

(57) 原位置における粘土グラウト試験
CLAY GROUTING EXPERIMENT AT THE KAMAISHI MINE

杉田 裕・藤田朝雄**
Yutaka SUGITA and Tomoo FUJITA

ABSTRACT

This paper presents the results of clay grouting experiment for the sealing system in the fractured rock at the Kamaishi Mine. Grout of bentonite content 0.2-8.0% were injected with a injection pressure 1.0MPa into the rock mass through certain fractures. The grouting method was static injection method with step-up bentonite slurry density. The summarized results are as follows.

- Injection rate of bentonite slurry decreased with increasing of bentonite slurry density.
- The hydraulic conductivity of fractured rock mass was effectively improved by bentonite grouting with static injection method.

地下空間利用，シーリング，粘土グラウト，ベントナイト

1.はじめに

地下空間の利用として地下深部の岩盤中に空洞を掘削すると、亀裂からの湧水や、空洞周辺に力学的、水理学的緩み域の発生に伴う地下水の卓越流路の形成を伴うことが考えられる。掘削された空洞周辺の亀裂を充填し、緩み域を改良する方法の一つとして、グラウト注入があげられる。グラウト材料としては、その止水性、耐久性等を要求性能として考えた場合、セメント系材料及び粘土系材料の2種類に大別される。セメント系材料は、地質条件の良くない岩盤の強度等を改良するのに有効であり¹⁾、粘土系材料は、地質環境への化学的影響が避けられ、天然の亀裂充填鉱物と類似して長期安定性が期待できると考えられる。

固形化しない粘土系グラウトは、主として亀裂等のめづまり効果を期待するものであるが、緩み域の地下水流動の低減化に対しては、その止水効果、安定性、改良範囲の評価が重要となる。坑道のシーリング技術に関する研究はこれまでに候補材料の特性試験、長期健全性の確認、設計、施工等の面からの研究²⁾及び基礎試験³⁾が進められてきた。しかし、粘土系材料のグラウトへの適用例は、海外における試験例⁴⁾等の他は、国内においては久慈における国家石油地下備蓄⁵⁾での施工実績等に限られその適用例は極めて少ない。本報では、原位置における粘土グラウトの適用試験を実施し、止水性に関する粘土グラウトの基本特性を得たので報告する。

2.試験位置

* 動力炉・核燃料開発事業団
**正会員 動力炉・核燃料開発事業団

本試験は、岩手県釜石市釜石鉱山内にある釜石原位置試験場で実施した。原位置試験場は、釜石鉱山内の大峰550m坑内に位置し、栗橋閃緑花崗岩を母岩とする。試験場は、図-1に示すNW坑道の壁面観察によれば、平均割れ目頻度は1.3本/mであり、卓越方向はN65°E75°NWである。試験場の被り厚さは約310mであり、応力開放法によると地圧の大きさは鉛直成分8.9MPa、水平成分の南北方向は18.2MPa、東西方向15.3MPaである⁶⁾。

試験区域は、高さ5m、幅5m、奥行10mの試験坑道の床盤とし、長さ50cm以上の亀裂観察の結果、図-2のように多くはN50-90°Eの走向を持ち、傾斜は急角度のものが多く。グラウトの試験対象亀裂は、天盤の亀裂観察の結果、天盤から湧水のある亀裂と湧水のない亀裂に対応する床盤の亀裂群A及び亀裂群Bの2種類の亀裂群とした。亀裂群A、Bにはそれぞれトモグラフィー用の観測孔2本、グラウト注入孔1本を配置した。試錐孔は直径86mmとし、長さは観測孔が7.0m、注入孔が5.0mであり、試錐方向は鉛直下向きとした。BTV観察の結果、亀裂群Aの注入孔KBG-3には27本の亀裂が存在し、全てヘアクラックであった。亀裂群Bの注入孔KBG-6には36本の亀裂が存在し、深度4.34m(開口幅1mm)、同4.45m(同0.5mm)、同4.75m(同0.5mm)に3つの開口亀裂が確認され他はヘアクラックであった。

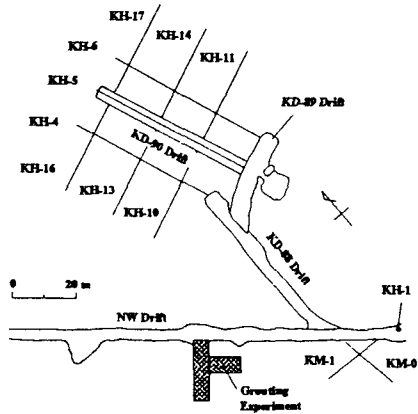
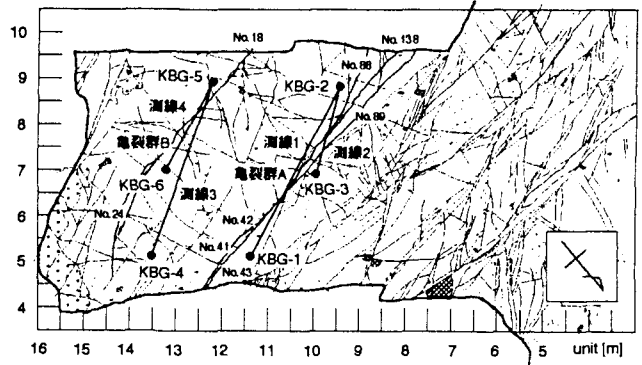


図-1 試験実施位置



亀裂群A：観測孔；KBG-1,KBG-2, 注入孔；KBG-3
トモグラフィー測線1；KBG-1-2, 測線2；KBG-2-3
亀裂群B：観測孔；KBG-4,KBG-5, 注入孔；KBG-6
トモグラフィー測線3；KBG-4-5, 測線4；KBG-5-6
※ 図中のNo.は床盤の亀裂観察に基づく亀裂番号を示す。

3. 注入試験

グラウト材として本試験ではクニゲルVAを用いた。諸特性は、クニゲルV1とほぼ同様であり、粒径がクニゲルV1より小さい。グラウト注入は図-3のような既存の注入装置で静的注入法により実施した。注入圧は、カバーロックの大きさ(孔口から1mの位置にパッカーを設置)及びセメントグラウトの実績を考慮して1.0MPaの一定圧とした。流量計では時間毎のグラウト材の注入量をモニターした。注入濃度は0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0重量%と低濃度から順に段階的に上昇させた。

亀裂群Bでは、注入圧力の違いによる注入速度に対する影響を確認するため、注入濃度0.2及び0.5重量%において注入圧を1.5MPaとした。

図-2 試験レイアウト

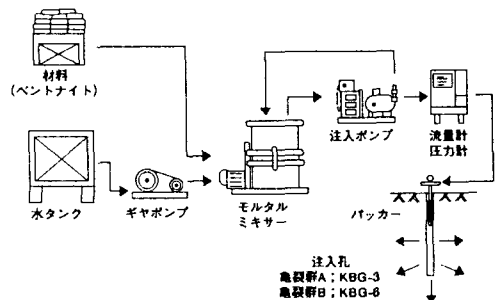


図-3 グラウト注入模式図

4. 効果確認試験

グラウト効果を確認する方法としてグラウト注入前後に透水試験を実施した。試験方法は、グラウト注入と同様のシングルバッカー方式のルジオンテストとした。バッカーは孔口から1mの位置に設置した、注水圧は5段階（30、50、70、90、100kPa）の昇圧及び降圧とした。

また、ベントナイトが持つ電気的特性を考慮して電磁波トモグラフィーを実施し、グラウト浸透範囲の推定を試みた。電磁波トモグラフィーは、2孔間の電磁波速度分布から地質状況を推定する透過法⁷⁾とした。測線は、図-2に示すように各亀裂群とも2測線とし、測定周波数150MHz、測定間隔25cmとした。速度トモグラフィー解析では、初めにBPT法（逆投影法）により初期値を計算し、それを基に、SIRT法（同時反復法）により繰り返し計算を行い、収束誤差を小さくするように電磁波速度分布を求めた。速度変化によるトモグラフィーでは、電磁波の場合屈折波が小さいため、送信点と受信点の波線を直線と仮定した。

5. 試験結果および考察

5.1 グラウト注入試験

図-4にKBG-3における各注入濃度[%]での注入圧[MPa]及びグラウト液注入量[l]の経時変化を示す。図から注入圧は設定以後は一定圧で制御できており、また注入濃度が低い0.2重量%のものが注入量が最も多く、注入濃度が高い8.0重量%のものが最も少なくなった。これは、図-5に示すKBG-6においてもほぼ同様の結果であった。

グラウト液の平均注入速度[l/min.]と注入濃度[%]の関係を図-6に示す。KBG-3、KBG-6ともに注入濃度の増加とともに注入速度は低下した。

図-7はKBG-6の注入圧力が異なる場合の試験結果である。濃度0.2重量%の場合、最初の注入である1.0MPaの場合よりも1.5MPaの場合の方が注入速度は減少した。注入圧1.5MPa一定下では、注入濃度が上昇すると注入速度は僅かながら減少しており、注入圧1.0MPaの場合と同様の傾向を示した。

一方、単位時間当たりの注入ベントナイト量（ベントナイト注入速度）[g/min.]と注入濃度[%]の関係を図-8に示す。図から、注入濃度の増加に伴いベントナイト注入速度は増加した。しかし、注入濃度4.0重量%前後で、注入濃度を上げてベントナイト注入速度が変わらなくなる傾向を示した。

これらは、グラウトの浸透による亀裂のめづまりや濃度の上昇による粘性抵抗の増加によるものと考えられる。KBG-6の全体のグラウト注入量がKBG-3と比較して多いが、これは孔中の開口亀裂の影響と

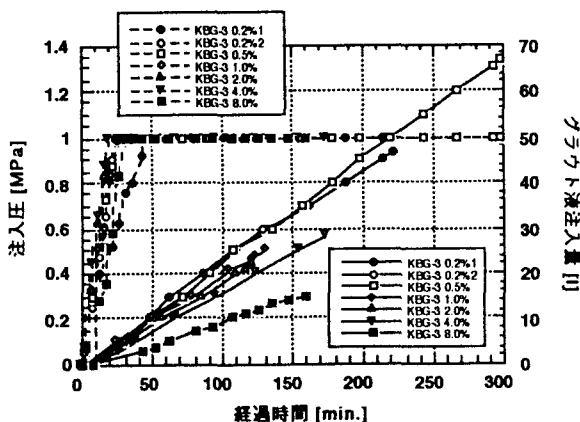


図-4 注入試験結果 (KBG-3)

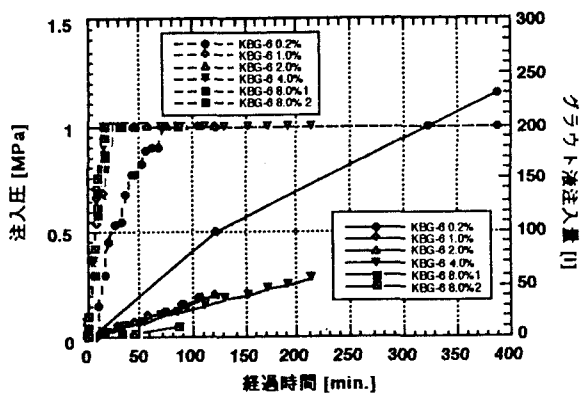


図-5 注入試験結果 (KBG-6)

考えられる。注入濃度8.0重量%は2日に分けて注入したが、図-8からベントナイト注入速度は10.7から9.1 g/min.に減少しており、亀裂のめづまりを反映していると考えられる。

5.2 効果確認試験

粘土グラウト注入前後の透水係数の比較を表-1に示す。亀裂群Aを対象としたボーリング孔KBG-3のグラウト注入前の透水係数は 9.6×10^{-6} cm/sであり、注入により 2.5×10^{-10} cm/sへ透水係数が減少し、亀裂群Bを対象としたボーリング孔KBG-6のグラウト注入前の透水係数は 4.2×10^{-6} cm/sであり、注入により 1.1×10^{-6} cm/sへ透水係数が減少した。この結果は、今回使用したベントナイトが、亀裂の止水性に有効であることを示すものであると考えられる。

図-9に亀裂群Bに関してのグラウト注入前後での電磁波トモグラフィーの速度変化分布を示す。速度が遅くなったものをマイナスとした。(a)の測定断面KBG-4-5では、KBG-5孔の深度1m近傍からKBG-4孔の深度5m当たりへと斜めに速度が遅くなっており、最大速度変化率は4.0%を超えている。この地点はトモグラフィーの測線と亀裂群Bの構成亀裂No.18が交わる地点であり、亀裂No.18及びそれに付随する亀裂にそってグラウトが浸透した結果、亀裂内の比誘電率が增大し、速度が遅くなったと考えられる。(b)の測定断面KBG-5-6では、注入孔KBG-6のほぼ全域で速度が遅くなっており、特に深度4m-5m付近で著しく速度が遅くなっている。これは、注入孔の開口亀裂の位置に対応しており、グラウトが注入孔から亀裂内へ浸透し、亀裂内の比誘電率が增大した結果を捉えたものと考えられる。

6. まとめ

地下深部岩盤内での空洞掘削に伴う緩み域を改良する方法の一つとして、天盤から湧水のある亀裂に対応する亀裂群Aと湧水のない亀裂に対応する亀裂群Bを対象としたベントナイトの原位置グラウト試験を釜石原位置試験場において実施した。試験の結果、以下の知見が得られた。

1)本試験範囲では、静的注入法によりグラウト注

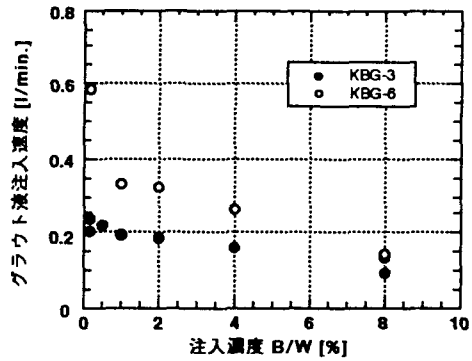


図-6 注入濃度と注入速度の関係

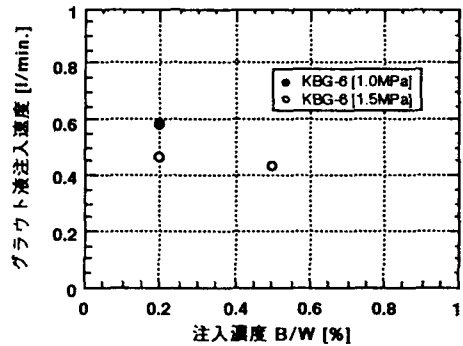


図-7 注入濃度と注入速度の関係 (圧力依存性)

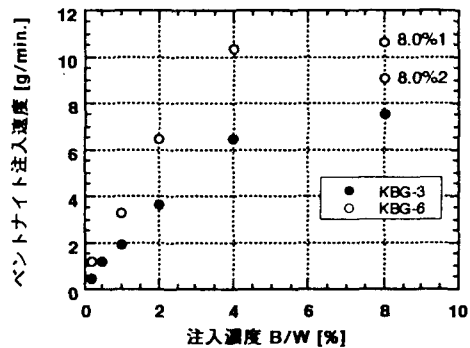


図-8 注入濃度とベントナイト注入速度の関係

表-1 透水試験結果一覧

	KBG-3		KBG-6	
	最高圧力 [kPa]	透水係数 [cm/s]	最高圧力 [kPa]	透水係数 [cm/s]
グラウト前	117.2	9.6×10^{-6}	110.8	4.2×10^{-6}
グラウト後	117.1	2.5×10^{-10}	110.8	1.1×10^{-8}

透水係数は、全て昇圧時の最小圧力段階と最大圧力段階における5~10分後の平均注水量から算出した。なお、各段階での圧力の変動幅は2.0kPa程度。

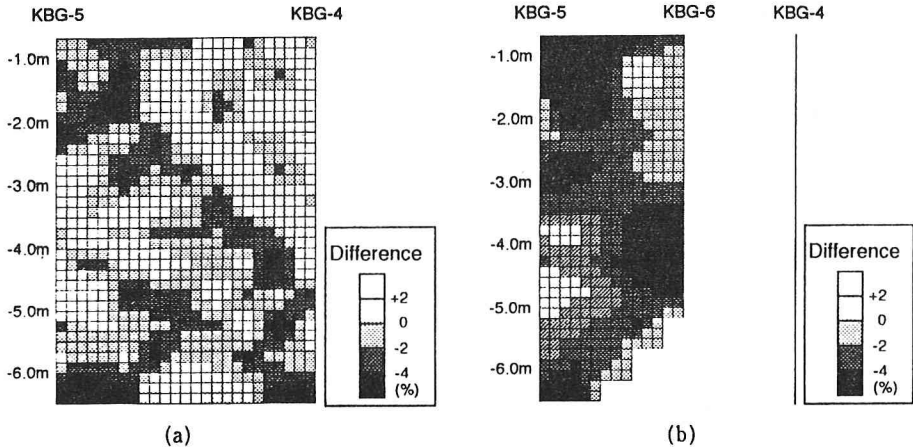


図-9 トモグラフィー結果 (亀裂B)
 (a)測線3; KBG-4-5, (b)測線4; KBG-5-6

入が可能であった。

- (2)今回対象とした亀裂群については、亀裂によらず注入濃度が大きくなるとグラウト液の注入速度は小さくなった。
- (3)亀裂群A, Bともにベントナイト注入速度は注入濃度とともに増加するが、注入濃度4.0重量%前後から注入速度が上がらなくなり、亀裂のめづまりと考えられる傾向を示した。
- (4)粘土グラウトにより亀裂群の透水係数が減少した。
- (5)電磁波トモグラフィーでは、グラウトの浸透を速度変化で捉える可能性があることを示した。

今回の試験では、注入速度の増加に伴うグラウト液注入速度の低下が粘性効果によるものか、亀裂のめづまりの進展によるものかについて必ずしも十分な把握ができなかった。今後、これらの点を明確にするとともにグラウトの長期安定性把握のため継続して試験を実施する計画である。

なお、本試験を実施するに当たって、鹿島建設株式会社の戸井田克氏をはじめ、多数の方々にご協力を頂いた。ここに記して各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会：土木技術者のための岩盤力学・昭和54年版, 1979
- 2) R. Pusch et al. : Final Report of the Borehole, Shaft, and Tunnel Sealing Test -Volume II: Shaft plugging, STRIPA PROJECT TR87-02, 1987
- 3) 増田純男, 棚井憲治：高レベル放射性廃棄物地層処分場のシーリング, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN1410 91-050, 1991
- 4) L. Börgesson et al. : Final Report of the Rock Sealing Project -Sealing of the Near-Field Rock Around Deposition Holes by Use of Bentonite Grouts, STRIPA PROJECT TR91-34, 1991
- 5) 蒔田敏明, 宮永佳晴：粘土グラウトによる地下水の制御, 土木施工, No.33, vol.12, pp. 30-38, 1992
- 6) 福田和寛：花崗岩中のトンネル掘削に伴う岩盤挙動と物性変化, 第8回岩の力学国内シンポジウム, pp. 231-236, 1992
- 7) 日比谷啓介他：ボアホールレーダーによる地盤調査技術の開発, 鹿島技術研究所年報, 40号, pp. 205-210, 1992
- 8) M. Uchida, A. Sawada : Discrete fracture network modelling of tracer migration experiments at the Kamaishi mine, M.R.S. Symp. Proc., vol. 353, pp. 387-394, 1995