

# 近代的施工方法による国内初のCFRDダムの施工

大成建設(株)  
独立行政法人水資源機構思川開発建設所

正会員 ○小林 雅幸、○長井 健二  
大嶋 潤、山口 茂

## 1. はじめに

南摩ダムは、独立行政法人水資源機構が栃木県鹿沼市の利根川水系南摩川に建設する多目的ダムである。岩石材料で盛立した堤体の上流面をコンクリート遮水壁（フェイススラブと呼ぶ）で被覆する型式（コンクリート表面遮水壁型ロックフィルダム：略称CFRD）を採用している。重建設機械を使用して薄層転圧工法で施工する近代的施工方法としては国内初のダム本体適用となる。

国内のダム型式は、昭和中期以降、重力式コンクリートダムやゾーン型ロックフィルダムが主流となる一方、海外ではCFRD型式のダム事例が数多くある。堤体材料の合理化、堤体断面の縮小化、降雨や気温による施工制限を受けにくい盛立等の理由により、南摩ダムにおいても、工期、経済性、地形改変による自然環境への影響の面から比較検討を行った結果、CFRD型式が採用された。

南摩ダム本体建設工事は、令和2年12月にダム本体工事に着手し、基礎掘削、本体盛立の施工を経て、フェイススラブコンクリートに着手し、令和6年5月にダム本体が概成した（写真-1, 2）。

本稿では近代的施工方法を適用した国内初のCFRD型式のダムの本体施工について報告する。



写真-1 堤体上流面



写真-2 堤体下流面

## 2. ダム構造の概要

### (1) ダム本体の概形

南摩ダムの形状は、上流面勾配 1 : 1.805 (29.0 度)、下流面勾配 1 : 1.9 (27.8 度) で、堤高 86.5m、堤頂長 365m、堤体積約 230 万 m<sup>3</sup> である。堤体はロックゾーン、リップラップ、トランジションゾーンで構成され、上流面には遮水

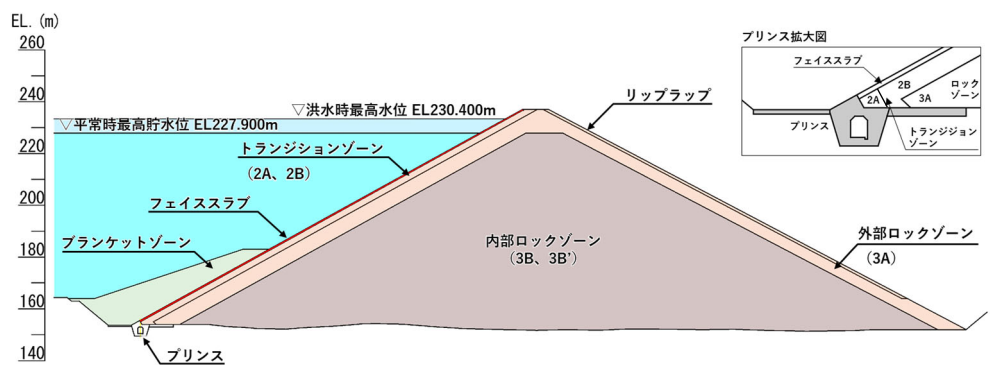


図-1 堤体断面図

壁としてフェイススラブコンクリート (2.2 万 m<sup>3</sup>) と、これを支持する役割をもつプリンスコンクリート (2.0 万 m<sup>3</sup>) が配置されている (図-1)。

盛立部は、エリア毎の要求性能（材料強度、耐久性、密度、透水性）に応じてゾーン分けされている（表-1）。盛立の大半（215 万 m<sup>3</sup>）を占める外部・内部ロック材は最大粒径 500mm～1,000mm の岩石材料で盛立てられ、下流面には表面保護のためのリップラップが設けられる。また、上流表面のフェイススラブとロック材との間には最大粒径 40mm～80mm のトランジション材を中間層として配置する構造となっている。

キーワード ダム、表面遮水壁型ロックフィルダム、盛立、CFRD型式、DX、自動化

連絡先 〒322-0049 栃木県鹿沼市花岡町 195 南摩ダム本体建設工事作業所 TEL0289-77-7221

フェイススラブは堤体の止水ラインを形成する重要な役割を果たし、スラブ形状はダム軸直角方向に 15m 間隔で鉛直継目を設け、合計 24BL に分割された、厚さ 350mm～547mm の不等厚コンクリートである。また、各ブロックは水平継目を設けない連続一体構造となっており、最大で斜面延長 164m の長大スラブ構造となる（図-2）。

プリンスは基礎岩盤を介しフェイススラブを支持するとともに、基礎岩盤中のグラウト止水ラインとをつなぐ重要な役割を担っており、躯体寸法は高さ 6.0m、幅 7.0m、延長 7.5m/BL で内部に監査廊が設けられ、河床から左右岸天端に渡り連続的に構築される。

表-1 盛立仕様

ゾーン名	材料	最大粒径	層厚	転圧回数	転圧機種
ゾーン3A (外部ロック) (リップラップ含む)	玄武岩CM級以上	500mm	50cm	4回 (1次盛立) 6回 (2次盛立)	振動ローラ20t級
ゾーン3B (内部ロック)	玄武岩CL級以上、チャート	500mm	50cm	6回	振動ローラ20t級
ゾーン3B' (内部ロック)	含ドロマイト珪質堆積岩類CL級以上	1,000mm	100cm	6回	振動ローラ20t級
ゾーン2A (トランジション)	河床砂礫+購入砂	40mm	25cm	6回	振動ローラ4t級、FPC
ゾーン2B (トランジション)		80mm	25cm	6回	振動ローラ20t級、FPC

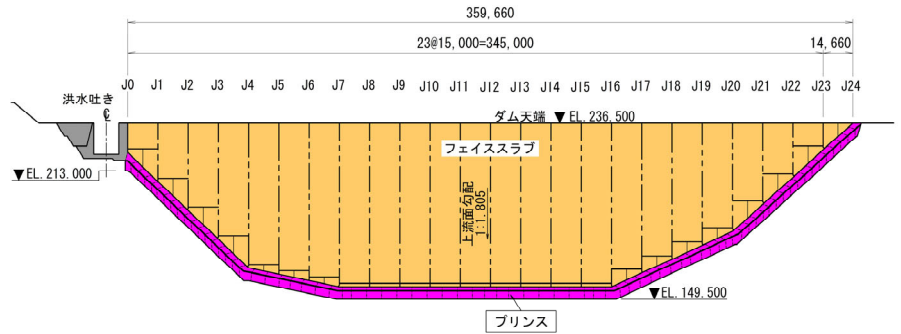


図-2 上流面図

## (2) 使用材料

### a) 盛立材料（ロック材、トランジション材）

盛立材料のうちロック材料は、ダム本体から 2.5km 上流に位置するダムサイト近傍の原石山から全量採取した。採取の際に発生する表土・廃棄岩等は建設発生土受入地へ搬出するほか、工事用道路の造成、貯水池斜面の押さえ盛土への活用を図った。

ロックゾーンに求められる要求性能としては、透水性が保たれ材料強度が大きく、変形性が小さいことであり、特に堤体表面に近い外部ロックゾーンはせん断応力抵抗が大きく、耐久性の高い材料が求められる。

ロック材は外部ロック材（ゾーン 3A）と内部ロック材（ゾーン 3B、3B'）に大別しており、外部ロック材には最も要求性能（材料強度・密度）の高い玄武岩の CM 級以上を使用し、内部ロック材には、チャート、含ドロマイト珪質堆積岩類等または玄武岩の CL 級以上を使用した。

トランジション材（ゾーン 2A、2B）は、フェイススラブ直下面に位置しスラブを直接支持することから沈下変形の少ない材料であるとともに、貯水池からの浸透水を適切に排水できる材料が求められることから粒度分布が重要となる。

トランジション材は近傍河川である大芦川、黒川から採取した河床砂礫をオーバーサイズカットした上で、購入砕砂と混合して所定範囲の粒度となるように製造した。

### b) コンクリート材料（プリンス、フェイススラブ）

フェイススラブは長大な斜面部において一体性を確保するため、河床部からダム天端まで中断することなく最大延長 162m を連続打設する必要がある。そのためコンクリートには、この連続打設を可能とする性状が求められ、施工段階におけるコンシステンシーの確保、脱型時のフェイススラブ表面の平坦性の確保、硬化後のひび割れ発生抑制が重要となる。また、冬期間の施工も行うことから、長大法面上における寒中コンクリートとしての対応が必要である。

プリンスはトレンチ形状の基礎岩盤内に構築されフェイススラブを支持する構造物であることから、高い止水性と耐久性が求められる。ひび割れが無く高い水密性をもったコンクリートとするために、マスコンクリートとしての対策が重要となる。また、暑中期の施工も行うことから、暑中コンクリートとしての対策が必要である。

これらの要求性能を満足するために、コンクリートを構成する骨材には石灰石を使用し、結合材には中庸熱

フライアッシュセメントを使用した。この他にもブリージング抑制、材料分離抵抗性、耐凍害性に配慮したコンクリートとし品質向上に努めた。

### 3. 施工における技術的課題と対応

#### (1) 盛立工における課題と対応

##### a) 盛立の沈下抑制対策

堤体盛立で転圧・締固めが不足すると塑性変形・不等沈下が発生し、フェイススラブに損傷を与え止水機能を損なう可能性がある。そのため堤体材料を均一かつ入念に転圧・締固めを行い、盛立完了以降の堤体変形を最小限に抑制することが重要であり、高速施工に対応したリアルタイムな転圧・締固め管理、現場密度の把握が必要であった（写真-3）。



写真-3 盛立状況

ロックゾーン（3A、3B、3B'）では、転圧不足が生じないように転圧回数・重複幅を面的に管理できるGNSS層厚管理・転圧管理システムを使用し、振動ローラに加速度計を搭載することで、現場密度と相関のある地盤剛性値をリアルタイムに測定し密度を間接的にモニタリングすることで全面的に品質を確保した。

ゾーン2Aでは、プリンスとフェイススラブ間で、かつ周辺継目（銅製止水板）背面の狭隘部での施工であることから、小型機械による丁寧な施工が求められた。施工中に地盤強度の確認可能な振動コンパクタ（340kg級、起振力45kN）を使用して薄層転圧（1層12.5cm）を行い所定の密度を確保した。

ゾーン2Bでは、表面から水平厚1mの区間は表面保護の目的でセメントを添加するため、施工はセメントの硬化時間を考慮した時間管理に加え、スラブと接する法面部ではFPC（フラットプレートコンパクション）機械にGNSSを搭載し、転圧位置と転圧時間を管理して所定の密度、平坦性を確保した。

##### b) トランジションの品質確保

盛立上流面のトランジションゾーンは、フェイススラブを支持する機能や適切な排水機能を持つ重要なゾーンであることから、トランジション材は内部摩擦角45.0度以上の高い性能が求められ、所定の粒度を満足する必要がある。また、盛立からスラブコンクリート構築完了までの間に、風雨やスラブコンクリート構築中の作業過程で発生する乱れ、轍等を防止する表面保護対策が必要である。



写真-4 製造設備

河床砂礫と購入砕砂のブレンド比率試験を事前に実施し粒度確認を行うとともに、3軸試験により内部摩擦角を確認した。さらに、表面保護としての機能を併せもつ2A材・2B材（水平幅1m区間）には、セメントを加えて強度を持たせた。また、これらの性能が実施工において長期的に機能するか確認するために、長期曝露試験を実施した。

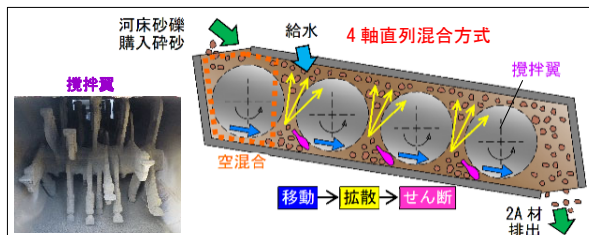


図-3 万能土質改良機

実施工における2B材の製造は、ICT建機を活用して互層パイルを薄層で精度よく切り崩し混合した。一方、表面を保護する2A、2B材はセメント（45kg/m<sup>3</sup>）と水を混合することから、混合攪拌性能に優れかつベルトスケールで正確な計量が可能な万能土質改良機（4軸直列混合方式）を使用して混合した（写真-4、図-3）。

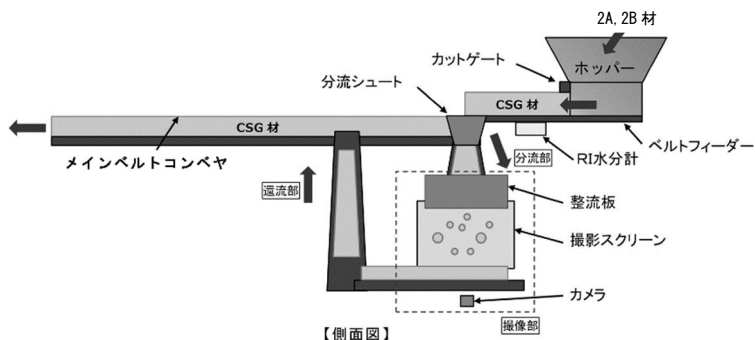


図-4 粒度・水分量監視システム

材料の粒度確認は定期に行う粒度試験に加え、「粒度・水分量監視システム」(図-4)を介して、リアルタイムに粒度を監視して品質の高度化に努めた。

なお、トランジションの施工が完了したエリアには、表面に乳剤を散布して表面保護に加えスラブとトランジション間の拘束力の低減を図った。

## (2) プリンス工における課題と対応

### a) 健全な基礎岩盤の確保

プリンスを構築する基礎岩盤(写真-5)は、一部の断層等を除き概ねCM級以上となるように基準を設けた。右岸側はチャート(Ch)で硬質な岩盤となっているが、左岸側は砥石型頁岩(TSh)で岩質としては非常に堅硬であるがスレーキングしやすく、また、乾湿を繰り返すことにより剥落・泥濘化し劣化の進行が早い特徴を有している。このため、新鮮な岩盤を保持し、コンクリートと確実に密着させることが重要となる。



写真-5 プリンス基礎岩盤

基礎岩盤は劣化を防止するために、基礎掘削完了後から仕上げ掘削まで、シートやモルタル吹付により雨風を遮断し岩盤の劣化防止対策を行った。また、仕上げ掘削時の基礎岩盤において、雨水等により岩盤の緩み等の事象が確認された箇所は、人力による丁寧な処理(浮石除去、ゆるみ岩盤の除去)を繰り返し行った。打設直前には水洗いやバキューム清掃を行い新鮮な岩盤を露出させたうえでコンクリートを打設した。

### b) マスコンクリート、暑中コンクリートとしての対応

プリンスは、フェイススラブを支持するように河床から左右岸に向かって、連続的に配置された構造物である(写真-6)。打設はポンプ車による配管打設を基本としているため、施工中の材料分離と配管閉塞によるトラブルが懸念された。また、マッシュなコンクリートであり、暑中期(7~8月)にも打設するため、マスコンクリートとしての対応に加え、暑中コンクリートの対策も求められた。



写真-6 プリンス構築

コンクリートの圧送はコンクリートに石灰石微粉末を加えることにより、粘性を向上しポンパビリティーを確保することで、長距離圧送時の材料分離、管内閉塞を防止した。

温度ひび割れについては、温度応力解析の結果から、コンクリート打込み温度を23℃以下に制御することで、発生を抑制できることが確認できたため、暑中期は骨材への散水および貯蔵ビンへの遮光ネットの設置、練混ぜ水冷却設備増強、冷風冷却設備、セメントクーラー等を配置して練上り温度を制御した。加えて、近年の暑中期における急激な気温上昇によるコンクリートの品質低下を防止するために、夏期期間中は夜間打設を基本として、打ち込み温度23℃以下を確保した。

## (3) フェイススラブ工における課題と対応

### a) 長大斜面上におけるコンクリート運搬

CFRDにおけるこれまでの国内実績では、コンクリートポンプ車を使用した配管打設が一般的であり、配管内のスランプロス を考慮した流動性の大きい配合(スランプ8cm)とする必要があった。長大斜面上を対象とした施工であることから、下り配管による配管閉塞の回避、連続打設を可能とするスリップフォーム移動後のコンクリートの自立という両側面から、コンクリート運搬方法と配合を選定することが重要であった。

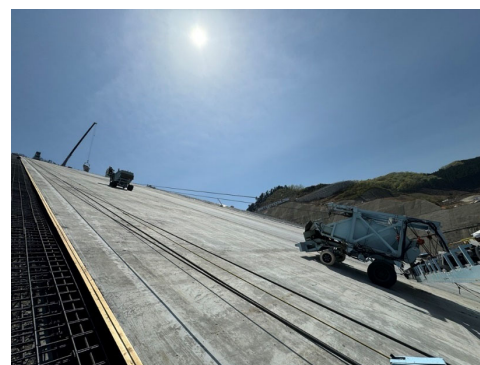


写真-7 コンクリート供給設備

そこで、斜面上を直に走行でき、コンクリートを打設場所まで直接運搬できるコンクリート供給車(図-5、写真-7)を開発した。コンクリートは製造設備からダム天端までトラックミキサー車で運搬し、コンクリート供給車でスリップフォームまで運搬して、横引きベルコンを介することで打設場まで運搬することが可能となった。この供給方法の変更により、流動性を小さく(スランプ 5.0cm)することができるのと同時に、閉塞

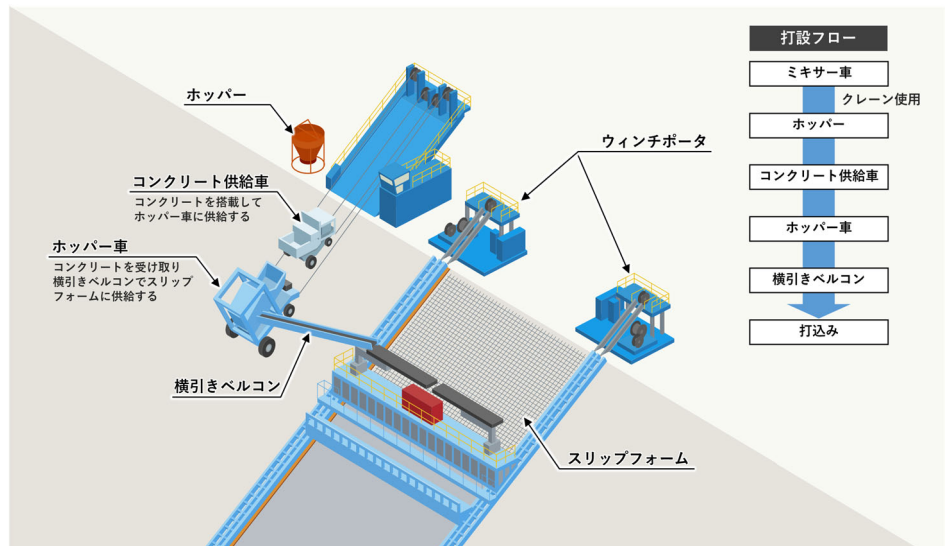


図-5 フェイススラブ打設設備

トラブルを解消した。また、打設時のスリップフォームへの側圧の低減および移動速度(平均上昇速度 2.0m/hr)の向上、移動後のコンクリート表面のコテ仕上げが容易となった。

**b) 連続打設を可能とする配合選定**

スラブコンクリートの止水性を向上するためには、製造場所から打設場所までの運搬中に材料分離を生じさせないこと、一体化のための連続打設を可能とするコンシステンシーを保持すること、スリップフォーム移動後のコテ仕上げを容易にすること、硬化後にひび割れを発生させないこと等の種々ある要求性能を満足するコンクリートを製造することが課題である。

対策として、コンクリートには以下の特殊な材料を添加することで品質向上を図った(表-2)。

表-2 コンクリート配合表

工種	配合種別	粗骨材の最大寸法	スランプ	空気量	水結合材比		フライアッシュ置換率	細骨材率	水	中庸熱セメント	フライアッシュ	膨張剤	細骨材	粗骨材		混和材	混和剤	
		Gmax	SL	Air	W/P	W/(C+F)	F/(C+F)	s/a	W	C	F	EX	細砂(石灰)	40mm~20mm(砂岩)	20mm~5mm(石灰)	石灰石微粉末	AE減水剤	AE剤
		(mm)	(cm)		(%)									S	G2	G3	LP	
プリンス工	D	40	8.0±1.0	6.0±1.0	41.7	50	30	43	150	210	90	15	767	505	505	45	4.59	0.101
フェイススラブ工	E	40	5.0±1.0	6.0±1.0	41.8	50	30	39	137	192	82	14	721	560	560	40	4.92	0.119

①石灰石微粉末の使用(材料分離抵抗性向上、変形抵抗性向上、ブリージング発生抑制)

混和材として、石灰石の微粉末を使用することで、適度な粘性を保持した滑らかなコンクリートとなり、打込みやすく、かつスリップフォーム通過後は変形しないコンシステンシーを確保できた。また、ブリージング量は、石灰石微粉末を使用していないコンクリートと比べ、使用したコンクリートは約 50%低減することができ、スリップフォーム移動後のコテ仕上げが容易となり表面の平坦性が確保できた。

②AE 減水剤・超保持型高機能タイプの使用(ワーカビリティ確保、耐凍害性向上)

混和剤には AE 減水剤・超保持型高機能タイプを使用することで、コンクリートの可使時間を延長できトラブル発生時のコールドジョイント防止対策とした。経時変化試験の結果、180 分後までフレッシュな状態でスランプを保持することができ、空気量の低減は 1%の低減にとどめることができた。実施工では、製造から打込み完了まで 120 分以内で管理するため、一時的な降雨や機械トラブル時に十分な品質保持性能を発揮することができた。

### ③石灰石骨材と膨張剤の使用（収縮ひび割れ抑制）

骨材は全て購入骨材であり、そのうち粗骨材（20～5mm）と細骨材に石灰石骨材を使用した。石灰石骨材を使用したコンクリートは、他の岩石骨材を使用したコンクリートに比べて、乾燥収縮と自己収縮が小さく、熱膨張係数も低減されるため、ひび割れを抑制できる。

併せて、膨張剤を添加することにより、プレストレスを導入し材齢経過時の収縮を緩和することで、収縮ひび割れの抑制を図ることができた。

#### c) 試験施工における施工技術の確立

フェイススラブコンクリートの施工はスリップフォーム移動式鋼製型枠（写真-8）を使用して、斜面上にコンクリート（厚さ 350～547mm、複鉄筋 D19@250mm）を最大で3昼夜半（約 80 時間）連続して打設する。既往の知見ではコンクリートの側圧によるスリップフォームの浮き上がりが確認されていることから、本施工実施前にスリップフォーム実機を用いた実物大試験を行い、各種挙動の確認を行った（図-6）。

また、CFRDはこれまで国内における施工実績が少なく、経験豊富な技術者が少ないため、施工ノウハウの蓄積も少ない中で、長大法面上での一連の作業工程における施工技術の確立と習熟を図った。

試験施工では打設中のスリップフォームの挙動および、埋設物の設置から打継面処理・打設・養生までの一連の施工サイクルの確認、硬化後のコンクリートの品質を確認した。試験施工において確認した事項を以下に示す。

##### ①スリップフォームの挙動確認、コンクリートの性状確認

・スリップフォーム打設中の姿勢制御・スリップフォームの上昇速度・コンクリートの充填確認・コンクリート表面の平坦性

##### ②一連の作業工程フローの確認

・作業工程毎の歩掛確認・トランジション表面の凹凸状況・鉛直継目工（・モルタルパッド掘削、打設・銅製止水板の設置）・鉄筋の組立・レール付き型枠の設置・コンクリート打設・左官仕上げ（写真-9）・型枠脱型・養生・コールドジョイント処理

##### ③硬化後のコンクリート品質確認

・ひび割れ発生観察・コア採取による密実性確認

試験施工では全3ケースの異なる施工仕様で行い、実施工で配置する作業員を試験施工段階から経験させることで技術の習熟と本施工へのスムーズな移行が図られるとともに、品質向上に寄与する施工方法を決定することができた。

#### d) 長大法面上の連続打設に対応した寒中コンクリート対応

フェイススラブ施工期間（令和5年11月～令和6年5月）中は日平均4℃以下となる寒中期（1月～2月）にも打設することから、寒中コンクリートとしての対応が必要となり、連続した打設の中でいかにして長大法面上で寒中養生を実施し初期凍害を防止し、強度発現を阻害することなくコンクリートの品質を確保するかが課題となった。



写真-8 スリップフォーム

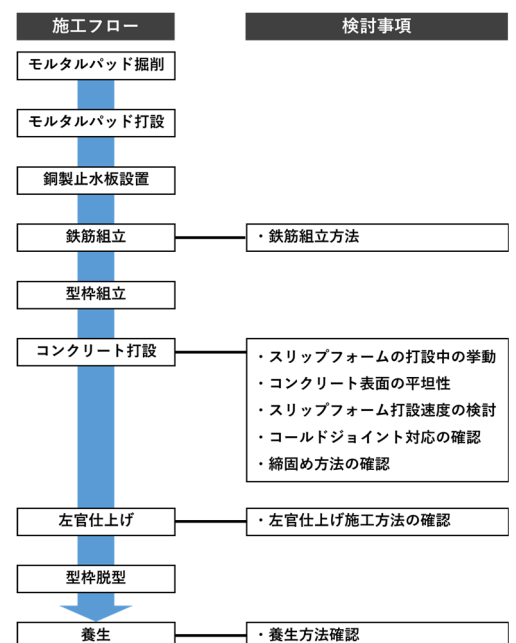


図-6 作業確認フロー



写真-9 左官仕上げ

寒中コンクリート対策として、練混ぜ水にボイラーによる温水を使用して、打ち込み時のコンクリート温度5℃以上とした。加えて、打ち込み場所のスリップフォーム全体に覆いを設けるとともに、スリップフォーム後方に取り付けられた雨除け TENT を改造することにより給熱養生（囲い内温度15℃以上）を行った。更に、TENT が通過した後の露出したコンクリート面の養生は、断熱マット（厚さ  $t=1\text{cm}$ ）に加え給熱バルーン（送風温度：40℃、寸法：幅16m、長さ10m）を敷設し継続的に給熱することでコンクリートの品質を確保した（写真-10）。

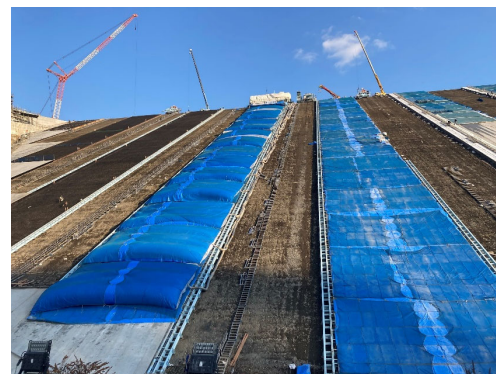


写真-10 給熱養生

#### 4. DXの取り組み

##### (1) デジタルツインを活用した現場管理 (T-iDigital® Field)

ICTを活用した現場管理を行うため、「工事マネジメントプラットフォーム (T-iDigital® Field)」を導入した。T-iDigital® Fieldは、現場の計測データ、カメラ映像、GPS位置情報、スマートウォッチ等の情報をサイバー上に収集して、リアルタイムにクラウドの仮想空間で表示することでデジタルツインを実現し、高付加価値の情報を工事関係者に提供するシステムである（図-7）。南摩ダムでは①～④のデジタル化による効率化を図った。①関係者間での現場状況のリアルタイム共有による現場管理の効率化、②建機・作業員の位置を常時把握した行動監視を行い作業の効率化、③建機・作業員の行動解析による安全性の向上、④腕時計型生体センサによる作業員の状態把握。



図-7 T-iDigital® Field

##### (2) 高速施工に対応した原石山材料採取 (T-iBlast® DAM)

盛立の高速化を実現するために、ロック材採取の効率化が求められた。材料採取を迅速化するため、発破用穿孔時にベンチ内部で岩級判定ができる「T-iBlast® DAM」を採用した。T-iBlast® DAMは、インテリジェントクローラドリル（写真-11）の打撃エネルギー、打撃数、穿孔速度から、穿孔エネルギー値を検層し、岩級区分を判定するシステムである（図-8）。これにより、1回の発破で採取できる材料を発破前に岩級別に把握できるため、盛立材料の供給量の不足を防止するとともに、地表からでは確認できない廃棄岩を事前に把握できるため、発破後にこれらを除去し、盛立材としての品質も確保できた。



写真-11 インテリジェントクローラドリル

### (3) 合理化施工を実現するためのDX導入 (T-iCraft®)

盛立工における重機土工の省人化を図るために、「自動建機群の協調運転制御システム (T-iCraft®)」を活用した自動建機による施工を広範な施工エリアの一部で実施した (写真-12)。

T-iCraft®は複数の自律建機の協調運転を制御し、それぞれの建機をつなぐ「プラットフォーム」(図-9)として機能して、機種が異なる複数の自動建機を同時に制御できる。

異なるメーカーの自動建機や有人運転の建機が混在しても、協調運転が可能になっており、自動建機それぞれの位置や作業の進捗をコントロールしながら、事前に設定された作業シナリオでタスクを実行する。

加えて、建機には複数の安全機能を設けており、建機に搭載したカメラの映像をリアルタイムで人工知能 (AI) に解析させ、人物を検出した際に停止信号を送る機能や、ミリ波レーダと 2D-LiDAR により障害物を検知する機能を搭載しており、危険を察知すると、建機は自動で停止する機能も有するため、省人化に加え安全性の向上にも寄与する技術となる。

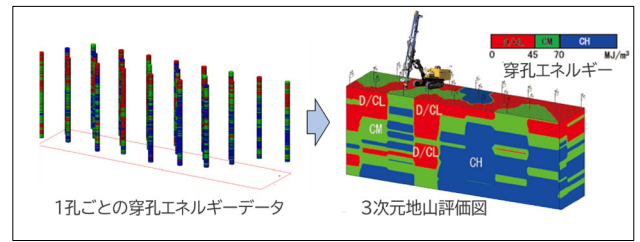


図-8 T-iBlast® DAM

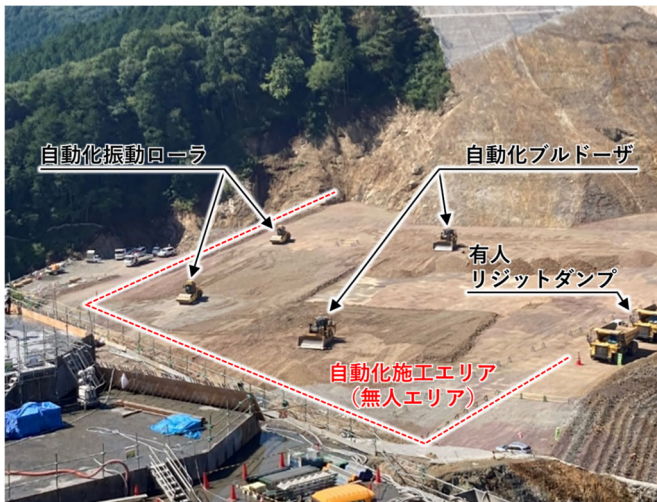


写真-12 自律建機の協調運転



図-9 T-iCraft®

## 4. おわりに

本報告では、近代的施工方法を適用した国内初のCFRD型式の本体ダムにおける施工技術の確立、盛立工およびコンクリートの品質確保に向けた取り組みについて報告した。また、DXについても積極的に開発、導入し効率化・省人化を図ることができた。現在、南摩ダムは供用開始に向けて準備を進めているところであり、事業全体が完成した後は将来にわたり安全で安心した暮らしを提供できるシンボルとなることを望んでいる。今後、南摩ダムにおいて確立した施工技術の応用、水平展開が図られ、DX技術の更なる発展により魅力ある建設現場を構築していきたい所存である。

## 参考文献

- 1) 藤田将司、大谷知樹、市川滋己、福田達郎：CFRD型式の南摩ダムの設計・施工 (その1) 堤体・フェイススラブの設計：ダム技術 No. 436 (2023.1)
- 2) 田中幸志・竹内祐治・福田達郎：CFRD型式の南摩ダムの設計・施工 (その2) フェイススラブ打設に向けて：ダム技術 No. 448 (2024.1)
- 3) 長井健二・岡谷豊・池田千博・小菅憲正 国内最大のCFRD、南摩ダムの完成に向けて — DXを活用した新しいダム建設のステージへ — 総合土木技術誌 土木施工 (2024年9月号)