極低温下における岩石の力学特性*

稲田 善紀** 八木 則男**

Mechanical Characteristics of Rocks at Low Temperatures

by

Yoshinori INADA and Norio YAGI

(Faculty of Engineering, Ehime University, Matuyama)

In the case of underground storage of L.N.G., it is important to know the mechanical characteristics of rocks at low temperatures.

In this study, the physical and the mechanical properties of dry and wet rocks were investigated at low temperatures. An easy method of estimating the strength of rock at low temperature based on the Protod'yakov's method were examined.

From the results of microscopic observation of mineral texture in rocks after low temperature treatment, the strength characteristics of rocks at low temperatures were explained.

(Received June 9, 1980)

キー・ワード：極低温，強度，顕微鏡観察，プロトジャコフ係数

1 緒 言

液化天然ガスを地下の岩盤内空洞に貯蔵する場合，低温の影響を受けた岩石の力学特性が明らかにされる必要がある。低温・常温のサイクルが繰返された岩石の常温における力学特性については前報¹⁾で報告したとおりであるが，今回は低温下において岩石試料が乾燥状態と湿潤状態とでは力学特性にどのような影響を及ぼすかについて求めた結果について述べ，また，顕微鏡によって組織の変化を観察した結果を述べる。

さらに，極低温下における岩石強度の簡易推定法を検討した結果を報告する。

2 極低温下における岩石の強度および変形特性

2・1 実験試料および実験方法

本実験に使用した岩石は，花崗岩（愛媛県越智郡大島産および松山市伊台産）ならびに安山岩（愛媛県上浮穴郡久万町産）である。なお，松山市伊台産の花崗岩については風化の度合いに応じて3種類選んだが，強度試験用に成形できたのは1種類であった。

この場合，供試体は前報と同様圧縮試験用のものは直径 3 cm，長さ 6 cm に，また圧裂引張試験で引張強度を求めたので直径 3 cm，長さ 3 cm に成形した。成形された供試体は低温層内で冷却されたまま実験

に供されるが，実験に先立ち，(1)室内で約1週間自然乾燥させた後デシケータ内でさらに3日間乾燥させたもの，(2)この乾燥状態の試料を真空状態にしたまま蒸溜水を入れて試料を浸潤させ，さらに水中の気泡が岩石表面に付着して水が試料内に浸入するのを妨げないように真空を併用しながら24時間抜気したもの，の2種類の試料を用意した。ここでは前者を Dry，後者を Wet と呼ぶことにする。

これらの試料の物理的性質を調べた結果をとりまとめて Table I に示した。この表から，Dry の状態でも水分は完全には蒸発せず内部にある程度残留しており，風化の度合いが大きいほど蒸発していることがわかる。

また，別の実験により，24時間真空ポンプを用いた場合の飽和度は，真空ポンプを用いず水中に42日間放置したもののそれよりさらに大きいことがわかった。

2・2 実験結果および考察

Fig. 1 および Fig. 2 はそれぞれ低温下における圧縮強度および引張強度の変化をとりまとめたものである。

これらの値はいずれも試料5～6個の平均であるが，いずれの岩石も温度の低下とともに著しく強度が上昇していることがわかる。

このことは，温度低下によって鉱物粒子は収縮してゆき，鉱物粒子そのものの強度は常温のそれよりも強くなってゆくものと思われる。一方，間げき中に含まれる水は 0℃以下で氷となり，温度低下とともに氷そ

* 本報を「液化天然ガスの地下貯蔵に関する基礎的研究（第2報）」
(A Fundamental Study on Underground Storage of Liquefied,
Natural Gas, II) とする。

原稿受理 昭和55年3月19日

** 正 会 員 愛媛大学工学部 松山市文京町

Table I. Physical properties of rocks.

	Dry			Wet			Specific gravity (Dry)	
	Porosity (%)	Moisture content ratio (%)	Degree of saturation (%)	Porosity (%)	Moisture content ratio (%)	Degree of saturation (%)	True specific gravity (g/cm ³)	Bulk specific gravity (g/cm ³)
Granite I	1.99	0.16	20.67	1.99	0.54	70.86	2.673	2.625
Granite II	1.96	0.18	22.17	1.96	0.62	84.13	2.714	2.660
Granite III	3.29	0.20	15.16	3.29	1.01	80.63	2.715	2.626
Granite IV	8.60	0.33	2.76	8.60	2.93	99.95	2.703	2.051
Andesite	5.60	0.91	41.02	5.60	1.94	88.33	2.665	2.549

Fig. 1. Compressive strength at low temperature.

Fig. 2. Tensile strength at low temperature.

ものの強度も上昇していく²⁾。従って一般的には岩石の強度は温度低下とともに上昇するものと思われる。

さて、圧縮強度については Dry よりも Wet の方が強度が低い。吸水による強度低下の原因は、後述の顕微鏡観察からも認められるようにマイクロクラックの増加および拡大によるものと思われる。この拡大の原因は試料を水潤したので、水が間げきを埋める際に生じたものと思われる。このような状態で圧縮試験を行うと Dry よりも Wet の方がマイクロクラックの数がふえ、さらに湿潤状態では常温において圧縮試験の際に間げき水圧が発生するために強度としては Dry よ

りも Wet の方が低くなると思われる。一方、0℃以下では引張強度においてある温度以下では Wet の方が強くなっている。これは間げき中の水は氷となり、温度の低下とともに氷の強度も上昇してゆくが、氷の圧縮強度は 0℃で 11~20 kg/cm²、-50℃で 40~82 kg/cm² と岩石のそれに比して非常に小さい²⁾。一方、引張強度において、氷の引張強度は 0℃で 14 kg/cm²、-50℃で 25 kg/cm² と岩石のそれに比して近い²⁾ため、氷の膠結物質としての効果は岩石の引張強度に大きく影響すると思われる。

つぎに、圧縮強度と引張強度からせん断強度 (S_s) とぜい性度 (B_r) を次式によって求め、図示したものが Fig. 3 および Fig. 4 である。

$$S_s = \sqrt{S_c \cdot S_t} / 2 \quad (1)$$

$$B_r = S_c / S_t \quad (2)$$

ただし、 S_c : 圧縮強度、 S_t : 引張強度

Fig. 3 から、いずれの岩石も温度低下とともに S_s の上昇が著しいことがよくわかる。また、花崗岩の場合は Dry, Wet において常温では強度に差があるが、温度低下とともにほとんど差がないことがうかがえる。

つぎに、Fig. 4 から全体として温度低下とともにぜい性度が低くなっていく傾向があることがわかる。また、Dry よりも Wet の方がいずれも値が小さい。このことは前述のとおり氷の膠結物質としての作用によ

Fig. 3. Shearing strength at low temperature.

Fig. 4. Brittleness index at low temperature.

る引張強度の上昇によるものであると考えられる。

つぎに、圧縮強度試験における応力-ひずみ曲線から、立ち上がり付近、破壊応力の30%付近、同70%付近の接線弾性係数を求めたが、それらを図示したものが Fig.5~7 である。立ち上がり付近についてはばらつきが大きいが全体としては温度低下とともに弾性係数が上昇していく傾向があり、このことは Fig.1 で述べたように温度低下とともに圧縮強度が上昇してゆ

Fig. 5. Tangential Young's modulus at low temperature (at initiation of compressive stress).

Fig. 6. Tangential Young's modulus at low temperature (at 30% of fracture stress).

Fig. 7. Tangential Young's modulus at low temperature (at 70% of fracture stress).

くことと関連があるものと思われる。すなわち、圧縮応力が初期の段階では同じ応力に対してひずみにくくなる傾向にあるといえる。

さて、30%、70%においてはばらつきはあるが全体としてはほとんど温度低下による値の差はなく、このことは Fig.1 にみられるように温度低下とともに強度は上昇しているの、それぞれの強度に対する30%、70%付近の応力は当然異なるが、その応力に対する弾性

Fig. 8. Poisson's ratio at low temperature (at 30% of fracture stress).

Fig. 9. Poisson's ratio at low temperature (at 70% of fracture stress).

的挙動が同じであることを意味している。

つぎに、破壊応力の30%付近および70%付近のポアソン比を求めたものが Fig. 8 および Fig. 9 である。

両図からは全体として温度低下とともにポアソン比が低下していく様子がうかがえる。これは冷却温度とともに鉱物粒子の収縮による隣接鉱物粒子間のマイクロクラックの増加から説明される。後述の顕微鏡観察結果からも温度が低いほどマイクロクラックも大きい。したがって圧縮試験の際には軸方向にまずクラックを閉鎖させるためポアソン比としては温度とともに低下してゆくものと思われる。

3 極低温の影響を受けた岩石の組織の変化

2・1 節で述べた方法にて処理された試料をさらに各温度において冷却し、これらの試料より顕微鏡用薄片を作製し、偏光顕微鏡にて観察したが、それらの結果をとりまとめたものが Fig. 10~17 である。

Fig. 10, 12, 14, 16 はそれぞれ Dry の試料についてのものであり、Fig. 11, 13, 15, 17 は Wet のそれである。

常温においてはいずれも Dry よりも Wet の方のマイクロクラックが大きい。このことは 2・2 節で述べたとおり、Wet の試料を作成する段階でできたものであると思われる。また、全体として温度低下とともにマイクロクラックが成長している。このことは構成鉱物粒子のそれぞれの収縮量および常温にもどしたときの膨張量が異なり、また温度低下とともにそれらの量も大きくなるので、マイクロクラックも温度低下とともに大きくなってゆくものと考えられる。

Fig. 10. Microphotograph of Granite I after having been at low temperature (Dry).

Fig. 11. Microphotograph of Granite I after having been at low temperature (Wet).

Fig. 12. Microphotograph of Granite II after having been at low temperature (Dry).

また、それぞれの温度において Dry よりも Wet の方がマイクロクラックが大きい。このことは、もともと常温の状態において水の作用により Wet の方がマイクロクラックを Dry よりも大きくしているうえ、前述のように鉱物粒子の収縮・膨張量の差異によるマイクロクラックのほか、0℃で水が氷になったときの

Fig. 13. Microphotograph of Granite II after having been at low temperature (Wet).

Fig. 14. Microphotograph of Granite III after having been at low temperature (Dry).

体積膨張によるマイクロクラックの助長によるものと考えられる。

また、Fig. 10, 12, 14 および Fig. 11, 13, 15 を比較してわかるように、花崗岩が風化するにつれてそれぞれの温度低下によるマイクロクラックが大きくな

昭和55年12月

Fig. 15. Microphotograph of Granite III after having been at low temperature (Wet).

Fig. 16. Microphotograph of Andesite after having been at low temperature (Dry).

っていることがうかがえる。以上のことは、前述の2・2節における結果を裏付けているものと考えられる。

4 極低温下における岩石強度の簡易推定法

4・1 実験装置および実験方法

実験装置および方法はすべてプロトジャコフの装

Fig. 17. Microphotograph of Andesite after having been at low temperature (Wet).

置および方法によっている。³⁾ プロトジャコノフ係数は次式で与えられる。

$$f = 20 \cdot n / l \quad (3)$$

ただし, f : プロトジャコノフ係数

n : 落下回数

l : メスシリンダーの岩粉の高さ

4・2 実験結果および考察

岩石は破壊によってある程度粉状化すると目の開き 0.5 mm の篩を通過する岩粉の体積の増加は, 錘の落下によるエネルギーが 2 次破碎に費やされる結果, 次第に微小となり, (3) 式から明らかなように l よりも n の方が大きく f に作用してくる。 f が最小になる回数は岩石によって異り, 特有のものとなるが一例を Fig. 18 に示した。この結果では花崗岩は $n=15$ で, また

Fig. 18. Relation between Protod'yakonov's modulus and number of dropping weight (at normal temperature, Dry).

安山岩は $n=18$ で最も小さい値を示している。

同じ岩石であっても低温の影響を受けると岩石の強度は変化するので, 温度によって f を最小にする n も当然変化する。いま, 最小の f と温度低下との関係をとりとめたものが Fig. 19 である。

温度低下とともに強度が上昇してゆくことはすでに 2・1 節で述べたとおりであるが, f もまた温度低下とともに上昇し, 強度と関連性をもっていることがわかる。しかし, 常温における強度と f とを比較してもわかるように, 必ずしも f は強度の順になっているわけではなく, f になって強度を推定するためにはいま無視されている n との関連づけも必要となってくる。

さて, いま花崗岩について $f/\sqrt{n}$ と各温度との関係を示したものが Fig. 20 である。Dry と Wet とを別別に考えれば, 2・1 節で述べた強度の順は Fig. 20 に

Fig. 19. Relation between Protod'yakonov's modulus and cooling temperature.

Fig. 20. Relation between $f/\sqrt{n}$ and cooling temperature.

Table II. $\bar{K}_c, \bar{K}_t$.

	$\bar{K}_c$	Standard deviation S	$S/\bar{K}_c$ (%)	$\bar{K}_t$	Standard deviation S	$S/\bar{K}_t$ (%)
Granite I (Dry)	3.74	0.05	1.25	0.86	0.02	2.33
Granite I (Wet)	3.25	0.13	3.92	0.81	0.03	3.82
Granite II (Dry)	3.86	0.04	1.05	0.99	0.02	2.03
Granite II (Wet)	3.25	0.17	5.35	0.91	0.01	0.76

おける順と一致する。

つぎに、強度と $f\sqrt{n}$ との関係は、今回の実験結果から花崗岩については次式で表すことができる。

$$\sqrt{S_c} = \bar{K}_c \cdot f\sqrt{n} \quad (4)$$

$$\sqrt{S_t} = \bar{K}_t \cdot f\sqrt{n} \quad (5)$$

ただし、 S_c : 圧縮強度、 S_t : 引張強度

f : プロトジャコノフ係数

n : f を最小にする錘の落下回数

$\bar{K}_c, \bar{K}_t$: 係数

ここで各岩石における $\bar{K}_c$ および $\bar{K}_t$ を求めた結果を Table II に示した。

一方、2・1 節で述べた花崗岩の強度は、 -160°C までは近似的に次式で表すことができる。

$$S_0 = 0.025T^2 - T + A \quad (6)$$

$$S_t(\text{Dry}) = B \exp\{-1.2 \times 10^{-3}(T+200)\} \quad (7)$$

$$S_t(\text{Wet}) = C \exp\{-3.1 \times 10^{-3}(T+200)\} \quad (8)$$

ただし、 S_c : 圧縮強度、 S_t : 引張強度

T : 温度、 A, B, C : 定数

以上のことから、花崗岩については常温における S_0 または S_t を求めておけば(6)~(8)式により A, B, C が決定されるから、各温度における S_c および S_t を簡単に推定することができる。ただし、この場合 -160°C で最大14.6%の強度誤差がでる。

一方、常温における $S_c, S_t, f\sqrt{n}$ を知って(4), (5)式から $\bar{K}_c$ および $\bar{K}_t$ を決定し、各温度における $f\sqrt{n}$ を求めることによって S_c および S_t を推定する方法が考えられる。

この方法は、前述の方法と比較してプロトジャコノフ試験によって $f\sqrt{n}$ を各温度で求めなければならない等の手間がかかる欠点はあるが、圧縮強度で最大10%、引張強度で7%程度の誤差であり、また花崗岩の産地や風化の程度によって実際の強度が(6), (7), (8)式

とは異ってくる場合も考えられるので、単に(6), (7), (8)式のみから強度を推定するよりは、無難であると考えられる。

今回は花崗岩についてのみ強度の簡易推定法を述べたが、他の岩石についても同様の手法を用いることができるものと思われる。

5 結 言

今回は極低温下において岩石が乾燥状態と湿潤状態とでは力学特性にどのような影響を与えるかを実験によって求めた結果ならびに顕微鏡によって組織の変化を観察した結果を述べた。さらに、極低温下における岩石強度の簡易推定法について検討した結果を述べた。

前回および今回の結果を比較して考えると、一般に岩石は温度低下とともに強度は上昇するが、逆に常温にもどした場合には低温の影響を受けた岩石ほど強度が低下している。したがって空洞の安全設計を行うためには、これらの特性を充分ふまえたうえで設計が必要があると思われる。

本研究の遂行に際し、愛媛大学工学部海洋工学教室技官二神治氏、西田敏憲、飯田英喜両君の協力を得たことをここに記し厚く感謝する。なお、本研究は昭和54年度の科学研究費補助金の援助をいただいたものであることをここに付記する。

(昭和55年5月22日 土木学会中・四国支部学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 稲田善紀, 八木則男, 材料, **28**, 979 (1979).
- 2) Butkovich, T. R., Research Paper 11, U.S. Army, p.1 (1954).
- 3) たとえば, 山口梅太郎, 西松裕一, “岩石力学入門”, p. 153 (1977) 東京大学出版会