

低温下における岩石の力学特性に関する実験的研究

中谷篤史^{1*}・若林成樹¹・百田博宣¹・高崎英邦²

¹ 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

² 日本大学生産工学部 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

*E-mail:nakaya@shimz.co.jp

LPG や LNG など常圧・低温液化状態で岩盤空洞内に貯蔵する低温岩盤貯蔵施設が構想されており、海外では実証試験も行われている。貯蔵方式として凍結式、メンブレン式などが提案されており、貯蔵空洞の安定性の検討には周辺岩盤の熱応力を考慮する必要がある。そのため、低温下における岩盤の強度・変形特性や線膨張特性の評価が重要となる。また、これらの物性は岩種、岩盤等級や含水状態によって大きく異なる。本研究では花崗岩を対象にインタクトな供試体と弾性係数が CH 級、CL 級に相当するように加熱処理により劣化させた供試体を用いて、乾燥・飽和状態で室温から -160℃までの範囲で一軸圧縮試験、圧裂引張試験、線膨張係数測定試験を実施し、強度・変形特性や線膨張特性の温度依存性を求めた結果を報告する。強度・変形特性の温度依存性や凍結膨張量は飽和状態で間隙率の大きい場合が顕著であることが得られた。

Key Words : *mechanical property, coefficient of thermal expansion, deteriorated rock, low temperature*

1. はじめに

石油代替エネルギー (LPG, LNG, DME 等) を常圧・低温液化状態で地下岩盤内空洞に貯蔵する低温岩盤貯蔵施設が構想されている。貯蔵方式には凍結式とメンブレン式があり、凍結式は貯槽周辺岩盤を飽和させて凍結ゾーンを設けることで液密性を確保する方式である。一方、メンブレン式はメンブレンに外水圧が作用しないように排水することによって不飽和ゾーンを設けてメンブレンで液密性を確保する方式である。いずれの方式とも貯槽周辺岩盤は冷却されるため、貯槽の安定性の検討には、低温下の岩盤の熱応力の評価が必要となる。

そのため、室内試験で岩石コアを用いた各種の試験が行われ、低温下における力学特性の評価がなされてきた¹⁾。しかし、ほとんどの研究はインタクトな岩石コアによるものであり、岩石の劣化の程度を変えた実験データはほとんどない。岩盤には亀裂や変質などがあり、インタクトな岩石とは低温下の力学特性は大きく異なることが想定される。

そこで本研究では、稲田花崗岩のインタクトな供試体と、加熱処理により岩盤等級で CH 級、CL 級に相当する値に弾性係数を低下させた供試体を用いて、乾燥・飽和状態で室温から -160℃までの範囲で一軸圧縮試験、

圧裂引張試験、線膨張係数測定試験を行い、強度・変形特性の温度依存性を評価した。

2. 亀裂性岩石供試体

加熱処理によって岩石コアの劣化状態を変えた供試体を作成する。花崗岩に含まれる石英鉱物は、573℃を境に性状が変化して熱膨張によりマイクロクラックが急激に発生する。そのため、この温度をはさむように加熱処理の最高温度を、640℃、610℃、580℃、550℃の4ケースとした。また、加熱、冷却の過程で供試体の外面と内部の温度差によるマイクロクラックの発生を避けるために加熱、冷却速度は1時間あたり20℃とし、最高温度で2時間の保持を行った。加熱処理後はデシケータ内で保管した。

加熱処理後の供試体およびインタクトな供試体の有効間隙率と一軸圧縮強さの関係を図-1に示す。この図より、加熱処理温度を高くすると有効間隙率は増加し、一軸圧縮強さは低下することがわかる。

また、図-2に有効間隙率と弾性係数の関係を示す。この図より、インタクトな供試体に比べ、加熱処理を行うと弾性係数は急激に減少することがわかる。

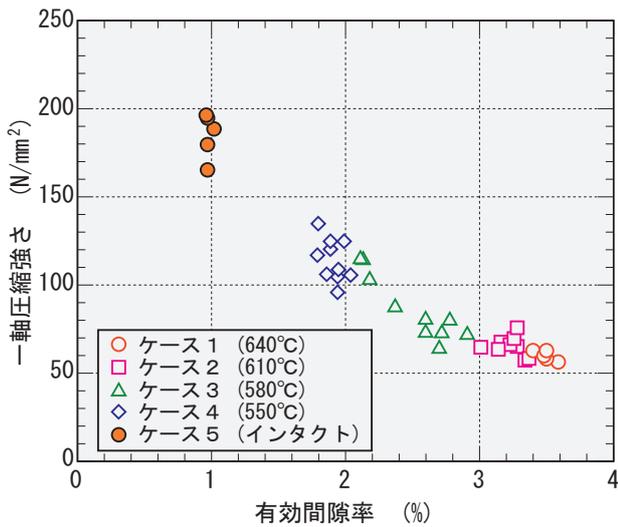


図-1 有効間隙率と一軸圧縮強さの関係

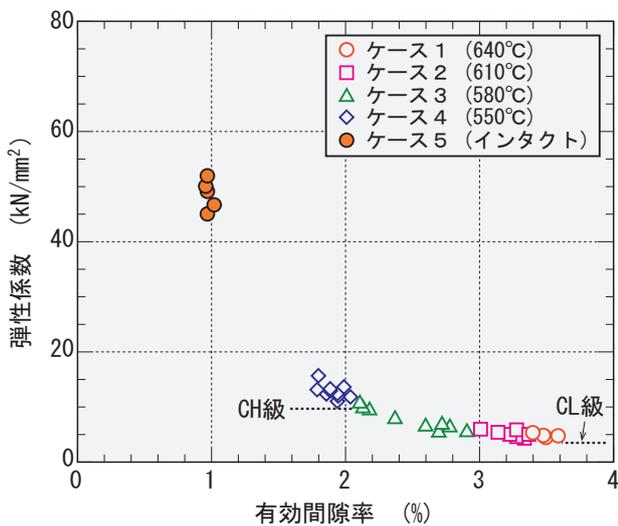


図-2 有効間隙率と弾性係数の関係

ダムサイトの平板載荷試験の接線弾性係数²⁾の試験結果からCH級の弾性係数の平均は9.7kN/mm², CM級は6.2kN/mm², CL級は3.5 kN/mm²であることを参考にCH級相当は550°C, CL級相当は640°Cで加熱処理を行った供試体を用いることにした。

3. 低温下の力学特性試験

低温下で一軸圧縮試験, 圧裂引張試験, 線膨張係数測定試験を以下のケースで行った。

岩石供試体はインタクト, CH級相当, CL級相当の3ケース, 乾燥, 飽和状態の2ケースである。

一軸圧縮試験, 圧裂引張試験は室温, -10°C, -30°C, -60°C, -110°C, -160°Cの6ケースで行った。

試験は図-3に示すような液体窒素を用いた低温槽を圧縮試験装置に組み込んで実施した。その際, 室温付近

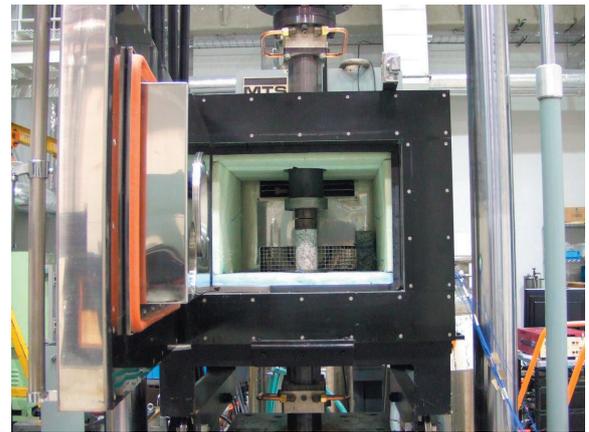


図-3 低温下一軸圧縮試験状況

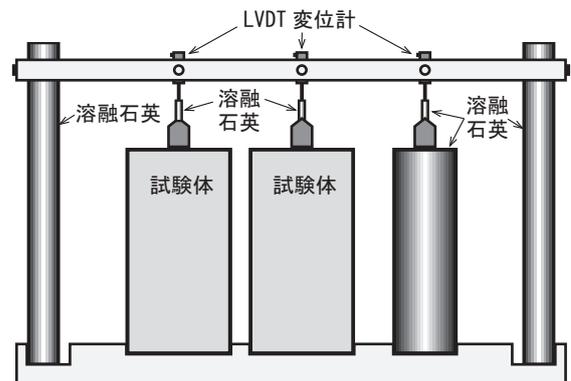


図-4 線膨張係数測定試験状況

での温度制御が精度良くできないために-10°C, -30°Cまでは温度制御の可能な冷凍庫を用いて, 1時間あたり2°Cの速度で冷却した。その後, 所定温度に冷却した低温槽に供試体を移して試験を行った。また, 温度条件-30°C~-160°Cまでは, 低温槽で1時間あたり20°Cの速度で冷却して試験を行った。

線膨張係数は図-4に示すような治具を作成し, 供試体と線膨張ひずみが既知である熔融石英棒の変形を同時にLVDTにて計測し, 石英の線膨張ひずみを差し引くことによって供試体の線膨張ひずみを求めた。治具と供試体を断熱材の箱に入れたうえで低温槽に設置し, 1時間あたり5°Cの速度でゆっくりと冷却して試験を行った。

(1) 一軸圧縮試験結果

乾燥, 飽和状態の温度と一軸圧縮強さの関係を図-5に, 室温での一軸圧縮強さを基準に正規化して求めた一軸圧縮強さ変化率の関係を図-6に示す。

これらの図より, 乾燥状態の一軸圧縮強さはインタクト, CH級相当, CL級相当ともに温度が低下してもほとんど変化しないが, 飽和状態の一軸圧縮強さは温度低

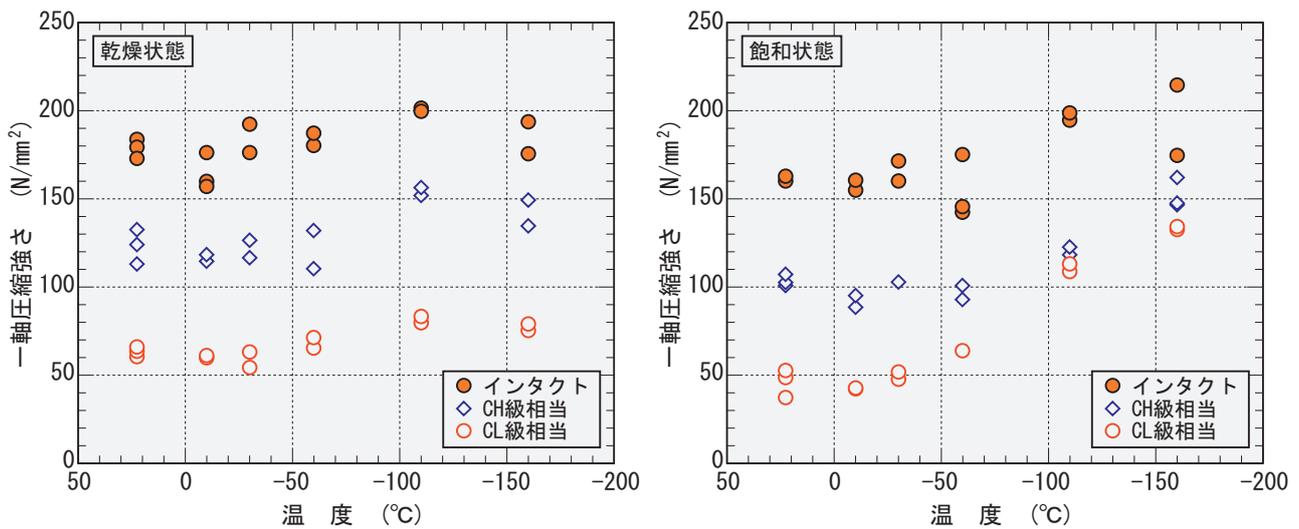


図-5 温度と一軸圧縮強さの関係

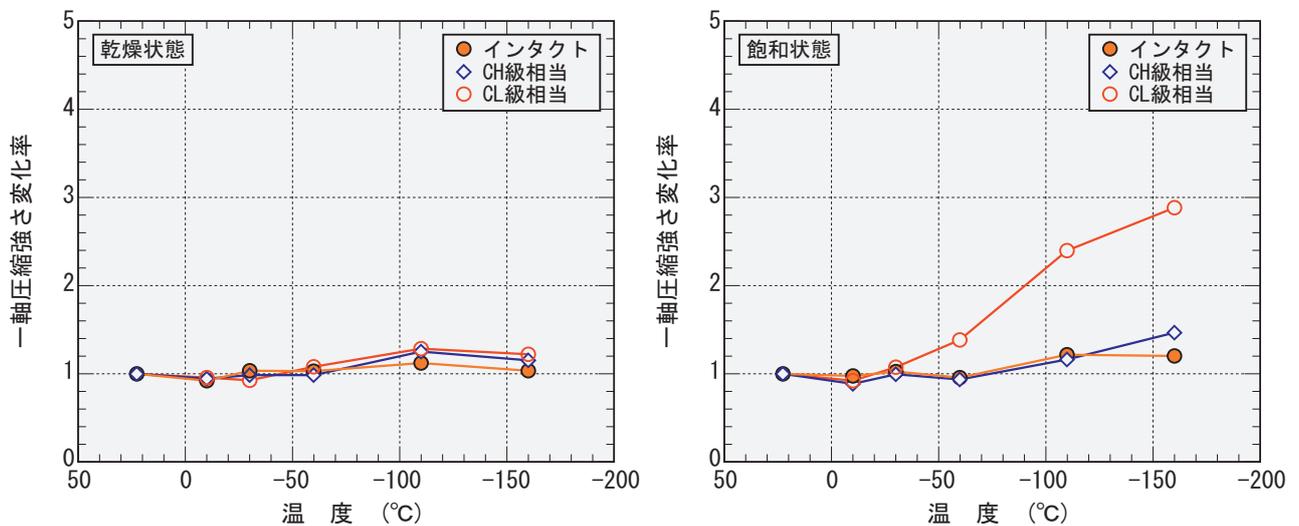


図-6 温度と一軸圧縮強さ変化率の関係

下とともに増加しているのがわかる。また、室温から -60°C 程度までは乾燥状態の方が一軸圧縮強さは大きいですが、温度がさらに低下すると逆に飽和状態の一軸圧縮強さの方が大きくなる。

同様に一軸圧縮強さ変化率では、乾燥状態では温度が低下してもほとんど変化がないが、飽和状態では -60°C 付近から顕著に強度が増加する。また、飽和状態の一軸圧縮強さ増加率はインタクトな供試体ではわずかであるが、有効間隙率の多いCL級相当では室温に比べて -160°C では約2.9倍に増加しており、有効間隙率が大きいほど一軸圧縮強さの変化率が大きくなる傾向を示すことがわかる。

次に乾燥・飽和状態の温度と弾性係数の関係を図-7に、室温での弾性係数を基準に正規化して求めた弾性係数変化率の関係を図-8に示す。なお、弾性係数の算出にあたっては、通常のピーク強度の50%での割線勾

配ではなく、ピーク強度の30%の割線勾配から求めた。これは、有効間隙率の大きいCL級相当の供試体においてピーク強度の50%までにひずみゲージにはがれものが多かったためである。

これらの図より、乾燥状態の弾性係数はインタクト、CH級相当、CL級相当ともに温度が低下してもほとんど変化しないか、わずかに低下する程度である。また、飽和状態の弾性係数は -110°C までは顕著に増加し、 -160°C ではやや低下する傾向を示す。一軸圧縮強さの結果と同様に有効間隙率の大きい方が弾性係数の増加率も大きく、常温から -110°C までインタクト供試体では約1.3倍、CL級相当の供試体では約16倍に増加していることがわかる。

(2) 圧裂引張試験結果

乾燥・飽和状態の温度と圧裂引張強さの関係を図-9

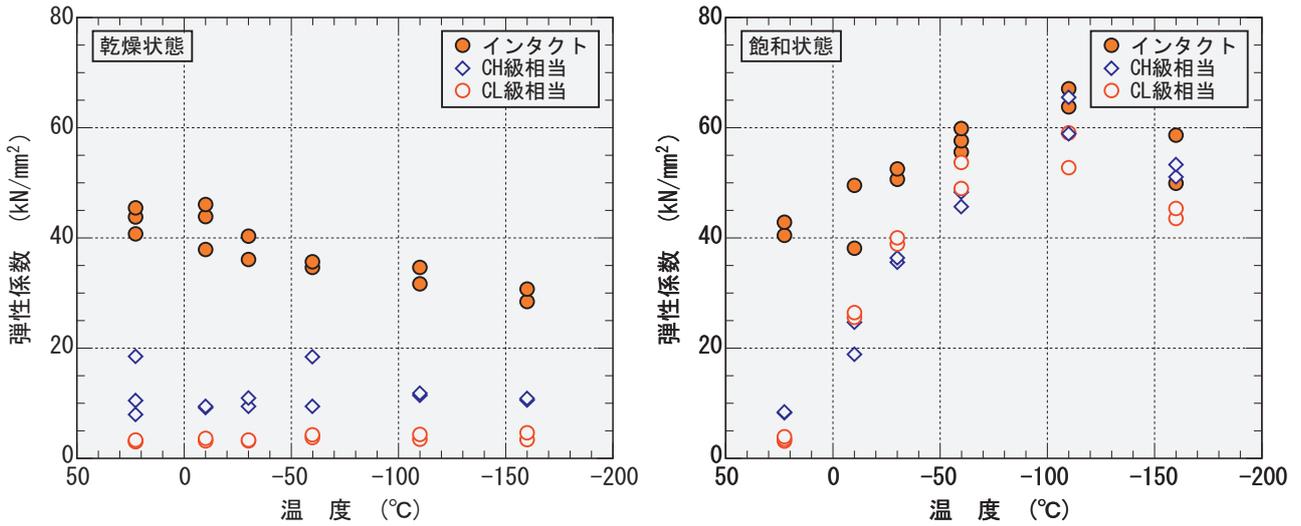


図-7 温度と弾性係数の関係

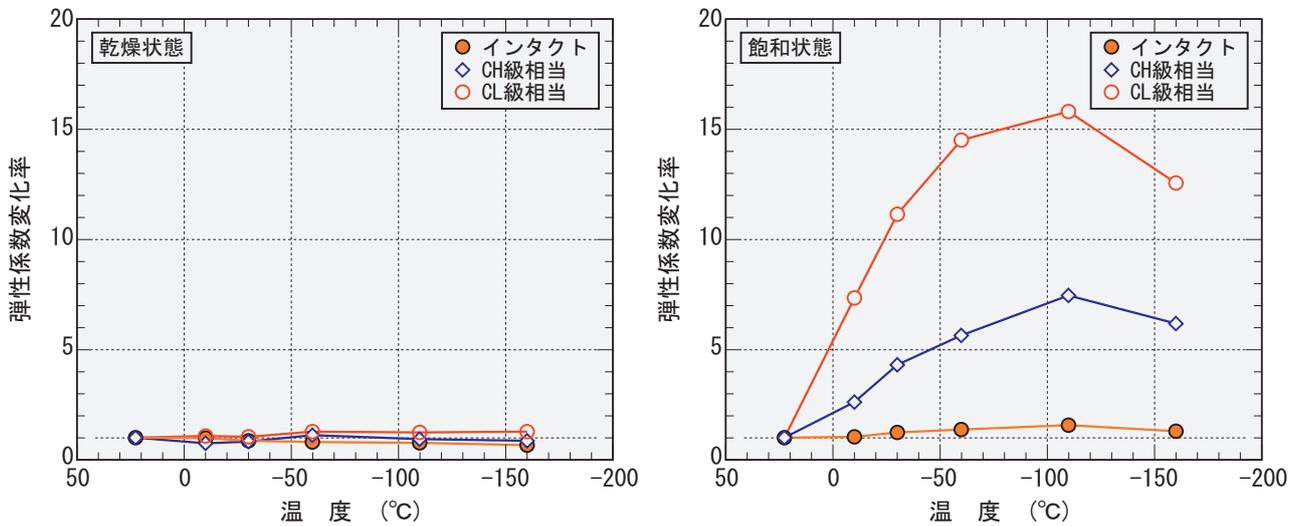


図-8 温度と弾性係数変化率の関係

に、室温での圧裂引張強さを基準に正規化して求めた圧裂引張強さ変化率の関係を図-10に示す。

一軸圧縮強さと同様に圧裂引張強さは乾燥状態では、インタクト、CH級相当、CL級相当ともに温度が低下してもほとんど変化していないことがわかる。また、飽和状態では、-110°Cまでは顕著に増加しているが、-160°Cまではほぼ一定となっていることがわかる。有効間隙率の小さいインタクト供試体では、常温から-160°Cに低下すると強度は約1.4倍に、有効間隙率の大きいCL級相当の供試体では、約4.3倍に増加しており、有効間隙率の大きいほど圧裂引張強さの変化率は大きくなる傾向を示すことがわかる。

(3) 線膨張係数測定試験結果

乾燥、飽和状態の温度と線膨張ひずみの関係を図-11に、温度と線膨張ひずみから求めた10°C毎の線膨張係

数の関係を図-12に示す。

これらの図より、乾燥状態にある岩石では温度低下とともに、線膨張ひずみは収縮方向を示す。また有効間隙率の大きい方が収縮しやすい傾向を示し、線膨張係数も収縮側に大きくなる。ばらつきはあるものの、温度低下とともに線膨張係数は小さくなる傾向を示している。

また、飽和状態にある岩石では-1°C付近から凍結膨張が生じ始め、-4.5°C付近で最大の凍結膨張を示し、有効間隙率の大きい方が凍結膨張も顕著である。凍結後の線膨張係数は-80°C付近までは一定または低下傾向にあるが、それより低温になると線膨張係数は顕著に低下する傾向を示す。

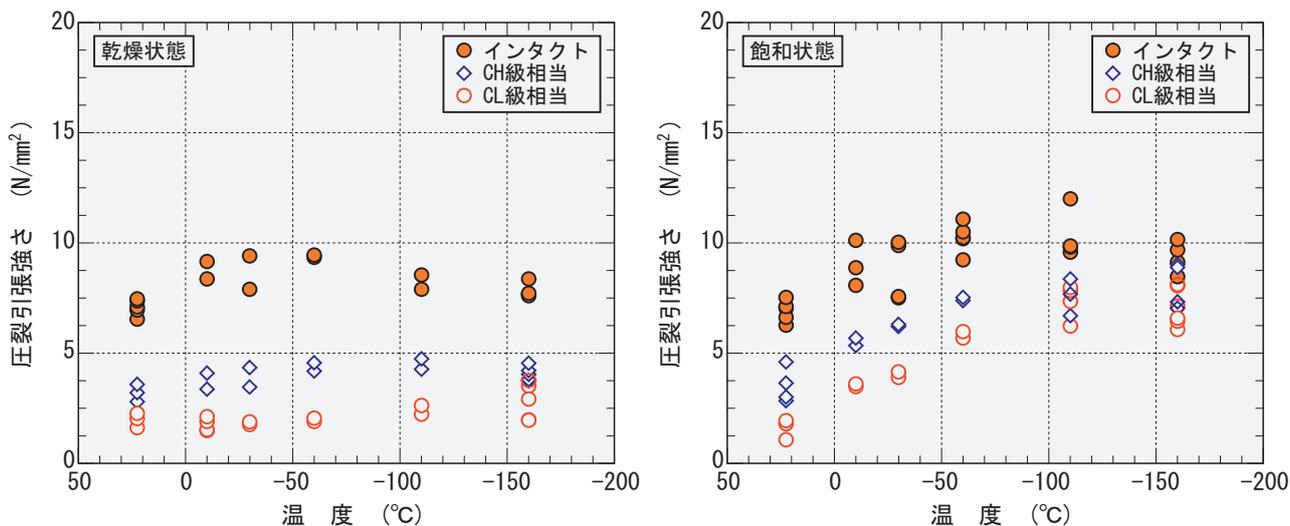


図-9 温度と圧裂引張強さの関係

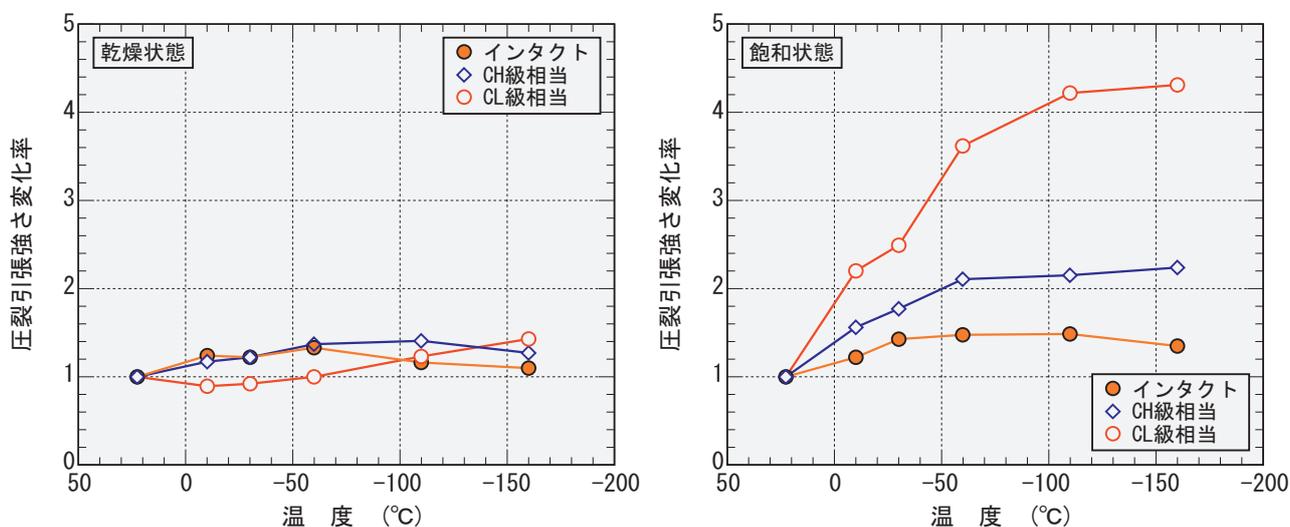


図-10 温度と圧裂引張強さ変化率の関係

4. まとめ

低温岩盤貯蔵施設の安定性の検討を行うための基礎となる岩盤の熱力学特性を把握することを目的に、実岩盤を想定した亀裂性岩石供試体を作成して、低温下での力学試験、線膨張係数測定試験を実施した。

その結果、低温下における岩石の力学特性は含水条件や劣化状況に大きく影響を受けることが得られた。これは、乾燥状態では岩石を構成する鉱物粒子の力学特性の温度依存性がわずかなため、力学特性はほとんど変化しない。一方、飽和状態では間隙水が凍結するため、力学特性は大きな温度依存性を示す。また、この傾向は、間隙率の大きな岩石ほど顕著となると考えられる。

低温下における岩石の熱膨張特性も、力学特性と同様に含水条件と劣化状況による影響が大きい。

乾燥状態の線膨張係数は、温度の低下にともなって緩やかに減少する傾向を示す。一方、飽和状態では凍結膨張が生じる。この凍結膨張ひずみは、間隙が大きな岩石ほど大きくなる傾向を示し、線膨張係数は温度低下にともない、顕著に低下する。

低温岩盤貯蔵空洞の安定性の検討を行う際には、含水条件や岩盤の劣化状況を踏まえて強度特性、変形特性、熱膨張特性の温度依存性を考慮する必要がある。

謝辞：本研究を行うにあたり、日本大学の江田慎平氏、井野崎太一氏にご協力いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

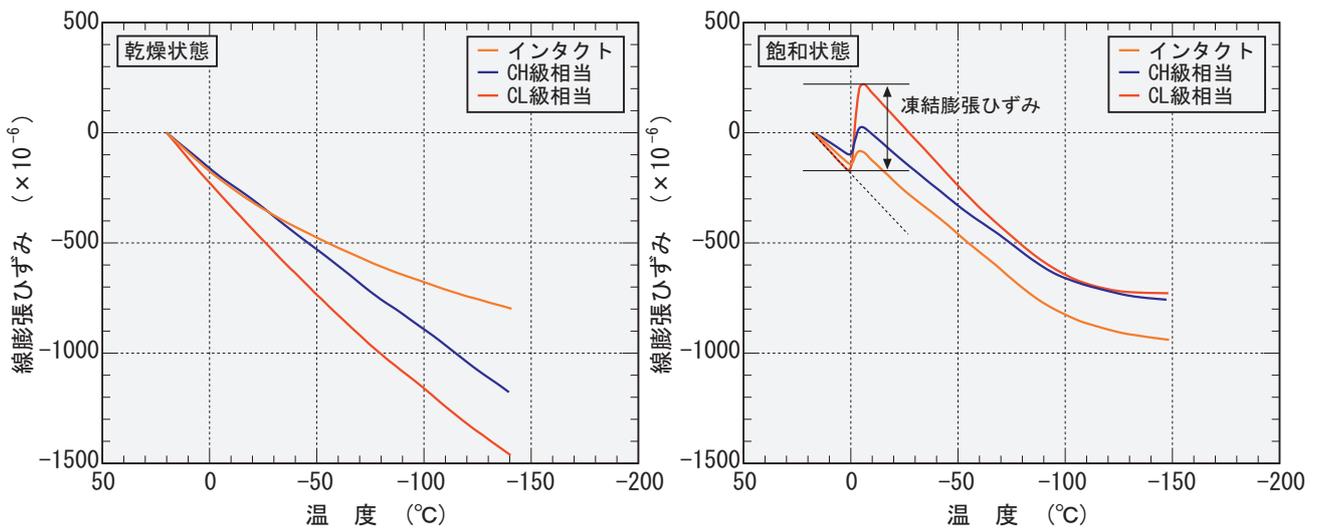


図-11 温度と線膨張ひずみの関係

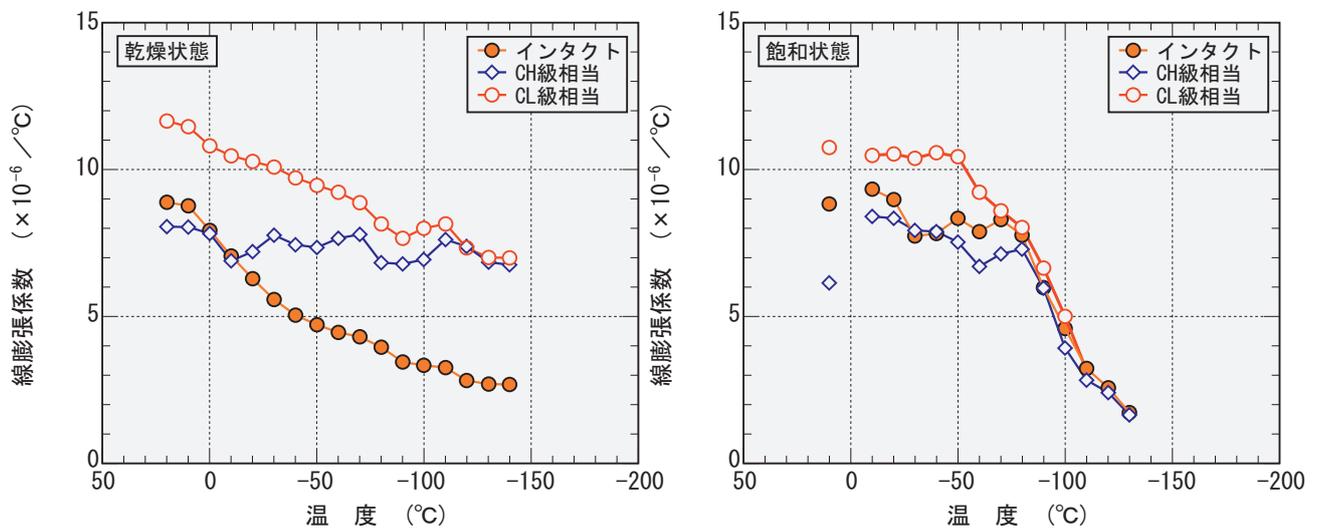


図-12 温度と線膨張係数の関係

参考文献

- 1) 土木学会：熱環境下の地下岩盤施設の開発をめざして
—熱物性と解析—, 2006.
- 2) 土木学会：原位置岩盤試験法の指針, 2000.

EXPERIMENTAL STUDY ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF GRANITE UNDER LOW TEMPERATURE

Ataushi NAKAYA, Naruki WAKABAYASHI, Hironobu MOMOTA,
and Hidekuni TAKASAKI

Rock cavern storage system of liquid LNG and LPG under low temperature is planned. Liquid tightness is satisfied by frozen zoon or lining. In-site storage test was performed in Korea. It is necessary for the estimation of cavern stability to consider the thermal stress of surrounding rock mass. In this paper, uniaxial compressive tests, Brazilian tests and thermal expansion tests were performed under dry and saturation conditions, and from room temperature to $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$. Used specimens were intact granite rock and deteriorated granite rock by heating. The mechanical properties and thermal expansion of deteriorated granite rock show high dependence on temperature and porosity under saturation.