

(3) 高温の影響を受ける空洞周辺岩盤の熱応力軽減および熱水の保温性について

THERMAL STRESS REDUCTION OF ROCK MASS AROUND OPENING AFFECTED BY HIGH TEMPERATURE
AND KEEPING WARMTH OF HEATED WATER

稲田善紀*・木下尚樹**・上田貴夫***・菊地慎二****

Yoshinori INADA, Naoki KINOSHITA, Takao UEDA, Shinji KIKUCHI

The authors have been shown by theoretical analysis that in the case of heated water storage in opening excavated in rock mountain, thermal stress occurs due to thermal expansion. In this case, the reduction of the thermal stress becomes important problem for the stability of the opening. In this study, the authors proposing to use adiabatical material to reduce thermal stress around opening. The results of theoretical analysis for thermal stress distribution around opening in the case of using adiabatical material is described. Then, the way of prevent leakage and keeping warmth of heated water is also discussed.

1. 緒 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ている^{1)~4)}。このシステムは省エネルギーの一環として毎日のゴミ焼却時の廃熱を利用して水を熱水に変え、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という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。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な貯蔵を行う施設が必要となってくるが、熱水の貯蔵方法としては地山岩盤内に空洞を設け、一時的に貯蔵することを提案している。この貯蔵方法は、土地の立体的な有効利用、環境の保全等の利点がある。これまでの研究から、熱水貯蔵時には空洞周辺岩盤には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おり^{1)~4)}、熱の影響を繰り返し受けることや、岩盤には潜在的な亀裂が存在することなどを考慮すると、できる限り熱応力を軽減させる必要がある。

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、室内実験にて求めた高温下の断熱材の熱物性値を用いて空洞周辺の温度分布の経時変化を解析によって求め、応力解析を行い、空洞周辺岩盤の応力状態を求め、断熱材による熱応力軽減の効果について考察した。次に漏水防止対策として高分子系材料を併用した場合について解析し、その有効性を検討した。さらに熱水の保温性についても検討した結果を述べる。

* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部土木海洋工学科

** 正会員 工修 愛媛大学助手 工学部土木海洋工学科

*** 正会員 工修 (株)竹中工務店 原子力・E・E本部

**** 正会員 日本国土開発(株) 技術本部

2. 空洞周辺の温度分布

2. 1 解析に用いた熱物性値および計算方法

解析に用いた断熱材はD社製の押出発泡ポリスチレンおよびA社製の硬質ウレタンフォームである。以下前者を Sample 1 後者を Sample 2 と呼ぶこととする。解析時に必要な断熱材の熱物性値は別の実験により求めた値¹⁾を表1に示した。比較のために示した花崗岩の熱物性値と比較すると断熱材の熱容量および熱伝導率は花崗岩に比べ非常に小さいことがわかる。

本解析では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。図1に示すように土被り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℃一定)を貯蔵した場合の非定常の温度分布の経時変化を要素分割法⁵⁾を用いて求めた。ここで断熱材を岩盤に施した場合には各材料で熱物性値の異なるいわゆる複合材料問題となるため、ここでは図2に示すように要素を矩形に分割し、複合材料用2次元問題に発展させて解析を行った。

2. 2 計算結果および考察

空洞の表面に10cmの厚さで Sample 1 の断熱材を施した場合の貯蔵1年後までの空洞周辺の温度分布の経時変化を図3に示す。比較のため岩盤のみの場合についての結果も示している。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である。また、断熱材を施すことにより空洞からの熱伝導に遅れが生じていることがわかる。これは断熱材の熱伝導

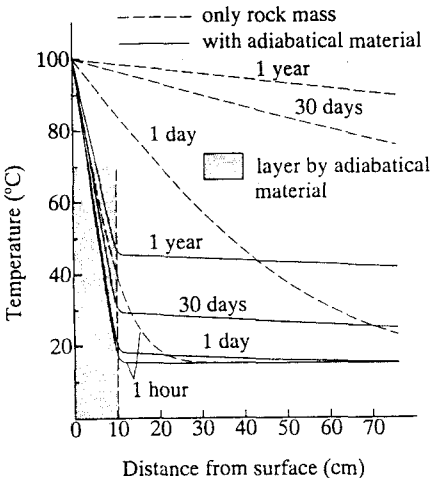


図3 温度分布の経時変化

表1 断熱材の熱物性値

	Thermal diffusivity ($\times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$)	Heat capacity ($\times 10^{-3} \text{ cal/cm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$)	Thermal conductivity ($\times 10^{-5} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$)
sample 1	12.60	7.18	9.05
sample 2	5.19	8.99	4.67
granite	12.30	631.70	777.00

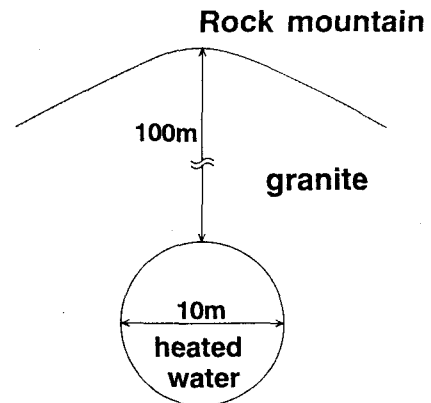


図1 想定した解析モデル

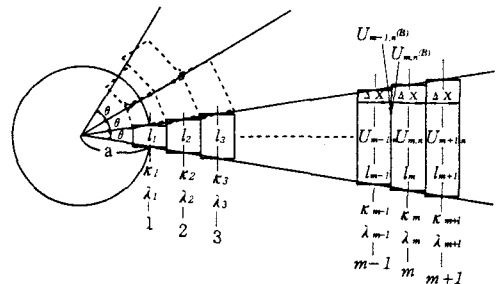


図2 要素分割法の原理

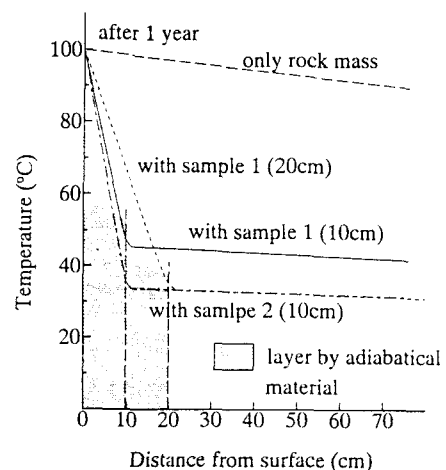


図4 貯蔵1年後の温度分布

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と考えられる。次に岩盤のみの場合、Sample 1 (厚さ10cm)を施した場合、Sample 1 (厚さ20cm)を施した場合およびSample 2 (厚さ10cm)を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示したものが図4である。Sample 1で厚さを20cmとした場合は10cm施した場合に比べ岩盤部分に熱を遅く伝えていることがわかる。またSample 2を施した場合はSample 1を施した場合に比べ、温度勾配が急であり岩盤部分に熱を遅く伝えている。これはSample 2の方が熱拡散率および熱伝導率の値がいずれもSample 1の1/2程度と小さいためであると考えられる。

3. 断熱材による熱応力軽減の効果

3. 1 解析方法

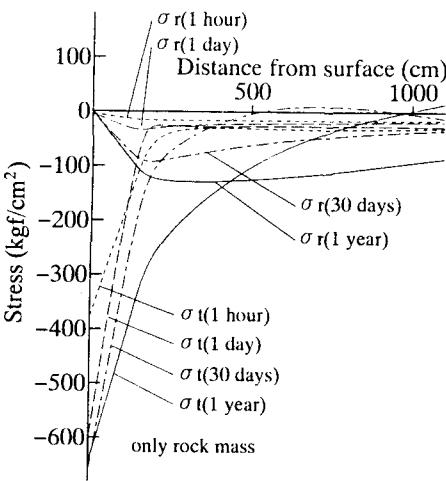
前述の温度分布をもとに、熱応力を考慮した有限要素法を用いて2次元平面ひずみ問題として応力解析を行い、断熱材を空洞表面に設けた場合の熱応力の軽減に関して考察した。解析に必要な湿潤状態の花崗岩の強度・変形特性については別の実験⁶⁾により求めた値を表2に示した。なお、本解析では便宜上亀裂の無い新鮮な岩盤を想定し、いずれも仕上がり直径を10mとして解析を行った。またここでは側圧係数(λ_0)を0.5とした。

3. 2 解析結果および考察

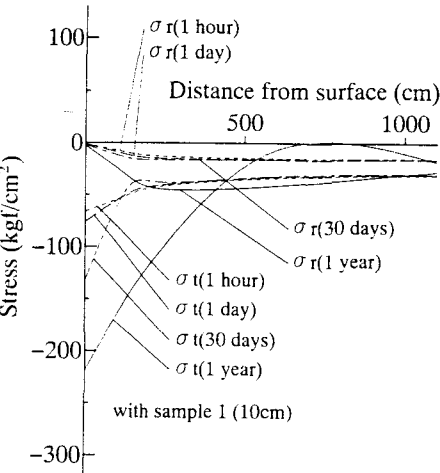
図5(a),(b)は空洞の中心からの水平軸上に作用する空洞の接線方向および半径方向の応力の経時変化を示したものである。また、貯蔵1年後の応力状態を岩盤のみの場合とSample 1 (厚さ10cm)を施した場合とを比較したものが図6(a),(b)である。断熱材を施した場合も岩盤のみの場合も貯蔵開始直後から空洞表面の接線方向に圧縮応力が発生している。また、時間の経過とともに圧縮応力は増大し、地山内部へと進展していく。しかし、断熱材を施した場合には岩盤のみの場合と比べ、空洞表面付近の接線方向の圧縮応力は貯蔵1年後で1/3程度、地山内部に発生する圧縮応力も1/2程度であり、断熱材が熱応力の軽減に有効な手段となり得ることがわかった。次に岩盤のみの場合、Sample 1を10cmおよび20cm、Sample 2を10cm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空洞の接線方向および半径方向の応力を示したものが図7である。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得られており、Sample 1よりSample 2を施した方がより効果が得られていることがわかる。

表2 解析に用いた花崗岩の強度・変形特性

Temperature (°C)	Expansion coefficient (1/°C)×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	—	0.510	0.16	-1788	90
20~30	7.7	0.522	0.16	-1772	88
30~40	7.7	0.533	0.16	-1755	87
40~50	7.8	0.545	0.16	-1739	85
50~60	7.9	0.556	0.16	-1722	84
60~70	8.3	0.568	0.16	-1706	82
70~80	8.6	0.579	0.16	-1690	81
80~90	9.1	0.591	0.16	-1673	79
90~100	9.6	0.602	0.16	-1657	78



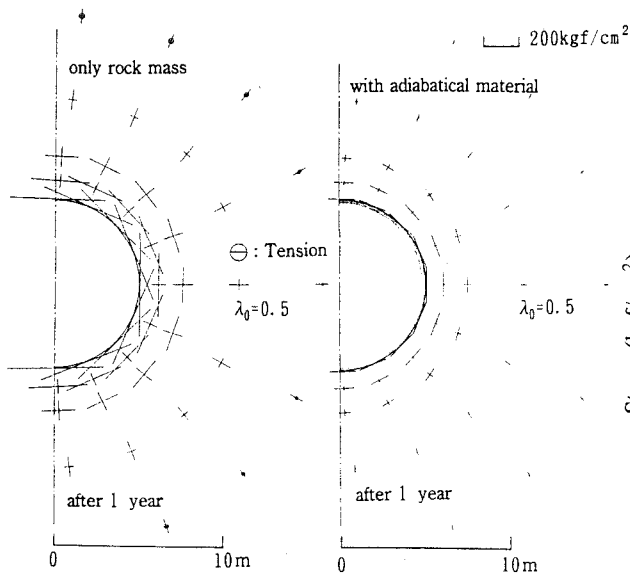
(a) 岩盤のみの場合



(b) 断熱材を施した場合

図5 水平軸上の応力分布の経時変化

次に岩盤のみの場合、Sample 1を10cmおよび20cm、Sample 2を10cm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空洞の接線方向および半径方向の応力を示したものが図7である。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得られており、Sample 1よりSample 2を施した方がより効果が得られていることがわかる。



(a) 岩盤のみの場合 (b) 断熱材を施した場合

図6 貯蔵1年後の応力分布

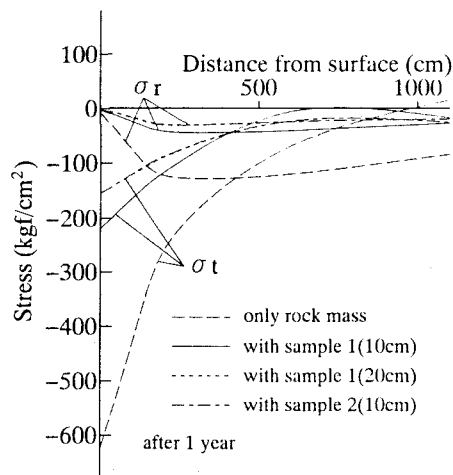


図7 貯蔵1年後の水平軸上の応力分布

以上のように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、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、貯蔵の際、高温の影響を長時間受けるため、断熱材の耐久性についても検討しておく必要がある。

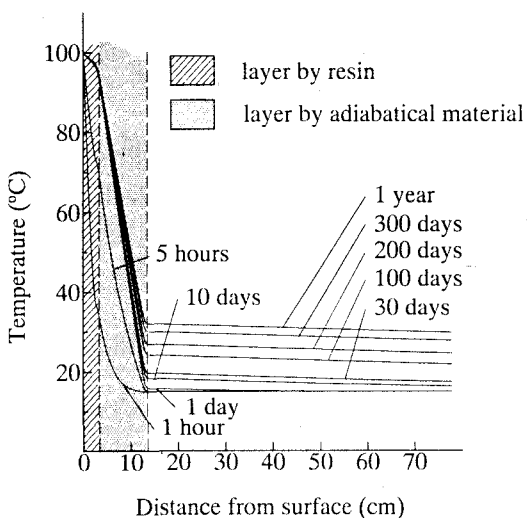


図8 温度分布の経時変化

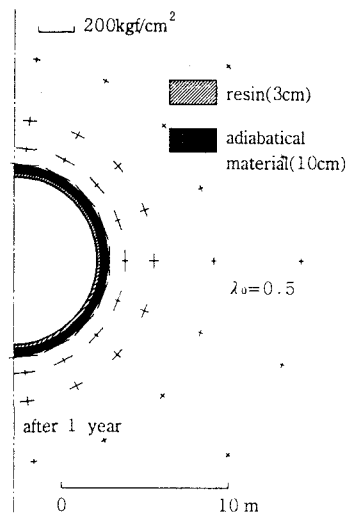


図9 貯蔵1年後の応力分布

4. 漏水防止対策に関する一考察

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吹き付けた場合について解析を行った。解析モデルは花崗岩の地山を対象とし、空洞表面に前述の断熱材(Sample 2:厚さ10cm)を施し、さらに高分子系材料を3cmの厚さでライニングした場合を想定した。用いる高分子系材料については種々考えられるが、数種類の高分子系材料の高温下における強度・変形特性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M社製のビニルエステル樹脂を用いることとした。高分子系材料は高温下では延性破壊を生じるが解析では便宜上降伏時の強度を破壊強度としている。また、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。

まず温度分布の経時変化を求めた結果を図8に示す。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。

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。結果の代表例として貯蔵1年後の応力分布を図9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緩和されている。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。

5. 保温効果について

ここでは断熱材による熱水の保温効果を確認するため岩石供試体を用いて室内実験を行った。30×30×30cmの花崗岩の供試体の中央に孔を設け，孔の表面に厚さ1cmの断熱材(Sample 2)を施した。比較のため断熱材を施さない岩石のみの供試体も作製し，いずれも仕上がり内径を9cmとしている。気温の影響を受けないよう供試体の周囲を別の断熱材で覆い，孔の中に熱水を注入して熱水の温度の経時変化を測定した。得られた結果を図10に示す。断熱材を施すことにより熱水の温度変化は緩慢になっており，断熱材は熱水の保温の面からも有利であると考えられる。

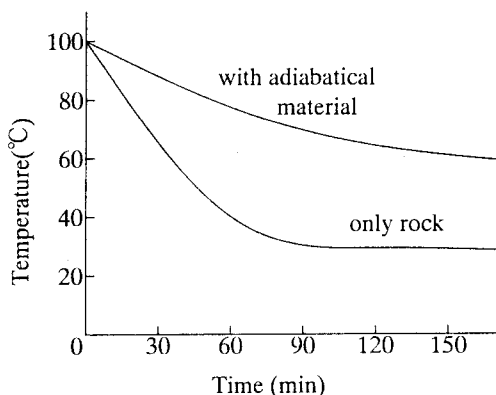


図10 熱水の温度の経時変化

6. 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) 要素分割法により熱水貯蔵時の空洞周辺岩盤の温度分布の経時変化を求めた結果，空洞表面に断熱材を施すことにより熱伝導に遅れを生じることがわかった。
- 2) 応力解析の結果，断熱材を施すことにより熱応力は $1/3 \sim 1/2$ となることがわかった。
- 3) 高分子系材料を空洞表面にライニングすることで熱水の漏出防止対策に成り得ることがわかった。
- 4) 断熱材は熱水の保温の面からも有利であると考えられる。

本研究の遂行にあたり愛媛大学大学院の肖俊氏には実験等で御協力いただいた。ここに記し，お礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) 稲田善紀・木下尚樹・関正造・菊地慎二：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.
- 2) Y.Inada, N.Kinoshita, H.Nakazaki & T.Ueda : Proc. 6th Int.Cong. IAEG., pp.2745-2750, 1990.
- 3) 稲田善紀・木下尚樹・中崎英彦・上田貴夫：土木学会論文集，No.424/Ⅲ-14，pp. 227～234，1990.
- 4) Y.INADA, T.MANABE, S.OHASHI, M.YOSHIKAWA : Proc. The 3rd Int. Conf. on Underground Space and Sheltered Build., pp.338-343, 1988.
- 5) 稲田善紀・重信純：日本鉱業会誌，第99巻，第1141号，pp.179～185，1983.
- 6) 稲田善紀・横田公忠・時川忠：土木学会論文集，No.370/Ⅲ-5，pp. 217～223，1986.