

低温物質の凝灰岩岩盤内空洞貯蔵に関する基礎的研究

稲田善紀*・藤原斉郁**・畑野俊一郎***・
門田俊一****

地山岩盤内空洞に低温物質を貯蔵する場合、これまでの研究により花崗岩や砂岩など空隙率の小さい岩盤では空洞周辺の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いる。逆に空隙率が大きい岩盤では空隙中の水分の水結時の体積膨張が熱収縮を軽減させ、亀裂の発生防止が期待できる。本研究では多孔質である凝灰岩岩盤内に低温物質を貯蔵することを想定し、低温下における凝灰岩の強度・変形特性および熱物性値を実験により求め、これらの値をもとに解析を行い、空洞周辺岩盤の安定性について検討した結果について述べる。

Key Words: low temperature materials, storage, openings, tuff, crack, thermal property

1. 緒言

現在、我国のエネルギー政策の課題として石油依存度の低減および地球環境問題等が大きな柱となっており、石油代替エネルギーの必要性が指摘されている¹⁾。中でもLNG, LPGが注目されており、今後需給量の増加が予想されるので²⁾、安定供給のための大規模な貯蔵基地が必要となる。また、冷凍食品の供給量も共働き夫婦の増加、冷凍食品の多種多様化を背景として著しく増加してきており³⁾、今後冷凍倉庫の需要もさらに増加するものと予想される。

現在、我国ではこれらの低温物質の貯蔵方式として、平地や海岸の埋立地において地上式や半地下式が用いられているが、これらの方式は大規模な貯蔵には多大な敷地を必要とし、国土の狭い我国にとって土地の有効利用の面からも得策とは言い難い。そこで、筆者らはこれらを地山岩盤内に設けた空洞に貯蔵する方式を提案し検討を行ってきている^{4), 5)}。これまでの研究により、新鮮な花崗岩（空隙率約2%の岩石を対象）岩盤内に低温物質を貯蔵した場合、低温の影響により空洞周辺の岩盤には熱収縮のため放射状に亀裂が発生し、時間の経過とともに進展し、亀裂からの液漏れおよび空気漏れが生じ、これらの防止対策が必要となることを報告してきている⁵⁾。また、花崗岩より空隙率が大きく、空隙中の水分が氷結する際の体積膨張により、熱収縮の軽減が予想された砂岩（空隙率約8%）岩盤内に貯蔵した場合も、発生する範囲は減少したものの亀裂が生じることがわかっ

た⁵⁾。

そこで、これまでの経緯から、空隙がさらに多い岩石を用いれば亀裂の発生を防止することができると考えられるため、本研究では、例えば凝灰岩（栃木県宇都宮市産、通称大谷石、空隙率約37%）のような多孔質の岩盤内に低温物質を貯蔵することを想定した。低温下における凝灰岩の熱的性質についてはこれまで様々の実験結果が報告されてきているが⁶⁾⁻⁸⁾、常温から-160°Cまでの広い温度範囲において強度・変形特性ならびに熱定数について一貫して実験した結果が報告されていないので、本研究ではまず実験によりこれらの値を求めた結果について述べる。次にこれらの値をもとに解析を行い、低温物質貯蔵時の空洞周辺岩盤の安定性について検討し、また実験によって検討した結果について述べる。

2. 低温下における凝灰岩の強度・変形特性

(1) 凝灰岩の圧縮強度

今回用いた凝灰岩の物理的性質をTable 1に示す。本実験では $\phi 3 \times 6$ cmに成形し、7日間自然乾燥させ、これをデシケータ内でさらに3日間乾燥させDryの状態にした供試体およびこれをさらに蒸留水を満たした別のデシケータ内に投入し、真空ポンプにより24時間脱気してWet状態に処理した供試体の2種類を用いた。実験に先立ち、凝灰岩の力学的異方性を調べるため、常温下において堆積層に対して垂直および平行な方向においてDryの供試体を用い圧縮試験を行った。実験結果をTable 2に示す。その結果、圧縮強度、接線弾性係数、ポアソン比の値にはいずれも大きな差は認められなかった。次に、常温下において堆積層に対して垂直および平行な方向の弾性波伝播速度をDryについて測定した結果をTable 3に示す。いずれも弾性波伝播速度には、大きな差は認められなかった。以上のことから、本研究では凝灰岩の力学的異方性を考慮に入れず実験を行うこと

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

** 正会員 工修 大成建設(株) 土木設計部

*** 学生会員 愛媛大学大学院 工学研究科 土木海洋工学専攻(現 東急建設(株))

**** 正会員 工博(株) フジタ技術本部技術企画部 主任研究員

Table 1 Physical properties of tuff.

	Moisture content ratio (%)	Degree of saturation (%)	Porosity (%)	Bulk specific gravity (g/cm ³)	True specific gravity (g/cm ³)
Dry	1.39	5.76	37.09	1.560	2.446
Wet	24.01	99.62	37.09	1.908	

Table 2 Results of the test.

	Compressive strength (kg/cm ²)		Tangential Young's modulus (× 10 ⁴ kg/cm ²)		Poisson's ratio	
	Mean	Standard deviation	Mean	Standard deviation	Mean	Standard deviation
Parallel to the bedding plane	233	1	0.347	0.035	0.13	0.04
Vertical to the bedding plane	239	13	0.361	0.036	0.14	0.04

Table 3 Elastic wave velocity of tuff.

	P-wave velocity (m/sec)		S-wave velocity (m/sec)	
	Mean	Standard deviation	Mean	Standard deviation
Parallel to the bedding plane	1757	35	1156	11
Vertical to the bedding plane	1754	13	1150	13

とした。

本実験では、堆積層に対して垂直な方向に加圧する場合についてのみ低温下における圧縮試験を行った。実験装置の概念図を Fig.1 に示す。なお、供試体を冷却する際、熱衝撃による破壊を防ぐ必要がある。別の研究により、岩石で 3.3°C/min 以下の降温速度では、破壊が起こらないことが報告されているが⁹⁾、本実験では念のため 1°C/min でゆっくりと降温した。また、所要温度に達した後、供試体の中心まで同一の温度にする必要があり、本実験はこれまで他の岩石について報告してきた実験と同様に、所要の温度になった後も 60 分間保温し、荷重速度 5 kgf/cm²/sec で圧縮試験を行った¹⁰⁾。

圧縮試験の結果を Fig.2 に示す。圧縮強度は、常温では Wet の方が Dry より小さいことがわかる。これは Wet に処理する際、真空ポンプで供試体中の空気を脱気し、水を浸潤させる時にマイクロクラックをさらに押し広げる結果となったことや、圧縮試験時に、岩石中の水に間隙水圧が生じ、破壊を促進するためであると考えられる。低温下においては、温度の低下とともに Dry および Wet のいずれも強度が上昇していることがわかる。これは温度の低下とともに鉱物粒子が収縮し硬化することによるものであると考えられる。また、この上昇の割合は Dry よりも Wet の方が大きい。これは、Wet の場合は空隙が氷によって満たされており、氷は -20°C から -160°C で約 2.8 倍の強度上昇を示す¹¹⁾ためであると考えられる。また花崗岩や砂岩と比較すると、Wet

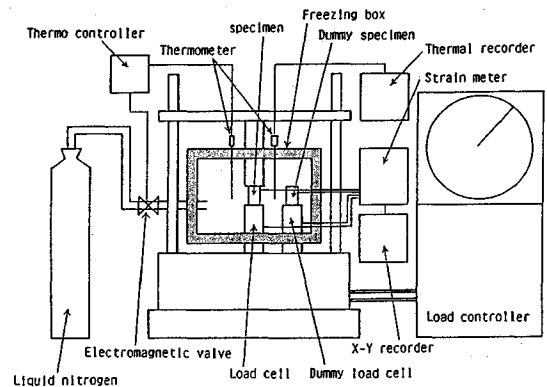


Fig.1 Schematic diagram of the test.

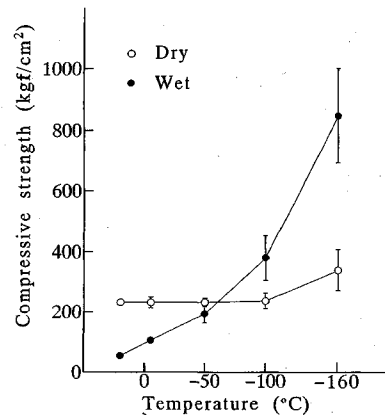


Fig.2 Compressive strength of tuff at low temperature.

の強度上昇の割合が大きい^{12), 13)}ことがわかる。これは凝灰岩が他の岩石と比較して空隙が多く、凝灰岩自身の強度がもともと低く、氷の膠結物質としての役割が大きく関与していることが推察される。

また、圧縮試験の際、供試体の表面に貼り付けたひずみゲージによって得られた応力-ひずみ曲線により、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。接線弾性係数は常温では圧縮強度と同様に Wet の方が Dry より大きいことがわかる。また、温度の低下とともに Dry および Wet のいずれも値が上昇していることがわかる。これは温度の低下とともに鉱物粒子が収縮し硬化することによるものであると考えられる。また、Wet の方が Dry より値が上昇する割合が大きい。これは空隙が氷によって満たされており、温度の低下とともに氷自身の接線弾性係数が上昇する¹¹⁾ことの影響を受けていることによるものであると考えられる。ポアソン比は常温では Wet の方が Dry より大きいことがわかる。これは圧縮の際、空隙を満たしている水分による水圧が、縦方向の応力を横方向にも伝え、横方向に変形しやすくなったことによるものであると考えられる。また、温度の低下と

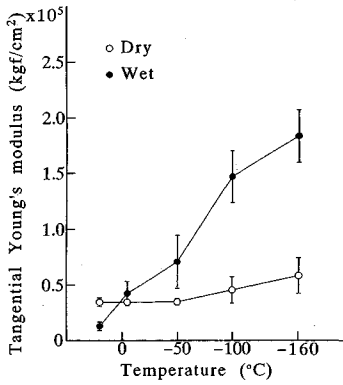


Fig. 3 Tangential Young's modulus of tuff at low temperature.

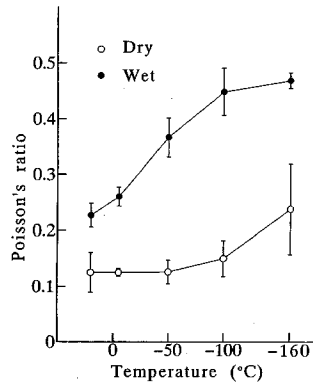


Fig. 4 Poisson's ratio of tuff at low temperature.

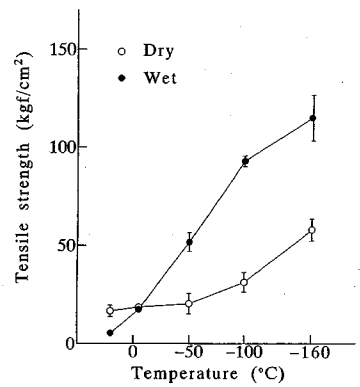


Fig. 5 Tensile strength of tuff at low temperature.

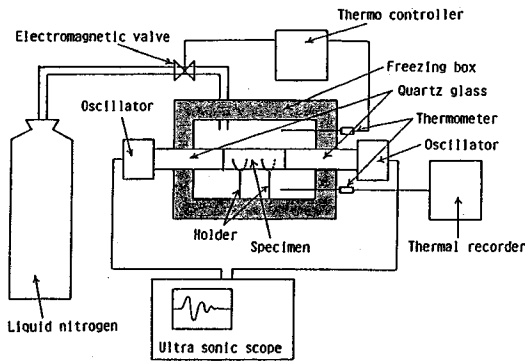


Fig. 6 Schematic diagram of the test.

ともに Dry および Wet のいずれも値が上昇していることがわかる。これは氷結後温度の低下とともに供試体が硬化することにより、縦方向の応力を横方向にも伝えやすくなったことによるものと考えられる。

(2) 凝灰岩の引張強度

本実験では、低温下において堆積層に対して平行な方向に加圧する場合について圧裂引張試験を行った。実験に使用した供試体は $\phi 3 \times 3$ cm に成形し、実験装置は圧縮試験時と同様のものを用い、降温速度は $1^\circ\text{C}/\text{min}$ でゆっくりと降温し、所要の温度になった後も 60 分間保温し、荷重速度は $2 \text{ kgf}/\text{sec}$ とした。

圧裂引張試験の結果を Fig. 5 に示す。引張強度においても圧縮強度と同様の傾向が見られ、強度上昇の要因も同様のことが考えられる。また、他の岩石と比較すると常温での引張強度が極めて小さく、強度上昇の割合が極めて大きいことがわかる^{12), 13)}。Wet では常温から -160°C で約 15 倍もの強度上昇を示し、引張強度においても空隙が氷で満たされることの影響が非常に大きいことを示している。

(3) 凝灰岩の弾性波伝播速度

本実験では、堆積層に対して垂直な方向について低温下における弾性波伝播速度を測定した。実験装置の概念

図を Fig. 6 に示す。実験には $\phi 3 \times 10$ cm に成形した供試体を用い、また超音波振動子を低温から保護するために振動子と供試体の間に石英ガラス棒を挿入し、降温速度は $1^\circ\text{C}/\text{min}$ とし、所要の温度になった後も 60 分間保温した。

結果を Fig. 7 に示す。Dry および Wet のいずれも温度の低下とともに P 波、S 波とも値が上昇し、上昇する割合は Wet の方が大きいことがわかる。値が上昇するのは、温度の低下とともに鉱物粒子が収縮し硬化するためであり、Wet の方が上昇する割合が大きいのは、空隙中の水が氷結し、氷自体の弾性波伝播速度が温度の低下とともに大きくなる¹⁴⁾ためであると考えられる。また、弾性波伝播速度の測定結果は、低温下において氷結後供試体自体が収縮し硬化していることを示しているので、先に述べてきた圧縮強度、引張強度、接線弾性係数、ポアソン比の結果を裏付けているものと考えられる。

3. 低温下における凝灰岩の熱物性値

(1) 凝灰岩の熱拡散率

本実験では、要素分割法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を求めた。この方法は熱拡散率が先に求まり、実験で熱容量を求めることにより熱伝導率を計算で見積もる方法である。この方法は、① 1 回の実験で同時に種々の温度における熱拡散率を求めることができる。② 測定時間が短い、などの利点をもっている¹¹⁾。岩石の異方性については前述の通り無視できるものとして堆積層に対して平行に熱が伝わる場合について実験を行った。結果を Fig. 8 に示す。熱拡散率は温度の低下とともにわずかながら値が上昇してゆき、今回の温度範囲では Dry では $\kappa = 6.0 \sim 7.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、Wet では 0°C 付近を除き $\kappa = 4.0 \sim 6.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 程度の値であった。また今回の実験の結果からは低温下では熱容量の値がわずかながら低下してゆくが、熱伝導率の値は逆に少しずつ上昇することがわかった。なお熱拡

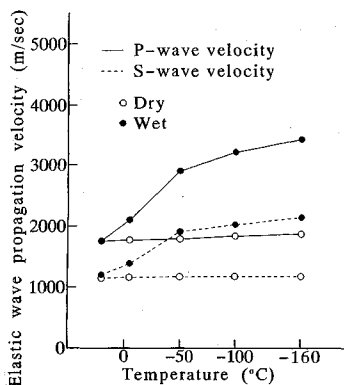


Fig.7 Elastic wave velocity of tuff at low temperature.

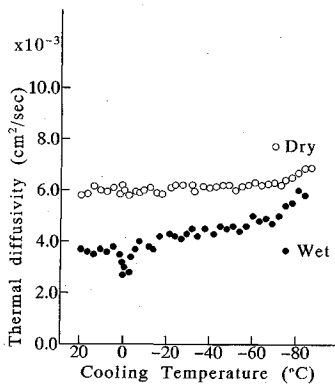


Fig.8 Thermal diffusivity of tuff at low temperature.

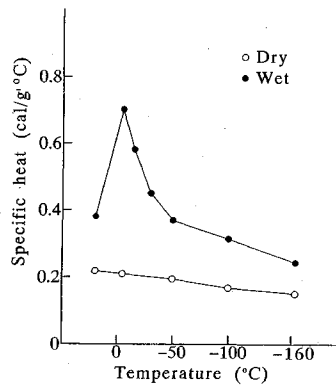


Fig.9 Specific heat of tuff at low temperature.

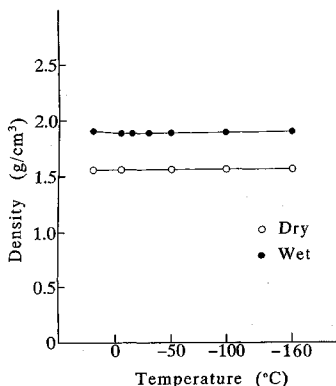


Fig.10 Density of tuff at low temperature.

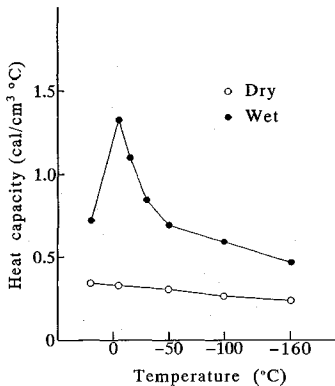


Fig.11 Heat capacity of tuff at low temperature.

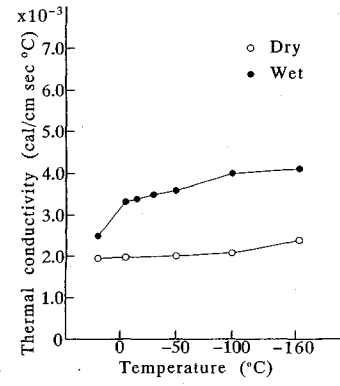


Fig.12 Thermal conductivity of tuff at low temperature.

散率の値について Wet の 0°C 付近で値が低いのは、水の熱拡散率が約 $1.2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ と岩石に比べて低く、0°C 付近ではまだ氷結しておらず潜熱の影響によるものであると考えられる。

(2) 凝灰岩の比熱

本実験では、低温下における岩石の比熱の測定を行った。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、供試体を包む媒体（ここでは水）が適切な温度変化を示すように形と大きさを考慮し、 $40 \times 40 \times 5 \text{ mm}$ 程度に成形したものをを用いた。実験は蒸留水を入れた断熱容器に所要温度に冷却した供試体を投入し、すばやく攪拌してその温度変化を測定し、式(1)を用いて比熱を求めた。

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

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 : 供試体と水の定常状態の温度

t_1 : 供試体の冷却温度

t_2 : 水の初期温度

得られた結果を Fig.9 に示す。なお、図中の横軸は供試体の冷却温度を示している。その結果、Dry および Wet のいずれも低温になるにつれ、比熱はわずかながらその値が小さくなっていることがわかる。また、Wet の方が Dry よりも値が大きい。これは、間隙中の氷の比熱の方が、空気比熱よりも大きい¹⁵⁾ことの影響を受けているものと考えられる。0°C 付近で突出した値を示すのは、間隙中の水が氷へ変化するときの潜熱の影響によるためであると考えられる。

(3) 熱容量、熱伝導率

まず、後述の線膨張係数から温度低下にともなう密度の変化を求めた結果を Fig.10 に示す。Dry では、温度の低下とともにわずかながら密度が上昇している。一方、Wet では、0°C 以下で供試体が氷結し膨張を示すため密度が下がるが、さらに低温では、逆に氷が収縮するためわずかながら値が上昇している。しかし、Dry および Wet のいずれの値も変化が小さく実用上ほぼ一定の値とみなせる。

次に、比熱および密度から熱容量を求めた結果を Fig.11 に示す。Dry では、温度の低下とともにわずかながら減少している。一方、Wet では、0°C 付近の比熱

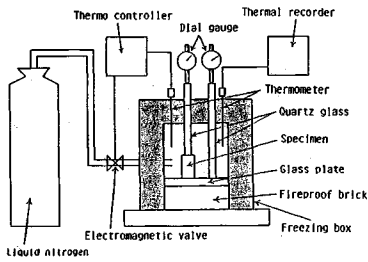


Fig.13 Schematic diagram of the test.

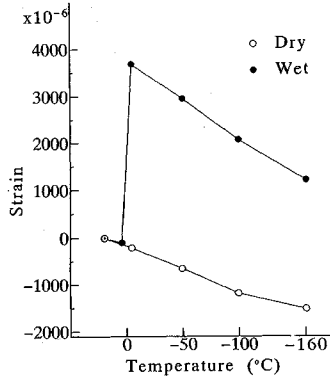


Fig.14 Strain of tuff at low temperature.

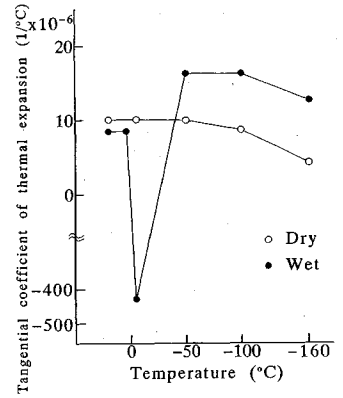


Fig.15 Tangential coefficient of thermal expansion.

が大きいため、熱容量もこの付近で大きい値を示し、さらに低温下では少しずつ減少している。

また、熱伝導率は以下に述べる式(2)に先に求めた熱容量の値を代入することにより求めた。

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

- 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.12 に示す。熱伝導率の値は Dry および Wet のいずれの値も温度の低下とともに増加している。

(4) 凝灰岩の線膨張係数

本実験では、石英ガラス棒を用いた比較法¹⁶⁾により温度低下にともなうひずみを堆積層に対して平行な方向について測定した。実験装置の概念図を Fig.13 に示す。実験には $\phi 3 \times 10$ cm に成形した供試体を用い、降温速度は 1°C/min とし、60 分間保温した後ひずみを測定した。実験結果を Fig.14 に示す。Dry では温度の低下とともに収縮しているのに対し、Wet では空隙の水が氷結する際、約 4000×10^{-6} の膨張ひずみを示した後に、温度の低下とともに収縮していることがわかる。また、空隙の水が氷結した後の収縮量は Wet の方が大きい。これは岩石と比較して氷の方が温度低下にともなう収縮量が大きい¹³⁾ためであると考えられる。氷結の際、氷の膨張にともなって供試体自体が膨張するのは凝灰岩の鉱物粒子間の結合力が弱く、氷の量も多いため氷の熱的挙動による影響をかなり受けているものと推察される。一方、氷自体は、氷結の際、約 30000×10^{-6} の膨張ひずみを示すことが報告されているので¹¹⁾、逆に、氷自体も凝灰岩によって挙動に影響を受けているものと推察される。

次に、得られたひずみから接線線膨張係数および割線

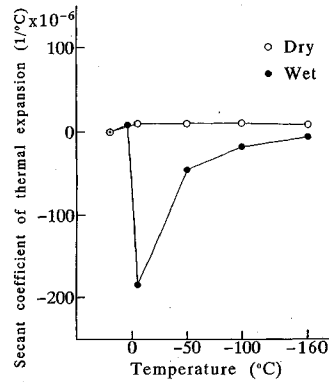


Fig.16 Secant coefficient of thermal expansion.

線膨張係数を求めた結果を Fig.15 および Fig.16 に示す。Dry では接線線膨張係数および割線線膨張係数のいずれ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。Wet では氷の接線線膨張係数および割線線膨張係数¹¹⁾とよく似た傾向を示し、ここからも凝灰岩の挙動には氷の影響を受けていることがわかる。

4. 低温物質貯蔵時の空洞周辺岩盤の挙動

(1) 空洞周辺の温度分布

本解析では、土被り 100 m の位置に直径 10 m の単一円形空洞を設け、Wet 状態の岩盤中に低温物質を貯蔵した場合の空洞周辺の温度分布を要素分割法によって求めた^{11),14)}。要素分割法は、① 解析法が明快である。② FEM に比べ時間間隔の選定が容易である。③ 複雑な形状の境界条件を処理できる。④ 複合材の解析に有効であるなど差分法や有限要素法の長所を合わせもった長所をもっている¹⁴⁾。また、空洞内熱源の温度は、LPG 貯蔵時の -43°C、まぐろの冷凍貯蔵時の -60°C、および LNG 貯蔵時の -162°C を想定した。ただし、岩盤の初期温度を 15°C とした。熱定数については温度依存性

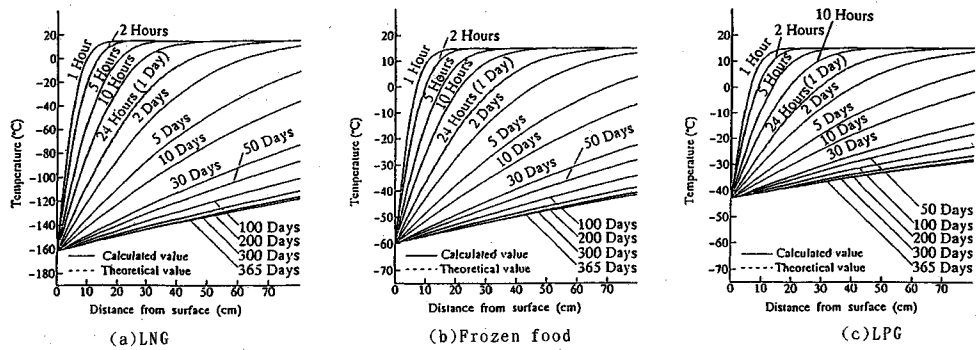


Fig.17 Temperature distribution around opening.

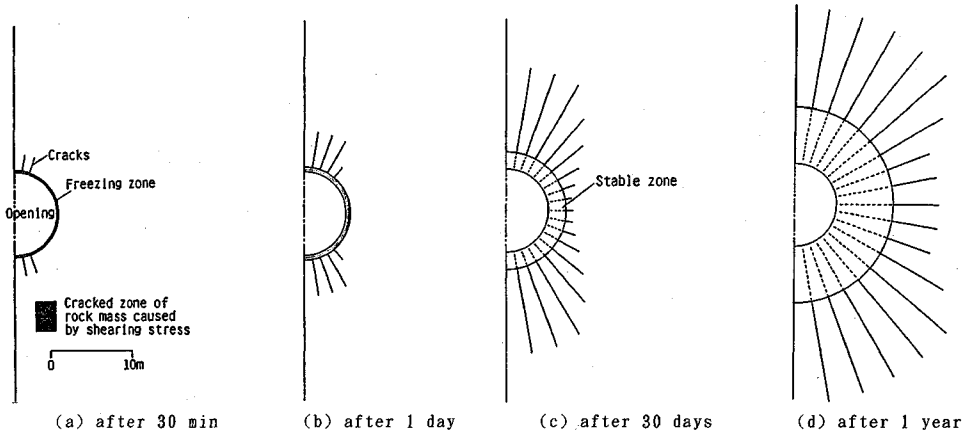


Fig.18 Cracks and cracked zone around opening (LNG: -162°C).

Table 4 Physical properties of tuff.

Temperature (°C)	Expansion coefficient (1/°C) × 10 ⁻⁴	Young's modulus (kg/cm ²) × 10 ⁶	Poisson's ratio	Compressive strength (kg/cm ²)	Tensile strength (kg/cm ²)
20 ~ 10	0.0000	0.190	0.233	-64	7.3
10 ~ 0	0.0929	0.295	0.251	-71	11.7
0 ~ -10	-1.8460	0.398	0.269	-98	17.0
-10 ~ -20	-1.1780	0.498	0.281	-118	23.4
-20 ~ -30	-0.8418	0.596	0.313	-138	30.9
-30 ~ -40	-0.6406	0.695	0.334	-159	38.4
-40 ~ -50	-0.5057	0.820	0.356	-184	47.0
-50 ~ -60	-0.4089	0.911	0.377	-203	57.0
-60 ~ -70	-0.3364	1.019	0.396	-244	66.0
-70 ~ -80	-0.2798	1.124	0.415	-280	74.8
-80 ~ -90	-0.2342	1.224	0.430	-317	82.7
-90 ~ -100	-0.1973	1.316	0.442	-358	89.8
-100 ~ -110	-0.1668	1.408	0.452	-404	95.7
-110 ~ -120	-0.1411	1.493	0.458	-455	100.4
-120 ~ -130	-0.1200	1.575	0.463	-512	104.4
-130 ~ -140	-0.1020	1.652	0.466	-578	107.8
-140 ~ -150	-0.0876	1.722	0.468	-664	110.8
-150 ~ -160	-0.0747	1.789	0.468	-775	113.4
-160 ~ -170	-0.0638	1.840	0.468	-935	115.8

を考慮して解析した。

得られた結果を Fig.17 (a)~(c) に示す。いずれ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やかになっている。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おり、貯蔵1年後にはほぼ準定常状態¹⁴⁾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¹⁵⁾で求めた温度分布(図中に点線で示してい

る)とよく一致していることがわかる。

(2) 空洞周辺の応力解析

ここでは、前述の温度分布をもとに亀裂解析法¹⁶⁾を用い、応力解析を行った。亀裂解析法は材料の引張強度を越える引張応力が発生した場合には、分割要素が塑性領域や破壊領域になると考えるのではなく、隣接要素間の目地に亀裂が進展してゆくものとする解析方法である。解析に用いた岩石の物性値を Table 4 に示す。解析に際しては、空洞掘削時の発破によるゆるみ領域は考慮せず、土被り100mの岩盤の圧力のみがかかっているものとし、側圧係数を0.5としてここに熱応力が重畳されるものとした。代表例としてLNGの貯蔵の場合の結果を Fig.18 (a)~(d) 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、また引張強度がかなり小さいため自重の影響により天端付近に亀裂が発生している。この時の空洞は氷結域がわずかなため変位していない。そして、貯蔵開始から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空洞側へ膨張できず、地山の方へ膨張し氷結域の周辺に亀裂が生じている。その後、氷結域は貯蔵開始から30

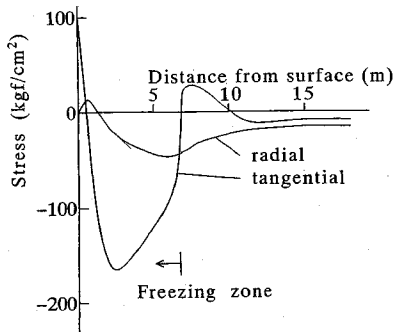


Fig. 19 Stress distribution along horizontal line (LNG : after 1 year).

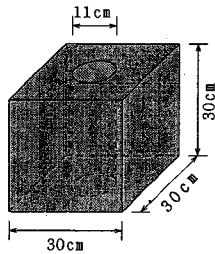


Fig. 20 Schematic diagram of the sample

日後には 2.2 m, 1 年後には 7 m と広がるが, 1 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。Fig. 19 は LNG 貯蔵 1 年後の空洞表面から水平軸に沿う半径方向と接線方向の応力を示したものである。氷結域ではどちらも圧縮応力が発生しているが, 氷結の境界を越えると, 水平方向は圧縮応力で鉛直方向は引張応力が発生していることがわかる。また冷凍食品 (-60°C) および LPG (-43°C) 貯蔵についても同様の挙動が見られた。

つぎに, 本解析結果の妥当性を検討するため, Fig. 20 に示すように, $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}$ の凝灰岩の中央に直径 11 cm の孔を設けた供試体を用い, 室内にて孔の内部を冷却させた実験を行い, 孔内部の円周方向のひずみを測定した。なお, 供試体は十分に乾燥させたもの (Dry) および水封式を想定して空隙に水を浸潤させたもの (Wet) の 2 種類を用いている。測定結果を Fig. 21 に示す。一方, この実験を想定した解析を行い, その結果を同時に Fig. 21 に示している。この図より, 測定結果と解析結果は挙動がよく一致しており, とくに Wet では水の挙動に影響を受けることがうかがえる。以上のことから, 本解析で地山岩盤の挙動を予測することができるものと思われる。

(3) 実用化に向けての一提案

本研究では, 空隙率の大きい凝灰岩の岩盤を想定して検討を行ってきたが, 前述の解析により氷結域周辺に亀裂が生じることがわかった。しかしこれまでの研究によ

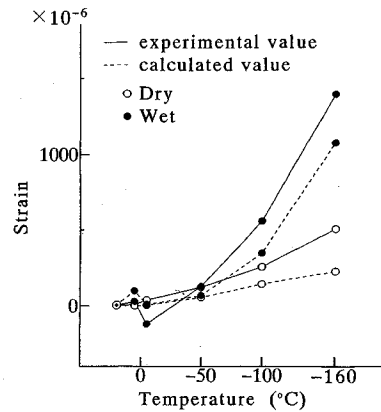


Fig. 21 Strain of surface of opening.

り, 同じ条件下において花崗岩および砂岩では, 岩石は地山に向かって収縮し空洞は見かけ上拡がり, 亀裂が生じているのに対し, 凝灰岩の空洞は見かけ上変化せず全く異なった挙動を示し, 空洞表面付近には安定領域が発生していた。そのため, 石油の備蓄に用いられている水封式を併用することにより, より液漏れや冷気漏れ防止の安全対策に役立ち, 低温物質の貯蔵が可能であると考えられる。ただし, ここでいう水封式はクラック内が常に水で満たされていて, 極低温が水と接触する場合にも瞬時に水が氷結するものと仮定している。また, 空洞周辺岩盤に人工的に亀裂を入れておき, 氷結時の膨張による応力を緩和し, 亀裂の発生を抑制することも有効な手段になると思われる。また凝灰岩よりも鉱物粒子間の結合力が強く, かつ空隙率に伴う線膨張係数のみを変化させた試算により, 空隙率が 15~25% 程度の岩盤を選定すれば, 安定することがわかった。この場合水の影響が少なくなり, 氷結時の膨張が抑制され, 温度低下による接線弾性係数の上昇が小さくなり, より引張強度が大きいので, 低温物質貯蔵に有利となり, 亀裂の発生が抑えられているのではないかと考えられる。

5. 結 言

本研究では, 花崗岩や砂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影響も小さいと予想される凝灰岩岩盤内に低温物質を貯蔵する場合を想定し, 実験により物性値を求め, 解析により実用化に向けての検討を行った。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) 凝灰岩の強度および接線弾性係数は常温においては Wet より Dry の方が大きい。また, 温度低下とともに値が上昇し, その上昇する割合は Dry より Wet の方が大きいことがわかった。

(2) 凝灰岩のポアソン比は常温においては Dry より Wet の方が大きい。また, 温度の低下とともにその

値は上昇することがわかった。

(3) 凝灰岩の弾性波伝播速度は温度の低下とともに値が上昇し、その上昇する割合は Dry より Wet の方が大きい。

(4) 凝灰岩の熱拡散率は、Dry では $6.0 \sim 7.0 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ 、Wet では $4.0 \sim 6.0 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ 程度の値となることがわかった。なお、 0°C 付近の Wet では、 $2.3 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ 程度の値となる。

(5) 凝灰岩の低温下における比熱および熱容量は、温度の低下とともに値が減少し、 0°C 付近の Wet で大きな値を示す。

(6) 凝灰岩の低温下における熱伝導率は、温度の低下とともに値が少し増加する。

(7) 凝灰岩の低温下におけるひずみは、Dry では温度の低下とともに収縮し、Wet では 0°C 付近で急激な膨張を示し、さらに低温下では収縮する。

(8) 解析の結果、凝灰岩の岩盤中に LNG、冷凍食品、LPG を貯蔵する場合、空洞周辺岩盤の温度分布は貯蔵 1 年後には準定常状態となることがわかった。

(9) 解析の結果、空洞周辺岩盤には亀裂を生じるが空洞表面付近は安定しており、水封式を併用することにより低温物質貯蔵は可能であると考えられる。

(10) 亀裂は、あらかじめ人工的に亀裂を入れておくことにより、その進展を防ぐことができるのではないかと思われる。

(11) 凝灰岩よりも鉱物粒子間の結合力が強く、かつ空隙率に伴う線膨張係数を変化させた試算により、空隙率が 15~25% 程度の岩石を選定すれば安定することがわかったので、亀裂の発生が抑えられるのではないかと考えられる。

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) 資源エネルギー庁監修：92 省エネルギー総覧，pp. 24~28, 1992.
 2) (財)省エネルギーセンター編：省エネルギー便覧，pp. 44~45, 1990.

3) 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.
 4) 稲田善紀・北村聖一・岡田明浩：LNG の地下岩盤内空洞貯蔵における空洞の安定性の検討，土木学会論文報告集，第 343 巻，pp. 35~44, 1984.
 5) 稲田善紀・甲村雄一・藤原齊都：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 号，Ⅲ-18，pp. 65~73, 1992.
 6) 例えば，日景秀次・添田弘基・西牧均・関根一郎：LPG 地下岩盤内低温貯蔵槽に関する研究，戸田建設技術開発センター研究報告，No. 10，pp. 36~48, 1983.
 7) 例えば，江原昭次・柳谷俊・平尾一之・寺田孚：低温下の岩石の熱膨張について，材料，第 32 巻，第 363 号，pp. 111~117, 1982.
 8) 例えば，木下直人・安部透：低温三軸応力下における堆積軟岩の力学特性，土木学会第 41 回年次学術講演概要集，Ⅲ-196，pp. 391~392, 1986.
 9) 山口梅太郎・宮崎道雄：熱による岩石の変化あるいは破壊について，日本鉱業会誌，第 86 巻，第 986 号，pp. 347~348, 1970.
 10) 岩石強度測定法特別委員会編：岩石強度試験に関するシンポジウムテキスト，日本鉱業会，1966.
 11) 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.
 12) 稲田善紀・藤原齊都：低温物質を地山岩盤内に貯蔵した場合の問題とその対策，第 12 回西日本岩盤工学シンポジウム論文集，pp. 115~120, 1991.
 13) 稲田善紀・八木則男：低温下における岩石の熱物性値，材料，第 29 巻，第 327 号，7 479 p., 1980.
 14) 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 1 141 号，pp. 179~185, 1983.
 15) 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.
 16) 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.
 17) H.S. Carslaw and J.C. Jaeger : Conduction of Heat in Solids, Oxford at the Clarendon Press, pp. 335~336, 1959.
 18) 稲田善紀・谷口浩二：液化天然ガス地下岩盤空洞貯蔵による空洞周辺の塑性領域，日本鉱業会誌，第 10 巻，第 1192 号，pp. 365~372, 1987.

(1993. 3. 24 受付)

BASIC RESEARCH ON LOW TEMPERATURE MATERIALS STORAGE IN OPENINGS EXCAVATED IN TUFF MOUNTAIN

Yoshinori INADA, Tadafumi FUJIWARA, Shunichiro HATANO and Shunichi KADOTA

In the case of low temperature materials storage in openings excavated in Granite or Sand stone mountain, as the authors have made clear by theoretical analysis and experiment, the cracks around opening will be occurring by shrinkage of opening.

When the rock mass is more porous, as the water will expand by changing to ice, reduce the shrinkage of rock mass will be expected.

In this study assuming the case of low temperature materials storage in openings in Tuff mountain, physical properties of Tuff under low temperature were investigated by experiment. And then, by using these values, stability of openings was analyzed and confirmed by experiment are described.