

わざるを得ない状況である。

土工材料の製造を合理的かつ効率的に実施するためには、除染土壌の性状を瞬時に把握し、配合を定めて混合する技術や、混合材の品質を短時間で確認する方法が求められている。そこで、細粒分含有率および強度と相関の高い含水比に着目し、自動測定可能な含水比測定装置を用い、除染土壌の含水比測定から適切な配合までを自動的に行う品質調整システムの開発を行った。

本報では、除染土壌の建設資材化のための品質調整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. 品質調整システムの概要

除染土壌の品質調整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、土質の性状の指標として、細粒分含有率と相関の高い含水比に着目した。まず、あらかじめ設定した土質性状に基づく区分により土壌を分別する。異なる区分の土壌の山から採取した土壌の含水比を連続的かつ自動で測定し、適切な割合で配合を行う。これにより、安定した品質の土壌に調整するものである。また、混合後の土壌の含水比を自動計測し、短時間で品質を確認することが可能なシステムとなっている。システムは、含水比測定装置、ベルトスケール、ベルトコンベア、混合を行うミキサーおよびデータを集約して配合計算を行うPCからなる。含水比を自動測定するために、RI(Radio Isotope)による含水比測定装置(以下、RI含水比測定装置と呼ぶ)を用いている。

大林組が提案する建設資材化の処理フローをFig. 2に、あらかじめ設定する土壌の区分をTable 1に示す。区分は発生土利用基準に記載されている土質区分基準¹⁾から4つのグループを設定した。グループAに相当すると考えられる第1種建設発生土は、細粒分含有率15%未満の砂や礫であり、建設資材としてそのまま使用可能な材料である。グループBに相当すると考えられる第2種建設発生土および第3種建設発生土は、それぞれコーン指数が800kN/m²以上、400kN/m²以上の材料であり、建設資材として概ねそのまま使用可能な材料である。グループCに相当すると考えられる土質区分は、第4種建設発生土であり、安定処理等の土質改良を適切に行えば建設資材として使用可能な材料である。グループDは含水比が80%以上となる泥土を想定している。

区分作業には、土質判別システムを活用する。土質判別システムの詳細については既往の文献²⁾を参照されたい。除染土壌を類似した品質を有する4つのグループに区分して仮置きする。次に、グループA(建設資材へそのまま使用可能)と、グループC(適切に土の強度を向上させれば建設資材へ使用可能)の土壌の山からバックホウ等で土壌を採取する。それぞれの土壌を、品質調整システムを用いて適切な割合で混合し、グループB(建設資材へそのまま使用可能)に相当する混合材を製造する。これにより、短い製造時間と簡単な処理プロセスで安定して

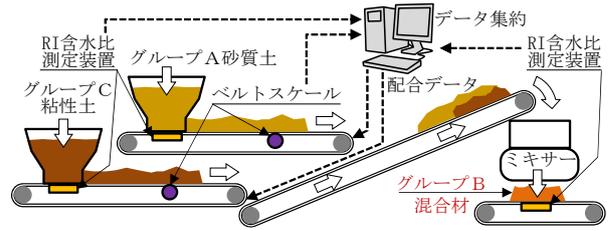


Fig. 1 品質調整システムのイメージ図
Image of Soil Quality Adjusting System

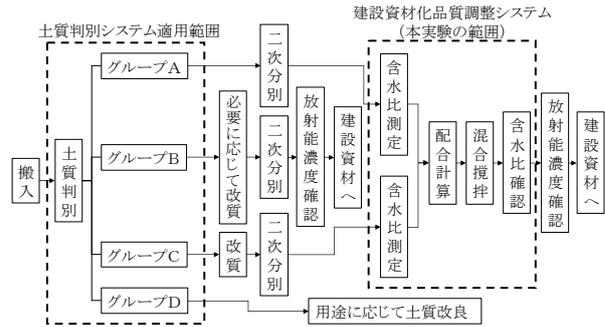


Fig. 2 建設資材化の処理フロー
Recycling Flow Chart

Table 1 土壌の区分
Segmentation of Soil

土壌区分	含水比	細粒分含有率	相当すると考えられる土質区分	建設資材への適用	土質調整
グループA	15%未満	15%未満	第1種建設発生土	そのまま使用可能	Cと混合後、出荷
グループB	40%未満	50%未満	第2種第3種建設発生土	そのまま使用可能	そのまま出荷
グループC	80%未満	50%以上	第4種建設発生土	適切な土質改良を行えば使用可能	Aと混合後、出荷
グループD	80%以上	—	泥土	グループCより土質改良にコストおよび時間が必要	用途に応じ土質改良

グループBの土壌を製造することが可能となる。なお、以下本稿では、複数の除染土壌を組み合わせ、混合した材料を「混合材」と呼ぶ。品質調整システムの適用先としては、以下が考えられる。

- 1) 中間貯蔵施設の受入・分別施設における資材化工程
- 2) 土壌貯蔵施設で貯蔵されていた土壌を再掘削して資材化する工程
- 3) 中間貯蔵施設に輸送せず再生資材化プラントで処理する工程
- 4) 仮置き場の遮へい用土のう(非汚染の購入土)を有効利用するための処理工程

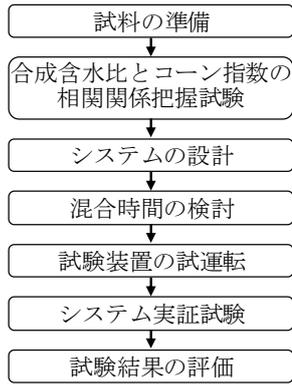


Fig. 3 実験全体の処理フロー Test Flow Chart

3. 実証実験概要

3.1 実験フロー

実験全体の処理フローをFig. 3に示す。実証実験では、まず、混合材の含水比(以下、合成含水比と呼ぶ)とコーン指数の相関関係を把握し、合成含水比の目標値の設定を行った。コーン指数とは、コーンペネトロメーターの先端部のコーンを地中に押し込む時の抵抗をコーンの断面積で除した値であり、建設発土の分類などに用いられている。次に、品質調整システムを構築し、実証実験を行い、目標とする混合材が製造可能かどうかについて検証を行った。

3.2 実験試料

各実験には砂質土系(以下、A試料と呼ぶ)2種類、粘性土系(以下、C試料と呼ぶ)3種類の合計5種類の試料を用いた。実験に用いた試料の基本物性をTable 2に示す。また、粒径加積曲線をFig. 4に、含水比と細粒分含有率の関係をFig. 5に示す。

対象とした試料のうち粘性土については、実際の除染土壌の状態を想定し、含水比10%に相当する加水を行ったものを初期の状態とした。本検討ではすべて加水した粘性土試料のみを用いるため、「加水10%」の表記は省略した。

砂質土系のA試料(A1, A2)は、搬入時含水比が7~11%程度、細粒分含有率が12~14%程度であり、Table 1に示すグループAに分類されることがわかる。一方、粘性土系のC試料(C1, C2, C3)は、含水比は68~76%と同様な値を示すものの、細粒分含有率は64~95%と試料により大きく異なる。C試料はTable 1に示すグループCに分類される材料であることがわかる。コーン指数については、A試料は6,000~8,000kN/m²が得られているのに対し、C試料では120~180kN/m²程度と細粒分含有率の増加に伴いコーン指数も大きく低下しているのがわかる。

今回の実験では、粘性土系のC試料については、除染土壌の処理工程を考慮し、大林組の開発による土質改質材「サラサクリーン™」³⁾を15kg/t混合したものをを用いるこ

Table 2 実験試料の基本物性

		Soil Properties				
試料名称 (産地)		A1: 砂質土 (川越)	A2: 砂質土 (笠間)	C1: 粘性土 (川越)	C2: 粘性土 (相模原)	C3: 粘性土 (見附)
土粒子密度 (g/cm ³)		2.662	2.652	2.622	2.564	2.750
粒度特性	礫分 (%)	15.4	34.2	4.7	1.0	0.2
	砂分 (%)	72.4	52.3	31.4	14.0	4.7
	細粒分 (%)	12.2	13.5	63.9	85.0	95.1
改質前	含水比 (%)	11.4	7.0	75.5	68.8	68.5
	コーン指数 (kN/m ²)	6,537	8,185	129	172	138
改質後	コーン指数 (kN/m ²)	—	—	142	525	186

※…改質前の粘性土は10%加水を行ったものを対象とした

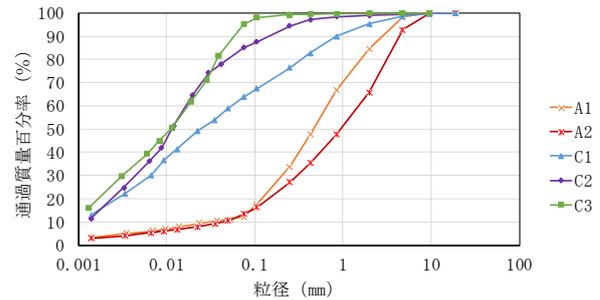


Fig. 4 対象試料の粒径加積曲線 Grain Size Accumulation Curve

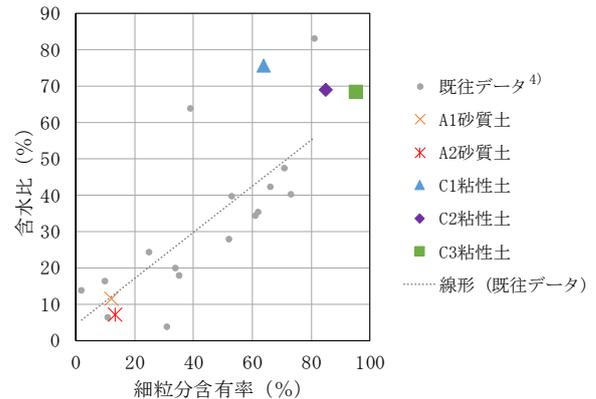


Fig. 5 含水比と細粒分含有率の関係 文献4)に加筆 Relation between Water Content and Fine Fraction Content

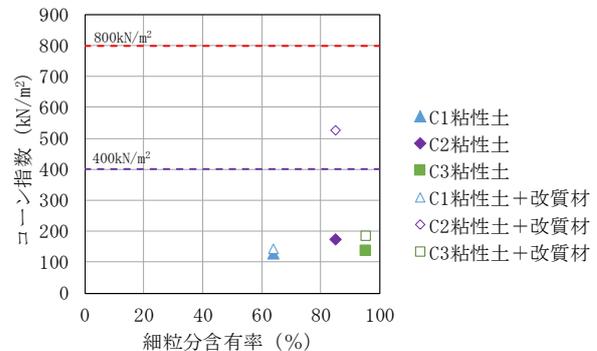


Fig. 6 コーン指数の比較 Comparison of Cone Index

ととした。Fig. 6に土質改質材混合前後のコーン指数の比較を示す。改質材の混合により、コーン指数の増加がみられた。

4. 相関関係把握試験

4.1 試験方法と試験ケース

合成含水比とコーン指数の相関関係把握試験では、含水比の異なる砂質土系(A試料)と粘性土系(C試料)を所定の合成含水比となるように混合を行った。混合後の材料を対象に、締固めた土のコーン指数試験(JIS A 1228)および含水比試験(JIS A 1203)を行い、各混合材におけるコーン指数と合成含水比の関係を求めた。得られた関係を用いて目標とするコーン指数(そのまま使用可能なグループB相当:800kN/m²あるいは400kN/m²)を満足する合成含水比を求め、後述する品質調整システムの実証実験において製造する混合材の目標合成含水比とした。

試験には、3.2節で示した5種類の試料を用い、合計24ケースを実施した。Table 3に目標合成含水比と各ケースの実測含水比の一覧を示す。1ケース当たりの混合土の量は2.5kgとし、試料の混合にはボウル付きミキサーを用いた。また、攪拌時間は3分とした。

4.2 相関関係把握試験結果

試験により得られたコーン指数と実測含水比の関係をFig. 7に示す。なお、下図は縦軸を拡大したものである。砂質土と粘性土のいずれの組合せにおいても、合成含水比が小さくなる(砂質土系が多くなる)とコーン指数が大きくなるのがわかる。今回実施した試験のケースにおいて、最もコーン指数が低くなる組合せはA1+C3試料であり、コーン指数800kN/m²となる合成含水比は24.5%、コーン指数400kN/m²となる合成含水比は29.0%であった。この結果から後述する品質調整システムの実証実験では、製造する混合材の目標合成含水比を24.5%と設定することとした。

Photo 1に混合材の例を示す。今回の試験では、C1試料を用いたケースにおいて合成含水比が大きくなるに従い、大きな塊状を呈する傾向がみられた。これは、C1試料が最も含水比が高いことが影響していると考えられる。粘性土系の割合が多くなると、組み合わせた試料の土質の違いにより、混合後の性状が異なる可能性があることが確認された。

5. 品質調整システム実証実験

5.1 実験方法

5.1.1 実験ケースと実験方法 品質調整システム実証実験に用いた実験装置の平面および立面配置の模式図をFig. 8に示す。また、実験装置の全景をPhoto 2に示す。

実証実験では、含水比の異なる砂質土系(A試料)と粘性土系(C試料)を自動配合によって混合材を製造する技

Table 3 各ケースの実測含水比一覧
Water Content of Experiment Cases

A試料	C試料	合成含水比 (%)			
		20	30	40	50
A1: 砂質土	C1: 粘性土	21.0	30.1	39.4	50.8
	C2: 粘性土	19.0	29.0	38.9	49.6
	C3: 粘性土	19.4	29.3	39.3	49.1
A2: 砂質土	C1: 粘性土	19.3	29.9	39.5	49.2
	C2: 粘性土	20.1	29.0	39.0	48.8
	C3: 粘性土	19.6	29.3	39.0	49.0

※ グループCの粘性土には改質材を15kg/t添加

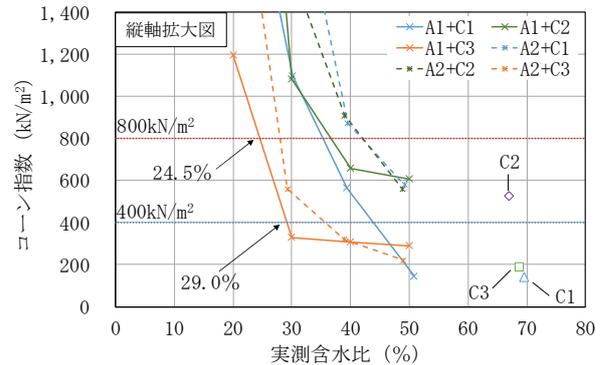
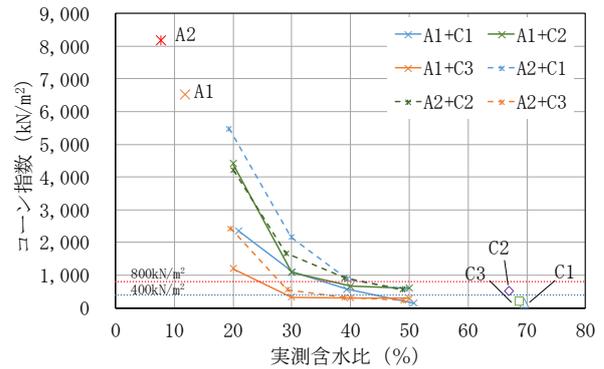


Fig. 7 コーン指数と実測含水比の関係
Relation between Cone Index and Water Content



Photo 1 混合後の試料の状況
Situation of Mixing Soil

術を実証し、目標とするコーン指数(800kN/m²)を満足する混合材を製造可能かどうかの確認を行った。実験に用いる土壌は、相関関係把握試験と同様に、3.2節で示した5種類の試料を用い、合計18ケースを実施した。Table 4に試験ケースの一覧を示す。なお、粘性土系試料については、相関関係把握試験と同様に土質改質材を15kg/t混合したものを用いた。実験手順を以下に示す。

- 1) A試料およびC試料の含水比を、電子レンジ法により測定する。以下、電子レンジ法により求めた含水比を実測含水比と呼ぶ。
- 2) A試料とC試料を各ホッパーに投入する。
- 3) ホッパー下に設置したRI含水比測定装置により試料の含水比を測定し(10秒間)、配合割合を算出する。ミキサーの能力から1回の自動配合で製造する混合材は約0.3tとした。配合割合の算出方法については後述する。なお、RI含水比測定装置で計測した含水比をRI含水比と呼ぶ。RI含水比測定装置による計測時間は既往の実験結果²⁾を参考に10秒とした。
- 4) ベルトコンベア①および②を30m/minで作動させ、算出した配合割合に従ってベルトスケールで必要量を計量し、試料をベルトコンベア③へ運搬する。
- 5) ベルトコンベア③を速度30m/minで作動させ、試料をミキサーへ投入する。試料がミキサーへ投入されたことを確認した後、混合攪拌を開始する。なお、今回の試験では事前に攪拌状況の確認を行い、ミキサーの混合攪拌時間を80秒に設定した。
- 6) 所定の混合攪拌が終了した後、ミキサーからベルトコンベア④へ混合材を排出し、コンベア下に設置したRI含水比測定装置により含水比の測定を行う(10秒間)。
- 7) 含水比測定が完了した後、試料の排出を行う。排出した試料からサンプリングを行い、電子レンジ法により含水比の測定を行う。また、各ケースの1回目については、サンプリング試料に対し、締固めた土のコーン指数試験ならびに粒度試験を実施した。

5.1.2 自動配合の方法 品質調整システムに用いた自動配合の方法を以下に示す。

- 1) 試料の含水比測定
ホッパー下に設置したRI含水比測定装置により含水比を測定し、PCに記録を行う。
砂質土(A試料)の含水比Wa(%)
粘性土(C試料)の含水比Wb(%)
- 2) 配合割合の計算
設定した目標合成含水比から砂質土(A試料)と粘性土(C試料)の比率を導出し、必要湿潤量を算出する。乾燥質量1tの混合材を製造する場合を以下に示す。なお、混合材の製造量は混合するミキサーの性能により設定を行う。

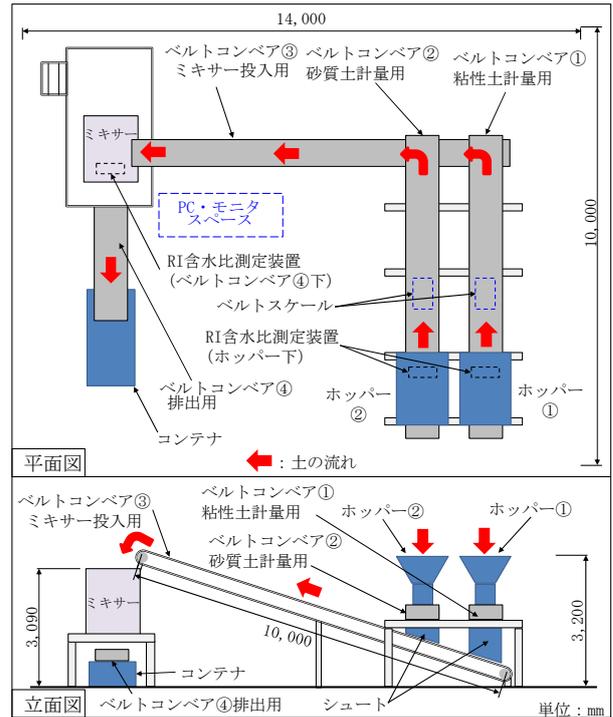


Fig. 8 実験装置の配置模式図
Image of Experiment Device

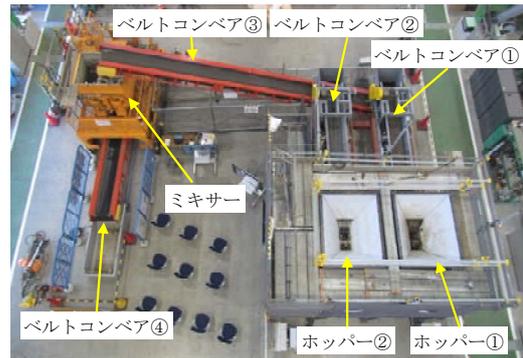


Photo 2 実験装置全景
Device of Experiment

Table 4 実証実験ケース一覧
Experiment Cases

A試料	C試料	ケース名称	粒度/コーン	目標合成含水比
A1: 砂質土	C1: 粘性土	AC11-1	○	相関関係 把握試験 結果より
		AC11-2	—	
		AC11-3	—	
	C2: 粘性土	AC12-1	○	
		AC12-2	—	
		AC12-3	—	
A2: 砂質土	C1: 粘性土	AC13-1	○	
		AC13-2	—	
		AC13-3	—	
	C2: 粘性土	AC21-1	○	
		AC21-2	—	
		AC21-3	—	
C3: 粘性土	AC22-1	○		
	AC22-2	—		
	AC22-3	—		
C3: 粘性土	AC23-1	○		
	AC23-2	—		
	AC23-3	—		

※ グループCの粘性土には改質材を添加



Photo 3 実証実験時の状況
Situation of Experiment

砂質土 : 粘性土 = $Y_a : Y_b$, $Y_a + Y_b = 1$
 目標合成含水比 (%) = $Y_a \times W_a + Y_b \times W_b$
 砂質土(A試料)の必要湿潤質量 T_a (t)
 $T_a = Y_a \times (1 + W_a/100)$
 粘性土(C試料)の必要湿潤質量 T_b (t)
 $T_b = Y_b \times (1 + W_b/100)$

3) 必要量の運搬

PCの計算結果に従って、必要量が算出されるまでベルトコンベアが作動する。

5.2 品質調整システム実証実験結果と考察

実証実験時の状況をPhoto 3に示す。以下に各実験結果について述べる。

5.2.1 含水比 混合前の各試料の実測含水比とRI含水比の関係をFig. 9~10に示す。なお、図中の破線は実測含水比とRI含水比が等しい場合を示している。

RI含水比は、A試料、C試料ともに概ね実測含水比と同程度の値を示した。しかし、砂質土系のA試料に比較して、粘性土系のC試料の方がRI含水比の測定結果がバラつく傾向がみられ、最大で約14%の違いが生じるケースもあった。混合材の実測含水比とRI含水比の関係をFig. 11~12に示す。混合材の含水比も若干バラツキがみられ、実測含水比に比較してRI含水比の方が大きめの値を示す傾向がみられた。これはRI含水比測定装置の計測箇所が局所的であり、粘性土の塊や空隙などの影響を受けたためと推察される。今回の実験では、RI含水比測定装置1箇所の測定結果を代表値としているが、より測定精度を上げるためには、同一のホッパーにRI測定装置を複数箇所設置し、それらの平均値で評価する方法などが考えられる。最適な設置位置を含め、今後検討が必要である。

RI含水比に若干のバラツキがみられたことから、RI含水比が実測含水比と異なった場合に製造される混合材を想定して、合成含水比の変動幅について検討を行った。

AC11の場合(A試料実測含水比8.4%、C試料実測含水比63.7%)を対象に、A試料、C試料ともに、RI含水比が実測

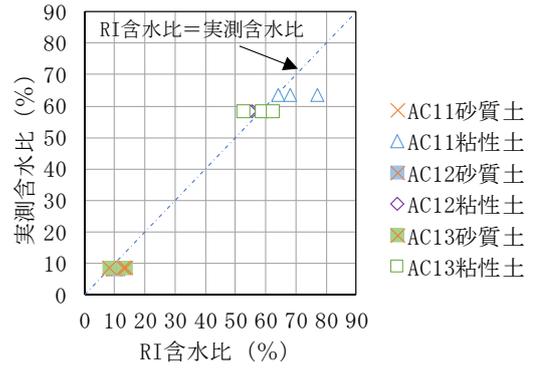


Fig. 9 実測含水比とRI含水比の比較(A1ケース)
Comparison of Water Content

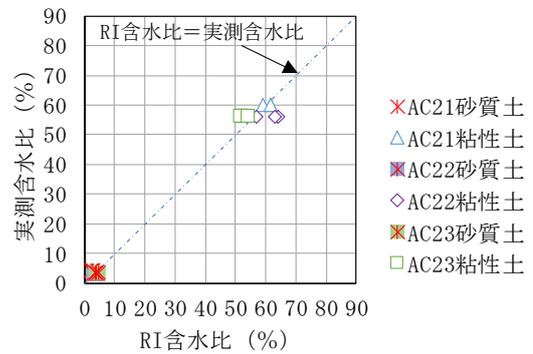


Fig. 10 実測含水比とRI含水比の比較(A2ケース)
Comparison of Water Content

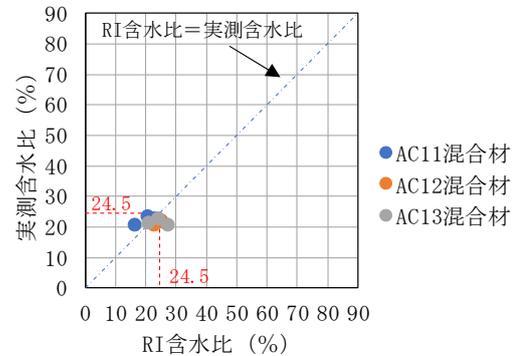


Fig. 11 混合材の実測含水比とRI含水比の比較
Comparison of Water Content

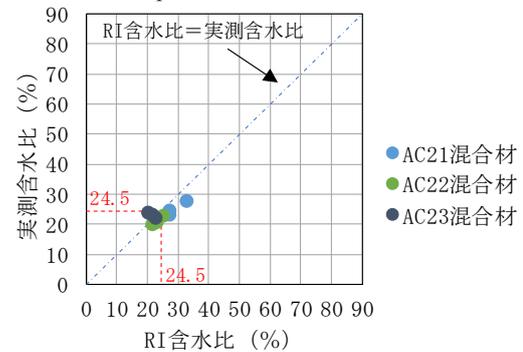


Fig. 12 混合材の実測含水比とRI含水比の比較
Comparison of Water Content

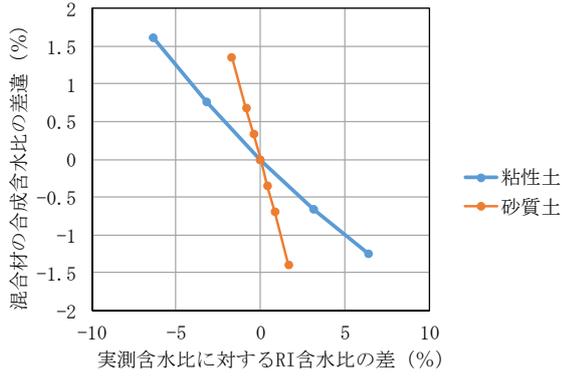


Fig. 13 RI含水比の計測差違が混合材の含水比に与える影響

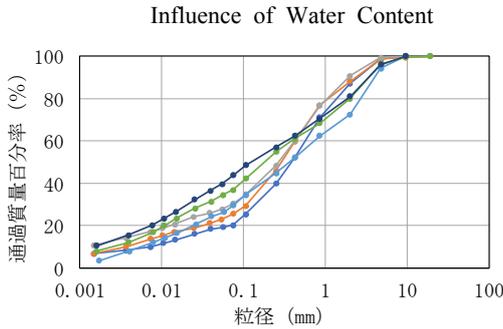


Fig. 14 混合材の粒径加積曲線
Grain Size Accumulation Curve

含水比に対して0.8~1.2倍までずれが生じた場合について試算を行った。試算結果をFig. 13に示す。

この結果から実測含水比に比較してRI含水比が高めの値を示す方(倍率が1を超える場合)が、実際に製造される混合材は含水比の低いものとなり、安全側のものになるといえる。また、本試験で目標とした合成含水比24.5%の混合材を製造する場合、砂質土系のA試料の割合が多いため、A試料のRI含水比が実測含水比と異なる場合の方が、混合材に与える影響が大きいのといえる。

5.2.2 混合材の粒度 各混合材の粒径加積曲線をFig. 14に示す。粘性土系のC試料の細粒分含有率に差があるため、粒径加積曲線の形状に若干差がみられるものの、いずれの混合材も礫混じり細粒分質砂あるいは細粒分質礫質砂に分類される同質の材料となることが確認された。

5.2.3 混合材の強度と含水比の関係 品質調整システムで製造した混合材の実測含水比とコーン指数の関係をFig. 15に示す。また、細粒分含有率とコーン指数の関係をFig. 16に示す。いずれのケースの混合材も、本実験で目標としたコーン指数800kN/m²以上の値が得られていることがわかる。また、細粒分含有率についてもグループB相当の範囲であることが確認された。このことから、所定の品質を有する混合材が製造可能であることが確認された。

今回の実験では、目標合成含水比の設定値として、安全側となる最も低いコーン指数の値を示したA1+C3の

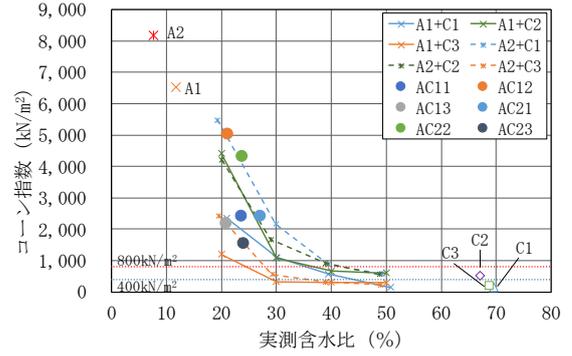


Fig. 15 コーン指数と実測含水比の関係
Relation between Cone Index and Water Content

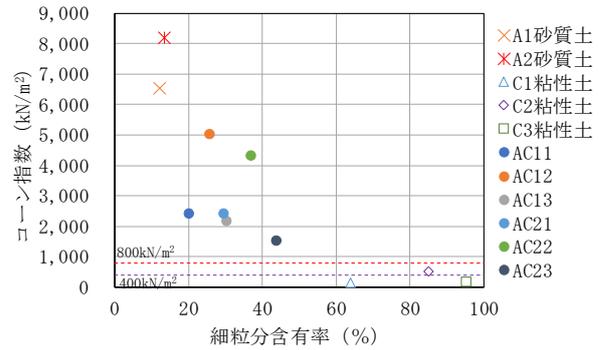


Fig. 16 コーン指数と細粒分含有率の関係
Relation between Fine Fraction Content and Cone Index

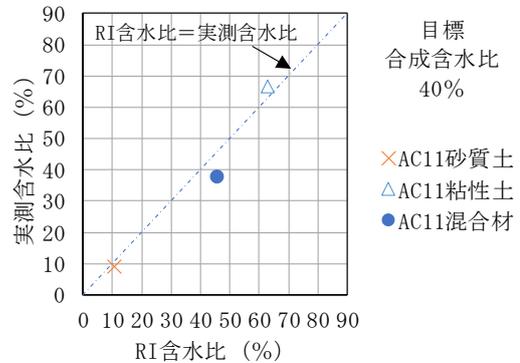
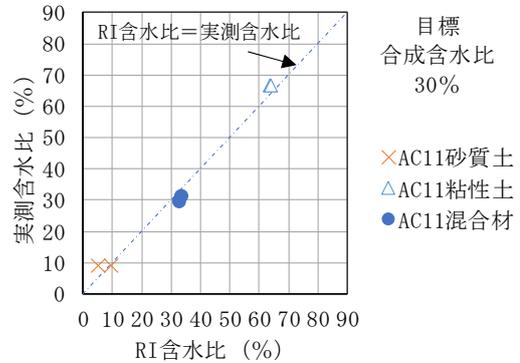


Fig. 17 実測含水比とRI含水比の比較
(目標合成含水比 上図 : 30%, 下図 : 40%)
Comparison of Water Content

ケースにより行った。実証実験により製造を行った混合材のコーン指数を見る限りでは、より大きな目標合成含水比を設定することも可能であったと考えられる。実際に際しては、更なるデータの蓄積を行い、RI含水比測定装置による計測誤差等も考慮しながら、目標合成含水比を設定する必要がある。

5.2.4 任意目標合成含水比での混合材の製造確認実験

新たに開発を行った品質調整システムで任意含水比の混合材が製造できることを確認する実証実験を行った。目標合成含水比を30%、40%としたケースについて検討を行った。実験試料はAC11ケースと同一の試料を用いた。各目標含水比による実験結果をFig. 17に示す。製造された混合材の含水比は、RI含水比と実測含水比で若干異なるものの、目標含水比にほぼ等しい混合材を得ることができた。このことから、本システムにより任意の合成含水比の混合材が製造可能であることがわかった。

6. まとめ

新たに開発した除染土壌の建設資材化のための品質調整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) 土の合成含水比とコーン指数に相関関係があることを示し、目標とするコーン指数を満足する目標合成含水比を設定できることを確認した。
- 2) 新たに開発した品質調整システムは、目標合成含水比を任意に変更することが可能であり、様々な合成含水比の混合材を製造できることを確認した。
- 3) RI含水比の計測データは、粘性土系のものほどバ

ラつきが大きくなる傾向がみられた。RI測定装置の設置位置や設置台数など測定精度を向上することで解決できると考えられる。

- 4) 短い製造時間と簡単なプロセスで建設資材にそのまま使用可能な土壌を安定して製造可能であることを確認した。

今後、処理速度の向上を目指した大型化や連続化の検討を行う必要がある。また、実際の除染土壌を対象に更なるデータの蓄積を図り、測定装置のバラツキも含めた目標合成含水比の設定方法なども検討していく必要がある。

謝辞

本技術の実証は「平成29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) 公益社団法人地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，pp.388-390，2009
- 2) 山田祐樹，他：除去土壌の連続土質判別システムの開発，大林組技術研究所報，№81，2017
- 3) 井出一貴，他：速効型中性系土質改良材の適用範囲検討，第23回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp.801-804，2017
- 4) 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