

ミストブレンダー工法で製造した ベントナイト混合土の試験施工

久 慈 雅 栄*¹ 福 田 和 人*²
仁 平 義 祐*³

要 旨

原子力発電所に伴い発生する放射性廃棄物は、放射能レベルによって分類され、深度を変えて地中に埋設することが計画されている。放射性廃棄物は、それぞれの処分方法において、放射性物質の漏洩抑制等の目的で、低透水性能を有する人工バリア材としてのベントナイト混合土を配置する計画となっている。ここでは、低レベル放射性廃棄物・浅地中(ピット)処分に用いられるベントナイト混合土をターゲットとし、覆土に必要な性能を確保するために用いる材料の条件を絞るために、ミストブレンダー工法を用いてベントナイト混合土を製造して、試験施工を実施したので、その結果について報告する。

キーワード 放射性廃棄物／ベントナイト混合土／有効モンモリロナイト湿潤密度

目 次

- | | |
|---------------|-------------|
| 1. はじめに | 5. 試験施工の進め方 |
| 2. L2覆土の概要 | 6. 試験施工結果 |
| 3. 使用材料と材料特性 | 7. おわりに |
| 4. Be混合土の製造方法 | |

TEST COMPACTION OF BENTNITE SOIL MIXTURE PRODUCED BY MIST-BLENDER METHOD

Masayoshi KUJI Kazuto FUKUDA
Yoshinori NIHEI

Synopsis:

Radioactive waste generated from nuclear power plants is classified according to its radioactivity level, and it is planned to be buried underground at different depths depending on the classification. For each disposal method, bentonite soil mixture with low permeability is planned to be used as an artificial barrier material to suppress the leakage of radioactive substances.

In this report, bentonite soil mixture, which is used for the shallow ground (pit) disposal of low-level radioactive waste, was targeted. In order to focus the conditions for materials used to ensure the required performance of the cover soil, bentonite soil mixture was produced using the Mist-Blender method, and a trial construction was carried out. This report presents the results of that trial.

* 1 本店 土木事業本部 土木技術部
* 3 東北支店 双葉町解体除染作業所

* 2 本店 土木事業本部 原子力営業部

1. はじめに

原子力発電所に伴い発生する放射性廃棄物は、放射能レベルによって分類され、深度を変えて地中に埋設することが計画されている。図-1 に放射能レベルでの区分と処分方法¹⁾を示す。

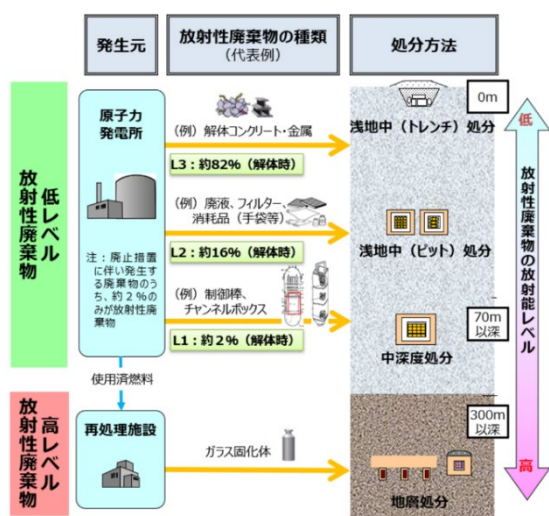


図-1 放射性廃棄物の区分と処分方法¹⁾

放射性廃棄物は、それぞれの処分方法において、放射性物質の漏洩抑制等の目的で、低透水性能を有する人工バリア材としてのベントナイト(以下、Be)混合土を配置する計画となっている。

人工バリア材としての Be 混合土は、砂等の土質系材料である母材に Be を混合し、初期含水比を調整した上で、巻出し・締固めを行ったものである。Be には、モンモリロナイト(以下、Mo)と呼ばれる、吸水すると膨張(膨潤)しさらに粘性が増加する粘土鉱物が含まれており、これが Be 混合土の低透水性能を発揮する主因となる。Be 混合土は Be の種類(主に Na 型と Ca 型)、Mo 含有率、Be 配合率、初期含水比(締固め前の、Be 混合土製造時の含水比)、および締固め密度等によりその透水係数は変化する。このため、目的に応じた透水係数を得るために、上記の要素を組み合わせる配合設計が不可欠である。

さらに、Mo が膨潤して粘性が増加する特徴は、攪拌式ミキサ等で材料を混合し加水調整する過程で、粘性を持つ材料に練り(せん断)を加えることとなり、製造された材料に不均質部(ダマ)が発生する原因となる。

このような課題に対し、筆者らは不均質部の少ない Be 混合土を連続的かつ大量に製造することを可能とした、連続縦落し型混合・加水方式を用いた Be 混合土製造システム「ミストブレンダー工法」を開発し、製造土や締固め土の品質等の確認を実施してきた^{例えば、2)}など。図-2 に、ミストブレンダー工法の概念図を示す。本工法では製造段階を、Be と母材を自然含水比状態で事前混合する工程と、所定の含水比に加水調整する工程の 2 段階に分けている。このうち、加水調整工程では事前混合した材料を

落下させながら水を噴霧する方式を採用しているため Be 混合土に練り(せん断)を加えておらず、不均質部(ダマ)ができにくい、という特徴がある。

今回、図-1 に示す放射性廃棄物の分類のうち、L2 と呼ばれる低レベル放射性廃棄物・浅地中(ピット)処分の覆土に用いられる Be 混合土をターゲットとし、ミストブレンダー工法を用いて Be 混合土を製造して、実際の施工を模した試験施工を実施した。その目的は、覆土に必要な性能を確保するための条件を絞ることにあり、材料の選定(3 章)、製造方法(4 章)、試験施工の進め方(5 章)、試験施工結果(6 章)の順でその結果を報告する。

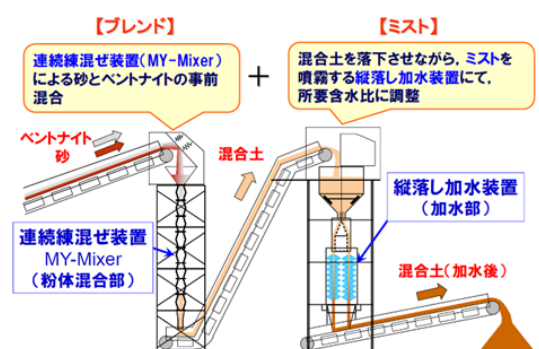


図-2 ミストブレンダー工法概念図

2. L2 覆土の概要

今回対象とする Be 混合土は、L2 と呼ばれる低レベル放射性廃棄物・浅地中(ピット)処分に用いる覆土である。本事業は、日本原燃株式会社により青森県上北郡六ヶ所村で進められており、原子力発電所から排出される廃液やフィルターなどの低レベル放射性廃棄物をドラム缶に封入し、コンクリート製のピットに収納した上で、3 種類の覆土で埋設する計画である。図-3 に、L2 のうち 1 号廃棄物埋設地の概要³⁾を示す。

覆土は、コンクリートピットを直接被覆する難透水性覆土、その外側に設置する下部覆土、地表面までを占める上部覆土の 3 種類に分けられる。表-1 に、これら 3 種類の覆土に求められる要求性能(透水係数)を示す。

表-1 各覆土の要求性能(透水係数)

覆土種類	要求性能(透水係数 [m/sec])
上部覆土	$1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-7}$
下部覆土	1×10^{-8}
難透水性覆土	1×10^{-10}

今回は、このうち難透水性覆土と下部覆土をターゲットに、試験施工を実施した。

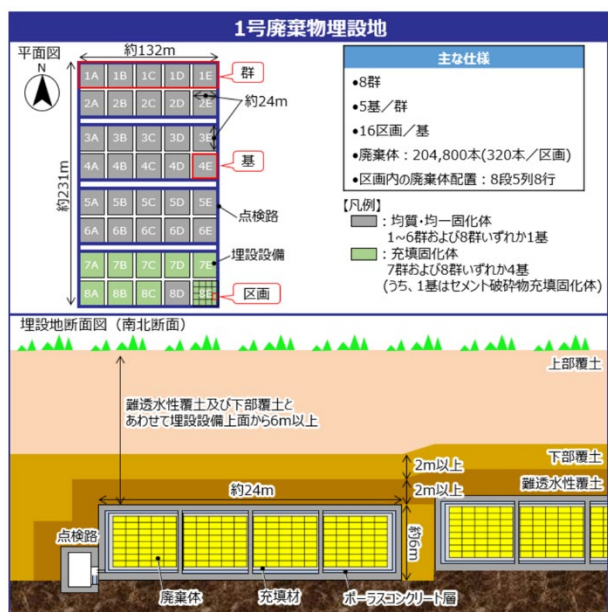


図-3 1号廃棄物埋設地の概要³⁾

3. 使用材料と材料特性

3.1 使用材料

(1) ベントナイト

今回試験施工に使用する Be は、クニミネ工業(株)製・クニゲル V1 と、日本砥研(株)製・津軽 2 号の 2 種類である。表-2 にこれら 2 種類の Be の材料特性を、図-4 に粒径加積曲線を示す。ここで MBC(メチレンブルー吸着量)は、JIS Z 2451 に則り、スポット法で測定した。なお、これらの値は室内土質試験の際に使用したロットでの試験結果である。

表-2 ベントナイトと石粉の材料特性

		クニゲルV1	津軽2号	石粉
土粒子密度	Mg/m ³	2.761	2.591	2.702
含水比	%	7.6	2.3	1.0
膨潤力	mL/2g	21	14	—
MBC	mmol/100g	84	58	—

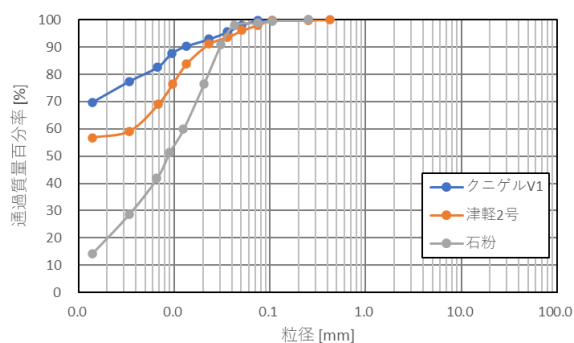


図-4 ベントナイト&石粉の粒径加積曲線

(2) 母材

今回試験施工に使用する母材としての土質材料は、青森県三沢産・コンクリート用砂(三沢砂)、東京都奥多摩産・碎石、砕砂(碎石、砕砂)、青森県六ヶ所産・粗粒砂岩(現地発生土)の 4 種類である。表-3 にこれら 4 種類の母材の材料特性を、図-5 に粒径加積曲線を示す。なお、これらの値は室内土質試験の際に使用したロットでの試験結果である。

表-3 母材の材料特性

		三沢砂	碎石	砕砂	現地発生土
土粒子密度	Mg/m ³	2.719	2.711	2.681	2.789
含水比	%	2.4	1.5	4.9	19.2

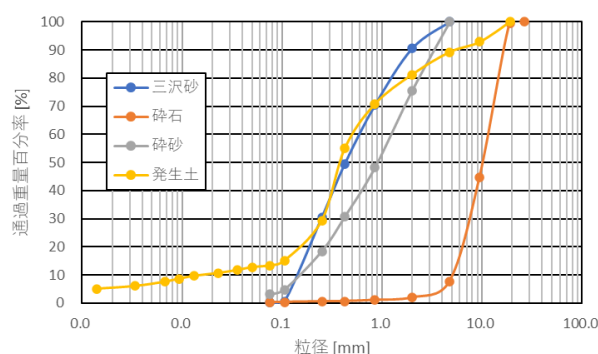


図-5 母材の粒径加積曲線

(3) 石粉

今回、下部覆土において、覆土材料費のコストダウンを企図して、細粒分としての Be の代替として石粉を使用した。ここで使用するのは、宮城県産・石灰石微粉末(石粉)である。表-2 に石粉の材料特性を、図-4 に粒径加積曲線を、Be とともに示す。なお、これらの値は室内土質試験の際に使用したロットでの試験結果である。

3.2 難透水性覆土の室内試験結果

(1) 概要

難透水性覆土の要求性能は、表-1 に示すように非常に低い透水係数($k=1 \times 10^{-10}$ [m/sec])である。さらに、施工時に発生するバラツキ等を考慮する必要があることから、室内試験では 1 桁低い $k=1 \times 10^{-11}$ [m/sec]を目標性能とすることとした。

使用材料は Be と三沢砂とし、Be はクニゲル V1 と津軽 2 号を使用して、性能を確認した。

(2) クニゲル V1 を用いた場合

Be としてクニゲル V1 を用いた難透水性覆土の Be 配合率と初期含水比を決めるため、表-4 に示す基本配合(乾燥重量比)のもとに、突固め試験と透水試験を実施した。図-6 に基本配合の粒径加積曲線を、クニゲル V1 と三沢砂とともに示す。突固め試験は JIS A 1210 に則り C-c 法で、

透水試験は低透水材料の透水試験方法として制定された JGS 0312-2018 に則り実施した。なお、透水試験の供試体は、突固め試験結果と同じ含水比と乾燥密度で調整した。表-4 に基本配合とともに突固め試験結果と透水試験結果を、図-7 に突固め試験結果を、図-8 に透水試験結果を示す。

表-4 難透水性覆土・クニゲル V1 基本配合の室内試験結果

配合率		最大乾燥密度	最適含水比	最小透水係数	最小透水係数含水比
ベントナイト	三沢砂	ρ_{dmax}	Wopt	Kmin	Wkmin
%	%	Mg/m ³	%	m/sec	%
15.0	85.0	2.050	9.2	3.27×10^{-12}	12.4
17.5	82.5	2.061	9.6	2.44×10^{-12}	12.4
20.0	80.0	2.069	9.4	2.00×10^{-12}	12.4

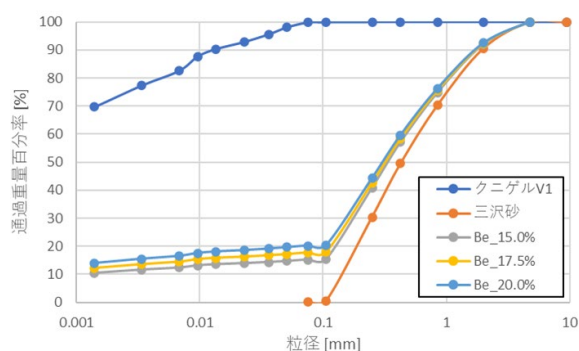


図-6 難透水性覆土・クニゲル V1 基本配合の粒径加積曲線

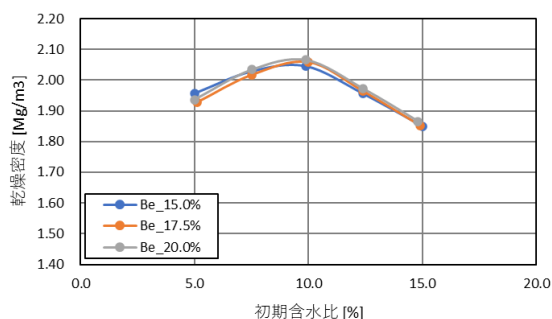


図-7 難透水性覆土・クニゲル V1 基本配合の突固め試験結果

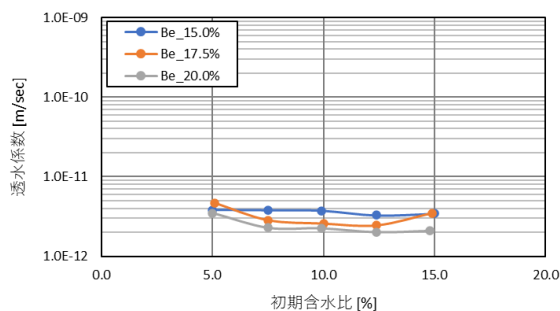


図-8 難透水性覆土・クニゲル V1 基本配合の透水試験結果

Be 配合率を 15.0~20.0%に変化させたものの、最大乾燥密度は大差なく、また透水係数は初期含水比に鈍感で、かつ配合による差は少なく、どの配合でも目標性能を満足していることがわかる。

(3) 津軽 2 号を用いた場合

Be として津軽 2 号を用いた難透水性覆土の Be 配合率と初期含水比を決めるため、表-5 に示す基本配合(乾燥重量比)のもとに、突固め試験と透水試験を実施した。図-9 に基本配合の粒径加積曲線を、津軽 2 号と三沢砂とともに示す。なお、透水試験の供試体は、突固め試験結果と同じ含水比と乾燥密度で調整した。表-5 に基本配合とともに、突固め試験結果と透水試験結果を、図-10 に突固め試験結果を、図-11 に透水試験結果を示す。

表-5 難透水性覆土・津軽 2 号基本配合の室内試験結果

配合率		最大乾燥密度	最適含水比	最小透水係数	最小透水係数含水比
ベントナイト	三沢砂	ρ_{dmax}	Wopt	Kmin	Wkmin
%	%	Mg/m ³	%	m/sec	%
20.0	80.0	1.955	10.1	1.83×10^{-12}	15.0
25.0	75.0	1.916	12.2	1.58×10^{-12}	15.5
30.0	70.0	1.900	13.1	2.40×10^{-12}	17.0

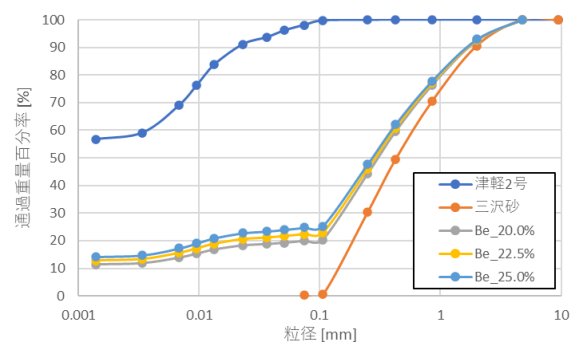


図-9 難透水性覆土・津軽 2 号基本配合の粒径加積曲線

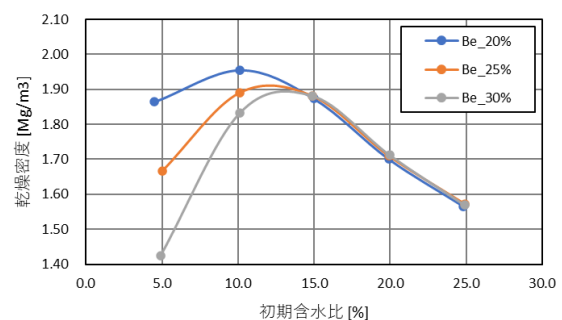


図-10 難透水性覆土・津軽 2 号基本配合の突固め試験結果

Be 配合率を 20.0~30.0%に変化させたが、最大乾燥密度は Be 配合率が高いほど低く、また透水係数のうち最小透水係数はクニゲル V1 仕様と同程度を示すものの、初期含水比にやや敏感である。初期含水比が低い場合には目

標性能を満足できないものの、最適含水比(Wopt)から最小透水係数含水比(Wkmin)付近に初期含水比を保つことにより、目標性能を満足できることがわかる。

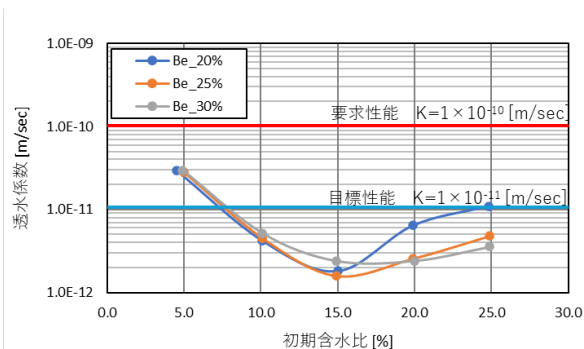


図-11 難透水性覆土・津軽 2 号基本配合の透水試験結果

3.3 下部覆土の室内試験結果

(1) 概要

下部覆土の要求性能は、表-1 に示す透水係数($k=1 \times 10^{-8}$ [m/sec])である。さらに、施工時に発生するバラツキ等を考慮して、室内試験ではその 1/2 である $k=5 \times 10^{-9}$ [m/sec] を目標性能とすることとした。

使用材料は Be(津軽 2 号)と砕石・砕砂、現地発生土とし、コストダウンを企図して Be に代替して石粉を使用する配合を加えて、性能を確認した。

(2) 津軽 2 号を用いた場合

津軽 2 号を用いた下部覆土の材料配合と初期含水比を決めるため、表-6 に示す基本配合(乾燥重量比)のもとに、突固め試験と透水試験を実施した。図-12 に基本配合の粒度分布を、材料とともに示す。ここで fuller とは式 1 に示す Fuller Thompson の式(例えば 4)より、ある最大粒径における理想的な粒度加積曲線を示すものである。図では $n=0.2, 0.3, 0.4$ の粒度加積曲線を示し、今回は 0.3 に沿うように配合した。

$$P=(d/D_o)^n \quad \text{[式 1]}$$

ここに、P : フレイ通過百分率

D_o : 最大粒径 d : 粒径

突固め試験は JIS A 1210 に則り C-c 法で、透水試験は JIS A 1218 に則り実施した。なお、透水試験の供試体は、突固め試験結果と同じ含水比と乾燥密度で調整した。

表-6 に基本配合とともに、突固め試験結果と透水試験結果を、図-13 に突固め試験結果を、図-14 に透水試験結果を示す。Be 配合率を 5.0~10.0%に変化させたが、Be 配合率 5.0%の含水比 5%以外は、余裕をもって目標性能を満足することがわかる。さらに、最大乾燥密度は Be 配合率が高いほど低く、また透水係数は初期含水比にやや敏感であり、特に乾燥側では透水係数が大きくなることがわかる。

表-6 下部覆土・津軽 2 号・室内試験結果

配合率				最大乾燥密度	最適含水比	最小透水係数	最小透水係数含水比
ベントナイト	現地発生土	砕石	砕砂	ρ_{dmax}	Wopt	Kmin	Wkmin
%	%	%	%	Mg/m ³	%	m/sec	%
5.0	31.7	36.9	26.4	2.027	10.1	8.06×10^{-11}	13.0
7.5	30.8	36.0	25.7	2.006	10.5	6.90×10^{-11}	13.0
10.0	30.0	35.0	25.0	1.997	10.8	7.02×10^{-11}	12.5

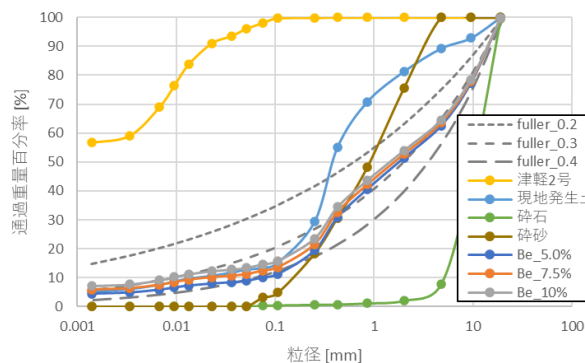


図-12 下部覆土・津軽 2 号基本配合の粒度加積曲線

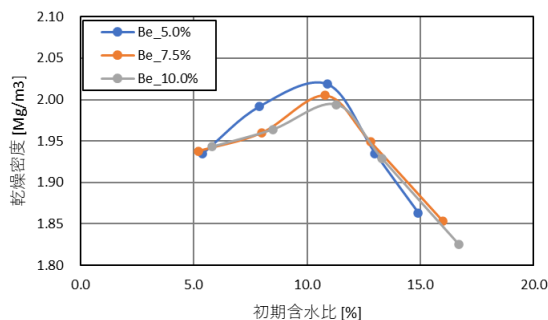


図-13 下部覆土・津軽 2 号基本配合の突固め試験結果

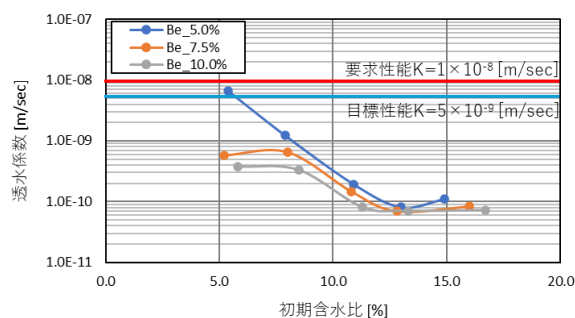


図-14 下部覆土・津軽 2 号基本配合の透水試験結果

(3) 石粉を用いた場合

下部覆土のコストダウンを企図して Be を代替して石粉を用いた場合の材料配合と初期含水比を決めるため、表-7 に示す基本配合(乾燥重量比)のもとに、突固め試験と透水試験を実施した。図-15 に基本配合の粒度加積曲線を、材料および fuller 曲線とともに示す。

表-7 に基本配合とともに、突固め試験結果と透水試験結果を、図-16 に突固め試験結果を、図-17 に透水試験結

果を示す。石粉配合率を 17.5～25.0%に変化させたが、配合に関わらず最大乾燥密度はほぼ一定であり、透水係数は $W_{opt} \approx W_{kmin}$ 付近より湿潤側で目標性能を満足することがわかる。また、透水係数は初期含水比に非常に敏感であり、 W_{opt} より 2.5%程度乾燥側では目標性能を確保できていないことから、施工時の含水比管理を慎重に行う必要がある。

表-7 下部覆土・石粉基本配合の室内試験結果

配合率				最大乾燥密度	最適含水比	最小透水係数	最小透水係数含水比
石粉	現地発生土	碎石	砕砂	ρ_{dmax}	W_{opt}	K_{min}	W_{kmin}
%	%	%	%	Mg/m ³	%	m/sec	%
17.5	27.5	32.1	22.9	2.074	9.5	1.13×10^{-9}	10.3
20.0	26.7	31.1	22.2	2.068	9.3	1.14×10^{-9}	10.1
22.5	25.8	30.1	29.2	2.068	9.0	1.19×10^{-9}	9.8
25.0	25.0	29.2	20.8	2.067	9.4	1.12×10^{-9}	9.8

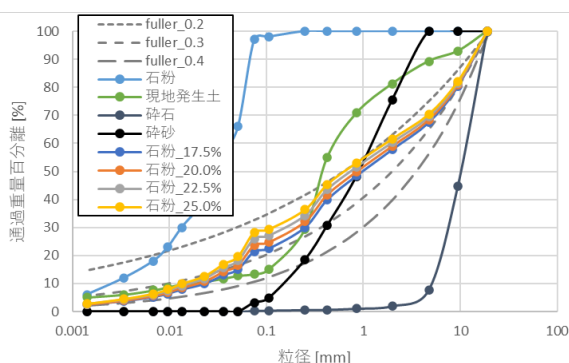


図-15 下部覆土・石粉基本配合の粒径加積曲線

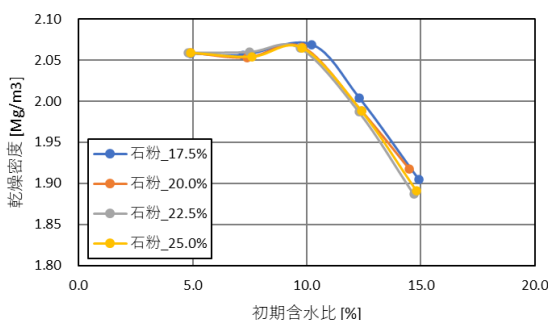


図-16 下部覆土・石粉基本配合の突固め試験結果

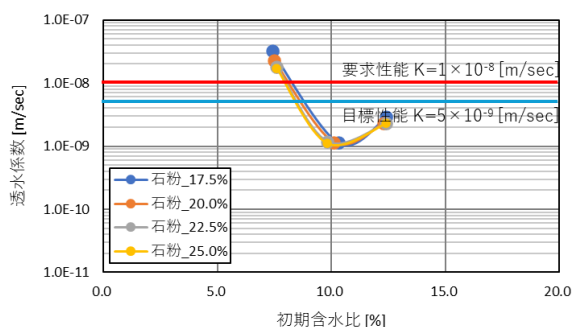


図-17 下部覆土・石粉基本配合の透水試験結果

3.4 使用材料と材料特性のまとめ

(1) 概要

L2 覆土に使用する Be 混合土の性能を評価するために、難透水性覆土と下部覆土を対象として、使用する材料とこれらを配合した Be 混合土の室内試験を実施した。

(2) 難透水性覆土

難透水性覆土に使用する材料は Be と三沢砂とし、Be にはクニゲル V1 と津軽 2 号を使用して、それぞれの性能を確認した。透水係数の目標性能は、要求性能を 1 桁下回る $k=1 \times 10^{-11}$ [m/sec]とした。

クニゲル V1 では、Be 配合率および初期含水比によらず、目標値を下回る性能を得られることを確認した。

津軽 2 号では、最小透水係数はクニゲル V1 と同程度の結果が得られたが、初期含水比に対してやや敏感で、 W_{opt} より乾燥側では目標値を満足できないものの、 W_{kmin} 付近に保つことにより満足できることが示された。

(3) 下部覆土

下部覆土に使用する材料は、Be(津軽 2 号)、碎石、砕砂、および現地発生土とし、コストダウンを企図して Be に代替して石粉を使用する場合を加えて、材料の配合と初期含水比での Be 混合土の性能を確認した。透水係数の目標性能は、要求性能の半分となる $k=5 \times 10^{-9}$ [m/sec]とした。

津軽 2 号では、Be 配合率 5.0%の乾燥側で目標値を満足できないものの、概ね目標を満足できることを確認した。

石粉では、初期含水比に非常に敏感であるものの、初期含水比を $W_{opt} \approx W_{kmin}$ 付近に保つことにより、目標値を満足できることが示された。

4. Be 混合土の製造方法

4.1 製造方法(ミストブレンダー工法)

(1) 概要

前述の通り、Be 混合土の製造方法として弊社では「ミストブレンダー工法」を開発している。本工法では均質な Be 混合土の製造を行うための工夫として、製造工程を粉体混合工程と加水調整工程の 2 段階に分けている。以下に、それぞれの工程を紹介する。

(2) 粉体混合工程

粉体混合工程は、使用する材料を自然含水比状態で混合する過程である。混合する材料の特性や材料数に応じて、弊社開発工法である MY-Mixer を用いる方法と、汎用機械である二軸強制ミキサを用いる方法の 2 種類がある。

このうち MY-Mixer を用いる方法は、MY-Mixer と呼ばれる特殊な筒形装置に混合する材料を落下しながら通過させることで、材料が筒内部で衝突と分散を繰り返し、

均質に事前混合するものである。動力を使用せず、連続製造に対応できるとともに、使用する材料が 2 種類であれば設備もコンパクトにできる。しかしながら、材料の種類が多くなるほどに貯蔵ビンや計量設備、制御システム等が煩雑になる。

これに対し、二軸強制ミキサを用いる方法は、既存コンクリートプラントを転用して材料を事前混合するものである。ミキサの容量に応じたバッチ毎の分割製造となるものの、複数種類の材料を自在に組み合わせて混合することが容易となる。

今回は、試験施工において使用する粉体材料が 3 種類、母材が 4 種類、合計で最大 7 種類の材料を使用する計画であったため、コンクリートプラントを転用した二軸強制ミキサを使用して粉体混合を行うこととした。

ただし、自然含水比での混合であるため、不均質部となるダマは発生しないことを確認している。

(3) 加水調整工程

加水調整工程は、粉体混合工程で製造された自然含水比状態の事前混合材料に加水を行い、目標とする初期含水比に調整する工程である。ここでは、従来²⁾と同様に、事前混合した材料を落下させながらミスト状に水を吹きつけて含水比調整する方法を採用した。

ここで、加水された材料の含水比の均質性を確保するためには、材料を加水部に落下させる際の定量性の確保が極めて重要となる。

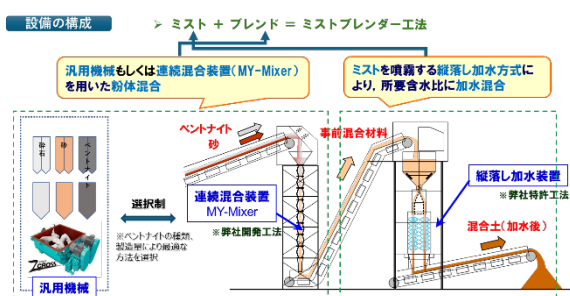


図-18 製造装置の概念図



写真-1 製造プラント概観

そこで、粉体混合材料をストックパイルに一時貯蔵し、そこから材料を定量排出できるサークルフィーダーとコンスタントフィードウェアを用いて定量性を確保した。

図-18 に製造装置の概念図を、写真-1 に実際に構築した製造プラントを示す。

プラントの製造能力は転圧土換算で $40\text{m}^3/\text{hr}$ を確保することを想定し、各種の設備等の仕様等を設定した。

4.2 製造品質

(1) 概要

Be 混合土は複数材料を粉体混合し、目標含水比に加水調整して製造する。この時に材料の偏在や含水比のバラツキが発生すると、製造された Be 混合土は不均質となり、最終的に巻出し・転圧された覆土の均質性が大きく損なわれ、目標とする透水係数が確保できない要因となる。

このため、粉体混合工程での材料混合、および加水調整工程での含水比の均質性(バラツキの少なさ)は極めて重要な管理項目となる。

ここでは、粉体混合工程と加水調整工程において、品質を確保するための取組と、実際の製造土の品質管理の事例を紹介する。

(2) 粉体混合工程

粉体混合工程の概念図を図-19 に示す。粉体混合工程では、次に示す項目により品質管理を行っている。

- ① 材料計量精度：母材(砂、礫)、Be(粉体)は 1kg 単位、水は 0.1kg 単位で調整可能。材料投入量は製造当日の各材料の含水比を測定してバッチ毎の投入重量を計算し、汎用プラントのシステムにより制御する。計量精度は砂・碎石で $\pm 3\%$ 、ベントナイトで $\pm 1\%$ 程度であり、計量実績を記録として残し、不具合等のフィードバックに活用する。
- ② 混合順序：母材と Be(粉体)の混合順序は、事前に試験練りを実施した結果、母材を先に混合した後に Be(粉体)を投入する順序とした。
- ③ 混合時間：試験練りを実施し、母材の混合時間 60 秒、Be(粉体)投入後の混練時間 45 秒とした。
- ④ 製造量：試験ケース毎に必要な盛土材の重量を算出し、1 バッチ(湿潤重量約 2000kg)で割り振り、必要量を製造した。
- ⑤ 品質管理：製造された粉体混合材料は二軸強制ミキサの排出口から排出ベルコンに投下され、一時貯留サイロに運ばれる。排出には 1 バッチ当たり 10 分程度かかり、この間にサンプリングして含水比試験を実施して、粉体混合された材料の品質管理を実施した。計測事例を図-20 に示す。この事例では、4 バッチ間の含水比の差は 0.5%程度に収まっており、均質に粉体混合ができたものと評価される。

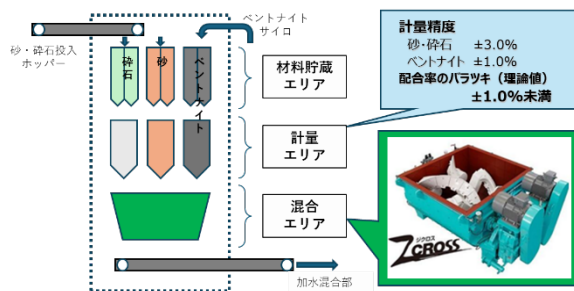


図-19 粉体混合工程概念図

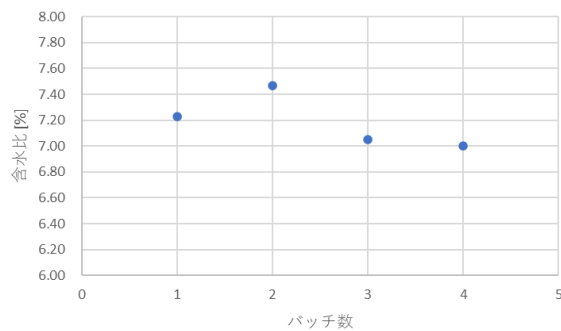


図-20 粉体混合工程での含水比の測定事例

(3) 加水調整工程

加水調整工程の概念図を図-21 に示す。加水調整工程では、次に示す項目により品質管理を行っている。

- ① 定量供給：一時貯留したストックパイルからサークルフィーダーとコンスタントフィードウェアにて排出を行い、定量性を確保した。
- ② 均質落下：加水調整では材料を円筒状に落下させながら、円筒の内外から水を噴霧することで材料の含水比を加水調整する。このため、材料落下の際には定量性ととも、落下形状の均質性が求められる。定量性は①で確保しており、新たに開発した分散装置により落下形状を円筒状に整えて、材料が均等に水の噴霧を受けるように調整した。
- ③ 加水量調整精度：加水部では、円筒状に落下させた材料に水を噴霧して加水調整を行う。加水は 4 系統に分けた合計 128 個のノズルを用い、ノズルの組合せと印加圧力の制御により、必要な噴霧量を得られる仕組みとしている。これらは運転システムにより、遠隔制御が可能である。
- ④ 品質管理：加水調整された材料は搬出ベルコンでストックヤードに移動する。この時に 1 分ごとにサンプリングを行い、含水比試験と Be 含有率の代替指標である細粒分含有率試験(5 サンプル毎)を実施し、加水調整された材料の品質管理を実施した。計測事例のうち、含水比の結果を図-22 に、細粒分含有率の結果を図-23 に示す。図-22 より、加水調整された材料の含水比は、目標値(この場合、10%)に対して概ね±1.0%以内に収まっており、図-23 より細粒

分含有率は目標値(この場合、20%)の±0.5%以内に収まっていることから、均質な材料製造ができたものと評価される。

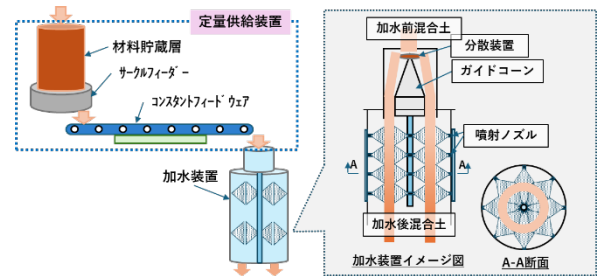


図-21 加水調整工程概念図

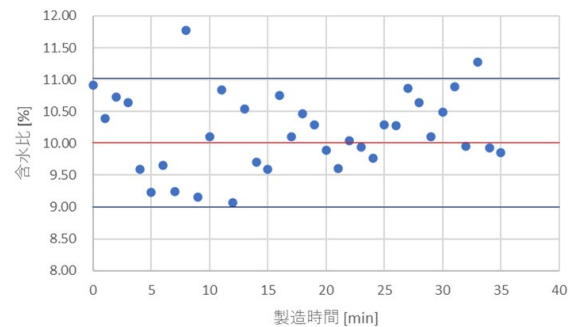


図-22 加水調整工程での含水比の測定事例

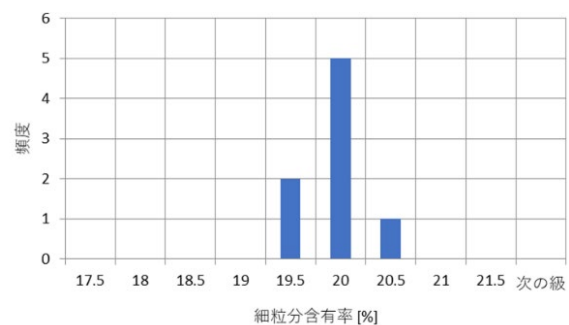


図-23 加水調整工程での細粒分含有率の測定事例

5. 試験施工の進め方

5.1 試験ケース

(1) 難透水性覆土

難透水性覆土について試験を実施したケースは、表-8 に示す 5 種類の配合で、仕上り厚を複数試験している。Be としてクニゲル V1 と津軽 2 号、母材として三沢砂を用いた。初期含水比は Wopt 付近を狙って製造を行い、目標の仕上り厚を得られるよう、巻出し厚は仕上り厚の 2 倍を目標にした。

表-8 難透水性覆土の試験ケース

	配合率			仕上り厚 cm
	ベントナイト		母材	
	クニゲルV1 %	津軽2号 %	三沢砂 %	
難_V_17.5	17.5	—	82.5	5.0, 7.5, 10.0
難_V_20.0	20.0	—	80.0	5.0, 7.5, 10.0
難_T_20.0	—	20.0	80.0	7.5, 10.0
難_T_22.5	—	22.5	77.5	7.5, 10.0
難_T_25.0	—	25.0	75.0	5.0, 7.5, 10.0

(2) 下部覆土

下部覆土について試験を実施したケースは、表-9 に示す 6 種類の配合で、仕上り厚を複数試験している。細粒分としてベントナイト(津軽2号)と石粉、母材として現地発生土、砕石、砕砂を用いた。初期含水比は W_{opt} 付近を狙って製造を行い、目標の仕上り厚を得られるよう、巻出し厚は仕上り厚の2倍を目標にした。

表-9 下部覆土の試験ケース

	配合率					仕上り厚 cm
	細粒分		母材			
	津軽2号	石粉	現地発生土	砕石	砕砂	
	%	%	%	%	%	
下_T_5.0	5.0	—	31.7	36.9	26.4	10.0, 15.0
下_T_7.5	7.5	—	30.8	36.0	25.7	10.0, 15.0
下_T_10.0	10.0	—	30.0	35.0	25.0	10.0, 15.0
下_P_20.0	—	20.0	26.7	31.1	22.2	10.0
下_P_22.5	—	22.5	25.8	30.1	21.6	10.0, 15.0
下_P_25.0	—	25.0	25.0	29.2	20.8	10.0, 15.0

5.2 転圧試験ヤード

転圧試験ヤードは、試験施工ヤードの一角を仕切り、地山を地盤改良しさらに転圧を行い、残留沈下が無視できることを確認して配置した。図-24 に概略平面図を、図-25 に横断面図(模式図)を示す。

施工範囲は 3.0m×8.0m とし、長手方向(振動ローラ走向方向)の両側を H 型鋼とコンパネで仕切り、測定範囲(2.1m×6.0m)は振動ローラの載荷幅から設定した。測定範囲の外側は本転圧前に小型機械(振動プレート)で予め締め固めるとともに、本試験時に適宜踏み固めた。また、施工範囲の前後は地山との高低差をスロープで摺り付ける範囲を兼ねている。

試験材料は 3 層に分けて巻出し・締め固めを行った。このうち最下層(1 層目)は試験の基盤層としての扱いで、地山との緩衝材および転圧回数の目安を得ることを目的とした。2 層目と 3 層目は実際の試験層とし、後述する各種品質管理試験等を実施した。

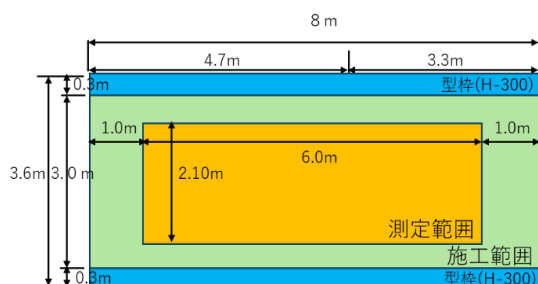
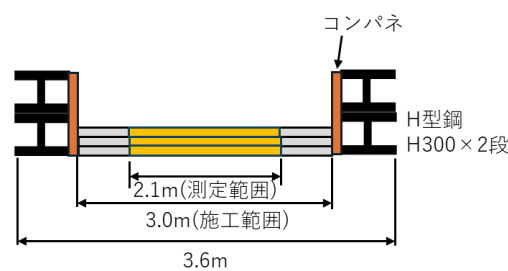


図-24 試験施工ヤード概略平面図



1～8 回目転圧 (目標5～15cm)

図-25 試験施工ヤード断面図(模式図)

5.3 使用機械

(1) 巻出し

試験施工において、転圧土の品質を確保するためには、均等な厚さと均質な初期密度で試験材料を巻出すことが重要である。このため、過去の実績²⁾を踏まえて、アスファルトフィニッシャーを用いて巻出しを行った。表-10 に使用した機械のスペックを、写真-2 に概観を示す。

表-10 アスファルトフィニッシャースペック

項目	仕様
メーカー	VOGEL
型式	Super 1803-3i
舗装幅	2.55m～8.00m
舗設能力	700t/hr



写真-2 アスファルトフィニッシャー概観

(2) 転圧

Be 混合土では、材料のオーバーコンパクションが懸念されるため、転圧に使用する振動ローラは過去の実績²⁾と同等程度の機材を使用した。表-11 に使用した機械のスペックを、写真-3 に概観を示す。

表-12 振動ローラスペック

項目	仕様
メーカー	酒井重工業
型式	MW700-i
転圧幅	2100 [mm]
運転質量	8770 [kg]
起振力(前輪/後輪)	38[kN]/90[kN]
起振力(後輪)	90([kN])



写真-3 振動ローラ概観

5.4 品質管理試験

(1) 試験項目

試験施工における品質管理試験として、表-13 に示す試験を実施した。また、写真-4 に代表的な品質管理試験の実施状況を示す。

表-13 品質管理試験項目

試験項目	基準等	数量	概要
撤出し厚・密度	JGS 1613(応用)	4ヶ所/層	撤出し時の盛土材料の層厚と密度を測定。 コアカッター法を応用
層厚	レベル測量	11か所/層	撤出しを含め、転圧(1往復)毎にレベル測量を行い、層厚および転圧完了を判定
原位置密度	砂置換	JIS A 1214	転圧終了後の盛土体の密度を測定
	RI密度	JGS 1614	撤出しを含め、転圧(1往復)毎にRI密度測定を行い、転圧完了を判定
ブロックサンプリング	チェーンソウ	2ヶ所/層	転圧面から試料をチェーンソウを用いてブロックサンプリング。透水試験や層内上下密度差測定の試料を取得



(a) 砂置換試験

(b) ブロックサンプリング
(チェーンソウ)

写真-4 品質管理試験の実施例

(2) 品質管理試験

表-13 に示す品質管理試験を2層目と3層目にて実施した。特に、試験層の破壊を伴う巻出し密度、砂置換、RI密度、ブロックサンプリングは、2層目と3層目が重ならないように配置した。図-26 に2層目の試験配置例を示す。

5.5 転圧回数

各層の転圧は、基本的に転圧に伴う指標が収束するまで実施した。具体的には、2種類の方法により、表-14 に示す判定基準に基づいた。この結果、試験条件によるが、概ね6回(3往復)から10回(5往復)で収束するものが大半となった。

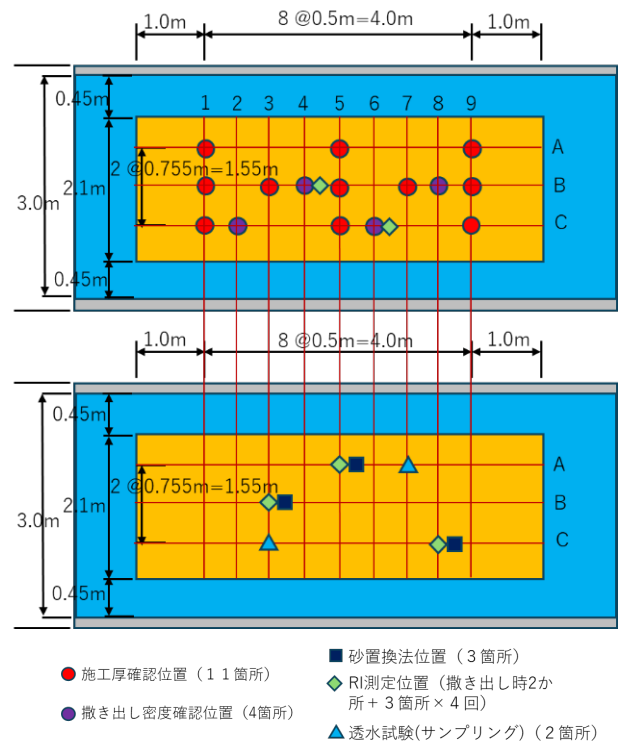


図-26 品質管理試験の配置例

表-14 転圧収束判定基準

試験項目	判定基準
レベル測量	各点の沈下量増分が全点1mm以下となり、かつ安定した状態が2回以上続くこと
RI密度	試験条件により予め設定した目標値(Mo乾燥密度から湿潤密度に換算)をクリアし、かつ密度増分が続くこと

6. 試験施工結果

6.1 難透水性覆土

(1) ブロック試験結果

難透水性覆土の締固めを行った転圧土から採取したブロックサンプリングを用いた乾燥密度と透水試験の結果について、図-27 にクニゲル V1 を、図-28 に津軽 2 号を示す。

この結果、乾燥密度は突固め試験(4.5Ec)の 92%程度であり、透水試験結果では目標性能 $k=1 \times 10^{-11}$ [m/sec]を満足できないものが多い結果となった。

ここで、図-29 で津軽 2 号仕様のブロックサンプリングの結果を有効 Mo 湿潤密度で整理してみる。図では、ブロックサンプリングに加え、突固め試験の Wopt より湿潤側、および転圧試験時に採取した材料を 4.5Ec 締固めした試料(製造土)、ブロックに合わせて密度を調整した試料(密度調整)、および有効 Mo 密度の低い範囲を狙った試料(有効 Mo 調整)も併せて記している。明らかにブロック以外は一定の傾向線に乗るのに対し、ブロックは高透水側にバラついていることが明らかである。なお、この傾向

は、クニゲル V1 仕様でも同様であることを確認している。
 これより、ブロックサンプリングした不攪乱試料を用いた透水試験の結果は、何らかの理由 (サンプリング、梱包、輸送、トリミング、等) による乱れの影響を受けて透水係数が大きく出ているものと推定され、今後の課題と考える

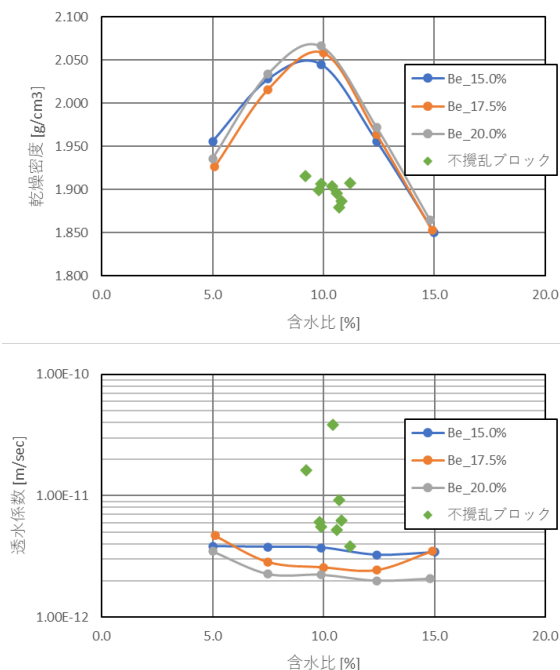


図-27 クニゲル V1 仕様・ブロック試験結果

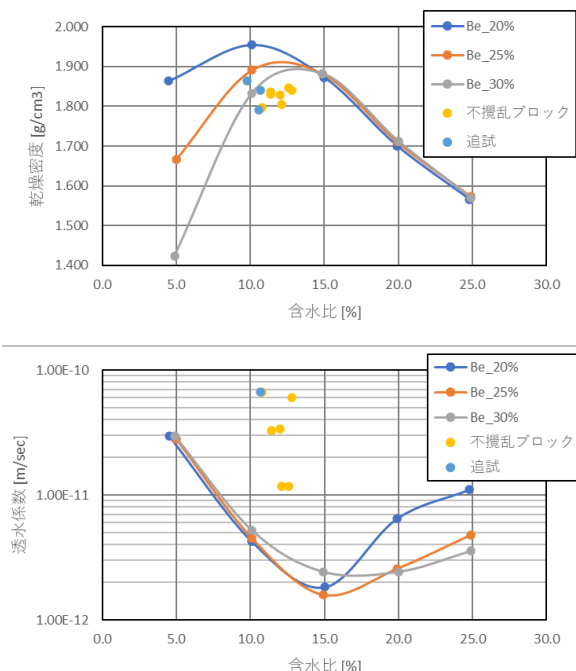


図-28 津軽 2 号仕様・ブロック試験結果

この結果、乾燥密度は突固め試験(4.5Ec)の 92%程度であり、透水試験結果では目標性能 $k=1 \times 10^{-11}$ [m/sec] を満足できないものが多い結果となった。

ここで、図-29 で津軽 2 号仕様のブロックサンプルの結果を有効 Mo 湿潤密度で整理した。図では、ブロックサンプルに加え、突固め試験の W_{opt} より湿潤側、および転圧試験時に採取した材料を 4.5Ec 締固めた試料(製造土)、ブロックサンプルに合わせて密度を調整した試料(密度調整)、および有効 Mo 密度の低い範囲を狙った試料(有効 Mo 調整)も併せて記した。ブロックサンプル以外は一定の傾向線に乗るのに対し、ブロックサンプルは高透水側にバラついていることが明らかである。なお、この傾向は、クニゲル V1 仕様でも同様であることを確認した。

これより、ブロックサンプリングした不攪乱試料を用いた透水試験の結果は、何らかの理由 (サンプリング、梱包、輸送、トリミング、等) による乱れの影響を受けて透水係数が大きく出ているものと推定され、今後の課題と考える。

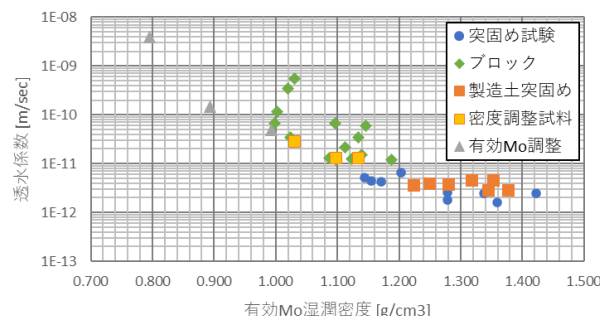


図-29 津軽 2 号仕様・有効 Mo 湿潤密度整理

(2) 透水係数と各種密度との関係

津軽 2 号について、ブロックのデータを除いて、横軸を密度(乾燥, 湿潤), 有効粘土密度(乾燥, 湿潤), 有効 Mo 密度(乾燥, 湿潤)を用いて整理した。図-30 にその結果を示す。これより、有効粘土湿潤密度と有効 Mo 湿潤密度が透水係数と非常に良い相関を示すことがわかる。そこで、図-30 に同時に近似曲線と決定係数を示す。ここでは、種々試した結果、縦軸(y 軸)の透水係数を log 換算し、横軸(x 軸)は有効粘土湿潤密度および有効 Mo 湿潤密度を使用した 2 次関数の相関性が最も高く、決定係数 R^2 はともに 0.96 程度を示している。ただし、2 次関数であり、極値(透水係数の最低値)が有効粘土湿潤密度で 1.562, 有効 Mo 湿潤密度で 1.349 に存在するので、近似式の適用範囲については注意を要する。

この近似式をクニゲル V1 で確認した。図-31 に、クニゲル V1 の突固め試験(W_{opt} 付近)、製造土の突固め試料とともに、ブロックサンプリング試料を有効粘土湿潤密度と有効 Mo 湿潤密度で整理し、津軽 2 号で得られた近似式を加えた。図より、ブロック試料ではやや乖離があるが、有効密度が高い領域では良い相関性を示していることがわかる。

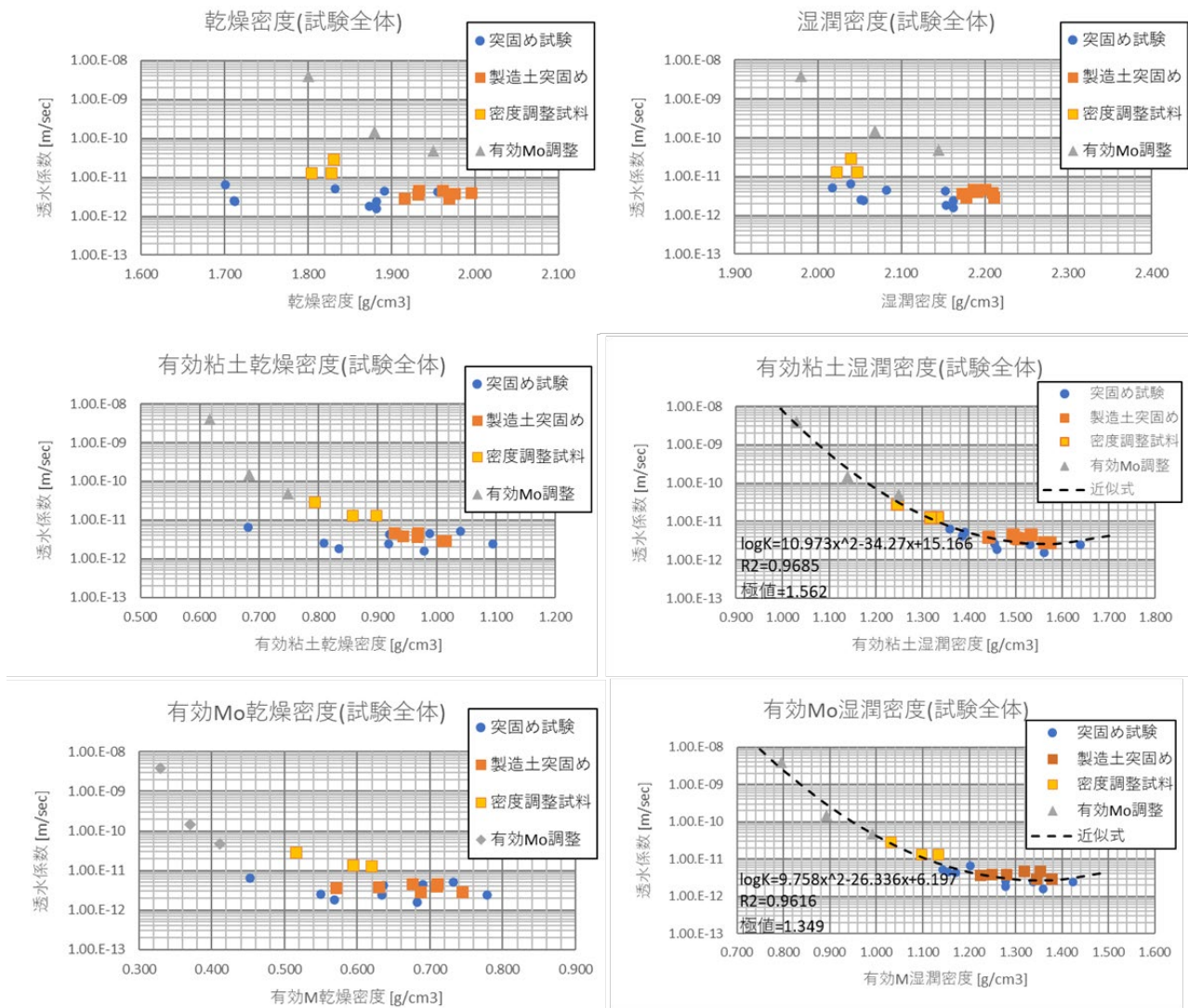


図-30 津軽 2 号仕様・各種密度と透水係数の関係

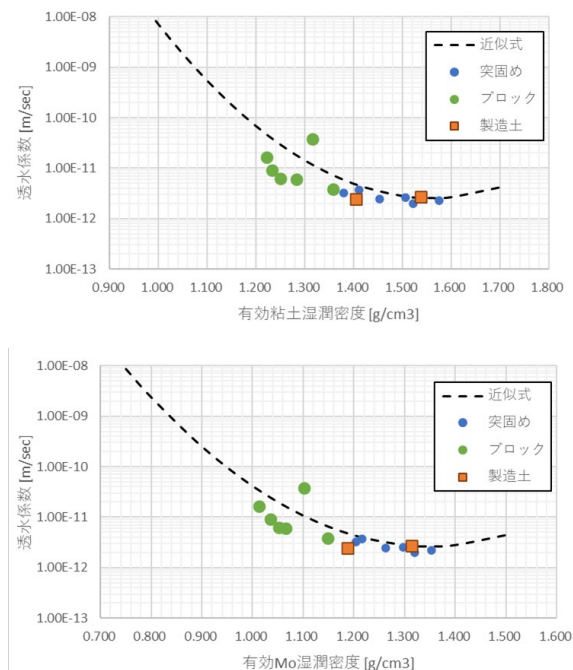


図-31 クニゲル V1 仕様・各種密度と透水係数の関係

(3) ブロックの上下密度差

盛土では巻出し厚を厚くする程に施工効率は向上するが、一方で同一盛土層内の上下で密度差が生じる可能性があり、厚いほどに顕著になると思われる。特に放射性廃棄物の処分においては、低透水層として期待される Be 混合土の性能は透水係数で規定され、使用する材料が一緒であれば密度に依存するため、同一層内での密度の差を評価する必要がある。

そこで、今回ブロックサンプリングした試料を上中下に 3 分割して密度を測定した。なお、前述の通りブロック試料は多少の乱れを受けている可能性があるが、相対評価で整理している。図-32 に、横軸を盛土の仕上り厚さ、縦軸に密度比をとり、上下比率(下層密度/上層密度)と全体比率(下層密度/全体密度)で算出し、クニゲル V1 仕様と津軽 2 号仕様に分けて示した。

この結果、上下比率も全体比率も仕上り厚さが厚くなるにしたがって低くなる、すなわち上下密度差が大きくなる傾向はやや認められる。また、クニゲル V1 仕様に比

べて津軽 2 号仕様の方が，上下密度差が大きい傾向がある．原位置試験等で評価される密度は全体密度に近いので，ここでは全体比率で評価するのが妥当と考えられる．

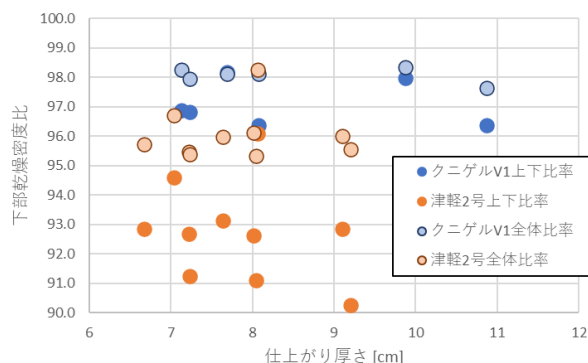


図-32 ブロック試料の上下密度差の関係

6.2 下部覆土

(1) ブロック試験結果

下部覆土の締固めを行った転圧土から採取したブロックサンプルを用いた乾燥密度と透水試験の結果について，図-33 に津軽 2 号を，図-34 に石粉を示す．

この結果，難透水性覆土と同様に，乾燥密度は突固め試験(4.5Ec)の 85～92%程度であり，透水試験結果では目標性能 $k=5 \times 10^{-9}$ [m/sec] を満足できないものが多い結果となった．

ここで，図-35 で石粉のブロックサンプルの結果を有効粘土湿潤密度で整理した．図では，ブロックサンプルに加え，突固め試験の W_{opt} 付近，およびブロックサンプルに合わせて密度を調整した試料(密度調整)も併せて記している．密度調整材の透水係数が正しいとすると，ブロックサンプル以外は一定の傾向線に乗るのに対し，ブロックサンプルの一部は低透水側に外れていることが明らかである．これより，ブロックサンプリングした不攪乱試料の透水係数は，何らかの理由 (サンプリング，梱包，輸送，トリミング，等) による乱れの影響を受けて透水係数が変化しているものと推定され，今後の課題と考える．

(2) 透水係数と各種密度との関係

石粉仕様について，ブロックサンプルのデータを除いて，横軸を密度(乾燥，湿潤)，有効粘土密度(乾燥，湿潤)を用いて整理した．なお，ここで粘土に相当する細粒分は，石粉そのものとともに，現地発生土に含まれる細粒分も含めて評価した．図-36 にその結果を示す．これより，有効粘土湿潤密度が透水係数と良い相関を示すことがわかる．そこで，図-36 に近似曲線と決定係数を合わせて示す．

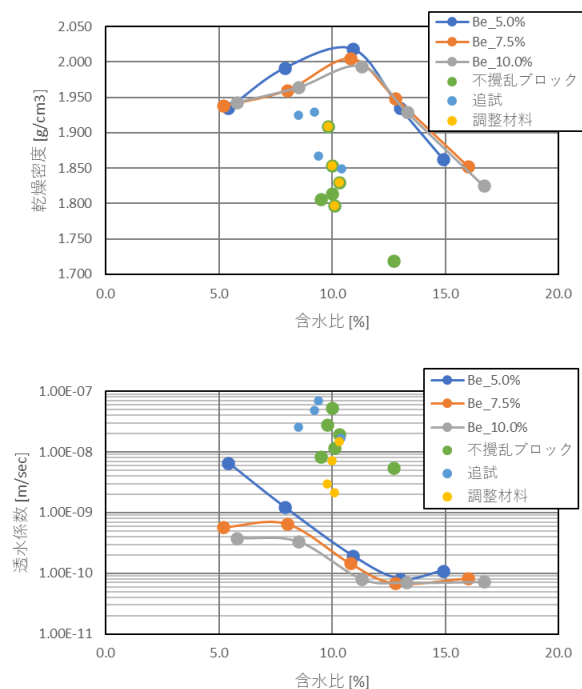


図-33 津軽 2 号・ブロック試験結果

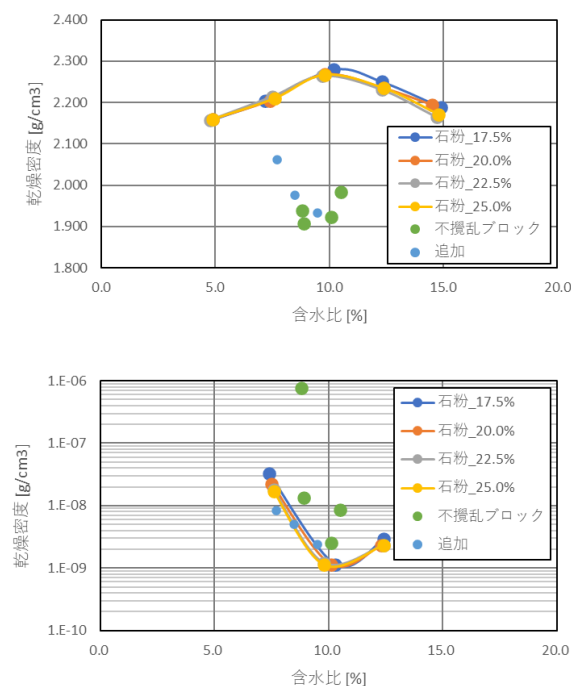


図-34 石粉・ブロック試験結果

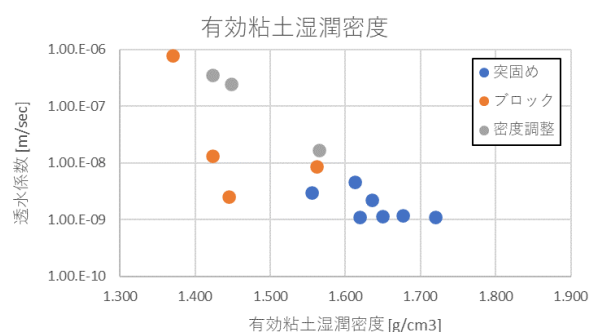


図-35 石粉・有効粘土湿潤密度整理

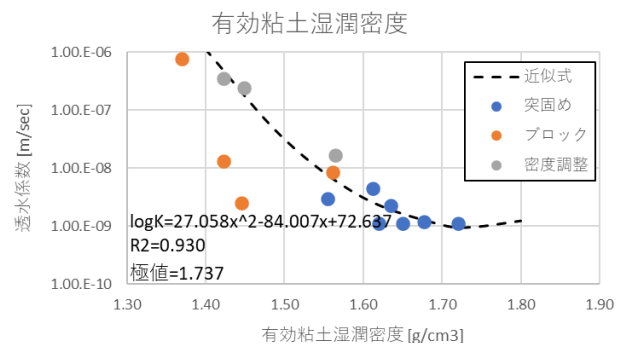
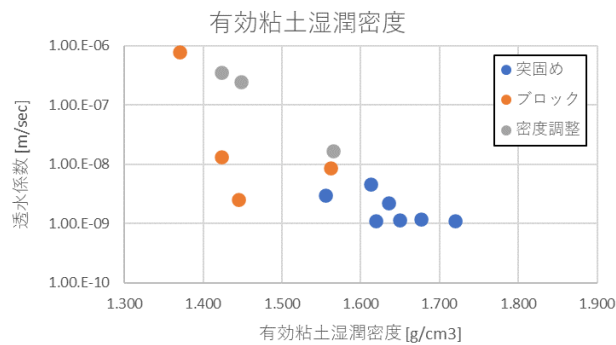
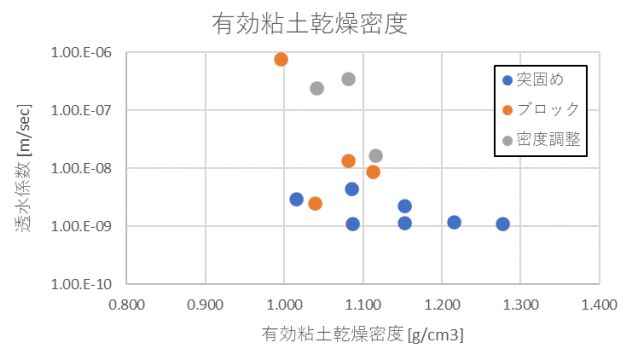
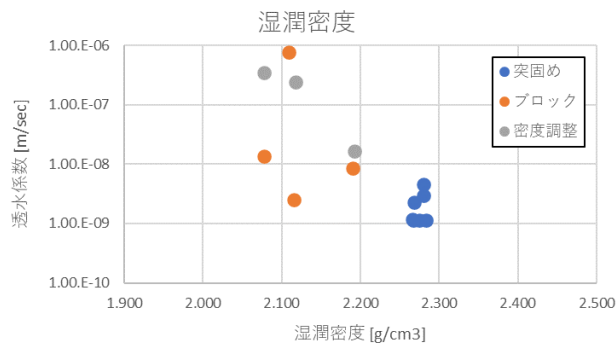


図-36 津軽 2 号仕様・各種密度と透水係数の関係

ここでは、種々試した結果、縦軸(y 軸)の透水係数を log 換算し、横軸(x 軸)は有効粘土湿潤密度を使用した 2 次関数の相関性が最も高く、決定係数 R^2 は 0.93 程度を示している。ただし、2 次関数であり、極値(透水係数の最低値)が 1.737 に存在するので、近似式の適用範囲については注意を要する。

(3) ブロックの上下密度差

下部覆土のうち、ここでは津軽 2 号について、ブロックサンプリングした試料を上下に 2 分割してそれぞれの密度を測定した。なお、ブロック試料は多少の乱れを受けている可能性があるが、相対評価でまとめている。図-37 に、横軸を盛土の仕上り厚さ、縦軸に密度比をとり、上下比率(下層密度/上層密度)と全体比率(下層密度/全体密度)で算出して示した。

この結果、上下比率も全体比率も仕上り厚さが厚くなるにしたがって低くなる、すなわち上下密度差が大きくなる傾向が認められる。これは、全体の層厚が厚いことが原因と考えられる。

6.3 考察・得られた知見

(1) 透水特性とベントナイト品質

難透水性覆土は、今回使用したベントナイト(クニゲル V1, 津軽 2 号)を使用した場合、透水係数と有効 Mo 湿潤密度の相関性が非常に高いことが示された。すなわち、ベントナイトの品質が一定であれば、Be 配合率と初期含水比を固定することにより、目標とする透水係数を得る

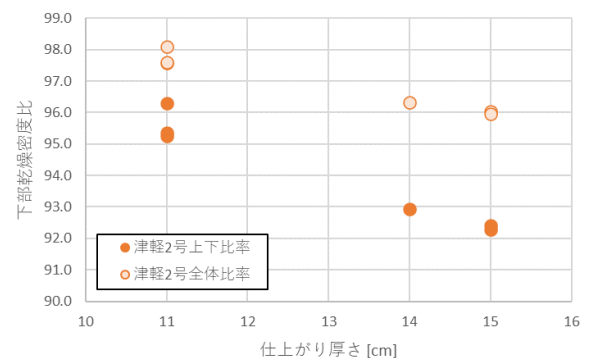


図-37 ブロック試料の上下密度差の関係

ためのターゲットとなる締固め密度を設定できることを意味する。

一方で、Be は自然由来の材料であり、その性能にはバラツキを有することは避けられない。このため、実際に Be 混合土を放射性廃棄物処分に適用する場合には、使用する Be の品質を常に把握しておく必要がある。

さらに、放射性廃棄物処分に用いる Be 混合土では、長期的な安定評価を満足するため、単位体積当りに必要な Mo が示されることがある。

これらを鑑みると、図-38 に示すような模式図を作成することができる。これは、横軸に使用する Be の Mo 含有率を、縦軸に Be 混合土の Be 配合率をとり、透水係数から決まる限界線と、長期安定性から決まる限界線を示したものである。それぞれの限界線の上側で目標性能を満足することから、使用する Be の Mo 含有率に応じて配合設計を行えば良いことになる。

具体的には次の手順となる。

【透水係数から決まる限界線】

- ・ 使用する Be の配合率毎の目標乾燥密度と初期含水比を突固め試験と試験盛土から決定。
- ・ 目標透水係数から算定される有効 Mo 湿潤密度を満足するために必要となる Mo 含有率を Be 配合率毎に逆算。
- ・ この結果を図にプロット。

【長期安定性から決まる限界線】

- ・ 満足すべき Be 混合土の単位体積当たりの Mo 含有率を確認。
- ・ 上記と同様に、Be 配合率毎の目標乾燥密度と初期含水比を設定し、単位体積当たりの Mo 含有率を満足するために必要となる Mo 含有率を配合毎に逆算。
- ・ この結果を図にプロット。

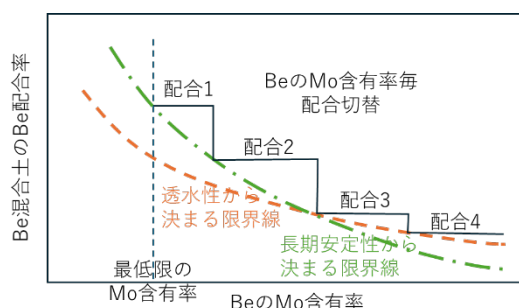


図-38 Mo 含有率と Be 配合率の関係

(2) 上下密度差への留意

今回の試験結果により、Be 混合土では同一層内での上下密度差が生じていることが示された。上下密度差は透水係数に影響を与え、密度が低い層内下部ほど透水性が高くなる可能性があると考えられる。

この解決方法として、隣接する区画で層の仕上り位置を変えて、各層の底部を連続させない位置をとることが考えられるが、L2 覆土のように比較広い面積を盛土する場合には、現実的とは言えない。

現時点では、可能な限り仕上り厚さを薄くすること、および上下密度差が生じることを見越して Be 配合率を高く設定し下部層で目標含水率を満足すること、の 2 点が考えられる。ただし、これらは施工コストを上昇させる要因となり、検討に当たってはバランスが重要となる。

さらに、可能な限り振動ローラ(起振力)を大きくし、上下密度差を小さくすることも考えられるが、Be 混合土の配合によっては過転圧が生じる可能性があるため、注意を要する。

(3) AtlasX 工法による施工管理の試み

Be 混合土は材料、製造、施工に留意することにより、目標とする透水係数を確保することが大きな目標である。

ここで、今までの盛土では施工管理試験として、今回も使用した砂置換試験や RI 密度測定を採用している。しかしながら、これらの試験方法は盛土面の破壊を伴い、かつ点の試験となる。特に破壊に関しては、放射性廃棄物処分の盛土体(人工バリア)にとっては避けたい状況である。

一方で、道路盛土等の施工管理においては、振動ローラ応答加速度をメインに、レーザースキャナによる沈下計測、自走式 RI ロボットによる含水比・密度の測定により、面的・非破壊・リアルタイムで盛土の品質を確認する「AtlasX(旧 α システム、新型 α システム)」が開発され、普及が進んでいる(例えば5)。

今回の試験施工においても、一部の盛土にて試験的に導入した⁶⁾。図-39 に測定値より推定した推定透水係数の分布図を示す。このように、本工法を用いることにより、盛土面全体のデータを取得することができ、品質保証等に寄与することができると考えられる。

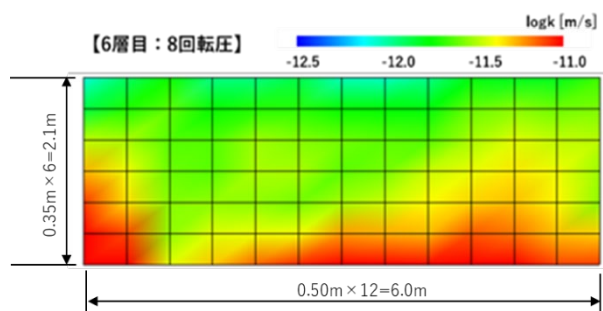


図-39 AtlasX 測定からの推定透水係数分布

7. おわりに

放射性廃棄物のうち、L2 と呼ばれる低レベル放射性廃棄物・浅地中(ピット)処分に用いられる Be 混合土をターゲットとし、ミストブレンダー工法を用いて Be 混合土を製造して、試験施工を実施した。その結果、以下のようない知見が得られた。

- ・ L2 覆土の要求品質を踏まえ、各種材料の材料特性と混合材料の突固め試験、透水試験を実施した。
- ・ 難透水性覆土では、Be としてクニゲル V1 を使用する場合には、透水係数は配合率や初期含水比の影響を受けずに要求品質を満足する。これに対し、津軽 2 号を使用する場合には、配合率と初期含水比にやや敏感であるものの、初期含水比を $W_{opt} \sim W_{kmin}$ 付近に保つことで要求品質を満足することがわかった。
- ・ 下部覆土では、津軽 2 号を使用する場合でも、石粉を使用する場合でも、透水係数は初期含水比に敏感であるものの、初期含水比を W_{opt} 付近に付近に保つことで要求品質を満足することがわかった。
- ・ 本試験施工に用いるため、ミストブレンダー工法の

プラントを、二軸強制ミキサを用いる製造方法に改造した。Be 混合土の製造品質は、十分な品質を保つことを確認した。

- ・ 難透水性覆土を対象にクニゲル V1 と津軽 2 号の試験盛土を実施した。概ね突固め試験(4.5Ec)の 92%程度の締固め密度が得られた。
- ・ また、透水試験結果を有効 Mo 湿潤密度で整理したところ、共に同じ近似曲線で高い決定係数を得ることができた。
- ・ 下部覆土を対象に津軽 2 号と石粉の試験盛土を実施した。概ね突固め試験(4.5Ec)の 85～92%程度の締固め密度が得られた。
- ・ また、透水試験結果を有効粘土湿潤密度で整理したところ、共に同じ近似曲線で高い決定係数を得ることができた。
- ・ 難透水性覆土、下部覆土ともに層内上下密度差が生じていることが明らかとし、これへの対応方法を検討した。
- ・ 透水係数を高い精度で予測することが可能となり、これに基づいて品質にバラツキのある Be を用いる場合の配合切替の考え方の一例を示した。
- ・ また、道路盛土等で適用が進んでいる AtlasX 工法を試験盛土の一部に適用し、透水係数の平面分布等を示すことができた。面的・非破壊・リアルタイムの管理法であり、今後も適用性を確認していく。
- ・ ブロックサンプリングの試験結果について、他の試験結果との傾向が合わない状況が散見された。今後の課題としていきたい。

Be 混合土は、Be そのものの性能の他、母材となる土質材料、Be 配合率、初期含水比、巻出し厚と締固め密度、等の多くの項目によりその性能が左右される、施工管理が難しい材料である。

今回の試験施工を通じて、製造や施工の経験を積むとともに、コントロールの方法等にも知見が得られたと考えている。今後とも、工法の発展に寄与していきたい。

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁 HP : https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/gaiyo/gaiyo01.html#h01, 最終閲覧 2025 年 7 月 16 日
- 2) 久慈雅栄, 河野浩之, 飯島健, 福田和人, 仁平義祐: ベントナイト混合土製造技術としてのミストブレンダー工法, 土木学会建設技術発表会 2021, IV-9, 2021
- 3) 日本原燃株式会社 HP : <https://www.jnfl.co.jp/ja/business/about/llw/summary/structure.html>, 最終閲覧 2025 年 7 月 16 日
- 4) 今城尚久: 地中ケーブル埋戻し材の開発(2) -最適粒度分布の検討-, 電力中央研究所報告 175063, p.12, 1976
- 5) 石黒健, 平田昌史, 古屋弘, 稲垣雄宣, 松崎晃, 佐藤寛: ICT 土工現場締固め品質管理方法「次世代 α システム」の開発-国土交通省 PRISM 大石龍門実証試験工事の実施概要-, 土木学会土木建設技術発表会 2022, II-01, 2022
- 6) 久慈雅栄, 石黒健, 平田昌史, 福田和人, 岩谷隆文: 振動ローラ加速度応答を利用したベントナイト混合土の締固め管理, 日本原子力学会 2024 春の年会, 1A08, 2024