

亀裂性岩盤のグラウトによる湧水抑制効果の予察的検討

清水建設株式会社 正会員 ○小林 伸司 正会員 延藤 遵 正会員 杉山 博一
日本原子力研究開発機構 正会員 小林 保之 正会員 新貝 文昭

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設を構成する地下坑道の建設に際し、わが国における幅広い地質環境を勘案すると、グラウトに代表される湧水抑制対策技術は非常に重要である。湧水抑制効果は、透水性の高い亀裂内部にグラウト材料が浸透することにより達成されるため、岩盤の亀裂特性とグラウトの浸透および湧水量の関係を把握しておくことは、合理的なグラウト技術を検討する上で肝要であると考えられる。海外における地層処分施設を対象としたグラウトに関する技術開発では、亀裂開口幅の大きさに応じてセメント系材料や溶液型材料を使い分けることが検討されている¹⁾。このような背景から、本件では、第2次取りまとめ²⁾を参考に岩盤の亀裂条件（亀裂密度、開口幅分布等）を設定し、グラウトにより改良される最小亀裂開口幅と湧水量の関係について予察的に検討した結果について報告する。

2. 亀裂性岩盤のグラウト改良効果の評価方法

天然の岩盤亀裂は、開口幅の変化や亀裂充填鉱物の存在等により複雑な形状を示し、グラウト材料の浸透性は、幾何学的亀裂開口幅に依存する。一方、湧水量を算定するためには、岩盤の透水係数が必要となるが、その際に支配的となる亀裂開口幅は、上記の変動因子を考慮して平均化された水理学的亀裂開口幅である（図1）。水理学的および幾何学的亀裂開口幅の関係は、実測データに基づいて例えばAlvarezら³⁾によって整理されているが、本検討では他の文献調査結果も加え両者の関係式を導出した（図2）。

水理学的亀裂開口幅 b を有する亀裂の透水量係数 T_f は、水の密度を ρ 、粘度を μ とすると、 $T_f = \rho g b^3 / 12 \mu$ で表わされる。複数の亀裂を含む透水量係数は $T = \sum T_f$ となるから、対象区間の延長を L とすれば岩盤の透水係数は $K = T/L$ となる。ここで、グラウトにより改良される最小水理学的亀裂開口幅を b_g とすれば、改良範囲の透水係数 K_i は、 $b < b_g$ である亀裂全体の透水量係数を T_i とし、 $K_i = T_i/L$ で求められる。

トンネル湧水量は、グラウト後の定常湧水量の推定に使用されている下記の簡易式⁴⁾で求めることとした。

$$Q = \frac{2\pi \cdot K_i \cdot h}{\ln\left(\frac{R+t}{R}\right) + \frac{K_i}{K} \cdot \ln\left(\frac{2h}{R+t}\right) + \xi}$$

Q: トンネル内湧水量 [m³/s/m], K_i : グラウト改良部の透水係数 [m/s],
K: 母岩の透水係数 [m/s], R: トンネル半径 [m], t: グラウト改良範囲 [m], h: 土被り [m], ξ : トンネル周囲の水圧低下を考慮したスキンファクター（一般に2~7を採用）

3. 検討方法及び検討結果

上記の方法により、グラウトにより改良される最小幾何学的亀裂開口幅と湧水量の関係について検討した。透水量係数分布については、第2次取りまとめのレファレンスケース²⁾を標準ケースとし、対数平均を1桁増減したもの、対数標準偏差を2倍、0.5倍したものを組合せた9ケースを（図3）、亀裂密度については、第2次取りまとめの花崗岩における割れ目頻度分布を網羅するように、0.1本/m、1本/m、10本/mの3ケースを対象とした。なお、亀裂の透水量係数分布と亀裂密度から計算される27ケースの母岩（改良前の岩盤）の透水係数は $10^{-11} \sim 10^{-4}$ m/sであった。またトンネル深度、改良範囲、スキンファクターについては、組み合

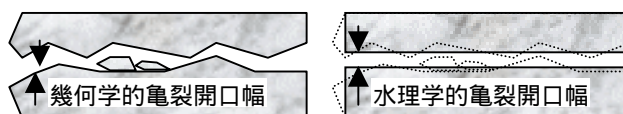
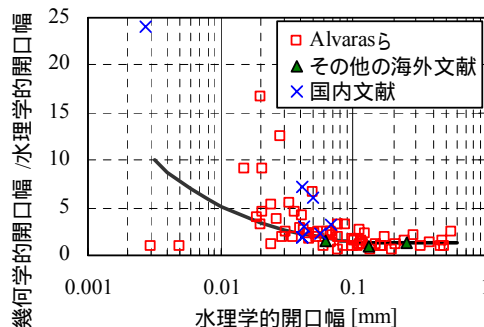


図1 幾何学的亀裂開口幅と水理学的亀裂開口幅のイメージ



近似曲線 $y = 0.357x^{-0.580}$ ($x < 0.1$)
(最小2乗法) $y = 1.356$ ($x > 0.1$)

図2 幾何学的亀裂開口幅と水理学的亀裂開口幅の関係に関する文献調査結果

わせの中で湧水量が最大、中程度、最小となる3ケースとし、合計81ケースを検討対象とした。

グラウトにより改良される最小幾何学的亀裂開口幅と湧水量の関係の一例を図4に示すが、湧水量をある一定量に抑制するためには、トンネル深度が深いほど微細な亀裂まで改良する必要があることが分かる。表1は海外の検討例¹⁾を参考に許容湧水量を10, 5L/min/100mと設定した場合の改良が必要な最小幾何学的亀裂開口幅について整理したものがあるが、亀裂密度が高いほど改良が必要な最小幾何学的亀裂開口幅は小さくなり、最小で40 μ m程度となっている。また、図5は許容湧水量5L/min/100mを達成するために改良が必要な最小幾何学的亀裂開口幅と母岩の透水係数の関係を示したものであるが、透水係数が 10^{-9} m/s以上の場合は、改良が必要との結果が得られた。

4. まとめ

第2次取りまとめに示された地質環境条件をベースとした検討結果によれば、処分施設の坑道内への湧水量を仮に数L/分/100mに制限しようとする、40 μ m以上の開口幅を有する岩盤亀裂を改良する必要があることが示唆された。ただし、検討においては、水理学的亀裂開口幅と幾何学的亀裂開口幅との関係の設定や、グラウト材料が浸透した岩盤亀裂は完全に止水されるなど様々な仮定が含まれるため、確定的な検討結果ではないが、グラウト材料を選定する際の参考になるものと考えられる。例えば文献4)によれば、最大粒径が15 μ mの超微粒子セメントが改良可能な最小亀裂開口幅の目安は50 μ m程度とされており、このようなことを考慮すると、今後は懸濁型ではない溶液型グラウトも視野に入れ検討する必要があると考えられる。

なお、本検討は経済産業省資源エネルギー庁の「平成19年度地層処分技術調査等委託費(高レベル放射性廃棄物処分関連：地下坑道施工技術高度化開発)」の一部として実施したものである。

参考文献

- 1) Emmelin, A., Brantberger, M., Eriksson, M., Gustafson, G., Stille, H.: Rock grouting. Current competence and development for the final repository, SKB Report R-07-30, SKB (2007)
- 2) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第2次取りまとめ - 分冊1 わが国の地質環境, JNC TN1400 99-021 第 章 (1999)
- 3) Alvarez, T. A. Jr., Cording, E. J., Mikhail, R. A.: Hydromechanical behavior of rock joints. A re-interpretation of published experiments, Rock Mechanics, Daemen and Schultz (eds), Balkema, Rotterdam (1995)
- 4) Finnish Tunnelling Association: Hard rock tunnel grouting practice in Finland, Sweden, and Norway-literature study (2003)

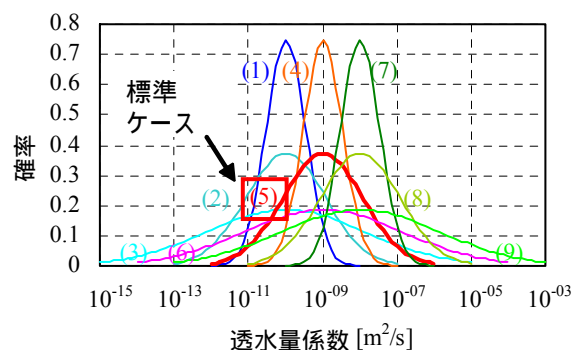


図3 検討に使用した透水量係数分布

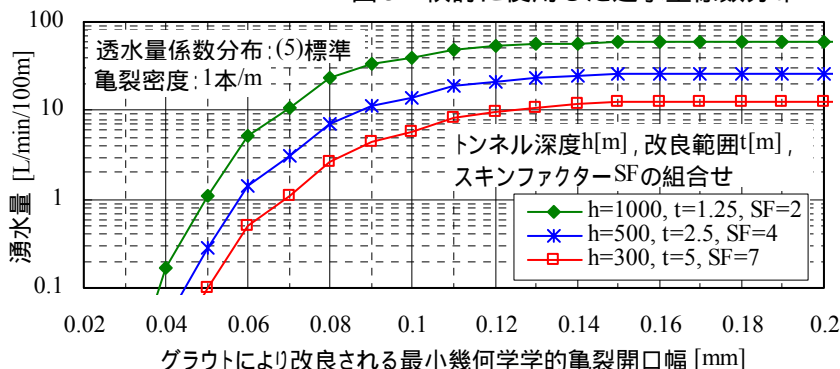


図4 グラウトにより改良される最小幾何学的亀裂開口幅と湧水量の関係

表1 許容湧水量と最小幾何学的亀裂開口幅

		許容湧水量 [L/min/100m]	
		10	5
亀裂密度 [本/m]	10	40 ~ 90 μ m	40 ~ 70 μ m
	1	70 ~ 130 μ m	60 ~ 100 μ m
	0.1	90 ~ 240 μ m	80 ~ 230 μ m

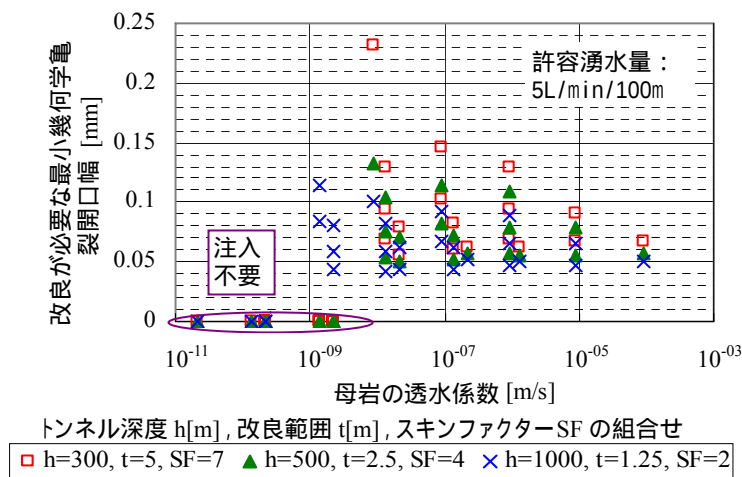


図5 母岩の透水係数と最小幾何学的亀裂開口幅の関係