

ロックフィルダムの盛立工における挑戦

ーICT 施工の全面展開ー

○福島 雅人¹・坂本 博紀²・奈良 洋幸³

概要：

小石原川ダムでは、i-Construction & Management の推進を背景として、ICT（Information and Communication Technology）施工を全面展開し、施工管理・品質管理の合理化・高度化を図っている。

本稿は、盛立工の各施工段階（材料採取・選別～材料製造・調整～盛立面施工）において活用されている種々の ICT 施工を紹介するものである。また、紹介する ICT 施工の一部は、フィルダムのコア材への適用事例がなく、技術的課題が残されていたことから、それらへの取組についてもあわせて報告する。

キーワード：ICT 施工、フィルダム、盛立工、施工管理、品質管理

1. はじめに

国土交通省では、建設現場の生産性向上の取組として、i-Construction が推進されている。フィルダム建設の分野においては、殿ダムや大分川ダムをはじめとして、GNSS（Global Navigation Satellite System）測量機、UAV、MG・MC（Machine Guidance・Control）機械などを活用した ICT 施工が導入され、測量・数量計算・出来形管理の省力化、作業効率・安全性の向上などの成果が報告されている¹⁾²⁾。

水資源機構では、維持管理段階における効率化、高度化も視野に入れた i-Construction & Management を推進しており、平成 28 年度に推進委員会が設置された。

朝倉総合事業所では、小石原川ダムを建設中であり、これまでに計画・調査・設計段階の CIM の活用状況、本体建設工事全般に係る ICT 施工の取組状況を報告してきた³⁾⁴⁾。

本稿は、盛立工に主眼を置いて、各施工段階で活用されている種々の ICT 施工を紹介するものである。また、コア材への適用事例のない、画像粒度解析システム及び CCV の技術的課題への取組についてもあわせて報告する。

2. 盛立工における ICT 施工の紹介

フィルダムの盛立工は、①材料採取・選別、②材料製造・調整、③盛立面施工の 3 つの施工段階に大別される。

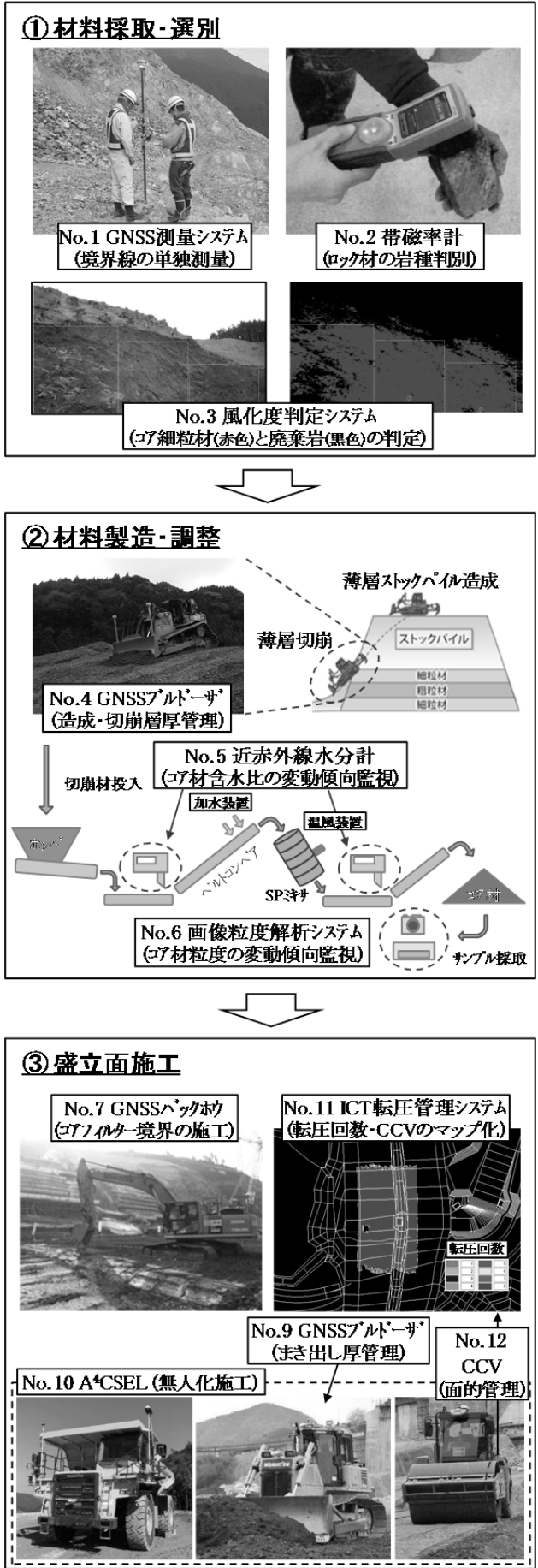
表-1 及び図-1 に、小石原川ダムの盛立工における ICT 施工の導入実績を示す。ICT 施工の導入により、生産性向上に係る成果が上がっている。特に、ダム軸に曲率を有する小石原川ダムでは、GNSS 建機の導入により、コア・フィルター境界の効率的な施工が可能となっている。

次章では、表-1 中で、既往ダムでの適用実績に乏しく、運用にあたって技術的課題が残されていた ICT 施工のうち、特に No.2、6、12 について詳述する。

表-1 盛立工の各施工段階における ICT 施工の導入実績

No.	項目
① 材料採取・選別	
1	「GNSS 測量システム」による三次元測量
2	「帯磁率計」による岩種判別
3	「風化度判定システム」によるコア細粒材と廃棄岩の選別
② 材料製造・調整	
4	「GNSS プルトーザ」による薄層スラッグの造成・切崩管理
5	「近赤外線水分計」によるコア材の含水比の管理・調整
6	「画像粒度解析システム」によるコア材の粒度管理
③ 盛立面施工	
7	「GNSS バックホウ」によるコア材まき出し時の分離防止
8	「UAV 空撮画像」による盛立面のまき出し状況の品質保証
9	「GNSS プルトーザ」によるまき出し厚管理
10	「自動化重機(A ⁴ CSEL(クラウドセル))」による無人化施工
11	「ICT 転圧管理システム」による転圧回数・軌跡の管理
12	「CCV」による盛立面の透水係数の面的管理
13	「FEM 情報化施工」による盛立時の間隙水圧の管理

- 1.朝倉総合事業所 ダム工事課
- 2.朝倉総合事業所 ダム工事課 副参事
- 3.朝倉総合事業所 ダム工事課 課長



図ー1 小石原川ダムにおける ICT 施工の導入実績

3. ICT 施工の技術的課題への取組

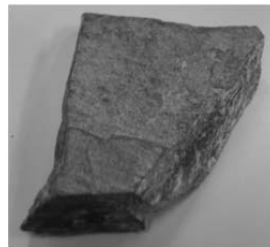
3.1 帯磁率計による岩種判別

ロックゾーンの要求性能は、①重量（比重・吸水率）、②強度（内部摩擦角）、③排水性（透水係数）、④耐久性（乾湿繰り返し、凍結融解）の 4 つである。したがって、原石山の地質とその物理的・力学的特性に基づき、堤体の適切な位置に適切な品質のロック材料を配置する必要がある。

小石原川ダムの原石山では、主に互層様片状ホルンフェルス（aHf）と塩基性片状ホルンフェルス（bHf）が賦存している（表ー2 参照）。耐久性に劣る aHf は、新鮮な状態であっても、外部ロックとしての使用が困難な材料であるため、岩種の判別を確実にすることが重要である。

材料判定は、「岩種」、「割れ目の間隔（粒径）」及び「割れ目の状態（風化度）」を目視により、「硬さ」を打音等により行っている。このうち、岩種以外の項目は監督員間の目合わせが比較的容易であるが、岩種については、写真ー1 に示すように、aHf と bHf の混在・挟在、天候、風化、粉塵の影響等により、判別が困難な場合があった。

表ー2 小石原川ダムにおける原石山の主な岩種と特徴

岩 種	互層様片状ホルンフェルス（aHf）	塩基性片状ホルンフェルス（bHf）
外 観		
特 徴	黒色で片理構造を有する	緑色で比重が大きい
賦存量	○	△
強 度	△	○
耐久性	×	○

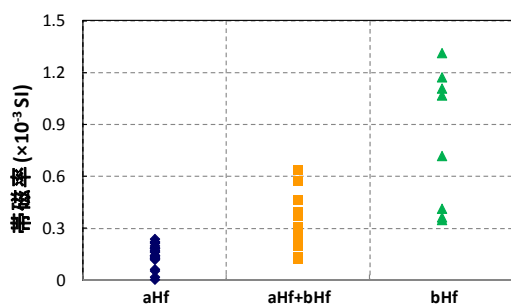


写真ー1 発破後の切羽の外観（岩種判別が困難な例）

そこで、岩種判別の補助を目的として、帯磁率計を導入した。帯磁率とは、磁場と誘導磁気との比で定義される物理量で、岩石に含まれる磁性鉱物の量と種類により定まる。帯磁率計は、非破壊測定が可能である上に、計器が軽量で、リアルタイムで結果が得られるため、非常に簡便である。

図-2に、熟練者2名の目視による岩種判別結果と帯磁率計による計測結果の関係を示す。岩種ごとに帯磁率の値域が異なっているため、 0.3×10^{-3} (SI)程度を目安として、帯磁率に基づく岩種判別の定量化が可能となった。

最終的な判断は監督員の目視によるが、帯磁率計の導入により、監督員の習熟度の違いによって生じる岩種判別結果の差を低減し、品質管理の高度化を図ることができた。



(熟練者2名の目視による岩種判別結果が異なる場合を「aHf+bHf」とした)

図-2 目視による岩種判別結果と帯磁率の関係

3.2 画像粒度解析システムにおけるコア材の団粒化

(1) 概要

画像粒度解析システム⁵⁾とは、図-3に示すように、デジタルカメラで撮影した土質材料の二次元画像から粒子輪郭を識別し、粒度インデックス I_i (撮影対象の全面積に対する監視対象粒径以上の粒子の投影面積の総和の割合) と各粒径の加積通過率の相関式から粒度分布を推定する簡易粒度測定法である。フィルダム建設の分野では、ロック材やフィルター材への適用事例があるが、コア材への適用事例はない。これは、コア材のような粘性材料は、同一粒度でも含水状態によって団粒化の程度が異なるためである。

写真-2に示すように、低含水比では団粒化は見られないが、高含水比では、細粒分の団粒化の他に、粒子同士の付着や大礫への細粒分のへばりつきが視認される。したがって、相関式を設定した際の試験材料の含水比と画像解析した際の含水比が異なると、推定される粒度分布に誤差が生じる可能性がある(図-4参照)。

小石原川ダムでは、コア盛立に係る品質向上を目的として、粒度、含水比、締固めエネルギーを全量管理することを目指している。そこで、画像粒度解析システムの導入により、盛立直前のコア材に対する粒度分布の判定を試みているが、団粒化の影響を補正することが課題となっている。

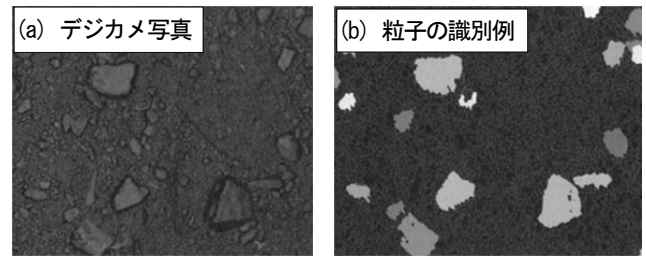


図-3 画像粒度解析システムによる粒子の識別例

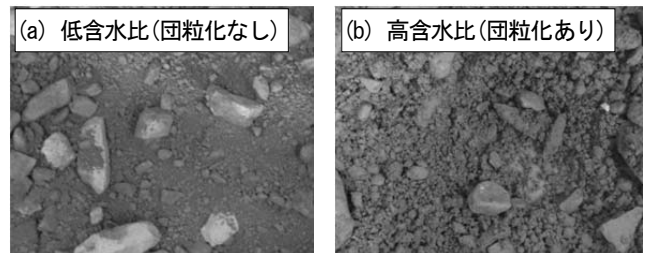


写真-2 含水状態による団粒化の影響(同一粒度)

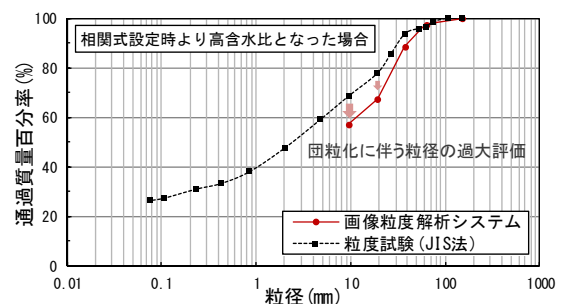


図-4 団粒化により生じる粒度分布の誤差(イメージ)

(2) 団粒化の影響因子

谷中らは、ストックパイルの切崩し時に生じる団粒化について、コンシステンシー指数 I_c (式-1) を規定値以上確保することで、団粒化が抑制できることを報告している⁶⁾。

$$I_c = \frac{w_L - w_n}{w_L - w_p} = \frac{w_L - w_n}{I_p} \quad (\text{式-1})$$

ここで、 w_L 、 w_n 、 w_p はそれぞれ粒径 0.425mm 以下の液性限界、自然含水比、塑性限界であり、 I_p は塑性指数である。

図-5に示すように、コア材の w_L 、 I_p は、採取位置や細粒材・粗粒材・(調整材)のブレンド比がほぼ一定であれば、大きく変わらない。したがって、団粒化は、同一のブレンド比であれば主に w_n に依存し、高含水比であるほど I_c が低下するため、団粒化しやすい。

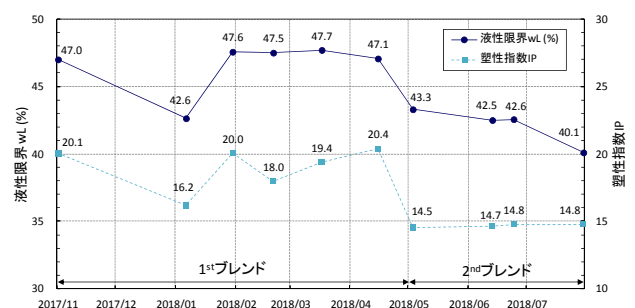


図-5 液性限界(w_L)と塑性指数(I_p)の推移

また、団粒化は、細粒分が多いほど生じやすいため、粒度分布にも影響を受ける。図-6に示すように、粒度分布の違いは最適含水比(w_{opt})に反映されるため、 w_{opt} が大きいほど団粒化しやすい。

小石原川ダムでは、近赤外線水分計により w_n を全量管理しつつ、1日1回の頻度で締固め試験を実施し、 w_{opt} を管理している。

そこで、同一の現場・ブレンドでは、 w_L と I_p が一定であると仮定し、 w_n と w_{opt} をパラメータとした団粒化の影響の補正方法を検討した。

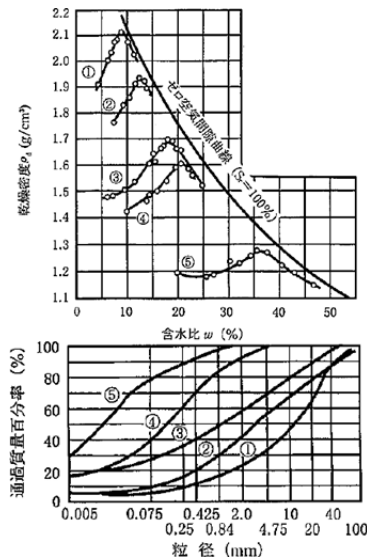


図-6 粒度分布と w_{opt} の関係⁷⁾

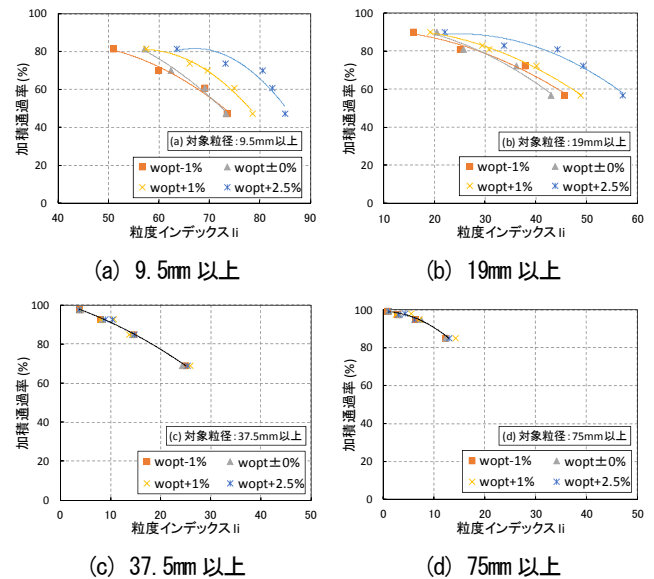


図-7 各粒径における含水状態に応じた I_L の変化

(3) キャリブレーションの方法とその結果

既往事例では、粒度インデックス I_L と加積通過率の相関式を求めるキャリブレーションにおいて、材料の含水状態は任意に設定されていた。

そこで、コア材を対象とする本検討では、細粒側～粗粒側の5パターンの粒度分布に対して、 w_{opt} -1%～+2.5%程度の範囲で含水調整しながら、 I_L の変化を調べた。

図-7(a)(b)に、粒径9.5mm及び19mmを対象とした場合における含水状態に応じた I_L の変化を示す。 I_L は、 w_{opt} より湿潤側になるほど大きくなっている一方で、 w_{opt} より乾燥側ではほとんど変わらない。これは、 w_{opt} は w_p と概ね等しいことから、 w_{opt} より乾燥側では、塑性体状ではなく半固体状に近い状態となり、団粒化が生じにくくなったためと考えられる。

一方で、図-7(c)(d)に示すように、大粒径(37.5mm以上)を対象とした場合には、 I_L は含水状態にほとんど依存していない。これは、37.5mmを超えるような大粒径の団粒が生じなかったためと考えられる。したがって、大粒径に対する含水状態の補正は不要である。

以上の結果から、撮影日の締固め試験から得られる w_{opt} と近赤外線水分計からリアルタイムで得られる w_n を用いて、 I_L と加積通過率の相関式を逐次補正することで、より正確な加積通過率を予測することが可能となった。

今後は、得られた成果を実運用に反映するためのシステムを構築し、粒度分布に対する品質管理の更なる高度化を図る予定である。

3.3 CCV を用いた遮水性の面的管理

(1) 概要

CCV (Compaction Control Value) とは、振動ローラの振動加速度を信号処理して得られる地盤の締固め状態を表す指標であり、式-2のように定義される⁷⁾。

$$CCV = \frac{S_{1/2} + S_{3/2} + S_2 + S_{5/2} + S_3}{S_{1/2} + S_1} \times 100 \quad (\text{式-2})$$

ここで、 $S_{1/2} \sim S_3$ は、基本振動数 $f_0 \times \frac{1}{2}$ の整数倍に対応する加速度スペクトルである ($S_1 = f_0$)。

図-8には、軟らかい地盤と硬い地盤における振動ローラの加速度波形と周波数特性を示す。軟らかい地盤では、ほぼ振動ローラの仕様毎に定まる基本振動数のみが計測される。硬い地盤では、振動輪の跳ね上がり～着地により周波数特性が変化しており、一般にCCVは剛な地盤になるほど大きな値をとる。

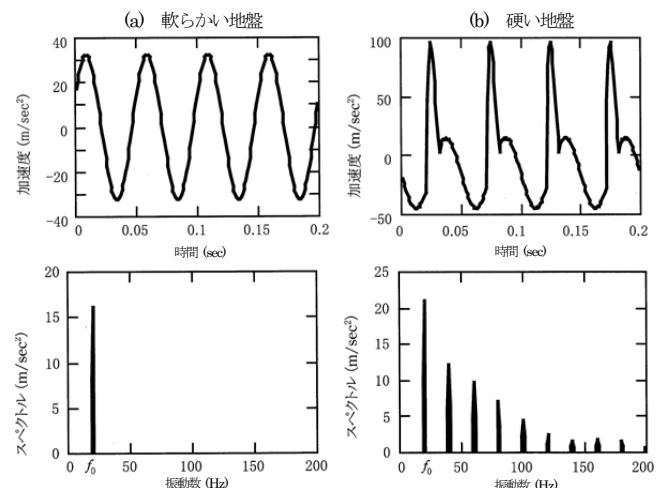


図-8 地盤の剛性による加速度波形・周波数特性の変化⁷⁾

大規模土工工事では、CCV と GPS を併用することにより、締固めの進行に応じた地盤剛性と転圧回数を面的に管理した事例が報告されている⁸⁾。一方で、フィルダムのコア材に対しては、①剛性・密度に加えて、遮水性が要求されること、②湿潤状態の粘性土は、転圧回数及び乾燥密度の増加に対して CCV の変化が鈍感であることなどの理由から、CCV の適用は困難とされてきた。

(2) CCV による遮水性の評価方法

図-9 に、粒度及び締固めエネルギーが適切に管理された場合の含水比と変形係数・透水係数の関係を示す⁹⁾。小石原川ダムにおいて規定している含水比の範囲($w_{opt@1Ec}-0.8\%$ ～ $w_{opt@1Ec}+2.2\%$)において、ばらつきを考慮しても、変形係数は一定値以下 ($E<7.0\text{MPa}$ 程度) であり、透水係数は規定値を下回っている。

また、図-10 に示すように、変形係数と CCV は概ね線形関係にある。そこで、「変形係数～透水係数の相関」と「変形係数～CCV の相関」から、CCV をある範囲に収めることで、間接的に遮水性を評価できるものと考えられる。

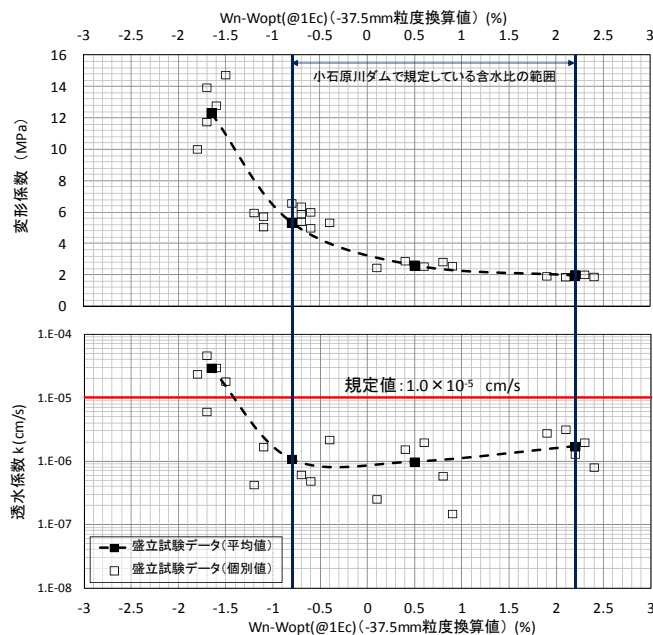


図-9 含水比と変形係数・透水係数の関係⁹⁾

すなわち、盛立面において計測された CCV が、含水比の乾燥側($w_{opt@1Ec}-0.8\%$)と湿潤側($w_{opt@1Ec}+2.2\%$)で計測された CCV の範囲内であれば、遮水性を評価できていると考えられる。

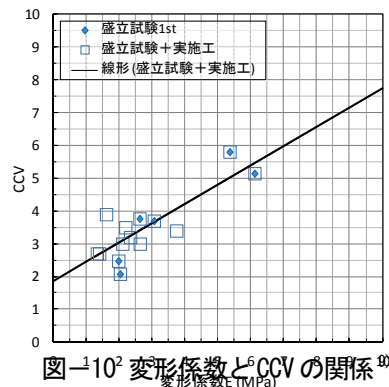


図-10 変形係数と CCV の関係⁹⁾

(3) CCV の位置付けとその意義

CCV による盛立面の遮水性評価は、前提条件に基づく間接的な方法であるため、現場透水試験の代わりにはなり得ない。したがって、CCV 管理は、遮水性評価のための密度管理(RI 法等)を代替するものとして位置付けている。

また、CCV を導入する意義は、以下のとおりと考える。

- ① 施工と同時に品質管理ができる (合理化)
- ② 面的管理により盛立面の均質性が確認できる (高度化)
- ③ 抜取検査型の試験位置の決定に寄与する (高度化)

(4) CCV に含まれる異常値とその原因

CCV は、リアルタイムで大量のデータを取得できるという特徴を有するが、これは同時に、局所的な地盤材料の変化や振動ローラの微細な挙動の変化がデータに反映されることを意味する。

図-11 に、盛立面における CCV マップの一例を示し、図-12 に、CCV と基本振動数 f_0 の時刻歴データの一例を示す。マップ上では、局所的に高い値が点在しているが、主な原因は、①コア・フィルター境界、②振動の ON/OFF、③転圧方向の切返しである。この例でも、①～③の影響により、高い値が計測されている。この他にも、異常値の影響が演算処理仕様に起因して残存する可能性があることを確認しており、全ての異常値を棄却することは困難である。

したがって、CCV の管理としては、極値(最大値・最小値)を用いた絶対値管理よりも、面データの確率分布を用いた管理の方が適切であると考えられる。

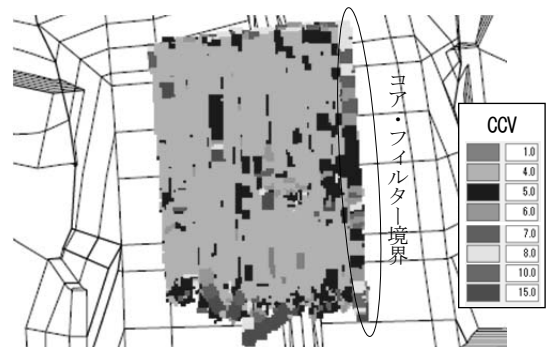


図-11 盛立面における CCV マップ (例)

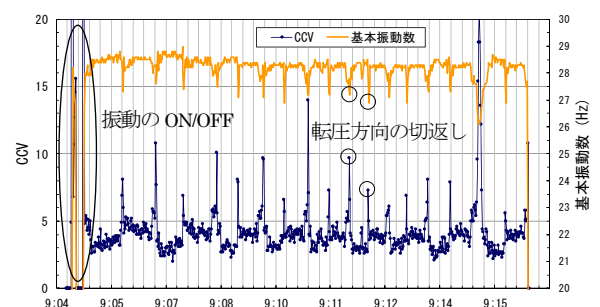


図-12 CCV と基本振動数 f_0 の時刻歴データ (例)

(5) CCV を用いた面的管理の運用ルール(案)の策定

図-13 に、3 ケースの盛立試験における CCV の累積発生確率分布を示す。含水比の低下に対して CCV は単調増加しており、図-9 と同様の関係が得られている。

この結果に基づき、CCV の運用ルール(案)を図-14 に示す評価フローのように定めた。

- ① 盛立面における CCV の計測値が、盛立試験で得られた乾燥側～湿潤側の計測範囲（塗りつぶし範囲）内に収まることを確認する（所要品質の確認）。
- ② 分布の偏り（グラフ形状の乱れ、CCV マップ）やロット間の相異もあわせて確認する（均質性の確認）。
- ③ 異常が検出された場合は、CCV マップにより、特に上下流方向への異常箇所の連続性を確認する（不良箇所の特定・品質への影響度把握）。
- ④ 連続性がない場合は、異常箇所に対して目視・触診を、連続性がある場合は、上記に加えて簡易試験を実施し、正常値が得られることを確認する。
- ⑤ ④において異常が確認された場合は、再施工を行う。

上記の運用ルールは試行中のものであるが、今後計測データを蓄積・分析した上で、内部の技術委員会へ諮り、品質管理項目へ位置付ける予定である。

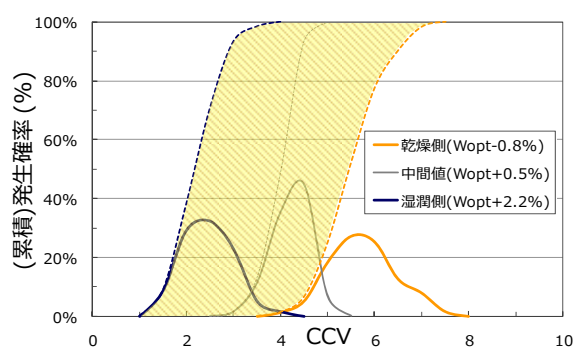


図-13 CCV の累積発生確率分布（盛立試験）

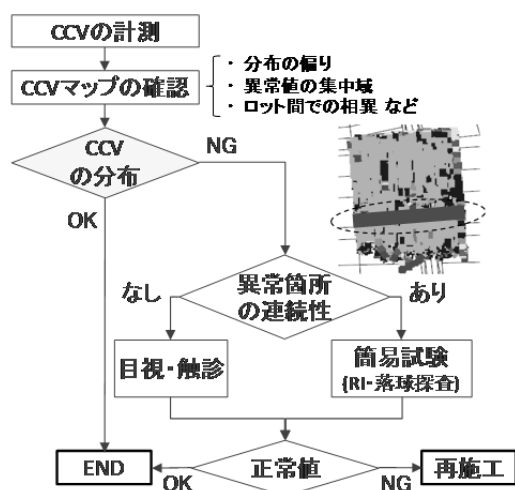


図-14 CCV による盛立面の性能評価フロー

4. まとめ

本稿では、小石原川ダムの盛立工において活用されている種々の ICT 施工を紹介するとともに、コア材への適用事例がない ICT 施工の技術的課題への取組について報告した。本検討を通じて得られた知見は、以下のとおりである。

- 1) 帯磁率計の導入により、ロック材料の岩種判別を定量化することで、監督員の習熟度の違いによって生じる判別結果の差を低減し、ロック材料の品質管理を高度化した。
- 2) 画像粒度解析システムにおけるコア材の団粒化の影響が、自然含水比と最適含水比により補正できることを示すとともに、37.5mm 以上の粒径では、含水比により結果が左右されないことを明らかにした。
- 3) CCV が異常値を示す原因を検証し、遮水性の面的管理に向けた CCV の運用ルールを策定した。今後、計測データを蓄積・分析した上で、内部の技術委員会に諮り、品質管理項目へ位置付ける予定である。

謝 辞

筆者は、電源開発(株)からの出向職員であり、日々貴重な現場経験を積むことができています。ここに記して、関係者の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日下 雅史, 米田 昌史, 下山 茂ら. 2011. 殿ダム本体工事における情報化施工技術の導入.
- 2) 酒井 正二郎, 後田 浩二. 2018. 大分川ダム建設事業における ICT の活用事例.
- 3) 宮崎 智也, 有馬 慎一郎, 定宗 幸雄. 2017. 小石原川ダム建設工事における CIM の活用状況.
- 4) 財津 孝雄, 田中 英晶. 2017. 小石原川ダム本体建設工事における ICT 施工について.
- 5) 藤崎 勝利, 黒沼 出, 川野 健一ら. 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.
- 6) 谷中 保男, 高橋 章, 梗田 茂樹, 西垣 誠. 2006. 粗粒・高含水比コア材料の品質改良に関する研究.
- 7) 公益社団法人地盤工学会. 2012. 土の締固め.
- 8) 高倉 敏, 北村 佳則, 大谷 茂ら. 2003. 盛土地盤における締固め品質管理手法の開発.
- 9) 坂本 博紀, 坂井田 輝, 田中 英晶, 有馬 慎一郎. 2017. フィルダムコア盛立の新たな品質管理手法の検討.