

(31) 圧裂引張強度の載荷速度依存性

○ 金 豊 年 東京大学大学院
大久保誠介 東京大学工学部

Loading Rate Dependency of Indirect Tensile Strength

Fengnian Jin Graduate Student
Seisuke Okubo The University of Tokyo

In this study, the loading rate dependency of indirect tensile strength is investigated. Loading rate dependency is a kind of time-dependent behavior. In the case of compression, the relation between loading rate and strength has been well established, but for tension it is yet unknown. It is possible that the increasing of tensile strength with loading rate is the same as the compressive strength. However, the reports of tensile test are far less than those of compressive test, and the comparison of both has not been made. So in this study, the indirect tensile test under four loading rates is carried out, and the results are compared with the previous studies. The testing rock is Sanjome Andesite results of which are sufficient for compression. And the test has also been made in water-saturated condition which is important in practice.

1. はじめに

岩石力学の分野では、圧縮強度に比べて引張強度に関する研究は比較的少ない。岩盤は殆どの場合圧縮応力下にあるため、実用上、圧縮強度がより重要なためと思われる。しかしながら、圧縮破壊現象を微視的に捕えてみると、岩盤内の亀裂の近傍では、引張応力の生じることが知られている¹⁾。巨視的には圧縮破壊であっても、引張応力に基づく亀裂の進展が大きく関与している可能性が高い。このような観点からすると、引張強度に関する研究は圧縮強度に関する研究と深く結びついており、引張・圧縮応力下での現象を比較検討しつつ研究を進めることが、破壊現象の解明には望ましいことと思われる。また、今後、地下空間の利用が進むにつれ、従来より大規模で複雑な形状の地下構造物の建設が予定されているが、このような場合には、局部的に引張応力を岩盤が受け持つことも有りえる。この意味からも、引張強度に関する研究の必要性が増すと考える。

本研究では、引張強度の載荷速度依存性について実験的な検討を進める。載荷速度依存性は、一種の時間依存性現象であり、圧縮応力下では遅れ破壊、クリープ等と深く関連した現象であることが知られているが²⁾⁻⁵⁾、引張応力下ではこのような関連はまだ実証されていない。引張応力下での載荷速度依存性を調べ、圧縮応力下でのそれと比較、検討することは興味深く、圧縮と引張応力下での破壊機構の解明につながるものと思われる。また、大規模地下構造物の長期安定性を計算機実験により調べる際、是非とも必要な引張応力下での時間依存性現象を取り扱える構成方程式の確立、検証にも、引張強度の載荷速度依存性に関する実験結果は必需のものである。

引張強度の載荷速度依存性を議論した研究は比較的少ないが、Mokhnachev等は5種類の岩石について

一軸引張強度試験を行い、 $10^{-4} \sim 10^2$ MPa/s の載荷速度の範囲で実験を行った⁶⁾。その結果を見ると、載荷速度の増加につれて強度は増加し、実験範囲内で増加率の最も大きい石灰岩では、強度が2.6倍に、最も倍率の小さいシルト岩では強度が1.5倍となったとしている。また、Mellor 等は花こう岩と砂岩の圧裂試験を行い、載荷速度により圧裂引張強度が増加するとしている⁷⁾、Price 等は中央に孔の開いた円盤状試験片の圧裂試験 (ring test) を行い、粗粒玄武岩では、載荷速度とともに顕著に強度が増加すること報告している⁸⁾。また、著者等は三点曲げ試験を行い、抗折力 (modulus of rupture) と破壊靱性値の載荷速度依存性を調べ、ともに載荷速度により顕著に増加することを見いだした⁹⁾。

これらの研究結果に共通して言えることは、圧縮試験の場合と同様に、載荷速度とともに引張強度が上昇することである。しかしながら、従来の研究例は圧縮試験に比べ少ないし、圧縮試験と合わせて載荷速度依存性を議論するに至っていない。そこで、本研究では、載荷速度を変えて圧裂試験を行った。その際、圧縮試験結果の豊富な岩石を使用し、圧縮試験での結果との比較検討を行う。また、実用上大切な湿潤状態での載荷速度依存性も調べる。

2. 実験方法

試料岩石として、三城目安山岩を用いた。三ブロックより切り出した試験片を用いて圧裂引張試験を行ったが、ブロックA、Bの試験片は、直径 25 mm、厚さ 13 mm で、ブロックCの試験片は、直径 50 mm、厚さ 25 mm である。三城目安山岩はさほど異方性が強くないが、一応これを考慮し、図1に示すような載荷方向とした。気乾状態の試験片は、整形後温度 $22 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 15\%$ に保たれた実験室中に一か月以上乾燥した後、試験に供した。湿潤状態の試験片は、真空ポンプで空気を吸引した後注水し、そのまま一か月以上水に放置した後試験に供した。なお、湿潤状態の実験は、試験片を水に入れたまま行った。

圧裂引張試験機は容量 1 t のサーボ試験機である。実験装置の概略図を図2に示す。プラテンの変位速度は 10^{-2} 、 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} mm/s の4段階に変えた。図3には、代表的な荷重－変位曲線を示した。縦軸は試

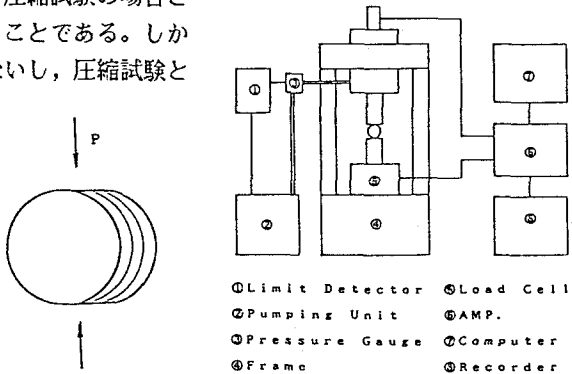


図1 圧裂引張試験での載荷方向

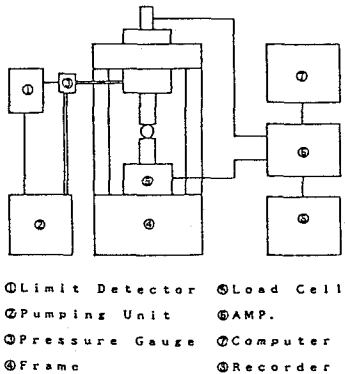


図2 サーボ試験機と測定系の概念図

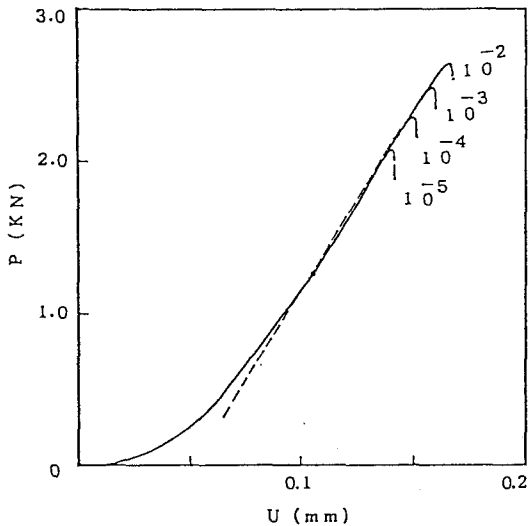


図3 荷重－変位曲線の例 (図中の数字は変位速度mm/s)

表1 変位速度・荷重速度・応力速度・歪速度の換算表

変位速度 (mm/s)	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
荷重速度 (kN/s)	1.25×10^{-1}	1.25×10^{-2}	1.25×10^{-3}	1.25×10^{-4}
応力速度 (MPa/s)	2.5×10^{-1}	2.5×10^{-2}	2.5×10^{-3}	2.5×10^{-4}
歪速度 (1/s)	2.5×10^{-5}	2.5×10^{-6}	2.5×10^{-7}	2.5×10^{-8}

験片の受ける荷重で、横軸は荷重方向の変位である。破壊荷重の50%の曲線傾きより、(1)式を仮定して計算した応力速度、歪速度をまとめて表1に示す。なお、ヤング率は一軸圧縮試験より求めた値 $E=10^4$ MPaを用いた。ヤング率は、気乾状態と湿潤状態では、ある程度異なるが、簡単のため、同じ値として変位速度を荷重速度に、応力速度を歪速度に換算した。

$$\sigma = \frac{2P}{\pi d h} \quad (1)$$

上式中の σ は圧裂面の引張応力、 P は荷重、 d は試験片の直径、 h は試験片の厚さである。

3. 実験結果

表2、3には、気乾状態と湿潤状態での実験結果をまとめて示した。ブロックA、B、Cはすべて三城目安山岩であるが、ブロックが違うと、その強度がある程度異なることが分かる。また、湿潤状態での強度は、気乾状態に比べ約20~30%位低下している。

図4、5は、それぞれ気乾状態、湿潤状態での圧裂引張強度 S_t と変位速度 C との関係を示す。横軸は変位速度の対数である。このグラフでは、強度がほぼ直線的に増加している。そこで、次式を仮定し、

$$S_t = S_n + \Delta S \cdot \log(C \times 10^5) \quad (2)$$

最小自乗法により S_n 及び ΔS の値を求めることにした。得られた S_n 及び ΔS の値を表3に示した。 S_n は変位速度 C が 10^{-5} mm/sでの値と一致する。そこで、 S_n の値を基準強度と呼ぶことにする。一方、 ΔS の値は C がある値から、その10倍の値になった場合の S_t の増加値を表す。従って、 ΔS は、圧裂引張強度の変位速度依存性を表す定数であると言える。

式(2)より求めた S_n と ΔS 値を表4に示す。平均値を見れば、気乾状態では、 $\Delta S=0.32$ MPa、湿潤状態では、 $\Delta S=0.34$ MPaとなり、ほぼ同じである。圧縮試験でも同様の結果が得られた事を述べる。

表2 三城目安山岩気乾状態での圧裂引張試験結果

ブロック	変位速度	平均強度 (MPa)	標準偏差 (MPa)	変動係数 (%)	実験回数
A	1	6.645	0.442	6.65	30
	2	6.130	0.550	8.97	30
	3	5.832	0.401	6.88	30
	4	5.616	0.333	5.93	30
B	1	6.048	0.401	6.63	20
	2	5.680	0.420	7.39	20
	3	5.458	0.251	4.60	20
	4	5.117	0.294	5.75	20
C	1	6.289	0.299	4.75	22
	2	5.885	0.418	7.10	22
	3	5.563	0.245	4.40	22
	4	5.378	0.308	5.73	22

変位速度 (mm/s) : 1は 10^{-2} , 2は 10^{-3} , 3は 10^{-4} , 4は 10^{-5}

表3 三城目安山岩湿潤状態での圧裂引張試験結果

ブロック	変位速度	平均強度 (MPa)	標準偏差 (MPa)	変動係数 (%)	実験回数
A	1	4.977	0.364	7.31	30
	2	4.641	0.382	8.23	30
	3	4.207	0.386	9.18	30
	4	3.945	0.247	6.26	30
B	1	4.641	0.185	3.99	20
	2	4.180	0.207	4.95	20
	3	3.848	0.183	4.76	20
	4	3.649	0.155	4.25	20
C	1	4.772	0.146	3.06	22
	2	4.456	0.262	5.88	22
	3	4.163	0.183	4.40	22
	4	3.732	0.167	4.47	22

表4 圧裂引張試験の S_n と ΔS 値

実験状態	ブロック	S_n (MPa)	ΔS (MPa)
気乾状態	A	5.55	0.34
	B	5.12	0.30
	C	5.32	0.31
湿潤状態	A	3.91	0.35
	B	3.58	0.33
	C	3.77	0.34

4. まとめ

今回は、三城目安山岩で圧裂引張試験を行い、強度の載荷速度依存性を示す定数 ΔS を求めたが、他の研究結果では、強度が載荷速度の $1/(n+1)$ 乗に比例すると仮定して、(3) 式より定数 n を求めた例が多い。

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{C_2}{C_1} \right)^{1/(n+1)} \quad (3)$$

(σ_1, σ_2 は載荷速度 C_1, C_2 下での強度)

数値を入れて調べると、(2) 式で近似した時の近似度とあまり変わらない。(3) 式の方が、含まれるパラメータ n が無次元であるため、破壊靱性値、圧縮強度の載荷速度依存性と比べるには、便利である。

現在までの実験結果^{2) 5) 9) -13)} より求めた n 値を表5に示す。示した一軸引張の n 値はクリープ試験での結果であるが、寿命がクリープ応力の n 乗に反比例することから求めた。抗折力の絶対値は一般に圧裂引張強度、一軸引張強度よりかなり大きいが、載荷速度を変えた抗折試験での n 値は今回の測定結果に近い。正四角柱にあらかじめき裂を入れた試験片を用いて、載荷速度を変えた三点曲げ試験より求めた破壊靱性値の n は、圧裂引張試験の n と近い。引張き裂の伝播が、いずれにしる支配的な機構とすれば、この結果は理解し易い。引張の場合では、 n 値だけを見れば大差がない。

圧縮応力下での実験結果はかなり多いが、歪速度あるいは載荷速度を変えた実験とクリープ応力を変えた実験で求めた n 値は良く合っている。引張場合と圧縮場合を比べると、両者での n 値がほぼ等しい。これは、時間依存性を決定する基本的な機構が、両者でありあまり変わらないことを示唆していると考える。

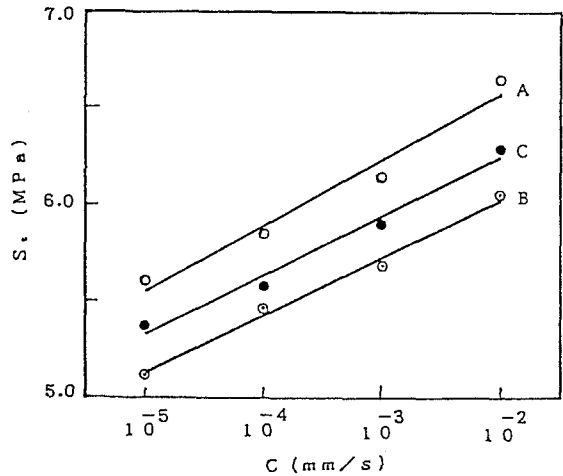


図4 気乾状態での実験結果 (S_t : 圧裂引張強度, C : 変位速度, 図中のA, B, Cはブロック名)

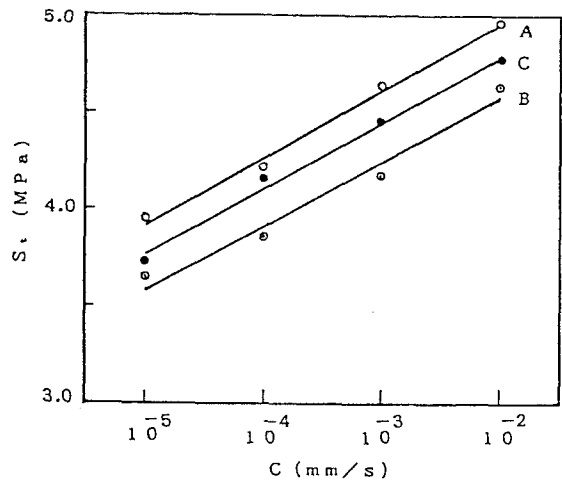


図5 湿潤状態での実験結果

表5 三城目安山岩の n 値

試験	n	
	気乾状態	湿潤状態
圧裂引張強度	39	26
一軸引張強度 ¹⁰⁾	36	—
抗折力 ⁹⁾	34	—
破壊靱性 ⁹⁾	37	—
一軸圧縮強度 ²⁾	36	—
一軸圧縮強度 ⁵⁾	38	—
一軸圧縮強度 ¹¹⁾	35	—
一軸圧縮強度 ¹²⁾	38	—
一軸圧縮強度 ¹³⁾	38	25

* 10) と 11) はクリープ試験での結果

本試験での n 値は、従来の結果より少し大きい、近似的には同等と考えられる。圧裂引張試験は、比較的簡単で、この方法で n あるいは ΔS が求まれば時間の節約につながる。

今後の展望として下記の事柄が挙げられる。

- ① 一軸引張強度を載荷速度を変えて行った例は極めて少ない。データの豊富な三城目安山岩でも、この試験は発表されておらず、今後実施する必要がある。
- ② 引張でも気乾、湿潤での ΔS は等しい。このことは、引張強度の絶対値が比較的小さい湿潤状態の場合、時間依存性がより顕著であることを意味する。圧縮で同様な傾向が確認されたことと合わせ、今後検討する必要がある。
- ③ 引張と圧縮とで、 n 値が同じであった。これが一般的に言えるとしたら、従来比較的豊富にある圧縮試験での実験結果を引張にも適用出来ることになる。ともに、引張き裂の進展が基本機構と考えれば理解出来るが、今後の検討が必要なのは言うまでもない。

参考文献

- 1) 鈴木光：岩盤力学と計測，183～209，(1983)，内田老鶴圃
- 2) 山口勉・大久保誠介・西松裕一・小泉昇三：日鉱誌，99[1140]，87～92，(1983)
- 3) 山口勉・大久保誠介・西松裕一・小泉昇三：日鉱誌，99[1150]，1029～1034，(1983)
- 4) 山口勉・大久保誠介・西松裕一：日鉱誌，100[1158]，631～635，(1984)
- 5) 大久保誠介・何昌栄・西松裕一：日鉱誌，103[1189]，117～181，(1984)
- 6) Mokhnachev M. P. & Gromova N. V.: Sov. Min. Sci., No.6, 609～612, (1970)
- 7) Mellor M. & Hawkes I.: Eng. Geol., 5, 173～225, (1971)
- 8) Price D.G. & Knill J.L.: Proc. 1st Cong. Int. Soc. Rock Mech., 1, 439～442, (1966), Lisbon
- 9) 大久保誠介・新孝一・西松裕一：材料，33[370]，882～887，(1984)
- 10) 西松裕一・山口勉：材料，29[317]，192～197，(1980)
- 11) 大久保誠介・西松裕一：日鉱誌，102[1181]，395～400，(1986)
- 12) 何昌栄・大久保誠介・西松裕一：材料，38[426]，216～220，(1989)
- 13) 大久保誠介・西松裕一・何昌栄・秋哲淵：材料，41[463]，403～409，(1992)