★★ 論文・報告 ★★

552.1:53-622.02

岩石の圧縮ならびに引張強さにおよぼす

含水率、温度の影響*

正 会 員 堀 部 富 男**

Influences of Water Content and Temperature on Compressive and Tensile Strengths of Rocks

Tomio HORIBE

In this study the author used the specimens of rock samples brought from the Joban Colliery, namely Goyasu and Asagai Sandstones, and examined the items mentioned on the title.

Then the main results were as follows.

- 1) Both strengths were lowered with the increment of the water content and existed the exponential relation between them.
- 2) As the temperature of specimen was lowered, for example at -100°C , the wet sample showed the excessive increase of strengths, but the dry sample didn't so.

1. ま え が き

坑内で採取された岩石を整形して、その強さ、たとえば圧縮強さ、引張強さを求めた事例は枚挙にいとまがないが、それらの実験条件の多くは常温下であり、また乾燥下である。これらの条件が変つた場合に、それが強さにいかなる影響をもたらすかをしらべるのが本研究の目的である。因みに乾湿による影響については従来でも幾らか研究されており、たとえば Stöcke¹⁾ は砂岩、頁岩試料において、湿潤試料の圧縮強さは乾燥試料のそれに比べて約半減する結果を掲げている。また鈴木博士²⁾ は砂岩におけるヤング率と含水率との関係をしらべられており、その結果は含水率が指数曲線的にヤング率を遞減せしめるとしている。ここで問題になるのは湿潤試料を作成する養生方法で、岩石試料の如何によつては単に水中に浸漬する方法の採り得ないものもある。すなわち常磐炭鉱産のほとんどの夾炭層岩石では、水中に放置すれば、膨潤、亀裂、形崩れのために試料としての用をなさない。著者はかかる岩石試料に対する養生方法として、密閉容器内における薬品の過飽和水溶液の有する雰囲気中に放置する方法を選びその目的を達した。岩石の強さと温度との関係は凍結法に関連せしめるため、特に低温における実験を行つたのであるが、従来これについては特記する研究がない。

2. 圧縮、引張強さと温度との関係

本項に使用した岩石は常磐炭鉱神山坑新斜坑より採取(昭28.7)した五安砂岩で、これを $70\text{mm}\phi \times 70\text{mm}$ の円嚢に整形して供試体とし、乾湿両状態における強さと温度特に低温度との関係を求めた。

(イ) 試料の乾湿養生

ここにおける乾燥試料の作成は次のとおり。すなわち、試料を $105\sim 110^{\circ}\text{C}$ の空気浴槽中で6時間乾燥し、次いでこれを真空デシケータに入れて6時間真空ポンプを運転し、以後そのまま該デシケータ中に放置しておく。これを翌日再び上記のように乾燥、真空吸引、真空放置を繰返す。かくすること7日にしてこれを乾燥試料とした。一方湿潤試料はデシケータ中に CuSO_4 の過飽和水溶液を入れ、これの有する雰囲気中にて吸湿せしめ、養生日数を20日にとつた。五安砂岩は常磐産岩石の中でも特に軟弱で、それ以上の日数をとれば取扱中に整形を損うおそれがある。

第1図は乾燥経過を試料 GD2-1, GD2-2 および GW 2-1 について示したものである。乾燥の方は初め急激な重量減をきたすが、後は鋸歯状の経過をたどる。これは空気浴槽はよく乾燥せしめるが、真空デシケータは乾燥をそれ以上に進行せしめないで、むしろ吸湿の傾向を有することを示すものである。しかして最初の1日目と後の7日目とではほとんど重量減に差がない。乾燥による重量減は試料の昇初条件差もあり、 $4.55\sim 5.28\%$ の範

* 昭和32年2月6日受理

** 工博 東北大学教授 鉱山工学教室

第1図 五安砂岩試料の乾燥ならびに湿潤経過

囲にあつた。一方湿潤の方は緩い傾斜をもつて重量漸増し、23日をもつて1.06%の増加を示した。

整形試料は大きさをもっているのて、中心部まで一様に乾湿養生が行われるか否か疑念がある。それで参考のためにこの岩石を-65meshに砕き、粉末試料について乾湿養生を行つた。すなわち、まず $\text{CuSO}_4\text{aq. sat.}$ の雰囲気中で重量増を見ると20日目で1.80%になり、これを直ちに空気浴槽中で3時間乾燥して7.30%の重量減になつた。したがつて最初の状態から換算すると5.50%の

第2図 圧縮強さと温度との関係(五安砂岩)

重量減である。

このように供試体は大きさをもっているだけに、粉末試料ほどには乾湿差が大きくなる。本実験における五安砂岩試料の乾湿における含水率の差は5.5~6.3%である。

(ロ) 試料の冷却ならびに温度規定

本研究における強さに対する温度の影響は特に低温度におけるものであるから、試料を冷却しなければならない。冷媒として液体窒素を選び、その冷却装置は既報³⁾のとおりである。また試料の温度規定法は別報⁴⁾に則つたもので、ここでは省略する。

(ハ) 実験結果

(i) 圧縮強さ：—第2図は実験結

果を示した図で、試料温度は、乾燥試料については、+18°C、+5°C、-21°C、-60°C、-103°C、-143°Cにとり、湿潤試料については、+18°C、-21°C、-55°C、-102°C、-144°Cにとつている。それに対して圧縮強さ(σ_c)の平均値は前者については、それぞれ51kg/cm²、51kg/cm²、46kg/cm²、57kg/cm²、67kg/cm²、63kg/cm²であり、後者については、それぞれ18kg/cm²、38kg/cm²、90kg/cm²、163kg/cm²、187kg/cm²となつた。

これで明らかなように、乾燥試料では常温に比べて低温においてはわずかに圧縮強さを増すような傾向はあるが大したことはない。一方湿潤試料では低温度とともに強さが急激に増大する。しかも湿潤試料は常温においては乾燥試料の約1/3に過ぎない値をとるにもかかわらず、低温度たとえば-100°C付近では逆に3倍近い値を示した。

以上の実験によつて、本試料のように軟弱な岩石にあつては、岩石を構成する粒子間孔隙を充てんする水分の凍結による水の低温度における強さの増大が試料の圧縮強さに著しい影響を与えることがわかる。

また本実験における破壊は試料を構成する粒子自身でおこるよりも、多くはそれのバウンダリの噛み合いがすべり、あるいは外れることによつておこると推測することができよう。

(ii) 引張強さ：—圧裂試験によつて算出した五安砂岩試料の引張強さ(σ_t)は次の第1表のとおりで、この場合も温度が低いほどその値が大になつてゐる。

第1表

試料状態	温度	引張強さ	備考
乾燥	+5°C	4.7kg/cm ²	3個平均
湿潤	-21°C	3.2kg/cm ²	〃
〃	-144°C	36.1kg/cm ²	〃

なお湿潤試料の常温における引張強さは測定不能の程度に小さい。

3. 圧縮, 引張強さと含水率との関係

前項の強さと温度との関係においても触れたように, 試料の含水率の如何が強さにかなりの影響を与えている。本項においては, これをさらに検討するために, 含水率を種々に変えて実験した。ただし温度は常温とする。

本研究に用いた岩石は常磐炭鉱尾立坑深度440mにて採取(昭29.11)した浅貝砂岩(K), および同炭鉱上矢田立坑深度410mにて採取(昭30.10)した浅貝砂岩(Y)である。

(イ) 試料の乾湿養生

前述のように軟弱な岩石試料なので湿潤試料の作成には, 密閉容器内における薬品の過飽和水溶液の蒸気圧がつくる雰囲気中で試料を養生し, 薬品を種々に選ぶことによつて含水率を変える方法をとつた。

薬品の過飽和水溶液の雰囲気中の保持する相対湿度は第2表⁵⁾のとおりである。

五安砂岩を $\text{CuSO}_4\text{aq. sat.}$ で養生した場合は既掲の第1図のとおりで, 23日養生で吸湿による重量増は整形時に比べて1.06%であり, これを空気浴槽による乾燥試料に比べると5.6~6.3%の含水率になっている。しかるに

第2表

薬品名	相対湿度	備考
$\text{CuSO}_4\text{aq. sat.}$	95%	60°C にて
$\text{NH}_4\text{Cl aq. sat.}$	79.2	20°C //
$\text{NH}_4\text{NO}_3\text{aq. sat.}$	67	10°C //
$\text{CaCl}_2\text{aq. sat.}$	38	10°C //

第3図 薬品の過飽和水溶液養生による吸湿放湿経過 浅貝砂岩(K)

本項に用いた浅貝砂岩(K)では, $\text{CuSO}_4\text{aq. sat.}$ による養生でも含水率は2.5%に達しない。一方浅貝砂岩(Y)においては, それが5.7~5.3%になっている。

このように試料の種類によつて吸湿量が異なる。

第3図は浅貝砂岩(K)について吸湿, 放湿の時間的経過を示したもので, 図で見られるように, 各薬品の過飽和水溶液の作る雰囲気中の有する相対湿度に比例して, その吸湿量が増減している。

しかして湿潤養生は試料整形後直ちに行つたので, 整形時に最初に有する含有水分に多少の開きがあるはずである。それで強さの試験後直ちに各試料の破片を集めて, これを10時間空気浴槽で乾燥し, これをもつて含水率を零とみなし, 各試験時ならびに整形時の含水率を逆算で求めた。第3図の縦軸は逆算で求めた含水率を表わしたもので, 測点の最初の点がずれているのは整形時の含水率に差があつたからである。

浅貝砂岩(K)(Y)はいずれも五安砂岩より硬いので, 湿潤養生は28日にとつた。

一方乾燥試料の作り方は五安砂岩試料の場合と同要領で, 105~110°Cの空気浴槽で6時間乾燥し, 次に真空デシケータに入れて6時間真空ポンプを働かせ, 以後ポンプをとめたまま放置し, 翌日再び6時間空気浴槽で乾燥し, これをもつて乾燥試料とした。

既述のように試料は大きさをもっているだけに, 上記の乾燥試料は含水率が絶無であるということとはできない。しかしまた絶無にする最適の方法が見当たらない。鈴木博士⁶⁾は24時間乾燥せる試料の含水率は零とみなされた。著者もまたこれに従うとして, 浅貝砂岩(K)においてはそれを零とみなして実験結果を処理した。浅貝砂岩(Y)においてはこの点をいささか検討した。すなわち, 上記乾燥による(Y)試料は試験後の含水率の測定によつてなお0.33%の水分を含有することが判明した。それ故さらに高度の乾燥試料を得んとして, 空気浴槽にて連続72時間乾燥せしめ, これの圧縮試験後の破片により含水率を測定したところ, 0.20~0.12%の値を示した。よつて浅貝砂岩(Y)の試験結果は乾燥試料の含水率を零とせず, おのおのの値を考慮して処理した。

(ロ) 実験結果

第4図は浅貝砂岩(K)の圧縮強さと含水率との関係を示した図で, 第5図は引張強さと含水率との関係を図示したものである。

両図で明らかなように, 含水率が大きくなると圧縮引張両強さともその値が減少する。いま乾燥試料の圧縮強さの平均592kg/cm²と $\text{CaCl}_2\text{aq. sat.}$ 養生試料の平均321kg/cm², および $\text{CuSO}_4\text{aq. sat.}$ 養生試料の平均289kg/cm²とを比較すると,

100:54:49

第4図 圧縮強さと含水率との関係 浅貝砂岩(K)

第5図 引張強さと含水率との関係 浅貝砂岩(K)

となり、含水率がわずかに1.5~2.5%程度を有するだけで、乾燥試料の圧縮強さの約半分に低下する。また引張強さにおいても、上記養生試料の値はそれぞれ、17.4kg/cm²、10.3kg/cm²、6.7kg/cm²で、その比は

$$100 : 59 : 39$$

となり、圧縮同様わずかの含水率の増加により強さが激減するのが見られる。

次に浅貝砂岩(Y)の試料について圧縮強さと含水率との関係を示すと第6図になる。この場合も含水率が大きくなるほど圧縮強さが減っており、全乾燥試料の圧縮強さの平均 964kg/cm² に対して CaCl₂aq. sat. および CuSO₄aq. sat. 養生の試料は、それぞれ 525kg/cm²、353kg/cm²

第6図 圧縮強さと含水率との関係 浅貝砂岩(Y)

cm² を示し、その比率は

$$100 : 54 : 37$$

である。すなわち含水率が 2.7% で圧縮強さは乾燥試料のその約半分之一になり、5.6% において約1/3に低下するのがわかる。

しかし以上の結果について、圧縮ならびに引張強さと含水率との関係を

$$\sigma = A \cdot e^{-B \cdot w}$$

ただし σ : 圧縮または引張強さ

A, B : 岩石による常数

w : %であらわした含水率

において、最小二乗法によつて A, B の値を求め、実験式を作ると次のようになる。

$$\text{浅貝砂岩(K)} \quad \sigma_c = 576e^{-0.338 \cdot w}$$

$$\sigma_t = 17.3e^{-0.369 \cdot w}$$

$$\text{浅貝砂岩(Y)} \quad \sigma_c = 1040e^{-0.199 \cdot w}$$

図において画かれた曲線は、それぞれ上記の実験式を示したもので、測点が比較的良好にこの曲線に乗ることが見られる。故に強さと含水率とは指数関係にあるといふことができよう。なおこの式の形からいえば w が零の時に $\sigma = A$ となり、換言すれば含水率が零の時の強さが常数 A で示される数値でなければならない。

さらに参考までに以上用いた試料の比重、孔隙率、シヨア硬度を挙げると第3表のとおりである。因みにここでの孔隙率は、真比重をピクノメータで測り、見掛比重と比較したものである。これを見ると各試料とも孔隙率

第 3 表

岩 種	孔 隙 率	ショア硬度	見掛比重	真 比 重
五 安 砂 岩	35.6%	14	1.63	2.53
浅貝 (K)	18.4	42	2.13	2.61
〃 (Y)	18.5	58	2.11	2.59

はかなり大きく、五安砂岩は特にはなほだしい。

もとより含有水分は試料粒子間の孔隙に包蔵されるとすれば、もつとも湿潤な状態では全孔隙が水分で充たされなければならない。試料粒子の真比重と水の比重を考慮に入れて、本実験における $\text{CuSO}_4\text{aq.sat.}$ 養生の場合の水分の孔隙充てん割合を概算すると、五安砂岩では45%、浅貝砂岩(K)では35%、浅貝砂岩(Y)では80%になる。したがって本実験試料はいずれも完全飽和の湿潤試料までには至っていない。

4. む す び

以上の実験結果を総括すると次のとおりである。

1) 本研究では常磐産の軟弱な岩石について、圧縮ならびに引張強さと温度、含水率との関係をしらべた。

2) 強さにおよぼす温度、特に低温度の影響は温度が低いほど強さが大になるが、湿潤試料ではその傾向が著しく乾燥試料ではそれがきわめてわずかである。またこのことから、本実験試料では試料を構成する粒子自身よりも、むしろそのバウンダリから破壊がおこるものと考えられる。

3) 含水率の強さにおよぼす影響は含水率の増加とともに強さが減少し、その関係は指数曲線的である。なお試料の湿潤ならびに乾燥の養生方法には特別の考慮を払った。

4) 室内で圧縮ならびに引張強さを実験する場合の試料よりも、一般に坑内にある岩石の方が含水率が多い。それ故坑内で実際に支保の対象になる岩石の強さを考える時には、実験室結果よりも内輪にとらなければならない。

謝 辞

本研究を御指導賜わった青山先生、水田先生に感謝の意を捧げるとともに、実験に協力された本学小林良二講師、西方兵衛、池城安俊、菅原俊右、手島季四郎諸学士に謝意を表する。また試料採取に便宜を与えられた常磐炭鉱の各位に深謝する。

さらに本研究は文部省科学研究費によつてその一部が遂行されたことを付言する。

参 考 文 献

- 1) K. Stöcke: 鉱業便覧 332 頁
- 2) 鈴木 光: 砂岩の物理的性質に関する測定, 日本鉱業会誌 昭29.4. 1~5 頁
- 3) 著者: 低温における岩石の圧縮ならびに引張強さについて, 日本鉱業会誌 昭27.10. 8 頁
- 4) 著者: 流砂の低温における圧縮ならびに引張強さについて, 日本鉱業会誌 昭29.8. 8~9 頁
- 5) International Critical Tables (1926) Vol. 1, p. 67.
- 6) 前出2)

ガソリン・エンジンによるさく岩機

Atlas Copco (英) が 1956 年の Public Works Exhibition で発表した Cobra モーター鑿岩機は、世界市場で最も軽いモーター鑿岩機で、重さ 53lb、穿孔可能長さは 13ft といわれている。Cobra は 3 つの小さい部分品を取外すことで、鋪装ブレーカーとして使用し得る。

この鑿岩機は、探査や圧搾空気設備のない辺鄙な場所での採掘のために作られてある。

1 汽筒 2 ストローク型のガソリン・エンジンは反転掃気方式で、フローとなし気化器、はずみ車磁石発電機式点火装置を備え、 $1/3$ 英ガロンの燃料タンクを持っている。16:1 の燃料/潤滑油の混合で 2,300r.p.m. の運転をする。このエンジンはクラン

ク室の上部に取付けられモーター・ピストンを衝撃ピストンの両方が同一シリンダー中で動き、圧搾と点火がこれらピストンの間で行われる。

鑿岩機の箱には、いろいろ必要な工具、部分品が収められているが、全部で 88 lb である。特に、可撓性軸でモーター鑿岩機のクランク軸に取付けられる特別なグラインダーがあつて、正しい刃先角や直径が得られるようになっている。

長さは 24 in. 0° 以下の温度でもスタートし、あらゆる角度の穿孔が可能である。硬い花崗岩で $1\frac{1}{8}$ in T C ビット使用時の鑿孔速度は $6\frac{1}{2}$ in/min, 1 時間当り 26 ft と公称されている。燃料消費量は 75~100ft 穿孔/英ガロンとなつている。直径 $\frac{3}{4}$

in, 長さ $4\frac{1}{4}$ in のジャンクの T C インサート Sandvik Coromant ロッドを使用している。

(Mine & Quarry Eng., Dec. 1956. pp. 527, 528)

(山口)