

岩の室内試験に関する最近の話題

Recent Development on Laboratory Test Methods for Rocks

谷 和 夫 (たに かずお)

横浜国立大学大学院教授 工学研究院

1. はじめに

岩の室内試験に関する最近の話題として特筆すべきは、地盤工学会基準が2000年以降に続々と制定されていることが挙げられる。また、従来は土の室内試験を土質試験と呼んで岩の室内試験と区別する傾向があったが、学会として両者を試験法の上で共通に扱う方針を打ち出したことであろう。試験技術としては本質的な部分は共通であり、両者を峻別する利点はないからである。2章には、新たに制定された試験基準を、土とはほぼ共通のものと岩石に特有なものに分けて紹介する。

室内試験に関して岩石と土の違いは、剛性や強度の差異もさることながら、最も強調されるべき点は、おそらく不連続性や不連続面の影響、引張り強さの存在であろう。3章以降では、まず連続で均質な岩石を対象とした試験を説明し、その次に、岩石の不均質性や不連続性を有する岩石を対象とした試験の最近の動向を紹介する。

2. 最近基準化された岩石の試験方法¹⁾

2.1 一軸圧縮試験と三軸圧縮試験

岩石一般については「一軸圧縮試験(JGS 2521-2000)」に続いて「非圧密非排水(UU)三軸圧縮試験(JGS 2531-2000)」と「圧密排水(CD)三軸圧縮試験(JGS 2534-2002)」が、有効応力原理が成り立つとされる軟岩については「圧密非排水(CUおよび $\bar{C}\bar{U}$)三軸圧縮試験(JGS 2532/2533-2002)」も制定された。これらの基準では、用いる供試体に顕著な不連続面や相対的に大きな礫が含まれることを想定しておらず、基本的に連続で均質な岩石としての力学特性を調べることを目的としている。よって、試料の剛性や強度が高いので変位計測の高精度化と荷重計測の大容量化や、脆性が著しいので載荷枠の剛性増大などの相違を除いて、基本的に土質材料の試験方法と大きく変わることはない。

2.2 一軸・三軸圧縮試験以外の試験

岩石特有の試験についても「岩石の吸水膨張試験方法(JGS 2121-1998)」、「圧裂による岩石の引張り強さ試験方法(JGS 2551-2002)」、「パルス透過法による岩石の超音波速度測定方法(JGS 2110-1998)」が制定された。また、2005年度末にはスレーキング特性を調べる試験方法も制定される。

3. 連続で均質な岩石を対象とした試験

3.1 高温/低温・高圧条件に注目した試験

高温/低温・高圧の厳しい条件下の試験では、セル水の沸騰や凍結、計測機器の耐圧性能や信頼性などが問題となる。高温・高圧条件については、地熱資源や大深度鉱床の開発を目的として、1980年代から200~300度で数十MPa程度に対応する技術が確立している。最近では低温・高圧条件についても、ハイドレートの開発を目的として不凍液を利用することで-20度で数MPa程度にまで対応できるようになっている^{2),3)}。

3.2 引張り強さに注目した試験

円柱形状の岩石供試体の両端を直接に引張って引張り強さを求めようとしても、わずかに作用する曲げモーメント(断面内に作用する引張り応力が非一様となること)の影響により極端に小さな値が得られてしまい非常に難しかった。そのため、圧裂引張り試験により求めることが多かったが、載荷点近傍の応力集中や弾性理論の適用性に対する疑義が問題となり、厳密ではない。

しかし1990年代に入り高強度の接着剤や高性能なユニバーサル・ジョイントが開発され、曲げモーメントを作用させないように軸引張りすることが可能になった。軸荷重の作用方向と供試体の中心軸を完全に一致させることが非常に重要であり、キャップとペダスタルを供試体の側面を基準として両端に正確に接着するための治具が開発された。軟岩に対しては拘束圧の下で軸引張りをする三軸引張り試験が実用化され、三軸伸張破壊や三軸引張り破壊による低い応力レベルにおける軟岩の強度特性が調べられている⁴⁾。

3.3 透水特性に注目した試験

放射性廃棄物の地層処分あるいは二酸化炭素の地中隔離などでは、岩盤中の物質移行を評価することが重要である。地下深部の岩盤中の地下水流速は年間1m以下と小さく、このような遅い流動場における地下水挙動を正確に把握するために、動水勾配が低い条件下で透水係数を正確に計測する技術が開発されている。

割れ目が少ない新第三紀中新統の海成堆積岩の円筒供試体(外径5cm, 内径1cm, 高さ10cm)に放射方向(外向きないし内向き)に通水して、変水位法で計測された透水係数と動水勾配の関係を図-1に示す⁵⁾。透水係数の値は、動水勾配が3以下の範囲で急激に上昇し、その後も動水勾配と共にほぼ線形に緩やかに増加するこ

論文

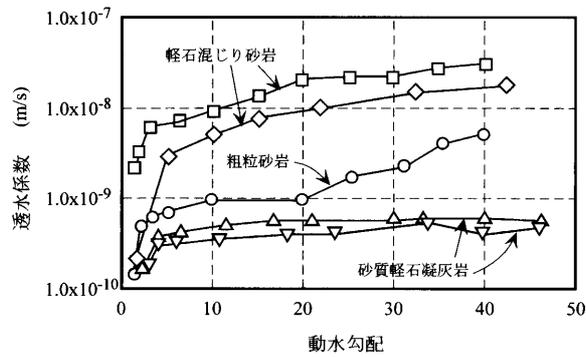


図-1 堆積岩の透水系数と動水勾配の関係 (文献5)を修正)

とが分かる。

4. 不均質な岩石を対象とした試験

不均質な岩石である礫岩を対象とした力学試験において問題となるのは、どの程度の大きさの供試体を用いれば寸法効果の影響がないのかということである。これまで、人工的に造った礫混じり岩、あるいは自然の碎屑性礫岩や火砕性礫岩に対して実験的な検討が数多く行われてきた^{6)~8)}。礫岩の寸法効果に関する実験的研究は、データのばらつきが大きいことその他に、せん断強さや剛性が礫含有率や礫の粒度にも影響を受けるので容易ではないし、三軸圧縮試験により検討する場合には、拘束圧の影響もあるので試験数が増えて労力が非常にかかる。

吉中ら⁶⁾は、新第三紀中新世の火山角礫岩に対して供試体の直径を95 mmから300 mmまで変化させて膨大な量の三軸圧縮試験を行って寸法効果を検討した。図-2は、最大礫径がせん断強さに及ぼす影響を示したもので、横軸は供試体径 D_0 /最大礫径 D_{max} を、縦軸は基準化したせん断強さ q_0 で正規化したせん断強さ q を表している。地盤工学会基準⁹⁾では $D_0/D_{max} \geq 5$ の条件を規定しているが、 D_0/D_{max} が1から3.5の範囲であっても最大礫径の影響をあまり受けていないことが分かる。ただし、礫径が淘汰されていない火山性の礫岩で得られたこのような特性が、淘汰が進んで礫径が比較的均一な碎屑性の礫岩でも見られるかどうかについては検討の要があろう。

5. 不連続面を対象とした試験

5.1 不連続面の発達に注目した試験

潜在的なものも含めて既存の不連続面が岩石の一軸・三軸圧縮試験の結果に及ぼす影響は大きい。そこで、試験結果を合理的に評価するために、せん断の進行に伴って変形の局所化が進行する様子を観察することを目的として、供試体のひずみ分布を計測する技術が開発されている。軸圧縮中に CCD のラインセンサーを用いて供試体の側面に沿って回転させ、異なる2方向からスキャンしたゴム膜上のマーカの3次元座標を三角測量の原理により求める手法である⁹⁾。

既存の不連続面に沿うせん断変形の他にも、引張り破壊による亀裂の発生や進展も岩石の破壊に強く関わって

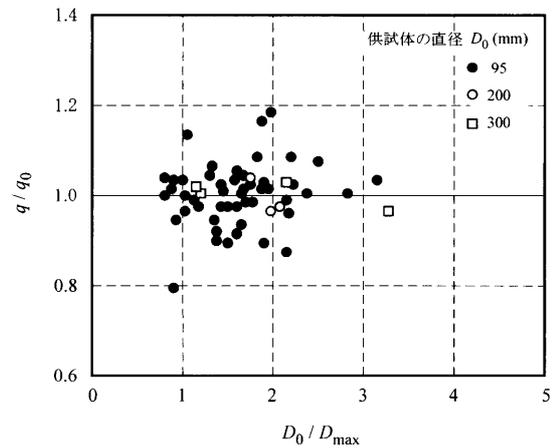


図-2 火山角礫岩のせん断強さに関する寸法効果 (文献6)を修正)

表-1 異なる環境下 (1 kPa) における熊本安山岩一軸圧縮強さと圧裂引張り強さの平均値 (文献3)を修正)

| 環境 | 一軸圧縮強さ q_u (MPa) | 圧裂引張り強さ σ_t (MPa) |
|---------|-----------------------|-----------------------------|
| アルゴン | 130.8 | 14.1 |
| 窒素 | 125.3 | 13.2 |
| 酸素 | 131.7 | 14.0 |
| メタノール蒸気 | 102.7 | 13.1 |
| エタノール蒸気 | 91.7 | 13.0 |
| アセトン蒸気 | 84.5 | 11.6 |
| 水蒸気 | 76.8 | 9.0 |

いる。特に、岩石内の亀裂先端の局所的な引張り応力が引張り強さより小さくても発生する亀裂の進展は、臨界状態に達しない状態で生じる亀裂の成長 (subcritical crack growth) として知られており、クリープ変形やクリープ強さの評価に重要である。この現象は、岩石を構成する主成分である二酸化珪素が水などと反応して結合が切断される応力腐食 (stress corrosion) が原因であると言われており、中央に切り込みを入れた板状試料に曲げ載荷してクラックの進展を計測するダブルトーション (double torsion) 試験により調べられる。尾原ら^{10)~12)}は、密閉されたチャンバーを利用して、このダブルトーション試験の他に一軸圧縮試験や圧裂引張り試験も行い、非大気環境下における応力腐食を詳しく検討している。その結果、応力腐食を最も促進する水蒸気が存在することで安山岩の一軸圧縮強さや圧裂引張り強さは無機ガス環境下に比べて2~4割程度も低下すること (表-1参照)、水蒸気圧と一軸圧縮強さや圧裂引張り強さの両対数関係は線形であること (図-3参照) を示した。また、応力腐食指数は試験方法や試験環境の違いに依存しない材料定数であることも明らかにしている。

5.2 不連続面のせん断・透水特性に注目した試験

これまで不連続面の透水特性は、せん断特性と切り離して検討されることが多かった。しかし、不連続面は弱

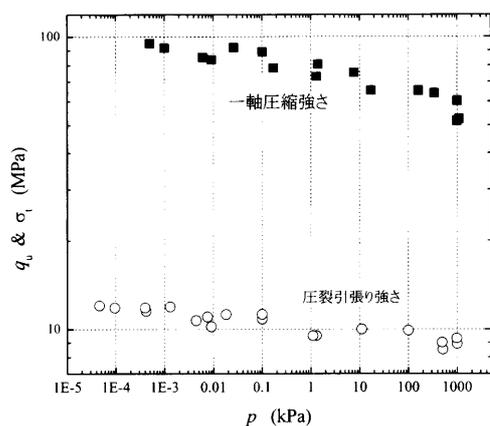


図-3 熊本安山岩の一軸圧縮強さ、圧裂引張り強さと水蒸気圧の関係(文献11)を修正

面であるためにせん断変形を受けやすく、せん断変形を受けた結果、面内にガウジが形成されたり凹凸が削れたりして隙間の接触・開口・連結の状況が変化することで透水特性が劇的に変化する。そこで、せん断変形に伴う透水特性の変化を調べるための試験方法が1990年代より盛んに開発されてきた¹³⁾。

せん断変形の与え方については、不連続面に対して45度の方向から互いに直交する荷重を加える二軸載荷型と、不連続面に平行なせん断変位を与える一面せん断型に分けられる。また、透水特性の調べ方については、不連続面の相対する外縁間に水頭差を与えて平行流を発生させる方法と、不連続面の中央に空けた小孔に注水して放射流を発生させる方法がある。せん断の制御・計測が容易で透水異方性なども評価できるのは、一面せん断型で放射流を与えるタイプの試験装置である。

図-4は、せん断面が100 mm × 120 mmの一面せん断型で放射流を与えるタイプの装置で計測した花崗岩に形成した不連続面の透水係数とせん断変位の関係である¹⁴⁾。せん断強さを発揮するせん断変位は1 mm弱であるが、この時点から3 mm程度の間凹凸部の乗り上げ効果により透水経路が形成されて透水係数が数10倍に増加する。残留状態になると凹凸が磨耗してガウジが生成され、10 mmを超えると透水係数は一定となる。一方、せん断除荷のプロセスではせん断変位が3 mm程度までは載荷時とほぼ同様の透水係数が得られるが、初期状態(0 mm)に戻しても形成された隙間が残るので透水係数は初期の値よりも1桁高いことが分かる。

6. まとめ

試験方法の基準化については、土を対象とした同種の試験方法との統合や調整、あるいは国際整合化が今後の焦点となろう。また、個々の試験方法については、単一の不連続・不均質構造の挙動を解明するためにより高度な計測・制御を迫及した研究開発が継続されるであろう。これらの成果が、将来的に、複数セットの階層的な不連続・不均質構造を反映する岩盤の複雑な挙動のモデル化に結びつくことを期待したい。

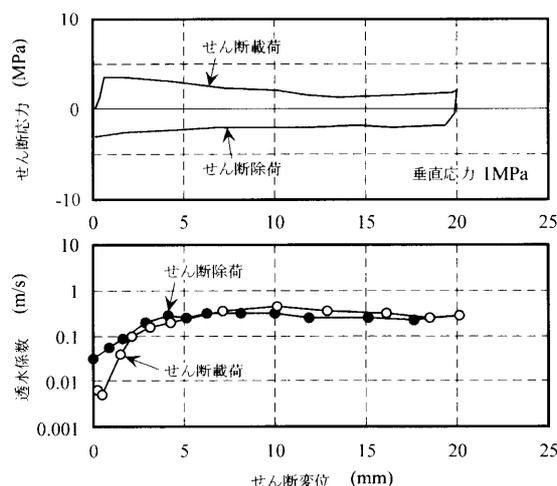


図-4 花崗岩の透水係数とせん断変位の関係(文献14)を修正

参考文献

- 1) 地盤工学会：岩の試験・調査方法の基準・解説書(平成14年度版), p. 359, 2003.
- 2) Winters, W. J., Waite, W., Mason, D. H., Dillon, W. P. and Pecher, I. A.: Sediment properties associated with gas hydrate formation, Proc. 4th Int. Conf. Gas Hydrates, pp. 722~727, 2002.
- 3) Yamabe, T. and Neaupane, K. M.: Determination of some thermo-mechanical properties of Shirahama sandstone under subzero temperature condition, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 38, pp. 1029~1034, 2001.
- 4) Tani, K.: Triaxial extension tests of cemented soils and soft rocks, Proc. 1st Asian Rock Mech. Sym., Vol. 1, pp. 315~320, 1997.
- 5) 佐々木泰・渡辺邦夫・林 為人・細谷真一：新第三紀堆積岩に対する低動水勾配での透水係数に関する一考察, 資源と素材, Vol. 119, pp. 587~592, 2003.
- 6) 吉中龍之進・長田昌彦・五月女敦・杉山弘泰・浜野久美：三軸圧縮試験による火山角礫岩の強度及び変形特性, 土木学会論文集, No. 673/III-54, pp. 85~100, 2001.
- 7) 川崎 了・伊藤 洋・小泉和宏：礫岩コアの寸法効果とサンプリングによる乱れの評価, 応用地質, Vol. 39, No. 4, pp. 391~400, 1998.
- 8) 岡田哲実・野崎隆司・伊藤 洋・中村敏明：礫岩の物性評価に関する研究(その2), 電力中央研究所報告, U02053, 2003.
- 9) Kishi, M. and Tani, K.: Development of measuring method for axial and lateral strain distribution using CCD sensor in triaxial test, Proc. 3rd Int. Sym. on Pref-ailure Deformation of Geomaterials, pp. 31~36, 2003.
- 10) 鄭 海植・尾原祐三：非大気環境下における熊本安山岩の強度特性, 資源と素材, Vol. 118, pp. 599~604, 2002.
- 11) 鄭 海植・尾原祐三・菅原勝彦：水蒸気下の岩石の強度特性, 資源と素材, Vol. 119, pp. 9~16, 2003.
- 12) 尾原祐三・鄭 海植・松山友彦・奈良禎太・金子勝比古：熊本安山岩の応力腐食指数, 資源と素材, Vol. 121, pp. 84~89, 2005.
- 13) 江崎哲郎：岩盤不連続面の力学・透水特性に関する最近の動向, 平成14年度資源・素材秋季大会, A1-1, pp. 1~4, 2002.
- 14) Esaki, T., Du, S., Mitani, K., Ikusada, K. and Jing, L.: Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 36, pp. 641~650, 1999.

(原稿受理 2005.8.21)