

## 成瀬ダムにおける現場の工場化に向けた取組み

鹿島建設(株) 正会員 ○奈須野 恭伸 出石 陽一  
神戸 隆幸 松本 孝矢

### 1. はじめに

成瀬ダムでは人手不足・熟練労働者不足への対応、建設生産性の向上、労働災害・事故の撲滅、などの建設業界における重要な課題解決を目的とし、「現場の工場化」を進めるため、さまざまなシステムを運用している。本報告では建設機械の自動化による次世代建設生産システム「A<sup>4</sup>CSEL<sup>®</sup> (クワッドアクセル) <sup>1)</sup>」と A<sup>4</sup>CSEL (クワッドアクセル) と連携して CSG を製造、運搬する「CSG 製造・出荷管理システム」と、上下流の保護コンクリートの型枠及び目地・止水板の設置作業を自動化・合理化する「置き型枠自動スライドシステム」のそれぞれの取組みについて述べる。

### 2. 事業概要

成瀬ダムは、雄物川水系成瀬川上流（秋田県雄勝郡東成瀬村椿川地内）の特別豪雪地帯に建設され、洪水調節、流水の正常な機能の維持、かんがい、水道用水、及び発電を目的とした多目的ダムで、堤体積約 4,850,000m<sup>3</sup>、堤高 114.5m の台形 CSG ダムである（写真-1）。CSG とは、材料の合理化に着目し、ダムサイト近傍で得られる土石を原材料とし、分級や粒度調整、洗浄を行うことなく、セメント及び水を添加・混合したものである。



写真-1 施工状況(2022年7月)

台形 CSG ダムにおいては本体の CSG の保護及び止水を目的として、上下流面に保護コンクリートを施工する（図-1）。同型式としては初の堤高 100m 超かつ国内最大規模となり、2018 年 10 月本体工事に着手、2026 年度の完成を目指し、現在施工中である。

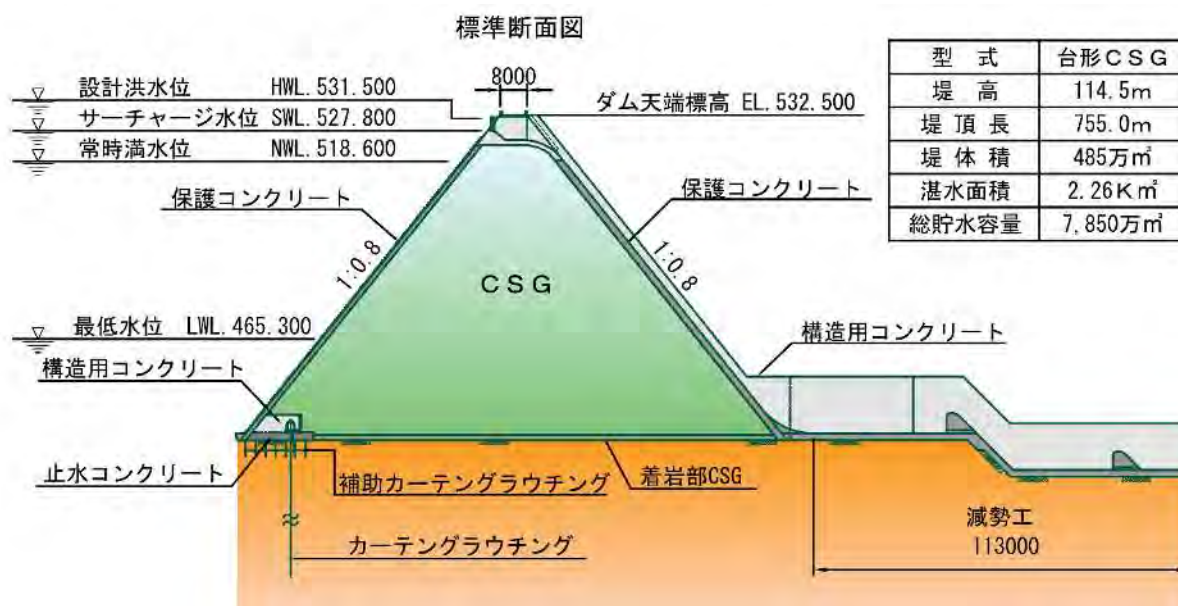


図-1 標準断面

キーワード：台形CSGダム、生産性向上、工場化、A<sup>4</sup>CSEL

連絡先 〒980-0802 宮城県仙台市青葉区二日町 1-27 鹿島建設(株)東北支店土木部 TEL022-261-7111 (代)

### 3. A<sup>4</sup>CSEL による CSG 打設

#### (1) A<sup>4</sup>CSEL 概要

成瀬ダムにおける堤体 CSG 打設では、省人化、生産性及び安全性の向上を目的とし建設機械の自動運転を核とした次世代建設生産システム「A<sup>4</sup>CSEL」を導入している。

最適計画で多数の自動化建設機械を同時に自律運転させることをコンセプトとした A<sup>4</sup>CSEL<sup>®</sup>は、最適化された施工計画・作業方法をデータ化し、それら作業データを基に複数の自動化機械を自律的に連携させることで極めて効率の高い施工を可能とする。

A<sup>4</sup>CSEL は、自動化された建設機械とそれらを効率的に稼働させるために必要な施工計画システム、施工管制システム、重機管理システムの3つのシステムで構成されており、これを自動化施工マネジメントシステム<sup>2)</sup>と定義している(図-2 参照)。

施工計画システムは、施工するエリア情報や作業に必要な機械台数及び敷均し層厚などの作業条件を人が指定し、作業毎の詳細なタイムスケジュールを自動で作成するシステムである。また、作業計画が自動化施工中に計画通りに実行されているかどうかをリアルタイムに監視し、閾値を超過する遅延が生じた場合には最適な工程に組み換えるリスケジューリング機能も有している。

施工管制システムは、施工計画システムにより事前に計画した各作業を、作業順序や各重機が占有するエリア等の制約条件に基づき、重機管理システムを通して各重機の作業を指示し、かつ全ての機械の作業状態を監視し、計画との差や異常を判定する。

重機管理システムは、施工管制システムで作られた作業データを自動化重機に送信する機能と自動化重機から機体のデータを受信する機能を有している。

自動化重機は、重機管理システムへ送信された作業データを基に、作業エリアの不陸、材料の荷下ろし位置のズレなどによって生ずる施工誤差を自ら修正し、自律的に自動運転を行う。

#### (2) A<sup>4</sup>CSEL による自動化施工実績

2019 年に自動化施工による CSG 試験施工を実施し、2020 年から堤体 CSG 打設で全面的に適用を開始した。各年度の CSG 施工範囲を図-3 に示す。本稿執筆の 2022 年 6 月末時点で累計約 62 万 m<sup>3</sup> を自動化施工によって打設した。自動化施工で使用した機械を表-1 に示す。打設量、打設速度及び自動化施工率の実績を表-2 に示す。

2021 年度までの CSG の運搬は、他工事車両も走行する共有の工事用道路を使用する施工条件であり、安全面からダンプトラック

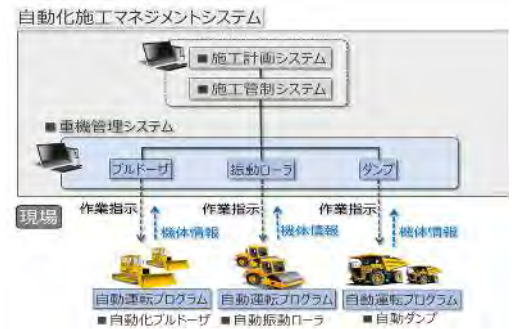


図-2 自動化施工マネジメントシステム

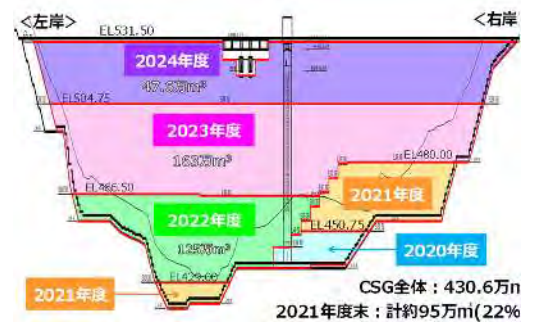


図-3 施工範囲（断面図）

表-1 施工機械一覧

機械名	仕様	2021年	2020年
		ダンプトラック	HD465-7E1 (55t級)
自動ブルドーザ	D65Pxi-18 (18t級) WidePAT	3	2
仕上げブルドーザ	D65Pxi-18 (18t級) ストレートチルトドーザ型	1	1
目地切りバックホウ	ZX130K-5B ZX110-1B	2	2
端部整形バックホウ	ZX135US-5B	2	2
端部締固め機	ZX135USK-5B	2	2
自動振動ローラ	SD451 (11t級)	4	3
自動仕上げローラ	TW504 (7t級)	2	2
合計		26	22

※黒字：管制員（自動化施工システム）の作業指示で自動化機械と連携して有人運転により作業する機械

表-2 打設量、打設速度、自動化施工率の実績一覧

施工年	施工期間	打設量 (m <sup>3</sup> /年度)	最大打設速度 (m <sup>3</sup> /時間)	自動化施工率※ (最大/平均(%))	摘要
2020	7月～11月	100,000	217	54/34	12月～3月 冬季打設休止期間
2021	4月～11月	406,000	322	94/80	同上

※CSG打設対象範囲に対して自動化施工を実施した割合（面積比）を自動化施工率と定義

(63 t) は有人運転している。

2021 年度に実施した自動化施工による打設速度は、ブルドーザ 1 台当りの標準積算値 103m<sup>3</sup>/h に対して最大 322m<sup>3</sup>/h であった。

2021 年度自動化施工状況及び自動化施工管制状況を写真-2 に示す。2021 年度は、自動運転機械と管制員（自動化システム）の作業指示で自動運転機械と連携して作業をする有人機械を合わせた最大 26 台の機械を 4 人の管制員により管制し、施工を行った。

### (3) 遠隔集中管制システム

A<sup>4</sup>CSEL では、中長期的に懸念されている建設業における担い手不足や働き方改革等の労務課題を見据えて、更なる省人化や生産性向上を目指し、遠隔集中管制システムを開発している。

これまで、自動化施工と遠隔操作の技術を組合せ、A<sup>4</sup>CSEL<sup>®</sup>が稼働する複数の工事の管制機能の一元化について開発を進めてきた。JAXA との共同研究の一環として、JAXA 相模原キャンパスの宇宙探査実験棟から約 1,000km 離れた種子島の建設機械を遠隔で操作し、さらには同キャンパスからの指令で自動運転に切り替えて作業できることも実証<sup>3)</sup>している。

2021 年度には、写真-3 に示すように、集中管制室（東京都）と複数の現場を公衆回線で結び、各所にて自動運転及び遠隔操作による作業を行った。集中管制室には、施工管制システムをはじめとする自動化施工システムを搭載したコンピュータと各所の状況を確認できるモニタを設置し、管制員が自動化施工を集中管制した。各所で実施した作業内容と稼働した建設機械を表-3 に示す。成瀬ダムでは堤体上に自動化専用道路を設定し、自動ダンプを稼働させた。①～③の 3 箇所合計 20 台の機械を同時に稼働させる場合、



写真-2 自動化施工および管制状況



写真-3 遠隔集中管制による施工状況

表-3 遠隔集中管制実施内容及び使用機械

現場名	①	②	③
	成瀬ダム堤体打設工事 秋田県	赤谷3号砂防堰堤工事 奈良県	西湘実験フィールド 神奈川県
施工種別	ダム堤体CSG打設	擁壁背面埋戻し	自動化施工試験
作業内容	材料運搬	○	○
	敷均し	○	○
	締固め転圧	○	○
	仕上げ転圧	○	-
使用機械 (台)	自動ダンプトラック	6	1
	自動ブルドーザ	3	1
	自動振動ローラ	4	1
	自動仕上げローラ	2	-
合計	20		

※1 成瀬ダムの自動ダンプは、専用道路化が可能な堤体上のみ自動運転を実施した

※2 西湘の振動ローラは、遠隔操作によって自動運転初期位置まで移動させ、その後自動運転を実施した

有人施工であればそれぞれの場所の機械数に応じた重機オペレータが必要であるが、遠隔集中管制による自動化施工であれば1/5の4名の管制員で円滑に行えることを実証した。

今後は、省人化、生産性の課題解決に向け、実施工で得る作業データ解析とそれに基づく技術開発により自動化施工マネジメントシステムの機能と性能を向上させ、今回実証した削減率（80%）以上の生産性向上を実現させたいと考えている。本稿では、A<sup>4</sup>CSEL による自動化施工のダム工事への適用について述べたが、今後はダム工事以外の工種にも適用範囲を拡張する計画である。

#### 4. CSG 製造・出荷管理システム

成瀬ダムの CSG 材は、堤体打設 JV がダムサイト近傍より採取し、ストックヤードに仮置きしてある3種類の段丘堆積物（採取箇所により桧山台段丘堆積物及び赤滝右岸段丘堆積物、ダムサイト段丘堆積物に区分される）と原石山破碎材（他JV施工）を所定の重量比率にてブレンドしたものを使用する。台形 CSG ダムでは、均質性が要求されるため2種類の CSG 材の確実な混合により CSG 材のばらつきを最小限とし品質管理の頻度・方法を高速大量施工に合ったものとする必要がある。しかし、使用材料の粒度調整を実施しないことから、CSG のばらつきの抑制、不適格品の捕捉、修正を確実にできないことが懸念される。そこで成瀬ダムでは CSG の製造にはまず、その2材をブレンドするために、自由落下することで混合を連続的に行うことができる MY-ミキサを通過させ事前混合し、それに水+セメントを加え、正転と逆転の組み合わせによる5連混合筒により連続的に強制混合させる SP-ミキサを使用することで均質で安定した CSG 材を製造している。

CSG 製造プラントの製造能力としては1セット当たり 360m<sup>3</sup>/h 製造が可能である設備が3セット設置されており、最大 1,080m<sup>3</sup>/h 製造能力がある。現在は製造された CSG はホッパーから 63t 積ダンプトラックに積み込み打設箇所までまで運搬しているが、2023 年からは、プラントからベルトコンベアにより右岸天端に3系統で搬送し、右岸天端からは内側に羽根を取り付けた管径 φ700mm の搬送管を回転させることで高所から低所に CSG を分離させることなく連続で大量運搬が可能な SP-TOM により堤体内に CSG を供給する。



写真-4 赤滝プラント全景

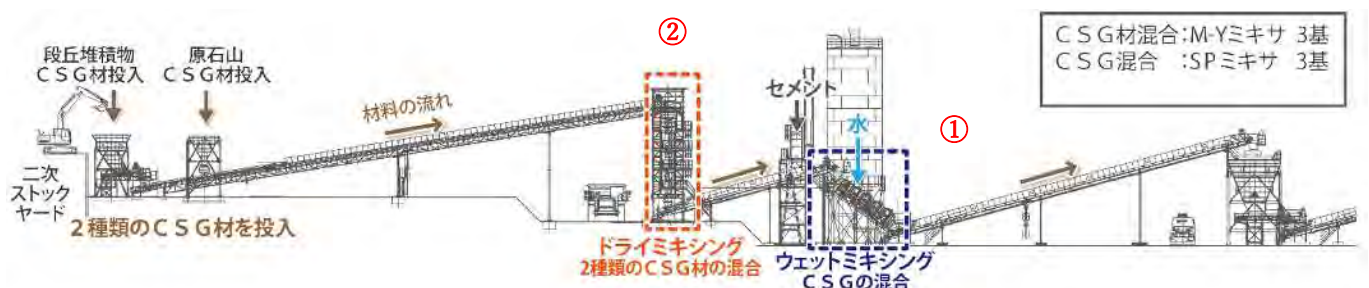


図-4 CSG 製造設備標準断面

従来の CSG 打設では、CSG 製造設備のオペレータと現場にいる打設番が無線等で製造指示や打設状況の連絡を取り合っていた。しかし当現場では、『CSG 製造・出荷管理システム』を構築し運用している。このシステムは A<sup>4</sup>CSEL と連携されており、無線連絡ではなくデジタルデータで管理している。A<sup>4</sup>CSEL は、施工シミュレーションを事前に行っており、打設エリア、レーンの制約条件に合わせて最適化された出荷計画(出荷台数、製造量、製造系統、配合、レーン毎の出荷台数等)を自動で作成する。これを CSG 製造管理サーバに送り、各系統に振り分けをし出荷台数・出荷数量を CSG 運転制御 PC へ送信する。CSG 運転制御 PC では各系統の運転制御を行い、製造設備の状態把握と監視に加え、製造状況データを CSG 製造管理サーバにリアルタイムに送信している。この連携により、ダンプトラックの配車なども自動で行い、出荷計画～製造～運搬～敷き均し～転圧までの全ての工程において連続性を保ち、出荷側と打設側の設備能力を最大限に発揮している。



図-5 出荷管理システム概念図

5. 置き型枠自動スライドシステム

台形 CSG ダムでは内部の CSG の打設は機械化による高速大量施工が可能になる反面、それに追従した上下流の保護コンクリートの打設速度がリフトスケジュールを確保する上でクリティカルパスとなる。そのため既存の台形 CSG ダムでは型枠としてプレキャスト型枠を採用し、保護コンクリートの工程短縮を図ってきた。し

かしプレキャスト型枠の搬入が他の作業に影響を与えることと、設置に熟練作業員が多数必要となることなどから打ち上がり速度向上の制限要因となっていた。そこで成瀬ダムでは設計段階から「プレキャスト型枠と異なり外部からの搬入が伴わないこと」、「型枠が鉛直であるために型枠際での作業が行いやすい」という理由から、上下流面の幅 1.6m の保護コンクリート(有スランプ)部分を H=0.75m の階段状に設計し、型枠として H 鋼(H400×400)を 2 本積み重ね、高さ 800mm で製作した H 鋼置き型枠を採用した。

成瀬ダムでは最盛期に 2 日に 1 リフト(0.75m)の施工速度を確保しなければならない。施工サイクルを維持するためには、CSG 打設に支障を与えず、H 鋼置き型枠の設置・撤去作業を効率的に行うことで、素早くコンクリート打設を行う必要がある。しかし、型枠、止水板、目地鉄板設置作業は、通常クレーンと人力による作業であり、クレーンが堤体内に多く(最大 7 台程度)配置されるため CSG 打設に伴う重機と干渉し安全上の懸念から、スムーズな CSG 運搬に支障をきたす恐れがあった。そこで堤体内にクレーンを配置せずに型枠作業が可能な「置き型枠自動スライドシステム」を開発し堤体内に配置するクレーンを 0 とすることで成果を上げている。置き型枠自動スライドシステムは、「置き型枠自動スライドリフター」「止水板台車」「おもり台車」の 3 種類の台車で構成されており、型枠の設置だけでなく打

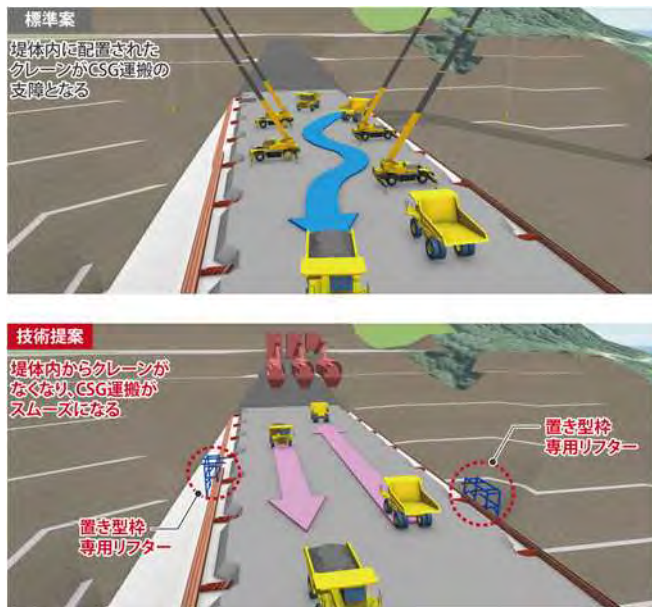


図-6 施工時間問題点概念図

設及び目地・止水板設置作業においても施工速度、安全性、生産性の向上を実現させ効果を発揮している。また 2022 年度からは堤体左岸側の曲線形状にも対応したシステムを開発し、運用している。

(1) 置き型枠自動スライドリフター

当現場ではコンクリートの養生時間を考慮し、上下流面 1:0.8 の勾配の階段上に上中下 3 段、H 鋼型枠を設置している。従来のクレーンによる型枠の吊り上げ作業を行う場合、作業員が打設面から 3 段下の置き型枠に玉掛けを行い、打設面で所定の位置に設置することを繰り返す必要があり、成瀬ダムではこの作業が 22,000 回以上発生する。そこでこの繰り返し作業を連続運転することが可能な自動スライドリフターを開発し効率的な施工を行った。このシステムはリフト台車に搭載した 2 つの電動ホイスト及び吊り天秤により最下部の置き型枠を揚重して脱型し、吊り上げた型枠を水平移動させ巻き下げにより最上段に設置する(図-7 置き型枠スライド手順)。

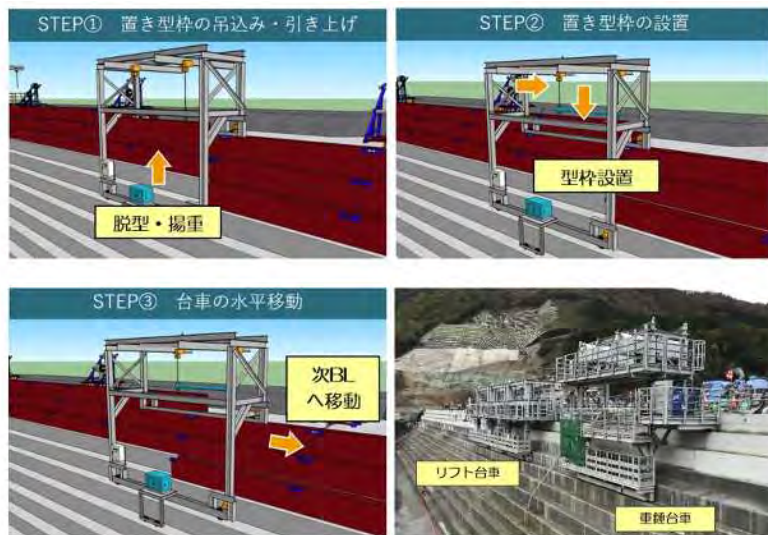


図-7 置き型枠スライド手順

次ブロックへの移動は、施工済みのコンクリート表面と H 鋼ウェブ上を車輪により自動走行する。この型枠盛替えのサイクルを全てボタン一つで連続に行うことが可能である。これにより堤体の中にクレーンを入れず CSG の打設に支障を与えることなく施工を行っている。また、当初 1 ブロック(15m)150 分かかる予定だった作業時間を 30 分に短縮(80%減)することが可能となり、生産性を大きく向上させた。

## (2) 止水板台車

保護コンクリートは、15m 毎に目地鉄板と上下流 2 枚の止水板を設置する構造になっている。止水板台車は、ロール状に巻いた止水板を保護コンクリートの打設の進捗に合わせて引き上げるだけで固定作業が完了するものである。CSG 打設面の外側から作業を行うことができるため、堤体打設面上のクレーン作業を省略できる。また、止水板架台を次リフトに延長し、目地鉄板をこの架台で押さえる構造としたため、鉄板を固定するセパ筋はほとんど必要としない。これにより、止水板及び目地鉄板設置が非常に効率化されるとともに止水板周りのコンクリートが充填しやすく品質向上にも寄与している。



写真-5 止水板台車

## (3) おもり台車

当初設計は階段上に 3 段設置した H 鋼置き型枠を転倒防止治具により連結し置き型枠を固定する構造になっていた。しかし設計照査をした結果、打設時のコンクリート側圧により型枠の滑動が生じる結果が判明した。実際に行った確認試験においても計算と同様に型枠の滑動を確認した。そこで対策として「サポート等による固定」や「セパレーター溶接による固定」等も検討したが、置き型枠自動スライドリフトの利点を損なうこと、型枠工・溶接工の増加が必要になることから、おもり台車を開発し、重量確保による抵抗増加を行った。おもり台車は 1 基(5m)あたり 15 t の重量があり、リフト台車等と同様に置き型枠上を水平移動することが可能である。5mのおもり台車 3 台を連結して並べて 1 ブロック (15m) を打設し、終了後、隣のブロックへ横移動する。これにより、置き型枠の固定が不要となり、階段部での作業員の転落等のリスクも低減され、安全かつ省人化を図れる。



写真-6 おもり台車

## 6. むすびに

成瀬ダムは堤体打設の高速化に向けた取り組みとして、様々な自動化施工システムを導入している。今後、最盛期には 1 リフト 2 日サイクルの堤体打設を行う計画であり、更なる作業の高速化が必要となる。そのためには 2023 年から実施予定の右岸天端から SP-TOM を用いた CSG 供給と、それに連動する自動ダンプトラックの安定した稼働が不可欠である。今後も、「現場の工場化」を目指した自動化技術の推進は、将来の土木技術の発展に向けて取り組むべき最重要課題であり、当現場には解決すべき素材が豊富に存在している。常に現場目線で作業のやり方を直視し、どのような自動化を図れるかを意識し次の「現場の工場化」への取り組みも継承していきたいと考えている。本稿を通じて、自動化施工が普及し、土木事業全体の生産性向上の一助になれば幸いである。

## 参考文献

- 1) 三浦悟：次世代建設生産システム A<sup>4</sup>CSEL<sup>®</sup>の適用，土木施工，VOL62 No.1，2021 Jan.
- 2) 菅井貴洋ほか：自動化施工システムの台形CSGダム工事への適用，土木学会第 76 回年次講演会，VI-209，2021.
- 3) 鹿島建設株式会社，プレスリリース，2021/5/18 (<https://www.kajima.co.jp/news/press/202105/18c1-j.htm>)
- 4) 鹿島建設株式会社，プレスリリース，2021/3/23 (<https://www.kajima.co.jp/news/press/202103/23c1-j.htm>)