

除去土壌の連続土質判別システムの開発

山田 祐樹 八塩 晶子 松浦 亮
(本社原子力本部) (東京機械工場)

大熊 史子 日笠山 徹巳 納多 勝
(本社原子力本部) (本社エンジニアリング本部) (本社土木本部)

Development of an Automatic Soil Type Identification System

Yuki Yamada Shoko Yashio Ryo Matsuura
 Fumiko Okuma Tetsumi Higayama Masaru Noda

Abstract

Soil segregation processes and soil modification processes take place at an interim storage facility (ISF). Every container bag of removed soil has different properties, but during the treatment process when the container bags are emptied the soils are usually mixed. The cost of processing clay-rich soil is more expensive than that of sandy soil. Identification of soil types would enable appropriate treatment according to each soil type, reducing cost. The authors developed and tested an automatic soil type identification system that continuously and rapidly identifies soil types during conveyer belt transportation. The system was constructed to measure three discrimination indices of soil (deposition shape (by cross sectional area), moisture content ratio, and dry density) using 1/2 of a machine's conveyer belt width. Experiments were conducted with soil type, moisture content, and conveyer belt speed as parameters. Results confirmed that soil types could be successfully identified using the proposed devices, indicators, and reference values.

概要

中間貯蔵施設では除去土壌を対象に、分別処理のための改質や、減容化のための分級洗浄処理等が計画されている。しかし、除去土壌は土質が様々であるとともに、処理過程において混合されることが避けられないため、改質等の処理を全量に対して行う状況が想定されている。一方、処理コストは砂質土に比べ粘性土の方が高く、土壌を砂質土と粘性土に分別できれば、改質材の削減や処理効率の向上により処理費用を低減できる。そこで、ベルトコンベア上を搬送される除去土壌に対し、その土壌の特性を瞬時に計測し、土質を連続的に判別するシステムを開発した。実機の1/2幅のベルトコンベアを用いて、土の種類や含水比、ベルトコンベアの速度をパラメータとした実験を行い、土の堆積形状(断面積)、含水比、乾燥密度を計測した。その結果、本システムを用いることにより、土の種類を判別できることがわかった。

1. はじめに

国は、東北地方太平洋沖地震に伴う原発事故により発生した除去土壌等の減容化・再生利用に関する技術開発を推進している。除去土壌等を最終処分するまでの間、安全に管理・保管するための中間貯蔵施設では、分別処理のための改質や、減容化のための分級洗浄処理等¹⁾が計画されており、土質に応じた効率的な処理が求められている。

除去土壌の大きな特徴として、異なる場所から発生した土壌であるため、大型土のう袋ごとに土質が様々であることが挙げられる。また、処理過程において混合されることが避けられないため、現状では土質にかかわらず改質等の処理を行うこととされている。一方、分別処理のための改質や、土壌を再生利用するための改良、減容

化処理のための分級洗浄処理では、砂質土に比べて、粘性土の方が、処理費用が高い。そのため、砂質土と粘性土に分別することができれば、処理費用の低減が可能になると考えられる。

中間貯蔵施設に運び込まれた除去土壌等の土質を推測する方法のひとつとして受入時に大型土のう袋に付与されたタグ情報による判別がある。しかし、タグに登録された採取地の情報だけでは土質判別に必要な情報として不十分と考えられ、判別結果の不確実性が高いだけでなく、迅速な処理が難しい。また、粒度試験やコーン貫入試験を実施する方法もあるが、試験には時間を要し、すべての土壌に適用するのは難しいといった問題がある。

再生利用や分級洗浄を合理的に実施するためには、対象土壌であるかを迅速に判別し、分別する技術が求められている。そこで、ベルトコンベア上を搬送される除去

土壌に対し、その特性を瞬時に計測し、土質を連続的に判別する技術の開発を行った。

本報では、土質を連続的に判別する土質判別システムの概要ならびに実証実験結果について述べる。

2. 土質判別システムの概要

土質判別システムのイメージをFig. 1に示す。新たに開発した技術は、中間貯蔵施設の受入・分別施設で破袋処理された後、ベルトコンベア上で搬送される除去土壌に対し、複数の計測装置を用いて土壌の特性に着目した測定を行い、土質を瞬時に判別するものである。

粘性土の特性と判別指標の考え方をTable 1に示す。粘性土は、砂質土に比較して「塊状になりやすい」、「含水比が高い」、「乾燥密度が小さい」という傾向がある。これらの特性を評価するために堆積形状(断面積)、含水比、乾燥密度の3項目を設定し、各々の項目にしきい値を設けることにより評価を行い、連続判別を行った。

土質判別システムに用いた計測装置とその原理の一覧をTable 2に示す。計測には汎用性の高い計測装置(レーザースキャナー、含水比測定装置、ベルトスケール)を用いた。レーザースキャナーにより断面積を計測し、断面積から算出した体積とベルトスケールにより得られた重量から湿潤密度の算出を行っている。

土の含水比の計測には、高速道路盛土などの品質管理にも一般的に用いられているRI(ラジオアイソトープ)による含水比測定装置を用いた。RIによる含水比測定装置は、中性子線を土中に照射し、土中の水素原子と衝突することで変異した熱中性子の数を計測する装置であり、この熱中性子数と含水比の相関関係から含水比を間接的に計測することができる。この含水比測定装置を、土を運搬するベルトの下側に設置することにより、ベルトコンベア上を流れる土の含水比を連続計測することが可能となっている。含水比測定装置で得られた含水比と湿潤密度の値から乾燥密度を算出している。

3. 実証実験概要

3.1 実験フローと実験装置

実証実験では、まず、単一の土による計測実験により、ベルトコンベア上で搬送される土の特性(堆積形状、含水比、乾燥密度)が計測可能であることを確認するとともに、土質判別指標のしきい値について検討を行った。次に、2種類の異なる土を交互に搬送する条件で計測実験を行い、検討した土質判別指標の妥当性について確認を行った。実験全体の処理フローをFig. 2に示す。

実験装置の全景をPhoto 1に示す。実験装置は土を投入するホッパー、土を運搬するベルトコンベア、土を回収するバケツで主に構成されている。実験には実機の1/2幅のベルトコンベア(幅600mm)を使用し、レーザースキャナー、含水比測定装置、ベルトスケールを設置してい

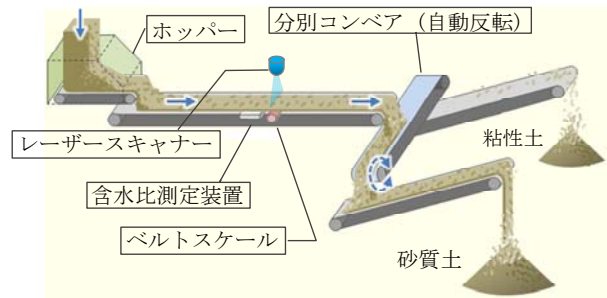


Fig. 1 土質判別システムのイメージ図
Image of Soil Type Identification System

Table 1 粘性土の特性と判別指標
Soil Properties and Indicators


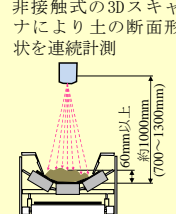
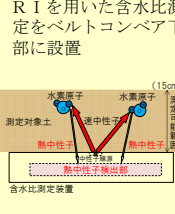
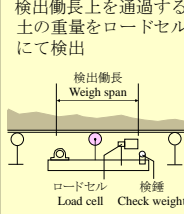
粘性土の特性・傾向	判別指標	判別指標の考え方
塊状になりやすい 	堆積形状(断面積) (m ²)	断面積が小さいもの(塊状で空隙が多い) ⇒ 粘性土に判別
細粒分が多く、含水比が高い	含水比 (%)	含水比が高いもの ⇒ 粘性土に判別
砂質土に比べ乾燥密度が小さい	乾燥密度 (g/cm ³)	乾燥密度が小さいもの ⇒ 粘性土に判別

Table 2 計測装置
Measurement Devices

計測装置	レーザースキャナー	含水比測定装置	ベルトスケール
測定項目	コンベア上の土の堆積形状	土の含水比	土の重量
原理	非接触式の3Dスキャナにより土の断面形状を連続計測 	RIを用いた含水比測定をベルトコンベア下部に設置 	検出働長上を通過する土の重量をロードセルにて検出 

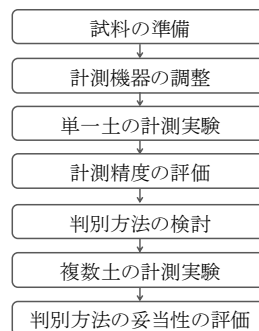


Photo 1 実験装置全景

Fig. 2 実験全体のフロー
Project Flow Chart

Device of Experiment

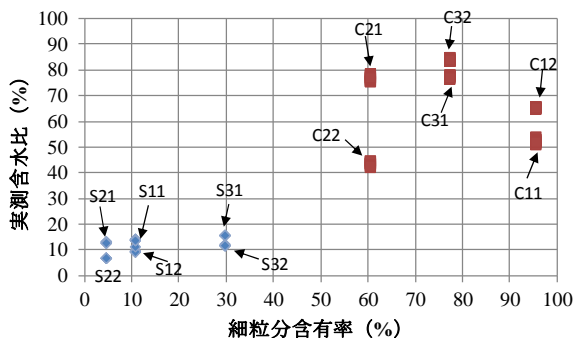


Fig. 3 細粒分含有率と実測含水比の関係
Relation between Fine Fraction Content and Water Content

る。

3.2 実験ケースと対象試料

実験に用いた対象試料の細粒分含有率と実測含水比の関係をFig. 3に、実験ケースの一覧をTable 3に示す。なお、本文中では、炉乾燥法あるいは電子レンジ法の含水比試験で得られた結果を実測含水比、RIによる含水比測定装置で得られた結果をRI含水比と呼ぶこととする。

実験では砂質土系試料3種類、粘性土系試料3種類の計6種類を選定し、土の種類、含水比、ベルトコンベア速度をパラメータとして全126回(42ケース×3回)実施した。土の含水比については、搬入時の状態を自然含水比として設定するとともに、実際の土壌を想定し、加水あるいは乾燥による含水比調整を行ったものも対象とした。加水による含水比調整については、ベルトコンベアで運搬できないほど流動性の高い土壌は事前に改質が行われることを想定し、予備試験により浮き水が生じない加水量を確認し、設定することとした。

ベルトコンベア速度については、中間貯蔵施設の主要設備に要求される処理能力140t/hの場合のベルトコンベア速度(0.31m/s)を中心に3種類のパラメータを設定した。今回の土質判別は大型土のう1袋(約1t)ごとの分別を目標としている。実験では実規模の半分の幅のベルトコンベアを用いることから、1ケース当たりの対象試料は大型土のう袋の容量(1t)の半分の重量となる500kgを目安とした。

3.3 実験方法

3.3.1 単一土の計測実験方法 単一土の計測実験では、単一土を対象として、断面積、含水比、重量を計測し、土質を判別することが可能であるかを評価することを目的として実施した。実験作業の手順を以下に示す。

- 1) 約500kgの試料を計量し、ホッパーに投入する。
なお、含水比調整を行うケースでは、ミキサーにより加水等を行った後、ホッパーに投入する。
- 2) 投入完了後、所定の速度でベルトコンベアの運転を開始し、ホッパーの排出ゲートより土を排出する。

Table 3 実験ケース一覧
Experiment Cases

土の種類		含水比	ケース番号			
			ベルトコンベア速度 [m/sec]			
			0.40	0.31	0.22	
単一土の計測	砂質土系	S1 山砂 (川越)	S11 自然含水比	S11-1	S11-2	S11-3
		S12 含水比調整	S12-1	S12-2	S12-3	
	S2 砂 (福島)	S21 自然含水比	S21-1	S21-2	S21-3	
		S22 含水比調整	S22-1	S22-2	S22-3	
	S3 珪砂 + トチクレイ	S31 自然含水比	S31-1	S31-2	S31-3	
		S32 含水比調整	S32-1	S32-2	S32-3	
粘性土系	C1 赤土 (新潟)	C11 自然含水比	C11-1	C11-2	C11-3	
		C12 含水比調整	C12-1	C12-2	C12-3	
	C2 黒土 (川越)	C21 自然含水比	C21-1	C21-2	C21-3	
		C22 含水比調整	C22-1	C22-2	C22-3	
	C3 黒土 (福島)	C31 自然含水比	C31-1	C31-2	C31-3	
		C32 含水比調整	C32-1	C32-2	C32-3	
複数土の計測	砂質土系S11 ↓ 粘性土系C11 ↓ 砂質土系S11	自然含水比	M1-1	M1-2	M1-3	
	粘性土系C21 ↓ 砂質土系S21 ↓ 粘性土系C21	自然含水比	M2-1	M2-2	M2-3	

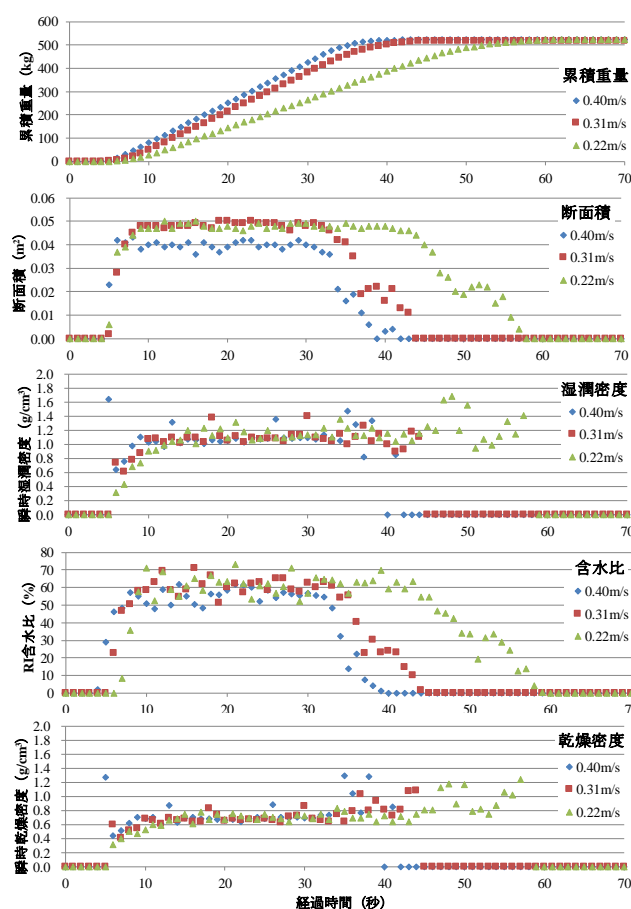


Fig. 4 単一土の計測実験結果の例 (C11試料)
Example of Single Soil Type Test



Photo 2 単一土計測実験時の状況
Situation of Single Soil Type Test

- 3) 各計測装置により、1秒ごとの計測を行い、パソコンに記録する。
- 4) ベルトコンベアを通過した土を回収し、重量の確認、含水比試料の採取および計測を行う。
- 5) 重量と断面積の計測結果より湿潤密度を算出し、含水比の計測結果を用いて乾燥密度を算出する。

3.3.2 複数土の計測実験方法 単一土の計測実験で得られた判別指標により、連続判別が可能かどうかを確認することを目的として、複数土の計測実験を実施した。複数土の実験における基本的な作業手順は単一土の計測実験と同様であるが、土の投入方法に以下の3種類の方法を採用した。

- 投入方法① すべての土を事前にホッパーに投入し、計測実験を行う。
- 投入方法② 最初に1試料分をホッパーに投入し、ホッパー内にある土が残り少なくなった時点で次の土を投入する。
- 投入方法③ 最初に1試料分をホッパーに投入し、ホッパー内にある土がなくなった後に次の土を投入する。

4. 実証実験結果

4.1 単一土の計測実験結果

単一土の計測実験結果の一例として、粘性土系C11試料のベルトコンベア速度を変えて計測した結果をFig. 4に示す。実験によりレーザースキャナー、ベルトスケール、含水比測定装置ともに1秒間隔のデータ取得が可能であることが確認できた。また、目標としたベルトコンベア速度(0.31m/s)よりも速い速度においても計測可能であることがわかった。なお、計測データには若干のバラツキがあるため、計測値を評価する際には瞬時値ではなく平均値(10秒程度以上)で評価する必要があると考えられる。

単一土計測実験時の代表的なケースの土の流れる状況をPhoto 2に示す。土の性状によりベルトコンベアを流れる際の形状が異なることが確認され、レーザースキャナ

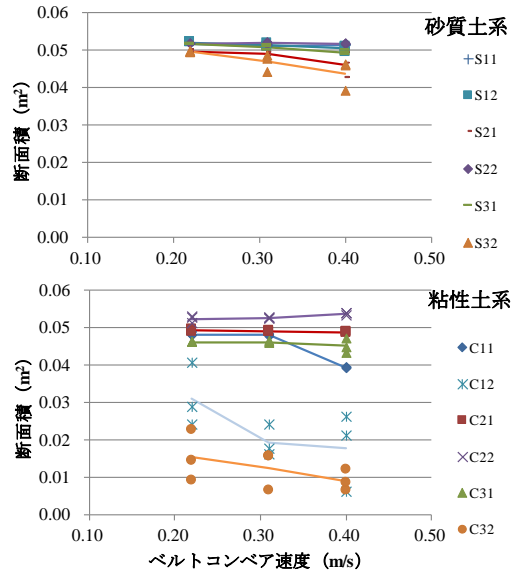


Fig. 5 ベルトコンベア速度と断面積の関係
Relation between Belt Conveyor Speed and Cross-sectional Area

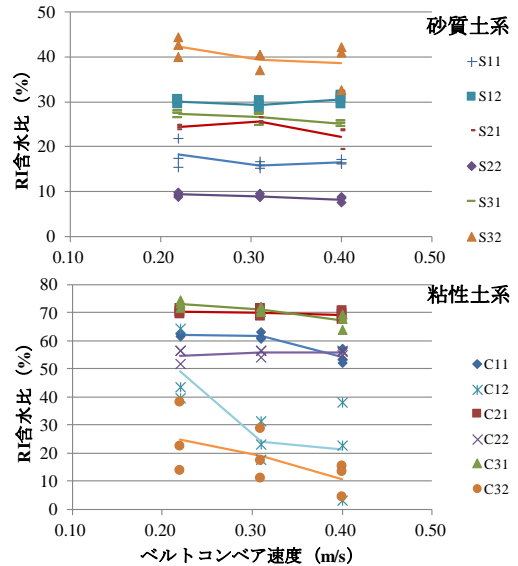


Fig. 6 ベルトコンベア速度とRI含水比の関係
Relation between Belt Conveyor Speed and Water Content

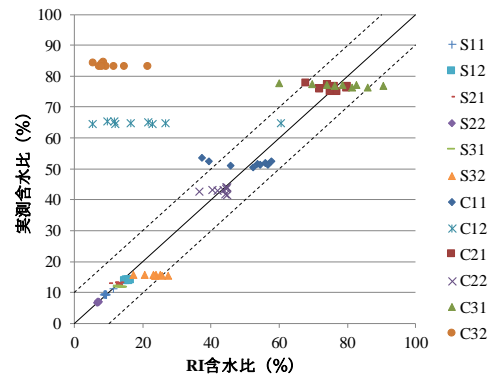


Fig. 7 RI含水比と実測含水比の比較
Comparison of Water Content

一により計測した断面積に大きな差異があることがわかった(4.3.1で後述)。

4.2 計測精度の評価

4.2.1 ベルトコンベア速度の違いによる影響 ベルトコンベア速度と断面積の関係をFig. 5に、RI含水比との関係をFig. 6に示す。なお、図中の実線は各ベルトコンベア速度における計測結果の平均値を結んだものである。

断面積の計測結果に着目すると、粘性が高いC12、C32試料では、最も遅いベルトコンベア速度0.20m/sにおいても他の試料に比べて小さい値を示した。また、ベルトコンベア速度が大きくなるに従い、断面積の値は小さくなる傾向がみられた。これは、Photo 2で示したように、粘性が大きくなると塊状を呈するため、試料表面の凹凸が大きくなるとともに、土の流れが不連続になるためである。

次にRI含水比の結果に着目すると、断面積の結果と同様にC12、C32試料のRI含水比はばらつきが大きく、また、ベルトコンベア速度が速くなるに従い、小さくなる傾向が見られた。これは、土が不均質、不連続な状態で流れているため、精度良く含水比を計測することが困難であることを表している。

一方、それ以外の試料では、ベルトコンベアの速度によらず断面積、RI含水比ともにほぼ一定の値を示しており、ベルトコンベア速度0.40m/sにおいても測定装置による含水比の計測が可能であることがわかった。

4.2.2 含水比の計測精度の影響 含水比試験で得られた実測含水比と含水比測定装置で得られたRI含水比を比較した結果をFig. 7に示す。図中にはRI含水比と実測含水比が等しい場合を実線で、±10%の値を破線で示している。4.2.1で述べた通り、粘性の高いC12、C32試料は、実測含水比に比較してRI含水比が小さい値を示しているのがわかる。これは、ベルトコンベア上を流れる土が不均質、不連続であることに起因すると考えられる。一方、それら以外では概ね±10%のバラツキ内に収まる結果を得た。

4.3 判別指標の検討

4.3.1 断面積による判別指標の検討 Fig. 8に含水比測定装置により得られたRI含水比と断面積の関係を示す。図にはベルトコンベア速度に関わらず全ての計測データをプロットしている。粘性が高いC12、C32試料では、4.2.1で述べた通り、断面積が小さく、かつ、RI含水比が小さくなる傾向がみられた。これは、ベルトコンベア上を流れる土が不均質、不連続であったためであり、このような状態では含水比を精度よく計測することが困難であることを示している。また、不均質、不連続な状態でベルトコンベア上を流れる土は粘性が高いため、何らかの改質をしなければ取り扱いが困難な土であると考えられる。

一方、それ以外の試料では含水比に依らず概ね0.04m²

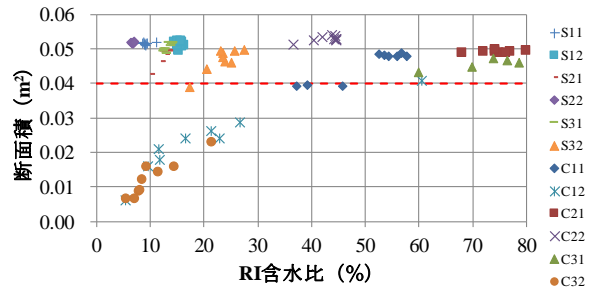


Fig. 8 RI含水比と断面積の関係
Relation between Water Content and Cross-sectional Area

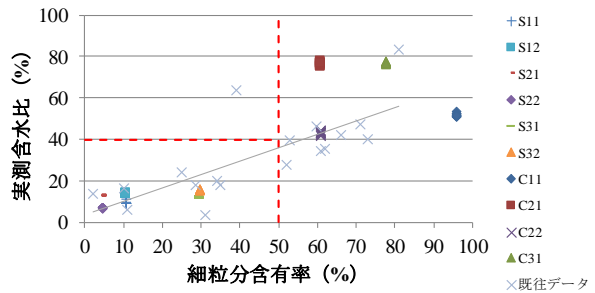


Fig. 9 細粒分含有率と実測含水比の関係
Relation between Fine Fraction Content and Water Content

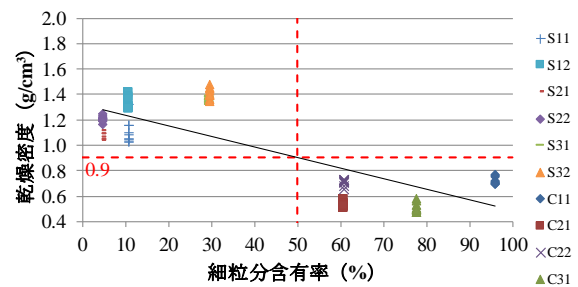


Fig. 10 細粒分含有率と乾燥密度の関係
Relation between Fine Fraction Content and Dry Density

以上の断面積が得られていることがわかる。また、断面積0.04m²以上の計測データでは、RI含水比のバラツキは概ね10%以内となっている。これらの結果より、判別指標のひとつとなる断面積のしきい値として、0.04m²を用いることとした。

4.3.2 含水比による判別指標の検討 Fig. 9に細粒分含有率と実測含水比の関係を示す。なお、計測データは全てのベルトコンベア速度をプロットしており、断面積による判別指標でしきい値未満となったC12、C32試料は除外している。また、図中には既往のデータ²⁾を併せて示している。含水比によるしきい値は既往のデータを考慮し設定することとした。グラフより砂質土と粘性土の目安となる細粒分含有率50%に相当する含水比は、およそ40%であり、判別指標のひとつとなる含水比のしきい

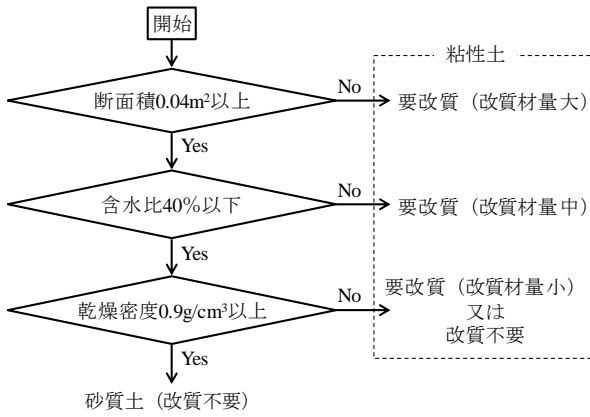


Fig. 11 土質判別フロー
Soil Type Identification Flow Chart

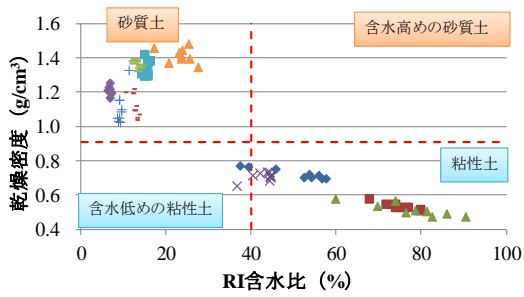


Fig. 12 単一土計測結果の判別結果の例
Example of Soil Type Identification based on Indicators and Reference Values

値として40%を用いることとした。

4.3.3 乾燥密度による判別指標の検討 Fig. 10に含水比測定装置により得られたRI含水比を用いて算出した乾燥密度と細粒分含有率の関係を示す。なお、計測データは全てのベルトコンベア速度をプロットしており、断面積の判別指標においてしきい値未満となったC12, C32の結果については除外している。グラフに着目すると細粒分含有率が大きくなるに従い、乾燥密度が低下する傾向がみられる。細粒分含有率50%に相当する乾燥密度はおおよそ0.9g/cm³であり、今回対象とした試料を分類できることがわかる。これらの結果から、判別指標の一つとなる乾燥密度のしきい値として0.9g/cm³を用いることとした。

4.3.4 判別指標のまとめ 単一土の計測実験により得られた判別指標と判別フローをFig. 11に、RI含水比と乾燥密度の関係に今回実施した単一土の計測実験結果をプロットしたものをFig. 12に示す。図中には提案したしきい値を赤い破線で示している。図から実験に用いた6種類の試料を砂質土と粘性土に分類できることがわかる。これらの結果から、提案した判別指標を用いることにより、土質を判別可能であることが確認された。

4.4 複数土の計測実験結果

複数土の計測実験では、ホッパーに投入した土が混ざ

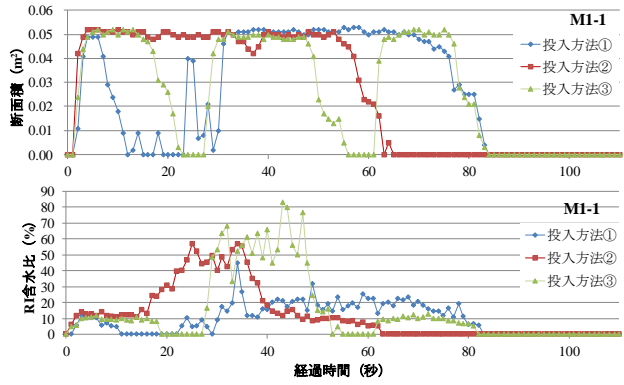


Fig. 13 複数土の計測実験結果の例(MI-1)
Example of Two Types of Soils

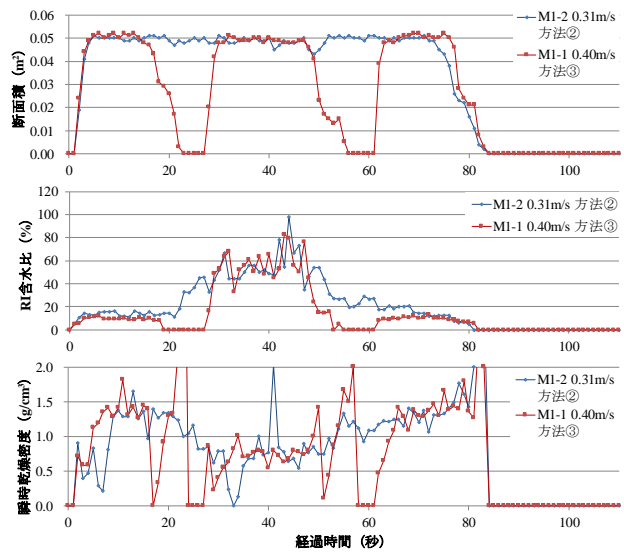


Fig. 14 投入方法とコンベア速度の組合せによる比較例
Comparison of the Supply Method into a Hopper

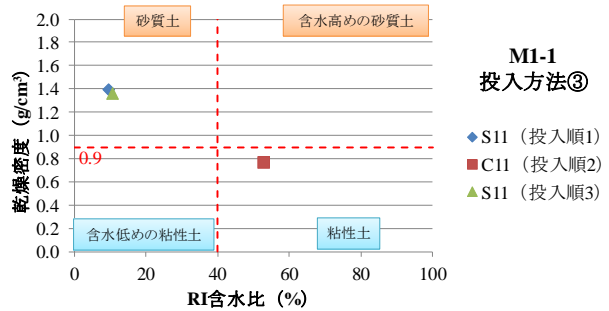


Fig. 15 複数土の判定結果の例 (MI-1投入方法③)
Example of Soil Type Identification

ることが考えられたため、3.3.2で示した3種類の投入方法により実験を行った。Fig. 13に計測結果の例を示す。

投入方法③のデータに着目すると、22秒後、55秒後に断面積、RI含水比ともにゼロとなっているのがわかる。これは、投入土間の境界を示しており、ベルトコンベア上に土が流れていない時間を設けることで土を明確に区別可能なことがわかる。次に投入方法②のデータに着目すると、土は区切れなく連続的に流れているため、断面

積のデータは一定の値を示している。それに対し、RI含水比は、15秒後以降徐々に増加し、35秒経過後から徐々に低下しているのがわかる。このような計測結果は、前後の投入土が混ざりあっているために生じていると考えられる。RI含水比の違いから土の種類が変化していることは読み取れるものの、投入土間の境界は不明確である。一方、投入方法①では、断面積、RI含水比ともに、土が流れている間はほぼ同じような値を示しており、投入土間の境界は不明であった。なお、投入方法①では、試験開始10~30秒後に、土がホッパーから排出されない状況が確認された。土をホッパーにストックさせる場合には、同様な状態が生じる可能性があり、排出方法などの検討が必要であるといえる。

投入方法③は各試料土の間にブランクを設けるために他と比べて計測作業の所要時間が長くなるが、データ抽出が容易であることがわかった。Fig. 14にベルトコンベア速度と投入方法が異なる二つの実験結果を示す。投入方法③の場合、ベルトコンベア速度を早くすることで、投入方法②と同等の時間で処理が可能であることがわかった。

Fig. 15に複数土の計測実験による土質判別結果の例を示す。各土のデータは、10秒間の計測結果の平均値としている。図より検討した土質判別方法によって土質を連続判別可能であることが確認できた。

5. おわりに

新たに開発した土質判別システムの概要について述べるとともに、実証実験により検証を行った。得られた結果を以下に示す。

- 1) 単一土の計測実験で見出した土質判別方法を複数土の計測実験に適用し、土質を連続判別可能である

ことを確認した。

- 2) 単一土の計測実験において目標とした速度でベルトコンベア上を搬送される土の特性(判別指標)を連続計測可能であることを確認し、本設備における各指標のしきい値を見出した。
- 3) 土質を連続判別する場合、土の投入方法によっては一袋ごとの境界が不明確となり、データ抽出方法、コンベア速度と投入方法の最適な組み合わせを検討する必要があることがわかった。

今回の実証実験を通して、砂質土系と粘性土系とに大別して土質を判別できることが確認できた。

今後、土質判別結果に応じて、改良材添加量の制御システムや土を分配するシステムの構築を行う必要がある。また、中間貯蔵施設に適用し、改質の要否や改質材の添加量の判断に用いる際には、実規模設備によるキャリブレーションを行うとともに、除去土壌に関する土質データを拡充させ、含水比と細粒分含有率の関係式、乾燥密度と細粒分含有率の関係式を検討する必要がある。

謝辞

本技術の実証は「平成28年度除染土壌等の減容等技術実証事業」(中間貯蔵・環境安全事業株式会社)に採択され実施したものです。

参考文献

- 1) 井出一貴 他：放射能汚染土壌の分級洗浄処理，大林組技術研究所報，No.76，2012
- 2) 三菱マテリアル株式会社：平成24年度除染等の措置の推進に関わる除去土壌の基本特性に関する調査業務，2013