論文

登別溶結凝灰岩の力学的挙動に与える 間隙流体圧とひずみ速度の影響*

後 藤 龍 彦¹ 児 玉 淳 一²
吉 田 豊³ 板 倉 賢 一⁴

Influence of Pore Fluid Pressure and Strain Rate on Mechanical Behavior of Noboribetsu Welded Tuff

by Tatsuhiko GOTO¹, Jun-ichi KODAMA¹
Yutaka YOSHIDA¹ and Ken-ichi ITAKURA¹

1. Muroran Institute of Technology, Mizumoto-cho, Muroran 050

In order to investigate the effects of pore fluid pressure and strain rate on mechanical behavior of rocks under stress, laboratory experiments were carried out using the porous specimens of Noboribetsu Welded Tuff. In this study triaxial compression tests with a conventional hydraulic testing machine were conducted for two types of the welded tuff specimens, which have different physical properties, confined pore water pressure or pore gas pressure under the strain rate from 10^{-5} /sec to 10^{-3} /sec. From the stress-strain curves determined under these conditions, following results were obtained:

The effective confining pressure law which was confirmed based on fracture and deformation behaviors in the region of pre-failure on the stress-strain curves was valid for two types of the welded tuff specimens under the strain rate ranging from 10^{-5} /sec to 10^{-3} /sec.

In pore fluid pressure tests, the increase of the strain rate affected the deformation behavior of the post-failure region in the stress-strain curve under the low effective confining pressure.

KEY WORDS : Noboribetsu Welded Tuff, Confining Pressure, Pore Fluid Pressure, Strain Rate, Effective Confining Pressure Law

1. 緒 言

地下に存在する岩石の空隙内には、水やガス等の流体が含まれている場合が多く、これらの存在により、その力学的挙動も異なる。Handin ら¹⁾によると比較的空隙率、浸透率の大きい岩石は有効封圧の法則に従うと言われている。

筆者らも岩石や石炭を対象に、空隙流体として水やガスを使用し、封圧および空隙流体圧試験を行い、有効封圧の法則が成立するか否かを検討してきた²⁾⁻⁴⁾。その結果有効封圧の法則に従うか否かは、供試体の持つ空隙率や浸透率の物理的性質、空隙流体の特性ならびに軸ひずみ速度が大きく影響することが分かった。また有効封圧の法則におよぼす軸ひずみ速度の影響に関し、Brace ら⁵⁾は強度を対象に検討し、臨界ひずみ速度の存在を指摘している。

ここでは主に比較的空隙率や浸透率の大きな2種の登別溶結凝灰岩を用い、軸ひずみ速度を 10^{-5} /sec から 10^{-3} /sec の範囲内で変化させ、封圧および空隙水圧、空隙ガス圧試験を実施した。

得られた差応力～軸ひずみ曲線を基に、pre-failure 域の変形と強度に着目し、各試験条件下で有効封圧の法則の適応性を検討した。また post-failure 域の変形挙動に関しても若干の考察を試みた。

その結果本実験条件下での軸ひずみ速度範囲内では、空隙流体の種類に関係なく、ほぼ有効封圧の法則の成り立つことや、特に空隙流体圧試験では、最大差応力点以降の差応力低下量が軸ひずみ速度に影響されること等の実験的傾向が得られたので報告する。

2. 試 験 装 置

図1は本試験に使用した封圧および空隙水圧、空隙ガス圧試験装置の概略を示したものである。装置は供試体に軸圧を負荷する材料試験機と封圧および空隙流体圧を加える封圧、空隙圧発生装置から構成されている。材料試験機の容量は100 tf、試験機剛性は約 2×10^7 N/m である。サーボコントロール機能を装備しているため、荷重速度や軸ひずみ速度の制御が可能である。封圧発生装置の最大容量は100 MPaで、サーボ制御のため、設定圧を常に一定に維持できる。空隙水圧発生装置の容量は100 MPaであり、封圧発生装置と同様に、設定空隙水圧を試験中一定の値に制御できる。なおサーボ制御用空隙水圧計は供試体の下部エンドピース側にのみ存在しており、試験中ほとんど変化は認められず、この位置での空隙水圧は供試体の変形に追従できたものと考えられる。一方、空隙ガス圧発生装置の最大容量は50 MPaで、単

* 1996年8月2日受付 1997年1月13日受理

1. 正会員 工博 室蘭工業大学助教授 工学部材料物性工学科

2. 正会員 工博 室蘭工業大学助手 工学部材料物性工学科

3. 正会員 工博 室蘭工業大学助教授 工学部応用化学科

4. 正会員 工博 室蘭工業大学助教授 工学部情報工学科

〔著者連絡先〕 FAX 0143-47-3193 (室工大・材料物性)

キーワード：登別溶結凝灰岩、封圧、空隙流体圧、ひずみ速度、有効封圧の法則

図1 間隙圧零および間隙流体圧試験装置の概略図

る増圧器である。そのため試験中ガス圧を一定に制御できないが、試験時におけるガス圧の変動範囲はすべて設定間隙ガス圧の数%以内であった。なお本試験では窒素ガスを使用した。

荷重はロードセル、変位はラムストロークから検出し、供試体の差応力～軸ひずみ曲線をレコダ上記録した。

3. 供 試 体

一辺が30 cm程度の2種の登別溶結凝灰岩のブロックから、方向を規定し、ボーリングマシンにより、直径約30 mmのコアを抜き取った。それを長さ約60 mmに切断し、表面研削盤で端面精度 $\pm 2/100$ mm以内に仕上げたものを供試体として使用した。整形した供試体は110℃で24時間炉乾燥後、デシケータ内に保存した。

本実験においては、封圧試験および間隙水圧、間隙ガス圧試験

を実施したが、封圧試験は間隙流体圧が零の場合であり、以下では封圧試験を間隙圧零試験と呼ぶことにする。間隙圧零試験と間隙ガス圧試験用の供試体はよく乾燥させてから、両端にエンドピースを取り付け、封圧流体の流入を防ぐため、周囲を生ゴム、シリコンゴムで被覆した。間隙水圧試験用は供試体の完全含水飽和を目的に、重量変化がなくなるまで数日間、水中で真空脱気したものを被覆した。なお間隙流体圧試験用供試体の下部エンドピースの中央には直径2 mmの細孔があり、そこから間隙水圧、間隙ガス圧を供試体に負荷する。本装置では下部エンドピースから負荷された間隙流体圧を上部エンドピースで計測できる機構にはなっておらず、したがって供試体の下部から負荷された間隙流体圧がどの程度供試体内に飽和されているかについては不明である。

表1は実験に供した2種の登別溶結凝灰岩(A)、(B)の真比重、見かけ比重、空隙率、浸透率を示している。浸透率は封圧の大きさ等に依存すると考えられるが、ここでは磯部ら⁶⁾の計測方法を採用し、それぞれ水および窒素ガスに対する値をオーダのみ、参考として記載した。登別溶結凝灰岩(A)は(B)に比べ、空隙率、浸透率がともに小さい。また登別溶結凝灰岩(B)では浸透流体として、窒素ガスを用いた場合の方が水の場合より、3オーダ程度浸透率が大きくなっており、これは分子半径の相違等によるものと考えられる。

なお過去に行った、凝灰岩(A)の軸ひずみ速度 $6 \times 10^{-5}/\text{sec}$ での間隙水圧試験ならびに凝灰岩(B)の軸ひずみ速度 $1.4 \times 10^{-4}/\text{sec}$ での間隙ガス圧試験結果によると、この条件下で有効封圧の法則が適用できたことを付記しておく²⁾⁴⁾。

4. 試 験 結 果

ここでは間隙圧零および間隙水圧、ガス圧試験で得られた、差応力～軸ひずみ曲線の結果を、各軸ひずみ速度ごとに示す。表2に、試験実施項目を示す。登別溶結凝灰岩(A)では、軸ひずみ速度 $6 \times 10^{-5}/\text{sec}$ および $1.4 \times 10^{-3}/\text{sec}$ で間隙圧零、間隙水圧試験、登別溶結凝灰岩(B)に対しては、軸ひずみ速度 $6 \times 10^{-4}/\text{sec}$ と $6 \times 10^{-3}/\text{sec}$ で間隙圧零、間隙水圧試験および軸ひずみ速度 $1.4 \times 10^{-4}/\text{sec}$ 、 $6 \times 10^{-3}/\text{sec}$ の条件下で間隙圧零、間隙ガス圧試験を行った。なお間隙圧零試験の載荷は封圧、軸圧の順であり、間隙水圧およびガス圧試験では封圧、間隙流体圧、軸圧の順

表1 実験に供した登別溶結凝灰岩(A)、(B)の物理的性質

Specimen	property	True specific gravity	Apparent specific gravity	Porosity (%)	Permeability (darcy)
NOBORIBETSU welded tuff (A)		2.68	2.12	20.90	10^{-8} (water)
NOBORIBETSU welded tuff (B)		2.66	2.08	21.08	10^{-6} (water) 10^{-3} (gas)

表2 各供試体に負荷した軸ひずみ速度と試験項目

Specimen	Contents of experiment	Axial strain rate (1/sec)	Confining pressure (MPa)	Pore pressure (MPa)
tuff (A)	0 pore pre. pore water	6×10^{-5}	0, 10, 20, 30, 50, 60, 70	0 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70
tuff (A)	0 pore pre. pore water	1.4×10^{-3} 1.4×10^{-3}	0, 10, 20, 40, 50, 60, 70, 80	0 10, 30, 50, 70, 80
tuff (B)	0 pore pre. pore water	6×10^{-4} 6×10^{-4}	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80	0 0, 10, 20, 40, 50, 60, 70, 80
tuff (B)	0 pore pre. pore water	6×10^{-3} 6×10^{-3}	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80	0 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80
tuff (B)	0 pore pre. pore water	1.4×10^{-4} 1.4×10^{-4}	0, 5, 10, 20, 35, 40, 50	0 5, 10, 20, 25, 30, 35, 40, 45
tuff (B)	0 pore pre. pore water	6×10^{-3} 6×10^{-3}	0, 10, 20, 30, 40, 50	0 10, 20, 30, 40, 50

である。

4・1 凝灰岩(A)に対する間隙圧零、間隙水圧試験

登別溶結凝灰岩(A)を用い2種の軸ひずみ速度で、間隙圧零および間隙水圧試験を行った。

図2は軸ひずみ速度 $6 \times 10^{-5}/\text{sec}$ の場合の間隙圧零試験で得られた差応力～軸ひずみ曲線であり、図の縦軸は差応力、横軸は軸ひずみを表している。図中の数字 P_c は設定封圧の値である。設定封圧の増加に伴い最大差応力点は増加し、変形挙動は脆性から次第に延性へと移行することが分かる。

図2 間隙圧零試験における登別溶結凝灰岩(A)の差応力～軸ひずみ曲線 (軸ひずみ速度: $6 \times 10^{-5}/\text{sec}$, P_c は設定封圧)

図3 登別溶結凝灰岩(A)の間隙水圧試験時の差応力～軸ひずみ曲線 (軸ひずみ速度: $6 \times 10^{-5}/\text{sec}$, P_c は設定封圧で 70 MPa, P_w は設定間隙水圧)

図4 間隙圧零試験における登別溶結凝灰岩(A)の差応力～軸ひずみ曲線 (軸ひずみ速度: $1.4 \times 10^{-3}/\text{sec}$, P_c は設定封圧)

図3は軸ひずみ速度 $6 \times 10^{-5}/\text{sec}$ のときの間隙水圧試験で得られた差応力～軸ひずみ曲線であり、縦軸は差応力、横軸は軸ひずみ、図中の P_w は設定間隙水圧の値である。設定封圧を 70 MPa と統一し、設定間隙水圧を変化させ試験を行った。有効封圧 (設定封圧と設定間隙流体圧との差) の増加に伴い、最大差応力点も増加し、変形挙動も脆性から延性へと徐々に移行する様子が分かる。図2と図3を比較してみると、強度、変形挙動に関しては、おおむね有効封圧の法則に従っているようである。

なおこれ以降の間隙圧零、間隙水圧および間隙ガス圧試験で得

図5 登別溶結凝灰岩(A)の間隙水圧試験時の差応力～軸ひずみ曲線 (軸ひずみ速度: $1.4 \times 10^{-3}/\text{sec}$, P_c は設定封圧で 80 MPa, P_w は設定間隙水圧)

図6 間隙圧零試験における登別溶結凝灰岩(B)の差応力～軸ひずみ曲線 (軸ひずみ速度: $6 \times 10^{-4}/\text{sec}$, P_c は設定封圧)

図7 登別溶結凝灰岩(B)の間隙水圧試験時の差応力～軸ひずみ曲線 (軸ひずみ速度: $6 \times 10^{-4}/\text{sec}$, P_c は設定封圧で 80 MPa, P_w は設定間隙水圧)

られた差応力～軸ひずみ曲線の表示方法は図2および図3と同様であるため、以下では図の説明は省略する。

図4, 5は軸ひずみ速度 $1.4 \times 10^{-3}/\text{sec}$ での間隙圧零および間隙水圧試験結果である。ここでは間隙水圧試験の設定封圧を 80 MPa にした。図4より、この場合も封圧が大きくなるに従い、最大差応力点は増加し、変形も脆性挙動から延性挙動へと規則的に移行している。

一方、図5をみると、有効封圧の増加とともに最大差応力点は増加を示すが、変形挙動に関しては、最大差応力点以降の差応力低下量が抑制され、特に低有効封圧の場合にその傾向が強い。

4・2 凝灰岩(B)に対する間隙圧零、間隙水圧試験

登別溶結凝灰岩(B)に対しては $6 \times 10^{-4}/\text{sec}$ および $6 \times 10^{-3}/\text{sec}$ の軸ひずみ速度条件下で、間隙圧零、間隙水圧試験を行った。

図6, 7は軸ひずみ速度 $6 \times 10^{-4}/\text{sec}$ で行った間隙圧零、間隙水圧試験の結果を示しており、間隙水圧試験の設定封圧は 80 MPa である。両者を比較してみると、設定封圧および有効封圧の増加に伴い、最大差応力点も増加し、変形挙動も脆性から延性へと次第に移行しており、有効封圧の法則に従う傾向を示している。

図8, 9は上記より、1 オード速い、軸ひずみ速度 $6 \times 10^{-3}/\text{sec}$ の条件下で実施した、間隙圧零および間隙水圧試験結果である。図8の差応力～軸ひずみ曲線の pre-failure 域をみると、図

6の結果とよく一致し、有効封圧の法則が適用できる。図9と図8の post-failure 域の変形挙動を比べてみると、差応力低下量に違いが認められ、間隙水圧試験では差応力低下量が抑制される傾向にあり、図9の変形挙動は凝灰岩(A)の図5の結果と比較的によく対応していることが分かる。

4・3 凝灰岩(B)に対する間隙圧零、間隙ガス圧試験

登別溶結凝灰岩(B)を対象に、軸ひずみ速度 $1.4 \times 10^{-4}/\text{sec}$ および $6 \times 10^{-3}/\text{sec}$ の条件下で、それぞれ間隙圧零、間隙ガス圧試験を行った。なお、ここでの試験はすべて設定封圧、設定間隙ガス圧の最大値を 50 MPa の範囲内とし、軸ひずみは 20 % まで計測した。

図10は軸ひずみ速度 $1.4 \times 10^{-4}/\text{sec}$ での間隙圧零試験の結果である。設定封圧の増加に従い、最大差応力点も増加し、変形挙動も脆性から延性へと徐々に移行する様子が分かる。図11は間隙ガス圧試験の結果を示しており、有効封圧の増加に伴い図10とはほぼ一致した挙動が認められる。

図12, 13は軸ひずみ速度 $6 \times 10^{-3}/\text{sec}$ での間隙圧零および間隙ガス圧試験の結果である。図12の間隙圧零試験結果は図10の場合とよく一致している。一方、図12と図13を比べてみると、pre-failure 域での変形挙動と強度に関しては、お互いによく一致しており、有効封圧の法則に従うことが分かる。しかしながら post-failure 域では、この場合も低有効封圧域で若干の相違が認められる。すなわち、間隙ガス圧試験では最大差応力点以降の差

図8 間隙圧零試験における登別溶結凝灰岩(B)の差応力～軸ひずみ曲線 (軸ひずみ速度: $6 \times 10^{-3}/\text{sec}$, P_c は設定封圧)

図10 間隙圧零試験における登別溶結凝灰岩(B)の差応力～軸ひずみ曲線 (軸ひずみ速度: $1.4 \times 10^{-4}/\text{sec}$, P_c は設定封圧)

図12 間隙圧零試験における登別溶結凝灰岩(B)の差応力～軸ひずみ曲線 (軸ひずみ速度: $6 \times 10^{-3}/\text{sec}$, P_c は設定封圧)

図9 登別溶結凝灰岩(B)の間隙水圧試験時の差応力～軸ひずみ曲線 (軸ひずみ速度: $6 \times 10^{-3}/\text{sec}$, P_c は設定封圧で 80 MPa, P_w は設定間隙水圧)

図11 登別溶結凝灰岩(B)の間隙ガス圧試験時の差応力～軸ひずみ曲線 (軸ひずみ速度: $1.4 \times 10^{-4}/\text{sec}$, P_c は設定封圧で 50 MPa, P_g は設定間隙ガス圧)

図13 登別溶結凝灰岩(B)の間隙ガス圧試験時の差応力～軸ひずみ曲線 (軸ひずみ速度: $6 \times 10^{-3}/\text{sec}$, P_c は設定封圧で 50 MPa, P_g は設定間隙ガス圧)

応力低下量が抑制されており、この傾向は間隙流体として水を使用した図 5, 9 の結果と類似している。

このように間隙流体として水と窒素ガスを用い、軸ひずみ速度を変化させ間隙圧零、間隙流体圧試験を行った結果、差応力～軸ひずみ曲線の最大差応力点以前の変形挙動は、両試験で比較的良好一致し、一般に有効封圧の法則が成立する可能性が高いが、軸ひずみ速度が最大差応力点以降の差応力低下量に影響を及ぼす結果が認められた。

5. 有効封圧則の検証と考察

2 種の登別溶結凝灰岩を対象に、間隙流体として水および窒素ガスを使用し、種々の軸ひずみ速度条件下で、間隙圧零、間隙流体圧試験を試みた。ここでは得られた結果を基に、pre-failure 域の変形と強度に関し、それぞれの条件下で、供試体が無効封圧の法則に従うか否かを検討した。また最大差応力点以降の変形挙動についても若干の考察を試みた。

4. で得られた差応力～軸ひずみ曲線から、これらを支配する破壊、変形特性量を定義、比較し、有効封圧の法則に従うかどうかを検討する。特性量としては、破壊前の差応力～軸ひずみ曲線の傾きを表す変形係数、限界ひずみ（最大差応力点での軸ひずみ）、供試体の破断角、強度等が挙げられる。4. で得られた結果をみると、乾燥供試体（間隙圧零および間隙ガス圧試験）は湿潤供試体（間隙水圧試験）に比べ、一般に変形係数が大きく、限界ひずみは小さい傾向が認められるが、僅かな相違のため、ここでは対象から外した。なおこの原因については、湿潤時の供試体の脆弱化によるものと思われる。試験後の供試体観察によると、破壊様式に関しては、脆性挙動を示した供試体には明瞭な破断面の存在が認められたが、延性挙動を示したものは樽状変形が支配的であった。破断角については両試験で大きな相違は得られなかった。

そこで特性量として、強度を抽出し、有効封圧の法則に従うか否かを検討することにした。以下に示す図 14 から図 19 まではこれらの結果であり、図の表示方法はすべて同様である。すなわち、縦軸は有効最大主応力で、最大差応力点の値に有効封圧の値を加えたものである。なお延性挙動を示す場合には、測定最大軸ひずみに対応する差応力の値を採用した。また横軸は有効最小主応力を表し、間隙圧零試験では設定封圧、間隙流体圧試験では有効封圧の値にそれぞれ対応している。図中の白丸印（dry specimen）は間隙圧零試験、黒丸印（wet specimen, gas specimen）は間隙流体圧試験のデータを表している。

図 14 は凝灰岩(A)の軸ひずみ速度 $6 \times 10^{-5}/\text{sec}$ で実施した間隙圧零、間隙水圧試験の結果を示したものであり、両データとも有効最小主応力の増加に伴い有効最大主応力も増加し、よく一致しており、有効封圧の法則に従うことが分かる。

凝灰岩(A)の軸ひずみ速度 $1.4 \times 10^{-3}/\text{sec}$ の間隙圧零、間隙水圧試験の結果を示したのが図 15 である。有効最小主応力 0 MPa で強度に差がみられるが、他のデータは比較的良好一致しており、有効封圧の法則にはほぼ従っているものと判断される。

図 16, 17 は凝灰岩(B)の軸ひずみ速度 $6 \times 10^{-4}/\text{sec}$ と $6 \times 10^{-3}/\text{sec}$ の間隙圧零、間隙水圧試験結果である。図 16 は両データともよい一致が認められ、有効封圧の法則に従うものと思われる。また図 17 は全体的にばらつきはあるものの有効封圧の適用が可能と考えられる。

図 18, 19 は凝灰岩(B)の軸ひずみ速度 $1.4 \times 10^{-4}/\text{sec}$ と $6 \times$

図 14 登別溶結凝灰岩(A)の間隙圧零および間隙水圧試験時の有効最大主応力と最小主応力の関係（軸ひずみ速度： $6 \times 10^{-5}/\text{sec}$ ）

図 15 登別溶結凝灰岩(A)の間隙圧零および間隙水圧試験時の有効最大主応力と最小主応力の関係（軸ひずみ速度： $1.4 \times 10^{-3}/\text{sec}$ ）

図 16 登別溶結凝灰岩(B)の間隙圧零および間隙水圧試験時の有効最大主応力と最小主応力の関係（軸ひずみ速度： $6 \times 10^{-4}/\text{sec}$ ）

図 17 登別溶結凝灰岩(B)の間隙圧零および間隙水圧試験時の有効最大主応力と最小主応力の関係（軸ひずみ速度： $6 \times 10^{-3}/\text{sec}$ ）

図 18 登別溶結凝灰岩(B)の間隙圧零および間隙ガス圧試験時の有効最大主応力と最小主応力の関係（軸ひずみ速度： $1.4 \times 10^{-4}/\text{sec}$ ）

図 19 登別溶結凝灰岩(B)の間隙圧零および間隙ガス圧試験時の有効最大主応力と最小主応力の関係（軸ひずみ速度： $6 \times 10^{-3}/\text{sec}$ ）

$10^{-3}/\text{sec}$ のときの間隙圧零および間隙ガス圧試験結果を示したものである。両図とも間隙圧零試験と間隙ガス圧試験のデータは比較的良好一致しており、有効封圧の法則が成立するものと判断される。

軸ひずみ速度を変化させ、間隙圧零および間隙流体圧試験を行い、有効封圧の法則に適合するか否かを検討した。その結果、pre-failure 域の変形と強度を対象とした場合、本実験の条件範囲内ではほぼすべて有効封圧の法則に従うことが分かり、臨界ひずみ速度の存在は認められなかった。臨界ひずみ速度の存在を調べるためには、より速い軸ひずみ速度条件下での試験が必要と思われる。

有効封圧の法則の成立については、軸ひずみ速度、岩種（浸透率）、間隙流体の性質が大きく関与するものと思われる。以下にこれら3者の関連について考察する。同じ岩種、間隙流体の場合の軸ひずみ速度の影響について考えると、軸ひずみ速度が速くなるに伴い有効封圧の法則に従い難くなる傾向が得られた（図14と15、図16と17参照）。一方、軸ひずみ速度と間隙流体を固定し、岩種による相違を調べてみた。同一軸ひずみ速度でのデータがないので、比較的軸ひずみ速度の近い図15と図17を比べると、浸透率の大きい凝灰岩(B)の方が、軸ひずみ速度が若干速いにもかかわらず、間隙圧零試験との一致性が高いことが分かる。さらに同一岩種、軸ひずみ速度条件下で、間隙流体の性質の違いによる影響をみると、図17と図19から明らかなように、水より粘性係数の小さいガスの方が、有効封圧の法則に従いやすいと判断される。これらより、供試体の浸透率が大きく、間隙流体の粘性係数が小さく、軸ひずみ速度が遅いほど有効封圧の法則に従う可能性が高くなるものと考えられる。

間隙流体圧試験では軸ひずみ速度の相違により、最大差応力点以降の変形挙動に違いが得られた。すなわち、低有効封圧では軸ひずみ速度が大きい場合、延性挙動が卓越し、間隙圧零試験とよい一致が得られなかった。一方軸ひずみ速度が小さい場合には変形は脆性的で、間隙圧零試験との一致が得られた。また高有効封圧では軸ひずみ速度の大きさに関係なく、延性挙動が支配的であり、間隙圧零試験と調和的であった。ここではこれらの相違について、若干の考察を試みる。

最大差応力点以降の変形挙動は供試体内に亀裂が多く発生し、進展する過程であり、その亀裂内への間隙流体圧の移動（ここでは都合上、飽和速度と呼ぶことにする）が大きく関連するものと考えられる。低有効封圧において、軸ひずみ速度より飽和速度が小さい場合には、供試体内の間隙流体圧が減少し、見かけ上有効封圧が増加するため、延性挙動が卓越するものと思われる、これが

軸ひずみ速度が大きいときの結果に対応すると考えられる。また軸ひずみ速度より飽和速度が大きい場合には、間隙流体圧が有効に作用し、変形は脆性的になるものと推察される。一方延性挙動が多くみられる高有効封圧下では、間隙圧零試験の結果とよく一致しており、軸ひずみ速度に対し、飽和速度自体がかなり大きかったためでなかろうかと考えられる。

これらのことは供試体内の亀裂の生成機構や破壊様式と密接な関連を有するものと思われる。本試験においても脆性挙動を示した供試体は、明瞭な破断面の存在が認められるが、延性的に挙動した供試体には樽状の破壊様式が多く観察され、このような違いにも起因するのではないかと考えられる。しかしながら本試験装置では供試体内の間隙流体圧を精確にモニタすることができず、また最大差応力点以降の変形機構を調べるにはより精密な計測とデータの蓄積が必要であり、今後の検討課題としたい。

6. 結 言

浸透率の異なる、2種の登別溶結凝灰岩を対象に、間隙流体として水と窒素ガスを用い、軸ひずみ速度約 $10^{-5}/\text{sec}$ から $10^{-3}/\text{sec}$ の範囲内で、間隙圧零および間隙流体圧試験を実施した。

その結果本実験条件の範囲内で、pre-failure 域の変形と強度に関しては、ほぼ有効封圧の法則が成り立つことが分かった。また間隙流体圧試験では、最大差応力点以降の変形挙動が軸ひずみ速度の大きさに影響される結果が得られた。

謝辞 本実験に当たり、協力して頂いた室蘭工業大学卒業の大学院生と学部生諸氏に感謝申し上げます。

引 用 文 献

- 1) Handin, J., Hager, R. V., Friedman, JR. M. and Feather, J. W. : Bull. Am. Ass. Petrol. Geol., 47, p. 717-755, (1963)
- 2) 後藤龍彦・佐藤干城・深井 哲・入江正幸：日本鉱業会誌, Vol. 89, p. 393-398, (1982)
- 3) 後藤龍彦・佐藤干城・児玉淳一・出口剛太：資源と素材, Vol. 110, p. 667-672, (1994)
- 4) 後藤龍彦・児玉淳一・吉田 豊・板倉賢一：資源と素材, Vol. 112, p. 11-16, (1996)
- 5) Brace, W. F. and Martin, R. J. : Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 5, p. 415-426, (1968)
- 6) 磯部俊郎・樋口澄志・山崎哲生・野原 博：日本鉱業会誌, Vol. 94, p. 845-850, (1978)

■書 評■

稲田善紀 著

岩 盤 工 学

1997年 A5判 215頁 森北出版株式会社 3,200円/税別

土木工学関連の学科に学ぶ学生にとって、その基礎をしっかり学ばなければならないのは例えば三力と呼ばれる構造力学、流体力学、土質力学であろう。また、建設事業においてこのような基礎学力が必要となる仕事は多く、それらが備わっているかどうか就職の決め手となった時代もあった。ところが最近では、社会のすみずみまで情報処理技術が必要になるなど、必要とする知識の多様化と相まって、就職にのぞむ学生に対して企業は上記の基礎学力を期待しなくなったふしがある。また、同時にそのような学問の修得に熱意をもたない学生が増えている。

岩盤工学は固体の力学、流れの力学、粒状体の力学を取り込んだ力学、いいかえれば構造力学、流体力学、土質力学の総合工学とも言えるものであるが、カリキュラムの中で確立されていないので、学生にとって三力よりさらに、興味をもって勉強する者は少ないようである。社会においても、岩盤工学を基礎とする業務に従事する人の数は少ないので、岩盤工学を修得することを望む企業からの声も大きくない。

一方、放射性廃棄物の地下保管は目前に迫った、しかも避けられない課題であるし、クリーンで無尽蔵な地殻エネルギーの抽出への期待も高まっている。また、本書に直接関係するものとしては、岩盤の力学的安定性（高強度、耐久性、耐震性）、遮蔽性（密度の大きい被り）、恒温性（温度調節帯）、経済性（原位置における天然の建材）、その他（運搬経路の短縮、雪害・凍結の回避、景観保持）の天然の恵みを利用する社会施設の建設も増えている。

本書はとくに固体の力学に重点が置かれていて、次の8章からなっている。

1. 岩石の成因と分類
2. 岩石の主な物理的性質
3. 岩盤の力学的挙動の基礎
4. 破壊理論
5. 有限要素法
6. 岩盤の調査と試験
7. トンネルの設計と施工
8. 地山岩盤内の空間利用の動向と課題

これらの各章において、学生が学んでいくときに途中落ちこばれないよう配慮して、簡素な表現でかみ砕いた説明がなされている。岩盤工学を初めて学ぶ学生、岩盤工学に少しでも興味をもっている技術者、とくに岩盤工学が難しいに違いないと敬遠している人たちにとって格好の書である。（山口大学 水田義明）