

台形 CSG ダム工事における CSG 材の全量管理技術

CSG 材表面水量全量管理システムを活用して試験員を 9 割削減

浅井 泰一郎・田中 恵祐・岡本 道孝

台形 CSG ダムの建設では、数十 kg の CSG 材を対象として簡易法と呼ばれる粒度試験と含水率試験を 1～2 時間ごとに行い、これらの結果を基にその表面水量を算出して CSG 製造時の給水量を調整している。CSG 工法は高速かつ大量に連続で施工することが前提であり、昼夜連続で実施されることが多く、これらの品質管理試験に相当数の人員や時間、労力を要する点が課題である。そこで、ICT ツールと計測デバイスを活用して、粒度と含水率の全量を監視する CSG 材表面水量管理システムを開発し、東北地方整備局発注の成瀬ダム堤体打設工事（秋田県東成瀬村）に適用した。本報では、本システムの概要、目的、適用効果について報告する。

キーワード：ダム、CSG、品質管理、省力化、表面水量、全量管理

1. はじめに

近年、我が国ではダム建設におけるコスト低減や環境保全に配慮した新しいダム形式として、材料の合理化、設計の合理化、施工の合理化を実現する台形 CSG ダムの施工実績が増えつつある。この CSG (Cemented Sand and Gravel) は、ダム建設地点近傍で採取可能な母材を最大粒径 80 mm に調整した砂礫材料（以下、CSG 材）にセメント、水を混合して製造される。CSG 材は現場で採取した材料から粒径 80 mm 以上の巨礫を除いて得られる材料であり、水洗いや分級は行わないことから CSG 材の粒度や表面水量に変動が生じる。締め固めた CSG の強度は、主に CSG 材の粒度、単位セメント量、単位水量に依存するため、設計強度を確保するには、CSG 材の粒度と表面水量の変動を考慮する必要がある¹⁾。そのため、1～2 時間ごとに粒度試験と含水率試験（以下、従来法）を行い、これらの結果を基に CSG 材の表面水量を算出して CSG 製造時の給水量を調整している。また、CSG 工法は高速かつ大量に連続で施工することが前提であり、昼夜連続で実施されることが多く、これらの品質管理試験に相当数の人員や時間、労力を要する点が課題である。

そこで、筆者らは従来法試験の省力化を目的として、AI 画像粒度モニタリング[®]（以下、本モニタリング）による粒度管理技術²⁾と近赤外線水分計による含水率管理技術³⁾を組み合わせた CSG 材の表面水量

全量管理システム（以下、本システム）を開発した。本システムは、2023 年度に東北地方整備局発注の成瀬ダム堤体打設工事（秋田県東成瀬村）にて試験運用を行い、2024 年度から従来の品質管理試験の代替技術として運用が開始された。本報では、本システムの概要と 2023 年度に得られた従来法と本システムの比較結果、2024 年度の運用実績について報告する。

2. 本システムの概要

(1) システムの概要

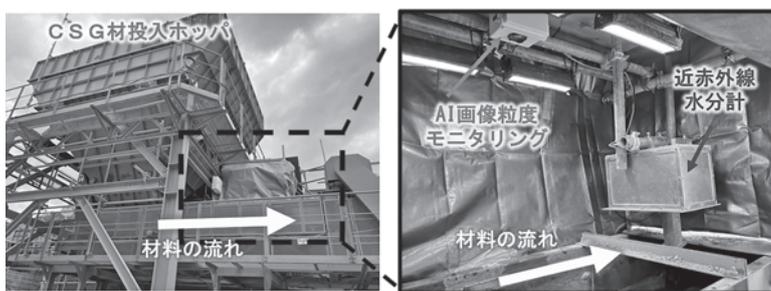
本システムは、本モニタリングによる粒度分布と近赤外線水分計による含水率のデータを使用して表面水量を算出し、CSG 配合表を自動出力するシステムである。成瀬ダムでは、CSG 製造プラント内のベルトコンベア上に設置した本モニタリングと近赤外線水分計により、CSG 材の粒度と含水率が約 3 秒に 1 回の頻度で測定され、プラント制御室内の PC にデータが送られ、CSG 材の表面水量が自動で計算される。CSG 製造プラントの全景を写真—1 に、測定システムの設置状況を写真—2 に示す。

(2) 本モニタリングによる粒度測定技術

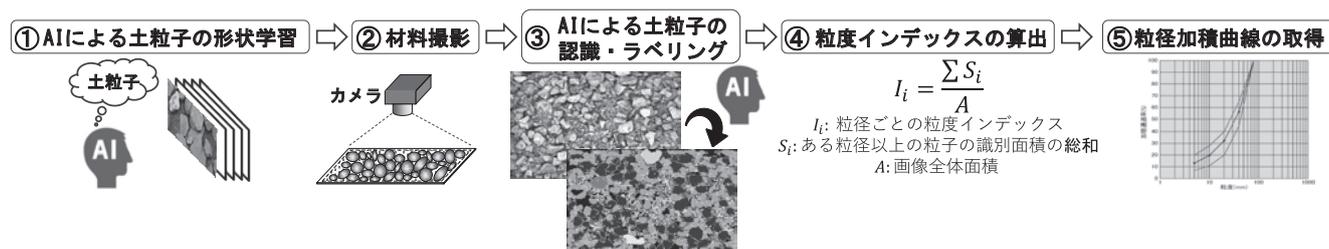
本モニタリングは、従来の画像解析技術による地盤材料の粒度をモニタリングする技術⁴⁾に AI による土粒子判定処理を導入することで、実用性を飛躍的に向上させた技術である。本モニタリングの概要を図—1



写真一 1 CSG 製造プラント全景



写真一 2 測定システムの設置状況



図一 1 本モニタリングの概要

に示す。あらかじめ土粒子の形状や色調を機械学習した AI が撮影した画像から瞬時に土粒子を認識して粒径区分ごとに識別する。画像上での各土粒子の大きさ（ピクセル数）を基に、撮影画像全体に占める土粒子の面積の割合（以下、粒度インデックス）が算出される。この粒度インデックスと加積通過率の相関関係を事前に取得しておくことで、粒度インデックスから粒径加積曲線を得ることができる。

(3) 近赤外線水分計による含水率測定技術

近赤外線水分計による含水率測定技術は、水が特定の波長の近赤外線を強く吸収する性質を利用し、被測定対象物に近赤外線を照射した際に、これが吸収される度合い（吸光度）を測定することで対象材料の含水率を非破壊かつ瞬時に評価する技術である。式（1）の吸光度と含水率の相関関係（以下、検量線）を事前に求めておくことで、近赤外線の照射とほぼ同時に材料の含水率を得ることができる。近赤外線水分計のキャリブレーション状況を写真一 3 に示す。検量線の切片ならびに偏回帰係数は、炉乾燥法で測定した含水率と近赤外線水分計で測定した吸光度の関係から重回帰分析によって求める。

$$w_{NIR} = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n \quad (1)$$

ここで、 w_{NIR} ：近赤外線水分計で測定した含水比、 a_0 ：検量線の切片、 $a_1 \sim a_n$ ：各吸光度に対する偏回帰係数、 $X_1 \sim X_n$ ：各波長帯における吸光度



写真一 3 近赤外線水分計キャリブレーション

(4) 本システムの概要

CSG の製造中は、1日に1回の頻度で密度および吸水率試験を、1～2時間に1回の頻度で従来法を行い、表面水量を算出することが義務付けられている¹⁾。このとき、JIS A 1109 および JIS A 1110 に準拠して行う CSG 材の密度および吸水率試験は、5 mm、10 mm、20 mm、40 mm ふるいに残留した試料、および 5 mm ふるい通過試料の計 5 つの粒径区分ごとに試験を行っている。各粒径区分の CSG の表乾質量に、表面水率を乗じて各粒径区分の CSG 材の表面水量を求め、これを合計して CSG 材の表面水量を算出する。本システムでは、従来法の代替として本モニタリングによる粒度と近赤外線水分計による含水率の全量データの 15 分移動平均値⁵⁾を用いて表面水量を算出する。

本システムの概要を図-2に示す。CSG材の粒度と含水率のデータがプラント制御室内の配合表計算PC内のデータベースに格納される。配合表計算PCがCSG製造管理サーバにアクセスしてCSGの製造状況を参照することでCSG製造中のデータのみ表面水量の計算を行う。配合表は最終的にクラウド上にアップロードされ、複数の工事関係者で共有できる。また、粒度分布や表面水量の経時変化もクラウド上で可視化しており、携帯端末などからもその変動傾向を監視可能としている。

3. 本システムの試験運用時の測定結果と従来法との精度検証

成瀬ダムのCSG製造設備において本システムを試験運用し、測定結果と従来法との比較を行った。当工事では段丘堆積物（以下、段丘材）と原石山破碎材（以下、破碎材）の2種類を混合してCSG材としている。

本節では、2023年9月20日午前0時～10月3日午前0時の計13日間におけるCSG材2種類の段丘材と破碎材の全量データについて述べる。

(1) 本モニタリングによる粒度分布

本モニタリングによる計測結果の一例として、40mmの加積通過率の経時変化を図-3に示す。灰色の網掛けは、材料製造を停止していた時間帯または同ラインが停止していた時間帯である。全体的に規定の粒度幅を満足していることが確認できる。また、本モニタリングで得られた加積通過率と従来法で測定した粒度分布の加積通過率の比較を図-4に示す。2種類のCSG材ともに、従来法との加積通過率の相違はおおよそ5.0%程度であり、十分な測定精度を有している。

(2) 近赤外線水分計による含水率

近赤外線水分計で測定した含水率の経時変化を図-

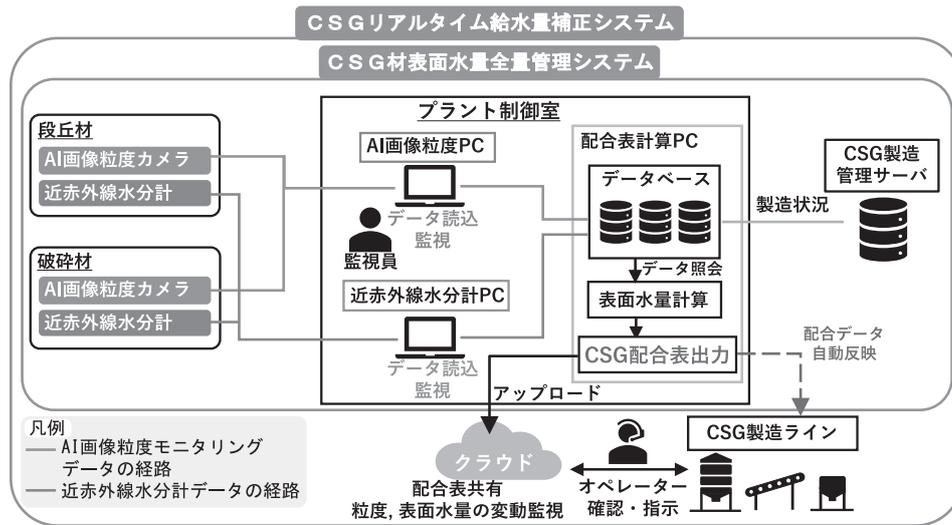


図-2 本システムの構成

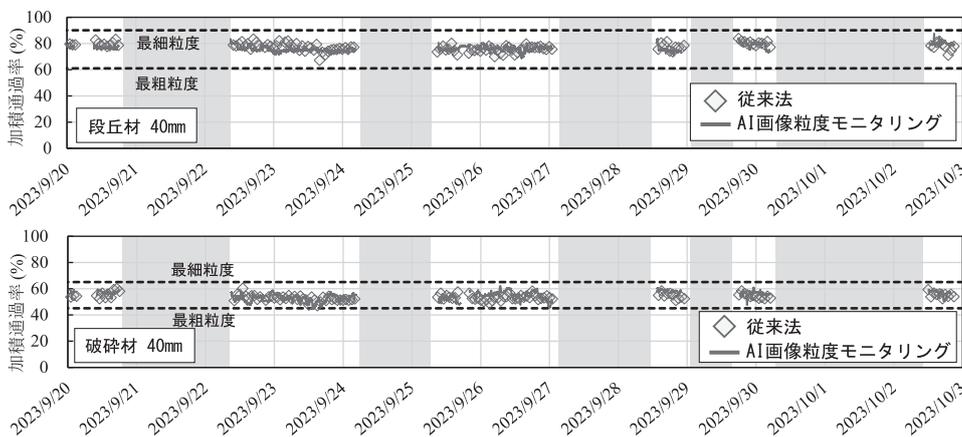


図-3 本モニタリングから得られる加積通過率

5に、近赤外線水分計で測定した含水率と従来法で測定した含水率との比較を図-6に示す。灰色の網掛けは、材料製造を停止していた時間帯または同ラインが停止していた時間帯である。従来法と比較して、近赤外線水分計による含水率の変動傾向は同様であり、CSG材の含水率をリアルタイムに監視できることを確認した。また、2種類のCSG材ともに、従来法との含水率の相違は概ね1.0%程度であり、十分な測定精度を有していることを確認することができた。

(3) 本モニタリングと近赤外線水分計の測定データから算出した表面水量

本モニタリングによる粒度分布と近赤外線水分計で測定した含水率から算出した表面水量の時系列データを図-7に、従来法で求めた表面水量との比較を図-8に示す。2種類のCSG材ともに、本システムで算出した表面水量の変動傾向は、従来法で算出した表面水量の結果とほぼ同等で、その水量の差も小さく、概ね±7.5 kg/m³に収まっている。これより本システムの測定精度はCSG製造管理に必要な性能を満足していることが分かる。以上より、当技術を用いると1~2時間に1回の従来法で捉えることが難しい短周期の材料変動を連続的に監視することができる。

4. 本システムの導入効果

本システムの試験運用結果から従来法と同等の精度で測定可能であると確認できた。この結果から本システムによる計測結果を基にCSGの配合設定が可能と判断され、2024年4月から従来法の代替として本システムによる品質管理が採用された。

従来法による品質管理はCSG材の品質の安定期に

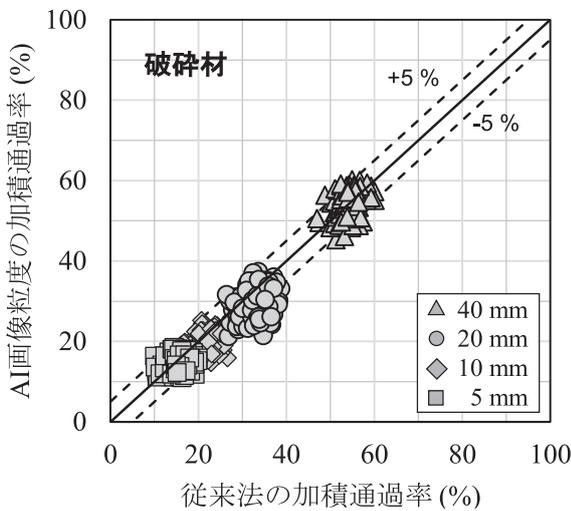
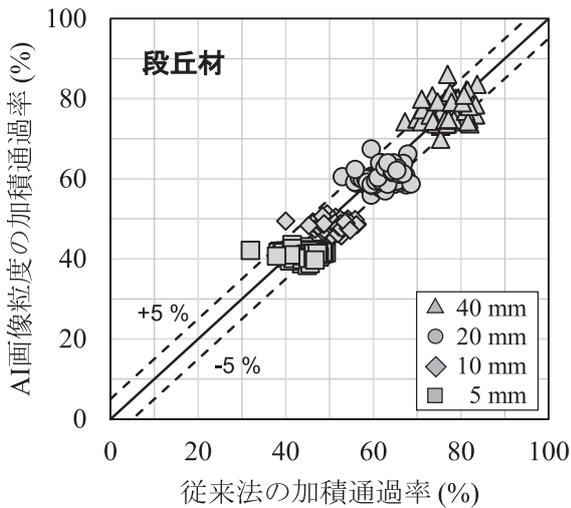


図-4 本モニタリングと従来法の比較

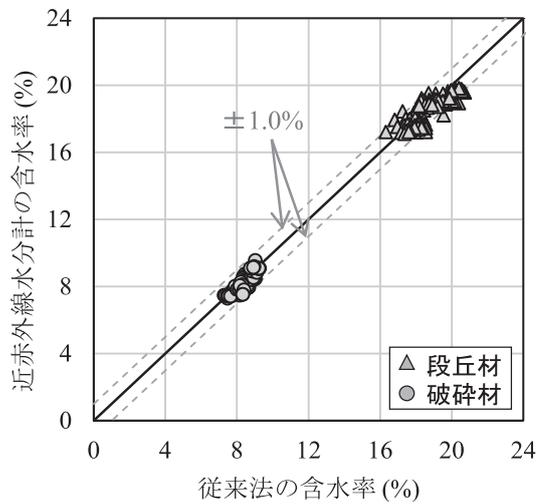


図-6 近赤外線水分計と従来法の含水率比較

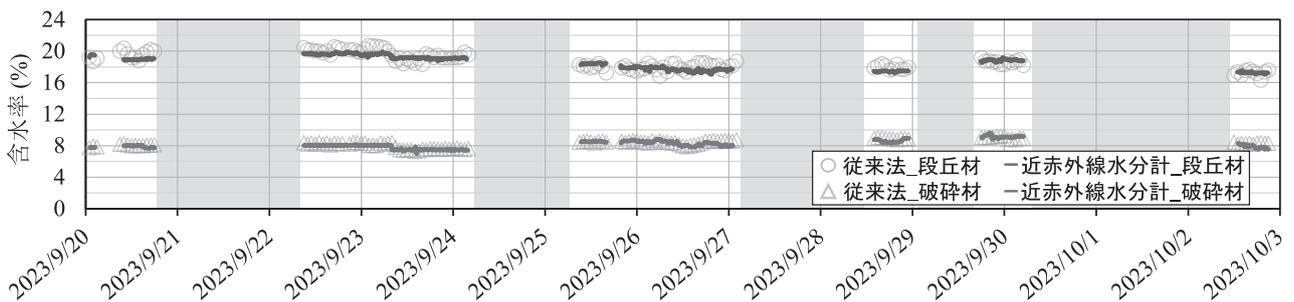
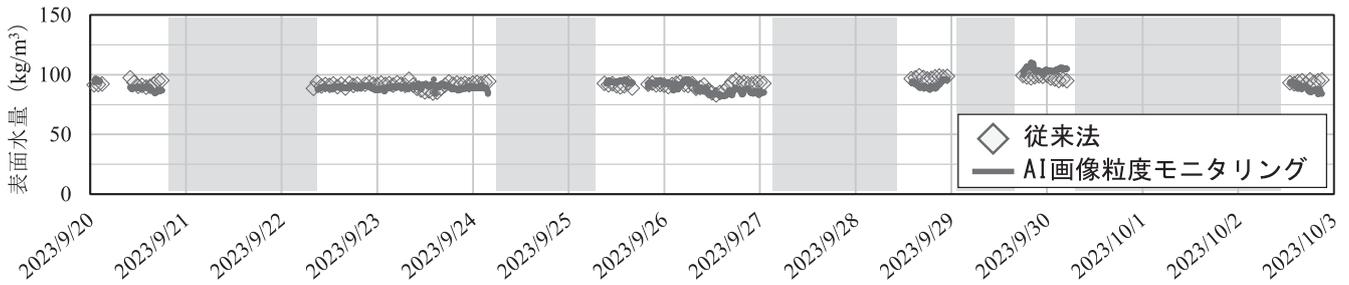
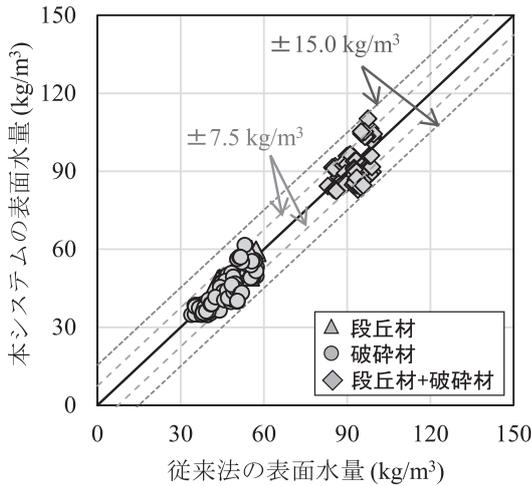


図-5 近赤外線水分計で得られる含水率



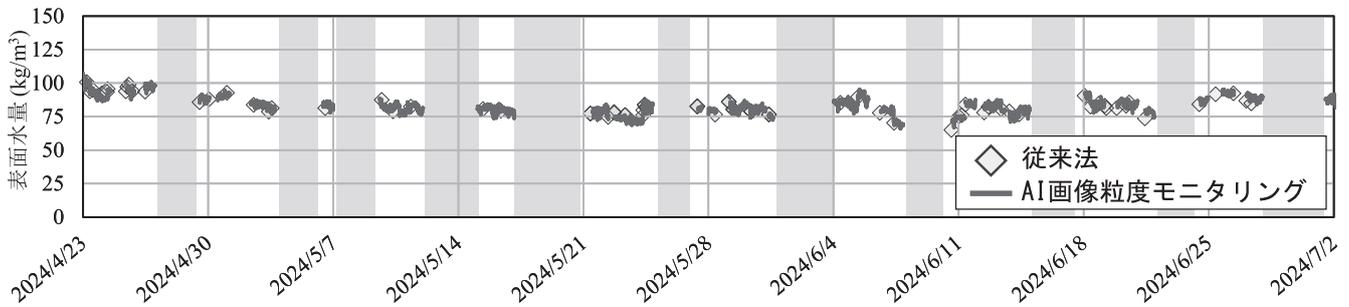
図一七 本システムから得られた表面水量



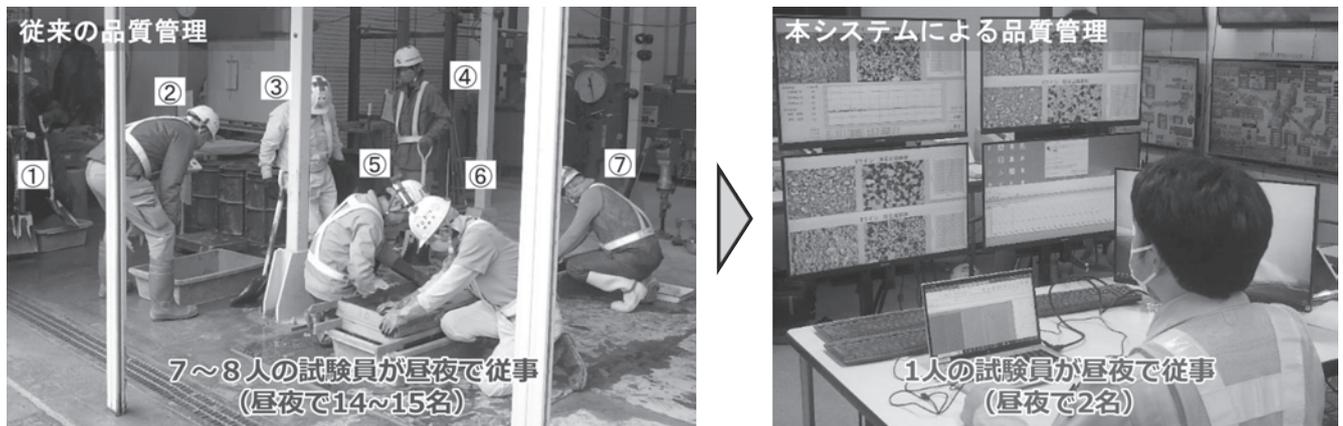
図一八 本システムと従来法の表面水量の比較

は2時間に1回であったが、運用開始後は1時間に1回の頻度で配合切り替えを実施している。2024年4月23日午前0時～7月2日午前0時の計70日間における表面水量の全量データを図一9に示す。本システムによる運用開始後も1日に1回従来法を実施している。従来法と比較して、本モニタリングによる粒度分布と近赤外線水分計による含水率から算出した表面水量は従来法と同等であることが分かる。

図一10に従来法による品質管理の様子と本システムによる品質管理の様子を示す。従来法で品質管理を行っていた場合、試験室の稼働に昼夜で14～15名の試験員が必要であったが、本システムの導入により、監視員を2名に削減し、品質管理業務に係る人員につ



図一九 本システム運用開始後の表面水量時系列データ



図一十 従来法から本システムへの品質管理の移行

いて約9割の省力化を実現した。また、従来法では数十kgの材料を対象とした試験を1～2時間ごとに実施して表面水量を算出していたが、本システムの導入により約3秒ごとに粒度、含水率を自動で取得することによって、CSG材全量を対象とした品質管理も実現した。

5. おわりに

成瀬ダム堤体打設工事において、CSG材の品質管理の省力化を目的として2023年にCSG材の表面水量全量管理システムを試験運用した。その結果、CSGの製造管理に用いるCSG材の表面水量では従来法と同等の精度であることから、CSGの品質を確保する上で十分な精度を有すると確認できた。当現場では、この結果を受けて2024年から本システムを品質管理として採用し、CSGの品質管理業務に係る人員の削減と省力化を実現した。また、粒度分布と含水率を約3秒に1回測定することで材料の全量管理を実現した。これによって材料の品質変動を高頻度に把握することが可能となり、CSGの品質の安定化にも寄与できると考えられる。

J C M A

《参考文献》

- 1) (財)ダム技術センター：台形CSGダム設計・施工・品質管理技術資料, pp.215-222, 2012.
- 2) 福島陽, 藤崎勝利, 岡本道孝, 小原隆志, 岡本遥河, 小林弘明, 田中恵祐：AI画像粒度モニタリングシステムによるCSG材の粒度分布の全量管理, 土木学会第78回学術講演会, VI-652, 2023.
- 3) 藤崎勝利, 榎谷麻衣, 福島陽, 笹岡里衣, 岡本道孝, 小原隆志, 小林弘明：近赤外線水分計によるCSG材の含水率全量管理, 土木学会第78回学術講演会, VI-651, 2023.
- 4) 藤崎勝利, 川野健一, 黒沼出, 武井昭：デジタルカメラ画像を用いた土質材料の粒度変動監視システム, 地盤工学会誌, Vol.62, No.8, Ser. No.679, 2014.
- 5) 福島陽, 榎谷麻衣, 藤崎勝利, 小原隆志, 岡本遥河, 小林弘明, 田中恵祐, 岡本道孝：AI画像粒度モニタリングシステムによる粒度変動の時系列分析, 第58回地盤工学研究発表会, No.12-12-2-07, 2023.

【筆者紹介】

浅井 泰一郎 (あさい やすいちろう)
鹿島建設㈱
技術研究所
土質・地盤グループ



田中 恵祐 (たなか けいすけ)
鹿島建設㈱
技術研究所
土質・地盤グループ



岡本 道孝 (おかもと みちたか)
鹿島建設㈱
技術研究所
土質・地盤グループ

