

小石原川ダムにおけるコア盛立工の ICT による品質管理

鹿島建設(株) 正会員 ○小原 隆志, 小林 弘明

1. はじめに

小石原川ダム（中央コア型ロックフィルダム）本体建設工事では、事業効果を早期に発現するため堤体盛立の高速施工が求められた。特に遮水ゾーンのコアについては、高速施工でも沈下や変形が生じないよう高い品質で盛立する必要があることから、品質管理値の改善や様々な ICT の導入を進め、全量管理型の遮水性盛土の品質管理法を開発・運用した。本報ではその実績を報告する。

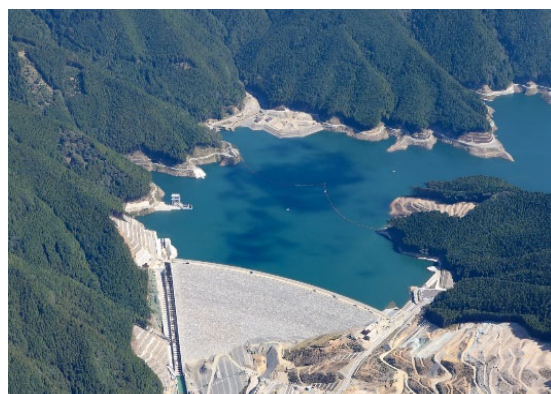


図-1 小石原川ダムの試験湛水状況

2. 小石原川ダムの高速施工とその課題

当ダムは 2017 年 9 月に堤体盛立を開始、2019 年 9 月に完了、同年 12 月に試験湛水を開始した（図-1）。堤高 139m、堤体積約 870 万 m^3 （うち、コアゾーンは 96.8 万 m^3 ）を 24 カ月（コアゾーンは 22 カ月）で完了させる計画であった。これは同規模の既往フィルダムと比べて盛立期間が 1/2 程度と非常に短い工程であった。

このため、高速施工を行うに際して、試験湛水までにコアの過剰間隙水圧の消散が終わらず有効応力が不足する可能性が懸念された。このことから、高密度、低透水で将来の沈下が小さい高品質なコアの盛立を目指し、締固め管理の改善と ICT 化による全量管理によってコアの品質向上を図ることとした。

3. 締固め管理の改善

(1) コアの高密度化のための施工含水比の設定

図-2 に締固め土の各特性値と含水比の関係のイメージを示す。一般的なコア盛立では、締固め土の品質は図-2(a)の①の領域で管理される。これは JIS A 1210（突固めによる土の締固め試験方法）の A 法もしくは B 法（いずれも $1E_c$ ）で得られる最大乾燥密度 ρ_{dmax} の 95%以上の乾燥密度を最適含水比 w_{opt} ～ $w_{opt}+3\%$ の範囲で確保するものであり、図-2(b)に示すように最適含水比より湿潤側で透水係数が極小となる性質を利用して遮水性を確保するものである。

当ダムでは、現場盛立試験の結果より現場の締固めエネルギー（以下、CEL）が約 $1.5E_c$ であったこと、CEL が上昇すればより低い含水比で乾燥密度が上昇し透水係数が低下すること、などから、図-2(a)の②の領域、つまり $1.5E_c$ の最適含水比を基準とし、従来よりも乾燥側の範囲で含水比管理を行い、締固め品質の向上を図ることを基本とした¹⁾。更に、後述の飽和度管理の導入により、現場 CEL による締固め曲線と下限飽和度コ

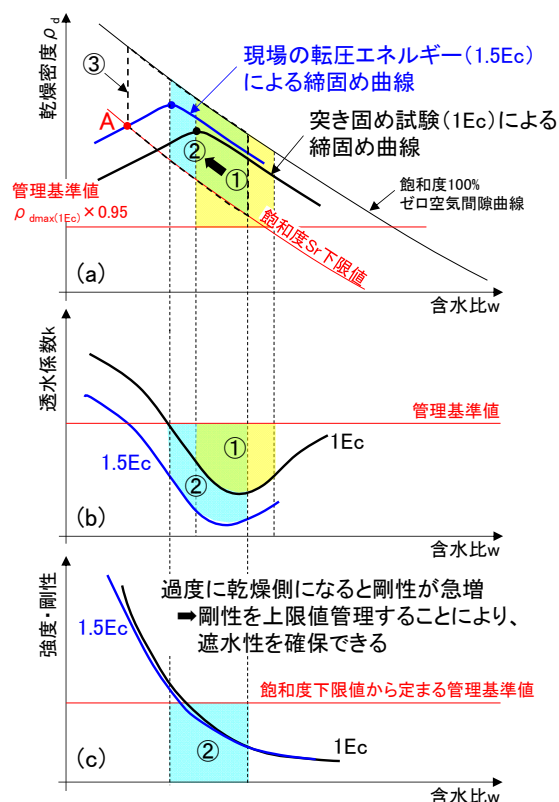


図-2 締固め土の力学特性と
小石原川ダムの品質管理

キーワード ロックフィルダム, コア, 品質管理, 遮水性, 地盤剛性指標, 面的管理

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 090-9017-8846

ンターの交点 A における含水比を管理下限値とすることが可能となることから、**図-2(a)**の点線枠で示す③の領域まで管理範囲を拡張できる。実務では、ピンポイントで A 点を決定することは難しいため、盛立試験で所要の品質を確認できた ($w_{opt})_{IEc} - 0.8\% \sim +2.2\%$ の範囲で含水比を管理した。

(2) 新たな品質管理法

従来よりも乾燥側の含水比範囲で $1E_c$ の ρ_{dmax} に対する $D_c \geq 95\%$ で管理した場合、CEL や材料のばらつきなどによって、飽和度が低く透水係数が過大な状態が発生する可能性がある。このため、飽和度の下限値を設定して、その可能性を排除するとともに、CEL の不足が生じないよう ICT を活用した CEL の全面管理を行った。さらに、盛立材料の品質保証を高めるため、搬出材料の含水比と粒度について ICT による全量管理^{2),3)}を行った。また、CEL と材料が概ね一定に管理されていることを前提に、飽和度とも相関のある地盤剛性に着目し、**図-2(c)**に示すように、乾燥側で締固めた場合に剛性が増加する特性を利用し、透水係数が規格値を満足する剛性の上限値を設定することで遮水性不足を回避することを考えた。つまり、先述した CEL と材料の管理に加えて転圧面の剛性についても ICT で面的管理することで間接的に遮水性を管理することとした⁴⁾。

以上述べたとおり、 $1.5E_c$ の CEL に合わせて乾燥側の施工含水比でコアを高密度化し、かつ、遮水性を確保するためには、(a)材料の均一性、(b)CEL の管理、(c)遮水性確保のための剛性管理が重要と考え、これらの品質を施工範囲全域で管理可能な ICT を駆使したシステムを構築した。これらの ICT 施工データはクラウドで一元管理し、工事関係者が時と場所を選ばずデータ確認が可能な環境を整えた。

4. ICT による品質管理

(1) 材料の均一性確保（含水比・粒度の全量管理）

複数の土質材料のブレンド材であるコアの均一性を向上させるため、**図-3**、**図-4**に示す混合設備を導入した。この設備は近赤外線水分計と画像粒度解析システムを装備しており、材料が運搬されるベルトコンベア上に設置した2台の近赤外線水分計によって含水比を常時リアルタイムに計測し（**図-5**）、ミキサにより混合したコア材の粒度分布を30分に1回の頻度で画像粒度解析システムによって計測した（**図-6**）。近赤外線水分計の計測値を基に設備内の加水装置や温風装置（ジェットファン）を用いて含水比を調整した。また、粒度については画像粒度解析システムによって変動傾向を監視し、目標粒度幅を超過した場合は目視確認や粒度試験を実施した上で、ブレンドパイルでの粒度再調整を行うこととした。このように、含水比と粒度を全量管理することによって材料の均一性について従来より高頻度な品質管理を実施した。



図-3 コア材混合設備の全景

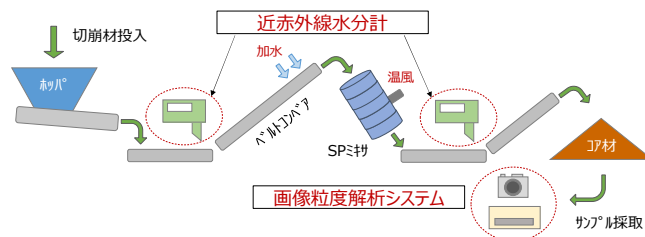


図-4 近赤外線水分計と画像粒度解析システム

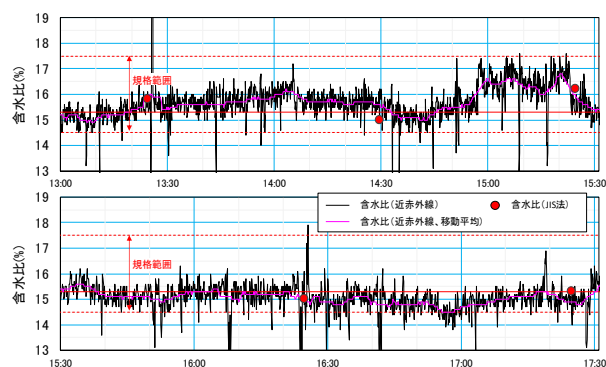


図-5 近赤外線水分計による含水比の連続測定の例²⁾

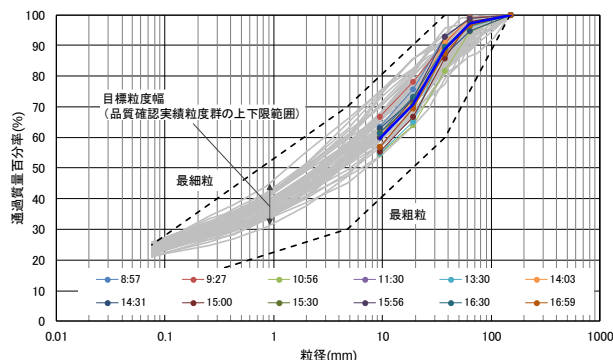


図-6 画像粒度解析システムによる粒度測定の例³⁾

(2) CEL の管理

コア盛立にはGNSS 建機を用いた ICT 土工を導入した(図-7)。マシンガイダンス搭載ブルドーザと振動ローラの転圧状況を可視化する転圧管理システムによって盛立て全面に対して所定の施工仕様(仕上り厚0.3m、8 回転圧)の履行を管理



図-7 コアの転圧状況

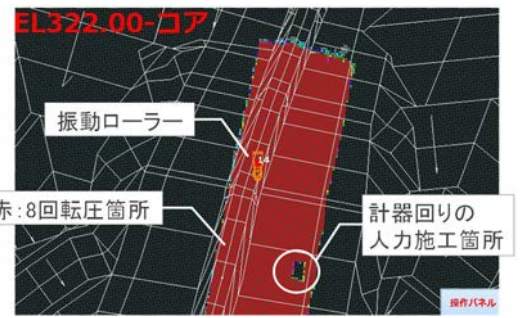


図-8 転圧管理システムの出力例

した。これらの施工仕様を盛立て範囲全面で履行することで所定の CEL が付与されることから、全箇所の施工履歴データを記録して CEL を全量管理した。図-8 に転圧管理システムによる転圧マップ出力例を示す。

(3) 遮水性確保のための剛性管理

剛性管理には落球探査法⁵⁾による変形係数とローラ加速度応答法による地盤剛性指標(以下、SSI)の一つであるCCV(Compaction Control Value)を段階的に採用した^{4),6)}。図-9に示すように、CCVの試行期間中に確認した変形係数EとCCVの相関関係を確認することで、CCVが実務適用可能な感度を有することを確認した。

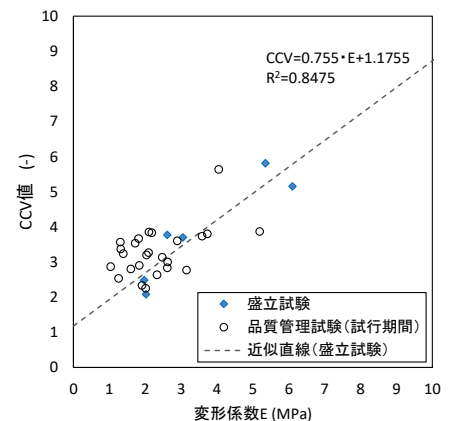


図-9 変形係数とCCVの関係⁴⁾に加筆

CCVデータ(1データ:50cm×50cm)の管理方法については、図-10に示すように施工含水比の下限・上限におけるCCVの累積発生率曲線を許容上・下限曲線として設定して、施工中に得た累積発生率曲線がこの二つの曲線の内側に収まることを確認することとし、これにより施工1ロット分の遮水性を間接的に管理した^{4),7)}。この管理方法は、材料の均一性確保とCELの管理がされた条件において成立する。図-11に管理帳票の例を示す。CCVマップとCCV累積発生率曲線で計測データの分布状況を可視化するとともに、統計データを記載した。

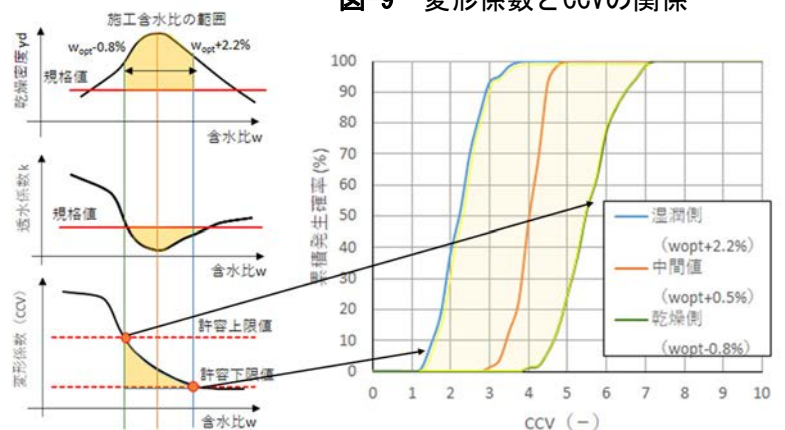


図-10 透水係数と加速度応答指標の管理範囲概念図⁷⁾

5. 本品質管理法の実績

(1) コアの品質向上

図-12に全盛立期間における従来法による品質管理の結果(締固め度、透水係数)を示す。締固め度は、全点で規格値である95%を満足し、さらに1Ecの締固め曲線を大きく上回る結果が多数確認された⁸⁾。また、飽和度と透水係数も規格値を満足した。図-13は近年の100m超級のロックフィルダムの平均的な締固め度の実績を比較したものである。本管理手法を適用した小石原川ダムは唯一締固め度100%を超え、遮水性能も他ダムと同等であった。既設ダムと比べて良好な締固め品質を確保できたことは、本品質管理法の成果と考えている。

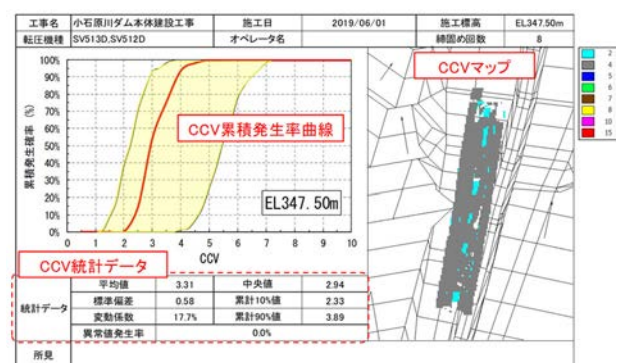


図-11 CCVの管理帳票

(2) 品質管理の生産性向上

SSI による遮水性能の間接評価で面的管理が実現できたことによって、RI 管理の一部代替が可能となった。具体には、転圧後の RI 試験の頻度を 1 回/1 層（当初）から 1 回/4 層に削減し、残る 3 回を SSI による評価で代替した。盛立全期間で合計すると約 14,000 点の試験点が省略され、1,300 時間以上の試験時間を短縮できた⁴⁾。また、現場常駐せずとも、ICT 管理によって品質管理項目がリアルタイムに監視でき、その記録も残るため、発注者職員による施工立会を一部省略でき、施工者・発注者双方の負担軽減に繋がった。

6. おわりに

ロックフィルダムのコアの品質向上を目的に ICT を用いた品質管理法を開発した。この管理手法を運用することにより、従来よりも良好な品質のコアを施工できた。さらに高速施工に資する品質管理の合理化を通じて生産性向上も実現することができた。

なお、本報文の内容は、発注者である（独）水資源機構ならびに龍岡文夫東京大学・東京理科大学名誉教授にご指導いただいた成果である。ここに改めて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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, ダム技術, No.390, pp.52-65, 2019.
- 2) 小林 弘明, 小原 隆志, 増村 浩一, 内場 謙二, 畑中 昭人, 坂本 博紀, 坂井田 輝: ロックフィルダム盛立におけるコア材製造時の新しい品質管理（その 1）—近赤外線水分計による含水比の全量管理—, 土木学会第 73 回年次学術講演会, VI-1060, 2018.
- 3) 小原 隆志, 小林 弘明, 増村 浩一, 中川 和歩, 坂本 博紀, 坂井田 輝: ロックフィルダム盛立におけるコア材製造時の新しい品質管理（その 2）—画像粒度解析システムによる粒度管理—, 土木学会第 73 回年次学術講演会, VI-1061, 2018.
- 4) 坂本 博紀, 小林 弘明, 龍岡 文夫, 福島 雅人, 曾田 英揮: 盛土締固めにおける遮水性能の面的管理法の開発と適用事例, ダム工学, Vol.31, No.1, p.27-39, 2021.
- 5) 北本 幸義, 吉田 輝, 川野 健一, 池尻 健, 鈴木 明夫, Jiaye W: 球体衝突理論に基づく岩質および土質物性の迅速評価手法, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.75, No.1, p.21-35, 2019.
- 6) 坂本 博紀, 小林 弘明, 龍岡 文夫, 曾田 英揮: 遮水性盛土の地盤剛性指標に基づく締固め管理, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.76, No.3, p.22-234, 2020.
- 7) 小林 弘明, 小原 隆志, 坂本 博紀, 福島 雅人, 龍岡 文夫: ロックフィルダムのコアにおける加速度応答指標に基づく遮水性の面的管理, 土木学会第 75 回年次学術講演会, VI-108, 2020.
- 8) 坂本 博紀, 龍岡 文夫, 曾田 英揮, 小林 弘明, 小原 隆志: 締固めエネルギーと飽和度を重視した遮水性盛土の締固め管理, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.77, No.1, p.43-58, 2021.

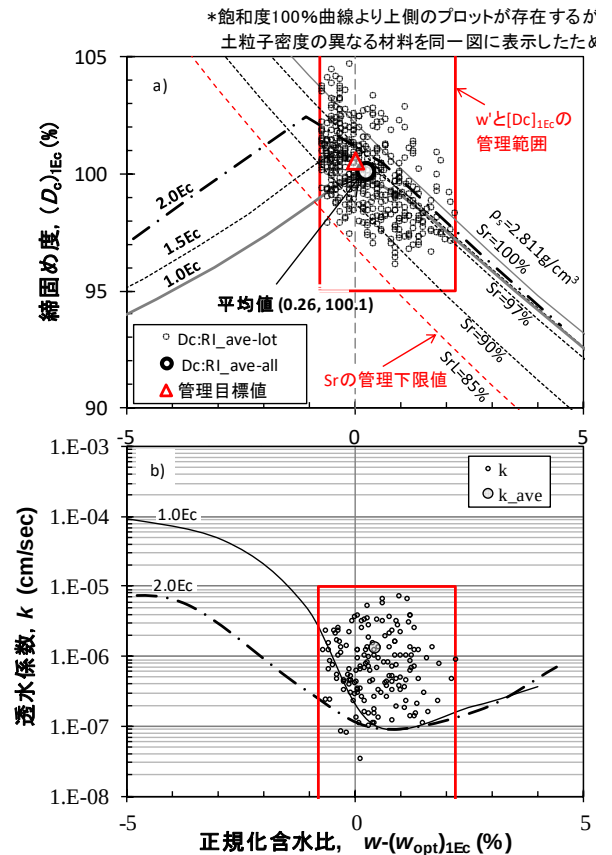


図-12 品質管理結果

（従来法：RIと現場透水試験）8)に加筆

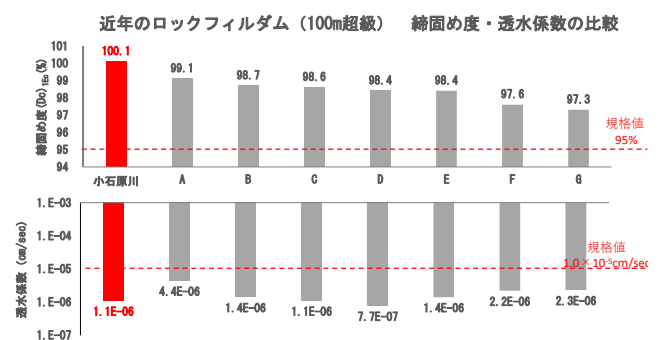


図-13 締固め度および透水係数の他ダムとの比較

（従来法による品質管理結果）