

# 熱水の地山岩盤内貯蔵における 一二の問題点と対策

稲田善紀<sup>1</sup>・木下尚樹<sup>2</sup>・松嶋信行<sup>3</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

<sup>2</sup>正会員 工修 愛媛大学助手 工学部環境建設工学科

<sup>3</sup>学生会員 愛媛大学大学院 理工学研究科土木海洋工学専攻

ゴミ焼却等で発生する廃熱を利用して水を熱水に変え、多目的に利用する場合、季節や一日の時間帯による熱水の使用量の変動に関係なく、安定供給するための一時的な貯蔵施設が必要となる。土地の立体的有効利用や環境保全等の観点から、地山岩盤内に空洞を設けて貯蔵することを想定した場合、空洞周辺岩盤に発生する熱応力や、空洞からの熱水の漏出が問題となる。本研究では、熱応力軽減対策として空洞表面に種々の断熱材を施すことを想定し、空洞周辺の温度分布および応力分布を求め、熱応力軽減に有効な手段となることを示した。また、熱水の漏出防止対策として、種々の高分子系材料を空洞表面にライニングした場合について検討し、漏出防止対策に有効な手段となることを示した。

**Key Words** : heated water storage, opening, reduction of thermal stress, preventing leakage, adiabatical material, resin

## 1. 結 言

筆者らはこれまで「熱水貯蔵システム」を提案し、種々の検討を行ってきた<sup>1)~4)</sup>。このシステムは、省エネルギー対策の一環として、毎日のゴミ焼却等で発生する廃熱を利用して水を熱水に変え、一般家庭への給湯、地域暖房、温水プール、ビニールハウス等多目的に利用しようというもので、質の高い生活を享受できるという点で、地域の過疎化対策やゴミ焼却場の立地等にも有効であると考えられる。

多目的に熱水を使用する場合、使用量が一日の時間帯や季節によって変動することから、安定供給のための一時的な貯蔵を行う施設が必要となる。熱水の貯蔵方法としては、地山岩盤内に空洞を設け一時貯蔵することを筆者らは提案している<sup>1)~4)</sup>。この方法は、土地の立体的有効利用や環境の保全等で利点があると考えられる。

これまでの研究から、熱水貯蔵時には空洞周辺岩盤に熱膨張による圧縮応力が空洞の接線方向に発生することがわかっている<sup>1)~4)</sup>。また、貯蔵量の変動により、空洞周辺岩盤が熱の影響を繰り返し受ける

場合の熱的挙動についても一部報告している<sup>5),6)</sup>。このように、周辺岩盤が熱履歴を受けることや、岩盤には潜在的に亀裂が存在することなどを考慮すると、空洞をより安定した状態で貯蔵するには熱応力を極力軽減させる必要がある。また、空洞からの熱水の漏出も問題となってくる。

本研究では熱応力の軽減対策の一つの方法として、空洞表面に断熱材を施すことを想定した。まず、高温下における種々の断熱材の熱物性値を実験により求め、地山岩盤と想定している花崗岩と比較し、高温下における断熱材の熱的性質を把握した。次に要素分割法<sup>7)</sup>を複合材料にも適用できるように発展させ、これを用いて空洞周辺岩盤の温度分布の経時変化を解析した。さらに温度分布を用いて応力解析を行い、断熱材による熱応力軽減の効果について考察した。

熱水の漏出防止対策としては、空洞表面に高分子系材料をライニングすることを想定した。ここでもまず、高温下における種々の高分子系材料の強度・変形特性および熱物性値を実験により求め、求めた値を用いて温度分布および応力分布を解析により求

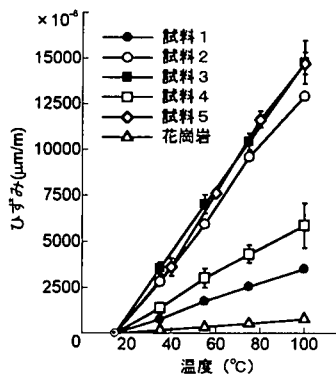


図-1 高温下における試料のひずみ

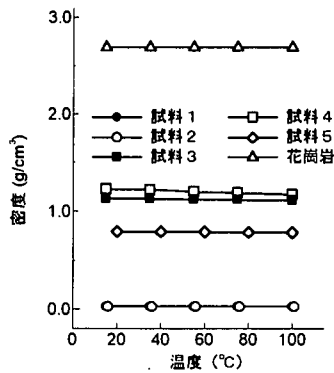


図-2 高温下における試料の密度

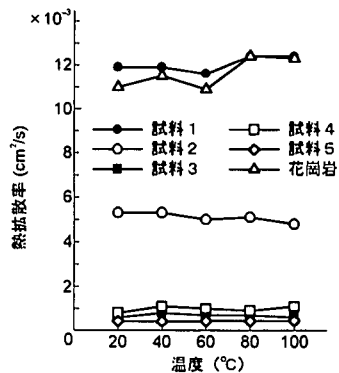


図-3 高温下における試料の熱拡散率

め、漏出防止対策としての高分子系材料の適用性を検討した。また、熱応力軽減と漏出防止を同時に行う方法についても考察した。

## 2. 高温下における断熱材および高分子系材料の熱物性値

### (1) 実験に用いた試料

本実験で用いた断熱材はA社製の押出発泡ポリスチレン（以下試料1と呼ぶ）およびB社製の硬質ウレタンフォーム（以下試料2と呼ぶ）である。両者とも一般的に建築材料として用いられている断熱材である。吸水率は前者が $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ 以下、後者が $0.025\text{g}/\text{cm}^3$ 以下であるが、実験に供する際には各実験用に成形後、室内で7日間自然乾燥し、これをデシケータ内でさらに7日間乾燥した。

高分子系材料はC社製のエポキシ樹脂（以下試料3と呼ぶ）、D社製のビニルエステル樹脂（以下試料4と呼ぶ）およびC社製のウレタン樹脂（以下試料5と呼ぶ）を用いた。これらの高分子系材料は、土木、建築の分野では海水からの防蝕防水や接着剤、耐酸性が要求される場所のライニングとして用いられているものである。試料3は重量比で20%、試料4は2%の硬化剤を加え、試料5は体積比で1:1の硬化剤を加えて型枠に打設し、硬化させた。硬化後、脱型して室内にて7日間以上養生し、各実験用に成形した。

### (2) ひずみおよび密度

本実験では石英ガラス棒を用いた比較法<sup>9)</sup>により、室温（ここでは $15^\circ\text{C}$ ）から $100^\circ\text{C}$ までの温度上昇に伴うひずみを測定した。供試体は $\phi 3 \times 10\text{ cm}$ に成形し、端面の平行度および平坦度は $5/100\text{ mm}$ 以内とし

た。熱源にはヒーターを用い、昇温速度は $1^\circ\text{C}/\text{min}$ とした。実験を行う際に供試体と同型の試料の中心温度を測定した結果、雰囲気温度が所定の温度に達した後、遅いものでも約20分間で供試体全体が所定の温度になることがわかった。また、ひずみの変化も約20分間で収束したが、念のためひずみを測定しながら60分間の保温を行った。実験回数は最低3回行った結果を平均した。結果を図-1に示す。図中に示す値の幅は標準偏差を表している。いずれの試料も温度の上昇に伴い、ほぼ直線的に膨張している。この場合、花崗岩のひずみは $100^\circ\text{C}$ で約 $800\text{ }\mu\text{m}/\text{m}$ であった。試料1は花崗岩の約5倍、試料2は約17倍、試料3および試料5は約19倍、試料4は約8倍で、断熱材、高分子系材料は花崗岩に比べて熱膨張量が大きい。また、一旦 $100^\circ\text{C}$ にしておき、室温まで降温させた場合の残留ひずみは断熱材、高分子系材料ともほとんど測定されず、実用上は無視できるものと考えられる。

ひずみから密度の変化を算出した結果が図-2である。温度の上昇とともに密度は低下しており、最もひずみの大きかった試料3では $20^\circ\text{C}$ から $100^\circ\text{C}$ で約5%減少していた。

### (3) 熱拡散率

要素分割法に実測値を適用させる方法<sup>9)</sup>で熱拡散率を求めた。供試体は $15 \times 25 \times 10\text{ cm}$ に成形し、供試体に1次元の熱伝導が得られるように5つの面を別の断熱材（厚さ $20\text{ cm}$ ）で覆い、外気の影響を受けないようにして、残りの1面（ $15 \times 10\text{ cm}$ ）に約 $100^\circ\text{C}$ の熱水を直接接点させた。この面から $5\text{ mm}$ 間隔で直径 $2\text{ mm}$ 、深さ $50\text{ mm}$ の孔を5孔設け、直径 $1\text{ mm}$ の熱電対を挿入し、孔壁の熱源側に接触させ、間隙は試料の粉を詰めた。これより得られる各距離における温度

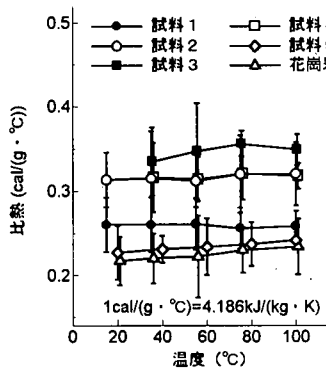
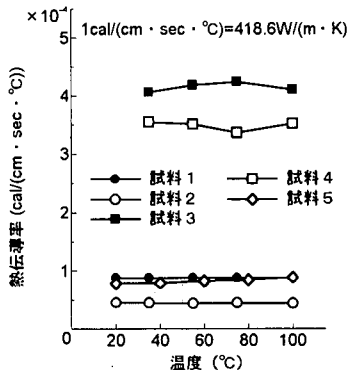
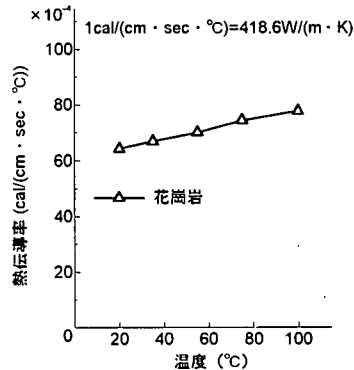


図-4 高温下における試料の比熱



(a) 断熱材および高分子系材料



(b) 花崗岩

図-5 高温下における試料の熱伝導率

の経時変化を要素分割法に適用して、熱拡散率を求めた。結果が図-3である。花崗岩の熱拡散率は $12.3 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$ 程度であった。断熱材の試料1は花崗岩と同程度、試料2は1/2程度であった。これに対し、高分子系材料の試料3および試料4は $1.0 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$ 程度で花崗岩の1/10以下、試料5は $0.45 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$ 程度で花崗岩の1/20以下である。いずれの場合においても温度による変化は小さくなく、実用上は一定値とみなせるものと考えられる。

#### (4) 比熱および熱伝導率

比熱の測定に用いた供試体は熱の授受が効率よく行える必要がある。ここでは $40 \times 40 \times 5 \text{ mm}$ に成形したものを用いた。供試体の質量を予め測定して、断熱ボックス内で $1^\circ\text{C}/\text{min}$ で加熱し、所定の温度で60分間保温した。この状態の供試体を蒸留水を入れた断熱容器に投入し、攪拌して温度変化を測定した。この温度変化から比熱を求めた結果が図-4である。花崗岩の比熱が最も小さく、試料3が最も大きいが $0.2 \sim 0.35 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$ 程度の値である。また、温度上昇に伴う比熱の変化はいずれの試料でも小さい。

前述の密度、熱拡散率および比熱から熱伝導率を算出した結果が図-5(a), (b)である。花崗岩は温度の上昇とともに増加の傾向にあるが、他の試料は温度に関係なくほぼ一定の値となった。断熱材の試料1および試料2は花崗岩の熱伝導率の1/80~1/160程度、高分子系材料の試料3および試料4は1/20程度、試料5は1/80程度であった。これより断熱材は岩石と比べ熱をきわめて遅く伝えることが予想される。

### 3. 高温下における高分子系材料の強度・変形特性

#### (1) 圧縮強度および引張強度

一軸圧縮試験に用いた供試体は $\phi 30 \times 60 \text{ mm}$ である。また、引張強度については花崗岩は圧裂試験としたため $\phi 30 \times 30 \text{ mm}$ とした。端面の平行度および平坦度は $5/100 \text{ mm}$ 以内になるように成形した。高分子系材料は一軸引張試験としたため、試料3および試料4はダンベル型に、試料5は厚さ $3 \text{ mm}$ のダンベル状に成形した。強度試験の概念図を図-6に示す。圧縮試験時には供試体にひずみゲージを貼り付け、供試体の縦ひずみおよび横ひずみを測定した。ひずみゲージおよびリード線の温度変化による影響はダメージゲージを用いてキャンセルした。供試体は加熱ボックス内で $1^\circ\text{C}/\text{min}$ で加熱し、所定の温度に達した後、60分間保温し、各実験を行った。なお、供試体を圧縮する際は $6000 \mu/\text{min}$ でひずみ速度を一定とした。各実験とも5回の試験を行い結果を平均した。圧縮試験および引張試験の実験結果を図-7および図-8に示す。高温下では高分子系材料は圧縮した場合破壊には至らず、応力-ひずみ曲線が弾性的に立ち上がり途中で傾きが変化し、その後は大きく塑性変形していた。そこで便宜的に、応力-ひずみ曲線が変化する前後における2つの接線の交点を降伏点と見なし、降伏点での応力から求めた強度を圧縮強度としている<sup>10</sup>。高分子系材料の圧縮強度、引張強度は温度の上昇に伴い著しく低下している。これは温度が上昇すると熱膨張により分子間隔が広がる<sup>10</sup>ことに起因しているものと考えられる。

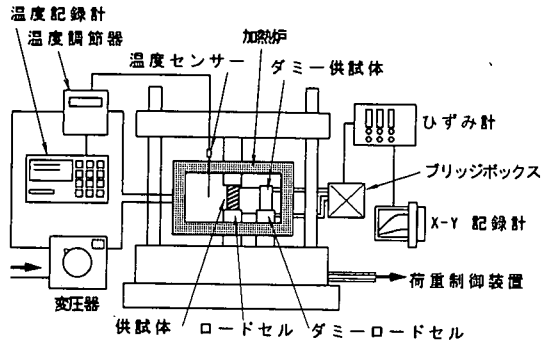


図-6 強度試験装置の概念図

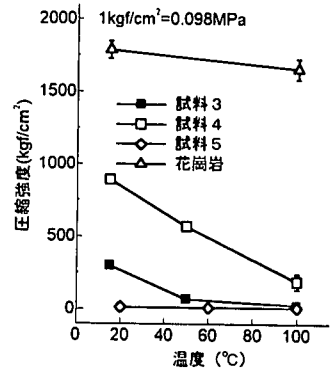


図-7 高温下における試料の圧縮強度

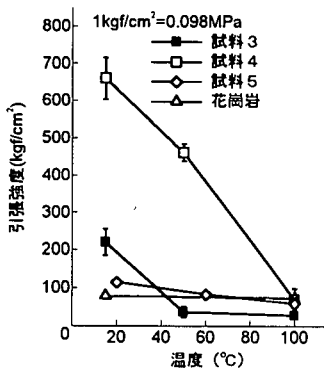


図-8 高温下における試料の引張強度

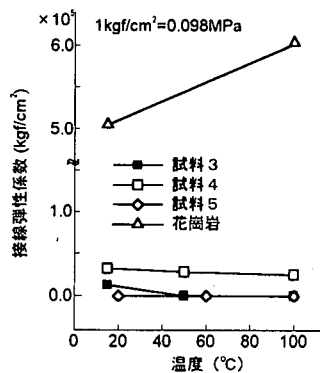


図-9 高温下における試料の接線弾性係数

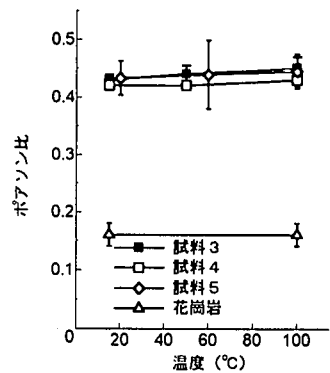


図-10 高温下における試料のポアソン比

## (2) 接線弾性係数およびポアソン比

圧縮試験時に得られた応力-ひずみ曲線から、破壊応力(高温下の高分子系材料では降伏応力)の30%付近での接線弾性係数およびポアソン比を求めた結果が図-9および図-10である。高分子系材料の接線弾性係数は花崗岩と比較し、非常に小さいことがわかる。また、温度の上昇とともに減少の傾向にあり、高温下では変形しやすい性質を持っていることがわかった。しかし、花崗岩では高温下では接線弾性係数は上昇している。これは花崗岩は温度上昇に伴う熱膨張によって岩石内部にも張り出し、空隙が抜け上密になり、接線弾性係数が大きくなったものと考えられる<sup>11)</sup>。高分子系材料のポアソン比は花崗岩に比べ大きく、温度の上昇に伴い、わずかではあるが上昇の傾向にある。花崗岩ではポアソン比はわずかながら上昇しているが、実用上は変化はほとんど

ないとみなせる。

## 4. 空洞周辺の温度分布の解析

### (1) 要素分割法の原理

本研究では熱水(100°C一定)を貯蔵した場合の空洞周辺岩盤に生じる非定常の温度分布の経時変化を要素分割法<sup>7)</sup>にて求めた。断熱材を岩盤に施した場合には、要素で熱物性値の異なる複合材料問題となる。要素分割法にて複合材料問題を解く場合、図-11示すように要素を矩形に分割した場合は、時間 $\Delta t$ に要素 $m-1$ から要素 $m$ に移動する熱量 $Q_{m-1,m}$ は式(1)で与えられる。

$$Q_{m-1,m} = -\lambda_{m-1} \frac{U_{m-1,n}^{(B)} - U_{m-1,n}}{\Delta X/2} l_{m-1} \frac{1}{2} \Delta \tau$$

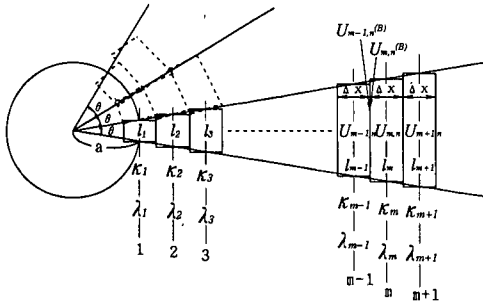


図-11 要素分割法の原理説明図  
(2次元, 矩形要素分割)

$$-\lambda_m \frac{U_{m,n} - U_{m,n}^{(B)}}{\Delta X/2} l_m \frac{1}{2} \Delta \tau \quad (1)$$

ただし,  $\Delta X$ : 要素間隔

$\lambda_m$ :  $m$ 番目の要素の熱伝導率

$U_{m,n}$ : 時間 $n$ における $m$ 番目の要素の温度

$U_{m-1,n}^{(B)}$ : 時間 $n$ における $m-1$ 番目の要素と $m$ 番目の要素との境界の温度

$l_m$ :  $m$ 番目の要素の長さ

$$(l_m = 2\{a \sin(\theta/2) + (m-1)\Delta X \tan(\theta/2)\})$$

$a$ : 円の半径,  $\theta$ : 中心角

また,  $U_{m-1,n}^{(B)}$  と  $U_{m,n}^{(B)}$  との間には式(2)の関係がある.

$$U_{m-1,n}^{(B)} = U_{m,n}^{(B)} = \frac{\lambda_{m-1} l_{m-1} U_{m-1,n} + \lambda_m l_m U_{m,n}}{\lambda_{m-1} l_{m-1} + \lambda_m l_m} \quad (2)$$

時間  $\Delta \tau$  間に要素 $m$ 内に貯えられる熱量は要素 $m$ の温度上昇に費やされるから,  $\Delta \tau$ 間に要素 $m$ から要素 $m+1$ に移動する熱量 $Q_{m,m+1}$ とすると, 式(3)の関係がある.

$$Q_{m-1,m} - Q_{m,m+1} = c_m \rho_m \Delta X l_m (U_{m,n+1} - U_{m,n}) \quad (3)$$

ただし,  $c_m$ : 要素 $m$ の比熱

$\rho_m$ : 要素 $m$ の密度

$U_{m,n+1}$ :  $m$ 番目の要素の時間 $n$ から $\Delta \tau$ 後における温度

式(1)~式(3)より, 式(4)を得る<sup>12)</sup>.

$$\left\{ \frac{\Delta X^2}{\kappa_m \Delta \tau} l_m - \frac{\lambda_{m-1}}{\lambda_{m-1} + \lambda_m} (l_{m-1} + l_m) - \frac{\lambda_{m+1}}{\lambda_m + \lambda_{m+1}} (l_m + l_{m+1}) \right\} U_{m,n}$$

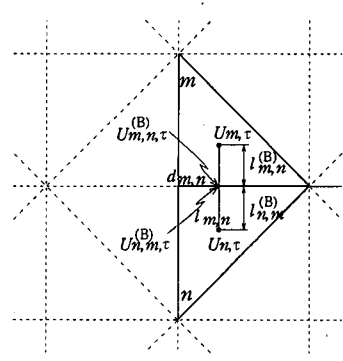


図-12 要素分割法の原理説明図  
(2次元, 三角形要素分割)

$$+ \frac{\lambda_{m+1}}{\lambda_m + \lambda_{m+1}} (l_m + l_{m+1}) U_{m+1,n} + \frac{\lambda_{m-1}}{\lambda_{m-1} + \lambda_m} (l_{m-1} + l_m) U_{m-1,n} = \frac{\Delta X^2}{\kappa_m \Delta \tau} l_m U_{m,n+1} \quad (4)$$

ただし,  $\kappa_m$ :  $m$ 番目の要素の熱拡散率 ( $\kappa = \lambda / c \rho$ )

この場合, 計算精度を上げるため $\theta, \Delta X, \Delta \tau$ の値を検討しておく必要がある.

さらに, 空洞の形状や境界条件が複雑な場合には, 要素を三角形に分割し, 温度分布を計算できる. この場合, 次のような仮定をおく.

(1)熱は互いに隣接する要素の辺を通じて出入りするものとする.

(2)各要素内部の温度は各々均一で, 熱の授受は隣接する要素の重心間で行われるものとする.

図-12に示すように要素 $m$ と要素 $n$ が隣接する場合, 時間 $\Delta \tau$ 間に要素 $m$ に要素 $n$ から入る熱量 $Q_{m,n}$ は式(5)で与えられる.

$$Q_{m,n} = -\lambda_n \frac{U_{n,m}^{(B)} - U_{n,n}}{l_{n,m}^{(B)}} d_{m,n} \frac{l_{n,m}^{(B)}}{l_{n,m}} \Delta \tau - \lambda_m \frac{U_{m,n} - U_{m,n}^{(B)}}{l_{m,n}^{(B)}} d_{n,m} \frac{l_{m,n}^{(B)}}{l_{m,n}} \Delta \tau \quad (5)$$

ただし,  $U_{m,n}$ : 時間 $t$ における $m$ 番目の要素の温度

$U_{m,n}^{(B)}$ : 時間 $t$ における要素 $m$ の要素 $n$ との境界の温度

$l_{m,n}$ : 要素 $m$ と要素 $n$ との重心間距離

$l_{m,n}^{(B)}$ :  $l_{m,n}$ のうち要素 $m$ の重心から要素 $n$ との境界までの距離

$d_{m,n}$ : 要素 $m$ と要素 $n$ の境界の長さ

また,  $U_{m,n}^{(B)}$  と  $U_{n,m}^{(B)}$  との間には式(6)の関係がある.

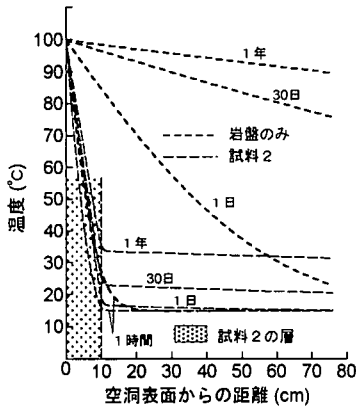


図-13 熱水貯蔵時の温度分布の経時変化

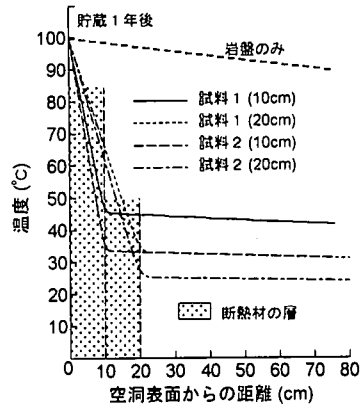


図-14 熱水貯蔵時の貯蔵1年後の温度分布

$$U_{m,n}^{(B)} = U_{n,m,n}^{(B)} = \frac{\frac{\lambda_m}{l_{m,n}^{(B)}} U_{m,j} + \frac{\lambda_n}{l_{n,m}^{(B)}} U_{n,j}}{\frac{\lambda_m}{l_{m,n}^{(B)}} + \frac{\lambda_n}{l_{n,m}^{(B)}}} \quad (6)$$

式(5)に式(6)を代入すると

$$Q_{m,n} = \frac{\lambda_m \lambda_n}{\lambda_m l_{m,n}^{(B)} + \lambda_n l_{n,m}^{(B)}} (U_{m,j} - U_{n,j}) l_{m,n} \Delta \tau \quad (7)$$

隣接要素は3個あるため、 $\Delta \tau$ 時間内に要素 $m$ 内に貯えられる熱量は要素 $m$ の温度上昇に費やされるから式(8)の関係がある。

$$\sum_{n=1}^3 Q_{m,n} = c_m \rho_m S_m (U_{m,j+\Delta \tau} - U_{m,j}) \quad (8)$$

ただし、 $S_m$  : 要素 $m$ の面積

$U_{m,j+\Delta \tau}$  :  $m$ 番目の要素の時間 $t$ から $\Delta \tau$ 後における温度

すなわち、時間 $t + \Delta \tau$ における要素 $m$ の温度は式(9)で与えられる。

$$U_{m,j+\Delta \tau} = \frac{\sum_{n=1}^3 Q_{m,n}}{c_m \rho_m S_m} + U_{m,j} \quad (9)$$

## (2) 解析方法

水平および鉛直方向に十分な広がりをもつ、花崗岩の地山を想定する。土被り100mの位置に、表面に断熱材を施した仕上りの内径10mの円形空洞を設け、熱水(100°C一定)を貯蔵した場合の空洞周辺岩盤に生じる非定常の温度分布の経時変化を要素分割法(三角形要素)にて求めた。花崗岩および断熱材の熱物性値については前述の値を用いて解析した。

境界は地表、空洞表面から左右100m、下方100mの位置とし、境界の温度は15°C一定とした。また、初期温度は岩盤部分、断熱材部分は15°C、空洞内部は100°Cとした。

## (3) 計算結果および考察

空洞の表面に10cmの厚さで試料2の断熱材を施した場合の空洞周辺の温度分布を貯蔵1年後までとりまとめた結果が図-13である。比較のため断熱材を施さない岩盤のみの場合も示している。断熱材を施すことにより、空洞からの熱伝導に遅れを生じている。また、断熱材部分と岩盤部分における温度勾配に大きく差がみられ、断熱材部分の勾配が急なのに対し、岩盤部分ではほとんど勾配がない。これは断熱材の熱伝導率が花崗岩に比べ、極めて小さな値であることに起因しているものと考えられる。

岩盤のみの場合、試料1、試料2をそれぞれについて10cmおよび20cmの厚さで施した場合について、貯蔵1年後における空洞周辺の温度分布をとりまとめたものが図-14である。いずれの断熱材を施した場合も断熱材の厚みを増すと、空洞周辺岩盤への熱伝導により遅れが生じている。また、この場合試料1よりも試料2の方が熱伝導により遅れが生じている。これらのことから、断熱材を施す場合には目的にあった熱物性をもつ断熱材を選定し、適切な厚みで施工することが必要であると考えられる。

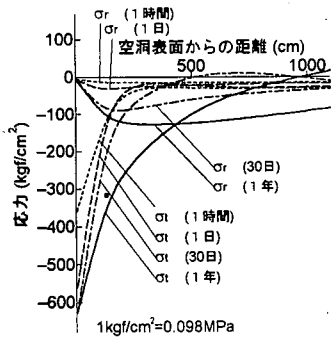
## 5. 空洞周辺の応力解析

### (1) 解析方法

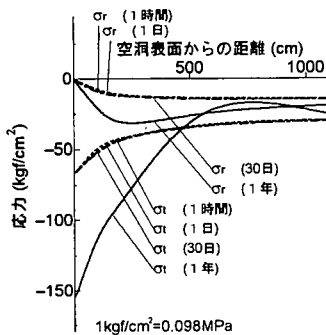
ここでは4で得られた温度分布を用いて、空洞周

表-1 解析に用いた花崗岩の物性値

温度 (°C)	線膨張係数 (1/°C)×10 <sup>-6</sup>	接線弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )×10 <sup>8</sup>	ポアソン比	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
10~20	0.0	0.51	0.16	-1790	90
20~30	7.7	0.52	0.16	-1770	88
30~40	7.7	0.53	0.16	-1760	87
40~50	7.8	0.55	0.16	-1740	85
50~60	7.9	0.56	0.16	-1720	84
60~70	8.3	0.57	0.16	-1710	82
70~80	8.6	0.58	0.16	-1690	81
80~90	9.1	0.59	0.16	-1670	79
90~100	9.6	0.60	0.16	-1660	78



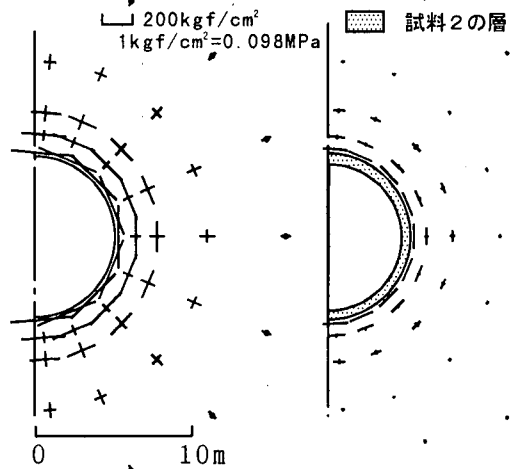
(a) 岩盤のみの場合



(b) 試料2を施した場合

図-15 熱水貯蔵時の水平軸上の応力分布の経時変化

辺岩盤の応力分布を有限要素法に時間の概念を取り入れ、2次元平面ひずみ問題として応力解析を行った。本解析では便宜上、亀裂のない新鮮な岩盤を想定し、破壊判定はMohrの応力円包絡線説<sup>13)</sup>に従うものとした。空洞掘削時の発破によるゆるみ領域はここではないものとした。解析に必要なとなる湿潤状態の花崗岩の物性値については3で述べた値を用いた。これを表-1に示す。



(a) 岩盤のみの場合 (b) 試料2を施した場合

図-16 熱水貯蔵時の貯蔵1年後の応力分布

境界は地表、空洞表面から左右100m、下方100mの位置とし、地表および左右の境界は自由端とし、下方の境界は上下方向固定とした。空洞表面は自由端とした。なお、空洞中心を通る鉛直線上では左右方向固定とした。

初期応力としては岩盤の自重と自重の1/2の側圧がかかっているものとし、熱水を貯蔵することにより、そこに式(10)で表される熱応力が重畳されるものとした。

$$\sigma_t = E_r \alpha_r (T - T_0) \quad (10)$$

ただし、 $\sigma_t$  : 熱応力

$E_r$  : 温度 $T$ における弾性係数

$\alpha_r$  : 温度 $T$ における割線線膨張係数

$T$  : 温度

$T_0$  : 地山の初期温度(15°C)

## (2) 解析結果および考察

ここで断熱材として試料2の方が熱拡散率および熱伝導率の値がいずれも試料1の1/2程度と小さく、岩盤に遅く熱を伝えていることから試料2を用いた。

まず、熱水貯蔵時の空洞で中心からの水平軸上に作用する接線方向および半径方向の応力の経時変化を、岩盤のみの場合と試料2を10cm施した場合とを比較したものが図-15(a)、(b)である。また、貯蔵1年後の応力状態をそれぞれ比較したものが図-

表-2 解析に用いた試料5の物性値

温度 (°C)	線膨張係数 (1/°C)×10 <sup>-4</sup>	接線弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )×10 <sup>3</sup>	ポアソン比	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
10~20	0.0	0.18	0.43	-14	118
20~30	1.3	0.17	0.43	-13	110
30~40	1.4	0.17	0.44	-13	103
40~50	1.5	0.16	0.44	-12	95
50~60	1.6	0.15	0.44	-11	87
60~70	1.7	0.15	0.44	-11	80
70~80	1.8	0.14	0.44	-11	74
80~90	1.8	0.13	0.44	-10	68
90~100	1.8	0.13	0.44	-10	63

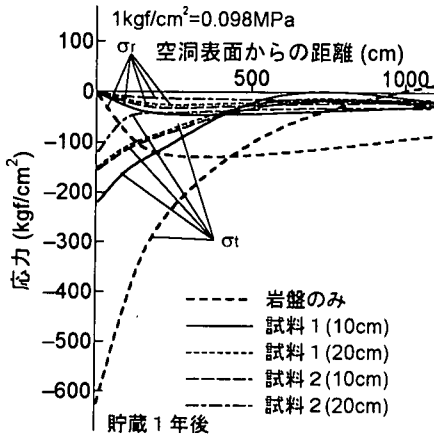


図-17 熱水貯蔵時の貯蔵1年後の水平軸上の応力分布

16(a),(b)である。これらより、断熱材を施した場合も岩盤のみの場合もいずれの場合にも、貯蔵開始直後から空洞表面付近に大きな圧縮応力が空洞の接線方向に発生していることがわかる。また、時間の経過とともに圧縮応力は増大しており、地山内部へも影響している。しかし、断熱材を施した場合には、岩盤のみの場合に比べ、空洞付近の接線方向の圧縮応力は貯蔵1年後で1/4程度、地山内部に発生する圧縮応力も1/2程度であり、断熱材が熱応力の軽減に有効な手段となり得ることがわかる。次に、岩盤のみの場合、試料1および試料2をそれぞれ10cmおよび20cm施した場合について、貯蔵1年後における空洞からの水平軸上に作用する接線方向および半径方向の応力を示したものを図-17に示す。これより断熱材の厚みを増加させた方が、より熱応力の軽減効果は大きく、試料1より試料2を施した方が、より効果が得られていることがわかる。また、試料1を20cm施した場合と試料2を10cm施した場合とを比較すると、熱応力軽減の効果はほぼ同程度であった。

以上の結果、断熱材を空洞表面に施すことにより熱応力を軽減できるものと考えられるが、前述の様に断熱材のひずみは岩石に比べて大きく、施工の際には繋ぎ目に適当な処置を施す必要があるものと考えられる。また、熱水の影響を長時間受けることから、断熱材の耐久性についても検討する必要がある。

## 6. 熱水の漏出防止に関する一考察

### (1) 解析方法

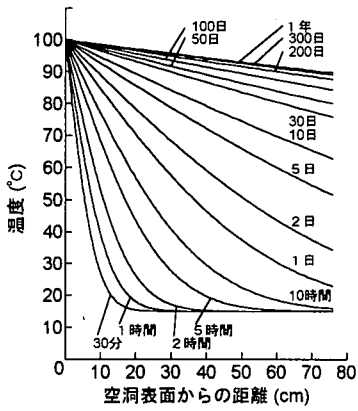
ここでは熱水を空洞内に貯蔵する際の熱水の漏出防止対策として、高分子系材料を空洞表面にライニングした場合について解析を行った。解析モデルは4と同様にし、ここで、ライニングについては通常のトンネルのように荷重をもたせるものではなく、熱水の漏出防止対策としてのライニングであるので、厚さは数mm~1cm程度で充分であると考えられるが、ここでは熱水の影響を受けることや、解析にて高分子系材料の挙動を確認し得る厚さを考慮し、3cmのライニングの層を設け、仕上がり直径が10mとなる場合を想定した。また、前述の熱応力軽減と漏出防止対策を併用した場合として、空洞表面に断熱材の層を設け、さらに高分子系材料の層を断熱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、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た。この場合、高分子系材料、断熱材および岩盤はそれぞれ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。断熱材および高分子系材料の熱物性値については2の値を用いて解析を行った。また、試料5の物性値については2および3で述べた値をさらに10°C毎に見積もった値を用いた。その値については表-2に示した。解析における境界条件、初期条件は4および5と同様にした。

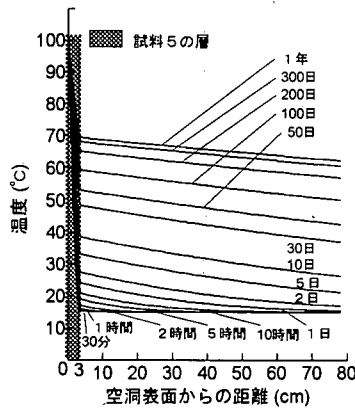
### (2) 温度分布

熱水貯蔵時の空洞周辺岩盤の温度分布の経時変化を要素分割法にて求めた。ここでは高分子系材料としては、熱拡散率が試料1および試料2に比べて1/2

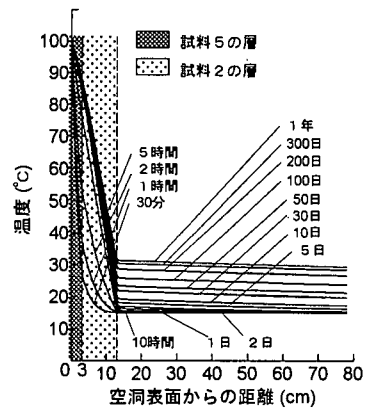




(a) 岩盤のみの場合

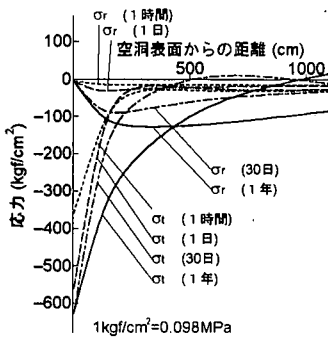


(b) 試料5をライニングした場合

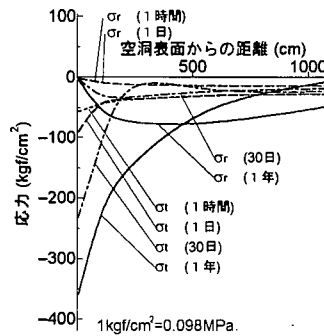


(c) 試料2および試料5を併用した場合

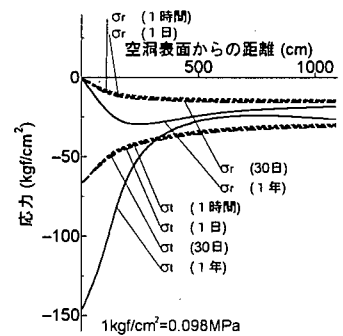
図-18 熱水貯蔵時の温度分布の経時変化



(a) 岩盤のみの場合

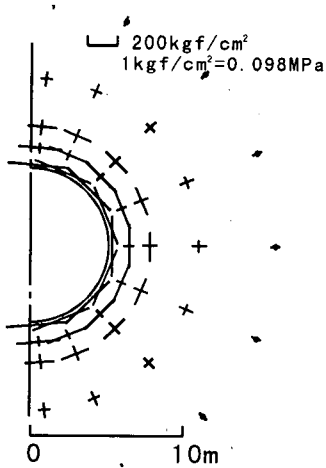


(b) 試料5をライニングした場合

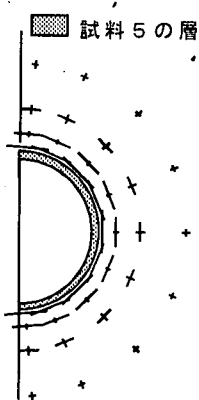


(c) 試料2および試料5を併用した場合

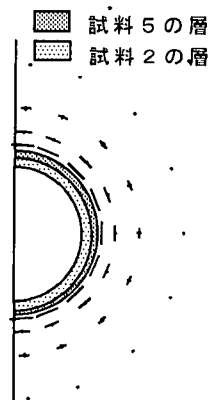
図-19 熱水貯蔵時の水平軸上の応力分布の経時変化



(a) 岩盤のみの場合



(b) 試料5をライニングした場合



(c) 試料2および試料5を併用した場合

図-20 熱水貯蔵時の貯蔵1年後の応力分布

と小さく、熱伝導率も1/5と小さいことから試料5を用いた。また、断熱材は前述と同様に熱拡散率および熱伝導率の値が試料1の1/2程度と小さい、試料2を用いた。モデルとして、試料5のライニングを空洞表面に3cm設けた場合、試料2を空洞表面に厚さ10cmで施し、さらに、試料5を厚さ3cmで断熱材の表面にライニングした場合の結果を図-18(a)-(c)に示す。なお、比較のため岩盤のみの温度分布も示している。いずれも初期の時間には急激な勾配を示しており、空洞周辺にはまだ温度が及んでいないことがわかる。しかし、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ることがうかがえる。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年後には温度変化が極めて緩慢となる、いわゆる準定常状態となることがわかる。また、試料5のライニングを設けた場合には、岩盤のみの場合に比べ熱伝導に遅れがみられる。これは試料5の熱拡散率および熱伝導率が花崗岩に比べ1/20~1/80程度と小さいことから岩盤部分に遅く熱を伝えていることがわかる。また、断熱材および高分子系材料を併用した場合には、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。

### (3) 応力解析

ここでは前述の温度分布をもとに応力分布の経時変化を求めた。熱水貯蔵時の空洞で中心からの水平軸上に作用する接線方向および半径方向の応力の経時変化を、岩盤のみの場合、試料5をライニングした場合および断熱材および高分子系材料を併用した場合とで比較したものを図-19(a)-(c)に示す。また、貯蔵1年後の応力状態をそれぞれ比較したものを図-20(a)-(c)に示す。これらより、試料5をライニングした場合も、岩盤のみの場合も、いずれの場合にも貯蔵開始直後から空洞表面付近に、圧縮応力が空洞の接線方向に発生し、時間の経過とともに圧縮応力は増大しているが、試料5をライニングした場合には、熱伝導に遅れがあるため、岩盤のみの場合と比較して、熱応力の発生にも遅れがみられる。また、断熱材と高分子系材料を併用した場合は、断熱材の効果により、断熱材の場合と同様に空洞表面付近の接線方向の圧縮応力は1/4程度、地山内部に発生する圧縮応力も1/2程度で、熱応力が軽減されていることがわかる。また、いずれの場合においても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

から試料5をライニングすることは、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。

## 7. 結 言

本研究では、地山岩盤内空洞に熱水を貯蔵した場合の漏出防止および熱応力軽減対策として、空洞表面に高分子系材料および断熱材を設けることを提案し、解析により空洞の安定性について検討を行った。本研究で得られた結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 高温下における高分子系材料および断熱材のひずみは花崗岩よりも大きい。また、高分子系材料の熱拡散率は花崗岩の1/10以下、熱伝導率も断熱材で花崗岩の1/100程度、高分子系材料で1/20程度と小さい。
- (2) 高温下における高分子系材料の圧縮強度および引張強度は温度上昇とともに低下する。接線弾性係数も温度上昇とともに低下し、接線弾性係数の値は花崗岩に比べて非常に小さい。
- (3) 熱応力軽減対策として、断熱材を施すことにより、熱応力を1/2~3/4程度軽減できることがわかった。
- (4) 高分子系材料をライニングすることにより、熱水の漏出防止対策となり得るものと考えられる。また、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た場合、有効な方法となり得ることがわかった。

実際に、地山岩盤内空洞に熱水を貯蔵した場合、貯蔵量の変動に伴い、空洞周辺岩盤は熱の影響を繰り返して受けることとなる。熱履歴を受ける場合の空洞周辺岩盤の挙動については別の機会に報告したい。

### 参考文献

- 1) Inada, Y., Kinoshita, N., Nakazaki, H. and Ueda, T. : Heated water storage in underground openings, *Proc. 6th Int. Cong. IAEG.*, pp.2745-2750, 1990.
- 2) 稲田善紀, 木下尚樹, 中崎英彦, 上田貴夫: 熱水貯蔵時の空洞の安定性と漏水に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.424/III-14, pp.227-234, 1990.
- 3) 稲田善紀, 木下尚樹, 関正造, 菊地慎二: 断熱材を用いた場合の空洞周辺岩盤の熱応力軽減に関する一考察, 第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.71-75, 1995.
- 4) Inada, Y., Kinoshita, N., Ueda, T. and Ochi, K. : Effect of

- adiabatical material on thermal stress reduction around openings due to heated water storage, *Proc. of The Korea-Japan Joint Symp.on Rock Eng.*, pp.101-107, 1996.
- 5) 稲田善紀, 木下尚樹, 松嶋信行, 成行惇: 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, 土木学会地下空間シンポジウム論文・報告集, 第3巻 (審査付論文), pp.139-148, 1998.
- 6) 稲田善紀, 木下尚樹, 上田貴夫, 甲村雄一, 松本喬: 高温および低温の影響を受ける空洞周辺岩盤の熱的挙動, 第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.593-598, 1998.
- 7) 稲田善紀: 岩盤工学, pp.180-185, 森北出版, 1997.
- 8) 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.
- 9) 稲田善紀: 地下の空間利用, pp.101-103, 森北出版, 1989.
- 10) 成沢郁夫: 高分子材料強度学, pp.67-73, オーム社, 1982.
- 11) 稲田善紀, 横田公忠, 時川忠: 熱水が岩石の強度および変形特性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.370/III-5, pp.217-223, 1986.
- 12) 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.
- 13) 山口梅太郎, 西松裕一: 岩石力学入門, pp.99-102, 東京大学出版会, 1991.

(1997. 10. 29 受付)

## COUNTERMEASURES FOR SOME PROBLEMS RELATED TO STORAGE OF HEATED WATER IN OPENING EXCAVATED IN MOUNTAIN

Yoshinori INADA, Naoki KINOSHITA and Nobuyuki MATSUSHIMA

The authors have proposed temporary storage of heated water in openings excavated in rock mountain. In this case, countermeasures for the reduction of thermal stress around openings and preventing leakage of heated water from openings become important. In this study, the authors proposed the reduction of thermal stress by using adiabatical material, resin lining system and combination lining system of resin and adiabatical material as a countermeasure for preventing leakage and reduction of thermal stress. The results of the test of physical properties of adiabatical material and resin at high temperature are described. And using these values, temperature distribution and stability of openings were analyzed and discussed.