

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

株式会社フジタ 技術センター ○仲沢 武志・北島 明・新井 智之
 株式会社フジタ 東日本支社 小島 秋・吉田 尚史
 株式会社フジタ 土木本部 福島 伸二

§1. まえがき

盛土造成では、盛土材が締固めに適した粒度特性にあることの事前確認は盛土の品質確保のために重要である。特に、堆積岩系の盛土材は最大粒径が大きい、粒径が揃い過ぎているなど締固めに適した粒度特性にない場合には、締固めエネルギーが粒子破砕に費やされ、密度増加が不十分になるため、過大なスレーキング沈下を発生するなどの問題を引き起こしやすい。しかしながら、現場で盛土材の粒度分布を確認するには現場粒度試験を実施する必要があるなど、室内試験に比較して大量の試料のフルイ分けを伴うなど、実施回数に限界がある。盛土材の粒度曲線を現場で簡単に求めるには画像解析技術の応用が有力な手法であり、これまでに粒径が比較的揃った CSG 材においては画像解析技術を用いた粒度曲線計測システムの構築が試みられている¹⁾。そこで、本稿では粒径が広範囲に分布する盛土材が締固めに適した粒度特性（粒度曲線，最大粒径 D_{max} ，均等係数 U_c ，細粒分含有 F_c など）にあることを現場で施工に合わせて把握できるように、精度よりも現場での簡便性を重視した画像解析による粒度曲線推定法を検討し、その適用性について実地を検証した結果を紹介する。

§2. 画像解析による土粒子形状の認識と粒度曲線

盛土材の土粒子粒径は以下に示す方法を採用して求めることにした。まず、盛土材の土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、上方よりある一定の距離から撮影する。土粒子群の撮影画像の PC に読み取った状態を図 1 (a) に、土粒子群のうち 1 個分の土粒子を拡大したものを図 1 (b) にそれぞれ模式的に示す。土粒子形状はカメラ素子の濃淡で表現され、境界となる素子を読み取ることで形状の輪郭を図 1 (b) の赤線のように抽出する。抽出された輪郭内の面積は各画素単位で構成される領域面積を加算することで図 1 (c) のように算出する。算出された面積はピクセル単位にあるので、予め適切に設定した校正係数を使って実空間の面積に換算する。以上のことは、画像処理ライブラリーとして提供されている OpenCV²⁾ を使って、土粒子群の撮影画像を PC に取り込んでから

- ① 入力画像のグレースケール化後に 2 値化
- ② findContours 関数による各土粒子の輪郭を抽出（写真 1）
- ③ contourArea 関数による抽出した輪郭領域の投影面積を算出の手順で実施した³⁾。算出された面積はピクセル空間におけるものなので、撮影距離から予め設定される校正係数により物理空間に変換した面積 A を求め、 A から土粒子に対して適切な形状を仮定して粒径の近似値を求める。土粒子形状は図 2 に示す長径 a と短径 b の比が $m=a/b$ で、 a を軸とする回転楕円体を仮定し、土粒子の粒径 D は b として体積 V を求めた。画像解析から得られたある土粒子の A に相当する 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 値は土粒子形状の異なる数種類のモデル試料を画像解析して推定した粒度曲線の近似性に優れていた $m=1.25$ を採用した。試料の画像解析による粒度曲線は、各土粒子の D と V を個別に求め、さらにそれぞれの土粒子の V を粒度範囲毎に総和

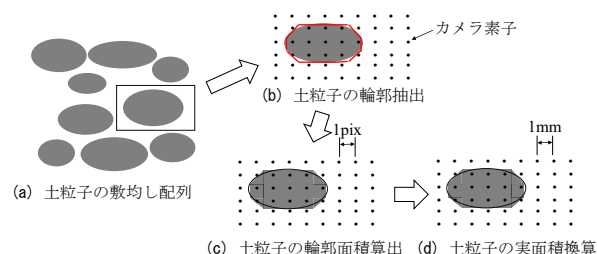


図1 画像解析による土粒子粒径の求め方



写真1 画像解析による盛土材の粒形認識例

してから、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、粒径範囲毎の体積比により求めた。

§3. 画像解析による盛土材の粒度曲線の推定法

盛土材は粗粒から細粒まで広範囲の土粒子を含んでいるので、粒径が比較的揃った骨材などと比較すると画像解析により粒径識別をうまくできない。そこで、盛土材試料はフルイ分けにより画像解析による粒径認識が可能な粗粒分と、それ以下の細粒分に分離し、粗粒分のみを画像解析により粒形認識を実施し、粒度曲線（質量百分率 P と粒径 D の関係）を求める。そして、粗粒分・細粒分を合わせた全体の粒度曲線は粗粒分のみを粗・細

キーワード：画像解析，盛土材，粒度曲線，フルイ分け

連絡先 〒160-8378 東京都新宿区西新宿 4-32-22 株式会社フジタ 東日本支社土木技術積算部 ☎ 030-5309-2100

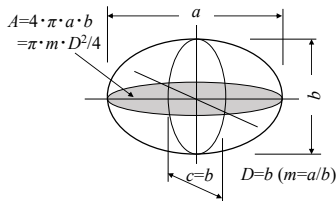


図2 土粒子形状の回転楕円体による近似



写真2 試験試料に用いた盛土材

粒分の質量比を考慮して変換した部分的な粒度曲線を求め、さらにこれを Talbot 曲線⁴⁾

$$P = (D/D_{max})^n \times 100 \quad (1)$$

により近似し U_c や F_c を求める。 n は粒径分布の良不良を示す指数である。式(1)を変形すると $P = \{100/(D_{max})^n\} \cdot D^n = P_i \cdot D^n$ となるから、 n は粒度曲線を累乗式により近似すれば得られ、 D_{max} は累乗式の係数 $P_i = 100/(D_{max})^n$ より

$$D_{max} = (100/P_i)^{1/n} \quad (2)$$

として算定できる。また、 U_c は 10% 粒径 D_{10} に対する $P=60\%$ 粒径 D_{60} の比 $U_c = D_{60}/D_{10}$ であるので

$$U_c = D_{60}/D_{10} = 6^{1/n} \quad (3)$$

により、 F_c は $D=0.075\text{mm}$ での P であるので

$$F_c = (0.075/D_{max})^n \times 100 \quad (4)$$

により算定できる。

§ 4. 現場盛土材の粒度曲線の画像解析による推定

画像解析による盛土材の粒度曲線推定法の現場での適用性を検証するために、試料として写真2に示すある造成工事における盛土材を用いた。造成地の地山は古生代ジュラ紀の付加体により形成された砂岩、頁岩、凝灰岩や、一部に石灰岩やチャートを含む多様な基盤からなり、試料には頁岩系の岩砕盛土材を用いた。

図3は盛土材試料約2kgのうち、9.5mm フルイに残留した粗粒分試料を画像解析して求めた粒度曲線 (○印) とこれを粗・細粒分の質量比により変換した粒度曲線 (○印)、粗粒分試料のフルイ分けにより求めた粒度曲線 (●印) をそれぞれ示す。図から、粗粒分試料の画像解析による粒度曲線とフルイ分けによる粒度曲線は、比較的良好一致しており、盛土材を粗・細粒分に分けて、粗粒分試料を用いた粒度曲線の推定に画像解析の適用性が高いことが分かる。図中の赤色の曲線は画像解析により得られた粗粒側粒度曲線を Talbot 曲線により近似したものである。

図4は盛土材のフルイ分けにより求めた粒度曲線と、図3に示した Talbot 曲線の比較を示す。両者は比較的良好一致を示し、画像解析による粗粒分試料だけの粒度曲線を Talbot 曲線近似した粒

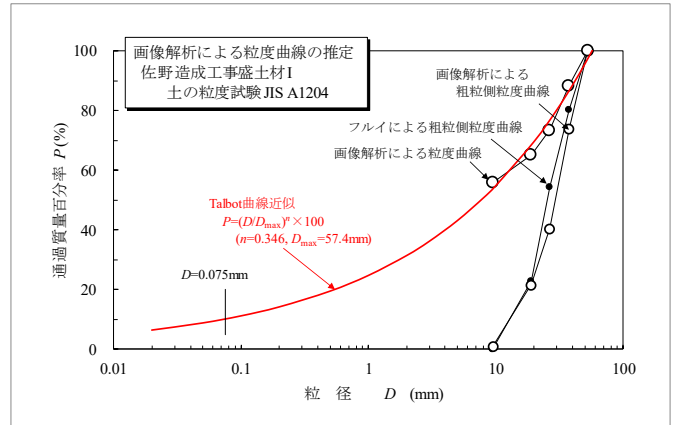


図3 盛土材の粒度曲線の画像解析と Talbot 曲線による推定

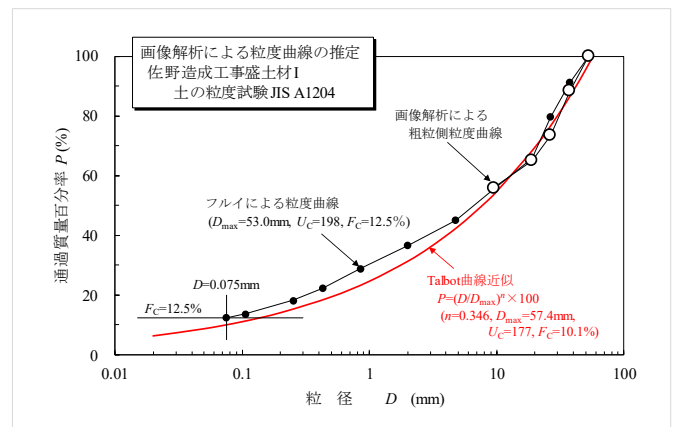


図4 盛土材の粒度曲線と画像解析による粒度曲線の比較

粒曲線は実際の盛土材の粒度曲線を実務的に問題ないレベルで推定できていると思われる。図中には参考のために画像解析による粗粒側だけの粒度曲線も示した。Talbot 曲線から得られる粒度特性値は式(2)～式(4)から $D_{max}=57.4\text{mm}$ (53.0), $U_c=177$ (98), $F_c=10.1\%$ (12.5) であるが(括弧内の数値はフルイ分けによる値)、実用的に問題のない値が得られることがわかる。留意点は、 U_c が n のわずかの差で大きく変化するが、締め固めに適した粒度特性にあることの確認 ($U_c \geq 80 \sim 100$ を目安にすると $n \leq 0.41 \sim 0.39$) が可能なので問題ないと考えている。

§ 6. あとがき

本稿は、盛土材の粒度曲線を現場で簡単に把握するために画像解析技術を応用した粒度曲線推定法について検討したもので、数種のモデル材料の試験を経て、現場での適用性を検証するためにある造成工事現場の盛土材の試験結果を示した。試験結果によると、検討した盛土材の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。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) 小枝正直, 上田悦子, 中村恭之: OpenCV による画像解析入門改訂 2 版, 講談社, 2017. 3) OpenCV-輪郭の特徴分析について, <https://pystyle.info/opencv-structural-analysis-and-shape-descriptors/> 4) 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.