

自動化施工システム A⁴CSEL[®] による DX ソリューション

出 石 陽 一・浜 本 研 一

「人手不足・熟練労働者不足への対応」, 「建設生産性向上」, 「労働災害撲滅」などの建設業界における重要な課題解決を目的として自動化施工システム A⁴CSEL[®] (クワッドアクセル: Automated/Autonomous/Advanced/Accelerated Construction system for Safety, Efficiency and Liability) の開発と現場適用を進めている。

本報では, A⁴CSEL (以下, 本システム) の技術開発と現場適用状況を中心に紹介するとともに, 本システムを「DX ソリューション」と位置付けその効果について述べる。

キーワード: 自動化施工システム, 遠隔集中管制, DX ソリューション, ダム, 造成

1. はじめに

鹿島建設では, 本システムの開発と同時に現場導入を進めており, 2015 年の五ヶ山ダム (福岡県) を皮切りにダム現場や災害復旧現場に適用してきた^{1), 2)}。秋田県で施工中の成瀬ダムでは, 2020 年から自動化施工を本格導入し, 今日まで無事故で推移している。2023 年 5 月には, 2022 年 10 月に打ち立てた国内月間打設量の日本記録を更新 (28.1 万 m³) し, 高い生産性と安全性を実現している (写真—1)。

本システムは, 自動化機械に注目されがちであるが, 機械を自動で動かすこと自体を目的とするものではなく, 「作業方法や手順を定式化して自動化機械に作業データを送り, 多機種・複数の機械を自律的に自動運転すること」, 「施工データに基づいて作業方法や施工計画の最適化を追求し続け, それにより仕事のやり方を根本から変革すること」を命題としており, 本シ

ステムの有する様々なソリューションを広く「展開」して建設業に DX を起こすことを目的としている。本報では, 本システムを様々な DX ソリューション (DXS) の総合体と位置付け, その中の「施工の DXS」「業務プロセスの DXS」「技能伝承の DXS」について述べる。

「施工の DXS」では成瀬ダムで実現した「現場の工場化」について詳述する。「業務プロセスの DXS」では, 実験フィールド (神奈川県小田原市) からの「遠隔集中管制」について紹介する。「技能伝承の DXS」では, 本システムによる「技能のコード化」について述べる。また, 今後の更なる「展開」として造成工事への導入について紹介し, 今後の課題とその解決促進のために求められることについて述べる。

2. 本システムによる DX ソリューション

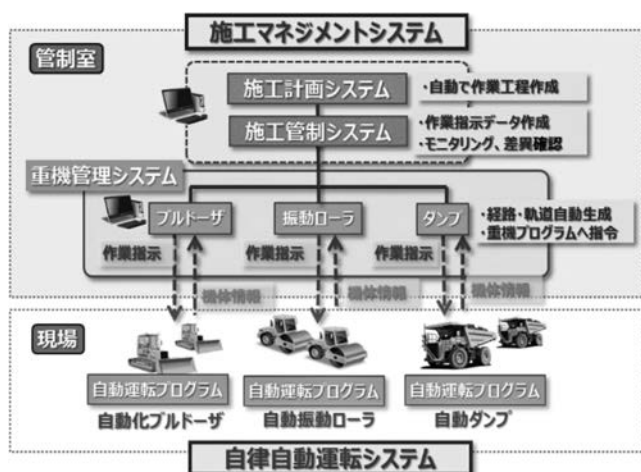
(1) 本システムの構成技術

本システムは, 自動化された重機による自律自動運転システムと, それらを効率的に稼働させるために必要な施工計画, 施工管制, 重機管理のサブシステムを包含する施工マネジメントシステムにより構成されている (図—1)。

施工計画システムは, 施工エリア情報や機械台数及びまき出し層厚などの作業条件を指定し, 詳細なタイムスケジュールを自動で作成する。施工管制システムは, 計画した各作業を作業順序や作業エリア等の制約条件に基づき重機管理システムに指示するとともに, 全ての機械の作業状態を監視し, 計画との差や異常を



写真—1 2023 年成瀬ダム自動化施工状況



図一1 本システムのシステム構成

判定する。重機管理システムは、作業データを基に生成される重機経路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、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じる施工誤差を自ら修正し、自律的に自動運転を行う。

(2) 施工の DXS : 「現場の工場化」

(a) 作業の細分化と定式化、施工計画の最適化

本システムは、建設現場を生産工場のように変革することで、飛躍的に生産性を向上させることを目指しており、これを施工の DXS と位置付けている。建設現場の生産性は製造業に比べて低く、製造業がこの20年で約14%向上させている一方で、建設業においては横ばいの状態である。この要因は、建設業の生産が現位置での単品生産であること、天候の影響を受けやすいことなどが挙げられるが、大きな要因として、建設業が労働集約型産業であり、進捗が技能者の能力に依存するため事前に立てる生産計画（施工計画、作業計画）どおりに仕事が進捗しないことにある。さらに、技術者による施工計画立案には多くの時間を要する一方で、策定した施工計画の定量的な評価指標に基づく優劣の判断や、詳細なシミュレーションがなされておらず、計画作業そのものの生産性が低い。

本システムでは、それらを変革する具体策の一つが作業の細分化、定式化、施工計画の最適化であると捉えている。全ての作業を一つ一つの動きまで細分化し、作業効率の高い一連の作業の繰り返しとなるように定式化する。次に、多数の機械に定式化された作業を効率的に稼働させるための施工計画を作成し、シミュレーションにより実行可能可否を確認した後に実行する。



図一2 施工計画の例と最適化のイメージ

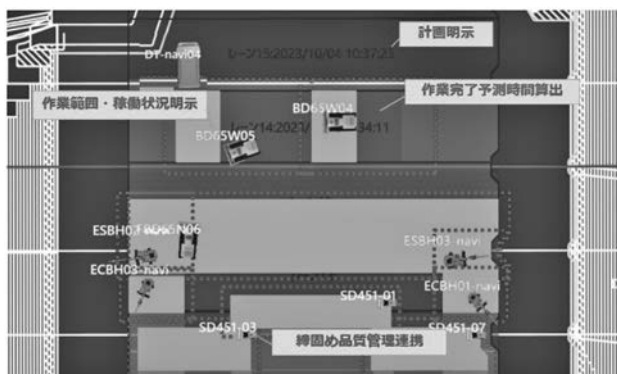
成瀬ダムのCSG打設を例に挙げると、材料の切出し、ダンプトラックによる材料の運搬、ブルドーザによる材料のまき出し、振動ローラによる材料の転圧から成る一連の作業の繰り返しによって施工される。その一連の作業を製造工場における一つのジョブとみなせば、製造工場のスケジューリング問題と同様に扱うことができる。本システムでは、製造工場で使われている生産スケジューラをベースとして開発した「最適化スケジューラ」を適用している³⁾。

最適化スケジューラでは評価の指標を、施工作業時間・コスト・安全性などとし、作業の組合せを入れ替える度に、指標が最大（最小）となる最適施工計画を見出す。そこで、組合せ最適化問題の解法である遺伝的アルゴリズムに着目し、高速な最適化処理を実現している（図一2）。現時点では、約30台の機械と約1,500の作業が含まれる12時間の施工計画に適用したところ、最適化に要した計算時間は10分程度となっており、施工計画作成業務そのものが人では不可能なレベルの生産性に達している。

(b) 管制システムによるトータルコントロール

生産性を向上させるための有効な手段は、最適化された計画をその通りに実施することである。従来の建設施工と製造工場との大きな違いとして各作業時間のばらつきの大小がある。建設施工では、作業方法はオペレータや技能者に依存しているため、作業工程を細分化して計画しても、一つ一つの作業方法、作業時間にばらつきが大きく計画どおりに実施することは困難である。また、管理者が計画からの作業進捗のズレを正確に把握することも困難である。

本システムでは、細分化された施工データに基づく自動化機械による作業であるためばらつきがなく、自動化機械からの作業データにより計画に対する進捗を管制システムにて正確に把握することができる（図一3）。そのため、「作業環境の変化による計画に対する遅延時間」、「作業した結果の出来形の評価値」、「品質管理の評価値」などのデータをリアルタイムで取得し、



図ー3 施工管理のイメージ

それを基に作業方法を改善できる。これにより、生産を自らのコントロール下に置くことが可能であり、自らの意思で現場を制御し生産性を維持することができる。技術者の経験値が重要な建設業において、より客観的に「データドリブン」な意思決定を行えている。

(c) 自動化機械ならではの作業方法の革新

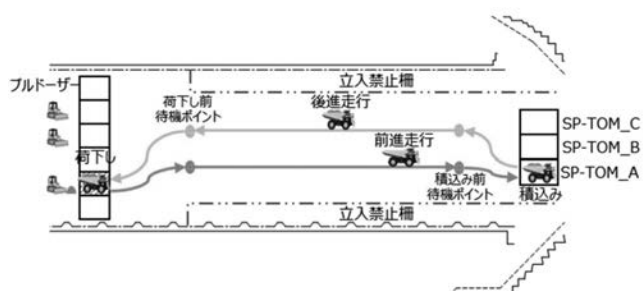
本システムは、熟練者の実操作データを基本としつつAI手法を導入して自動建設機械の制御を行い自動運転させている。さらに、有人作業の制約から脱却した自動化施工ならではの作業方法を導入し、生産性向上を実現している。

その例として、成瀬ダムの堤体上での自動ダンプトラックによる材料運搬について紹介する(写真ー2)。

製造プラントで製造されたCSG材は、ベルトコンベアやSP-TOMを介して堤体右岸のCSG積込み地点まで自動搬送される。自動ダンプトラックは、積込み地点から打設エリアの自動ブルドーザに向かって最大で約600mを左岸に向かって後進走行で運搬する(図ー4)。自動ダンプトラックの後進走行は有人運転では非常に困難な走行方法だが、自動運転だからこそ実現できる方式である。加えて、運搬経路途中での切り返し動作をなくすことで走行時間や距離を大幅に短縮することが可能となり、堤体内の打設地点へのCSG材の連続かつ最速運搬を実現した⁴⁾。



写真ー2 自動ダンプによる材料運搬



図ー4 自動ダンプシャトル走行図

(3) 業務プロセスのDXS：「遠隔集中管制」

(a) 遠隔集中管制システム

当社は、工事場所の異なる複数の本システム導入現場を遠隔地から一括して管制する「遠隔集中管制システム」を開発し、現場に導入している。建設産業は各現場に人を配置する「分散生産および分散管理」以外に選択肢を持ち得なかったが、当システムの導入により「分散」と「集中」双方の長所を取り入れた最適な業務プロセスへの変革が可能となり、建設業の重要課題、さらに2024年から適用された「働き方改革関連法」で直面する課題を解決し得ると考えている(図ー5)。

2023年度より、実験フィールドに新たに設置した「遠隔集中管制室」から3人のITパイロットが成瀬ダムの自動ブルドーザ・自動振動ローラ・自動ダンプトラックなど合計14台の自動化建設機械を稼働させ、交代制でCSGの堤体打設を昼夜にわたって連続施工している(写真ー3)。この結果、ITパイロットを



図ー5 遠隔集中管制による効果概念図



写真ー3 実験フィールドからの遠隔管制状況

現地に派遣することなく、現地で管制する場合と同じ人数で成瀬ダムの施工に必要な高速大容量施工を実現した。さらに、自動化施工と隣接して実施するバックホウによる端部法面整形作業を、遠隔集中管制室からの遠隔操作にて実施した。これにより、定型的な繰り返し作業を自動化施工することによる省人化に加え、不定形な作業についても遠隔集中管制室から遠隔操作することで、一人の遠隔オペレータが複数の遠隔重機を操作することが可能となり省人化が図れる。

以上のことから、遠隔集中管制システムには以下に挙げるメリットがあり、建設業の課題解決につながると考える。

- ・複数の遠隔現場を一箇所から最小人員で施工することにより、作業者の飛躍的な有効活用が実現できる。
- ・自動運転と遠隔操縦を連携して作業することにより、作業者が現場所在地に赴任する必要がなくなる。
- ・数箇所の現場をあたかも一現場の施工と同等の仕組みで実施できるため、大規模現場、長工期現場だけでなく、中小工事、工期の短い工事にも適用することが可能となる。

(4) 技能伝承の DXS : 「技能のコード化」

(a) 技能伝承の「新たなかたち」

建設業のみならず他産業も含めて、熟練技能者の高齢化により若い世代へ技能伝承がされないまま退職を迎えてしまう、技能の伝承不足が深刻な問題となっている。

本システムでは、熟練オペレータの操作データを参考に最適化された作業データを作成するプログラムにより自動化機械を稼働させる。すなわち、熟練技能者の技能をデジタル化、コード化し、ソフトウェアとしてコンピュータに伝承する「新たなかたち」になると考える。これにより、多くの熟練オペレータを育成する必要はなくなり、本システムのソフトを使える管制員を育成することで対応できる。

また、プログラムは無限にコピーできるため、自動化機械の数に応じて熟練オペレータを育成できることになり、今後、自動化機械は「熟練オペレータ付き機械」と同等以上のものとして益々価値の高いものになると考える。

3. 本システムのさらなる展開

(1) 造成工事への展開

本システムのさらなる「展開」として、2023年に仙台北部造成工事の盛土工事の一部に自動ブルドーザ

と自動振動ローラを各1台導入した。自動ブルドーザは成瀬ダムに導入したコマツ D65PXi を導入し、自動振動ローラは小石原川ダム（福岡県）に導入した同型の酒井重工 SV900 を今回新たに自動化改造し導入した。

今後の展開を視野に入れて「本システム教育訓練カリキュラム」を構築し、重機土工を請け負う施工会社の職員に本システムを自ら使えるように教育訓練した。成瀬ダムまでは本システムの技術開発を担っている当社の社員が管制員を務めていたが、システムの成熟度や信頼度が向上したことにより、短期間の教育訓練で施工会社の職員がシステムを使って自ら自動化施工を実施することが可能となった。

仙台北部造成工事では、自動ブルドーザで盛土材をまき出したエリアの後方から自動ローラが転圧した。自動ブルドーザへの盛土材の供給は、有人アーティキュレートダンプで実施した（写真—4）。また、前項で紹介した「遠隔集中管制システム」を導入し、実験フィールドの遠隔集中管制室から施工会社の職員が1人で自動ブルドーザ・自動振動ローラ各1台と有人ダンプ4台の合計6台を管制した。通信設備は公共回線を使用し、GPSはVRSを用いることで、コスト低減とリードタイム短縮を実現した。

4. 今後の課題と求められること

今後も、建設機械の自動運転機能及び性能の向上並びに自動化施工する対象機種種の増強により適用工種や作業を拡げるとともに、現場規模や使用条件に合わせて多くの現場に適用できるようにするための取り組みを加速する。それにより自動化施工が普及し、下記に述べる課題解決に向けた動きが促進されることを期待する。



写真—4 造成現場での自動化施工稼働状況

(1) 建設機械の電子化、制御信号の利用

外部からの指令により自動で動く建設機械が汎用品として販売されるようになることが望ましいが、現時点は自動で動くように改造する必要がある。建機メーカーによる建設機械の電子化が進み制御信号の利用が可能になれば、建設機械の自動化改造に要するコストやリードタイムの低減が図れ、導入が容易になり、自動化施工の普及が促進され则认为する。

(2) ネットワークに関するインフラ整備

自動化施工及び遠隔施工を確実に実施するためには、ネットワークが整備されていることが不可欠である。ICT 施工を導入する現場が増加してきたので GPS やネットワーク回線の整備は進んでいるものの、建設機械の自動化改造と同様にコストとリードタイムの低減が課題である。現場規模が大きく工期が長い現場では専用回線を設置しても費用対効果がある一方で、中小規模かつ工期が短い現場では専用回線を設置することは厳しく、これが普及への障壁になる。公共回線を利用することにより合理化が図れるものの、通信速度や通信容量の課題がある。ネットワークの整備は、今後の建設産業に必須な協調領域と捉えて普及を進めることが必要と考える。

(3) 自動化施工に関する法規、ルール策定

自動車の自動運転についてはガイドラインや道路交通法改正などのルール作りが進展している一方で、建設機械の自動化は法律やマニュアルがない作業を自動で施工することであり、その使用方法是メーカー等によって規定することはできない。したがって、当社は本システムを導入している現場で自らルールやマニュアルを整備して運用している。自動化施工を普及させるためには、準拠すべき法律やガイドラインを策定し、事故が発生した際の責任の所在を明らかにできる体系が必要と考える。

5. おわりに

今後も A⁴CSEL を「進化」と「深化」させることで「現場の工場化」を進め、建設生産システムの変革に挑戦する。A⁴CSEL は、最新の製造工場と同様に、ハードウェアとしての生産機械と、自動運転や最適稼働をさせるソフトウェア、並びにそれらをつなぐネットワークを備えたデジタル時代の生産システムといえる。これのさらなる「展開」を図り、「遠隔集中管制室」を情報集約型の生産拠点とすることによって建設生産のやり方を一新し、労働集約型の典型である建設現場を変革して建設業に関わる多くの問題を解決することにより、将来にわたって安定的にインフラを提供していけるよう、今後も努力していく所存である。

J C M A

《参考文献》

- 1) 三浦 悟, 出石 陽一, 浜本 研一: 自動化施工システム A⁴CSEL[®] の進化と深化, 土木施工, Vol.64, No.1, pp.68-71, 2023
- 2) 坂田 昇, 青柳 隆浩, 出石 陽一, 土木施工, Vol.64, No.5, pp.81-84, 2023
- 3) 高見 聡ほか: 自動化施工システムにおける施工計画作成への最適化手法の導入, 土木学会第 75 回年次学術講演会, VI-1151, 2020
- 4) 鹿島建設(株)プレスリリース: 成瀬ダムで自動化施工システムによる「現場の工場化」を実現, 2023/10/13

【筆者紹介】

出石 陽一 (いずし よういち)
鹿島建設(株)
機械部 自動化施工推進室
室長



浜本 研一 (はまもと けんいち)
鹿島建設(株)
技術研究所 先端・メカトロニクスグループ
グループ長

