前と履歴後に供試体の同一場所において撮影した写真である。履歴後にクラックの拡大や新たなクラックが生じていることが確認できる。

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。

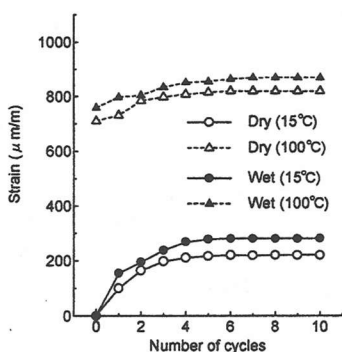


図-4 熱履歴と残留ひずみの関係

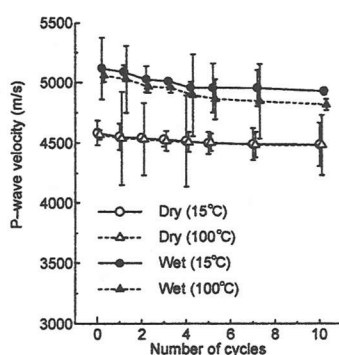
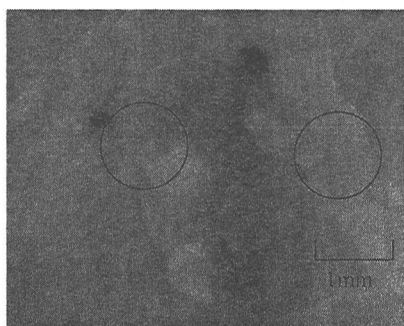
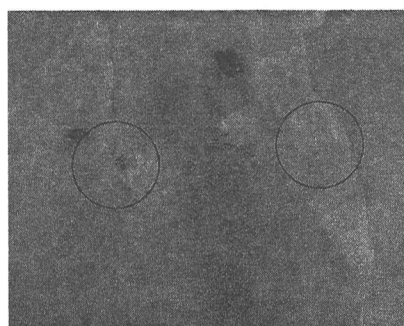


図-5 熱履歴と弾性波伝播速度の関係



(a) 熱履歴を受ける前



(b) 熱履歴を受けた後 (10 サイクル)

図-6 熱履歴を受けた供試体表面の拡大写真 (稲田花崗岩)

3. 空洞周辺岩盤の挙動

3・1 解析方法

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℃一定とする)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⁹⁾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。次に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⁹⁾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。

空洞周辺岩盤が熱履歴を受けた場合の挙動を知るため、以下の 2 通りの解析を行うこととした。

Case 1：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 1 ヶ月間停止する。空洞内の温度は 15℃とする。

この 2 通りの解析を繰り返すことにより、周辺岩盤が熱履歴を受けることを表現する。

解析に必要な岩石の物性値については前述の実験により求めた値を用いることとした。この場合履歴を受けた岩石の物性値に関しては、それぞれの履歴回数、履歴幅、温度に対する物性値を実験結果より算出、推定し、用いることとした。代表例として表-2 に大島花崗岩の物性値を示した。

表-2 解析に用いた大島花崗岩の物性値

(a) cycle 10, 15℃~100℃

Temperature (°C)	Expansion coefficient (1/°C) × 10 ⁻³	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Compressive strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
10~20	0.000	51.7	0.183	-155.4	7.2
20~30	0.680	52.0	0.182	-152.9	7.2
30~40	0.680	52.4	0.182	-152.5	7.1
40~50	0.680	52.7	0.182	-152.1	7.1
50~60	0.680	53.1	0.182	-151.6	7.1
60~70	0.680	53.4	0.182	-151.2	7.0
70~80	0.680	53.7	0.182	-150.7	7.0
80~90	0.680	54.1	0.182	-150.3	7.0
90~100	0.680	54.4	0.182	-149.8	7.0

(b) cycle 0

Temperature (°C)	Expansion coefficient (1/°C) × 10 ⁻³	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Compressive strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
10~20	0.000	54.8	0.191	-181.6	8.0
20~30	0.892	55.2	0.191	-179.7	8.0
30~40	0.892	55.6	0.191	-177.8	7.9
40~50	0.892	56.1	0.191	-175.9	7.8
50~60	0.892	56.5	0.191	-174.0	7.7
60~70	0.892	56.9	0.191	-172.1	7.6
70~80	0.892	57.4	0.191	-170.3	7.6
80~90	0.892	57.8	0.191	-168.4	7.5
90~100	0.892	58.2	0.191	-166.5	7.4

3・2 解析結果および考察

温度分布の解析結果として大島花崗岩および凝灰岩の場合の結果を図-7、図-8に示す。熱拡散率の値は $12.3 \times 10^{-3} (\text{cm}^2/\text{sec})$ である。Case 1 (履歴なし) においては、初期の時間には急激な温度勾配を示しており、空洞周辺にはまだ温度が及んでいないことがわかる。また、時間の経過とともにその勾配は緩やかになり、空洞周辺に温度が及んでいくことがうかがえる。また、空洞表面から同一距離における温度変化は、時間の経過とともに緩慢となり、貯蔵 1 年後において温度変化が実用上無視できるいわゆる準定常状態となってい

る。Case 2 (履歴 10 回目) の場合では、熱水の貯蔵を停止した直後から空洞表面の温度が低下し、急激な温度勾配を示している。しかし、30 日後までに温度が低下するのは空洞表面から 7m 程度までであり、それより遠い位置では温度低下はあまり見られない。従って空洞周辺岩盤は熱履歴を受けるが、その領域は 7m 程度であり、それより外の領域では熱履歴を受けないことがわかった。Case 1 (履歴 10 回目) の場合では、熱水の貯蔵とともに再び急激な温度勾配を示しており、約 300 日後において貯蔵の停止前の温度分布と同じになり、その後、温度の及ぶ範囲が広がっている。安山岩および砂岩においては熱履歴を受ける領域は空洞表面から約 5m であった。また、凝灰岩においては熱拡散率が $3.8 \times 10^{-3} (\text{cm}^2/\text{sec})$ と他の岩石に比べて著しく小さいため空洞周辺岩盤の熱伝導は遅れが大きく、温度の及ぶ範囲も最も小さいことがわかり、熱履歴を受ける領域は空洞表面から約 4m と最も小さいことがうかがえる。

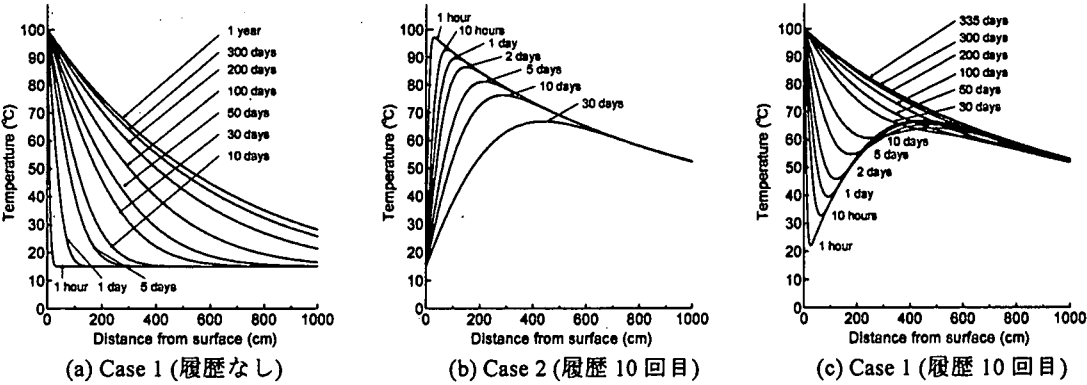


図-7 空洞周辺の温度分布の経時変化 (大島花崗岩)

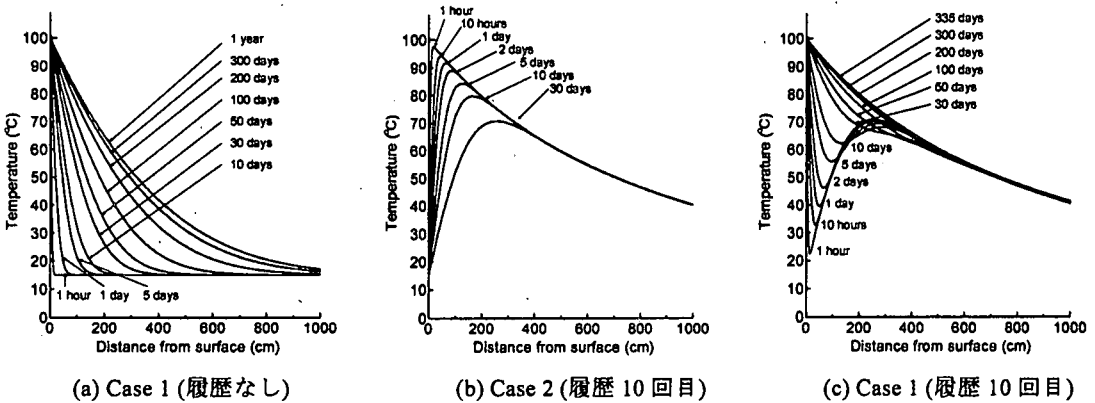
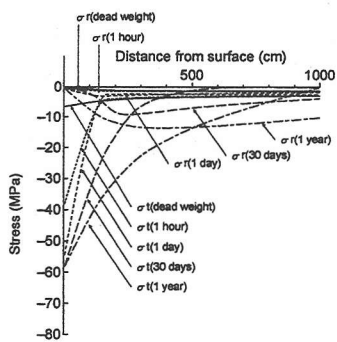


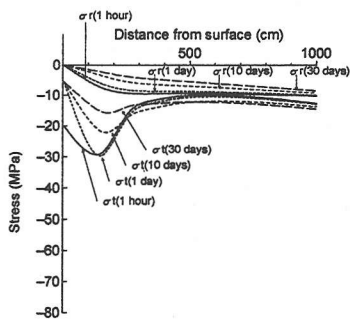
図-8 空洞周辺の温度分布の経時変化 (凝灰岩)

次に応力解析の結果について述べる。得られた温度分布から、大島花崗岩においては空洞表面から 220cm の距離までは 15℃から 100℃の幅の熱履歴を受けたものとし、220cm から 700cm の距離においては 15℃から 60℃の幅の熱履歴を受けたものとし、それ以降は熱履歴を受けていないものとして解析を行った。また、凝灰岩の場合では空洞表面から 1.4m 間での距離までは 15℃から 100℃の幅の熱履歴、1.4m から 3.8m の距離においては 15℃から 60℃の幅の熱履歴、それ以降は熱履歴を受けていないものとして解析を行った。その他の岩石についても温度分布の解析結果より同様に履歴の範囲を仮定した。

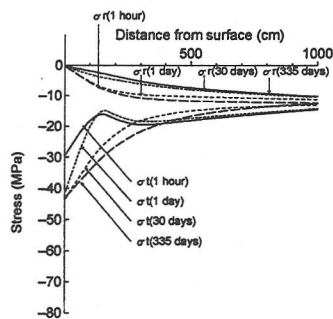
得られた結果を大島花崗岩は図-9、図-10に、凝灰岩は図-11、図-12に示す。大島花崗岩では、Case 1 (履歴なし) においては熱水貯蔵直後、空洞周辺の熱膨張により岩盤は自由面である空洞内部に張り



(a) Case 1 (履歴なし)

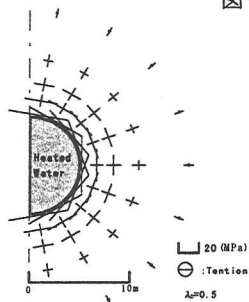


(b) Case 2 (履歴 10 回目)

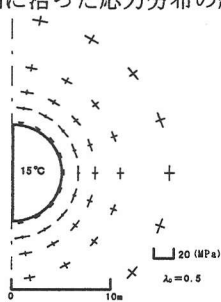


(c) Case 1 (履歴 10 回目)

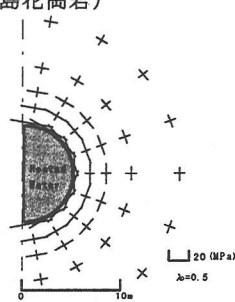
図-9 水平軸に沿った応力分布の経時変化 (大島花崗岩)



(a) Case 1 (履歴なし)

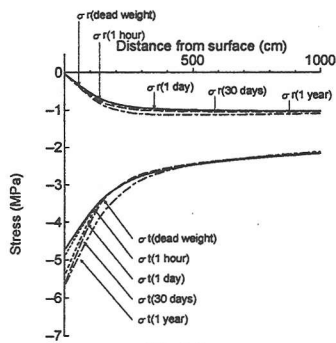


(b) Case 2 (履歴 10 回目)

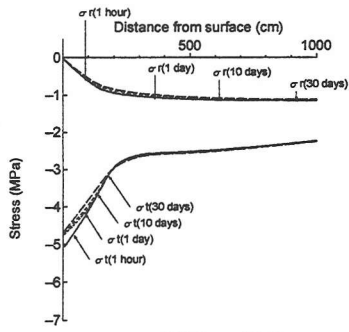


(c) Case 1 (履歴 10 回目)

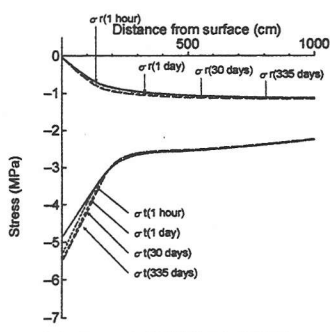
図-10 最大・最小主応力方向線図 (大島花崗岩)



(a) Case 1 (履歴なし)

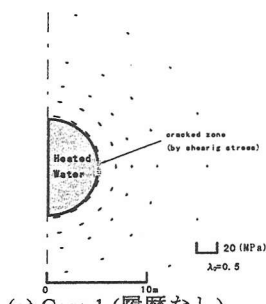


(b) Case 2 (履歴 10 回目)

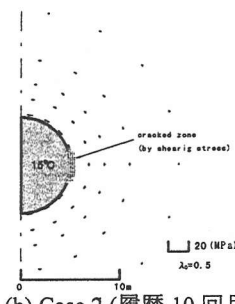


(c) Case 1 (履歴 10 回目)

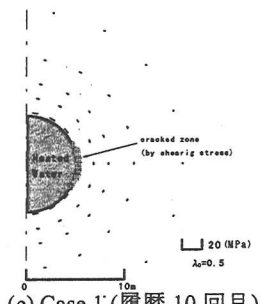
図-11 水平軸に沿った応力分布の経時変化 (凝灰岩)



(a) Case 1 (履歴なし)



(b) Case 2 (履歴 10 回目)



(c) Case 1 (履歴 10 回目)

図-12 最大・最小主応力方向線図 (凝灰岩)

出し、できるだけ円に近い状態になろうとするが、逆にこれは空洞を縮めることになり、その結果円周方向に大きな圧縮応力が生じたものと推察される。また時間の経過に伴い温度が周辺に及び、半径方向および接線方向に大きな圧縮応力が発生したものと考えられる。Case 2（履歴 10 回目）においては、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 2m 付近で接線の圧縮応力が最も大きくなっている。Case 1（履歴 10 回目）においては、再び空洞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ことがわかるが、熱履歴を受けた場合には発生する応力が減少していることがわかる。これは、熱履歴を受けると接線弾性係数が小さくなることに起因しているものと思われる。いずれの場合においても空洞は安定しており、大島花崗岩の空洞周辺岩盤が熱履歴を受けても空洞は安定しているものと考えられる。これは、前述の実験結果から花崗岩の圧縮強度は熱履歴を受けると 100℃においては 91%に低下する。しかし、接線弾性係数および線膨張係数においてもそれぞれ約 89%および約 77%に低下することから、解析から得られた空洞表面付近で発生する熱応力も約 74%に減少している。このことから空洞は破壊せずに安定している結果となったものと考えられる。

凝灰岩においては、空洞表面に発生する熱応力は他の岩石と比較して非常に小さい。これは、他の岩石と比べて接線弾性係数が小さいため、発生する熱応力も小さいものと考えられる。また、他の岩石よりも応力分布の経時変化が小さい。これについても、発生する熱応力が他の岩石と比較して小さく、自重による応力が大部分を占めるためであると考えられる。また、凝灰岩においては貯蔵 1 日後において空洞の水平軸付近がせん断破壊することがわかった。これは、凝灰岩の強度自体が他の岩石と比較してかなり小さいためであると考えられる。また、履歴を受けた場合においては、せん断破壊が進行していることがわかった。

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。

本研究の遂行にあたり、当時愛媛大学大学院の学生であった宮本賢人氏（現東興建設（株））には実験および解析でご協力いただいた。ここに謝意を表しておく次第である。

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) 例えば稲田善紀・木下尚樹・関正造・松尾暁・成行惇・越智健三：低温の影響を受けた空洞周辺岩盤の熱的挙動に関する一二の知見，土木学会論文集，547/Ⅲ-36，pp.211- 220，1996。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 稲田善紀：岩盤工学，pp.180-188，森北出版，1997。
- 6) 稲田善紀：地下の空間利用，pp.112-119，森北出版，1989。