

低レベル放射性廃棄物処分における礫・砂混じりベントナイト混合土の実用化に向けた検討

鹿島建設(株)	正会員	○米丸佳克	正会員	小林一三
	正会員		正会員	
	正会員		正会員	
日本原燃(株)	正会員	太田征志	正会員	石黒頌明
	正会員		正会員	
	正会員		正会員	

1. 目的

我が国における低レベル放射性廃棄物の浅地中処分（ピット処分）では地下水位以下に埋設設備が建設されることから、放射性物質の漏出を低減する機能および生活環境への移動を抑制するため、低透水性材料である難透水性覆土と下部覆土の構築が計画されている（図-1、表-1）¹⁾。また、今後の放射性廃棄物処分事業では数十万～数百万トンのベントナイトが使用される見込みであり²⁾、将来的な供給不足や品質変化が懸念されていることから、安全性と性能の確保を前提として、合理的な材料仕様、製造・施工方法が求められる。筆者らは、浅地中処分に適用する覆土のうち難透水性覆土の仕様を満足する材料として、ベントナイト量を極力低減可能な「礫-砂混じりベントナイト混合土（以下、礫ベン）」を採用し、実用化に向けた検討を実施している。礫ベンの実用化には、製造方法や施工方法の確立に加えて、迅速な品質評価手法も検討する必要がある。本報では、実規模の製造試験と施工試験を通じて礫ベン の性能を検証するとともに、提案する品質管理方法の有効性に関する検討事例を述べる。



図-1 浅地中処分（ピット処分）の例¹⁾

表-1 覆土の主な仕様例

主要な部位	主な仕様
難透水性覆土	材料：Na型ベントナイト（20%），砂（80%） 透水係数(施工時点)：巨視的透水係数として 1.0×10^{-11} m/s以下 厚さ：2m以上 密度：1,100kg/m ³ 以上
下部覆土	材料：現地発生土（30%），Na型ベントナイト（10%），砂（25%） 砕石（35%） 透水係数(施工時点)：巨視的透水係数として 1.0×10^{-8} m/s以下 厚さ：2m以上 密度：1,100kg/m ³ 以上
上部覆土	材料：現地発生土 透水係数(施工時点)：廃棄物埋設地周辺の第四紀層の透水係数と同程度 厚さ：難透水性覆土及び下部覆土とあわせて埋設設備上面から6m以上

2. 礫-砂混じりベントナイト混合土（礫ベン）の概要

礫ベン の基本配合を表-2 に示す。本材料は、一般的な「砂混じりベントナイト混合土（以下、砂ベン）」に最大粒径 20mm の礫（透水性の低い砕石）を加えることによって粒度幅が広がり、締固め性能が向上し、支持力も向上する³⁾。また、礫自身の透水係数は十分に小さいことから、礫を避けるように水が流れると考えられるため、砂ベンと比較して間隙水の通水流路が長くなり、有効断面積も小さくなる（図-2）。さらに、ベントナイト混合率が同じ砂ベンと礫ベンと比較すると、間隙水が流れる礫以外の部分のベントナイト混合率は礫ベンの方が高くなる。これらの効果によって礫ベンは、砂ベンよりも少ないベントナイト量で同等以上の遮水性を確保できる³⁾。

表-2 礫ベン の基本配合

乾燥重量割合（wt%）			
ベントナイト	砕石	砕砂	現地発生土
12.5	50	27.5	10

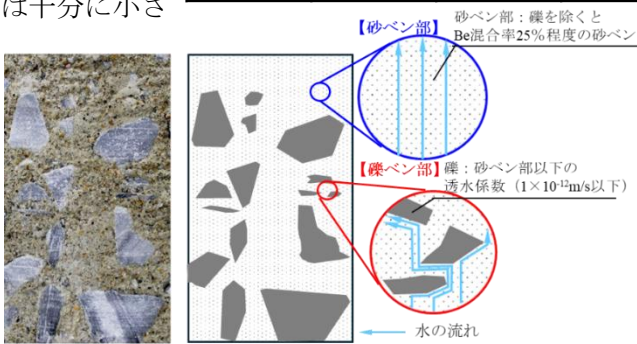


図-2 礫ベン の概要

キーワード 低レベル放射性廃棄物処分，難透水性覆土，礫・砂混じりベントナイト混合土

連絡先 〒980-0021 宮城県仙台市青葉区中央 4 丁目 4-19 鹿島建設(株)東北支店 TEL 022-261-9058

3. 検討フロー

難透水性覆土に必要な透水係数 k は $k=1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 以下（本検討時における値）と非常に低く、試験結果の取得に長期間を要する。そのため、実工事では透水係数の代替指標として、ベントナイト混合率や初期含水比の影響を考慮可能な「有効モンモリロナイト湿潤密度⁴⁾（以下、有効 M_o 湿潤密度）」を用いた品質管理を行う方針とした。この品質管理手法の検討フローを図-3に示す。先ずSTEP①として、材料の製造試験を通じて製造仕様を決定し、本材料を用いた施工試験を実施した（STEP②）。STEP①、STEP②で得られたデータから実施工時に想定されるばらつき（製造時の含水比、ベントナイト混合率のばらつき、施工時の含水比、乾燥密度のばらつき）を包含した幅広い条件下で室内透水試験を実施し、有効 M_o 湿潤密度と透水係数の関係（以下、相関式）を作成した（STEP③）。最後に、施工試験の結果を基に、STEP③で得られた相関式から算出した透水係数（以下、換算透水係数）と、コアサンプリングの透水試験（JGS 0312-2018）の結果を比較・検討することによって、本品質管理手法の実施工への適用性を評価した。

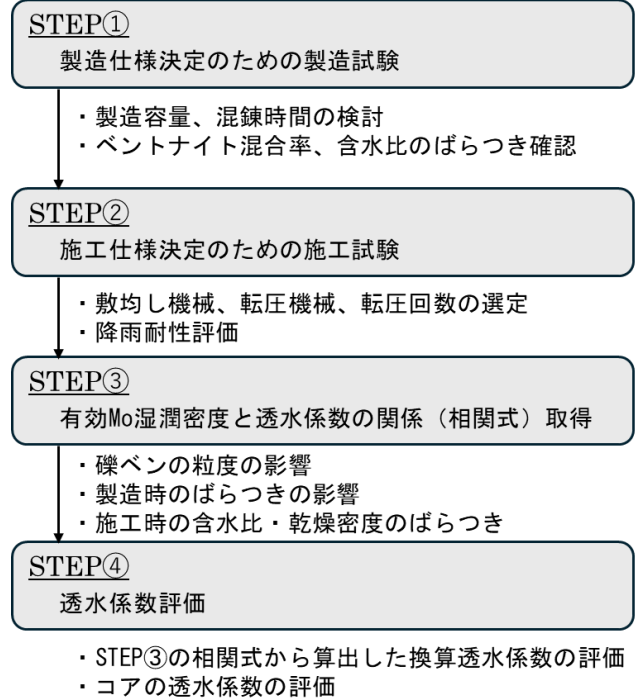


図-3 実適用に向けた検討フロー

4. 礫-砂混じりベントナイト混合土（礫ベン）の物理特性

図-4に礫ベンと砂ベンの締固め曲線（JIS A 1210 礫ベン：A-c 法，砂ベン：C-c 法）を、図-5に礫ベンの粒径加積曲線を示す。礫ベンは粒径幅の広い材料（均等係数 $U_c=1,333$ ）であることから締固め性能に優れ、小さな締固めエネルギー（ $1Ec$ ）で、砂ベン（ $4.5Ec$ ）と同等の高密度を実現することが可能である。

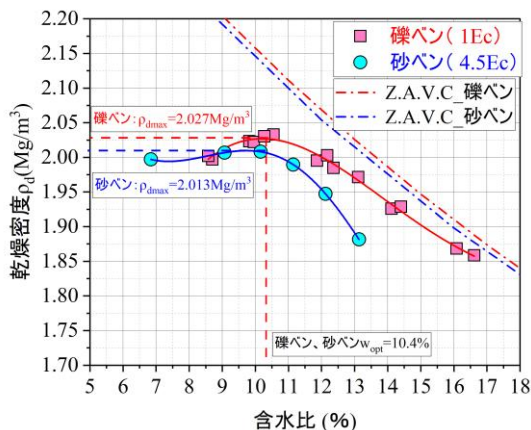


図-4 締固め試験結果

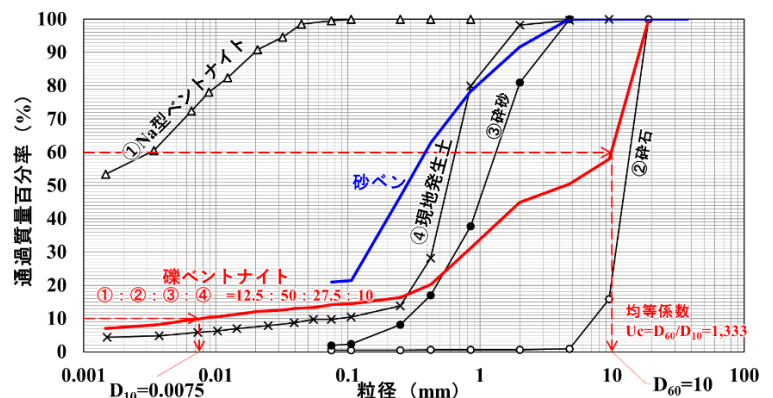


図-5 粒径加積曲線

5. 製造仕様決定のための製造試験（STEP①）

(1) 製造試験概要

礫ベンの製造には、一般的な生コンクリートの製造で用いられるバッチ式強制二軸ミキサ（ 2.0m^3 練り）を採用した。バッチ式ミキサは、バッチ毎に各材料の投入重量や加水量が既知となり、ベントナイト混合率と含水比を厳密に管理できる。本検討では、STEP①-1として、1バッチあたりの混合量（ m^3 ）および加水後の混合時間をパラメータとした製造試験を実施し、含水比やベントナイト混合率のばらつきが小さい混合土が得られる製造仕様を決定した。製造試験は、現地発生土の混合率が多く、含水比やベントナイト混合率のばらつきが生じやすい下部覆土（ $w_{\text{opt}}(1Ec)=10.8\%$ ）を対象（表-3）とした。製造の手順は、①材料の投入、②空練り、③加水、④混合、⑤排出であり、⑥品質確認では各ケースで6試料をサンプリングして、含水比とベントナイト混合率を計測した。表-4に製造試験の試験ケースを示す。ここに示す混合量とは、締固め後の覆土体積を

表し、コンクリートと同様に各材料の必要重量を内割り計算した値であり、締固め後の空気空隙量はゼロと仮定した。STEP①-2では、STEP①-1で選定した製造仕様で、転圧試験に使用する覆土材を60バッチ製造し、5バッチ毎に品質を確認して製造仕様の妥当性を評価した。

(2) 製造試験結果 (STEP①)

各混合量における、加水後の混合時間と含水比の関係を図-6に示す。全体的な傾向として含水比のばらつきは、混合時間の増加とともに小さくなるのが分かる。また、加水後に60秒間混合することで含水比の平均値は設定値に収束する結果となった。この混合時間における混合量の違いに着目すると、0.9m³（公称容量の45%）のケースが含水比のばらつきが最も小さい結果となった。加水後の混合時間とベントナイト混合率の関係を図-7に示す。製造した下部覆土のベントナイト混合率は、45秒以上混合することで設定値±1.0%程度とばらつきが小さくなった。また、含水比の結果と同様に0.9m³（公称容量の45%）のケースのばらつきが最も小さい結果となった。

以上のことから、1バッチでの混合量を0.9m³（公称容量の45%）、加水後の混合時間を60秒とすることで、均質な製造ができることを確認した。STEP①-2では、この製造仕様で難透水性覆土の製造（設定含水比w=11.0%）を実施した。STEP①-2の品質確認結果を図-8に示す。図より、含水比、ベントナイト混合率ともに設定値±1.0%程度と高い精度で製造できており、事前に決定した製造仕様の妥当性を確認した。

表-3 製造試験の配合 (STEP①-1)

覆土	乾燥重量割合 (wt%)			
	ベントナイト	砕石	砕砂	現地発生土
難透水性覆土	12.5	50	27.5	10
下部覆土	10	35	25	30

表-4 製造試験ケース (STEP①-1)

配合	混合量		加水後混合時間 (s)
	投入量 (m ³)	容積率 (%)	
下部覆土	0.7	35	30
	0.9	45	45
	1.1※	55※	60

※混合時間30秒は他ケースの結果に鑑みて実施していない。

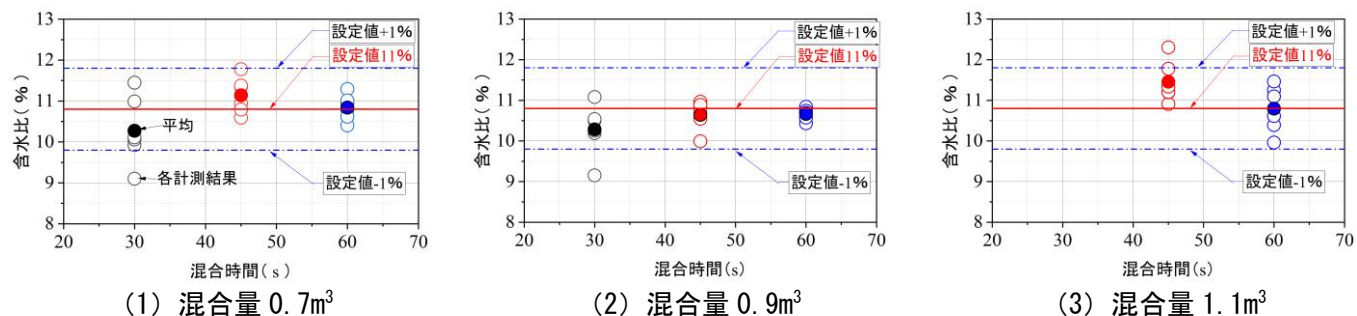


図-6 混合時間と含水比の関係（下部覆土）

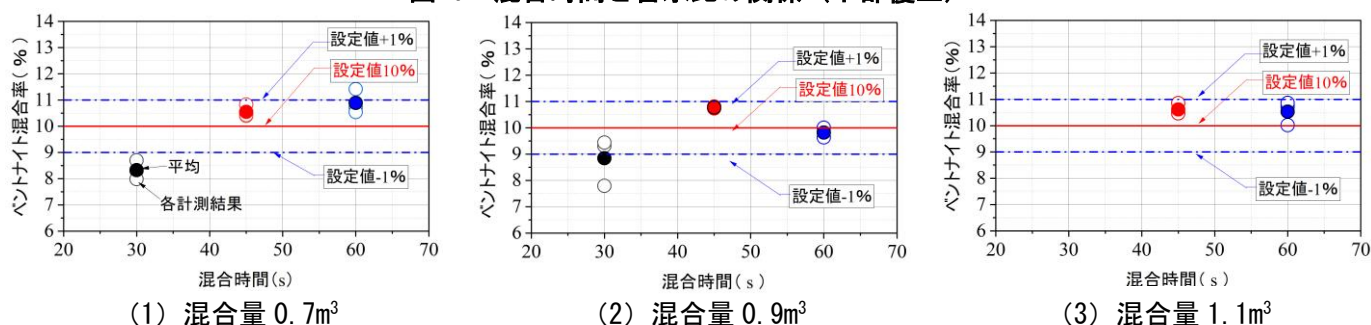


図-7 混合時間とベントナイト混合率の関係（下部覆土）

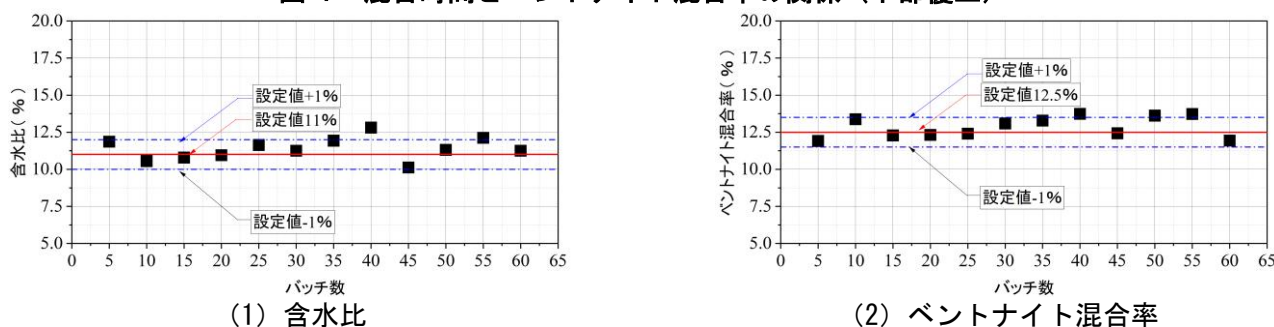


図-8 難透水性覆土の製造試験結果

6. 施工仕様決定のための施工試験 (STEP②)

(1) 施工試験概要

本試験では、幅 3m、長さ 15m、1 層あたりの仕上がり層厚 200mm×5 層の難透水性覆土を構築した。材料は 0.8m³ 級バックホウ、3t 級ブルドーザを用いて厚さ 300mm 以下になるように敷き均し、10t 級振動ローラを用いて締め固めた。転圧回数は、1 層目において、沈下量が収束する転圧回数を確認し、8 回（無振動 2 回+有振動 6 回）とした。転圧完了後は、図-9 に示す位置で現場密度試験（砂置換法、RI 法）を実施するとともに、コアサンプリングを行い、透水試験等の室内試験に供した。なお、RI 法については、非破壊で密度、含水比の計測が可能で、散乱型 RI を採用した。これらの試験を 2～5 層目の計 4 層で実施し、難透水性覆土の施工品質を確認するとともに散乱型 RI の精度検証を目的として、同地点で実施した砂置換法やコアと比較した。

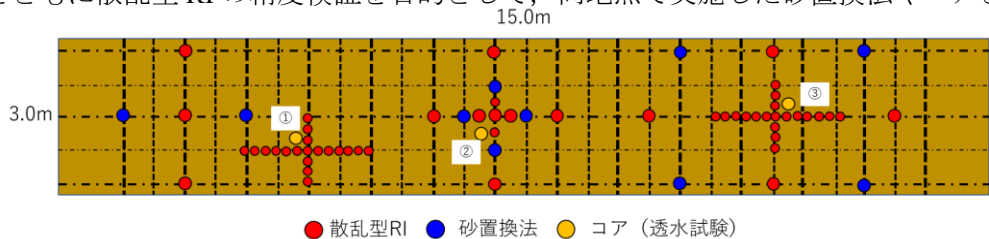


図-9 品質管理位置の一例

(2) 施工試験結果 (STEP②-1)

図-10 に砂置換法、RI 法およびコアの密度試験結果を示す。なお、RI 法については、同一計測地点における、砂置換法による湿潤密度、水分量の計測結果を用いて、最小二乗法による 1 次式での補正結果を示している。図より、すべての計測点において締固め度 Dc95%以上を達成している。加えて含水比は設定値±1.0%以内、乾燥密度も±0.05Mg/m³ 程度とばらつきの小さい覆土が構築できている。また、砂置換法の含水比、乾燥密度のばらつきの幅と RI 法のばらつきの幅が概ね同等であることから、非破壊で計測可能な散乱型 RI の精度についても確認することができた。表-5 に各層の乾燥密度の統計量を示す。この結果より、各層の乾燥密度の平均値は締固め度 Dc100%程度と高い密度を達成している。また、各層の平均値、標準偏差、変動係数はおおむね同等であり、施工品質の再現性も確認することができた。

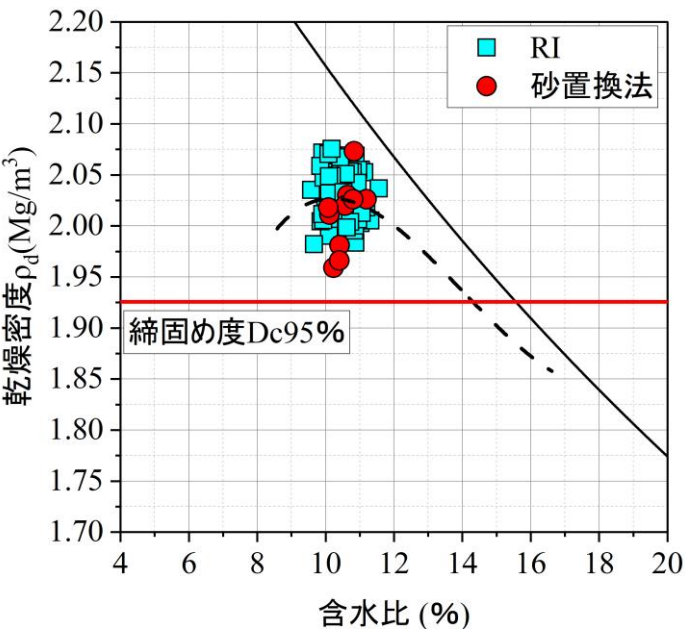


図-10 5 層目における密度試験結果（難透水性覆土）

(3) 降雨耐性評価 (STEP②-2)

難透水性覆土に砂ベンを適用する場合、降雨に伴う膨潤によって覆土が著しく泥濘化し施工が困難になるため、雨養生用の屋根を設置し、降雨影響を排除した環境下での施工計画がなされている。これに対して、礫ベンの場合では、材料構成の利点を活かすことによって、一般的な土工と同様に雨養生用の屋根を設置しない施工方法を適用できる可能性がある。そこで、本検討では、礫ベンの降雨耐性に

表-5 乾燥密度 (RI 法) の統計量 (難透水性覆土)

層目	2層目	3層目	4層目	5層目	全層
標本数 (点)	68	66	70	66	270
平均 (Mg/m ³)	2.045	2.031	2.033	2.034	2.036
標準偏差 (Mg/m ³)	0.037	0.03	0.029	0.025	0.031
変動係数	0.018	0.015	0.014	0.012	0.015

関する評価を行った。具体的には、施工完了後の礫ベンを対象に降雨装置を用いて人為的に降雨（10mm/hrを5時間：総降雨量50mm）に曝し、降雨による浸潤深度と浸潤箇所撤去後の品質を評価した。図-11に降雨後の含水比、図-12に降雨後のベントナイト混合率の結果を示す。降雨後の含水比については、表層から10mmの深度までが高く、それ以深は製造時の含水比（赤線）と概ね同等であった。このことから、表層10mm以深には降雨が浸透していないことがわかる。また、ベントナイト混合率についても同様に、表層10mmまでは降雨の影響でベントナイト分が3～4%程度流出しているが、それ以深では降雨の影響を受けていないことがわかる。図-13に降雨後、浸潤箇所を撤去した後の転圧面を対象に密度計測、落球探査³⁾により礫ベンの剛性（変形係数）を取得した結果を示す。なお、図中には比較対象として、降雨に曝されていない健全部の結果も示している。図より、乾燥密度、変形係数ともに浸潤部を剥ぎ取ることで、健全部と同等の密度、剛性を確保することが可能である。

以上のことから、10mm/hrの降雨を5時間継続しても、含水比とベントナイト混合率への影響は表層から10mm程度にとどまり、高い耐降雨性を有することが確認できた。このことから、一般土工と同様の施工方法が適用可能であり、降雨対策としては、シート養生や一雨雨量5mmを超える場合の施工中止などの対応で十分である。

7. 有効モンモリロナイト湿潤と透水係数の関係（相関式）の取得（STEP③）

STEP③の目的は、換算透水係数を算出するための相関式の取得である。換算透水係数を精度よく算出するためには、「粒度のばらつきの影響」、「製造時の含水比、ベントナイト混合率のばらつきの影響」に対応できる幅広い相関式の作成が必要である。

表-6 に試験条件を示す。表に示すように、STEP①、STEP②で得られたばらつき（ベントナイト混合率、含水比ともに設定値±1.0%程度のばらつき）を包含するように、ベントナイト混合率は「基本」配合の12.5%に対して±2%に、含水比は「基本」配合の礫ベンの1Ecにおける最適含水比である10%に対して±2%に設定した。また、細粒配合から粗粒配合までの材料のばらつきにおいても試験を実施した。さらに、乾燥密度は、「標準」の礫ベンの1EcにおけるDc=100%と93%とした条件で供試体（φ100mm×h100mm）を作製し、透水試験によって、相関式を設定した。透水試験の結果を図-14に示す。図から、全体的な傾向として、有効Mo湿潤密度の増加に伴い、透水係数が低くなるといった既往検討⁴⁾と同様の傾向が確認できた。一方で、「細粒配合」は

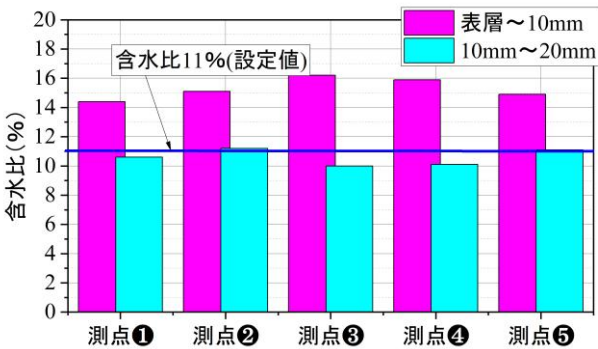


図-11 降雨後の含水比

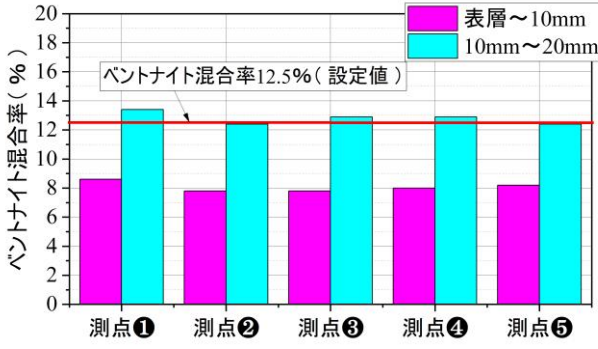


図-12 降雨後のベントナイト混合率

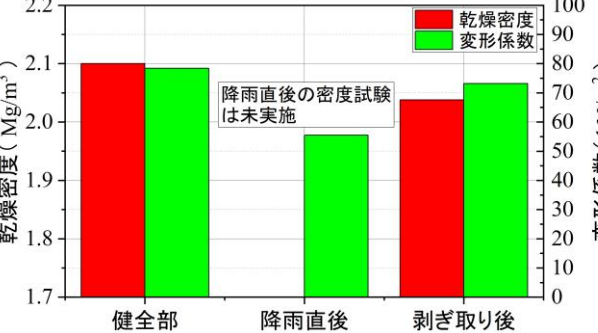


図-13 降雨後の乾燥密度と変形係数

表-6 STEP③室内透水試験条件

検討項目	配合	乾燥重量割合 (wt%)				含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m³)
		ベントナイト	砕石	砕砂	現地発生土		
粒度の影響評価	基本配合 (粒)	12.5	50	27.5	10.0	8	2.027 1.888
	細粒配合		40	27.5	20.0	10	
	粗粒配合		60	27.5	0.0	12	
製造時のばらつき評価	低ベントナイト配合	10.5	50	27.5	12.0	8	1.888
	高ベントナイト配合※	14.5			8.0	10 12	

※含水比は10%のみ実施

有効 Mo 湿潤密度が 0.9Mg/m^3 より低くなると、透水係数が 1 オーダー以上増加した。この原因については、より詳細な検討が必要であるが、「細粒配合」の礫ベンは、「標準」や「粗粒配合」と比較して、異なる締固め特性を有しており、「標準」の締固め試験結果から設定した締固め度管理が適用できない程度にまで材料が変化した恐れがある。また、図中に赤線（有効 Mo 湿潤密度 $< 0.925\text{ Mg/m}^3$ ）、青線（有効 Mo 湿潤密度 $> 0.925\text{ Mg/m}^3$ ）で示す相関式を設定することによって、換算透水係数を保守的に評価した。

8. 透水係数評価（STEP④）

表-7に各層におけるコアの透水係数と換算透水係数のそれぞれの平均値を示す。換算透水係数は、現場で計測した密度と製造時のベントナイト混合率から算出した有効Mo湿潤密度の値を図-14の相関式に代入することで評価した。表より、コアの透水係数は、すべての層で要求性能である $1.0 \times 10^{-10}\text{m/s}$ 以下を満足した。また、透水係数の幅は $8.20 \times 10^{-12} \sim 1.40 \times 10^{-11}\text{m/s}$ とばらつきが小さく、均質な難透水性覆土が構築できており、同様の傾向は、換算透水係数の結果からも確認できる。さらに、換算透水係数は、コアの透水係数よりも大きい値を示していることから、相関式は保守性を有しており、実施工時の品質管理手法として適用できることが分かった。

9. まとめ

本研究では、「礫-砂混じりベントナイト混合土」の低レベル放射性廃棄物処分事業への実用化に向けた検討を行った。その結果、「均質な製造」、「所定の敷均し厚さ」、および「所定の転圧回数」を確保することによって、構築される覆土は要求性能を満足するとともに、施工層毎の品質のばらつきも概ね同等となることが確認された。これにより、施工品質の再現性が確認でき、実施工での適用が可能であることが明らかとなった。また、礫ベンの高い耐降雨性により、一般の土工と同様な降雨対策が適用可能である。さらに、品質管理方法としての透水係数評価については、現場で想定されるばらつきを考慮した相関式を事前に作成し、現場で有効 Mo 湿潤密度を確認することによって、透水係数の保守的な評価が非破壊かつ迅速に実施できることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 日本原燃(株)：埋設設備の構造，<https://www.jnfl.co.jp/ja/business/about/llw/summary/structure.html>
- 2) 原子力発電環境整備機構：国内産ベントナイトおよびベントナイト混合土の基本特性データ，p.1,2022.
- 3) 田中ら：人工地盤構築材料の開発（その1）－礫混入ベントナイト混合土の基礎的特性－，鹿島技術研究所年報 第42号，pp.11-16，1994.
- 4) 工藤ら：低レベル放射性廃棄物処分施設における難透水性覆土の透水性評価の一考察，土木学会第69回年次学術講演会，III-152，2014.
- 5) 北本ら：ヘルツ理論を基礎とした地盤や岩質の迅速な物性評価手法，地盤工学会誌，Vol.63，No.4，pp14-17. 2014.

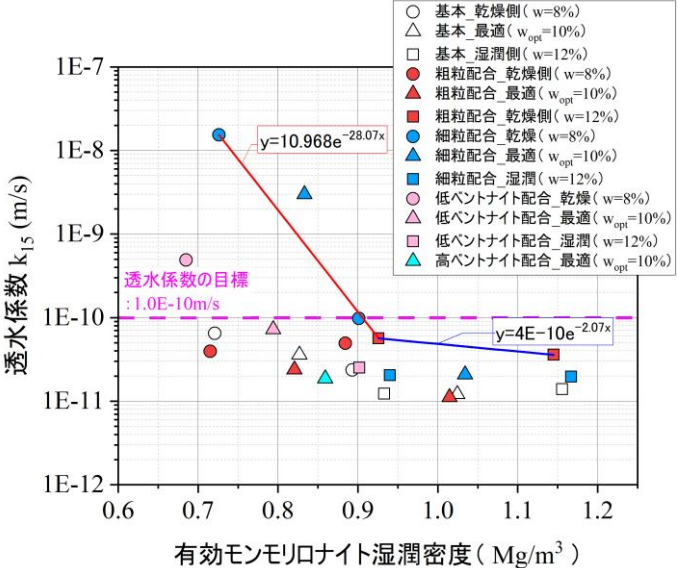


図-14 有効 Mo 湿潤密度と透水係数の関係（相関式）

表-7 透水係数評価

層目	コアの透水係数の平均値※ (m/s)	換算透水係数の平均値※※ (m/s)
2	1.30E-11	4.60E-11
3	1.04E-11	4.73E-11
4	1.40E-11	4.52E-11
5	8.20E-12	4.51E-11
※3点/層の平均値 ※※表-5に示す計測点数の平均値		