

(83) 懸濁水注入による岩盤割れ目の
閉塞・止水効果に関する基礎的研究

備前谷組 正員○伊藤 洋 正員 清水 昭男
電源開発 正員 宮永 佳晴 正員 江原 昌彦

Fundamental Study on Blocking Effect of Open-Crack by Suspension Grouting in Rock Mass

Yo ITO, Teruo SHIMIZU, Kumagai Gumi Co., Ltd.

Yoshiharu MIYANAGA, Masahiko EBARA, Electric Power Development Co., Ltd.

Abstract

This paper studies the hydraulic effect due to suspension grouting in fractured rock mass. The characteristics of clogging phenomena in open-crack are experimentally discussed by the permeability test over a long time. The experimental results are compared with mathematical model based on successive blocking in parallel wall. In addition, in order to investigate the flow characters and clogging phenomena in field scaled model, several numerical computations are carried out by typical model of a open-crack.

1. はじめに

岩盤空洞の有効利用に係わる技術的課題の中でも、地下水問題は様々な観点から重要視されており、岩盤浸透流の研究が活発に行われるようになってきている。しかし、その定量的把握には現場調査技術の限界のみならず多くの不確定要因や他現象との相互依存性などの複雑な問題を抱え、必ずしも樂觀的状况にはないように思われる。今後も現象解明と評価精度の向上を目指し、地道な努力を行うことも必要と考えるが、一方、岩盤をわかりやすい媒体に変えるようなアプローチも有効であろう^{1), 2)}。

本論では、こういった背景から岩盤地下水の主流路となる割れ目系の懸濁水注入による閉塞・止水効果に注目し、単一割れ目を有する供試体を用いて超微粒子粘土を含む懸濁水注入による長期透水実験を行って、その基本的性質を吟味する。また、開口割れ目壁面への濁質拘留モデルを設定して実スケールでの理論的評価を試みた。いくつかの興味ある結果が得られたのでここに報告する。

2. 実験方法とケース

本実験に用いた実験装置は、18体建設可能なポンプ循環定圧法の透水実験装置であり³⁾、供試体は7本設定するが、内2体は割れ目内に充填物があるような場合を想定し標準砂（粒径 $d_{50}=0.20\text{mm}$ 、透水係数 $k_s=1.5 \times 10^{-4}\text{m/s}$ ）を下端から1～2 cm程度詰める。供試体はコンクリートにより作製し、その寸法は、直径 $\phi=10\text{ cm}$ 、高さ $H=14.8\sim 18.8\text{ cm}$ で、平均換算割れ目幅は $w=0.05$ 以下 $\sim 2.87\text{ mm}$ である。

実験手順はつぎのようである。まず、I 県産の粘土スラリーを用いて濁度5000ppmの懸濁水($W/S=200$ 、比重2.58、粒径 $D_{50}=1.8\text{ }\mu\text{m}$ 、 $D_{95}=23\text{ }\mu\text{m}$)を作る。ついで、供試体を実験装置の取付部にセットし、循環ポンプを作動させて圧力を調節($0.55\sim 0.85\text{ kgf/cm}^2$)する。ここまで準備が整うと供試体内に定圧強制対流を発生させ、浸透流量をメスシリンダーにより経時的に測定する。

実験は、25日間は圧力 $0.55\sim 0.85\text{ kgf/cm}^2$ で連続注入するが、26日目からは透水性（流路）の安定性確認の

表-1 実験ケースと結果

割れ目 状態	実験 ケース	平均換算 割れ目幅 w (mm) *1)	25日間懸濁水注入				圧力変更	水道水注入
			初期の 流量 q_0 (ml/s)	25日後の 流量 q_{25} (ml/s)	流量の 低下率 q_{25}/q_0	閉塞係数 K_b (1/d)	36日後の 流量比*4) q_{36}/q_{25}	53日後の 流量比*4) q_{53}/q_{25}
開口 割れ目	RunA-1	0.81	25.40	27.7	1.09	—	1.05	1.37
	RunA-2	0.91	23.47	20.36	0.867	—	0.84	0.93
	RunA-3	0.036	27.0×10^{-2}	20.8×10^{-5}	7.70×10^{-4}	—*3)	1.06	0.72
	RunA-4	0.156	13.7×10^{-1}	64.1×10^{-2}	0.468	0.69	0.81	0.456
	RunA-5	0.0018	15.0×10^{-2}	30.0×10^{-7}	2.0×10^{-4}	1.5	(測定限界 値以下)	—
一部に 標準砂 充填	RunB-1	2.87 (2.49×10^{-1} cm/s)	2.46	55.0×10^{-4}	2.24×10^{-3}	10.0	(測定限界 値以下)	—
	RunB-2	2.85 (2.30×10^{-1} cm/s)	1.84	20.8×10^{-5}	1.13×10^{-4}	0.4	(測定限界 値以下)	(測定限界 値以下)

*1): RunAは q_{0-0} (57.3 μ ±0.218) ℓ w から求め、RunBは表面割れ目幅の実測値の平均である。

*2): 割れ目内の初期の平均透水係数である。

*3): 流量の低減過程が一律でないため、 K_b を算定しなかった。

*4): 36日および53日での流量は、0～25日での圧力値での値に換算した。

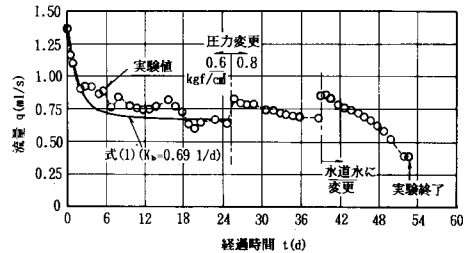
ため圧力を0.80～1.10kgf/cm²と上昇させ、さらに一部の供試体では39日目から同圧力で水道水を53日目まで通水する。実験終了後は供試体を分割して割れ目壁面での粘土の付着・拘留状況を観察・写真撮影する。

実験ケースは、表-1に示したとおりであるが、RunA-1～5は開口割れ目の場合で、RunB-1,2は割れ目内一部充填の場合である。

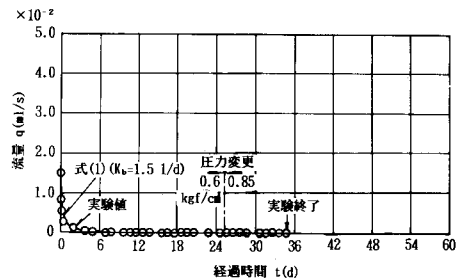
3. 実験結果と考察

実験結果を整理したものが表-1である。まず、一定圧力下での懸濁水注入実験結果に着目すると、割れ目幅の大きいRunA-1,2では浸透流量の低下は認められないが、その小さいRunA-3,5および標準砂を充填したRunB-1,2では初期流量に比して数百～数千分の一と著しく低減していることがわかる。RunA-4では、数分の一程度であるが明確な流量の低下が確認できる。つまり、流速があまり大きくなければ懸濁物質の付着・拘留による目詰まり現象が起こり得ることになる。また、圧力や水質の変更による浸透流量の変化について見てみると、いずれもあまり影響がないか、あるいはさらに目詰まりが進行することになっており、一旦形成された拘留濁質層（粘土層）は多少の環境変化によらず、ほぼ安定したものとなっていることが伺える。

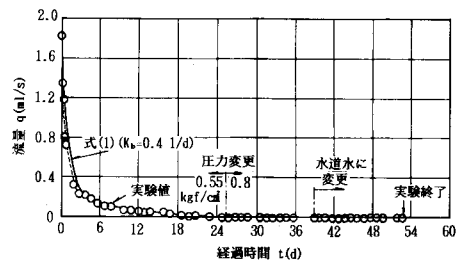
つぎに、代表的な結果としてRunA-4,5およびRunB-2の浸透流量 q の経時変化を示したものが図-1である。同図のa)はRunA-4、b)はRunA-5、c)はRunB-2のそれである。まず、a)は換算割れ目幅 $w=0.156$ mmの場合であるが、流量は初期には大きく低下するもののその後はゆるやかに減少している。26日目に設定圧力を0.6kgf/cm²から0.8



a) RunA-4



b) RunA-5



c) RunB-2

図-1 浸透流量 q の経時変化

kgf/cm²に上げると、一旦圧力上昇により流量は増加するものの再び減少傾向となる。39日目からの水道水への変更後は一旦注入を停止することもあるが、一時的に流量は増大するものの再び低減過程となる。ここで、25日目までの $q \sim t$ 関係と無効流路体積が累積流量 Q に比例するとして導いた次式(濁質拘留モデル)と整合させてみると^{3), 5)}、閉塞係数 $K_b=0.69$ 1/d で比較よく一致する。

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

ここに、 q : 浸透流量、 q_t : $t=0$ での流量、 q_c : 恒常流量、 q_o : 閉塞対象流量($=q_t - q_c$)、 K_b : 閉塞係数(T^{-1})、 t : 時間である。

また、b)図は換算割れ目幅 $w=0.0018$ mmと非常に小さい場合であるが、流量は初期より急激に減少し早期に恒常流量となっていることが判読できる。恒常流量は非常に小さく、このときも圧力の変化による影響がほとんど見られない。a)と同様に式(1)と整合させると $K_b=1.5$ 1/dでよく一致する。

一方、c)図は割れ目下端部に標準砂を充填したものであり、砂への拘留・閉塞と表面ろ層の形成⁵⁾が同時に進行することになる。浸透流量は大きく減少し、恒常流量は圧力や水質の変化による影響も確認できないほど小さくなっている。また、このときの目詰まりモデルは厳密にはかなり複雑なものとなるが、参考までに見掛け上式(1)に対応させて K_b を求めると0.4 1/dとなる。このことは、もし割れ目内に充填物があると急速な流路閉塞を生じやすく、流量(透水係数)は大きく低下することを示唆しているものと考え得る。しかし、一方では充填物より下流の流路において、逆に懸濁物質は輸送されにくくなり、閉塞・止水効果が乏しくなることも懸念されることとなる。

以上より、開口割れ目の閉塞・止水において懸濁水注入による目詰まり効果が有用であることが確認された。一方、流速が大きいと懸濁物質の拘留が起こりにくくなること、また割れ目内に充填物があるとその上流できわめて早期に流路間隙が閉塞することなどが示唆された。

4. 数学モデルによる理論的検討

ここでは、濁質拘留モデルに立脚した数学モデルを設定して、実際の地山への応用の可能性について若干の検討を行う。

(1) 基礎式の誘導

懸濁物質の透水層内での輸送は、溶質のそれと同様と考えられるから、その物質保存式は次式のように表せる⁴⁾。

$$\partial S/\partial t + \partial(\lambda C)/\partial t = \text{div}\{D_a \text{grad}(\lambda C)\} - \text{div}(\omega \lambda C) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 S : 懸濁物質の吸着・拘留による流路閉塞固相体積濃度、 $S=V_b/V_o$ 、(V_b : 流路閉塞固相体積、 V_o : 初期の総空隙体積)、 λ : 空隙率($\lambda=V_l/V_o$ 、 V_l : 液相体積)、 C : 懸濁物質濃度($C=V_m/V_l$ 、 V_m : 懸濁物質体積)、 D_a : 分散係数、 ω : 浸透移流速(実流速)、である。

ここで、流路閉塞固相体積濃度 S が単位時間当たりの懸濁物質輸送総量に比例する(濁質拘留モデル)とすれば、式(2)の第1項は、

$$\partial S/\partial t = K_b' \omega \lambda C \dots\dots\dots (3)$$

と表され、さらに懸濁物質濃度変化が主に固相(土粒子、岩)への拘留によって生じるとすれば⁵⁾、式(1)の左辺第1項の分散項は無視され、次式のようになる。ここに、 K_b' : 拘留係数(L^{-1})である。

$$K_b' \omega \lambda C + \partial(\lambda C)/\partial t = -\text{div}(\omega \lambda C) \dots\dots\dots (4)$$

他方、浸透流の基礎式は、その非定常性が式(4)の空隙率変化に伴う透水性の時間変化により支配されるものとする、次式のように書ける。

$$\text{div}(k \cdot \text{grad} h) = 0 \dots\dots\dots (5), \quad k = A f(\lambda) \delta_o'^2 \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 k : 透水係数、 h : ピエゾ水頭、 A : 定数、 δ_o' : 初期の代表空隙寸法である。

したがって、濁質拘留モデルによる懸濁物質の輸送・拘留現象は式(4), (5), (6)を用いて、 C , λ , h を

境界条件下で解けばよいこととなり、カップリング問題ということになる。ただし、これらの基礎式は必ずしも実験的に十分裏付けされたものではないので今後さらに検討が必要であろう。

つぎに、上述の実験結果を評価するに当たって、図-2のような平行平板モデルを設定すると、 S 、 λ および有効流路割れ目幅 δ はつぎのように表せる。ここで、 δ は式(3)を積分して $t=0$ 、 $\delta=\delta_0$ より求める。

$$S = V_b / V_o \approx \delta_b / \delta_o, \quad \lambda = V_l / V_o \approx \delta / \delta_o, \quad \delta = \delta_o (1 - K_b' \int_0^t \omega(t) \lambda C dt) \dots (7)$$

ここに、 δ_b :流路閉塞固相(濁質拘留層)厚さ、 δ_o :初期の割れ目幅(流路幅)である。

また、透水係数 k は平行平板の粘性流の式より、

$$k = g \delta^2 / 12 \nu \cdot \delta / \delta_o = g / 12 \nu \cdot (\delta / \delta_o)^3 \delta_o^2 = A \lambda^3 \delta_o^2, \quad A = g / 12 \nu \dots (8)$$

となる。ここで、 ν :流体の動粘性係数である。さらに、式(1)は式(7)において $Q = \int_0^t \omega(t) \lambda C dt$ (Q :累積流量)として解いたものであり、式(1)における閉塞係数 K_b と式(3)の拘留係数 K_b' の関係はつぎのようになる。

$$K_b' = K_b \{ \delta_o / (C q_t) \} \dots (9)$$

以上より、図-2に示したモデルにおける目づまり過程の解析が可能となる。

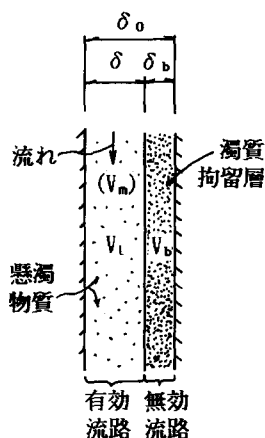


図-2 平行平板モデル

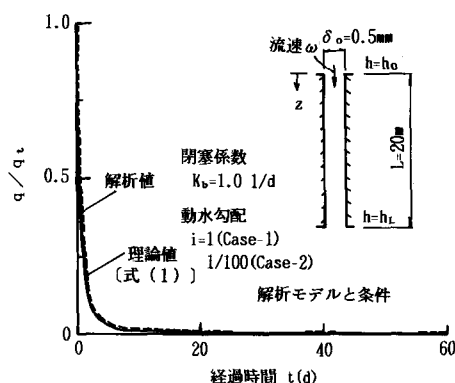


図-3 $q/q_t \sim t$ の関係

(2) 解析結果と考察

解析モデルは、図-3中に示したような割れ目幅 $\delta_o=0.5$ mm (初期透水係数 $k_o=20.42$ cm/s) の単一の平行平板モデルを設定する。また、流路長は実地山スケールを想定して $L=20.0$ mとし、 $t=0$ での動水勾配を $i=(h_o-h_L)/L=1$ (Case-1) と $1/100$ (Case-2) の2ケース考える。拘留係数 K_b' は直接求められていないが、閉塞係数として $K_b/C=1.0$ 1/dとする^{2), 3)}。こういった条件で式(4), (5), (7), (8)を用いて差分法により解析する。解析手順は、まず式(4)より時刻 $t=(n+1)\Delta t$ の λC を求める。ついで λ_{old} を仮定し、式(8)より k を求め式(5)より h を算定し、 ω を決める。得られた ω 、 λC を用いて式(7)から δ を求め λ_{new} を得る。 $|\lambda_{new}-\lambda_{old}| < \epsilon$ を満足するまで繰り返し計算を行い、得られた λ から濃度 C を算定し、つぎの時間ステップに進む手順となる。解析は、60日間まで行う。

図-3は、浸透流量 q の経時変化の計算結果を示したものである。当然ながら閉塞係数 K_b を同一のものとしているので流量低減過程に差は生じないが、上述の実験結果と同様の傾向となっている。式(1)の計算結果を図中に一点鎖線で示したが両者はよく一致し、上述の解析結果が妥当なものであることが確認できる。つぎに、 z 方向の濁質濃度分布 C/C_o 、流速分布 ω/ω_o 、水頭分布 $(h-h_L)/(h_o-h_L)$ 、空隙率分布 λ を示したものが図-4である。図中の点線がCase-1($i=1$)で、実線がCase-2($i=1/100$)である。Case-1の場合は、流速がかなり速いため濁質濃度は瞬時に $C/C_o=1$ となり、したがって λ は z 方向にほぼ同一と

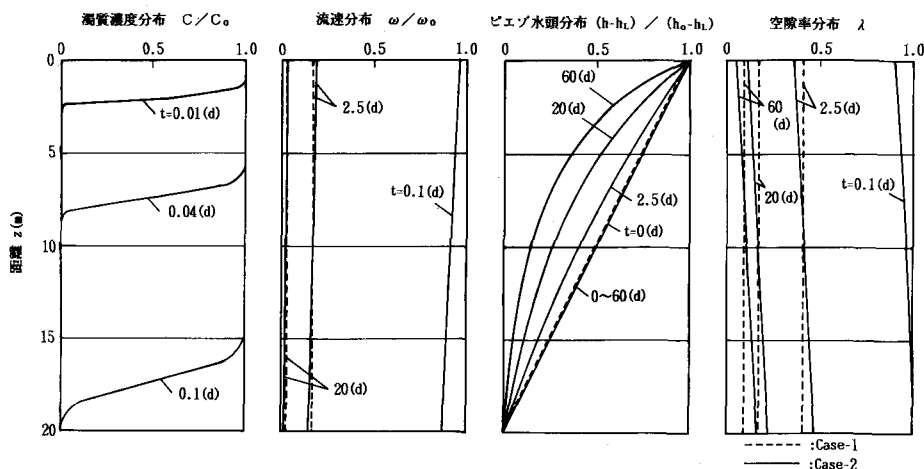


図-4 C/C_0 , ω/ω_0 , $(h-h_L)/(h_0-h_L)$, λ 分布の経時変化

なり、水頭分布の経時変化はほとんど認められない。一方、Case-2の場合は、流速が遅く、しかも拘留係数が大きくなる(式(9)参照)ため、濃度 C/C_0 の非定常過程が表れ、空隙率 λ は $z=0$ に近いほど小さくなっている。つまり、注入口に近いほど濁質拘留層が厚くなるわけで、透水係数も z 方向に変化することになる。この結果、流速分布は僅かではあるが z 方向に小さくなり、水頭分布は大きく変化してくることになる。

結局、このような条件下であれば懸濁水注入によってフィールドスケールにおいても割れ目全流路にわたる閉塞・止水が期待できることが示唆されたわけであるが、今後さらに進んだ検討が必要であろう。

5. むすび

本研究は、地盤内浸透における目詰まり現象を積極的に利用した岩盤割れ目系流路の閉塞・止水法の可能性を検討しようとしたものである。実験は必ずしも十分でなく現象解明に当たってはさらに進んだ検討が不可欠であるが、基本的には適切な懸濁水を用いて広域岩盤地山の透水性を改善できることを示唆することができたと思う。また、濁質拘留モデルを発展させての理論的検討を行い、その基本的性質解明の有効な手段となることを示した。岩盤内浸透流の時間依存性も含めこういった研究の蓄積はほとんどなされておらず、今後さらに研究を進めていくつもりである。

本実験の遂行に当たり、貴重なご助言を頂いた東京大学 小島 圭二教授、電力中央研究所 駒田 広也室長に深謝の意を表す。また、本研究に助力して頂いた御熊谷組 坂口雄彦氏、西山勝栄氏、境信親氏にお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 小島圭二ほか：地下空間利用に関する割れ目の広域グラウトの基礎実験、日本応用地質学会昭和63年度研究発表会講演論文集、pp.135~138, 1988.5.
- 2) 伊藤洋ほか：開口割れ目における懸濁水浸透流の目詰まりに関する基礎実験、土木学会第43回年次学術講演会第3部門、pp.648~649, 1988.10.
- 3) 伊藤洋ほか：開口割れ目における浸透流の目詰まりに関する基礎実験、第20回岩盤力学シンポジウム講演論文集、pp.329~333, 1988.2.
- 4) 佐藤邦明ほか：不飽和浸透流における溶質分散係数の測定、土と基礎、Vol.33, No.2, pp.45~50, 1985.2.
- 5) 佐藤邦明・伊藤洋：岩盤内浸透流の時間依存と目詰まり機構、土と基礎、Vol.36, No.4, pp.21~25, 1988.4.