

ロックフィルダムの盛立工における挑戦 — ICT施工の全面展開 —

福島 雅人¹・坂本 博紀¹・奈良 洋幸²

¹独立行政法人水資源機構 朝倉総合事業所 工事課 (〒838-0019 福岡県朝倉市上秋月1373-1)

²独立行政法人水資源機構 ダム事業部 事業課 (〒330-6008 埼玉県さいたま市中央区新都心11-2)

福岡県に建設中の小石原川ダムでは、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が推進されており、(独)水資源機構では、維持管理の効率化・高度化も視野に入れたi-Construction & Managementを推進している¹⁾。フィルダム建設の分野では、殿ダムや大分川ダムをはじめとして、GNSS測量機、UAV、MG・MC (Machine Guidance・Control) 建機などを活用したICT施工が導入され、生産性向上に係る様々な成果が報告されている²⁾。

福岡県に建設中の小石原川ダムは、洪水調節・水道用水・不特定用水を目的とし、堤高139m、堤体積約870万m³、堤頂長約550mと九州一の規模を誇るロックフィルダムであり、2019年9月に盛立完了した (写真-1参照)。

本稿では、小石原川ダムの盛立工を対象として、各施工段階で活用されているICT施工を紹介するとともに、その技術的課題への取組について報告する。



写真-1 小石原川ダム上流面 (盛立完了)

2. 盛立工で活用したICT施工の紹介

(1) 小石原川ダムにおけるICT施工の導入実績

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。例えば、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できています。

次節では、ロック材の品質管理の高度化に貢献した帯磁率計 (No.①-2) について紹介する。

表-1 小石原川ダムにおける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」によるロック材の岩種判別
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ブルドーザ」による薄層スツガ 仮造成・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」によるコア材のまき出し時の分離防止
8	「UAV空撮画像」によるまき出し状態の品質保証
9	「GNSSブルドーザ」によるまき出し厚管理
10	「自動化重機(A-CSEL(ケッドアケル))」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」による盛立面の遮水性の面的管理
13	「FEM情報化施工」による盛立時の間隙水圧の管理

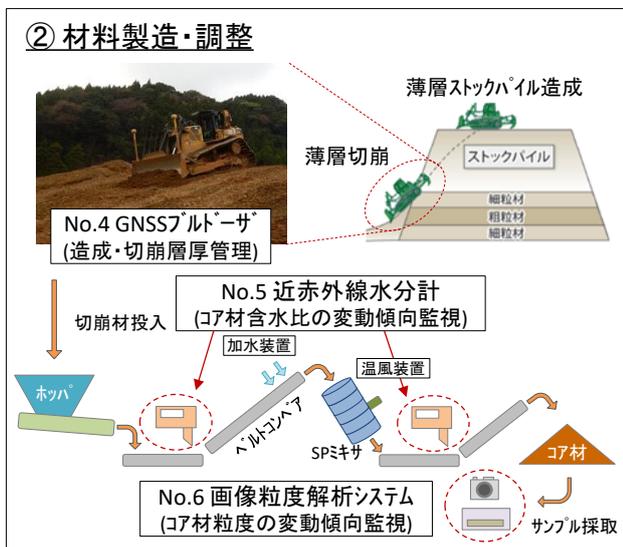
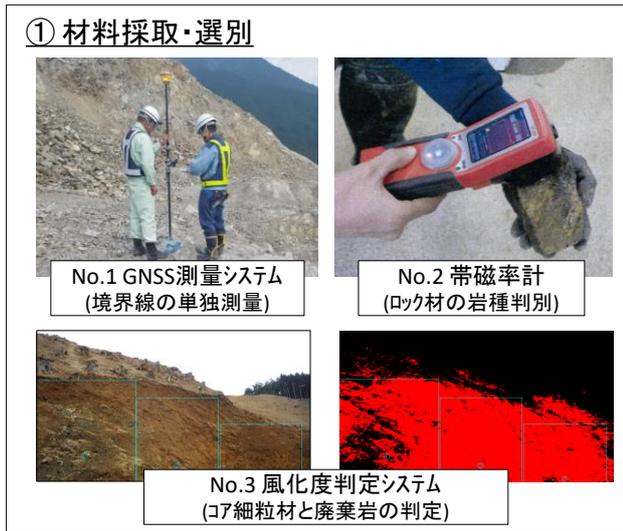


図-1 小石原川ダムにおけるICT施工の導入実績

(2) 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・強度（比重・吸水率、内部摩擦角）、②圧縮抵抗性、③排水性（透水係数）、④耐久性（乾湿繰返し、凍結融解）が挙げられる。そのため、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を配置する必要がある。

小石原川ダムの原石山では、古生代末～中生代初期に変成作用を受けた三郡変成岩類が分布しており、表-2に示すように、塩基性片状ホルンフェルス（以下、bHfという）と互層様片状ホルンフェルス（薄層の頁岩と砂岩が互層状をなすもの）（以下、aHfという）が主に賦存している。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行うことが重要である。

材料判定は、①岩種、②割れ目の間隔（粒径）及び③割れ目の状態（風化度）を目視により、④硬さを打音等により実施している。このうち、岩種以外の項目については、監督員間の目合わせが比較的容易であったが、岩種については、写真-2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。

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。帯磁率計とは、磁場と誘導磁気との比で定義される物理量であり、主に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、①非破壊測定である、②軽量小型で持ち運びが楽、③リアルタイムで結果が得られるなど、非常に簡便な計測機器である。

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。岩種毎に帯磁率の値域が異なっているため、 $0.3 \times 10^{-3}(\text{SD})$ 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。

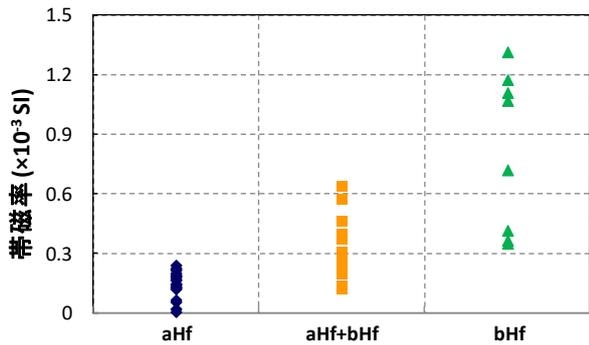
最終的な岩種の判断は監督員の目視によるが、帯磁率計の導入により、監督員の習熟度の違いによって生じる岩種判別結果の差を低減し、品質管理の高度化を図ることができた。

表-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	黒色で片理が卓越する	緑色で比重が大きい
賦存量	○	△
強度	△	○
耐久性	×	○



写真-2 発破後の切羽の外観（岩種判別が困難な例）



(熟練者2名の目視による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. ICT施工の技術的課題への取組

(1) 小石原川ダムにおけるコア盛立の品質管理目標

締固め土の工学的特性（乾燥密度，変形係数，透水係数）は，粒度，含水比，締固めエネルギー（以下，CELという）の3つで規定される．これに基づき，より良い締固めを行うことで，高密度・高剛性・低透水のコア盛立を実現するため，小石原川ダムにおけるコア盛立の品質管理においては，以下3つの目標に挑戦した⁴．

- ① 現場の締固めエネルギーに基づく管理含水比の設定
- ② 飽和度の管理下限値の設定
- ③ ICT施工を用いた粒度，含水比，CELの全量管理

フィルダムの施工管理においては，上記3要素を均一化するような施工努力がなされている．特に，含水比が最適含水比 w_{opt} より乾燥側になると，透水係数が急増し，水浸によるコラップス沈下，強度・剛性の低下が生じるため， w_{opt} から湿潤側に+2~3%程度の範囲で管理するのが一般的である．この場合， w_{opt} はCELを1.0Ec（標準プロクター）とした室内締固め試験で求める場合が多い．一方，転圧機械の大型化・高性能化に伴い，現場の締固めエネルギー（以下，CEL_Fという）が向上していることを考慮すると，1.0Ecに対する w_{opt} を基準に管理含水

比を設定した場合，CEL_Fの w_{opt} に対しては3%以上湿潤側での施工を許容していることになり，エネルギーの有効利用ができておらず，場合によっては過転圧の恐れがある．

そこで，小石原川ダムにおけるコア盛立の品質管理においては，盛立試験により現場で用いる転圧機種種のCEL_Fが1.5Ec相当であることを明らかにし，CEL_Fに基づく含水比の管理範囲を， $w_{opt@1Ec}-0.8\% \sim w_{opt@1Ec}+2.2\%$ と定めた．

また，龍岡が提唱する飽和度管理⁵に基づき，従来の締固め度D値による管理で許容していた低飽和度の領域を排除するとともに， w_{opt} から乾燥側の領域を広げるため，飽和度の下限値（ $S_r \geq 85\%$ ）を設定した．

図-3に示すように，上記の設定により，管理範囲は左上にシフトしている．これは，締固め後の平均的な乾燥密度が高くなることを意味しており，従来よりも高品質なコアが期待できる．

以上の品質管理手法の前提条件は，粒度，含水比，CELが適切に管理されていることである．そこで，小石原川ダムでは，表-1及び表-3に示すように，粒度に対して画像粒度解析システム，含水比に対して近赤外線水分計，CELに対してICT転圧管理システムを導入することにより，これらを全量管理に近づける試みを行っている．

次節では，このうち，画像粒度解析システムに残された技術的課題への取組について報告する．

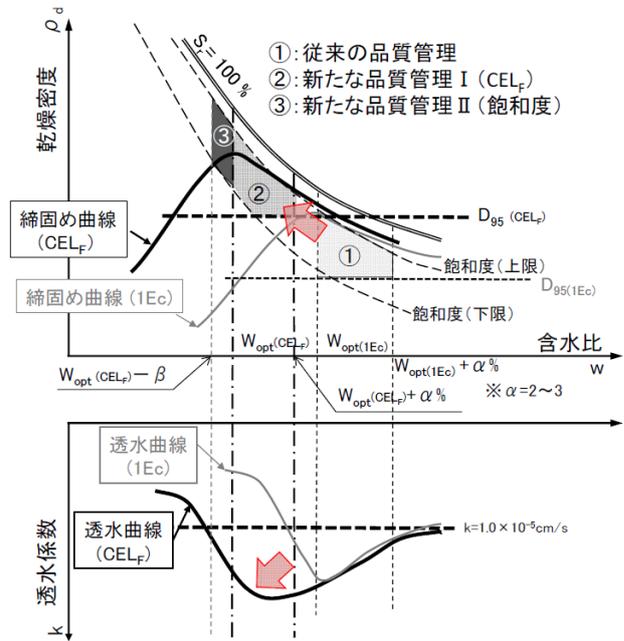


図-3 小石原川ダムのコア盛立の品質管理目標⁴

表-3 粒度，含水比，CELの全量管理に向けた取組

項目	従来	小石原川ダム
粒度	JIS法：1回/日	JIS法+画像粒度解析システム(1回/30分)
含水比	JIS法：3回/日	JIS法+近赤外線水分計(全量)
CEL	施工仕様規定	施工仕様規定+ICT転圧管理システム

(2) 画像粒度解析システムによる粒度推定精度の向上

a) システム概要と技術的課題

画像粒度解析システム[®]とは、図-4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はあるが、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-3に示すように、低含水比では団粒化は生じないが、高含水比では、細粒分の団粒化、粒子同士の付着、大礫への細粒分のへばりつきなどが視認される。したがって、相関式設定時の含水比と、実運用時の含水比が異なると、図-5に示すように、推定される粒度分布に誤差が生じるため、団粒化の影響を補正することが課題となっていた。

b) 補正方法とその結果

既往事例では、粒度インデックス I_i 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、試験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～粗粒の5パターンの粒度分布に対して、最適含水比 w_{opt} -1%～+2.5%程度の範囲で含水調整しながら、 I_i の変化を調べた。

図-6(a) (b)に、粒径9.5mm及び19.5mmを対象とした場合における含水状態に応じた I_i の変化を示す。 w_{opt} より乾燥側においては、 I_i はほぼ変わらない。これは、 w_{opt} は w_p と概ね等しいことから、 w_{opt} から乾燥側では、塑性体状ではなく半固体状となり、団粒化が生じにくくなったためと考えられる。また、 w_{opt} より湿潤側においては、 w_n の増加に伴い団粒化が進行した結果、 I_i は大きくなっている。一方で、図-6(c) (d)に示すように、大粒径(37.5mm以上)を対象とした場合では、 I_i は含水状態にほとんど依存していない。これは、37.5mm以上となる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。

これらの結果を用いて、画像粒度解析システムの補正フローを以下のとおりとした。

- ① 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、 $\Delta W (= w_n - w_{opt})$ を算出する。
- ② キャリブレーション結果を利用して、 ΔW に対応する I_i と加積通過率の相関式を得る。
- ③ 画像粒度解析システムにより、各粒径の I_i を取得し、上記の相関式に代入して、加積通過率を得る。

以上の結果から、 I_i と加積通過率の相関式を逐次補正することで、粒度分布の推定精度が向上した。

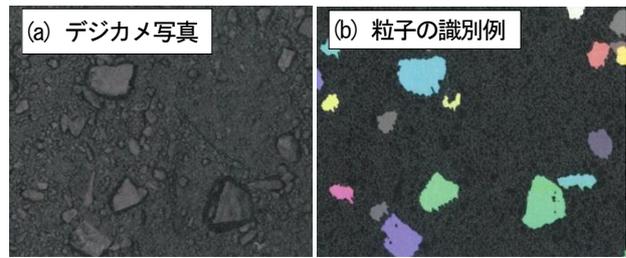


図-4 画像粒度解析システムによる粒子の識別例



写真-3 含水状態による団粒化の影響（同一粒度）

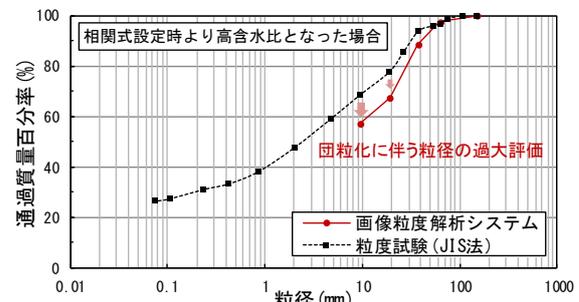


図-5 団粒化により生じる粒度分布の誤差（イメージ）

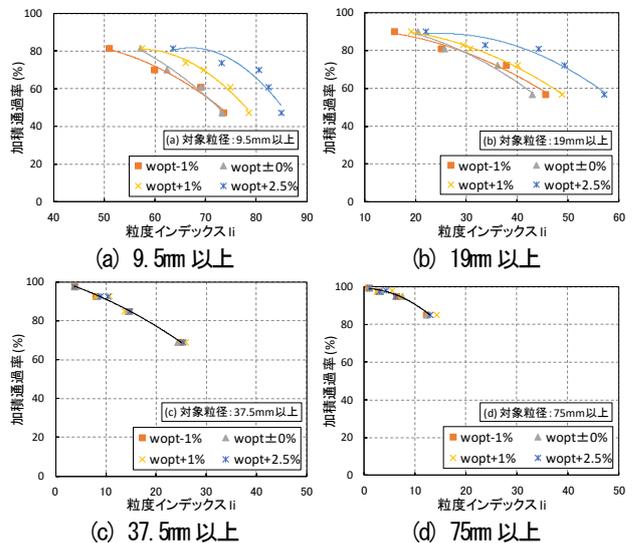


図-6 各粒径における含水状態に応じた I_i の変化

(3) CCVを用いたコア材の遮水性の面的管理

a) CCVの定義と技術的課題

CCV (Compaction Control Value) とは、振動ローラの加速度波形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(1a)のように定義される⁷⁾。

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

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

図-7に、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、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～着地により高周波成分が増加するため、一般にCCVは剛な地盤になるほど大きな値をとる。

大規模土工工事では、CCVとGNSS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⁾。しかしながら、一般的なCCVの管理手法は、地盤剛性の下限値管理であり、フィルダムのコア材のような高含水比の粘性材料は、締固めの進行に伴う剛性の変化が許容下限値周辺で小さいことや、剛性・密度に加えて遮水性が要求されることから、適用が困難とされてきた。したがって、これまでのフィルダムのコア盛立における面的な管理記録は、施工層厚や転圧回数の記録に留まっており、従来の管理手法の代替とされる状況には至っていなかった。

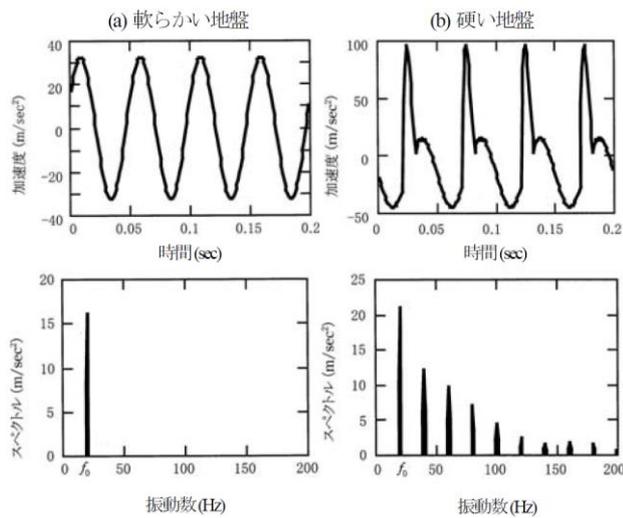


図-7 地盤剛性による加速度波形・周波数特性の変化⁷⁾

b) CCVによる遮水性の評価方法

表-4に示すように、遮水性の管理手法のうち、現場透水試験が直接的な手法であるが、概ね1日の時間を要する。そのため、日常管理としては、粒度、含水比、CELが適切に管理されていることを前提に、乾燥密度と透水係数の間接的な関係を用いて、迅速法 (RI法) による乾燥密度の計測が実施されてきた。

図-8に、小石原川ダムの盛立試験に基づく含水比と乾燥密度・透水係数・変形係数の関係を示す⁴⁾。この結果は、一般的な締固め土の工学特性と含水比の関係⁷⁾と一致する。小石原川ダムの含水比の管理範囲 ($w_{opt@1Ec} - 0.8\% \sim w_{opt@1Ec} + 2.2\%$) において、含水比の増加に伴い変形係数は減少しており、この間透水係数は規定値を下回っている。したがって、変形係数の上限値管理を用いれ

ば、乾燥密度と同様の管理がより迅速に可能となる。

CCVと変形係数は、ともに地盤剛性の指標であり、線形関係にある⁹⁾。そこで、変形係数による管理手法をCCVに置き換えて、盛立面で計測されたCCVが、管理含水比の乾燥側 ($w_{opt@1Ec} - 0.8\%$) 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。

ただし、CCVによる盛立面の遮水性評価は、乾燥密度・変形係数の場合と同様に、前提条件に基づく間接的な方法であるため、現場透水試験の代替にはなりえない。したがって、CCV管理は、遮水性評価のための密度管理 (RI法など) 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, 高度化)
- ② 面的管理で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)

表-4 遮水性の管理手法の一覧

管理項目	試験方法	管理手法		計測時間
透水係数	現場透水試験	直接	点管理	1日/層
乾燥密度	RI法	間接	点管理	2時間/層
変形係数	落球探査法	間接	点管理	15分/層
CCV	(実施工=試験)	間接	面的管理	自動計測

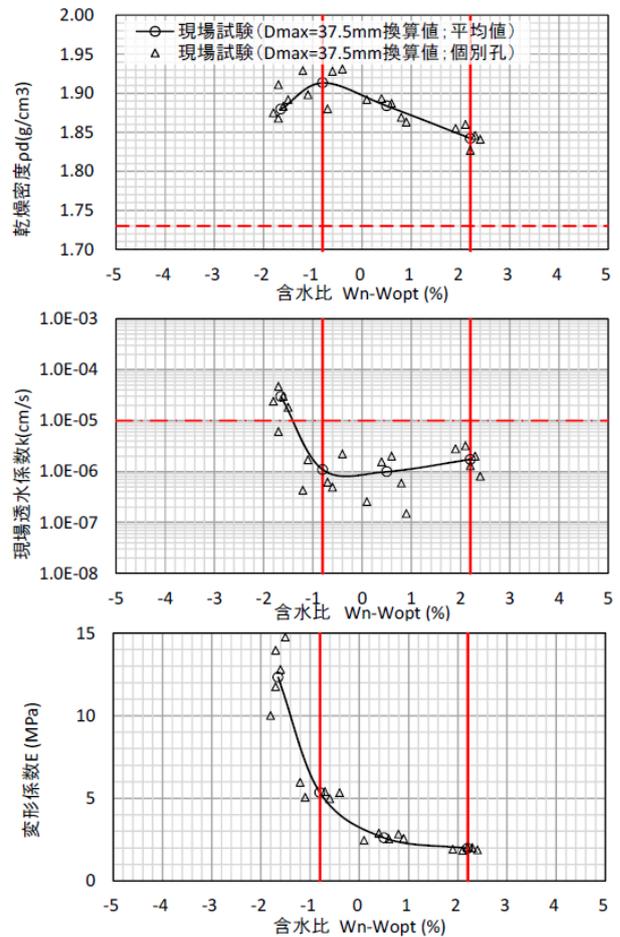


図-8 含水比と乾燥密度・透水係数・変形係数の関係⁴⁾

c) CCVの運用ルール の策定

図-9に、3ケースの盛立試験で得た計測面における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-8と同様の関係が得られている。

この結果に基づき、CCVの運用ルールを図-10に示す評価フローのように定め、品質管理基準に位置付けた。

- 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）内であることを確認する（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連続性を確認する。
（異常箇所の特定、品質への影響度把握）
- ④ 連続性がない場合は、異常箇所への目視・触診を、連続性がある場合は、RI法などの簡易試験を実施し、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。

以上より、CCVの導入により、品質管理試験の実施時間を大幅に短縮するとともに、遮水性の面的管理を実現できた。

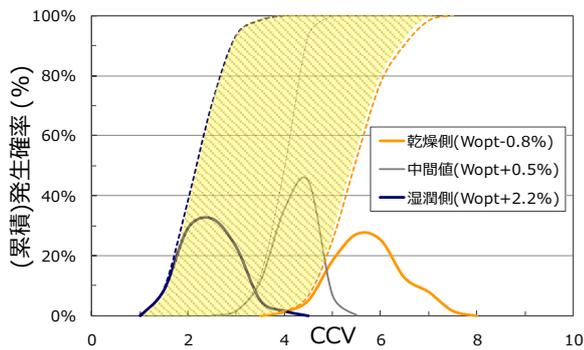


図-9 CCVの累積発生確率分布（盛立試験）

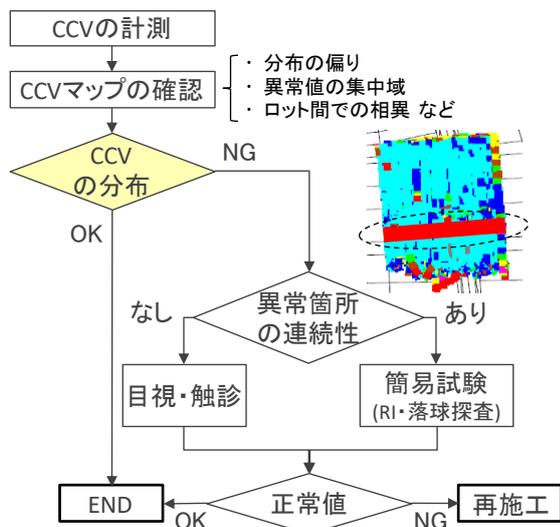


図-10 遮水性の面的管理に向けたCCVの運用ルール

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、適用事例に乏しい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、監督員間の習熟度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に対して、自然含水比と最適含水比を用いて、その影響の補正手法を示し、粒度分布の推定精度を向上させた。
- 3) CCVによる遮水性の評価方法及び運用ルールを構築し、品質管理基準に位置付けることで、品質管理試験の実施時間を大幅に短縮するとともに、盛立面の遮水性の面的管理を実現させた。

謝辞：小石原川ダムの堤体盛立は無事完了し、今年度事業完了予定です。各種の難題を解決し、盛立完了を迎えることができたのは、地元やユーザーの皆様のご理解・ご協力、有識者検討会の委員をはじめとする専門家の皆様によるご指導、関係者の皆様のご尽力によるものであり、ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 宮崎 智也, 有馬 慎一郎, 定宗 幸雄：小石原川ダム建設工事におけるCIMの活用状況。
- 2) 日下 雅史, 米田 昌史, 下山 茂ら：殿ダム本体工事における情報化施工の導入。
- 3) 酒井 正二郎, 後田 浩二：大分川ダム建設事業におけるICTの活用事例。
- 4) 坂本 博紀, 福島 雅人, 日野 浩二：小石原川ダムにおけるコア盛立の品質管理の合理化・高度化に関する検討。
- 5) 龍岡 文夫：土の締固めにおける飽和度管理の重要性。
- 6) 藤崎 勝利, 黒沼 出, 川野 健一ら：デジタルカメラ画像を用いたCSG材の粒度監視システム。
- 7) 公益社団法人地盤工学会：土の締固め。
- 8) 高倉 敏, 北村 佳則, 大谷 茂ら：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, 小林 弘明, 龍岡 文夫ら：フィルダムコアゾーンにおける現場透水係数と地盤剛性に関する検討。