

CSG 材料の品質管理合理化技術の開発

前田建設工業	正会員	○田中	麻穂	安井	利彰
前田建設工業	正会員	笹倉	伸晃	佐藤	友哉
前田建設工業	正会員	平川	彩織	中島	具威

1. はじめに

近年、普及が進んでいる CSG 工法は、台形 CSG ダムや CSG 防潮堤として適用されることが多く、当社においても、『平成 25 年度〔第 25-K5611-01 号〕浜松篠原海岸津波対策施設等整備事業（海岸）工事（総合管理及び CSG 製造工）』（以下、浜松防潮堤工事と称する）において、CSG 工法による防潮堤を建設中である。CSG 工法は、建設現場周辺で容易に入手できる材料に対してセメントと水を混合し、適切な品質管理を行うことで必要強度を確保するものである。材料の分級や粒度調整、洗浄は行わず粒度と単位水量の変動を許容するため、合理的な設計が可能であるという特徴がある。また、CSG 工法は、高速大量連続施工を前提とした工法であるが、従来的人力による品質管理方法では管理頻度に限界がある。更なる高速大量製造化に対応するためには、品質管理を合理化する必要がある。そこで、筆者らは、近年、建設分野においても適用が増えてきている画像処理を駆使した粒度分析技術¹⁾²⁾と水分計による含水比のリアルタイム把握技術を導入し、CSG の品質管理合理化システムを現場に適用することを目指している。本管理システムでは、高速大量製造に対応した適切な品質管理の実施、つまり、表面水量の管理頻度を大幅に増加させることが可能となり、品質管理結果を配合修正に逐次反映できる。これにより、CSG の品質向上にも繋がる。本論文では、本管理システムの画像処理技術を駆使した粒度分析技術についてのみ特筆し、現場実験により適用性を確認した結果について報告する。

2. CSG 工法における品質管理

CSG の品質管理は、台形 CSG ダムの管理方法³⁾に準拠して実施する。施工当日は、簡易法によって 1 時間に 1 回程度の頻度で粒度及び含水比を測定することで CSG 材の品質に変動がないかを確認している。浜松防潮堤工事で使用している CSG 材（阿蔵山段丘堆積物、以下段丘材）の平均粒度、最細粒度及び最粗粒度を図-1 に示す。段丘材の粒度試験の結果が、最細粒度及び最粗粒度の範囲内に存在している場合には、段丘材の品質に大きな変動がないと評価する。

3. 画像処理による粒度分析方法

段丘材をデジタルカメラで撮像した画像を図-2 に示す。これを二値化処理したものが図-3 である。このように段丘材を連続的に撮像した画像から必要な情報を抽出し、統計的手法により粒度分布を推定する。筆者ら

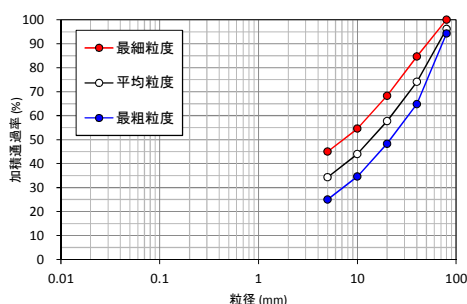


図-1 段丘材粒度範囲

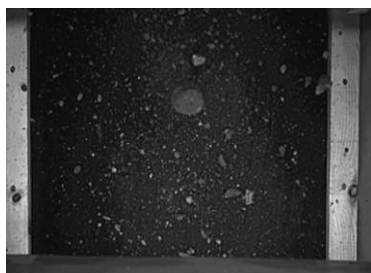


図-2 撮像画像

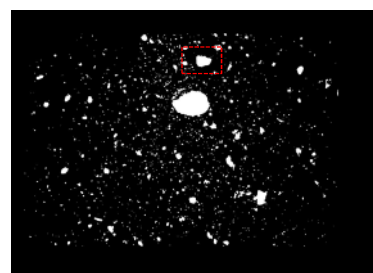


図-3 二値化処理画像

キーワード 画像処理, 粒度試験, CSG

連絡先 〒102-8151 東京都千代田区富士見 2 丁目 10 番 2 号 前田建設工業株式会社 TEL 03-5276-5166

が提案する粒度分布推定手法を以下に示す。

(1) 推定式(回帰式)の作成

- ①粒度分布既知の段丘材を対象にして画像解析を行い、各土粒子の投影面積と短径を得る。(図-4 参照) この作業を全撮像画像に対して繰返し、粒度毎の合計投影面積と平均短径を得る。
- ②粒度毎の合計投影面積を全投影面積(各粒度の合計投影面積の総和)で除して無次元化し投影面積率 S を算出する。
- ③簡易粒度試験結果より、各粒度の質量を全質量で除して無次元化し、質量率 M を算出する。
- ④粒度毎の平均短径を全粒度の平均短径の合計で除して無次元化し、平均短径率 D として算出する。
- ⑤目的変数を質量率 M 、説明変数を平均短径率 D 及び投影面積率 S の積 $S \times D$ として回帰分析を行い、粒度毎に推定式を以下のように作成する。

$$\text{推定式 } aS \times D + b = M \quad (a, b: \text{係数})$$

なお、CSG 材の性状が大幅に変化した場合は、適宜推定式を見直すこととする。

(2) 粒度分布の推定

デジタルカメラで撮像した画像を解析し、得られた平均短径率 D 及び投影面積率 S を上記の方法で作成した推定式に代入することにより各粒度の質量率 M を算出し、粒度分布を推定する。

4. 実験概要

実験装置の概要を図-4 に示す。ベルコン上に試料(30kg/回)を敷設した後、ベルコンを稼働させ、試料を図-5 中の矢印の向きに搬送・流下させる。流下中の試料をデジタルカメラで正面から連続撮像する。実験ケースを表-1 に示す。CASE1-1 では、ストックヤードに仮置きされている段丘材(粒度調整なし)を用いて画像処理による粒度分析を実施し、分析精度を確認する。品質管理上の最小監視粒径が 5mm であることを考慮し、5mm 未満の粒度については検討対象外とした。また、JIS 法ではなく簡易法により求めた粒度分布を推定対象とし、目標推定精度は既往の研究²⁾³⁾を参考にして、±5%以内とした。CASE1-2 では、段丘材を平均粒度、最



図-4 二値化画像拡大図

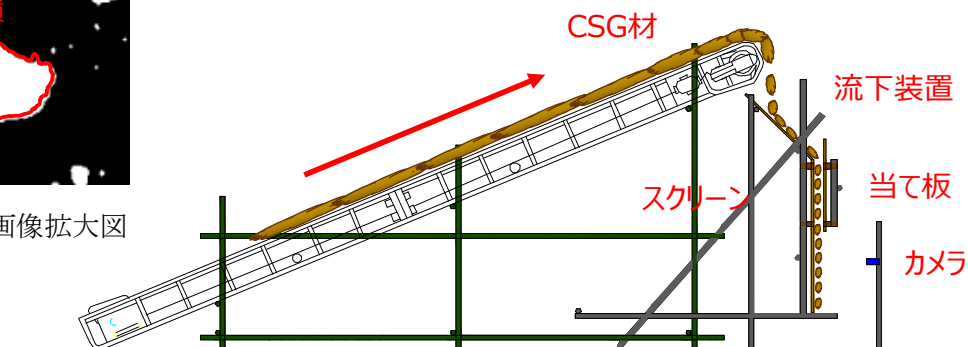


図-5 実験装置

表-1 試験ケース

CASE 名	CSG 材	粒度	含水比	
CASE1-1	阿蔵山段丘堆積物	未調整(自然粒度)	未調整(自然含水比)	6.8%
CASE1-2	阿蔵山段丘堆積物	平均・最細・最粗粒度	未調整(自然含水比)	6.8%
CASE1-3	阿蔵山段丘堆積物	規格外粒度	未調整(自然含水比)	7.3%
CASE2	泥岩	未調整(自然粒度)	未調整(自然含水比)	未試験
CASE3	阿蔵山段丘堆積物	未調整(自然粒度)	高含水比	10%

細粒度，最粗粒度に粒度調整した試料を作成し，精度5%以内で推定可能であるか確認する．今後，浜松防潮堤工事ではCSG材が泥岩に変わる予定である．そこで，CASE2において泥岩に対する画像処理による粒度推定技術の適用性を検証する．CASE3では，段丘材が高含水比の場合の適用性について検討を行う．降雨等の影響により，CSG材の含水比が自然含水比より高くなることもあり，高含水比試料に対する適用性について追加検討した．段丘材の自然含水比が6~8%程度であることを考慮し，自然粒度の段丘材の含水比を10%程度に調整して高含水比試料を作成した．

5. 実験結果

CASE1-1の実験結果を図-6に示す．図-6の実線は簡易法による粒度試験結果と推定値の通過質量百分率に差がないことを示しており，破線は $\pm 5\%$ の誤差範囲を示している．生じた推定誤差は最大4.5%であり，全ケースで $\pm 5\%$ 以内に収まっていることから，本論文で提案している推定アルゴリズムに基づいた粒度推定技術は目標を満足していると判断できる．

CASE1-2の実験結果を図-7に示す．図-7の実線は，それぞれ最細・平均・最粗粒度の簡易法による粒度試験結果であり，破線は推定結果を示している．それぞれの粒度で推定誤差は $\pm 5\%$ 以内に収まっていることを確認した．

CASE1-3の実験結果を図-8に示す．粒度管理範囲を逸脱している規格外試料であるが，推定誤差は $\pm 5\%$ 以内に収まっていることがわかる．CASE1の全実験ケースにおいて推定誤差 $\pm 5\%$ 以内を満足することに加え，段丘材の粒度分布がCASE1-2およびCASE1-3のように，ある程度ばらつきを有していても適用可能であることを実証できた．特に，品質管理の観点からは，CASE1-3のように粒度管理範囲から逸脱する規格外試料についても粒度推定し，評価できることが重要である．

CASE2の実験結果を図-9に示す．CASE1-1と同様の検討を泥岩について実施したところ，生じた誤差は最大4.0%となり全試料で誤差が $\pm 5\%$ 以内であることを確認した．CSG材が泥岩に変わっても，画像処理による粒度推定技術は適用可能と考えられる．また，CASE2の方がCASE1と比べて全体的に誤差が小さいのは，段丘堆積物と比べて泥岩の方が，5mm未満の土粒子が少ないからであると考えられる．

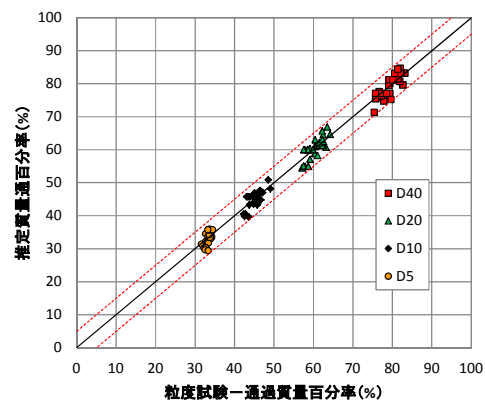


図-6 CASE1-1 試験結果

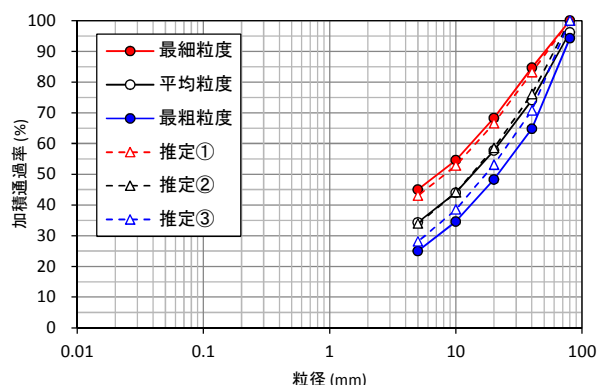


図-7 CASE1-2 試験結果

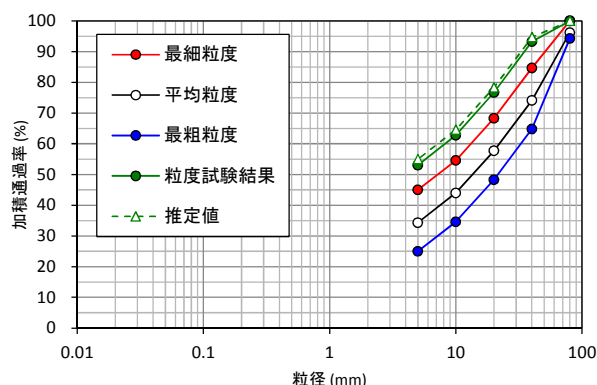


図-8 CASE1-3 試験結果

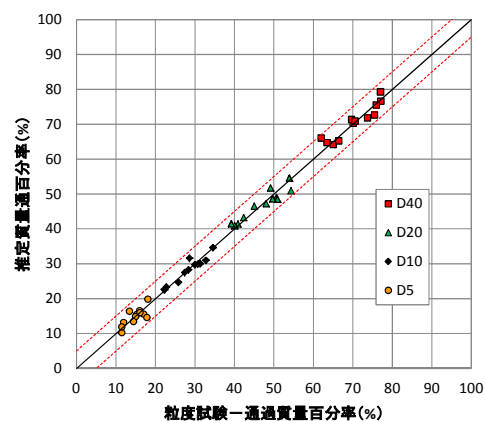


図-9 CASE2 試験結果

CASE3 で用いた試料の表面状態を写真-1 に示す。左は自然含水比の表面状態を示しており、右は高含水比の状態を示している。高含水比の試料は、細粒分が団粒化しやすい傾向がある。実験結果を図-10 に示す。図-10 中の黄色のプロットは高含水比試料の実験結果を示しており、特に高含水比試料は推定誤差が $\pm 5\%$ を満足していないことがわかる。これは既述の通り、細粒分が団粒化した影響によって、撮像画像が自然含水比付近の試料と異なる傾向を示したためであると考えられる。そこで、高含水比の試料については新たに回帰式を作成して粒度推定を実施した。推定結果を図-11、図-12 に示す。図-11 は自然含水比試料のみ、図-12 は高含水比試料のみの実験結果を表している。どちらも推定誤差は $\pm 5\%$ 以内であることがわかる。本検討では、高含水比と自然含水比というように分類したが、実際の運用時には事前にキャリブレーションを行って団粒化の影響が大きくなる含水比を判定する必要がある。その含水比を閾値として設定し、推定式を分けることによって、さらに推定精度を向上させることができる。

以上の実験結果から、CSG 材の品質管理において筆者らが提案する画像処理を駆使した粒度推定方法の適用性を検証することができた。

5. まとめ

本研究では、筆者らが提案する画像処理技術による粒度推定方法を用いて、浜松防潮堤工事で製造されている CSG 材の粒度推定を実施した。既述の通り、段丘材では全実験ケースにおいて目標推定精度 $\pm 5\%$ 以内を満足でき、筆者らが提案する方法の妥当性を確認した。また、CSG 材としての使用が予定されている泥岩についても本技術の妥当性を確認した。

今後、さらに推定精度の向上を目指すとともに別途検討中の含水比リアルタイム把握技術を合わせて CSG 製造プラントに実装、運用することによって CSG の品質管理の合理化及び品質向上を図る所存である。

参考文献

- 1) 藤崎ら：デジタルカメラ画像を用いた CSG 材の粒度変動監視システム，ダム工学，vol.23，No.1，2013
- 2) 片山ら：連続粒度解析システムの開発，大成建設技術センター報，第 47 号，2014
- 3) 台形 CSG ダム 施工・品質管理技術資料(平成 19 年 9 月)

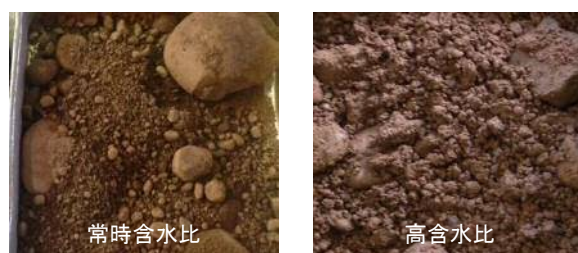


写真-1 CSG 材の状態比較

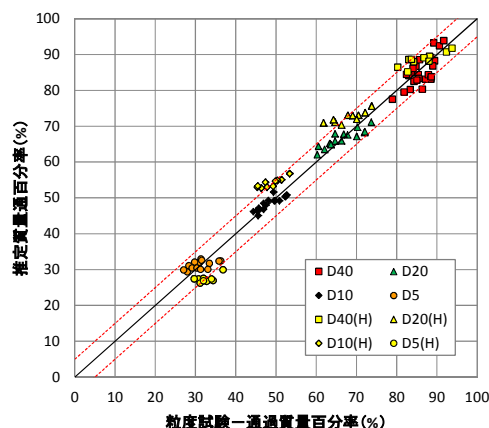


図-10 CASE3 試験結果①

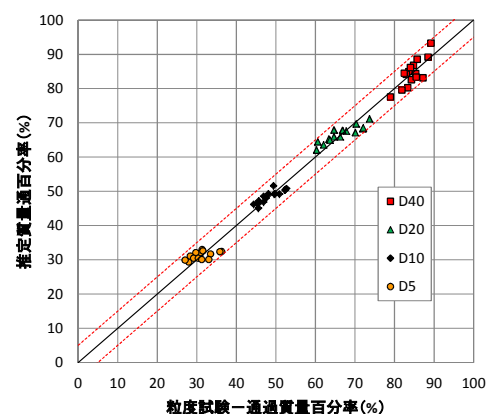


図-11 CASE3 試験結果②

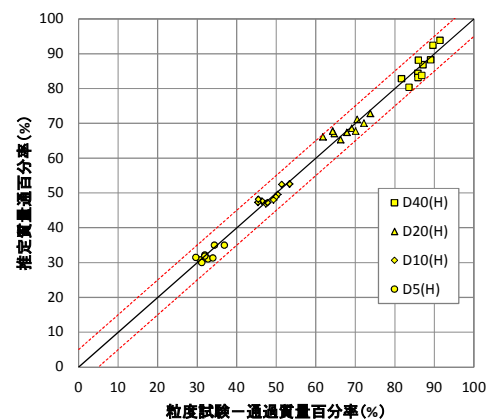


図-12 CASE3 試験結果③