

難透水性岩盤を対象とした透水試験装置の開発

応用地質株式会社 坂田章吉

1. はじめに

難透水性岩盤を対象とした透水試験では、微少な注入量と注入圧力が精度よく測定できる透水試験装置（以下、試験装置と呼ぶ）が必要となる。この要求に応える試験装置を開発した。

この試験装置は、一般の岩盤に対して用いられるルジオンテストと同様にバッカーで区切られた試験区間に水を注入し、岩盤の透水性を調べる装置である。試験装置の特徴は、微少な注入量を精度よく測定するために、注入用タンク、高精度流量計、軟質ゴムを用いたエアバッカーおよび膨張・収縮の少ない硬質ホースを使用していることである。さらに、注入圧力の調整には、注入量の変化に対しても一定の圧力が保持できる高精度レギュレータバルブを使用した。

この試験装置の測定能力を確認するために、難透水性岩盤に掘削したボーリング孔内において、実際に透水試験を実施した。その結果、 $0.01 \text{ cm}^3/\text{min}$ の注入量の測定ができ、 10^{-9} cm/s オーダーの透水係数を測定することができた。

2. 試験装置開発の概要

試験装置開発の流れを図-1に示す。

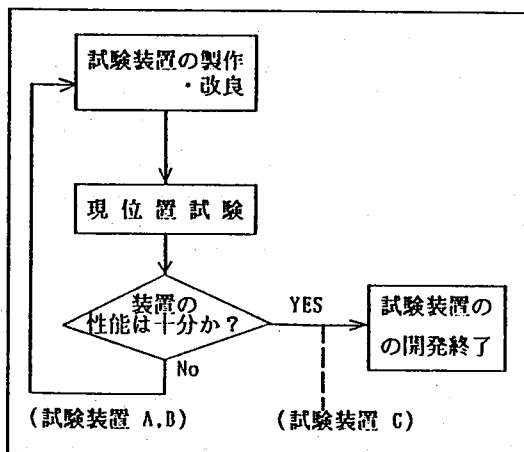


図-1 試験装置開発の流れ

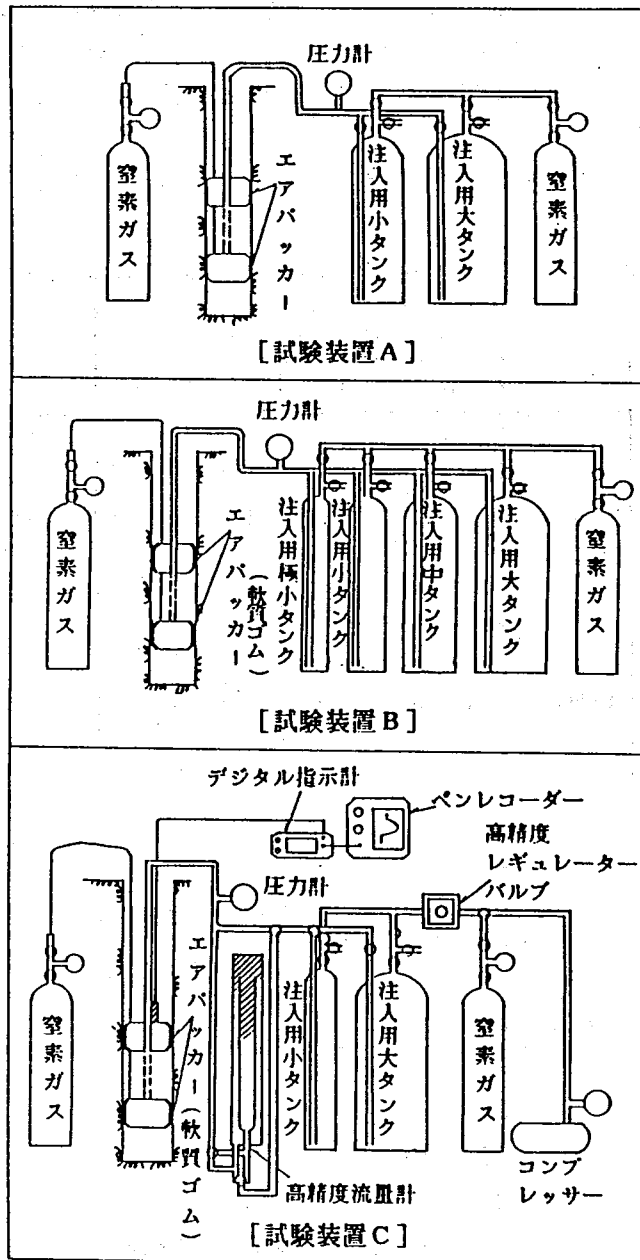


図-2 試験装置概要図

Development of permeability test apparatus for aquiclude like rock bed;
Shoukichi Sakata (OYO Corporation)

最初に試験装置Aを製作し、この装置を用いて透水試験を行った。その結果、明らかになった問題点に対する改良を行い、試験装置Bを製作した。さらに、透水試験を行って再度改良し、最終的に試験装置Cを製作した。試験装置A、B、Cの概要を図-2に示す。各試験装置は、基本的には注入用タンク、注入用タンク加圧装置（窒素ガス・コンプレッサー）、エアパッカー、エアパッカー拡張用窒素ガスボンベから構成される。各試験装置の仕様とそれぞれの透水試験の結果明らかとなった問題点を表-1に示す。

最終的に製作した試験装置Cの特徴は、以下に示すとおりである。

- ①注入圧力測定装置として高精度流量計を使用しているため、 $0.01 \text{ cm}^3/\text{min}$ までの注入量の測定が可能である。
- ②注入圧力の制御および検出のために高精度レギュレータバルブと圧力センサーを用いているため、注入圧力を 0.01 kgf/cm^2 までバラツキなく調整することが可能である。
- ③注入用ホースとして硬質ホースを使用し、圧力を変化させた際のホースの膨張・収縮を最小限に抑えている。
- ④軟質ゴムを用いたパッカーを使用し、孔壁とパッカーとの間の漏水を防止している。

表-1 各試験装置の主な仕様と透水試験により判明した問題点

	試験装置 A		試験装置 B		試験装置 C
	仕様	問題点	仕様	問題点	仕様
注入用タンク	2種類 大タンク 小タンク	$10 \text{ cm}^3/\text{min}$ 以下の注入量を正確に測定することが不可能。	4種類 大タンク 中タンク 小タンク 極小タンク	$0.1 \text{ cm}^3/\text{min}$ 以下の注入量を正確に測定することが不可能。	2種類 大タンク 小タンク
注入用ホース	高圧ゴムホース	圧力の変化により、見かけ上の水の出入りが発生（ただし、試験装置の精度以下）	高圧ゴムホース	圧力の変化により、見かけ上の水の出入りが発生	硬質ホース
注入用タンク加圧装置	窒素ガス	—	窒素ガス	—	窒素ガスとコンプレッサー 高精度レギュレータバルブのガス放出機構に対処するため
パッカー	エアパッカー	パッカーと孔壁との間から漏水が発生	エアパッカー (軟質ゴム)	—	エアパッカー (軟質ゴム)
測定限界	$10^{-7} \text{ cm}^3/\text{s}$ のオーダー	精度不足	$10^{-8} \text{ cm}^3/\text{s}$ のオーダー	精度不足	$10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}$ のオーダー

3. 透水試験

3-1. 透水試験の条件

試験装置A、B、Cそれぞれに対して、測定能力を確認するためにボーリング孔内において透水試験を各10回実施した。各試験において、試験区間長は1.0 m、測定時間は注入量が一定となった後の5分間とした。注入圧力は、一般のルジオンテストにならって段階的に昇圧し、降圧した。まず、試験装置A、Bの場合、最大注入圧力は 10 kgf/cm^2 、各圧力段階は $1 \sim 2 \text{ kgf/cm}^2$ と定めた。また、試験装置Cの場合、注入圧力の孔壁に与える影響を少なくするため、最大注入圧力を試験装置A、Bの場合よりも低圧の 2 kgf/cm^2 とし、各圧力段階は $0.25 \sim 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ と定めた。

なお、地盤の透水係数は(1)式により算出した¹⁾。

$$k = \frac{1}{2\pi L} \times \frac{Q}{H} \ln \left(\frac{L}{r} \right) \quad \text{----- (1) 式}$$

ここに、k：透水係数(cm/s) , H：水頭差(cm) , L：試験区間長(cm) , r：試験孔の半径(cm)

Q：注入量(cm³/s)

3-2. 透水試験の結果

各試験装置によって得られたP-Q曲線の代表例を図-3に示す。

試験装置Aでは、注入圧力 3 kgf/cm²以下のときの注入量は 0 cm³/min/mであり、注入圧力 4 kgf/cm²ではじめて 17 cm³/min/mの注入量が測定された。透水係数は 10⁻⁶ ~ 10⁻⁷ cm/s の値となる。ただし、以下の3点が問題となった。

- ① 10 cm³/min 以下の注入量を正確に測定することができなかった。
- ② 圧力計の測定精度が 0.3 kgf/cm² (最大測定圧力 30 kgf/cm² , 1級) であり、精度が低い。
- ③ バッカーと孔壁の間から漏水が認められた。

次に、試験装置Aを改良した試験装置Bでは、10⁻⁸ cm/s オーダーの透水係数を測定することができた。しかしながら、さらに以下の4点が問題となった。

- ① 0.1 cm³/min以下の注入量を正確に測定することができなかった。
- ② 注入圧力を変化させた際、注入用ホースが膨張・収縮し、見かけ上の水の出入りが生じた(例えば、注入圧力を 0~2 kgf/cm² に変化させた際、水の出入りが約 200 cm³ となった)。
- ③ 圧力計の測定精度が 0.05 kgf/cm² (最大測定圧力 10 kgf/cm² , 0.5級) であり、精度が低い。
- ④ 注入圧力の調整をボールバルブの開閉により行っているため、熟練を要し、人手がかかった。

試験装置Cでは、さらにこれらの問題点に対する改良を行い、10⁻⁹ cm/s オーダーの透水係数を測定することができた。

なお、改良の結果、注入圧力を変化させた際の注入用ホースの膨張・収縮による見かけ上の水の出入りは、注入圧力を 0~2 kgf/cm² に変化させた際、約 20 cm³ となり、試験装置Bの約 1/10 となった。

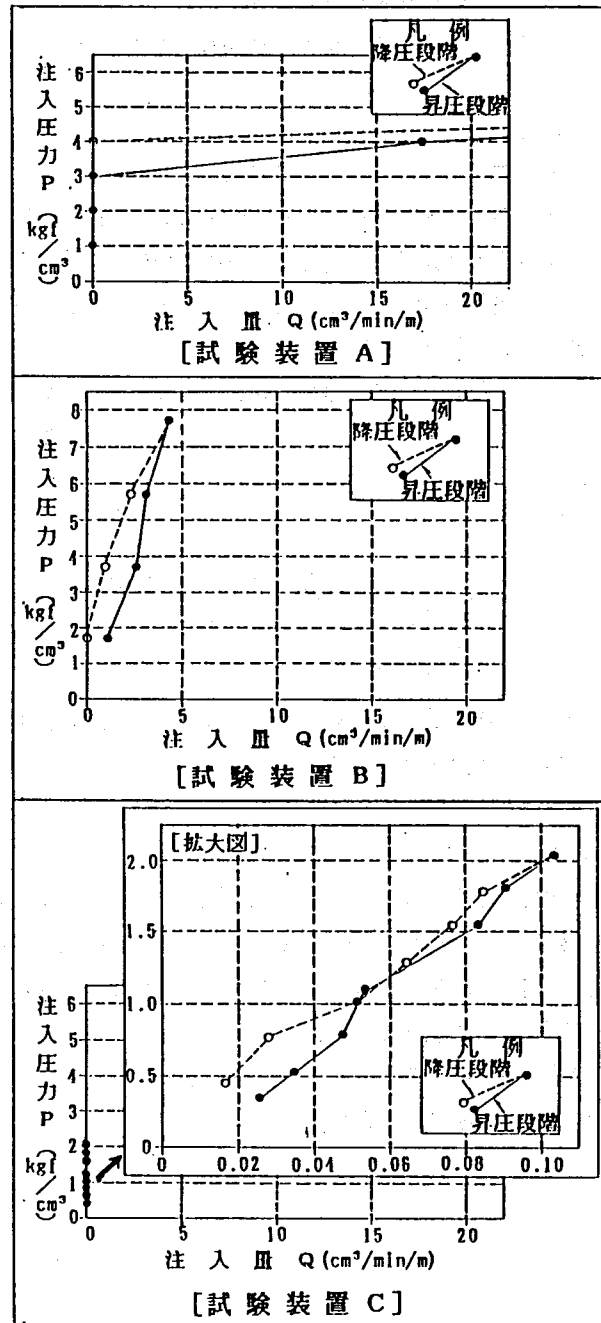


図-3 各試験装置によって得られた P-Q 曲線代表例

4. 試験装置Cの測定限界の検討

試験装置Cの遮水性を調べるため、ダブルバッカーを鋼管内に挿入し、ボーリング孔内で行った透水試験とほぼ同様の方法で試験を行った。

試験の条件および方法は以下のとおりである。

ロッド：3.0 m × 10本 = 30.0 m

バッカー：ダブルバッカー，膨張区間各 50 cm，拡張圧力
15 kgf/cm²

試験区間長：1.0 m

鋼管：内径 80.7 mm，長さ 3.0 m

注入圧力：0 → 0.25 → 1.0 → 1.5 → 2.0 (kgf/cm²)

測定時間：注入量が一定となった後の10分間

測定結果を図-4に示す。注入圧力が 2 kgf/cm²のとき、10分間の漏水量は 0.065 cm³であった。

測定限界の目安として、漏水量Q₀が実際の注入量Qの10%を超過するときの透水係数を測定限界と仮定すると、注入圧力 2 kgf/cm²のとき $Q = Q_0 \times 10 = \{0.065 / (60 \times 10)\} \times 10 \text{ cm}^3$ となり、測定限界は以下のようになる。

(1) 式より

$$k = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 100} \times \frac{\{0.065 / (60 \times 10)\} \times 10}{2000} \times \ln \left(\frac{100}{4.1} \right)$$

$$= 2.76 \times 10^{-9} \text{ (cm/s)}$$

この結果、試験装置Cでは、注入圧力を 2 kgf/cm²までとする場合 3×10^{-9} cm/s の透水係数までが精度よく測定できるものと考えられる。

5. おわりに

難透水性岩盤を対象とした透水試験装置を試作し、実際の岩盤において透水試験をくり返しながらか改良し、最終的には 10^{-9} cm/sオーダーの透水係数まで測定可能な試験装置を開発することができた。

本試験装置（試験装置C）は、測定上十分な性能を有するものであるが、注入量の測定に人手がかかることがまだ問題点として残っている。

この問題を解決するためには、将来、注入量の測定を自記録とする等の改良を行い、より良い透水試験装置としてゆくことが必要と考えられる。

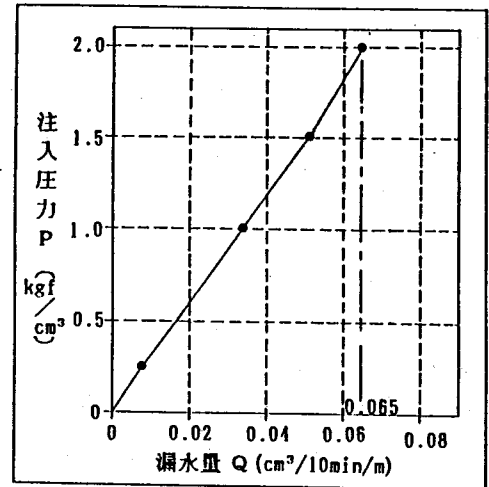


図-4 試験装置Cの漏水量