

低温物質貯蔵時の岩盤空洞の熱的挙動について

ON THERMAL BEHAVIOR OF ROCK MASS AROUND OPENING AT LOW TEMPERATURE MATERIAL STORAGE

稲田善紀*・木下尚樹**

Yoshinori INADA and Naoki KINOSHITA

In general, in the case of low temperature materials storage in openings excavated in mountain, as the authors have made clear by theoretical analysis, cracks caused by tensile stress due to shrinkage of the rock mass will occur around openings. In this case, as behavior will be different by rocks, range for length of cracks and mechanism of the crack development will be also change. In this study, temperature distribution and behavior of rock mass around openings were analyzed by theoretically. That is, in the case of granite and sandstone, cracks were caused by tensile stress due to shrinkage of rock mass was founded. On the other hand, in the case of tuff, cracks were caused by shearing stress due to expansion of ice when water change to ice was founded.

Key Words: thermal behavior, opening, storage, low temperature, cracks

1. 緒 言

近年、我が国では石油代替エネルギーとして LNG および LPG の需給量が増加している。また、多様化した社会を背景として冷凍食品の需給量も増加している。したがって、今後これらの低温物質を安定供給するための貯蔵施設の増加が予想される。筆者らは土地の立体的有効利用および環境保全などを考慮した貯蔵方法として、地山岩盤内に設けた空洞に低温物質を直接貯蔵することを提案している^{1)~3)}。低温物質を地山岩盤内に直接貯蔵するとさまざまな原因で地山岩盤に亀裂が発生することがわかっている^{1)~3)}。本研究では地山の選定のための一つの指標として、極低温の LNG を貯蔵した場合の亀裂の範囲を常温下の諸物性値を用いて簡易に予測できないかという点に着目した。地山岩盤内に低温物質を貯蔵すると、花崗岩や砂岩のような空隙率の小さい岩石では熱収縮による引張応力が発生し亀裂が放射状に広がり、また、凝灰岩や泥岩のような空隙率の大きい岩石では間隙中の水の氷結膨張によって、せん断破壊が生じることがこれまでの研究で明らかとなっている⁴⁾。

本研究では、物性値と亀裂の関係を明らかにするために、これまで低温下の物性が知られていなかった空隙率 20~30% 程度の岩石について実験を行い、低温下での物性を明らかにした。つぎに実験結果を基に LNG 貯蔵時の温度分布および応力分布を解析により求め、熱的挙動を検討した。さらに、これまでの熱的挙動の解析結果と合わせ、岩石の物性と熱的挙動、亀裂の進展長を比較検討した。

* フェロー会員 工学博士 愛媛大学 工学部 環境建設工学科

** 正会員 工学修士 愛媛大学 工学部 環境建設工学科

2. 低温下における岩石の諸物性

(1) 強度・変形特性

本実験に用いた岩石は、来待砂岩(島根県産)および伊豆若草凝灰岩(静岡県産)である。力学的異方性を考慮する必要があるが、実用上無視できる範囲のもの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。これらの岩石試料を一軸圧縮強度試験用には $\phi 3 \times 6\text{cm}$ 、圧裂引張試験用には $\phi 3 \times 3\text{cm}$ にそれぞれ成形した。また、供試体は室内で1週間以上自然乾燥させた後、デシケーター内でさらに1週間乾燥させたものを蒸留水で満たしたデシケーター内で真空ポンプにより24時間脱気した状態のものを用いて実験を行った。本実験では降温速度を $2.5^\circ\text{C}/\text{min}$ 、保温時間は60分し、常温(15°C)、 -5°C 、 -50°C 、 -100°C および -160°C の温度で物性値を求めた。また、荷重速度については一軸圧縮強度試験では 600kPa/s で、圧裂引張強度試験では 49N/s で実験を行った。一軸圧縮試験時の縦ひずみと横ひずみの測定には、ひずみゲージを用いた。

来待砂岩および伊豆若草凝灰岩の一軸圧縮強度試験の結果を図-1に示す。また、来待砂岩および伊豆若草凝灰岩の圧裂引張強度試験の結果を図-2に示す。一軸圧縮強度および圧裂引張強度とも低温下になるにつれて強度が大きくなっている。その理由としては、低温下においては粒子間の結合力が鉱物粒子の収縮および硬化により増加したためと考えられる。とくに岩石に含まれている水が氷結することによって、結合力が強まり、強度が増加したと思われる。低温下になるにつれて強度増加の割合が増加している。

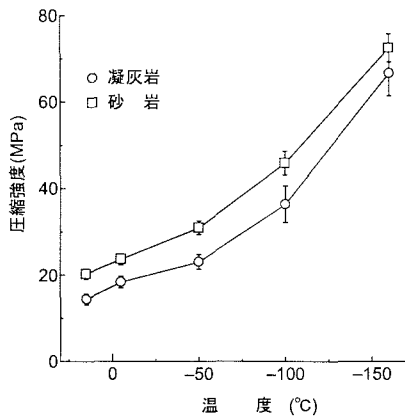


図-1 圧縮強度

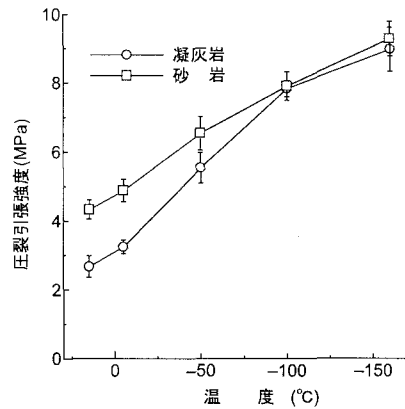


図-2 圧裂引張強度

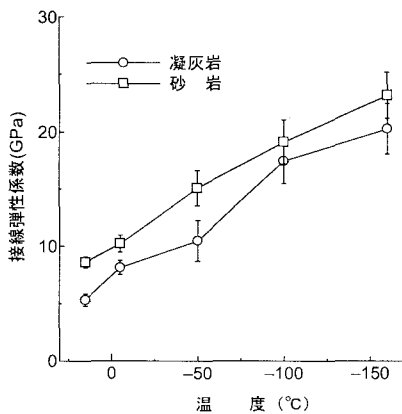


図-3 接線弾性係数

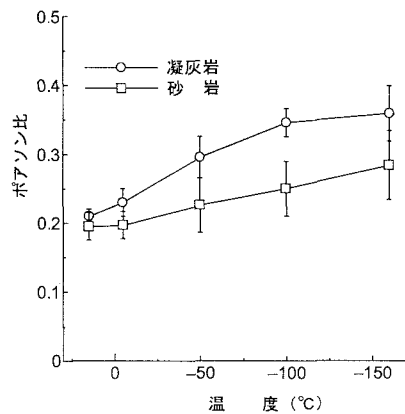


図-4 ポアソン比

つぎに、圧縮試験の際に供試体の表面に貼り付けたひずみゲージにより得られた応力 - ひずみ関係から破壊応力の 30% 付近における接線弾性係数およびポアソン比を求めた。接線弾性係数を図 - 3 に示す。接線弾性係数は低温下になるにつれて値が大きくなっている。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、間隙水が氷結したことが大きく関与していると考えられる。ポアソン比を図 - 4 に示す。ポアソン比も低温下になるにつれて少し値が大きくなる傾向が見られる。これは常温下では与えられた荷重によって供試体のマイクロクラックが広がることにより、横方向の応力が伝わりにくい、低温下では間隙水が氷結することによって、縦方向の応力を横方向にも伝えやすくなるためにポアソン比は増加したと考えられる。

(3) 線膨張係数

低温下における来待砂岩および伊豆若草凝灰岩のひずみを比較法により測定した。測定結果を図 - 5 に示す。4℃付近ではわずかに収縮し、0℃付近から急激に膨張しており、膨張してからはまた収縮していることがわかる。これは空隙率が大きく鉱物粒子間の結合力が弱いことと、0℃付近で空隙中の水が氷結膨張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。つぎに、得られたひずみから求めた低温下における割線線膨張係数を図 - 6 に示す。0℃付近では膨張することから小さな値を示し、その後は徐々に値が大きくなっている。

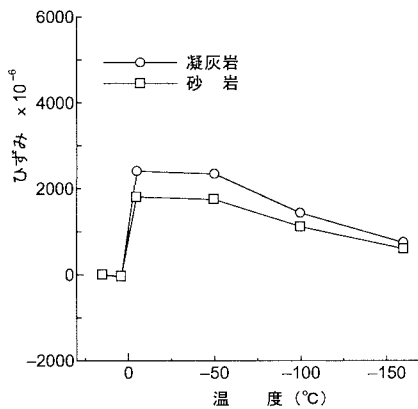


図-5 温度変化に伴うひずみ

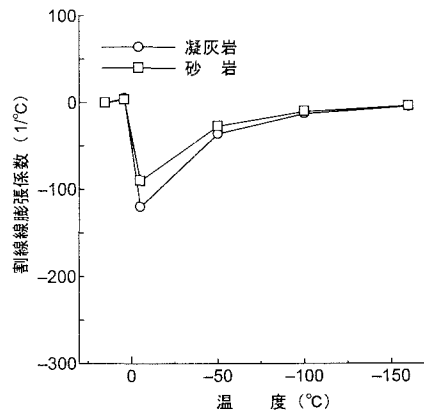


図-6 割線線膨張係数

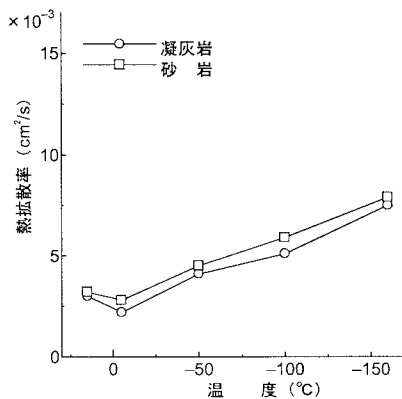


図-7 熱膨散率

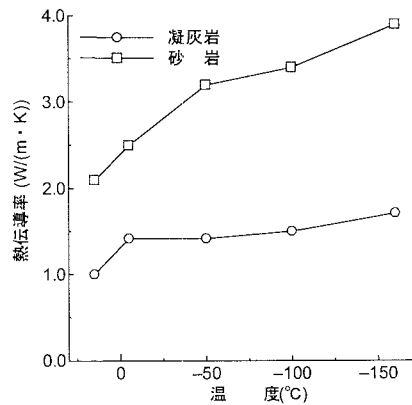


図-8 熱伝導率

(4) 熱物性

要素分割法⁵⁾に実測値を適用する方法で熱拡散率の値を測定した。本実験に使用した供試体は 10×15×25cm に成形したものをを用い、Wet の状態で実験を行った。供試体に一次元の熱伝導が得られるように、5 つの面を断熱材で覆い、残りの 1 面の表面にはアルミニウム箔を施し、熱源と接触する面から 2 カ所ずつ 5mm 間隔で 20mm まで、合計 8 本のセンサーを面 (10×15cm) に対して平行に挿入し温度変化を測定した。熱源として液体窒素を用い断熱材の槽の中に直接注ぎ込んだ。得られた時間－温度曲線を要素分割法に適用し、熱拡散率を求めた。熱拡散率を図 - 7 に示す。温度が低下するにつれて少しずつ値が上昇していることがわかる。氷の熱拡散率が低温になるにつれて値が大きくなる影響を受けているためと思われる。また、熱伝導率を図 - 8 に示す。熱伝導率も温度の低下に伴い、値が上昇することがわかった。

3. 空隙率が低温下における岩石の諸物性に及ぼす影響

ここでは、大島花崗岩(空隙率 0.8%), 大牟田砂岩(空隙率 8.12%), 来待砂岩(空隙率 20.03%), 伊豆若草凝灰岩(空隙率 28.22%), 大谷凝灰岩(空隙率 37.09%)および泥岩(空隙率 39.42%)の物性値を用いて、空隙率が諸物性に及ぼす影響を考察した。常温下および低温下における圧縮強度を比較したものを、図 - 9 に示す。空隙率の小さい花崗岩の強度が最も大きく、空隙率が大きくなるにつれて強度が小さくなっている。接線弾性係数を比較したものを、図 - 10 に示す。各岩石について比較すると、値が増加する割合は wet において、空隙率の小さい花崗岩や砂岩よりも空隙率の大きい凝灰岩や泥岩の方が大きい。これも氷の氷結が大きく関与していると思われる。また、圧縮強度と同様に空隙率が大きくなるにつれて値が小さくなっている傾向がある。つぎに、各岩石の常温下および低温下における線膨張係数を比較したものを図 - 11 に示す。低温下の wet では空隙率の小さい花崗岩や砂岩では熱収縮が起こり、空隙率の大きい凝灰岩や泥岩では氷の氷結により膨張している。また、膨張する岩石においては 0℃ 付近で大きな変化を示している。

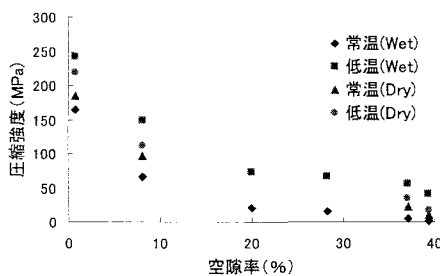


図-9 圧縮強度と空隙率の関係

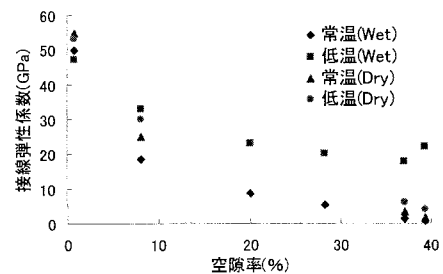


図-10 接線弾性係数と空隙率の関係

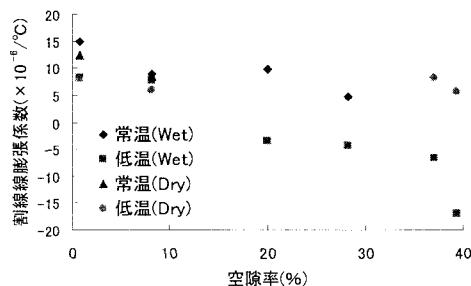


図-11 割線線膨張係数と空隙率の関係

4. 低温物質貯蔵時の岩盤に生じる亀裂に関する考察

ここでは、解析によって求められた熱的挙動および亀裂の進展長と空隙率、圧裂引張強度、接線弾性係数、割線線膨張係数、弾性波伝播速度、熱拡散率などの諸物性値との関係について考察した。解析では、土盛り100mの地山岩盤中に直径10mの円形空洞を設け、LNGを貯蔵する場合を想定した。

空隙率と亀裂の関係を図-12に示す。亀裂解析法により空隙率が0～10%の岩石では、熱収縮に起因する引張応力によって亀裂が発生している。また、空隙率が20～40%の岩石では間隙中の水の氷結膨張によるせん断破壊によって亀裂が発生している。このように各岩石の空隙率によって挙動が異なっているため、どちらの挙動により亀裂が発生するかは割線線膨張係数によって見極めることが重要だと思われる。空隙率が0.8%の岩石よりも8.12%の岩石の方が亀裂は進展しない傾向があり、空隙率の大きい岩石では、空隙率が20.03%から39.42%まで大きくなるにつれて亀裂も進展する傾向がある。この図から判断すると引張応力によって亀裂が発生するか、せん断破壊によって亀裂が発生するか、二つの境界である空隙率が10%前後の岩石で最も亀裂が進展しにくいのではないかとと思われる。今回用いた岩石ではこのような傾向が見られ、空隙率を調べることによって簡易に亀裂の進展長を推測することは可能であると考えられる。

接線弾性係数と亀裂の関係を図-13に示す。空隙率の小さい岩石では接線弾性係数の値が大きくなるにつれて、亀裂も進展する傾向がある。空隙率の大きい岩石では接線弾性係数の値が小さくなるにつれて、亀裂が進展する傾向がある。これは接線弾性係数が小さいので熱応力も小さくなるが、それよりも強度が弱いいため間隙中の水の氷結膨張によるせん断破壊により亀裂が進展するためと考えられる。引張応力またはせん断破壊によって亀裂が発生するこの二つの境界である10～20GPaでは亀裂は最も進展しにくいのではないかと考えられる。

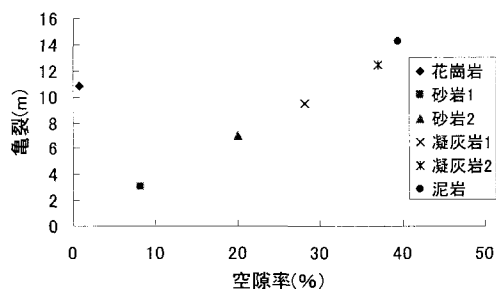


図-12 亀裂長と空隙率の関係

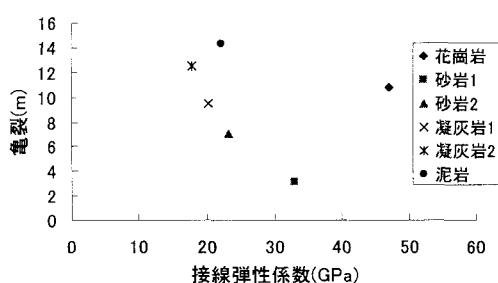


図-13 亀裂長と接線弾性係数の関係

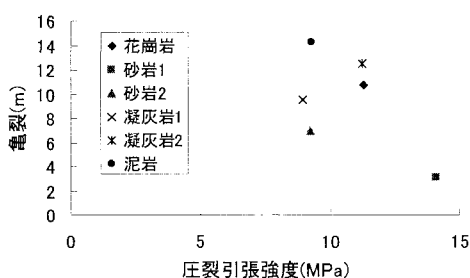


図-14 亀裂長と圧裂引張強度の関係

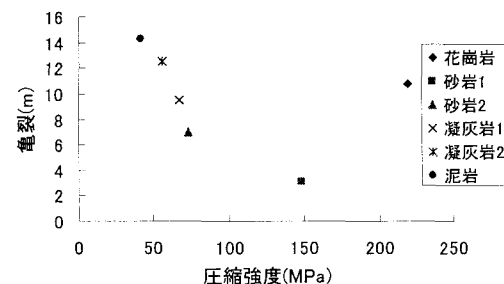


図-15 亀裂長と圧縮強度の関係

圧裂引張強度と亀裂の関係を図 - 14 に示す。常温下では空隙率の小さい岩石も大きい岩石も圧裂引張強度が大きくなるほど亀裂は進展しにくい傾向にある。岩石は低温下になると熱収縮するので圧裂引張強度が大きい岩石は亀裂があまり進展しないと考えられる。引張応力で亀裂が発生するかせん断破壊によって亀裂が発生するか見極める必要がある。圧縮強度と亀裂の関係を図 - 15 に示す。空隙率の小さい岩石では圧縮強度が大きくなるにつれて亀裂も進展する傾向がある。空隙率の大きい岩石では圧縮強度が小さくなるにつれて亀裂も進展する傾向が見られる。これは空隙率が大きいと熱応力が小さくなるがそれ以上に強度が弱いいため亀裂が進展すると考えられる。弾性波伝播速度は強度と密接な関係にあり、圧縮強度などと同様な傾向を示している。

今回の検討の結果、空隙率の小さい岩石では強度も大きくなるが、接線弾性係数も線膨張も大きくなり熱応力が上回るため亀裂が進展している。また、空隙率が大きい岩石では熱応力も小さくなるが強度もかなり弱いいため亀裂が進展するため、空隙率 10% 付近の岩石が最も亀裂が進展しにくいのではないかと推察される。

6. 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) 湿潤状態の来待砂岩および伊豆若草凝灰岩の強度や接線弾性係数は、温度の低下とともに増加することがわかった。温度変化に伴うひずみの測定の結果、0℃付近では氷の水結膨張による影響のため膨張しているが、温度の低下とともに収縮することがわかった。
- (2) 岩石における空隙率と強度や接線弾性係数の関係は、空隙率が大きくなるにつれてその値も小さくなっており、亀裂の進展長の簡易な目安として常温下では空隙率や接線弾性係数によってある程度の推測はできるのではないかと考えられる。今回の検討結果からは空隙率が 10% 前後の岩石では亀裂が進展しにくいと推測される。

参考文献

- 1) 稲田善紀：岩盤工学，pp.173-193，森北出版，1997.
- 2) 稲田善紀：地下の空間利用，pp.83-134，森北出版，1989.
- 3) 稲田善紀：地下・地下・地下！，pp.140-147，森北出版，1992.
- 4) 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，No.547/III-36，pp118-119，1996.
- 5) 前掲 1)，pp.180-187.