

極低温の履歴が地山岩盤内空洞の挙動に及ぼす影響

EFFECT OF THERMAL HYSTERESIS OF LOW TEMPERATURE ON BEHAVIOR OF ROCK MASS AROUND OPENINGS

稲田善紀*・木下尚樹**

Yoshinori INADA and Naoki KINOSHITA

The authors have proposed and discussed storage of low temperature materials such as LNG, LPG and frozen food in openings excavated in rock mountains. In this case, the rock mass around the openings will receive thermal hysteresis of low temperatures. In this study, strength and deformation characteristics of rocks were examined after receiving thermal hysteresis of the range between room temperature and -160°C . Then, using the results of the experiments, for the case where LNG will be stored in openings, temperature and stress distribution around openings were analyzed. Then the effect of thermal hysteresis of low temperatures on thermal behavior of the rock mass around openings was discussed.

Key words : thermal hysteresis, low temperature, storage, rock mass, thermal behavior, opening

1. 緒 言

近年、石油の代替エネルギーとしてのLNGやLPGの需給量が増加している。一方で、食生活の多種多様化を背景に冷凍食品の需給量も増加している。今後、これら低温物質を安定供給するための貯蔵施設が増加するものと予想される。筆者らはこれまで低温物質の貯蔵方法の一つとして、地山岩盤内に設けた空洞に直接貯蔵することを提案し、検討を行ってきた¹⁾。この貯蔵方法は土地の立体的有効利用、岩盤の保温性から省エネルギー、地下においては地震の影響が軽減されることから防災上などの点から利便な方法である。しかし、この場合、貯蔵量の変動やメンテナンス等により、空洞周辺岩盤が極低温の温度履歴を受けるため、空洞周辺岩盤の挙動を検討するには、温度履歴を受けた岩石の強度・変形特性を把握しておく必要がある。

本研究では、まず温度履歴が岩石の強度・変形特性に与える影響を明らかにするため、数種類の岩石について温度履歴を与えた後、室温下および低温下の強度・変形特性を求め、履歴回数、履歴幅、雰囲気温度および岩石の含水状態などが及ぼす影響について考察した。次に得られた値を用いて、低温物質を地山岩盤内空洞に貯蔵した場合を想定し、温度分布および応力分布を解析し、温度履歴を受ける場合の空洞周辺岩盤に発生する亀裂の進展状況および岩盤の挙動について考察した。

キーワード：温度履歴、極低温、貯蔵、岩盤、熱的挙動、空洞

* フェロー会員 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

2. 低温の温度履歴が岩石の強度・変形特性に及ぼす影響

2. 1 実験に用いた岩石試料

実験に用いた岩石試料は、2 種類の花崗岩（愛媛県越智郡宮窪町産：大島花崗岩，茨城県笠間市稲田産：稲田花崗岩）および凝灰岩（栃木県宇都宮市産）である。各岩石の物理的性質を表-1 に示す。一般に、岩石には節理や層理が存在しており、力学的性質を調べる際には力学的異方性を考慮する必要がある。花崗岩については、岩石ブロックの弾性波伝播速度を測定することにより、rift plane および grain plane を推定し、これらの面に平行となる方向にコアドリルで試料を採取した。また、堆積岩である凝灰岩についても力学的異方性を検討し、岩石ブロックの弾性波伝播速度を測定することにより、ここでは堆積層に対して平行になるようにコアドリルで試料を採取した。これらの各岩石を一軸圧縮強度試験用には $\phi 3 \times 6\text{cm}$ ，圧裂引張強度試験用には $\phi 3 \times 3\text{cm}$ に成形した。端面の平行度および平坦度は、 $5/100\text{mm}$ 以内とした。また、各岩石は以下に示す 2 通りの方法で処理したものについて実験を行った。

- ① 室内で1週間以上自然乾燥した後、デシケータ内でさらに1週間乾燥した。
 - 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”と呼ぶこととする。

表-1 実験に用いた岩石の物理的性質.

rocks	Porosity (%)	Moisture content ratio (%)	Degree of saturation (%)	Bulk specific gravity	True specific gravity
Inada granite(Dry)	1.45	0.03	5.5	2.63	2.67
Inada granite(Wet)	1.45	0.24	44.1	2.63	2.67
Oshima granite(Dry)	0.79	0.09	28.5	2.65	2.67
Oshima granite(Wet)	0.79	0.24	81.3	2.65	2.67
Oya tuff(Dry)	37.09	1.39	5.8	1.56	2.45
Oya tuff(Wet)	37.09	24.01	99.6	1.91	2.45

2. 2 温度履歴の与え方

供試体に温度履歴を与える方法は以下のようにした。温度履歴を与えている間、供試体の含水状態が変化することを防止するため、Dry, Wet とともにポリエチレンフィルムで覆った状態で槽内に入れた。実験中の温度を測定するために温度センサーを Wet, Dry それぞれ1つの供試体の中心に埋め込み、供試体の表面に3カ所および槽内 25 箇所に設置した。履歴を与える温度については、LNG(-162℃)および食品の冷凍の中で最も低い温度の、マグロの冷凍温度である-60℃を想定し、各岩石試料に常温(15℃)から低温(-160℃, -100℃, -60℃)までの温度範囲とし、図-1 に示すように、以下これらの温度履歴を Case 1(15℃~-160℃), Case 2 (15℃~-100℃), Case 3 (15℃~-60℃) と呼ぶこと

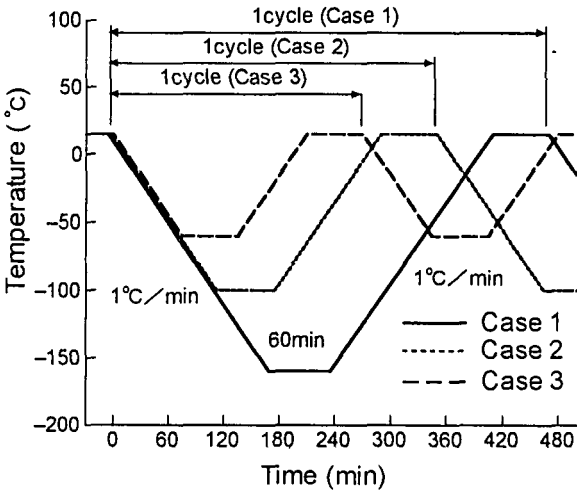


図-1 温度履歴の与え方.

とする。降温速度は $3.3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以下なら熱衝撃による影響を受けないとされている²⁾。ここでは槽内を一様な温度で降下させ得る速度として $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ とした。槽内が履歴の最低温度に達した後、供試体の寸法がこの程度であれば約 20 分で供試体の中心部まで温度が及ぶことが報告されているが³⁾、ここでは設定温度と供試体表面、中心の温度差が $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 以内で安定していると確認できる時間として、60 分間保温した。保温後は $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で昇温し、 15°C で 60 分間保温した。以上の過程を 1 サイクルとし、本実験では 10 サイクルまでの温度履歴を与えた。いずれの場合も温度を直線的に変化させるため、液体窒素およびヒーターを併用した。

供試体に温度履歴を与えた後、一軸圧縮強度試験、圧裂引張強度試験および弾性波伝播速度の測定を行った。実験の雰囲気温度は常温および各温度履歴の最低温度とした。低温下における実験については温度履歴を与える場合と同じ条件で供試体を冷却、保温して行った。なお、供試体数は各試験とも各条件に付き最低 5 本とした。

2. 3 実験結果および考察

供試体を断熱したボックス内で液体窒素を気化した冷氣により冷却し、それぞれの履歴の最低温度である -160°C 、 -100°C 、 -60°C および常温での圧縮強度および引張強度を測定した。また、一軸圧縮試験の際には、供試体にひずみゲージを貼り付け、荷重に伴う縦ひずみと横ひずみも測定した。荷重を与える速度は強度および応力-ひずみ関係が 5% 以内のばらつきで測定できる速度として、花崗岩については荷重速度で $480\text{N}/\text{sec}$ (応力速度で約 $0.7\text{MPa}/\text{sec}$) とし、軟岩である凝灰岩については荷重速度で $340\text{N}/\text{sec}$ (応力速度で約 $0.5\text{MPa}/\text{sec}$) とした。圧裂引張強度試験における荷重速度は、花崗岩については $49\text{N}/\text{sec}$ 、凝灰岩については $20\text{N}/\text{sec}$ とした。

実験結果の代表例として稲田花崗岩の一軸圧縮強度を図-2 に示す。なお、図中のエラーバーは標準偏差を示している。また Case 1 における常温下の結果について、温度履歴を受けた岩石の圧縮強度 (σ) を履歴を受ける前の圧縮強度 (σ_i) で除した値を圧縮強度比 (σ/σ_i) として示したのが図-3 である。同じ履歴回数において比較すると、常温下よりも低温下の方の強度が大きい。これは、低温下では鉱物粒子が収縮硬化したためと考えられる。また、常温において Wet と Dry を比較すると Dry の方の値が大きい。これは、いくつかの要因が考えられるが、その一つはサクシオンによる影響であると考えられる。サクシオンとは岩石中の水分が表面張力や鉱物粒子の吸着力の作用によって、大気圧に対して持っている負の圧力であり、岩石の粒子相互の結合力として作用する⁴⁾。この現象は飽和度が小さい範囲で顕著であるので、Wet より Dry に対して顕著に作用したと考えられる。また、花崗岩においては応力腐食⁵⁾ (stress corrosion) の影響も一因として考えられる。応力腐食とは、圧縮応力下において潜在的亀裂の先端の局所引張応力が、岩石の主成分の Si-O 結合と水の反応を促進し、反応により結合が切断される現象である。この現象は反

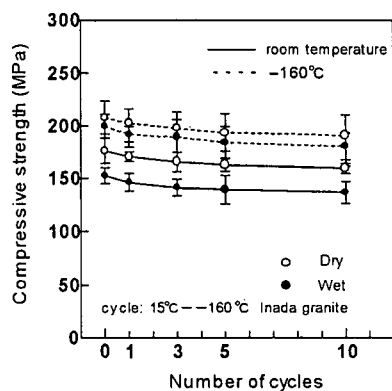


図-2 温度履歴を受けた稲田花崗岩の圧縮強度。

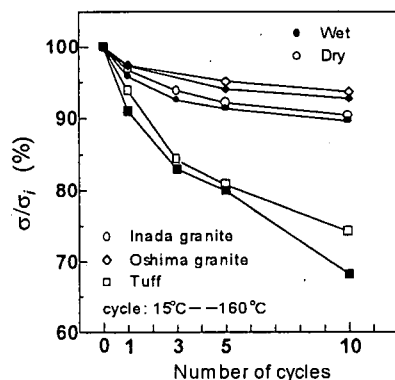


図-3 圧縮強度比と温度履歴回数の関係(常温下)。

応物質である水が多いほど発生しやすく、亀裂を進展させる速度を速めるので Wet の強度が低下したと考えられる。低温下において Wet と Dry を比較すると、花崗岩については常温の場合ほどの差はないが Wet の値の方が小さい。いずれの場合においても温度履歴回数が増加するにつれて、強度が低下している。これは、岩石の構成鉱物粒子が温度履歴を受けた際、それぞれの膨張、収縮量が異なるため、鉱物粒子間のマイクロクラックが増加、拡大したためと考えられる。

花崗岩においては温度履歴回数が増加するに伴い値が低下する割合は次第に減少している。これは履歴の温度幅が一定のため、各構成鉱物粒子の膨張、収縮量も履歴回数に関わらずほぼ一定になり、マイクロクラックの増加、拡大がある一定量以上になりにくいためであると考えられる。このことから花崗岩においては、いずれはある値に収束することがうかがえる。一例として大島花崗岩における Case3 において 50 サイクルを行った結果を図-4 に示す。20 サイクル以上では圧縮強度比が約 95% でほぼ一定であり、収束していると見なすことができる。Wet と Dry では Wet の方が若干であるが圧縮強度比の値が小さい。これは温度履歴によって間隙中の水が氷結膨張してマイクロクラックの増加、拡大を促進したものと考えられる。また、稲田花崗岩と大島花崗岩を比べると、稲田花崗岩の方が圧縮強度比の低下する割合が大きい。同じ花崗岩である両岩石において鉱物粒子間に生じるひずみの差はほとんど変わらないと考えられる。しかし、鉱物粒子の大きさの違いから、鉱物粒子間の変位は粒子の大きい稲田花崗岩の方が大きくなると考えられ、大島花崗岩より大きな応力が発生した結果、マイクロクラックがより発生した、あるいは、より大きなクラックが発生しやすくなったため強度の低下が促進されたと考えられる。凝灰岩においては、温度履歴回数の増加に伴う強度の低下が花崗岩に比べて比較的大きい。これは、凝灰岩が細粒の火山砕屑物が堆積し固結してできた軟らかい岩石であり、火成岩で全体が結晶からなる堅硬な花崗岩に比べて粒子間の結合力が小さいためであると考えられる。Wet においては空隙率が約 37% と非常に大きいため間隙中の水の影響を大きく受け、温度履歴に伴う水の氷結膨張の影響で強度低下が大きく現れたものと考えられる。

大島花崗岩および凝灰岩の各温度履歴幅における室温下の圧縮強度比を図-5(a),(b) に示す。強度低下は履歴の温度幅が大きい方が大きいことがわかる。これは、温度履歴幅が大きくなるほど各構成鉱物粒子の相対的なひずみの差が大きくなるため、マイクロクラックの増加、膨大量が増えたものと考えられる。

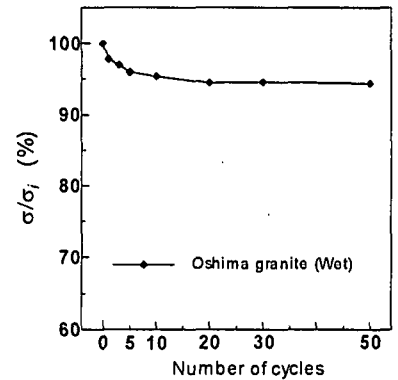
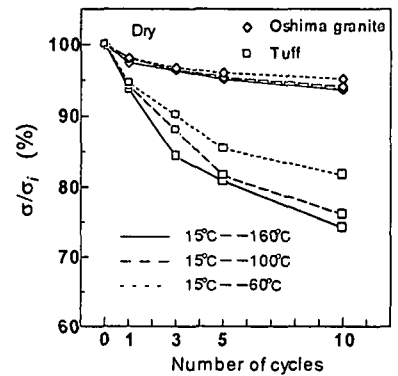
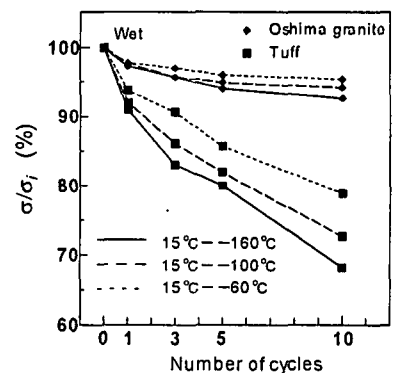


図-4 温度履歴回数 50 回までの圧縮強度(常温下)。



(a) Dry



(b) Wet

図-5 圧縮強度比と温度履歴幅の関係(常温下)。

岩石の圧裂引張強度試験の結果を前述の圧縮強度比と同様に引張強度比 (σ_t/σ_{ti}) として示したのが、図-6および図-7(a),(b)である。圧縮強度の結果とほぼ同様な傾向を示すが、いずれの場合においても温度履歴回数に伴う強度の低下の割合が、圧縮強度に比べて引張強度の方が大きくなっている。温度履歴を受けることでマイクロクラックが増加、拡大した場合、引張強度は圧縮強度よりその影響を大きく受けると考えられる。また、引張強度においても、履歴の温度幅が大きい方が値の低下の割合が大きい。

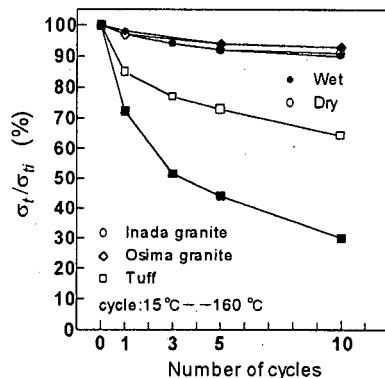
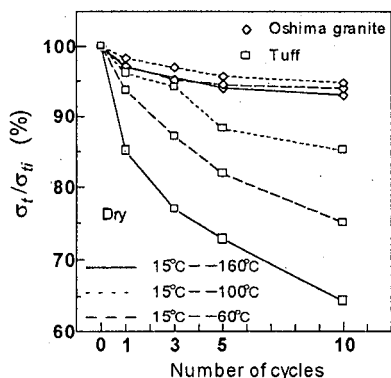
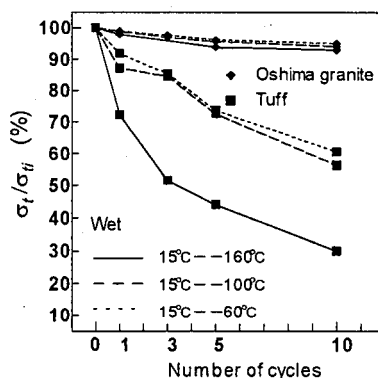


図-6 引張強度比と温度履歴回数の関係(常温下).



(a) Dry



(b) Wet

図-7 引張強度比と温度履歴幅の関係(常温下).

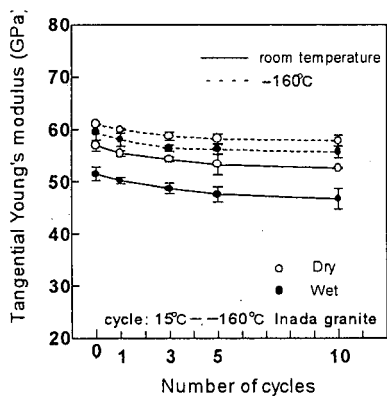


図-8 温度履歴を受けた稲田花崗岩の接線弾性係数.

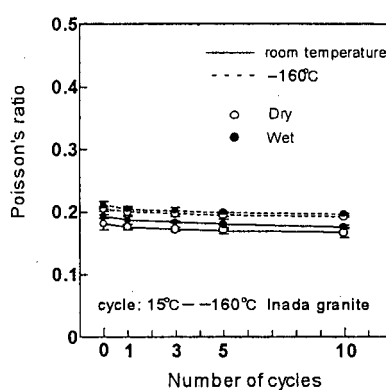


図-9 温度履歴を受けた稲田花崗岩のポアソン比.

圧縮試験の際に供試体表面に貼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%付近における岩石の接線弾性係数およびポアソン比を求めた。

稲田花崗岩の Case 1 における接線弾性係数を図-8に、ポアソン比を図-9に示す。接線弾性係数は低温下の値が Dry, Wet 共に室温下より大きくなっている。これは低温下では構成鉱物粒子が収縮し硬化したためと考えられる。また、いずれの場合も温度履歴回数が増加するのに伴い接線弾性係数の値が低下している。圧縮、引張強度の傾向と同様に、履歴回数の増加に伴うマイクロクラックの増加、拡大が影響しているためと考えられる。ポアソン比についても、温度履歴回数の増加に伴い値は低下している。

次に、供試体の寸法は $\phi 3\text{cm} \times 10\text{cm}$ とし稲田花崗岩、大島花崗岩および凝灰岩について、常温下および低温下において弾性波伝播速度の測定を行った。

各岩石の P 波伝播速度を前述の圧縮強度比と同様に、P 波伝播速度比 (V_p/V_{pi}) として図-10 および図-11(a),(b)に示す。温度履歴回数の増加とともに値が低下している。弾性波伝播速度の値が低下することは岩石が粗になっているということであり、これはマイクロクラックが増加、拡大したことを示していると考えられる。花崗岩における履歴に伴う伝播速度比が低下する割合は次第に小さくなり、次第に収束するような傾向を示している。また、稲田花崗岩、と大島花崗岩を比べると稲田花崗岩の方が低下する割合が大きくなっている。Wet と Dry を比較するとすべての場合において Wet の方が低下する割合が大きく、特に凝灰岩の Wet における低下が大きい。また、履歴温度幅が大きいほど伝播速度比が小さくなっていることがわかる。これらの傾向は、先に求めてきた圧縮強度、引張強度、接線弾性係数およびポアソン比の結果を裏付けているものと考えられる。

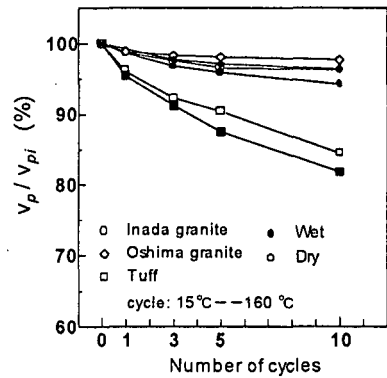
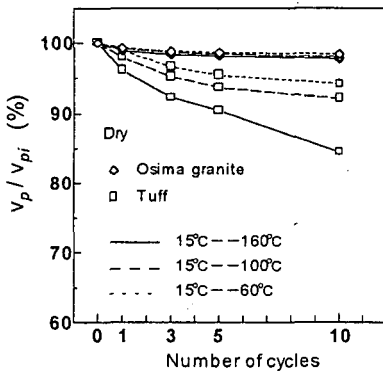
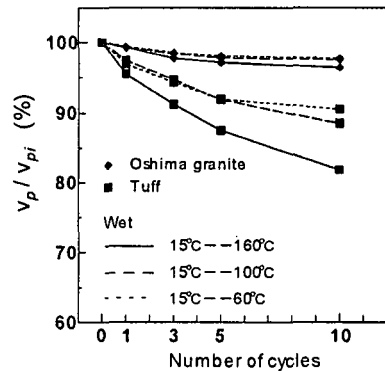


図-10 弾性波伝播速度比と温度履歴回数の関係(常温下)。



(a) Dry



(b) Wet

図-11 弾性波伝播速度比と温度履歴幅の関係(常温下)。

3. 温度履歴を受けた空洞周辺岩盤の挙動

3. 1 温度分布の解析および考察

本研究では、花崗岩の岩盤内空洞にLNGを貯蔵することを想定し、定常的に貯蔵する場合と、一時的に貯蔵を停止し、再び貯蔵を開始することで温度履歴が空洞周辺岩盤に及ぶ場合について、解析を行い比較した。ここでは稲田花崗岩の場合において、まず、空洞周辺における温度分布の経時変化を求め、得られた温度分布をもとに、空洞周辺岩盤の応力解析を行った。

空洞周辺岩盤の温度分布の経時変化を筆者らが提案している要素分割法⁹⁾により2次元問題として求めた。要素分割法では、互いに隣接する要素の熱物性が異なる場合にも適用できる。図-12示すように要素を矩形に分割した場合は、時間 $\Delta\tau$ に要素 $m-1$ から要素 m に移動する熱量 $Q_{m-1,m}$ は式(1)で与えられる。

$$Q_{m-1,m} = -\lambda_{m-1} \frac{U_{m-1,n}^{(B)} - U_{m-1,n}}{\Delta X/2} l_{m-1} \frac{1}{2} \Delta\tau - \lambda_m \frac{U_{m,n} - U_{m,n}^{(B)}}{\Delta X/2} l_m \frac{1}{2} \Delta\tau \quad (1)$$

ただし、 ΔX : 要素間隔、 λ_m : m 番目の要素の熱伝導率、 $U_{m,n}$: 時間 n における m 番目の要素の温度

$U_{m,n}^{(B)}$: 時間 n における $m-1$ 番目の要素と m 番目の要素との境界の温度

l_m : m 番目の要素の長さ ($l_m = 2\{a \sin(\theta/2) + (m-1)\Delta X \tan(\theta/2)\}$) a : 円の半径、 θ : 中心角

また、 $U_{m-1,n}^{(B)}$ と $U_{m,n}^{(B)}$ との間には式(2)の関係がある。

$$U_{m-1,n}^{(B)} = U_{m,n}^{(B)} = \frac{\lambda_{m-1} l_{m-1} U_{m-1,n} + \lambda_m l_m U_{m,n}}{\lambda_{m-1} l_{m-1} + \lambda_m l_m} \quad (2)$$

時間 $\Delta\tau$ 間に要素 m 内に貯えられる熱量は要素 m の温度上昇に費やされるから、 $\Delta\tau$ 間に要素 m から要素 $m+1$ に移動する熱量 $Q_{m,m+1}$ とすると、式(3)の関係がある。

$$Q_{m-1,m} - Q_{m,m+1} = c_m \rho_m \Delta X l_m (U_{m,n+1} - U_{m,n}) \quad (3)$$

ただし、 c_m : 要素 m の比熱、 ρ_m : 要素 m の密度、 $U_{m,n+1}$: m 番目の要素の時間 n から $\Delta\tau$ 後における温度
式(1)～式(3)より、式(4)を得る。

$$\left\{ \frac{\Delta X^2}{\kappa_m \Delta\tau} l_m - \frac{\lambda_{m-1}}{\lambda_{m-1} + \lambda_m} (l_{m-1} + l_m) - \frac{\lambda_{m+1}}{\lambda_m + \lambda_{m+1}} (l_m + l_{m+1}) \right\} U_{m,n} + \frac{\lambda_{m+1}}{\lambda_m + \lambda_{m+1}} (l_m + l_{m+1}) U_{m+1,n} + \frac{\lambda_{m-1}}{\lambda_{m-1} + \lambda_m} (l_{m-1} + l_m) U_{m-1,n} = \frac{\Delta X^2}{\kappa_m \Delta\tau} l_m U_{m,n+1} \quad (4)$$

ただし、 κ_m : m 番目の要素の熱拡散率 ($\kappa = \lambda / c\rho$)

この場合、計算精度を上げるため $\theta, \Delta X, \Delta\tau$ の値を検討しておく必要がある。なお、解析の際必要となる岩石の諸物性については、地下水により地山岩盤は湿潤状態にあるものと仮定し、別の実験⁷⁾で求めたWetの値を用いた。図-13に示すように解析の対象範囲は空洞表面から100mの位置とし、端部の温度は15℃一定とした。

まず、地山の初期温度が15℃の状態ではLNGを定常的に貯蔵する場合を想定し、これをCase Aとする。貯蔵1年後までの結果を図-14に示す。初期の時間には急激な勾配を示しており、空洞周辺にはまだ温度が及んでいないことがわかる。しかし、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温度が及んでいくことがうかがえる。

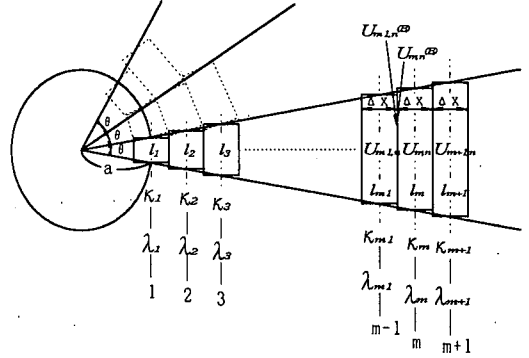


図-12 要素分割法の原理説明図。

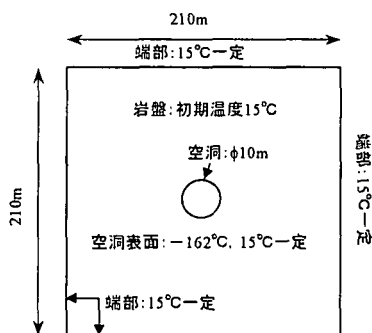


図-13 温度分布の解析モデル。

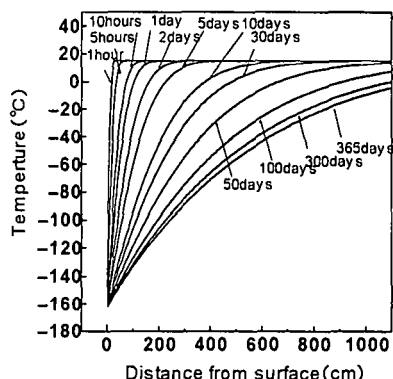
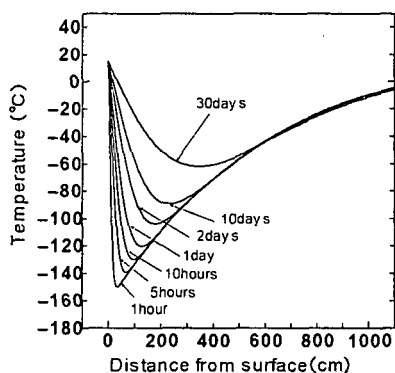
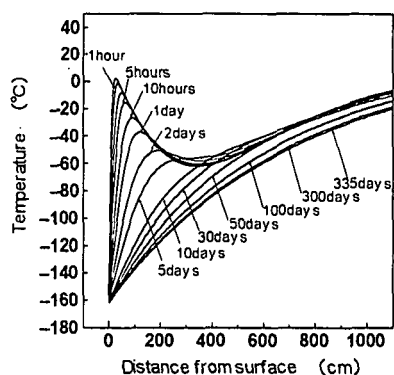


図-14 貯蔵1年後までの空洞周辺の温度分布。

次に、1年間の内1ヶ月間を整備、点検等で空洞表面が常温になるものとし、その後11ヶ月間再び貯蔵することを想定し、これをCase Bとする。ただし、最初の1年間は貯蔵状態にあるものとし、2年目から前述の条件で温度分布の経時変化を求めた。Case Bの経時変化を図-15(a),(b)に示す。(a)はLNGの貯蔵を停止し、空洞表面が低温から常温になった場合で、空洞表面が瞬間的に15°Cになるものと仮定し、この状態からの経時変化である。(b)は再びLNGを貯蔵する場合で、瞬間的に空洞表面が-162°Cになるものと仮定し、この状態からの経時変化である。貯蔵を停止した場合、空洞表面における温度は上昇し、急激な温度勾配を示すが、30日後までに温度が上昇するのは空洞表面から7m程度までであり、それより外の領域における岩盤の温度は下がり続けることがわかった。貯蔵を再び開始すると、温度分布は時間の経過に伴い、緩やかな温度分布になることがわかった。従ってCase Bにおいては空洞周辺岩盤は温度履歴を受けるが、その領域は7m程度であり、それより外の領域においては温度履歴を受けないことがわかった。



(a) 貯蔵を停止した場合



(b) 再び貯蔵した場合

図-15 温度履歴を受ける場合の空洞周辺の温度分布。

3. 2 応力分布の解析および考察

前述の温度分布をもとに、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⁸⁾を用いて応力解析を行った。亀裂解析法は、材料の引張強度を超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のとは考えるのではなく、隣接要素間の目地に亀裂が進展すると考える解析方法である。まずFEMによる弾性解析を行い、要素内に生じた応力がその要素の引張強度を超えると隣接要素間の目地を外して、再びFEMによる弾性解析を行う。これを引張による破壊がなくなるまで繰り返して亀裂の進展を表現する。解析は平面ひずみ問題として取り扱い、破壊判定はMohrの破壊包絡線説⁹⁾に従うものとした。すなわち、岩盤内に生じている最大主応力 σ_1 が引張応力で、その値が引張強度 S_t よりも大きければ、引張破壊するものとし、 σ_1 が S_t よりも小さいとき、 σ_1 と最小主応力 σ_3 を直径とする円が、Mohrの応力円包絡線と接するか交われば、せん断破壊するものとする。包絡線は S_t を頂点とし、圧縮強度 S_c と原点を直径とする円に接する2次曲線とする。境界は影響を受けないよう、離れた位置にとり、初期応力は岩盤の自重と自重の1/2の側圧がかかっているものとし、LNGを貯蔵することにより、そこに熱応力が重畳されるものとした。花崗岩の強度・変形特性については前述の実験で得られた値を用いた。今回の実験結果から花崗岩における強度・変形特性と温度の関係は、ほぼ直線的であったので、これらの値を1次式で近似して各温度帯における物性値を求めた。また、Case Bにおいては空洞周辺岩盤が空洞から7mの範囲で温度履歴を受けているため、この範囲については温度履歴を受けた場合の岩石の強度・変形特性を用いてそれぞれの温度に対応させた値を求めた。

LNG貯蔵開始から1年後までの亀裂進展の経時変化を図-16に示す。時間の経過とともに空洞周辺岩盤に放射状に亀裂が進展していることがわかる。Case AおよびCase Bにおける亀裂の進展長および凍結領域の経時変化を図-17に示す。Case Bの凍結領域はLNGの貯蔵を一時的に停止するため10年後でCase A

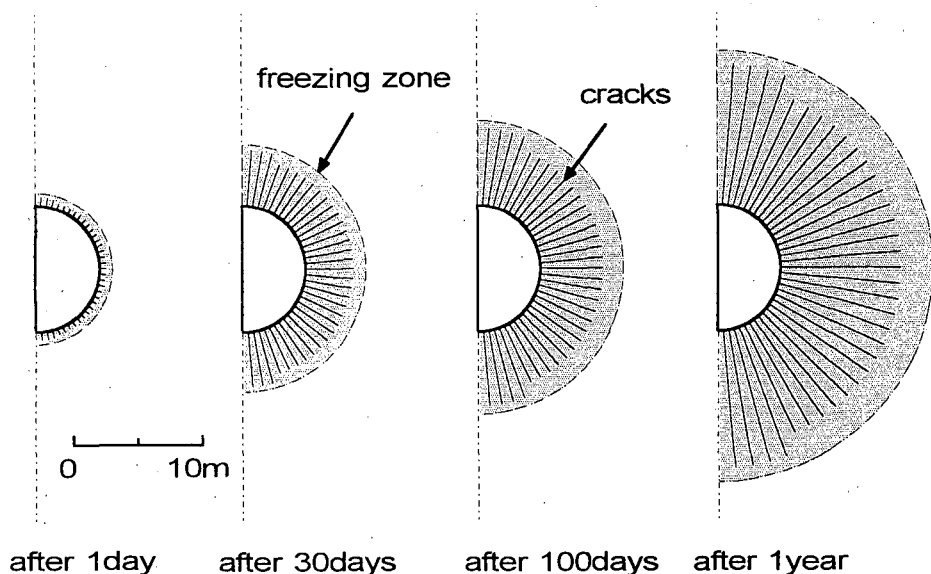


図-16 貯蔵1年後までの亀裂の進展範囲と凍結領域。

より約 1m 程度小さい。また、10 年後における亀裂の進展長は Case B の方が Case A に比べて約 1m 小さいが、凍結領域が等しいときの値で比べるとほとんど同じである。空洞周辺岩盤が温度履歴を受ける場合、履歴によって岩盤の強度が低下しても同時に弾性係数も低下するために熱応力の発生が小さくなり、結果的に亀裂の進展長が同程度になったものと考えられる。また、温度履歴を受けるのは空洞周辺から 7m の範囲であるため、これより外の領域では履歴を受けない場合と同様となり、このような結果になったと考えられる。

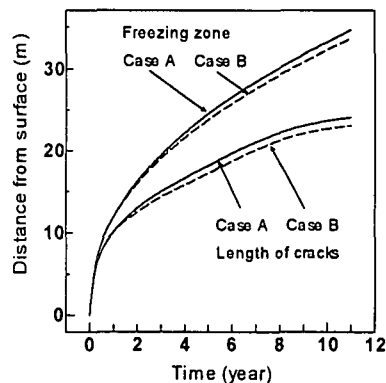


図-17 亀裂の進展範囲と凍結領域の経時変化.

4. 結 言

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) 低温の温度履歴を受けた稲田花崗岩、大島花崗岩、凝灰岩の強度は温度履歴回数の増加とともに低下し、圧縮強度よりも引張強度の方が値の低下する割合が大きいことがわかった。
- (2) 岩石の弾性係数およびポアソン比等の変形特性も低温の温度履歴回数の増加とともに値が低下することがわかった。
- (3) 花崗岩においては、履歴回数増加に伴う強度低下の割合は履歴回数の増加に伴い小さくなり、ある一定の値に収束していく傾向があることがわかった。
- (4) 花崗岩の岩盤内に設けた空洞に LNG を貯蔵した場合、空洞周辺岩盤が温度履歴を受けて強度の値が低下しても、亀裂の進展は温度履歴を受けていない場合とほとんど変わらないことがわかった。

参考文献

- 1) 例えば 稲田善紀：岩盤工学，pp.176-193，森北出版，1998。
- 2) 山口梅太郎，宮崎道雄：熱による岩石の強度の変化あるいは破壊について，日本鉱業会誌，86，986，pp.347-348，1970。
- 3) 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，28，313，pp.979-985，1979。
- 4) 例えば 木下直人，阿部透，若林成樹，石田毅：高温下岩石の力学特性に関する研究，土木学会論文集，561/Ⅲ-38，pp.151-162，1997。
- 5) 日本材料学会編：岩の力学－基礎から応用まで－，pp.108-110，丸善，1993。
- 6) 前掲 1)，pp.180-187。
- 7) 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に関する一二の知見，土木学会論文集，547/Ⅲ-36，pp.211-220，1996。
- 8) 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，103，1192，pp.365-372，1987。