

清水建設(株) 研究所

正員 木下 直人

公害資源研究所資源第4部

厨川 道雄

//

松永 烈

1. はじめに

LPGやLNGのような低温液化ガスを地下岩盤内に低温貯蔵しようとする場合、岩盤の低温物性を明らかにする必要がある。そこで筆者らは低温における岩石の力学的性質を明らかにするための実験を行ってきた。^{1)~3)} その結果、堅硬な岩石でも含水している場合には温度低下とともに強度や弾性係数はかなり増加することが明らかになった。同時に、岩石の低温特性は間隙率や間隙の形状によっても異なることを示唆する結果となっている。この点をより明らかにするために、種々の量のき裂を含んだ岩石を用いて、低温における力学的性質に関する実験を行なったので、その結果を報告する。

2. 実験概要

供試体としては、稲田花崗岩を電気マuffle炉内で加熱処理することによって人工的に種々の量のき裂を生じさせたものを用いた。以下これをき裂岩と記すものとする。き裂岩の有効間隙率は1%~6%の範囲となっている。

一軸圧縮および圧裂引張試験は、含水飽和および炉内乾燥した直径35mmの円柱形の供試体について、常温、 -10°C 、 -40°C 、 -70°C 、 -100°C 、 -130°C 、 -180°C の各温度で実施した。その際、冷却過程において供試体内部に熱応力が生じないように、約 $-30^{\circ}\text{C}/\text{h}$ のゆっくりとした速度で所定の温度まで冷却した。一軸圧縮試験の場合、供試体に低温用ひずみゲージを貼付して静弾性係数を求めたが、間隙率が大きくなるとひずみゲージによる測定が困難になるので、その場合にはダイヤルゲージを併用した。

3. 実験結果

3.1. 圧裂引張強度 各温度、各含水状態毎に、有効間隙率の異なる15個前後の供試体を用いて圧裂引張試験を行なった結果、各試験条件毎に圧裂引張強度 σ_t と有効間隙率 n との間にははっきりとした相関関係が認められ、

$$\log \sigma_t = an + b \quad (1)$$

で表わすことができる。そこで、各試験条件毎に最小自乗法により定数 a および b の値を求め、それらを用いて有効間隙率が1%、3%、5%の場合について圧裂引張強度の温度による変化を求めてみたのが図-1である。

含水飽和状態では、温度低下とともに引張強度は増加するが、 $-100^{\circ}\text{C} \sim -130^{\circ}\text{C}$ で極大となり、それ以下の温度では低下する。たとえば $n=1\%$ の場合、 -100°C では常温時の約1.7倍の強度に増加するが、 -180°C では常温時の1.1倍まで低下する。一方 $n=5\%$ の場合には、 -130°C における強度は常温時の約10倍と著しい増加を示すが、それ以下の温度での強度低下は比較的小さい。ある温度以下になると引張強度がほとんど変化しなくなるか又は低下する現象は堅硬な岩石の場合にもみられ、コンクリートとも共通している。また、温度低下とともに引張強度の間隙率に対する依存性は小さくなる。

乾燥状態では温度が低下しても引張強度はほとんど変化しない。

3.2. 一軸圧縮強度 一軸圧縮強度に関しても、引張強度と同様な方法により、有効間隙率が1%、3%、

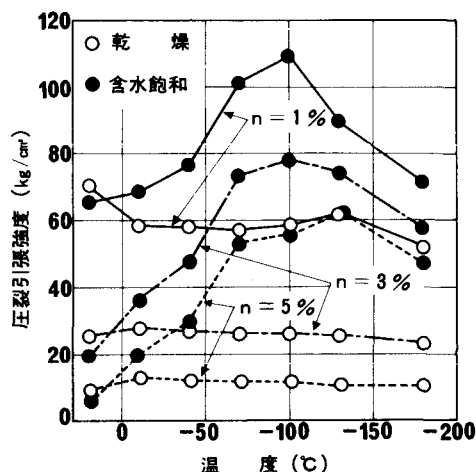


図-1 き裂岩の圧裂引張強度

5%の場合について強度と温度の関係を求めた(図-2)。

含水飽和状態では $-10^{\circ}\text{C} \sim -40^{\circ}\text{C}$ で圧縮強度が最も小さくなり、それ以下の温度では強度増加を示す。その度合は間隙率が大きいほど著しいが、 $n=5\%$ の場合でも -180°C における圧縮強度は常温時の約2.5倍であり、引張強度ほど温度による変化は大きくない。

乾燥状態でも $-10^{\circ}\text{C} \sim -70^{\circ}\text{C}$ の範囲では温度低下とともに圧縮強度が増加する。そして間隙率があまり大きくない場合には、極低温になっても乾燥した供試体の方が含水飽和した供試体よりも強度が大きい。

3.3.弾性係数 弾性係数としては、破壊応力の50%における割線弾性係数を用いた。測定数があまり多くないので、含水飽和状態の場合について測定値をそのまま図-3に示した。常温では間隙率の増加とともに弾性係数は急激に低下している。温度の低下とともに全体的に弾性係数は増加するが、特に間隙率が大きい場合その度合が著しい。たとえば間隙率が5%の場合 -100°C における弾性係数は常温時の数10倍にも達する。そして -40°C 以下では間隙率にあまり依存しなくなる。弾性係数は -100°C 付近で最大となり、それ以下の温度ではあまり変化しない。

乾燥状態の場合については図示してないが、温度が低下しても弾性係数はほとんど変化しない。

4. 考 察

実験の結果、低温におけるき裂岩の力学的性質は堅硬な岩石以上に水分の有無に大きく左右され、岩石内の間隙が水で充されている場合にはき裂の量が多いほど温度低下にともなう強度や弾性係数の増加が著しいことがわかった。特に弾性係数は極低温になるとき裂の有無にほとんど左右されなくなり、引張強度に対するき裂の影響もかなり小さくなる。こうした現象はき裂性岩盤についても共通するものと考えられる。

乾燥した岩石の力学的性質は、圧縮強度が温度により変化

するものの、全体的に含水した岩石よりも温度依存性ははるかに小さい。したがって、低温における岩石の力学的性質は主として間隙水の凍結の進行状況および生じた氷自体の力学的性質によって決定づけられるものと思われる。しかし、これらについては未知の面が多く、今後実験・検討の必要がある。

5. おわりに

低温液化ガスの地下貯蔵のための熱的解析や空洞の安定性の解析にあたっては、低温における岩石の力学的性質だけでなく熱的性質をも明らかにする必要があるが、現在実験を進めている。また、低温岩石の熱応力破壊実験も行っており、これらについては別の機会に報告する予定である。

参考文献

- 1) 木下直人：土木学会第32回年次学術講演会講演概要集，第3部，pp.360～361(1977)
- 2) 厨川道雄：西日本地下資源シンポジウム講演要旨集，pp.135～138(1978)
- 3) 松永烈他：日本鉱業会昭和54年度春季大会講演要旨集，pp.303～304(1979)

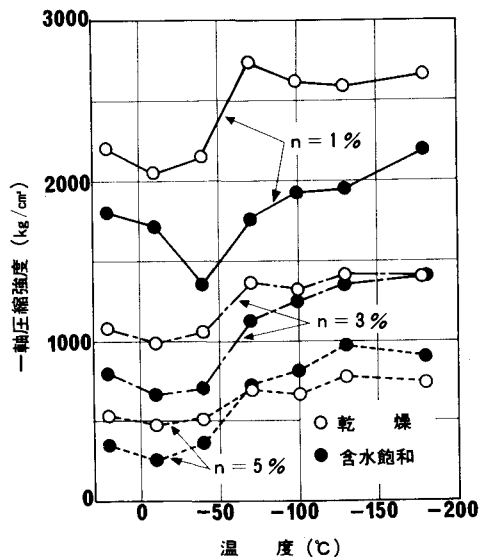


図-2 き裂岩の一軸圧縮強度

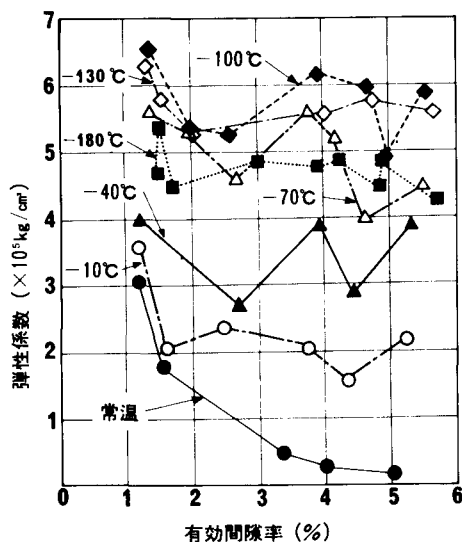


図-3 き裂岩の弾性係数