

中空円筒供試体の内圧载荷による引張り試験

Tensile Test Using Hollow Cylindrical Specimen by Internal Hydraulic Pressure

高橋康裕* ・ 大岡政雄** ・ 船戸明雄**

Yasuhiro TAKAHASHI, Ohoka MASAO and Akio FUNATO

It is well known that the mechanical properties of soft rock are strongly influenced by the pore water. Tensile test using hollow cylindrical specimen is suitable for evaluating such properties under controlled conditions of the pore water. The authors tried to apply this test for the tertiary Tuff, and got satisfactory results as follow ;

- Typical tensile failure modes are observed in any specimens.
- According to increase the confining pressure, stress-strain curves appear nonlinear behaviors and failure strains increase.
- Tensile strengths seem to be constant regardless of confining pressure.

1. はじめに

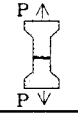
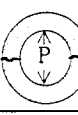
軟岩の力学的挙動については間隙水が大きな影響を与えることが知られており、三軸圧縮試験など多くの室内試験では、供試体の飽和度、排水条件が厳密にコントロールされている。しかし、引張り強度を求める場合に一般的に適用されている圧裂引張り試験においては、飽和度、排水条件をコントロールすることは無理である。

引張り強度を求めるための主な試験法を表-1に示す。

このなかで、内圧引張り試験は、排水条件や飽和度を制御できること、背圧を加えられること、また間隙水圧を測定できることなど、軟岩の引張り強度を求める試験としては優れている。しかし、試験方法や装置が複雑になることなどにより、内圧式引張り試験で軟岩の引張り強度を測定した例は少ない。

著者らは、飽和、非排水条件下における軟岩の引張り応力側の力学特性に関する基礎的なデータを得るため、内圧引張り試験装置を作成し、中空円筒供試体を用いて引張り試験を実施した。

表-1 主な引張り試験法

試験名	供試体形状	特 徴
圧裂試験		• 間接的に引張り応力を測定 • 成形が容易 • 載荷点に応力集中が発生する
直接引張り試験		• 直接引張り応力を測定 • 供試体作成が困難 • 供試体の端部で応力集中が起りやすい
内圧引張り試験		• 間接的に引張り応力を測定 • 供試体の成形が比較的容易 • 飽和度、排水条件を制御可能

* 正会員 東京電力株式会社

** 正会員 応用地質株式会社 コアラボ 岩盤物性部

2. 内圧引張り試験の概要

2.1 载荷圧力と引張り応力の関係

中空円筒供試体を σ_3 の等方圧で圧密した後、内圧を P だけ増加した時の供試体の中心から r の位置に発生する円周方向と半径方向の応力 σ_θ 、 σ_r は、厚肉円筒理論より次式で導かれる。ただし、引張り側を正とする。

$$\sigma_\theta = \frac{(r_o^2 + r^2)r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2)r^2} P - \sigma_3 \quad \text{---(1)}$$

$$\sigma_r = -\frac{(r_o^2 - r^2)r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2)r^2} P - \sigma_3 \quad \text{---(2)}$$

r_i : 内半径 r_o : 外半径

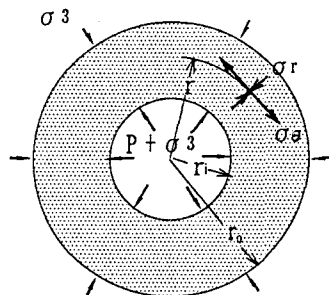


図-2 圧肉円筒断面図

2.2 供試体の物性及び形状

本試験には、小さな礫を混入する第三紀の凝灰岩を用いた。試料はA、Bの2地点から $\phi 120\text{mm}$ のボーリングコアとして採取し、比較的均質な部分を選んで供試体を作成した。表-2に本試験に用いた凝灰岩の物性を示す。

表-2 凝灰岩の物性

	A地点	B地点
湿潤密度 g/cm^3	2.10	2.19
有効間隙率 %	38.2	33.4
含水比 %	20.2	16.8
圧裂引張り強度 kgf/cm^2	6.11	6.85

試験装置を作成するにあたり、円筒の肉厚について検討した。 $2r_i = 1, 3, 6, 9\text{cm}$ ($2r_o = 12\text{cm}$) とすると、 $\sigma_3 = 1\text{kgf/cm}^2$ 、 $P = 9\text{kgf/cm}^2$ を負荷した時の応力状態は図-3のようになる。 r_i が小さい場合、引張り応力が生じるのは内縁近傍のみで、内縁近傍にクラックが生じたとしても、外縁まで達しないケースが考えられる。また、 r_i が大きい場合、内縁と外縁の引張り応力の差は小さいものの、成形時に供試体を乱してしまうおそれがある。以上のことから、 $r_i/r_o = 0.5$ の内半径 3cm で供試体を作成した。

供試体高さは過去の事例^{(1)~(3)}や歪みゲージを貼る際の作業性を考慮し、直径と同様の 12cm とした。

2.3 試験装置及び試験条件

試験には軸変位と内圧を油圧サーボシステムにより制御可能な三軸試験機を用いた。試験装置の概要を図-4に示す。

内圧はサーボ制御によって制御すると同時に、微量体積計

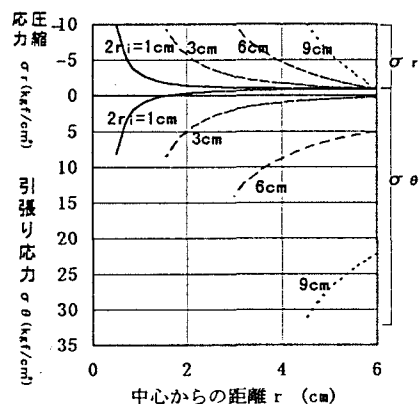


図-3 中空円筒供試体の応力状態

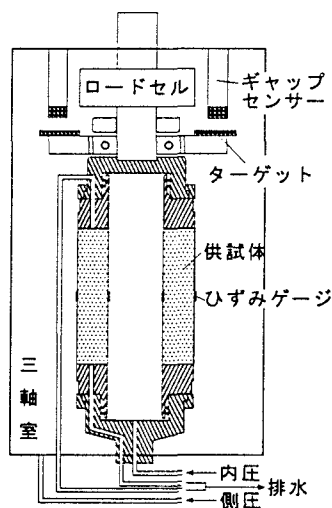


図-4 内圧引張り試験装置

を介し破壊直前まで流入量を計測した。軸変位と軸荷重は三軸セル内で計測し、引張りひずみは供試体の内縁及び外縁の円周方向に沿って120° 間隔の三カ所づつにひずみゲージを貼りつけて計測した。なお、圧密促進のため供試体外縁と内縁にろ紙を巻くとともに、供試体端面とキャップ及びペDESTALとの摩擦の軽減のため、それぞれの間にテフロンシートを挟んだ。

主な試験条件は以下の通りである。

- ①排水条件は $\overline{CU}$ とした。
- ②水通しと背圧負荷によって供試体の飽和度を高め、所定の圧力で等方圧密をした。
- ③圧密圧力は1、4、8 kgf/cm²、背圧は2 kgf/cm²とした。
- ④拘束圧と軸変位を一定に保ち、内圧を一定の割合で供試体が破壊するまで徐々に増加させた。

3. 試験結果

3.1 供試体の破壊形式

内圧引張り試験の場合、脆性的な材料では図-5 (a)の様に単純引張り破壊となる一方、土の様な塑性材料の場合には、図-5 (b)の様なすべり線を伴うせん断破壊になる⁴⁾。しかし、今回の試験については、試験後の供試体を観察すると、どの拘束圧においても明瞭な引張り破断面を有し、すべり線は生じていない。その破断面は半径方向に円筒軸とほぼ平行であった（写真）。また、破壊時には供試体の破壊音が聞き取られ、内縁でクラックを生じると瞬時に外縁までクラックが進展したものと考えられる。

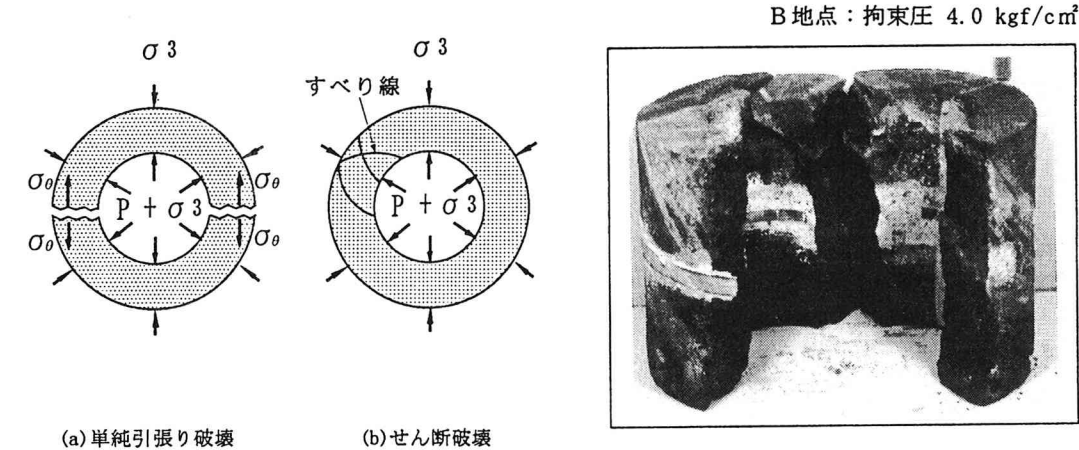


図-5 厚肉円筒供試体の破壊の模式図

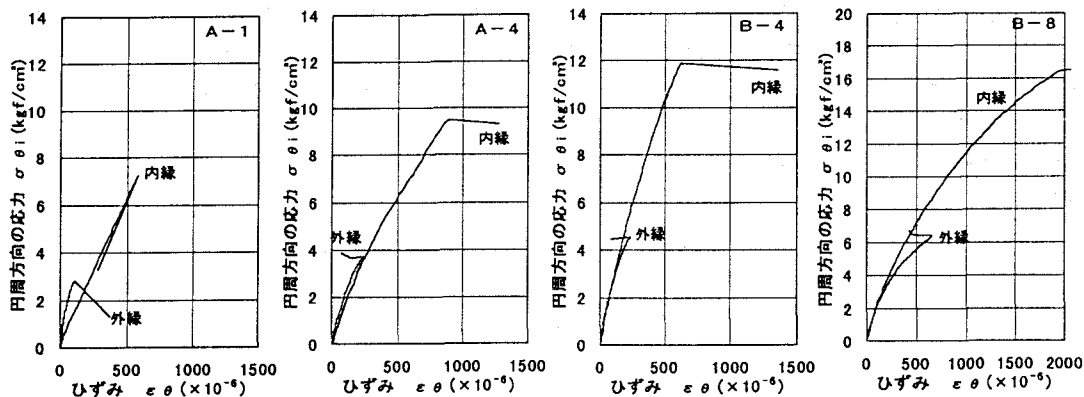
写真 単純引張り破壊が生じた供試体

3.2 変形特性

図-6 に応力-ひずみ曲線の関係を示す。内縁、外縁の引張り応力 $\sigma_{\theta i}$ 、 $\sigma_{\theta o}$ は(1)式において $r=r_i$ 、 r_o として求め、引張りひずみ ϵ_{θ} は、内縁、外縁それぞれ三カ所に貼ったひずみゲージの平均値とした。また、 $\sigma_{\theta i}$ 、 $\sigma_{\theta o}$ 及び ϵ_{θ} は圧密終了時をゼロとし、それから内圧を増加させたときの値とした。

結果を要約すると以下の通りである。

- ①応力-ひずみ曲線は、拘束圧が高くなるとややカーブを帯びる。このことから、拘束圧が低いほど破壊は脆性的であることが推測できる。
- ②図-6 (a)を除き、内縁と外縁の応力-ひずみ曲線はひずみが小さい線形弾性領域では重なっており、内



(a) A地点 拘束圧 1 kgf/cm² (b) A地点 拘束圧 4 kgf/cm² (c) B地点 拘束圧 4 kgf/cm² (d) B地点 拘束圧 8 kgf/cm²

図-6 応力-ひずみ曲線

縁と外縁においてはほぼ弾性論通りの変形挙動を示していることがうかがえる。図-6(a)の内縁と外縁の応力-ひずみ曲線が異なるのは、図-7に示す様に個々のひずみゲージの挙動が大きくばらついていることなどから、供試体の不均質性によるものと判断される。

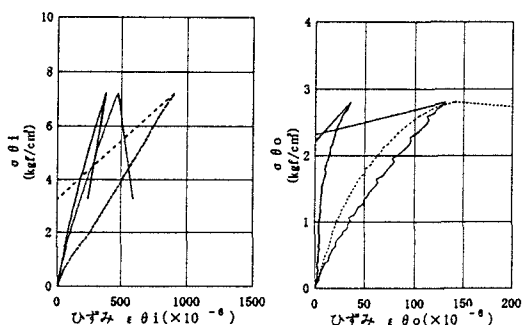
③拘束圧が高くなると、引張りひずみの増加がみられる。これは拘束圧が高いほど内縁に発生したクラックの進展が抑制されることや、拘束圧の増加に従い塑性的性質が徐々に表われてせん断破壊に移行していくことによるものと推測される。

④図-8に示す様に間隙水圧は内圧の増加に伴って上昇し、破壊点または破壊点の手前で最大値を示している。

3.3 強度特性

図-9に今回の試験で得られた破壊時のモールの応力円と圧裂試験によるモールの応力円を比較して示す。

それによると、内圧引張り強度は圧裂引張り強度の約0.9~1.2倍程度で、両者の応力状態が大きく異なるものの、比較的よく一致している。また、内圧引張り強度は拘束圧の大小の影響を受けていないことがうかがえる。



(a) 内縁

(b) 外縁

図-7 個々のひずみゲージの応力-ひずみ曲線

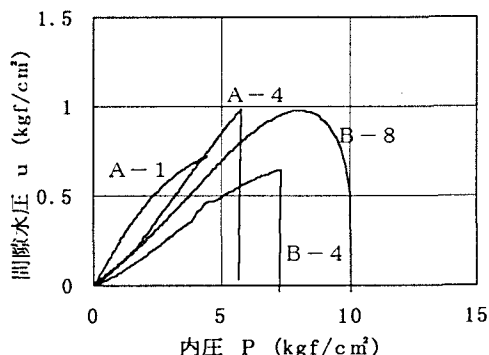
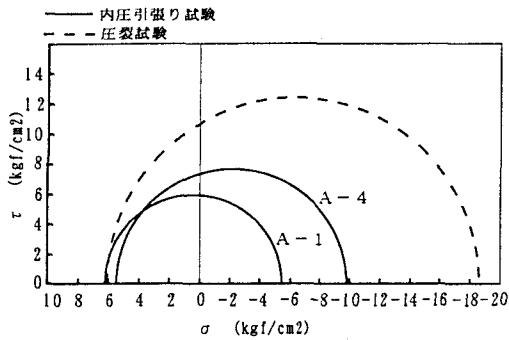
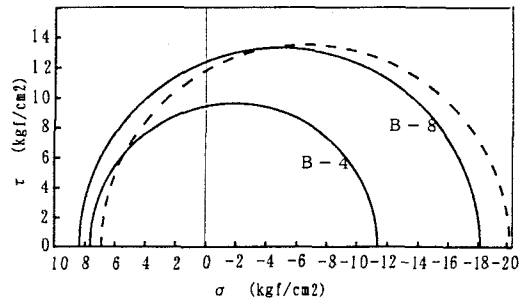


図-8 内圧と間隙水圧の関係



(a) A地点



(b) B地点

図-9 内圧引張り試験結果

4. まとめ

凝灰岩を用いて内圧引張り試験を実施し、以下の知見を得た。

- ①供試体は、どの拘束圧でも明瞭な破断面をもち単純引張り状態で破壊している。
- ②均一な材料の場合、ひずみが小さい線形弾性領域では、内縁と外縁においては弾性論通りの変形挙動を示し、拘束圧が増加するに従って応力-ひずみ曲線は非線形的となる。
- ③拘束圧の増加に従い破壊ひずみも増加する。
- ④内圧引張り強度は、拘束圧の影響はみられず、圧裂引張り強度と比較的一致する。

今後の課題として、他の岩種でも内圧式引張り試験を実施し、適用範囲を確認していくことが重要である。また、排水条件、飽和度、円筒の肉厚の違いが強度・変形特性にどのような影響を与えるかについても検討を行ってきたい。

5. 参考文献

- 1) 西村慎一・清水英良・仲野良紀：火山灰粘土質ロームの圧縮及び引張の力学的特性に関する実験的研究，農業土木学会論文集，No. 179, PP. 1～8, 1995. 10
- 2) D. R. Schmitt & M. D. Zoback: Laboratory tests of effects of pore pressure on tensile failure., Rock at great depth., Maury and Fourmaintrux (eds)., Key questions in rock mechanics. Balkema, Rotterdam, 67-74, 1989.
- 3) M. L. Talesnick, M. Y. Lee and B. C. Haimson: On the determination of elastic parameters of transverse isotropic rocks from a single test specimen., Rock Mech. and Rock Engng. 28(1), pp17～35, 1995.
- 4) 福島信二・石井武美：土の中空供試体を用いた引張り試験機の適用性，土と基礎，33-12(335) pp. 27～ 33, 1985. 2.