

(35) 懸濁液注入による開口割れ目の止水 に関する理論的検討

榑熊谷組 原子力開発室 正員 伊藤 洋
 榑熊谷組 原子力開発室 正員 〇境 信親
 榑熊谷組 原子力開発室 正員 清水 昭男

Numerical Study on Blocking Effect of Open-Crack by Suspension Grouting

Yo ITO, Nobuchika SAKAI and Teruo SHIMIZU, Kumagai Gumi Co., Ltd.

Abstract

This paper studies the hydraulic effect due to suspension grouting in fractured rock mass. In order to examine the clogging phenomena in an open-crack, several numerical computations are carried out by some typical models of an open-crack. The mathematical model used in this study is based on successive blocking in fracture wall. Some characteristics of clogging phenomena in an open-crack were clarified by the aid of computed results.

1. はじめに

岩盤浸透流の制御手法の一つとして、著者らは懸濁液注入による割れ目系の止水工法（いわゆる広域グラウト工法¹⁾）に関する基礎研究を行ってきている^{2)~4)}。本工法は、岩盤浸透流の主流路となる割れ目内に固形の超微粒子を浮遊させた低濃度の懸濁液を長時間注入・浸透させ、その目詰まり効果によって徐々に割れ目内を閉塞・止水しようとするものである。この工法の特徴は、①広域地山の透水性改善が可能となること、②注入・排水孔（空洞・トンネル）等があれば、特に施工機械等は不要でありコスト的にも一般の岩盤グラウト工法よりかなり有利であること、③浮遊物質は、粘土、岩石などを粉碎したものをを用いるため地下水汚染等の心配がないこと、④天然鉱物材料であるため長期的な健全性が期待できること、などが長所として上げられ、一方、短所としてはゆっくりと低濃度の懸濁液を注入・拘留させるため、長時間を要することと局所的な止水には適さないことなどが考え得る。これまで、室内実験を行って本工法の基礎的な現象を確認した上で多少理論的な考察も試みているが、未解明のことも多く残されている^{2)~4)}。

本論では、いくつかの割れ目モデルを設定し、懸濁液注入に伴う割れ目内の閉塞過程の基本的性質について理論的考察を加えることとする。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. 基礎式と解析条件・ケース

単一開口割れ目における懸濁液注入に伴う閉塞過程に係わる基礎式は、濁質拘留モデル⁵⁾を仮定するとつぎのように書ける^{2)~4)}。

$$K_0 \cdot v \lambda C + \partial (\lambda C) / \partial t = - \partial (v \lambda C) / \partial z \quad \text{----- (1)}$$

$$\partial (k \cdot \partial h / \partial z) / \partial z = 0 \quad \text{----- (2)}$$

$$k = g / 12 \nu \cdot \lambda^2 \cdot \delta_0^2 \quad \text{----- (3)}$$

$$\lambda \approx \delta / \delta_0, \quad \delta = \delta_0 \cdot \{1 - K_b' \cdot \int_0^t v \lambda C dt\} \quad (4)$$

$$K_b' = K_b \cdot \{\delta_0 / (C q_1)\} \quad (5)$$

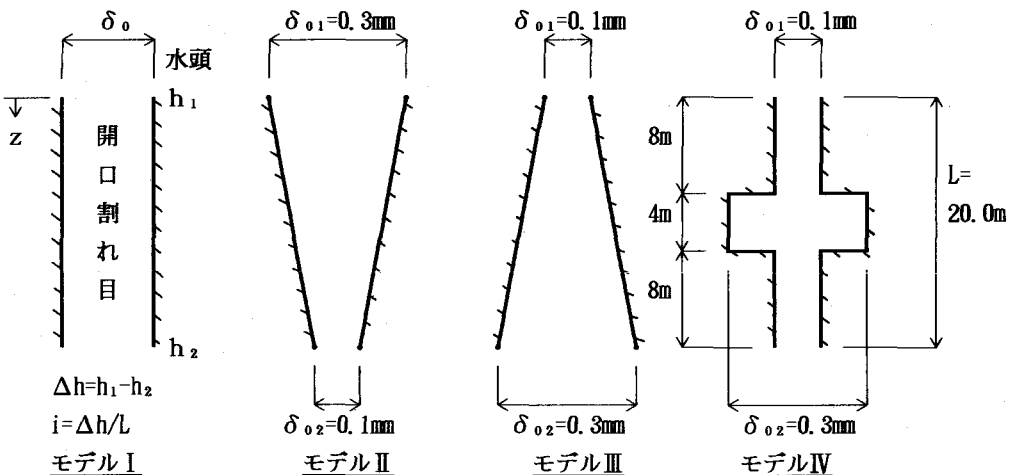
ここに、 K_b' ：拘留係数、 v ：実流速、 λ ：空隙率、 C ：SS濃度、 t ：時間、 k ：透水係数、 h ：ピエゾ水頭、 g ：重力加速度、 ν ：流体の動粘性係数、 δ_0 ：初期の割れ目幅、 δ ：有効流路割れ目幅、 q_1 ： $t=0$ での流量、 K_b ：閉塞係数、 z ：座標である。ここで、 h 、 v 、 λ 、 C 、 k 、 δ は座標 z と時間 t の関数となる。

解析は、上述の式(1)～(4)を連成させて差分法により数値解析を行う。解析フローは、図－1に示したとおりである。また、解析精度については、平行平板モデルから得られる理論解と数値解を比較・検討して、十分な一致をみている²⁾。

表－1は、解析条件および解析ケースをまとめて示したものである。割れ目幅は、 $\delta_0=0.1 \sim 0.5\text{mm}$ とし、閉塞係数はこれまでに行った実験結果を参考に $K_b=0.5, 1.0, 3.0(1/d)$ ととり^{2)～5)}、動水勾配は $i=\Delta h/L=1, 1/100$ とする。割れ目モデルについては同表の下に示したように、モデルⅠ（平行平板モデル）、Ⅱ（下流側に閉じているモデル）、Ⅲ（下流側に開いているモデル）、Ⅳ（平行平板の中央部で幅が拡大しているモデル）、の4つのモデルを想定する。ここで、割れ目の流路長さは、すべて $L=20.0\text{m}$ とする。

表－1 解析条件および解析ケース

モデル	初期割れ目幅 δ_0 (mm)		閉塞係数 K_b (1/d)					
			0. 5		1. 0		3. 0	
			動水勾配 i					
	δ_{01}	δ_{02}	1	1/100	1	1/100	1	1/100
Ⅰ	0. 1		Run-A-1	Run-B-1	Run-C-1	Run-D-1	—	—
	0. 3		—	Run-B-2	—	Run-D-2	—	Run-F-2
	0. 5		—	Run-B-3	Run-C-3	Run-D-3	Run-E-3	Run-F-3
Ⅱ	0. 3	0. 1	—	Run-B-4	—	Run-D-4	—	Run-F-4
Ⅲ	0. 1	0. 3	—	Run-B-5	—	Run-D-5	—	Run-F-5
Ⅳ	0. 1	0. 3	—	—	—	Run-D-6	—	—



3. 解析結果と考察

解析結果の代表的なものを提示して、考察を加えることとする。

まず、図-2は代表的な解析ケースにおける濁質拘留層の経時的な形成過程を示したものである。(i), (ii)はモデルIで、割れ目幅 $\delta_0=0.1\text{mm}$ の場合である。前者は、閉塞係数 K_0 が小さく、動水勾配 i が大きいときのものであるが、流路全長にわたって拘留層がほぼ均一に形成されている。広域グラウトの目的からするとこの状態が最も望ましいことになる。後者は、前者に比較して K_0 が大きく、 i が小さいときのものであるが、流入口付近での拘留層の形成がかなり早く、流出口付近までそれが到達していない。(iii), (iv)は同様のモデルIであるが、 $\delta_0=0.3\text{mm}$ で K_0 が異なる。(i), (ii)と比較して拘留層の形成延長は長くなるが、基本的にはほぼ同じ傾向にある。つぎに、(v), (vi)はモデルIIの閉塞過程を示しており、水理条件は(iii), (iv)に対応している。このときは、拘留層自体の形成過程はモデルIと類似の傾向にあるが、割れ目が流下方向に閉じていることから、(v)では逆に流出口付近で先に閉塞し、(vi)では中央部付近で最も早く閉塞が生じるといった結果となっている。(vii), (viii)は、モデルIIIのそれであるが、割れ目が流下方向に開いているためいずれも流入口付近で早期に閉塞し、特に閉塞係数の大きい後者で顕著となっている。つまり、こういった割れ目であると、濁質拘留層が全体に形成されにくいことになる。(ix)は、モデルIVであるが、この場合は上部の平行な割れ目部のみで閉塞が起り、中央拡大部より下流ではそれが生じていない。

つぎに、図-3は、図-2に対応した浸透流量 q/q_0 (q : 浸透流量、 q_0 : $t=0$ での流量)の経時変化を示したものである。浸透流量はいずれも見掛け上は初期に大きく低減し、その後も経時的に徐々に減少するが、モデルIIIのRun-F-5, B-5ではある時点で変曲点が存在し急減していることが判読できる。これは、モデルIIIではこの時点で流入口付近がほぼ完全閉塞状態になったことを示唆しているものと考え得る。

図-4は、モデルI、II、IIIの代表的なSS比濃度 C/C_0 分布の経時変化を示したものである。閉塞係数 K_0 が(a)と(b)で異なるが、モデルの違いによる特徴の方が顕著に表れている。モデルIでは初期より全体に高濃度 $C/C_0 \approx 1.0$ となるが、モデルIIでは濃度分布は z 方向へ大きく分散し、その上昇速度は初期には速くしだいに遅くなっている。モデルIIIでは、拡散フロントで濃度勾配が急であり、最終的にも懸濁液は流出口まで到達していない。これらの傾向からすると、広域グラウトに理想的なSS濃度分布は、モデルIに見られるように流路全体に高濃度でかつ均一なものとなることと考えられ、モデルIIIのように懸濁液が到達しない部分が残るような場合は局所的な閉塞にとどまる可能性が高いことになる。

図-5は、開口割れ目内流路の懸濁液注入による閉塞率に着目し、縦軸に閉塞率 $\alpha = V_s/V_0$ (V_s : 濁質拘留層の体積、 V_0 : 初期の開口割れ目内体積)をとり、横軸に無次元量 $\varepsilon = (\delta_0 g \Delta h) / (K_0 \nu L)$ をとって、それらの関係を整理したものである。これより、モデルIでは全体的に ε が大きく、かつ δ_0 が大きいほど閉塞率 α が高くなる傾向にある。つまり、平行平板に近い割れ目では閉塞係数 K_0 が小さく、割れ目幅 δ_0 が大きく、さらに動水勾配 $i = \Delta h/L$ が大きい(流速が速い)ほど流路全体の閉塞に有利となる。しかし、モデルIIではこの傾向とまったく逆のものとなっている。モデルIIIでは、閉塞率 α は全

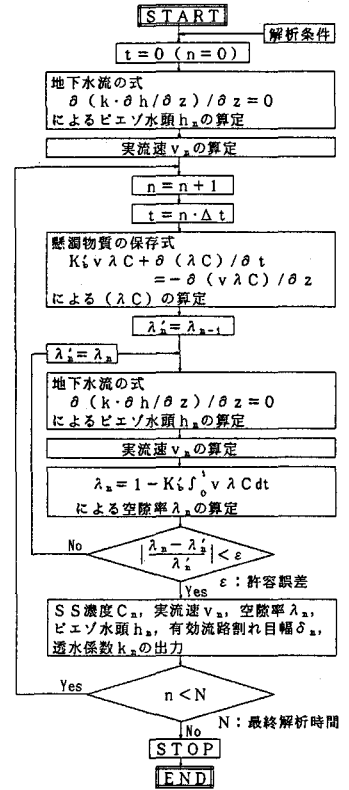
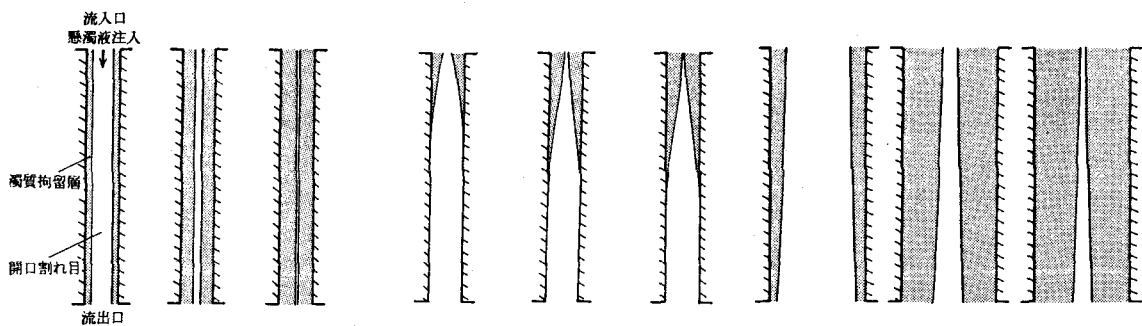
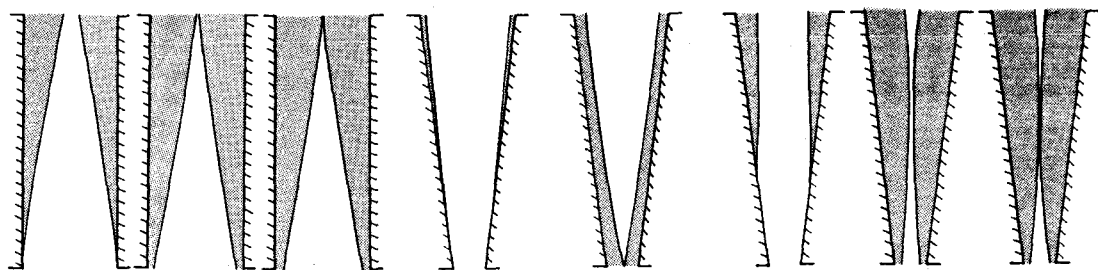


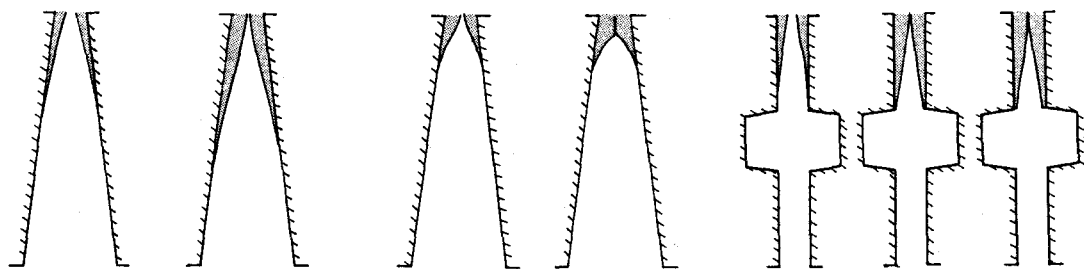
図-1 解析フロー



a) 1日後 b) 20日後 c) 100 日後 a) 1日後 b) 20日後 c) 100 日後 a) 1日後 b) 20日後 c) 100 日後
 (i)モデルⅠ: Run-A-1 (ii) モデルⅠ: Run-D-1 (iii) モデルⅠ: Run-B-2



a) 1日後 b) 20日後 c) 100 日後 a) 1日後 b) 20日後 a) 1日後 b) 20日後 c) 100 日後
 (iv)モデルⅠ: Run-F-2 (v) モデルⅡ: Run-B-4 (vi)モデルⅡ: Run-F-4



a) 1日後 b) 20日後 a) 1日後 b) 20日後 a) 1日後 b) 20日後 c) 100 日後
 (vii)モデルⅢ: Run-B-5 (viii)モデルⅢ: Run-F-5 (ix)モデルⅣ: Run-D-6

図-2 開口割れ目における閉塞過程の解析結果

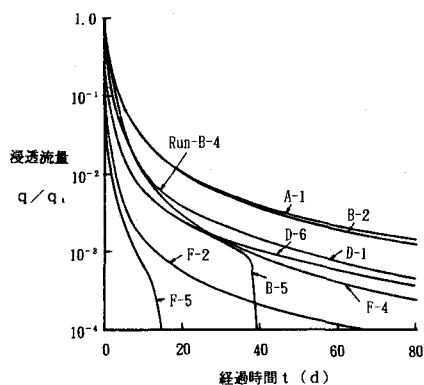


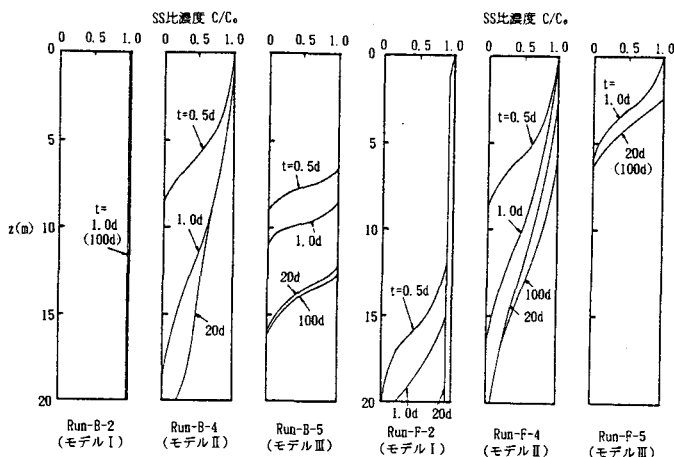
図-3 浸透流量 q/q_0 の経時変化

体に小さく、広域グラウトには不利な傾向となっている。ただ、モデルⅠと同様に ε の増大によって、閉塞率 α も大きくなる傾向にはある。結局、さまざまな割れ目系を想定した場合、最適条件的なものはいきだせず、実際の岩盤地山における広域グラウトに当っては、いくつかの課題があることが示唆される結果となった。

4. むすび

本研究は、岩盤地山における割れ目系流路を対象とした広域グラウト技術の開発を目的とし、いくつかの単一割れ目モデルを設定して、懸濁液注入を行ったときの濁質拘留層の形成過程（目詰まり過程）に係わる基本的性質を理論的に検討したものである。その結果、割れ目パターンによって、閉塞過程や最終的な拘留層形成状態が大きく異なることが明らかとなり、割れ目系の広域にわたるグラウト止水を行うに当って

は、定圧・定質懸濁液の連続注入では十分ではなく、工夫を要することが示唆された。実用に供するには、基本的メカニズムの解明、注入圧力・SS濃度の調整法やグラウト材料そのものに対する検討なども併せ、今後さらに進んだ研究が必要であろう。



(a) $K_0 = 0.5$ の場合の例

(b) $K_0 = 3.0$ の場合の例

図-4 SS比濃度 C/C_0 の経時変化

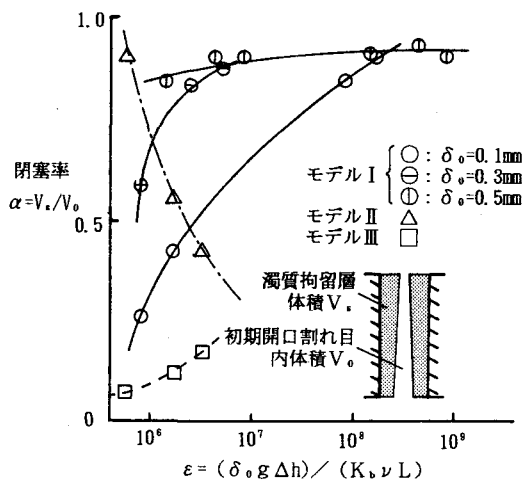


図-5 閉塞率 α と $\varepsilon = (\delta_0 g \Delta h) / (K_0 \nu L)$ の関係

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，1988. 5.
- 2) 伊藤 洋・宮永佳晴ほか：懸濁液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，土木学会第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，1989. 2.
- 3) 伊藤 洋・宮永佳晴ほか：開口割れ目における懸濁液浸透の目詰まりに関する基礎実験，土木学会第43回年次学術講演会概要集（Ⅲ），1988. 10.
- 4) 伊藤 洋ほか：懸濁液浸透による開口割れ目内の閉塞過程に関する一考察，土木学会第44回年次講演会概要集（Ⅲ），1989. 10.
- 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, 1988. 4.