

(67) 開口割れ目における浸透流の

目づまりに関する基礎実験

熊谷組 原子力開発室 正員 伊藤 洋 正員 坂口 雄彦
" 正員〇西山 勝栄 正員 清水 昭男

1. はじめに

岩盤浸透流を評価するに当たって、割れ目系の透水性を知ることが重要でありこれまで数多くの研究がなされているが、その時間依存性や目づまりについては定量的にも無視できない可能性があるにもかかわらず見逃がされていたように思う。従来、浸透流の目づまり機構は多孔媒体中ではよく知られた現象であり、ろ過過程や地下水の人工涵養などといった分野で研究が進められている。^{1)~3)} 一方、岩石・岩盤については信頼できる実験データも少なくこれらについてはあまり目を向けられていなかったが、最近になって岩石についてはいくつかの実験報告がされつつある。^{4)~7)}

本論では、こういった背景にあって、単一開口割れ目における浸透流の時間依存や目づまりの基本的性質を明らかにすることを目的に、人工円柱岩石供試体を用いた室内長期透水実験を行って検討を加えた。いくつかの興味ある知見が得られたのでここに報告する。

2. 実験装置の方法

本研究に用いられた透水実験装置は、図-1(a)に示したようにポンプ循環による定圧法であり、多数供試体の同時、かつ長期間の実験が可能となる。装置は①水タンク (3 m³)、②循環ポンプ (吐出量 600 l/min)、③開閉バルブ、④圧力計 (0~10 kgf/cm²)、⑤供試体取付装置、⑥圧力調節弁 (0.5~3 kgf/cm²)、⑦ピーカー ⑧供試体 (コンクリート製、直径 ϕ = 10 cm、高さ H = 15~17 cm) からなっている。供試体取付装置の詳細は同図(b)に示したようであり、(c)図に示した側面樹脂コーティング供試体がセットされ、上下フランジには漏水防止のOリングが固定されている。

実験は次の手順で行われる。まず、人工岩石円柱供試体 (コンクリート製) に割裂により単一割れ目を発生させ周辺をエポキシ樹脂によりコーティングする。樹脂硬化後、供試体の上下面を整形して水中に数週間浸漬することにより飽和させる。その後、⑤取付装置に供試体をセットする。ここまで準備が整うと、①水タンク内に水道水を入れ、②循環ポンプを作動させて実験装置配管内に通水し、④圧力調節弁により所定の圧力 (0.5~0.8 kgf/cm²) を設定する。ついで、③開閉バルブを開け⑩空気抜きによりエアーを排除し、供試

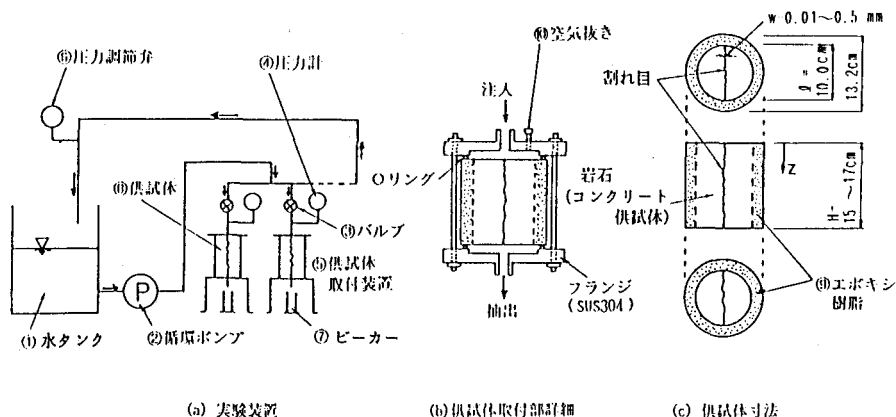


図-1 実験装置の概略

体内に定圧強用対流を発生させる。浸透流量 q は⑦ビーカーに採水したものをメスシリンダーにより経時的に測定する。

実験供試体は実際の岩石では脆性破壊を生じ、適当な供試体を製作するのが困難であったため、ここではコンクリート製の円柱供試体18体を用いる。供試体寸法は直径（≒割れ目長） $\ell=10\text{cm}$ 、高さ $H=15\sim17\text{cm}$ であり、割れ目の幅 w は上下面の各々5ヶ所に対しクラックルーペにより測定したものを単純平均し、表-1（後述）に示すように $w=0.05\sim0.57\text{mm}$ の範囲にある。なお、写真-1は実験装置の供試体設置部全体を示したものである。

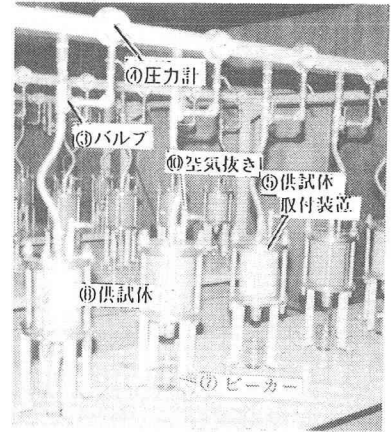


写真-1 実験装置の供試体設置部

3. 実験結果と考察

実験で得られた結果から、水温を 20°C に補正して初期透水係数 k_0 および30日経過後のそれ k_{30} を整理したものが表-1である。本実験供試体における開口割れ目の初期透水係数は $k_0 = 5.0 \times 10^{-5} \sim 3.0 \times 10^{-2} \text{m/s}$ の範囲にあるが、30日経過は $k_{30} = 3.0 \times 10^{-6} \sim 2.0 \times 10^{-2} \text{m/s}$ となり特に初期透水係数 k_0 が小さい場合に一層低減することが伺える結果となっている。

つぎに、浸透流量（透水係数）の経時変化と割れ目幅 w との関係を調べてみることにする。図-2は、浸透流量 q と時間 t の関係を次の3つの形式に分類してその代表的なものを示したものである。

- (a) Type-A……浸透流量は経時的にあまり変化しない。
- (b) Type-B……浸透流量は初期には一定であるが、何らかの付加的要因があるとその後徐々に低減する。
- (c) Type-C……浸透流量は経時的に著しく減少する。

まず、同図(a)に注目するといずれも多少変化はあるものの経時的には浸透流量は概ね一定となっている。この場合の割れ目幅は $w = 0.3 \sim 0.57\text{mm}$ と比較的大きい。つぎに(b)図では流量は6～12日経過後まではあまり変化していないが、その直後一時的に急上昇した後は徐々に低下してくることが判読できる。流量の急増は、タンク内水量が減少して配管内摩擦熱による影響が大きくなって水温急上昇・粘性低下が生じた

ことによると思われるが、それが結果的に目づまりの引金となったものと考え得る。このときの割れ目幅は $w=0.05\sim0.45\text{mm}$ と(a)に比べてやや小さくなっている。(c)の場合は $w=0.06\sim0.13\text{mm}$ とさらに小さく、流量 q は実験開始直後より指数関数的に減少し、10日後には初期流量の1/50程度となっている。(b)、(c)の流量の経時的低減は、明らかに目づまりによる割れ目幅の減少によるものと推定されるが、その発生原因としては、(1)水中懸濁物質（固形）の機械的空隙捕捉、(2)水中溶存酸素・気泡の混入、(3)コンクリートと水の化学反応による固形物の析出、(4)プランクトンなどの生物増殖等が挙げられる。¹⁾ 写真-2(a)は割れ目壁面を走査電子顕微鏡により撮影したものであり、写真下部が割れ目壁面でその上部に固形微粒子層が形成されていることが確認できる。また、写真(b)は固形微粒子をさらに拡大したもので、固形微粒子が積層をなしており割れ目空隙を閉塞していく過程が伺える。しかし、こういった目づまり機構は要因も多く複雑なため厳密な現象

表-1 実験供試体とその結果

供試体 No.	平均割れ目幅 w (mm)	初期透水係数 k_0 (m/s)	30日後透水係数 k_{30} (m/s)	透水係数比 k_{30}/k_0
1	0.16	4.79×10^{-3}	3.80×10^{-3}	0.794
2	0.19	4.95×10^{-3}	1.75×10^{-3}	3.52×10^{-1}
3	0.15	2.84×10^{-3}	2.14×10^{-3}	0.755
4	0.12	9.02×10^{-3}	2.51×10^{-3}	0.278
5	0.46	3.37×10^{-3}	3.75×10^{-3}	1.11
6	0.37	4.01×10^{-3}	2.51×10^{-3}	0.627
7	0.57	7.35×10^{-3}	5.93×10^{-3}	0.807
8	0.11	8.10×10^{-3}	1.14×10^{-3}	0.141
9	0.09	3.43×10^{-3}	4.08×10^{-4}	0.119
10	0.12	2.10×10^{-4}	3.31×10^{-6}	1.58×10^{-2}
11	0.45	5.81×10^{-3}	2.56×10^{-5}	0.441
12	0.13	4.92×10^{-4}	5.13×10^{-6}	1.04×10^{-2}
13	0.21	3.45×10^{-3}	1.47×10^{-3}	0.427
14	0.30	8.34×10^{-3}	1.05×10^{-2}	1.26
15	0.05	4.55×10^{-3}	7.08×10^{-5}	1.56×10^{-2}
16	0.06	1.42×10^{-3}	3.92×10^{-5}	2.76×10^{-2}
17	0.09	3.05×10^{-3}	5.84×10^{-4}	0.191
18	0.06	1.31×10^{-4}	3.02×10^{-6}	2.30×10^{-2}

解明は容易ではない。よって、ここでは実用性に力点を置いた佐藤らの平行平板空隙内の濁質滞留モデルを適用して実験結果と比較検討してみる。(3), 5)

図-3は平行平板空隙内における目づまり機構の水利メカニズムをモデル化したものである。開口割れ目流路は平行空隙に対応し、濁質(固形)粒子が壁面に少しずつ吸着・拘留して空隙断面が徐々に減少するといったもので、その定式化を簡単に述べることにする。流路間隙は初期($t=0$)には幅 w_0 をもち閉塞はなく流量は q_t である。時間が経過するにつれて流路の閉塞・目づまりが生じ、このときの単位奥行当りの無効流路断面積が累積流量 Q に比例すると仮定すると、任意時刻 t における流路断面積 s および割れ目幅 w_t は次のように表せることになる。

$$s = w_t H = w_0 H - K'_b Q, w_t = w_0 - K'_b / H \cdot Q \cdots \cdots (1)$$

ここに H : 流路長, K'_b : 閉塞係数(無次元)である。

さらに、流れは同様に平行空隙内の粘性流とすると、流路閉塞対象間隙からの流量 $q' (= q - q_c, q$: 浸透流量, q_c : 恒常流量)は

$$q' = \frac{dQ}{dt} = q_0 (1 - \beta Q)^3, q_0 = \frac{C}{\mu} w_0^3 \frac{\Delta h}{H}$$

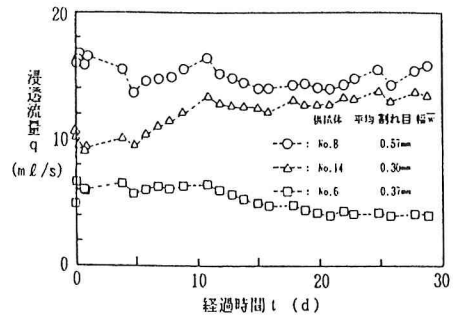
$$\beta = \frac{K'_b}{H \cdot w_0} \cdots \cdots (2)$$

となる。ここに、 $q_0 = q_t - q_c$, $C = \rho q / 12$, ρ : 流体の密度, g : 重力加速度, Δh : 水頭差, μ : 水の粘性係数である。

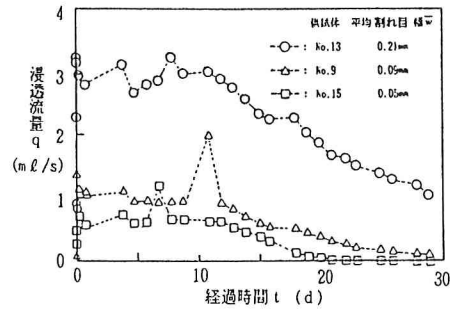
よって、結果的に q は次のように求まる。

$$\frac{q}{q_t} = \frac{q_0}{q_t} \frac{1}{\sqrt{(1 + 2K_b \cdot q_0 / q_t \cdot t)^3}} + \frac{q_c}{q_t},$$

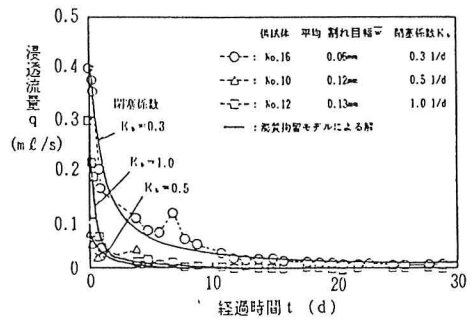
K_b : 閉塞係数(T^{-1}) ($= K'_b q_t / H \cdot w_0$) $\cdots \cdots (3)$



(a) Type-Aの場合

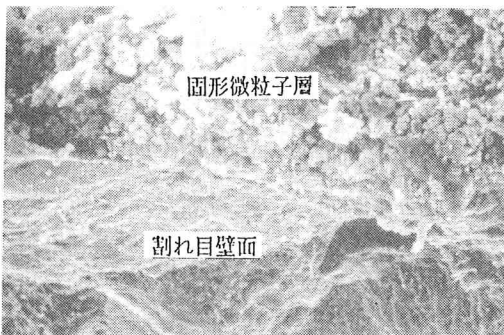


(b) Type-Bの場合

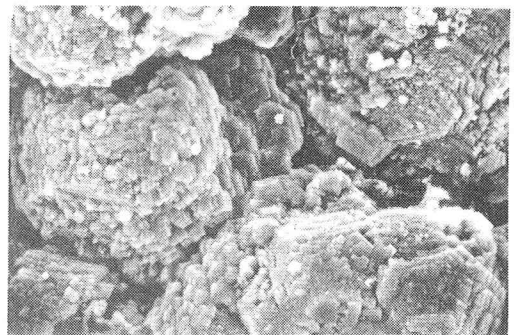


(c) Type-Cの場合

図-2 浸透流量 q の経時変化



(a) 割れ目壁面



(b) 割れ目壁面に拘留・付着した固形微粒子

写真-2 走査電子顕微鏡による割れ目壁面の写真

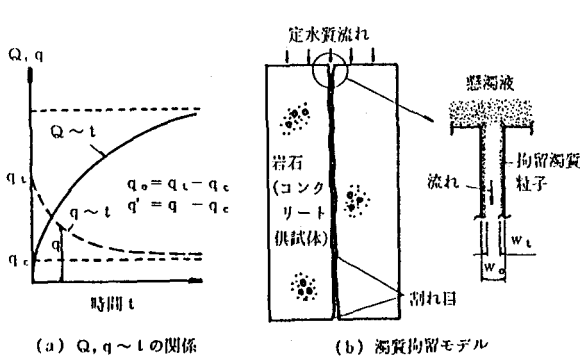


図-3 目づまりのメカニズム^{3), 5)}

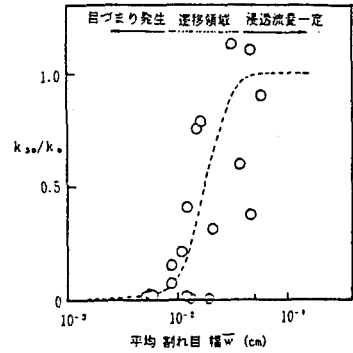


図-4 $k_{30}/k_0 \sim \bar{w}$ の関係

同式よりType-Cの実験結果と整合する閉塞係数 K_0 を与えて、その流量 q の経時変化曲線を図-2(c)中に実線で示した。モデル基本式は実験結果と比較的よく一致しており、割れ目内の目づまりによる流量の時間依存性がうまく再現されている。このときの閉塞係数 K_0 は $0.3 \sim 1.0 \text{ l/d}$ ($\bar{w} = 0.06 \sim 0.13 \text{ mm}$)である。

つぎに、こういった割れ目幅 $\bar{w}$ と目づまりの関係を明確にするため、縦軸に透水係数比 k_{30}/k_0 、横軸に $\bar{w}$ をとって示したものが図-4である。同図において $k_{30}/k_0 = 1.0$ であれば流量 q は経時的にあまり変化しないが、 k_{30}/k_0 が小さくなると目づまりによる流量低下が大きいことを意味する。これより、概ね $\bar{w} = 0.1 \text{ mm}$ 以下では $k_{30}/k_0 < 0.1$ となり目づまりによる流量低下が顕著となるが、 $\bar{w}$ が 0.3 mm を超えるとほとんど $k_{30}/k_0 \approx 1.0$ となってその影響はみられなくなる。つまり、割れ目幅 $\bar{w}$ が 0.1 mm 以下であると実際の地下水より固形微粒子等が少なくと考えられる水道水においても目づまりを生じやすく、流量 q 、透水係数 k は大きく減少することになる。ちなみに、これは割れ目の分布間隔・数にもよるガルジョン値で $1 \sim 5 \text{ Lugeon}$ 程度に相当し、⁸⁾多くの岩盤がその対象となることが示唆されることとなる。

4. むすび

岩盤浸透流の基本となる開口割れ目の浸透流における時間依存や目づまり機構に着目し、人工岩石を用いた長期透水実験を行いその基本的性質を吟味した。その結果、開口割れ目においても目づまり現象を生じる可能性が認められ、特に割れ目幅が 0.1 mm 以下となると顕著となることがわかった。また、目づまりによる浸透流低減過程は、平行空隙内粘性流として濁質滞留モデルによりうまく再現し得た。このときの支配パラメータである閉塞係数は本実験では $K_0 = 0.3 \sim 1.0 \text{ l/d}$ 程度の値となった。割れ目系におけるこの種の実験は従来あまり行なわれていなかったが、こういった空隙スケールにおいても目づまりを生じ浸透流は大きく変化する可能性が明確にされたわけで今後の研究の足掛りとなればと思う。

参考文献

- 1) 建設省土研・国土開発センター：地下水涵養技術の開発，1978.3，1979.2
- 2) 北川・石崎：浮遊物による目づまりに関する研究，第24回水理講演会論文集，pp. 91~96，1980.2
- 3) 八幡：土壌の物理，東京大学出版会，pp.142~157，1983.
- 4) R. Summers, et al : Permeability changes during the flow of water through westerly granite at temperatures of $100 \sim 400^\circ\text{C}$, J. of Geophysical Res., pp.339~344, 1978.
- 5) 佐藤・伊藤：岩盤浸透流の時間依存と目づまり機構，土と基礎，1988. 4. (掲載予定)
- 6) 佐藤・佐々木：岩の浸透流による放射性核種の拡散・移行特性，土と基礎，Vol.35, No.3, 1987.
- 7) 渡辺：岩盤割れ目系の諸地質量を考慮した岩盤浸透流の解析に関する基礎研究，東大学位論文，1983.
- 8) 土木学会編：土木技術者のための岩盤力学，pp.238~241，1979.11.

(67) EXPERIMENTAL STUDY ON CLOGGING MECHANISM
OF SEEPAGE IN OPEN-CRACK

by Y. ITO, T. SAKAGUCHI, K. NISHIYAMA and T. SHIMIZU

ABSTRACT

The clogging mechanism of seepage flow in porous media has been investigated for a long time. When we deal with the groundwater motion in fractured rock mass, it is one of the key subjects to find the time dependence of permeability in open-crack.

From such points of view, this paper studies the time dependence caused by the clogging of suspended and dissolved materials in seepage flow through open-crack. The characteristics of clogging phenomena in open-crack are experimentally discussed by the permeability test over a long time. The experiments are realized by eighteen artificial rock samples with a simple open-crack. The experimental results are compared with mathematical model based on successive blocking in parallel wall.

The main conclusions by this study can be summarized as follows : The flow rate decreases substantially with time under 0.1mm in width of open-crack. The application of successive blocking model to clogging problems was effectively confirmed by several experiments in open-crack.

Dept., Nuclear Power Development, Kumagai Gumi Co., Ltd.