

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

久慈 雅栄^{*1}・南 浩輔^{*1}・福田 淳^{*1}・前田 和亨^{*2}・磯野 宗一^{*1}・武部 篤治^{*3}

Development of “MIST-BLENDER method” for Bentnite-Sand Mixture

Masayoshi KUJI, Kosuke MINAMI, Jun FUKUDA, Kazuyuki MAEDA, Souichi ISONO, Atsuji TAKEBE

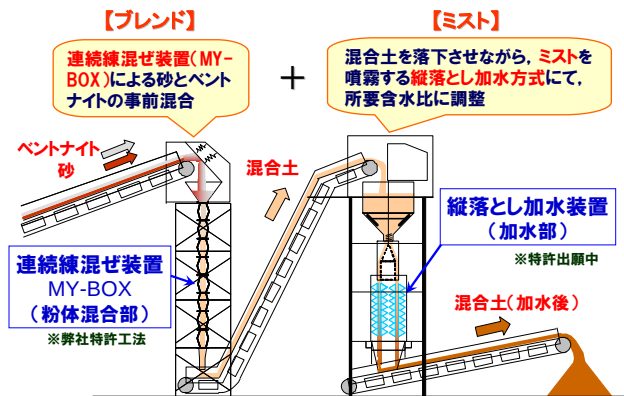


図-1 ミストブレンダー工法の概念図

設定ベントナイト添加率30%, 砂:w=9.0% のケース

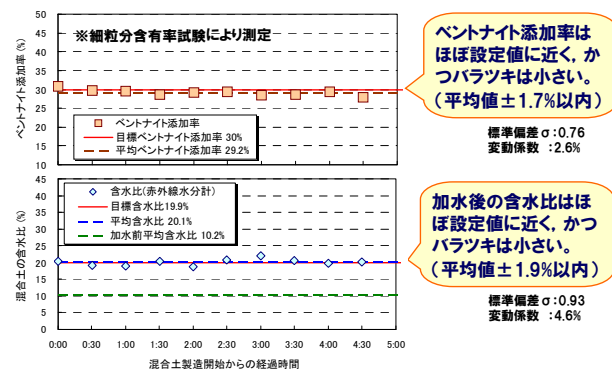


図-2 製造土の品質

研究の目的

放射性廃棄物処分場の人工バリアや放射性汚染廃棄物の仮置き・中間貯蔵施設の低透水層や、一般廃棄物最終処分場の遮水層では、低透水性材料としてベントナイト混合土の適用が考えられている。ベントナイト混合土の所要品質は、施設に求められる要求性能により、それぞれ締固めを経た後に構築される低透水層は均質かつ目標透水係数を満足することが求められるため、ベントナイト添加率や含水比のバラツキが少ない均質な混合土を製造できる技術が必要となる。本研究では、均質なベントナイト混合土の製造を目的に、重力を活用した縦落とし式混合装置を開発したので、報告するものである。

技術の説明

ベントナイト混合土の製造方法として、従来の練り混ぜ方式とは異なる粉体混合部および加水部に縦落とし式混合方式を採用することにより、ベントナイト混合土製造時にせん断力を加えず、かつ連続製造が可能な新しいタイプの製造技術「ミストブレンダー工法」を開発した。図-1 に縦落とし式混合装置の概念図を示す。本装置は、母材(砂等)とベントナイト等の粉粒体を混合する「粉体混合部」と、目標含水比まで均質に加水調整する「加水部」から構成されている。

主な結論

製造能力 20m³/hr 級の実規模プラントを製作した。製造されたベントナイト混合土の品質確認は、ベントナイト添加率ならびに含水比のバラツキに着目して実施した。試験は安定製造開始から 30 秒ごとに連続採取した 10 サンプルを用いて、ベントナイト添加率と含水比を測定し、目標値との乖離およびバラツキの程度により評価を行った。図-2 に試験結果の代表例(ベントナイト添加率:30%、母材(砂)初期含水比:9%、混合土の目標含水比:19.9%)を示す。ベントナイト添加率は概ね目標値を満足し、バラツキも平均値±2%以下、変動係数 2.6~3.9%程度を示した。同様に、含水比も概ね目標値を満足し、バラツキも平均値±2%以下、変動係数 4.1~4.6%程度を示した。以上より、ベントナイト添加率および含水比ともに、目標値との乖離およびバラツキの程度は小さく、実規模プラントによって安定した品質のベントナイト混合土を製造できることが確認できた。

*1 本店 土木事業本部 土木設計・技術部
*2 東北支店 土木営業部

*3 本店 CSR・環境部

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

久 慈 雅 栄^{*1} 南 浩 輔^{*1}
 福 田 淳^{*1} 磯 野 宗 一^{*1}
 前 田 和 亨^{*2} 武 部 篤 治^{*3}

要 旨

放射性廃棄物処分場の人工バリア材や放射性汚染廃棄物の仮置き・中間貯蔵施設の低透水層，一般廃棄物最終処分場の遮水層では，低透水性材料としてベントナイト混合土の適用が考えられている．ベントナイト混合土の所要品質は，施設に求められる要求性能により，締固めにより構築される低透水層が均質かつ目標透水係数を満足することが求められる．このため，ベントナイト添加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できる技術が必要である．本研究では，均質なベントナイト混合土の製造を目的に，重力を活用した縦落し式混合装置を開発し，実規模プラントを製作するとともに，当プラントで製造したベントナイト混合土が十分な品質を持つことを確認した．

キーワード 放射性廃棄物／ベントナイト混合土／MY-BOX／ベントナイト添加率／含水比／縦落し混合

目 次

- | | |
|--------------|------------|
| 1. はじめに | 4. 実規模プラント |
| 2. ベントナイト混合土 | 5. 混合土の品質 |
| 3. 縦落し式混合方式 | 6. まとめ |

DEVELOPEMENT OF MANUFACTURING SYSTEM “MIST-BLENDER METHOD” FOR BENTONITE-SAND MIXTURE

Masayoshi KUJI	Kosuke MINAMI
Jun FUKUDA	Soichi ISONO
Kazuyuki MAEDA	Atsuji TAKEBE

Synopsis:

It is considered that the bentonite-sand mixture is applied for artificial barrier materials for radioactivewaste or radioactive contaminated waste, and water shielding layer for general waste repository. One of the performance of bentonite-sand mixture, it needs low and homogeneous permeability after compaction, so it is required that low variation of ratio of bentonite and moisture content.

Then, the manufacturing system for bentonite-sand mixture using falling blend method, called “MIST-BLENDER METHOD” is developed, the full-scale plant is assembled, and good quality of mixture is confirmed.

* 1 本店 土木設計・技術部
 * 2 東北支店 土木営業部

* 3 本店 CSR・環境部

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、放射性汚染廃棄物の仮置き・中間貯蔵施設の低透水層、一般廃棄物最終処分場の遮水層では、低透水性材料として、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」の適用が考えられている。ベントナイト混合土には、締固めにより構築される低透水層が、均質かつ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、ベントナイト添加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できる技術が必要となる。

当社はこの課題に対して、全く新しい発想に基づ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」を開発している^{1)~5)}。図-1 にミストブレンダー工法の工法概要図を示す。ここでは、その内容について報告する。

2. ベントナイト混合土

ベントナイト混合土とは、砂等の母材と、水と接触すると粘性や膨潤性を発揮するスメクタイトという粘土鉱物を主成分とするベントナイトと呼ばれる土質材料を、所定割合で混合して最適含水比に調整したものである。このベントナイト混合土を適切に締め固めることにより、非常に小さな透水係数を持つ低透水層を形成することができる。このため、万が一でも廃棄物等から汚染物質が漏れ出た場合でも、周辺環境への拡散を抑制する効果が

期待されている。

ベントナイトは含水に伴い強い粘性が発揮される材料であるため、一般的な機械的攪拌型ミキサーでは、ベントナイト添加率が高まるほど高品質かつ均質に混合することが容易ではなく、ベントナイト混合土製造上の大きな課題となっている。

例えば、一般的な機械式攪拌型ミキサーで材料を混合する場合、ミキサー内部の攪拌翼や攪拌軸、胴部などへの材料の付着が問題となる。写真-1 は、一般的なコンクリート用の二軸強制練りミキサーを用いて、コンクリート細骨材用の購入砂と Ca 型ベントナイトをベントナイト添加率 30%で混合した状況である。購入砂とベントナイトを含水比 10%程度の自然含水比状態で混合すると、両者は均一に混合できることが確認できた(写真-1 (a))。これに目標含水比 20%になるように加水して混合すると、ベントナイトが吸水により粘性増加するとともに、強制的な攪拌(せん断力の付与)を受けた結果、ミキサー内部の攪拌翼や攪拌軸、胴部に多量の混合土の付着が認められる(写真-1 (b) (c)) とともに、数 cm 大の不均質部(ダマ)が発生し(写真-1 (d))、不均質な状態となることが確認された。このように、ミキサー内部に付着する土が増加するにつれ、十分な混合性能が発揮されず混合土の品質の低下を招くとともに、頻繁に装置内部の付着除去・清掃作業等が必要になるため、施工能率が低下するといった問題が生じる可能性がある。

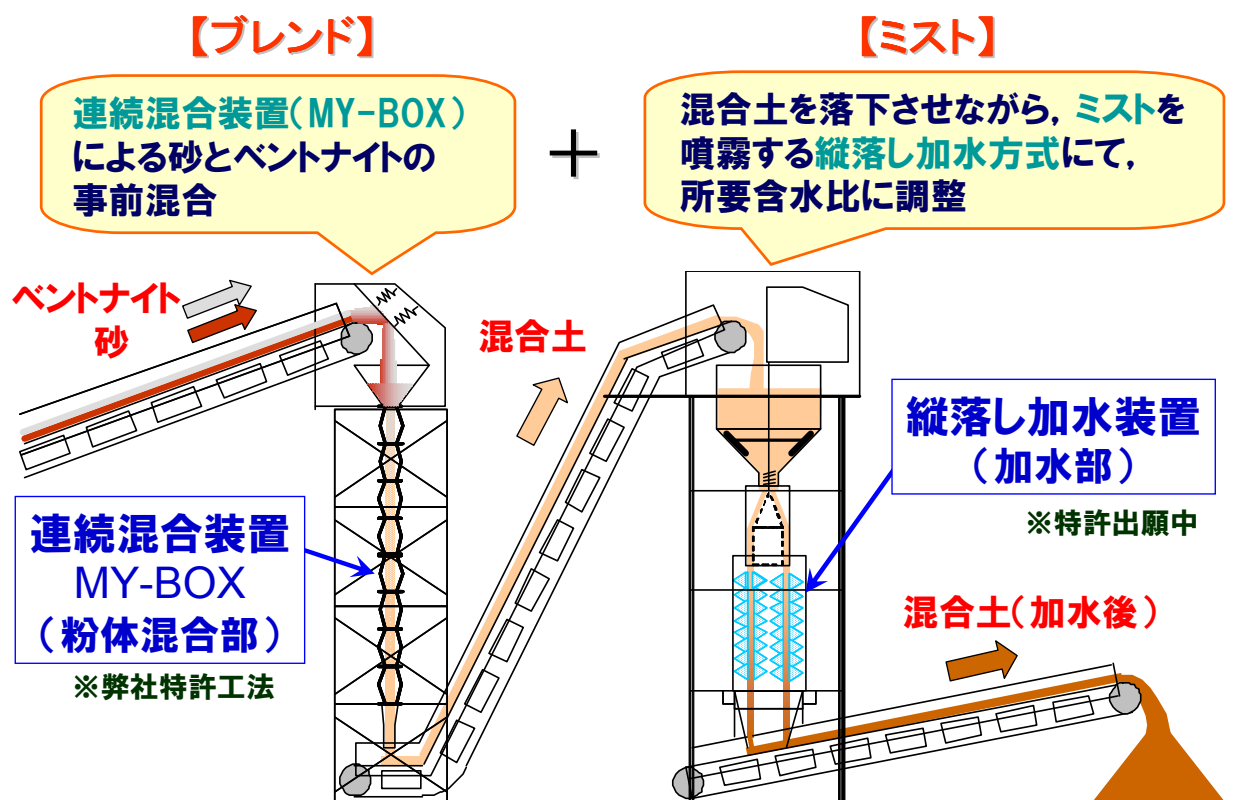


図-1 ミストブレンダー工法概要図



(a) 自然含水状態でのベントナイトと砂の混合状況



(b) 加水して練り混ぜた状況



(c) 攪拌翼、攪拌軸、胴部 (d) 発生した不均質部（ダマ）の状況



写真-1 二軸強制練りミキサでのベントナイト混合土製造時の状況

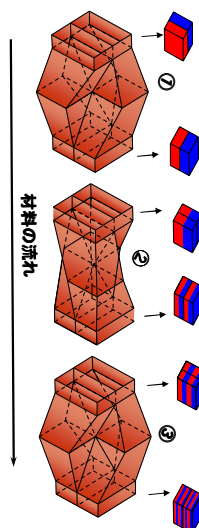


図-2 連続混合装置 MY-BOX

3. 縦落し混合方式

3.1 概要

このような問題点を解決するに当たり、ベントナイト混合土の製造過程で、材料を「練らない（せん断力を与えない）」方法を検討し、図-1 に概念図を示す縦落し式混合方式による製造システムを開発した。

本装置は、母材とベントナイト等の粉粒体を混合する「粉体混合部」と、目標含水比まで均質に加水調整する「加水部」の二段階混合方式を採用し、共に重力を活用した縦落し方式としているところに特徴がある。各部の概要を以下に述べる。

3.2 粉体混合部

母材とベントナイトはともに粉粒体であるため、自然含水状態では比較的均質に混合することが容易である。しかしながら、プラントの製造能力を確保するためには、一般的な機械式攪拌型ミキサのようなバッチ式ではなく、連続的に製造できることが望ましい。

これに対し、当社の保有技術であり、CSG 材料の製造等で実績のある連続混合装置「MY-BOX」⁶⁾が「粉体混合部」に適用できるものと判断された。

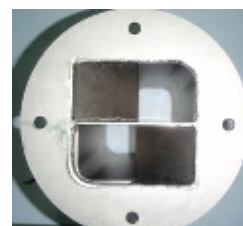
MY-BOX は、従来の機械式攪拌型ミキサとは全く異なる原理の混合装置である。ミキサのように動力を使わずに、重力による落下エネルギーを利用して、材料を分割しながら 90 度回転させる独特の形状の筒状の装置を複数個連結し、その中で混合する材料を落下させることにより、材料を練らない（攪拌しない）で混合することが可能である。図-2 に概念図を示す。



(a) 従来型壁面 (SS)



(b) 改良型壁面 (メッキ加工)



(c) 改良型断面 (隅各部の解消)

図-3 MY-BOX の改良状況

MY-BOX の大きな特徴は、次に示す 2 点である。

- ・ 投入材料に対して「重ね」と「延ばし」効果を与える（ 2^N の分割効果、N は MY-BOX 連結個数）
- ・ MY-BOX 壁面への材料の衝突と分散効果

MY-BOX はこのような原理により、材料を通過（落下）させるだけで粉体混合を連続的に行うことができる簡便な混合装置である。

MY-BOX へ投入する材料の含水比が高い場合、MY-BOX 壁面への材料の付着による混合性能の低下が懸念された。そこで、図-3 に示すように、装置全体に低摩擦性かつ高耐久性を有するメッキコーティングを施すとともに、材料が滞留しやすい MY-BOX の隅角部を曲面加工する等の改良を行い、壁面付着の低減を図っている。

3.3 加水部

ベントナイト混合土は締固め施工後に所定の透水係数を満足するために、含水比を最適含水比付近に調整する必要がある。



(a) 絶乾状態の混合土に
上面から加水



(b) 10分経過、2cm程度
しか浸透しない

写真-2 絶乾状態の混合土への加水状況

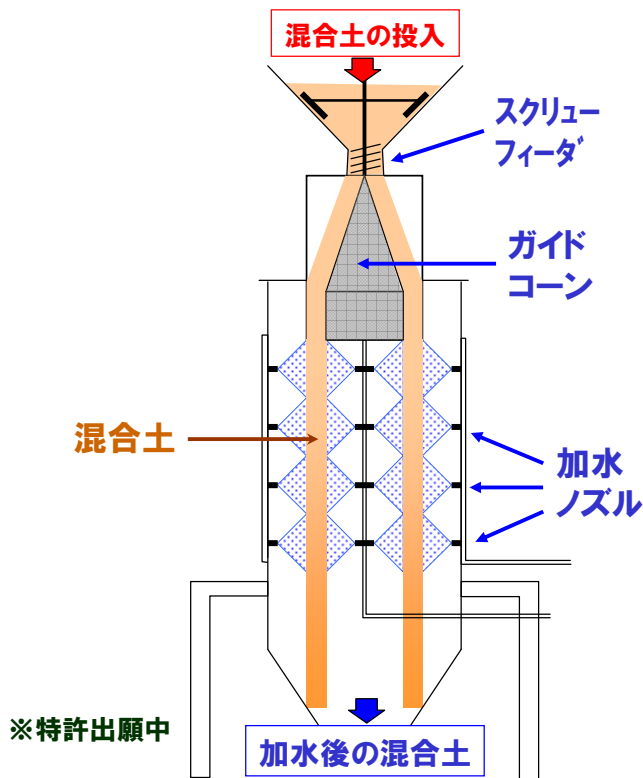


図-3 縦落とし加水装置の概念図

しかしながら、ベントナイト中に含まれる膨張性粘土鉱物の一種ス멕タイトは、吸水することで膨潤作用を示し、粘性が増加するとともに、透水係数が低下することが知られている。写真-2に絶乾状態で粉体混合したベントナイト混合土を透明容器に入れ、上から水を吸水させた状況を示す。水は表面から2cm程度までは浸透するものの、ス멕タイトの膨潤作用の影響により透水性が低下し、それより深部には浸透していかない。

このように、ベントナイトは表面からの加水が非常に困難であるうえ、吸水により粘性が著しく増加し、かつ透水性が低下するために、従来は機械的攪拌型ミキサーを使用して材料と水を強制的に混連せざるをえず、結果として混合土にせん断力を加え、ミキサーへの付着の原因や不均質部（ダマ）の発生の原因となっていた。

このような問題を解決するために、混合土を所要含水比に調整するための様々な加水方式を検討し、最終的に「加水部」として図-3に概念図を示す縦落とし式の加水装置を新たに開発した。

本加水装置では次のステップにより加水が行われる。

- ① 粉体混合部で混合された材料をホッパーに投入
- ② 材料をスクリューフフィーダにより定量供給し、ガイドコーンにより円筒状に薄く拡げて落下
- ③ 落下中の混合土を挟み込むように、多段・多点配置したノズルから噴霧（ミスト）状に加水

加水に使用するノズルの種類・段数・点数とノズルに加える水圧のコントロールにより、加水量（含水比増加分量）を自在に加減することができ、混合土を高い精度で目標含水比に調整することが可能となった。

また、本装置の機構上、加水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、不均質部（ダマ）を発生させることなく混合土に均質に加水できるとともに、攪拌翼・軸を有しないため付着等の問題が生じない、という特徴がある。

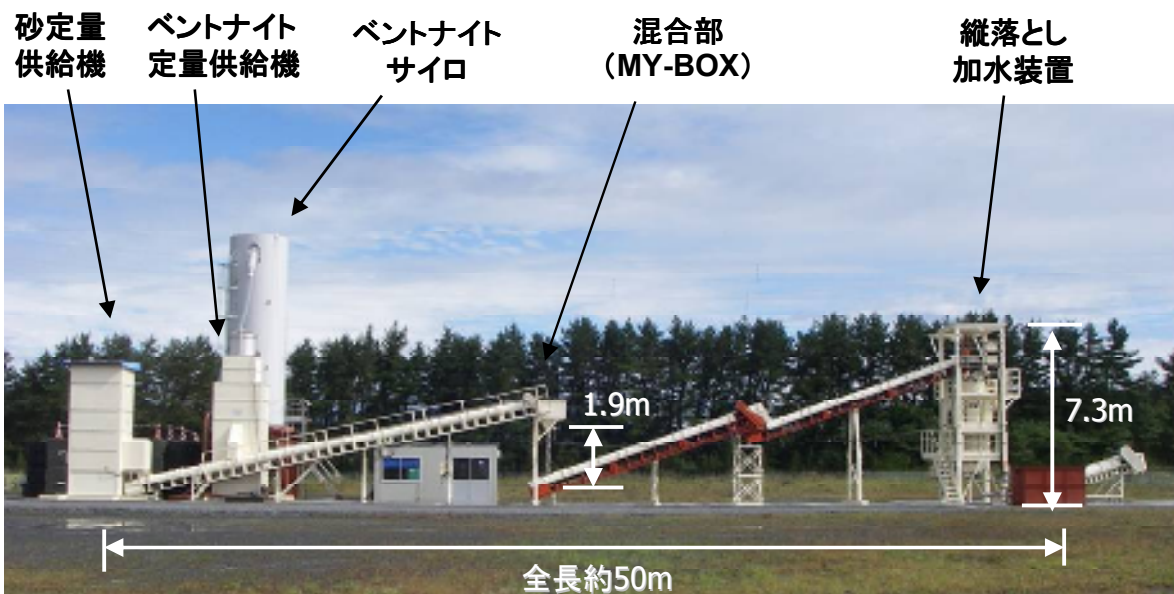


写真-3 実規模プラントの外観

4. 実規模プラント

上記のようなコンセプトの基に、室内実験等を繰り返して効果を確認した上で、プロトタイプ設備を構築・運転確認を行い、改良を加えて実規模プラントを製作した。写真-3 に製作した実規模プラントの全景を示す。

実規模プラントは上流側から下流側に次のような設備で構成される。

- ① 材料供給部（砂およびベントナイト定量供給機）
- ② 粉体混合部（連続混合装置 MY-BOX）
- ③ 縦落し加水装置

本プラントの設計製造能力は $20\text{m}^3/\text{h}$ 規模である。実規模プラントの全長は約 50m 、粉体混合部の MY-BOX は $\square 120\text{mm} \times \text{H}240\text{mm} \times 8$ 連とし、高さ約 1.9m である。また、加水部である縦落し加水装置の高さは 7.3m である。

図-4 に本工法のベース技術である砂およびベントナイトの定量供給状況を示す。供給運転開始から 3 分程度で定量供給状態となり、そのバラツキは概ね 1%程度と非常に小さくなっている。

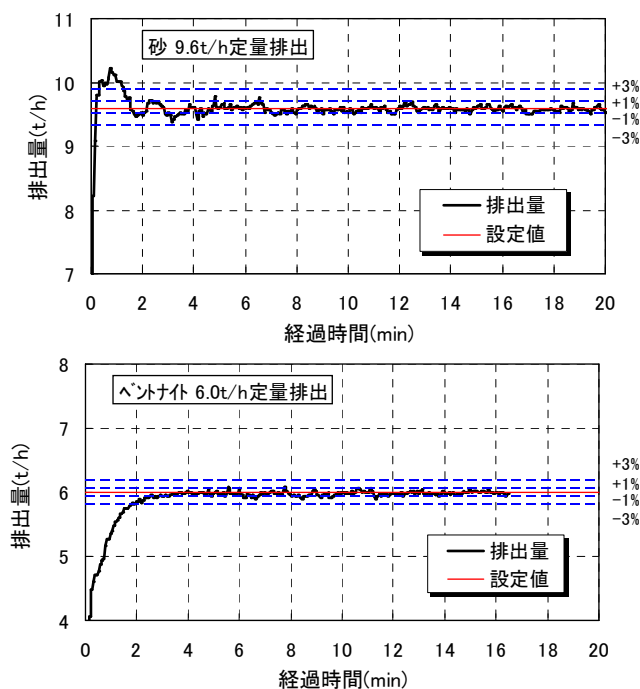


図-4 砂およびベントナイトの供給状況

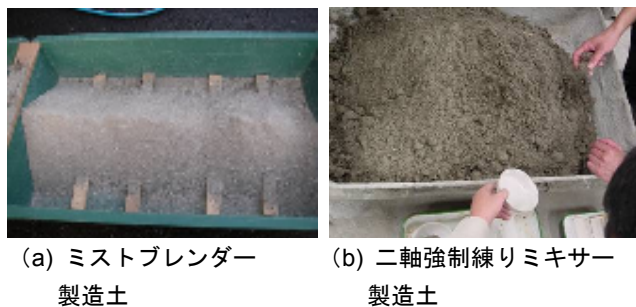


写真-4 ミストブレンダーと二軸強制練りミキサーの製造土の違い

実規模プラントを用いて製造したベントナイト混合土は、所要の仕様を満足するとともに、品質についても問題のないことを確認した。写真-4 に本プラントで製造したベントナイト混合土と、全く同じ配合により二軸強制練りミキサーで製造した混合土の外観を比較した。見た目にも、両者の違いがはっきりとわかる。

5. 混合土の品質

5.1 品質の検証試験方法

実規模プラントで製造したベントナイト混合土の品質は、母材含水比とベントナイト添加率をパラメータとして、品質のバラツキを検証試験により確認した。

(1) 使用材料

検証試験の材料には、母材（砂）としてコンクリート用の JIS 細骨材（以下、購入砂と記す）を用いた。購入砂の粒度分布²⁾は、細粒分 0.4%、砂分 87.8%、礫分 11.8%と、細粒分が非常に乏しいのが特徴である。

また、ベントナイトとしては日本産の Ca 型ベントナイトを使用した。

(2) 検証試験ケース

表-1 に試験ケース一覧を示す。購入砂の含水比の設定に際しては、複数の現場で実測された購入砂の表面水率の変動範囲が含水比として概ね 3～9%であったことから、 $w=3, 6, 9\%$ の 3 水準とした。また、ベントナイト添加率は従来よりもやや高配合側の 25, 30, 40%の 3 水準とした。

検証試験は、母材含水比 9%・ベントナイト添加率 30%を中心とした 5 ケースで実施した。製造するベントナイト混合土の目標含水比は、一般的に最適含水比 W_{opt} よりやや湿潤側で透水係数が最低となることが多いので、ベントナイト混合土の締固め試験結果（C 法締固め、混合土はソイルミキサーで作製）で得た W_{opt} より湿潤側「 $W_{opt}+4\%$ 」に設定した。

5.2 検証試験結果

実規模プラントで製造されたベントナイト混合土の品質確認のための検証試験として、ベントナイト添加率ならびに含水比の変動（バラツキ）に着目した。

表-1 ベントナイト混合土の検証試験ケース

母材(砂) 含水比	ベントナイト添加率		
	25%	30%	40%
3%		○	
6%		○	
9%	○	○	○
最適含水比 W_{opt}	13.0%	15.9%	17.8%
目標含水比 $W_{opt}+4\%$	17.0%	19.9%	21.8%

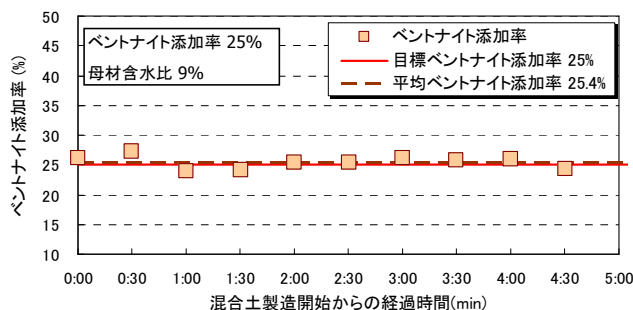
各ケースのベントナイト混合土について、実規模プラントの安定運転開始後から試料を 30 秒ごとに 10 サンプル採取し、それぞれベントナイト添加率と含水比を測定し、その平均値と設定値との乖離、バラツキにより試験結果の評価を行った。

各ケースのベントナイト混合土について、実規模プラントの安定運転開始後から試料を 30 秒ごとに 10 サンプル採取し、それぞれベントナイト添加率と含水比を測定し、その平均値と設定値との乖離、バラツキにより試験結果の評価を行った。

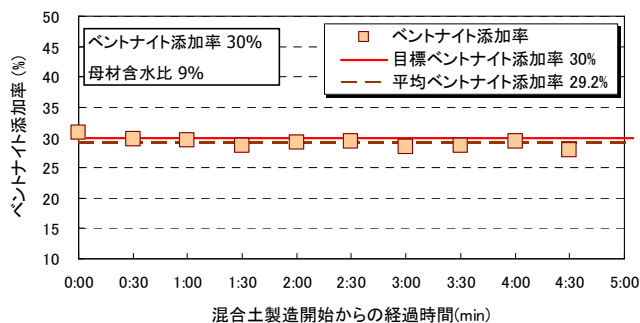
なお、ここではベントナイト添加率の影響に注目し、母材（砂）含水比 9%における各ベントナイト添加率の試験結果を示す。

(1) ベントナイト添加率

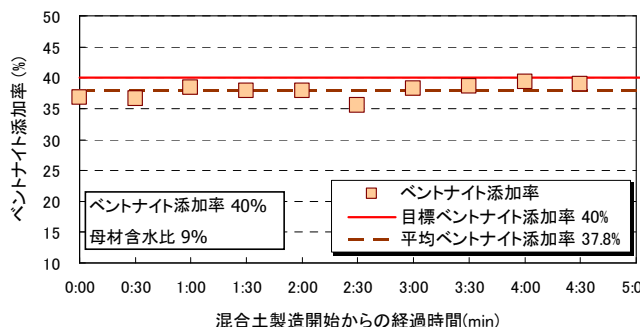
ベントナイト添加率の確認は、使用する母材の細粒分（粒径 $75\mu\text{m}$ 以下）が 0.4%と非常に少ないことから、ベ



(a) ベントナイト添加率 25%



(b) ベントナイト添加率 30%



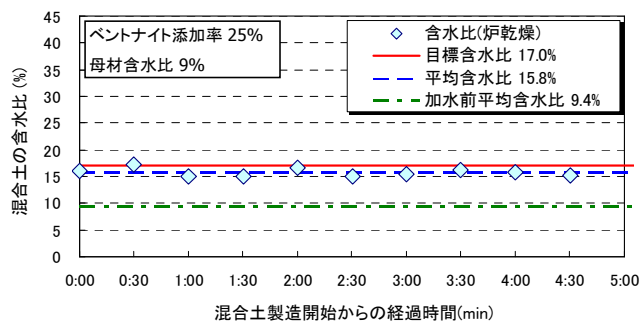
(c) ベントナイト添加率 40%

図-5 ベントナイト添加率の変動

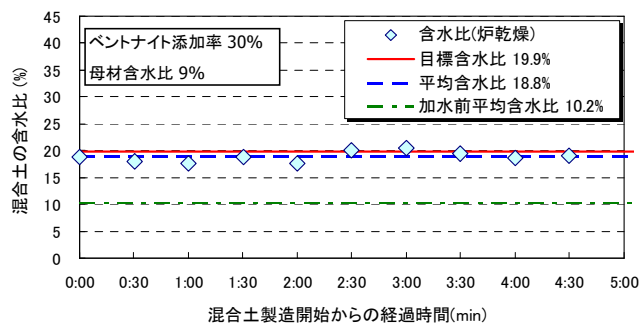
ントナイト混合土を $75\mu\text{m}$ ふるいで水洗いする簡易な方法（細粒分含有率試験）で実施した。なお、簡易法によるベントナイト添加率の試験は、メチレンブルー試験による検証を逐次補足しながら実施した。

表-2 ベントナイト混合土の検証試験結果

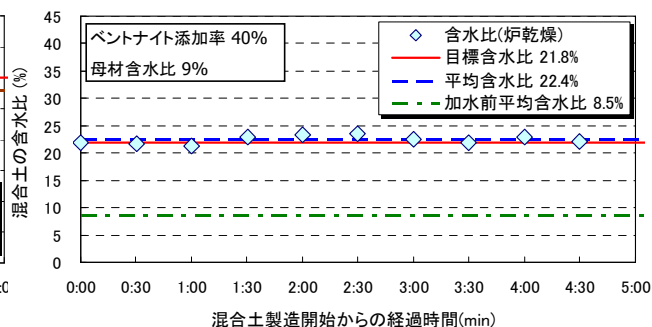
試験ケース		BT添加率25% 母材含水比9%	BT添加率30% 母材含水比9%	BT添加率40% 母材含水比9%
ベントナイト 添加率	目標添加率	25.0 %	30.0 %	40.0 %
	平均添加率	25.4 %	29.2 %	37.8 %
	バラツキ (平均値からの離れ)	± 1.9 %	± 1.7 %	± 2.2 %
	標準偏差	0.99	0.76	1.11
	変動係数	3.9 %	2.6 %	2.9 %
含水比	目標含水比	17.0 %	19.9 %	21.8 %
	平均含水比	16.9 %	20.1 %	23.1 %
	バラツキ (平均値からの離れ)	± 1.2 %	± 1.9 %	± 1.6 %
	標準偏差	0.69	0.93	0.96
	変動係数	4.1 %	4.6 %	4.2 %



(a) ベントナイト添加率 25%



(b) ベントナイト添加率 30%



(c) ベントナイト添加率 40%

図-6 含水比の変動

図-5 および表-2 に測定結果を示す。ベントナイト添加率の変動は、混合材料の定量混合精度にも依存するが、砂とベントナイトの供給精度は図-4 に示す供給機のモニタリング結果により大きな影響を与えないことを確認している。測定結果より、ベントナイト添加率は、添加率40%の場合は若干低めではあるものの、概ね目標添加率を満足し、バラツキも平均値±2%程度、変動係数 2.6～3.9%程度を示し、非常に小さいと判断される。

(2) 含水比

含水比の試験は、ベントナイト混合土の製造直後に測赤外線水分計を用いて測定を行った。

図-6 および表-2 に測定結果を示す。含水比の変動は、混合材料の定量供給精度と加水量の定量給水精度にも依存するが、プラントの材料供給精度および加水量のキャリブレーションを実施することにより大きな影響を与えないことを確認している。測定結果より、製造されたベントナイト混合土の含水比は目標含水比と概ね一致し、バラツキも平均値±2%程度、変動係数 4.1～4.6%程度と、非常に小さいものと判断される。

(3) 検証試験結果総括

表-2 に検証試験結果総括を示す。全てのケースにおいて安定した結果が得られており、実規模プラントにより製造したベントナイト混合土は均質に混合・加水されていることがわかる。また、ベントナイト混合土の製造時の目視確認においても、不均質部（ダマ）の発生もなく良好な仕上がりとなった。

6. まとめ

ベントナイト混合土の製造方法について、これまでの機械式攪拌型ミキサーで課題なっているミキサーへの付着と不均質部の発生を解決するために、全く新しい発想に基づく「ミストブレンダー工法」を開発し、プロトタイプ機でその効果を確認した後、実規模プラントを製作するとともに、製造したベントナイト混合土の品質の確認を実施した。

その結果、実規模プラントは順調に稼動し、製造したベントナイト混合土は設定した品質（ベントナイト添加率、含水比）を満足するとともに、バラツキも小さく非常に均質な品質を保っていることを確認した。

今後は、実施工に向けてプラントを調整していくとともに、本工法で製造したベントナイト混合土に適した締固め工法の確立を目指して、研究開発を進める予定である。

参考文献

- 1) 前田和亨，武部篤治，南浩輔，藤山哲雄：ベントナイト混合土の製造に対する縦落し式混合装置の開発－（その1）縦落とし式混合装置の概要－，土木学会第66回年次学術講演会（平成23年度），CS3-031，2011
- 2) 武部篤治，前田和亨，南浩輔，藤山哲雄：ベントナイト混合土の製造に対する縦落し式混合装置の開発－（その2）プロトタイプ試験装置による検証結果－，土木学会第66回年次学術講演会（平成23年度），CS3-032，2011
- 3) 久慈雅栄，福田淳，南浩輔，前田和亨，磯野宗一：ベントナイト混合土の製造に対する縦落し式混合装置の開発（その3）－ミストブレンダー工法の実規模プラント概要－，土木学会第67回年次学術講演会（平成24年度），CS13-012，2012
- 4) 福田淳，久慈雅栄，南浩輔，前田和亨，磯野宗一：ベントナイト混合土の製造に対する縦落し式混合装置の開発（その4）－ミストブレンダー工法によるベントナイト混合土の品質－，土木学会第67回年次学術講演会（平成24年度），CS13-013，2012
- 5) 久慈雅栄，福田淳，南浩輔，前田和亨，磯野宗一：縦落し混合方式によるベントナイト混合土の製造技術の開発－ミストブレンダー工法の概要－，日本原子力学会2012年秋の大会，B34，2012
- 6) 大藪勝美，江頭正基，永田裕規：二系列 MY-BOX による CSG 製造，第56回土木学会年講第VI部門，pp.204-205，2001.