小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験（2）
― 瑞浪超深地層研究所を活用した実証試験 ―

清水建設（株）　正会員　○石塚　光
清水建設（株）　正会員　矢萩　良二
清水建設（株）　正会員　戸栗　智仁
（国研）日本原子力研究開発機構　正会員　松井　裕哉

1. はじめに

我が国の結晶質岩を対象とした地層処分埋め戻し技術オプションの整備の一環として、瑞浪超深地層研究所研究坑道の一部を利用し、全断面吹付け施工の適用性等を実証的に検討した。このうち、本報では小断面坑道に対する吹付け施工を、施工性と品質の観点から評価するとともに、品質確認手法として実施した密度測定やモニタリング結果について、その適用性や課題を報告する。

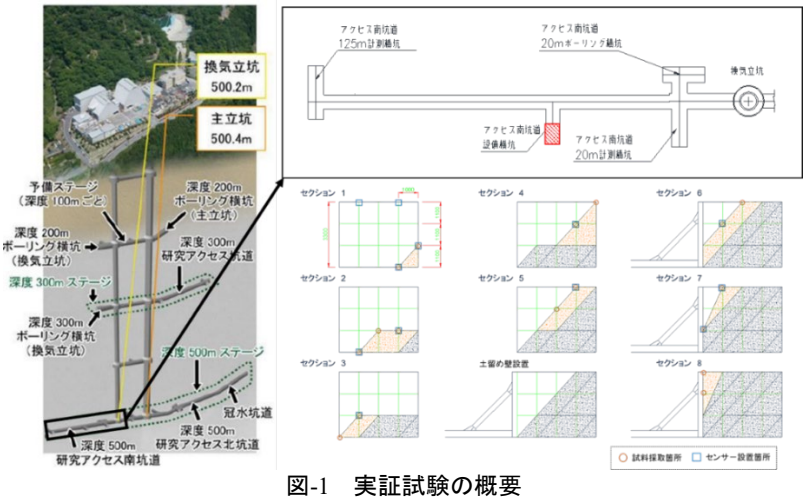


図-1　実証試験の概要

2. 実証試験の概要

実証試験は、瑞浪超深地層研究所の設備横坑（GL-500m）で実施した。埋め戻し対象範囲は切羽から 4m とし、計測センサー設置のため 8 セクションで吹付けを行った（**図-1**）。土留め壁は排水を許容する構造とした。埋め戻し材はクニゲル V1：砂＝15：85（w＝14±2%）とし、機械は、予備試験にて選定したものを編成、さらに空間的制約や電力量を考慮して設定した。表-1 に本試験の品質確認手法を示す。

表-1　品質確認手法（密度測定とモニタリング）

項目	計測方法	設置個数	目的
密度	試料採取	50 箇所	品質確認
	3D スキャナー	吹付け終了毎	
土圧	土圧計	10 個	膨潤圧の確認
水圧	水圧計	12 個	水圧の確認
水分	土壌水分計	10 個	浸潤過程の確認
流量	水位計	1 箇所	ベントナイト流出量の確認
濃度	吸光度計	1 箇所	

3. 吹付け施工の施工性と品質

本試験では施工性評価の指標として施工速度と吹付け速度、品質評価の指標として有効粘土密度（以下、ρ_e）を用いた。**表-2** に実証試験の結果、**図-2** に実証試験の様子を示す。施工速度は、作業員の習熟により作業が定常化し、施工の進行に伴って改善される傾向がみられた。一方で、ノズル移動や目詰まり等によって連続吹付けが困難であった場合は大きく施工速度が低下した（例えばセクション 4）。吹付け速度は、上向き吹付けによって吹付け圧力が低下したことで、一部低下がみられた（例えばセクション 4, 5）。ρ_e の全セクションの平均は、試料採取の場合は 0.507 Mg/m^3、3D スキャナーによる推定値では 0.460Mg/m^3 となり、本試験の目標値を満足した。

表-2　実証試験のサイクルタイムと有効粘土密度

項目	正味吹付け重量	施工速度	吹付け速度	有効粘土密度	
				試料採取	3D スキャナー
	(kg)	(kg/h)	(kg/h)	(Mg/m^3)	
予備試験（その2）	951.0	920.3	1967.6	0.534	-
セクション 1	6173.0	587.9	1119.0	0.447	0.326
セクション 2	13689.7	631.3	1342.1	0.527	0.450
セクション 3	8308.1	1100.4	1724.9	0.566	0.514
セクション 4	22394.4	842.4	1514.8	0.477	0.420
セクション 5	13542.6	1172.5	1599.5	0.521	0.408
セクション 6	16319.5	1034.0	1962.3	0.509	0.343
セクション 7	9115.8	885.0	1905.7	0.513	0.587
セクション 8	5015.3	837.8	1662.5	0.492	0.631

正味吹付け重量：材料投入重量―（はね返り重量＋ロス重量）
施工速度：吹付け施工に要した施工時間（段取、吹付け、中断、片付け等）から算出した速度
吹付け速度：施工時間のうち吹付け時間のみを抽出して算出した速度

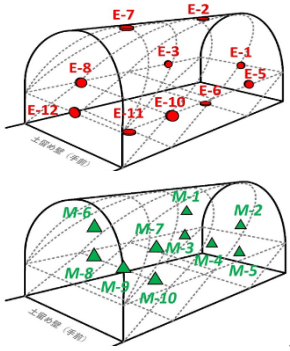
キーワード　吹付け施工、埋め戻し、サイクルタイム、有効粘土密度、モニタリング、3D スキャナー
連絡先　〒104-8370　東京都中央区京橋二丁目 16-1　清水建設（株）土木技術本部バックエンド技術部　Tel：(03)3561-3919

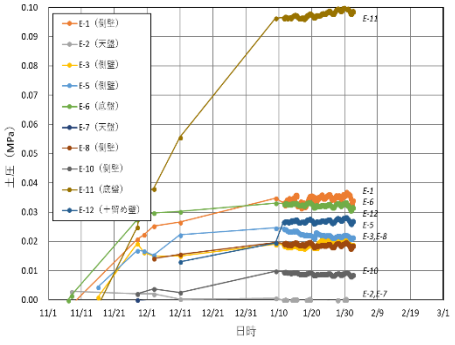
© Japan Society of Civil Engineers

4. 密度測定とモニタリングによる品質確認

試料採取による ρ_e は 3D スキャナーと比較して高い傾向を示したが、両測定結果には相関性がみられた。3D スキャナーによる測定は、施工中のはね返り材を含めた体積が取得されているため低い値となったと考えられる。図-3 より、土圧は側壁と底盤で 0.02～0.03MPa を示した（E-11 を除く）。一方で、天端では 0.00MPa を示しており、自重沈下によって埋め戻し材が土圧計感受面に接触していないことが考えられた。土留め壁を排水構造としたため、ほぼ全測点で水圧は 0MPa であった。土壌水分（飽和度）は、湧水発生がみられた切羽左側、側壁左側から高くなる傾向がみられた。ここで、埋め戻し材を飽和状態かつ静止状態と仮定し、土の自重による圧力を推定し、側壁と底盤における膨潤圧を算出するとおよそ全測点で 0MPa となる。有効粘土密度と平衡膨潤応力の関係式[1] $\sigma = \exp(3.94\rho_e{}^3 - 13.71\rho_e{}^2 + 18.06\rho_e - 9.60)$ より予測される、$\rho_e = 0.4\mathrm{Mg/m^3}$ の時の平衡膨潤応力は 0.013MPa となり膨潤圧は極めて小さく概略的な膨潤圧の算出結果と整合的である。また、ベントナイト流出量と総流量の関係を既往の研究結果[2]と比較すると（図-4）、材料や実験規模の違いに依らずほぼ同じ勾配となり、次の関係式が得られた。 $Y = 0.0015Q^{0.7809}$

図-2　実証試験の様子（右：3D スキャナーによる出来形測定）





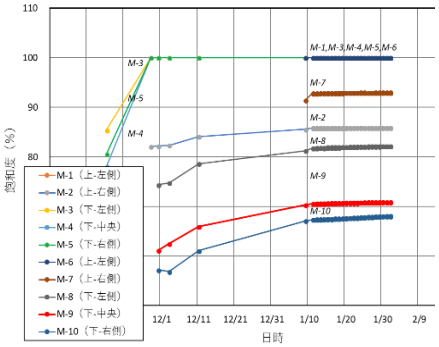


図-3　土圧計、土壌水分計の配置模式図とモニタリング結果

5. 全断面吹付け施工の適用性

予備試験と実証試験の結果から、材料仕様や使用機械、吹付け条件、施工環境が施工性と品質に大きく影響することがわかった。特に本試験では、上向き吹付けによる吹付け圧力の低下が大きく影響した。したがって、ノズルの改良や吐出量の確保等、吹付け圧力の低下の防止対策や管理が必要である。

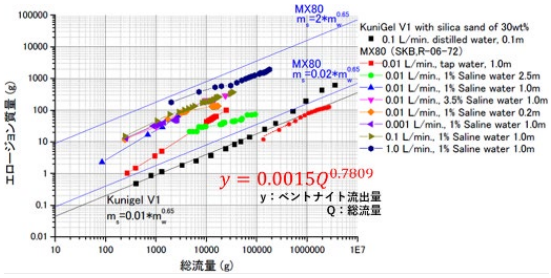


図-4　ベントナイト流出量と総流量の関係

6. 密度測定とモニタリングによる品質確認の有効性

試料採取による密度測定は、直接的に密度が得られるが、部分的に密度が低い箇所を見落す可能性がある。したがって、埋め戻し箇所全体の品質を評価するためには 3D スキャナーによる計測を併せて行うことが有効である。モニタリング結果から、埋め戻し箇所の土圧、水圧、水分移行を把握することができた。本試験期間内では、埋め戻し材の膨潤圧は確認できなかったが、今後飽和度の上昇に伴い膨潤圧が発生すると考えられる。一方で、天端付近の土圧計の値は今後も増加しない可能性があるため、天端付近の埋め戻しの際はベントナイト混合率を高くする等対策が必要と考えられる。また、既往の研究と同等のベントナイト流出傾向を取得できたことから、継続的にデータ取得を行うことで、埋め戻し材の状態変化に関する知見が得られると考えられる。

本報告は経済産業省資源エネルギー庁からの受託研究「平成 30 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業（地層処分施設閉鎖技術確証試験）」の成果の一部である。

参考文献： 1) JNC：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ－－分冊 2 工学技術の開発－，JNC TN1400 2005-015, 2005．2) RWMC：平成 27 年度 地層処分技術調査等事業処分システム工学確証技術開発報告書（第 2 分冊）－人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材, 2016.

© Japan Society of Civil Engineers