

画像解析による盛土材料の品質確認装置の開発

Development of quality confirmation device for embankment materials by image analysis

岩谷 隆文*

Takafumi Iwatani

要 約

盛土、埋め戻しなどに使用される土には、施工現場から発生する建設発生土のように土質が日々変化していくものもあり、施工現場では土質の変化を日常管理として適切に行うことが求められる。本研究では、使用する土質の変化を施工現場内で簡易に確認し、品質を適切に管理するために、測定用カメラ等を使用した画像解析技術を活用した品質確認装置を開発した。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 装置化の検討
- § 3. 装置の概要
- § 4. 装置による測定結果
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

盛土、埋め戻しなどに使用する土は、事前に土質試験を行い、施工現場において試験施工を行うことで、品質・施工方法を確認し施工が行われる。しかし、使用する土には、現地発生土など品質が変化する材料も存在する。これらの土は、事前試験からの土質の変化を日常管理として適切に行うことが求められる。現状、現場における土の品質の変化は、現場作業員の目視や含水比測定などで判断している。今後、土工事の品質を確保・向上させていくには、土質の変化に対してより適切な管理が求められる。

本報では、この土質の確認を現場で簡易に行うため、土質の変化を確認できる測定カメラなどを装備した品質確認装置（以下、本装置）の研究開発を行った。

§ 2. 装置化の検討

従来、施工時の土質の確認は主に以下の方法がある。

- ・ 含水比の測定
- ・ 転圧後の乾燥密度
- ・ 目視確認

GNSSを使用した転圧管理システムを導入した場合は、

乾燥密度の管理の代わりに、試験盛土で確認した転圧回数管理で担保し、土の含水比の測定のみを行う。ここで、目視による土質の変化は、

- ① 粒度の変化
- ② 土の色彩の変化

などを感覚的に把握、判断していると考えられる。そのため、①粒度、②色彩の変化を現場で定量的に測定できれば、より適切に施工の品質を確保することが可能となる。

一方で、土質の変化を現場管理する条件として、

- ・ 計測に必要な設備の最小化
- ・ 測定時間、人員の省力化
- ・ 持ち運び可能な管理技術

を条件とすることで、現場への負担をできるだけ軽減できるように考慮した。これらの条件を踏まえ、持ち運び可能なポータブルの計測装置の開発を行った。

2-1 装置の測定対象

本装置の測定対象は、一般的な土工事に使用される幅広い粒度の土を対象とする。具体的には、砂礫土（主に粒径2mm～75mmを多く含む土）および砂質土（主に粒径75μm～2mmを多く含む）を対象とした（図-1）。



図-1 測定対象の範囲¹⁾

2-2 粒度の測定方法

(1) 画像解析による粒度測定

土の粒度は、一般的にふるいを用いた試験¹⁾（JIS A 1204, 以下、ふるい試験）から求める。ふるい試験は、既定のふるいに残留する土の乾燥重量をもとに算出するた

* 技術研究所土木技術グループ

め、2日間以上の計測期間と乾燥炉、ふるいなどの設備が必要となる。

粒度測定には、ふるい試験以外に画像を用いて測定する手法（以下、画像法）がある。この手法は、主に測定対象土をカメラで撮影した画像から土の粒子（土粒子）の短径、長径などの画像情報を求め、土粒子の体積を計算する。画像解析手法は、各社でも開発が進んでおり^{2,3)}、粗粒材（例えば、CSG材）を対象に適用が検討されている。本装置は、上述の測定対象土である砂礫土などの粗粒材から砂質土までの比較的に粒径の小さい材料までを測定対象とし、画像法による粒度測定を行う。

本装置に用いる画像による粒度解析には、粒子解析ソフトウェア「Dia.Image（西華デジタルイメージ株式会社製）⁴⁾」を用いた。解析手法は、測定対象土をカメラで撮影後、撮影画像を白と黒の濃淡画像（グレー画像）へ変換する。このグレー画像への変換は、撮影画像の土粒子と背景のより区別しやすくするための処理となる。その後、グレー画像の濃淡からしきい値を設定し、土粒子の形状を判定する（2値化処理、図-2）。抽出した土粒子の短径、長径から土粒子を球形として体積換算し（図-3）、最終的に粒度分布を算出する。

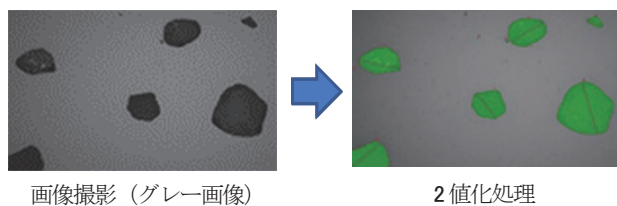


図-2 画像による土の粒度測定イメージ

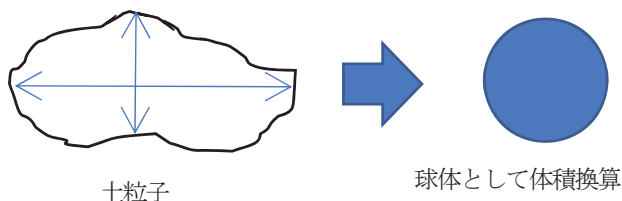


図-3 画像による土の粒径換算方法

2-3 撮影条件の検討

(1) 背景色の検討

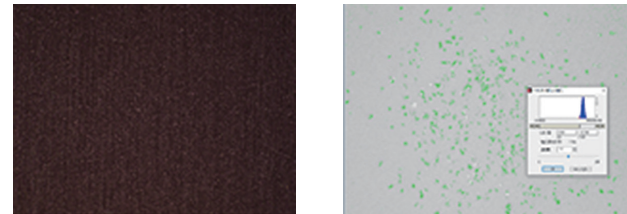
撮影時、対象土の輪郭をより鮮明に取得するため、背景色の検討を行った。検討結果例として、黒色、白色の背景色での精度を検証した。

黒色板はアルマイト処理のアルミ板を使用し、照明はリングライトを使用した。撮影初期、板に模様がみられた。透明度の高い土粒子の場合、2値処理時のパラメータ設定で模様の影響は排除が可能な場合も考えられるが、大きな土粒子を測定する場合、土粒子の輪郭を把握することが難しい（図-4（a））。

次に、背景色として白色板を使用し、照明はリングライトを使用した。白色板は樹脂製を使用し、土粒子の撮影を行った。石英のような透明度の高い土粒子の場合、土

粒子と背景色の境界の区別をつけ難い結果となった（図-4（b））。

背景色の選定では、黒色、白色とも土粒子の種類によって粒子の輪郭を把握することが難しい結果となった。そのため、照明条件との組み合わせ、最適な撮影条件を検討することとした。



(a) 黒色板

(b) 白色板

図-4 背景色による検証

(2) 照明を含めた撮影条件の検討

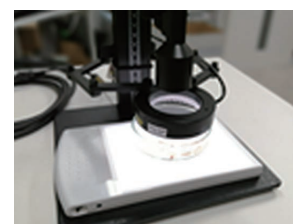
照明は、画像撮影時の光源がカメラ側にある反射光、光源が被写体側にある背景光の二種類がある（写真-1）。

反射光は、試料土の表面模様や試料土背景のパターン（礫による擦り傷を含む）を誤認識する可能性があった。誤認識を避けるためには、多方向から強い光量を照射する必要がある。その場合、装置化の際に、照明のサイズ、重量が大きくなり、装置化への影響が懸念された。そのため、装置の最小化のため、測定物の後をライトボックスの背景光として設置する形式とした。

照明条件およびサンプルの影などの影響を考慮した結果、画像法の測定において重要となる粒子形状を正確に把握するため、透過用ライトボックスを背景光として使用した手法が最適と判断し、背景光（透過型）を本システムでは採用した（写真-2）。



反射光による照明



背景光による照明

写真-1 照明条件の検討状況



写真-2 採用した撮影条件による土粒子画像

2-4 粒度の測定方法の検討

測定対象となる土質は、①砂礫土（主に粒径 2 mm～75 mm を多く含む土）および②砂質土（主に粒径 75 μm ～2 mm を多く含む）のように、測定する粒径幅の広いため、画像法で測定するには対象ごとに別々の手法を用いる必要が生じた。

ふるい試験時に必要となる試料質量と最大粒径の目安を表一に示す。ふるい試験では、最大粒径が 37.5 mm～75 mm の場合、試料質量として 6 kg～30 kg が目安となる。また、最大粒径が 2 mm～4.75 mm 程度でも、試料質量は 200 g～400 g 程度を必要とする。

画像法でも、ふるい試験と同程度の試料質量を目安として測定を行った。

表一 試料の最大粒径に応じた質量の目安¹⁾

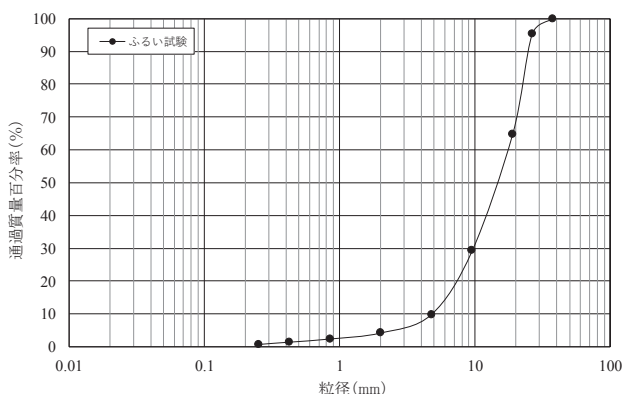
試料の最大粒径 mm	試料質量 g
75	30,000
37.5	6,000
19	1,500
4.75	400
2	200

(1) 砂礫土を用いた測定

砂礫系の土質として、RC-40 を使用して試験を行った。RC-40 の物性値及び粒度分布を表二、図一五に示す。RC-40 の最大粒径は最大粒径は 40 mm となるため、ふるい試験では、試料質量が 6.0 kg 必要となる。一方、画像法でも同程度の試料質量が必要となる。

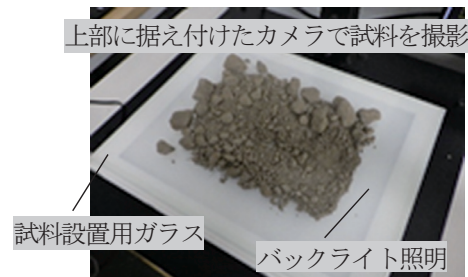
表二 RC-40 の主な物性値

試験項目	物性値
土粒子密度 ρ_s (g/cm^3)	2.672
自然含水比 w_n (%)	8.8
最大粒径 (mm)	37.5
平均粒径 D_{50} (mm)	14.5



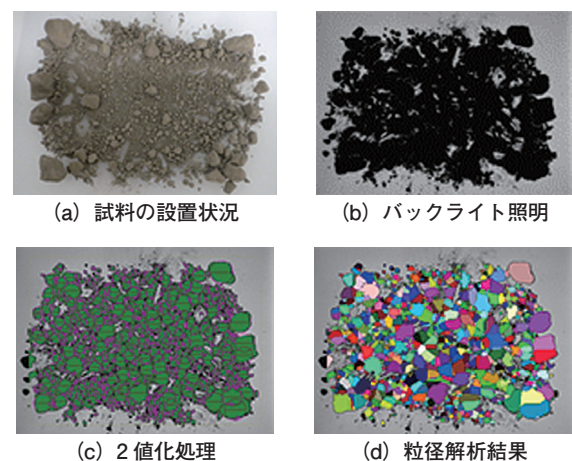
図一五 粒径加積曲線 (RC-40)

画像法の測定状況を写真一三に示す。写真の試料質量は 200 g である。撮影は、バックライト照明を試料背面から照らし、上部から試料を撮影する。バックライト照明と試料の間には透明ガラスを敷設している。

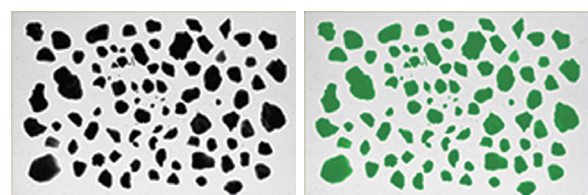


写真一三 撮影状況

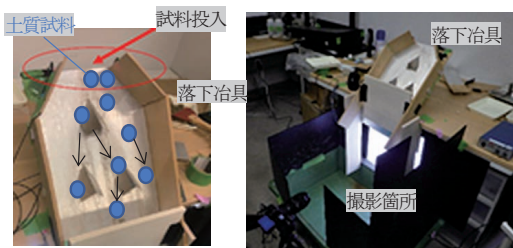
実際の粒度解析の状況を図一六に示す。図一六 (a) では、試料が隙間なく敷き詰められていることがわかる。そのため、図一六 (b) に示すように、バックライト照明による撮影画像では各土粒子を認識できないことがわかる。この状態で、2 値化処理（背景と土粒子を画像の濃淡で判別させる）を行っても正確な土粒子を判定することができない（図一六 (c)）。最終的な解析結果を図一六 (d) に示す。図中の色の異なる各形状が解析で土粒子として認識したものである。実際の試料配置状況（図一六 (a)）と全く異なる粒径判定をしていることがわかる。このため、画像法により土の粒度を正確に測定するためには、図一七のように各土粒子が分散させて敷設することが重要となる。一方、RC-40 のように粒子径が大きく、試料質量が多く必要な試料を図のように間隔をあけて敷設するには、多くの時間と労力がかかるため、現実的には難しい。そこで、図一八に示すように、試料を落下時に分散させる落下治具を作製し、落下治具の下にライトボックス照明を配置し、ライトボックスを通過する試料を撮影することで粒度計測を行う測定手法（以下、落下法）を検討した。



図一六 粒度解析の状況 (RC-40)



図一七 理想的な粒度解析の状況

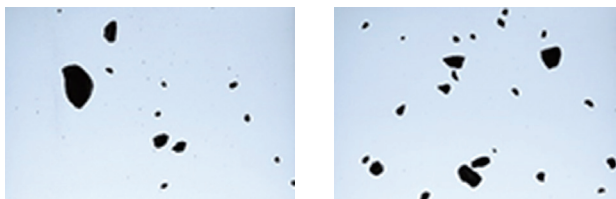


図一8 落下治具を用いた測定状況

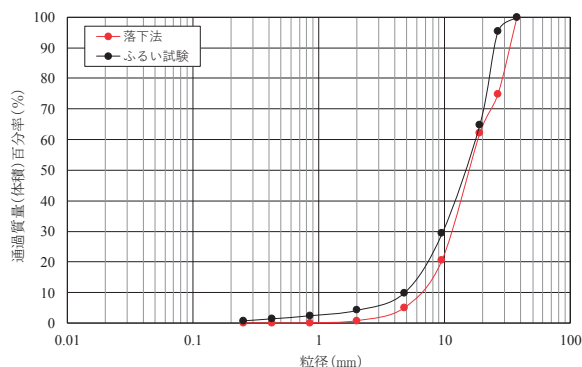
落下法の検証時の測定条件を表一3に示す。測定は、現場での測定を考慮し、自然含水状態の試料を用いて測定を行った。粒度測定結果を図一9に示す。その結果、試料は写真一4に示すように、きれいに分散され、ふるい試験と同様の粒度分布を得ることができた。また、落下法による再現性の検証結果として、同一試料を用いて4回(N=4)落下法を行った結果を図一10に示す。結果から、落下法は再現性がある手法であり、RC-40のような砂礫土の測定に有効であることを確認した。

表一3 主な測定条件

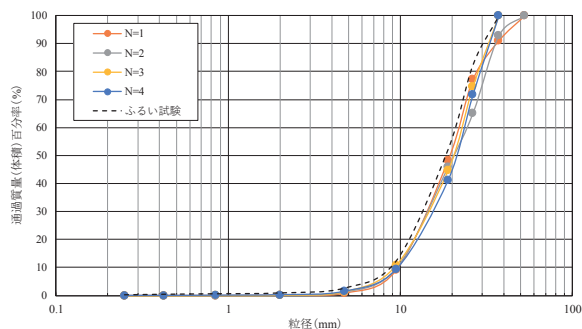
測定条件	数値
試験回数 N (回)	1
試料量 (kg)	6.0 kg
含水比状態	自然含水比 (8.8%)



写真一4 落下法で得られた測定画像



図一9 画像法による粒径加積曲線 (RC-40)



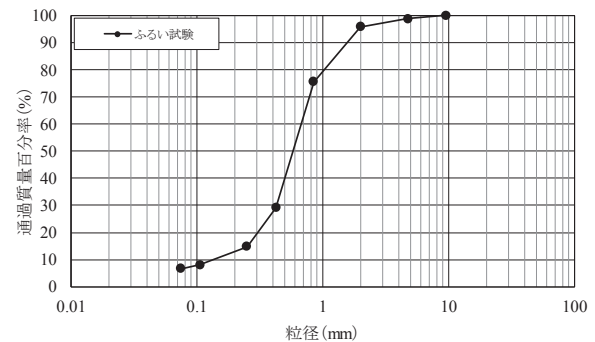
図一10 画像法による粒径加積曲線 (RC-40, $N = 4$)

(2) 砂質土を用いた測定

検討に使用した砂質土1の物性値及び粒度分布を表一4、図一11に示す。

表一4 砂質土の主な物性値

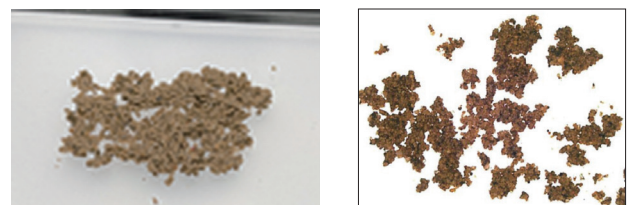
試験項目	物性値
土粒子密度 ρ_s (g/cm^3)	2.693
自然含水比 w_n (%)	12.3
最大粒径 (mm)	9.5
細粒分含有率 F_c (%)	6.7
平均粒径 D_{50} (mm)	0.586



図一11 粒径加積曲線 (砂質土1)

本研究で使用した最大粒径9.5 mm、細粒分含有率6.7%の砂質土を落下法を用いて測定した場合、以下の課題が生じた。

- ① 粒径が小さく落下法の距離では粒径計測が難しい
- ② 細粒分により粒子が団塊化し、落下治具では分散できず正確な粒度計測が難しい (図一12)



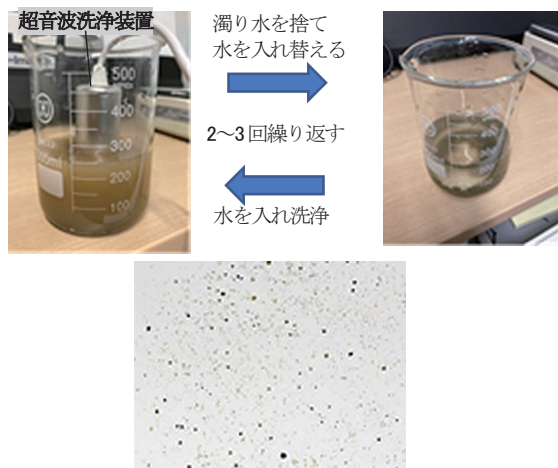
(a) 試料状況 (湿潤状態)

(b) 撮影画像

図一12 試料の撮影状況 (砂質土1)

課題①への対応として、本試料のように測定対象の粒径の小さい場合、当初予定していたバックライト上に試料を置き、上部から撮影を行う。

課題②への対応として、細粒分を取り除くことで対応した。方法は、測定試料と水を容器に入れ、攪拌する。細粒分は攪拌時に濁り水となるため、濁り水をすて再度水を加える。この作業を2~3回繰り返し細粒分を取り除く。その後、試料を測定用ガラス容器(透明)に入れ、撮影する(以下、定置法、図一13)。図に示すように、細粒分を取り除いた試料は、団塊化せず各土粒子が分散され、正確な測定が可能となる。



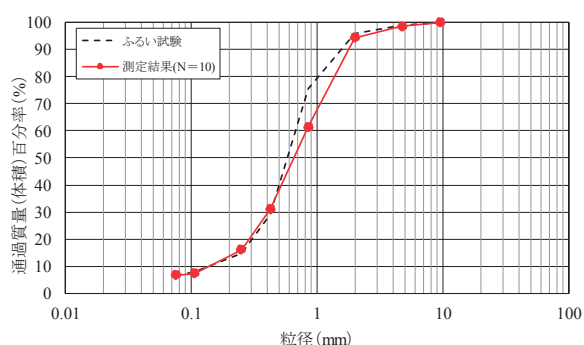
図一13 濁り水除去の手順

表一5 主な測定条件

測定条件	数値
試験回数 N (回)	10
試料量 (g / 回)	約 2.0
含水比状態	飽和状態

砂質土 1 (表一4, 図一11) を用いて定置法を行った。主な測定条件を表一5に示す。ふるい試験では、測定に使用する試料量の目安は 400 g となる (表一1)。一方、定置法による設営範囲は約 18 cm × 12 cm のため、1 回の測定量は約 2 g となった。そこで、測定回数を増やすことで測定量を増加させた。

$N=10$ 回の平均測定結果を図一14に示す。図は今回の測定対象領域である 75 μm までの結果を示している。試験結果から、試料数はふるい試験と比べ少ないものの、ふるい試験と比較的近い粒度分布を示しており、砂質土の測定に有効であることを確認した。

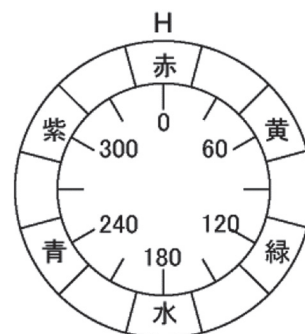


図一14 定置法による測定結果 (砂質土 1)

2-5 色彩の測定

土の粒度測定と併せて、土の色彩変化を測定する方法を検討した。本研究の画像法では、撮影した試料土の特徴となる色情報を基に判定できるか検討を行った。色彩の測定は、RGB 値をもとに算出される色情報 (色相, 明度, 彩度) から判断する。色相, 明度, 彩度とは、以下のような意味合いを持つ。

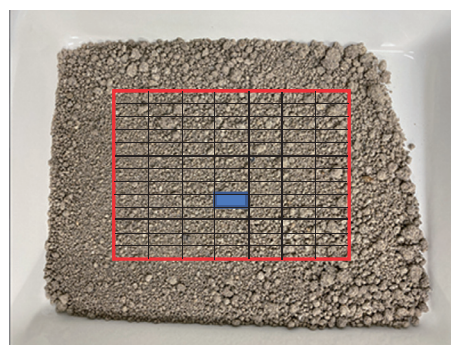
- ・色相：赤, 青, 緑のような色味の違いのことを表し、イメージの違いを最も表現することが出来る属性となる (図一15)。
- ・明度：色の明るさの度合いを表し、明度が高いと明るくやわらかな印象となる。明度が高いと白に近づき、明度が低いと黒に近い色となる。
- ・彩度：色の鮮やかさの度合いを表し、彩度が高ければ高いほど目を惹く効果がある。



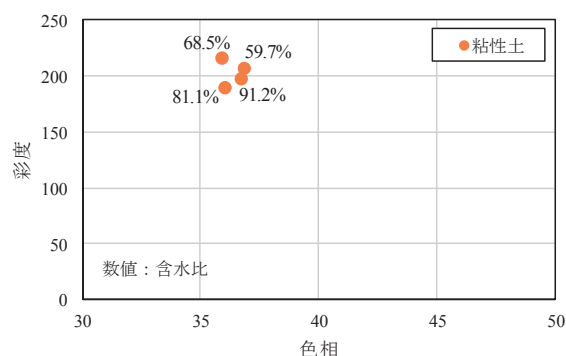
図一15 色相の数値図

土の色は含水状態や照明 (日光) などによって異なる。そのため、本研究では、照明は撮影に使用する照明を使用し、含水状態による影響を受けにくい、明度・彩度を用いて土の色彩を測定することとした。色彩情報の取得方法は、図一16のように撮影した色情報を分割し (測定点: 約 100 点), 平均データを算出した。

粘性土試料に対して、含水比を $w=59.7\% \sim 91.2\%$ 変えて測定した結果を図一17に示す。色度・彩度で評価した試料土は含水比の影響をほぼ受けておらず、一定の値に収束している。



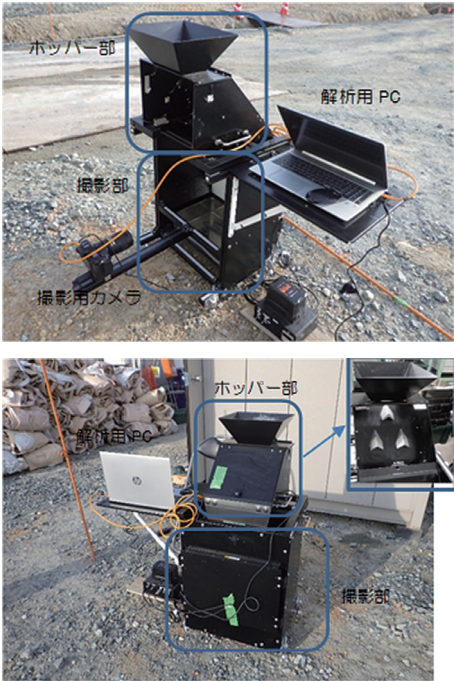
図一16 色彩の測定図



図一17 色彩測定の結果

§ 3. 装置の概要

上述の検討結果をもとに、土の品質確認装置を開発した（写真―5）。以下、装置の仕様を述べる。



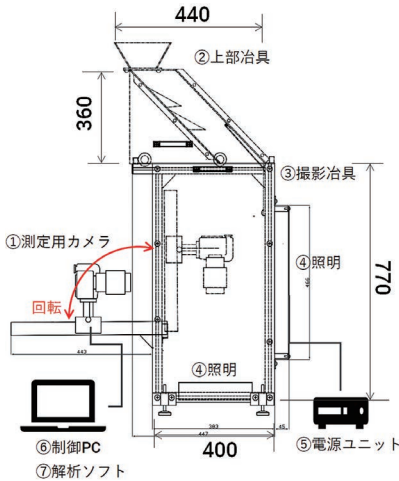
写真―5 装置の外観

3―1 装置の仕様

本装置の構成図を図―18、仕様を表―6に示す。本装置は、落下法および定置法が実施できる装置となる。

本装置の主な構成は、落下法に用いる落下治具を有する上部治具と、定置法、落下法の測定部の2つをメインとする装置となる。上部治具と測定部は運搬しやすいを考慮し、取り外しが可能となっている。

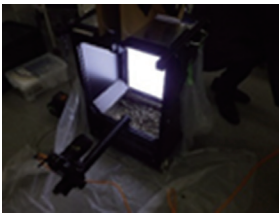
測定部には、両測定手法用の照明が、側面部と下面部に装備されている。測定用カメラはカメラ用治具に設置し、両測定手法に対応できるように撮影距離、撮影位置を変更できる仕組みとなっている（図―18、写真―6）。電源は屋外の測定を考慮し、バッテリー駆動とした。



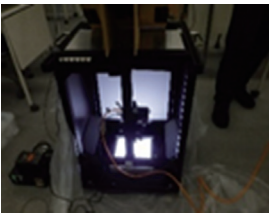
図―18 装置の構成図

表―6 装置の仕様

装置名称	仕様機材	仕様
落下機構	上部治具（ホッパー部）	・外形寸法：約 503 mm(W)×503 mm(H)×200 mm(D) ・材質：アルミニウム合金 ・重量：5 kg
	撮影治具	・外形寸法：約 503 mm(W)×720 mm(H)×383 mm(D) ・材質：アルミニウム合金 ・重量：10 kg
測定部	照明（2箇所）	・高演色専用白色光源 ・供給電源：DC 12 V
	測定用カメラ	・センサー解像度：2,450 万画素 ・カラーデジタルカメラ ・シャッタースピード：1/8,000 ・撮影範囲 319×217 mm（落下法） ・175×116 mm（定置法）
電源部	電源ユニット	・電源入力：14.8 V ・出力電圧：12 VDC ・最大出力電流：最大 15 A
制御部	制御用 PC	・OS：windows 10 ・CPU：Intel Corei7-10510 U 1.8 GHz
	解析ソフト	・Dia image ソフトウェア ・粒度分布・粒径解析ソフトウェア



(a) 落下法



(b) 定置法

写真―6 装置による測定状況

§ 4. 装置による検証結果

各土質試料を用いて本装置の検証を行った。以下、装置の検証結果を示す。

4―1 粒度測定の結果

(1) 落下法による計測結果

装置を用いた検証に RC-40（表―2、図―5）を使用した。主な測定条件を表―7に示す。測定回数は N=1、試料量は 6.0 kg、試料の含水状態は自然含水比（ $w_n=8.8\%$ ）とした。試料の落下治具通過状況を写真―7に示す。

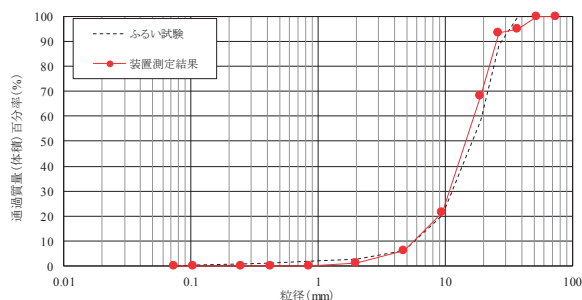
測定結果を図―19に示す。上述の検証結果同様に、ふるい試験とほぼ同じ粒度分布を得ることができ、装置として落下法による粒度の測定が可能であることを確認できた。測定時間は、落下測定に 1 分、粒度解析に 10 分、合計 11 分程度の短時間での粒度測定が可能となった。

表―7 測定条件

測定条件	数値
試験回数 N (回)	1
試料量 (kg)	6.0 kg
含水比状態	自然含水比 (8.8%)



写真一七 落下治具による試料の分散状況



図一十九 法による粒径加積曲線 (RC-40)

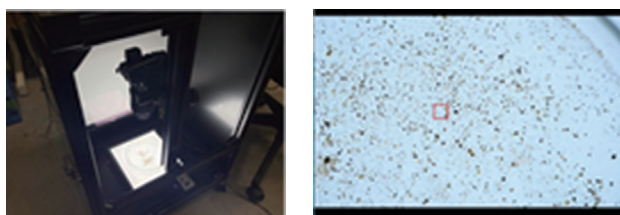
(2) 定置法による計測結果

装置の検証として、砂質土 2 を用いて定置法の測定を行った。使用した砂質土 2 の物性値および粒度分布を表一八、図一二十に示す。今回使用した砂質土は、最大粒径 4.75 mm、細粒分含有率 $F_c = 17.1\%$ のものを用いた。測定回数は $N=10$ とし、一回の測定試料量は約 2.0 g とした。定置法の測定状況を写真一八に示す。

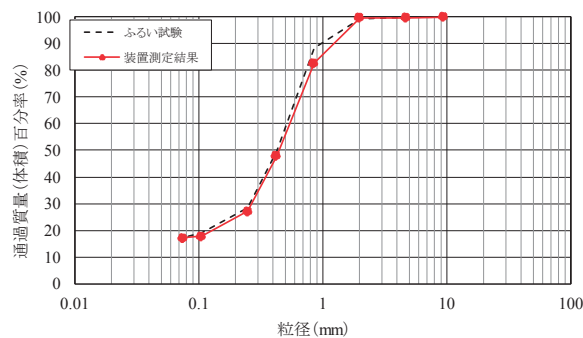
測定結果を図一二十に示す。なお、測定結果は、 $N=10$ の平均値である。上述の検証結果同様、ふるい試験とはほぼ同じ粒度分布を得ることができた。測定時間は、定置測定に 30 分、粒度解析に 5 分、合計 35 分程度であった。以上の結果により、本装置による粒度の測定が可能であることを確認できた。

表一八 砂質土 2 の主な物性値

試験項目	物性値
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.684
自然含水比 w_n (%)	18.0
最大粒径 (mm)	4.75
細粒分含有率 F_c (%)	17.1
平均粒径 D_{50} (mm)	0.43



写真一八 装置による測定状況 (定置法)

図一二十 画像法による粒径加積曲線 (砂質土 2, $N=10$)

4-2 色彩測定の結果

本装置による土の色彩測定には、3 種類の異なる試料土を用いた。試料土は、砂質土、粘性土、砂礫土の 3 種類である (写真一九)。

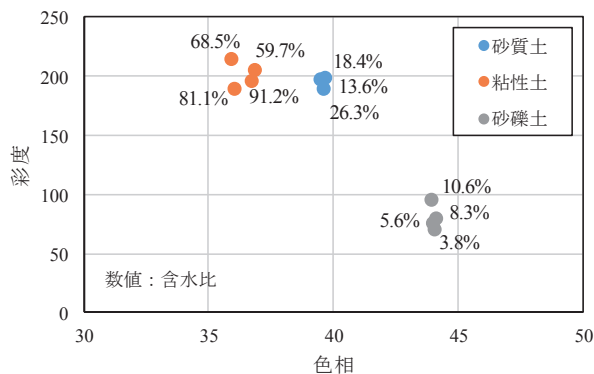
各試料土の測定は、以下の含水比内で含水比を調整し、複数回の測定を行った。

- ・砂質土：含水比 $w = 13.6 \sim 26.3\%$ ($w_n = 18.0\%$)
- ・粘性土：含水比 $w = 59.6 \sim 91.2\%$ ($w_n = 89.2\%$)
- ・砂礫土：含水比 $w = 3.8 \sim 10.6\%$ ($w_n = 8.8\%$)



写真一九 色彩測定の対象土

測定結果を図一二十一に示す。結果から、3 種類の試料土の色彩が違うことがわかる。また、含水比を変えても測定結果への影響は小さいことがわかる。そのため、色彩測定を行うことで、土質の違いが判定でき、粒度以外の方法で異なる土質を判別することが可能なことを確認した。



図一二十一 色彩測定の結果

§ 5. まとめ

本装置による成果を以下に述べる。

- ① 一般盛土工事に使用される砂礫土、砂質土 (粒径 75 mm $\sim$ 75 μ m) を対象とし、土の粒度と色彩測定

による品質管理装置を開発した。

- ② 砂礫土には落下法が、砂質土には定置法を適用することで粒度測定が可能なことを確認した。
- ③ 各粒度測定は、落下法で10分程度、定置法で35分程度で、短時間での粒度測定が可能なことを確認した。
- ④ 土の色彩測定には、色相と彩度を使用することで、土の含水状態の変化に影響を受けずらい測定手法で、色彩により土質の違いを判別できる可能性があることを確認した。

以上により、粒度と色彩を測定可能な土の品質確認装置を開発することができた。

今後、現場導入に向けた以下の課題を検討する。

- ・土質の変化（粒度幅、色彩幅）について、装置精度を含めた管理指標の設定方法の構築
 - ・測定頻度、実際の盛土材の対象土質など装置の運用方法の構築
- これらの課題を検討し、本装置の現場導入を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，pp. 132-157，2021.
- 2) 江田正敏ら：デジタル画像処理による連続粒度解析システムの開発，ダム工学，2014.
- 3) 田中麻穂ら：画像処理による粒度分布推定技術を用いた品質管理の高度化，地盤工学会誌，2015.
- 4) 西華デジタルイメージ株式会社：Dia.image, <https://www.seika-di.com/measurement/combustion/DiaImage.html>