

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

前田建設工業(株) 正会員 ○久慈 雅栄 正会員 河野 浩之
正会員 飯島 健 正会員 福田 和人
正会員 仁平 義祐

1. はじめに

原子力発電所などから発生する放射性廃棄物の処分場に用いられる人工バリア材、放射性物質に汚染された廃棄物の仮置き・中間貯蔵施設に用いられる低透水層、一般廃棄物最終処分場での遮水層等では、低透水性土質材料として砂等の母材とベントナイトを混合した「ベントナイト混合土」の適用が計画されている。ベントナイト混合土の締固めにより構築される低透水層には、土質材料としての均質性と施設に要求される透水係数を満足することが求められる。そのため、ベントナイト混合率や含水比のバラツキが少ない均質なベントナイト混合土を製造・施工できる技術が必要となる。

この課題に対して、筆者らは高均質なベントナイト混合土を連続的かつ大量に製造することを可能とした、連続縦落し式混合・加水機構を用いたベントナイト混合土製造システム「ミストブレンダー工法」を開発し、その性能や製造土および締固め土(造成土)の品質等の確認を実施してきた^{1)~3)}。

ここでは、本工法の原理と概要を紹介するとともに、製造土の品質、施工時の管理指標・基準について検討を実施したので、それらについて報告する。

2. ミストブレンダー工法の概要

図-1 に連続縦落し式混合・加水機構によるベントナイト混合土製造システム「ミストブレンダー工法」の概要図を示す。本装置は、自然乾燥状態程度の含水比を持つ砂等の母材とベントナイトを混合する「粉体混合部」と、混合された粉体を目標含水比まで均質に加水調整する「加水部」から構成され、いずれも重力を活用した縦落し方式となっている。

粉体混合部を構成する縦落し混合装置は当社の特許技術「MY-Mixer」を使用している。MY-Mixer は、内部に設置された仕切壁で材料を分割して 90 度回転させる独特の形状の筒形装置である。複数個連結して材料を通すことにより、分割を繰り返して均質に混合することができる。従来の機械攪拌型ミキサが動力により羽根等を回転して材料を強制的に攪拌・混合するのに対して、MY-Mixer は重力による落下エネルギーを利用して、筒形装置の中を自由落下させるだけで「練らずに混ぜる」ことが特徴となっている。図-2(a) にアクリル製の MY-Mixer 模型に 2 種類の粒状体(着色ビーズ)を落下させた時の混合状況を模式的に再現した状況を示す。本装置を n 個連続させた場合、理論的には 2^n (2 の n 乗)の分割・混合効果が得られる。

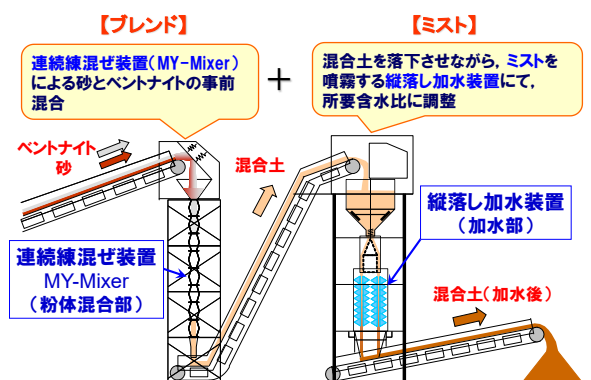
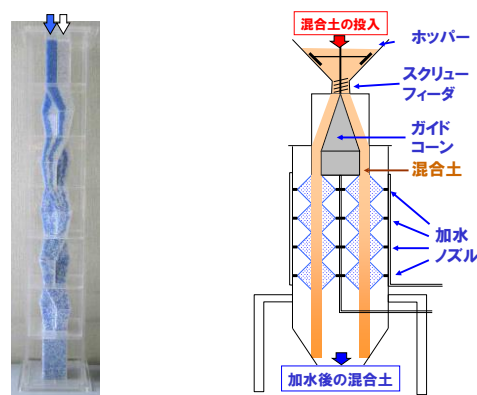


図-1 縦落し式混合・加水装置の概要



(a) MY-Mixer の概念模型 (b)加水装置の概念図

図-2 粉体混合部および加水装置の概念図

キーワード 放射性廃棄物, ベントナイト混合土, 縦落し式混合装置, 透水係数, 管理基準

連絡先 〒102-8151 東京都千代田区富士見 2-10-2 前田建設工業(株) 土木事業本部 土木技術部 TEL 03-5276-5166

加水部においては、図-2(b)に示す概念図の通り、次のステップにより加水が行われる。

- ① 粉体混合部で均質に混合された材料をホッパーに貯留
- ② ホッパーに貯留された材料をスクリーフィーダにより定量排出し、円錐形のガイドコーンを介して円筒状に薄く拡げて落下
- ③ 円筒状に落下中の材料を表・裏から挟み込むように、多段・多点配置したノズルから水をミスト状に噴霧し、目標含水比に加水

加水に使用するノズルの種類・ノズル数、およびノズルに加える水圧をコントロールすることにより、加水量（設定含水比に調整するための追加水分量）を自在に加減することができ、高い精度で目標含水比に調整したベントナイト混合土を製造することが可能となる。

このような連続縦落とし式混合・加水機構の利点として、次のような点が挙げられる。

- ① 独特な材料混合、加水調整方法により、非常に均質なベントナイト混合土の製造が可能である
- ② 材料混合、加水調整の過程で混合土に強制的な攪拌（せん断力）を加えないため、ダムなどの不均質部を発生させない
- ③ 攪拌翼・軸等の動作部を有しないため材料の付着等の問題が生じない
- ④ 連続製造が可能である

写真-1 に上記の概念のもとに試作した実規模実証プラントを示す。本プラントの製造能力は締固め土体積に換算して 10[m³/hr]（約 18[ton/hr]）規模である。プラント全長は約 50[m]、粉体混合部の MY-Mixer は□120[mm]×H240[mm]×8 連であり高さ約 1.9[m] である。また、加水部である縦落し加水装置は、加水装置自体がφ700[mm]×H1,000[mm]、架台高さ約 7.3[m]である。

写真-2 にミストブレンダー工法および一般的なコンクリート製造用強制二軸練りミキサで製造した同一配合（Ca 型ベントナイト混合率 30%，含水比 19.5%）のベントナイト混合土を示す。目視でも両者の違いが明らかなように、ミストブレンダー工法は不均質なダマが少なく、製造材料の均質性において優位であることが確認された。



写真-1 実規模実証プラント



ミストブレンダー 強制二軸練りミキサ

写真-2 製造したベントナイト混合土の外観

3. 製造されたベントナイト混合土の品質

(1) 材料供給精度

ミストブレンダーにおけるベントナイト混合土の製造品質を左右するポイントの一つは、使用する材料（砂およびベントナイト）の供給精度と考えられる。そこで、実規模実証プラントを長時間（45 分程度）連続運転した際の材料供給精度の測定結果の経時変化グラフを図-3 に示す。

図に示すように、砂およびベントナイトともに運転開始 2 分程度で安定供給状態となり、長時間（45 分程度）連続運転しても供給精度は概ね±1%以内のバラツキに収まっていることが示された。

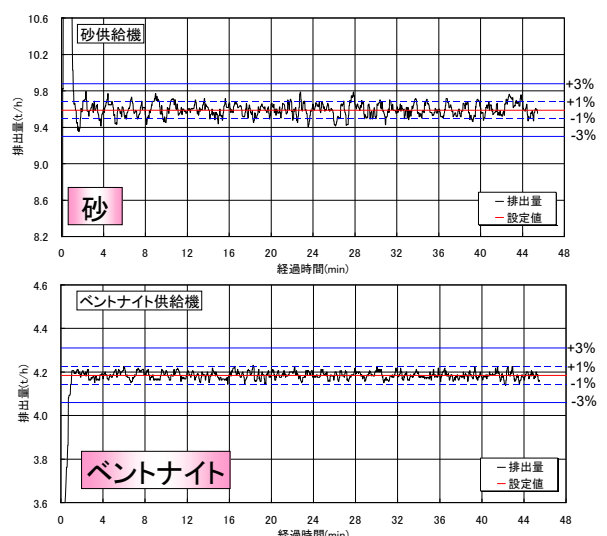


図-3 材料供給精度

(2) 製造精度

ミストブレンダーによるベントナイト混合土の製造精度について、含水比とベントナイト混合率に注目して検証した。実規模実証プラントを長時間（50分程度）連続運転中に製造土を5分毎にサンプリングして、含水比とベントナイト混合率の測定を行い、それぞれの設定値に対する平均値の乖離とバラツキについて確認した。なお、ベントナイト混合率は、使用する砂（母材）の細粒分含有率（ $-75[\mu\text{m}]$ ）が0.4%程度と少ないことから、製造土の細粒分含有率試験（ $75[\mu\text{m}]$ メッシュのふるいで水洗いする方法）により測定した。

図-4に測定結果の経時変化グラフを示す。長時間運転時においても、含水比およびベントナイト混合率ともに設定値からの乖離は概ね2%以内と小さいことを確認した。

以上より、実規模実証プラントは非常に高い製造土精度を有していることが示された。また、田坂ら⁴⁾の研究でも、本工法はバッチ式ミキサと同等程度の製造精度を持つことが示されている。

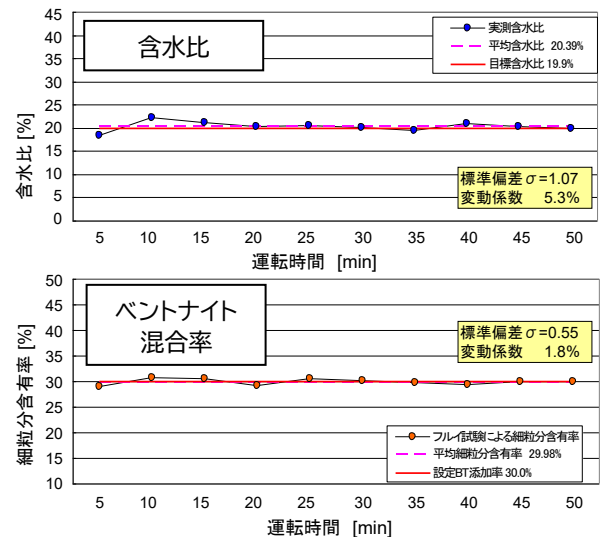


図-4 製造土の品質

(3) 製造されたベントナイト混合土の性能

a) 室内試験の目的

室内試験の目的は、実際にミストブレンダー実規模実証プラントで製造したベントナイト混合土の性能を把握することである。性能を評価する試験として、室内締固め（突固め）試験と透水試験を実施した。

b) 試験に使用する材料

室内試験には、前述のとおり、ミストブレンダー実規模実証プラントで製造したベントナイト混合土を用いた。なお、ここで使用するベントナイトはCa型を用いている。

試験に用いるベントナイト混合土のベントナイト混合率は4水準（25, 30, 35, 40%）、含水比はそれぞれのベントナイト混合率にて最大乾燥密度 ρ_{dmax} を示す最適含水比 W_{opt} と最小透水係数 K_{min} を示す含水比 W_{kmin} を確認できるように5水準に設定した。なお、含水比5水準の試料を準備するに当たっては、実規模実証プラントにてその都度含水比を設定して製造した。

c) 室内締固め（突固め）試験

室内締固め（突固め）試験は、締固めエネルギーを $4.5E_c$ に設定して実施した。

締固め試験結果を、横軸に含水比、縦軸に乾燥密度をとり、締固め曲線として図-5に示した。一般的な土と同様に、ミストブレンダー製造土の締固め曲線は上に凸の曲線となる。各ベントナイト混合率における締固め曲線のピーク位置を、最大乾燥密度 ρ_{dmax} と最適含水比 W_{opt} で評価し、表-1に示す。

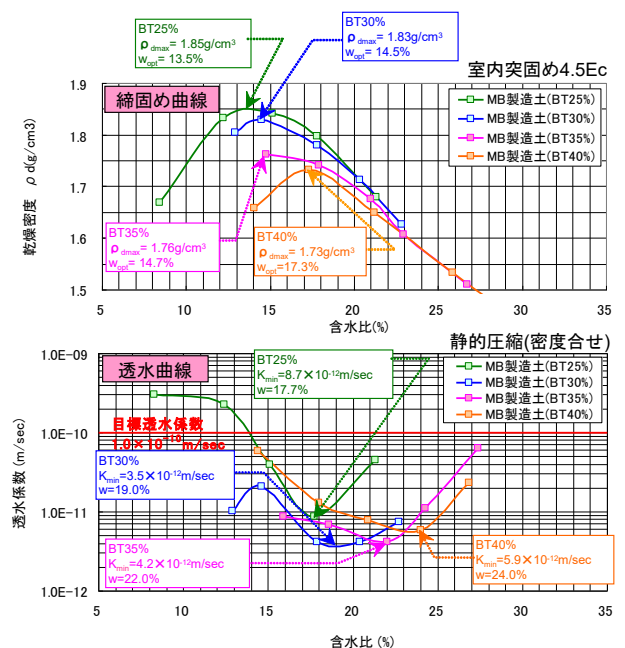


図-5 ミストブレンダー製造土の室内試験結果

ベントナイト混合率が高いほど、最大乾燥密度 ρ_{dmax} は小さく、最適含水比 W_{opt} は高くなるという傾向がある。一方、含水比が概ね 20%を超える範囲では、各ベントナイト混合率の締固め曲線はほぼ重なってくることから、含水比 20%以上の範囲ではベントナイト混合率に関わらず乾燥密度は大きく変わらないことを示している。

d) 室内透水試験

室内透水試験に用いた試料は、締固め試験に使用した試料と同時に製造したものを用い、締固め試験により得られた乾燥密度と同じ密度となるように静的圧縮により調整して使用した。

室内透水試験結果を、横軸に含水比、縦軸に透水係数をとり、透水曲線として図-5 に示す。一般的な土と同様に、ミストブレンダー製造土の透水曲線は下に凸の曲線となる。各ベントナイト混合率における透水曲線のピーク位置を、最小透水係数 K_{min} とその含水比 W_{kmin} で評価し、表-1 に示す。

ベントナイト混合率 30%～40%での最小透水係数 K_{min} は、透水曲線のピークがやや不明瞭な形状を示すこともあって、 $3.5 \sim 5.9 \times 10^{-12} [m/sec]$ とほぼ同等程度と評価されるのに対し、ベントナイト混合率 25%は $8.7 \times 10^{-12} [m/sec]$ とやや大きな値を示す。最小透水係数を示す含水比

W_{kmin} は、ベントナイト混合率が高いほど大きくなる。また、ベントナイト混合率 30～40%では透水曲線のピークが不明瞭な形状であることから、 W_{opt} から W_{kmin} 付近を含む広い含水比幅で透水係数の目標値 $1 \times 10^{-10} [m/sec]$ を十分に下回るとともに、 W_{kmin} 付近でほぼ一定の低透水性となることが示された。

表-1 では、さらに最大乾燥密度 ρ_{dmax} を示す最適含水比 W_{opt} と最小透水係数を示す含水比 W_{kmin} との関係を $W_{kmin} = W_{opt} + \bigcirc\%$ で表現した。これより、 W_{kmin} は $W_{opt} + 4 \sim 7\%$ 程度を示し、一般的な土砂($W_{kmin} = W_{opt} + 2\%$ 程度)よりやや大きいと評価され、これがベントナイト混合土の特徴の一つと考えられる。

e) 既往試験結果との比較

室内試験のうち締固め(突固め)試験の結果について、過去に実施した練混ぜ模擬土(室内試験用に手作業で製造した若干のせん断力が加えられたベントナイト混合土)の締固め曲線と比較したものを図-6 に示す。両者の締固め曲線を比較すると、3種類のベントナイト混合率のベントナイト混合土はいずれも、ミストブレンダー製造土は練混ぜ模擬土に比べて ρ_{dmax} は $0.03 \sim 0.06 [g/cm^3]$ 程度大きく、 W_{opt} は 1～3%程度低い(乾燥側)ことがわかる。すなわち、同じエネルギーを与えた場合、ミストブレンダー製造土は練混ぜ模擬土よりも密度が大きくなることから、「締固めやすい材料」とであると評価できる。

(4) 実規模締固め試験と造成土の性能

a) 実規模締固め試験の目標

実規模締固め試験では、締固めた材料が十分な低透水性を発揮するために、ミストブレンダー製造土の特徴を生かした転圧施工方法を確立することを目標とした。

表-1 ミストブレンダー製造土の室内試験結果

試験	項目	ベントナイト混合率			
		25%	30%	35%	40%
締固め試験	最適含水比 W_{opt} [%]	13.5	14.5	14.7	17.3
	最大乾燥密度 ρ_{dmax} [g/cm^3]	1.85	1.83	1.76	1.73
透水試験	最小透水係数 K_{min} [m/sec]	8.7×10^{-12}	3.5×10^{-12}	4.2×10^{-12}	5.9×10^{-12}
	K_{min} の含水比 W_{kmin} [%]	17.7	19.0	22.0	24.0
	W_{kmin} と W_{opt} の関係	$W_{opt} + 4.2\%$	$W_{opt} + 4.5\%$	$W_{opt} + 7.3\%$	$W_{opt} + 6.7\%$

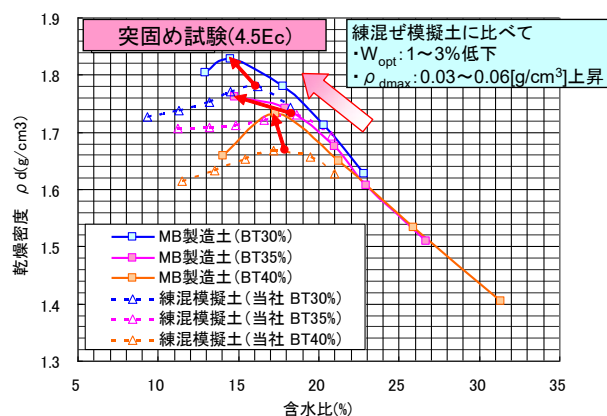


図-6 MB 製造土と練混ぜ模擬土の締固め曲線比

そのため、実際に実規模プラントで製造したミストブレンダー製造土を用い、実際の施工環境を想定してできるだけ実際の環境に近い状態で締固め試験を行い、その性状を評価することとした。

これに合わせて、転圧施工の効率化と品質向上も検討する。

b) 実規模締固め試験結果

実規模締固め試験として、撒出し厚について検討した。ベントナイト混合率 30%、初期含水比 19.0%の材料を用い 3 種類の撒出し厚(10cm, 15cm, 20cm)で実施した実規模締固め試験結果を、横軸に転圧ステップ、縦軸に層厚を初期撒出し厚さで基準化した平均仕上り率(=層厚/初期撒出し厚)で整理して図-7 に示す。図に示すように、撒出し厚 10cm と 15cm では転圧後の平均仕上り率は 47%程度を示すのに対し、撒出し厚 20cm では平均仕上り率は 55%程度とやや高く、10cm と 15cm に比べて転圧が不十分であることを示している。また、同程度の仕上り率を示す 10cm と 15cm では、15cm の方が効率的であると評価される。

以上より、ベントナイト混合率 30%、撒出し厚 15cm を標準転圧仕様とすることとした。なお、含水比については、できるだけ低い透水係数を実規模締固め試験の目標とするため、ベントナイト混合率 30%での Wkmin である $w=19.0\%$ とする。

次に、標準転圧仕様で転圧した転圧層から採取した試料を用いて、乾燥密度と透水係数を測定した。図-8 にその結果を、横軸に含水比、縦軸にそれぞれ乾燥密度と透水係数を用いて示す。なお、図中の青実線は同一条件での突固めエネルギー4.5Ecにおける室内締固め試験の締固め曲線と透水曲線であり、青破線は締固め曲線における C 値締固め度(後述)に相当する。この結果、標準転圧仕様で転圧した転圧層の透水係数は全て目標透水係数 $1E-10[m/sec]$ を下回る結果を示し、標準転圧仕様で転圧を行うことにより目標透水係数を満足できる可能性が示された。また、乾燥密度は C 値締固め度で概ね 96%以上を示していることが明らかとなった。

c) 施工の効率化、施工品質の向上

ベントナイト混合土の転圧施工のさらなる効率化と施工品質の向上を達成するために、ベントナイト混合土の撒出しにおいて、アスファルトフィニッシャを用いた機械施工の適用性を確認した。

ミストブレンダー製造土の撒出しにおけるアスファルトフィニッシャの適用性に関しては、いくつかの留意事項はあるものの、基本的には問題なく施工できることが確認された。写真-3 に用いたアスファルトフィニッシャを示す。

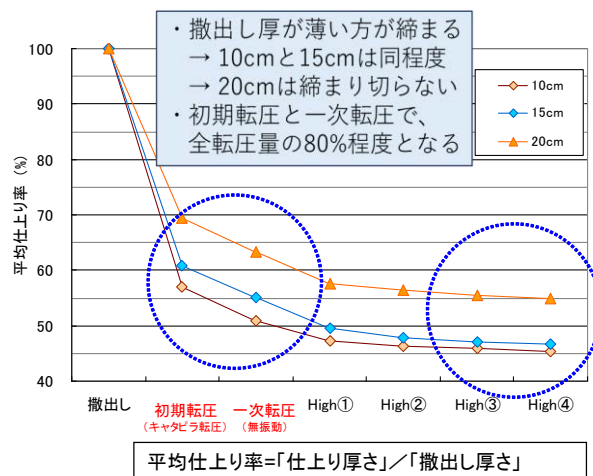


図-7 撒出し厚の違いによる平均仕上り率の違い
(ベントナイト混合率 30%)

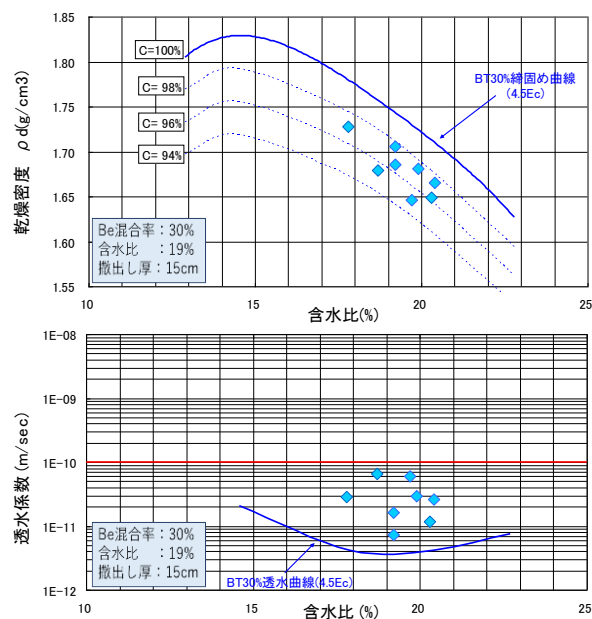


図-8 実規模締固め試験結果

ミストブレンダー製造土をアスファルトフィニッシャーで撒出した際の初期乾燥密度を、「バックホー+人力」による初期乾燥密度と比較し、図-9 a) に示す。アスファルトフィニッシャーでの初期乾燥密度は $0.94[\text{g}/\text{cm}^3]$ 程度を示し、「バックホー+人力($0.80[\text{g}/\text{cm}^3]$)」の $1.1\sim 1.2$ 倍程度で、より高い密度での撒出しが可能であることがわかった。

また、撒出し厚については、図-9a)と同様に「バックホー+人力」と比較して図-9 b) に示す。なお、撒出し設定厚は「バックホー+人力」の 15cm に対して、アスファルトフィニッシャーは初期撒出し密度増加を考慮して 12.5cm としている。この結果、両者ともに平均撒出し厚は設定厚よりやや厚くなっているものの、アスファルトフィニッシャーでの撒出し厚のバラツキが非常に小さいことが確認された。

さらに、アスファルトフィニッシャーを用いた撒出し層は、初期撒出し密度が高く凹凸も小さいため、バックホーキャタピラによる初期転圧を実施する必要がなく、いきなりタンデム振動ローラーでの転圧作業に移行できることが確認された。これらにより、施工効率についても、「バックホー+人力」における施工実績に対して、 2.5 倍程度の時間的な効率化が図れることが明らかになった。また、アスファルトフィニッシャーを用いた撒出し層の透水係数は目標値を満足することを確認している。

このように、ミストブレンダー製造土の撒出しにアスファルトフィニッシャーを適用することで、品質と施工性の向上が図れることが示された。

4. 品質管理方法の提案

(1) 要求品質と管理指標

ベントナイト混合土を撒出し転圧した低透水層の要求品質は、対象層の透水係数として与えられる。これを管理指標とした場合、対象層からサンプリングし、室内透水試験の結果により品質管理が行われることになる。しかしながら、 $1\text{E}-10[\text{m}/\text{sec}]$ 程度の低透水材料の透水試験は、試験期間として 1 ヶ月程度が必要で大きなタイムラグが生じ、施工済み範囲の修復など施工上のリスクが極めて大となる。

そこで、締固め度と施工含水比に着目したリアルタイムで実施可能な管理基準の考え方を検討した。

なお、ここで締固め度については 2 種類の指標 (D 値と C 値) を用いることとする。図-10 に概念図を示す。

D 値：試料の乾燥密度 ρ_{d1} と締固め曲線の最大乾燥密度 ρ_{dmax} との比 $D = \rho_{d1} / \rho_{dmax}$

C 値：試料の乾燥密度 ρ_{d1} と同じ含水比に対応する締固め曲線の乾燥密度 ρ_{d2} との比 $C = \rho_{d1} / \rho_{d2}$



写真-3 アスファルトフィニッシャー

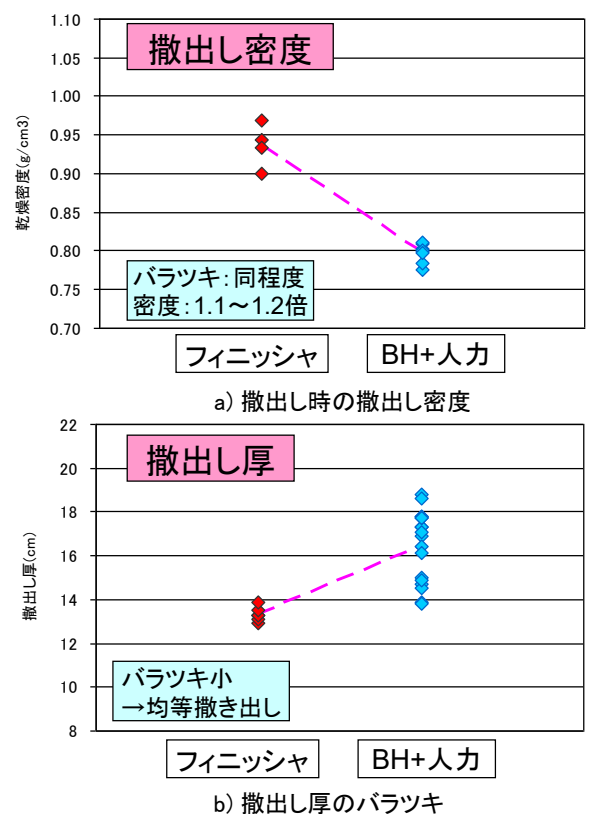


図-9 撒出し品質の比較

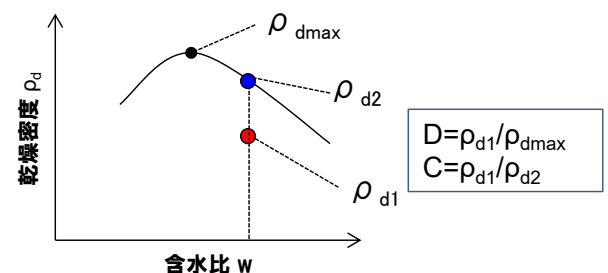


図-10 締固め度の概念図

(2) 管理基準の提案

図-11 にミストブレンダーで製造した材料の締固め施工試験結果に、予備試験であえて高透水となる条件で実施した締固め施工試験結果も加えて、横軸に含水比、縦軸に透水係数をとって、透水試験結果を整理した。なお、用いた試験結果はベントナイト混合率 30%の条件に限定している。試験結果は透水係数により次の3種類に層別した。

- ◎：十分に目標性能満足 0.5E-10[m/sec]未満
- ：目標性能満足 0.5～1.0E-10[m/sec]
- ×：目標性能未達 1.0E-10[m/sec]超過

図-12 は横軸に含水比、縦軸に乾燥密度をとり、4.5Ec締固め曲線とそのC値コンターの上に、図-11 で示した層別結果を落し込んだ図である。

この結果、締固め度 C 値 $\geq 96\%$ 、かつ含水比 $W_{kmin}(W=19.0\%) \pm 2\%$ 範囲を特徴的な領域として扱うことができると考える。この範囲には、透水係数が高く目標性能に達していないケース(×)は分布していない。さらに、十分に透水係数の目標性能を満足するケース(◎)が多く分布している。すなわち、施工後のC値と含水比がこの範囲にあれば、転圧層の透水係数は目標値を満足するものと考えることができる。

そこで、上記したC値および含水比を指標とした管理基準に、一般的な盛土の管理基準値 $D \geq 90\%$ を加え、管理基準(管理エリア)とすることを一例として提案した。図-12 に管理エリアを示している。なお、今回のケースは、前述のようにCa型ベントナイトを使用しベントナイト混合率 30%、目標含水比 $W=19.0\%$ の条件での検討ケースである。これらの条件が異なる場合の管理基準の設定については、改めて検討・確認が必要である。

以上示した手法は、ベントナイト混合土に使用する材料や混合率などが絞られた段階で、さらに施工時の含水比の影響をどう考慮するかといった施工管理段階において有効となる。

管理基準に関して工藤ら^{5),6)}は、ベントナイト混合土における有効モンモリロナイト湿潤密度を用いた透水係数の推定方法を提案している。図-13 は図-11 および図-12 に用いた試験結果を、横軸含水比・縦軸乾燥密度の座標上に、有効モンモリロナイト湿潤密度(ρ_{tm})とともにプロットしたものである。ベントナイト混合土の施工含水比として有望な最適含水比 W_{opt} より湿潤側の含水比範囲では、有効モンモリロナイト湿潤密度もC値と同様、コンターが右下がりのラインとして示される。これは透水係数が管理基準を満たすエリアのコンターと同傾向となっているという点で両者は共通しており、これらの管理指標としての妥当性が示唆される。

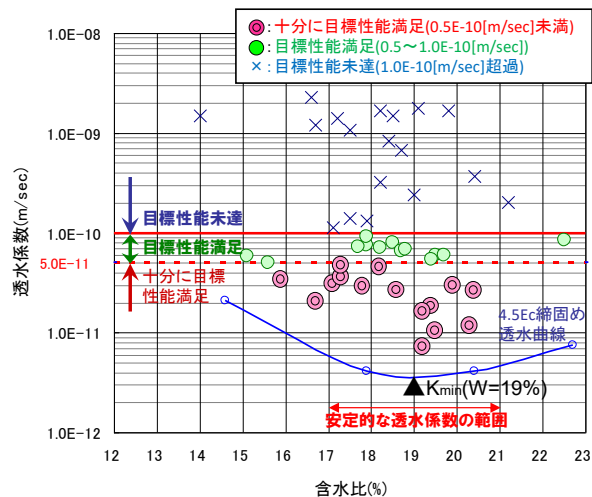


図-11 透水試験結果の目標値に対する層別

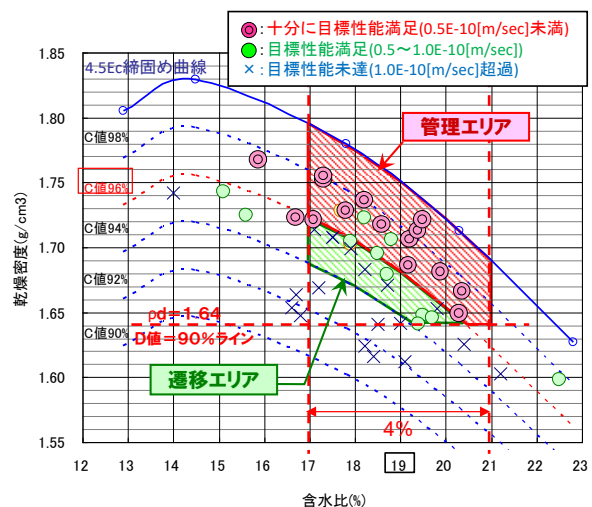


図-12 締固めにおける管理エリアの設定例

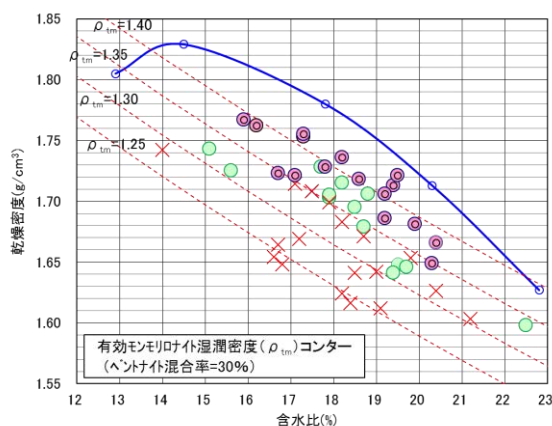


図-13 有効モンモリロナイト湿潤密度と透水試験結果

地盤工学会「低透水性土質材料の活用と性能評価技術に関する研究委員会 研究報告書」⁷⁾では、「Ca 型ベントナイトは Na 型ベントナイトと比較して膨潤性が低いことから、初期含水比の影響により透水係数が変動し、最適含水比より湿潤側では初期含水比が大きいほど透水性が低下する。指標はこれらを考慮するものがふさわしく、湿潤密度系を透水係数の代用特性とすることができる」としている。つまり、ここで提案した C 値や有効モンモリロナイト湿潤密度はそうした指標の候補となりうると考えられる。

また、Tatsuoka⁸⁾は盛土の管理指標として「飽和度」の活用を提唱している。透水係数も飽和度と関連する可能性が高いと考えられ、これについても検討を進める予定である。

5. 終わりに

ベントナイト混合土の製造方法として縦落し混合・加水装置「ミストブレンダー工法」を開発し、実際に実規模実証プラントで製造したベントナイト混合土の室内締固め(突固め)・透水試験、実規模締固め(転圧)試験を実施した。その結果を以下にまとめる。

①室内試験結果(締固め試験, 透水試験)

- ・ 通常の土と同様に、ピークを有する締固め・透水曲線を示す
- ・ 透水係数は W_{kmin} を中心に広い含水比幅で $1E-10[m/sec]$ を下回る
- ・ 練混ぜ模擬土と比べて「締固めやすい材料」とであると評価される

②実規模締固め試験結果

- ・ ベントナイト混合率 30%, 初期含水比 19.0%, 撒出し厚 15cm を標準転圧仕様とし、汎用機で転圧を実施することで、目標透水係数を満足する
- ・ 撒出しにアスファルトフィニッシャを適用することで、撒出し品質が向上し、施工効率も改善する

③締固め度 C 値, D 値と含水比に注目した管理エリアを設定することにより透水係数を満足する可能性が示され、施工管理方法として提案。その他、有効モンモリロナイト湿潤密度や飽和度管理も検討する

④実規模実証プラントの材料供給精度や製造土品質は、50 分程度の長時間連続運転においても非常に安定
本工法で製造されるベントナイト混合土は、放射性廃棄物処分場の人工バリア材や放射性物質で汚染された土壌やガレキ等の仮置き・中間貯蔵に用いられる低透水層、一般廃棄物最終処分場の高品質遮水層等にも適用できるものであり、今後も更に幅広い様々な社会のニーズに応えていく予定である。

参考文献

- 1) 久慈雅栄, 福田淳, 前田和亨, 南浩輔, 磯野宗一, 武部篤治: ベントナイト混合土製造システム「ミストブレンダー工法」の開発, 前田技術研究所報, Vol.53, 2012.
- 2) 飯島健, 久慈雅栄: 連続縦落し式混合・加水装置によるベントナイト混合土の製造と締固め施工技術, 第 60 回地盤工学会シンポジウム発表論文集, 3-1, 2016.
- 3) 久慈雅栄, 飯島健: ミストブレンダー工法の適用拡大に向けての検討, 前田技術研究所報, Vol.58, 2017.
- 4) 田坂喜章, 押部甚一, 千々松正和, 飯島健, 山田淳夫, 秋山吉弘: 連続練混ぜ機械によるベントナイト混合土の練り混ぜ試験, 第 69 回土木学会年講, CS9-20, 2014.
- 5) 工藤淳, 庭瀬一仁, 千々松正和, 木村誠, 矢込吉則: 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, 第 69 回土木学会年講, III-152, 2014.
- 6) 工藤淳, 浪岡翔吾, 千々松正和, 木村誠, 矢込吉則: 低透水材料であるベントナイト混合土の施工品質を評価する代替指標の提案, 第 50 回地盤工学会研究発表会, No.169, 2015
- 7) 地盤工学会: 低透水性土質材料の活用と性能評価技術に関する研究委員会研究報告書, p.92, 2016.
- 8) F.Tatsuoka: Compaction Characteristics and Physical Properties of Compacted Soils Controlled by the Degree of Saturation, Deformation Characteristics of Geomaterials, IOS Press, 2015.