鹿島における DX 戦略と 建設生産 DX としての A4CSEL(クワッドアクセル)

鹿島建設株式会社 技術研究所 プリンシパルリサーチャー

さとる 三浦 ひでくに

鹿島建設株式会社 デジタル推進室 室長

真下 英那

全社の DX 戦略について

(1) 経営計画の達成に向けた DX 2 本の矢

鹿島建設株式会社(以下、「当社」という)では、 建設業や当社を取り巻く諸々の課題解決を目指し て、全社でデジタルトランスフォーメーション (DX) に取り組んでいる。

建設業では、就業者の高齢化や若手技術者の減 少、特に熟練労働者の将来的な不足が大きな問題 である。また、建設業の特色である現地・一品の 生産が労働集約的で、標準化・機械化・遠隔化に よる生産性・品質・安全性の向上の妨げになって いる。さらに、苦渋・危険作業とも隣り合わせの 建設現場は、3Kと呼ばれることもあり、若者が 建設業への就業をちゅうちょする原因とも考えら

れる。

当社は、これら課題の解決を目指して、建設業 の魅力向上も視野にグループ DX 戦略を定め、 デジタル技術を高度に駆使して次の二つの DX に果敢にチャレンジしている (図-1)。

- ① 既存事業や経営基盤の強化 (DX 1.0)
- ② 事業領域の拡大・多様な収益源の確立 (DX 2.0)

DX 1.0 では、中核事業である建設生産プロセ スの変革を通じた生産性向上や建設業の魅力向 上、経営基盤の最適化・合理化などを目指してい る。DX 2.0 では、デジタル社会における社会・ 顧客の新たな課題に対してデジタル技術を活用し て応え、事業領域の拡大を目指している。

(2) DX 実現に向けた主要施策

中核事業強化の主な取り組み (DX 1.0) として.

多様な収益源を確立した企業グループ

国内建設事業の強化

生産性向上と競争力強化

経営基盤の強化・業務変革 事業の強化・拡大を後押し

事業領域の拡大 -● 社会・顧客の新たな課題に対応する サービス・ビジネスモデルの変革・創造

・鹿島グループのデータサイクルを創造して社会や顧客と 常に繋がり、課題を的確に理解して解決 ・異業種を含めた他社との企業体で新たなモデル創造

■ 建設システム/プロセスの強化・変革 ・企画/設計/施工の各フェーズをデジタルで磨き、 生産性向上と競争力強化を図る

●事業を後押しするコーポレート機能と システム基盤

2.0 1.0

DXの定義

- ✓企業がビジネス環境の変化に対応し、データとデジタル技術を活用して、顧客・社会のニーズを基に、
- ①製品・サービス・ビジネスモデルを変革(DX2.0)
- ②業務そのもの、組織、プロセス、企業文化・風土を変革(DX1.0) ✓競争上の優位性を確立すること

DXの定義 出典:経済産業省、2019年 ※DX1.0、DX2.0は野村総合研究所から

図-1 デジタル戦略における [2本の矢]



図-2 DX が目指す「次世代建設生産システム」

「次世代建設生産システムの構築」が挙げられる。 当社が目指す「次世代建設生産システム」の概念 を図-2に示す。

建設業は、現実空間に構造物を建設することが主目的であり、仮想現実空間(サイバー)の取り組みを現実空間(フィジカル)に生かすことが肝要である。このために、「デジタルツイン」と呼ばれるフィジカル構造物を模した仮想モデルをデジタル空間に構築して、着工前に施工プロセスや建物の運用までをシミュレーションする「着工前仮想竣工・仮想運用」を推進している。また、技術者の経験知が重要な建設業において、より客観的に「データドリブン」な意思決定が行える仕組みの構築にも取り組んでいる。施工に関するさまざまなデータを集積・分析する基盤を構築し、より詳細なデータを取得するセンサ技術の開発などに取り組んでいる。

フィジカル空間では、施工の生産性向上や苦渋作業・危険作業の軽減などを目的に、「機械化・自動化」を推進している。このため、従来は熟練労働者の経験に頼っていた作業を機械が行えるよう、技能のデータ化を進めている。また、施工管理の生産性向上のため、遠隔で現場を管理する基盤の構築、VRやARを駆使した効率的な管理技術の開発、ドローンや3Dスキャナを活用したデータの取得技術の開発など「デジタルツール」の開発と現場適用に挑戦している。

現状、これらの取り組みは個々に開発・適用す

る段階にあるが、一つの DX 基盤上で稼働する 統合的なシステム「次世代建設生産システム」に 昇華させることを目指して、活動を強化している。

事業領域拡大の主な取り組み(DX 2.0)として、スマートシティの推進が挙げられる。東京都大田区に2020年にオープンした HANEDA INNOVATION CITYでは、当社は運営企業体の主幹事として全体統括を担当している。大田区が直面する課題(交通、生産性向上、観光、健康)の解決を目指して集結した多様な業種・業態の事業者が、先端技術を活用した実証・実装に挑戦しており、ここが産業交流の場となっている。このほかのスマートシティ案件でも、エネルギーや廃棄物、地方創生など各地が抱える社会課題に対して、建設業の強みとデジタル技術を組み合わせて新たな価値を創出して、解決に取り組んでいる。

2. 施工分野の DX-A⁴CSEL

(1) A⁴CSEL の開発コンセプト

我が国の建設産業界における重要課題として「人手不足・熟練労働者不足への対応」、「建設生産性の向上」、「労働災害の撲滅」が挙げられている。これらの問題を解決するため、建設機械の自動運転と、生産計画・管理の最適化を核とした「A⁴CSEL」(クワッドアクセル: Automate/Autonomous/Advanced/Accelerated Construction

system for Safety, Efficiency and Liability) の開発を進めている。

確実に進む現場作業者の不足や高齢化の状況下で、作業者の安全を確保し、将来にわたり社会資本を安定的、継続的に供給する生産システムはどのようなものになるのであろうか。この命題に対して、時代背景や実施理由は異なるものの生産性向上、省人化を目的として、近年、変革し続けている製造業の生産システムに注目した。

製造業では、1980年代から作業ミスの削減、 作業効率、人間に対する安全性の向上を図ること を目的として、作業の自動化が進められてきた。 工場では産業用ロボットを多用して、従来人間に よって行われていた作業を自動で行う。もちろん、人手でなければできない作業は残るが、生産 プロセスを制御して人が介在する必要性を低減さ せる。すなわち、少数の人員でミスなく安全に多 くの生産を行うことに成功している。このような 生産システムの仕組みを参考に「現場の工場化」 の実現を目指している。

すなわち、施工機械の自動化を進めるとともに、作業手順、方法を分析して作業の標準化を図る。そこから生まれる定型的な作業、繰り返し作業を自動化した機械によって行い、判断を要する臨機応変な作業や、熟練の技能が必須で標準化・自動化が困難な作業のみを人で行う。この考えを基に創出した開発コンセプトを図-3に示す。

人が作業データを送ると、自動化された建設機械が定型的な作業や繰り返し作業を自動で行うため、必要最小限の人員で多くの機械を同時に稼働させることが可能となる。これによって、大幅な省人化が図れるとともに、標準化された作業手順、方法を確実に行うことによって生産性が向上し、



図-3 開発コンセプト

安定した施工品質が期待できる。また、建設機械に搭乗する必要はなく、作業フィールド内に人が立ち入ることもないため、仮に、機械関連の事故が起こったとしても、死亡災害等の労働災害は発生せず、作業者の安全性は確保される。このように A⁴CSEL には、建設工事における諸問題に対し大きなメリットがあり、従来の機械化施工、遠隔施工とは異なる、これまでにない全く新しい建設生産システムである。

A⁴CSELの内容は次項から順次述べていくが、 特徴としては、専用の自動機械ではなく汎用機械 をベースに自律型自動建設機械に改造しているこ と、別途計測した熟練者の実操作データを基本と しつつ、AI 手法なども導入して自動建設機械の 制御を行い自動運転させること、などが挙げられ る。それに加えて、機械への作業指示に関して は、現場状況に応じて決定しなければならないこ ともあるため、経験豊富な人間の判断が必要とな るものの、多数の機械を効率的に稼働させるため の作業データや、工程の作成に最適化手法等のい わゆる生産管理技術を導入していることも大きな 特徴である。

単一作業に特化した自動化ではなく、製造業における産業用ロボットや CNC(Computerized Numerical Control)加工機のように多様な作業が可能な自動化機械を開発する。そして、それらに適切な制御信号を与えることによって思いどおりに動作する機械システムを構築し、生産工学に基づいて立案された生産計画に基づき効率的に活用することによって、建設作業の自動化率を上げる。その結果、真に熟練の技が必要なものだけを人が担当し、それ以外は自動機械が分担する新しい建設生産システムが実現する。それが、A4CSEL が最終目標としている「現場の工場化」につながると考えている。

(2) A⁴CSEL の技術概要

A⁴CSEL は、①汎用の建設機械を自動運転仕様に改造する技術、②自動運転の制御に AI で分析した熟練者の操作データを取り入れることで、現

場状況に左右されずに安定した品質で作業させる 技術, ③多数の機械を連携させ, 最も生産性の高い施工計画に基づいて稼働させる施工マネジメント技術で構成されている。これらによって, 建設機械の配置や作業順序などを最適化した計画の下,全ての機械が自律・自動運転で作業を行うことが可能となっている。これまでに振動ローラ,ブルドーザ,ダンプトラックの3種類の建設機械を中心に建設機械の自動化とそれらによって行う作業の自動化を進め,実工事に順次適用している状況である。

① システム構成

A⁴CSELの基本構成を図ー4に示す。大きくは、施工マネジメントシステムと建設機械の自律化自動運転システムで構成されている。「自動化」というと、これまではほとんど後者のシステムを指していたが、A⁴CSELの目的である「施工の自動化」を実現するためには、図ー4で示した施工マネジメントシステムが必須の技術要素となっている。施工マネジメントシステムには、「施工計画・施工管制システム」と、「重機管理システム」がある。それらの関係を簡単に記す。

現在、A⁴CSELを適用しているダム建設工事の 堤体盛り立て作業では、多数の建設機械を稼働さ せている。簡単にいえば、A⁴CSELでは、各々の 自動建設機械をどのように稼働させるかという施 工計画および作業データを作成する。その作業データを自動化重機に伝送して、自動運転によって作業をするというシステムである。しかし、それを遂行するためには、自動運転状況、機体状況をリアルタイムでモニタリングしつつ自動化機械への指示を継続的に発信する必要がある。

「施工計画・施工管制システム」,「重機管理システム」と「自律化自動運転システム」について, 以下にその概要を記す。

1) 施工計画システム

自動化機械を稼働させるためには、全ての作業を数値で指示する必要がある。例えば、ダム建設工事で約30台の重機を稼働させるには、12時間当たり約1,500の作業データ(施工計画)が必要となる。人手により約1,500の作業の施工計画を30分で作成することはまず不可能であるが、A4CSELでは、これらの施工計画の作成を迅速に行う技術の開発を進め、現状では30分以内に作成できるシステムとなっている。具体的には、作業エリアの情報(位置や形状)、機械の情報(台数や仕様)や作業種類などの基本情報を人が入力すると、それらの情報で施工計画が自動的に作成される仕組みになっている。

一方, 作成された計画の良否が施工生産性に 大きく影響するため, 作業時間やコスト, 安全

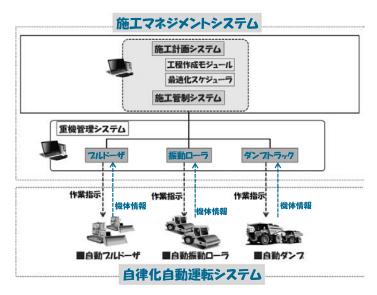


図-4 A⁴CSEL の基本構成

性がより適切になるように施工計画を立案することが重要である。このため、工程作成機能に加えて、AI 手法などの最適化機能を備え、施工計画を作業時間やコスト、安全性などのさまざまな評価軸で初期計画を向上させるため、製造工場の製造計画立案で使用されている生産スケジューラをベースに、施工計画の最適化を行うスケジューラを開発している(図 5)。

2) 施工管制システム

施工管制システムは、施工計画システムで計画された各作業を、各建設機械が的確に連携して遂行できるよう全体の進捗を管制する。施工計画システムにおいて各作業の前後関係の関連付けが行われているので、施工管制システムは、それに沿って作業進捗を重機管理システムと情報共有し、例えば、ある作業の終了を確認したら、自動的に次工程を開始する指示を出す。そのほか、作業全体の開始指示や、一時的な作業中断や再開も、このシステムを用いて行う。

3) 重機管理システム

重機管理システムは,施工計画・施工管制システムと次項に示す建設機械の自律化自動運転システムの仲介を行うシステムである。基本的には,施工管制システムからの指示を建設機械の作業データとして,いわば翻訳して自動建設機械に送る。と同時に,建設機械の作業進捗や動作状態を施工管制システムに伝える役割を担っている。また,作業が計画どおりに進まない場合,運行できない状態を施工管制システムに

伝えるとともに、状況に応じて自動化機械の動作を変更する機能を持っている。

4) 自律化自動運転システム

A⁴CSELでは、専用機械を開発するのではなく、汎用の建設機械にセンサや自動制御装置を後付けして自動化し、それをさまざまな作業に応じた制御プログラムで自動運転させることを開発コンセプトとしている。これまでに重ダンプトラック、ブルドーザや振動ローラ、また小型のバックホウやクローラダンプの自動化を行っている。ダムや造成工事で行われる運搬・ダンピング、まき出しおよび転圧の各作業を自動化するために開発した建設機械の概要を紹介する。

(i) 振動ローラの自動化

図ー6(a)に自動化装置を設置した振動ローラ(酒井重工製 SD451,運転質量:11t,全長:4.1 m,全幅:2.3 m,高さ:3.0 m)を示す。後付自動化装置や計測機器,センサおよび制御用 PC を搭載して自動化改造し,指示した施工範囲を自動で転圧作業を行うシステムを開発した。これまでに,4~20tの土工用,舗装用振動ローラを自動化している。

(ii) ブルドーザの自動化

図ー**6**(b)に示すブルドーザ (コマツ製 D61-PXi 機械 質量:18.9 t 全長:5.5 m 全幅:3.9 m 高さ:3.2 m) をベースに,振動ローラと同様の計測装置,センサと自動化装置を後付けして改造した。このほか,21 t,40 t の機種を自動化している。本件は株式会社小



図-5 最適化スケジューラの適用例







(a) 振動ローラの自動化概要





(b) 自動ブルドーザの構成

(c) 自動ダンプトラックの構成

図-6 自動化建機の概要

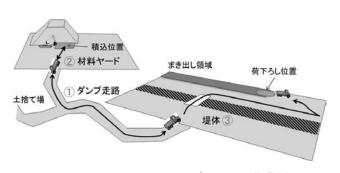


図-7 ダムにおけるダンプトラック作業例

松製作所との共同研究開発で実施している。

(iii) ダンプトラックの自動化

図ー**6**(c)に示す 55 t 積級ダンプトラック (コマツ製 HD465, 最大積載質量:55 t, 全 長:9.4 m, 全幅:4.6 m, 高さ:4.4 m) に, 他機械と同様, 計測装置, センサ等を後付け し自動化した。株式会社小松製作所との共同 研究開発で実施している。

② 自動化した作業の概要

ダム堤体盛り立て作業における自動化について 述べる。

1) 運搬・ダンピング作業の自動化

図-7にダム工事におけるダンプトラックの 作業を示す。ダンプトラックは、材料ヤードで 材料を積み込み、ダム堤体まで運搬を行い、堤 体上のまき出し領域で荷を下ろす。これらの走 行を自動化するには、与えられた制約を満たす 走行経路の自動生成や、走行路の勾配や不陸が あっても追従走行制御できる機能を開発・運用 している。

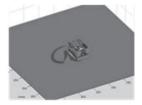
2) まき出し作業の自動化

振動ローラと同様に、ダムや造成工事で用いる各種材料のまき出しを自動化ブルドーザで行っている。まき出し作業でのブルドーザの移動経路を考えると、上手な作業を実施するために適した経路は材料の質および量によって変わる。それに対応した経路を生成するため、まき出し作業シミュレータ(図-8(a))を開発した。これを使い、例えば、深層強化学習などのAI手法を用いてさまざまな条件に対して作業を効率よく行うための経路を生成している(図-8(b))。

3) 転圧作業の自動化

ブルドーザでまき出した土砂を踏み固める転 圧作業は、前後進と走路切替えを繰り返して走 行する単調な繰り返しのため、自動化に適した





(a) まき出し作業シミュレータ



(b) 計算結果 (作業前-作業中-作業後) 図-8 作業シミュレーションの例



(a) 自動振動ローラ



(b) 自動ブルドーザ



(c) 自動ダンプトラック

図-9 自動化機械の自動運転状況

作業であるが、走行路の性状によって操舵角および操舵速度を調整しなければならない。作業時の車体応答値から自律的に制御パラメータを変更する適応制御などを採用することで、材料特性の影響を受けない運転操作を開発している。図-9に、これまでに現場適用した各種自動建設機械を示す。

③ 適用状況

A⁴CSEL は 2015 年に導入した, 福岡県五ケ山 ダムを皮切りにダム工事を中心に実現場に適用し てきた。最近の主な適用状況について紹介する。

1) ロックフィルダムのコア部盛り立て

2018年11月,独立行政法人水資源機構・小石原川ダム本体建設工事においてA⁴CSELによる堤体盛り立てを実施した。作業エリア付近に施工マネジメントシステムを稼働させるための施工管制室を設置し、施工管制システムからの指示により自動ダンプトラック3台、自動ブルドーザ2台、自動振動ローラ2台の合計7台の自動化建機を連動させ作業を行った(図ー10)。コア材一層分(約1,300 m³)の盛り立て作業を4.5時間にわたる連続作業で実施し、順調に施工することができた。



図-10 ロックフィルダムでの A^4CSEL の適用状況

2) CSG ダム本体工事への適用

現在、堤高114.5 m、堤頂長755.0 m、堤体積485万 m³と、台形 CSG ダムとしては日本最大級の規模を誇る、国土交通省・成瀬ダム堤体打設工事に A⁴CSEL を導入している。上下流幅が広く、大型建設機械での機械化施工に適していることで、最盛期には、エリアサイズ65,500 m²に1リフト(25 cm×3層)で、総ボリューム約48,000 m³を、おおよそ70時間の連続施工で盛り立てるという大容量高速施工が要求されており、ブルドーザ4台、ダンプトラック7台、振動ローラ7台、仕上げローラ3台、清掃車2台の合計23台の自動化建設機械を必要最少人員で、全機種同時に稼働させる計画である(図-11)。2020年7月から開始し11月まで施工、その後、冬期中断を経て、



図-11 CSG ダムでの A4CSEL の適用イメージ



図-12 CSG ダムでの A4CSEL の適用状況

2021 年 4 月から自動化施工を再開している。 施工数量に合わせて機械台数を増やしながら, 昼夜勤体制で $20 \sim 30$ 時間の連続運転を実施している(図-12)。

成瀬ダムでは、2024年まで稼働を予定しており、機会があれば、稼働実績などについても報告する所存である。

3) KAJIMA DX LABO

成瀬ダム堤体工事の右岸側サイトに、A⁴CSELの管制室が設置されているが(図ー13)、その1階に「KAJIMA DX LABO」が昨年10月にオープンした。A⁴CSELの概要および成瀬ダム工事について体感・学習できる施設となっている。成瀬ダムのジオラマを中心に据えたパネルゾーンとシアタールーム、展望デッキのフィールドミュージアムで構成され、見学者はタブレット端末を操作しながら、ジオラマやパネルに組み込まれたAR(Augmented Reality:拡張現実)を通じて工事や技術を体感的に学べる。さらに、展望デッキでは工事中の堤体にタブレットをかざすことで、実際の位置に成瀬ダムの完成形がARで視認できる仕組みとなっており、



図−13 KAJIMA DX LABO

当社が考える土木の未来を表現している。

3. まとめ

本稿では、当社のDX戦略を示すとともに、施工-建設生産分野のDXの具現化を追及しているA⁴CSELの技術概要とその実用状況等について報告した。

手前味噌ながら、A⁴CSELの構成技術要素は、最新の製造工場と同様のICT 化がなされていると考えている。すなわち、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およびそれらをつなぐネットワークを備えたデジタル時代の建設生産システムといえる。これによって、労働集約型の典型である建設現場を情報集約型の生産拠点に変革し、建設生産のやり方を一新し、建設業に関わる多くの問題を解決して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。