

画像解析による土質材料の粒度曲線推定法の開発と現場適用例

北島 明 福島 伸二[※]
仲沢 武志 小島 秋[※]
新井 智之 犬飼 翔吾

概 要

本研究では、盛土材の工学的特性を把握する上で重要な指標である粒度特性を、画像解析とTalbot曲線による近似手法を組み合わせることで、簡易かつ高精度に推定する技術を開発した。提案手法では、画像解析の適用性に基づき盛土材を粗粒材と細粒材に分類し、粗粒材については画像解析により粒度分布曲線を作成する。一方、細粒材についてはTalbot曲線を用いて粒度分布を補間することで、全体の粒度特性を推定する。本技術の有効性は、開発段階において8種類の盛土材を用いて検証され、さらに、ある鉱滓ダムの品質管理試験において補助的手法として適用された。

Development and field application of an image-based method for estimating grain size distribution curves of geomaterials

Abstract

This study proposes a method for estimating the grain size characteristics of embankment materials, which are essential for evaluating their geotechnical properties. The technique combines image analysis with Talbot curve approximation to enable rapid and accurate assessment. Embankment materials are first classified into coarse-grained and fine-grained fractions based on the applicability of image-based analysis. The grain size distribution of the coarse fraction is derived through image processing, while that of the fine fraction is interpolated using the Talbot curve. The method was validated with eight types of embankment materials during the development phase, and its practical applicability was demonstrated through supplementary use in a quality control test at a tailings dam.

キーワード：画像解析、Talbot曲線、盛土材、粒度特性、
品質管理、省力化

※ 土木本部土木エンジニアリングセンター

§1. はじめに

盛土造成において盛土材が締固めに適した粒度にあることの事前確認は盛土の品質確保のために重要な事項である。しかしながら、現場で盛土材の粒度分布を確認することは、室内試験におけるよりも大量の盛土材について多段階のふるい分け試験を行う必要があるなど多大な労力を伴うため実施回数に限界がある。このような管理の省力化のために画像処理技術の応用が考えられているが、適用は粒径が比較的揃ったCSG材などに限られている¹⁾。そこで筆者らは粒径幅の広い一般的な盛土材の粒度分布を現場で簡単に求めるために、画像解析技術とTalbot曲線近似を組合せた盛土材の粒度曲線推定法を開発し各種盛土材への適用を確認してきた^{2) ~ 5)}。本稿ではその概要と現場に適用した例を報告する。

§2. 画像解析による盛土材粒度分布推定法の概要

土粒子の画像解析による粒形認識は骨材のような粒径が大きく、かつ揃った材料であれば容易に実施できる。しかしながら、通常の盛土材は、粗粒から細粒まで広範囲な粒径の土粒子を含んでおり、粒子の一部が他の粒子に重なるなど、現状の画像解析技術による粒形認識は難しい。そこで盛土材を粒形認識が可能な粗粒側粒子とそれ以外の粗粒側粒子に予めふるいで分級し、粗粒側粒子のみを画像解析して部分的に粒度曲線を求め、さらにこれをTalbot曲線近似して全体の粒度曲線を推定することにした。

2.1 画像解析による粗粒分の粒度分布推定法

画像解析が可能な粗粒分の粒子粒径は以下に示す方法で推定した。まず、粗粒側粒子を平面上に重ならないように敷き均し、デジタルカメラなどで上方のある一定の距離から撮影する。撮影画像の土粒子群のうち1個分の土粒子を拡大したものを図1 (a) に模式的に示す。土粒子形状はカメラ素子の濃淡で表現され、土粒子の投影面積はカメラ素子の数（ピクセル）で表現することができる。図1 (b) に二値化したカメラ素子で表現した土粒子を概念的に示すが、予めキャリブレーションにより1ピクセルに相当する面積を定めておけば土粒子の投影面積が計測できる。写真1に盛土材を9.5mmふるいにより粗粒側粒子と細粒側粒子に分け、粗粒側粒子を撮影した画像を示す。画像の二値化時の精度が高まるように、一般的な土粒子色の反対色である赤色のパンチカーペットの上に土粒子を重ねるように並べて撮影している。写真中の青い線

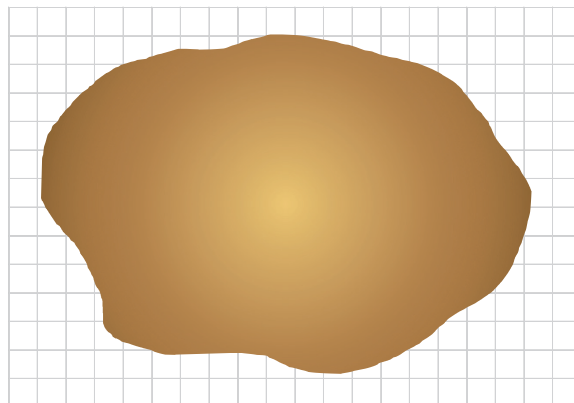


図1 (a) 土粒子の撮影画像

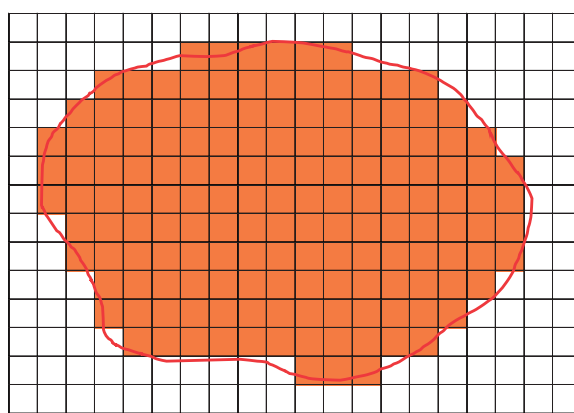


図1 (b) 画像の二値化と投影面積の算定

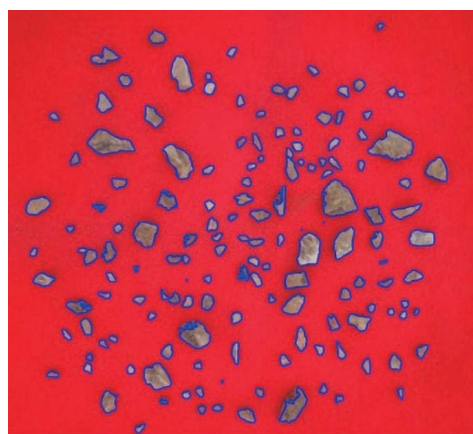


写真1 画像解析による粒子形状の判定例

は境界線を表し、この境界線で囲まれた部分の面積を各土粒子の投影面積 A としている。

次に、土粒子形状は図2に示す長径 a と短径 b を持ち、 a を軸とする回転楕円体として仮定し、土粒子の粒径 $D (= b)$ および体積 V を下記の式を用いて求めた。画像解析から得られたある土粒子の投影面積を

A、長径/短径比を $m=a/b$ とおくと D と V はそれぞれ

$$D = 2 \cdot \{A / (m \cdot \pi)\}^{1/2}$$

$$V = \pi \cdot m \cdot D^3 / 6$$

となる。なお m は土粒子形状の異なる数種類のモデル試料を用いた予備実験から $m=1.25$ を採用した。また、土粒子密度を D によらず一定とすれば質量比と体積比が等しくなることから、各土粒子の D と V を個別に求め、さらに粒度階毎（例えば $9.5\text{mm} < D \leq 19\text{mm}$ ）の全土粒子の V を総和することにより、粒度曲線を求めた。

2.2 Talbot 曲線近似による細粒側粒度曲線の補完

Talbot曲線は粒度分布を数式化するための近似式として一般的に使用されており、以下の式で表される。

$$P = (D/D_{\max})^n \times 100$$

P ：通過質量百分率（%）

D ：粒径（mm）

$D_{\max}$ ：試料の最大粒径（mm）

n ：Talbot指数

この数式を使用すれば、盛土材の粒度特性を示す均等係数 U_c や細粒分含有率 F_c は

$$U_c = D_{60}/D_{10} = 6^{1/n}$$

$$F_c = (0.075/D_{\max})^n \times 100$$

により算定できるため品質管理等の労力が大幅に低減できる。

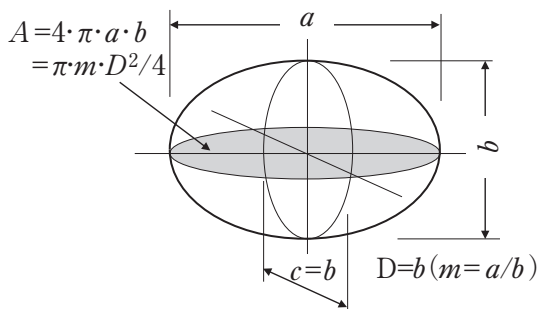


図2 土粒子形状の仮定

§3. 画像解析とふるい分析（従来法）の比較

図3はある造成工事の盛土材Ⅰの粗粒側の土粒子のみを画像解析する事で得た粒度曲線（推定法）と、ふるい分けにより求めた粒度曲線（ふるい法）を比較したものである。画像解析から得られた粒度（○印）を近似して得られたTalbot曲線（赤実線）と、ふるい分析により求めた粒度曲線（●印）をそれぞれ示す。図から、推定法とふるい法の結果がよく一致している事が分かる。

図4は、図3に示した盛土材Ⅰを含む8種類の盛土材について、推定法から求めた最大粒径 $D_{\max}^T$ とふるい法から求めた最大粒径 $D_{\max}^S$ の関係を示す。同様に、図5と図6は細粒分含有率 F_c^T と F_c^S 関係、 $U_c^T \sim U_c^S$ 関係をそれぞれ示す。

まず図4より、 $D_{\max}^T$ は平均的には $D_{\max}^S$ とほぼ同様の値となっているが、分散が $D_{\max}^T < D_{\max}^S$ 側に偏る傾向を示している。これは図7に概念的に示すように、盛土材の最大粒径付近の粒度曲線がTalbot曲線が直線的に増加するのに対して、実際の盛土材は100%に漸近するように増加する形状になるためと考えられる。

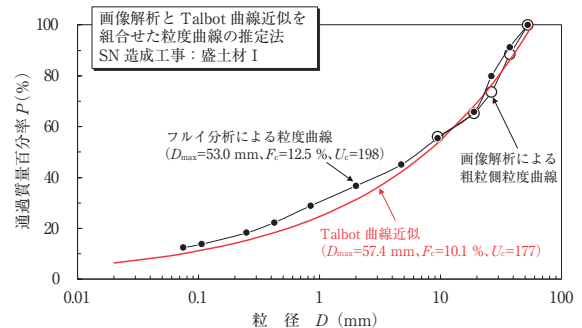


図3 推定法とふるい法による粒度曲線の比較

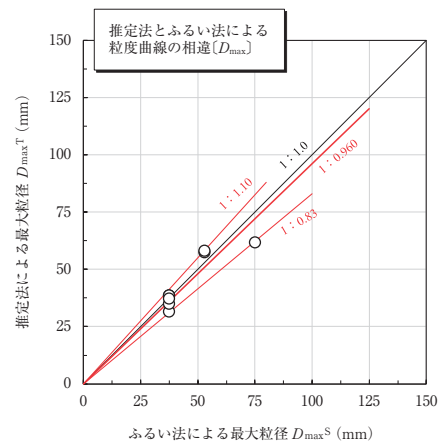


図4 推定法とふるい法による $D_{\max}$ の比較

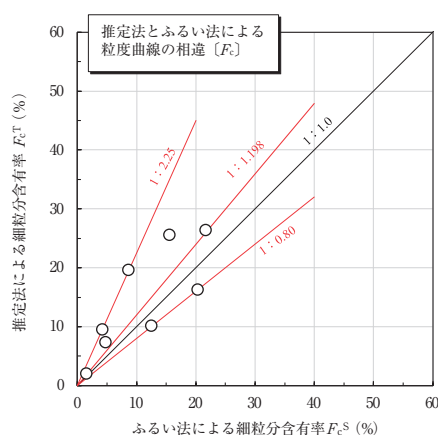


図5 推定法とふるい法による F_c の比較

次に図5より、 F_c^T の平均値は F_c^S よりやや大きく、分散が $F_c^T > F_c^S$ 側に大きく2倍程度となっていることがわかる。 F_c^T が $F_c^T > F_c^S$ の傾向にあるのは図7に概念的に示したように、推定された粒度曲線が画像解析による粗粒分だけの粗粒側粒度曲線を外挿的に推定されているためであり、ふり分析による粒度曲線Aに対して細粒側になりやすいためと考えられる。このような粒度分布の土質材料は地山掘削土など一般的な盛土材に多く見られる。逆に、 F_c^T が $F_c^T < F_c^S$ の傾向にあるのは、粒度曲線がある粒径範囲のものが多く、あるいは少ない階段状の粒度曲線Bのようになる場合であると考えられる。このような階段状の粒度分布は発破掘削によるトンネルズリなどの人工的な岩碎材などで多く見られる。

また図6より、ふるい法では沈降分析を行っていないため10%粒径 (D_{10}) が得られなかった試料がありデータが限定的であるが、分散が大きくうまく推定できない例が多い。理由は、 $U_c T$ がわずかの n の差により大きく変化するためである。しかしながら、実務的には締固めに適した粒度分布にあることの判定は $U_c > 80 \sim 100$ に相当する $n \leq 0.41 \sim 0.39$ により判定することで対応可能であると考えられる。

§ 4. 鉦澤ダムの品質管理に適用した例

4.1 鉦澤ダムの概要

本事例の鉾澤ダムは、標準断面を図8に示すように、有効堤高 $H_e=55.5\text{m}$ 、堤長 $L=392.0\text{m}$ 、堤体積 $V=132.25\text{万 m}^3$ 、貯留量 $Q=\text{約}305.0\text{万 m}^3$ の既設堤体を嵩上げし、 $H_e=71.0\text{m}$ 、 $L=485.8\text{m}$ 、 $V=295.18\text{万 m}^3$ 、 $Q=\text{約}844.4\text{万 m}^3$ に貯留容量を拡大したものである。既設堤体のゾーニングは中央コア型で、コアB、下流側フィルターC、上・下流側ランダムA・Dの各ゾーンからなる。嵩上げ堤体は堤体軸を31m下流側に移動させた

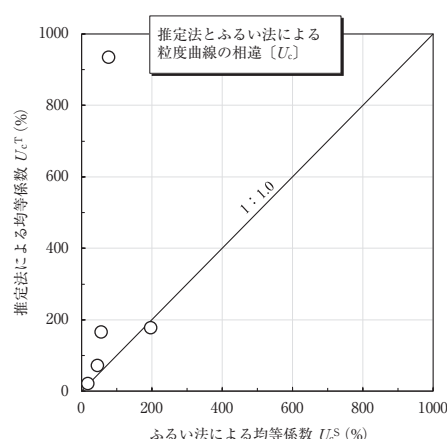
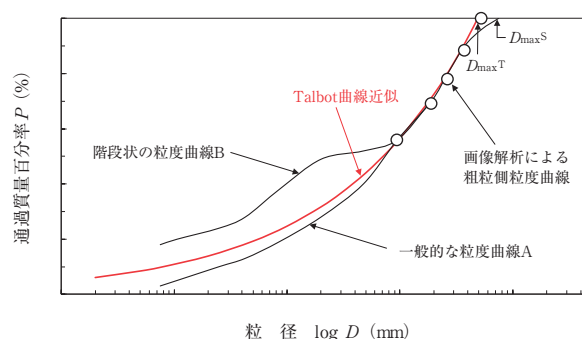
図6 推定法とふるい法による U_c の比較

図7 画像解析による細粒側粒度曲線の推定概念

外盛り型で、既設・新設コアゾーン間を接続しやすい傾斜コア型ゾーニングとしている。ランダムゾーンは貯留容量を確保するために貯留池上流端部に張り出した尾根部を土取場とした切土発生土により築造した。

4.2 ランダムゾーン D 材の粒度基準の設定

ランダムゾーンDは堤体の安定機能を受け持つ重要な部分なので、締固めに適した粒度分布にある盛土材を、空隙の少ない密な状態に締固めて、長期的に土粒子の細粒化による沈下や強度不足を引き起こさないようにする必要がある。盛土材としたゾーンD材は第三紀中新世の火山岩類である凝灰岩（赤森凝灰岩）地山からなる池上流端に張り出した尾根部を土取場とした切土発生土である。このため、D材は岩質が比較的硬質なため掘削時に塊状の粗粒分が残りやすく、スレーキングも生じやすいため、盛土材として利用するには最大粒径 $D_{\max}$ 、均等係数 U_c 、細粒分含有率 F_c についてそれぞれ基準値を設定して管理する事にした。

図9に土取場内の4箇所から採取した試料D1~D4について実施した粒度試験(JIS A 1204)の結果を示す。図中の記号(○、◇、□、△)はふるい法による粒度

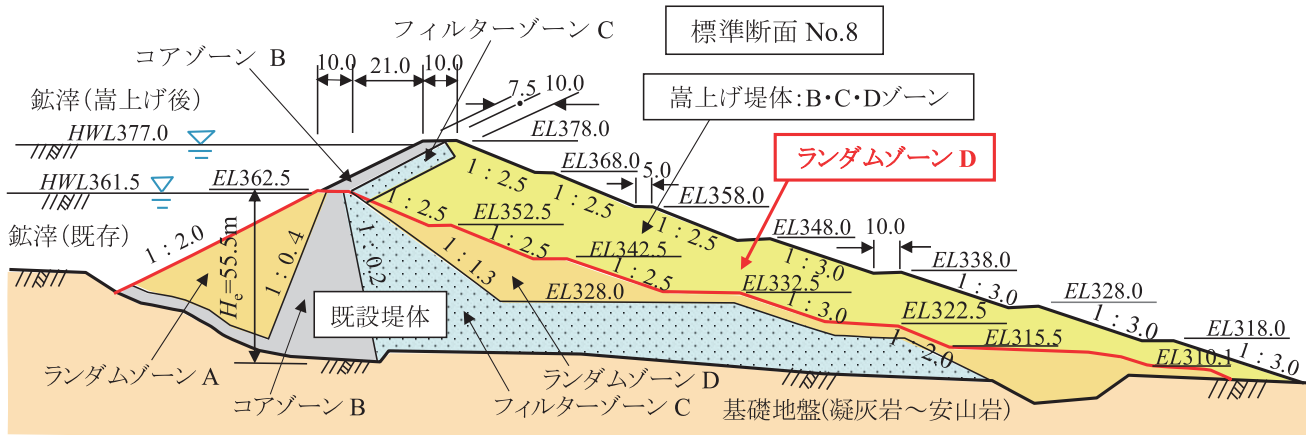


図8 HRK 鉦津ダムの標準断面図

曲線、赤色実線は推定法による粒度曲線範囲を示す。図から、D材は $D_{\max} = 53 \sim 75 \text{ mm}$ 、 $U_c \geq 25 \sim 100$ 、 $F_c = 1 \sim 8 \%$ であり、粒度分布もよく、細粒分も少ない状態にあることが分かる。締固め試験 (JIS A 1210) による盛土材の締固め特性は締固め曲線のピーク点のゼロ空気間隙曲線に対する位置からも、粒度分布が締固めに適した状態にあることが確認できた。したがって、実際に使用する盛土材がこのような粒度分布にあれば、十分な締固めが可能で、スレーキング性沈下も抑制できると考えられる。そこで、室内試験で使用した試料は実施工の盛土材と比較して大粒径の土粒子が除かれてしまうことを考慮して、実施工における品質規定は $U_c \geq 25 \sim 100$ 、 $D_{\max} = 100 \sim 300 \text{ mm}$ 、 $F_c \leq 6 \%$ に設定した。

4.3 ランダムゾーンD材の粒度管理結果

D材の粒度管理への推定法の適用性を確認するために、盛土材D221005 (Dの後の数字は試料の採取日を表す) を用いて試験盛土を実施し、締固め転圧前に採取した試料の現場粒度試験による粒度曲線 (○印)、19mmフルイ残留分の画像解析による粗粒分のみの部分的粒度曲線 (●印)、これをTalbot曲線近似して推定した粗・細粒全体の粒度曲線 (太実線) を図10に示す。図から、試験盛土材の推定粒度曲線は $D_{\max}$ をやや過小評価しているものの、現場粒度試験による粒度曲線の形状に近く、主要部をうまく近似できており実務的に適用できることがわかる。また、試験盛土材の粒度曲線が設定した粒度範囲にあることも確認できた。

築堤中におけるD材の粒度管理は、盛土材を撒出し・敷均した後の締固め転圧前の状態で採取した試料につ

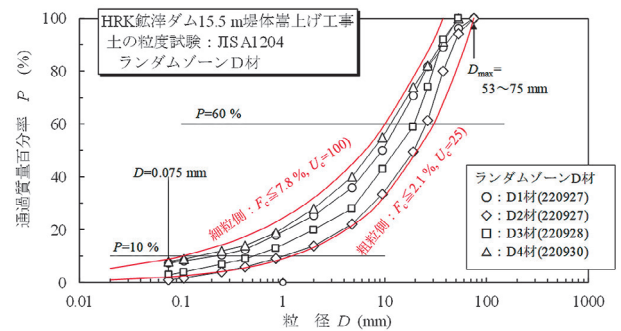


図9 ランダムゾーンD材の粒度分布

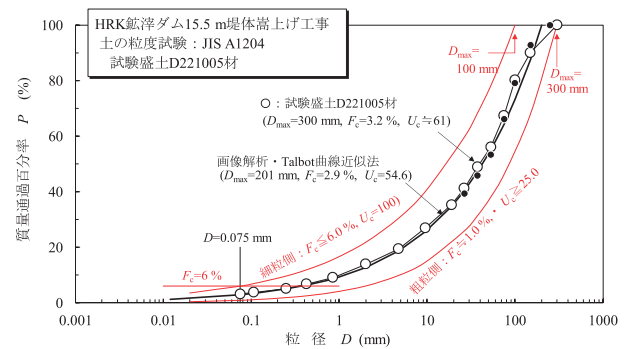
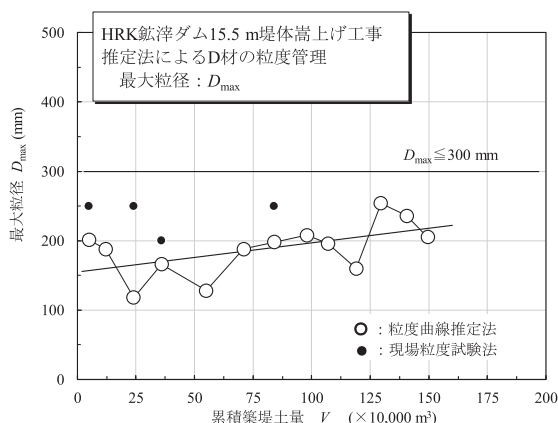


図10 試験盛土材の粒度分布 (推定法とふるい法)

いて粒度曲線を推定して粒度特性値 $D_{\max}$ 、 U_c 、 F_c を求めることで実施した。図11は施工中のD材の粒度管理試験における推定法から求めた $D_{\max}$ と累積築堤土量 V の関係 (○印) を示す。図中の●印は別途確認のために実施したふるい法による粒度試験による値である。また、図12は $U_c \sim V$ 関係 (○印) と $F_c \sim V$ 関係 (◇印) を示す。同様に図中の●印と◆印はそれぞれふるい法による値である。これらの図から、築堤中のD材の

図 11 D材の粒度管理 ($D_{\max}$)

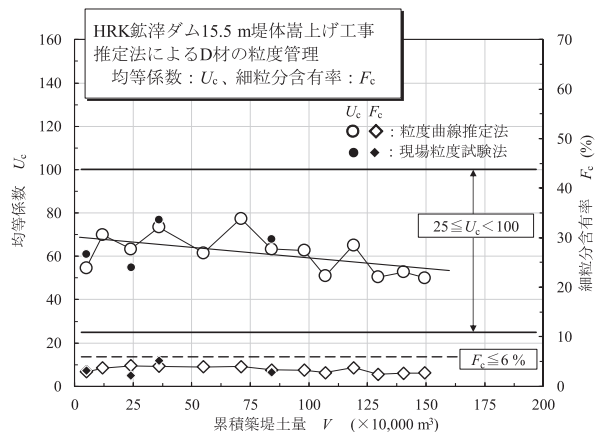
$D_{\max}$ 、 U_c 、 F_c はそれぞれ設定した基準を満足していたことがわかる。図中に平均線を示したように、 $D_{\max}$ は V に対して増加傾向に、 U_c と F_c は V に対して低下傾向を示しているが、これは土取り場の地山岩質が掘削深度とともに軟岩から中硬岩、硬岩へと変化し、掘削方法をリッパ掻き起こしのみから発破併用のリッパ掻き起こしに変えたことに起因していると思われる。

§ 5. あとがき

本稿は、盛土材の粒度特性を現場で簡単に把握することを目的として開発した画像解析技術を応用した粒度曲線推定法について、数種のモデル材料の試験を経て、その適用性を検討したものである。その結果、粒度曲線推定法は実務に十分適用できるレベルで粒度曲線を推定できることがわかったため、鉾津ダムの盛土材の粒度管理に適用した事例を併せて報告した。報告した事例では設定した粒度基準に対し、施工中の盛土材が基準を満足していたことを確認できた。今後、さらに実績を積み上げて確実な方法として確立したい。

参考文献

- 1) 例えば、藤崎勝利、黒沼 出、岡本道孝、川野健一：画像解析技術を用いた粒状材料の粒度解析システム、土木学会第66回年次学術講演会、Ⅵ-430、2011
- 2) 福島伸二、北島 明：Talbot曲線を用いた堆積軟岩盛土材の現場粒度管理法、土木学会第75回年次学術講演会、Ⅲ-252、2020
- 3) 仲沢武志、北島 明、新井智之、小島 秋、吉田尚史、福島伸二：画像解析技術を応用した盛土材の粒度曲線推定システム、土木学会第77回年次学術講演会、Ⅲ-79、2022
- 4) 北島 明、仲沢武志・新井智之、福島伸二、小島 秋：盛土材の画像解析とTalbot曲線近似を組合せた粒度曲線推定法の特長について、第59回地盤工学研究

図 12 D材の粒度管理 (U_c 、 F_c)

発表会、論文番号 [24-4-3-02]、2024

- 5) 北島 明、仲沢武志、新井智之、福島伸二、小島 秋、竹田 茂、田中知樹：画像解析とTalbot曲線近似を組合せた粒度曲線推定法による凍上抑制層材の粒度管理、土木学会第79回年次学術講演会、Ⅲ-146、2024

ひとこと

労働人口の減少が進む中、建設現場における効率化・省力化は喫緊の課題である。本技術がその一助になれば幸甚である。



北島 明