

低温の影響を受ける岩盤内空洞の問題点と対策 COUNTERMEASURES FOR SOME PROBLEMS RELATED TO UNDERGROUND OPENING AFFECTED BY LOW TEMPERATURE

稲田善紀*・木下尚樹**・西岡哲***・越智健三****

Yoshinori INADA, Naoki KINOSHITA, Tetsu NISHIOKA and Kenzo OCHI

In the case of low temperature materials such as LNG, LPG and frozen food etc., during storage in openings excavated in rock mountain, countermeasures for the reduction of thermal stress occurred around the openings and preventing leakage of gas and liquid from the opening become important problems. The authors proposed a "combination lining system of resin and adiabatical material" as a countermeasure for preventing leakage and reduction of thermal stress at the same time. It was assumed for the analysis that water proof sheets were set up between the adiabatical material and the resin, so thermal behaviors were independent of each other. From the results of the analysis, it was found that this system is an effective way.

1. 緒 言

近年、石油の代替エネルギーとしてLNGおよびLPGの需給量が増加傾向にある。また、生活様式の多様化や食糧の輸入量の増加などから冷凍食品の需給量も増加しており、今後これら低温物質を貯蔵する施設の増加が予想される。筆者らはこれまでこれら低温物質の貯蔵方法として土地の立体的有効利用や省エネルギー、環境保全等の利点を持つ地山岩盤内に設けた空洞への直接貯蔵を提案し、検討を行ってきている^{1)・2)}。これまでの研究により低温物質を貯蔵した場合、空洞周辺の岩盤には熱収縮による亀裂が放射状に発生することがわかっており、亀裂の発生を抑制するために空洞周辺に発生する熱応力を軽減することが必要となってくる。また、亀裂からの液漏れや冷氣漏れが問題となるため、その対策として水封式、氷ライニング方式を提案し、検討、報告してきている^{3)・4)}。

本研究では、熱応力軽減および液・冷氣漏出防止を同時に行う方法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をライニングした場合を想定し、検討を行った。まず、低温下における花崗岩、断熱材および高分子系材料の熱物性値を実験により求めた。次に実験により求めた値を用いて要素分割法⁵⁾により空洞周辺の温度分布を複合材料問題として求めた。また、この温度分布をもとに亀裂解析法⁶⁾により応力解析を行い、貯蔵時の空洞周辺岩盤、断熱材および高分子系材料の挙動を求め、熱応力軽減および液・冷氣漏出防止の効果について考察した。

*正会員 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
***正会員 東急建設(株) 技術研究所土木研究部 室長
****正会員 工博 東急建設(株) 技術研究所土木研究部 主任研究員

2. 低温下における高分子系材料の熱物性値

2.1 実験に使用した試料

低温物質貯蔵時の液・冷気漏出防止対策としてのライニングに有利な高分子系材料を選定するため、ビニルエステル樹脂、エポキシ樹脂、これらの樹脂に熱収縮量を抑制するために砂を混入したもの、引張強度を向上させるために炭素繊維を混入したもの等について低温下における強度・変形特性および熱物性値を実験により求めた。その結果、とりわけエポキシ系樹脂がライニングに有利であることがわかった。ここではさらにエポキシ系樹脂の内、U社製のエポキシ樹脂 (sample 1)、ガラスフレーク混入エポキシ樹脂 (sample 2) および水中硬化型ガラスフレーク混入エポキシ樹脂 (sample 3) について低温下における強度・変形特性および熱物性値を求めることとした。sample 2は重量比で20%、sample 1およびsample 3は50%の硬化剤を加え、 $\phi 3 \times 15\text{cm}$ の型枠に流し込み、硬化後、脱型して室内養生した。

また、比較のため地山岩盤として想定している花崗岩 (愛媛県越智郡大島産) についても実験を行った。花崗岩は成形後、真空ポンプを用いて水を浸潤させ、湿潤状態で実験を行った。

2.2 圧縮強度および引張強度

圧縮強度用の供試体は $\phi 3 \times 6\text{cm}$ に成形した。冷却速度は $1^\circ\text{C}/\text{min}$ とし、所定の温度に達した後の保温時間は60分間とした。結果をFig.1に示す。温度低下に伴い圧縮強度が上昇していることがわかる。高分子系材料の圧縮強度はいずれの温度においても花崗岩と比べ小さい。しかし、強度の上昇の割合は大きく、極低温になると圧縮強度は花崗岩に近づくことがわかる。

引張強度は圧裂引張試験により求めた。供試体は $\phi 3 \times 3\text{cm}$ に成形し、降温速度および保温時間は圧縮強度試験と同様にした。結果をFig.2に示す。温度の低下とともに引張強度は上昇しており、sample 2が最も引張強度が大きい。

2.3 接線弾性係数およびポアソン比

圧縮強度試験の際に供試体の表面に張り付けたひずみゲージにより得られた応力-ひずみ曲線より破壊応力の30%付近の接線弾性係数およびポアソン比を求めた。結果をFig.3およびFig.4に示す。接線弾性係数は温度の低下とともに上昇しており、花崗岩と比較すると小さい。ポアソン比は温度に関係なくほぼ一定で花崗岩よりも値は大きい。

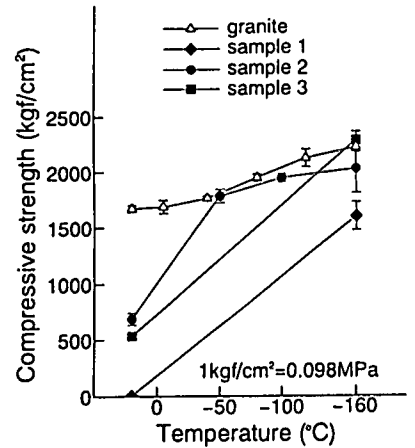


Fig.1 Compressive strength of resin.

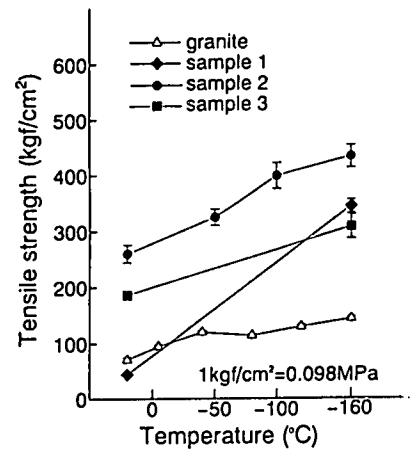


Fig.2 Tensile strength of resin.

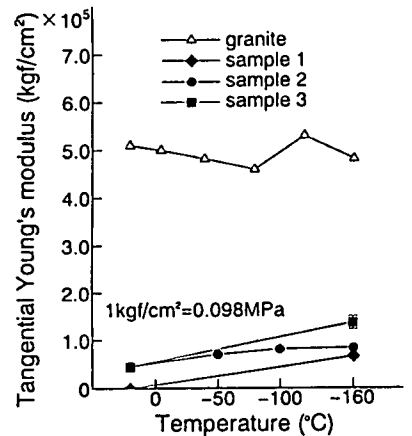


Fig.3 Tangential Young's modulus of resin.

3. 低温下における高分子系材料の熱物性値

3.1 ひずみ

石英ガラス棒を用いた比較法⁷⁾により室温から温度の低下に伴う試料のひずみを測定した。降温速度は1℃/min、所定の温度に達した後の保温時間は60分間とした。測定結果がFig.5である。温度の低下に伴い試料が収縮しているが、sample 2およびsample 3はsample 1と比較してひずみが小さく、ガラスフレークにより熱収縮量が抑制されているものと推察される。花崗岩と比較すると高分子系材料のひずみは大きい。

次にひずみの測定結果から密度の変化を求めた結果をFig.6に示す。温度の低下とともに密度は上昇しており、ひずみの変化の最も大きかったsample 1では20℃から-160℃で約7%上昇している。

以上の強度・変形特性およびひずみの測定結果から、① sample 2およびsample 3のひずみがsample 1にくらべて小さい。② sample 2の引張強度が最も大きい。③ sample 2の接線弾性係数がsample 3よりも小さい。という理由でsample 2が低温物質貯蔵時に熱収縮により発生する引張応力に対して最も有利であると判断し、以下の熱物性値はsample 2について述べる。

3.2 熱拡散率および比熱

熱拡散率は要素分割法に実測値を適用させることにより求めた。15×25×10cmに成形した供試体に1次元の熱伝導が得られるように5つの面を断熱材で覆い、残りの1面(15×10cm)を熱源面として液体窒素を用いて冷気(-160℃)を吹き付けた。この面から5mm間隔で5本の温度センサーを挿入し、温度変化を測定した。これから得られた時間-温度曲線を要素分割法に適用し、熱拡散率を求めた。結果をFig.7に示す。温度の変化に関係なくほぼ一定の値である。花崗岩の熱拡散率と比較するとsample 2の値は1/10程度であった。

比熱は所定の温度に冷却した試料と温度を予め測定した蒸留

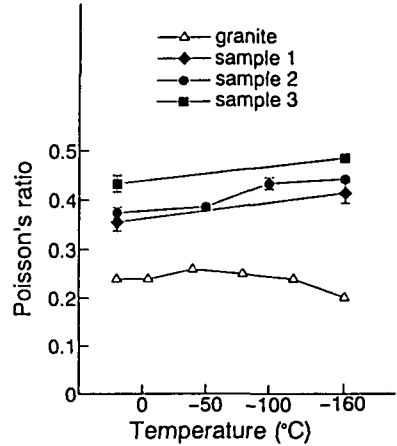


Fig.4 Poisson's ratio of resin.

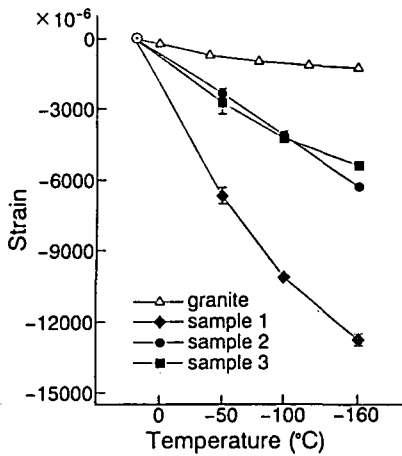


Fig.5 Strain of resin.

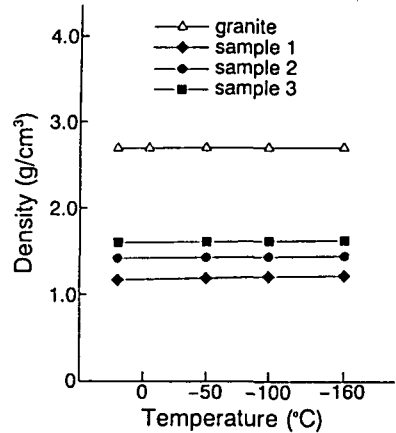


Fig.6 Density of resin.

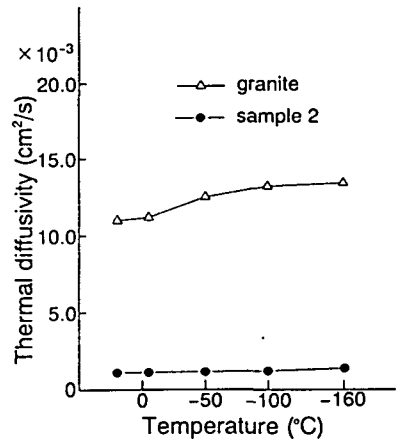


Fig.7 Thermal diffusivity of resin.

水を断熱容器内で混合し、温度変化を測定することにより求めた。供試体の寸法は $40 \times 40 \times 5\text{mm}$ に成形した。なお、降温速度は $1^\circ\text{C}/\text{min}$ 、保温時間は60分間とした。得られた結果が Fig.8 である。温度の低下に伴いわずかに値が小さくなっている。花崗岩の比熱とほぼ同様の値であることがわかった。

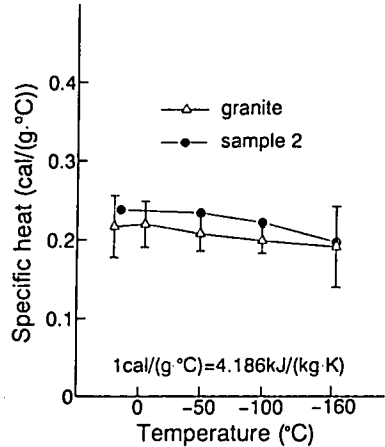


Fig.8 Specific heat of resin.

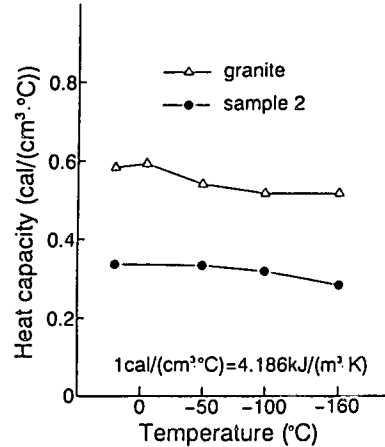


Fig.9 Heat capacity of resin.

3.3 熱容量および熱伝導率

前述の比熱および密度のより熱容量を算定した結果が Fig.9 である。温度の低下に伴い熱容量は小さくなっているが実用上はほぼ一定の値とみなせる。また、sample 2 の熱容量は花崗岩と比べ約 $1/2$ であった。次に熱拡散率と熱量量から熱伝導率を求めた。結果が Fig.10 である。sample 2 の熱容量は花崗岩の約 $1/10$ であった。

4. 低温下における断熱材の熱物性値

4.1 実験に使用した試料

実験に用いた断熱材は D 社製の押出発泡ポリスチレン (sample 4) および A 社製の硬質ウレタンフォーム (sample 5) である。両試料とも広く建築材料として用いられている断熱材である。

4.2 実験結果および考察

熱拡散率の測定結果が Fig.11 である。sample 4 では温度低下に伴い値は大きくなっている。sample 5 でもわずかながら同様の傾向がみられた。今回の実験範囲では実用上一定とみなされ、花崗岩の熱拡散率と比較して sample 4 では同程度、sample 5 では $1/2$ 程度の値である。

Fig.12 は熱容量を示している。温度の低下に伴い sample 4 では減少し、sample 5 では増加する傾向にある。

熱伝導率を求めた結果を Fig.13 に示す。いずれの場合も温度の低下に伴いわずかではあるが増加している。この場合の値は花崗岩の熱伝導率の約 $1/100$ であり、断熱材は岩石と比べ極め

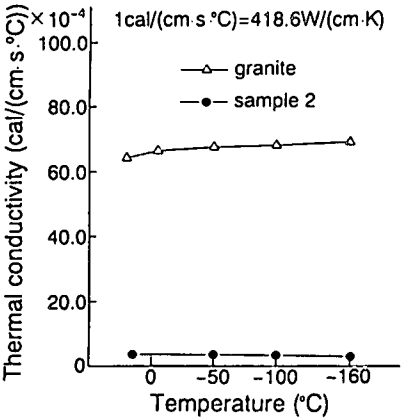


Fig.10 Thermal conductivity of resin.

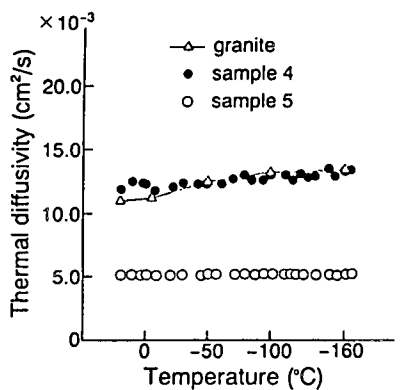


Fig.11 Thermal diffusivity of adiabatical material.

て熱を遅く伝えるものと考えられる。

5. 液・冷氣漏出防止対策

5.1 解析方法

Fig.14 に示すように花崗岩の岩盤中に設けた空洞の表面に液・冷氣漏出防止対策として sample 2 のライニングを施し、仕上りの内径を 10m とした空洞

内に冷凍食品を貯蔵した場合の空洞周辺岩盤の温度分布および応力分布を解析した。ここで sample 2 の厚さは 3cm とし、空洞内の温度は食品の冷凍貯蔵では最も温度の低いマグロの貯蔵に要する -60°C を想定した。

ここではまず、空洞周辺の温度分布の経時変化を複合材料問題に対応した要素分割法により求めた。次に温度分布をもとに有限要素法に時間の概念を取り入れ逐次破壊を考慮した亀裂解析法を用いて応力解析を行った。花崗岩および sample 2 の物性値については前述の実験結果を用いた。

5.2 解析結果および考察

温度分布の解析結果を Fig.15 および Fig.16 に示す。Fig.16 は比較のために岩盤のみの場合について計算した結果である。いずれの場合にも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、空洞周辺に低温の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、いわゆる準定常状態となる。また、sample 2 のライニングを設けた場合には岩盤のみの場合と比べ、熱伝導に遅れがみられる。これは sample 2

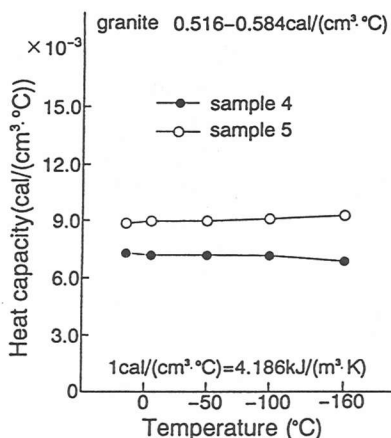


Fig.12 Heat capacity of adiabatical material.

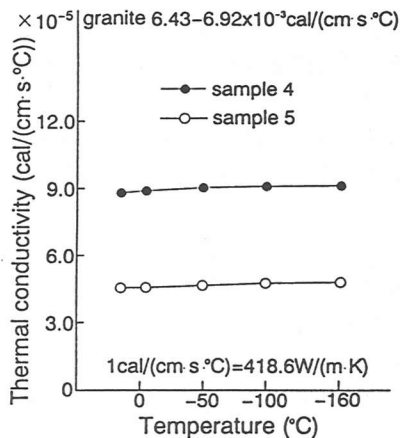


Fig.13 Thermal conductivity of adiabatical material.

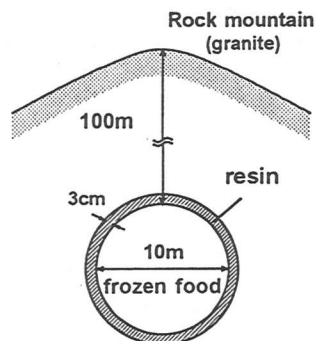


Fig.14 Opening model used in analysis.

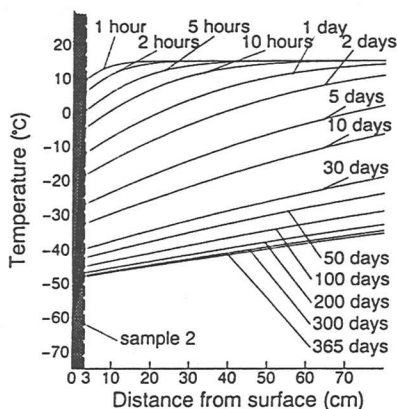


Fig.15 Temperature distribution around opening (with sample 2).

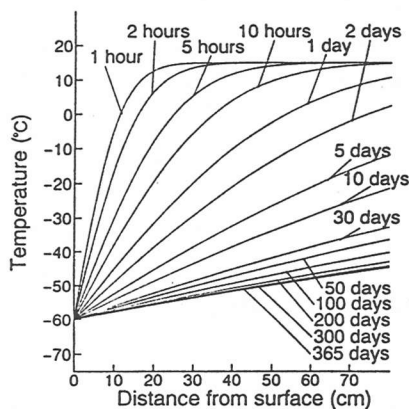


Fig.16 Temperature distribution around openings (rock mass only).

の熱拡散率および熱伝導率が花崗岩の約 1/10 と小さいことに起因しているものと考えられる。

次に sample 2 のライニングを設けた場合の応力解析の結果を Fig.17 に示す。貯蔵初期から熱収縮により空洞周辺岩盤に放射状に亀裂が発生するものの、引張強度が花崗岩に比べて大きいため sample 2 のライニングは破壊していない。しかし、時間の経過とともに空洞表面に生じた亀裂は空洞周辺に進展し、貯蔵 30 日後にはライニングが破壊することがわかった。これは低温の影響を受けて空洞周辺岩盤が熱収縮し、見かけ上は空洞は放射状の亀裂を伴って広がるという挙動¹⁾の影響を受けたためと考えられる。

そこで前述の問題点を考慮して岩盤とライニングの間に防水シート等を施し、互いの挙動を独立させた場合を想定した解析を行った。結果が Fig.18 である。空洞周辺岩盤は熱収縮により亀裂が発生し、時間の経過とともに進展しているが、sample 2 のライニングは貯蔵 1 年後においても安定していることがわかった。

6. 熱応力軽減対策

6.1 断熱材を用いた場合

ここでは空洞周辺に発生する熱応力の軽減対策として空洞表面に断熱材を施すことを想定した。ここではは 5 で想定した条件で高分子系材料のライニングではなく、空洞の表面に sample 5 の断熱材を厚さ 10cm で設け、仕上がりの内径を 10m とした場合について述べる。Fig.19 は温度分布の計算結果である。岩盤のみの場合の Fig.16 と比較すると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ことがわかる。また、断熱材部分と岩盤部分とでは温度勾配に差がみられる。これは断熱材と岩石で熱物性値が異なることに起因しているものと考えられる。

次に応力解析の結果から貯蔵 1 年後の亀裂の状態を Fig.20(a),(b) に示す。断熱材を施すことにより熱応力が軽減され亀裂の進展が抑制されていることがわかる。

6.2 高分子系材料を併用した場合

ここでは熱応力軽減および液・冷気漏出防止を同時に行う方法として空洞表面に断熱材 (sample 5) の層を設け、さらに高分子系材料 (sample 2) をライニングした

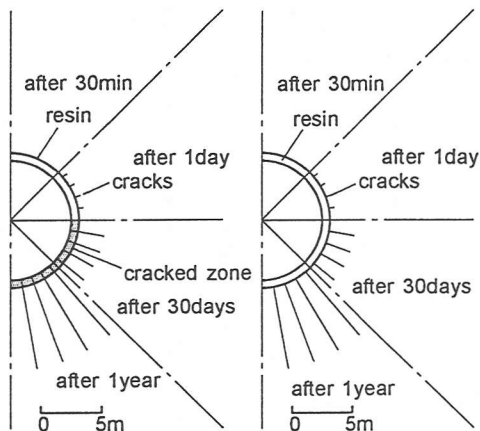


Fig.17 Cracks and cracked zone (direct). Fig.18 Cracks and cracked zone (indirect).

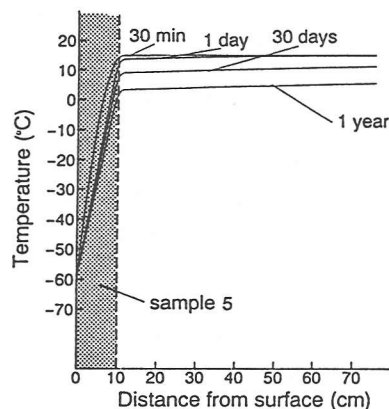
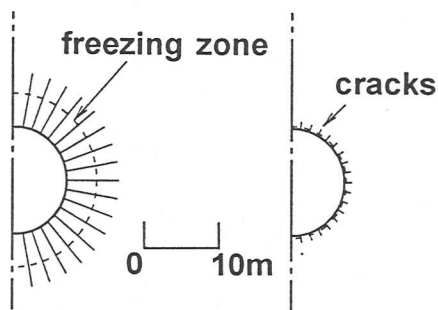


Fig.19 Temperature distribution around opening with sample 5.



(a) rock mass only (b) with sample 5
Fig.20 Cracks and cracked zone around openings.

場合を想定し、検討を行った。温度分布の経時変化を求めた結果が Fig.21 である。高分子系材料部分、断熱材部分、岩盤部分で温度勾配が異なり、特に断熱材部分において急激である。

応力解析の結果から貯蔵 1 年後の亀裂の状態を示したものが Fig.22 である。空洞周辺岩盤には放射状に亀裂が発生しているが、断熱材の効果により亀裂が抑制されている。また、高分子系材料のライニングも安定していた。

7. 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) 低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低下とともに上昇する。引張強度は花崗岩と比べ大きいが接線弾性係数は小さい。

(2) 低温下における高分子系材料の熱拡散率および熱伝導率は花崗岩の約 1/10 である。

(3) 低温下における断熱材の熱容量および熱伝導率は花崗岩の約 1/100 である。

(4) 高分子系材料のライニングを岩盤と切り離して設けることにより、液・冷気漏出防止対策となり得る。

(5) 空洞表面に断熱材の層を設け、さらに高分子系材料のライニングを設けることにより熱応力軽減および液・冷気漏出防止対策となり得る。

本研究を遂行するにあたり愛媛大学大学院の松尾暁氏には実験等で御協力頂いた。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, 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, 土木学会論文集, No.547/Ⅲ-36, pp.211-220, 1996.
- 2) Y.Inada, N.Kinoshita & S.Seki; Thermal behavior of rock mass around openings affected by low temperature, Proc. 8th Int. Cong. on Rock Mech.(ISRM), pp.721-724, 1995.
- 3) 稲田善紀, 甲村雄一, 藤原斉郁: 低温物質の地山岩盤内貯蔵時における亀裂からの液漏れ及び冷気漏れ対策に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.445/Ⅲ-18, pp.65-73, 1992.
- 4) Y.Inada & Y.Kohmura; Low temperature storage of gases in rock caverns with a water curtain system, Proc. 7th Int. Cong. on Rock Mech.(ISRM), pp.111-114, 1991.
- 5) 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

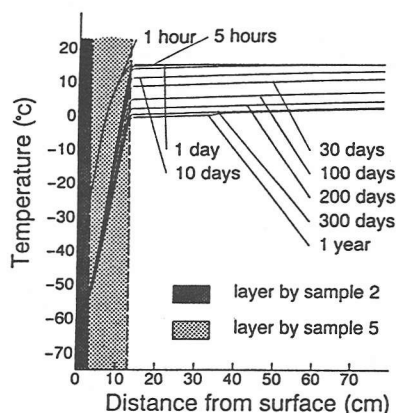


Fig.21 Temperature distribution around opening.

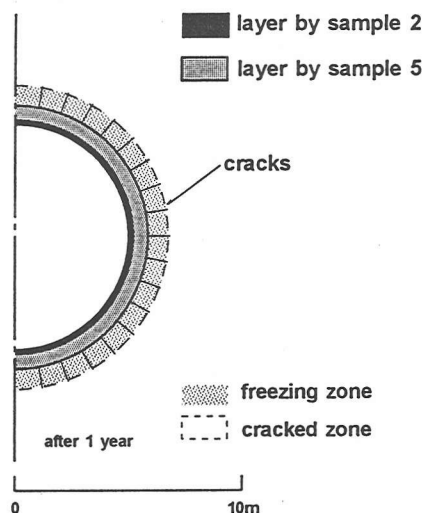


Fig.22 Cracks and cracked zone around opening.

誌, Vol.99, No.1141, pp.179-185, 1984.

6) 稲田善紀, 谷口浩二: 液化天然ガスの地下岩盤内貯蔵による空洞周辺の塑性領域, 日本鉱業会誌, Vol.103, No.1192, pp.365-372, 1987.

7) 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.