

大深度における亀裂性岩盤の シーリング技術の開発

(研究課題番号：13450416)

平成13年～15年度科学研究費補助金

(基盤研究(B)(2))

研究成果報告書

京都大学図書



1040941102

附属図書館

平成16年3月

研究代表者 青木 謙治

(京都大学大学院工学研究科 教授)

はしがき

高レベル放射性廃棄物の処分施設において、核燃料サイクル機構“第2次取りまとめ”では、岩盤の湧水を伴う割れ目を埋め戻し時に粘土グラウト等により処理することになっている。しかしながら、建設中、操業時に、湧水を伴う割れ目に適切な止水処理を行わないと、サイト全体の地下水流動が著しい影響を受けるため、深部地下水環境を維持するためのフラクチャーシーリング技術の開発は極めて重要な課題であると考えられる。具体的には、従来のダム建設やトンネル建設などでは透水性改良の対象とされていなかった低透水性の岩盤の微小亀裂についてもシーリングを行い、透水性を改良することが必要となる。しかしながら、従来のグラウチング工法ではこのような低透水性岩盤の微小亀裂を十分に改良することは困難であり、新たなグラウチング工法の開発が必要である。

このような背景のもと、低透水性岩盤の微小亀裂に対するグラウチング工法として、古くはSTRIPAプロジェクトでも検討された動的注入工法が有用と考えられる。この工法は一定の注入圧力（定常圧）に振動圧を付加してグラウトを注入する工法である。研究代表者らの研究グループでは、長時間にわたってグラウト注入が可能である実用的な動的注入装置の開発、静的注入工法に対する動的注入工法の優位性の確認、動的注入工法によるグラウト注入メカニズムの解明、対象岩盤に応じた効果的な注入仕様の決定方法の確立、などの課題に取り組んできた。

さて、岩盤内の地下水挙動の評価については、調査・試験、解析、モニタリングといった個別技術の研究が進められてきたが、高レベル放射性廃棄物の地層処分における岩盤のバリア機能を確保するために深度の地下水流動挙動を評価し、微細な亀裂群からなる透水経路に効率的なシーリンググラウトを行う体系化されたシステムについての研究はほとんど実施されていない。そこで、本研究では、「大深度における亀裂性岩盤のシーリング技術」の開発として、以下の3課題に対する検討を重点的に行った。

- ①大深度岩盤内における地質状況の評価方法の開発
- ②大深度岩盤内における水理性状の評価方法の開発
- ③地下深部の亀裂群に対する高精度かつ効率的なシーリンググラウト技術の開発

①大深度岩盤内における地質状況の評価方法の開発

本課題については、TBM掘進データや反射トモグラフィーといった新しいデータ取得技術を用いて、坑道掘削時に地質状況を高精度に評価するための方法を開発した。特に、地質状況の空間的評価にあたっては地球統計学を利用し、合理的かつ高精度に地質評価を行うことが可能となった。

②大深度岩盤内における水理性状の評価方法の開発

本課題については、クロスホール透水試験により得られた計測データの処理に今回新規に開発した水圧トモグラフィ手法を用いた高精度3次元クロスホール透水試験によるイメージング技術を開発した。

大深度岩盤内の地下水の不均質流れは、水みちとなる不連続面のみを地下水が支配的に流れるために生じる。したがって、このような水みち（卓越透水経路）を特定することが重要であるが、通常のジオトモグラフィをベースとする技術では水みちを精度よく把握することが困難であり、これまでと異なる新しい調査・イメージング手法を開発する必要がある。

そこで、まず、亀裂性岩盤の透水特性、特に深部岩盤内の地下水の選択的な流動経路を検知する手段として、複数のボーリング孔を用いて注水孔と観測孔との間の透水特性を明らかにするクロスホール透水試験について検討を行うとともに、予備的な実験を原位置において実施した。次に、クロスホール透水試験の結果から、多次元尺度構成法と逆距離補間法を利用して、不均質な岩盤の水理地質構造を合理的に推定する手法を構築した。さらに構築した手法の妥当性・有効性を検証するために、数値シミュレーションによる検討を行ったところ、様々なタイプの水理地質構造を適正に再現できることが判明した。

③地下深部の亀裂群に対する高精度かつ効率的なシーリンググラウト技術の開発

本課題については、まず大深度における亀裂性岩盤へのシーリング技術のうち、注入材として超微粒子のポルトランドセメント系注入材を用い、これを注入圧を動的に変化させながら亀裂内に充填する動的注入工法の予備検討を行った。脈動発生装置を改良することで、より高い周波数の脈動発生が可能な現場注入システムを開発した。また、原位置注入試験から、動的注入工法が静的注入工法に比べて、同一地山に対してより多くのグラウト材を短時間で注入できることを確認した。動的注入工法の特長として、2～4 Lu 程度の岩盤に対しては 10Hz 程度の脈動が最適であること、振幅の大きさと注入効率の相関は低く、注入脈動圧の低圧部をより低くすることの方が効果的であること、静的注入終了後に動的注入を行った場合、更なる再注入効果のあることが明らかになった。

これらの予備検討結果を基に、岩盤のシーリング技術としてのグラウトの最適注入仕様を合理的に決定するために必要となる亀裂内グラウト充填メカニズムを理論的に検討した。検討にあたっては、グラウト材の①流動メカニズム（流動性の向上）と②充填メカニズム（目詰まり発生の抑制）の2つに分けて詳細な検討を行った。

まず、①流動メカニズムを明らかにするために、人工亀裂模型を用いた室内実験および理論的検討を行い、注入パラメータと流体の見かけ粘性の低下に関する関係を明らかにした。次に、②充填メカニズムを明らかにするために、現場実験および理論的検討を行い、

注入流量の時間変化および注入パラメータとの関係を明らかにした。これにより、対象とする亀裂に対する最適注入パラメータを数値シミュレーションにより決定することが可能となり、注入システムの合理的な構築が可能となった。

このモデルの妥当性を検証するために、超微粒子のポルトランドセメント系注入材を用いて、岩盤亀裂を模擬した人工亀裂模型に対する注入実験を行ったところ、動的注入効果が確認されるとともに、構築したモデルによってグラウト流量の経時変化をよく説明できることが判明した。さらに原位置グラウト試験結果に対して本モデルを適用したところ、グラウト流量の経時変化が試験結果とよく適合したことから、当モデルの妥当性と有効性が確認された。

以上の検討結果から、低透水性の微小亀裂が分布する大深度岩盤内における水理特性の不均質性を的確に評価し、動的注入工法により確実にシーリングを行うことによって透水性を改良する亀裂性岩盤に対する合理的なフラクチャーシーリングシステムを構築することができた。当システムの構築により、地層処分技術のうち、バリアシステムの研究開発に多大の貢献を期待できると共に高圧ガス岩盤タンク、CAESなどの実現に大きく寄与することができるものと考えられる。

研究組織

研究代表者	青木 謙治	(京都大学大学院 工学研究科 教授)
	菅野 強	(京都大学大学院 工学研究科 助教授)
	新苗 正和	(京都大学大学院 工学研究科 助教授)
	水戸 義忠	(京都大学大学院 工学研究科 助 手)

研究経費

平成 13 年度	5,900 千円
平成 14 年度	3,700 千円
平成 15 年度	2,000 千円
合 計	11,600 千円

研究発表

- Suguru Shirasagi, Takuji Yamamoto, Michihiro Inou, Shinya Yamamoto, Yoshitada Mito, Kenji Aoki: Development of Intelligent TBM Excavation Control System, Rock Mechanics - a Challenge for Society, pp.615-620, (2001)
- Takuji Yamamoto, Suguru Shirasagi, Shinya Yamamoto, Yoshitada Mito, Kenji Aoki: Evaluation of the Geological Condition ahead of the Tunnel Face by Geostatistical Techniques using TBM Driving Data, Modern Tunneling Science and Technology, pp.213-218, (2001)
- Takuji Yamamoto, Suguru Shirasagi, Michihiro Inou, Kenji Aoki: Systems for forward Prediction of Geological Condition ahead of the Tunnel Face, Modern Tunneling Science and Technology, pp.237-242, (2001)
- 白鷺 卓, 山本拓治, 西岡和則, 青木謙治: 反射トモグラフィ法を利用したトンネル周辺地質の予測, 第 11 回岩の力学国内シンポジウム, F18, (2002)
- 伊達健介, 山本拓治, 桑川政則, 大場康信, 青木謙治: 低透水性岩盤における動的注入工法の適用結果, 第 11 回岩の力学国内シンポジウム, G01, (2002)
- 水戸義忠, 西坂直樹, 山本真哉, 青木謙治: 不連続面トレースの情報を活用した岩盤不連続面方向の合理的決定手法, 第 11 回岩の力学国内シンポジウム, J10, (2002)
- 脇田伸吾, 伊達健介, 山本拓治, 黒川義民, 水戸義忠, 青木謙治: 低透水性岩盤における動的注入工法の基礎的検討, 第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 197~202 頁, (2003)
- 山本拓治, 白鷺 卓, 富田諭, 青木謙治: 3 次元孔間弾性波トモグラフィーによるグラウト効果の評価, 第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 203~208 頁, (2003)
- Kenji Aoki, Yoshitada Mito, Takuji Yamamoto, Suguru Shirasagi: Prediction of the rock

properties ahead of the tunnel face in TBM tunnels by geostatistical simulation technique, Environmental Rock Engineering, Proceedings of the First Kyoto International Symposium on Underground Environment, pp. 247-252, (2003)

- Tetsuya Matsuoka, Masakazu Niinae, Yoshitada Mito, Kenji Aoki: A Study on Long-term Behavior of Groundwater Flow in Coastal Aquifer, Environmental Rock Engineering, Proceedings of the First Kyoto International Symposium on Underground Environment, pp. 337-344, (2003)
- Kenji Aoki, Yoshitada Mito, Yoshitami Kurokawa, Takuji Yamamoto, Kensuke Date, Shingo Wakita: Development of dynamic grouting technique for the improvement of low-permeable rock masses, Environmental Rock Engineering, Proceedings of the First Kyoto International Symposium on Underground Environment, pp. 345-352, (2003)
- Kensuke Date, Shingo Wakita, Takuji Yamamoto, Y. Nakashima, Y. Hoshino, Yoshitada Mito, Kenji Aoki: Development of dynamic grouting technique for the ground improvement, International Tunnel Association World Congress, (2003)
- Yoshitada Mito, Takuji Yamamoto, Suguru Shirasagi, Kenji Aoki: Prediction of the geological condition ahead of the tunnel face in TBM tunnels by geostatistical simulation technique, ISRM 2003-Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy, (2003)
- Yoshitada Mito, Takuji Yamamoto, Suguru Shirasagi, Kenji Aoki: Evaluation of dynamic grouting effect for low-permeable rock, ISRM 2003-Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy, (2003)
- Kenji Aoki, Yoshitada Mito, Takuji Yamamoto, Suguru Shirasagi: Evaluation of the rock property around TBM tunnels using seismic reflective survey data and TBM driving data, International Symposium on the Fusion Technology of Geosystem Engineering, Rock Engineering and Geophysical Exploration, Seoul, Korea, Nov. 18-19, (2003)
- 山本拓治, 白鷺 卓, 小倉永輔, 水戸義忠, 青木謙治: 反射法弾性波探査と TBM 機械データを利用した地球統計学によるトンネル切羽前方の地質評価, 第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, (2004)
- 脇田伸吾, 伊達健介, 山本拓治, 中村百合子, 水戸義忠, 青木謙治: 動的注入に関する室内・現場実験とグラウト充填過程モデルを用いた結果の解釈, 第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, (2004)
- 青木謙治, 水戸義忠, 山本真哉: クロスホール透水試験による岩盤の水理地質構造の新しい評価方法の提案, 第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, (2004)

目 次

1. 大深度地質状況の評価	1
1.1 Development of Intelligent TBM Excavation Control System	3
1.2 Evaluation of the Geological Condition ahead of the Tunnel Face by Geostatistical Techniques using TBM Driving Data	9
1.3 Systems for forward Prediction of Geological Condition ahead of the Tunnel Face	15
1.4 反射トモグラフィ法を利用したトンネル周辺地質の予測	21
1.5 不連続面トレースの情報を活用した岩盤不連続面方向の合理的決定手段	27
1.6 Prediction of the rock properties ahead of the tunnel face in TBM tunnels by geostatistical simulation technique	33
1.7 Prediction of the geological condition ahead of the tunnel face in TBM tunnels by geostatistical simulation technique	39
1.8 Evaluation of the rock property around TBM tunnels using seismic reflective survey data and TBM driving data	43
1.9 反射法弾性波探査と TBM 機械データを利用した地球統計学によるトンネル切羽 前方の地質評価	51
2. 岩盤の水理性状の把握	57
2.1 3次元孔間弾性波トモグラフィによるグラウト効果の評価	59
2.2 A Study on Long-term Behavior of Groundwater Flow in Coastal Aquifer	65
2.3 クロスホール透水試験による岩盤の水理地質構造の新しい評価方法の提案	73
3. 動的注入技術の開発	79
3.1 低透水性岩盤における動的注入工法の適用結果	81
3.2 低透水性岩盤における動的注入工法の基礎的検討	87
3.3 Development of dynamic grouting technique for the improvement of low-permeable rock masses	93
3.4 Development of dynamic grouting technique for the ground improvement	101
3.5 Evaluation of dynamic grouting effect for low-permeable rock	107
3.6 動的注入に関する室内・現場実験とグラウト充填過程モデルを用いた結果 の解釈	113