

③9 新しい岩盤ブロック試験機を用いた岩盤の透水性測定手法の研究

大成建設(株) 技術研究所 正会員 ○ 下茂道人
正会員 飯星 茂

Study on Permeability Testing Methods using New Rock Block Testing Machine

Michito SHIMO, Taisei Corporation
Shigeru IIHOSHI, Taisei Corporation

Abstract

The new rock block testing machine had been developed. This machine can apply pore pressure up to 5MPa as well as bi-axial stress up to 20MPa on cubic rock block specimen(30×30×30cm). These features enable us to conduct laboratory tests on rock mass properties using boreholes or model tests on the rock mechanical behavior around underground structures under simulated in-situ conditions. This paper describes the structure and performance of the machine and the results of a series of borehole permeability tests using this machine. A rock block specimen of Shirakawa tuff was used for the tests. From these tests, the capability of the machine as a new laboratory testing tool was confirmed and the following results were obtained: (1) permeability obtained by single-hole transient permeability test is compatible with that of cross-hole test, (2) storage coefficient obtained single-hole test is larger by a order than that from cross-hole test, showing the wellbore storage effect, (3) The principal directions of permeability tensor obtained from cross-hole permeability test are identical with those of s-wave velocity.

1. はじめに

燃料油地下貯蔵、圧縮空気貯蔵発電、放射性廃棄物の地層処分などに見られるように、最近の地下空間利用構想は、大深度・大規模・多様化の傾向を示している。また、その一方では、環境問題への関心の高まりと共に、これらの地下構造物の建設、操業にあたっては、構造物の安定性ととも周辺環境、特に地下水流動に与える影響の評価の必要性も再認識されている。岩盤中の地下水流動評価を行う上で最も重要な岩盤物性の一つである透水係数は、岩盤の不均質性のために、数オーダーにわたって分布する事が報告されている。このため、岩盤の巨視的な透水係数の評価においては、サイトにおける局所的な透水係数の分布を考慮する事が必要であり、高透水性域から極低透水性域までを対象とした高精度の透水試験技術の確立が望まれている。最近では、土木の分野で従来用いられてきたルジオン試験やJFT試験の他にもいくつかの新しい原位置透水試験法が提案されているが、試験結果の信頼性や異なる試験法で得られる測定データの関連については未だに十分な検討がなされていない。そこで、筆者らは、岩盤のブロックに応力(二軸)と間隙水圧を与えながら、原位置試験と非常に類似したボーリング孔内透水試験を室内で行える岩盤ブロック試験機を開発した。本報告においては、本試験機の概要とそれを用いた透水試験により得られた知見について述べる。

2. 岩盤ブロック試験機の概要

今回開発した岩盤ブロック試験機の大きな特徴は、ボーリング孔や模擬空洞を設けた岩盤のブロックに荷

重(二軸)を載荷しながら同時に間隙水压を発生させられる事である。このため、明確な境界条件(応力、間隙水压)の基で原位置試験と非常に類似した種々の岩盤特性試験や、地下構造物の小型模型実験を室内で行う事が可能である。本試験機の主な性能をまとめると以下の通りである。①一辺が最大30cmの岩盤ブロックに、水平二方向から最大20MPaの圧縮力載荷が可能である。②最大間隙水压5MPaを発生させる事ができる。③試料の表面や内部に取り付けた各種のセンサーにより岩盤の力学・水理・熱力学的挙動を計測できる。図-1に圧力セルの概観を、図-2に試験機の全体構成図を示す。試験機は、①圧力セル、②載荷装置(フラットジャッキ、加圧盤)、③セル内圧力発生装置、④注水装置(定流量ポンプまたはブースターポンプ、バックシステム等)、⑤計測システム等からなる。圧力セルの水密性は、上蓋とセルの間にある二重のOーリングをボルトで締めつける事により確保される(図-1)。荷重は、油圧フラットジャッキにより、加圧盤を介して試料に伝える。加圧盤の表面には試料との摩擦軽減の目的と試料表面からの水の自由な出入りを保証するために格子状のスリットが切ってある。セル内に取り付けた各種センサーからのケーブルや配管は耐水パッキンを通して外部へ出される。計測データはアンプ、AD変換器を通してパーソナルコンピュータへ送り、ディスプレイ上に図化すると共にディスク内に保存する。

3. 試験内容と方法

図-3に、岩盤ブロック試験機を用いて行った透水試験の概要を示す。試料として用いた岩石は白河凝灰岩(粒子比重2.65、空隙率23%)である。30cm角の立方体試料の中央にはダイヤモンドビットで削孔した $\phi 11\text{mm}$ の注水用ボーリング孔が貫通している。このボーリング孔内の11cmの区間をメカニカルパッカーにより隔離し、これを透水試験区間とする。透水試験時におけるブロック試料内の間隙水压の変化をモニターするために、この注水孔を中心とした半径5cmの円周上に等間隔(45度)に8点、ステンレス性のスタンドパイプ(外径4mm、内径2mm)を埋め込んだ間隙水压測定孔($\phi 7\text{mm} \times 17.5\text{cm}$ 、解放区間5cm)を設けた。間隙水压は、1/16インチのステンレス管でセル外の圧力変換器まで延長して測定した。試験計測システムの検定、パッカーの止水性能試験、配管系の剛性、圧力損失測定など、一連の性能試験を行った後、定圧注水試験、定流量注水試験、回復試験の3種類の透水試験を実施した。図-4に各試験における注水条件の変化を模式図で示す。全ての試験においてセル内水压(すなわち試料内初期間隙水压)は常に2MPaとし、側圧は3MPaに保った。注水压は、0.25、0.5、0.75、1MPaの4種類、注水流量は0.875、1.75、2.625、3.5、5.25cc/minの5種類のもとで実施した。定圧注水試験には、空圧制御式のブースター

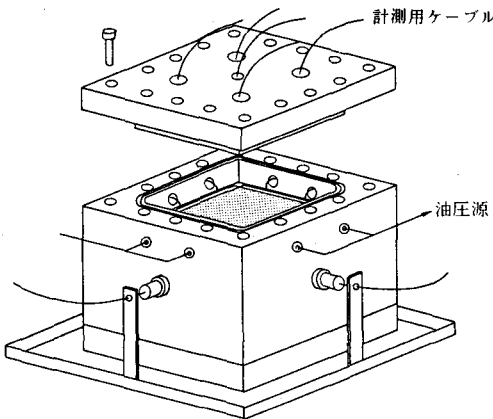


図-1 圧力セル

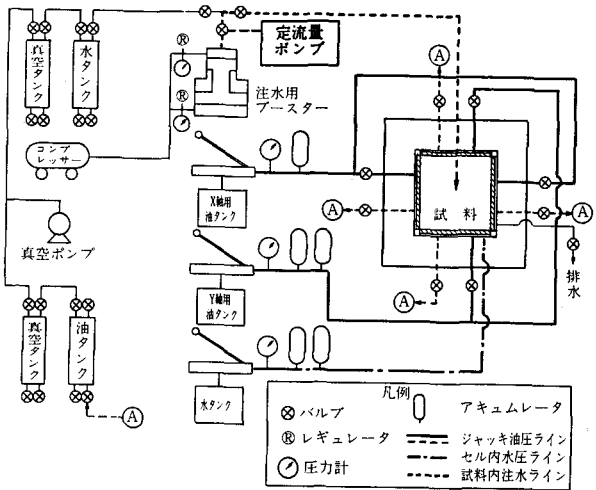


図-2 試験機全体構成図

ポンプを用い、定流量試験には低脈流のダブルプランジャー定流量ポンプ(流量範囲0.005~9.99 cc/min、精度±1%)を用いた。定圧試験における注水量は、変位計(500 μ /mm, 25mm max, 非直線性0.1%RD)により測定したピストンロッド(ϕ 30mm)の移動速度に、ロッドの断面積を乗じて求めた。試験期間中、室温は常に20°Cに保った。セル内の水温変化は、試験時間内(数分~一時間程度)を通じて、0.2°C以下であった。尚、試料の飽和を完全にするために、成型した乾燥試料を、セル内で一週間真空引きした後に、脱気水を注水しながら飽和させるという方法をとった。

4. 試験結果と考察

図-5に、定流量透水試験時の注水区間内圧力および間隙水圧の経時変化の測定例を示す。試料内の間隙水圧は、白河凝灰岩試料を用いた今回の透水試験では、約10秒程度ではば定常状態に至った。各点における間隙水圧は、ボーリング孔から等距離の位置で測定しているにもかかわらず異なる値が得られた。これは、後述のように透水性の異方性を反映している。

以下に、各試験結果をまとめ、考察を加える。

(1) 定常透水試験

図-6に、定圧および定流量透水試験の定常状態における注水圧と注水流量の関係を示す。同図より、注水圧と定常注水量との間には直線関係にある事が分かる。これは、試験が層流条件下で行われた事を示唆するものである。定圧試験と定流量試験の結果が、わずかに異なるのは、両試験における流量測定法の違いによる誤差であると考えられる。図-6の結果より、定常注水試験結果の評価に用いられるMoyeの式(図中に示す)を用いて算定した透水係数は、それぞれ 3.21×10^{-7} cm/s(定圧)、 3.05×10^{-7} cm/s(定流量)であった。

(2) 単一孔非定常透水試験結果

非定常注水試験結果について、まず単一孔試験としての評価を行う。図-7は、定流量注水試験結果をJacob Plot紙上に再整理した例である。5種類の注水量について同様の試験を実施して得られた透水係数及び比貯留係数は、 $k=(1.70 \pm 0.15) \times 10^{-7}$ cm/s、 $S_g=(1.73 \pm 0.21) \times 10^{-7}$ 1/cmであった(土は標準偏差を示す)。

図-8は、回復法試験結果をHorner Plot上に再整理したものである。注水量の異なる5回の試験結果よ

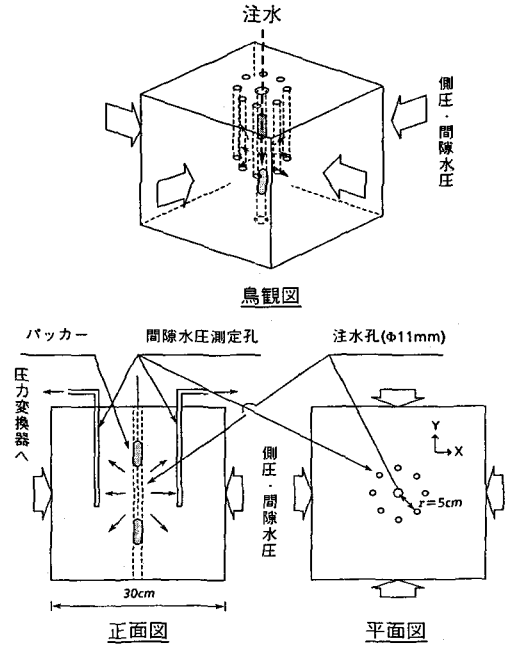


図-3 ブロック試料を用いた透水試験の概要

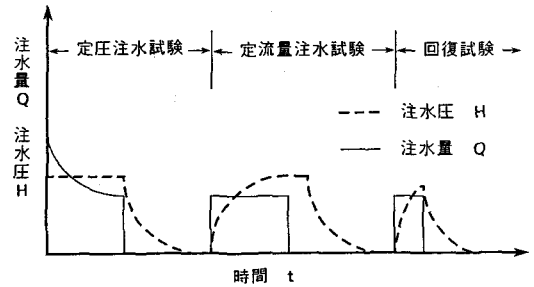


図-4 注水圧、注水流量の変化

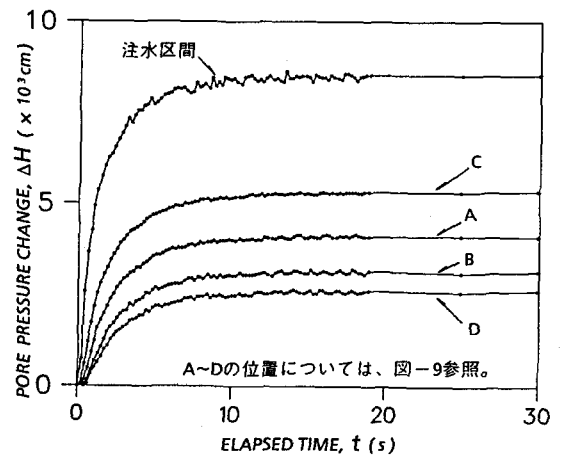


図-5 注水圧、間隙水圧測定結果
[定流量透水試験($Q=3.5$ cc/min)]

り、図中の式を用いて算定した透水係数は、 $k=(1.53 \pm 0.12) \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ であった。

(3) 孔間非定常注水試験結果

単一孔における透水試験では、岩盤は等方な透水係数を有するものと仮定される。今回のように、注水区間周辺の岩盤内の間隙水圧の変化を測定する事により、透水係数の異方性を評価する事ができる。今、ボーリング孔が異方性の一つの主軸に平行に削孔されていると仮定すると(岩石試料は、ボーリング孔が層理面に直交するように成型した。)、注水孔周辺の間隙水圧の経時変化は、次のような式で表される²⁾。

$$\Delta H_D = \frac{4\pi\sqrt{D}}{(Q/l)} = E_i \left(\frac{1}{4t_D} \right) \quad (1)$$

ただし、
$$E_i(u) = \int_u^\infty \frac{1}{s} e^{-s} ds \quad (2)$$

$$t_D = \frac{Dt}{S_g G} = \frac{k_n t}{S_g r^2} \quad (3), \quad D = \sqrt{k_{xx} k_{yy} - k_{xy}^2} \quad (4)$$

$$G = \frac{r^2 D}{k_n} = y_0^2 k_{xx} + x_0^2 k_{yy} - 2x_0 y_0 k_{xy} \quad (5)$$

また、 k_{xx}, k_{yy}, k_{xy} は透水テンソルの各成分、 k_n は注水孔から観測点に向かう方向の透水係数、 x_0, y_0 は間隙水圧観測点の座標、 r は注水孔からの距離である。したがって、横軸に t/r^2 、縦軸に間隙水圧の変化量 ΔH をプロットし、これをタイプカーブ($t_D \sim E_i(1/4t_D)$ 曲線)にフィッティングすると、(1)、(3)式を用いて各観測点毎に $D, S_g/k_n$ が求められる。図-9に、測定データのフィッティング例を示す。本来、上式は無限境界についての式であるが、試験データにおいては、境界の影響が現れ始める時点を確認に読み取る事ができる。よって、それ以前のデータを用いてフィットした。透水テンソルの各成分(k_{xx}, k_{yy}, k_{xy})は、3箇所以上の観測点データを用いて、(4)、(5)式より決定できる。図-9は、今回行った5回の定流量注水試験時における間隙水圧の測定データから最小自乗法により求めた透水テンソルの例である。この結果、透水係数の主値は $k_1 = (2.31 \pm 0.03) \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 、 $k_2 = (1.10 \pm 0.06) \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 、透水性の主軸の方向は x 軸より反時計回りに $\theta = 44.4 \pm 0.6^\circ$ 、また比貯留係数は $S_g = (2.17 \pm 0.08) \times 10^{-8} \text{ 1/cm}$ と求められた。

以上の試験結果について、比較検討する。

孔間試験により得られる等方透水係数は、 $k =$

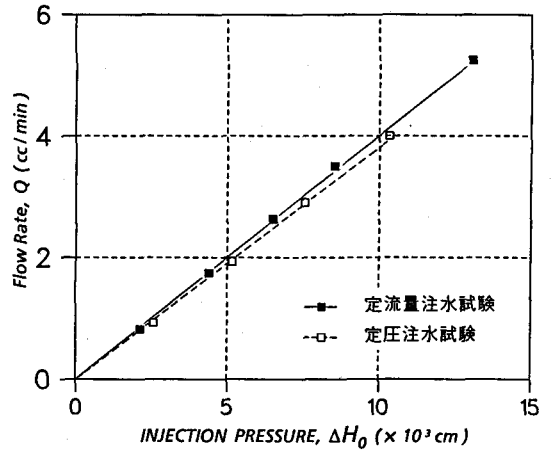


図-6 注水圧と注水流量の関係(定常状態)

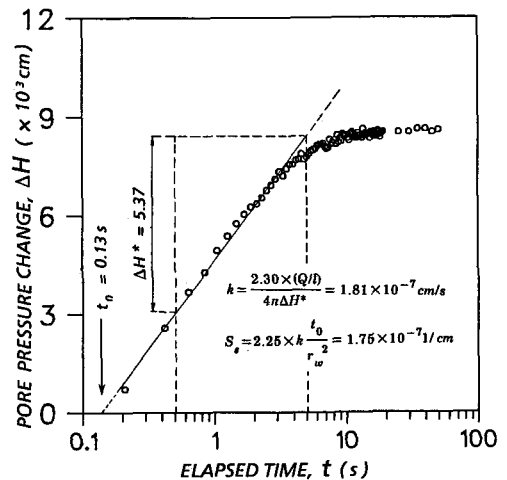


図-7 Jacob Plot(定流量注水試験, 注水区間内圧力)

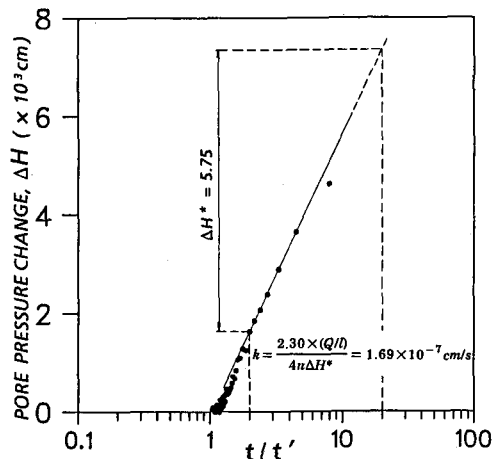


図-8 Horner Plot(回復試験, 注水区間内圧力)

[t, t' : 注水開始後、注水停止後の経過時間(s)]

$\sqrt{k_1 k_2} = 1.59 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ となり、単一孔による非定常透水試験で求められた値と良く一致する。一方、定常試験結果と比べると、2倍程度の違いが見られる。この理由は現時点では明らかではないが、定常試験については、試料表面での圧力境界条件を、数値解析等により正確に考慮する必要があると思われる。

注水圧の変化からJacob-Plotを用いて得られた比貯留係数は、孔間透水試験により得られた値よりも1オーダー近く大きい。これは、注水区間内の水の圧縮や、パッカーや孔壁の変形等による見かけの貯留効果が、注水孔における圧力変化に反映されるためである。よって、岩盤の比貯留係数の正確な評価には、孔間での非定常注水試験が必要である。

図-11は、試料の弾性波速度の測定結果である。飽和試料であるため、ほぼ等方なP波速度($V_p = 3.5 \text{ km/s}$)が得られたが、S波速度は、わずかの異方性を示し($V_{s1} = 1.7 \text{ km/s}$ 、 $V_{s2} = 1.5 \text{ km/s}$)、しかも、その主軸は透水性の主軸と良く一致した。これは、透水性と弾性波速度の異方性の関連を示唆する興味深い結果であり、今後、異なる試料による確認を行いたい。

5. おわりに

新しい岩盤ブロック試験機を用いて、種々の透水試験を試み、試験結果の相互比較を行なった。得られた主な知見をまとめると、以下の通りである。

- ①単一孔の非定常透水試験により得られる透水係数は、孔間試験で得られる透水テンソルから求めた等方透水係数と良く対応する。
- ②単一孔試験で得られる比貯留係数は、井戸の貯留効果により、孔間透水試験で得られる比貯留係数よりも信頼性が低い。
- ③透水性の異方性とS波速度の異方性の間に相関が見られる。

今後、本試験機の三軸化を図ると共に、岩盤の透水性およびその応力依存性の評価手法の開発を目指した試験を行なう予定である。

参考文献

1)下茂、亀村:「測定値における分布を考慮した岩盤の平均透水係数の予測手法について」、第7回岩の力学シンポジウム、1987.12
 2)P.A. Hsieh:Theoretical and Field Studies of Fluid Flow in Fractured Rocks, Ph.D. Dissertation, Univ. of Arizona, 1983

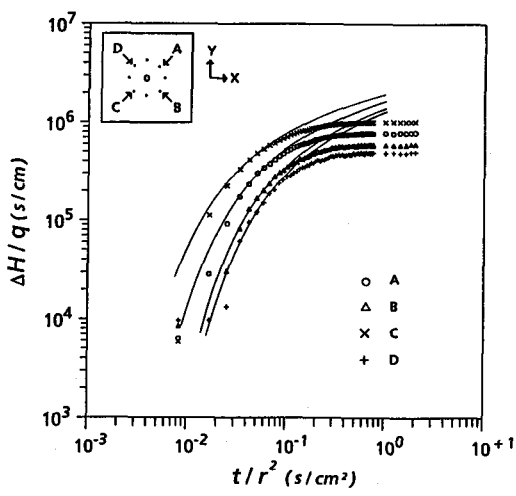


図-9 タイプカーブフィッティング
 [定流量孔間注水試験、 $Q = 3.5 \text{ cc/min}$]

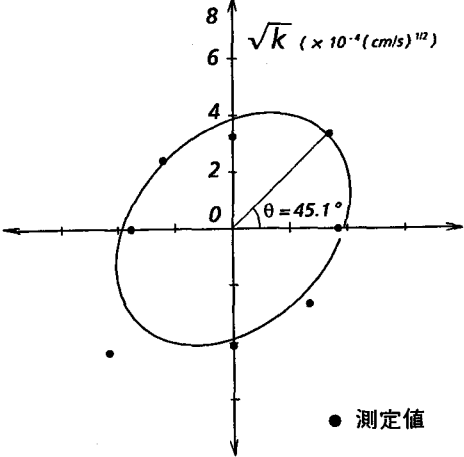


図-10 透水係数テンソル

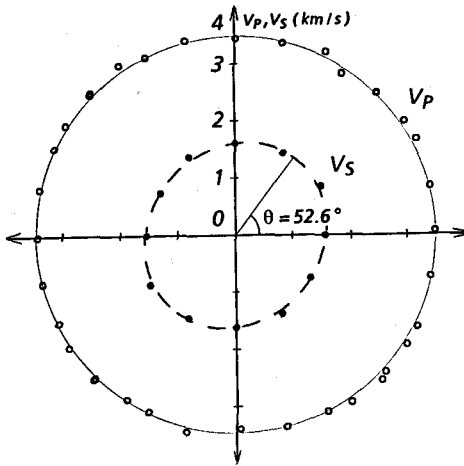


図-11 弾性波速度の方向性