

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

稲田善紀*・甲村雄一**・藤原斉郁***

花崗岩に比べ空隙が多く、このため水分を多く含み得るので岩盤の熱収縮が小さく熱応力の値も小さいと予想される砂岩岩盤内の空洞にLNG, LPG, 冷凍食品などの低温物質を貯蔵する場合を想定し、空洞周辺岩盤の挙動を解析によって求めた。次に、亀裂からの液漏れ、および冷気漏れ対策として水封式ならびに氷ライニング方式を適用することを提案し、それらの効果を解析および実験により検討した。

Keywords : low temperature materials, openings storage, cracks, leakage, water curtain system, ice lining system

1. 緒 言

エネルギー資源のほとんどを輸入に頼っている我が国では、エネルギーの貯蔵は重要な課題の一つである。総合エネルギー調査会需給部会発表の長期エネルギー需給見通しによると、一次エネルギー構成比のうち石油は年々減少すると予想されており、これに代わるエネルギーとしてのLNGやLPGの需給量の増加が指摘されている¹⁾。現在のLNG等の貯蔵方式は地上式や半地下式が主流であるが²⁾、この方法は地価の高い我が国において多大な敷地を必要とするばかりでなく、景観を損ねる点、防災上の点、また、維持管理の点からも必ずしも得策とは言えない点が多い。

一方、冷凍食品の供給量も近年増加の傾向を示しており³⁾、今後の貯蔵施設の増加が見込まれている。現在の冷凍倉庫は海岸部に広大な敷地を要しており、LNGを貯蔵する場合やLPGを貯蔵する場合と同様、土地の有効利用や維持管理等の観点から得策とは言えない点が多い。

これらの問題を考慮した貯蔵方法の一つとして地山岩盤内に設けた空洞や鉱山の廃坑を利用して上述の低温物質を直接貯蔵することが考えられる。花崗岩を対象とした場合、空洞周辺の岩盤は熱応力の影響を受け亀裂を生じることが既に報告されている^{4),5)}。このため、亀裂内部に液体や冷気が浸入し、亀裂がさらに進展することが予想され、亀裂からの液漏れ、冷気漏れ対策が重要な課題となる。

本研究では、まず花崗岩に比べ空隙が多く、このため水分を多く含み得るので岩盤の熱収縮が小さく熱応力の

値も小さいと予想される砂岩を母岩とする鉱山の廃坑に上述の低温物質を貯蔵する場合を想定し、空洞周辺岩盤の挙動を解析によって求め、これまで研究を進めてきている花崗岩の岩盤での解析結果と比較し、実用化に向けての検討を行った。さらに、これらの結果をふまえて、亀裂からの液漏れ、および冷気漏れ対策として水封式および氷ライニング方式を適応させることを提案した。水封式は、空洞周辺岩盤に亀裂を生じても亀裂内に地下水が浸入し氷結することで亀裂をふさぎ、空洞内部の液密性および気密性を保持するという方式である。また、氷ライニング方式は、空洞表面に設けた氷のライニングにより液密性および気密性を保持する方式である。本研究では、これらの効果について解析ならびに室内実験により検討を行った結果について述べる。

2. 低温物質の砂岩岩盤への貯蔵

(1) 空洞周辺の温度分布

本研究で対象とする砂岩は福岡県大牟田市産の第三紀層大牟田層群七浦中粒砂岩である。試料の物理的性質をTable 1に示す。新鮮な花崗岩の空隙率は2%程度であるのに対し⁶⁾、七浦層砂岩の場合8%程度であり空隙の多い岩石であることがわかる。解析に用いたモデルは地下水により湿潤状態にある土盛り100mの砂岩の岩盤中に直径10mの単一円形空洞を設け、上述の低温物質を貯蔵した場合とし、空洞周辺岩盤の温度分布の経時変化を要素分割法⁴⁾によって求めた。なお、解析に必要な熱拡散率は、要素分割法に実測値を適用させる方法⁴⁾を用いて別に実験を行った結果、低温下においては $\kappa = 5.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 程度の値で実用上ほぼ一定の値をとることがわかったのでこの値を用いた。

地山岩盤の初期温度を15℃としLNGを液体で貯蔵した場合(貯蔵温度:-162℃)、まぐろ等の冷凍食品を貯蔵した場合(貯蔵温度:-60℃)およびLPGを

* 正会員 工博 愛媛大学教授 土木海洋工学科
(〒790 松山市文京町3番)

** 正会員 工修(株) 竹中工務店技術研究所

*** 学生会員 愛媛大学大学院工学研究科土木工学専攻

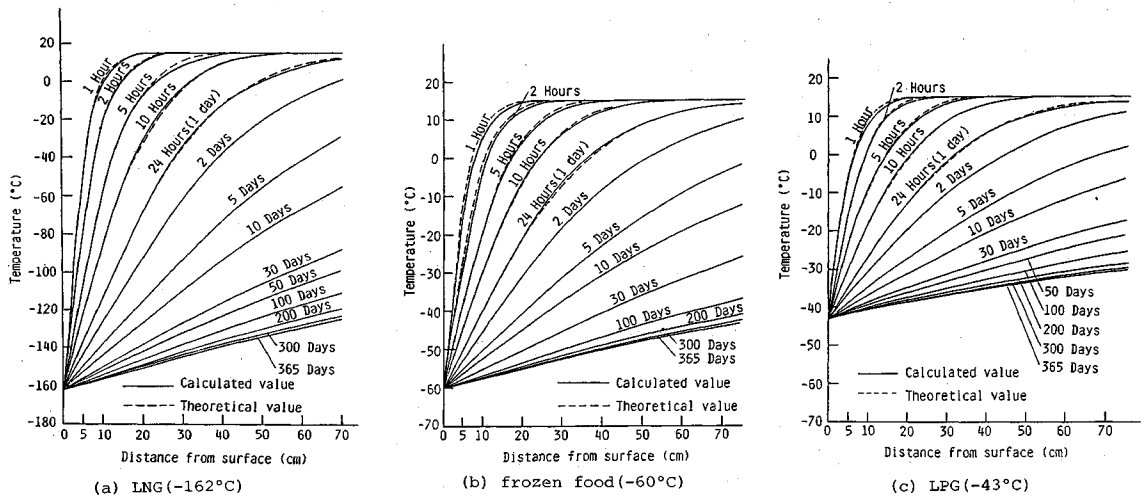


Fig.1 Temperature distribution around openings.

Table 1 Physical properties of sandstone.

	Moisture content ratio (%)	Degree of saturation (%)	Porosity (%)	Bulk specific gravity (g/cm ³)	True specific gravity (g/cm ³)
Dry	1.46	16.77	8.12	2.400	2.616
Wet	3.42	96.89	8.12	2.488	

Table 2 Physical properties of rock used in this analysis.

Temperature (°C)	Expansion coefficient (1/°C) × 10 ⁻⁴	Young's modulus (kgf/cm ²) × 10 ⁶	Poisson's ratio	Compressive strength (kgf/cm ²)	Tensile strength (kgf/cm ²)
20 ~ 10	0.196	0.185	0.185	-726	48.8
10 ~ 0	9.70	0.189	0.186	-748	49.9
0 ~ -10	9.20	0.203	0.188	-772	53.1
-10 ~ -20	8.93	0.208	0.189	-796	57.2
-20 ~ -30	8.83	0.211	0.190	-821	62.2
-30 ~ -40	8.80	0.215	0.191	-847	67.8
-40 ~ -50	8.77	0.219	0.193	-873	74.0
-50 ~ -60	8.76	0.224	0.194	-902	81.0
-60 ~ -70	8.70	0.229	0.196	-930	89.0
-70 ~ -80	8.67	0.234	0.198	-962	95.6
-80 ~ -90	8.62	0.240	0.200	-994	103.7
-90 ~ -100	8.55	0.248	0.203	-1030	112.0
-100 ~ -110	8.50	0.255	0.206	-1070	121.0
-110 ~ -120	8.41	0.263	0.209	-1115	130.8
-120 ~ -130	8.31	0.272	0.213	-1170	140.6
-130 ~ -140	8.20	0.283	0.218	-1240	151.0
-140 ~ -150	8.04	0.297	0.225	-1320	162.0
-150 ~ -160	7.86	0.316	0.233	-1432	173.0
-160 ~ -170	7.64	0.334	0.245	-1620	186.0

液体で貯蔵した場合(貯蔵温度: -43°C)を要素分割法⁽⁴⁾にて解析した結果を Fig.1 (a)~(c) 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緩やかになっていることがわかる。また、空洞表面から同一距離において時間の経過とともに温度変化は緩慢となっている。また、地山の初期温度を 15°C とし空洞内部の熱源温度をそれぞれ -162°C, -60°C, および -43°C の一定とした場合の空洞周辺の温度分布を求める場合、初期の時間にしか適用できないが厳密解の近似式⁽⁷⁾によって求めた結果も図中にあわせて示した。両者の値はよく一致していることがわかる。

(2) 空洞周辺の応力解析

本研究では亀裂解析法⁽⁵⁾を用い平面ひずみ問題として取り扱い、低温物質貯蔵時の空洞周辺岩盤の亀裂の進展状況を求めた。なお、破壊の判定は Mohr の破壊包絡線説によるものとした。解析に用いた岩石の物性値は低温下における実験を別に行い得られた値を用いた。これらを取りまとめて Table 2 に示す。本研究では貯蔵 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、逐次破壊を考慮して順次解析を行った。

LNG を貯蔵した場合、冷凍食品を貯蔵した場合および LPG を貯蔵した場合の解析結果をそれぞれ Fig.2 (a)~(c) に示す。時間の経過とともに亀裂は進展していくが、貯蔵 1 年後においてその範囲は、それぞれ最大

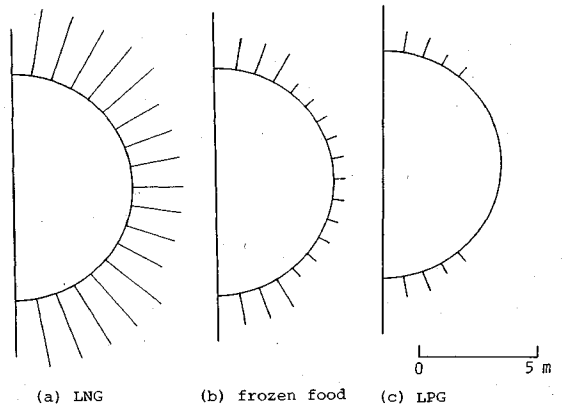


Fig.2 Cracks around opening.

で 3 m, 1.4 m および 90 cm の範囲に達することがわかる。花崗岩の岩盤を対象とした場合、貯蔵 1 年後において生じる亀裂の範囲は LNG を貯蔵した場合空洞表面から約 9.5 m, 冷凍食品を貯蔵した場合約 5 m および LPG を貯蔵した場合約 4.2 m にまで達することが報告

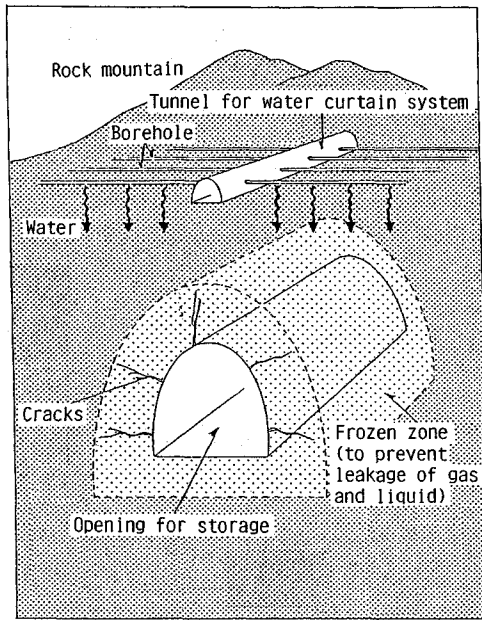


Fig.3 Low temperature materials storage system (water curtain system).

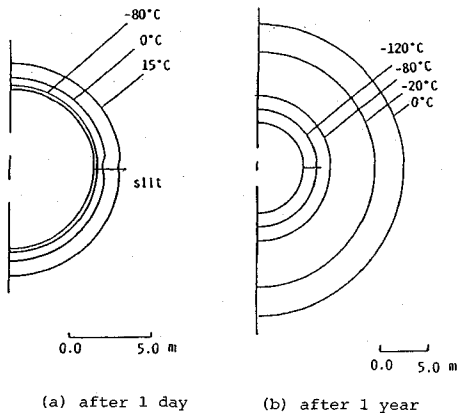


Fig.4 Temperature distribution around opening.

されており⁸⁾, 砂岩の岩盤においても花崗岩の岩盤と同様に亀裂からの冷気漏れ対策が必要となることがわかる。

3. 水封式による低温物質の貯蔵

(1) 空洞周辺の温度分布

水封式の貯蔵を模式的に示したものが Fig.3 である。ここでは水封式の効果を解析によって求めるため、まず、要素分割法により空洞周辺の温度分布を求めた。解析に用いたモデルは、亀裂内の水の挙動を観察しやすいように土被り 100 m の花崗岩の地山岩盤中に直径 10 m の単一円形空洞を掘削し、水平軸方向に長さ 2 m、幅 3 cm のスリットを設けた場合を想定した。

Table 3 Physical properties of ice used in the analysis.

Temperature (°C)	Expansion coefficient (1/°C)×10 ⁻²	Young's modulus (kgf/cm ²)×10 ⁵	Poisson's ratio	Compressive strength (kgf/cm ²)	Tensile strength (kgf/cm ²)
0 ~ -5	-0.1576	0.354	0.18	-17.2	4.3
-5 ~ -10	-0.1355	0.358	0.18	-20.0	4.5
-10 ~ -20	-0.1037	0.364	0.19	-24.2	4.9
-20 ~ -30	-0.0768	0.372	0.20	-30.0	5.3
-30 ~ -40	-0.0606	0.381	0.21	-36.0	5.8
-40 ~ -50	-0.0497	0.389	0.22	-42.2	6.3
-50 ~ -60	-0.0420	0.398	0.23	-47.7	6.7
-60 ~ -70	-0.0363	0.407	0.24	-53.0	7.1
-70 ~ -80	-0.0318	0.415	0.25	-58.1	7.4
-80 ~ -90	-0.0282	0.423	0.26	-62.9	7.7
-90 ~ -100	-0.0252	0.430	0.26	-67.4	8.0
-100 ~ -110	-0.0227	0.437	0.27	-70.8	8.3
-110 ~ -120	-0.0206	0.443	0.28	-73.4	8.5
-120 ~ -130	-0.0189	0.448	0.28	-75.3	8.7
-130 ~ -140	-0.0174	0.453	0.29	-76.9	8.8
-140 ~ -150	-0.0161	0.456	0.29	-77.7	8.9
-150 ~ -160	-0.0150	0.456	0.30	-77.9	9.0
-160 ~ -170	-0.0139	0.458	0.30	-78.0	9.1

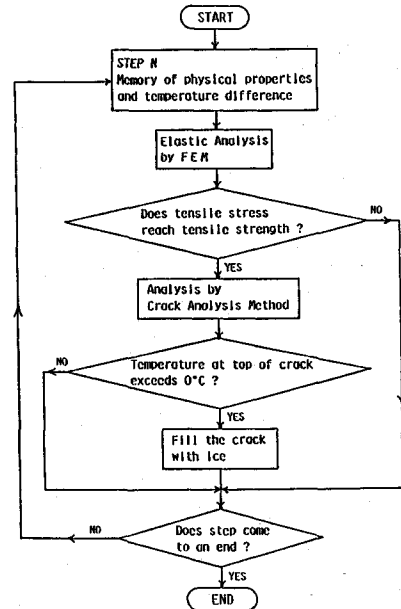


Fig.5 Flowchart of analysis.

LNG を貯蔵する場合について得られた結果を Fig.4 に示す。貯蔵 1 日後において、スリットの部分およびその周辺に熱伝導の遅れが見られる。これは、初期の間スリット内にまだ水が残っており、水の熱拡散率が岩盤の約 1/10 であることが原因であると考えられる。しかし、貯蔵 1 年後には熱伝導の遅れも見られなくなり、同心円状の温度分布を示すことがわかる。

(2) 空洞周辺の応力解析

本解析では、亀裂解析法を用い、平面ひずみ問題として取り扱い、破壊の判定は Mohr の破壊包絡線説に従うものとした。解析に用いた氷の物性値⁹⁾を Table 3 に示す。また、解析手順を Fig.5 に示した。ここでは、貯蔵 1 年後までを 4 つのステップに分割し、それぞれのステップにおいて、1 つ前のステップからの温度差にともなう物理定数を用いて順次解析を行った。ただし、

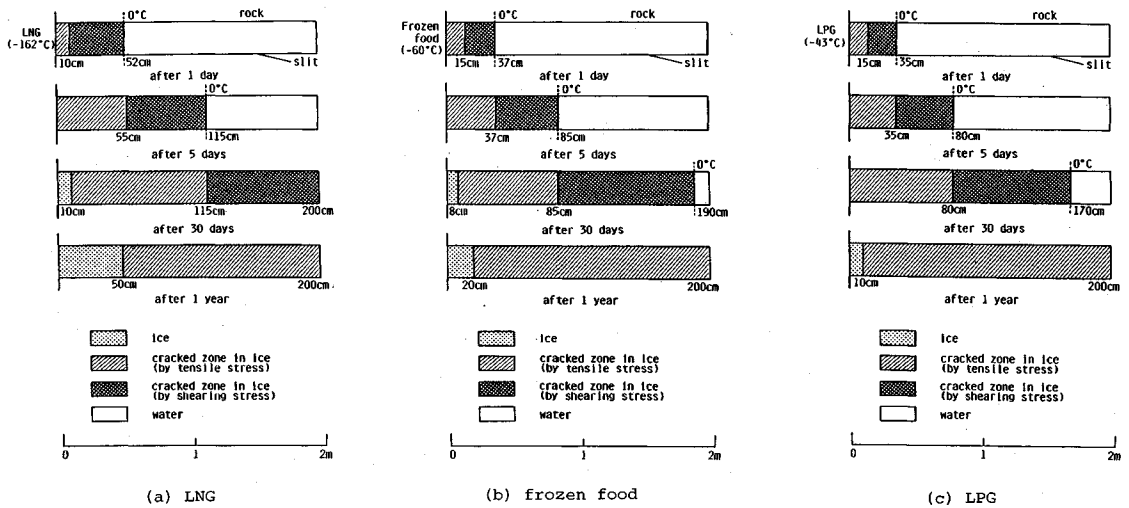


Fig.6 Behavior of ice in slits.

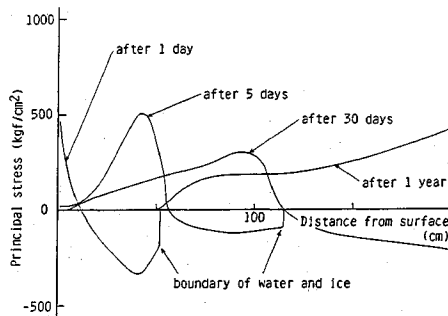


Fig.7 Principal stress of ice in slits (LNG).

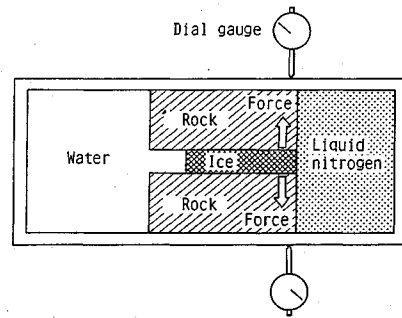
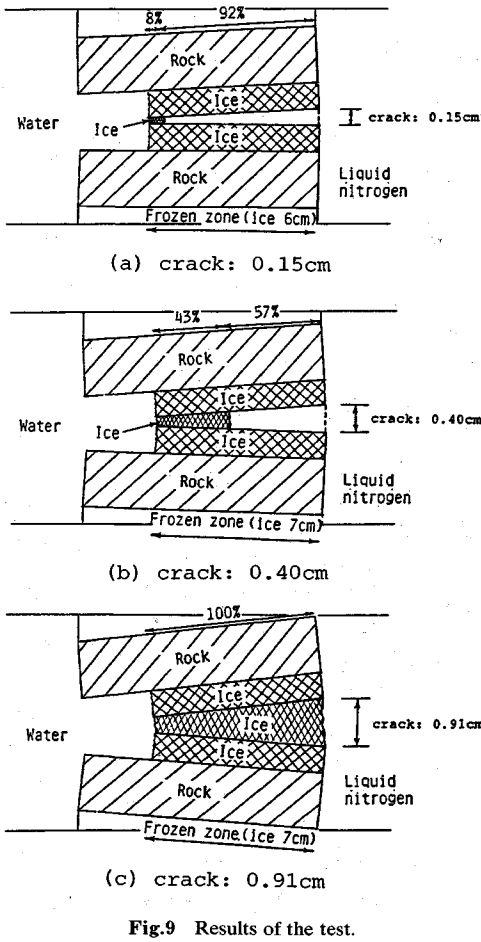


Fig.8 Schematic diagram of the test for the effect on water curtain system.

FEM 解析によりスリット内の氷に亀裂が生じた場合には亀裂解析法を適用し、亀裂先端における温度が 0°C 以上であれば、そこから水が瞬間的に亀裂内に浸入し、氷結して亀裂をふさぐもの（ここでは地下水の流れは考慮しないこととする。）と仮定した。すなわち、次のステップを解析する際には、亀裂を生じたスリット内の氷の応力は一旦解放され、そこに地下水が浸入し氷結するとしているので、全体としての氷の応力は残留しないものと考え、亀裂がふさがった状態から各ステップにおける FEM による解析を始めることとした。

LNG を貯蔵する場合、冷凍食品を貯蔵する場合および LPG を貯蔵する場合について、スリット内部における解析結果をそれぞれ Fig.6 (a)～(c) に示す。LNG を貯蔵する場合、貯蔵 1 日後において空洞表面から 52 cm の範囲で氷結しているが、この氷には亀裂を生じており不安定な状態にある。空洞表面に近い部分では引張応力により破壊し、表面から遠い部分ではせん断による破壊をしている。これは、水が氷に変化する際に体積が膨張すること、岩盤が地山に向かって熱収縮するため、

スリットの幅が拡がることに起因しているものと考えられる。Fig.7 にスリット内部の最大主応力の経時変化を示す。貯蔵 1 日後において、空洞表面に近い部分では岩盤とスリットが体積比で約 500 : 1 であるため岩盤の熱収縮が大きく、そのためスリットの幅が拡がる量が大きく、水が氷へ変化する際の膨張量よりも上回るために氷は引張により破壊し、空洞表面から遠い部分ではこれとは逆に、収縮しても周囲からの拘束もあり岩盤は自由に変形できず、水から氷へ変化する際の膨張量の方が岩盤の収縮量を上回るためにせん断により破壊するものと考えられる。貯蔵 5 日後を過ぎると、前のステップで破壊を生じた部分の氷は、応力が一旦解放されるため応力の発生は抑えられ、引張応力のピークは次第に空洞表面から遠い所に移動している。また、空洞表面に近い部分では時間の経過とともに応力の値は小さくなり、貯蔵 30 日後を過ぎると、空洞表面から次第に亀裂がふさがっていく現象がみられ、1 年後には 50 cm の範囲で亀裂がふさがった状態となっており、水封式の効果が得られていることがわかる。冷凍食品を貯蔵する場合および LPG



を貯蔵する場合も同様に、時間の経過とともに空洞表面から亀裂がふさがった状態となり、その範囲は貯蔵1年後で20 cm および10 cm となり水封式の効果が得られていることがわかる。

(3) 水封式の効果に関する考察

水封式の効果を確かめるため室内実験を行った。実験装置の概念図を Fig. 8 に示す。花崗岩の供試体 (8×10×3.6 cm) を図に示すように金属製の型わく (8×25×8 cm) 内に設置し、供試体で挟まれた部分 (スリット) を脱気した蒸留水で満たした。これを隔壁を介して液体窒素により氷結させ、スリット内部が氷結した後は隔壁を取り除き、液体窒素と水を異なる色粉により着色した。この状態でスリットの液体窒素側に外力を加えて氷に亀裂を生じさせ、そのときの亀裂内に液体窒素と水が浸入する範囲を亀裂内部の着色の状況により観察した。

氷に生じる亀裂の幅を変化させて行った実験結果を Fig. 9 (a)~(c) に示す。(a) の場合では水結範囲の8%、(b) の場合では43%、(c) の場合では100%の範囲にまで水が浸入し氷結して、亀裂をふさがることが観察され

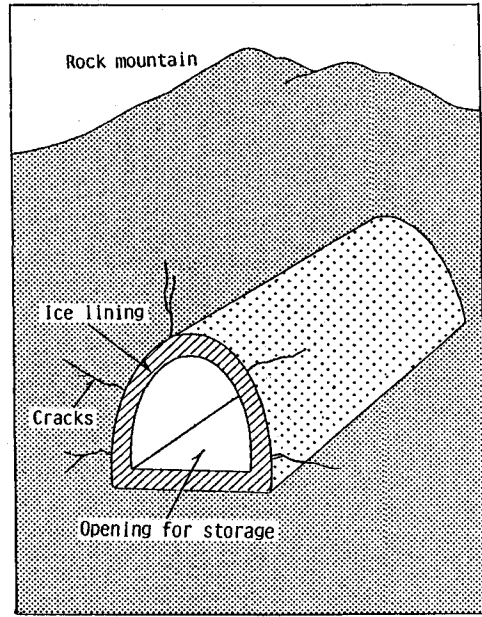


Fig. 10 Low temperature materials storage system (ice lining system).

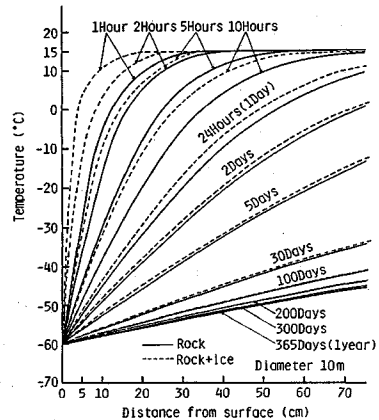


Fig. 11 Temperature distribution around opening.

た。亀裂内部に水が浸入する範囲は、このほかにも亀裂の発生速度や貯蔵空洞内の圧力と地下水圧との関係など多くの要因によって変化すると考えられるが、本実験から水封式は有効な手段となり得ることが予想される。

4. 氷ライニング方式による低温物質の貯蔵

(1) 温度および応力解析

氷ライニング方式を模式的に示したものが Fig. 10 である。ここでは、まず、直径10 mの単一円形空洞に10 cmの厚さの氷の層を貯蔵開始と同時に設けた場合を想定し、空洞周辺の温度分布を要素分割法により求めた。なお、ここでは空洞内の温度は-60°Cとした。

解析結果を層を設けない場合と比較したものが

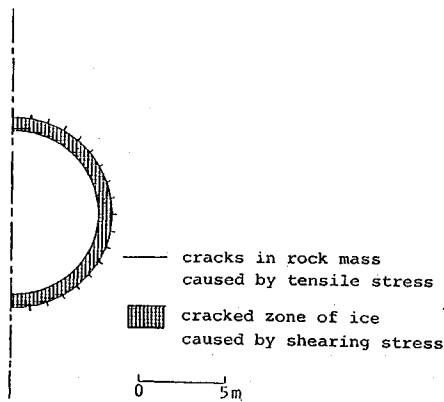


Fig.12 Cracks and cracked zone around opening.

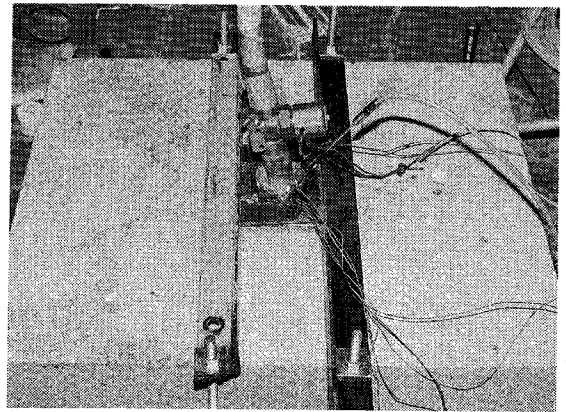


Fig.14 External view of the test for ice lining system.

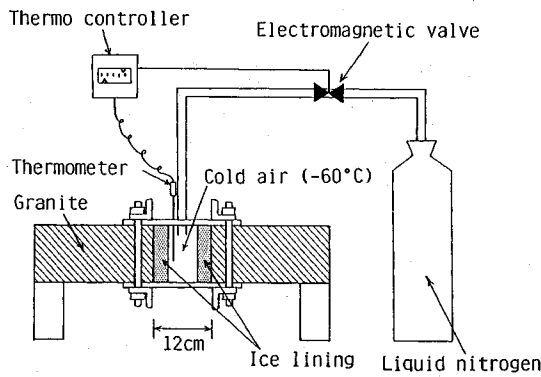


Fig.13 Schematic diagram of the test.

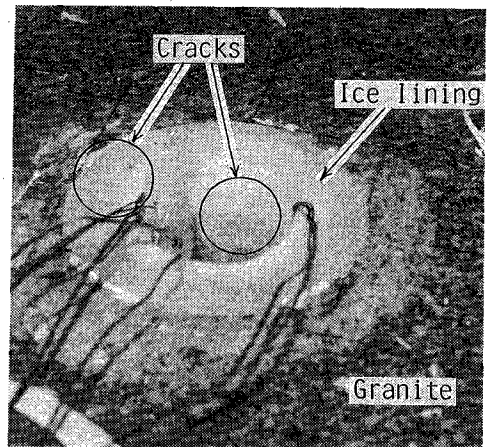


Fig.15 Results of the test (ice lining).

Fig.11 である。水の熱拡散率が岩盤に比べ小さいことから初期の時間において熱伝導の遅れがみられるが、貯蔵 30 日後にはほとんど回復していることがわかった。次に、貯蔵開始と同時に層を設けた場合について貯蔵 1 日後における応力解析を行った結果が Fig.12 である。ただし、図中では氷の巻厚は拡大して示してある。水から氷へと変化する際の体積膨張により氷はせん断破壊をすることがわかった。

(2) 室内実験

上述の解析結果を確かめる室内実験を行った。実験の概念図を Fig.13 に、また、実験装置の外観を Fig.14 に示す。60×70×10 cm の花崗岩（愛媛県越智郡大島産、通称大島みかげ）の供試体の中央に直径 12 cm の孔を設け、この孔内に厚さ 2 cm の脱気した蒸留水の層を設けた。氷結の際膨張しないように層の上下端を拘束し、中心部に -60 °C の冷気を通して氷結させた場合の氷の層の様子および層の内径の変化量を測定した。実験結果を Fig.15 に示す。

Fig.15 からわかるように、氷の層には氷結による体積膨張により円周方向および水平方向に平行に多くの亀裂が生じている。このことから氷に生ずる応力を軽減す

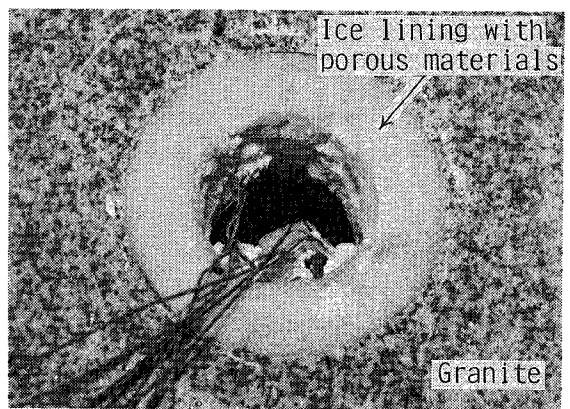


Fig.16 Results of the test (ice lining with porous materials).

る方法について検討が必要であることがわかる。

(3) 多孔質物質を用いた水ライニング方式

a) 室内実験

氷の応力を軽減する一方法として、ここでは多孔質物質に水を含ませて見掛けの水分量を減少させて層を設けた場合について実験により検討を行った。実験に用いた

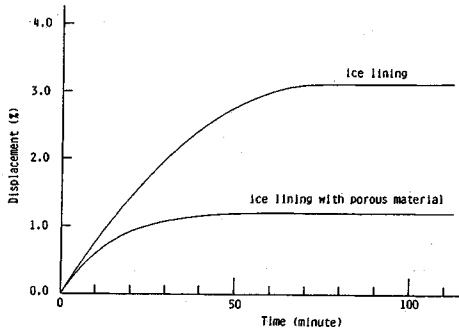


Fig.17 Change of inside diameter of ice lining system.

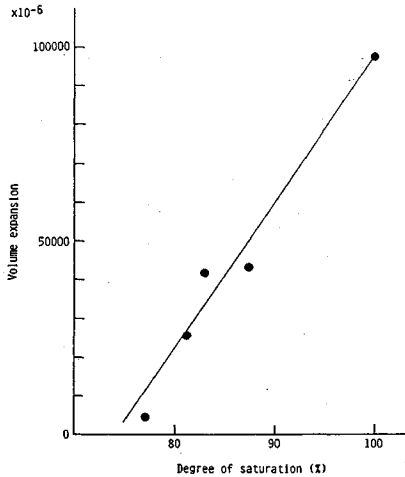
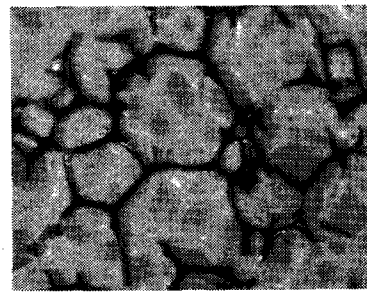


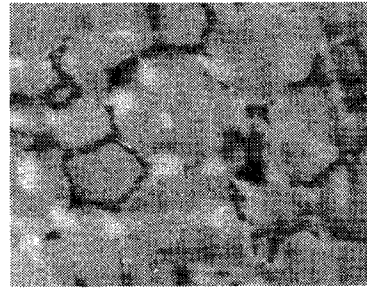
Fig.19 Volume expansion of porous materials with ice.

多孔質物質はウレタンフォーム（空隙率：99.1%）とした。実験方法は前述の（1）の場合と同様とし、飽和度80%の条件で実験を行った。実験結果をFig.16に示す。多孔質物質に水を含ませた場合には肉眼では亀裂は認められなかった。また、ライニングの内径の変化を測定し、水のみで氷結させた場合と比較したものがFig.17である。この結果から多孔質物質を用いた場合には水の場合に比べて水分量が少ないので氷結する際の見掛けの体積膨張量が少ないため、層の厚さの増加量が少ないことがわかる。このことから、応力の発生も少なくなっていることが推察される。

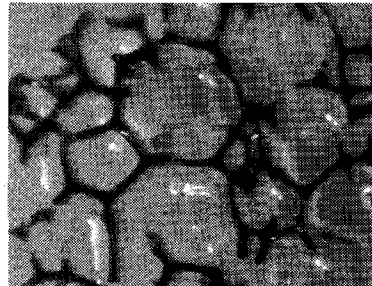
さらに、表面拡大装置を用いて上述の多孔質物質の氷結時の様子を観察した。ただし、ここでは上述の条件よりより厳しい雰囲気の中で実験を行った。すなわち、多孔質物質に飽和度100%となるように脱気した蒸留水を真空ポンプを併用して含ませ、これを -196°C の液体窒素に浸して急激に氷結させ、氷結時における多孔質物質の繊維の変化、また、低温に対しての安定性を観察した。実験結果をFig.18(a)~(c)に示す。ここで(a)は水を含ませた室温(15°C)での状態、(b)は液体窒



(a) before freezing(at 15°C)



(b) after freezing(at -196°C)



(c) after having been low temperature(at 15°C)

Fig.18 Microphotograph of porous material with ice.

素に浸した直後の状態、(c)は再び室温にもどしたときの状態を示している。なお、観察し易いように観察地点は赤色に染色してある。Fig.18(a)~(c)より、繊維には変化がなく低温下においても安定していることがわかる。これらの結果から、適切な空隙率をもつ多孔質物質を用いることにより水分量を調節してライニングを設ける方法が有効であると考えられる。

b) 多孔質物質の熱物性値

ここでは、上述の多孔質物質にどの程度水を含ませるのが最適であるかについて検討を行った。まず、飽和度を変化させて多孔質物質の氷結時のひずみを実験により求めた。 -5°C にて氷結させた場合の実験結果をFig.19に示す。ばらつきがみられるが飽和度と氷結時のひずみは比例関係にあると解釈できる。この結果をもとに飽和度80%の場合について、低温下におけるひず

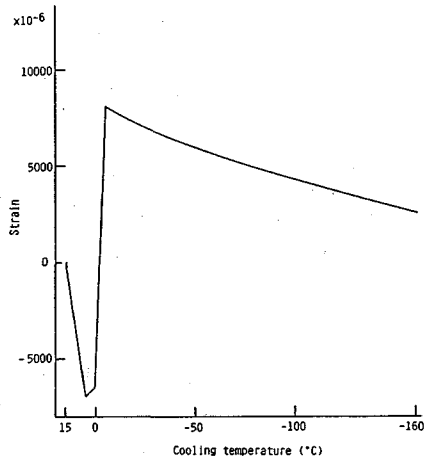


Fig.20 Strain of porous material with ice.

Table 4 Physical properties of porous materials with ice at low temperatures.

Temperature (°C)	Expansion coefficient (1/°C) × 10 ⁻³	Young's modulus (kgf/cm ²) × 10 ⁴	Poisson's ratio	Compressive strength (kgf/cm ²)	Tensile strength (kgf/cm ²)
0 ~ -5	-0.4051	0.397	0.01	-27.1	4.8
-5 ~ -10	-0.2910	0.391	0.01	-35.0	5.2
-10 ~ -20	-0.2530	0.398	0.01	-38.9	5.5
-20 ~ -30	-0.1770	0.408	0.01	-46.7	5.9
-30 ~ -40	-0.1320	0.417	0.01	-54.6	6.4
-40 ~ -50	-0.1030	0.425	0.01	-62.5	6.9
-50 ~ -60	-0.0829	0.435	0.01	-70.4	7.4
-60 ~ -70	-0.0675	0.445	0.01	-78.3	7.8
-70 ~ -80	-0.0561	0.454	0.01	-86.1	8.3
-80 ~ -90	-0.0472	0.463	0.01	-94.0	8.8
-90 ~ -100	-0.0400	0.470	0.01	-101.9	9.2
-100 ~ -110	-0.0342	0.478	0.01	-109.8	9.7
-110 ~ -120	-0.0295	0.485	0.01	-117.6	10.2
-120 ~ -130	-0.0254	0.490	0.01	-125.5	10.7
-130 ~ -140	-0.0220	0.495	0.01	-133.4	11.1
-140 ~ -150	-0.0188	0.498	0.01	-141.3	11.6
-150 ~ -160	-0.0162	0.499	0.01	-149.2	12.1
-160 ~ -170	-0.0139	0.501	0.01	-157.0	12.5

みの変化を測定した結果が Fig.20 である。氷結するまでは温度の低下とともに収縮し、氷結の際に急激に膨張することがわかる。また、氷結後は温度の低下とともに収縮していくことがわかる。

次に、低温下において強度、弾性係数およびポアソン比を求めた。これらの結果と上述のひずみから計算した割線線膨張係数をあわせて Table 4 に示す。また、熱拡散率を求めた結果、氷結するまでは $\kappa = 1.7 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 程度、氷結後においては $\kappa = 6.8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 程度の値であり、それぞれの状態ではほぼ一定の値をとることがわかった。

c) 温度および応力解析

ここでは、土被り 100 m の花崗岩の地山中に単一円形空洞を設けた場合に、多孔質物質を用いた氷ライニング方式を適応させることを想定し、氷のみのライニングを設けた場合との比較を行うとともに、その効果を解析により検討した。ライニングの厚さは 30 cm とし、空洞の仕上がり直径を 10 m とした。解析に用いた多孔質物質の物性値は、前述の値を使用した。まず、要素分割法により温度分布の解析を行い、これをもとに有限要素

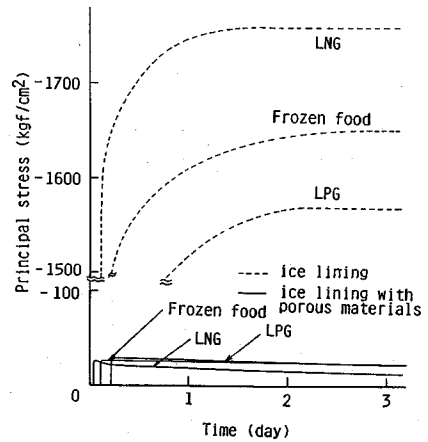


Fig.21 Change of principal stress of ice lining system (distance from surface : 5 cm)

法によってライニングの応力状態を計算した。

LNG、冷凍食品および LPG を貯蔵する場合について、氷のみのライニングおよび多孔質物質を併用したライニングを設けた場合の応力状態の経時変化を示したものが Fig.21 である。なお、ここでは空洞表面から 5 cm の位置の応力状態を示した。氷のライニングには大きな圧縮応力が生じ破壊するが、多孔質物質を併用したライニングは圧縮応力が抑えられ、破壊には至らないことがわかる。このことから多孔質物質を用いた氷ライニング方式は有効な手段となり得ることがわかった。

5. 結 言

本研究では、花崗岩に比べ空隙が多く、このため水分を多く含む得るので岩盤の熱収縮が小さく熱応力の値も小さいと予想される砂岩を母岩とする鉱山の廃坑に低温物質を貯蔵する場合を想定し、空洞周辺岩盤の挙動を解析によって求めた。次に、亀裂からの液漏れ、および冷気漏れの対策として水封式ならびに氷ライニング方式を適用することを提案し、それらの効果を解析および実験により検討した。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) 解析の結果、砂岩の岩盤中に低温物質を貯蔵する場合、空洞周辺の岩盤には亀裂を生じる。その範囲は貯蔵 1 年後には、LNG を貯蔵する場合には最大で 3 m、冷凍食品を貯蔵する場合には最大で 1.4 m、LPG を貯蔵する場合には最大で 90 cm となることがわかった。

(2) 解析の結果、空洞からの冷気漏れ対策として水封式を併用する場合、亀裂を想定したスリットおよびその周辺岩盤は初期の時間には熱伝導の遅れが見られるが、時間の経過とともにその遅れは解消することがわかった。

(3) 解析の結果、水封式を併用する場合、貯蔵 30

日後以降においては、亀裂内の水がふさがり、また、その範囲は時間の経過とともに広がり、水封式の効果が得られることがわかった。

(4) 色粉を用いた実験の結果、スリット内の水に亀裂を生じて水が亀裂内に浸入し氷結することが確かめられ、水封式が有効な手段となることがわかった。

(5) 解析および室内実験の結果、氷ライニング方式を適用した場合、氷の層は氷が形成される際の体積膨張によりせん断破壊をするため、氷に生ずる応力を軽減する方法についての検討が必要であることがわかった。

(6) 実験により、多孔質物質に水を含ませて、みかけの水分量を減少させて氷のライニングを設ける場合には亀裂は生ぜず、応力の発生量も減少し、多孔質物質の組織にも変化が見られないことから、適当な空隙率をもつ物質をライニングに用いることで、液漏れ、および冷気漏れ対策に有効な手段となり得ることがわかった。

(7) 解析により、多孔質物質に水を飽和度80%の状態まで含ませてライニングを設けた場合、氷のみのライニングに比べて応力が減少し、破壊に至らないことが確かめられ、有効な手段となることがわかった。

あとがき

今回得られた結果および提案は新鮮な砂岩についてシミュレートし、また、実験室で行った実験結果をもとにしている。今後は、さらに実際の地山岩盤に適用した場合を想定し、実用化に向け大規模な実験を行い効果を確

認したいと考えている。

本研究は平成元年度および平成2年度科学研究費の補助を受けて遂行されたことをここに記しておく。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁監修：'90資源エネルギー年鑑，pp.269-270, 1989.
- 2) 稲田善紀：地下の空間利用，pp.70-79, 森北出版, 1989.
- 3) 農林水産省経済統計情報部編集：ポケット農林水産統計，pp.36-37, 1988.
- 4) 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巻，1141号，pp.179-185, 1983.
- 5) 稲田善紀・谷口浩二：液化天然ガスの地下岩盤内空洞貯蔵による空洞周辺の塑性領域，日本鉱業会誌，103巻，1192号，pp.365-372, 1987.
- 6) 稲田善紀・八木則男：低温下における岩石の熱物性値，材料，29巻，327号，pp.1228-1233, 1980.
- 7) Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C. : Conduction of Heat in Solids, Oxford at the Clarendon Press, pp.335-336, 1959.
- 8) INADA, Y., KOHMURA, Y., OHASHI, S. and YOSHIKAWA, M. : Low temperature materials storage in underground rock mass, Proceeding of 6th Congress of the International Association of Engineering Geology, pp.2751-2756, 1990.
- 9) 稲田善紀・甲村雄一：極低温下における氷の力学的挙動，第10回西日本岩盤工学シンポジウム論文集，pp.47-53, 1989.

(1991.3.29受付)

BASIC RESEARCH ON PREVENTIVE MEASURES AGAINST LEAKAGE OF LIQUID AND COLD AIR FROM CRACKS DUE TO STORAGE OF LOW TEMPERATURE MATERIALS IN OPENING EXCAVATED IN MOUNTAIN

Yoshinori INADA, Yuichi KOHMURA and Tadafumi FUJIWARA

In the case of low temperature materials storage, such as LNG, LPG and frozen food etc., in opening excavated in mountain, as the cracks around opening will be developing with time by shrinking the opening towards against mountain, leakage of liquid and cold air from the cracks become important problem.

In this study, the authors proposing "water curtain system", which the way enclose the liquid and gas with water in mountain. Moreover, proposing "ice lining system", which the way set up the layer of ice inside of opening.

And then, the results which the effect on these systems were confirmed by experiment and analysis are described.