

岩石の一軸引張り試験結果の 解釈と利用に関する文献調査

及川 寧己^{1*}・早野 公敏²・嶋本 敬介³

¹ (独) 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 (〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1)

² 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常磐台79-5)

³ (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

*E-mail: y.oikawa@aist.go.jp

本研究では、一軸引張り試験についての基準化を念頭に文献調査を行い、研究分野におけるその解釈と利用に関する現状について調べ整理した。一軸引張り強さに影響を及ぼす因子としては、水分、載荷速度および異方性の影響が大きく、特に水分と異方性は50%に及ぶ強度の違いが報告されていた。引張り強さとヤング率については、本調査で文献からデータを収集したところ、明らかな正の相関があることが分かった。一軸引張り強さと圧裂引張り強さの比較では、程度の大小はあるが圧裂引張り強さの方が一軸引張り強さよりも大きくなる傾向があるようだが、一方で引張り強さが概ね1MPaよりも小さい試料では、大関係のバラツキが大きくなり、逆に一軸引張り強さの方が大きく計測される場合も見られた。

Key Words : direct tension, rock test, strength, deformation, bibliographic survey

1. はじめに

岩石の引張り強さを調べる試験としては、簡便な圧裂引張り試験が良く知られており実施例も多い。圧裂引張り試験に関しては、例えば(公社)地盤工学会により基準化が行われ、「圧裂による岩石の引張り強さ試験(JGS2551-2009)」として公開されている。圧裂引張り試験は、試験片を圧縮変形することにより、間接的に試験片内部に引張り応力を生じさせており、引張り破壊を生ずる領域が、一軸引張り試験のような単純で一様な引張り応力状態にはなっていないという特徴がある。これは簡便性との引き換えになっているが、得られる引張り強さも一軸引張り試験と比較して過大となる傾向があると言われている。岩盤評価の基となる岩石物性を精度よく求めるという観点から、一軸引張り試験についても基準化を行い、その実施を奨励することが岩盤工学的に重要と考えられる。

本調査では、岩石の一軸引張り試験についての基準化を念頭に、国内外の一軸引張り試験に関する116編の文献調査を行い、これまでの主に研究分野における一軸引張り試験結果の解釈と利用に関する現状についてとりまとめた。調査では、一軸引張り試験において引張り強さに影響を及ぼすと考えられる幾つかの因子(含水状態、寸法効果、載荷速度(変形速度)、異方性、不均質性)、

一軸引張り試験によって得られる各種の力学的パラメータ(強さ、ヤング率、ポアソン比)相互の関係、圧裂引張り強さとの関係や一軸圧縮試験で得られる各種の力学的パラメータとの関係等について着目し整理するとともに、一軸引張り強さの利用例についても調べた。ここではそれによって得られた主な知見について報告する。

2. 一軸引張り強さに及ぼす影響因子

一軸引張り試験では、試験結果に影響を及ぼす幾つかの影響因子があることが知られている。ここでは、含水状態、寸法効果、載荷速度依存性、異方性、不均質性の5点に着目して調査を行った。

(1) 水分の影響

岩石を用いた試験では、一般に含水状態では乾燥状態よりも強度が低下することが知られている。木下ら¹⁾は、花こう岩(乾燥時の引張り強さ概ね11MPa以上)を用いてひずみ速度を変えた一軸引張り試験を実施し、載荷速度依存性を調べたが、その際に異方性と含水飽和の影響も併せて検討している。論文に示された実験式に基づき、載荷速度が 10^{-5} sの場合で比較すると、含水飽和により15%程の強度低下が生ずる。Covielloら²⁾は、石灰砂岩

(乾燥時の引張り強さ概ね1MPa以下)の引張り強さを、一軸引張り、圧裂引張り、3点曲げ等の各種試験を行い比較した。彼らは一軸引張り試験における寸法効果や含水の影響も調べており、この場合は、含水させると40%程の強度低下を生じた。羽柴ら³⁾は、花こう岩、安山岩、凝灰岩を用いて気乾状態と含水飽和状態の一軸引張り強さの違いや変形特性の違いを調べた。結果を見ると花こう岩では8%、安山岩では34~58%、凝灰岩では53%の強度低下が生じた(表-1)。また、著しく強度が低下する岩種では変形特性も大きく異なっていると報告している。また榊井ら⁴⁾は、粘土を用いて不飽和土の含水状態と引張り強さの関係について調べ、含水比10%以下のところで含水比の低下に伴う毛管力の発現に対応した強度の増加を報告している。

このように岩種により程度の違いはあるが、含水の影響により一軸引張り強さは低下すると考えられる。その程度は50%以上に及ぶ場合も見られた。室内試験は乾燥状態で実施される場合が主と考えられるが、現場の岩盤は一般に含水状態である点に留意するとともに、採取した岩石試料の含水状態の管理にも注意を払う必要がある。含水飽和度の影響に関しては、粘土を用いた研究が報告されているものの、岩石については詳しく調べられていないようである。圧縮試験で得られている知見⁵⁾から考えると、水分量の増加に対応した強度低下が生じる可能性が考えられるが、今後の研究に期待したい。

表-1 花こう岩、安山岩、凝灰岩を用いた一軸引張り試験における含水の影響の例。羽柴ら³⁾より引用。

		Specific gravity	Porosity (%)	Uniaxial tension strength (MPa)		Inelastic strain at peak strength (10 ⁻³)	
				Average	SD*	Average	SD*
Sanjome andesite A	Air-Dried	2.24	13.3	4.3	0.74	76	8.5
	Water-saturated	2.37		1.8	0.20	261	27
Sanjome andesite B	Air-Dried	2.13	17.0	6.3	0.36	176	47
	Water-saturated	2.30		4.1	0.20	429	77
Inada granite	Air-Dried	2.61	1.1	6.6	0.19	117	10
	Water-saturated	2.63		6.1	0.27	148	31
Honkomatsu andesite	Air-Dried	2.24	16.1	5.8	0.59	105	34
	Water-saturated	2.40		3.8	0.60	182	56
Kawazu tuff	Air-Dried	1.88	28.9	3.4	0.75	106	40
	Water-saturated	2.17		1.6	0.23	181	59

* Standard deviation

(2) 寸法効果

岩石を用いた力学試験では、一般に試験片サイズが大きくなるにつれて強度が低下することが知られており、これを寸法効果という。一軸引張り試験の場合は、サイズの異なる試験片に合わせた試験片固定治具等が必要な場合があり、煩雑であることから研究例は少ないようである。Covielloら²⁾の、軟岩である石灰砂岩を用いた実験では、明らかな寸法効果は見られなかったとしている。一方でSpetla and Kadlecěk⁶⁾は、コンクリートを用いた一軸引張り試験の結果から、ワイブル則に基づく下式を示し

ている。

$$\frac{S_{V_2}}{S_{V_1}} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\left(\frac{1}{m} \right)} \quad (1)$$

ここで、 V_1, V_2 は試験片の体積、 S_{V_1}, S_{V_2} は試験片の体積 V_1, V_2 に対応する強度、 m は寸法効果を表す定数である。彼らは m として24~48という値を示している。コンクリートは天然の岩石ではないが、一軸引張り強さとしては軟岩相当の材料と考えることもできる。ワイブル則に関しては、秋ら⁷⁾も一軸引張り強さのパラツキについて安山岩と凝灰岩を用いて実験的に検討しており、分布則としてはワイブル分布が良く当てはまると報告している。彼らの研究は直接寸法効果を調べたものではないが、強度のパラツキにワイブル則が成立することとは、対象岩石が寸法効果を有することと矛盾しない。また趙ら⁸⁾は、数値シミュレーションによって、一軸引張り試験における寸法効果について検討している。試験片サイズの増大は要素数の増加によって模擬されており、それによる引張り強さの低下は、各要素の不均質性が大きいほど顕著であった。そして試験片サイズがある程度以上に大きくなると、強度はあまり低下しなくなる、つまり寸法効果が弱くなることも示されている。

岩石の一軸引張り試験で寸法効果について検討した例が少なく、調べた範囲では明瞭な傾向は見られなかったものの、他の力学試験では寸法効果があることが知られており、直接的ではないがSpetla and Kadlecěk⁶⁾、秋ら⁷⁾および趙ら⁸⁾の報告を考え合わせると寸法効果を念頭において試験を実施することが必要であろう。

(3) 載荷速度

岩石の変形破壊挙動には一般に載荷速度依存性があり、載荷速度が速くなるに従って、その強度は緩やかに上昇することが知られている。一軸引張り試験においても、安山岩を用いた大久保ら⁹⁾の研究において、一軸引張り強さ、圧裂引張り強さおよび一軸圧縮強さの載荷速度依存性は、ほぼ同じ傾向となることが報告されている。これらにおいて、載荷速度を10倍ずつ変化させた際の強度増加率は、全て6%前後の値が得られている。安山岩と凝灰岩を用いた福井ら¹⁰⁾の研究でも、載荷速度が10倍増加したときの一軸引張り強さの増加率は安山岩で約6%、凝灰岩で約5%の値と評価されている。またこの増加率は、一軸圧縮強さや一軸引張り試験時のヤング率の増加率とほぼ同じ値となると報告されている。花こう岩を用いた木下ら¹⁾の研究では、載荷速度依存性が見られることを報告している。載荷速度が10倍増加したときの一軸引張り強さの増加率は乾燥状態で8.5%、含水状態での増加率は13.5%程度である。また趙ら⁸⁾は、数値シミュ

レーションによって、一軸引張り試験における寸法効果と载荷速度依存性について検討しており、サイズが大きくなるに従って载荷速度依存性が弱くなると報告している。

以上のことから一軸引張り試験においてもやはり強度の载荷速度依存性があると考えられ、その程度は調査した範囲では、载荷速度が10倍になると数%～十数%の強度上昇として現れるようである。

(4) 異方性

岩石は程度は異なるが一般に異方性を有する。ここでいう異方性とは、その成因等により岩石の3次元的な方向と関係して、その力学的な性質が変化することをいう。この性質により、試験片を作成する際には、その引張り軸方向が元の岩石ブロックや岩盤でどの方向に当たるかに注意を払う必要がある。異方性が見られる岩種としては花こう岩や各種の堆積岩等が知られている。花こう岩は直交異方性を有し、それは内部の微小クラック分布の異方性によるものと考えられている。堆積岩では、堆積面内では等方的だが堆積面に直交する方向との性質が異なる面内等方性を示す場合がしばしばある。林ら¹¹⁾は、花こう岩の一軸引張り強さの異方性について、直交異方面を基準とした3方向について調べ、引張り強さの方向による異方性の度合いが56%と、引張り試験時の接線ヤング率、一軸圧縮強さ、P波速度の値の変化の度合い（それぞれ20%、10%、12%）と比べて端的に大きかったと報告している（図-1）。藤井ら¹²⁾は、同じ花こう岩を対象に、一軸引張り試験後の試験片の破断面観察を行い、リフト面に平行な石英粒内クラックの強い卓越を報告しており、高強度の石英の粒内クラックの多寡と引張り強さの違いが関連しているものと考察している。甲村と稲田¹³⁾は、凝灰岩の異方軸に準じた2方向の一軸引張り試験を行った結果、一軸引張り強さは载荷方向によって49%の低下と大きな差が見られ強い異方性を示す一方で、一軸引張り破壊時のひずみは载荷方向による差が小さく、応力に比べてひずみは異方性の影響を受けにくいことを報告している。Nova and Zaninetti¹⁴⁾は片麻岩を用いた研究で、片理面となす角度を変えた一軸引張り試験を行い、最大で70%を超えるような強度低下を報告している。

一軸引張り試験においては、特に強度に関して異方性の影響が強く出るという報告が見られた。異方性を示すことがあらかじめ予想される岩種を扱う場合は、その異方性の把握とともに、複数方向の試験片を作成するなどの工夫が必要と考えられる。その際に弾性波速度異方性の計測や岩目、流理、層理、葉理の観察などの情報から非破壊的に異方性を評価し、引張り軸方向との関係を把握することは有用である。

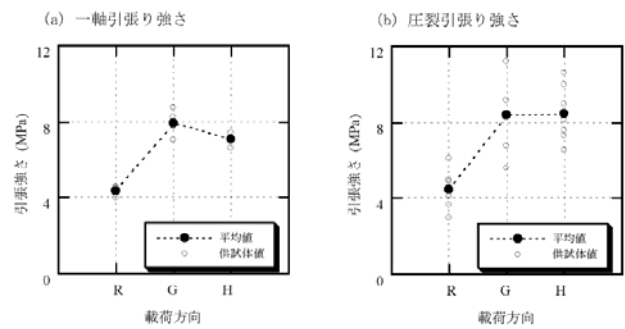


図-1 花こう岩の载荷方向による引張り強さの違いの例。林ら¹¹⁾より引用。

(5) 不均質性

岩石は様々な大きさの鉱物の集合体であり、一般に不均質性を有する。たとえ様に微細な粒子からなるように見える岩であってもその不均質性には留意すべきである。この不均質性があるため、試験結果は程度の差はあるがバラツキを有する。よって精度のよい評価には十分な個数の試験を実施しバラツキの影響を小さくすることが重要である。不均質性を詳細に調べるためには、試験数を十分に確保する必要がある、手間がかかることからこれまでの研究は少ないようである。秋ら⁷⁾は、一軸引張り強さのバラツキについて安山岩と凝灰岩を用いて実験的に検討した。分布則としてはワイブル分布が良く当てはまり、式(2)に示すような形の確率関数を用いてバラツキの程度を表す形状母数 b （均一性係数）で比較を行った。一軸圧縮強さ、圧裂引張り強さ、一軸引張り強さのバラツキは、気乾状態と湿潤状態でさほど変わらないことから含水の影響は小さく、圧裂引張り強さと一軸引張り強さのバラツキは大差なく、一軸圧縮強さと一軸引張り強さのバラツキも大差なかったと報告している。

$$P(\sigma_F) = \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma_F}{a} \right)^b \right\} \quad (2)$$

ここで、 P は強度 σ_F の確率関数、 a は尺度母数、 b は形状母数である。 b としては安山岩で15、凝灰岩で7.6という値が示されており、岩種の違いとして b の値の小さい凝灰岩の方がバラツキが大きいことになる。

3. 一軸引張り強さと引張り変形特性

一軸試験によって得られる変形特性として良く知られているものにヤング率とポアソン比がある。それぞれが载荷軸方向および横方向の変形特性を表すパラメータであるが、圧縮領域では、岩石試験において圧縮強さとヤング率は正の相関を示すことが知られている。端的に言えば固い岩ほど高強度という傾向があることを意味する。

一軸引張り試験においても同様の性質が発現するのであれば、引張り強さから変形特性が、逆に変形特性から引張り強さの見当がつけられることになり有用と考えられる。

一軸引張り強さとヤング率の相関について注目した研究は少ない。林ら¹⁵⁾の深成岩を用いた研究において、間接的に一軸引張り強さとヤング率の間に良い正の相関があるとする報告が見られたが岩種が限定的であった。そこで、本調査で収集した文献の中から、表形式で一軸引張り強さとヤング率が数値で示されているものを、岩種の多様さに留意しながら選びまとめたものを表-2に示す。10編の文献から、堆積岩を含む11種の地盤材料のデータを得た。ただしその中には同一試料で力学的異方性を調べたものや、同一試料で載荷速度を変化させたものも含まれている。またヤング率に関しては、接線ヤング率の値を用いることとし、載荷直後の値を評価する E_0 と強度の50%点付近の値を評価する E_{50} を区別して整理した。なお文献中にはこの区別が明記されていないものもあったが、それらは表では単に接線ヤング率として示した。この表を基に一軸引張り強さとヤング率の関係を図示したものが図-2である。様々な岩種に渡って、高強度の試料のみならず、低強度の試料まで含めた図で、明瞭な正の相関があることが分かる。図中の点線は E_{50} の値からのみ求めた最小自乗直線であるが、原点近傍を通り全体の傾向とも良く一致することが分かる。

ヤング率とポアソン比の関係では、林ら¹⁵⁾の研究で正の相関を示すという報告がある。彼らは、構成粒子間の結合が弱いほど、ポアソン比も小さくなる（一軸引張り状態の横変形も小さい）と考察している。上述のように彼らの実験対象は深成岩類であるので、様々な岩種での傾向については明らかではない。

4. 圧裂引張強さとの関係

本調査では一軸引張り強さと他の試験で得られた力学特性との関係についても調べた。ここではそれらの中でも特に重要と考えられる圧裂引張り強さとの関係について記す。圧裂引張り試験は、その実施の簡便さから広く用いられている引張り強さ計測法である。圧縮試験により引張り強さを求めるという点が最大の特徴であり、一軸引張り試験で必要となる専用の試験片固定器具は不要である。一方で、試験片内部に圧縮応力が生じたり、試験片の変形による影響が生じたりと、測定法としては得てして過大評価になりやすいという性質があるといわれている。

本調査においては、青野ら^{16), 17)}の凝灰岩を用いた研究、西林ら¹⁸⁾のセメント固結土を用いた研究、木村ら¹⁹⁾の土

丹を用いた研究、納谷と岡田²⁰⁾の凝灰質礫岩を用いた研究、羽柴ら²¹⁾の泥岩を用いた研究においては、圧裂引張り強さの方が一軸引張り強さよりも大きい値が得られている。一方、そのような傾向は認められるが、差は小さいという報告は、岡ら²²⁾の安山岩、大理石、凝灰岩を用いた研究、Covielloら²³⁾の石灰砂岩を用いた研究、林ら¹¹⁾の花こう岩を用いた研究がある。逆に一軸引張り強さの方が大きい値となったことが報告されているものも、古関と佐藤²³⁾のセメント改良土を用いた研究や小野ら²⁴⁾の石膏材料を用いた研究があり、またAonoら¹⁷⁾の凝灰岩を用いた研究の一部でも見られた。概ね圧裂引張り強さの方が一軸引張り強さよりも大きい値となる傾向があるも

表-2 各種の岩石の一軸引張り強さとヤング率

岩種	産地名	一軸引張り強さ [MPa]	接線ヤング率 [GPa]	接線ヤング率(E_0) [GPa]	接線ヤング率(E_{50}) [GPa]	Note	Reference
花こう岩	Barre	13.5	51.7	35.2			32)
	稲田	8.6					33)
	稲田	6.1		25.0			34)
	稲田	4.3		22.1		*1 リフト	11)
	稲田	7.9		26.8		*1 グレイン	11)
トータル岩	稲田	7.1		22.2		*1 ハードウェイ	11)
	長屋	5.4		9.7			15)
	長屋	9.7		22.0			15)
	長屋	7.5		20.3			15)
花こう閃緑岩	石森	10.2		30.1			15)
	初森	5.6		9.1			15)
	初森	7.2		20.8			15)
	三春	1.7		8.1			15)
斑れい岩	三春	7.7		23.9			15)
	移ヶ岳	12.3		48.1			15)
	移ヶ岳	15.2		46.4			15)
安山岩	三城目	4.3		16.5			33)
	三城目	6.0		18.7	16.6	*2 $10^{-3}/s$	10)
	三城目	6.2		18.4	16.5	*2 $10^{-3}/s$	10)
	三城目	6.4		19.1	17.8	*2 $10^{-3}/s$	10)
	三城目	7.1		20.9	17.6	*2 $10^{-3}/s$	10)
片麻岩	Luserna	2.5	11.6			*3 0度	14)
	Luserna	2.4	10.2			*3 15度	14)
	Luserna	2.8	14.2			*3 30度	14)
	Luserna	4.5	14.6			*3 45度	14)
	Luserna	5.5	21.3			*3 60度	14)
	Luserna	7.9	19.8			*3 75度	14)
石灰岩	Luserna	8.8	24.7			*3 90度	14)
	Indiana	5.9		37.9	29.6		32)
砂岩	Berea	1.2		4.8	1.4		32)
	Chunar	3.0		16.3	7.3		35)
	白鳥	2.5		15.4			33)
	白浜	2.3		10.3			33)
	鎌倉	5.9		25.2			33)
凝灰岩	田下	2.3		7.6			33)
	田下	1.3		3.8	2.3	*2 $10^{-3}/s$	10)
	田下	1.3		4.1	2.5	*2 $10^{-3}/s$	10)
	田下	1.6		4.2	2.8	*2 $10^{-3}/s$	10)
	田下	1.6		4.4	2.8	*2 $10^{-3}/s$	10)
石炭	Beijing	0.42	1.70				36)
	Beijing	1.04	3.00				36)
	Beijing	0.57	2.10				36)
土丹	横浜	0.33	0.72			E20	19)

32) I.Hawkes, M.Mellor and S.Gariepy (1973)

33) 福井勝則, 大久保誠介, 清水剛 (1998)

34) 及川重己, 山口勉, 福井勝則, 大久保誠介 (1998)

11) 林為人, 高橋孝, 中村聡明, 藤井幸泰 (2008)

15) 林為人, 高橋孝, 藤井幸泰, 西山哲, 竹村貴人 (2007)

10) 福井勝則, 大久保誠介, 岩野圭太 (2003)

14) R.Nova and A.Zannonetti (1990)

35) P.Pande and D.P.Singh (1986)

36) S. Okubo, K. Fukui and G. Qi (2006)

19) 木村有仁, 大久保誠介, 福井勝則 (2001)

*1 : 各異方向に垂直方向に載荷

*2 : 載荷速度

*3 : 片理面からの垂直度, 0度が垂直, 90度が平行

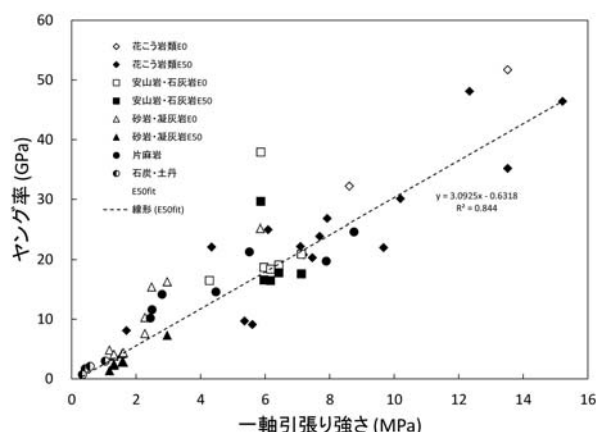


図-2 各種の岩石の一軸引張り強さとヤング率の関係

のと考えるが、そうでない場合もいくつか見られる。

引張り強さの大小という観点からは、引張り強さが概ね1MPaよりも大きい試料では、差が小さいと報告されているのが、岡ら²²⁾、Aonoら¹⁷⁾、林ら¹¹⁾の研究、差があるというのが羽柴ら²¹⁾の研究。引張り強さが概ね1MPaよりも小さい試料では、差があるというのが青野ら^{16) 17)}、西林ら¹⁸⁾、木村ら¹⁹⁾、納谷と岡田²⁰⁾の研究、差が小さいのがCovielloら²⁾の研究、一軸引張り強さの方が大きい値となる古関と佐藤²³⁾、小野ら²⁴⁾の研究となる。引張り強さが概ね1MPaよりも大きい試料では、少なくとも一軸引張り強さの方が大きくなる例はなく、引張り強さが概ね1MPaよりも小さい試料では、その例があることから、引張り強さが概ね1MPaよりも小さい試料では、圧裂引張り強さと一軸引張り強さの相対的な大きさのバラツキが大きいことを示唆していることが考えられる。引張り強さが概ね1MPaよりも小さい試料を用いる場合は留意する必要がある。

また力学的異方性を有すると考えられる試料を扱う場合には、圧裂引張り強さと一軸引張り強さを検討する際に、異方軸と引張り軸方向との関係に留意する必要がある。本文献調査においても、青野ら^{16) 17)}、林ら¹¹⁾の研究では異方性を考慮して引張り軸に相当する方向を揃えた上での比較を行っていた。

5. 一軸引張り強さをを用いた岩盤評価の例

一軸引張り強さをを用いて岩盤の評価を行った例を幾つか示す。Bernaix³⁰⁾はマルパッセダム崩壊事故の原因解析の一部として、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験とともに一軸引張り試験を行い、岩盤マトリクスの破壊規準を評価した。木下ら¹⁾は、岩盤内に開削した空洞周りの安定性を、幾つかの条件下での引張り強さの中から最も弱いものを選んで解析した。シミュレーションの結果と床板透水試験で計測した現場床板の損傷領域とは整合的であった。川越ら³¹⁾は、斜面の落石危険性の評価のために一軸引張り試験を行い、破壊面の新鮮部（新規破壊面）の面積に比例して引張り強さが増加すると報告している。

6. おわりに

一軸引張り試験は、試験片に様な引張り応力のみを作用させる必要があるため、技術的な難しさから必ずしも広く実施されていないところがあった。近年、試験機器等の進歩や地道な研究実施例の積み重ねにより、それ程困難なく実施可能な環境が整ってきたと考えられる。ここでは、基準化を念頭に試験結果に影響を及ぼすと思

われる要因や力学試験で得られる各種のデータとの関係について文献調査を行いとりまとめた。

引張り強さに及ぼす影響因子としては、水分、載荷速度および異方性の影響は大きいと考えられる。特に水分と異方性は50%に及ぶ強度の違いが報告されていた。寸法効果と不均質性については文献が少なく、調査の中でははっきりしなかった。引張り試験における引張り強さとヤング率については、本調査で文献からデータを収集したところ明らかな正の相関があることが分かった。一軸引張り強さと圧裂引張り強さの比較では、引張り強さが概ね1MPaよりも大きい試料では、程度の大小はあるが、圧裂引張り強さの方が一軸引張り強さよりも大きくなる傾向が認められた。一方で引張り強さが概ね1MPaよりも小さい試料では、大小関係のバラツキが大きくなり、逆に一軸引張り強さの方が大きく計測される場合も見られた。

謝辞：なお、この論文の内容は（公社）地盤工学会の室内試験規格・基準委員会の下に設置された岩石および岩盤の一軸引張り試験方法基準化検討WG（WGリーダー、谷和夫）において実施した調査の成果をとりまとめたものである。

参考文献

- 1) 木下直人，掘田政國，松井裕哉，杉原弘造：発破振動計測と引張強度試験に基づく掘削損傷領域の評価，第29回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.220-224，1999.
- 2) Coviello, A., Lagioia, R. and Nova, R.: On the measurement of the tensile strength of soft rocks, *Rock Mech. Rock Engng.*, 38(4), pp.251-273, 2005.
- 3) 羽柴公博，大久保誠介，福井勝則：気乾状態と湿潤状態での岩石の一軸引張強度と非弾性歪，*Journal of MMIJ*, 127, pp.675-681, 2011.
- 4) 梶井健，八尾眞太郎，伊藤淳志：備前粘土の土中水の状態と引張強度の関係について，第48回地盤工学シンポジウム論文集，pp.1-8，2003.
- 5) 例えば Vutukuri, V.S., Lama, R.D. and Saluja, S.S.: *Handbook on mechanical properties of rocks (Vol.1)*, pp.50-61, Trans Tech Publications, 1974.
- 6) Spetla, Z. and Kadlecik, V.: How size and shape of specimens affect the direct tensile strength of concrete, *Tech. Dig.*, 12, pp.865-872, 1967.
- 7) 秋哲淵，大久保誠介，福井勝則：気乾状態と湿潤状態での岩石の圧裂・一軸引張強度の分布特性，資源と素材，111, pp.231-237，1995.
- 8) 趙顕，大久保誠介，福井勝則：強度のばらつきを考慮した一軸引張試験の計算機シミュレーション，資源と素材，111, pp.907-912，1995.
- 9) 大久保誠介，金豊年，秋山政雄：一軸引張強度と圧裂引張強度の載荷速度依存性，資源と素材，109, pp.865-869，1993.
- 10) 福井勝則，大久保誠介，岩野圭太：一軸引張応力下での三城目安山岩と田下凝灰岩の載荷速度依存性，土木学会論文集 No.729/III-62, pp.59-71，2003.

- 11) 林為人, 高橋学, 中村敏明, 藤井幸泰: 稲田花崗岩の引張り強さ・変形特性およびその異方性—岩石の一軸引張試験と圧裂引張試験の比較を中心として, 地盤工学ジャーナル, 3, pp.165-173, 2008.
- 12) 藤井幸泰, 竹村貴人, 高橋学, 林為人, 赤岩俊治: 異方性を考慮した稲田花崗岩の一軸引張割れ目の特性, 応用地質, 46, pp.227-231, 2005.
- 13) 甲村雄一, 稲田善紀: 凝灰岩が巨視的破壊に至るまでの微視的な破壊挙動に関する考察, 資源と素材, 122, pp.65-70, 2006.
- 14) Nova, R. and Zaninetti, A.: An Investigation into the Tensile Behaviour of a Schistose Rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 27, pp.231-242, 1990.
- 15) 林為人, 高橋学, 藤井幸泰, 西山哲, 竹村貴人: 一軸引張状態における数種類の花崗岩質岩石と斑れい岩の変形特性, 材料, 56, pp.654-659, 2007.
- 16) 青野泰久, 谷和夫, 岡田哲実: 圧裂引張り試験と一軸引張り試験による田下石の引張り強さの比較, 第 46 回地盤工学研究発表会, pp.41-42, 2011.
- 17) Aono, Y., Tani, K. and Okada, T.: Comparison between splitting tensile strength test and uniaxial tensile test on Tase stone, *Proc. of 4th Korea-Japan Geotechnical Workshop*, pp. 79-84, 2011.
- 18) 西林清茂, 細谷芳巳, 小日向隆: 試験法の相違によるセメント混合固結土の引張・曲げ強度特性, 昭和 59 年度土木学会関東支部年研究発表会, 12, pp.109-110, 1985.
- 19) 木村有仁, 大久保誠介, 福井勝則: 土丹の力学特性について, 資源・素材 2001 (春季大会), pp.171-172, 2001.
- 20) 納谷朋広, 岡田哲実: 一軸引張り試験による礫岩の引張り強さの評価, 第 44 回地盤工学研究発表会, 2009.
- 21) 羽柴公博, 大久保誠助, 福井勝則: 湿潤状態での泥岩の一軸引張試験, 第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.89-93, 2010.
- 22) 岡行俊, 小林良二, 高多明, 西松裕一: 岩石の引張強さの測定法, 日本鉱業会誌, 84, pp.1465-1469, 1968.
- 23) 古関潤一, 佐藤剛司: セメント改良土の引張強度特性, 生産研究, 53, pp.49-52, 2001.
- 24) 小野直人, 望月秋利, 黒崎ひろみ, 上野勝利: 圧縮・引張り試験機の試作, 土木学会年次学術講演会講演概要集Ⅲ, 58, pp.337-338, 2003.
- 25) 甲村雄一, 下河内隆文, 稲田善紀, 上田貴夫: 稲田花崗岩の引張応力下における応力-ひずみ特性, 第 28 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 28, pp.214-218, 1997.
- 26) 林為人, 高橋学: 稲田花崗岩の一軸引張強さおよび引張変形特性, 平成 14 年度応用地質学会講演論文集, pp.273-274, 2002.
- 27) Yu, X., Da Gama, C. D., Na, Y., Wang, Q. and Xie, Q.: Deformation behavior of rocks under compression and direct tension, *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, 105, pp.55-62, 2005.
- 28) 林為人, 高橋学, 藤井幸泰, 竹村貴人: 一軸引張り状態における花崗岩質岩石の破壊後の残留ひずみ, 第 12 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.531-534, 2008.
- 29) 福井勝則, 金豊年, 大久保誠介: 一軸引張荷重下での岩石の完全応力-歪曲線, 資源と素材, 111, pp.25-29, 1995.
- 30) Bemaix, J.: New laboratory methods of studying the mechanical properties of rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 6, pp.43-90, 1969.
- 31) 川越健, 浦越拓野, 太田岳洋, 長谷川淳, 木谷日出男: 落石発生時に剥離する面の引張強さに関する検討, 第 12 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 2008.
- 32) Hawkes, I. Mellor, M. and Garipey, S.: Deformation of Rocks under Uniaxial Tension, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 10, pp.493-507, 1973.
- 33) 福井勝則, 大久保誠介, 清水剛: 一軸引張荷重下での岩石の除荷・載荷試験, 第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.25-30, 1998.
- 34) 及川寧己, 山口勉, 福井勝則, 大久保誠介: 周圧下における岩石の引張試験, 第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.785-790, 1998.
- 35) Pande, P. and Singh, D.P.: Deformation of a Rock in Different Tensile Tests, *Eng. Geol.*, 22, pp.281-292, 1986.
- 36) Okubo, S., Fukui, K. and Qi, Q.: Uniaxial compression and tension tests of anthracite and loading rate dependence of peak strength, *Int. J. Coal Geol.*, 68, pp.196-204, 2006.

BIBLIOGRAPHIC SURVEY ON BOTH THE INTERPRETATION AND THE USAGE OF RESULTS OBTAINED FROM DIRECT TENSION TEST FOR ROCKS

Yasuki OIKAWA, Kimitoshi HAYANO and Keisuke SHIMAMOTO

For standardization of direct tension tests (DTT) for rocks, bibliographic survey was conducted focusing on both the interpretation and the usage of the test results. Three factors those are water content, loading rate and anisotropy affect tensile strengths very much, especially water content and anisotropy significantly affect tensile strengths and some technical papers reported over 50% of strength decrease. Relationship of tensile strengths and Young's moduli were analyzed and Young's modulus is found to be generally proportional to the tensile strength. Comparison of DTT and Brazilian tests reveals that in most cases Brazilian tests showed higher strengths, however, on some soft rocks, DTT showed higher strength.