

(15) 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

愛媛大学工学部	稲田善紀
愛媛大学工学部	木下尚樹
愛媛大学大学院	関 正造
日本国土開発(株)	菊池慎二

A Study on Reducing The Thermal Stress Around Openings by Using Adiabatical Materials

Yoshinori INADA, Naoki KINOSHITA, Shozo SEKI,
Shinji KIKUCHI,

Ehime University
J.D.C. Corporation

Abstract

The authors have been made clear by theoretical analysis and experiment that in the case of high and low temperature materials storage in openings excavated in rock mass, the thermal stress will be occurring by thermal expansion or by shrinkage of rock mass around openings. Therefore, countermeasure to reduce the thermal stress become important for maintaining a stability of openings. In this study, the authors proposed using adiabatical materials for reducing thermal stress around opening. That is the results of the test of thermal properties of adiabatical materials at high and low temperatures are described. And using these values, temperature distribution and stability of openings were analysed and described.

1 緒 言

近年、生活の質の向上により熱水の使用量が増加している。エネルギーの有効利用の観点から、ゴミ焼却時の廃熱を利用して、水を熱水に変え、各家庭への給湯や地域暖房等多目的に使用することが考えられる。この場合、一日の時間帯や季節による熱水の使用量の変動に関係なく安定した供給を行うための一時的な貯蔵が必要となってくる。一方、石油の代替エネルギーとしてのLNGやLPGの需要が増加の傾向にあり¹⁾ また、冷凍食品の需要も増加の傾向を示している²⁾。今後これらの貯蔵施設の増加が予想される。

筆者らはこれら高温物質や低温物質の貯蔵方法の一つとして、土地の立体的有効利用、環境保全および維持管理費の節減等の利点から、地山岩盤内に設けた空洞内に一時的に貯蔵することを提案し、検討を行ってきている^{3)~6)}。これまでの研究から熱水を貯蔵した場合、空洞周辺岩盤には熱膨張のため空洞の接線方向に圧縮応力が発生することがわかっている。また、低温物質を貯蔵した場合には空洞周辺岩盤に熱収縮のため放射状に亀裂が発生することがわかっており、いずれの場合にも空洞をより安定した状態に保つためには、熱応力を軽減させる対策が必要となってくる。これまで高温物質の貯蔵については熱応力の軽減のための一方策として空洞周辺岩盤に人工的にスリットを設けた場合について⁷⁾、また、低温物質の貯蔵については液・冷氣漏れ対策として水封式、氷ライニング方式および高分子材料によるライニング方式等の検討をそれぞれ行ってきた⁵⁾。

本研究では熱応力を軽減させる対策の一つとして、空洞表面に断熱材の層を設けることを想定し、高温お

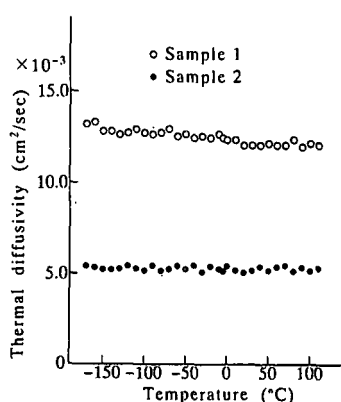
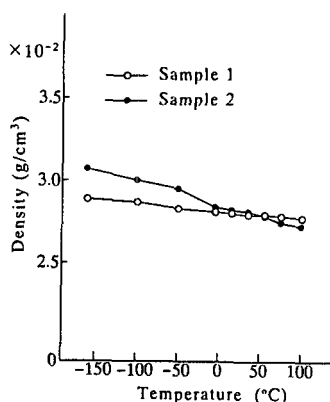
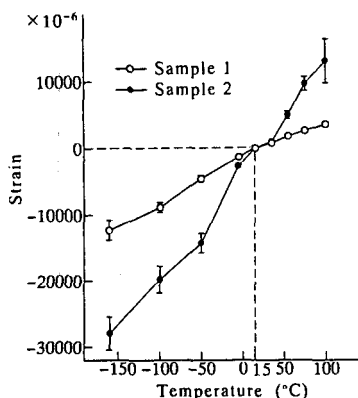


Fig.1 Strain of adiabatical materials at high and low temperature. **Fig.2** Density of adiabatical materials at high and low temperature. **Fig.3** Thermal diffusivity of adiabatical materials at high and low temperature.

よび低温下における断熱材の熱物性値を実験により求めた。次に求めた値を用いて空洞周辺の温度分布の経時変化を求め、さらに応力解析を行い、空洞周辺の応力状態および亀裂の発生、進展状況を求めて断熱材が空洞周辺岩盤の熱応力軽減に及ぼす効果について考察した。

2 高温および低温下における断熱材の熱物性値

2.1 実験に用いた試料

本実験で用いた断熱材はD社製の押出法ポリスチレンフォームおよび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。両者の試料とも一般的に広く建築物に用いられている断熱材である。また、いずれの試料も吸水性は小さいが、念のため成形した後、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日間乾燥して実験に供した。

2.2 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⁹⁾により、常温（ここでは15°C）から温度上昇および低下にともなうひずみを測定した。実験結果をFig.1に示す。温度の上昇、降下とともにほぼ直線的に膨張、収縮している。この場合のひずみ量は花崗岩のそれと比較するとSample 1で約8倍程度、Sample 2では約18倍程度である。また、一度100°C（低温下では-160°C）にしておき、再び常温まで戻した場合の残留ひずみは、本実験ではほとんど測定されず、実用上残留ひずみを無視できるものと考えられる。ひずみ量から密度の変化を求めた結果がFig.2である。密度も温度の変化にともないほぼ直線的に変化していることがわかる。

2.3 熱拡散率

要素分割法に実測値を適用させる方法⁹⁾で熱拡散率を求めた結果をFig.3に示す。Sample 1では温度上昇とともに値は小さくなっている。Sample 2でもごくわずかではあるが同様の傾向がみられた。今回の実験範囲では実用上ほぼ一定の値とみなされ、Sample 1で $12.7 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 程度、Sample 2では $5.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 程度であった。これは花崗岩の熱拡散率($11.1 \sim 12.3 \text{ cm}^2/\text{sec}$)と比較して、それぞれ同程度および1/2程度の値である。

2.4 比熱、熱容量および熱伝導率

比熱の測定結果をFig.4に示す。Sample 1およびSample 2のいずれの場合も、温度の上昇にともないわずかながら比熱は大きくなる傾向にある。比熱と前述のひずみの測定結果から求めた密度を用いて熱容量を算出した結果をFig.5に示す。温度の上昇とともに熱容量はSample 1では増加し、Sample 2では減少している。これはひずみの変化がSample 2の方がSample 1に比べて大きく、したがって密度の変化が大きいこと、影響を大きく受けていることに起因しているものと思われる。さらに、熱容量と前述の熱拡散率の実験結果から

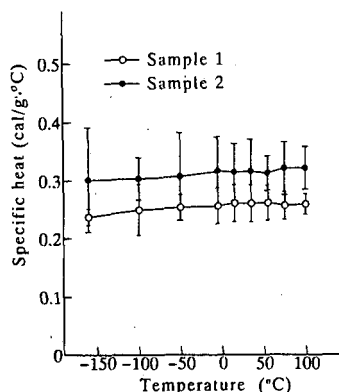


Fig.4 Specific heat of adiabatical materials at high and low temperature.

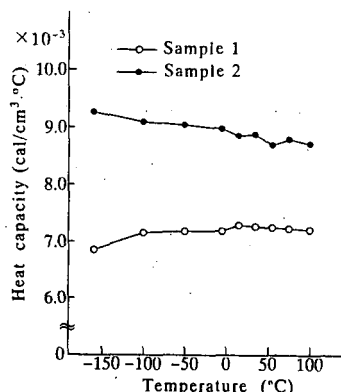


Fig.5 Heat capacity of adiabatical materials at high and low temperature.

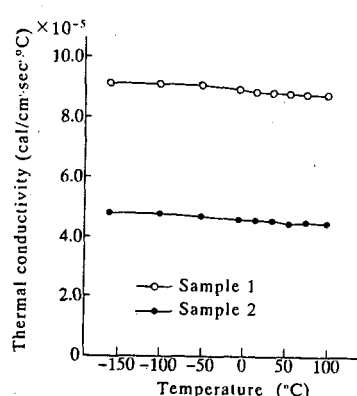


Fig.6 Thermal conductivity of adiabatical materials at high and low temperature.

熱伝導率を算出した結果が Fig.6 である。Sample 1 および Sample 2 のいずれの場合も熱伝導率は温度の上昇とともにわずかに減少している。この場合の熱伝導率は、花崗岩の値 ($7.7 \times 10^{-3} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$) と比較して 1/100 程度であり、断熱材は岩石と比べ熱を極めて遅く伝えるものと思われる。

3 空洞周辺の温度分布

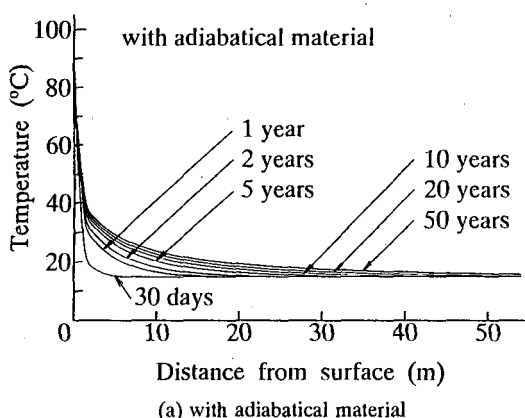
3.1 計算方法

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 の位置に表面に厚さ 10cm の断熱材を施した場合と岩盤のみの場合とについて空洞の仕上がり直径をいずれも 10m として、熱水 (100°C) および低温物質貯蔵の代表例として LNG (-162°C) を貯蔵した場合の非定常の温度分布を要素分割法⁹⁾を用いて求めた。ここで、断熱材の熱物性値については 2 で述べた値を、花崗岩の熱物性値については別の実験^{10), 11)}により求めた値を用いて解析した。

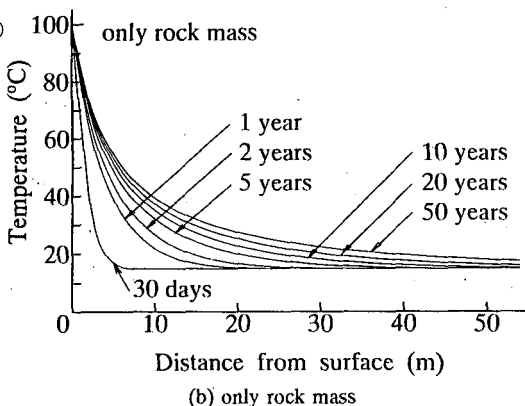
3.2 計算結果および考察

熱水の場合は一時貯蔵を想定しているが空洞を構造物として考え、熱水貯蔵に使用し 50 年経過するまでの温度分布を求めた。結果を Fig.7(a),(b) に示している。断熱材を施すことにより空洞からの熱伝導に遅れが生じていることがわかる。Fig.8 に貯蔵 1 年後までの空洞の表面付近の温度分布の経時変化を示している。岩盤に断熱材を付加することにより熱が遅く伝わっていることがわかる。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る。これは 2 で述べた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思われる。これらの結果より断熱材が岩盤に極めて熱を伝えるのが遅く、空洞周辺岩盤の熱応力の軽減が期待できるとと思われる。

次に LNG 貯蔵の場合の結果を Fig.9(a),(b) に示している。この場合も熱水貯蔵の場合と同様に温度分布



(a) with adiabatical material



(b) only rock mass

Fig.7 Temperature distribution around opening.

断熱材を付加することにより熱が遅く伝わっていることがわかる。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る。これは 2 で述べた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思われる。これらの結果より断熱材が岩盤に極めて熱を伝えるのが遅く、空洞周辺岩盤の熱応力の軽減が期待できるとと思われる。

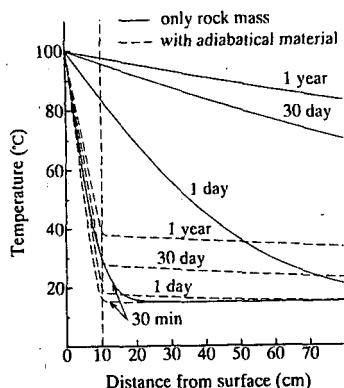
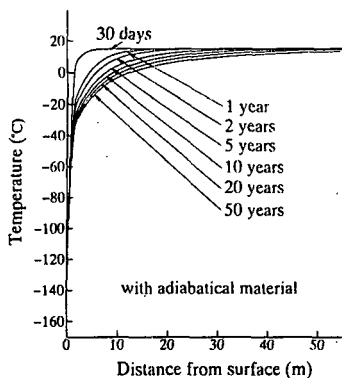
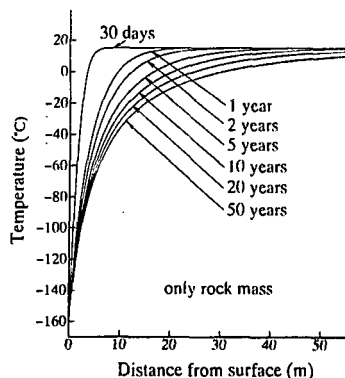


Fig.8 Temperature distribution around opening.



(a) with adiabatical material



(b) only rock mass

Fig.9 Temperature distribution around opening.

に遅れが生じていることがわかり、断熱材が熱応力軽減に有効な手段となり得ることが予想される。解析結果の妥当性を検討するため15×25×10cmの花崗岩の供試体の一つの面に厚さ2.5cmの断熱材を付加し、他の面は別の断熱材で覆い一次元的に熱が伝わるようにして冷却し、実測した温度分布と要素分割法により求めた解析値を比較した。結果をFig.10に示す。測定結果と解析結果はよく一致しており、本解析により温度分布を予測することの妥当性が確かめられた。

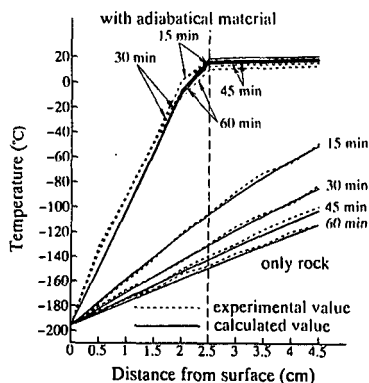


Fig.10 Temperature distribution.

4 空洞周辺の応力解析

4.1 解析方法

前述の温度分布をもとに、亀裂解析法¹²⁾を用いて応力解析を行った。花崗岩の物性値については別の実験^{13), 14)}により求めた値を使用した。なお、本解析では亀裂のない新鮮な岩盤としている。

4.2 解析結果および考察

熱水貯蔵に使用し、貯蔵後50年経過した時の岩盤内の応力状態をFig.11(a),(b)に示す。断熱材を施した場合には岩盤のみの場合に比べ空洞表面付近の接線方向の圧縮応力は約1/3程度、地山内部に発生する圧縮応力も約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LNG貯蔵の場合の結果をFig.12(a),(b)およびFig.13(a),(b)に示す。空洞周辺岩盤は低温の影響を受けて収縮し、断熱材を施した場合には貯蔵1年後には放射状

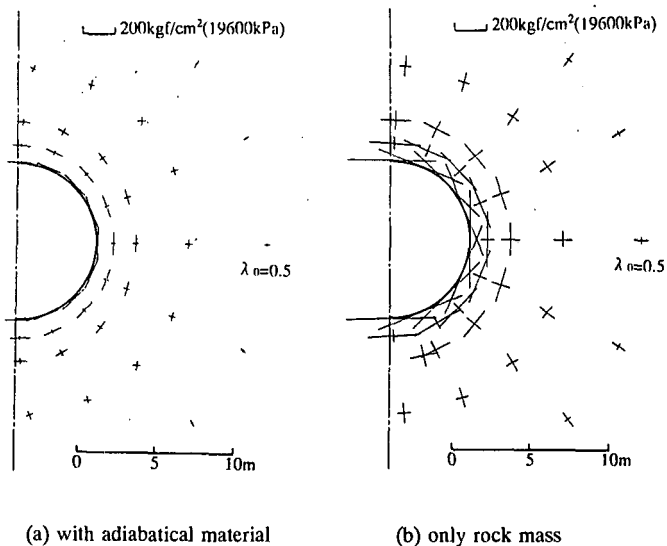


Fig.11 Principal stress direction around openings.

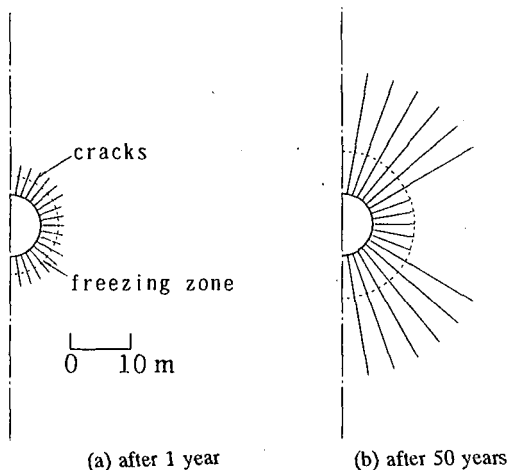


Fig.12 Range of cracks around opening.

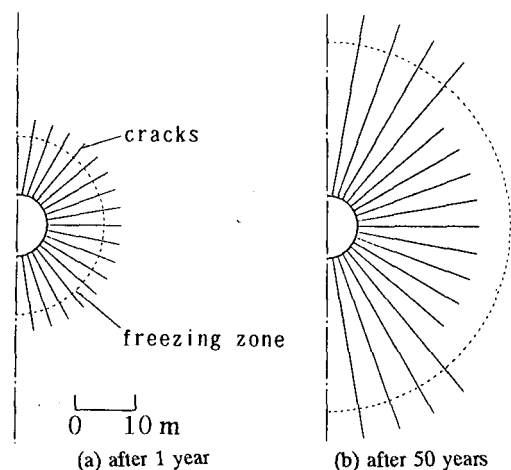


Fig.13 Range of cracks around opening.

に約3.7m, 空洞の天端付近で約4.9mの亀裂が発生している。貯蔵50年後にはそれぞれ約6.9m, 約19.9mまで亀裂が進展している。それに対し岩盤のみの場合には1年後で約12.5m, 50年後で放射状に約20m, 最大で空洞の上下に約30mの亀裂が生じており, 断熱材を施すことにより少なくとも1/3程度亀裂を軽減できるものと考えられる。以上のように断熱材を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, 2で述べたように断熱材のひずみの変化は岩石に比べて大きく, 施工の際には緊き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, 高温および低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。これらについては今後の研究課題としたい。

5 結 言

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) 高温および低温下における断熱材のひずみは花崗岩の約8~18倍であることがわかった。
- 2) 断熱材の熱拡散率は花崗岩とほぼ同程度であるが, 熱伝導率は1/100程度となることがわかった。
- 3) 要素分割法により熱水およびLNG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。
- 4) 応力解析の結果, 断熱材を施すことにより, 熱水貯蔵の場合には熱応力を1/2~2/3程度, またLNG貯蔵の場合には亀裂を1/3程度軽減できることがわかった。

参 考 文 献

- 1) (財)省エネルギーセンター編: 省エネルギー便覧, pp.44~45, 1990.
- 2) 農林水産省経済統計情報部編: ポケット農林水産統計, pp.36~37, 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) 稲田善紀・北村聖一・岡田明浩: 土木学会論文報告集, No.343, pp.35~44, 1984.
- 5) 稲田善紀・甲村雄一・藤原斉都: 土木学会論文集, No.445/Ⅲ-18, pp.65~73, 1992.
- 6) 稲田善紀・藤原斉都・畑野俊一郎・門田俊一: 土木学会論文集, No.499/Ⅲ-28, pp.22~30, 1994.
- 7) Y.INADA,T.MANABE,S.OHASHI,M.YOSHIKAWA: Proc. The Third Int. Conf. on Underground Space and Sheltered Build.,pp.338~343,1988.
- 8) 稲田善紀・寺田宇・伊藤一郎: 水曜会誌, 第17巻, 第5号, 200~203頁, 1971.
- 9) 稲田善紀・重信純: 日本鉱業会誌, 第99巻, 第1141号, pp.179~185, 1983.
- 10) 稲田善紀・真鍋孝信: 第1回計算力学シンポジウム講演論文集, pp.291~298, 1987.
- 11) 稲田善紀・八木則男: 材料, 第29巻, 第327号, pp.1228~1233, 1980.
- 12) 稲田善紀・谷口浩二: 日本鉱業会誌, 第10巻, 第1192号, pp.365~372, 1987.
- 13) 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.
- 14) 稲田善紀・八木則男: 材料, 第29巻, 第327号, pp.1221~1227, 1980.