

低温の影響を受けた空洞周辺岩盤の熱的挙動 に関する一二の知見

稲田善紀¹・木下尚樹²・関 正造³・松尾 暁⁴・成行 惇⁵・越智健三⁶

¹フェロー会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒 790-77 松山市文京町 3 番)

²正会員 工修 愛媛大学助手 工学部環境建設工学科 (〒 790-77 松山市文京町 3 番)

³正会員 工修 兵庫県土木部 尼崎港管理事務所 (〒 660 尼崎市道意町 9 丁目 21)

⁴学生会員 愛媛大学大学院 工学研究科土木海洋工学専攻 (〒 790-77 松山市文京町 3 番)

⁵正会員 東急建設株式会社 技術研究所副所長 (〒 229 相模原市田名字曾根下 3062-1)

⁶正会員 工博 東急建設株式会社 技術研究所 (〒 229 相模原市田名字曾根下 3062-1)

地山岩盤内空洞に低温物質を貯蔵した場合、空隙率の小さい花崗岩や砂岩岩盤では熱収縮による亀裂が空洞周辺に放射状に発生し、空隙率の大きい凝灰岩岩盤の場合には間隙水の氷結膨張の影響を受け、花崗岩の場合とは挙動が異なることを報告してきた。本研究ではさらに空隙率の大きい泥岩を加え、4種類の岩石について乾燥および湿潤状態での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結果、空隙率の大きい岩石では間隙水の影響を大きく受けることがわかった。次にこれらの値の差異が低温物質貯蔵時の空洞周辺岩盤の熱的挙動に及ぼす影響について解析および実験により比較検討した結果、花崗岩や砂岩の岩盤と凝灰岩や泥岩の岩盤とは熱的挙動が異なることがわかった。

Key Words : low temperature, storage, underground openings, thermal behavior

1. 緒言

地球環境保護の問題がますます重大な課題となってきた今日、石油代替エネルギーとして、またクリーンなエネルギーとしてLNGおよびLPGが注目されており、その需給量は増加傾向にある¹⁾。また、人々の食生活は多種多様化しており、加えて共働き夫婦が増加していることなどを背景に冷凍食品の需要量も増加の傾向を示している²⁾。以上の背景から、将来の低温物質の安定供給を考慮した大規模な貯蔵施設の必要性が増すものと予想される。現在、我が国においては海岸の埋め立て地などを利用してLPGは地上式および半地下式貯蔵が主流をなしており、LNGは地下式貯蔵がなされている。また、冷凍倉庫も臨海部の地上に建設されているものが多い³⁾。しかし、これらの貯蔵方法は広大な敷地を必要とするばかりでなく景観を損ねるという点、エネルギーロスを含めた維持管理費等の点からも必ずしも得策と言えない点が多い。そこで、前述の諸

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に前述の低温物質を直接貯蔵することが考えられる。筆者らのこれまでの研究により、花崗岩(空隙率約2%)岩盤内に低温物質を貯蔵した場合、熱収縮により空洞周辺に放射状に亀裂が発生し、亀裂からの液漏れおよび冷気漏れ対策が重要な課題となることを指摘してきた⁴⁾。花崗岩よりも空隙率の大きい砂岩(空隙率約8%)岩盤の場合、花崗岩よりは発生する範囲は減少するものの亀裂が生じることも報告した⁵⁾。また、空隙率の大きい凝灰岩(空隙率約37%)岩盤の場合、発生した亀裂は空隙中の水の氷結膨張の影響を受けてふさがり、空洞表面には安定領域が発生することを解析により明らかにしてきた⁶⁾。そこで本研究では、さらに空隙率の大きい泥岩(空隙率約39%)についても検討を行い、4種類の岩石について、含水状態による違いが低温下における強度・変形特性および熱物性値に及ぼす影響を比較し、次に、これらの値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に

Table 1 Physical properties of rocks.

Rocks	Porosity (%)	Moisture content ratio (%)	Degree of saturation (%)	Bulk specific gravity	True specific gravity
Granite(Dry)	1.99	0.16	20.67	2.625	2.673
Granite(Wet)	1.99	0.62	70.86	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

ついて解析により比較検討し考察した結果について述べる。さらに、低温物質貯蔵時における空洞の熱変形について岩石供試体を用いた室内実験を行い、実測値と解析値を比較し、解析方法の妥当性を検討した。また、熱応力の軽減対策について考察した結果についても述べる。

2. 低温下における各岩石の強度・変形特性

(1) 圧縮強度および引張強度

比較の対象とした試料は花崗岩（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。各岩石は、室内で約1週間自然乾燥させた後、デシケータ内でさらに3日間乾燥させたDryと呼ぶものと、Dryの試料を真空状態にしたまま蒸留水を入れて試料を浸潤させ、真空ポンプを用いて5時間脱気したWetと呼ぶものの2通りの方法で処理したものについて試験を行った。各岩石のDryおよびWetの物理的性質をTable 1に示す。低温下における各岩石の圧縮強度をFig.1に示す。なお、供試体の寸法はφ3×6cmとした。とくに、堆積岩である砂岩、凝灰岩および泥岩については、堆積層に対して平行に加圧した場合と垂直に加圧した場合とで力学的異方性を検討したが、その差は強度の7%以内で強度的ばらつきの範囲内であったため、ここでは層に平行に加圧した場合の結果のみを示す。

Fig.1より、いずれの岩石においても常温ではDryよりもWetの方が圧縮強度が小さい。これは、供試体をWetにする際に水が空隙を埋める時、マイクロクラックを増加させたり拡大させたりしたことに起因しているものと考えられ、荷重をかけた際、Wetでは空隙水圧が発生し、破壊を促進したことも影響しているものと推察される。また、いずれの岩石においても、DryおよびWetともに温度の低下とともに圧縮強度が上昇している。これは、温度低下に伴い鉱物粒子が収縮して硬化し、変形しにくく

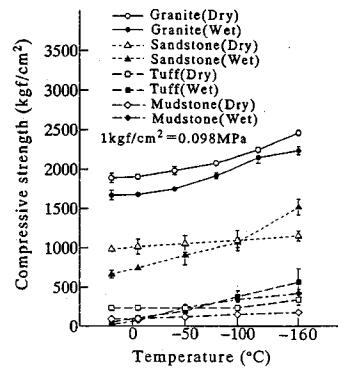


Fig.1 Compressive strength of rocks at low temperature.

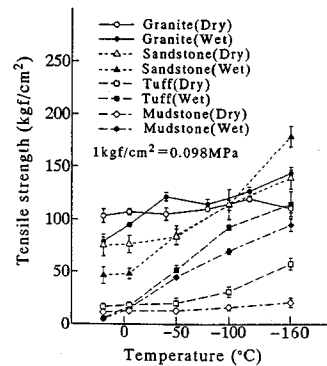


Fig.2 Tensile strength of rocks at low temperature.

なったためと考えられる。とくに空隙率の大きい凝灰岩および泥岩においては温度低下とともにDryよりもWetの方が圧縮強度が大きくなっている。これは、凝灰岩および泥岩の圧縮強度がもともと小さく、0℃以下では空隙中の水が氷結し、温度低下に伴い氷自身の圧縮強度も上昇し、-20℃から-160℃で約2.8倍の強度上昇を示す⁶⁾ためであると考えられ、氷の膠結物質としての影響を受けたことがうかがえる。

次に、低温下における各岩石の引張強度をFig.2に示す。圧裂引張強度を引張強度としたため供試体の寸法はφ3×3cmとした。ここでも力学的異方性について検討を行ったが、強度の10%以内でその差は実用上無視できる範囲であったため、層に平行に加圧した場合のみの値を示す。Fig.2より、いずれの岩石においても温度の低下とともに引張強度は上昇している。強度上昇の割合は、とくに凝灰岩および泥岩のWetで大きく、その割合は圧縮強度の場合よりも大きい。これは氷の引張強度は低温下において上昇するが⁶⁾、氷の圧縮強度自体が圧縮強度とは異なり、岩石のそれに近いために氷の膠結物質としての効果が大きく影響したためと推察される。

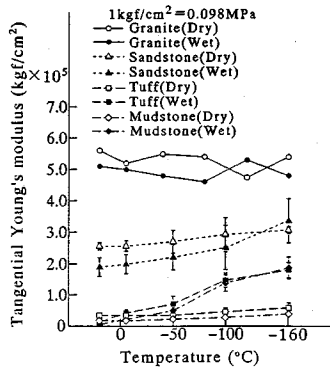


Fig.3 Tangential Young's modulus of rocks at low temperature.

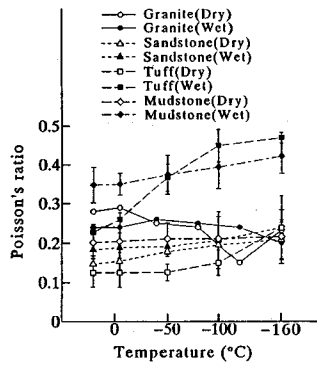


Fig.4 Poisson's ratio of rocks at low temperature.

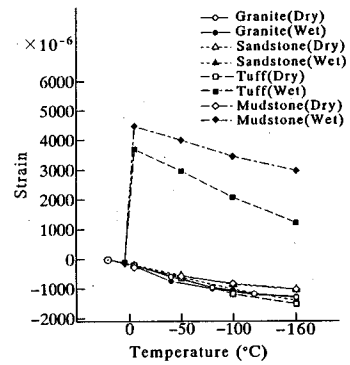


Fig.5 Strain of rocks at low temperature.

(2) 接線弾性係数およびポアソン比

次に、圧縮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-ひずみ曲線から、破壊応力の30%付近における各岩石の接線弾性係数を求めた結果を Fig.3 に示す。含水の多寡に関わらず、花崗岩を除いてはいずれの岩石においても温度低下に伴い接線弾性係数が上昇している。これは、温度低下に伴い鉱物粒子が収縮して硬化していることによるものと考えられ、上昇する割合はとくに凝灰岩および泥岩の Wet において大きい。これは温度の低下とともに空隙中の水の接線弾性係数も上昇しており⁶⁾、ここでも水の膠結物質としての効果が関与しているものと考えられる。次に、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 の方がポアソン比が大きく、Dry と Wet 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 ともポアソン比が小さくなっていることが特徴である。これは、花崗岩を構成する鉱物粒子の大きさが他の岩石よりも大きく、温度低下に伴う鉱物粒子の挙動の違いがクラックの増加を促進し、圧縮試験で供試体に荷重をかけた際、そのクラックを埋めることに費やされ、縦方向の応力が横方向に伝わりにくかったためポアソン比が小さくなったものと推察される。温度低下に伴い Dry での各岩石のポアソン比の値の差は小さくなっており、極低温になるとほぼ同じ値となることわかる。一方、Wet では凝灰岩および泥岩のポアソン比が花崗岩および砂岩より大きく、温度の低下とともに各岩石のポアソン比の値の差は大きくなっていることがわかる。

3. 低温下における各岩石の熱物性値

(1) 線膨張係数

低温下における各岩石のひずみを石英ガラス棒を用いた比較法⁷⁾により測定した。供試体はφ3×10cmに成形し、降温速度は1°C/minとし、所要の温度に達した後30分間保温すれば中心まで一定となり安定することがわかっているが⁸⁾、ここでは念のため60分間保温した後にひずみを測定した。結果を Fig.5 に示す。ここでも異方性を検討したが、差がなかったため堆積層に平行な方向について測定した結果のみを示している。Fig.5より、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かる。これは、温度低下に伴い鉱物粒子が収縮しているためであると考えられ、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°C付近まではわずかではあるが収縮し、4°Cから-5°C付近の間で急激に膨張しており、膨張してからは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°C付近で空隙中の水がひずみの値で約30000×10⁻⁶の氷結膨張をすることによる影響を多大に受けたためであると考えられる。凝灰岩と泥岩とで差がみられるのは、Dryのひずみを比較すると、構成鉱物粒子自身の熱収縮量がわずかではあるが泥岩の方が小さく、圧裂引張試験の結果から泥岩の方が凝灰岩よりも若干鉱物粒子間の結合力が弱く、ごくわずかではあるものの泥岩の方が凝灰岩よりも含水量が多いため氷結膨張の影響を大きく受けたことによるものと推察される。また、凝灰岩および泥岩のそれぞれの岩石について0°C以下のDryとWetの収縮する割合はWetの方が

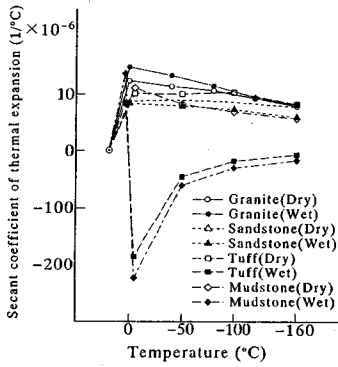


Fig.6 Secant coefficient of thermal expansion of rocks at low temperature.

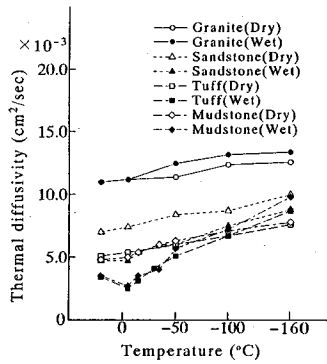


Fig.7 Thermal diffusivity of rocks at low temperature.

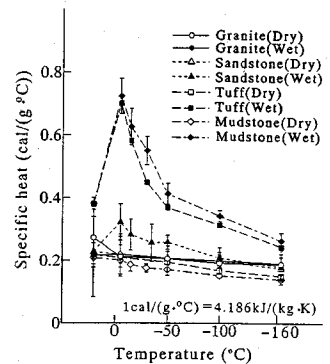


Fig.8 Specific heat of rocks at low temperature.

大きい。これは、0°C以下では岩石よりも氷の方が収縮する割合が大きい⁹⁾ ことによるものと考えられる。次に、得られたひずみから各岩石の割線線膨張係数を求めた結果を Fig.6 に示す。各岩石とも Dry では、温度の低下とともに割線線膨張係数の値が徐々に小さくなっている。一方、Wet において凝灰岩および泥岩では -5°C 付近で膨張することから極端に大きな負の係数を示し、それからは徐々に値が大きくなっている。これは、氷の割線線膨張係数の傾向⁹⁾ と非常によく似ている。花崗岩および砂岩の場合は、温度の低下とともに Wet においても値が小さくなっている。このことから鉱物粒子の種類の違いによる割線線膨張係数にはほとんど差はみられないが、空隙率の大きい凝灰岩および泥岩は間隙水の影響を大きく受けることがわかった。

(2) 熱拡散率

要素分割法¹⁰⁾ に実測値を適用させる方法¹¹⁾ で低温下における熱拡散率の値を測定した。本実験に使用した供試体は、15 × 25 × 10cm に成形したものをを用いた。堆積岩の熱拡散率の値の異方性については、強度・変形特性の結果から推測して実用上無視できる範囲であると予想されたので、堆積層に平行に熱が伝わる場合のみ実験を行った。各岩石の熱拡散率の測定結果を Fig.7 に示す。各岩石とも温度の低下とともに少しずつ値が上昇していることがわかる。また、凝灰岩および泥岩の Dry と Wet を比較すると常温では Dry の方が値は大きい、-100°C ではほぼ同じとなり、-160°C では逆に Wet の方が大きくなっており、熱拡散率の変化は Wet の方が大きいことがわかる。氷の熱拡散率が 0°C ~ -170°C で $1.2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ から $6.7 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ に変化することが報告されており¹²⁾、間隙中の水が氷結してからは温度の低下とともに熱拡散率の値が上

昇することから、空隙率の大きい凝灰岩および泥岩では氷の影響を多大に受けてこのような傾向を示したのと考えられ、空隙率 2% の花崗岩ではその影響はみられないが、空隙率 8% の砂岩ではわずかながらその傾向がみられる。また凝灰岩および泥岩の Wet では 0°C 付近で一旦値が小さくなっているが、空隙中の水が氷へと変化する際の潜熱¹²⁾ の影響により見かけ上値が小さくなったものと考えられる。これについても花崗岩および砂岩では、0°C 付近での熱拡散率の値の変化がみられず、2 ~ 8% の空隙率では潜熱の影響はほとんどないものと考えられる。

(3) 比熱

低温下における各岩石の比熱の測定を行った。あらかじめ供試体の質量を測定しておき、断熱ボックスに供試体を入れて液体窒素で冷却した。その後蒸留水を入れた断熱容器に所定の温度に冷却した供試体を投入し、攪拌してその温度変化を測定した。実験に用いた供試体は熱の授受を効率よくさせるため、また、供試体を包む水が適度な温度変化を示すように形と大きさを考慮し、試行錯誤の結果 40 × 40 × 5mm 程度に成形したものをを用いた。なお、降温速度は 1°C/min、所定の温度に達してからの保温時間は 60 分以上とした。温度変化を測定した後に、次式を用いて比熱を求めた。

$$c_1 m_1 (t_1 - T) = c_2 m_2 (T - t_2) \quad (1)$$

ただし、 c_1 : 供試体の比熱

c_2 : 水の比熱

m_1 : 供試体の質量

m_2 : 水の質量

T : 供試体と水の平衡状態の温度

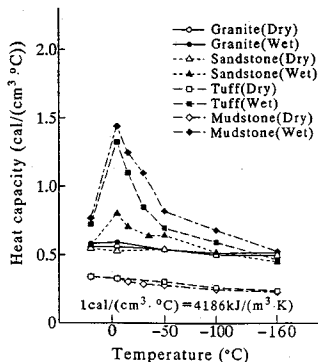


Fig.9 Heat capacity of rocks at low temperature.

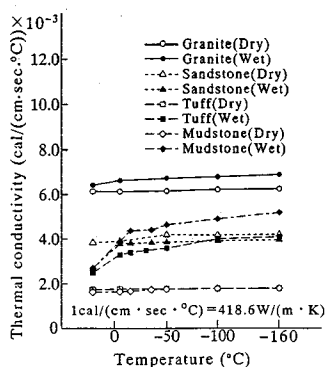


Fig.10 Thermal conductivity of rocks at low temperature.

t_1 : 供試体の所定の温度
 t_2 : 水の初期温度

得られた結果を Fig.8 に示す。まず、Dry についてみると温度の低下とともにごくわずかではあるものの値が低下していることがわかる。各岩石について比較すると、Dry ではほぼ同じ値であることから、鉱物粒子の種類による比熱の差異はほとんどないことがわかる。また、いずれの岩石についても Wet の方が値が大きい。これは、各温度における氷の比熱が岩石のそれに対して比較的大きいためであると考えられる^{1,2)}。また 0°C 付近で凝灰岩、泥岩、砂岩は潜熱の影響を受けていると考えられるが、花崗岩は空隙率が小さいため潜熱の影響は受けにくいものと考えられる。

(4) 熱容量および熱伝導率

先に求めた比熱とひずみの値から計算した密度の値を用いて、低温下における各岩石の熱容量を求めた。結果を Fig.9 に示す。各岩石とも Dry ではごく

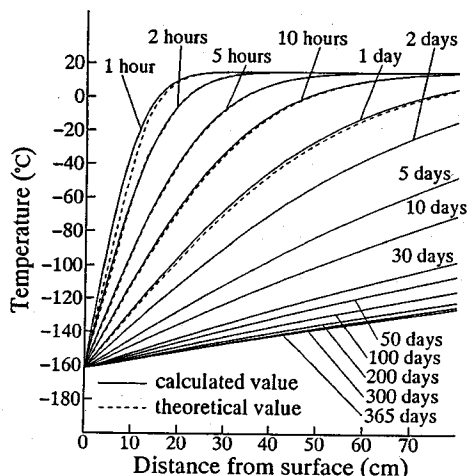


Fig.11 Temperature distribution around opening.

わずかながら温度低下に伴い値が小さくなっていることがわかる。一方、Wet では凝灰岩および泥岩は 0°C 付近において比熱の値が大きいいため値が突出し、さらに温度が下がると値が小さくなっている。氷の熱容量がこれとほぼ同様の傾向を示すことが報告されており^{1,2)}、このことから氷の影響が大きく関与しているものと考えられる。また、Dry では花崗岩および砂岩の密度が凝灰岩および泥岩より大きいため、熱容量も大きいことがわかる。

次に、前述の熱拡散率と熱容量の値を用いて以下の式により熱伝導率を見積もることができる。

$$\lambda = \kappa c \rho \quad (2)$$

ただし、 λ : 熱伝導率
 κ : 熱拡散率
 c : 比熱
 ρ : 密度

得られた結果を Fig.10 に示す。いずれの岩石においても Dry では温度の低下に伴わずかではあるが値は上昇することがわかる。一方、Wet では凝灰岩および泥岩が上昇する割合が大きい。氷の熱伝導率が温度低下に伴い上昇することから^{1,2)}、ここでも、花崗岩および砂岩より空隙中の氷の影響を多大に受けていることが推察される。

4. 空洞周辺岩盤の挙動

(1) 温度分布

本解析では、土被り 100m の前述の 4 種類の岩石からなる一様な地山岩盤中に直径 10m の単一円形

Table 2 Physical properties of granite used in analysis (wet).

Temperature (°C)	Expansion coefficient (1/°C) × 10 ⁻⁴	Young's modulus (kgf/cm ²) × 10 ⁴	Poisson's ratio	Compressive strength (kgf/cm ²)	Tensile strength (kgf/cm ²)
20 ~ 10	0.0000	0.494	0.250	-1670.0	79.0
10 ~ 0	0.1510	0.494	0.250	-1670.0	79.0
0 ~ -10	0.1490	0.495	0.250	-1678.0	95.0
-10 ~ -20	0.1450	0.495	0.250	-1689.0	104.0
-20 ~ -30	0.1400	0.496	0.250	-1711.0	111.0
-30 ~ -40	0.1360	0.496	0.250	-1741.0	116.0
-40 ~ -50	0.1320	0.497	0.240	-1776.0	121.0
-50 ~ -60	0.1270	0.497	0.240	-1819.0	124.0
-60 ~ -70	0.1230	0.498	0.240	-1859.0	127.0
-70 ~ -80	0.1190	0.498	0.240	-1899.0	129.0
-80 ~ -90	0.1140	0.499	0.240	-1938.0	132.0
-90 ~ -100	0.1100	0.499	0.230	-1978.0	133.0
-100 ~ -110	0.1060	0.500	0.230	-2017.0	135.0
-110 ~ -120	0.1010	0.500	0.230	-2057.0	137.0
-120 ~ -130	0.0970	0.501	0.230	-2097.0	138.0
-130 ~ -140	0.0930	0.501	0.230	-2137.0	140.0
-140 ~ -150	0.0890	0.501	0.220	-2176.0	142.0
-150 ~ -160	0.0840	0.502	0.220	-2216.0	143.0
-160 ~ -170	0.0800	0.502	0.220	-2256.0	145.0

Table 3 Physical properties of mudstone used in analysis (wet).

Temperature (°C)	Expansion coefficient (1/°C) × 10 ⁻⁴	Young's modulus (kgf/cm ²) × 10 ⁴	Poisson's ratio	Compressive strength (kgf/cm ²)	Tensile strength (kgf/cm ²)
20 ~ 10	0.0000	0.088	0.348	-30.0	5.8
10 ~ 0	0.1500	0.145	0.348	-46.8	9.1
0 ~ -10	-2.2360	0.215	0.350	-78.9	13.7
-10 ~ -20	-1.4500	0.237	0.352	-118.2	18.7
-20 ~ -30	-1.0550	0.290	0.355	-164.3	24.8
-30 ~ -40	-0.8200	0.358	0.360	-204.9	31.8
-40 ~ -50	-0.6530	0.442	0.366	-238.3	39.2
-50 ~ -60	-0.5540	0.560	0.372	-266.5	46.7
-60 ~ -70	-0.4720	0.695	0.379	-293.3	52.8
-70 ~ -80	-0.4070	0.850	0.385	-318.1	57.9
-80 ~ -90	-0.3570	1.044	0.391	-340.3	62.5
-90 ~ -100	-0.3150	1.250	0.396	-359.8	66.8
-100 ~ -110	-0.2810	1.457	0.401	-377.3	70.8
-110 ~ -120	-0.2530	1.604	0.405	-392.9	74.7
-120 ~ -130	-0.2290	1.720	0.408	-406.1	78.6
-130 ~ -140	-0.2090	1.797	0.412	-417.5	82.5
-140 ~ -150	-0.1910	1.840	0.415	-427.0	86.2
-150 ~ -160	-0.1760	1.865	0.417	-435.3	89.5
-160 ~ -170	-0.1630	1.880	0.419	-443.0	92.6

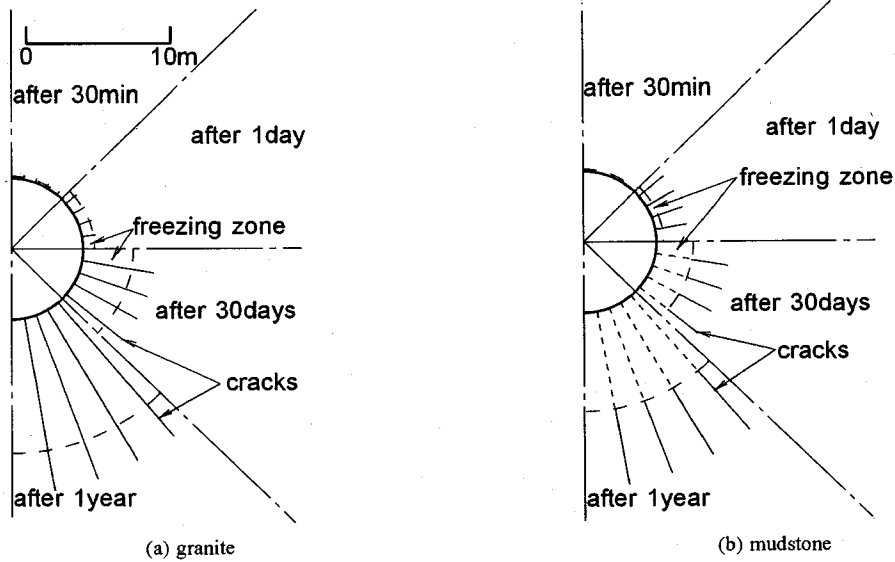
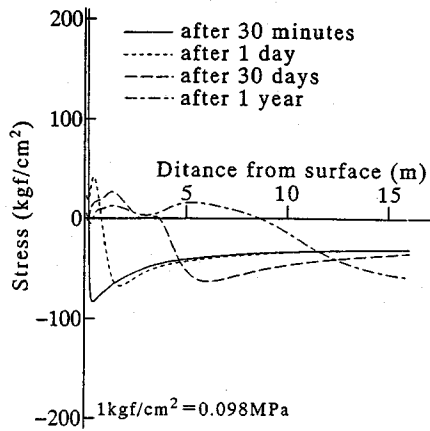


Fig.12 Cracks and cracked zone around opening.

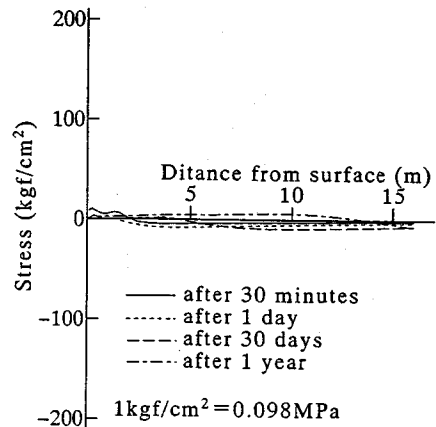
空洞を設け、LNGを貯蔵した場合の空洞周辺岩盤の温度分布の経時変化を要素分割法の2次元モデルを用いて求めた。なお、地下水により地山岩盤は湿潤状態にあるものとしたため、各岩石とも熱物性値はWetの値を用いた。代表例として花崗岩の岩盤中にLNGを貯蔵した場合の温度分布の解析結果をFig.11に示す。貯蔵初期には急激な勾配を示すが、時間の経過とともにその勾配は緩やかになり、空洞周辺に熱(この場合冷熱)が拡散することがうかがえる。また、空洞表面から同一距離における温度変化は、時間の経過とともに緩慢となり、貯蔵1年後には温度変化が極めて緩慢な、いわゆる準定常状態となることがわかる。また、初期の時間に限られるが、厳密解の近似式¹³⁾で求めた温度分布とよく一致していることがわかる。

(2) 各岩盤の挙動

本解析では、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¹⁴⁾を用いて応力解析を行った。解析は平面ひずみ状態を仮定し、破壊判定はMohrの応力円包絡線説に従うものとした。また、空洞掘削時の発破によるゆるみ領域ここでは考慮せず、土被り100mの岩盤の重力のみがかかっているものとし、そこに熱応力が重畳されるものとした。なお、空洞周辺岩盤の側圧係数は0.5とした。解析に用いた花崗岩、砂岩、凝灰岩および泥岩のWetの物性値のうち、ここでは花崗岩と泥岩のみのWetの値をそれぞれTable 2およびTable 3に示す。空洞内にはLNGを貯蔵した場合を想定し、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て貯蔵30分後、1日後、30日後および1年後のステップに分割し、逐次破壊を考慮して解析を行った。ここでは代表例として花崗岩および泥岩地山

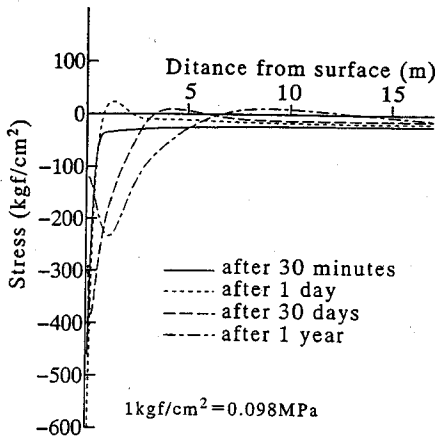


(a) tangential

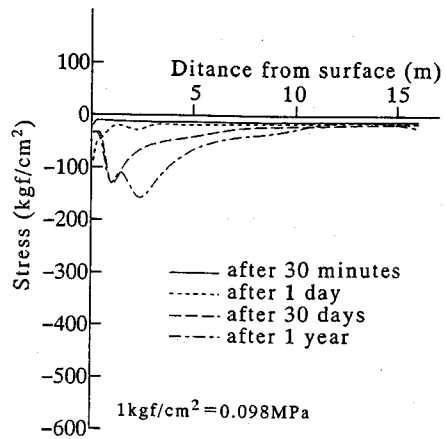


(b) radial

Fig.13 Stress distribution along horizontal line (granite).



(a) tangential



(b) radial

Fig.14 Stress distribution along horizontal line (mudstone).

の場合について述べる。花崗岩の解析結果を Fig.12(a) に示す。貯蔵 30 分後には、空洞周辺岩盤に熱収縮による亀裂が放射状に 30cm の長さで発生し、貯蔵 1 日後には亀裂が進展して 90cm となる。貯蔵 30 日後には亀裂の長さは 5m となり、1 年後には 12.5m の亀裂が空洞周辺に発生することが予想される。また、氷結域も亀裂と同様、時間の経過とともに広がっていることがわかる。

次に、泥岩の解析結果を Fig.12(b) に示す。貯蔵 30 分後には、空洞表面から 10cm の範囲が氷結し、氷結時の急激な膨張によりせん断破壊している。これは、泥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ため、間隙中の水の氷結膨張の影響を多大に受けたためであると考えられる。また、貯蔵 1 日後には氷結域は 50cm となるが、氷結域の空洞表面側の方が接線弾性係数が大

きいために空洞側へ膨張できず地山の方へ膨張し、氷結域の周辺に放射状に亀裂が 1.7m 生じている。その後、氷結域は貯蔵開始から 30 日後には 3m、1 年後には 7m と広がるが、一度生じた亀裂は氷結時の膨張によりふさがり安定していることがわかった。

以上のことから、岩質および含水状態の違いにより LNG 貯蔵時における各岩盤の挙動は大きく異なり、空隙率の小さい花崗岩および砂岩の挙動が互によく似ており、空隙率の大きい凝灰岩および泥岩の挙動は互によく似ていることがわかった。

(3) 各岩盤の応力分布

LNG 貯蔵時の空洞表面から水平軸に沿う接線方向と半径方向の応力分布の経時変化を代表例として花崗岩と泥岩について示したものがそれぞれ Fig.13(a),(b) および Fig.14(a),(b) である。貯蔵 1 年

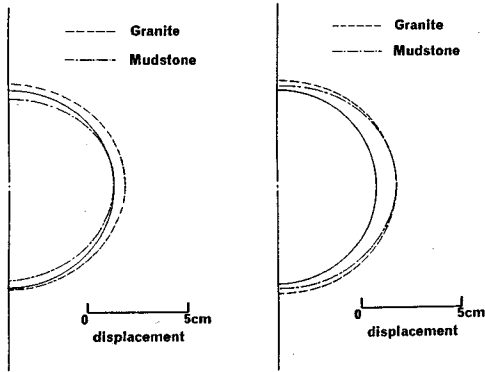


Fig. 15 Change of opening's shape after 1 day. Fig. 16 Change of opening's shape after 1 year.

後までを前述の応力解析と同じステップで表しており、貯蔵 30 分後は亀裂発生時の値を示してある。まず、花崗岩の場合の接線方向において貯蔵 30 分後についてみると、空洞表面において熱収縮による非常に大きな引張応力を生じており、まだ温度が及んでいない範囲では自重による圧縮応力を生じている。貯蔵 1 日後では、貯蔵 30 分後に発生していた引張応力が亀裂を生じたことから解放され、引張応力のピークは亀裂の先端である空洞表面から 90cm 付近のところへ移動する。貯蔵 30 日後、1 年後と時間の経過とともに引張応力のピークは空洞表面から遠ざかり、亀裂を生じている範囲では圧縮応力は発生していないことがわかる。一方、半径方向では貯蔵 30 分後において空洞表面でわずかに引張応力が生じており、時間の経過とともに引張応力のピークが地山側へ推移しているものの、いずれにせよ熱応力はほとんど生じていないことがわかる。

次に泥岩の応力分布の経時変化については、貯蔵後初期の時間において接線方向に氷結時の膨張による大きな圧縮応力を生じており、時間が経過するにつれて次第にそのピークが地山側へ推移しており、亀裂による引張応力のピークも同様に地山側へ推移していることがわかる。また、亀裂が発生し引張応力を生じていた範囲は、時間の経過とともに氷結時の膨張による圧縮応力へと移行しており、亀裂がふさがっていることが推察される。一方、半径方向では、氷結時の膨張による圧縮応力を生じており、時間の経過に伴いその範囲が広がっていることがわかる。

以上のことから、岩質および含水率の違いにより低温物質貯蔵時の各岩盤の応力分布も挙動と同様かなり異なっており、空隙率の小さい花崗岩および砂岩の応力分布と、空隙率の大きい凝灰岩および泥岩

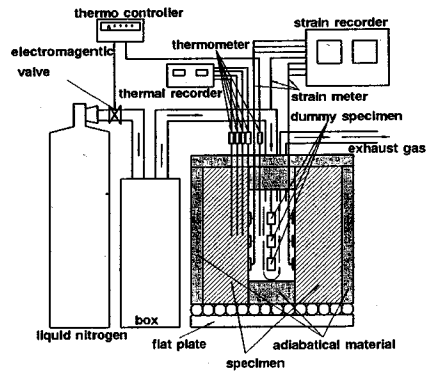


Fig. 17 Schematic diagram of the test.

の応力分布はそれぞれよく似ていることがわかった。

(4) 各岩盤内空洞の変形

次に、LNG 貯蔵 1 日後および 1 年後における各岩盤の空洞の変形を比較したものをそれぞれ Fig. 15 および Fig. 16 に示す。ここでも代表例として花崗岩および泥岩の場合について示している。比較のために直径 10m の円形空洞も示した。貯蔵 1 日後では、花崗岩の場合は空洞が拡がる変形をしているのに対し、泥岩の場合は、空洞がわずかながら内側に収縮する変形をしている。これは、低温の影響を受けた際、空隙率が大きい泥岩の場合には氷の氷結時の体積膨張により空洞表面付近に圧縮応力が作用するため、空洞が収縮するものと考えられる。しかし、貯蔵 1 年後ではいずれの岩盤においても周辺の岩盤が収縮するため、空洞が外側に拡がる変形をしていることがわかる。これは、泥岩の空隙中の水が氷結膨張してからは、時間の経過とともに収縮し、その割合は花崗岩よりも比較的大きいことによるものと考えられる。以上のことと前述の周辺岩盤の応力分布の経時変化から、LNG 貯蔵時における花崗岩の岩盤内空洞は、時間の経過とともに地山側に収縮することにより、空洞は外側に拡がる変形を示すことがわかった。一方、泥岩の岩盤は LNG 貯蔵後初期は氷結膨張し、空洞を内側に収縮させる変形を示すものの、貯蔵後 1 年経過すると空洞は外側に拡がることわかった。

(5) 室内実験

次に、本解析結果の妥当性を検討するため、小規模ながら孔を設けた岩石供試体を用いて室内実験により孔表面の円周方向のひずみを測定し、実測値と解析値とを比較検討した。実験に用いた岩石は前述の花崗岩と凝灰岩の 2 種類で、いずれも湿潤状態のものである。30 × 30 × 30cm の各岩石の中央に φ

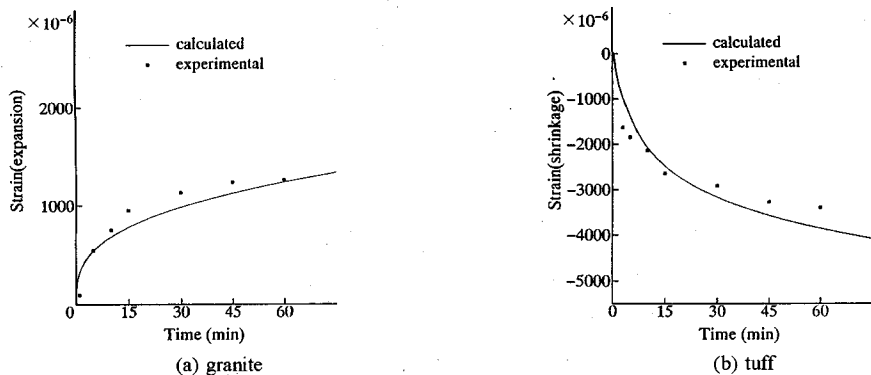


Fig.18 Strain of surface at low temperature.

9cmの孔を設け、孔表面にひずみゲージを接着し、液体窒素を用いて孔に冷気を送り込み、時間の経過に伴う孔表面の円周方向のひずみの変化を測定した。測定装置の概念図を Fig.17 に示す。

各岩石の実験結果および解析結果をそれぞれ Fig.18(a),(b) に示す。花崗岩の場合は時間の経過とともに円周方向のひずみは大きくなっており、孔が拡大していることがわかる。特に孔壁付近の温度が急激に変化する実験の初期の時間にひずみの変化は大きく、時間の経過とともに温度変化が緩慢になるとひずみの変化も小さくなっている。凝灰岩では逆にひずみが負の値を示し、孔が内側に収縮していることがわかる。この場合も初期の時間にひずみの変化は大きく、時間の経過とともに小さくなっている。このことから凝灰岩は間隙中の水の氷結膨張の影響を多大に受け、特に初期の時間に影響を大きく受けていることが推察される。また、実測値と解析値は非常によく似た値を示しており、本解析により先に述べた各地山岩盤の挙動を予測できるものと考えられる。

以上のことから、岩質の差異により LNG 貯蔵時における空洞周辺岩盤の挙動および応力分布は異なるものの、いずれの岩盤においても水封式⁵⁾を併用することにより低温物質の貯蔵は可能であると考えられる。

5. 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) 低温下における花崗岩、砂岩、凝灰岩および泥岩の強度および接線弾性係数は、常温下では Wet よりも Dry の方が大きく、温度の低下とともに Dry および Wet とも値が上昇し、その割合は凝灰岩お

よび泥岩の Wet でとくに大きいことがわかった。

(2) 低温下において各岩石は、Dry ではいずれも温度低下に伴い収縮し、Wet では凝灰岩および泥岩は 0℃付近で水の影響により一旦は急激な膨張を示すが、その後の温度低下により収縮することがわかった。

(3) 低温下における各岩石の熱拡散率は、いずれも温度低下に伴い値がわずかながら上昇し、上昇する割合は凝灰岩および泥岩の Wet で大きい。実用上はほぼ同様で一定とみなせる範囲であることがわかった。

(4) 低温下における各岩石の比熱は、いずれも Dry では温度低下に伴い値がわずかに低下するが、凝灰岩および泥岩の Wet では潜熱の影響により 0℃付近でとくに大きな値を示すことがわかった。

(5) 解析の結果、低温物質貯蔵時における花崗岩岩盤は熱収縮により引張応力が生じているのに対し、泥岩岩盤は氷の影響により圧縮応力を生じていることがわかった。

(6) 地山岩盤内の LNG 貯蔵時における空洞の熱変形は、花崗岩岩盤では時間の経過とともに空洞は拡大(岩盤は収縮)し、泥岩岩盤では貯蔵後初期の時間において、空洞は氷の影響により一旦内側へ収縮し、それから後は空洞が拡大することがわかった。なお、砂岩および凝灰岩地山での空洞の挙動、岩盤の応力の経時変化などはそれぞれ花崗岩および泥岩地山の場合と同様であった。

(7) 孔を設けた岩石供試体を用いた室内実験の結果、孔表面のひずみの値は実測値と解析値はほぼ一致することがわかった。

(8) ここで用いた各種岩石の強度・変形特性および熱物性値と解析法を用いることにより低温物質貯蔵時における各岩盤の挙動を予測できるものと考えられる。

なお、解析には愛媛大学情報処理センターの FACOM M-770/6 を使用した。

参考文献

- 1) (財)矢野恒太郎記念会：日本国勢図会 ,p.144, 国勢社, 1995.
- 2) 前掲 1) p.311.
- 3) 稲田善紀：地下の空間利用 ,pp.70-79, 森北出版, 1989.
- 4) 稲田善紀, 藤原斉郁, 門田俊一, 姚義久：低温物質の岩盤内貯蔵時に岩質の差異が挙動に及ぼす影響, 第 25 回岩盤力学に関するシンポジウム概要集, pp.231-235, 1993.
- 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 ,No.445/ III -18, pp.65-73, 1992.
- 6) 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.
- 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, 第 17 巻, 第 5 号, pp.200-203, 1971.
- 8) 稲田善紀, 八木則男：低温の影響を受けた岩石の力学特性, 材料, 第 28 巻, 第 313 号, pp.979-985, 1979.
- 9) 稲田善紀, 甲村雄一, 楠裕行：低温下における氷の熱物性値, 第 42 回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集, pp.360-361, 1990.
- 10) 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, 第 99 巻, 第 1411 号, pp.179-185, 1983.
- 11) 前掲 3) pp.101-103.
- 12) 熱物性ハンドブック編集委員会：熱物性ハンドブック, pp.57-59, 養賢堂, 1990.
- 13) H.S.Carslow and J.C.Jaeger: *Conduction of heat in solids*, Oxford at the Clarendon Press, pp.335-336, 1959.
- 14) 前掲 3) pp.118-119.

(1996. 1. 5受付)

A FEW REMARKS ON THERMAL BEHAVIOR OF ROCK MASS AROUND OPENINGS AFFECTED BY LOW TEMPERATURE

Yoshinori INADA, Naoki KINOSHITA, Shozo SEKI, Takashi MATSUO,
Atsushi NARIYUKI and Kenzo OCHI

The thermal behavior of rock mass around openings when low temperature material are stored, will be different with each type of rock. In this study, Affect of the difference of water content in each rock on physical properties in wet state under low temperature were investigated by experiment. From results, it was found that the physical properties of rocks which have large porosity, were affected by pore water. Then, temperature distribution and behavior around openings were analyzed and the results which were discussed for mechanism of crack development are described. In the case of granite and sandstone, it was found that cracks were caused by tensile stress. On the other hand, in the case of tuff and mudstone, cracks were caused by shearing stress.