

低温物質貯蔵時の空洞周辺岩盤の挙動および熱応力軽減対策について
THERMAL BEHAVIOR AND THERMAL STRESS REDUCTION MEASURES OF ROCK MASS
AROUND OPENINGS DUE TO STORAGE OF LOW TEMPERATURE MATERIALS

愛媛大学工学部 稲田善紀 Yoshinori Inada ^{*}
愛媛大学工学部 木下尚樹 Naoki Kinoshita ^{**}
愛媛大学工学部 関 正造 Shozo Seki ^{***}

SUMMARY

In the case of low temperature material storage in openings excavated in granite, sandstone, tuff and mudstone mountain, temperature distribution and thermal behavior of rock mass around openings becomes an important problem. In this study, these behavior were analysed theoretically and confirmed by experimentally.

Then, to reduce thermal stress around openings, the authors proposing to use adiabatical material lining in opening. From the results of theoretical analysis, it is found that these measures were useful for reducing a thermal stress.

Key Words: *thermal behavior* (熱挙動), *thermal stress reduction* (熱応力軽減),
storage (貯蔵), *low temperature material* (低温物質)

1. 緒 言

近年、石油の代替エネルギーとしてのLNGおよびLPGの需給量が増加傾向にある^{1), 2)}。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^{3), 4)}、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、検討を行ってきた。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し、この亀裂からの液漏れや冷気漏れが問題となることがわかっており、その対策として水封式、氷ライニング方式および高分子系材料によるライニングを空洞表面に設ける方法等を検討し報告してきている^{5)~7)}。

本研究では空隙率の比較的小さい花崗岩および砂岩と空隙率の比較的大きい凝灰岩および泥岩について、岩盤および含水状態の差異が低温物質貯蔵時の空洞周辺岩盤の挙動に及ぼす影響を解析の結果から比較検討し考察した。また、この場合の岩盤の熱変形を実際に確認するため、小規模ではあるが花崗岩および凝灰岩の岩石供試体に孔を設けて冷却して孔表面のひずみを測定し、実測値と解析値を比較し考察した。

次に低温物質貯蔵時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した場合を想定し、実験により求めた低温下における断熱材の熱物性値を用いて要素分割法⁸⁾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⁹⁾により応力解析を行い、断熱材による熱応力軽減効果について考察した。

^{*}) Prof., Dept. of Civil & Ocean Engineering, Faculty of Engineering, Ehime University
3 Bunkyo-cho, Matsuyama, 790, Japan

^{**}) Research Assistant, Dept. of Civil & Ocean Engineering, Faculty of Engineering, Ehime University

^{***}) Researcher, Dept. of Civil & Ocean Engineering, Faculty of Engineering, Ehime University

表 1 実験に用いた岩石の物理的性質
(Table 1 Physical properties of rocks.)

Rocks	Porosity (%)	Moisture content ratio (%)	Degree of saturation (%)	Bulk specific gravity (g/cm ³)	True specific gravity (g/cm ³)
Granite(Dry)	1.99	0.16	20.67	2.625	2.673
Granite(Wet)	1.99	0.62	70.85	2.693	2.673
Sandstone(Dry)	8.12	1.46	16.77	2.400	2.616
Sandstone(Wet)	8.12	3.42	96.89	2.488	2.616
Tuff(Dry)	37.09	1.39	5.76	1.560	2.446
Tuff(Wet)	37.09	24.01	99.62	1.908	2.446
Mudstone(Dry)	39.42	1.31	5.42	1.631	2.692
Mudstone(Wet)	39.42	21.90	99.62	2.015	2.692

2. 低温下における各岩石の強度・変形特性

2. 1 実験に用いた試料

実験に用いた岩石は花崗岩（愛媛県越智郡大島産）、砂岩（福岡県大牟田市産）、凝灰岩（栃木県宇都宮市産）、および泥岩（神奈川県相模原市産）である。以下に示す2通りの方法で処理したものを試料として実験に供した。

① 室内で約1週間自然乾燥しこれをデシケータ内でさらに3日間乾燥させた。

② ①の状態のものを蒸留水を満たしたデシケータ内で真空ポンプにより5時間脱気した。

以後、①の状態のものを“Dry”，②の状態のものを“Wet”と呼ぶ。各岩石のDryおよびWetの物理的性質をTable 1に示した。

一般に岩石には力学的異方性が存在し、試料を採取する方向を考慮する必要がある。今回用いた花崗岩については同一方向に採取したものを、砂岩、凝灰岩および泥岩については堆積層に対して平行および垂直に採取した場合について力学的異方性を検討した結果、実用上無視できる範囲のものであったため、層に平行に採取した場合の結果について述べる。

2. 2 強度・変形特性

各岩石の低温下における圧縮強度および引張強度を実験により求めた結果をFig.1およびFig.2に示す。いずれの岩石も圧縮強度および引張強度とも温度の低下とともに強度が上昇していることがわかる。これは、温度低下に伴い鉱物粒子が収縮して硬化したためにこのような結果になったものと考えられる。

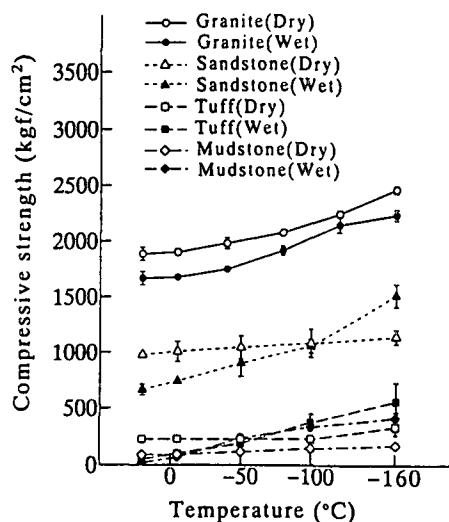


図 1 低温下における岩石の圧縮強度

(Fig.1 Compressive strength of rocks.)

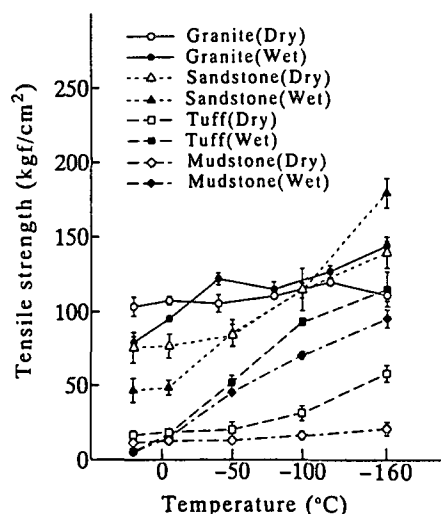


図 2 低温下における岩石の引張強度

(Fig.2 Tensile strength of rocks.)

また、Table 1 からわかるように空隙率の大きい凝灰岩および泥岩においては温度の低下とともに Dry よりも Wet の方が値が大きくなっている。これは、凝灰岩および泥岩自体の圧縮強度および引張強度が小さく、0℃以下では間隙中の水が氷結し温度低下とともに氷の圧縮強度および引張強度も上昇するため、氷の膠結物質としての影響を受けたためと考えられる。また、花崗岩の圧縮強度が他の岩石比べ大きいのにに対し、引張強度とくに Wet においては温度が低下するにつれて他の岩石との差が小さくな

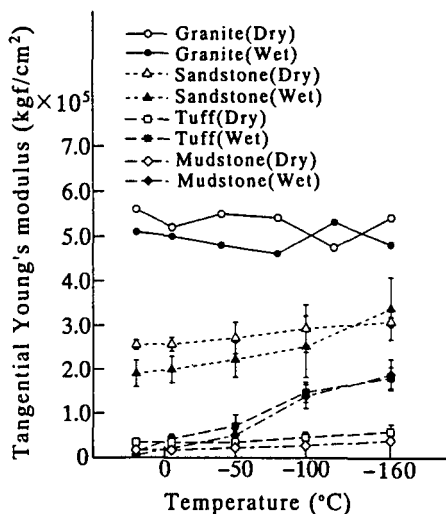


図3 低温下における岩石の接線弾性係数

(Fig.3 Tangential Young's modulus of rocks.)

ている。これは、花崗岩を構成している鉱物粒子の大きさが他の岩石より大きく、各々の粒子によって温度低下に伴う収縮量に違いがあるため潜在的欠陥等をさらに拡大する結果となり、圧縮強度よりは引張強度にその影響が強く現れたためであると考えられる。また、花崗岩は他の岩石に比べて空隙率および飽和度が小さいことや、他の岩石に比べて強度が大きいことから氷の膠結物質としての影響をあまり受けていないことにも起因しているものと考えられる。

次に、破壊応力の30%付近の接線弾性係数を求めた結果を Fig.3 に示す。花崗岩の場合はほとんどその値が変化していないが、他の岩石では温度の低下に伴い値が上昇していることがわかる。このことから温度の低下に伴い鉱物粒子および氷が収縮、硬化したことがうかがえる。

さらに破壊応力の30%付近の各岩石のポアソン比を Fig.4 に示す。いずれの岩石においても Dry よりも Wet の方が値は大きく、その差は凝灰岩および泥岩において顕著に現れている。また、花崗岩は他の岩石と違って温度の低下とともに Dry および Wet とも比較的値が小さくなっている。これは、前述のように温度低下に伴う鉱物粒子の熱収縮の挙動の違いがクラックを増加させ、その結果縦方向の応力が横方向に比較的伝わりにくかったものと推察される。また、各岩石とも Dry では温度低下に伴いその差

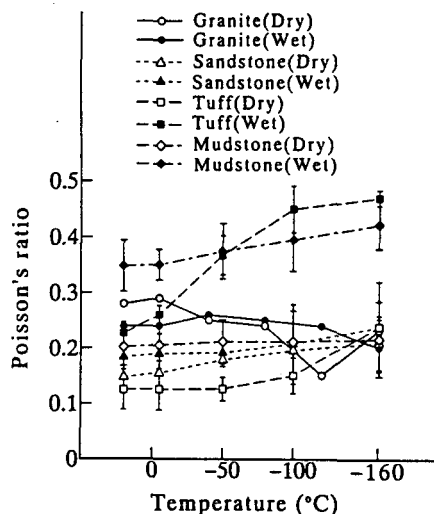


図4 低温下における岩石のポアソン比

(Fig.4 Poisson's ratio of rocks.)

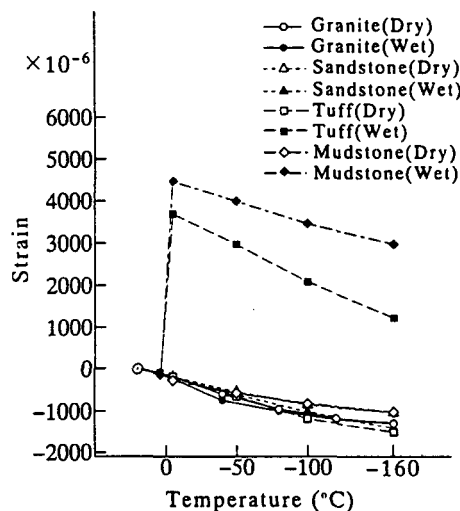


図5 低温下における岩石のひずみ

(Fig.5 Strain of rocks.)

は小さくなり、極低温下ではほぼ同じ値となることがわかる。一方、Wet では凝灰岩および泥岩の値が花崗岩および砂岩より大きく、温度の低下とともにその差は大きくなることがわかる。

2. 3 線膨張係数

石英ガラス棒を用いた比較法¹⁰⁾により室温(15℃)から温度低下に伴うひずみを測定した。結果を Fig.5 に示す。Dry では、いずれの岩石においても温度の低下とともに値が小さくなっていることがわ

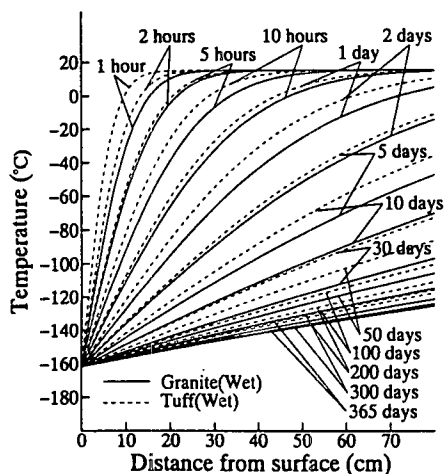


図6 空洞周辺の温度分布

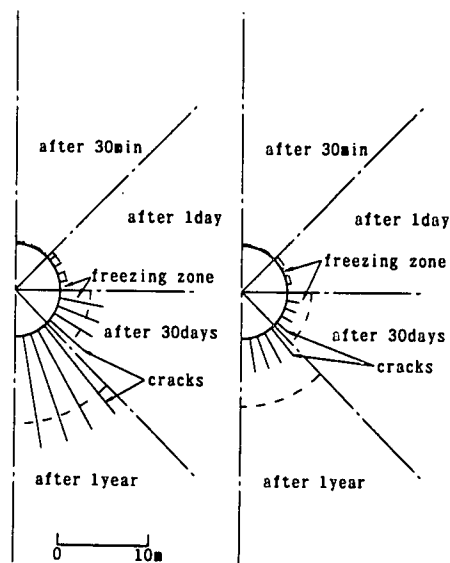
(Fig.6 Temperature distribution around opening.)

かる。これは、温度低下に伴い鉱物粒子が収縮するためと考えられ、岩石の種類に関係なくほぼ同様の値であることがわかる。Wetについてみると花崗岩および砂岩ではDryの場合と同様の傾向を示しているが、凝灰岩および泥岩では4℃付近まではわずかながら一旦収縮し、-5℃付近から急激に膨張し、その後収縮していることがわかる。これは、凝灰岩および泥岩は空隙率が大きく、鉱物粒子間の結合力が弱く、0℃付近で空隙中の水が氷結膨張する際に約 3000×10^{-6} のひずみが生じる¹¹⁾ことによる影響を大きく受けたためであると考えられる。

3. 空洞周辺岩盤の挙動の解析

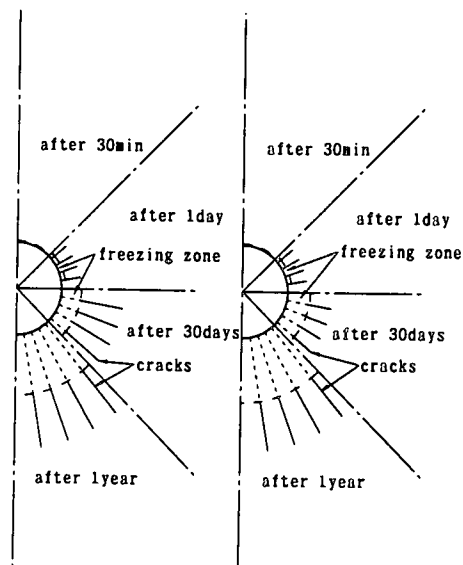
3. 1 温度分布

花崗岩、砂岩、凝灰岩および泥岩の地山岩盤の土被り100mの位置に直径10mの単一円形空洞を設け、LNGを貯蔵した場合を想定する。この場合の空洞周辺岩盤の温度分布の経時変化を要素分割法により求めた。計算の際に必要な岩石の熱物性値については別の実験により求めた値^{6), 7)}を用いた。代表例として花崗岩および凝灰岩の場合の温度分布の解析結果をFig.6に示す。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その勾配は緩やかになり、貯蔵1年後には温度変化が実用上無視できる準定常状態となることがわかる。また、4種類の岩石の中で最も熱拡散率の値が大きい花崗岩($\kappa = 11.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$)と最も値が小さい凝



(a)花崗岩

(b)砂岩



(c)凝灰岩

(d)泥岩

図7 空洞周辺の亀裂の進展

(Fig.7 Cracks and cracked zone around opening.)

灰岩($\kappa = 4.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$)の温度分布を比較した結果、凝灰岩の方が花崗岩に比べて初期の時間では熱伝導に遅れが見られるものの、時間の経過とともにその差は小さくなり、熱拡散率の違いがこの程度であれば、温度分布にあまり影響を及ぼさないことがわかった。

3. 2 空洞周辺岩盤の挙動

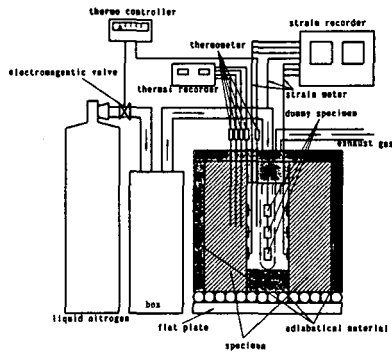


図8 室内実験の概念図

(Fig.8 Schematic diagram of the test.)

前述の温度分布をもとに有限要素法に逐次破壊を考慮した亀裂解析法を用いてLNG貯蔵時の空洞周辺岩盤の挙動を求めた。解析は温度分布が準定常状態となる貯蔵1年後までを対象とし、貯蔵30分後、1日後、30日後および1年後の4つのステップに分割して行った。

解析結果を Fig.7(a) ~ (d) に示す。花崗岩の場合空洞周辺岩盤には熱収縮による亀裂が放射状に発生し、時間の経過とともに亀裂が進展している。砂岩地山の場合いずれのステップにおいても花崗岩より亀裂の範囲は小さい。これは、花崗岩と比較して砂岩の線膨張係数および接線弾性係数が小さいことから発生する熱応力が小さく、また極低温下においては砂岩の引張強度が花崗岩に比べて大きいことに起因しているものと考えられる。凝灰岩の場合には貯蔵30分後において空洞表面から10cmの範囲がせん断破壊している。これは、凝灰岩の空隙率が花崗岩および砂岩に比べて大きく、鉱物粒子間の結合力が弱いこと、間隙水の氷結膨張の影響を大きく受けたためと考えられる。氷結域は時間の経過とともに広がるが、氷結域の空洞表面側は周辺に比べ低温であるため接線弾性係数が大きく、したがって空洞側に膨張できず、逆に地山側に膨張し、氷結域の周辺に亀裂が発生したと思われる。しかし、貯蔵30日経過後は1度生じた亀裂は水の氷結膨張によりふさがり安定していることがわかった。泥岩の場合には凝灰岩と同様の挙動をすることがわかった。

以上のことから、LNG貯蔵時における岩盤は岩質および含水率の違いにより異なる熱挙動を示すことがわかった。

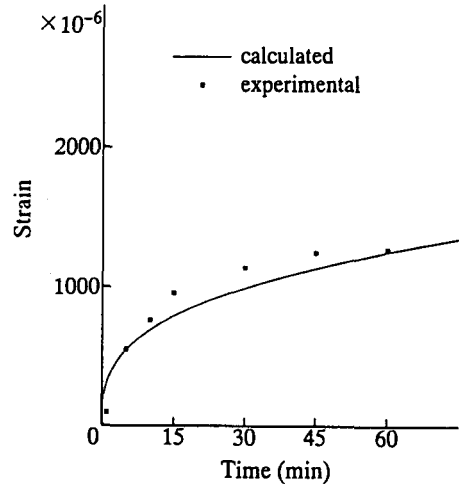


図9 孔表面のひずみの変化(花崗岩)

(Fig.9 Surface strain of granite.)

3. 3 岩石供試体を用いた室内実験

低温物質貯蔵時における空洞の熱変形を実際に確認するため、小規模ながら花崗岩および凝灰岩の供試体を用いて室内実験を行った。実験の概念図を Fig.8 に示す。一辺30cmの立方体に成形された亀裂のない岩石供試体の中央に直径9cmの孔を設け孔壁表面にひずみゲージを設置した。熱源には液体窒素を使用し孔内を絶えず所定の温度に保ち、時間の経過に伴う孔壁表面のひずみを測定した。また、孔周辺に温度センサーを挿入し温度分布も同時に測定した。本実験では、LNGの貯蔵を想定して孔内の温度を-160℃とした。また、熱応力を考慮した有限要素法にて解析を行い、実験結果と比較した。ただし、ここでは便宜上平面ひずみ問題として解析を行った。まず、花崗岩供試体を用いた場合のひずみの実測値と解析値を比較した結果を Fig.9 に示す。孔は低温の影響を受け時間の経過とともに供試体周辺に向かって広がっていることがわかる。次に湿潤状態の凝灰岩の場合の結果を Fig.10 に示す。孔は中心に向かって大きく張り出していることがわかる。これは空隙中の水の氷結膨張の影響を大きく受けたものと考えられる。いずれの場合にも実測値と解析値はほぼ一致しており、これらの結果から熱応力を考慮した有限要素法は実際の現象をよく表現し得るものと考えられ前述の解析結果の妥当性を確認することができた。

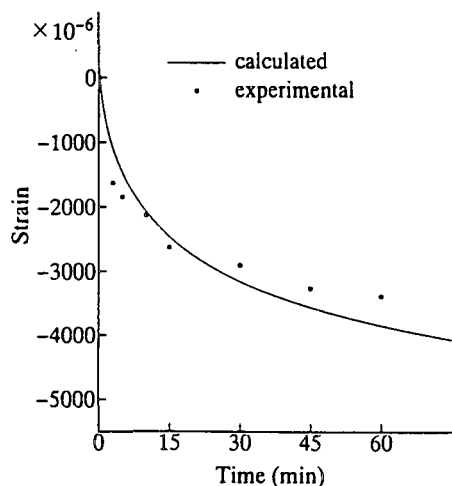


図10 孔表面のひずみの変化(凝灰岩)
(Fig.10 Surface strain of tuff.)

表2 解析に使用した断熱材の熱物性値

(Table 2 Thermal properties of adiabatical materials.)

	Thermal diffusivity ($\times 10^{-6}$ cal/sec)	Specific heat (cal/g $\cdot$ °C)	Heat capacity ($\times 10^{-3}$ cal/cm $\cdot$ °C)	Thermal conductivity ($\times 10^{-6}$ cal/cm $\cdot$ sec $\cdot$ °C)
sample 1	12.60	0.25	7.18	9.05
sample 2	5.19	0.31	8.99	4.67

4. 断熱材を用いた熱応力軽減に関する一考察

4. 1 解析に用いた断熱材

前述のように低温物質を貯蔵した場合には空洞周辺には岩盤の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、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、できる限り発生する熱応力を軽減させる必要がある。ここ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。

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。両試料とも一般的に広く建築材料として用いられている断熱材である。熱物性値については別の実験^{1,2)}により求めた値を用いた。解析に用いた断熱材の熱物性値を Table 2 に示す。これより断熱材の熱拡散率は花崗岩とほぼ同程度かまたは1.2倍程度であるが、熱容量が小さいため、熱伝導率は1/100程度となることがわかる。

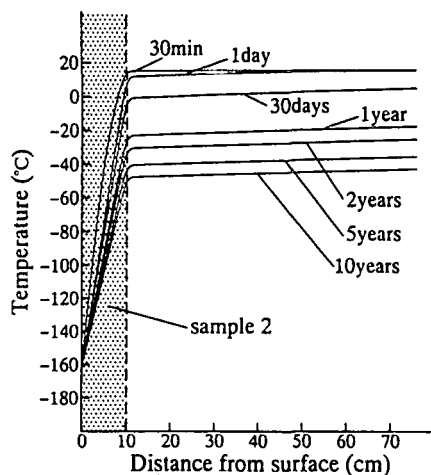


図11 断熱材を施した場合の温度分布
(Fig.11 Temperature distribution in case of using adiabatical materials.)

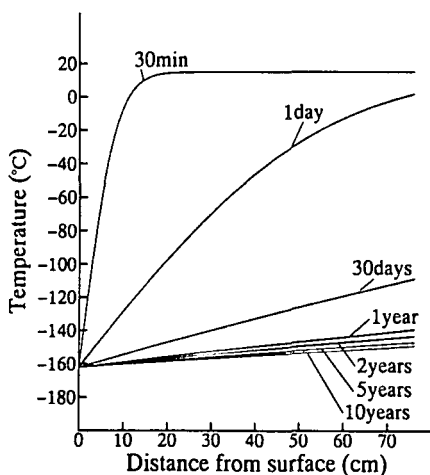


図12 岩盤のみの場合の温度分布
(Fig.12 Temperature distribution in case of only rock mass.)

4. 2 空洞周辺の温度分布

花崗岩地山の土被り100mの位置に表面に断熱材を施した仕上がり内径10mの単一円形空洞を設け、そこにLNG (-162°C)、冷凍食品 (-60°C) およびLPG (-43°C) を貯蔵した場合を想定する。

Fig.11 は空洞の表面に10cmの厚さで Sample 2 の断熱材を施し、LNGを貯蔵した場合の貯蔵10年後までの空洞周辺の温度分布の経時変化を示したものである。比較のため岩盤のみの場合についての結果

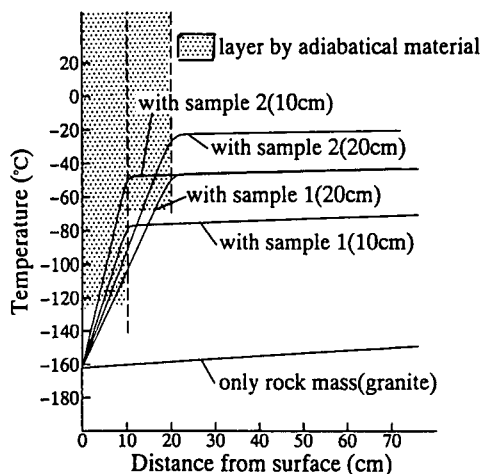


図13 貯蔵10年後の温度分布

(Fig.13 Temperature distribution after 10 years.)

を Fig.12 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を生じ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、断熱材部分の勾配が急であるのに対し、岩盤部分ではほとんど勾配がないことがわかる。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思われる。これらの結果より断熱材が岩盤に極めて熱を遅く伝え、空洞周辺岩盤の熱応力の軽減が期待できるものと思われる。

岩盤のみの場合、Sample 1 を10cmおよび20cmの厚さで施した場合、Sample 2 を10cmの厚さで施した場合について貯蔵10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 Fig.13 である。いずれの場合においても断熱材部分の温度勾配は岩盤部分に比べて急であり極めて遅く熱を伝えていることがわかる。Sample 1 の厚さを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 の約1/2 と小さいためであると考えられる。

4. 3 空洞周辺の応力解析

前述の温度分布をもとに、亀裂解析法を用いて解析を行い、断熱材を空洞表面に設けた場合の熱応力

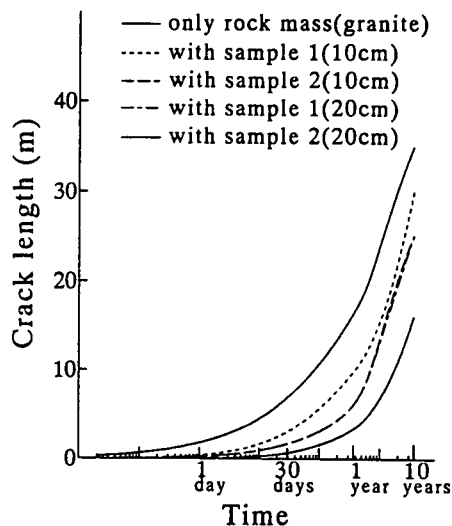


図14 空洞周辺の亀裂の進展長

(Fig.14 Crack length around opening.)

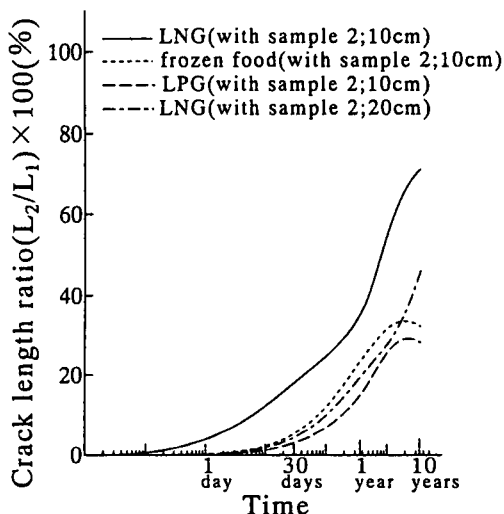


図15 亀裂長比の変化

(Fig.15 Change of crack length ratio.)

の軽減に関して考察した。

Fig.14 は岩盤のみの場合と断熱材を施した場合との発生する亀裂の進展長の経時変化を示したものである。いずれの場合においても時間の経過とともに亀裂は空洞表面から放射状に空洞周辺へ進展するが、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。貯蔵10年後において亀裂の進展長は Sample 1 を10cm施した場合は岩盤のみの場合に比べ約85%，Sample 2 を10cm施した場合および Sample 1 を20cm施した場合は約70%，Sample 2 を

20cm施した場合は約50%であり、施す断熱材の厚みが増すほど熱応力の軽減効果が大きく、亀裂の進展が抑制されていることがわかった。また、Sample 1 に比べ Sample 2 の方が亀裂の進展長が小さくなっており、断熱材の熱物性値が亀裂の進展に影響を及ぼすものと考えられる。

次にLNG、冷凍食品およびLPG貯蔵時の岩盤のみの場合の亀裂の進展長(L_1)と断熱材を施した場合の亀裂の進展長(L_2)との比(L_2/L_1)を亀裂長比とし、その経時変化を示したものがFig.15である。いずれの場合においても初期の時間においては亀裂長比は小さく時間の経過とともに増加しており、断熱材の効果は時間経過に伴い低下していくことがわかる。しかし、LNG貯蔵の場合には亀裂長比は増加する一方であるのに対し、冷凍食品およびLPG貯蔵の場合には亀裂長比の増加は55%程度で抑えられていることがわかる。このことより貯蔵温度が高い方が断熱材による熱応力の軽減効果は大きいものと推察される。

5. 結 言

本研究で得られた結果を要約すると次のとおりである。

- 1) 低温下における岩石の強度を実験により求めた結果、いずれの岩石も強度は上昇することがわかった。
- 2) 低温下において各岩石はDryではいずれも温度の低下とともに収縮し、Wetでは凝灰岩および泥岩では0℃付近で氷の影響により急激な膨張を示すことがわかった。
- 3) 解析の結果、岩盤内に空洞を設けてLNGを貯蔵した場合、花崗岩および砂岩の場合は時間の経過とともに亀裂の長さは進展し、凝灰岩および泥岩の場合は一度生じた亀裂は氷結時の膨張によってふさがり安定していることがわかった。
- 4) 岩石供試体を用いた室内実験を行った結果、熱応力を考慮した有限要素法は実際の現象をよく表現し得ることがわかった。
- 5) 空洞表面に断熱材を施すことにより空洞周辺に

発生する熱応力を軽減できることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 資源エネルギー庁省エネルギー石油代替エネルギー対策課監修：省エネルギー総覧，pp. 19～22, 1994.
- 2) 資源エネルギー庁長官官房企画調査課編：総合エネルギー統計，pp. 50～145, 1994.
- 3) 農林水産省経済局統計情報部編：ポケット農林水産統計，pp. 36～37, 1994.
- 4) 農林水産省経済局統計情報部編：農林水産物流通統計，pp. 59, 1994.
- 5) 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および冷気漏れ対策に関する基礎的研究，土木学会論文集，445/Ⅲ-18, pp. 65～73, 1992.
- 6) 稲田善紀，藤原斉郁，畑野俊一郎：低温物質の地山岩盤内貯蔵時の液漏れ・冷気漏れ対策としてのライニングに関する一考察，地下空間利用シンポジウム論文集，pp. 388～389, 1993.
- 7) 稲田善紀・藤原斉郁・畑野俊一郎・門田俊一：低温物質の凝灰岩岩盤内空洞貯蔵に関する基礎的研究，土木学会論文集，499/Ⅲ-28, pp. 22～30, 1994.
- 8) 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，日本鉱業会誌，99, 1141, pp. 179～185, 1983.
- 9) 稲田善紀：地下の空間利用，pp. 118～119, 森北出版，1989.
- 10) 稲田善紀・寺田孝・伊藤一郎：岩石の線膨張係数について，水曜会誌，17, 5, pp. 200～203, 1971.
- 11) 稲田善紀，甲村雄一：岩盤内亀裂への冷気漏出に関する二三の知見，愛媛大学工学部紀要，12, 2, pp. 119～128, Feb., 1991.
- 12) 稲田善紀，木下尚樹，関正造，菊池慎二：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.