

成瀬ダムにおけるCSG材の品質管理業務の省力化と全量検査の適用

鹿島建設(株) 正会員○田中 恵祐 正会員 岡本 道孝
正会員 浅井 泰一郎 正会員 小林 弘明
正会員 大井 篤 正会員 榎谷 麻衣
国土交通省東北地方整備局 菅原 崇之 佐藤 尚司

1. はじめに

盛土工事では要求品質を確保するために、盛土材料の粒度や含水比が規定されている。また、近年実績を積み上げている我が国発の新しいダム形式である台形CSGダムの施工では、CSG (Cemented Sand and Gravel) の高速大量連続施工を前提としており、昼夜連続でのCSGの製造と打設を実施することが求められる。CSGは、CSG材と呼ばれるダムサイト近傍で採取される最大粒径 80mm の砂礫材料にセメントと水を混合して製造される。その際、1~2時間に1回、質量数十kgのCSG材を対象として粒度試験と含水率試験（以下、従来法）を行い、これらの結果をもとに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。この従来法試験の実施に相当数の試験員と時間を要している。

筆者らは、この従来法試験の省人化と配合調整の自動化を通じた品質管理業務の合理化を目的として、AI画像粒度モニタリング[®]による粒度測定技術²⁾と近赤外線水分計による含水率測定技術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。本報では、本システムの成瀬ダム堤体打設工事（国土交通省東北地方整備局，秋田県東成瀬村）での試適用実績と導入効果について報告する。

2. 要素技術の概要

(1) AI画像粒度モニタリングによる粒度測定技術

AI画像粒度モニタリングは、従来の画像解析技術を用いた地盤材料の粒度モニタリング⁴⁾にAI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。AI画像粒度モニタリングの概要を図-1に示す。AIは、撮影された地盤材料の画像から土粒子を認識し、各土粒子をラベリング（個々の土粒子を構成する画素群をグループ化）するまでを担う。その後、粒径区分ごとに粒度インデックス（対象粒径以上の粒子の投影面積の総和が、画像全体の面積に占める割合）を算出する。粒度インデックスと各粒径区分の加積通過率と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取得できる。

機械学習の実施例を図-2に示す。薄く敷き均したCSG材をカメラで撮影し、粒子を拡大した画像から粒子の輪郭を抽出し、それらを教師データとして使用した。土粒子の抽出にはGrabCut法⁵⁾を用いて、教師データの作成を可能な限り省力化した。機械学習量の異なる解析結果例を図-3に示す。一方のAIには17,000データ、もう一方のAIには37,000データを機械学習させている。AI画像粒度モニタリングで評価した粒径加積曲線は別途実施した従来法の粒度試験結果と概ね一致しており、教師データを17,000データより増やしても粒度分布の測定精度は変化しないことがわかる。なお、教師データの最適な量については、今後の検討課題と考えている。

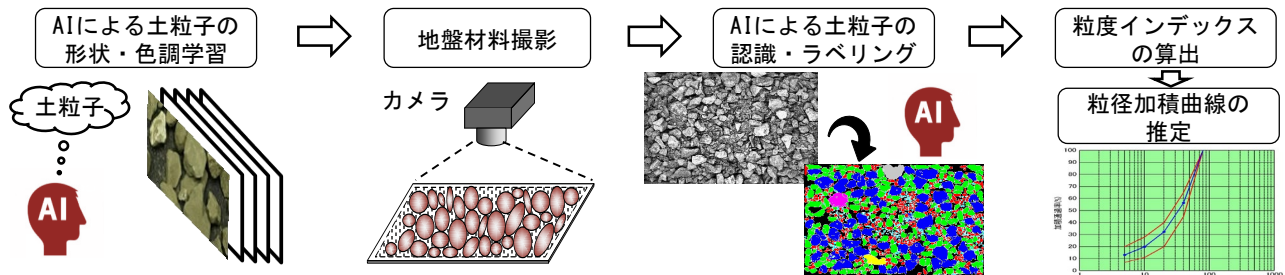


図-1 AI画像粒度モニタリングの概要

キーワード 品質管理, 全量検査, CSG, 表面水量, 省人化

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株)技術研究所 TEL 042-489-1111

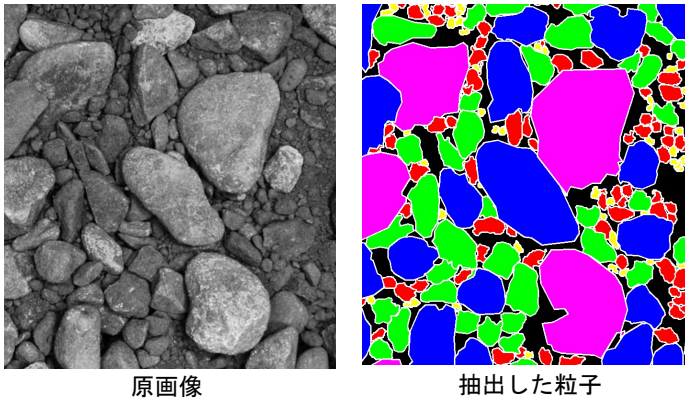


図-2 教師データの作成例

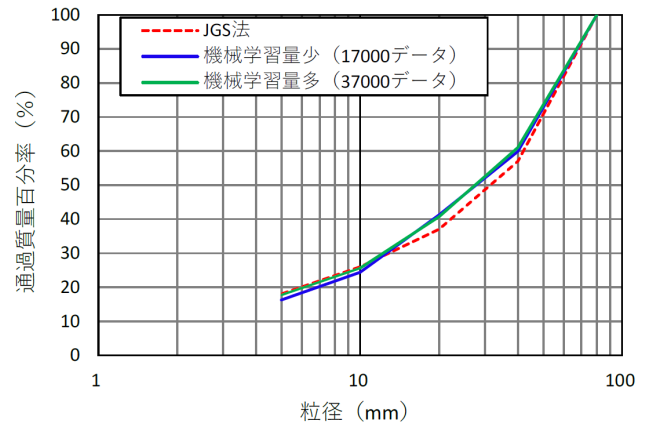


図-3 機械学習量の違いが評価結果に及ぼす影響

(2) 近赤外線水分計による含水率測定技術

水分は特定波長の近赤外線を減衰させる性質を持っている。近赤外線水分計はこの原理を利用した非破壊検査装置で、被測定物に近赤外線を照射したときの反射光の減衰量である「吸光度」を測定するものである。事前に求めた材料の吸光度と含水率の相関関係（検量線）を利用することで、近赤外線の照射とほぼ同時に材料の含水率を求めることができる。今回用いた近赤外線水分計は5波長タイプのもので、4つ吸光度から式-1に示す検量線により含水率を算出した。

$$w_{NIR} = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n \quad \text{式-1}$$

ここに、 w_{NIR} ：近赤外線法による含水率

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

検量線は材料の採取地や色調により変化する。成瀬ダムでは採取地の異なる2種類のCSG材（段丘堆積物ならびに原石山破砕材）を使用しているが、それぞれCSG材全粒径（最大粒径80mm）の含水率に関して検量線を取得した。図-4に運用開始前に取得した検量線を用いて算出した含水率 w_{NIR} とJIS法（JIS A 1125）で測定した含水率 w_{JIS} の関係を示す。両材料ともに、近赤外線法の含水率の測定誤差は概ね0.5~1.0%以内であり、十分な測定精度を有している。

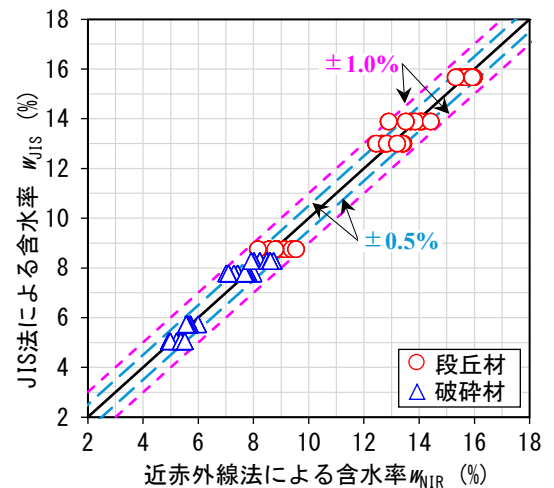


図-4 近赤外線水分計とJIS法の含水率比較

3. CSG材の品質管理への適用

(1) CSG材の表面水量の算出方法

台形CSGダム設計・施工・品質管理技術資料¹⁾では、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を義務付けている。その際、JISA 1109およびJISA 1110に準拠して行うCSG材の密度および吸水率試験は、5mm、10mm、20mm、40mmふるいに残留した試料、および5mmふるい通過試料の計5区分の粒径区分毎に試験を行っている。表乾状態での各粒径ごとのCSG材の質量に、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⁹⁾。本システムでは、従来法により得られる1~2時間に1回の頻度で得られる従来法の代替として、AI画像粒度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⁷⁾を用いて表面水量を算出する。

(2) 測定装置の設置概要

前述の通り成瀬ダムでは、2種類のCSG材をブレンドし、これにセメントと水を混合してCSGを製造し

ている。CSG製造プラント内でこれらの材料を搬送するベルトコンベア上にAI画像粒度モニタリングと近赤外線水分計を設置した。2種類のCSG材の粒度と含水率を約3秒に1回の頻度で測定しており、使用材料全量のデータを取得することができる。CSG製造プラントの全景を写真-1に、計測システムの設置状況を写真-2に示す。

(3) システムの構成

本システムの構成を図-5に示す。常時、CSG材の粒度と含水率のデータがプラント制御室内の専用PC内のデータベースに格納される。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、取得した粒度と含水率のデータからCSG製造中のデータのみを選択し、表面水量の計算を行う。表面水量の算出に必要なCSG材の密度試験結果や所定の単位水量、単位セメント量などの情報は日々の製造開始時に試験員が入力する。最終的に、CSG製造ラインに伝達する給水量を含め、上記のデータを集約してCSG配合表としてまとめ、クラウド上にアップロードされる。粒度や表面水量の経時変化もクラウド上で可視化され、現場事務所、プラント制御室、材料試験室から確認することができる。

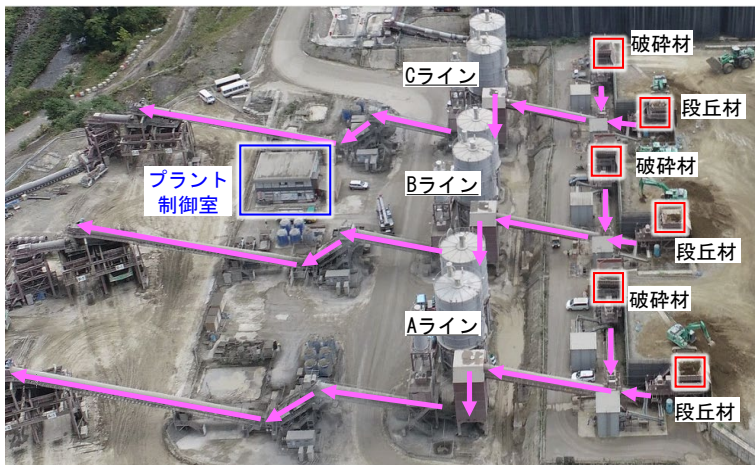


写真-1 CSG製造プラント全景

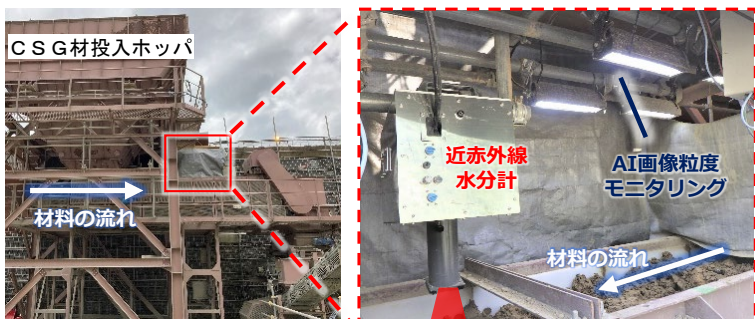


写真-2 計測システムの設置状況

(4) 測定結果

a) AI画像粒度モニタリングによる粒度測定

AI画像粒度モニタリングによって測定した2種類のCSG材の粒度分布のうち、代表例として20mmの加積通過率の経時変化（15分間移動平均値）を図-6に示す。比較のため、従来法の結果も併記している。図中の破線は管理値を、灰色網掛はCSGが製造されていない時間帯を示している。AI画像粒度モニタリングの測定結果は管理値の範囲内で変動し、従来法と同様の変動傾向を示していることがわかる。

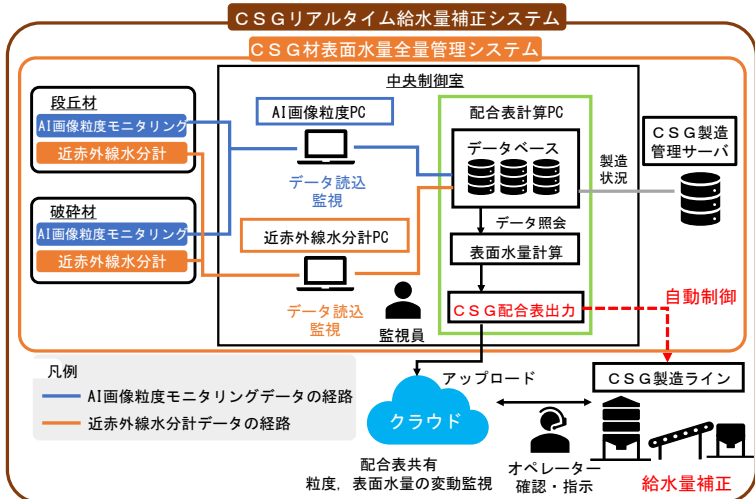


図-5 本システムの構成

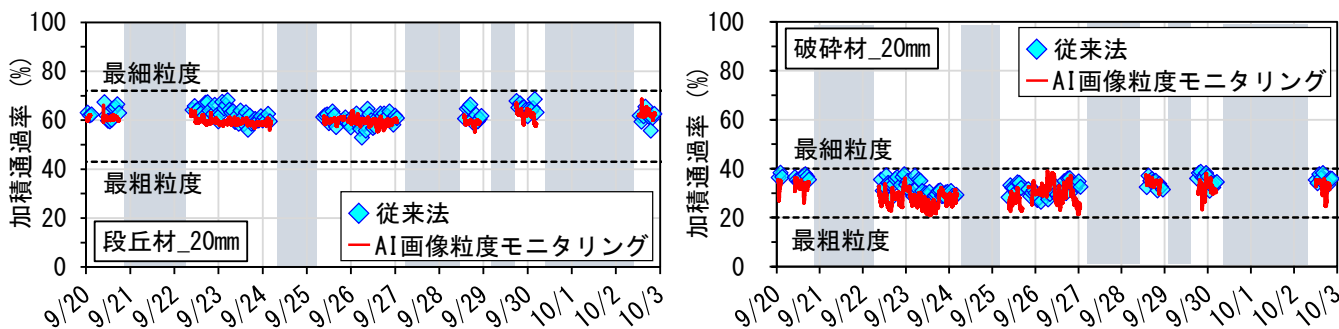


図-6 従来法とAI画像粒度モニタリングの粒度測定結果

b) 近赤外線水分計による含水率測定

近赤外線水分計で測定した2種類のCSG材の含水率の経時変化を図-7に示す。こちらも粒度測定結果と同様に近赤外線水分計の結果は15分間移動平均値を示している。従来法では段丘材および破碎材のいずれにおいても±1%程度の日変動がみられるが、近赤外線水分計でも含水率とその変動傾向を精度良く捉えていることがわかる。

c) 表面水量のリアルタイム測定結果

AI画像粒度モニタリングで測定した粒度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(15分間移動平均値)と従来法で算出した表面水量の比較を図-8に示す。両手法で測定した表面水量の変動傾向は良く合致しており、本システムで測定した表面水量の妥当性を確認できた。

4. 従来法との比較による精度検証

粒度、含水率および表面水量について、本システムと従来法の測定結果の比較を図-9~図-11に示

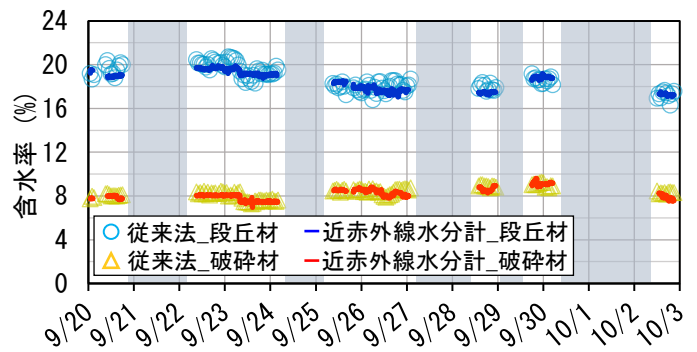


図-7 従来法と近赤外線水分計の含水率測定結果

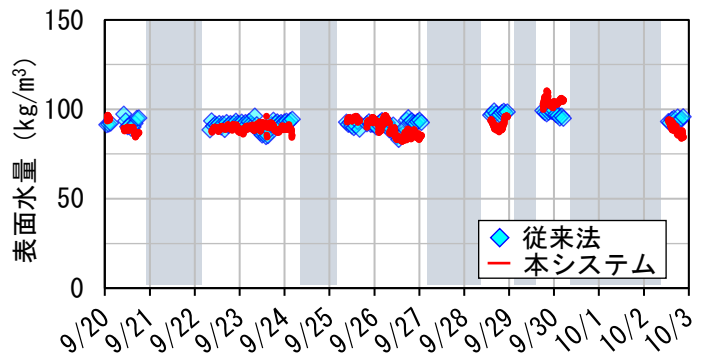


図-8 従来法と本システムの表面水量比較

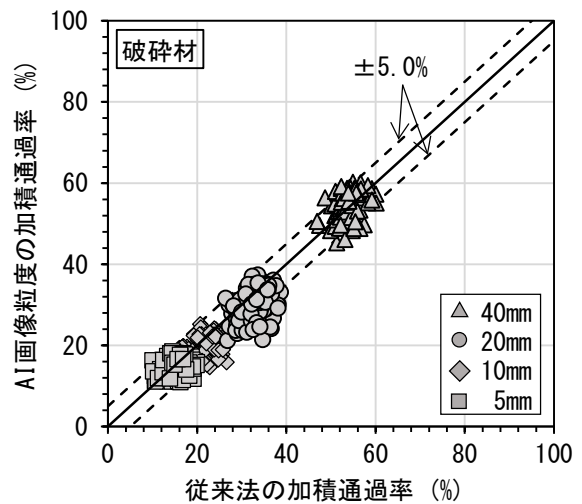
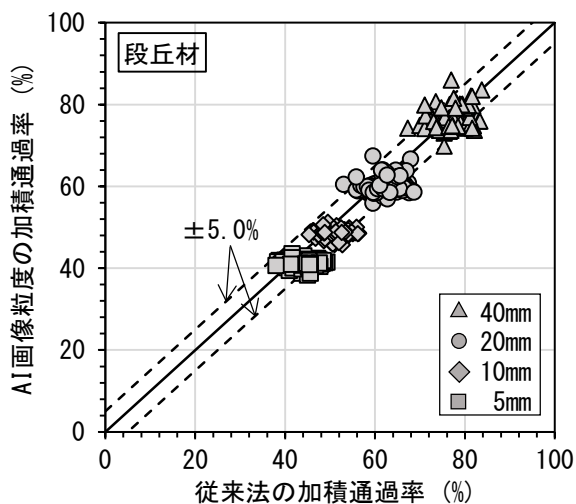


図-9 AI画像粒度モニタリングの精度検証結果 (左: 段丘材 右: 破碎材)

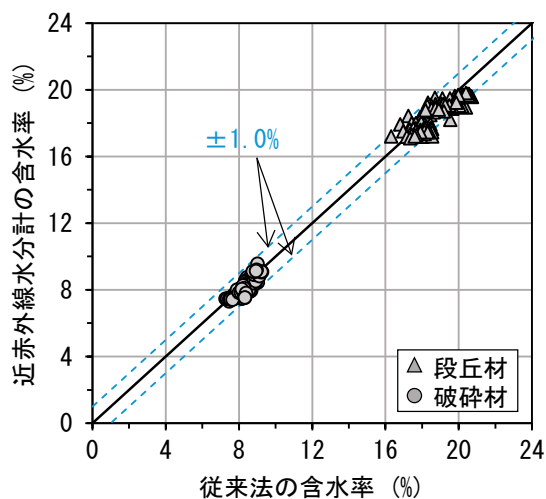


図-10 近赤外線水分計の精度検証

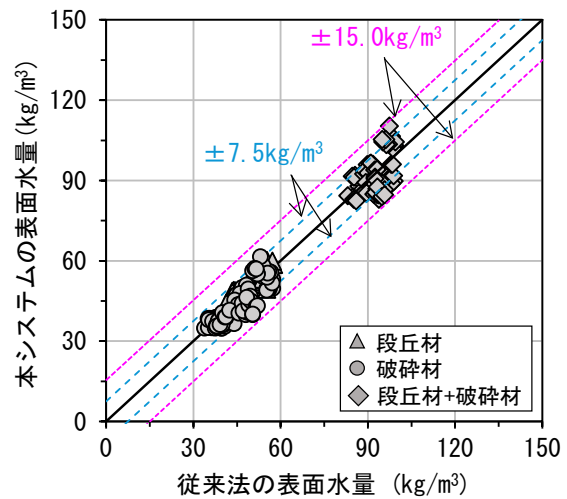


図-11 本システムの精度検証

す。AI画像粒度モニタリングで求めた加積通過率は従来法と比較して±5%程度の精度を、また近赤外線水分計の結果は、段丘堆積物および原石山破砕材ともに従来法と比較して±1.0%程度の精度を持つことが確認できた。さらに両者の結果から求められる表面水量は、従来法に対して±7.5 kg/m³となった。成瀬ダムでは、CSG単位水量は±15 kg/m³で管理されているが、本システムの測定精度はCSG製造管理に必要な性能を有していることが確認できた。

5. 本システムの導入効果

3, 4章で述べた試適用結果を踏まえ、成瀬ダムでは2024年度4月から従来法の代替として本システムを採用して、CSG材の品質管理を行っている。本システムの導入前後の比較を図-12に示す。CSG打設を昼夜で行う場合、試験室を24時間体制で稼働させるために昼夜で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、課題であった試験業務に係る人員を2名に削減し、約9割の省力化を実現した。また、従来法では、代表的なCSG材を目視判断により採取し、数百グラム~数十キログラムの材料を対象として、約1時間をかけて試験を実施していた。本システムを導入することで、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をも実現した。

6. まとめ

今回、現在施工中の成瀬ダム堤体打設工事において、CSG材の品質管理手法の省力化と材料の全量管理、配合調整の自動化を目的に本システムを導入し、その精度検証を行った。その結果、CSGの製造管理に用いるCSG材の表面水量では±7.5kg/m³程度の精度で有し、CSGの品質を確保する上で十分な精度を有するこ


	導入前（従来法）		導入後（本システム）	
項目	粒度試験：水洗い法 人力でふるい分け、各粒径毎に計量 	含水率試験：電子レンジ法 各粒径毎に電子レンジで加熱 	粒度試験： AI画像粒度モニタリング 	含水率試験： 近赤外線水分計 
試験状況	CSG試験室 		監視モニター画面例 	
作業人員	昼夜を問わず、7~8名の試験員 （昼夜で14~15名）		昼夜1名ずつの監視員 （昼夜で2名）	
試験時間	約1時間/回 （材料採取~試験~配合計算）		3秒/回 試験結果をリアルタイムに把握できる	
測定材料	代表的なCSG材を目視判断で採取し、試験を実施。 粒度試験：約40kg 含水率試験：約500g		ベルトコンベア上を流れるすべての材料の粒度と含水率を測定。	
測定頻度	1時間または2時間に1回 II 55tダンプ約4~8台に1回		3秒に1回（1200個/時間） 採用値：15分間の移動平均（300個） II 55tダンプ約1~2台に1回	

図-12 従来法と本システムの比較

とを確認した。成瀬ダムでは2024年4月から本システムを採用して、CSGの品質管理を行っている。前述したように本システムによって、品質管理業務の大幅な省力化を実現した。また、本システムによってCSG材全量の品質管理も実現した。これによって材料の品質変動の全容が可視化され、CSG製造管理の更なる高度化にも寄与できるものと考えられる。

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，pp205-234，2012.
- 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) Rother,C., Kolmogorov.V., Blake.A.; “GrabCut”: Interactive Foreground Extraction using Iterated Graph Cuts, ACM Transactions on Graphics, Vol .23, Issue 3, 8, pp. 309-314, 2004.
- 6) 伊藤信幸，高田剛志，寺田知史，中島具威，田中麻穂：CSGの配合および品質管理の合理化の試み，ダム技術，No.376，2018
- 7) 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.