

小断面坑道の吹付けによる埋め戻し材の施工試験（１）

— 実証試験に向けた材料、機械の選定 —

清水建設（株） 正会員 ○矢萩 良二

清水建設（株） 正会員 石塚 光

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、本報では使用材料および使用機械による施工性や品質への影響について予備試験で調査した結果を報告する。また、予備試験の結果にもとづき実証試験で使用する材料、機械の選定を行った。

2. 使用材料

本試験では、材料の違いによる施工性や品質への影響を調査するため、ベントナイト、砂、碎石を混合した埋め戻し材 A とベントナイト、砂を混合した埋め戻し材 B を使用した（表-1）。埋め戻し材の仕様は、透水係数 1.0×10^{-8} 以下の低透水性を満足することとし、この時の埋め戻し材の有効粘土密度は、既往の検討結果¹⁾を参考に、海水系地下水を想定した場合にも透水係数を満足するよう 0.4 Mg/m^3 以上とした。なお、埋め戻し材中のベントナイトの配合率は15wt%である。

表-1 使用材料

名称	構成材料	配合(wt%)	$\rho_s(\text{Mg/m}^3)$
埋め戻し材 A	クニゲル V1	15	2.767
	砂 A	35	2.681
	碎石	50	2.686
埋め戻し材 B	クニゲル V1	15	2.759
	砂 B	85	2.674

表-2 室内締固め試験の結果

	埋め戻し材 A			埋め戻し材 B		
試験条件	1Ec	0.6Ec	0.4Ec	1Ec	0.6Ec	0.4Ec
$\rho_{dmax}(\text{Mg/m}^3)$	1.933	1.855	1.799	1.747	1.681	1.648
$w_{opt}(\%)$	11.6	12.5	14.8	14.2	14.5	15.9
$\rho_e(\text{Mg/m}^3)$	0.727	0.656	0.609	0.589	0.542	0.519

3. 埋め戻し材の締固め特性

既往の研究結果では、吹付け施工によって得られる乾燥密度は、室内締固め試験の最大乾燥密度を下回ることが報告されている²⁾。そこで、締固めエネルギーを変化させた締固め曲線（1Ec、0.6Ec、0.4Ec）をA-c 法により取得し、締固めエネルギーが0.4Ecの場合においても有効粘土密度が 0.4 Mg/m^3 以上になることを材料選定の条件とした（表-2、図-1）。

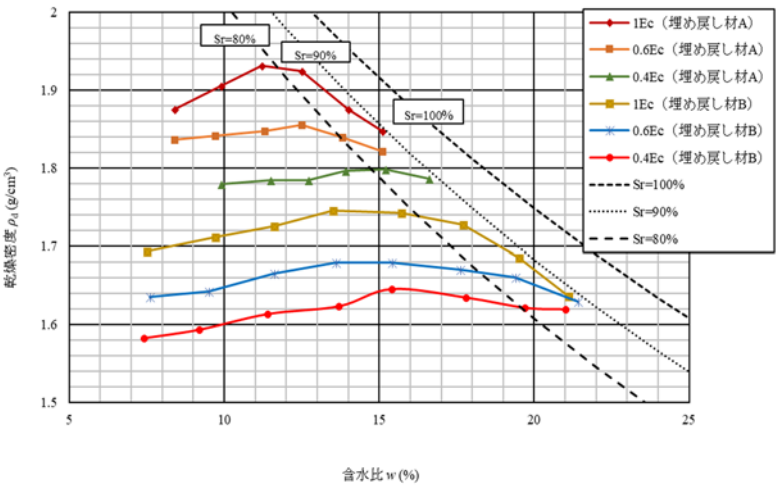


図-1 埋め戻し材の締固め曲線

4. 実機を用いた予備試験

使用材料および使用機械による施工性や品質への影響を調査するため、実機を用いた小規模な埋め戻し試験を実施した。予備試験（その1）では、室内締固め試験で高密度の締固めが期待された埋め戻し材 A を用いた吹付け試験を実施して、使用材料と使用機械の課題抽出をおこない、予備試験（その2）では、材料および機械の改善点を反映させたうえで、埋め戻し材の含水比が施工性や施工品質に与える影響を調査した。

キーワード 埋め戻し材、吹付け施工、サイクルタイム、ベントナイト混合土、有効粘土密度

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

(1) 予備試験（その1）

予備試験（その1）では、吹付け機（アリバ社製：アリバ 285）を用いて埋め戻し材 A（含水比は 0.4Ec と 0.6Ec の最適含水比の平均値 13.7%を設定）の吹付け試験を実施した。図-2 に、埋め戻し材 A の締固め曲線と吹付け後の乾燥密度を示す。有効粘土密度は、 $0.571 \sim 0.611 \text{ Mg/m}^3$ と比較的高い密度を得た一方で、1 袋（428kg）の吹付けに 63 分（※正味吹付け時間 13 分）を要し、施工性の観点から改善が必要と考えられた。原因として、砕石を加えたことにより運搬中に埋め戻し材が圧密によって団粒化し、吹付け機への投入が困難となったことが挙げられる。

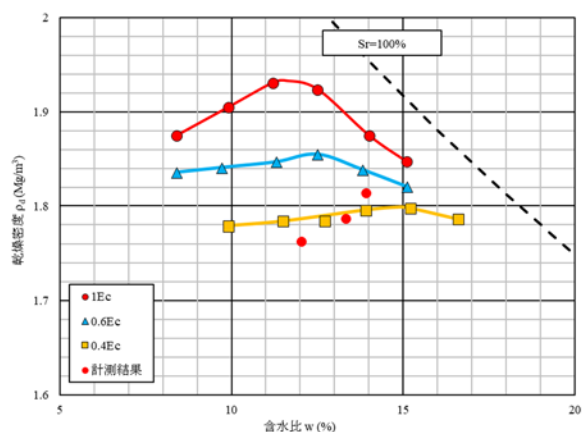


図-2 締固め曲線と吹付け後の密度の比較（その1）

(2) 予備試験（その2）

吹付け試験の様子を図-3 に示す。予備試験（その1）における団粒化による影響を改善するため、埋め戻し材 B を使用した。含水比は、予備試験（その1）の結果から吹付けによる締固めエネルギーは 0.4Ec 程度と推定、このときの最適含水比 16%を基準として $\pm 2\%$ をふり全 3 水準を設定した。使用機械は、団粒化した埋め戻し材をほぐすため解砕機を追加、また吹付け機にはマテリアルホース内での目詰まり抑制のため 1 噴射あたりの吹付け量が少ない吹付け機（AGC プライブリコ社製：ニードガン 2000）を設定した。試験の結果、 $w=14\%$ と 16% のケースで、高い施工密度（有効粘土密度は、 $w=14\%$ で $0.519 \sim 0.543 \text{ Mg/m}^3$ 、 $w=16\%$ で $0.493 \sim 0.553 \text{ Mg/m}^3$ ）が得られた（図-4）。施工性（表-3）は、 $w=14\%$ と 18% のケースで時間 1 t 程度の正味吹付け量が確保できることを確認した。また、ロス率は $w=14\%$ のときに最も小さい結果が得られた。これは、含水比が低いことにより解砕機や吹付け機、ホース内での付着が抑制されたことが原因として考えられた。



図-3 吹付け試験状況

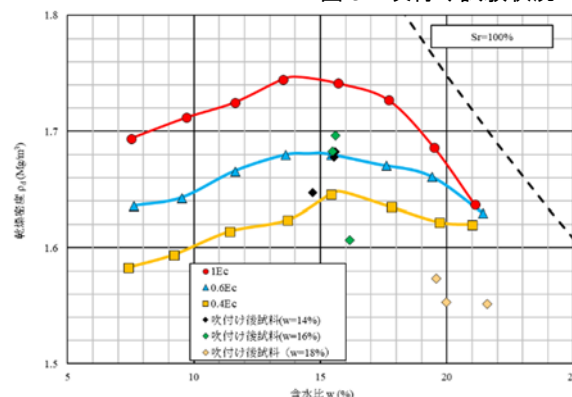


図-4 締固め曲線と吹付け後の密度の比較（その2）

表-3 設定含水比別のサイクルタイムとロス率

項目	14%	16%	18%
施工時間 (min)	62	79	53
正味吹付け時間 (min)	29	31	20
正味吹付け重量 (kg)	951.0	858.5	820.5
施工速度 (kg/h)	920.3	652.0	928.9
吹付け速度 (kg/h)	1967.6	1661.6	2461.5
ロス率	1.287	1.445	1.364

※ロス率＝材料投入重量／正味吹付け重量

5. 実証試験に向けた材料・機械の選定

以上の一連の選定プロセスと試験結果より、次報の実証試験における材料、機械を選定した。表-4 に埋め戻し材の材料仕様、表-5 に使用機械一覧を示す。含水比は施工密度が高く、良好な施工性（施工速度、ロス率）が得られた $14 \pm 2\%$ （加水練混ぜによる誤差を考慮）を設定した。使用機械は、予備試験（その2）において施工性の改善効果がみられた機械を編成、さらに実証試験における水平坑道や立坑の空間的制約、供給可能な電力量等を考慮して機械の能力や寸法を最終決定した。

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) NUMO：NUMO セーフティケースに関する外部専門家ワークショップ資料, 2016. 2) RWMC：平成 26 年度 管理型処分技術調査等事業地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験報告書, 2015.

表-4 実証試験に向けた埋め戻し材の材料仕様

名称	構成材料	配合(wt%)	含水比
埋め戻し材	クニゲル V1	15	$14 \pm 2\%$
	砂	85	

表-5 実証試験に向けた使用機械一覧

吹付けロボット	ベルトコンベア
吹付け機（ニードガン 2000）	フォークリフト
コンプレッサ（13.9m³/min）	カニクレーン
積込用油圧ショベル	水中ポンプ
解砕機（ホッパ容量 0.2m³）	送風機
レーザーバタンク（2.0m³）	集塵機
ベッセル（1.0m³）	