

CSG 材の表面水量の全量管理技術

Total Inspection System for Surface Water Content of Sandy Gravel Used for CSG

榊谷 麻衣 岡本 道孝 岡本 遥河 田中 恵祐
松本 聡碩 大井 篤¹⁾ 小林 弘明²⁾ 藤崎 勝利

要 約

土構造物の施工における、土質材料の含水率と粒度の管理は品質管理の根幹である。CSG工法のような高速大量連続施工を前提とする場合には、迅速かつ連続的な品質管理が求められるが、JISで規定された含水率試験と粒度試験は相当数の人手と時間が必要である。筆者らは、土質材料の品質管理の省力化と全量管理技術の確立に向けて、近赤外線水分計を用いた含水率管理技術と、AI画像粒度モニタリングを用いた粒度管理技術を開発した。本報では、これらの技術を台形CSGダム建設現場のCSG製造設備に試験的に導入してCSG材の粒度と含水率を連続的に測定し、さらに両者を組み合わせた表面水量の全量管理への適用性を検討した結果について報告する。

目 次

- I. はじめに
- II. 近赤外線水分計を用いた含水率測定
- III. 高解像度カメラを用いたAI画像粒度測定
- IV. CSG材の品質管理への適用事例
- V. おわりに

I. はじめに

土構造物の施工において、盛土のせん断強さや遮水性などの要求品質を確保するために、盛土材料の粒度や含水率が厳格に規定されている。また、近年実績を積み上げているCSG (Cemented Sand and Gravel) 工法でも同様に、CSG材と呼ばれる砂礫材料の粒度と表面水量の管理を目的に、粒度試験と含水率試験が一定時間間隔に実施される。CSG工法は高速大量連続施工¹⁾を前提としているため、従来よりも迅速かつ連続的な品質管理方法(全量管理)が必要とされている。

筆者らは、土質材料の品質管理の省力化と全量管理技術の確立に向けて近赤外線水分計を用いた含水率管理技術と、AI画像粒度モニタリングを用いた粒度管理技術を開発した。本報では、初めにそれぞれの測定技術の概要と適用性能について述べたのち、台形CSGダム施工現場においてCSG材の粒度と含水率を連続的に測定し、表面水量の全量管理に応用

した結果について述べる。ただし、本文中の用語は「台形CSGダム設計・施工・品質管理技術資料」¹⁾に準拠することとし、地盤分野における「含水比」も「含水率」と表記する。

II. 近赤外線水分計を用いた含水率測定

1. 開発の背景

従来、土質材料の含水率測定では、JISで規定されている炉乾燥法が用いられるが、施工現場では簡易法として電子レンジ法やフライパン法²⁾が用いられることも多い。しかし、これらの測定方法はTable 1に示すような問題点をそれぞれ有している。降雨後など盛土材の状況変化があった場合にも含水率は施工再開可否の判断基準となるため、現場の含水率

Table 1 従来の含水率測定方法の特徴
(Characteristics of Standard Water Content Tests)

試験方法	特徴	問題点
炉乾燥法 (JIS A 1203)	・最も一般的な方法 ・多量な試料でも測定可能	・測定に時間がかかる(18~24時間)
電子レンジ法 (JGS 0122)	・迅速に測定可能 (10~20分)	・試料量が500g程度以下と少ないため測定結果にばらつきが生じる ・電子レンジが故障する可能性があり、連続使用が困難 ・加熱中に礫分が破裂する可能性がある
フライパン法 (直接加熱法)	・比較的迅速に測定可能 (15~30分程度)	・試料は5kg程度以下 ・乾燥中の攪拌方法など試験員による個人差が生じる可能性がある

1) 東北支店 Tohoku Blanch

2) 土木管理本部 Civil Engineering Management Division

キーワード：含水率、粒度、CSG、表面水量、AI、全量管理

Keywords : water content, grain size distribution, CSG, surface moisture, artificial intelligence, full quality control

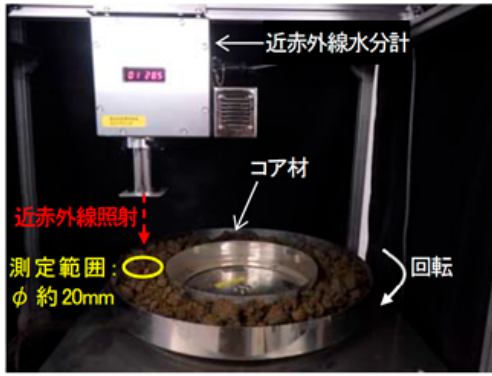


Photo 1 卓上型含水率測定装置

(Turntable Apparatus for Water Content Measurement Using NIR)

測定には迅速性が求められる。また、例えばロックフィルダムコア材では、施工含水率が最適含水率 $w_{opt} \sim w_{opt} + 3\%$ 程度の範囲に限定されるように、含水率の測定にはこの管理レベルに見合う測定精度も要求される。このような含水率測定の迅速性と精度についての現場的要求を満たす測定法として近赤外線（以後「NIR」）水分計に着目し、土質材料に対する測定精度や運用方法について検討してきた。

2. NIR 水分計による含水率測定の原理と特徴

NIR 水分計は近赤外線の水分による吸光性を利用した水分計であり、被測定物に近赤外線を当てたときの特定の波長帯における反射光の減衰量を数値化した“吸光度”を介して被測定物表面の水分量を測定する。含水率を求めるには、予め対象材料の吸光度と含水率の相関（検量線）を求めておく必要がある。NIR 水分計は、測定する波長帯の数 n に応じて種類が異なるが、一般的な装置の n は 2~5 である。各波長帯の吸光度から次の検量線により含水率を推定する。

$$w_{NIR} = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 w_{NIR} : NIR 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であり、切片および偏回帰係数は炉乾燥法で測定した含水率と吸光度の関係から重回帰分析によって求める。

NIR 水分計は物体の水分量を非接触かつ連続的に測定できることから工場製品の品質管理に用いられており、製紙、食品、薬品など利用分野は多岐にわたる。これを施工現場で用いる最大の利点は、近赤外線光を試料に当てただけで瞬時に測定結果を得ることができる迅速性にあり、ターンテーブル式の卓上型含水率測定装置 (Photo 1) では試料（質量 10kg 程度）の準備～測定～廃棄に要する作業時間は約 5 分と短時間での含水率測定が可能である³⁾。

3. 土質材料による吸光度の違い

Fig.1 に、含水率を変化させて測定した 4 種類のロックフィルダムコア材の吸光度 X_1 および X_2 の関係を示す。コア材

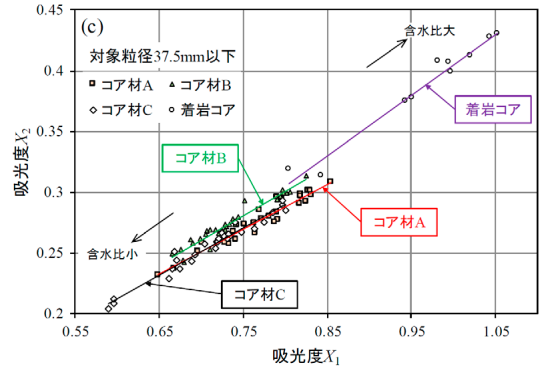


Fig.1 土質材料による吸光度の違い (Absorbency of Several Soil Materials)

A~C は同一現場内の異なる地点で採取された土質材料から製造されたものだが、2つの吸光度の関係に若干の違いが認められることから、土質や材料の色相が吸光度に影響を及ぼす可能性があり、検量線を土質材料毎に設定する必要があることが示された⁴⁾。

III. 高解像度カメラを用いた AI 画像粒度測定

1. 開発の背景とシステムの概要

従来行われている粒度試験 (JIS A 1102) は、採取試料を乾燥後にふるい分けして、質量を測定するという工程が必要であり、相当数の人手と時間を要する試験である。藤崎ら (2013) は JIS 法に代わり、省力化と迅速化を目的に、画像を用いた土質材料の粒度分析技術、「画像粒度モニタリング」を開発し、実用化を図った。なお、この技術はダム現場を中心として、これまでに 8 現場 (2023 年現在) で活用されている。さらに改良を加えた「AI 画像粒度モニタリング」(以降、「AI 画像粒度」) では、粒子の識別・抽出過程に AI を導入することで、従来のシステムと比較して測定装置の簡略化と測定頻度の向上を実現した。

画像粒度モニタリングの測定手順を Fig.2 (a) に示す。薄く敷き均した材料を、暗室内でフラッシュ撮影し (STEP1)、粒子の輪郭を際立たせることで画像解析による粒子の識別を可能とした (STEP2, 3)。例えば当別ダム (北海道当別町、2012 年完成) では、専用の撮影小屋を設けて 1 回/15 分の頻度で粒度を測定し、品質管理を行った⁵⁾。

AI 画像粒度の測定手順を Fig.2 (b) に示す。AI 画像粒度では、事前に粒子形状を AI に機械学習させることで (STEP1)、通常の照明下や自然光の下で撮影した材料画像でも粒子の識別が可能になり、材料を敷き均す作業や専用設備が不要となった。さらに、撮影から粒子の識別・抽出 (STEP2, 3) までにかかる時間が大幅に短縮されたため、従来よりも高速かつ連続的な測定が可能になった。例えばベルトコンベアを流れる材料に対して、連続撮影が可能な産業用カメラと、高速演算処理に対応する高性能 PC を用いることで、数秒に 1

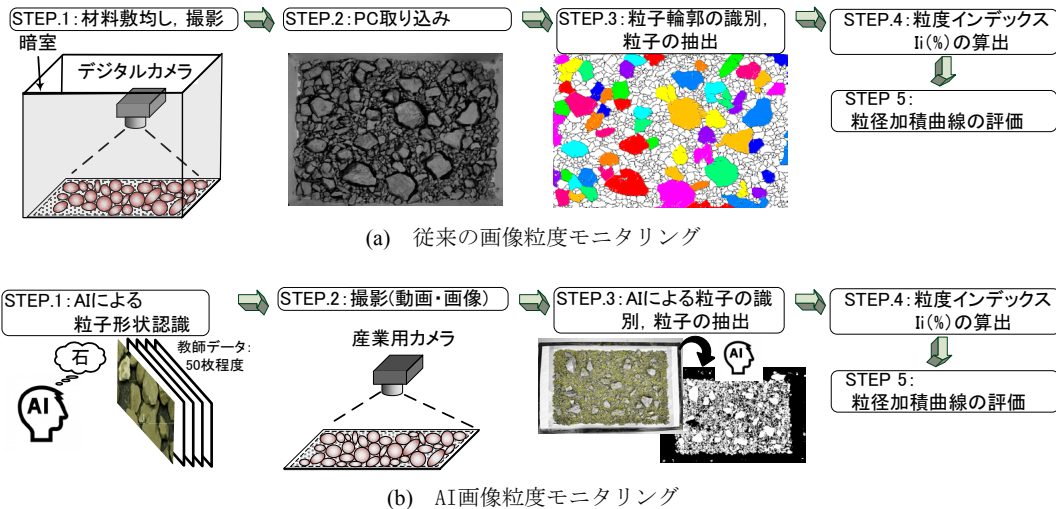


Fig.2 画像粒度モニタリングおよび AI 画像粒度モニタリングの手順

(Procedures of Ordinary Image Analysis Method and Artificial Intelligence Method for Grain Size Distribution)

回の頻度で粒度を測定し続けることが可能である。以上のように、粒径の認識・抽出が完了した後、複数の監視粒径毎に算出する粒度インデックス I_i を介して粒径加積曲線の評価する (STEP4, 5)。ここで、粒度インデックスとは撮影対象の全体面積に対する監視粒径以上の土粒子の投影面積の総和の割合であり、次式で定義される。

$$I_i = \sum S_d / A \cdots \cdots (2)$$

ここに、 A : 測定対象材料の撮影全体面積

S_d : ある監視粒径 (d) 以上の粒子投影面積

これと石分を含む地盤材料の粒度試験から得られる加積通過率の相関関係を予め関数化しておくことで、粒度インデックスから粒径加積曲線の評価することが可能である。

2. 機械学習における教師データ数の検討

AI 画像粒度では、事前に粒子の特徴を AI に機械学習させる必要がある。Fig.3 は機械学習の実施例である。薄く敷き均した材料をカメラで撮影し、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た。ここでは指定した粒径区分に応じて表示色を設定している。

粒子の抽出には GrabCut 法⁷⁾を用いて、教師データの作成にかかる手間を可能な限り省力化した。Fig.4 に機械学習量が異なる解析結果例を示す。一方の AI には 17,000 データ、他方の AI には 37,000 データを機械学習させている。AI 画像粒度で評価した粒径加積曲線は別途実施した粒度試験結果 (図中、JGS 法) と概ね一致しており、教師データ量に依らず粒径加積曲線を良好に評価できていることがわかる。

IV. CSG材の品質管理への適用事例

本章では、台形 CSG ダム施工現場 (成瀬ダム堤体打設工

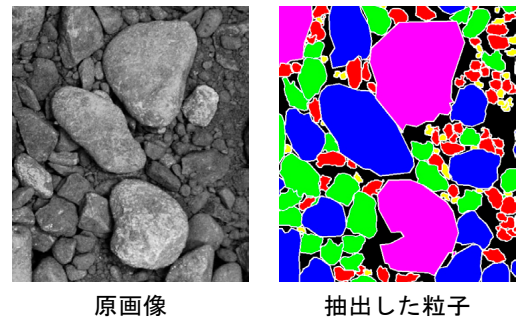


Fig.3 教師データ作成例

(An Example of Soil Particle Indicator)

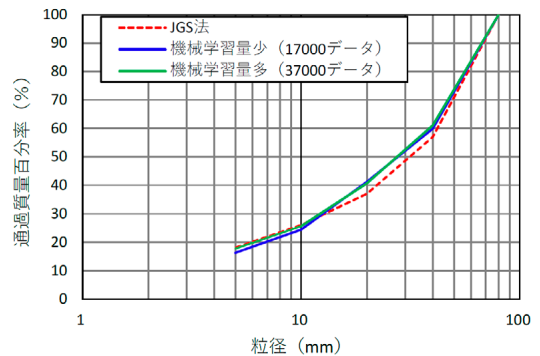


Fig.4 機械学習例

(An Example of Machine Learning Results given Different Amount of Sample Data)

事, 国土交通省東北地方整備局) で稼働中の CSG 製造設備に実装した NIR 水分計と AI 画像粒度 (以降「本システム」) の測定データをもとに、CSG 材の表面水量の連続評価を試みた事例について述べる。

1. CSG材の品質管理

CSG 材の品質管理の目的は、打設される CSG の強度を管理することである。CSG の強度の管理では、その製造過

程で粒度と単位水量が「ひし形」¹⁾と呼ばれる管理幅の中で施工されていることを確認する必要がある。CSG材の単位水量はCSG材の粒度と表面水量から算出するため、粒度と表面水量の変動傾向を簡易試験によって監視し、給水量の補正を行う。施工初期には1回/1時間、安定期には1回/2時間の頻度で簡易試験を実施する必要がある、CSG材の品質管理の合理化が果たす役割は大きい。

2. CSG材表面水量の算出方法

CSG材の表面水量は、各粒径区分毎の含水率試験 (JIS A 1125) と吸水率試験 (JIS A 1109) の結果から算出した表面含水率に、CSG材の配合質量を乗じ、これを粒径区分毎に合計して求める。配合質量もまた、各粒径区分毎の密度試験 (JIS A 1110) から得られた絶乾密度と吸水率、ならびにふるい分け試験 (JIS A 1102) から得られた加積通過率から算出する⁸⁾。

本現場ではCSG材の粒度区分を 80-40mm, 40-20mm, 20-10mm, 10-5mm, 5mm 未満に分けて管理している。上記のように、表面水量の計算はこれらの粒径区分毎に行われる。一方で、NIR水分計で測定している含水率とは、近赤外線の照射範囲にある材料の水分量に対応するもので、CSG材の全粒径 (80-0mm) の含水率である。したがって、本検討ではNIR水分計で測定した全粒径の含水率を、AI画像粒度により算出した粒度構成を基に各粒径区分毎の含水率に割り振り、表面水量を算出した。

3. 近赤外線水分計のCSG材への適用性確認

(1) 室内含水率測定

これまでNIR水分計は、最大粒径37.5mm程度の盛土材への適用が主であったが、CSG材相当の最大粒径80mmの砂礫材料への適用性を検討した。砂礫材料には5波長、測定径約φ50mmのNIR水分計(㈱ケツト科学研究所)を使用した。前述した卓上型含水率測定装置を用いて、受皿上に砂礫材料を敷き均して1回転(1分間)させ、1秒間隔で連続的に含水率を測定した。その結果をFig.5に示す。従来の傾向³⁾と同様に、表面に礫がある場合に含水率が低くなる結果が得られた。ただし、複数回測定を繰り返した場合にはJIS法による含水率の測定結果(w=8%)とほぼ同等の平均値が得られており、表面の礫の影響は限定的であることが確認できた。

炉乾燥法とNIR水分計で測定した含水率の比較をFig.6に示す。w=14%を超えて砂礫材料の表面に水分が浮くような状態になると、NIRの測定結果は変化が鈍化し、誤差も大きくなっている。これは、NIR水分計で測定している吸光度がほとんど変化しなくなるためである。以上のことから、降雨等によって一時的に砂礫表面に水分が浮くような状態を除けば、最大粒径80mmの砂礫材料に対してもNIR水分計は実用上問題なく適用できるものと考えられる。

(2) 検量線の取得

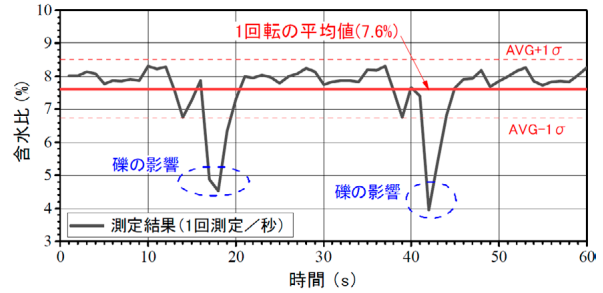


Fig.5 砂礫材料のNIR水分計による測定結果 (The Result of Water Content of Gravel Material Using NIR)

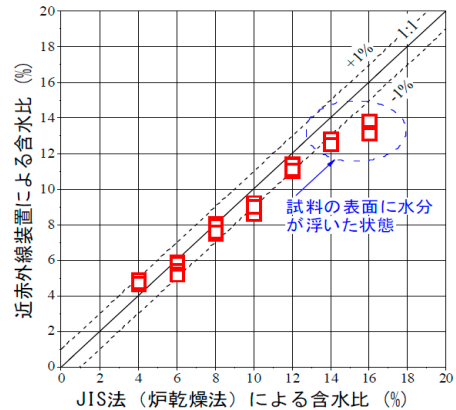


Fig.6 砂礫材料におけるJIS法含水率とNIR法含水率の比較 (The Water Content Relationship of Gravel Material)

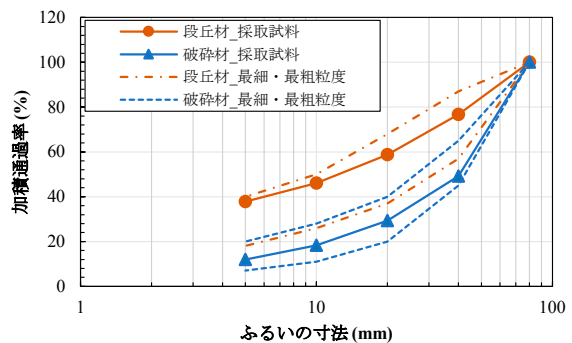


Fig.7 CSG材の粒度分布 (The Grain Size Distribution of CSG Materials)

前述したように、検量線は材料の採取地や色調により変化する可能性がある。そこで、対象現場で用いられている採取地の異なる2種類のCSG材である段丘材および破砕材について、それぞれ「CSG材全粒径の含水率」に関して検量線を取得した。Fig.7にCSG材の粒度分布を示す。実線が検量線取得のために採取した試料の試験結果を、破線が各CSG材について許容されている粒度範囲を表す。Fig.8は取得した検量線を用いて算出した含水率 w_{NIR} とJIS法で測定した含水率 w_{JIS} の関係である。段丘材および破砕材ともに、NIR法の含水率の測定誤差は概ね0.5~1.0%以内であり、要求精度を満足すると判断した。

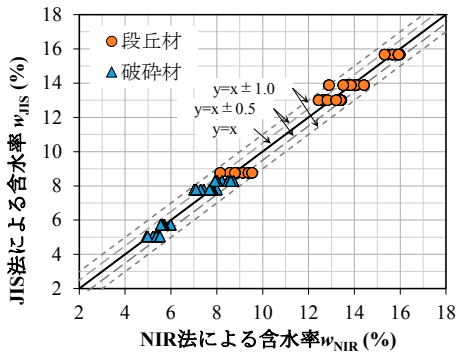
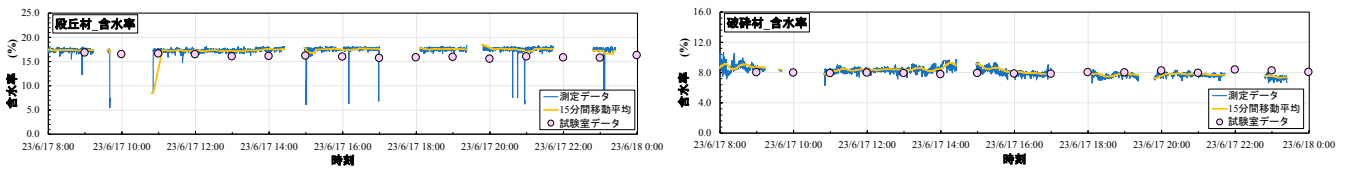


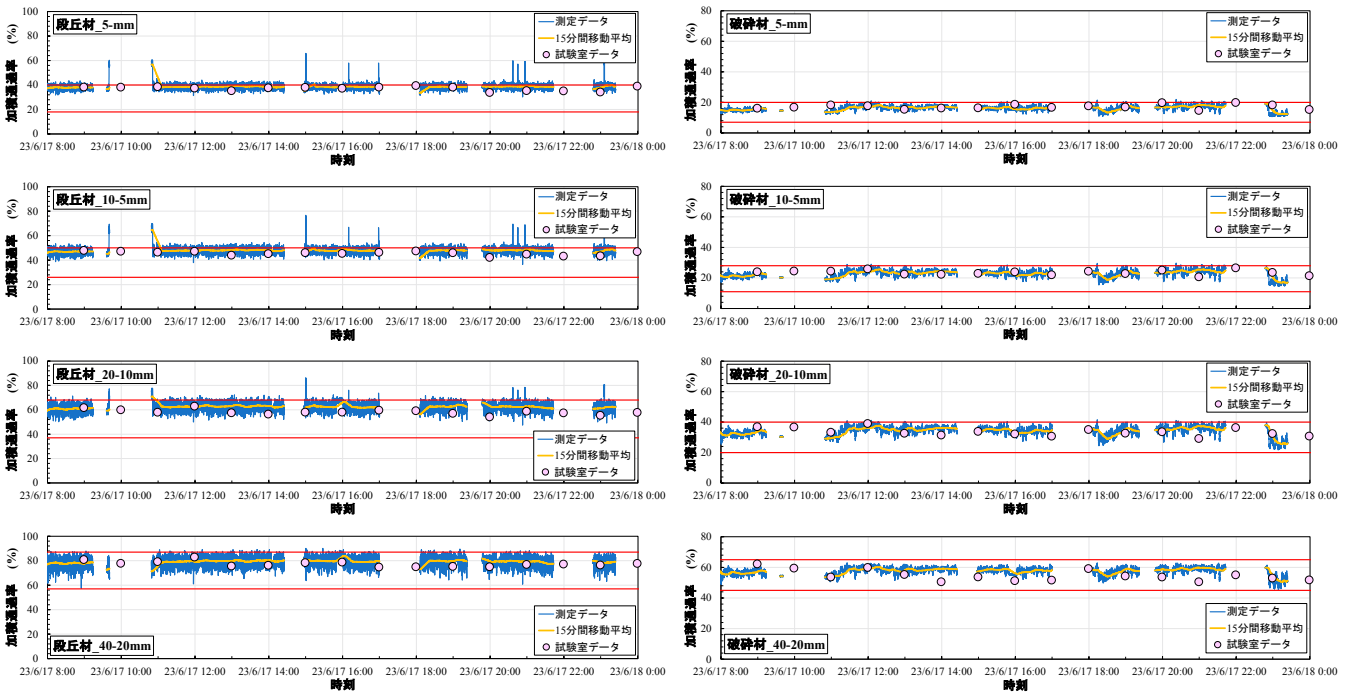
Fig.8 CSG材の検量線
(Calibration Curves of CSG Material)



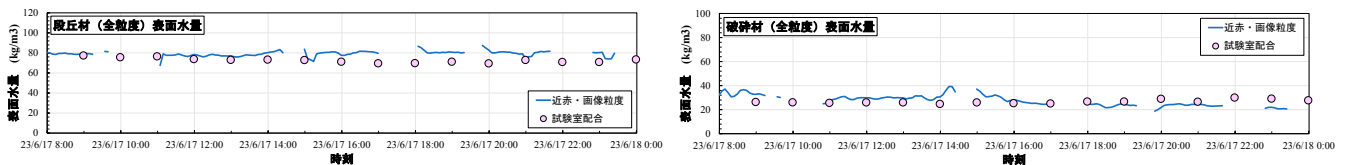
Photo 2 NIR水分計とAI画像粒度の設置状況
(On-site Apparatuses Installation)



(a) NIR法による含水率の測定結果と従来法による試験結果



(b) AI画像粒度による粒度分布の測定結果と従来法による試験結果



(c) NIR法とAI画像粒度より算出した表面水量と従来法に基づく試験室配合結果

Fig.9 CSG材の品質管理測定の結果
(The Measurement Results and the Standard Test Results)

4. 装置の設置状況

近赤外線水分計とAI画像粒度カメラの設置状況をPhoto 2に示す。CSG製造設備内で段丘材および破碎材を搬送するベルトコンベア上にそれぞれNIR水分計とAI画像粒度用の産業用カメラを設置し、どちらも3秒間隔で測定を実施した。

5. 測定結果

Fig.9 (a) にNIR法で測定した含水率と、1時間毎に従来法で測定した含水率の推移を示す。NIR法で測定した含水率は、15分間の移動平均結果も併記した。ただし、CSGの製造を中断したためにBCが稼働していない時間帯はデータを表示していない。NIR法で測定した含水率は±1.0%程度の変動がみられるが、直前15分間の移動平均値では、従来法で測定した含水率の推移と概ね一致していることがわかる。段丘材のNIR法で測定した含水率では、瞬間的に乾燥側の含水率を示すことがあるが、これは乾燥した礫の表面を測定しているためと考えられる。

Fig.9 (b) に各粒径区分の加積通過率の推移を示す。また、各粒径の通過率の規格値を赤線で示している。全体的には規定の粒度範囲に収まりつつも、突発的に規定範囲を逸脱する瞬間があることが確認できる。このような短周期の材料変動を従来法の試験頻度で捉えることは難しく、当技術による連続かつ全量での監視の効果が期待できる。

Fig.9 (c) にNIR法で測定した含水率とAI画像粒度で測定した粒度分布から算出したCSG材表面水量の経時変化と、従来法に基づく試験室配合結果を示す。計算に使用した測定値は直前15分間移動平均後の値である。本現場でのCSG単位水量の管理幅は±15kg/m³ (含水率±0.75%程度相当)以内だが、本システムの測定結果と試験室配合結果はほぼ同等の値を示しており、本システムの測定精度は要求性能を満たしていると言える。

一方で、一部の結果で確認されるように突発的な変動を含む大量のデータを品質管理に反映する考え方については、更なる議論が必要である。一定の期間で平均化すれば短周期変動の影響を低減できるが、過度な平均化は時系列分布の分解

能を落とすため、測定感度と品質管理のバランスを考慮することが重要と考えている。

V. おわりに

NIR水分計とAI画像粒度を用いて、台形CSGダム施工現場におけるCSG材の表面水量の連続評価を試行した。その結果、本システムを用いることで、要求性能を満たす精度で表面水量を測定できることを示した。今後は、時系列分布の統計的分析を行い、測定データの最適な処理方法と現場運用方法、そして品質管理ロジックについて検討していく。

参考文献

- 1) (財)ダム技術センター；台形CSGダム施工・品質管理技術資料，2012.
- 2) 地盤工学会；地盤材料試験の方法と解説，含水比試験，2009，pp.61-68.
- 3) 藤崎勝利ほか；近赤外線水分計を用いた盛立材料の室内迅速含水比測定装置，土木学会第73回年次学術講演会，VI-1051，2018.
- 4) 小原隆志ほか；近赤外線水分計によるロックフィルダムコア材料の含水比迅速測定法，第54回地盤工学研究発表会論文集，D-03，2019.
- 5) 藤崎勝利ほか；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，pp.19-26.
- 6) 米丸佳克ほか；AI画像粒度モニタリングの解析精度向上に向けた検討，第57回地盤工学研究発表会論文集，22-2-2-03，2022.
- 7) Rother, C. et al; "GrabCut": Interactive Foreground Extraction using Iterated Graph Cuts, ACM Transactions on Graphics, Vol 23, Issue 3, 2004.8, pp.309-314.
- 8) 伊藤信幸ほか；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，pp.42-73.

Total Inspection System for Surface Water Content of Sandy Gravel Used for CSG

Mai Masutani, Michitaka Okamoto, Yoga Okamoto, Keisuke Tanaka, Akihiro Matsumoto, Atsushi Oi¹⁾, Hiroaki Kobayashi²⁾, and Katsutoshi Fujisaki

Quality controls for the water content and grain size of soil materials are the basis of soil structure construction. However, JIS methods used for water-content and grain-size tests require a considerable amount of manpower. To save on labor in site tests and establish a full quality control system, the authors have developed a system for controlling water content using a near-infrared moisture meter and a system for controlling grain size using AI image analysis. This report shows the applicability of these systems to the control of surface water volume on CSG materials by implementing them at a CSG dam construction site.