

品質管理自動化システムを適用した CSG 工事の合理化

前田建設工業株式会社 正会員 ○田中 麻穂
前田建設工業株式会社 正会員 安井 利彰
前田建設工業株式会社 中島 具威
静岡県浜松土木事務所 袴田 充哉

1. はじめに

CSG とは Cemented Sand and Gravel の略称で、建設現場周辺で容易に入手できる材料にセメントと水を添加し混合した材料であり、近年では CSG を材料として土構造物を建設する CSG 工法の普及が急速に進んでいる。静岡県浜松市では、南海トラフ巨大地震に備え、浜名湖から天竜川河口付近までの延長 17.5km にかけて、CSG 工法による防潮堤整備事業が進められている¹⁾。材料が比較的入手しやすいという利点の他に、材料の分級や粒度調整、洗浄等を行う必要がなく、振動ローラー等の汎用機械により急速施工を実現できるという点が CSG 工法の急速な普及を後押ししている一因である。一方で、今後改善し得る課題も残している。CSG 工法の品質管理は、台形 CSG ダムの管理方法²⁾ に準拠して実施しており、施工当日には 1 時間に 1 回程度の頻度で粒度と含水率を簡易法によって計測し、材料特性の変動に対応している。しかし、現行の人力による品質管理方法では 1 時間に 1 回程度の頻度が限界であり、多大な労力と費用を要する。

近年、CSG 工法において、工期短縮の需要増加に応じるべく製造設備の処理能力向上を目指す動きが見られる。その結果、高速大量製造が実現するが、現行と同等の品質を確保するためには品質管理頻度の増加が求められる。

そこで、筆者らは、高速大量製造化に向けた品質管理自動化システムを開発し、現場の CSG 製造プラントに試験的に組み込んだ。本論文では、システムの概要および現場適用性検証結果について報告する。

2. 既往の粒度分布推定技術

2.1 粒度推定アルゴリズム

近年では、画像処理技術が建設分野にも幅広く取り入れられてきている。³⁾⁴⁾ 例えば、CSG 材を撮影した画像(図-1)に対して画像処理を施す(図-2、図-3)と、最終的に図3に示すような土粒子一粒ずつの短径、長径及び投影面積を評価することができる。この時、土粒子の粒度を判定するために短径が用いられることが多い。筆者らもまた、画像処理技術を用いた粒度分布推定技術の開発を行っている。筆者らの提案する推定アルゴリズムには、回帰分析を用いて CSG 材の粒度分布を推定するという特徴があり、全粒径に対する各粒度の合計面積の割合と各粒度の平均短径から、各粒度の質量割合を推定する。

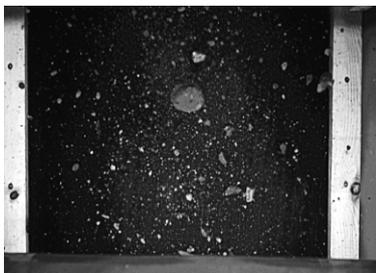


図-1 撮像画像例

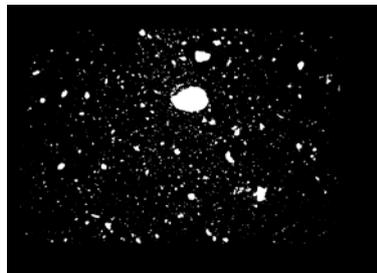


図-2 画像処理例

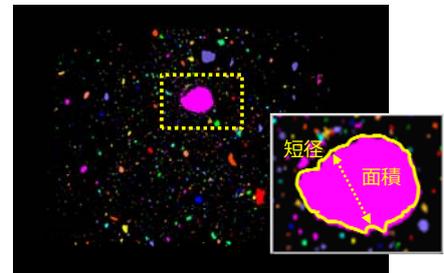


図-3 撮像画像例

2.2 粒度推定アルゴリズムの検証

前節において提案した粒度推定アルゴリズムの妥当性について、室内試験により検証した。試験装置の概要を図-4 に示す。1 試料 30kg とし、バルコン上に人力で敷均した後、バルコンを稼働させて試料を搬送し流下させ、流下中の試料をデジタルカメラで正面から連続撮影する。試験ケースを表-1 に示す。本試験では、砂礫質の阿蔵山段丘堆積物を対象に粒度分布推定を実施した。当社は、静岡県浜松市の防潮堤整備事業である『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)』及び『平成 27 年度 [第 27-K5601-01 号] 浜松市沿岸域津波対策施設等整備事業 (海岸) 工事 (舞阪工区 CSG 製造工)』の 2 工区において CSG の製造を担当している。両工区において、阿蔵山段丘堆積物は CSG 材として用いられている。写真-1 は、舞阪工区に設置した CSG 製造プラントの全景である。

CASE1 では、ストックヤードに仮置きされている CSG 材から無作為に採取した 10 試料を対象として、粒度推定を実施した。採取試料の粒度分布を図-5 に示す。CASE2 では、篠原工区で規定されている平均粒度、最細粒度および最粗粒度に粒度調整した試料を対象として粒度推定を行った。CASE3 では、高含水率の試料を対象として粒度推定を行った。また、各粒度推定結果は乾燥状態ではなく湿潤状態で求めた粒度分布と比較し、目標推定精度は既往の研究³⁴⁾を参考にし、 $\pm 5\%$ 以内とした。試験結果を図-6 から図-11 に示す。図-6 は、CASE1 の結果であり、簡易法による通過質量百分率と推定した通過質量百分率の関係を示している。図中の黒実線は、推定誤差が 0%，赤破線は $\pm 5\%$ であることを示しており、最大推定誤差が $\pm 5\%$ 以内に収まっていることがわかる。また、図-7 は、CASE2 の試験結果を示している。CSG 工法において、最細粒度と最粗粒度は使用可能な粒度範囲の上下限を示している。このように、粗粒側から細粒側までの幅広い範囲の材料の粒度を精度よく推定できることが、提案する粒度推定アルゴリズムを実運用する上での必要条件である。図-7 中の推定①の粒度分布は最細粒度、推定②は平均粒度、推定③は最粗粒度について推定した結果である。図-7 より、CASE2 において生じた推定誤差

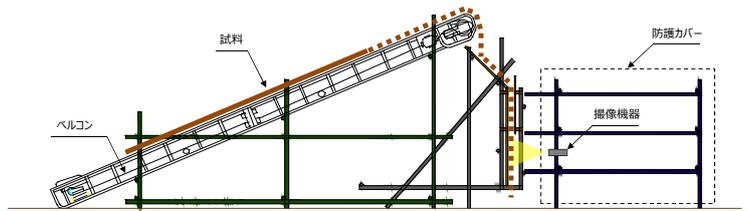


図-4 室内試験装置概要図

表-1 試験ケース

CASE	粒度分布	含水率 (%)
CASE1	粒度未調整	6.8
CASE2	① 平均粒度 ② 最細粒度 ③ 最粗粒度	6.8
CASE3	粒度未調整	10.0



写真-1 舞阪工区 CSG 製造プラント全景

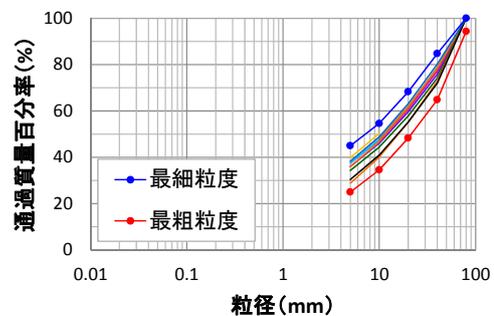


図-5 試料の粒度分布 (CASE1)

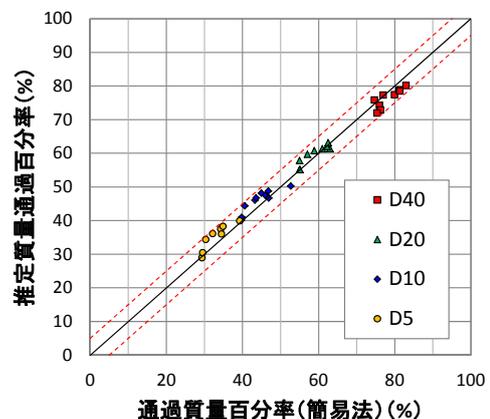


図-6 粒度分布推定検証結果 (CASE1)

は±5%以内に収まっており、目標値を満足している。

次に、CASE3 では、高含水比の CSG 材に対する粒度推定手法の適用性について確認した。試験結果を図-8 に示す。図-8 は、簡易法による通過質量百分率と推定した通過質量百分率の関係を示している。推定対象の中に含水率が高い試料が含まれている場合には、目標推定精度(±5.0%以内)を満足できず、本粒度推定アルゴリズムに課題があることがわかった。これは、高含水試料中に含まれる細粒分の団粒化が原因と考えられる。そこで、団粒化の影響を強く受ける高含水率の試料と常時含水率の試料とでそれぞれ推定式を設定し、材料の含水率に応じて粒度分布を推定した。検証結果を図-9 及び図-10 に示す。図-9 は常時の含水率試料のみ、図-10 は高含水率試料のみの推定結果を表している。どちらも推定誤差が±5%以内に収まっていることを確認でき、本手法を用いることで高含水率の材料にも適用することが可能となる。ここでは、高含水率と常時含水率というように分類したが、実際には、運用前にキャリブレーションを行い、推定式を使い分ける含水率の閾値を設定する必要がある。以上の検証試験より、提案する粒度推定アルゴリズムの妥当性を確認した。

3. 品質管理システムの開発

3.1 品質管理システムの構成

品質管理自動化システムを CSG 製造プラントに試験的に導入した状況を写真-3 に示す。本システムは、画像処理技術を適用した粒度分布推定技術とマイクロ波水分計による含水率計測技術を核として、品質管理の合理化を実現し、CSG 製造過程における生産性向上に貢献する。本論文では言及していないが、画像処理と同様にマイクロ波水分計においても



写真-3 品質管理システム

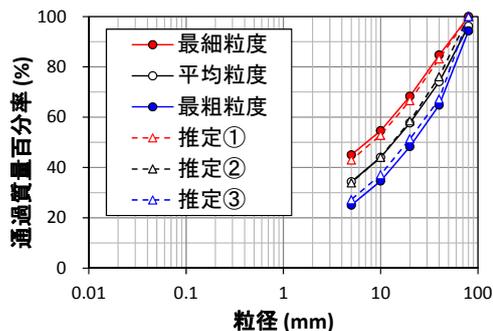


図-7 粒度分布推定検証結果 (CASE2)

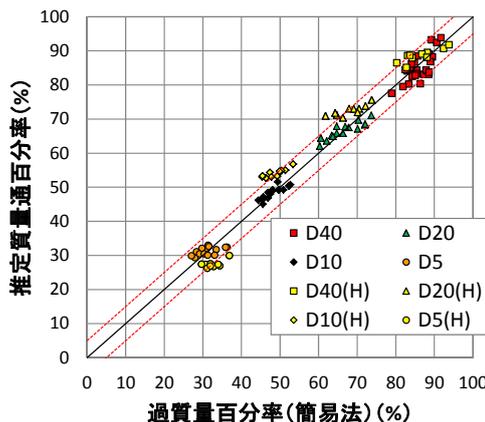


図-8 粒度分布推定検証結果 (CASE3)

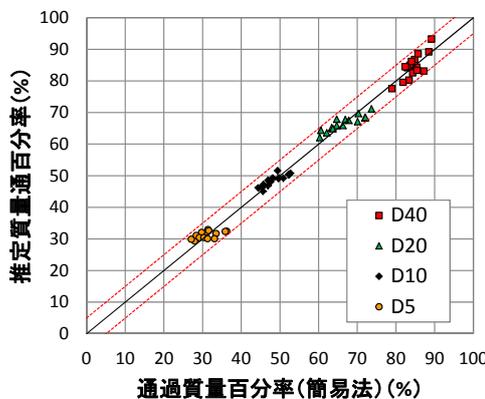


図-9 粒度分布推定検証結果 (常時含水率)

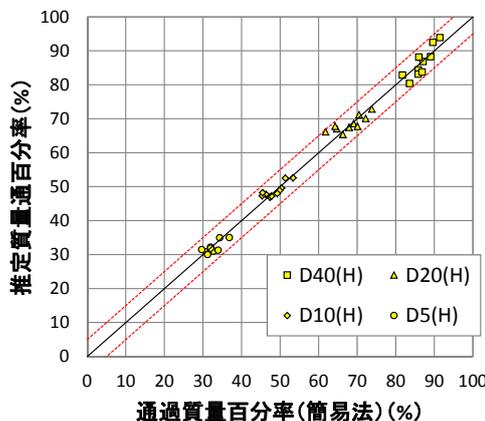


図-10 粒度分布推定検証結果 (高含水率)

適用性を検証している。また、本システムの特徴として、CSG 材を撮像する前に含水率を計測するプロセスを加えている。

3.2 現場適用性検証試験

本検証試験では、システムの全自動化に伴って粒度推定手法に問題が生じないか確認を行った。マイクロ波水分計は全自動化による懸念事項が少ないと考えられるため、画像処理による粒度分布推定技術のみを対象とした。ここでは、品質管理自動化システムによる粒度推定精度を確認し、本システムの現場適用性について検証した。本試験においては、粒度推定の対象を変更し軟岩とした。試験結果を図-11、図-12 に示す。

図-11 は、簡易法による通過質量百分率とシステムによって推定した通過質量百分率との関係を表している。本システムを適用した場合であっても、簡易法と比較して最大 3.6%の推定誤差に収まっていることを確認した。また、図-12 は、推定誤差を統計的に処理したものであり、誤差は正規分布すると考えられる。95%信頼区間 ($\mu \pm 2\sigma$) より推定誤差は概ね $\pm 4\%$ 未満である。以上の検証より、本品質管理自動化システムの現場適用性を確認した。

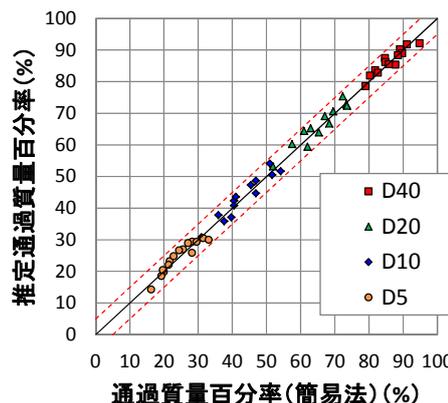


図-11 粒度分布推定検証結果

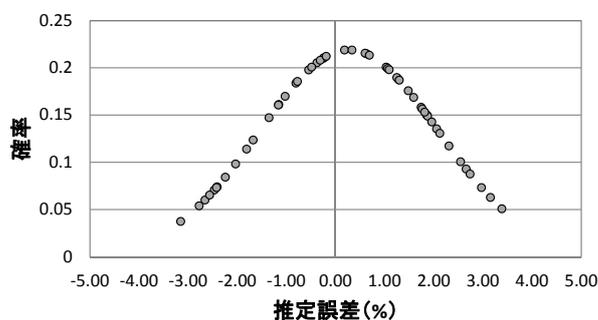


図-12 推定誤差の統計分析結果

4. まとめ

本研究では、CSG 材の高速大量製造に適応可能な品質管理を実現することを目標として、自動で CSG 材の粒度分布を推定する技術を開発し、マイクロ波水分計による含水率自動計測と合わせて品質管理自動化システムを構築した。本システムを現場に試験的に導入し適用性の検証を行った結果、粒度について簡易法に対して概ね誤差 $\pm 4\%$ 以内の推定精度を確保できた。また、阿蔵山段丘材のような砂礫質の材料だけでなく軟岩に対して目標の粒度推定精度を満足しており、種々の材料に対して本システムを適用できると考えている。

以上の検証結果より、本システムの適用性を確認した。このような品質管理自動化システムの運用方法はまだ明確な決まりがなく、試行段階であるが⁵⁾、特に連続式混合プラントの品質管理に対しては非常に有効であると考えている。今後、運用データを蓄積・分析することにより、本システムを活用した運用方法について検討・提案し、CSG 工事の更なる合理化に努めたい。

参考文献

- 1) 笹倉伸晃・安井利彰・松尾健二・田中麻穂・平川彩織・中島具威 (2015) : 浜松市沿岸域 CSG 防潮堤における CSG 工法の合理化・高度化技術, 前田建設技術研究所報, Vol.56
- 2) 台形 CSG ダム施工・品質管理技術資料 (2007)
- 3) 藤崎勝利・武井昭・黒沼出・川野健一 (2013) : 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
- 4) 片山三郎・江田正敏・栗原庸聡・小山哲・新井博之 (2014) : 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
- 5) 小林弘明・品川敬・藤崎勝利・黒沼出・川野健一 (2015) : 画像粒度モニタリングによる CSG 材破碎製造時の施工管理実績, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.70, VI-028