

ミストブレンダー工法の適用性拡大にむけての検討

久慈 雅栄^{*1}・飯島 健^{*2}

Consideration for Application Properties Expansion of “Mist-Blender Method”

Masayoshi KUJI, Takeshi IJIMA

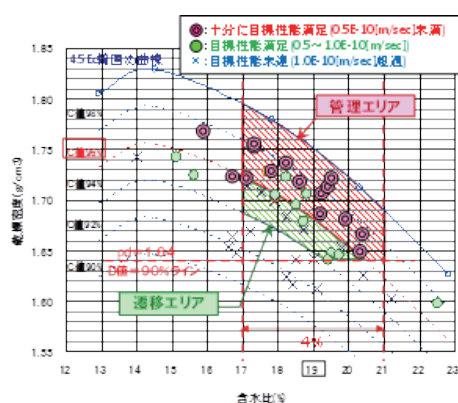


図-1 締固めにおける管理エリアの設定例

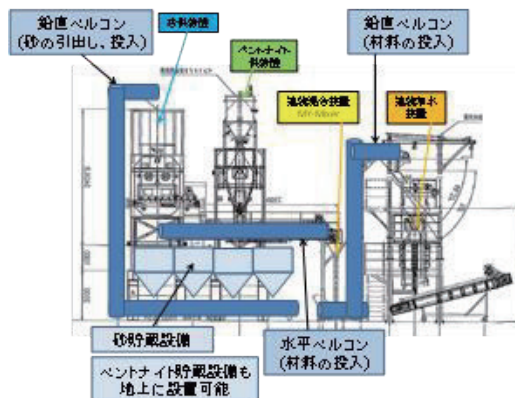


図-2 プラントコンパクト化概念図

研究の目的

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などでは、低透水性土質材料として「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は、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ため、ベントナイト混合土を製造できる技術が必要となる。

この課題に対して、連続縦落し式混合・加水装置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、均質な混合土を連続的かつ大量に製造することを可能とし、さらに適用性拡大をはかった。

技術の説明

本工法は、砂等の母材とベントナイトを混合する「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、いずれも重力を活用した縦落し方式となっており、ダムなどの不均質部を発生させることがなく、さらに攪拌翼・軸を有しないため材料の付着等の問題が生じない。今回は、本工法の適用性の拡大を狙い、Na型粒状ベントナイトへの適用性確認試験、施工時の管理指標・基準、および実規模プラントのコンパクト化について検討を実施した。

主な結論

- Na型粒状ベントナイト単体の材料供給試験、加水調整試験を実施した。その結果、ミストブレンダー工法における良好な適用性を確認できた。
- 締固め度 C 値と含水比に着目した管理エリアを設定することにより透水係数を推定可能であり、施工管理方法として利用できる可能性がある。また、本管理方法は有効モンモリロナイト密度による管理方法にも通じるものと言え、地盤工学会委員会報告がまとめた代替指標の候補になると考えられる。
- 実施工を想定したプラントのコンパクト化を検討し、コンセプト概念図をまとめるとともに、既存のプラントユニットを転用して実現した。その結果、プラント長さは元プラントの 1/3 弱の 15m 程度に縮小することができた。

*1 本店 技術研究所

*2 本店 土木事業本部

ミストブレンダー工法の適用性拡大にむけての検討

久 慈 雅 栄*¹ 飯 島 健*²

要 旨

放射性廃棄物処分場や、放射性汚染物質の仮置き・中間貯蔵，一般廃棄物最終処分場などは，低透水性土質材料であるベントナイト混合土の使用が想定されている．連続縦落し式混合・加水装置「ミストブレンダー工法」はベントナイト混合土の新しい製造方法であり，これまで製造土の品質や締固め試験結果等について報告してきた．

ここでは，さらにNa型粒状ベントナイトへの適用材料の拡大，施工時の管理指標・基準，および実規模プラントのコンパクト化についての検討を実施したので，それらについて報告する．

キーワード 放射性廃棄物／低透水性／ベントナイト混合土／縦落し式混合

目 次

- | | |
|------------------------|---------------------|
| 1. はじめに | 4. 施工時の管理指標・基準の提案 |
| 2. ミストブレンダー工法の概要 | 5. 実規模プラントのコンパクト化検討 |
| 3. Na型粒状ベントナイトの適用性確認試験 | 6. まとめ |

CONSIDERATION FOR APPLICATION PROPERTIES EXPANSION OF “MIST-BLENDER METHOD”

Masayoshi KUJI

Takeshi IJIMA

Synopsis:

Bentonite-sand mixture is considered to apply as the material for the artificial barrier or water shield layer in the radioactive waste disposal, general waste disposal, and radioactive soil & debris repository. The authors have developed the manufacturing system for bentonite-sand mixture with unconventional conception, called “Mist-Blender Method” in the previous report. Using this technology, the full-scale plant is assembled, and it is confirmed that the products from this plant has excellent quality.

Moreover, expansion of the application material to sodium type granular bentonite, the management criterion index at compaction works stage, and reduction concept of manufacturing plant were considered, and reported on this paper.

* 1 本店 技術研究所

* 2 本店 (土木事業本部)

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路、一般廃棄物最終処分場での遮水路等では、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」の適用が考えられている。ベントナイト混合土の締固めにより構築される低透水路には、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。

この課題に対して、筆者らは均質な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・加水装置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の品質等の確認を実施してきた^{1)~11)}。

ここでは、この本工法の原理と概要を紹介するとともに、Na 型粒状ベントナイトへの適用性確認試験、施工時の管理指標・基準、および実規模プラントのコンパクト化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・加水装置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、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」を使用しており、従来の機械攪拌型ミキサーが動力により羽根等を回転して材料を強制的に攪拌・混合する方式であるのに対して、MY-Mixer は材料を仕切壁で分割しながら 90 度回転させる独特の形状の筒状装置を複数個連結し、重力による落下エネルギーを利用

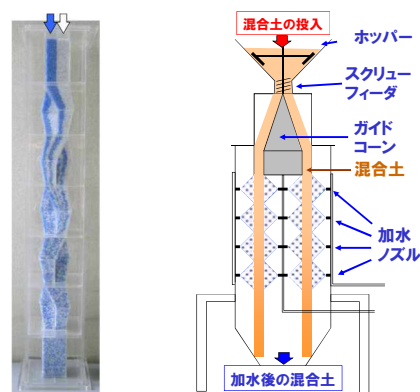
して筒状装置の中を自由落下させるだけで、混合できることが特徴となっている。図-2(a)に MY-Mixer のアクリル製の模型に 2 色の粒状体を落下させた時の混合状況を模式的に再現した状況を示す。当該装置を n 個連続させた場合、理論的には 2 の n 乗の分割・混合効果が得られる。

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 粉体混合部で混合された材料をホッパーに投入
- ② ホッパーに溜まっ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広げて落下
- ③ 円筒状に落下中の材料を挟み込むように、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（含水比増加分水量）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。

上記のような加水装置の機構の利点として、混合土に均質に加水できるとともに、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ることがなく、さらに攪拌翼・軸を有しないため材料の付着等の問題が生じない、などが挙げられる。



(a)MY-Mixer

(b)加水装置

図-2 粉体混合部および加水装置の概念図

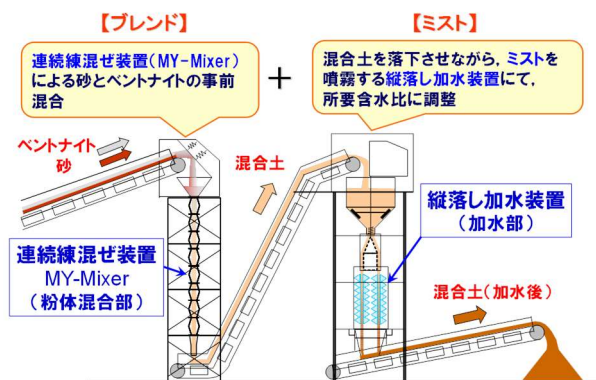


図-1 縦落し式混合・加水装置の概要



ミストブレンダー

強制二軸練りミキサ

写真-1 製造したベントナイト混合土の外観

写真-1 に当該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ーで製造した同一配合(ベントナイト添加率 30%, 含水比 19.5%)のベントナイト混合土を示すが、目視でも両者の違いが明らかであり、当該工法は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。

3. Na 型粒状ベントナイトの適用性確認試験

3.1 概要

これまでミストブレンダー工法では、砂等の母材とベントナイトのうちカルシウム型(以下、Ca 型と記す)を粉体状で混合する実験を進めてきた。

一方、放射性廃棄物の処分場の一部では、ナトリウム型(以下、Na 型と記す)ベントナイトの粒状体を単体で使用する場合がある。

そこで、ミストブレンダー工法に Na 型粒状ベントナイトが適用できないか確認した。

3.2 使用材料

実験に使用した材料は、代表的な Na 型ベントナイトであるクニゲル V1 (クミネ工業製)の原鉱を破碎し粒度調整した粒状ベントナイトであり、最大粒径 10mm(クニゲル GX, 以下 GX 材)と最大粒径 5mm(クニゲル GV, 以下 GV 材)の 2 種類を使用した。それぞれの粒度分布を図-3 に示す。なお、原材料の試験前含水比平均値は、GX 材および GV 材 それぞれ 10.1%と 7.3%であった。

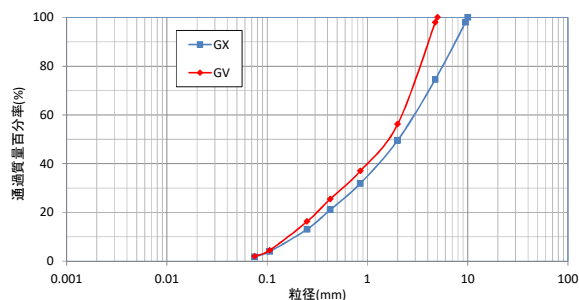


図-3 使用材料の粒度加積曲線

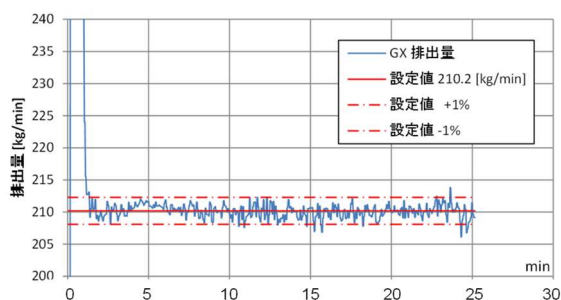


図-4 使用材料(GX 材)の供給精度

3.3 材料供給精度

図-4 にクニゲル GX 材の場合の供給量の経時変化グラフと供給精度を示す。GV 材も同様の供給精度である。プラントの材料供給は供給開始後約 90 秒でほぼ安定し、供給精度は±1%以内を維持しており、母材(砂)の供給精度とほぼ同等^{たとえ3)}の高い精度が確保されている。

粒状ベントナイトの供給精度が従来の母材と同様に高い水準を得たことより、本プラントは、同材料の供給に対して適用性があると判断される。

3.4 加水調整試験結果

加水調整試験における目標含水比は、粒状ベントナイトの締固め試験等での採用が多い $W=21\%\pm 2\%$ とした。また、それぞれの材料は原材料約 5 ton を連続して加水調整試験を行い、製造材料は直接大型土のう袋に排出・投入し、1 袋約 250kg ずつ 20 袋に分けて採取・保管した。連続製造に要する製造時間は約 25 分であった。

加水された材料を大型土のう袋ごとに 1 試料ずつ合計 20 試料を採取した。含水比の測定結果をヒストグラムとして図-5 に、また含水比の経時変化を、サンプル番号を時間単位の代用特性とする経時変化グラフとして図-6 にまとめた。この結果、GX 材の含水比平均値は 20.6%、GV 材の含水比平均値は 21.1%とほぼ設定値に調整することができた。さらに、含水比のパラツキは±2%の範囲に収まることが確認された。製造中の経時変化グラフからは、連続的に含水比が上昇・下降するような傾向は認められず、安定的に加水調整ができているものと判断される。

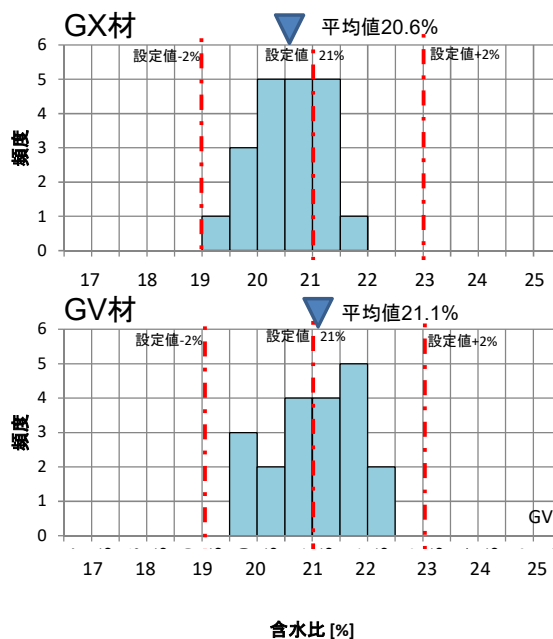


図-5 加水材料の含水比分布

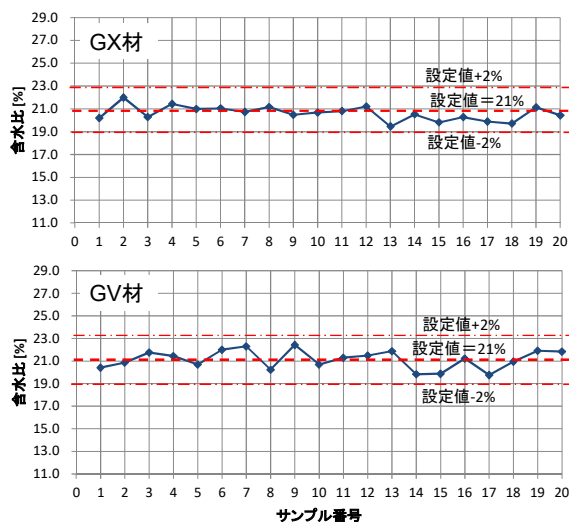


図-6 加水材料含水比の継続変化

3.5 試験結果

粒状ベントナイトの加水調整試験の結果、5 ton (25 分程度)の連続運転において、所定の品質を確保できることが確認された。

なお、本報告は、経済産業省からの委託による「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認試験）」の成果の一部である。

4. 施工時の管理指標・基準の提案

4.1 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、結果を得るまでに 1 ヶ月程度の時間を要し、大きなタイムラグと施工済み範囲の修復などの施工上のリスクが極めて大となる。

そこで、既報^{た）}でも示した締固め度と施工含水比に着目した管理基準の考え方を、さらに検討した。

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-7 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

$$C = \rho_{d1} / \rho_{d2}$$

4.2 管理基準の提案

図-8 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加え、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、

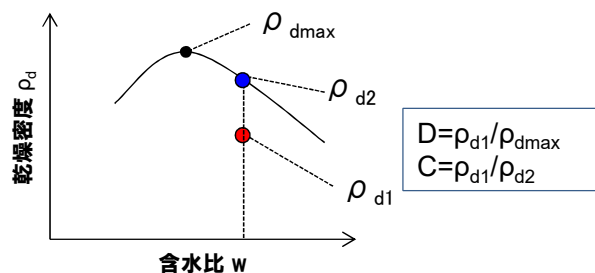


図-7 締固め度の概念図

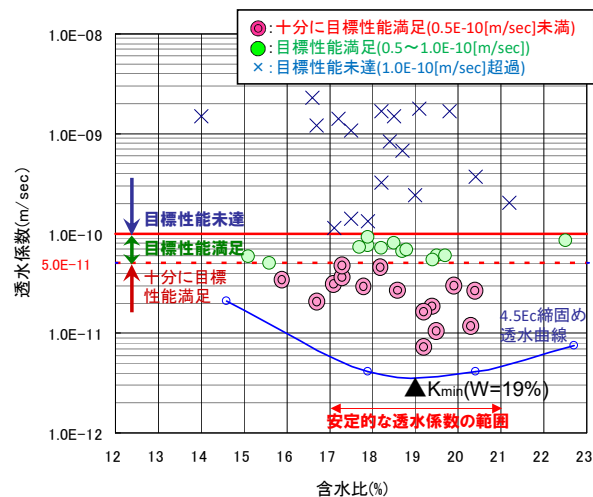


図-8 透水試験結果の目標値に対する層別

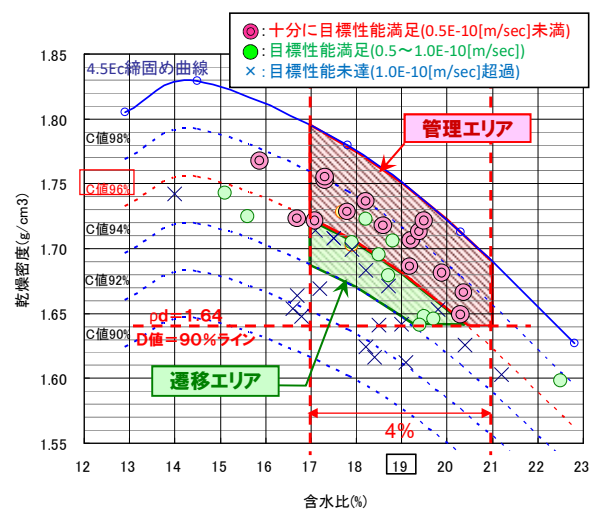


図-9 締固めにおける管理エリアの設定例

用いた試験結果はベントナイト添加率 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 $5.0\text{E}-11(\text{m}/\text{sec})$ 未満
- ：目標性能満足 $5.0\text{E}-11 \sim 1.0\text{E}-10(\text{m}/\text{sec})$
- ×：目標性能未達 $1.0\text{E}-10(\text{m}/\text{sec})$ 超過

図-9 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-8 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 $W_{kmin}(W=19\%) \pm 2\%$ 範囲を特徴的な領域として扱うことができる。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($\times$)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($\odot$)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-9 に管理エリアを示している。なお、今回のケースは、前述のようにベントナイト添加率 30% かつ Ca 型ベントナイトを使用する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、別途検討・確認が必要である。

以上示した手法は、基準となる締固め曲線をベントナイト添加率 30% の場合に限定して示している通り、ベントナイト混合土に使用する材料や添加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。

既往の研究として工藤ら^{12),13)}は、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-10 は図-8 および図-9 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おいて、有効モンモリロナイト密度(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。

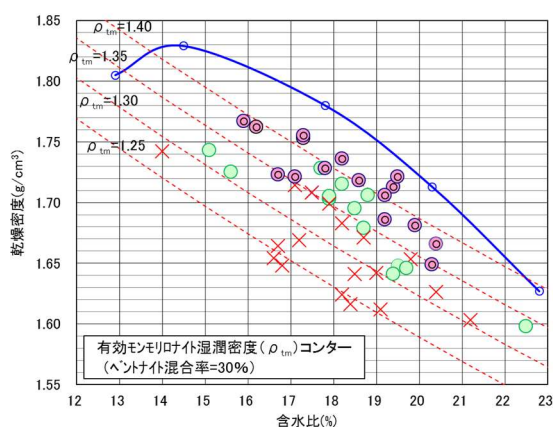


図-10 有効モンモリロナイト湿潤密度のコンターと透水試験結果

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」¹⁴⁾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。

5. プラントコンパクト化の検討

5.1 製造試験用実規模プラント

これまで製造試験を実施してきた実規模プラントを写真-2 に示す。本プラントの混合土製造能力は締固め土体積に換算して $10\text{m}^3/\text{hr}$ (約 18 ton/hr) 規模である。プラント全長は約 50m 、粉体混合部の MY-Mixer は $\square 120\text{mm} \times \text{H}240\text{mm} \times 8$ ユニットであり高さ約 1.9m 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 $\phi 700\text{mm} \times \text{H}1000\text{mm}$ 、架台高さ約 7.3m である。このため、この高さに材料を供給するために長い斜めベルトコンベアが必要となっている。



写真-2 実規模プラント

5.2 プラントのコンパクト化に関する検討

実施工を想定した場合、プラント自体は専有面積等なるべく狭い方が、レイアウト等の自由度が高くなる。

そこで、プラント設備の合理化とコンパクト化について検討を行うに当たっては、以下のような条件を考慮した。

- ① 母材となる砂は安定供給のために骨材ビン等の貯蔵設備と引出しベルコン等が必要
- ② ベントナイトも貯蔵設備が必要だが、ベントナイトは粉体のため空気圧送が可能であるため、従来の縦型円筒サイロの他、横型箱状サイロ等の適用も可能であるなど自由度が高い
- ③ 砂貯蔵設備をプラントの下方に配置することによりプラントの土台(ベース)として活用することが可能
- ④ 母材とベントナイトを均質に混合するため、MY-Mixer には材料を連続的に投入する必要がある

5.3 コンパクト化のコンセプト

上記の検討条件に基づいて、コンパクト化のコンセプトをまとめた。図-11 に概念図を示す。ポイントは以下のようにまとめられる。

- ① 母材(砂)の貯蔵設備を設け、鉛直ベルコンで引き出して砂供給装置に投入する
- ② 母材(砂)の貯蔵設備を下方に配して砂およびベントナイト供給装置のベースとすることにより、貯蔵設備の上方を有効活用する
- ③ 貯蔵設備を用いたベースの高さを MY-Mixer より高くすることにより、MY-Mixer への材料投入用ベルトコンベアを水平にして、その長さを大幅に短縮する
- ④ 粉体混合部から加水部への材料の供給については、すでに MY-Mixer を用いて粉体として均質に混合された材料であり、かつ加水部では材料は一度ホッパーに貯蔵されそこから定量供給が行われるため、ホッパーへの供給についての厳密な定量性は必要ないため、バケット式等の鉛直ベルコンの適用が可能である

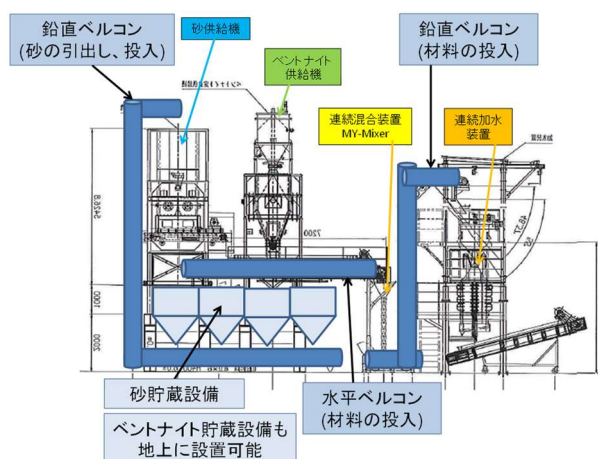


図-11 プラントコンパクト化概念図

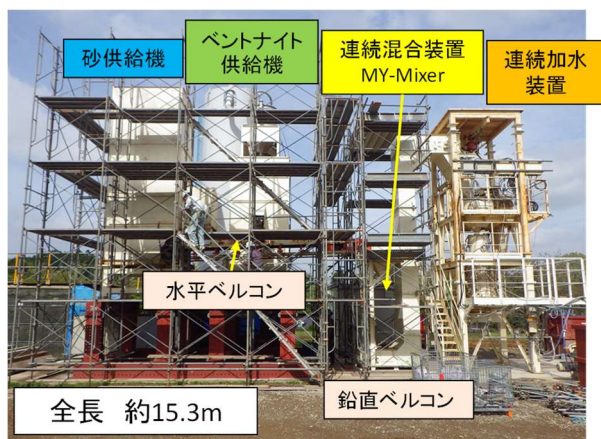


写真-3 実規模コンパクト化プラント

5.4 実規模コンパクト化プラント

このコンセプトを、現状の実規模プラントに使用しているユニットを極力流用しながら実現したのが、写真-3 である。ここでは、砂貯蔵設備と母材(砂)引出しベルコンは省略し、砂貯蔵設備が担うベースの高さは仮設鋼材で代用しているものの、それ以外はほぼコンセプトに沿った設備となっている。

この結果、プラント全長は全長 15m 程度となり、元プラントの長さ(50m)から 1/3 弱への縮小を実現している。

この程度の大きさになれば、例えば設備全体をテント等の中に収めて全天候型とするといった利用の仕方が可能となると考える。

6. おわりに

これまで、ベントナイト混合土の製造方法として連続縦落し式混合・加水装置を開発し、実規模プラントで製造したベントナイト混合土の室内締固め・透水試験、実規模締固め施工試験を実施し、当該工法の有効性を確認してきた。

今回は、さらに、Na 型粒状ベントナイトの適用性確認試験、施工時の管理指標・基準の検討、プラントコンパクト化の検討を実施した。主な成果は以下の通りである。

- ・ Na 型粒状ベントナイト単体の材料供給試験、加水調整試験を実施した。その結果、ミストブレンダー工法における良好な適用性を確認できた。
- ・ 締固め度 C 値と含水比に着目した管理エリアを設定することにより透水係数を推定可能であり、施工管理方法として利用できる可能性がある。また、本管理方法には有効モニタリング密度による管理方法にも通じるものと言え、地盤工学会委員会報告がまとめた代替指標の候補になると考えられる。
- ・ 実施工を想定したプラントのコンパクト化を検討し、コンセプト概念図をまとめるとともに、既存のプラントユニットを転用して実現した。その結果、プラント長さは元プラントの 1/3 弱の 15m 程度に縮小することができた。

当該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、放射性物質で汚染された廃棄物の仮置き・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遮水層等、様々な遮水目的の用途に適用できるものであり、今後も更なる品質向上とコストダウン等を目指した研究開発を継続し、幅広い社会ニーズに応えていきたいと考えている。

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とし式混合装置の開発(その 1)ー縦落とし式混合装置の概要ー, 第 66 回土木学会年講, 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とし式混合装置の開発(その 2)ープロトタイプ試験装置による検証試験結果ー, 第 66 回土木学会年講, CS3-032, 2011.
- 3) 久慈雅栄, 南浩輔, 福田淳, 磯野宗一, 前田和亨, 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
- 4) 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とし式混合装置の開発(その 3)ーミストブレンダー工法の実規模プラント概要ー, 第 67 回土木学会年講, CS13-012, 2012.
- 5) 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とし式混合装置の開発(その 4)ー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ー, 第 67 回土木学会年講, CS13-013, 2012.
- 6) 久慈雅栄, 磯野宗一, 中本雅也, 飯島健, 清水英樹: 縦落と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ーミストブレンダー工法の概要ー, 日本原子力学会「2012 年秋の大会」, B34, 2012.
- 7) 久慈雅栄, 磯野宗一, 中本雅也, 飯島健, 清水英樹: 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(その 2), 前田技術研究所報, VOL.54, 2013
- 8) 久慈雅栄, 磯野宗一, 中本雅也, 飯島健, 清水英樹: ベントナイト混合土の室内試験による締固め・透水特性ー縦落とし混合・加水装置「ミストブレンダー工法」で製造した混合土の事例ー, 第 68 回土木学会年講, CS11-008, 2013.
- 9) 久慈雅栄, 飯島健: ベントナイト混合土の転圧試験における締固め・透水特性と施工管理手法の提案ー縦落とし混合・加水装置「ミストブレンダー工法」で製造した混合土の事例ー, 日本原子力学会「2013 年秋の大会」, O55, 2013.
- 10) 久慈雅栄, 飯島健: 放射性廃棄物人工バリア材(高品質ベントナイト混合土)連続大量製造システム「ミストブレンダー工法」の開発, 電力土木, No.367, pp.104-106, 2013.
- 11) 飯島健, 久慈雅栄: 連続縦落とし式混合・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 回地盤工学シンポジウム発表論文集, 3-1, 2016.
- 12) 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.
- 13) 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 回地盤工学研究発表会, No.169, 2015
- 14) 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.