

建設現場の生産性向上に資する技術に関する調査・研究

(その3)

2024年4月

土木学会 建設技術研究委員会

生産性向上小委員会

## 目次

### 第1編 無人化施工の現状、課題と今後の方向性

1. はじめに	1
1-1. 無人化施工の背景および歴史	1
1-2. 国土交通省における取組み	2
1-3. 民間における取組み	3
2. 無人化施工	3
2-1. 無人化施工の施工技術の概要説明	3
2-2. 無人化施工の対応可能な作業	4
2-3. 無人化施工の適用工種	4
2-4. メリット、デメリット	5
3. 無人化施工の事例紹介	6
3-1. 無人化施工の施工実績	6
3-2. 自動化技術の業界動向調査	8
4. 無人化施工の課題や問題点	9
4-1. 調査結果からの分析・考察	9
4-2. 無人化施工工事の減少に伴う問題	10
4-3. 熟練オペレーターの高齢化と減少	10
4-4. 遠隔操作式建設機械の老朽化と減少	11
4-5. 施工管理者の高齢化と減少	11
5. 無人化施工の今後の方向性	11
6. おわりに	12

## 目 次

### 第2編 山岳トンネルの無人化施工

1. はじめに	13
2. 山岳トンネルの施工方法	15
2-1. トンネル掘削	15
2-2. インバート工	16
2-3. 防水工	17
2-4. 覆工	17
3. 無人化施工を実現するために必要な技術	18
3-1. トンネル掘削	18
3-2. インバート工	19
3-3. 防水工	19
3-4. 覆工	19
4. 山岳トンネルの無人化施工を実現するための要素技術	20
4-1. 無人化施工を実現するための要素技術	20
4-2. トンネル掘削	20
4-3. インバート工	33
4-4. 防水工	34
4-5. 覆工	37
4-6. 施工管理	40
5. 現場適用にあたっての課題	43
5-1. 技術面における課題	43
5-2. 費用面における課題	44
5-3. 作業者の技術/スキル	44
5-4. 法令における課題	45
6. おわりに	45

## 目 次

### 第3編 プレキャストコンクリート工法における無人化および自動化施工の取組

1. はじめに	46
1-1. プレキャストが採用されにくい状況について	49
1-2. 無人化に向いているプレキャスト構造物	51
2. プレキャスト工法における無人化・自動化の取組	52
2-1. プレキャスト工法の取組の特徴	52
2-2. ゼネコンによる現場施工や製作工場の取組み事例(土木分野)	53
2-3. 建築での取組み事例	55
2-4. 海外での取組み事例	55
2-5. その他の取組み事例	56
3. 無人化・自動化に関する課題や問題点	58
3-1. 概説	58
3-2. 荷下し・据付・組立に関する課題	58
3-3. 接合・グラウト・中詰めにおける技術面の課題	61
3-4. 費用面の課題	62
4. プレキャスト分野での今後の展望	63
4-1. 無人化の展望	63
4-2. プレキャストコンクリート積極採用に向けた発注者による政策的な取組・事例	63
4-3. 技術開発	66

## 目 次

### 第4編 3Dプリンタの活用

1. はじめに	69
2. 他業界の事例	70
3. 建設業界の事例	71
3-1. 模型の作成事例	71
3-2. 建築工事の事例	72
3-3. 土木工事の事例	73
4. 委員会の事例	77
4-1. 日本コンクリート工学会	77
4-2. 土木学会	77
5. 発注者の動向	79
6. 3Dプリンタの活用メリット	81
7. 3Dプリンタ活用における課題	82
8. 今後の展望	85

## 目 次

### 第5編 建設分野におけるデジタルツイン技術の利用についての現状、課題と将来性について

1. はじめに	86
1-1. デジタルツインの歴史および背景	86
2. デジタルツインの概要	87
2-1. デジタルツインの概要説明	87
2-2. デジタルツインと類似の用語・概念とその違い	88
2-3. デジタルツインを支える技術	90
2-4. デジタルツイン活用のメリット・デメリット	92
3. デジタルツインの取組み・活用事例	94
3-1. 国、地方公共団体における事例	94
3-2. 民間企業(建設業ゼネコン各社)における事例	96
3-3. 他産業、海外における事例	99
4. デジタルツインの構築・運用上の課題や問題点	101
4-1. 分野によらず共通の課題	101
4-2. 建設分野における課題	102
5. デジタルツインの今後の展望	103
5-1. デジタルツイン活用への期待	103
5-2. デジタルツインの将来性	103
6. おわりに	105

## 目次

### 第6編 自己治癒・修復コンクリートを用いた将来性の無人化修復工事について

1. はじめに	106
1-1. 老朽化に伴うインフラ整備	106
1-2. コンクリートの歴史	107
2. 自己治癒・修復コンクリート保術	107
2-1. コンクリート自らが機能回復する技術	107
2-2. 自己治癒技術	108
2-3. 自己修復技術	109
3. 自己治癒コンクリートの現場適用例	110
3-1. Basilisk HA の概要	110
3-2. ひび割れ修復メカニズム	110
3-3. 施工実績	111
4. 現場適用に向けた課題	111
4-1. 価格	111
4-2. Basilisk HA 量産体制	111
4-3. Basilisk HA を用いた現場打ちコンクリート	111
4-4. 耐久性	112
5. 各学会の活動	112
5-1. コンクリート標準示奉書(規準編)の追加(JSCE)	112
5-2. 日本コンクリート工学会	113
6. 自己治癒コンクリートの有効性	114
6-1. 脱酸素の有効性	115
6-2. 生産性向上の有効性	115
7. おわりに	115

## 第1編 無人化施工の現状、課題と今後の方向性について

### 1. はじめに

担い手不足が進む中で建設業の持続性を確保するためには、建設現場の抜本的な生産性向上が必要である。現場の生産性向上に資する技術の一つとして、建設機械施工の無人化施工、すなわち自動化・自律化・遠隔化技術が期待されている。

無人化施工とは、建設工事を遠隔操作可能な建設機械を使用し、作業を行うことである。建設機械を操縦するための装置等を取り付けた建設機械群をオペレータが遠隔地より操作することで安全性の確保および生産性の向上が期待できる。

現在、無人化施工技術は明かり工事やトンネル工事において開発が進められているが、トンネル工事に関しては後段に譲り、本章では明かり工事における無人化施工技術について現状と課題を整理した上で、今後の方向性について述べる。



写真-1 バックホウおよびダンプの無人化施工の様子  
(先端建設技術センター資料より)

#### 1-1 無人化施工の背景および歴史

無人化施工の主な目的は、危険および有害な作業環境である災害現場や施工条件が厳しい箇所での労働力確保や安全性の向上のためである。現在のところ、プロジェクトの効率化、コスト削減および品質管理の向上を図るため、いわゆる生産性向上のために導入される段階には至っていない。

無人化施工は、表-1に示すように平成2年11月に発生した雲仙普賢岳噴火に起因する土石流対策工事から本格的に導入され、平成12年の有珠山噴火による被害拡大防止対策など、土砂災害への対応を中心に技術開発されてきた。平成27年4月には、北陸地方整備局から無人化施工設計施工マニュアルが発行されており、設計、積算、施工管理等の技術的事項を取りまとめ、無人化施工の普及に努めていることがうかがえる。

しかしながら、無人化施工が完全に普及し、建設プロジェクトで一般的に使用されるようになるまでにはまだ時間がかかると考えられる。技術の発展と規制の整備が同時に進行しながら、無人化施工が一般的になることが求められる。

表-1 無人化施工の歴史

1990年代	雲仙普賢岳噴火に起因する土石流対策工事から本格的導入。
2000年代	有珠山噴火による被害拡大防止対策など、土砂災害への対応を中心に技術開発。
2010年代	建設業界における無人化技術の研究と開発が本格化。 建設機械の自動運転、遠隔操作、ドローンの活用、建設サイトのデジタルツインの導入。 北陸地方整備局から無人化施工設計施工マニュアルが発行(2017)
2020年代	自律的な建設ロボットの導入が増加。 建設用ロボットアームや自動化されたコンクリート敷設装置が一般的になりつつある。 国交省 建設機械施工の自動化・自律化協議会 を設置(2021)

1-2 国土交通省における取組み

国土交通省では、建設業の担い手不足および生産性の向上にも効果を期待し、無人化施工技術の開発および普及の加速化を目的として令和3年に「建設機械施工の自動化・自律化協議会」を設置し議論を開始している。(図-1) この協議会では、無人化施工を想定した入札・契約、施工計画や検査におけるルール整備、安全対策の標準化などについて検討されており、災害現場以外での導入が普及促進されるよう取組まれている。



図-1 建設機械施工の自動化・自律化協議会 実施体制

(建設機械施工における自動化・自律化・遠隔化の促進\_国交省総合政策局より)

### 1-3 民間における取組み

無人化施工を普及させるためには国の取組みだけでなく、民間企業での取組みも重要である。現在、建機メーカーでは5Gを活用した遠隔システムの開発が行われている。また、ゼネコンではバックホウをはじめとした建設機械の自律システムおよび自動運転による施工システムの開発および実証実験の開始など、各社で技術開発が行われている。

これまでは危険・苦渋・劣悪な作業環境の対策として、災害復旧のほか比較的単純な施工に無人化施工が導入されていた。例えば、粉じん対策・ガス対策・土壌汚染対策などオペレータの作業環境改善を目的としたものがある。これらは、解決されるべき課題が特定され、無人化施工が活躍すべき場が明確となり技術開発が進められてきたと考えられる。今後、省力化・施工効率の向上・安全性の向上という視点で、議論が進められることに着目したい。

本WGでは、建設機械を使用した無人化施工について、現状と課題および今後の展望についてとりまとめることとする。

## 2. 無人化施工とは

### 2-1 無人化施工の施工技術の概要説明

無人化施工とは、建設機械とその周辺に設置したカメラにより撮影した映像を遠隔操作室に無線伝送し、操作者はその映像を見ながら、または直接目視によりコントローラーを用いて遠隔操作を行うものである。(図-2)

無人化施工は、主に災害復旧のように重機オペレータが施工箇所に近づくことが危険な場合において、遠隔から操作することでオペレータの安全性を確保することを目的とした技術である。

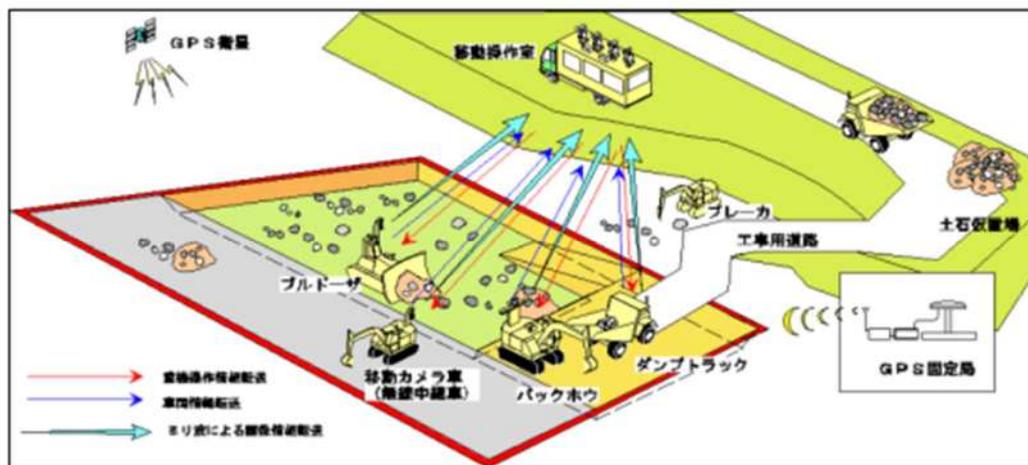


図-2 無人化施工の概要 (建設無人化施工協会 HP より抜粋)

近年、ICT 土工の技術が進展しているが、ICT 土工で使用されるシステムは無人化施工技術から派生したものも多数あり、無人化施工と ICT 土工において使用されている技術は共通するものが多数ある。しかしながら、ICT 土工が生産性向上を目的としているのに対し、無人化施工は作業の安全性確保を目的としており、両者は異なるものである。以下に、無人化施工の対応可能な作業、適用工種、メリット、デメリットについて述べる。

## 2-2 無人化施工の対応可能な作業

現在、無人化施工において対応可能な作業は以下のとおりである。(図-3)

- ・バックホウによる掘削や破砕、設置
- ・ブルドーザによる掘削・押土
- ・運搬機械による土砂や資器材の運搬
- ・振動ローラーによる土砂の締固め・転圧



図-3 無人化施工で適用可能な工種  
(先端建設技術センター資料より)

## 2-3 無人化施工の適用工種

建設無人化施工協会のHPに、対応工種の一覧表が整理されている。(表-2)

表-2 施工技術・対応工種一覧

(施工技術・対応工種 | 無人化施工とは | 建設無人化施工協会 (kenmukyuu. gr. jp) より抜粋)

施工技術・対応工種						
工種	細分	対応工種		備考	施工写真	
			作業概要			
1 砂防堰堤等	①転圧コンクリート (RCC、CSG)	・BH、BD、VRの組合わせ作業 ・測量、位置出し(マーキング)、平板載荷試験等の管理		砂防堰堤、床固工、水叩き工、側壁を含む。	A	
	②有スランブコンクリート	・BH、DTを改造したポンプ車により作業を実施		-	B	
	③ISM工法	・バックホウに攪拌装置(ISM)を取付け施工		ホースの取廻し距離に限界がある。	C	
	④ブロック積堰堤	・BHIにブロック把持装置、CD、DTによるブロック運搬		把持対象と把持装置、運搬機と適合が必要である。	D	
	⑤鋼製スリット	・BHIに把持装置、DTによるスリット運搬作業			B	
2 土工事等	⑥土工事 (導流堤/遊砂地)	・BH、BD、CD、DTの組合作業		-	E	
	⑦除石工 (転石破砕を含む)	・BH、BD、CD、DTの組合作業 (転石破砕ではBHIにブレーカ装着)		-	F	
	⑧頭部排土	・BH、ロックライミングマシンの組合作業		ロックライミングマシンは目視の実績しかない。	G	
	⑨土のう設置	・BH、BD、CD、DTの組合作業		土のうを吊込むために、土のうの吊代に工夫が必要である。	H	
	⑩伐採工	・BHIにアタッチメント(切断機:ウッドシャ)と把持装置付BH(切断木の接触を防ぐため把持)の複合作業		除根作業は手間がかかる。	I	
	⑪分解による空輸 (山頂部での施工)	・分解型バックホウと空輸による作業		空輸計画、組立ヤード等の検討が必要である。	J	
	⑫除雪	・BH、BDによる作業		降雪などの厳しい作業条件にも対応可能である。	K	
	⑬瓦礫片付け	・BHIに把持装置、CDで運搬		-	-	
	⑭粉塵防止材散布	・CDを改造した(散水車)		-	-	
	⑮水中掘削	・水陸両用ブル、嵩上げバックホウによる作業		作業箇所の平坦性、トラフカビリティを確認してから作業となる。	L	
	⑯吹き付工	・水陸両用ブル、嵩上げバックホウによる作業		-	-	
	3 構造物設置	⑰ブルメタル	・BHIに把持装置、DTによるブルメタル運搬作業		把持対象と把持装置、運搬機と適合が必要である。	-
		⑱ボックスカルバート	・BHIに把持装置、DTでボックスカルバート運搬			M

\*機種名: BH (バックホウ)、BD (ブルドーザ)、CD (クローラダンプ)、DT (ダンプトラック)、VR (振動ローラ)

## 2-4 メリット、デメリット

無人化施工のメリット・デメリットを以下に整理する。

### ①メリット

- ・重機オペレータの安全性が確保される。
- ・施工場所に作業者が行かなくて良いため、建設現場における労働環境の改善につながる。
- ・遠隔地からの作業が可能となるため、多様な人材が建設業で働きやすくなり、担い手不足の解消につながる。

### ②デメリット

- ・現在の安全に関する法令やルールは有人施工を前提とされたものであるため、無人化施工において体系化された法令・ルールが存在しない。
  - ・重機の操作方法が従来のものと異なるため、オペレータの育成のために特別な教育が必要。
  - ・導入にあたり、従来に比べコストがかかる。
- 次項以降に、無人化施工の施工実績及び自動化技術の業界動向を示す。

### 3. 無人化施工の事例紹介

前章では無人化施工の技術内容を紹介したが、本章では無人化施工の施工実績および自動化技術の業界動向を紹介する。

#### 3-1 無人化施工の施工実績

平成6年の雲仙普賢岳水無除石無人化施工試験工事をきっかけとして、本格的に無人化施工は始まった。平成6年～令和4年10月を対象とした無人化施工の施工実績<sup>1)</sup>を図-4に示す。無人化施工は協会員で約200件、会員外で約70件であるが、建設無人化施工協会の会員外による施工実績の調査漏れも考慮すると300件以上の施工実績があると考えられる。また、近年の無人化施工案件については主要ゼネコンではなく地場ゼネコンが工事を受注する傾向も増えてきている。

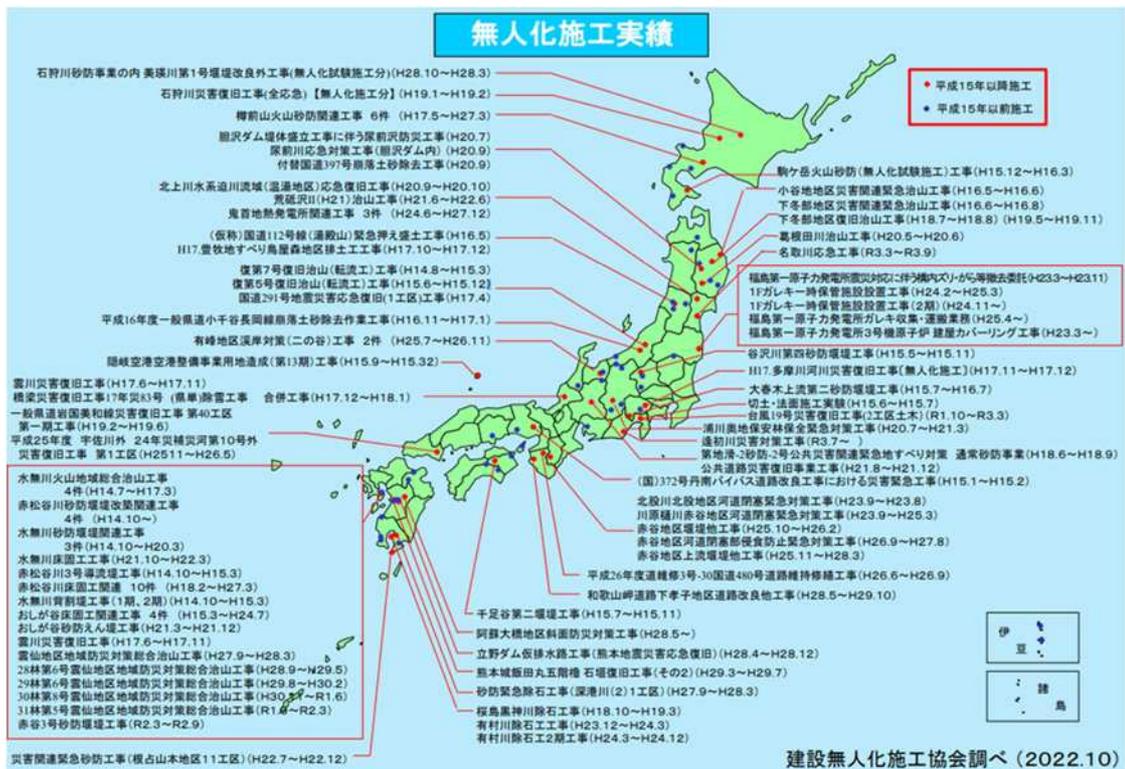


図-4 無人化施工の実績

主要ゼネコンによる無人化施工の地区別実績を図-5に示す。無人化施工実績は圧倒的に九州地区が多く、そのほとんどは雲仙絡みの工事である。その次は東北地区であり、岩手・宮城内陸地震(2008年)、東日本大震災(2011年)の対応、北海道は有珠山噴火(2000年)対応および北海道開発局で定期的実施されている実験工事(樽前、美瑛)が施工実績の内訳を多く締めている。地場ゼネコンについては記載していないが、北陸地区の施工実績が特出している。以下に、代表的な施工実績を述べる。

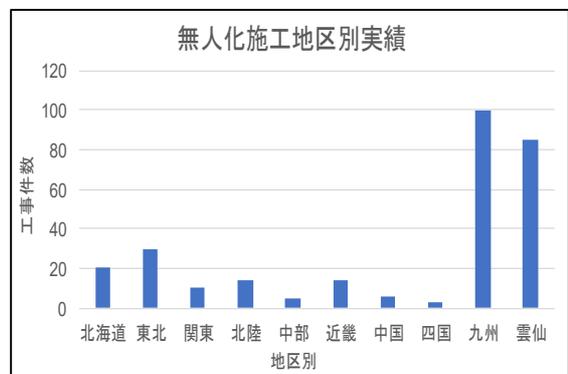


図-5 無人化施工地区別実績

## (1) 雲仙普賢岳水無除石工無人化施工試験<sup>2)</sup>

雲仙普賢岳は長崎県南東部の島原半島中央部に位置し、平成2年11月に火山噴火活動が再開され、翌年6月には水無川流域において大火災流が発生した。雲仙復興工事事務所では、土石流対策で除石工事が急務であったが、火砕流・土石流が頻発する水無川地域内は非常に危険であった。このため、建設省では平成5年度に「試験フィールド制度」を導入し、無人化除石技術についての技術開発を求め、技術提案の公募を行った。表-3の公募条件を満たし、かつ、平成5年度内に施工可能である

6社の技術を採用した。

平成6年に水無川地域で約1か月間の試験施工を行った。施工機械はブルドーザ・バックホウ・ダンプトラック・ブレイカーとし、施工機械の遠隔操作には無線を用いた。試験施工では掘削・積み込み・運搬・岩破碎作業ができることを確認した。その結果、無人化除石技術が実施可能であることが分かった。よって、試験施工後に雲仙復興工事事務所では2社の技術を採用し、警戒区域内を含む4工区において、図-6のように234,000m<sup>3</sup>の無人化除石を行った。

表-3 公募のための技術条件

技術の内容	技術水準
1.不均一な土砂の状態であつ、岩の粉碎を伴う掘削と運搬	直径2~3m程度の礫破碎が可能である
2.現地の温度、湿度条件に対応可能	外圏条件として一時的には温度100℃、湿度100%でも運航可能
3.施工機械を遠隔操作することが可能	100m以上の遠隔操作が可能なこと

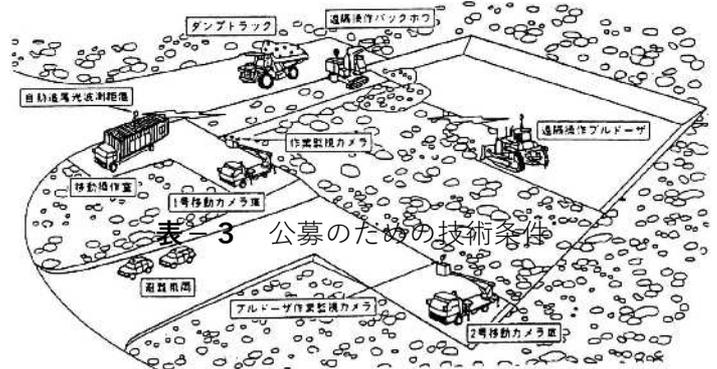


図-6 無人化除石工事

## (2) 福島第一原子力発電所震災対応に伴う構内ズリ・がら等撤去委託<sup>3)4)</sup>

平成23年3月11日の東日本大震災で福島第一原子力発電所に津波が襲来し、翌日3月12日に福島第一原子力発電所で水素爆発が発生した。本工事は平成23年4月に開始し、工事内容は福島第一原子力発電所の水素爆発で飛び散った瓦礫や津波で発生した瓦礫の撤去作業である。特に水素爆発によって発生した瓦礫は放射線レベルが高く、発電所内の復旧作業において大きな妨げとなった。そこで、高線量作業環境における作業員の被ばく線量の低減を目的として無人化施工を採用した。また、無人化施工機械は、ブルドーザ・バックホウ・クローラダンプ等を使用した。

バックホウを用いて、瓦礫をコンテナに収納し、クローラダンプをコンテナ保管場所まで輸送した。その際、瓦礫は種類および放射線別に仕分けして、コンテナに収納した。発電所内の瓦礫除去作業は約7ヶ月間実施され、面積で約56,000m<sup>2</sup>、撤去量で約20,000m<sup>3</sup>の瓦礫を除去できた。また、今回の瓦礫撤去では放射線量の高い瓦礫を撤去したため、周囲の放射線量が徐々に減少された。

### 【参考文献】

- 1)吉田貴：5Gを活用した無人化施工の可能性について、令和3年度先端建設技術セミナー
- 2)古賀康：正雲仙普賢岳における砂防工事の無人化施工、砂防学会誌、Vol. 52、No. 4、pp. 64-68、1999
- 3)浅間一：福島原子力発電所の事故対応および廃炉のための遠隔操作・ロボット技術、日本原子力学会誌、Vol. 56、No. 5、pp.25-29、2014
- 4)立石洋二、植木陸央：企業からみた福島第一原子力発電所災害への対応—福島第一原子力発電所における無人化施工での瓦礫撤去—、日本ロボット学会誌、Vol. 32、No. 2、pp.151-153、2014

### 3-2 自動化技術の業界動向調査

次に自動化施工について、ゼネコンおよび建設機械メーカーの土工事の技術開発を調査した。以下に、代表的な導入事例を紹介する。

#### (1) 大林組、NEC：バックホウ自律運転システム

従来のシステム（2019年度）では、トンネル工事現場などバックホウの作業場所が固定化された建設現場を対象とし、バックホウの動きや盛土の掘削・積み込みポイントを算出するための各種センサやカメラをトンネルの天井などに固定していた。

今回は**写真-2**のようにセンサやカメラの認識機能を高度化し、バックホウに設置することで、屋内外を問わず状況が変化する多様な現場環境においても、従来と同様の精度で自律運転が可能となった。さらに、

地表面以下を掘らない掘削や土砂の清掃、盛土の積み替えなどができる制御機能の向上や、外部接続機能（連携インターフェース）の追加により、複数台の建設機械が連動して協調運転するよう制御する建機フリートマネジメントシステム（建機 FMS）を通じて、他の自動化・自律化重機と連携させた作業ができるようになった。

（参照：[https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20221120\\_1.html](https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20221120_1.html)）



写真-2 バックホウ自律運転システム

#### (2) 安藤・間、コベルコ建機：自動運転ショベルの複数台同時稼働・管理による省人化

**写真-3**のように1人の作業管理者が2台の自動運転ショベルの運転管理を同時に行う実証実験を行った。本システムでは、ティーチング作業（プログラムの作成から現場環境に応じて重機の動作を記録する）や油圧ショベルの非常停止を含めた自動運転の全操作をタブレットから複数台同時に指示・管理することが可能である。また、LiDAR（光を使用して、リモートセンシング技術を用いて物体検知や対象物までの距離を測定する）で取得した掘削箇所の形状やアタッチメント角度検出のセンサによるバケット



写真-3 自動運転の様子

爪先の移動軌跡をタブレット画面に表示することができ、作業管理者がショベルの状態をリアルタイムに確認することができる。実証実験では、ダンプトラックへの土砂積み込みの作業時間について、有人運転（1人で1台）と自動運転で比較を行い、1人で2台の自動運転ショベルを管理することにより、1人あたりの土砂積み込み量が有人運転時より約3割増加することが確認できた。

（参照：<https://www.ad-hzm.co.jp/info/2023/20230511.php>）

## 4. 無人化施工の課題や問題点

### 4-1 通信環境の整備に関する問題

無人化施工の実現にあたり、送受信設備の綿密な構築と管理が不可欠である。施工通信環境の整備は必然的に複雑化する傾向を示しており、無人化施工において使用される無線設備は、遠隔操作や作業情報の伝達など幅広い範囲に渡ってその活用が求められる。

現在の無人化施工の通信様式は図-7 に示すとおりである。

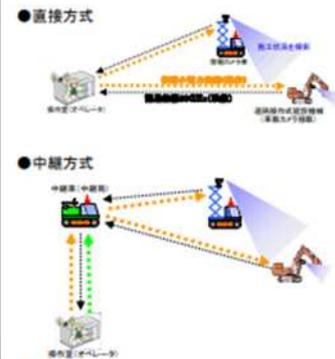
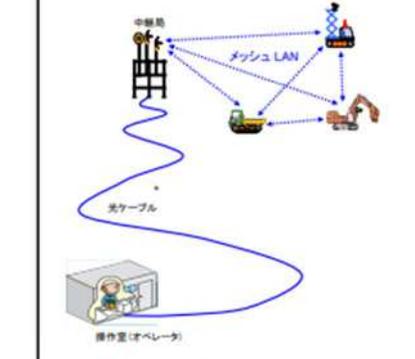
大別	直接目視による無人化施工		映像伝送システムを用いた無人化施工	
	実務方式	直接操作方式	非ネットワーク型直観および中継操作方式	ネットワーク型操作方式
世代		第1世代	第2世代	第4世代
概要		オペレータが遠隔操作式建設機械を直接目視しながら遠隔操作する実施方式である。	オペレータがカメラの捉えた遠隔操作式建設機械の映像をモニターで見ながら遠隔操作する実施方式である。第2世代はネットワークを使用しないため、遠隔操作と映像伝送は1:1通信である。第4世代は、すべての情報を集約し、ネットワークで伝送するため、1:n通信となる。また、第2または第4世代にて情報化施工をするものを第3世代と称している。	
システムイメージ				
適用の目安	<ul style="list-style-type: none"> <li>操作距離が0~50m以内、かつ直接目視操作が可能であること。</li> <li>オペレータが機械より高い位置から操作できること。</li> <li>簡単な作業であること。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>【直接方式の場合】 <ul style="list-style-type: none"> <li>操作距離は、50~300m以内、かつ障害物がない(見通しが確保される)こと。</li> <li>無人化施工で実績のある工程はすべて可能。</li> </ul> </li> <li>【中継方式の場合】 <ul style="list-style-type: none"> <li>操作室から中継車までの操作距離が1km以内かつ障害物がないこと。</li> <li>中継車から機械までの操作距離が50~300m以内であること。</li> <li>操作室から機械までの間に障害物が1箇所であること。</li> <li>無人化施工で実績のある工程はすべて可能。</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>操作距離は障害物の有無を問わず600m以上が可能。</li> <li>光ファイバケーブルを使用すると、超長距離からの操作も可能(実績:直線距離30km)。</li> <li>見通し条件は問わない。操作距離(500m程度が目安)障害物の数に応じて、アクセスポイント(中継車)を設置する。</li> <li>無人化施工で実績のある工程はすべて可能。</li> </ul>	

図-7 無人化施工の通信様式(先端建設技術センター資料より抜粋)

施工作業の性格上、通信距離の確保は至上の重要性を有する。現場の広範囲性及び地形によって異なる通信距離をどれだけ適切に確保できるかが、無人化施工の通信環境の整備に対する重要な要素である。また、通信の見通しは極めて重要であり、無線通信の可否は見通しの良さに大きく依存する。機械の屈折箇所や障害物が多い場所では無線通信の妨げとなる可能性があるため、それらをよく考慮した通信環境の整備が要求される。

また、一定の地域内で複数の無人化施工が並行して行われる場合、同種無線のチャンネル数には限りがある。特定チャンネルの混雑は、通信の不安定化を招き、施工安全性や効率性を損ねる危険性を秘めている。

無線設備の使用にあたっては、免許や許認可の取得が必須となり、その取得は通信環境整備における重要な課題となる。映像伝送に関しては、アナログ方式とデジタル方式の選択が求められる。この選択は映像の質やデータ転送速度、並びに電池寿命等の観点から重要である。デジタル方式は高品質の映像転送が可能であるが、転送速度が低下する危険性がある。逆にアナログ方式では、転送速度が高いものの、映像品質が下がる可能性がある。

無線データの転送速度は、遠隔操作の反応速度や、映像及びその他の情報のリアルタイム性に対して影響を及ぼす。さらに、通信が連続発信であるか、休止時間を有しても良いかという観点も重要である。

以上に挙げられた要素の全てが無人化施工の通信整備における課題であり、これらを解決することが無線通信の可能性を最大限に活かし、無人化施工を更に効率的で実用的なものにする鍵となる。

#### 4-2 無人化施工工事の減少に伴う問題

雲仙普賢岳噴火の災害復旧に端を発した無人化施工の施工実績数は、図に示すようにその後の地震などのタイミングで突発的に増加するものの全体的には減少する傾向にある。今後の気候変動に伴い激甚災害が増加する可能性はあるものの、無人化施工実績数の減少は今後も続くと考えられる。

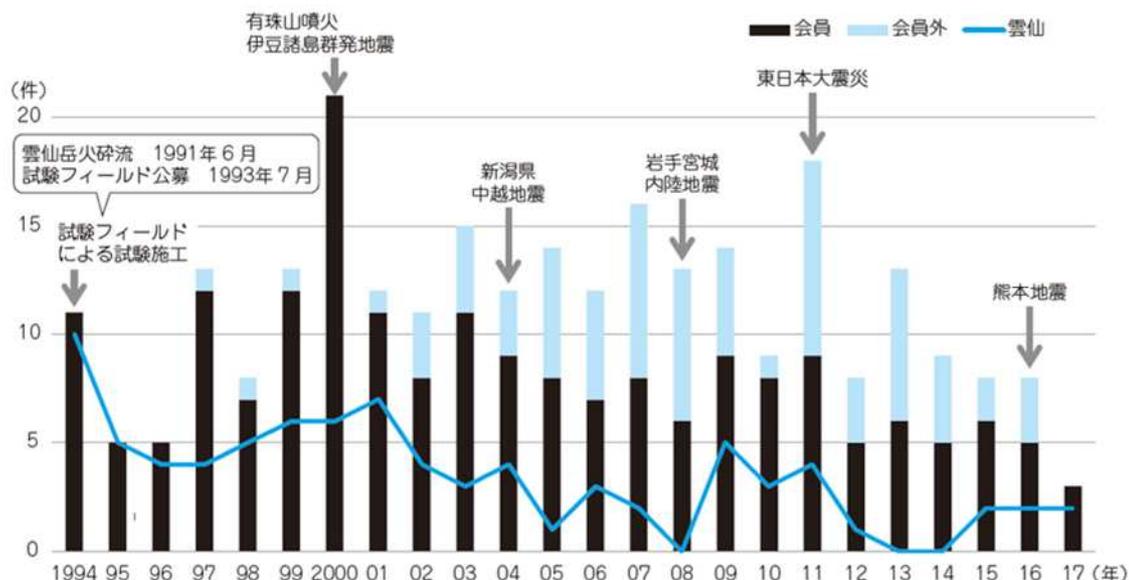


図-8 年度別無人化施工実績数（建設マネジメント技術 2018年11月号より抜粋）

そして、実績数の減少に付随する、以下に示すような問題も懸念される。

#### 4-3 熟練オペレータの高齢化と減少

無人化施工を行う災害現場は、例えば同じ噴火災害でも雲仙普賢岳と有珠山では施工条件が全く異なり、そのため経験のある熟練オペレータが指名され重用されてきた。この熟練オペレータは1994年に無人化施工が本格的に現場で活用されてきた頃から従事している者が多いため、そこから30年近く経過しオペレータの高齢化が懸念されている。



図-9 建設業就業者の高齢化の進行  
（建設業デジタルハンドブック資料より抜粋）

また、図-9に示すように建設業就業者の高齢化が進んでいることに加え、無人化施工工事数の減少に伴いオペレータの需要も減少するため、前述の高齢化と合わせて熟練オペレータ数が減少傾向にあり、無人化施工オペレータの技術とノウハウが失われてしまう可能性がある。

#### 4-4 隔操作式建設機械の老朽化と減少

令和2年8月時点で、全国の遠隔操作式建設機械の現存台数は93台(先端建設技術センター調べ、国交省保有の災害対策用機械は除く)で、その中でも重ダンプや振動ローラーの現存機は老朽化しており、無人化施工適用事例の減少と相まってこれらの機械が今後減少してゆくと考えられ、無人化施工が可能な件数、および工種に影響する懸念がある。

#### 4-5 施工管理者の高齢化と減少

前述のように無人化施工に習熟したオペレータの高齢化と減少の問題は、その工事を良く知る施工監理者にも当てはまる。無人化施工適用事例が減少するなかで、施工監理者の技術・ノウハウの継承も難しくなり、無人化施工工場の技術レベルが保持できなくなる可能性がある。

以上のように、無人化施工工場の減少に伴い人と機械両方の資源が減少し、無人化施工技術そのものが風化してしまい、またそれが工場の減少に拍車をかける可能性が懸念される。

### 5. 無人化施工の今後の方向性

これまで全国で実施してきた無人化施工の工事は近年減少傾向にある。

無人化施工技術は災害に関連した技術であるため、工事が減るということは喜ばしいことだが、前述したような課題が懸念されている。

そこで国土交通省では第1章でも述べたように、令和3年度に建設機械の自動・自律・遠隔施工技術の開発及び普及の加速化を目的とするため、産学官からなる「建設機械施工の自動化・自律化協議会」(以下、「協議会」という)を設置し、多様な関係者の参画のもと、議論を開始しました。

この協議会では「安全・基本設定WG」、「施工管理・検査基準WG」、「現場普及WG」の3つのWGに分け技術基準の整備(安全ルール策定、施工管理、積算)の検討を進めている。まずは、令和5年10月頃から建設DXテストフィールドにて公募企業による現場検証を行い、技術間の共通項を探り2023年度内に標準的な安全ルールのバージョン1をまとめ、2024年度以降も現場検証を重ねブラッシュアップしていくことで安全ルールの標準化を目指す方針である。(図-10)

また、無人化施工を継続的に普及させる

には「人材の確保、育成」や、「無人化施工機械の普及」も重要な課題である。

そこで人材育成の分野では、九州地方整備局や近畿地方整備局においては整備局内各事務所の維



図-10 公募企業による現場検証記事  
(建設通信新聞 2023年6月29日号より抜粋)



写真-4 無人化施工講習会  
(九州地方整備局企画部報道資料より抜粋)

持・災害協定企業等を対象に、2015年度から無人化施工訓練を定期的に行い、無人化施工に対応可能なオペレーターを育成することで地域防災力向上を図っている。(写真-4)

また関東地方整備局においても2018年度から災害協定会社・施工会社を対象に無人化施工講習会を定期的に行い、最近では5G通信による遠隔操作、特定小電力無線による遠隔操作実習を行い、オペレーターの育成に力を入れている。

ただ、前述のような講習会は定期的に行われているが無人化施工の訓練を常時受けるための専用施設は国内には無いのが実情である。しかしながら、民間企業において建機メーカーを中心に重機の遠隔操作を実際に体験できるデモ施設が開設されるなど、徐々にではあるがフィールド環境の整備が進みつつある。

このような訓練や、高い技術開発の検証が継続できるフィールド環境の整備が無人化施工を継続的に活用するためには必要不可欠である。

「無人化施工機械の普及」においては、第3章に述べたようにゼネコンや建機メーカーが連携し施工機械の自動化に取り組んでおり、ラジコン型対応バックホウのようにレンタル可能な無人化施工機械も普及し始めている。ただ、「災害対応や維持工事など継続的な工事でない民間としては、無人化施工の重機を維持できない。」といった施工会社からの意見にもあるように、山地災害の多い場所での定期的な試験工事や維持工事での継続的な発注が望まれる。

## 6. おわりに

建設機械の自動化・自律化・遠隔化技術の普及は、これからの日本の社会インフラを整備・維持し、災害対応能力を保持していくためには必要な技術である。当該技術の普及は建設現場の省人化による生産性の向上をもたらすだけでなく、遠隔地のオフィスからでも建設機械を操作することを可能にし、労働力人口が減少する中で老若男女問わず多様な人材が建設業で働きやすくなるといった効果も期待できる。

建設機械の自動化・自律化・遠隔化技術は、有事の際は無人化施工や遠隔化施工、平時の際は自動化施工といったような使い分けが両立できれば、前述した課題が解決されるのかもしれない。

今後は、産学官が連携した「協議会」において技術基準の整備（安全ルール策定、施工管理、積算）を進め、無人化施工を継続的に普及させるための仕組みづくりを加速させ、当該技術の維持と災害対応能力向上に資することを期待したい。

### 【参考文献】

- ・「建設機械施工における 自動化・自律化・遠隔化の促進」建設マネジメント技術 2022年7月号
- ・資料5 「無人化施工の課題と今後の方向性について」国土交通省報道資料

## 第2編 山岳トンネルの無人化施工

### 1. はじめに

山岳トンネル工事における切羽では地山が露出しており、落石等のリスクがある危険な場所での作業が多いため、重篤度の高い労働災害がたびたび発生している。厚生労働省は、山岳トンネル工事の切羽における労働災害の防止を図るため平成28年にガイドラインを公表しており、事業者が講ずることが望ましい事項として、労働者の切羽への立入りを原則として禁止し、切羽作業は可能な限り機械化するよう定めている。

さらに、平成30年にはガイドラインが改正され、より実効性を高めるために、既に一般化している浮石落しの機械化や機械掘削の採用だけでなく、装薬作業の遠隔化、支保工建込み作業等の各作業において完全な機械化等を積極的に進めることを追記しており、山岳トンネル工事における切羽作業の機械化に関するニーズがますます高まっている。

図-1に山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止に係るガイドラインの記載を示す。

#### 改正の背景

- ガイドライン策定時に考慮されていなかった肌落ち災害**が発生し、これらの災害に対してはガイドラインが十分な効果を上げることができないおそれがあったこと。  
<発生した災害の概要>
  - ・地山等級の査定は適切にされ、それに基づき支保パターンが選定されていたが、地山に局所的に脆弱な箇所があり、その部分で肌落ちが発生した際に労働者が接近しており、被災したもの。
  - ・地山の層が鏡にはほぼ平行であり、鏡全体が倒れるように崩壊したもの。
  - ・遮水層を貫通し、大量の水がトンネル内に流入したもの。
- 切羽監視責任者に専任性を求めているものの全断面積の小さなトンネルまで専任の切羽監視責任者を置くことはかえって車両系建設機械との接触災害を誘発するおそれがあり、**専任性と全断面積の関係について整理が必要**であったこと。

#### 改正の概要

- 切羽への立入禁止措置**
  - ・原則として切羽への立入を禁止、真に必要な場合のみ立ち入らせるようにする。(変更なし)
  - ・現在切羽へ立ち入ることにより作業されていることが多い**装薬作業の遠隔化、支保工建て込み作業等の完全な機械化等を積極的に進めることを記載。**(第5の1関係)
- 肌落ち防止計画の実施・変更**
  - ・肌落ち防止計画の適否の確認において、**切羽に脆弱部が存在するおそれがあることに留意するよう記載。**(第5の3のウ関係)  
(地山に局所的に脆弱な箇所があり、その部分で発生した肌落ちにより災害が発生したことを踏まえたもの)
- 切羽監視責任者の専任性等**
  - ・切羽監視責任者は**専任であることを明確化**。ただし、小断面(概ね50m<sup>2</sup>未満、2車線道路では、通常50m<sup>2</sup>を超える。)では作業主任者が兼任できることを明示。(第5の4の(1)関係)
- ベンチカットの記載**
  - ・○**断面積60m<sup>2</sup>以上ではベンチカット**をすること、地山の状態が悪い場合に**核残し**を行うことが望ましいことを明記。(第5の5関係)  
(大断面の山岳トンネルでの肌落ち災害が発生したことを踏まえたもの)
- 遮水層・帯水層対策**
  - ・遮水層、帯水層がある場合の**水抜きボーリング、薬液注入工法**の実施の検討を記載。(第6の1の(9)関係)  
(遮水層を貫通したことによりトンネルが崩壊した事故が発生したこと踏まえたもの)
- 切羽に平行な層**
  - ・地山の層が切羽に平行になっている場合の**鏡ボルトの有効性**を明記。(第2の(2)関係)  
(地山の層が切羽に平行になっている箇所切羽の大部分が倒れるようにして肌落ちとなった災害が発生したことを踏まえたもの)

図-1 山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止に係るガイドラインの記載

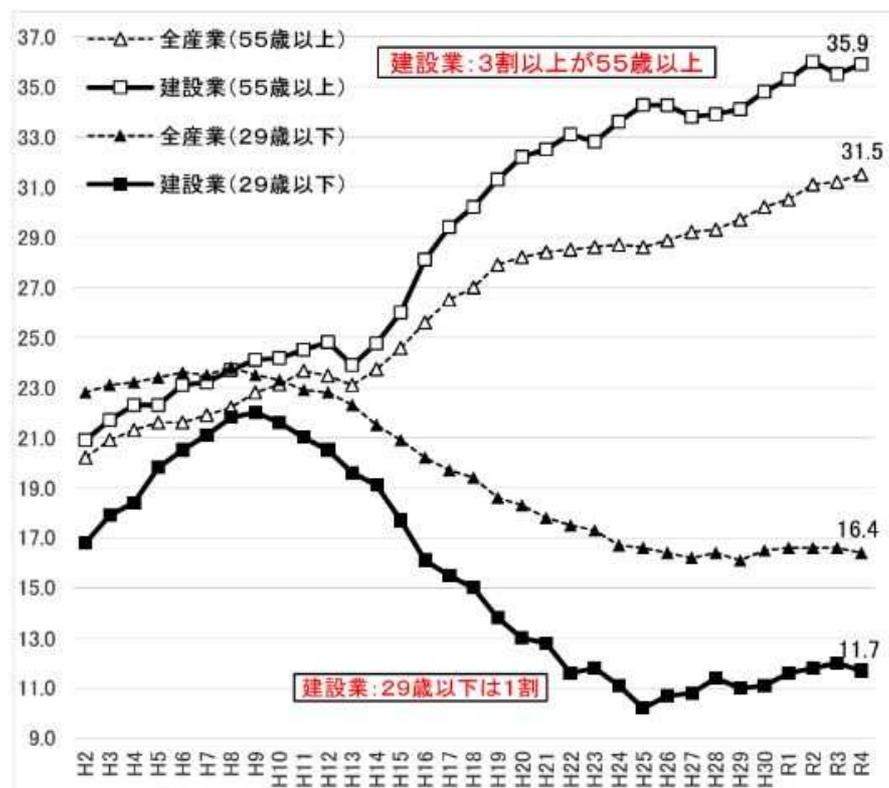
山岳トンネル工事では、切羽における肌落ち災害のみでなく、掘削中に発生する多量の粉じんによる坑内の作業環境の悪化も問題となっている。発破や重機による掘削作業、ずり処理、コンクリート吹付け作業等により発生する高密度な粉じんは、作業能率の低下はもとより、じん肺の原因となるなど労働者の健康面から大きな問題となっている。

また、近年の日本は慢性的に人手不足に陥っており、建設業界においても、技能労働者の減少は深刻である。関東地方整備局が令和5年に作成した「建設業の働き方改革の現状と課題」によると、建設業就業者数は令和4年時点で55歳以上が35.9%、29歳以下は11.7%であり、前年に比べて55歳以上が1万人増加し29歳以下は2万人減少している（図-2参照）。

このように建設業界では、高齢化が進行するとともに、若手技能労働者不足による次世代への技術継承といった課題に直面しており、生産性向上への取組などの対策が必要である。

このような背景のもと、山岳トンネル工事における安全性確保や生産性向上を図るためには、省人化や無人化を見据えた機械化・自動化技術の開発は欠かせないと考えられる。

そこで、山岳トンネル工事の現状の機械化・自動化技術についての調査を行い、現場適用にあたっての課題や今後の展望について取りまとめた。



出典：総務省「労働力調査」(暦年平均)を基に国土交通省で算出

(※平成23年データは、東日本大震災の影響により推計値)

図-2 建設業就業者の高齢化の進行

## 2. 山岳トンネルの施工方法

2章では山岳トンネルの施工方法について述べる。

### 2-1 トンネル掘削

#### (1) 掘削

##### a) 発破掘削

ドリルジャンボなどの削岩機により、穿孔を行い、孔に爆薬を装填して爆破することにより掘削する掘削方式をいう。発破掘削では、心抜きの方法、孔数、薬量、薬種および点火順序を地質条件、環境条件などに応じて、適切に決定することが重要である。

発破掘削は、おもに硬岩から中硬岩の地山に適用され、機械掘削はおもに中硬岩から軟岩および未固結地山に適用される。発破掘削を採用する場合は、近隣に重要構造物や住宅等が存在する場合の発破掘削においては、制御発破、分割発破あるいは割岩工法等を採用して、騒音・振動等の影響を極力抑える必要がある。

発破掘削はおもに、「①穿孔」「②装薬」の2つの作業に大別される。「①穿孔」は、ドリルジャンボなどの削岩機により爆薬を装填するための孔（あな）を削孔する作業である。従来の作業では、トンネル坑内で作業員がドリルジャンボに搭乗して、直接操作をして作業を行うことが一般的である。

「②装薬」は、削孔した孔（あな）に対して、爆薬を装填する作業である。従来の作業では、ドリルジャンボなどのバスケットに作業員が搭乗し、人力にて装填を行うのが一般的である。

##### b) 機械掘削

機械掘削は、その名の通り、掘削機械を使用して地山を掘削する掘削方式をいう。山岳工法では、全断面掘削機や自由断面掘削機を用いて掘削する。機械掘削では、火薬類の取扱いの問題がなく、発破掘削に比べて騒音・振動が少ないため、環境保全上問題となる区間の掘削に適した方式である。

機械掘削を採用する場合は、施工延長、断面の大きさ、形状、進入路、岩盤強度および湧水等の諸条件をもとに施工性、経済性について十分検討のうえ仕様を決定する必要がある。

#### (2) ずり処理

ずり処理とは、掘削したずり（土砂）を坑外へと搬出する一連の作業であり、掘削ずりの運搬方式は、「タイヤ方式」、「連続ベルトコンベヤー方式」、「レール方式」に分類される。

「タイヤ方式」では、ダンプトラックなどの運搬車両により、掘削ずりを運搬する方法である。タイヤショベルなどの積込み機により、直接ずりを車両に積込み、ずりを積替えることなく坑外へ運搬するため、仮設備が簡易となる。一方で、インバートの全幅を一括で施工する場合は、切羽への走路確保のために移動式の栈橋設備が必要となる場合がある。また、タイヤ方式では、排気ガスによる坑内環境の悪化が懸念されるため、排気ガスに対する換気設備を採用する必要がある。

「連続ベルトコンベヤー方式」は、延長の長いトンネルにおいて採用例が多くあり、坑内作業環境の改善、安全性の向上をおもな目的としている。切羽でベルトコンベヤーにずりを乗せるテールピース台車、延伸用ベルトの格納と展張のためのストレージカセット、ベルトコンベヤーを駆動させるためのメインドライブから構成され、切羽で発生したずりを連続的に輸送し、ずり置き場に搬出する。

「レール方式」は、坑道に軌道を設け、ずり鋼車、台車、アジテーター車等の車両を連結し、バッテリー機関車でけん引して運搬する方式である。トンネルの規模、地質等に制約されないため、タイヤ方式の採用が困難となる小断面トンネルにおいて採用されることが多いが、トンネルの勾配には制約を受ける。勾配が2%以上のトンネルでは、車両が逸走する危険性が高くなるため、十分な逸走

防止対策を行う必要がある。

### (3) 鋼製支保工建込み

鋼製支保工と呼ばれるトンネル断面形状に加工された H 鋼をトンネル断面内の所定の位置に設置する作業である。従来は、作業員がエレクター付き吹付け機に搭乗して直接操作を行うのが一般的である。鋼製支保工の建込みを建込み後に継手のボルト締め、つなぎ材の設置などはエレクター吹付け機のバスケットに作業員が搭乗して一連の作業を行う。

### (4) 吹付けコンクリート

吹付けコンクリートとは、圧縮空気や機械力により、吹付けられるコンクリートであり、支保部材のとして用いられる。吹付け方式には、セメントと骨材をドライミックスしてノズルまで圧送し、その先端で水と合流させる「乾式方式」と全材料をミキサでウェットミックスした後にノズルまで送って吐き出させる「湿式方式」に大別される。

吹付けコンクリートは、型枠を設置することなく地山の凹凸に密着でき、任意の吹付け厚に施工できる特徴を有している。掘削により開放された地山に対して早急に施工することで、地山と吹付けコンクリートの間にせん断抵抗を与え、緩みや風化を防止する効果がある。なお、湧水がある場合は、吹付けコンクリートの付着性が低下するため、急結剤の増量や湧水の切回しを行い対処する。

従来は、吹付け機のノズルを作業員がリモコン操作することにより、施工を行っている。吹付け作業は粉じん環境下で行われるため、労働環境の改善が望まれる作業である。

### (5) ロックボルト

ロックボルトは、トンネル壁面から地山内部に穿孔された孔に設置された鋼棒などの心材、心材を孔の周囲の地山と一体化するための定着材および頭部で心材と吹付けコンクリート等と一体化するためのプレートとナットから構成される複合部材をいう。

吹付けコンクリートや鋼製支保工とは異なり、地山の内部から支保機能が発揮される。ロックボルトは地山自身の持っている耐荷力を最大限に利用して地山を支持するところに特徴があり、吊下げ効果、はり形成効果等の作用効果があると考えられている。

従来は、ドリルジャンボに作業員が搭乗し、ロックボルトを挿入するための孔(あな)を削孔する。また、モルタル注入およびロックボルトの打設はドリルジャンボのバスケットに作業員が搭乗して、人力で行うのが一般的である。

## 2-2 インバート工

トンネルの側壁より下方の底盤に設置される逆アーチ状の構造物をいう。覆工と一体となってトンネル下部にアーチ形状を呈しトンネルとしての必要な機能を与え、長期安定性を保持する。インバートコンクリートは支保工と一体となって地山の安定性を確保する機能も期待される。

インバート掘削においては、バックホウなどの機械により、掘削を行い、ダンプトラックにより、トンネル坑外へと搬出する。コンクリート打設は、ポンプ車を用いて行うが、締固めや仕上げなどの打設作業は、一般的な明かり構造物と同様に人力にて行うのが一般的である。

### 2-3 防水工

覆工コンクリートへの漏水を防ぐため、不透水性の材料で処理する工事である。山岳トンネルの覆工に適用される防水工では、シート防水が一般的であり、シートの材料は、エチレン酢酸ビニル重合体（EVA）、エチレン共重合体ビチューメン（ECB）およびポリ塩化ビニル（PVC）の3種類が主体である。

防水シートはロール形状で現場に搬入され、台車上で人力にてシートの展張・溶着が行われる。台車は防水シートの設置延長が長くなるにつれ、トンネル延長方向に移動させていく必要があるが、台車移動のためのレールの盛替はバックホウなどの機械を使用しつつ人力にて行うのが一般的である。

### 2-4 覆工

覆工とは、トンネルの内空の確保や美観などの目的のためにトンネルの掘削断面を被覆する構造体またはその構造体を構成することをいう。山岳トンネルでは覆工材料として、現場打ちのコンクリートが用いられる。

覆工コンクリートは無筋とするのが一般的であるが、強い土圧や偏圧が懸念される場合には鉄筋コンクリートとすることもある。

覆工コンクリートにおける鉄筋組立は、防水シートと同様に台車を用いて行う。また、コンクリートの打設はセントルと呼ばれる専用の型枠を用いて行う。

### 3. 無人化施工を実現するために必要な技術

3章では山岳トンネルの無人化施工を実現するための必要な技術について述べる。

#### 3-1 トンネル掘削

##### (1) 掘削

###### a) 発破掘削

###### ①穿孔

発破掘削においては、装薬孔の配置や装薬量が重要であるが、これらは熟練作業員の経験や勘に依存する部分が多い。穿孔作業の無人化を実現するためには、発破パターン作成技術が必要となる。発破パターンの設計は、穿孔エネルギーや切羽評価点などの客観的なデータに基づくものが望ましいと考えられる。

穿孔作業においては、設計された発破パターンをもとに自動で穿孔する技術が必要である。穿孔作業の自動化にあたっては、ドリルジャンボの位置姿勢測定、ブーム位置の座標把握などの技術が必要である。

###### ②装薬

発破掘削の無人化を実現するためには、穿孔作業に加えて、装薬作業の自動化技術も必要不可欠である。装薬作業の自動化を実現するためには、装薬孔の位置を認識するための技術や装薬後や結線作業の自動化もしくは結線作業自体がない起爆システムが必要不可欠である。また、万が一の不爆に備えた対策なども必要である。

###### b) 機械掘削

山岳トンネルでは、掘削機械として全断面掘進機や自由断面掘進機を用いて掘削することから、機械掘削の無人化施工を実現するためには、これらの機械の自動化技術が必要不可欠である。全断面掘進機や自由断面掘進機の自動化にあたっては、機械の位置姿勢測定、ブーム位置の座標把握などの技術が必要である。

##### (2) ずり処理

掘削ずりの運搬方式は、「タイヤ方式」「連続ベルトコンベヤー方式」「レール方式」に分類される。「連続ベルトコンベヤー方式」については、坑外にベルトコンベヤーを用いて、ずりを搬出することから、「タイヤ方式」に比べて無人化までのハードルが低いと考えられるが、クラッシャーまでの掘削ずりの運搬を行うタイヤショベルの自動化が必要である。

一方で、「タイヤ方式」については、掘削ずりの運搬を行うダンプトラックの自動運転技術が必要不可欠である。自動化の実現にあたっては、坑内に設置する仮設備などとの接触を防止するための自己位置推定技術が必要である。

##### (3) 鋼製支保工建込み

鋼製支保工建込み作業の無人化するためには、エレクター吹付け機の自動化が必要である。エレクター吹付け機の自動化を実現するためには、エレクターのアーム角度や鋼製支保工の位置精度測定技術に加えて、鋼製支保建込みに伴うつなぎ材やボルト締めなどの作業を簡易にするための要素技術が必要となる。

#### (4) 吹付けコンクリート

吹付け作業を無人化するためには、吹付け機を自動化する必要がある。吹付け機の自動化にあたっては位置姿勢測定、ノズル位置、角度、鋼製支保工位置の座標把握などが課題となる。また、吹付け前の掘削形状から、最適なノズルワークを決定し、機械を制御する必要がある。

また、将来的な完全無人化を実現するためにはバッチャープラントの管理の自動化も必要となる。

#### (5) ロックボルト

ロックボルトの施工を無人化するためには、作業の機械化が必要となる。ロックボルトの打設位置を特定するためには打設機械の位置姿勢測定、ブーム位置などの座標把握が課題となる。また、削孔、ボルト挿入、定着材注入セットの各工程における機械位置とブーム位置、口元位置がずれないように機械位置を制御・保持する必要がある。さらに、自穿孔ボルト、膨張鋼管型ボルトといった特殊なロックボルトの施工への対応も課題となる。

### 3-2 インバート工

インバート工の作業工程は「①掘削」「②鉄筋・型枠」「③コンクリート打設」に大別される。インバート工の施工の無人化を実現するためには、それぞれの工程の無人化が必要不可欠である。

### 3-3 防水工

防水シートの設置作業を無人化するためには、シートの展張・溶着作業の自動化が必要不可欠である。また、シート設置に使用する台車移動およびレールの盛替えについても自動化する必要がある。

### 3-4 覆工

覆工コンクリートの作業工程は「①鉄筋組立」「セントルセット」「コンクリート打設」「脱型・養生」に大別される。覆工コンクリートの施工の無人化を実現するためには、それぞれの工程における自動化が必要不可欠である。

## 4. 山岳トンネルの無人化施工を実現するための要素技術

### 4-1 無人化施工を実現するための要素技術

工場における生産工程の自動化から車の自動運転まで、製造業を始め、様々な分野で自動化技術の活用が始まっている。本章では、トンネル工事における生産性向上に資する自動化技術に焦点を当て、要素技術を紹介する。ゼネコン各社の取り組みについて、各社の公開情報、プレスリリース情報などをもとに調査した。調査した要素技術は、作業員を対象とした「作業」に関するものとゼネコン現場職員の「施工管理」に関するものに大別された。これらを下記のように分類し、紹介する。

- (1)トンネル掘削
- (2)インバート工
- (3)防水工
- (4)覆工
- (5)施工管理

### 4-2 トンネル掘削

#### (1) 掘削

##### ①全自動ジャンボの活用によるせん孔作業の効率化

###### 【技術の概要】

これまでのコンピュータジャンボは、作業員がキャビン内の小型画面を見ながらブームを誘導しなければならず作業員の熟練度に依存し、1ブームあたり1名の作業員が必要だった。これに対して、フルオートせん孔機能を有したコンピュータジャンボを導入することでオペレーター1名によるせん孔作業を実現した。

###### 【技術の紹介】

- ・4ブームコンピュータジャンボ（鹿島建設）

[自動化・機械化技術 | 山岳トンネル技術 | 鹿島建設株式会社 \(kajima.co.jp\)](https://www.kajima.co.jp/technology/automation/mechanization/)



図-3 4ブームフルオートコンピュータジャンボ

- ・ドリルジャンボの遠隔操作技術（安藤ハザマ）
- ・発破の高度化技術と全自動ドリルジャンボの連携（安藤ハザマ）

[山岳トンネル工事の穿孔作業を完全自動化ー発破の高度化技術と全自動ドリルジャンボの連携による生産性向上の取り組みー | 新着情報 | 安藤ハザマ \(ad-hzm.co.jp\)](http://ad-hzm.co.jp)



写真1：全自動ドリルジャンボ



図1：発破の最適化サイクル



写真2：鋼製支保工を設置しない区間における内空断面の仕上がり

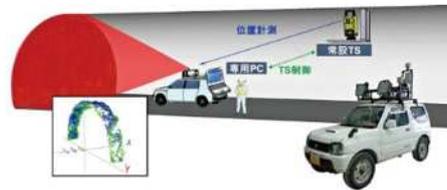


図2：切羽出来形取得システム

図-4 ドリルジャンボの遠隔操作技術

## ②最適自動発破設計システムの活用による余掘量・サイクルタイムの低減化

### 【技術の概要】

地盤から得られるデータを基に、目標の設計断面を最少の施工量で実現する最適自動発破設計システムを確立し、本システムで作成した発破計画に基づき自動穿孔、装薬することで従来の施工と比べて余掘量を低減し、穿孔数・装薬量の最適化により発破サイクルタイムの低減を実現した。

### 【技術の紹介】

- ・最適自動発破設計システム（鹿島建設）

[最適自動発破設計システムで余掘量 60% 発破サイクルタイム 20%低減 | プレスリリース | 鹿島建設株式会社 \(kajima.co.jp\)](http://kajima.co.jp)

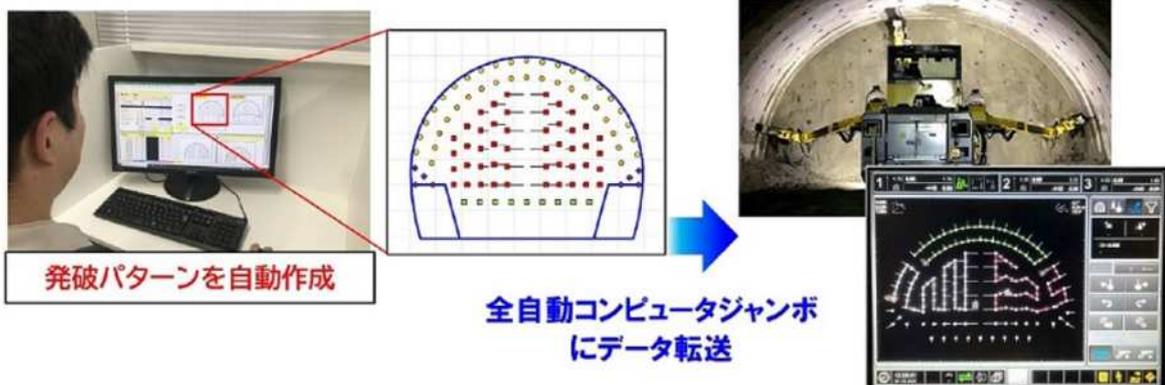


図-5 最適自動発破設計システム

- ・削孔誘導システム「MOLEs」(鹿島建設)

[モニター上でブームを合わせるだけ！新しい削孔誘導システムを開発 | プレスリリース | 鹿島建設株式会社 \(kajima.co.jp\)](#)

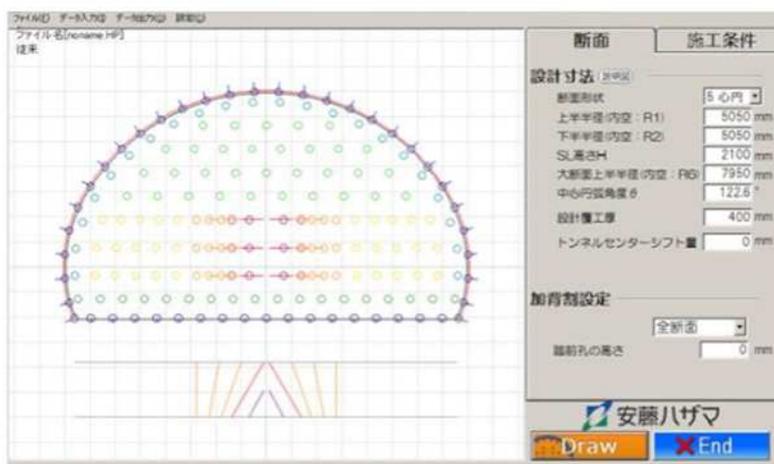


ドリルジャンボに後付け設置されたMOLEs

図-6 削孔誘導システム

- ・発破パターン作成プログラム (安藤ハザマ)

[発破の高度化技術 | 技術・ソリューション | 安藤ハザマ \(ad-hzm.co.jp\)](#)



出力された発破パターン

図-7 発破パターン作成プログラム

### ③自動装薬システムの活用による切羽の安全確保

#### 【技術の概要】

装薬作業中に切羽から落下した岩石が作業員に激突する。切羽肌落ちによる重篤災害が後を絶たない。また、厚生労働省が策定した「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン（2018年1月改定）」においては、機械化による事故防止対策が要望されている。このような現状を踏まえ、切羽に作業員が立入ることなく装薬可能な自動装薬システムが開発されている。

#### 【技術の紹介】

- ・自動装薬システム（前田建設工業）

[山岳トンネル自動化技術「自動装薬システム」を開発（特許出願中）～発破装薬における切羽立入作業ゼロの実現へ～ | 2022年 | ニュース | 前田建設工業株式会社 \(maeda.co.jp\)](#)

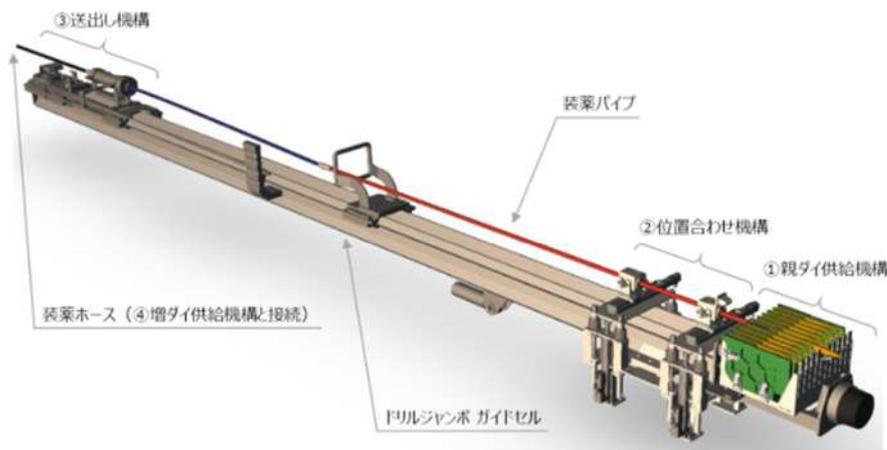


図1 自動装薬システム

図-8 自動装薬システム

## (2) ずり処理

### ①吹付け作業の自動化による安全確保

#### 【技術の概要】

山岳トンネル工事での切羽周辺作業は、周辺岩盤の性状予測技術や崩落検知などの計測技術による危険度評価がなされているものの根本的な安全確保には至っておらず、依然として岩盤の崩落等の危険度が高い作業である。切羽周辺の作業は熟練を要し、自動化は困難とされてきたが、究極の安全性向上策として切羽周辺域の無人化を目指し、関連する作業の自動化に取り組み、山岳トンネル工事における自動ホイールローダによるずり出し作業および自動吹付機による吹付け作業の自動化を実現した。

#### 【技術の紹介】

- ・無人ホイールローダによるずり出しの自動化（鹿島建設）

[山岳トンネル工事を対象とした自動化施工システム「A4CSEL for Tunnel」の開発 | プレスリリース](#)  
[| 鹿島建設株式会社 \(kajima.co.jp\)](#)

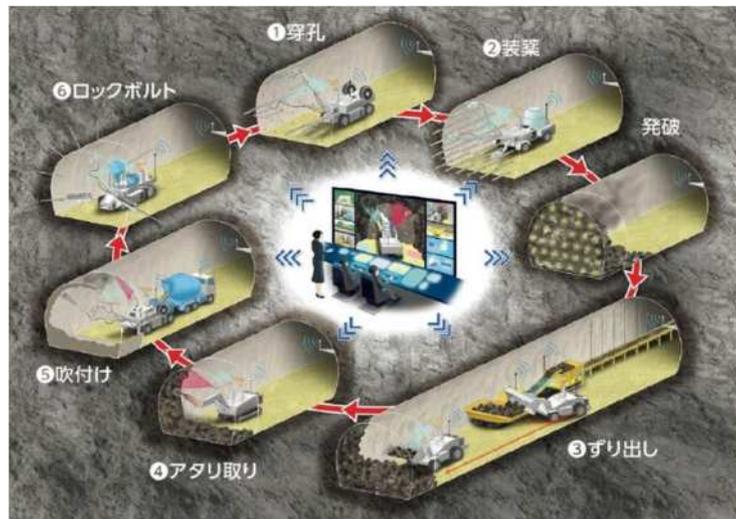


図-9 A4CSEL for Tunnel

### (3) 鋼製支保工建込み

#### ①ロボットの活用による鋼製支保工建込み作業の効率化

##### 【技術の概要】

オペレータの技量に依存せず、ボタン1つで鋼製支保工建込みが可能な「全自動鋼製支保工建込みロボット」を開発した。

##### 【技術の紹介】

- ・全自動鋼製支保工建込みロボット（前田建設工業）

[山岳トンネル「全自動鋼製支保工建込みロボット」を開発！\(特許出願中\)<br>～ワンボタンで鋼製支保工建込みが可能に～ | 2022年 | ニュース | 前田建設工業株式会社 \(maeda.co.jp\)](#)



図-10 模擬トンネルにおける全自動鋼製支保工建込みロボット

#### (4) 吹付けコンクリート

##### ①吹付け作業に自動システム・遠隔操作システムを活用することによる省力化

###### 【技術の概要】

吹付け作業では、確実な吹付け厚さの確保や仕上がりの平滑性が求められ、その技量により作業時間や品質に大きな差が生じる。実際のトンネルの複雑な凹凸を有する岩盤面に対して自動吹付けシステムを適用することで、支保工間の吹付け仕上がり面に対し、高精度で平滑にコンクリートを自動で吹付けることを実現した。

###### 【技術の紹介】

- ・吹付けコンクリートの自動化（鹿島建設）

[吹付けコンクリートの自動化を初めて実トンネルで実現 | プレスリリース | 鹿島建設株式会社 \(kajima.co.jp\)](http://kajima.co.jp)



実トンネルでの自動吹付け機による施工



支保工間の自動吹付け状況

図-11 吹付けコンクリートの自動化

- ・吹付け作業の遠隔操作技術「T-iROBO」

[コンクリート吹付け作業の遠隔操作技術「T-iROBO® Remote Shotcreting」を開発 | 大成建設株式会社 \(taisei.co.jp\)](http://taisei.co.jp)



吹付機操作者、切羽監視員、吹付ホース介添者(カメラ移動補助)は切羽直近からは離れた位置で作業

図-12 吹付け作業の遠隔操作技術

- ・コンクリート吹付け機の遠隔操作システム（戸田建設）

[山岳トンネルにおける遠隔施工技術『コンクリート吹付け機の遠隔操作システムを開発』](#) | 新着情報 | 戸田建設 ([toda.co.jp](http://toda.co.jp))

【全体構成図】

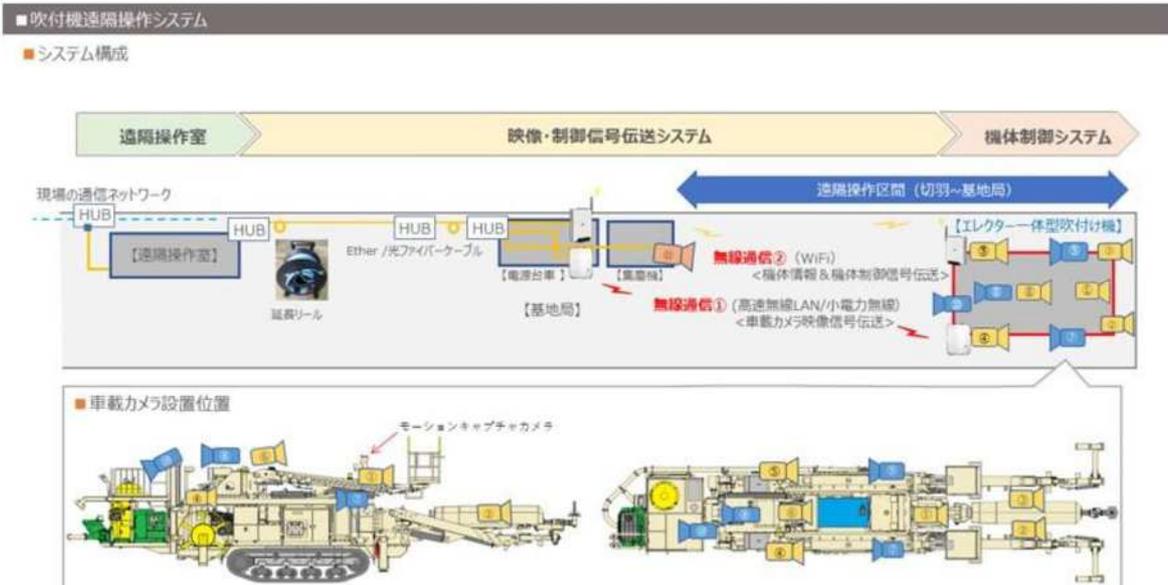


図-13 吹付け作業の遠隔操作技術

- ・最適なノズル位置に自動で保つコンクリート吹付け機（大林組）

[施工に最適なノズル位置を自動で保つコンクリート吹付け機を開発](#) | ニュース | 大林組 ([obayashi.co.jp](http://obayashi.co.jp))

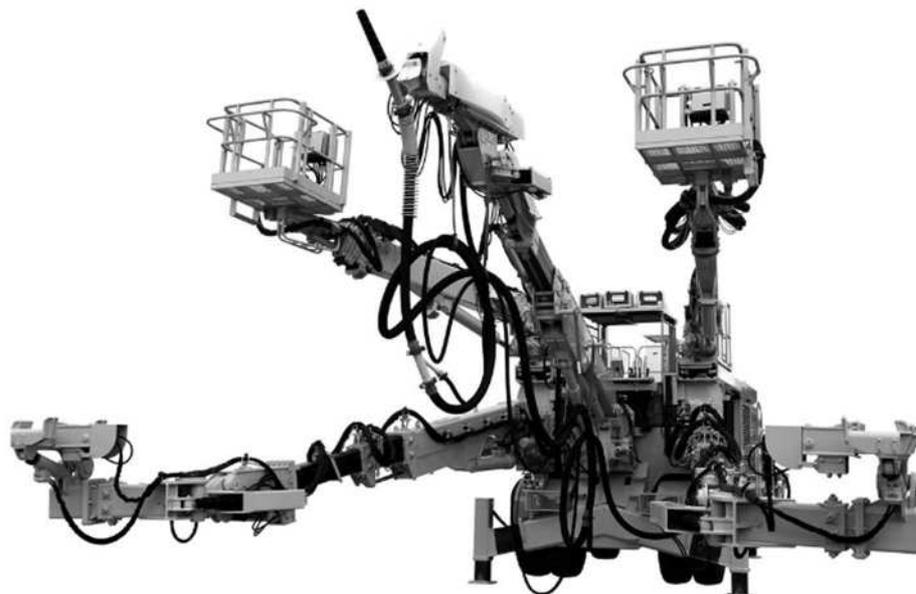


図-14 最適なノズル位置に自動で保つコンクリート吹付け機

・吹付けコンクリートの遠隔操作技術の開発（熊谷組）

[吹付けコンクリートの遠隔操作技術の開発 | ニュース一覧 | 熊谷組 \(kumagaigumi.co.jp\)](http://www.kumagaigumi.co.jp)

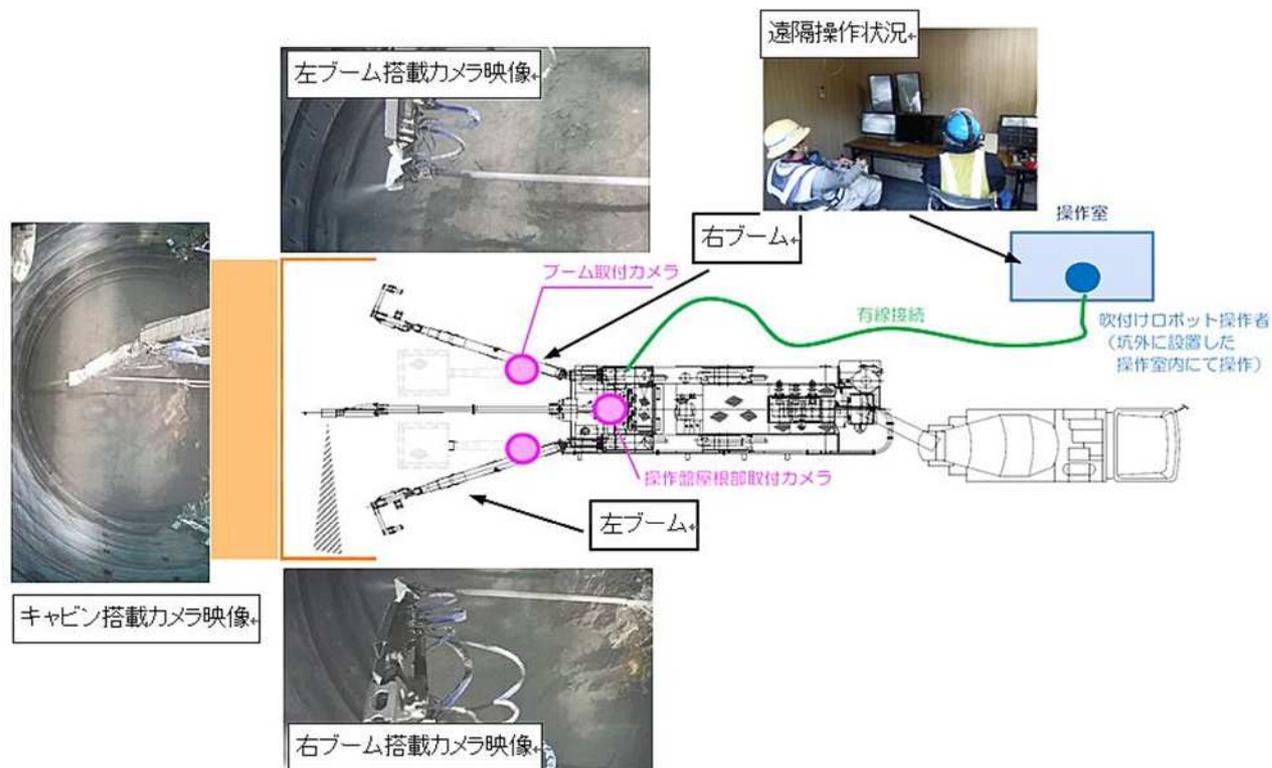


図-15 吹付けコンクリートの遠隔操作技術

## ②練上がり温度を自動制御する吹付けコンクリート製造設備を活用することによる省力化

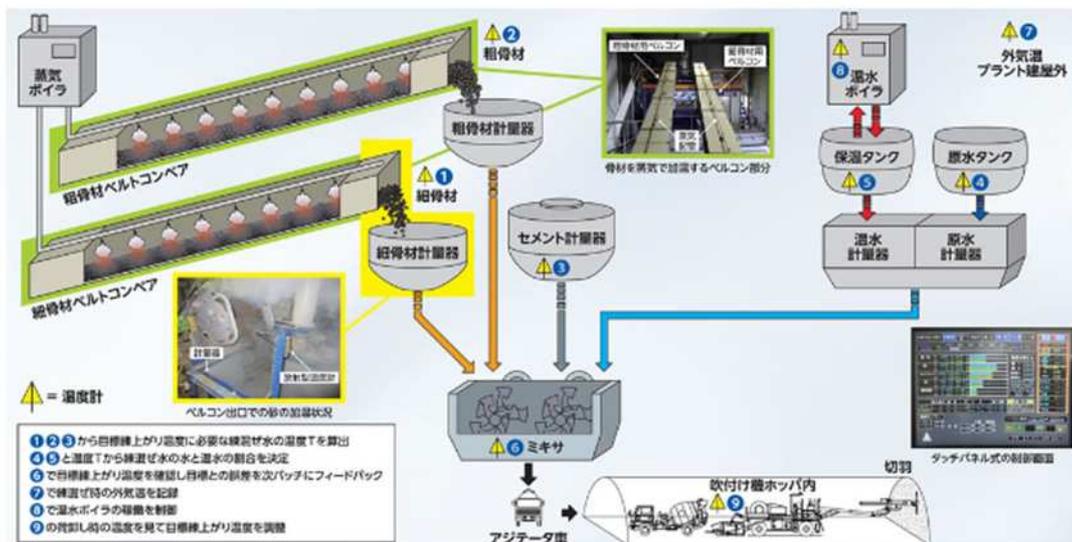
### 【技術の概要】

吹付けコンクリートは山岳トンネル工事における主要な支保部材であり、施工直後から高い強度発現が求められる。この強度発現はコンクリート温度に大きく影響される。スマートバッチャープラントは、温水と蒸気によるコンクリート材料の加温機能と連続温度計測機能により、コンクリートの練上がり温度を熱容量計算に基づいて自動制御することができる。これにより、一定温度のコンクリートを供給することで品質変動を抑制し、安定した品質での施工を実現した。

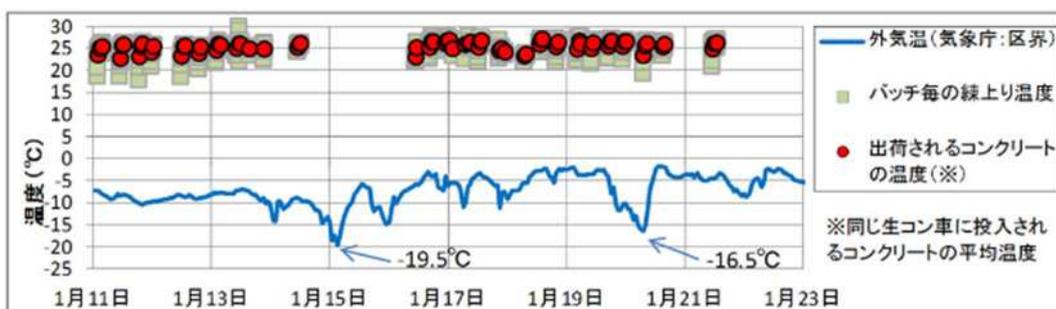
### 【技術の紹介】

- ・練り上がりを自動制御「スマートバッチャープラント®」（飛島建設）

[練上がり温度を自動制御する吹付けコンクリート製造設備「スマートバッチャープラント®」 | 地下空間・山岳トンネルの技術 | 土木 | 飛島の技術 | 飛島建設 \(tobishima.co.jp\)](http://tobishima.co.jp)



スマートバッチャープラントのシステムの概要



コンクリート練上がり温度と外気温の経時変化の例

図-16 スマートバッチャープラント

## (5) ロックボルト

### ①ロックボルト工の完全機械化による省力化

#### 【技術の概要】

山岳トンネル工事におけるロックボルト工の穿孔からモルタル注入、ロックボルト挿入までの一連作業を完全機械化することで、作業員の肉体的負担の大きいロックボルト挿入作業が減り、切羽近傍での作業を軽減できる。また、ガイダンスシステムを搭載しているため従来人力で行っていた座標測量が不要となり人員の削減、測量時間の短縮につながる。本技術により安全性、生産性、品質の向上が期待できる。

#### 【技術の紹介】

- ・ロックボルト打設専用機による完全機械化（鹿島建設）

[自動化・機械化技術](#) | [山岳トンネル技術](#) | [鹿島建設株式会社 \(kajima.co.jp\)](#)



図-17 ロックボルト打設専用機

・ロックボルト打設専用機「BOLTINGER」(大成建設)

[ロックボルト打設専用機「BOLTINGER」の機能を拡張 | 大成建設株式会社 \(taisei.co.jp\)](http://taisei.co.jp)



本技術による施工状況 (木与防災木与第三トンネル)



打設専用機全景 (前方)



モルタル供給装置搭載状況 (後方)

図-18 ロックボルト打設専用機

・完全ワンオペによるロックボルト打設 (戸田建設)

[完全ワンオペによるロックボルト自動化施工を実現 | 新着情報 | 戸田建設 \(toda.co.jp\)](http://toda.co.jp)



図-19 SF レジンボルト工法対応セミオートロックボルト自動打設機

・ロックボルト打設の完全機械化（清水建設）

[山岳トンネル工事のロックボルト打設を完全機械化 | 企業情報 | 清水建設 \(shimz.co.jp\)](http://shimz.co.jp)



図-20 2ブームロックボルト打設専用機

### 4-3 インバート工

#### ①インバート掘削形状のモニタリング技術

・インバートのあたり箇所を可視化して作業の安全性向上と効率化（西松建設）

##### 【技術の概要】

本システムは、高速3Dスキャナを三脚にてインバート掘削区間に設置し、インバートの掘削形状を計測する。掘削形状の点群データと設計断面を比較し、設計断面線よりも内空側に残ったあたり箇所を重機キャビン内のモニターにヒートマップ表示させることにより、重機のオペレータが容易にあたり箇所を確認することができる。重機のオペレータは運転席モニター画面のヒートマップ表示を基にあたり作業を行うため、従来のように重機の近くで作業員が腰線と定規を使って床付け高さを確認する必要がなくなる。

[インバートのあたり箇所を可視化して作業の安全性向上と効率化を図る（西松建設）](#)

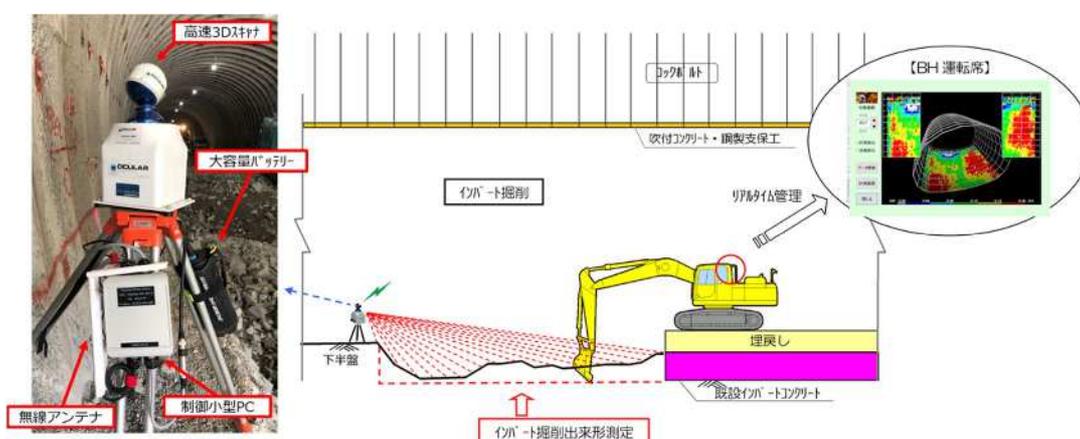


図-21 インバート掘削形状のモニタリング技術

#### ②インバート部の掘削具合の可視化

・3Dスキャナとプロジェクションマッピングにより、インバート部の掘削具合を可視化（清水建設）

##### 【技術の概要】

本システムは、3次元スキャナとプロジェクターを一体化した形状計測・照射装置と掘削領域に投影する画像データを生成するPC・解析ソフト、装置の位置情報を得るためのドーム型マーカー（発泡スチロール製、直径30cm）から構成される。マーカーは掘削領域近傍の測量機器で位置出し済みの箇所に、また、形状計測・照射装置とPCは掘削領域近傍にそれぞれ設置する。

[インバート掘削管理システム「SP-MAPS」 | 技術・ソリューション](#)

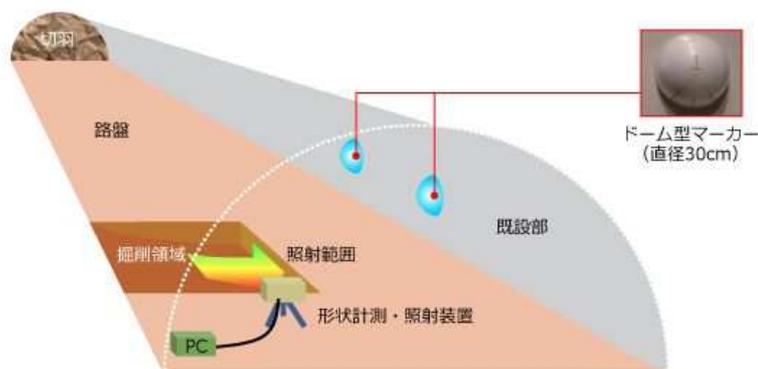


図-22 インバート部の掘削具合の可視化

## 4-4 防水工

### 【技術の概要】

山岳トンネル工事では、完成後の周辺地下水の円滑な排水、覆工面への漏水防止、覆工と地山の縁切りによるひび割れ抑制などを目的として、覆工打設前の吹付けコンクリート面に防水シートを張り付ける。従来の防水シート張り付け作業は、幅約2mの防水シートを1枚1枚人力で押し付けて釘打ち機で固定し、隣り合う防水シート同士を全周溶着するなど多大な労力を要していた。また、吹付けコンクリート面の凹凸に対して余裕のない状態で防水シートを固定すると空隙の発生や破損の恐れがあるため品質を確保するには適度な余裕を持たせる熟練技術が必要だった。防水シート自動展張システムを使用することで、適度な余裕で自動的に貼り付けることができるため、防水シート張り付け作業の生産性向上と省人化を実現し、施工品質も確保できる。

### 【技術の紹介】

- ・防水シートの自動展張システム（大林組）

[長尺スラックシート®システム | ソリューション/テクノロジー | 大林組 \(obayashi.co.jp\)](#)

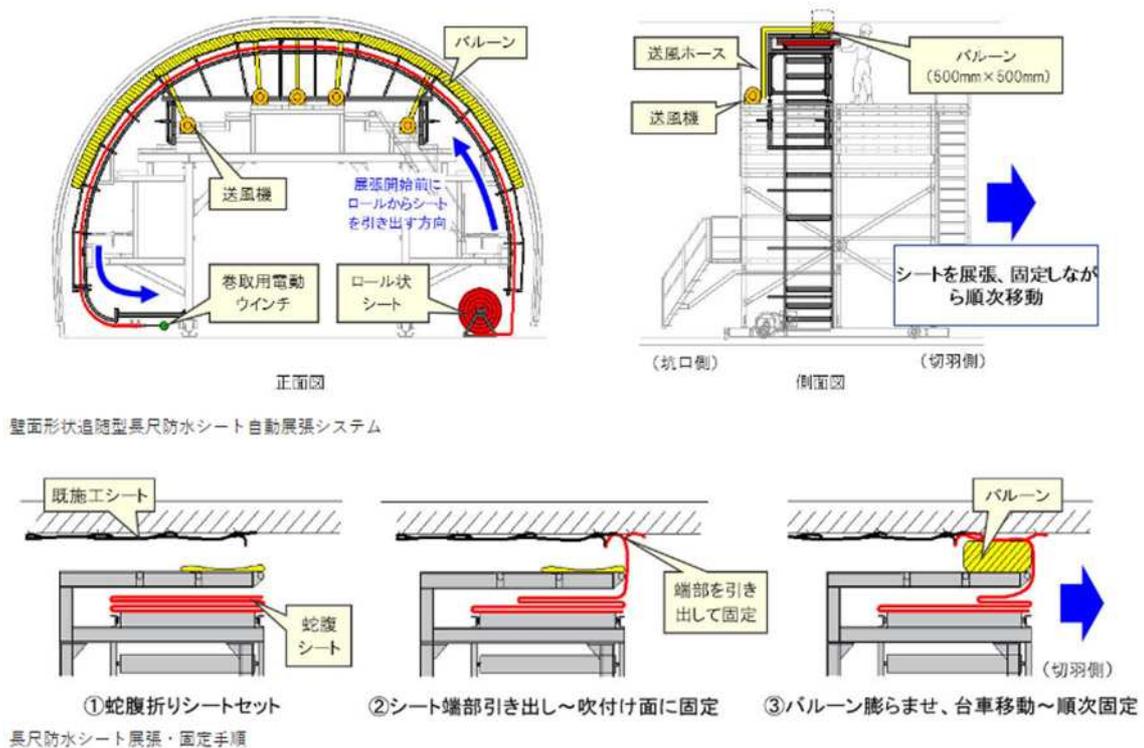


図-23 防水シートの自動展張システム

・防水シート自動溶着システム（御用建設・大栄工機）

[PowerPoint プレゼンテーション \(daieikouki.co.jp\)](http://daieikouki.co.jp) ※プレスリリース無し

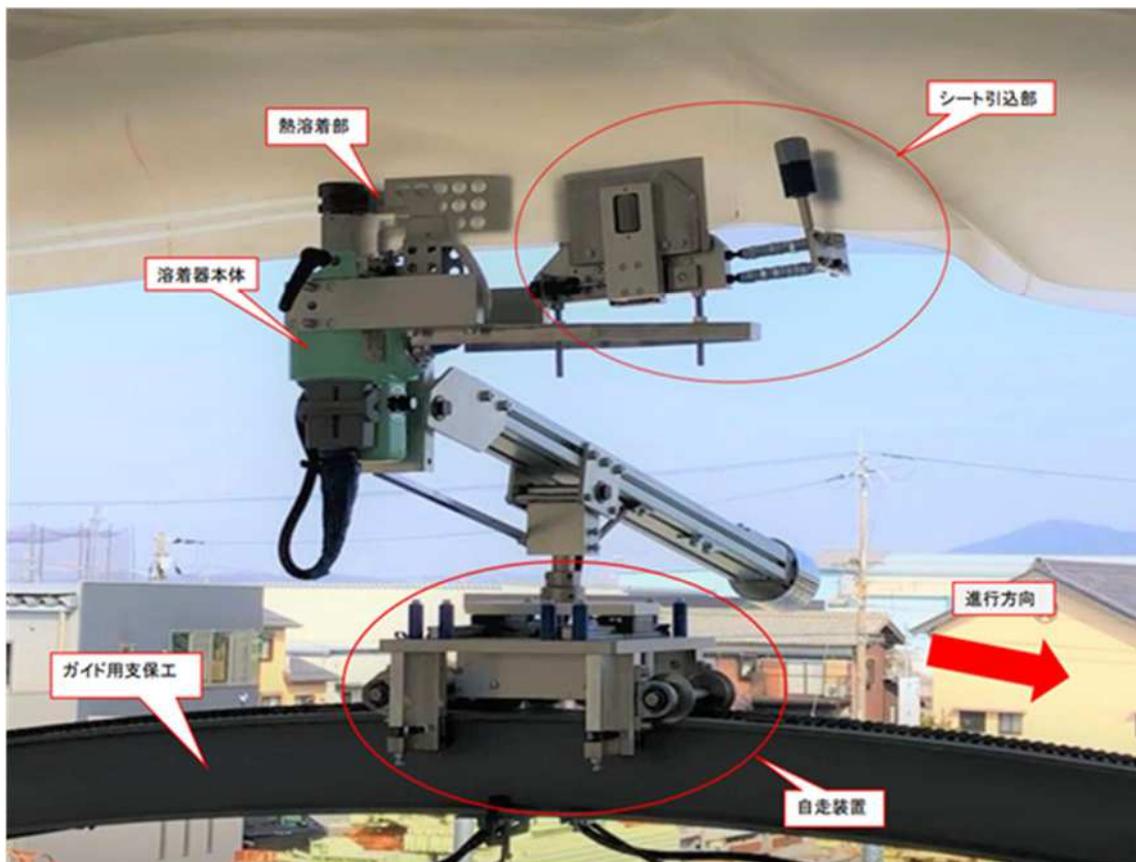


図-24 防水シート自動溶着システム

## ②防水シート自動溶着技術の活用による省力化

### 【技術の概要】

トンネル形状に加工された走行レールに沿って溶着機が移動できることから、隣り合う防水シートをトンネル内空形状に沿った適切な重なり具合で溶着することができる。溶着機の自動走行は、溶着機ローラー部の動力を利用するとともに、牽引用バルンサーにて溶着機を支持することによりスムーズな走行が可能となる。

### 【技術の紹介】

- ・防水シートの自動溶着技術（前田建設工業）

[山岳トンネルにおける防水シート自動溶着技術『FILM用防水シート自動溶着システム』を開発（特許出願中） | 2021年 | ニュース | 前田建設工業株式会社 \(maeda.co.jp\)](#)

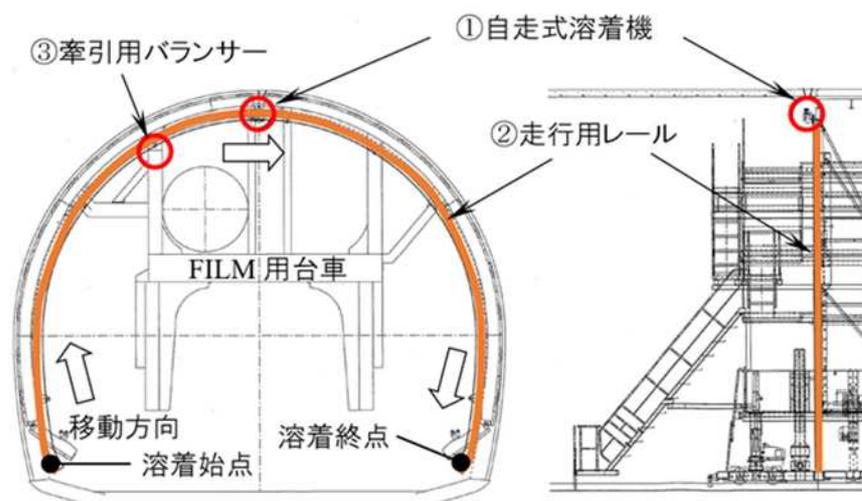


図-25 FILM用自動溶着システム技術概要図

## 4-5 覆工

### ①セントルの全自動セットシステムの活用による省力化

#### 【技術の概要】

山岳トンネルの覆工コンクリートは、トンネルの内側にセントルと呼ばれる移動式の鋼製型枠を据え付け、トンネルとの隙間にコンクリートを流し込み構築する。その際、セントルを約 10m のコンクリート打設ブロックごとに移動させ、トンネルの完成形の位置に正しくセットするためにセントルの中心位置や高さを繰り返し測量し、位置と姿勢をミリ単位で据え付けるため、一回のその作業におおよそ 6 人で約 90 分を必要としていた。セントルの全自動セットシステムは、セントルに自己位置と傾斜を把握する測量・センシング機器と機器からの情報を元に移動を指示する駆動指令部を搭載しているため、一回のボタン操作でセントルを正しい位置に自動で移動、据え付けることができる。これにより、その作業を自動化し省力化・省人化することができ、工事全体の生産性が大きく向上する。

#### 【技術の紹介】

- ・全自動でセントルをセット（大林組）

[セントル全自動セットシステム | ソリューション/テクノロジー | 大林組 \(obayashi.co.jp\)](http://obayashi.co.jp)

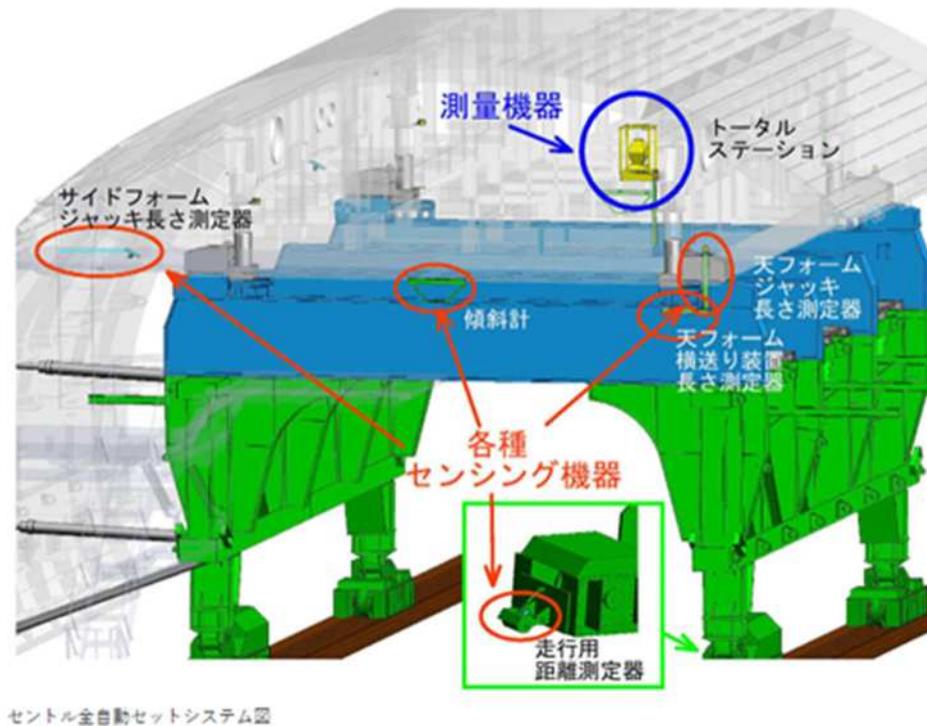


図-26 セントル全自動セットシステム

## ②覆工コンクリートの自動打設システムの活用による省力化

### 【技術の概要】

山岳トンネル工事の覆工コンクリート施工では、技能労働者が狭隘な作業空間の中でコンクリートの打込みや締固め等の作業に従事しており、作業負担を軽減するための対策が求められている。また、品質面でも締固め状況の判断等を熟練技能労働者の経験と勘に依存する状況にあり、品質確保も重要な課題となっている。自動打設システムにより、作業員を苦渋作業から解放するとともに、施工品質の均質化を図ることができる。このシステムは、型枠バイブレータとコンクリートセンサーを各所に配置したセントルとセントル端部からコンクリートを充填する自動打込み装置で構成されている。本システムの導入によりセンサーが検知した定量データを基に、コンクリートの打込みから締固め、打ち止めに至る一連の打設作業の進捗を自動制御することができる。

### 【技術の紹介】

- ・コンクリート打設を自動化（清水建設・岐阜工業）

[覆工コンクリートの自動打設システムを開発 | 企業情報 | 清水建設 \(shimz.co.jp\)](http://shimz.co.jp)

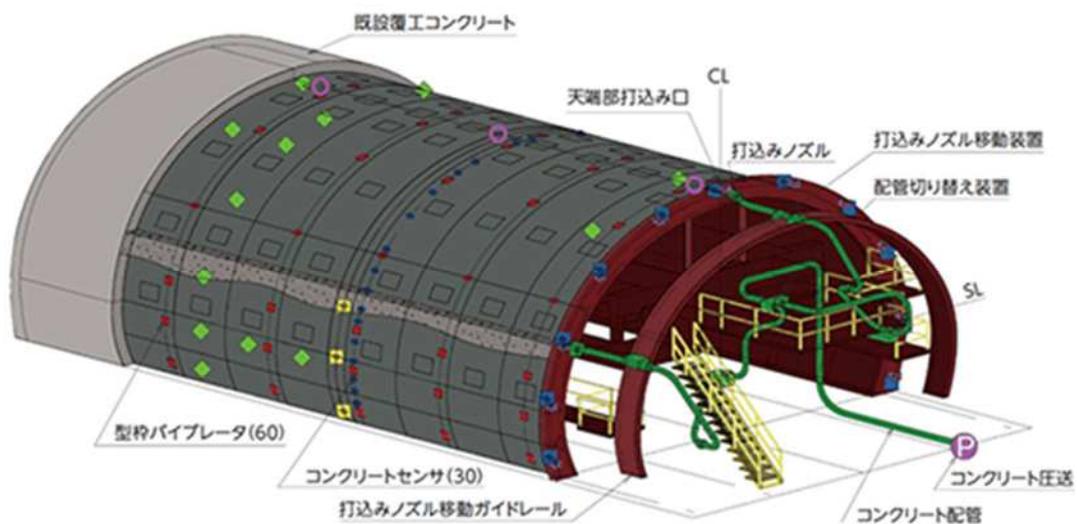


図-27 覆工コンクリートの自動打設システム

### ③ライニングを連続的に施工できる技術の活用による省力化

#### 【技術の概要】

山岳トンネル工事に用いる吹付けコンクリートの仕上りを平滑にし、粉じんやはね返り量を最小化する施工技術である。本技術によって吹付機のエレクターブームに搭載して動きを制御するクローラ型専用型枠と急硬性コンクリートを用いて、平滑なライニング（一次覆工）を連続的に施工することができる。

#### 【技術の紹介】

- ・トンネル連続ライニング工法「PL-CASTTM」（西松建設）

[独自型枠システムと急硬性コンクリートを用いたトンネル連続ライニング工法「PL-CASTTM」を開発](https://www.nishimatsu.co.jp) —コンクリート面の平滑化，粉じん・はね返り量を最小化— | 西松建設株式会社 ([nishimatsu.co.jp](https://www.nishimatsu.co.jp))



図-28 吹付機を用いた実機試験状況

## 4-6 施工管理

### ①トンネル坑内自動巡視ドローンシステムの活用による省力化

#### 【技術の概要】

本技術は、飛行制御にLiDARを使用するドローンを採用しており、非GNSS環境かつ暗所のトンネル坑内においても安全で安定した自律飛行が可能である。またドローンに搭載した360度カメラで取得した画像情報を使い、VR空間が生成できる現場モニタリングシステムと連携させることで建設現場の各施工段階を網羅的に記録し、BIM/CIMと併せて施工管理情報を一元化できる。これにより、関係者間での迅速な情報共有・分析が可能となり、巡視点検業務の効率化・高度化につながる。

#### 【技術の紹介】

- ・自律飛行型ドローンで坑内の映像を生成（フジタ）

[トンネル坑内自動巡視ドローンシステム | ソリューション・技術 | 株式会社フジタ \(fujita.co.jp\)](#)

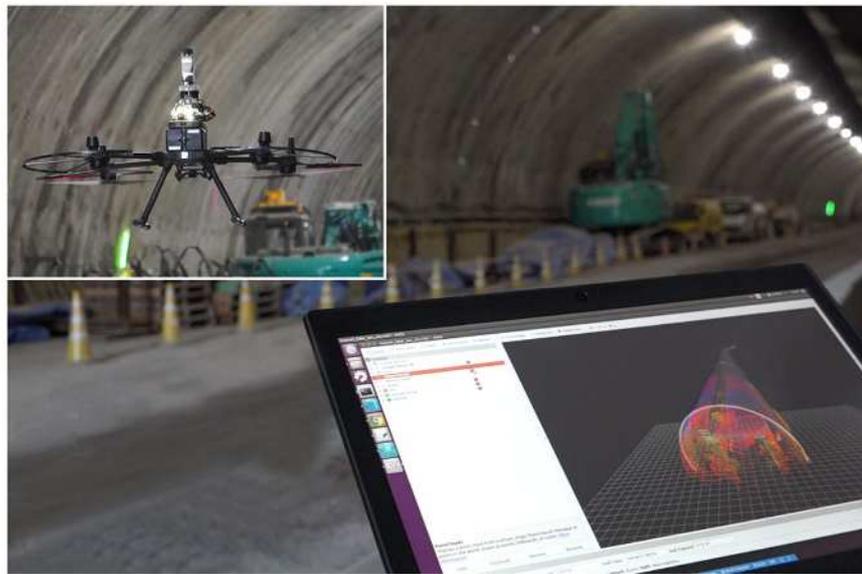


図-29 自律飛行型ドローン

## ②AI 切羽画像評価システムの活用による省力化

### 【技術の概要】

トンネル切羽の地質を AI・センシング等の手法を用いて評価する技術の開発を進め、携帯端末を用いた山岳トンネルの切羽評価を AI が切羽画像から評価する「AI 切羽画像評価システム」を開発した。従来技術と同等以上の精度で切羽の地質を評価することができる。また、特殊なカメラや計測機器を搭載した計測車両が必要など、従来の評価技術で抱えていた課題を本システムで解決することで、さらなる業務の効率化を実現した。【技術の紹介】

- ・切羽評価全 11 項目を自動評価「AI 切羽画像評価システム」（安藤ハザマ）

[山岳トンネルの切羽評価全 11 項目を自動評価「AI 切羽画像評価システム」を開発 | 新着情報 | 安藤ハザマ \(ad-hzm.co.jp\)](#)

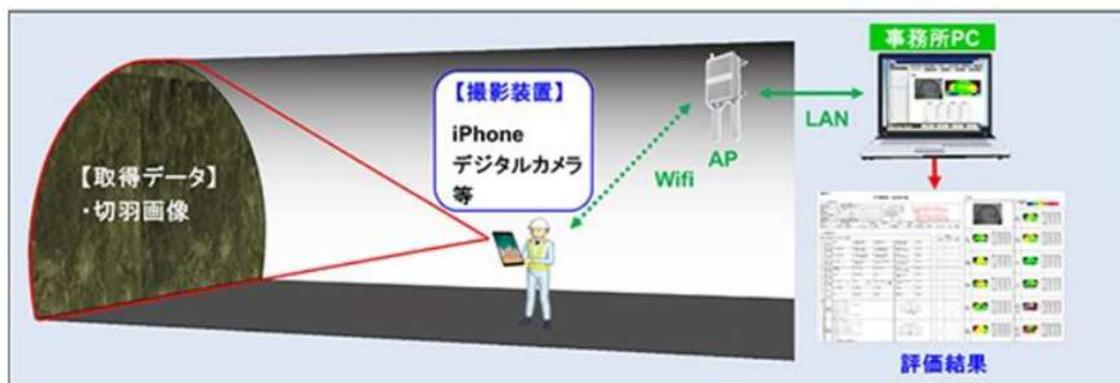


図-30 AI 切羽画像評価システムの構成

### ③サイクルタイム取得と電力管理による省力化

#### 【技術の概要】

山岳トンネル工事では、一般に掘削から吹付け・ロックボルトまでの一連の作業を繰り返すことで施工を進める。この作業サイクルにおける無理・無駄を排除することで、生産性を向上できる。そのため、昼夜の作業状況を作業日報などから分析し、作業の最適化が図られてきたが、手間を要するため、より精度良く効率的な情報収集技術が求められていた。近年ではトンネル切羽に設置したカメラ映像から作業状況を解析するなどの新技術導入も進んでいる。しかしながら、これらの情報については教師データ作成の手間や精度の面で課題が残されていた。本技術は、「トンネル掘削の実績サイクルチャート自動生成」「作業工種に応じた最適な換気制御」「デマンド監視と使用電力量制御」等の機能を備える。電気信号を得ることができる機械設備であれば、本技術と接続できるため、エンジン駆動の重機なども対象とすることができ、掘削方法やズリ運搬方法の制約を受けない点が特徴である。

#### 【技術の紹介】

- ・山岳トンネル施工管理システム「Hi-Res」(安藤ハザマ)

[山岳トンネル施工管理システム「Hi-Res」の展開 | 新着情報 | 安藤ハザマ \(ad-hzm.co.jp\)](http://ad-hzm.co.jp)

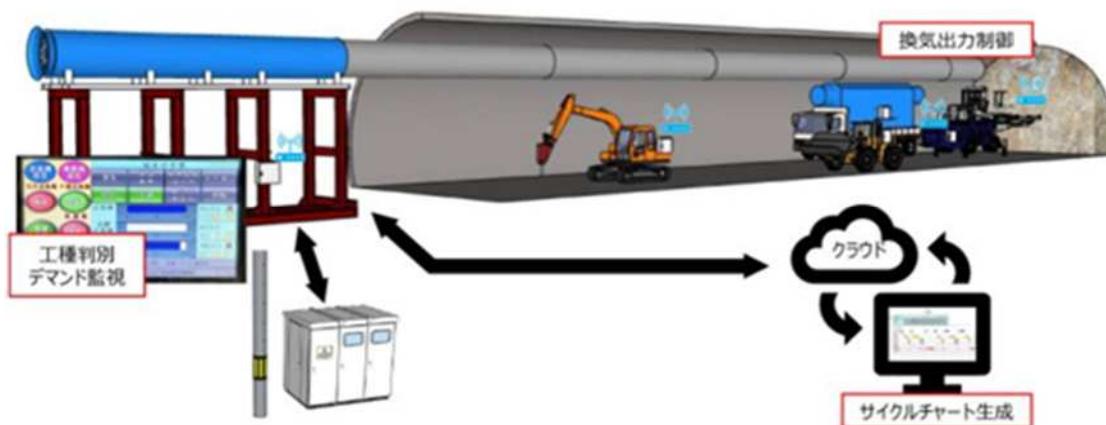


図-31 Hi-Res システム

## 5. 現場適用にあたっての課題

現在、ゼネコン各社を中心に様々な自動化技術が開発・リリースされているが、現場適用にあたっては課題が残っている。5章では、現場適用にあたっての課題をいくつかの観点に分けて整理する。

### 5-1 技術面における課題

先述のとおり、トンネルは施工ステップが細分化されており、それぞれのステップに対応する自動化技術がゼネコンを中心に開発されている。現時点对で対外発表されている技術と施工ステップの対応を整理したものを表-1に示す。表-1の内容を踏まえ、現場適用にあたっての課題を以下に示す。

表-1 施工ステップに対応する自動化技術

項目			技術の例
掘削	掘削	発破掘削	<ul style="list-style-type: none"> <li>最適自動発破設計システム（鹿島建設）</li> <li>発破パターン作成プログラム（安藤ハザマ）</li> <li>4ブームコンピュータジャンボ（鹿島建設）</li> <li>ドリルジャンボの遠隔操作技術（安藤ハザマ）</li> <li>発破の高度化技術と全自動ドリルジャンボの連携（安藤ハザマ）</li> <li>削孔誘導システム「MOLEs」（鹿島建設）</li> </ul>
		装薬	<ul style="list-style-type: none"> <li>自動装薬システム（前田建設工業）</li> </ul> ※結線作業に関する開発が進められていない
	機械掘削		
	ずり出し		<ul style="list-style-type: none"> <li>無人ホイールローダーによるずり出しの自動化（鹿島建設）</li> </ul>
	鋼製支保工建込み		<ul style="list-style-type: none"> <li>全自動鋼製支保工建込みロボット（前田建設工業）</li> </ul>
	吹付けコンクリート		<ul style="list-style-type: none"> <li>吹付けコンクリートの自動化（鹿島建設）</li> <li>コンクリート吹付け機の遠隔操作システム（戸田建設）</li> <li>最適なノズル位置に自動で保つコンクリート吹付け機（大林組）</li> <li>吹付けコンクリートの遠隔操作技術の開発（熊谷組）</li> <li>練り上がりを自動制御「スマートパッチャープラント®」（飛鳥建設）</li> <li>トンネル連続ライニング工法「PL-CASTTM」（西松建設）</li> </ul>
	ロックボルト		<ul style="list-style-type: none"> <li>ロックボルト打設専用機による完全機械化（鹿島建設）</li> <li>ロックボルト打設専用機「BOLTINGER」（大成建設）</li> <li>完全ワンオペによるロックボルト打設（戸田建設）</li> <li>ロックボルト打設の完全機械化（清水建設）</li> </ul>
インバート工	掘削		<ul style="list-style-type: none"> <li>インバート掘削形状のモニタリング技術（西松建設）</li> <li>インバート部の掘削具合の可視化（清水建設）</li> </ul>
	鉄筋・型枠組立		
	コンクリート打設		
防水工	防水シート設置		<ul style="list-style-type: none"> <li>防水シートの自動展張システム（大林組）</li> <li>防水シート自動溶着システム（五洋建設・大栄工機）</li> <li>防水シートの自動溶着技術（前田建設工業）</li> </ul>
	台車移動		
覆工	鉄筋組立		
	セントルセット・脱型		<ul style="list-style-type: none"> <li>全自動でセントルをセット（大林組）</li> </ul>
	コンクリート打設		<ul style="list-style-type: none"> <li>コンクリート打設を自動化（清水建設・岐阜工業）</li> </ul>
	養生		
その他	坑内巡視		<ul style="list-style-type: none"> <li>自律飛行型ドローンで坑内の映像を生成（フジタ）</li> </ul>
	切羽評価		<ul style="list-style-type: none"> <li>切羽評価全11項目を自動評価「AI切羽画像評価システム」（安藤ハザマ）</li> </ul>
	施工管理		<ul style="list-style-type: none"> <li>山岳トンネル施工管理システム「Hi-Res」（安藤ハザマ）</li> </ul>

：現時点で自動化技術が公開されていないステップ



#### 5-4 法令における課題

自動化施工技術の現場実装により、現場の無人化が進んだとしても一定の安全リスクは残ると考えられるが、その中で機械の誤作動やシステム不具合等の自動化機械に起因する事故の発生の可能性も否定できない。

しかしながら、自動化機械に起因する事故が発生した場合の責任の所在等について、現在では法整備が進んでいない。

そのため、現場実装においては自動化施工を踏まえた法整備をいかに進めていくかが課題となると考える。

#### 6. まとめ

山岳トンネルの無人化施工の実現に向けて、ゼネコン各社を中心に技術開発が進められている。山岳トンネルの施工工程うち、もともと機械に頼って施工が行われて工種については、自動化が比較的進められている。

一方で、発破掘削における結線作業やインバート工や覆工における鉄筋組立作業やコンクリートの締固め作業は、機械化が難しく、自動化技術の開発が進んでいないのが実情である。

また、自動施工技術を発展させていくためには、発破パターンの作成や切羽評価など熟練技能者の経験や勘を頼りに行われた作業を数値化し、客観的なデータにもとづくものでなければならないが、膨大なデータを活用するためには、AIなどの活用が必要不可欠である。

山岳トンネルの自動化技術はゼネコン各社を中心に進められているものの、現場適用を進めるにあたっては、費用面、法令などの課題も多く残されている。今後、山岳トンネルの無人化を実現するためには、産官学が一体となり新技術の開発や現場適用を進めていくことが重要である。

### 第3編 プレキャストコンクリート工法における無人化および自動化施工の取組

#### 1. はじめに～プレキャストコンクリートの適用事例と現状

わが国におけるコンクリート製品の歴史は、1905年にドイツから空洞コンクリートブロックの製造技術が入ってきたのが最初である。その後1925年にRC管の製造技術が国内に導入され始め、くいや枕木、積ブロック等小規模な製品の製造が進んだ。その後1968年には内径4.0m×内高2.5mのボックスカルバートが製造される等、製品の大規模化が進み、近年ではプレキャスト製品が高速道路やトンネル、橋梁、建築物等、多岐に渡る建設プロジェクトにおいてこれまで現場打ちで築造してきた大規模構造物においても広く用いられるようになってきた(表-1)。

表-1 わが国で土木工事に使用される主なコンクリート製品の展開年表

土木学会論文集 No. 466(1993年5月) 技術展望 コンクリート製品の歴史より

年代	事項	年代	事項
1875年	M 8 初めてポルトランドセメントを製造	1954	29 北海道と和歌山県で災害復旧に初めて積みブロックを使用
1905	38 空洞コンクリートブロック技術導入	1954年	S29 コンクリート製魚礁を初めて設置
1906	39 茂庭氏 RC 管を設計、横浜築港埋立用の排水管に使用	1955	30 遠心力 RC くい JIS 制定、ポールパイル協会設立
1910	43 名古屋市の下水工事に RC 管使用、石狩川治水工事にヨーカン型コンクリートブロック使用、花畔工場で製造開始	1958	33 加圧コンクリート矢板を初めて製造
1920	T 9 Hume, 遠心力 RC 管発明(オーストラリア)	1959	34 全国コンクリート製品協会設立、スラブ橋用 PC 橋げたの JIS 制定
1921	10 角くいを製造し使用	1960	35 ロール転圧 RC 管の製造技術導入、けた橋用 PC 橋げたの JIS 制定、名古屋の地下鉄に RC セグメント使用
1923	12 永坂氏、東大佐野教授の指導でコンクリートくいを試作	1961	36 VIHY パイプの製造技術導入
1925	14 ヒューム管の製造技術を導入、日本ヒューム管 柳平沼工場で製造開始、石浜氏鉄筋コンクリートまくらぎ考案	1962	37 矩形断面のボックスカルバート製造、真空処理工法による加圧矢板製造、PC パイルも初めて製造される
1926	S 1 石浜型 RC まくらぎ製造、使用	1965	40 全国土木コンクリートブロック協会設立、PC 矢板の JIS 制定
	1 細梅氏山形県でくいの製造に成功	1960	41 無筋コンクリート管、加圧コンクリート矢板の JIS 制定
1929	4 神奈川県に日本柱合資会社設立ポール製造	1968	43 プレテンション方式遠心力 PC くい、ポストテンション方式遠心力 PC くい、ロール転圧 RC 管の JIS 制定
1930	5 愛知県に日本セメント工作所設立、くい、ポール製造		スプリットブロック東名高速道路の法面工事に使用
1932	7 吉沢コンクリート工業所、オーストラリアの Williams を招き、本格的にくいポール製造		PC ボックスカルバート製造開始
1934	9 日本コンクリートポール 柳、大同コンクリート工業所設立ポール、くいを製造	1971	46 コア式 PC 管の JIS 制定
1937	12 下水道用 RC 管規格(JIS)制定	1972	47 コンクリートぎ木の製造開始
1940	15 吉田博士 1000 kgf/cm <sup>2</sup> を超える高コンクリート開発	1973	48 緑化ブロックの製造開始
1942	17 橋名の軽石で軽量ブロック製造、Dow Mac 型 PC で、まくらぎ開発(イギリス)	1974	49 コンクリート積みブロックの JIS 制定
1948	23 ヒューム管協会設立	1975	50 樹脂含浸コンクリート多孔管開発
1949	24 東京葉平橋で生コンクリートの製造開始	1979	54 舗装用コンクリートブロック(インターロッキングブロック)技術導入
1950	25 即時脱型ブロックマシン導入(アメリカより)、RC 管、遠心力 RC 管、平板の JIS 制定	1981	56 バイコン卵形管の製造開始
1951	26 PC まくらぎ製造し、試験的に使用、石川県にプレテンけたの長生橋完成	1982	57 プレテンション方式高強度 PC くい JIS 制定 コンクリート積みブロック製造指針作成
1952	27 空洞コンクリートブロックの JIS 制定	1984	59 宅地造成用ザウォール製造、販売
1953	28 無筋コンクリート管開発	1990	H 2 ポリマー含浸コンクリート(PIC)フォーム製造

工場内の安定した環境下で製造するプレキャスト部材は現場打ちコンクリートよりも優れた性質を持つ。困難な地形や環境下でも良好な品質を維持しながら施工を進めることができること、現場での構築作業短縮につながることから、コンクリート工の生産性向上技術としての期待が高まっており、規格の標準化を進め導入促進を図るため国土交通省は設計および施工に関する要領やガイドラインを整備している(表-2)。土木学会においても、『コンクリートライブラリー158 プレキャストコンクリートを用いた構造物の構造計画・設計・製造・施工・維持管理指針(案)』として取りまとめている(写真-1)。



プレキャストコンクリートを用いた構造物の構造計画・設計・製造・施工・維持管理指針 (案)  
土木学会、2021年3月

写真-1 プレキャストコンクリートを用いた構造物の構造計画・設計・製造・施工・維持管理指針 (案)

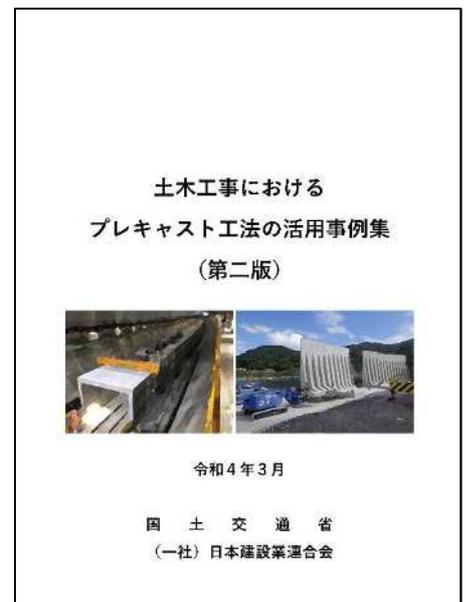
表-2 国土交通省策定のプレキャストに関する要領・ガイドライン

策定年月	要領・ガイドライン名
平成 28 年 3 月	土木工事に関するプレキャストコンクリート製品の設計条件明示要領 (案)
平成 30 年 6 月	コンクリート橋のプレキャスト化ガイドライン
平成 30 年 6 月	コンクリート構造物における埋設型枠・プレハブ鉄筋に関するガイドライン
平成 31 年 1 月	プレキャストコンクリート構造物に適用する 機械式鉄筋継手工法ガイドライン

国土交通省と日建連は、2011 年から 2021 年にかけて実施されたボックスカルバートおよび L 型擁壁の導入事例について「土木工事におけるプレキャスト工法の活用事例集 (第二版)」として取りまとめている。

その中で実施しているアンケート結果では、大断面 BOX カルバートの施工例 48 件のうち、プレキャスト導入の目的と効果の有無で、「省人化・省力化」および「工程短縮」に効果ありと回答したのは 44 件、そのほか、「品質・維持管理性」は 43 件、「安全性」は 40 件であった。

回答のあった項目の集計では、現場打ちを 1.0 とした場合の工程・労務費・初期コストの比はそれぞれ 0.44、0.42、2.67 となっており、工程や労務を「お金で買う」というような傾向が読み取れる。表 3-3～表 3-5 に「土木工事におけるプレキャスト工法の活用事例集 (第二版)」に記載の導入事例の代表例を示す。(写真-2)。



土木工事におけるプレキャスト工法の活用事例集 (第二版)  
国土交通省、日本建設業連合会、2022年3月  
【引用元】 <https://www.mlit.go.jp/tec/content/001474498.pdf>

写真-2 土木工事におけるプレキャスト工法の活用事例集 (第二版)

表-3 プレキャストの導入事例 その1

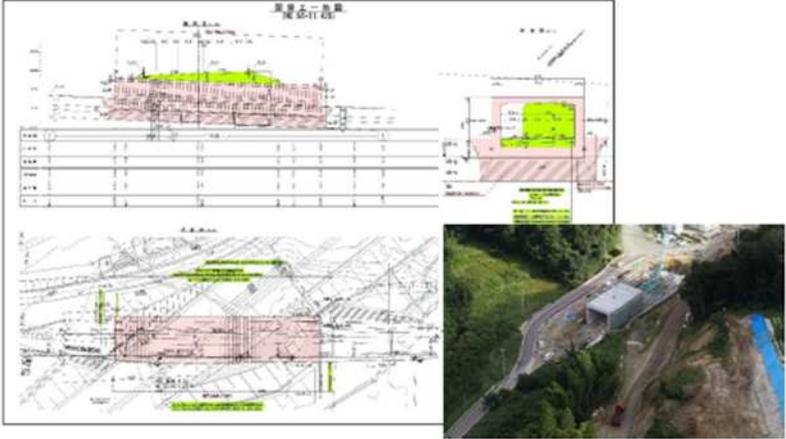
<p>概要図</p>			
<p>工事名</p>	<p>東北中央自動車道 下小国地区道路改良工事</p>		
<p>発注機関</p>	<p>国土交通省</p>		
<p>受注者</p>	<p>五洋建設株式会社</p>		
<p>用途</p>	<p>道路</p>		
<p>現場打ちとの比較 (現場打ちを 1.0)</p>	<p>工程</p>	<p>労務</p>	<p>初期コスト</p>
	<p>0.2</p>	<p>0.4</p>	<p>2.20</p>
<p>導入の経緯</p>	<p>施工箇所が現道と工事用道路の接続地点となっており、事業工程に遅れが生じないように、施工時の通行止め日数を極力減らす必要があったため、プレキャストを採用した。</p>		

表-4 プレキャストの導入事例 その2

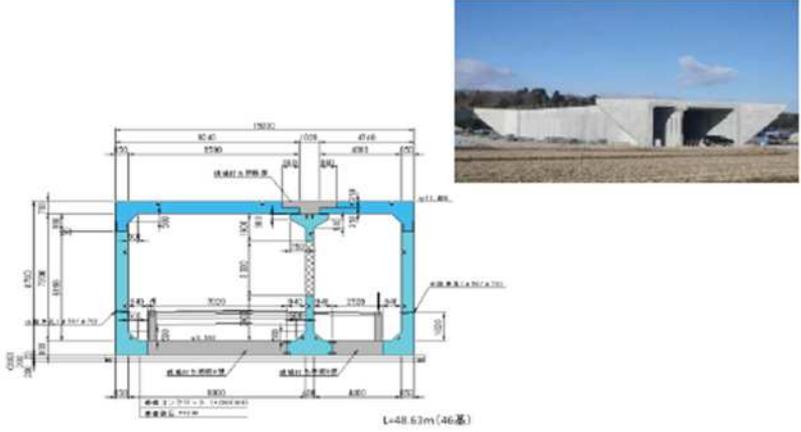
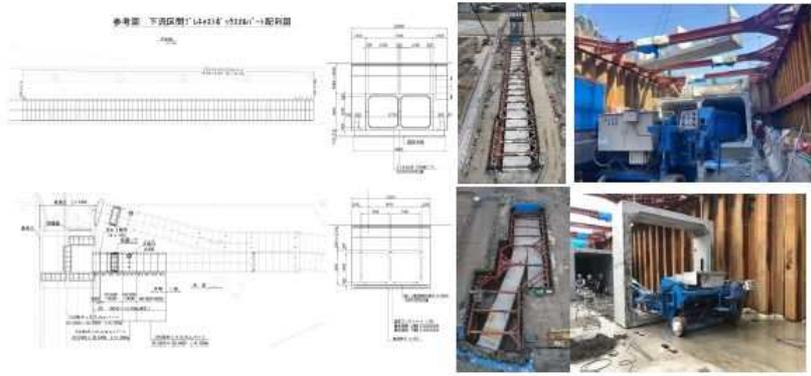
<p>概要図</p>			
<p>工事名</p>	<p>常磐自動車道山元工事</p>		
<p>発注機関</p>	<p>高速道路会社</p>		
<p>受注者</p>	<p>清水建設株式会社</p>		
<p>用途</p>	<p>道路</p>		
<p>現場打ちとの比較 (現場打ちを 1.0)</p>	<p>工程</p>	<p>労務</p>	<p>初期コスト</p>
	<p>0.38</p>	<p>0.13</p>	<p>2.68</p>
<p>導入の経緯</p>	<p>工期短縮</p>		

表-5 プレキャストの導入事例 その3

<p>概要図</p>			
<p>工事名</p>	<p>大規模地震対策事業 宗岡副水路堤外部下流外工事</p>		
<p>発注機関</p>	<p>その他・事業団</p>		
<p>受注者</p>	<p>大成建設株式会社</p>		
<p>用途</p>	<p>水路</p>		
<p>現場打ちとの比較 (現場打ちを 1.0)</p>	<p>工程</p>	<p>労務</p>	<p>初期コスト</p>
	<p>0.50</p>	<p>0.30</p>	<p>1.50</p>
<p>導入の経緯</p>	<p>河川工事のため非出水期間の 7 か月しか工事ができず、その期間内で開削(切梁)による構築を完了するため工程短縮が必要となった。</p>		

### 1-1 プレキャストが採用されにくい状況について

「建設機械施工 Vol.71 2019年9月号」では、プレキャスト製品利用拡大に向けての課題として①コストの壁、②部材接合技術の課題、③規格の標準化について記載されている。

#### ①コストの壁について

現場打ちコンクリートとの比較としてアンケート調査ならびにヒアリング結果において工期は半減するものの直接工事費は1.4~4.0倍になると試算されていることから、コストダウンが求められるとりわけ公共の建設工事ではプレキャスト導入の壁となっていると考えられる。

「規格の標準化 (PCa 製品のコスト構造等) についてアンケート結果」(国土交通省、第8回コンクリート生産性向上検討協議会平成31年3月14日) (図-1) において、プレキャスト製造会社を対象に調査したプレキャスト製品の単価構成について記載されており、製品の種類にもよるが、製品価格の約75%は材料費や人件費・設備償却費等の製品原価で、残りの約25%が製品運搬費と一般管理費となっている。単純比較は難しいが、このうち工場設備や製品運搬に関わる費用が、現場打ちに対して割高となる一要因と考えられる。プレキャスト工法を導入する上で必要な経費であり削減は難しい。

コスト増により導入がためられる現状に対し、上述の「建設機械施工」誌上では直接工事費のみで比較するのではなく仮設費や交通規制費用といった要素を含めた総合的な比較が可能な手法が望まれる、としている。

**[参考] 単価構成の全平均(%)**  
**※全平均:今回調査の4工種(規格品、特注品)の平均**

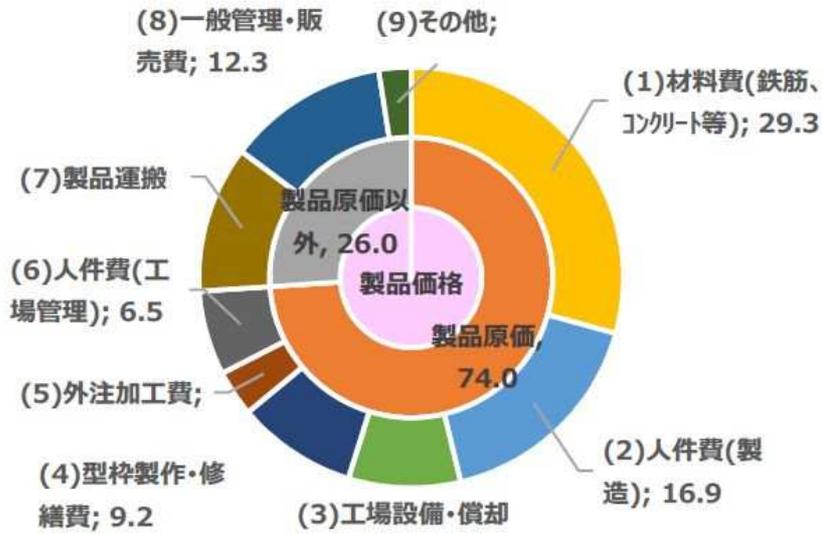


図-1 プレキャスト製品の単価構成

同誌ではコスト増の一因として他にはプレキャスト製品に対する高い表面品質要求も挙げている。これは、“(高価な)プレキャスト製品だから表面はツルツルピカピカでなければならない”という固定観念から、製品の性能と無関係な表面の色むらといったものまで補修(化粧)して出荷することが多々あり、製品に求められる本来の性能や機能に基づいた要求品質で、受け渡しが行われるようになってほしいと綴られている。

さらに、生産が特定期間に集中していることもまた一因であるとしている(図-2)。閑散期が長い場合どうしても当該期間をベースにした人員・設備配置が選択され、繁忙期の恒常的超過勤務や未熟な派遣作業員等に起因する事故リスクの増大、ストックヤード不足による部材の横持ちコスト等の余分な費用が発生する。しかし生産の平準化はメーカーの企業努力だけでは難しい。

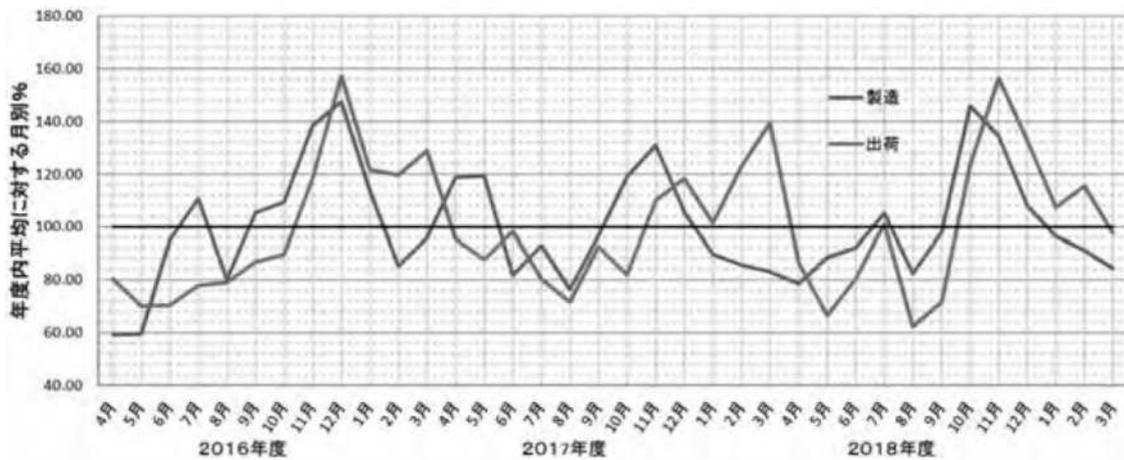


図-2 ボックスカルバートの生産と出荷の年間変動

## ②部材接合技術の課題について

製品本体に対し接合に関する技術開発が遅れており、それが採用のハードルとなっている、としている。

## ③標準化について

国土交通省が主導するコンクリート生産性向上検討協議会においても主要部材の規格の標準化が議論されているが、同一形状・寸法の製品を大量生産するコストダウンはまだ実現に至っていない印象である。

また、施工の観点からみると、プレキャスト部材は大断面の部材を用いる際は、設置に 100t 吊級以上の性能を有するクレーンが必要で、また部材運搬は大型トレーラーを用いる場合が多く、工事の搬入ルートや施工ヤードの広さと地盤条件などが整っていないとそもそも施工できない、といった課題もある。

### 1-2 無人化に向いているプレキャスト構造物

現場打ちコンクリートに比べ、現場作業の内容が単純化・簡略化され、繰り返しが多いプレキャスト構造物は、無人化施工技術と相性がいいと考えられ、ゼネコン各社等が技術開発に注力している。その例は次章以降で紹介する。

## 2. プレキャスト工法における無人化・自動化の取組み

### 2-1 プレキャスト工法の取組みの特徴

一般的なプレキャストコンクリートの施工は、**図-3**の施工フローに示す各施工段階により行われる。完全無人化の構築にはプレキャスト部材の製作から運搬、据付などの各施工段階で相互の連携が必要となるため、ゼネコンなどの単一の会社が全工程を通して一元的に実施することは困難である。したがって現状では、個々の施工段階を担当する特定の企業や業界による部分的な取組み事例が多く、全面的な無人化・自動化システムの構築事例は少ないのが現状である。

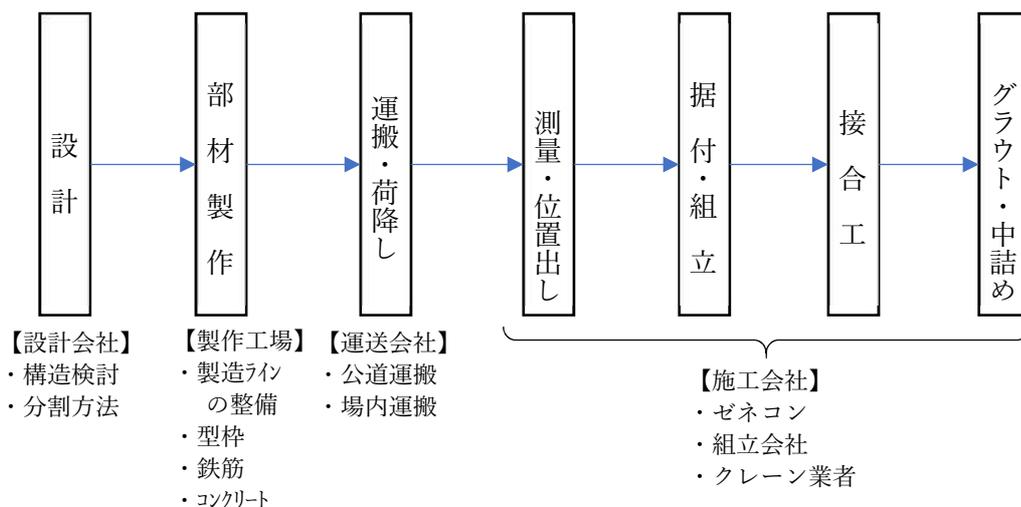


図-3 プレキャスト施工フロー図

上記で述べたように、プレキャストコンクリートの施工において、ゼネコンなどが担当する現場でのプレキャスト部材の据付け・組立に着目した場合でも、これの無人化・自動化のためには、**表-6**に示すように、異なる施工段階や他の業種が相互に関連しており、それぞれの分野での技術的進歩や社会的環境整備が必要と言える。

表-6 無人化・自動化に必要な対応

施工段階	項目	必要な対応の例
設計段階	構造形式 分割方法	無人化・自動化での据付方法に合わせた構造や分割を予め設計で配慮
工場製作	接合方法	ワンタッチ接合等の容易な接合方法の実現
場内運搬	積込・荷下し	無人運搬機による部材の積込みと据付箇所への誘導
据付・組立	揚重方法	クレーンやフォークリフトの無人化や自律制御の実現 ロボットアームなどの施工機械の技術的進歩

次に、現在各分野で取組まれている無人化・自動化の事例についていくつか紹介する。

## 2-2 ゼネコンによる現場施工や製作工場の取組み事例（土木分野）

### （1）大型プレキャストブロック据付の自動化施工（鹿島建設）

【引用元】 <https://jcmnet.or.jp/jcma2019wide/wp-content/uploads/2022/11/007.pdf>

実施項目：据付の自動化、部材製作の工夫

大規模土砂崩落の災害復旧を行う工事において、砂防堰堤に用いるプレキャストブロックの据付を自動化した事例である。本システムは、汎用のバックホウにカメラを取り付け、ブロックに貼り付けたARマーカからブロックの位置情報等を読み取り、重機の姿勢を把握してブロック据付を自動化したものであり、以下の要素技術を組み合わせて自動運転システムを構築している（写真-3）。

- [1] ARマーカとカメラを用いたAR測量
- [2] バックホウを自動運転するキャビン搭載型ロボット
- [3] リアルタイムに重機の姿勢を把握する姿勢計測システム

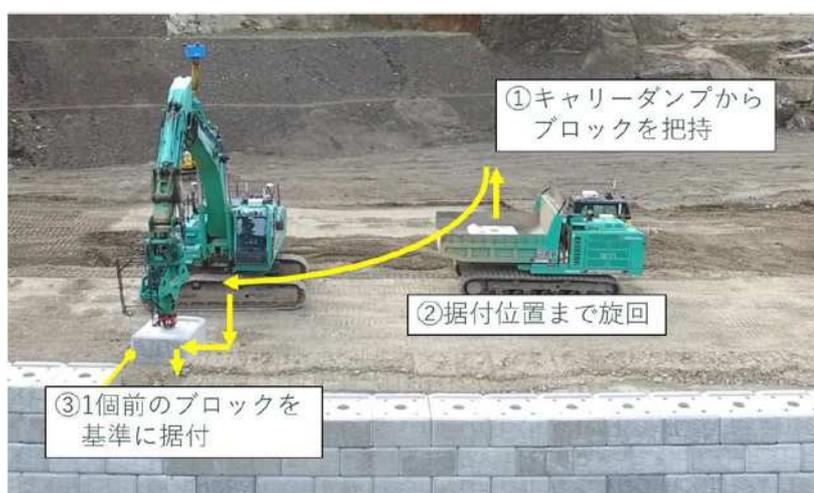


写真-3 ブロック据付状況、専用アタッチメント、ARマーカ付ブロック

### （2）無人化施工によるプレキャストカルバート施工（フジタ）

【引用元】 <https://jcmnet.or.jp/bunken/kikanshi/2010/08/021.pdf>

実施項目：運搬・据付の無人化

砂防設備におけるカルバートボックスの建設において、最大 15t の PCa アーチカルバートを既存の遠隔操作重機（4.0m<sup>3</sup>級バックホウ）により無人化施工を実施した。施工にあたり下記の工夫を講じている（写真-4）。

- [1] 連結用ボルトボックス形状の変更による有人作業時間の短縮
- [2] ボックス把握装置の可動フック調整により傾斜状態での据付を実現
- [3] 専用の無人運搬機による部材の場内運搬

[4] カメラモニターの工夫による据付状況の遠隔確認



写真-4 アーチカルバート運搬・据付状況

(3) PC床版製作に鉄筋組立自動化システムを導入（三井住友建設）

【引用元】 <https://www.smcon.co.jp/topics/2021/09031300/>

実施項目：鉄筋組立の自動化

ロボットを活用した鉄筋組立自動化システム（「Robotaras®II」）をプレキャストPC床版の鉄筋供給・配置・結束作業に導入した事例（写真-5）。鉄筋組立の85%を自動化することにより3倍の生産性向上を実現した。本システムの鉄筋組立作業の流れは次のとおりである。

- [1] 鉄筋の供給：外周に配置した「鉄筋供給機」がロボットアーム作業半径内に鉄筋をコンベア搬送
- [2] 鉄筋の配置：天吊りロボットアーム2台が3種類の鉄筋配置用「鉄筋保持治具」を自動装着し、「鉄筋架台」に鉄筋を配置
- [3] 鉄筋の結束：自動脱着により市販の「鉄筋結束機」を装着した天吊りロボットアーム2台と、装置下部に設置した結束用ロボット1台（計3台）で鉄筋を結束。ロボットアームの先端に三次元カメラを設置し、鉄筋結束時にプログラミング位置との配置誤差を認識・補正して確実に結束を行う。



写真-5 ロボットアームによる配筋

## 2-3 建築での取組み事例

### (1) 0A フロア施工ロボ Robo-Buddy の開発 (清水建設)

【引用元】 <https://www.shimz.co.jp/company/about/news-release/2021/2021040.html>

実施項目：部材設置の自動化

4 輪駆動の作業台車と台車から伸び出た 2 本のロボットアームから構成される双腕多機能ロボット Robo-Buddy による 0A フロアの施工において、片方のアームが 0A フロアの床パネルを支える支持脚の据え付けを行い、もう一方は床パネルの敷設を実施し、材料供給ロボットとセットで稼働し自律的に作業と移動を繰り返す (写真-6)。



写真-6 Robo-Buddy によるフロア床パネル敷設

## 2-4 海外での取組み事例

### (1) 高度に自動化されたプレキャスト工場 (PROGRESS グループ)

【引用元】 <https://www.youtube.com/watch?v=Wwkuxg0vcgQ>

実施項目：製造全工程の自動化

コンクリート製品製造を自動化する「カルーセルシステム」は、工場内を循環する製造パレット上でコンクリート製品を製造する工場システムで、主に床・ハーフスラブ・壁の製造に適している。事務所で読み込んだ BIM データを基に、型枠の設置、インサートの埋め込み、メッシュの配置、トラス筋の配置、コンクリート打設、養生、脱型まで、各ワークステーションで高度な自動化を実現する (写真-7)。



写真-7 自動化製造ラインによる PCa 床版製造 (オーストラリア工場)

## 2-5 その他の取組み事例

プレキャストコンクリートの無人化・自動化の推進においては、施工に関する技術的課題の解決だけでなく、そのベースとなるプレキャスト工法自体の採用拡大が必要である。

このためには、プレキャスト工法が単純な生産性の向上に留まらず、建設業に求められる様々な社会的要請に対して有効な工法であることも重要と考えられる。

プレキャスト工法は現場打工法に比べ打設時の騒音など環境影響を低減できるほか、施工期間の短縮による通行規制短縮や、高所作業などの危険作業の縮減による安全上のメリットを有しているが、近年は新たな技術開発による取組みもあることから、その事例を示す。

### (1) カーボンニュートラルなどの環境課題への対応（竹中工務店ほか）

【引用元】 <https://www.takenaka.co.jp/news/2023/10/04/>

CO<sub>2</sub>を削減・固定・吸収し、製造過程での排出量を80%以上削減したコンクリート「CUCO（クーコ）-建築用プレキャスト部材」を開発し、大阪万博のイベントホール棟の基礎部材に適用した。本開発材は以下の3つの要素技術を組み合わせた技術となっている（写真-8）。

[1] 普通セメントに代えて高炉スラグを用いたECMセメントを適用

[2] コンクリート用骨材などにCO<sub>2</sub>を固定させ駐留する技術

[3] 特殊混和材により硬化後にCO<sub>2</sub>を吸収・固定する技術



写真-8 CO<sub>2</sub>排出量を削減したプレキャスト部材の開発

## (2) DX化などのデジタル技術を活用した生産性向上（昭和コンクリート）

【引用元】 <https://www.showa-con.co.jp/about/pc/>

デジタル技術の活用はプレキャストの無人化施工における ICT 技術の利用など要素技術の1つであるが、その他にも、工場製作であることから、現場で打設するコンクリートに比べ部材毎の品質管理や施工管理データの収集が容易であり、情報管理のデジタル化と親和性が高い。

本技術は、カメレオンコード（カラーバーコード）を製品に貼付け、製品の出来形・品質管理・打設日や、搬入・据付け情報等をクラウド管理し、いつでも管理値をペーパーレスにて確認可能にする技術である（写真-9）。



写真-9 カメレオンコード  
貼付け状況

### 3. 無人化・自動化に関する課題や問題点

#### 3-1 概説

前章 3-2. では製造や施工段階で現在取り組まれている無人化・自動化の事例を紹介した。本章では現場施工に着目して工程段階毎に、プレキャストコンクリートの無人化・自動化施工における課題と問題点について整理するとともに、課題解決方法について考察する。

#### 3-2 荷降し・据付・組立に関する課題

前章 3-2. の施工フロー図に示すとおり、一般的に、プレキャストコンクリートは工場で製造され、現場に運搬設置される。

現場の条件は工事によって様々であるため、大きなコンクリート製品の輸送や、大型クレーンを使用した設置には施工環境や地形を踏まえた適切な計画が必要であるが、以下に現場での荷降ろし、測量・位置出し、据付、接合・グラウト中詰め、および費用面における無人化・自動化の課題について示す。

##### (1) 現場での荷降ろし

現場での荷降ろしについて、主に建築や流通の現場などでは、人が操作するフォークリフトでの積込みは、安全面の課題や人手不足もあり、自動化ニーズが高まっている。

フォークリフトなどを土木構造物のような大型重量物に適用する場合、これに適した大型機械の開発が課題となる。しかし、逆を言えばプレキャスト部材の小型化・軽量化を行うことで、現存技術の利用が可能であると考え。大型構造物を分割して小型化することはプレキャスト構造物の規格標準化にも繋がり、設計手間・工程・費用にも有利であると考え。

現存技術として、フォークリフト型の自動搬送ロボでトラックからの荷降ろし作業を自動化できる Robo-Carrier Fork (清水建設) (写真-10)、トラック自動積込み・荷降ろしシステム (メイキコウ) (写真-11)、トラックローダ (オークラ輸送) (写真-12) 等がある。

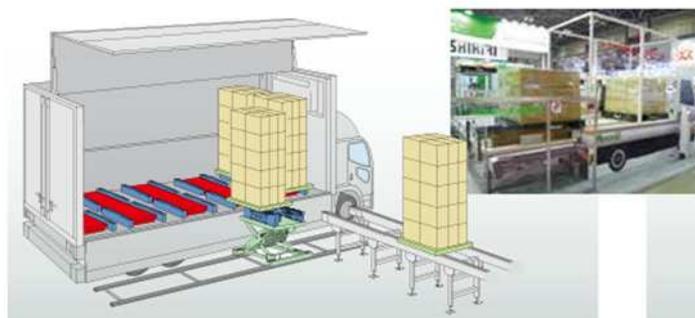


アプリによるロボットへの搬送指示で、荷積み場所への移動、資材の荷取り、搬送場所への移動・荷降ろしまでの一連作業をロボットが自律的に遂行可能

【引用元】

<https://www.shimz.co.jp/company/about/news-release/2022/2021070.html>

写真-10 Robo-Carrier Fork



パレット積み搬送物をコンベアラインからトラックに自動で積込み・荷降ろしするシステム

【引用元】

[https://www.meikikou.co.jp/system\\_truckyard/automatic.html](https://www.meikikou.co.jp/system_truckyard/automatic.html)

写真-11 トラック自動積込み・荷降ろしシステム



大量出荷が要求されるパレット積み商品を、フォークリフトに代わって  
一挙にトラックへ積み込む出荷設備

【引用元】 <https://www.okurayusoki.co.jp/product/pallet/truck/>

写真-12 トラックローダシリーズ

## (2) 測量、位置出し

プレキャスト構造物を計画位置に据付けるため、事前に測量、位置出しが必要であるが、株式会社フジタでは、遠隔にて測量を行い、位置出しを可能とする無人測量システムの開発・導入を行うとともに、測量精度の向上および測量時間の短縮を図る改良を続けている。

無人測量システムは、マーキング機構を有し、立入困難区域内での出来形測量、型枠やブロックなどの据付を行うための位置出し作業を遠隔にて行うシステムである。

ベースマシンは 0.8m<sup>3</sup>級バックホウ、システムには GPS (GR2100) を使用している。マーキングの誤差は 15mm 以内と比較的高精度である。1 点のマーキング時間は約 1 分半と速い。また、アタッチメント部におけるバケットと測量システムの迅速な交換も可能となっており、ベースマシンを効率的に稼働させることができコスト面においても有利である (写真-13)。

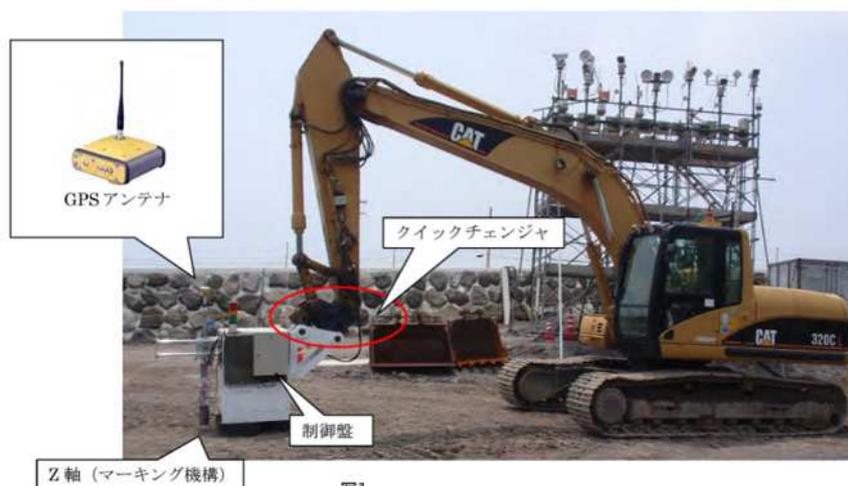


写真-13 改良型無人測量システム概要図

写真-13 無人測量システム概要図

当システムの精度は 15mm 程度であり、土木構造物の出来形基準管理値を考慮すると、測量精度が課題であると考えられる。無人測量システムは現在のところ GPS システムを利用しているため、今後レーザースカナによる点群データ等と上手く組み合わせることで、精度が向上することが期待される。

### (3) 据付

国土交通省北陸地方整備局では、災害復旧現場での安全を確保するため、各種建設機械の無人化に取り組んでおり、平成 14 年に遠隔での操作が可能な 50t 吊りラフテレーンクレーンが開発されている。この無人クレーンは、大型の移動式クレーンでは日本初となる遠隔操縦可能な 50t 吊りラフテレーンクレーンである。走行と作業が同一の運転席で操作可能なため、作業場所まで走行しクレーン作業が可能となる。遠隔操作時の操作有効距離は最大 150m であるが、クレーン操作の複雑性や安全上の理由から、オペレーターが確実に目視でクレーンの動きを把握できる場所からの遠隔操作であることが条件となっている（写真-14、写真-15）。

このような無人クレーンを、プレキャスト構造物の据付けに適用する際の課題の 1 つが玉掛けの無人化である。玉掛作業は人に頼るケースがほとんどであることから、無人化の実現には遠隔操作可能なアタッチメントの開発が必要となる。また、プレキャスト構造物を据え付ける際には細かい据付精度が要求されることが想定され、据付時に細かい調整ができるような精度向上も今後の課題となる。

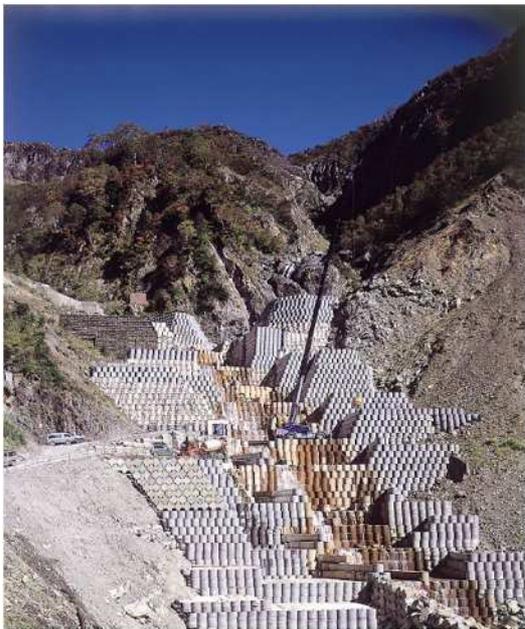


写真-14 無人クレーンの作業状況



写真-15 遠隔操作状況

### 3-3 接合・グラウト・中詰めにおける技術面の課題

プレキャストコンクリートの接合部は、一般的に機械式継手やPC圧着工法が用いられる。その中で詳細な施工工程に区分すると、接合部処理、グラウト注入、定着部処理（中詰め）という工程がある。

まず、機械式継手は、一般的に鉄筋やボルトと相手側のソケットなどの孔を合わせる構造のため、人力による部材据付け位置の微調整が必要となることから、自動化の実現にはよりワンタッチに近いシンプルな継手構造が必要である。橋梁のPC床版の取替え工事では、急速施工を目的にPC床版同士をつなぎ合わせる「コッター式継手」が開発されている（図-4）。同継手の施工は、現状では人力による締め付けを伴っているが、構造がシンプルのため自動化への応用が可能な技術であり、カルバートボックス等でもこのような継手システムの開発が課題である。

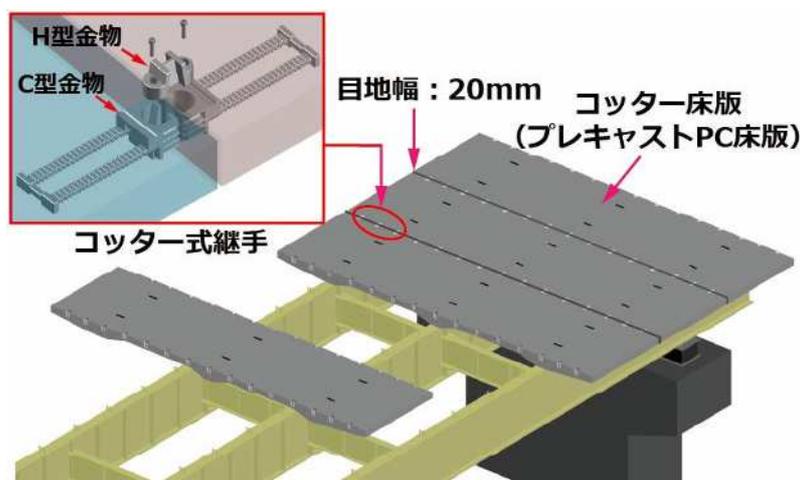


図-4 コッター式継手概略図

【引用元】 <https://www.gaeart.com/technical/49.html>

この他、鉄筋の継手工法としてはCB工法から波及した「鉄筋自動溶接機」が開発されており、部材の接合方法として応用できる可能性がある。現状は溶接については自動化できているものの、設置については人力であることが課題であると考えられる。

グラウト注入に関しては、地盤改良や薬液注入を扱う企業で注入圧や量を管理しながら施工する工法が既に存在しており、プレキャスト接合部でも同様な技術開発が望まれる。

PC定着工法については、耐久性向上の観点からプレグラウトおよびグラウトレスの技術開発が進められている。同時に、PC鋼材の自動緊張システムも開発されている。自動計測を行いながら、パソコン制御により緊張荷重を自動出力するものである。しかし現状では、緊張自体の作業は自動化されているものの、事前準備や設置は人力作業が必要である。

プレキャストコンクリートの接合部における品質構造において重要なこれらの技術については、部分的な自動化・無人化の基礎となる要素技術は既に発展しているものの、それらの事前準備や設置などについて人力の補助を必要としているということが大きな課題と言える。

接合部の完全無人化を行うためには、さらに事前準備・設置する過程での自動化技術やロボット化が必要であると考えられる。これも接合種類によって多様になってしまうため、自動化・無人化に向いている工種を見定め、接合方法の開発を含め、今後戦略的に技術開発に取り組むことが重要であると考えられる。

### 3-4 費用面の課題

プレキャストコンクリートにおける無人化や自動化は、製造工場における製品の大量生産だけであれば技術的な面では比較的容易と考える。一方で、土木構造物は地形条件等の制約を受けるため、個々の工事で製品の形状や規模が大きく異なり、単品受注・単品生産となることが多い。したがって、現場ごとに設計や製造ラインの整備（型わくの製造など）に費用がかかることで、初期コストが増大して導入のハードルが高くなることが大きな課題となっている。このようなコスト面の改善には、製造する部材の小型ブロック化や規格標準化によるコストダウンが有効と考えられる。

また、プレキャストコンクリートは従来の現場打ち施工と比較して大きな施工時のコストだけでなく、トータルのライフサイクルコストで評価することも重要である。これについては次章 3-4. で詳しく述べるが、例えばライフサイクルコストの一例として維持管理を考えると、プレキャストコンクリートは現場打ち構造と比較し、天候などの影響を受けない工場で製造され品質が安定しているため、将来的な耐久性の向上により、維持管理費用が抑制できるという側面もある。

今回プレキャストコンクリートの施工について、無人化・自動化に関する考察を行ったが、現時点で即座に採用できるものは少ない。実際の施工において使用するには、現存の技術の組み合わせや技術開発が不可欠である。プレキャストコンクリートは施工時の初期コストが大きく、無人化・自動化を導入した場合は更に初期コストが大きくなることが想定されるが、これも長期的視点で見れば、建設業界の喫緊の課題である生産性向上につながると考えられるため、業界を挙げて取り組んでいくことが重要である。

## 4. プレキャスト分野での今後の展望

### 4-1 無人化の展望

従来からプレキャストコンクリートは省力化や工程短縮を目的に導入される事例が多く、その工法自体が生産性向上に寄与するものであるが、無人化・自動化が実現することで、さらなる生産性向上の可能性を有している。

しかしながら、これまで述べてきた通り、プレキャストコンクリートについては、そもそも通常の工事でプレキャストの導入が進んでいない状況である。なおかつ現場での無人化プレキャスト作業に関しては3-2. で述べた好事例はあるものの非常に少ない。したがって、3-3. で述べた施工に関する技術開発はもちろん必要であるが、まずはプレキャストコンクリートを通常の工事において発注段階から積極的に採用していく仕組みづくりが先決であると考えられる。

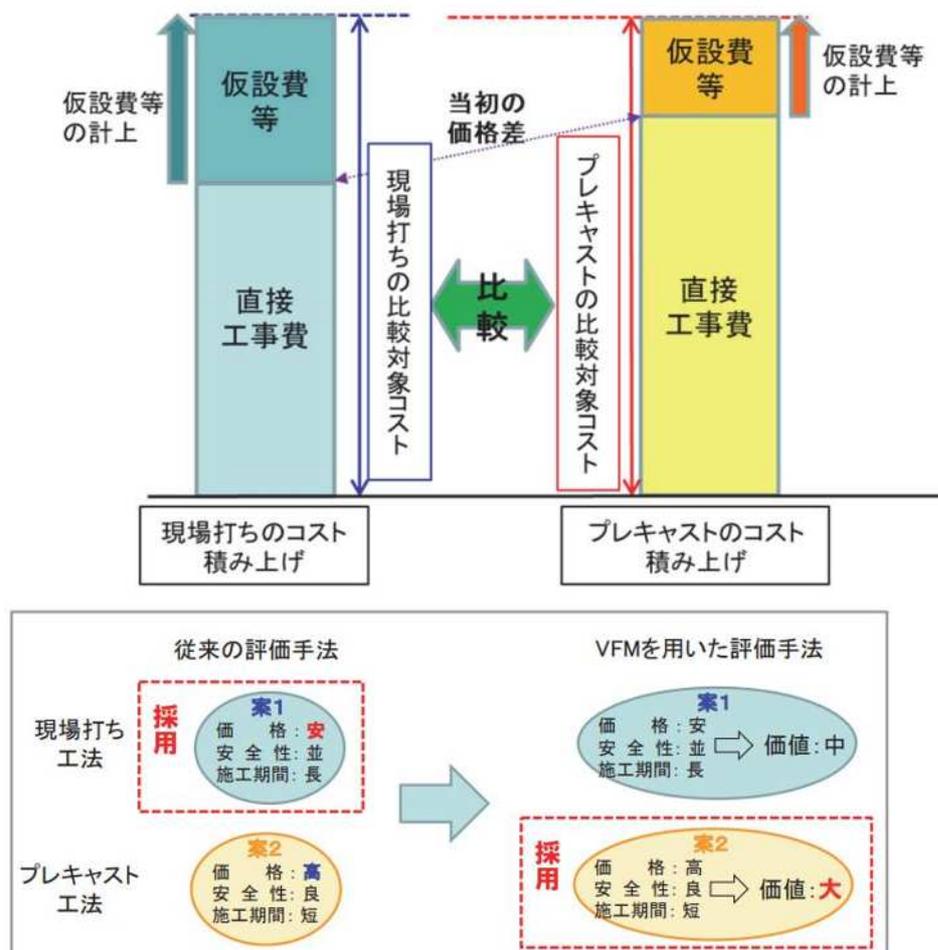
### 4-2 プレキャストコンクリート積極採用に向けた発注者による政策的な取組・事例

日本コンクリート工学会発行の月刊コンクリート技術 2022年10月号によると、土木分野でのプレキャスト部材の普及は思うように進んでいないのが現状で、未だに土木分野における全セメント使用量のうち、プレキャストに使用される量は20%にも満たないと言われている。これは、プレキャスト技術の土木分野での有効性は示されているものの、一般的に現場打ち構造に対して、プレキャスト構造は施工時コストが増大するため経済性に劣るなどの理由により計画段階から構造選定されないことが多々あるためである。そのため、今後は施工時の初期コストにおける経済性のみでの判断ではなく、生産性向上をはじめとする急速施工、ライフサイクルコスト低減、CO2削減、労働災害リスク低減などプレキャスト技術が優位となる付加価値を最大限に評価することで構造選定される仕組み作りが求められると考えられる。

【引用元】 [公益社団法人 日本コンクリート工学会 \(jci-net.or.jp\)](http://jci-net.or.jp)

上記を踏まえ、国土交通省としても取組を開始している。以下にその一例を示す。

①JICE REPORT (【引用元】 [jice\\_rpt39\\_07.pdf](#)) によると、国土交通省では、計画・設計段階での比較検討の考え方として、ライフサイクルコストや単純に価格換算できない要素等を評価し、支払額に対して価値を最大化するように受注者を選定しようとする Value for Money (以下、「VFM」という) の概念の導入が検討されている (図-5)。



従来のコスト（経済性）を中心に比較検討する選定方法とは違い、VFMは、表-7に示す、貨幣換算が難しい要素も考慮した上で比較検討し、最大価値となる工法を選定する方法である。

表-7 プレキャストコンクリートにおけるコスト以外の評価項目一覧

- ・工期 ・施工性 ・品質管理 ・施工時の安全性
- ・周辺住民や道路ユーザーへの影響（社会的コスト）
- ・自然環境への影響（CO<sub>2</sub> 排出など） ・景観
- ・維持管理性（耐久性、補修・点検の容易さなど）
- ・働き方改革への寄与度  
（労働時間、休暇の取得率、書類の削減 など）

令和5年度には、「令和4年度 国土交通省・日建連意見交換会」成果報告でも議題になっているとおり、VFMを取り入れた評価の考え方を確立すべく、直轄 土木工事で活用するための要領案を策定予定である。【別紙6】（図-6）

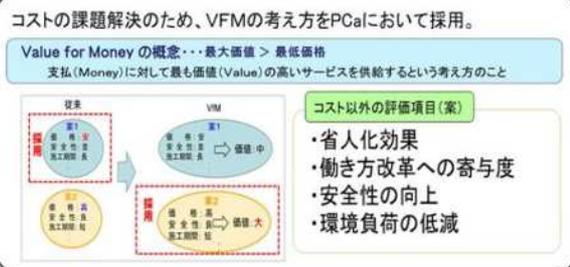
【引用元】 <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001598483.pdf>

## 施工の効率化(プレキャスト工法)

### ◆VFMを取り入れた新たな評価の考え方の検討のための検証

- 新たな評価の考え方を確立するため、評価項目として「省人化効果」「働き方改革への寄与度」「安全性の向上」「環境負荷低減」を設定。
- 上記項目に沿って、既存の直轄土木工事設計業務5件において、新たな評価の考え方の検証を実施。検証結果について、第12回コンクリート生産性向上検討協議会(R5.2.9)において報告。
- R5は、この評価の考え方を踏まえ、R6に直轄工事の設計業務において試行するための要領（案）の策定を予定。

#### Value for Moneyの採用



図：VFMの考え方、評価項目（案）

表：検証した直轄設計業務の一覧

番号	対象構造物	規格・寸法 (m)	断面積 (m <sup>2</sup> )	断面区分	構造形式	備考
1	ボックスカルバート	B3.0×H3.5	10.50	中型	2分割	【PCa採用実績の評価項目】 ・経済性・施工管理・施工性・環境
2	ボックスカルバート	B4.0×H4.0	16.00	大型	2分割	【PCa採用実績の評価項目】 ・経済性・構造性・施工性・品質・安全性・その他
3	ボックスカルバート	B4.5×H4.0	18.00	大型	4分割	【PCa採用実績の評価項目】 ・経済性・工程・施工性・品質・安全性・環境
4	ボックスカルバート	B2.0×H2.5	5.00	中型	1体型	【PCa採用実績の評価項目】 ・経済性・施工性・構造性
5	ボックスカルバート	B2.5×H2.3	5.75	中型	1体型	【PCa採用実績の評価項目】 ・経済性・工期・構造性・施工性・維持管理性・環境性

図-6 国土交通省によるVFMを取り入れた新たな評価の考え方検討のための検証

②「新たな評価の考え方を取り入れた構造物選定マニュアル等の作成（中間報告）」によると、中国地方整備局では、中国地方の特性（瀬戸内の干潮、山陰・山間部の積雪、職人確保困難性等）を整理し、プレキャスト採用に伴う仮設費用の低減等に加え、新たな評価項目及び評価指標を設定し、同整備局で経済比較を実施する取り組みを令和4年1月より開始した。経済性に劣る場合でも現場条件等により採用が可能となるよう、比較・採用基準を明確化した工法選定フローを整備する方向性を打ち出している。また、設計、発注、施工の各段階において、工期の制約や技能者の確保状況、景観等の評価項目と採用基準を明確化したフローを作成し、設計基準（土木工事設計マニュアルを想定）として位置づけることとしている。

【引用元】 [001587865.pdf \(mlit.go.jp\)](https://www.mlit.go.jp/001587865.pdf)

③九州地方整備局では、令和5年10月に日本道路建設業協会九州支部とプレキャスト化の推進などについての意見交換を行っている。会議の中で、同協会は当初設計からのプレキャスト化の推進を要望した。九州地方整備局は中型コンクリート構造物については「運搬可能なものは原則プレキャスト化を検討している」とし、大型のものについても「VFMを考慮した指標を本省で検討しており、25年度からの実装を目指している」と回答するなど、プレキャスト化推進の具体的気運も高まりつつある。

#### 4-3 技術開発

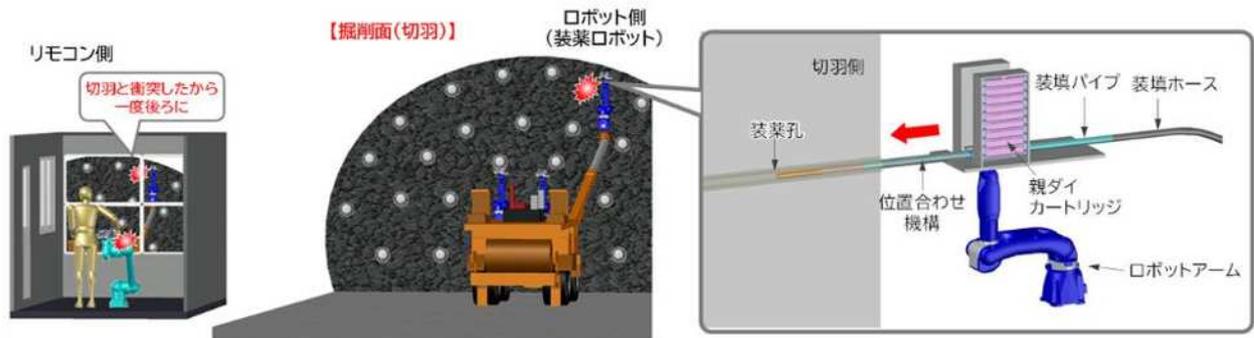
これまで見てきたように最新技術を活用したプレキャストコンクリートの無人化に向けた取り組みは行われている一方で、前述のとおり据付精度や施工スピード等は十分とは言えず、接合・グラウト中詰めにおける事前準備等で一部人が介在せざるを得ない状況である。

プレキャストコンクリートの設置場所としては、各種境界部（敷地境界、道路境界など）があり、当該箇所においては、非常に高い据付精度が要求される。前述の例においても4Kカメラの画像処理によって、±15mmの精度を確保とのことであるが、よりシビアな据付条件にも対応するために、更なる精度向上が求められる。本件に関しては、建設業界においても日進月歩で新技術を活用したDX（Digital Transformation）に向けた取り組みが行われている。高解像度画像（8K動画や1億画素以上の静止画など）やそれらを活用した高精度点群データ、大容量高速低遅延通信技術（5G）、および高性能PCによる処理速度の向上が達成されており、今後も引き続き当該最先端技術を的確かつ積極的に導入していくことが重要となる。

接合・グラウト中詰めについては、人が介在する部分を人型ロボットにより代替する方法もあるが、現在の市場の技術を鑑みると、まず遠隔操作によって現場の無人化に取り組むのが良いと考えられる。

株式会社大林組では山岳トンネル掘削作業における自動火薬装填システムで遠隔から高精度に火薬の充填作業を行う技術を開発しており、今後は自動化に向けた取り組みも進めている（写真3-16）。本技術等を参考にプレキャスト接合・グラウト中詰めの遠隔化・自動化に関する技術開発が進んでいくことが期待される。なお、当該作業を遠隔から実施できれば、離れた複数現場の接合作業を1つの作業チームで行うことで、トータルで見た場合の現場の省人化に寄与（生産性向上）することも期待できる。

【引用元】 [https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20230912\\_1.html](https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20230912_1.html)



火薬装填作業の概要と装填ロボットの拡大図



遠隔装填技術の要素試験

写真-16 山岳トンネル掘削作業における自動火薬装填システムの開発

国土交通省としても上記のようなインフラ分野のDXの取組をさらに深化させるため、令和4年8月から、「インフラ分野のDXアクションプランのネクストステージ」の検討を開始し、インフラ分野のDXの一層の推進に向け「インフラの作り方の変革」、「インフラの使い方の変革」、「データの活かし方の変革」という3つの観点で分野網羅的、組織横断的に取組を図ることとし、「インフラ分野のDXアクションプラン（第2版）」を策定したところである（図-7）。

【引用元】 <https://www.mlit.go.jp/tec/content/001633173.pdf>

インフラ分野の

# DXアクションプラン2

コロナ後も加速化を続けるDX

2023年8月  
国土交通省

- 特集1：組織横断的なDX推進体制の強化
- 特集2：業界を超えて広がるDX
- 特集3：国土交通省が進めるプラットフォーム整備
- 特集4：3Dデータ・デジタル空間の活用
- 特集5：災害対応のDX

図-7 インフラ分野のDXアクションプラン2（国土交通省）

以上の通り、プレキャスト採用に向けた仕組みづくりという視点で国土交通省が取組を開始しているが、これに対して民間企業が積極的に参加し、忌憚のない意見交換や課題を議論し合う場が重要と考えられる。また、これまで述べてきた通り導入に際して現状では施工時のイニシャルコストが大きなハードルとなることから、実現場での試行や適用については、例えば国の研究開発に係る補助金等を有効に活用することで、コスト面でのバックアップを行い、一つでも多くの好事例を積み重ねて発信して行くことが今後のプレキャストコンクリートの現場適用において、大きなポイントであると考えられる。

## 第4編 3Dプリンタの活用

### 1. 3Dプリンタとは何か

3次元データを基に断面形状を積層することで、立体造形を作れる機械である。基本的な仕組みとしては、ベースの3Dデータから断面をスライスしたデータに変換し、そのデータ通りに材料を積層していくことで立体物が造形できる。この3Dプリンタの技術を活用し現在では、試作品・製品・部品・フィギュアなどに活用されていて、住宅が建てられるまでに進化してきている。

3Dプリンティング技術は省力化や無人化施工による生産性の向上を実現できるばかりでなく、高い造形自由度によって意匠に優れた造形物や、これまでにない斬新な構造形式・断面を有するコンクリート構造物を実現することが可能である。また、使用材料を減らして環境負荷低減を図りつつ、コンクリート構造物の価値を高めるなど、建設産業に大きな革新をもたらすポテンシャルもある。

その中で3Dコンクリートプリンターを使って橋や住宅を造る3Dコンクリートプリンティング技術を用いた構造物の開発競争が世界各国で活発になっており、基礎研究のステージから幅広い実用

化に向けて広く試行されるフェーズに移りつつある。

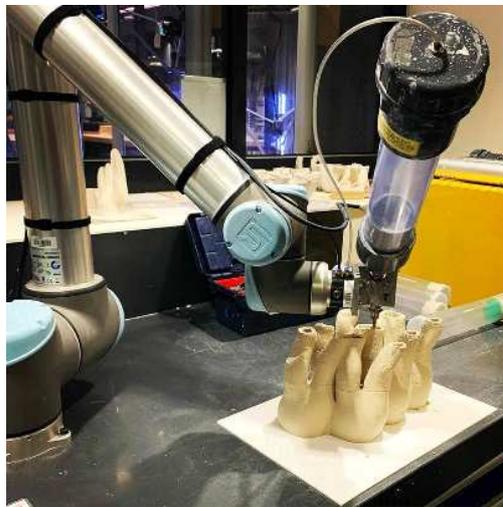


写真-1 3Dプリンタ技術一例

3Dプリンティングには以下の二とおりがある。

#### ●オフサイトプリント

プリンタを導入している工場にて分割した部材を印刷し、出来上がった部材を現場で組み立てて施工を行う。

#### ●オンサイトプリント

大型の3Dプリンタを直接現場に設置し、材料を積み重ねて施工する方法。

## 2. 他業界の事例

表-1 に建設業界以外の他業界の 3D プリンタの技術をまとめた。

表-1. 他業界の主な導入分野と使用目的

業界・分野	使用目的
工業・製造業 自動車メーカー 家電メーカー 部品メーカー 家具・インテリア	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ パーツの内製化，金型の作成，試作品の作成</li> <li>・ 旧車やカスタムカーなど小ロット部品の製造</li> <li>・ 省力化，在庫なしの部品管理</li> <li>・ 切削加工では難しい形状部品の製作</li> </ul> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>
医療分野	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ インプラントのシミュレーション，義肢等</li> </ul> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>
航空・宇宙業界	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 軽量化</li> <li>・ 切削加工では難しい形状部品の製作</li> </ul> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>
食品業界	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 介護食，人造肉</li> </ul> <div style="text-align: center;">  </div>
ホビー関係	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 模型，フィギア等</li> </ul>

### 3. 建設業界の事例

#### 3-1 模型の作成事例

##### 【事例1】

2014年8月に広島市で発生した豪雨による土砂災害の被災地域に砂防堰堤1基を建設する工事。堰堤は透過型で、幅100m、高さ14.5m、現場の掘削土を使って製造したソイルセメント約6400m<sup>3</sup>を本堤内部に投入して構築する。(写真-2)



写真-2 砂防堰堤航空写真

施工を担ったのは宮川興業（広島市）。着手に当たり、品質の確保や円滑な施工を阻む恐れのある要素として2点を想定した。1床掘りの掘削形状が複雑で、作業員が仕上がりの姿をイメージしにくい点、2 ソイルセメントの製造プラントの位置が現場から遠く、搬入や安全管理への負担が大きい点である。

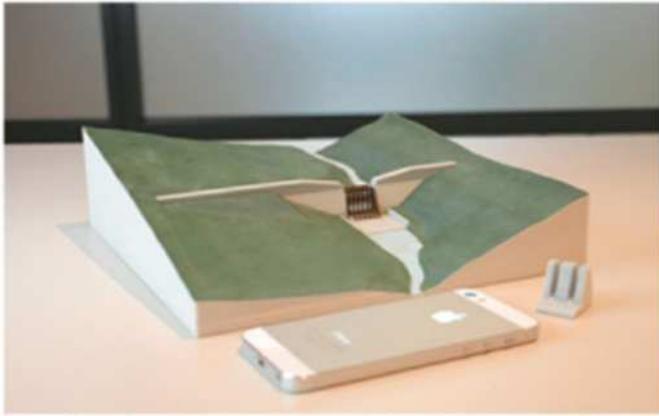
これらに対して、3次元の設計データやICT施工を全面活用して対処した。例えば、3次元設計データを3Dプリンタに入力して掘削後の仕上がり状態を模型で表現、現場全体で施工イメージの共有を図った。プラントの位置は、ドローン測量で得た3次元データを使ったシミュレーションで検討。現場内に置く仮設計画を練り上げた。

これらユニークな取り組みは発注者の国土交通省中国地方整備局にも大きなインパクトを与えた。評定点で85点の高得点を獲得した他、2020年度の局長表彰も受けている。

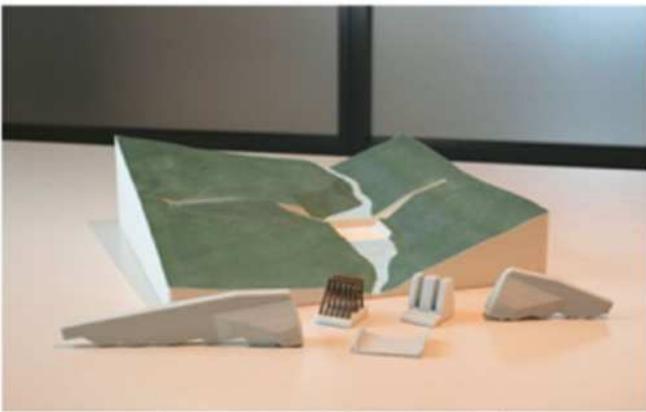
##### 【事例2】

和光技研株式会社では、平成24年度に3Dプリンタを導入し、一般の方へ説明会等で模型を作成、使用して構造物の形状を伝えた。説明の際に地中に隠れる部分がある土木構造物等では、二次元図面で正しい形状を認識していただくのは困難な場合があるため、以下の写真-3は、地表面形状といくつかのパーツに分割した砂防堰堤を3Dプリンタでそれぞれ出力し、組み換え可能な模型を製作した例である。

図面やパースでは理解しにくい構造も、参加者にパズルのように組み立ててもらった事で、形状をより正確に伝えることができた。



大きさは22×22×7 cm (1/500 スケール)



パズルのように各部に分かれます

写真-3 砂防堰堤の3Dプリンタ模型

### 3-2 建築工事の事例

- ・2023年5月：セレンディクス株式会社、長野佐久市において商用初となる3Dプリンタ店舗 serendix10 を完成。

[商用初、3Dプリンター店舗「serendix 10」が長野県佐久市で竣工 | セレンディクス株式会社のプレスリリース \(atpress.ne.jp\)](https://atpress.ne.jp)



写真-4 3Dプリンタ店舗 serendix10

- ・2022年2月：株式会社Polyuseは、群馬県渋川市にて、国内初の建築基準法に準拠した10m<sup>2</sup>以上の建築物を施工に成功。

[Polyuse 製 3D プリントでの 10 m<sup>2</sup>以上の建築物施工に国内初成功！！海外で先行する 3D プリント建築の国内適応技術を確立 | 株式会社 Polyuse のプレスリリース \(prt.imes.jp\)](https://prt.imes.jp/)



写真-5 建築物の組立状況



図-1 3Dプリンタ施工を行う建築物イメージ (面積：17m<sup>2</sup>)

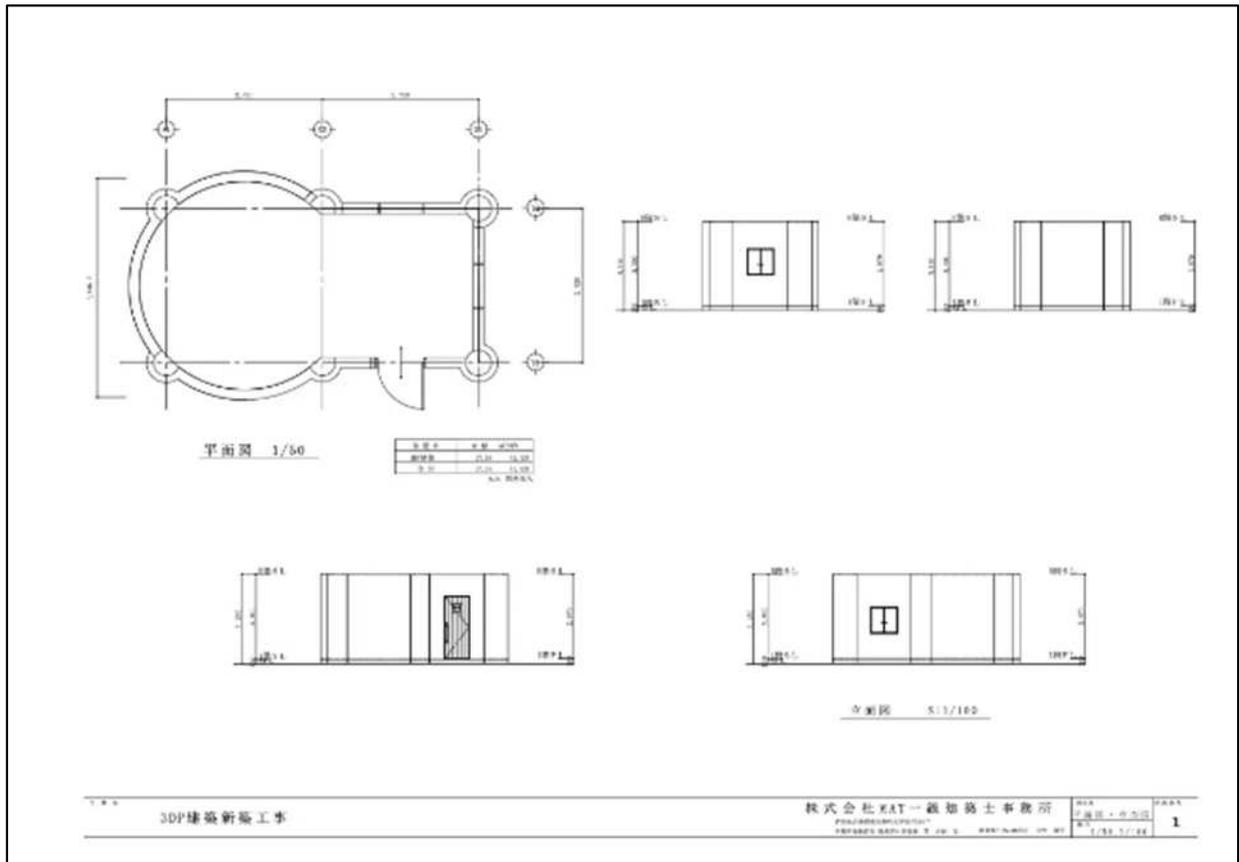


図-2 3Dプリンタ施工 新築建築工事図面

- ・2019年8月：大林組は、3Dプリンタ用特殊モルタルと超高強度繊維補強コンクリートを一体化する構造を開発。独自の積層制御技術および大型ロボットアームを用いた3Dプリンタで国内最大規模となる構造物「シェル型ベンチ（幅7,000mm，奥行き5,000mm，高さ2,500mm）」の製造した。

[3Dプリンター用特殊モルタルと超高強度繊維補強コンクリートとの複合構造を開発しました | ニュース | 大林組 \(obayashi.co.jp\)](#)



写真-6 シェル型ベンチ

### 3-3 土木工事の事例

3Dプリンタを活用した土木用工事部品の製造としては、株式会社Polyuseが国内各地で国交省や地方自治体、ゼネコンなどと協力の下に製作しているものが有名である。

例えば2021年6月には、前田建設工業株式会社と国内初となる建設用3Dプリンタを用いた実利用土木構造物の現場施工に成功している。(PRTIMES記事より引用。集水桝のプリンティング)



写真-7 集水桝のプリンティング

その他にも下記のような事例が公表されている。

- ・2022年4月：入交建設と、国内初となる建設用3Dプリンタを用いた実利用土木構造物の現場施工に成功。(デジコン記事から引用。集水桝のプリンティング)

[https://digital-construction.jp/column/351?fbclid=IwAR0hVfDI\\_vkltCE4oYKfeyMxV01ys14wy06ybVHOY3curopuWlQ-1baeBto](https://digital-construction.jp/column/351?fbclid=IwAR0hVfDI_vkltCE4oYKfeyMxV01ys14wy06ybVHOY3curopuWlQ-1baeBto)



写真-8 集水桝のプリンティング

- ・2022年9月：建設用3Dプリンタを用いた公共土木工事でのオンサイトプリンティングを国内初成功。(PRTIMES記事より引用. 車歩道境界縁石の現地プリンティング)

[https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000015.000049711.html](https://prt看mes.jp/main/html/rd/p/000000015.000049711.html)

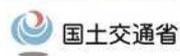


図-3 歩車道境界縁石の現地プリンティング

- ・2022年9月：中部地方初の建設用3Dプリンタの公共土木工事を実施。(PRTIMES記事より引用. 重力式擁壁のプリンティング)

<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000014.000049711.html>



図-4 重力式擁壁のプリティンク

土木での事例としては、先にも示したように集水桝や擁壁、縁石など、従来は現場打ちコンクリート施工やプレキャスト製品で施工されてきた。やや小振なコンクリート製品を現地なりに代替施工（製作・設置）する形で実施されているケースが多い。

#### 4. 委員会（土木学会，コンクリート工学会）の事例

建設用 3D プリンタを対象としている各種委員会について調査したところ，日本コンクリート工学会（JCI）と土木学会で活動していることが確認された。

##### 4-1 日本コンクリート工学会

日本コンクリート工学会では 2018 年から 3 年間に渡り、3D プリンティングに関する研究委員会が設置されていた。設置の経緯としては、我が国の 3D プリンティング技術は海外と比較して出遅れていたことから、建築、土木、材料分野の知見を統合して、体系的な技術発展と 3D プリンティングの水平展開を図ることを目的に発足した。委員会活動としては、2018 年に「3D プリンティングのコンクリート構造物への適用に関する FS 委員会」が設置され、1 年間の Feasibility Study ののち「3D プリンティングによるコンクリート構造物構築に関する研究委員会」で活動している。

活動では 3 つの WG に分かれ、3D プリンタのメリット、デメリットの抽出や活用法を検討する他産業 WG、設計や構造面での研究課題を検討する構造 WG、品質管理や試験方法、材料面の研究課題を検討する材料 WG である。各 WG を中心に、講演会やワークショップを開催し、2021 年 11 月に活動報告会をもって活動を終了している。

##### 4-2 土木学会

土木学会ではコンクリート委員会において「3D プリンティング技術の土木構造物への適用に関する研究小委員会」で 3D プリンタについての活動を行っている。この委員会は、前述のコンクリート工学会の「3D プリンティングによるコンクリート構造物構築に関する研究委員会」における土木分野の活動を継続したものとなっている。

活動内容としては、3 つのワーキンググループ（以下 WG）に分かれており、ケーススタディ WG、指針化検討 WG、契約・標準化 WG となっている。

ケーススタディ WG では、3D プリンタの有望な適用先を選定し、ケーススタディを通してメリットデメリット、課題を具体的かつ定量的に評価している。ケーススタディとして、先行事例を調査するとともに、サブワーキングとして具体的な適用方法を検討しており、駅舎の待合室と埋設型枠に適用した場合について検討を行っている。駅舎の待合室への適用では、従来のアルミの規制品と比べ自由に造形できる一方で、部材の軽量化が課題であることが示されている。埋設型枠での検討では、実際の事業で実施された柱脚を対象に、従来工法との設計、施工、コスト、工期の削減可能性について検討しており、適切な強度を有する材料を用いれば、セパレータの設置を省略し、縦横端太の総数も削減できる可能性があることが示されている。

指針化 WG では、3D プリンタを実部材の製作や構造物の構築への適用を想定し、計画から施工、維持管理に関する指針策定について検討を行っている。まず国内の事例を収集し、3D プリンタで適用する対象として、非構造部材、非構造部材埋設型枠、構造部材埋設型枠（耐久性照査不要）、構造部材埋設型枠、構造部材の 5 つのカテゴリに分類し、各カテゴリにおいて設計で考慮すべき項目や課題などを整理、抽出を行っている。次に、海外における施工事例について調査を行い、準拠あるいは参照している指針類について調査を行い、3D プリンタによる構造物の構築にあたり必要な検査と品質管理の在り方について体系化の検討を行っている。

契約・標準化 WG では、3D プリンタを土木構造物に適用していく上で生じると考えられる課題や解

決策の提言を目的に、標準化の検討、3D プリンタの適用にメリットのある事例の検討、契約形態や方法について提言を行っている。具体的には3D プリンタを適用する際において、場所打ちコンクリートと比較してコストが高くなり、発注者側の理解が得られないことに対して、VFM という支払いに対して最も価値の高いサービスを提供するという指標をもとに評価している。ほかにも数量の算出方法や設計に必要な情報など多角的な観点から検討を重ねている。

## 5. 発注者の動向

3Dプリンタの最大の利点は、多種多様な条件に応じて複雑な形状の目的物を3Dデジタルデータから高精度で容易に立体化することである。そのような特徴から、地形や近接物件に応じて形状の違う目的物をワンオフで施工する建設業においても有用な技術であり、近年、国交省など発注者が推進する建設DXやBIM/CIMにおける生産性向上の取組みにも合致する技術と言える。

しかし、他の製造業と比べて目的物の規模が大きく、より大きな構造的強度を求められる建設分野においては、3Dプリンタ自体の大型化や複合構造である鉄筋コンクリートと同等の強度の実現など、多くの点で課題があり実工事での導入はまだ少なく、環境整備が始まったばかりという状況である。

建設分野の動向としては3Dプリンタのメーカーや3Dプリントの専門会社とゼネコンとの共同開発による試験的な取組みからスタートし、これに発注者である国交省が追随するような形で、2022年頃から現場での実証実験やプリント材料の建築基準への対応が行われている（図-4、表-2）。

国交省以外の発注者（他の省庁、自治体、NEXCO、JR等）では、現時点では取組みがほとんど見られない。

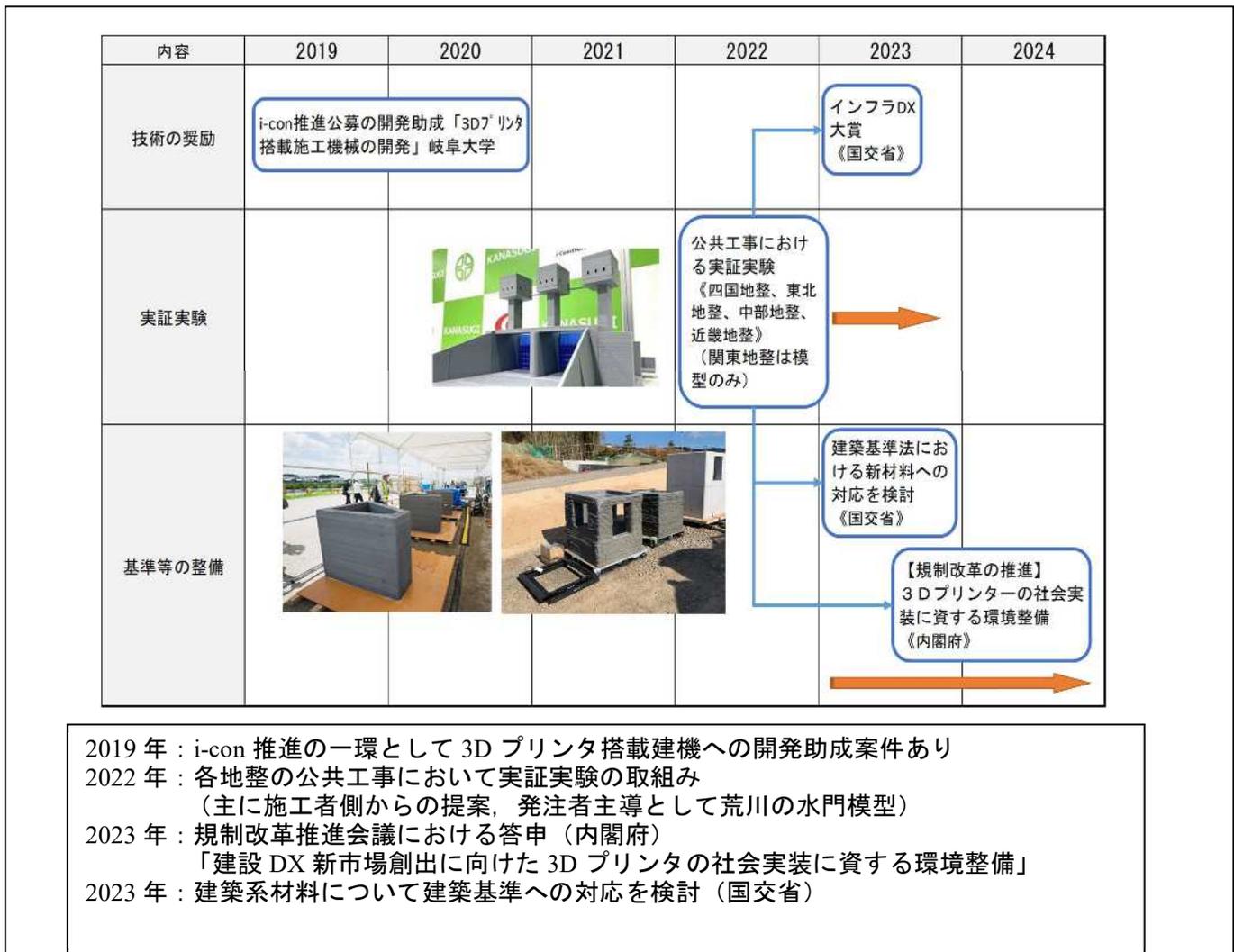


図-5. 発注者動向の時系列的整理

表-2. 発注者動向の調査結果一覧表

	資料名	発注者	時期	内 容
1	R1_i-construction を推進する 10 の技術（～R2）	国土交通省	2019/08	技術開発の支援 セメント系ハイブリッド 3D プリンタを ICT 建機に搭載するシステムの構築
2	R4 技術・業務研究発表論文_3D プリンタによる集水桝施工	四国地整	2022/02	公共工事で国内初施工した 3Dプリンタで作成した集水桝について評価
3	荒川調整池 BIMCIM 利活用事例の紹介	関東地整	2022/03	水門模型の印刷 白色の地形モデルを印刷し、模型にプロジェクトマッピングを行う.
4	山形河川国道事務所での 3D プリンタ施工の紹介	東北地整	2022/04	集水桝の作成, 現場見学会の開催
5	建設用 3D プリンタを活用し土木構造物（重力式擁壁）の施工	中部地整	2022/04	道路工事における重力式擁壁の作成
6	R5 研究発表論文_建設用 3D プリンタによる構造物の施工	近畿地整	2022/07	電線共同溝工事での 3Dプリンタによる境界ブロック現場で直接印刷（実証実験の紹介）
7	建築基準法における新材料・新技術への対応	国土交通省	2023/01	構造耐力上主要な部分などにモルタルを用いる場合は、大臣認定が必要
8	R4 年度インフラ DX 大賞	国土交通省	2023/02	インフラ分野にける優れた DX 技術 コンクリート構造物の施工工事における建設用 3D プリンタ
9	規制改革推進に関する答申（R5.6.1）	内閣府	2023/06	建設DX新市場創出に向けた建設用 3D プリンタの社会実装に資する環境整備

## 6. 3Dプリンタ活用のメリット

3Dプリンタ活用によるメリットとしては、以下の内容が考えられる。

- ① 意匠性の向上（要求性能に応じたデザインの柔軟性
- ② 省力化と人材不足の解消
- ③ 製作工期、製作時間の削減
- ④ 材料費の削減

### ① 意匠性の向上

形状条件にもよるが、3Dプリンタは複雑な3次元形状や曲面を直接作ることができるため、建築物の意匠性を高めることができる。固定した形状（例えばプレキャスト製品など）の一括大量製作にはコスト面などから優位性は劣る（価格競争として負ける）が、少量多品種、いわゆる一品ものの製作には自由度が高く、機能性に特化したような形状やユーザーが望む意匠形状を作成できるという点では適していると考えられる。

### ② 省力化と人材不足の解消

3Dプリンタによるパーツや構造体の製作方法には、現場に製作機を設置して直接部材をプリント・構築する方法と、専用工場などでプリント製作した部材を現場に搬入・設置する方法の2つが考えられる。いずれの方法においても、事前にデジタル空間上で3Dモデル形状データを作成し、3Dプリンタにデータを受け渡すことにより、ほぼ自動で実際の製作物を作るため、これまで現地にて多大な労力や職人が必要であった型枠作業（製作・設置）やコンクリート打設作業をある程度軽減・自動化でき、省力化や人材不足の解消につながる可能性がある。

### ③ 製作工期、製作時間の短縮

コンクリート構造物の一般的な施工では、型枠を組んでコンクリートを流し込んだ後、十分な強度が発現されるまで待つから、設置した型枠を解体・廃棄するという作業が発生する。一方、3Dプリンターなら（サポート材が必要となる場合もあるものの）ほぼ型枠なしで自由な造形が行えるため、従来の施工プロセスを大幅に短縮できる可能性がある。製作に必要な3D形状データを事前に3Dプリンタに送信しておけば、後は製作完了まで自動的に吐出ノズルが稼働し、形状を構築する。材料であるセメント系モルタルの配合設計にもよるが、従来よりも強度発現を待つ時間も短くすることが可能なことから、製作工期を大幅に縮めることができる。

### ④ 材料費の削減

従来の施工では施工の際に使う型枠をはじめ、大量の端材や打設に使用されなかった余剰コンクリートなどの廃棄物が発生していた。3Dプリンタでは直接積層にて形状を生成することから周辺型枠がほとんど必要なく、また積層に必要なセメント系モルタルの吐出量も事前に計算できるため、無駄の発生を防ぐことができる。最低限の材料を使うことで材料費の低減につながるだけでなく、型枠など様々な建材を運ぶ運搬コストなどをカットすることができる。

## 7. 3Dプリンタ活用における課題

3Dプリンタ活用における課題としては、以下の事項が考えられる。

- ① 形状による製作方法の工夫や正確性
- ② 製作や設備投資費用の高コスト性
- ③ 技術者不足
- ④ 建築としての質の担保
- ⑤ 法規制への対応

### ① 形状による製作への工夫や正確性

3Dプリンタでのモデル製作は、その造形過程上、ノズルから吐出されたセメント系モルタル材料を薄く層状に積層製作する方式が基本である。この方式のため不得意な形状面が存在する。

例えば、積層方向（上方向）に同一あるいは狭くなる形状の整形は得意だが、積層方向（上方向）に広がる形状や開口形状は積層時に支え（サポート）が不足するため、材料が垂れ下がり形状破綻する可能性が大きくなる。このため、材料を支えるためのボイド管設置や別途サポートを付加するなどの対処が必要となる場合や、形状によっては横倒しにして積層方向を変えるなど、整形に対する工夫が求められる場合があり、サポート材も含めた積層を行う場合には後に無駄となる材料消費量も多くなる。複雑な形状の場合、モデルの配置や製作の向きにより整形の容易さや作製精度が変わるため、一括形状での作成が難しい場合には、形状を分割してパーツ化し、後で合体するなどの作業上の検討も必要となる。どのように作成するとより効率的に成型できるかについては、製作企業の経験上のノウハウになり得るものと思われる。

またモデルは積層で製作されるため、必ず積層境界面での外形面の凸凹が生じる。積層ピッチを細かくすれば凹凸は目立たなくなるが、その分、単位量当たりの積層速度が遅くなることからモデル全体としての製作作業時間が伸びることとなる。どうしても平滑な面形成を行いたい場合には、別の対処法や工夫（例えば積層後の材料が固まるまでの時間内での面の均しや穴埋め、切削加工作業などのほか、従来方式のように型枠を併用して面を整形するなど）が必要と考えられる。

最近になり「積層作業の仕組みやノズルの動作上、平らな面で積層を開始する必要がある」という、従来の3Dプリンタで課題としていた製作条件を打破する新しい方式（具体的にはセンサーとノズルを組み合わせ、現地での凹凸地表面形状に沿わせて構造物を構築できる技術<sup>\*</sup>）も開発されている。

\* 2023.6, 大成建設ほか：斜面や曲面に施工可能な3Dプリンティング技術を開発

[https://www.taisei.co.jp/about\\_us/wn/2023/230607\\_9561.html](https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2023/230607_9561.html)

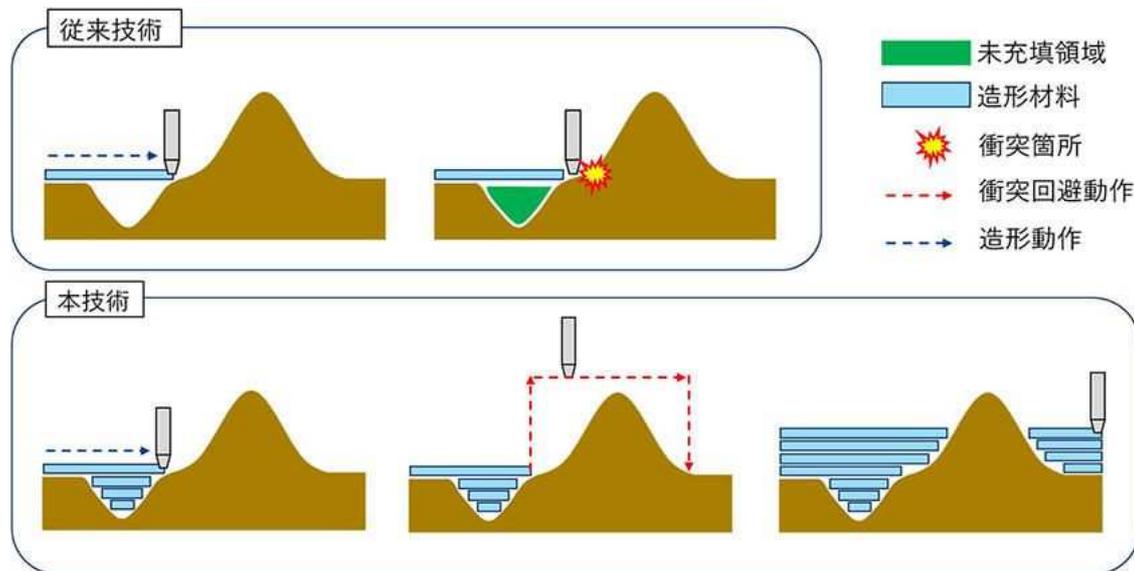


図-6 ツールパス生成における地盤への衝突を回避する新技術  
(大成建設の発表記事より図を引用)

## ② 製作や設備投資費用の高コスト性

建設用の3Dプリンタは、国内・海外を含めいくつかのメーカーが開発したものが市場に存在しているが、材料や製作機（プリンタ）を含めて特殊な用途に特化したものであり、未だ十分成熟した技術とは言えず、研究目的や試験的利用に留まる開発途上の技術となっている。また材料や製作機を含めた大量発注・生産によるスケールメリットでのコスト低下が十分期待できるまでに至る状態にはなく、導入実績においても十分とは言えないことから、現状では現場打ちやプレキャスト製品を含めた既存の建設サプライチェーンの方が圧倒的に効率的であり、製造設備としてもまだまだ高価なことから、普及の足かせになっているのが実情である。

建設系として比較的良好に用いられているガントリー型の3Dプリンタでは、動作制御に対する開発コストや機器価格が比較的低く抑えられる反面、移動や設置に手間がかかり、鉄筋などの障害物に対する吐出制御も難しい状況にある。多関節で動くロボットアーム型は、鉄筋などの障害物に対する吐出方向制御の柔軟性はあるが、アーム動作範囲（稼働距離）や機器設置に制限があり、また動作制御などの開発コストや機器自体の価格も高額となる傾向がある。

## ③ 技術者不足

実空間に3Dプリンタで構造体をプリントするための3次元デジタルモデルデータを事前に作成する（3次元CADでの操作が主となる）作業自体、非常に専門的なものである。ソフトウェア操作に慣れた技術者人材の育成・教育が必要不可欠となっている。

## ④ 建築としての品質の担保

建築物は、風雨・降雪や炎天下など様々な事象条件や、地震などの天災にさらされるなど、長期に渡る品質の確保が要求される。例えば、防水施工を例としても、金属板やゴムシート、アスファルト、シリコンなど複数の材料を部位ごとに駆使して止水性能を確保しており、「プリントする＝建てる」だけでは足りず、様々な工夫が必要となる。材料や構築方法を含め全く新しい技術を導入し、過酷な自然環境に耐えられる建築としての品質を担保する上では、まだ十分な実績があるとは言えないのが現状である。

## ⑤ 法規制への対応

建設業に関わる国の法律、例えば構造計算や材料の認定などについての基準（規準）類や規制は、既存の生産システムを前提に詳細に決められている。そのため、特に人が内部で過ごすような安全性に関わる構造物を対象とした3Dプリンタ技術の導入・利活用に対しては適用規準がなく（あるいは未整備のため）、乗り越えなくてはならない規制の壁も多く、普及の妨げとなっている。技術認定や規制緩和など、早急に整備されることが望まれる。

地震大国と呼ばれる日本では、世界に比べ耐震基準が非常に厳しく設定されており、法律（建築基準法における耐震基準）では、耐震性を確保するためコンクリートに鉄筋を組み込む必要がある。一般的に建設系3Dプリンタではセメント系モルタルを積層して構造体を構築する方法が採用されており、鉄筋敷設がノズルからの材料吐出や動作経路を妨げるため、壁内や床版内に鉄筋を内包するような躯体形状に対して、鉄筋を組んだ後から直接材料を吐出し一体化製作していくことは難しい状況にある。このため3Dプリンタで製作された構造体を外型枠として用い、内部に鉄筋を後から差し込んで一体化する清水建設のような方法<sup>\*</sup>も取り組まれているが、様々な規制をクリアできるレベルまでには達していない。

- \* 2021.2, 清水建設：3Dプリンティング技術を活用し、自由曲面形状の大規模コンクリート柱を構築

<https://www.shimz.co.jp/company/about/news-release/2021/2020053.html>

## 8. 今後の展望（3Dプリンタ技術の進化による可能性）

3D プリンタは、デザインの多様化ニーズへの対応や、また人手不足問題などによる省人化・省力化が喫緊の課題である建設業界においては生産性の向上が重要なテーマとなっていることから、これを解決できる手段の一つとして期待されている。

中国での事例もあるように 3D プリンタを使って 1 日未満で住宅が完成した報告もあり、法規制などの条件が整っていれば 3D プリンタを使って施工期間を大幅に短縮することができる。データを保存しておくだけで好きな時に必要な分だけ製作することができ、施工で一時的に必要な金型・型枠の製作や材料の調達・在庫が不要となるため、少人数で作業を進めることができる。材料の調達や運搬、製作に制限がある宇宙空間（月）での基地建設構想など、将来の技術適用の可能性を模索する政府や企業の動きも話題となっている。

現在課題となっている様々な課題を克服し、技術が進化することで更に適用範囲が広がっていくことが期待されている。

## 第5編 建設分野におけるデジタルツイン技術の利用についての現状、課題と将来性について

### 1. はじめに

近年、IoT や AI、VR/AR、ビッグデータ、ロボティクスなど、様々なデジタルデータ処理技術の進化やセンサー類の発達により「デジタルツイン (Digital Twin)」という概念が注目されている。

デジタルツインは、現実世界の物体や環境から収集したデータをもとに、コンピューター上の仮想空間に全く同じ環境をあたかも双子のように再現するテクノロジーであり、近年、製造業や建設業だけでなく、エネルギー、医療、金融など、さまざまな分野での活用が始まっている。

#### 1-1 デジタルツインの歴史および背景

デジタルツインの原型とも言える「現実空間とデジタル空間を対にして扱うこと」を最初に採用したのは、1960年代のアメリカ航空宇宙局 (NASA) の宇宙船開発で用いられた「ペアリングテクノロジー」だと言われている。

1991年には米イェール大学のデビッド・ゲレルンター氏が、著書「Mirror Worlds」の中で概念を初めて提唱して、デジタルツインを「物理世界にあるオブジェクトの完全なデジタル表現」と定義し、その可能性について論じた。その後ミシガン大学のマイケル・グリーブス氏がこの考え方を製造業に応用し、2002年に開催された Society of Manufacturing Engineers (製造技術者協会) の会議で正式に紹介した。

2010年には、NASA のジョン・ヴィッカーズ氏が「デジタルツインロードマップ」の中で「デジタルツイン」という用語を発表し、デジタルツインの概念を広く普及させようとした。さらに2017年にガートナー社がデジタルツインを戦略的テクノロジーの1つとして選定したことにより、多くの人々に知られるようになった。

デジタルツインが注目されている最大の理由は、近年 IoT や AI、VR などの技術が劇的に進化し、再現される現実世界の解像度が飛躍的に向上したことにより、事象の詳細を把握するだけでなく、リアルタイムに構築・分析をすることで、最適な解決策を見つけることが可能となったことにある。

現代では、あらゆる産業の DX (デジタルトランスフォーメーション) の取り組みが進んでいるが、その本質は「データを活用して、いかに質の高い改善判断を行えるようにするか」にある。その際、現実のモノや人などの事象をデータ化し、それらを紐付けて重要な要素を抽出した上で可視化し、直感的に理解できるようにするための行程が必要不可欠となるが、その課題解決の要としてデジタルツインの活用が期待されている。

世の中の DX (デジタルトランスフォーメーション) が進むにつれて、データ活用の重要性がますます高まっている一方で、世の中のデータ量は増え続け、現在も毎秒ごとに人間が想像できる量を超えるデータが世界中で生み出されている。こうした膨大なデータを理解しやすく可視化して、直感的に扱えないだろうか—そんな課題の解決に役立つと期待されているのが「デジタルツイン」と呼ばれる新しい技術である。

## 2. デジタルツインの概要

### 2-1 デジタルツインの概要説明

デジタルツインとは、「現実空間のヒト・モノ・コトの様々なデジタル情報を IOT などで集め、コンピューター上の仮想空間に全く同じ環境をあたかも双子のように再現し、送信されたデータをサイバー空間上に表現する先進技術」を指す。現実世界の環境を仮想空間にコピーする鏡の中の世界のようなイメージであり、「デジタルの双子」の意味を込めてデジタルツインと呼ばれている。

デジタルツインは従来の仮想空間と異なり、よりリアルな空間をリアルタイムで再現できることが特徴である。仮想空間では、収集した膨大なデータをもとに、限りなく現実に近い物理的なシミュレーションや分析ができるため、製造工程やサービスの在り方を改善するうえで有効な手段となる。

この技術を用いることで、現実世界の物理的オブジェクトの状態を

シミュレーションしたり、分析したり、実際の工事の着手前に、想定される課題や改善策を検討することができる。その際、現実のモノや人などの事象をデータ化し、それらを紐付けて重要な要素を抽出した上で可視化し、直感的に理解できるようにするための行程が必要不可欠であるが、デジタルツインはまさに、DX 時代においてデータを活用した課題解決の要となる。

デジタルツインは、物理的な「モノ」のデジタル空間上の複製であり、その「モノ」から収集した様々なデータを利用して、その性能や状態をシミュレーションしたり、最適化したりできることから、インターネット (IoT)、人工知能 (AI)、機械学習 (ML) などの技術と組み合わせて、さまざまな産業分野で応用されている。例えば、製造分野では、製品やプロセスの開発、運用、保守などにデジタルツインを使用して、効率性や品質を向上させることができる。エネルギー分野では、発電や送電のシステムにデジタルツインを使用して、性能や安全性を確保することができる。

建設分野では、建物や橋梁などの大規模なプロジェクトにデジタルツインを使用して、設計や管理を最適化することができる。特に土木技術者にとっては、3D や 4D の空間データをリアルタイムで表示したり、建築中の環境に拡張現実システムを組み込むことができたりと非常に有用な技術である。

BIM/CIM モデルは、構造物や地形などの 3 次元形状だけでなく、属性情報や時系列情報なども含む 4 次元、積算情報などを含む 5 次元のデジタルツインであり、これを利用することで、関係者間の情報共有やコミュニケーション、品質管理や施工プロセスの効率化などが可能となる。

遠隔臨場や自動化・自律化技術では、ドローンやカメラなどのセンサーから得られるリアルタイムのデータをデジタルツインに反映させることで、現場の状況を遠隔から確認したり、重機を遠隔操作したり、AI やロボットによる施工や点検を行ったりすることが可能となる。

デジタルツイン技術は、現実空間とサイバー空間の世界をつなぐことで、さまざまな産業分野で価値を創出する可能性を秘めているが、デジタルツインという用語に対するイメージは、それに関わる人によって様々な捉え方や広がりがある。

デジタルツイン技術は、今後もさまざまな分野で活用が進み、私たちの生活をより豊かで便利なものにしていくことが期待されている。

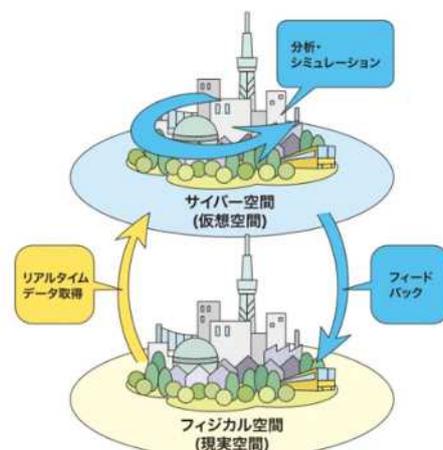


図-1 デジタルツインって何？  
(総務省サイトより引用)

## 2-2 デジタルツインと類似の用語・概念とその違い

ここではデジタルツインと類似の用語・概念について示すとともに、それらの違いについて述べる。

### (1) クロスリアリティ環境 (XR : Cross Reality)

デジタルツインは、現実世界を「再現」することに重点をおくのにに対し、クロスリアリティ環境は、現実世界と仮想世界を「融合」させることに重点をおく。

仮想空間と現実空間を統合することで、現実世界のデータを可視化し、直感的に理解できるようにすることで、業務の効率化や変革を加速させることができる。VR (仮想現実)、AR (拡張現実)、MR (複合現実) などの技術を組み合わせて使用されることがある。

### (2) コスペース (Co-Space)

コスペースとは、現実世界と仮想世界を融合させた空間のことを指す。コスペースは、現実世界と仮想世界を「融合」させることに重点をおく。

### (3) ミラーモデル (Mirror Model)

ミラーモデルとは、現実世界と仮想世界を同期させるためのモデルのことを指す。ミラーモデルは、現実世界と仮想世界を「同期」させることに重点をおく。

### (4) メタバース (Metaverse)

メタバースとは、インターネット上に構築された人数参加型の3次元仮想空間のことを指す。「超越」や「高次元」を意味する「メタ (meta)」と、「宇宙」や「世界」を表す「ユニバース (universe)」をかけた造語である。メタバースでは、ユーザーは自身の分身となるアバターを使って生活をおくるほか、仮想空間内での物の売買、他者とのコミュニケーション、イベント開催、散歩などが可能である。主にオンラインゲームで先行して活用されていたが、近年ではビジネスや音楽などのシーンでもメタバースが利用され始めている。

建設業界においても、バーチャルオフィスで仕事をしたり、仮想空間でオンライン会議やバーチャル会議に参加したりと、仮想世界は我々の身近な存在になりつつある。

### デジタルツインとメタバースの違い

デジタルツインとメタバースはどちらも「デジタルによる仮想空間」を活用した技術という意味で似ている。しかしメタバースは必ずしも現実世界の忠実な反映である必要はなく、例えば人が空を飛んだり、武器を持ってモンスターと戦ったりと、現実ではありえない虚構の空間を創り出すこともメタバースの一つだと考えられている。一方、デジタルツインは現実世界の写し絵であることに大きな意味がある。目的はあくまでも、仮想空間を活用しながら現実世界で起きていることを正しく把握し、現実世界の維持や改善につなげることがデジタルツインに求められる役割である。

デジタルツインは、現実世界の物体やプロセスをデジタルモデルとして再現する一方、メタバースはユーザーが対話や創造、共有を行う仮想空間を指す。

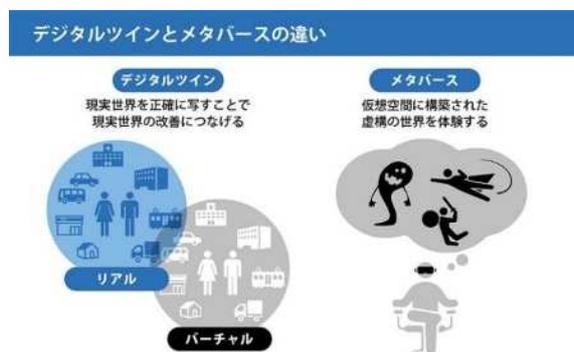


図-2 デジタルツインとメタバースの違い  
(日立グループサイトより引用)

デジタルツインはリアルな状態のモデル化とデータ活用に焦点を当て、製造プロセスの最適化や効率化に役立つのに対して、メタバースは仮想現実の世界の構築と対話性を重視したものである。

#### (5) サイバー・フィジカル・システム (CPS: Cyber Physical System)

サイバーフィジカルシステム (CPS) とは、実世界 (フィジカル空間) とサイバー世界が一体となることで、より高度な社会の実現を目指すサービスやシステムのことである。

実世界にある多種多様なデータをセンサーなどで収集し、サイバー空間で大規模データ処理をして分析することで、産業の活性化や社会問題の解決ができるような新たな価値や情報を創出することができる。

私たちとインターネット空間の接点は、今やパソコンやスマートフォンなどの端末に限られることなく、IoT 技術の浸透によって、車や家、更には身の回りにあるあらゆる「モノ」が私たち実世界にいる人間とサイバー世界を繋ぐ接点になっている。この様々な IoT デバイスによって収集されたデータは、他でも集められてきたありとあらゆる分野のデータと連携し、インターネットを介してサイバー世界に蓄積され、サイバー空間の高度なコンピューティング能力により、数値化され定量的に分析される。

#### デジタルツインと CPS の違い

CPS (Cyber-Physical System) とは、物理的なシステムとネットワークが密接に結びつき、リアルタイムで相互にデータや情報をやりとりするシステムを指す。

デジタルツインは主にデータのモデリングと分析に焦点を当てており、物理オブジェクトのデジタルな再現によって理解を深める手段である。一方、CPS は物理的なシステムとコンピューターネットワークの統合を強調するというアプローチである。

デジタルツインと CPS (サイバーフィジカルシステム) は同じ概念なので明確な違いはないが、あえて違いを表現するとしたら、CPS は個別の指標におけるデータ活用のサイクルを示しているのに対し、デジタルツインはそのデータの集合体をサイバー空間に再現した物理モデルのことを意味していることである。

#### (6) デジタルトランスフォーメーション (DX: Digital Transformation)

DX (Digital Transformation) とは、企業がビックデータなどのデータと AI や IoT を始めとするデジタル技術を活用して、業務プロセスを改善してだけでなく、製品やサービス、ビジネスモデルそのものを変革するとともに、組織、企業文化、風土をも改革し、競争上の優位性を確立することである。

#### デジタルツインと DX の違い

デジタルツインは物理的な対象をデジタルモデル化するアプローチを指し、製品やプロセスの再現に活用される。一方、DX (デジタルトランスフォーメーション) は組織全体のビジネスモデルやプロセスを、デジタル技術を用いて革新する戦略を指す。

デジタルツインは製品やプロセスの理解と改善を支援し、DX は組織全体の変革を促進する戦略として位置付けられることが多い。

## 2-3 デジタルツインを支える技術

デジタルツインを構築するには、現実世界（物理空間）の状態を感知するセンサーや情報送信のためのネットワーク、大量のデータを保管・加工・分析する情報処理基盤、そして分析結果を視覚化する手段など様々な技術が必要とされる。具体的には以下の技術などが挙げられる。

- IoT
- AI
- 5G
- VR/AR/MR
- BIM/CIM
- ビッグデータ
- クラウドコンピューティング
- 自動運転技術
- セキュリティ

### (1) IoT (Internet of Things)

IoT（モノのインターネット）は、あらゆるモノがインターネットと接続して通信を行う技術である。リアルな世界を反映した高精度な仮想空間を再現するためには、センサーやカメラなどから収集した大量の情報を、インターネットを介して送受信することが必要となる。

### (2) AI (Artificial Intelligence)

IoTが収集した膨大なデータは、使いやすいように加工され分析や予測に使用される。この膨大なデータの分析や予測を、精度良く行うのがAI（人工知能）である。AIは膨大なデータを効率的に分析することに長けており、これを上手く利用することで、収集したデータから異常や新しいパターンの発見、将来の状況の予測などが可能になる。

### (3) 5G (5th Generation Mobile Communication System)

IoTで取得した大量のデータを集めるには、高速かつ大容量で低遅延の通信技術が必要となる。そのための手段のひとつが「5G（第5世代移動通信システム）」である。5Gでは大容量のデータを超高速、超低遅延で送受信できるため、リアルタイムでの仮想空間へのデータ反映に高い効果が見込める。

### (4) VR・AR・MR

デジタルツインには、AIが行った分析や予測結果を可視化して、人にわかりやすく見せる技術も必要である。それを可能とするのが、ARやVRといった技術である。

- VR（仮想現実）：仮想空間を現実の世界のように体感できる技術
- AR（拡張現実）：現実世界にデジタルコンテンツを重ねて表示する技術
- MR（複合現実）：現実世界と仮想世界を融合させた技術

仮想空間で起きた不具合やエラーを視覚化することで、現実世界（物理空間）へのよりリアルなフィードバックが得られるため、AR・VR・MR技術の発展には期待が寄せられています。

## (5) BIM/CIM

BIM/CIMは、計画、調査、設計段階から3Dモデルを導入し、その後の施工、維持管理においても3Dモデルを連携させることで、事業全体にわたり関係者間の情報共有を容易にするだけでなく、一連の建設生産・管理システムの効率化・高度化を図ることを目的としたワークフローを指す。

## (6) ビッグデータ

ビッグデータ (Big Data) とは、従来のデータベース管理システムなどでは記録や保管、解析が難しい巨大なデータ群を指す。この「ビッグ」が指すものは量的側面だけではなく、さまざまな種類や形式のデータによって構成された非構造化データを含んでおり、情報源も多様である。

## (7) クラウドコンピューティング

クラウドコンピューティングは、インターネットを介してストレージ、サーバー、アプリケーションなどを提供するデリバリーモデルであり、一般的には従量制課金によってオンデマンドでサービスとして提供される。

「クラウド」は、物理的な場所ではなく、主にローカルマシンやプライベートデータセンターを置き換えるITリソースを管理する手法である。このクラウドコンピューティングモデルでは、ユーザーはリモートプロバイダーがオンラインで提供する仮想コンピューティング、ネットワーク、およびストレージリソースにアクセスする。

高価なコンピューティングやストレージなどのITインフラストラクチャを購入・維持する必要がないうえ、実績ある専門知識を利用してこうした機器を管理できるこのモデルは、クラウドサービスプロバイダーが責任の多くを負う。

## (8) 自動運転技術

自動運転技術とは、ドライバーが行う運転中の認知、判断、操作（加速、操舵、制動など）などを、ドライバーの代わりにシステム（機械）が自動的に行う技術のことを指す。自動運転技術は、自動車に限らず電車や飛行機、フェリーなどの乗り物、建設分野では重機やドローン等で活用が広がっている。

## (9) セキュリティ

サイバー攻撃などセキュリティ上の脅威が最近では社会問題となっており、デジタルツインの導入においても、以下のようなセキュリティ対策が必要となる。

- データの暗号化
- 権限の無い者がデータを閲覧できないようにアクセス権限制御や認証を厳格にする
- 更新プログラムなどの定期的な適用によるシステムぜい弱性の解消
- ファイアウォールなどによるネットワークセキュリティ
- データ操作履歴などのログ監視
- 機器やデバイスの物理的な保護
- 定期的な利用者トレーニング

## 2-4 デジタルツイン活用のメリット/デメリット

デジタルツインを活用する一般的なメリットとしては、複雑なデータを可視化した上で、課題を発見しやすくすることで、業務の効率化や変革を加速させることができる点である。

### (1) 建設業での活用におけるメリット

デジタルツインを建設業において活用するメリットとしては、主に以下の点が考えられる。

#### a) 調達効率化

建物の設計データをデジタルツインで活用することにより、自動で調達資材の見積もりを完了させることが可能となる。これにより調達する材料の種類・数量・タイミングをデータに基づき最適化することができる。

#### b) 建物の設計シミュレーション

建物の設計を従来の2D図面ベースではなく、CADなどをベースとする3Dモデルベースで行い、VR/MRを用いて、遠隔地のメンバーと3Dモデルを共有しながら協同設計作業を行ったり、デジタルツイン上で耐震や耐熱性能、人流などのシミュレーションを行いながら比較検討することができる。

#### c) 施工のシミュレーション

建設の際にどのような作業計画手順で施工を進め、進捗に応じてどのように内容修正すべきかといった検討ツールとしてデジタルツインの活用が進んでいる。施工計画の修正に関しては、実際に施工が進むなかで取得された各種のデータをバーチャルな施工計画モデルに取り込み、算出された最適な施工計画をリアルな施工現場に適用して効果を検証するというループにより、常に最適化を推し進めるという仕組みを構築することも可能である。これにより、一度建設してしまうと修正の難しい施工現場の作業精度の向上やコスト、リードタイムの最小化を目指した施工を実現することができる。

#### d) 作業員への3Dでの施工指示

従来の作業指示は2D図面を用いて行うことが主流だが、デジタルツイン・MRなどを活用して3Dのデジタルガイダンスを基に説明を行うことにより、直感的に理解しやすく分かり易い作業指示ができる。

この活用により、個人の経験や能力の差に依存しない作業の平準化が可能となり、施工品質のコントロールを行うことが可能となる。

#### e) 建物のメンテナンス・アフターサービス

デジタルツインを活用することで、施工後の建物や設備の不備のリスクを事前に予測したり、遠隔地からアフターサービスを実施するといったことが可能となる。この活用により、適切なタイミングでコストを抑えながらのメンテナンス作業やアフターサービスを提供することが可能となる。

#### f) バリューチェーン全体の最適化

調達・設計・施工・アフターサービスというバリューチェーンの一連のデータをデジタルツイン上で統合・分析を行うことで、バリューチェーン全体での設計や運用の最適化を図ることが可能となる。この活用により、各プロセス単位での最適化に留まっていた取り組みを、バリューチェーン全体での最適化に発展させることが可能となる。

### g) 技術の伝承

デジタルツインを活用し、卓越した技術を持つ作業員が遠隔地から作業指示を行ったり、各作業員の仕事の進め方のデータが可視化・集約されることで、今まで共有されていなかった価値あるノウハウを、デジタルツインを通じて他社員に継承していくことができる。

## (2) 建設業での活用におけるデメリット

デジタルツインを建設業に活用するデメリットとしては、主に以下の点が考えられる。

### a) 高額な費用負担

システムを構築するための初期投資、システムのメンテナンス、運用自体の費用に加えて、デジタルツインによるシミュレーションの基となるデータの収集にも費用が発生し、高額な費用負担の発生が想定される。特に、デジタルツインは現実を忠実に再現するためには複数のデータを統合してシミュレーションを行うため、収集する必要のあるデータの種類が多くなりやすく、データ収集の費用がかさみやすい。

### b) 導入と管理に高度な技術力が必要

デジタルツインを長期的に自社ビジネスに活用することが想定される場合、必要となるシミュレーションが都度変化する度にシステムの改修が必要となり、導入と運用/保守の両方に高度な技術力が必要となる。

自社にデジタルツインに精通した人材を持たない場合、システムの運用/保守に必要な人材を常に外注する必要があるが、外注先とのコミュニケーションの質が低い場合には、自社に最適なデジタルツイン活用に繋がらない可能性がある。

### c) セキュリティ対策が必要

デジタルツインを実現するにあたり、さまざまな情報をデータ化してネットワーク上に流す必要が生じることから、情報漏えいなど特有のセキュリティリスクが発生する可能性があり、不正アクセス対策や情報漏えい対策などのセキュリティ対策が必要となる。

5-2 ではデジタルツインの概要について述べ、特に「5-2-3 デジタルツインを支える技術」に焦点を当てた。

5-3 以降では官公庁や民間企業を含めた建設分野におけるデジタルツインの取り組みや活用事例を紹介するとともに、実際に活用する上で明らかとなった課題や問題点、今後の展望などについて取りまとめることとした。

### 3. デジタルツインの取り組み・活用事例

#### 3-1 国、地方公共団体における事例

国や地方公共団体において、様々な目的でデジタルツインの取り組みが行われている。本章では建設分野に関連する事例として、国土交通省、東京都、静岡県の実例を記載する。なお政府各省庁で行われているデジタルツインへの取組については、総務省が発行している「令和5年度版情報通信白書」に詳細が記載されている。

##### (1) 国土交通省の取組み

国土交通省では、保有する多くのデータと民間のデータを連携したデジタルツインにより、業務の効率化やスマートシティ等の施策の高度化、産学官連携によるイノベーションの創出を目的に、国土交通データプラットフォームの構築を進めている。このプラットフォームを通じて、3D都市モデルを基盤とした「まちづくりのデジタルトランスフォーメーション(DX)」を進めている。国土交通省では、3D都市モデルの活用のためにオープンデータ化を行っており、災害時の被害想定や交通渋滞の予測、都市計画の活用など、様々な用途に利用することができる。

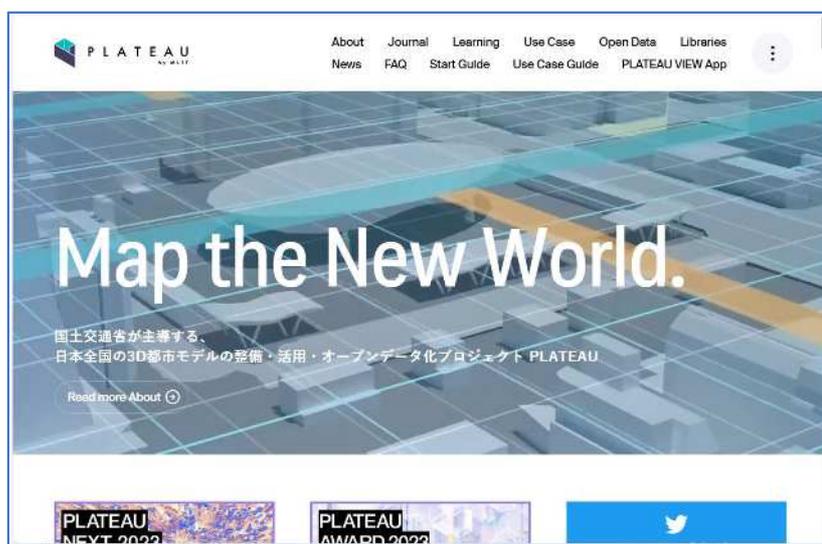


図-3 国土交通省 HP

(画像出典:[https://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08\\_hh\\_000819.html](https://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08_hh_000819.html))

##### (2) 東京都の取組み

東京都は行政自治におけるさまざまな課題を解決するため、都市のデジタルツインを産官学一体で実現する「東京都デジタルツイン実現プロジェクト」を推進している。デジタルツインを活用することで、少子高齢化や人口減少、人流・物流の変化、気候変動対策、首都直下型地震に対する備えなど、多様な課題の解決と都民のQOL(クオリティ・オブ・ライフ:生活の質)向上を目指している。

デジタルツインの実現ステップとして、デジタルツイン基盤構築、データエコシステムの構築、仕様・ルール整備、重点分野のサービス実装などを挙げ、庁内の日常業務やサービスをデジタルツインで高度化するため、庁内外の地理空間データを集約し横断的にデータ活用できるよう「デジタルツイン基盤」の構築に取り組むほか、デジタルツインの社会実装に向けた取り組みを支援するための指針としてデジタルツイン活用ガイドラインやロードマップを公開している。



図-4 「東京都デジタルツイン実現プロジェクト」公式サイト

(画像出典:<https://info.tokyo-digitaltwin.metro.tokyo.lg.jp/>)

### (3) 静岡県の取組み

静岡県では現実空間をレーザスキャナ等で広範囲に測量することにより「3次元点群データ」を取得・蓄積し、オープンデータ化することで、まちづくり、インフラの維持管理、防災対策だけでなく観光や自動運転、エンタメなど3次元点群データ活用による「誰もが安全・安心かつ快適で質の高い生活を送ることができる美しく持続可能な社会」の実現を目指す「バーチャル静岡」を構築している。



図-5 VIRTUAL SHIZUOKA 特設サイト

(画像出典:<https://virtualshizuokaproject.my.canva.site/#>)

### 3-2 民間企業（建設業ゼネコン各社）における事例

建設業、とりわけ主要ゼネコン各社におけるデジタルツインの取り組みについて、各社のホームページ上で公開しているプレスリリース情報を元に調査した。デジタルツインの利用シーン毎に分けると、大きく以下3つに分類された。

- 施工中の現場での利用（土木、建築）
- 施工後の建物や工場内での利用（施工中の BIM を活用した建築案件向け多数あり）  
→建物に関しては、建物 OS やファシリティマネジメントへ展開
- スマートシティ等の都市レベルでの利用 →都市 OS（都市基盤を支えるソフトウェア）への展開

土木分野の利用シーンは現場での施工を対象としたものが主であるのに対し、BIM が先行している建築分野では、施工後の建物の維持管理、さらに都市レベルでの利用を対象とした案件も散見されたのが印象的である。

以下に土木の施工で活用している事例に着目し、どのようなツール（プラットフォーム）や利用を行っているかについて整理した。

#### （1）大林組： デジタルツイン用のシステムを開発

大林組では、デジタルツイン用のシステムを開発している。開発したデジタルツインアプリは、デジタルツインを扱う上で課題となっている高性能な PC を必要とするハード面の課題と、専用ソフトウェアを扱うソフト面の課題解決を目的に、高性能 PC やソフトのスキルを不要としたデジタルツインシステムを開発している。容易な操作性の上、クラウド上にデータを保存しているため場所を選ばずにデジタルツインへのデータのアクセスを可能としている。



図-6 建設現場のデジタルツインを構築できる「デジタルツインアプリ」を開発  
(画像出典:[https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20230412\\_\\_2.html](https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20230412__2.html))

## (2) 清水建設： 3次元モデルシステムをデジタルツインのプラットフォーム化

清水建設では、トンネル工事向けの3次元モデルを扱うシステムを開発し、デジタルツインのプラットフォームとして活用している。清水建設が開発したSG-ReGridはトンネル工事の施工中に取得した前方探査のデータをもとに、最新の3次元地質モデルをアップデートするシステムを開発した。このシステムを逐次更新した3次元地質モデルを、山岳トンネル向け施工プラットフォームのデジタルツインとして活用し、安全性や生産性の向上を目指している。

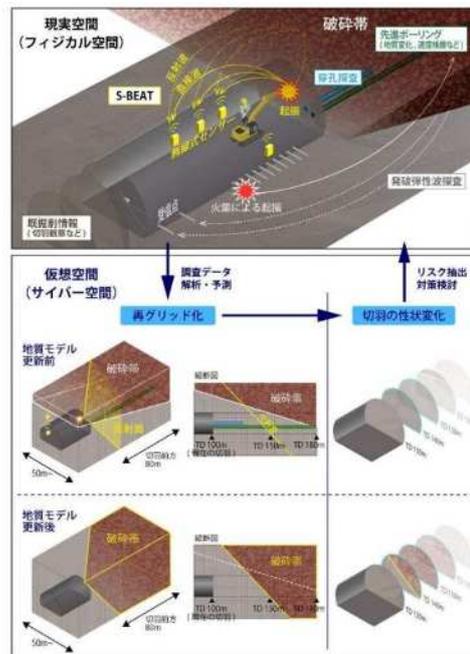


図-7 3次元地質モデルの逐次更新システム「SG-ReGrid」を開発

(画像出典:<https://www.shimz.co.jp/company/about/news-release/2022/2022013.html>)

## (3) 大成建設： 現場内の情報（映像、IoT データ）の可視化ツールを活用

大成建設では現場内の情報を可視化するツールを開発し、デジタルツインのプラットフォームとして活用を進めている。開発したT-iDigital Fieldは、現場内の映像やIoT機器のデータを用いて可視化し、場所を問わずリアルタイムで情報共有できる現場管理システムであり、このシステムをデジタルツインのプラットフォームとしている。



図-8 映像・IoTデータを活用した現場管理システム「T-iDigital Field」を開発、

(画像出典:[https://www.taisei.co.jp/about\\_us/wn/2020/200727\\_4966.html](https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2020/200727_4966.html))

#### (4) 鹿島建設： 現場内の情報（資機材管理）の可視化ツールを開発

鹿島建設では、現場内の状況把握を目的としたシステムを開発している。開発したシステムは資機材管理を目的に、ドローンの空撮映像から資機材を撮影し、AIが資機材を認識後その位置を3Dモデル上に表示するシステムである。従来現場職員が現場内を巡回して管理していた資機材管理の作業を省力化する効果がある。

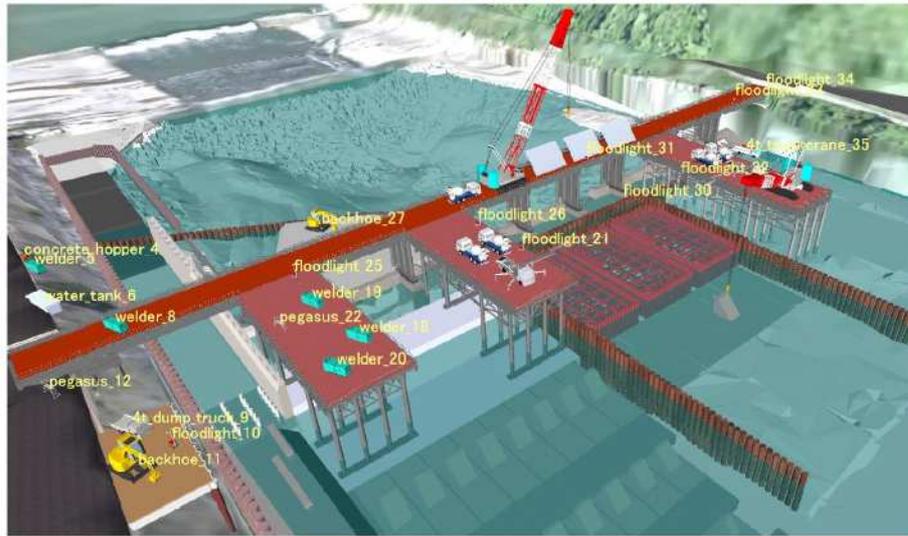


図-9 AI とドローンによる新たな資機材管理システムで作業時間を 75%削減

(画像出典:<https://www.kajima.co.jp/news/press/202307/19c1-j.htm>)

デジタルツインのツールとしては、3次元モデルに着目したものや現場のデータ収集システムから派生したものなど各社で異なり、デジタルツインへのアプローチの仕方に違いが出ている。

土木でのデジタルツインの使い方としては、3次元モデルをベースにしているものよりも、現場のデータを収集しての統合化に指向している印象がある。

### 3-3 他産業、海外における事例

他産業や海外においてもデジタルツインは様々な形で活用されている。活用シーンとしては、工場の効率化や、遠隔支援、都市レベルでの活用など多岐に亘っている。

#### (1) 工場の効率化

工場の効率化の活用では、エアコンなどを製造するダイキン工業ではデジタルツインを用いて生産管理を行っている。正常ライン上に各種センサーを設置し、取得したデータや温度、CO2濃度データなどをリアルタイムでデジタルツイン上に反映し、異常予測機能を用いて重大インシデントを未然に防ぐ取り組みを行っており、前年度比で3割のロスを削減している。

海外の事例では、自動車メーカーのフォードは、工場のデジタルツインを活用して、生産ラインの効率化や品質管理に取り組んでいる。また、航空機メーカーのボーイングは、航空機のデジタルツインを活用して、新製品開発の検証や保守・メンテナンスの効率化に取り組んでいる。

#### (2) 遠隔支援への活用

化学総合メーカーの旭化成では、2021年に水素製造プラントにデジタルツインを導入している。設備異常が発生した場合に、ベテラン技術者が現場に不在の場合にリモートで対応できる仕組みを構築し、将来的には国内から海外プラントの支援も視野に入れている。



図-10 水素製造プラントにデジタルツインを導入

(画像出典:<https://www.asahi-kasei.com/>)

#### (3) 都市開発での活用

都市レベルでの活用事例では、トヨタとシンガポールの事例について紹介する。

トヨタ自動車に取り組んでいる都市開発のプロジェクト、「Woven City (ウーブン・シティ)」においてもデジタルツインが活用されている。Woven Cityはモノやサービスが情報でつながる時代を見据え、テクノロジーやサービスの実証実験をする都市で、技術開発や検証をスピーディに行うためのプラットフォームとしてデジタルツインが活用されている。

シンガポールでは政府が自然、建物、道路、人、車などのあらゆるデータを集約し、世界で初めて国全体のデジタルツイン化に成功している。これらは最適な都市計画の策定や自然災害のリスク評価、最適な交通ルートの提案など多岐にわたっている。



図-11 トヨタ UbenCity

(画像出典: <https://www.woven-city.global/jpn>)

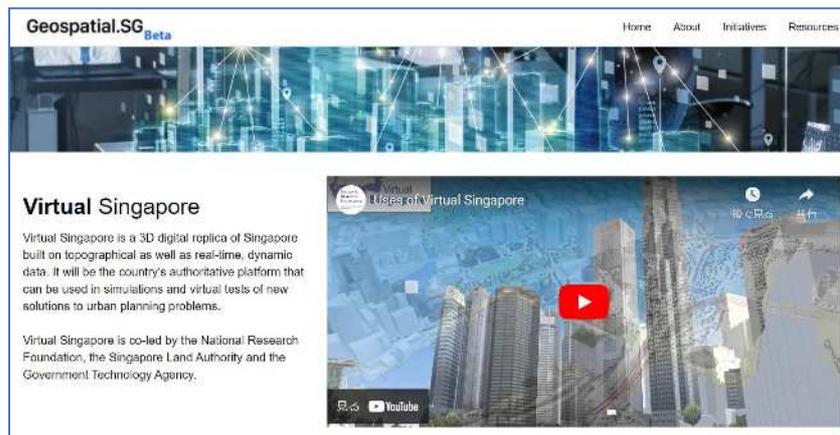


図-12 バーチャルシンガポール

(画像出典: <https://www.sla.gov.sg/geospatial/gw/virtual-singapore>)

## 4. デジタルツイン構築・運用上の課題や問題点

デジタルツインは建設分野だけでなく、様々な分野で活用されている。デジタルツインを構築・運用・活用するにあたり、存在する課題を整理した。分野によらず共通するものと、建設分野特有のもの2つに分けて、以下に記載する。

### 4-1 デジタルツイン構築・実現にあたっての共通の課題

デジタルツインの構築・実現にあたっては、利用分野によらず以下のような共通の課題が考えられる。

#### (1) 取り扱うデータの規模

デジタルツインを構築するためには、膨大なデータ量が必要となる。そのため、大規模なプロジェクトを進めるとなると、それ相応のデータ量が必要となる。

#### (2) データの統合化

デジタルツインを構築するためには、広く使われているレガシーシステム（過去の技術や仕組みで構築されているシステム）から新しいプラットフォームへのデータ移行や統合が必要となるケースが多い。しかし、互換性のないフォーマットやプロトコル、APIが障害となり、移行作業に多大な労力や困難を伴う場合がある。

既存のデータをどのようにデジタル化するか、センサーやポンプなどのレガシー機器に新しい技術をどのように接続するか、そしてそれらの新しい技術を実世界と統合するか、といった課題がある。

#### (3) セキュリティ

デジタルツインは、現実世界の状況をリアルタイムに再現するため、セキュリティ上のリスクを伴う。例えば、デジタルツインがハッキングされた場合、現実世界にも影響を及ぼす可能性がある。また現実の物理的なシステムを再現するために多くのデータを収集する必要があり、大量のデータの保護とセキュリティが重要な課題となる。

#### (4) データの精度と信頼性の課題

デジタルツインは、現実の物理的なシステムを再現することを目的としている。そのため、デジタルツインの精度と信頼性が、実世界のシステムの正確な再現に直結する。

#### (5) データの活用法

デジタルツインは、現実の物理的なシステムを再現することを目的としているため、デジタルツインを活用することで、どのような価値を生み出すことができるか、といった活用法を明確化する必要がある。

デジタルツイン構築におけるこれらの課題を解決するためには、以下のような方策が考えられる。

- 業務領域やプロセスを明確にする
- データをチェックする
- データ選定とデータフローの整備
- アプリケーション開発と運用
- 継続的に改善していく

具体的には、デジタルツイン構築にあたっては、データの収集、整理、分析、可視化、アプリケーション開発、運用、改善といった一連のプロセスが必要である。そのため業務領域やプロセスを明確にし、データの選定とデータフローの整備を行うことが重要である。またデータのチェックやアプリケーション開発と運用においては、セキュリティにも十分に配慮する必要がある。

## 4-2 建設分野における課題

デジタルツインとは、現実世界から様々なデータを IOT 技術などにより収集・蓄積し、これを仮想デジタル空間上に再現する技術のことであるが、その第1歩として建設分野に普及しつつあるものに BIM/CIM がある。

国土交通省では、令和5年度からの BIM/CIM 原則適用により、中小規模の企業を含め BIM/CIM 活用の裾野拡大を目指している。具体的には BIM/CIM の活用により、受発注者間におけるデータの共有・活用を容易にし、建設事業全体における一連の建設生産システム・管理システムの効率化を図ることを目標としているが、BIM/CIM 活用を進める中で課題も見え始めている。

### (1) 受注者側の課題

受注者側の課題として、現場で BIM/CIM を活用できる人材がまだ足りていないことが挙げられる。BIM/CIM でデジタル空間に現場を再現し、施工計画の検討等に活用するためには、現場が抱える課題に対して、どのような BIM/CIM モデルを作成して現実世界のデータを反映し、それを基にどのような検討を実施するかという活用計画を作成できる人材が必要である。建設プロセスでの課題や問題点を洗い出し、如何に効率的に問題なく進めることができるかの検討を BIM/CIM というツールを使って行い、業務効率化・変革に繋げることが目的であるが、BIM/CIM モデルを作ることが最終目的となってしまうケースが見受けられる。

このような方針を立てられる人材を育成するためには、高度かつ継続的な教育が必要であるが、残業時間の規制など建設業の働き方改革・意識改革が求められる中で、人材育成の環境を整えることは容易ではなく、各社が試行錯誤している状況である。

### (2) 発注者側の課題

発注者側の課題としても、同様に人材育成が挙げられる。BIM/CIM 活用に関する要領等が策定されていても、現場担当者レベルまで理解が浸透していないケースが見受けられる。また受注者側から提出された3次元モデルを扱うためのハード・ソフトも含めた環境整備が十分でないケースも見受けられる。この点については、一部の発注者が受発注者ともに使用できる仮想環境を整えるなど、本格運用に向けた取り組みを進める動きもある。

### (3) 運用上の課題

デジタルツインで生産性向上を実現するためには、収集されたデータの分析・処理が重要となる。デジタルツインでは現実世界の情報を仮想空間上に再現するため、3次元モデルの運用が主になるものと考えられるが、3次元に拘らず、様々な現場データを収集・分析した上で、計画に遡って反映する等のフィードバックまで実施した参考となるべき事例が、現状まだまだ少ない。施工段階で得られた構造物の沈下量や補修情報などを収集・分析し、デジタルツインに反映することがで

できれば、竣工後の維持管理でも、本データを有効活用できると考える。また発注者側の課題でも述べたが、3次元モデルを扱う環境整備にも課題があると感じている。デジタルツインを進めるためには、デジタルツインの活用イメージを明確にした上で、受発注者が連携して、これらの課題に取り組むことが求められている。

## 5. デジタルツインの今後の展望

### 5-1 デジタルツイン活用への期待

デジタルツインは、センサー類や通信技術などのIoT技術の進歩に伴い、現実世界でのモノや事象をより正確に素早く収集できるようになることで再現精度を更に向上していくことが期待され、今後もますます重要性が増していくものと予想される。またAI技術の進歩により、デジタルツインの自己学習や予測分析などが可能になり、製品やサービスの開発・製造・運用・保守・改良において、より効率的かつ高度な最適化が実現されることも予想される。

デジタルツインは、産業界だけでなく、教育や医療分野でも利用が広がっていく可能性があり、例えば医療分野では、人体をデジタルツイン化し、手術のシミュレーションや治療の最適化を行ったり、教育分野では物理実験や化学実験をデジタルツイン化することで、安全かつリアルな実験を実現することも可能になると考えられる。その他にも、生産活動にともなう工場でのCO2排出量の削減やサイバー攻撃へのセキュリティ対策など、データを駆使した課題解決が必要となる多くの分野で、デジタルツインが活用されはじめている。

こうしたスケールの大きな課題こそ、1社だけの知見で解決をめざすのではなく、オープン化したデジタルツインの技術を活かして、社会全体での効率的な課題解決につなげることが求められている。これからさらにデータ活用のためのIoTやAI、ロボティクスが発展し、取得できるデータ量が増えれば、デジタルツインをより容易に導入しやすくなる好循環が生まれる。その先の未来には、可視化されたデータを利用し、AIなどにより最適に運用する時代が到来することも予想されている。デジタルツインの産業実装は今後ますます求められ、期待が高まっていると考えられる。

### 5-2 デジタルツインの将来性

3章で示したように、建設分野でのデジタルツインに関する様々な取り組み、特に施工現場における生産性向上(業務効率化や迅速化)については好事例が示されている一方で、これらの取り組みは、従来行ってきた業務の一部を自動化・最適化する程度にとどまっており、生産性向上の効果は限定的といえ、抜本的に業務そのもの自体を変革するいわゆる建設DXが目指す到達レベルには至っていない。

国土交通省のインフラDXアクションプラン2には『デジタルツインはサイバー空間で分析・シミュレーションした結果を踏まえ、現実空間にフィードバックし、既存施策の運用や事業の進め方を見直していくことで、初めてその恩恵を広く享受することができます。今後はデータ分析・処理技術の更なる充実とその結果を踏まえた施策の立案を進めていきます。』という記載があり、今後もデジタルツインによって収集したデータの分析・処理技術が重要となっている。

データ分析・処理技術の更なる充実のためには、国土交通省の「AIを活用した建設生産システムの高度化に関する研究」にも記載されているように、以下の課題を解決することが重要である。当該課題の解決によって建設DXが目指す更なる生産性向上および新しい付加価値創出に繋がる可能性がある。

- 業務プロセスの把握（現状では見える化されていない）
- データ収集・活用の仕組み構築（AI 等を用いてデータを利活用するには十分な量のデータが必要だが、その手法や仕組みが確立されていない）
- センサー情報・施工情報の活用（・ICT 施工で発生している多くのセンサー情報・施工情報が工事全体での生産性向上に十分に活かされていない）
- DX 推進人材の育成（人材がそろわず、すぐに取り組めない、リスクリング・教育体系見直しの必要性）

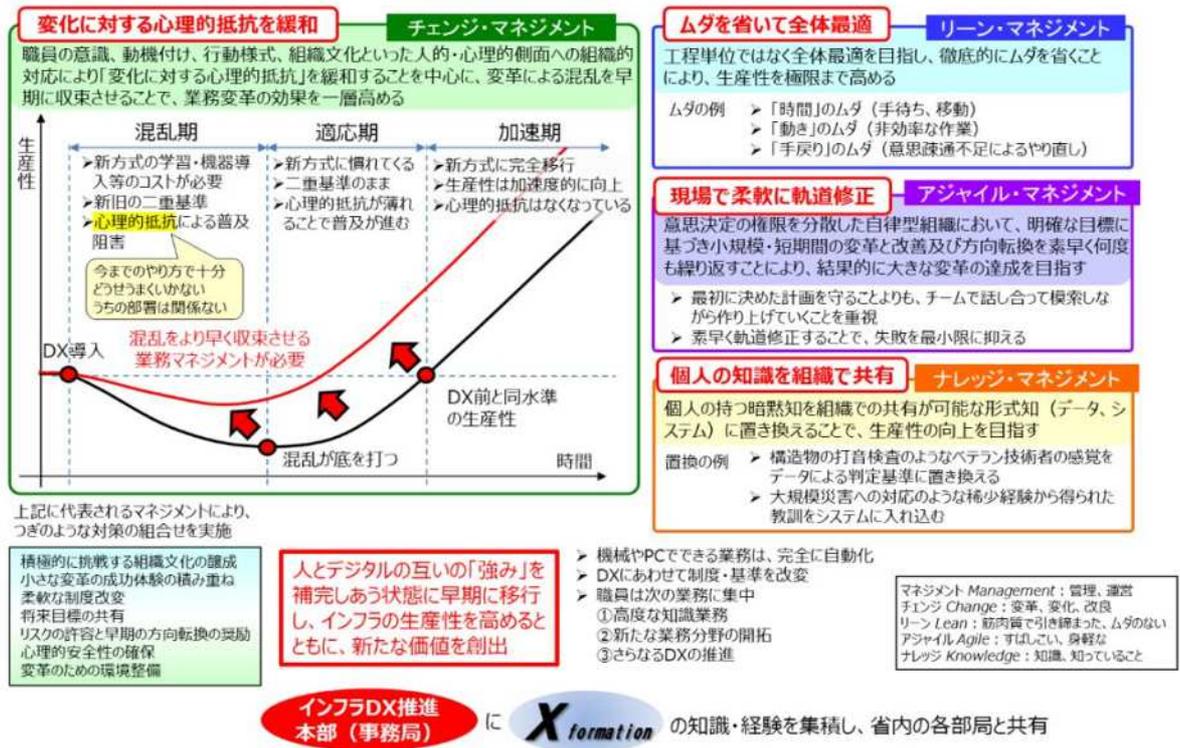


図-13 国土交通省 DX アクションプラン 2

(参考 URL)

<https://business.ntt-east.co.jp/bizdrive/column/dr00127-004.html>

[https://www.mlit.go.jp/tec/gijutu/kaihatu/pdf/h29/170725\\_06jizen.pdf](https://www.mlit.go.jp/tec/gijutu/kaihatu/pdf/h29/170725_06jizen.pdf)

<https://kensetsu-hr.resocia.jp/article/haken03>

## 6. おわりに

IoT や AI、AR・VR・MR などの技術進展によって実現したデジタルツインは、現実世界のオブジェクトやプロセスをデジタル化し、シミュレーションや予測分析などに利用することができる革新的な技術であり、産業界や都市開発、サービス提供など、様々な分野で活用されており、コスト削減や業務効率化などが期待されている技術である。

膨大なデータをデジタルツインで活用することで、分析やシミュレーションによる効率的なモノ作りから課題解決まで、幅広いスケールを対象に用途もますます拡大していくと考えられる。現在は製造業を中心に活用が進んでいるが、デジタル庁の「データ戦略タスクフォース第一次とりまとめ」にあるデータ戦略のビジョンとして、デジタルツインを前提とした経済発展と社会的課題の解決を両立する人間中心の社会を目指すことも謳われている。DX の課題でもある「膨大なデータの効果的な活用」にもデジタルツインは有効的である。

今後も IoT 技術や AI 技術の進歩に合わせた建設現場のデジタルツイン活用により、現場の再現精度が向上し、より効率的かつ高度な現場最適化につながることが期待されている。建設分野だけでなく、デジタルツインは、今後も様々なビジネスシーンや社会課題の解決に際して重要な役割を果たしていくと考えられる。企業や団体がデジタルツインを活用することで、更なる生産性向上や新しい付加価値が創出され、我が国の国際競争力を高めることも期待されており、デジタルツインへの更なる積極的な取り組みが求められる。

## 第6編 自己治癒・修復コンクリートを用いた将来の無人化補修工事について

### 1. はじめに

本章では、インフラ施設の整備（修繕・更新・改修）に対する政府の取組みを説明する。「修繕」は劣化した部位の性能を回復させ、施設の機能低下速度を弱めることである。また、「更新」は劣化した施設を新品に取り替え、性能および機能を原状回復（初期水準）させること、「改修」は劣化した施設の性能および機能を高機能化させることである。これらのイメージは図-1 に示す。また、大昔から現在まで原形を保ちつつある建造物を紹介する。

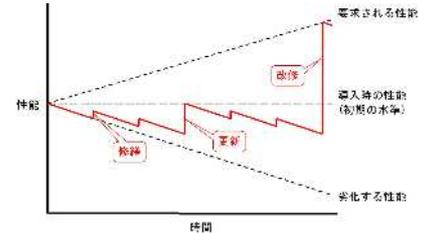
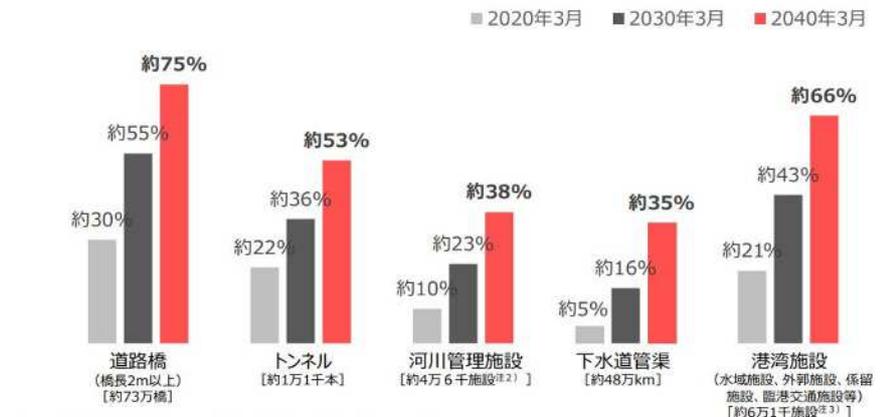


図-1 修繕・更新・改修のイメージ<sup>1)</sup>

### 1-1 老朽化に伴うインフラ整備<sup>2)</sup>

我が国の社会資本は、その多くが高度経済成長期で集中的に整備されており、道路橋・トンネル・河川・下水道・港湾等のインフラ施設は、図-2のように今後20年で建設後50年以上経過する施設の割合が加速度的に高くなる。今後、急速に老朽化が進展し、インフラの不具合が懸念されるため、維持管理・更新を計画的かつ適切に進めていく必要がある。

【建設後50年以上経過する社会資本の割合<sup>注1)</sup> (2020年度算出)】



注1) 建設後50年以上経過する施設の割合については、建設年度不明の施設数を除いて算出。  
 注2) 国・道、決り、開門、水門、排水機場、排水機、樋門・樋管、陸揚、管理橋、浄化施設、その他(立坑、排水池、ダム、独立行政法人水資源機構に規定する特定施設を含む。都道府県・政令市：堰(ゲート有り)、開門、水門、樋門・樋管、陸揚等ゲートを有する施設及び排水機、排水機、ダム。  
 注3) 一部事務組合、港務局を含む。

図-2 建設後50年以上経過する社会資本の割合

老朽化対策に関する政府全体の取組みとして、平成25年11月に「インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議」が行われ、「インフラ長寿命化基本計画」がとりまとめられた。また、平成26年5月に「社会資本の老朽化対策会議」が行われ、図-3のように「国土交通省インフラ長寿命化計画(行動計画)」を策定された。これは、政府の取組みに基づいて国土交通省が管理・所管するインフラの維持管理、更新等を着実に推進するため、中長期的な取組みの方向性を示した計画である。今後は持続可能なインフラメンテナンスの実現を目指しているが、メンテナンスに携わる人的資源が不足しているため、生産性向上の加速化を重要とする。したがって、将来のインフラ設備は修繕工事の削減および構造物の長寿命化に資する新技術の研究開発・導入が喫緊の課題である。

## インフラ長寿命化基本計画の概要

<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 個別施設毎の長寿命化計画を核として、メンテナンスサイクルを構築</li> <li>○ メンテナンスサイクルの実行や体制の構築等により、トータルコストを縮減・平準化</li> <li>○ 産学官の連携により、新技術を開発・メンテナンス産業を育成</li> </ul>																	
<h3>1. 目指すべき姿</h3> <p><b>○安全で強靱なインフラシステムの構築</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>メンテナンス技術の基盤強化、新技術の開発・導入を通じ、厳しい地形、多様な気象条件、度重なる大規模災害等の脆弱性に対応</li> <li>【目標】老朽化に起因する重要インフラの重大事故ゼロ(2030年)等</li> </ul> <p><b>○総合的・一體的なインフラマネジメントの実現</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>人材の確保も含めた包括的なインフラマネジメントにより、インフラ機能を適正化・維持し、効率的に持続可能で活力ある未来を実現</li> <li>【目標】適切な点検・修繕等により行動計画で対象とした全ての施設の健全性を確保(2020年度)等</li> </ul> <p><b>○メンテナンス産業によるインフラビジネスの競争力強化</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>今後のインフラビジネスの柱となるメンテナンス産業で、世界のフロントランナーの地位を獲得</li> <li>【目標】点検・補修等のセンサー・ロボット等の世界市場の3割を獲得(2030年)</li> </ul>	<h3>3. 計画の策定内容</h3> <p><b>○インフラ長寿命化計画(行動計画)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>計画的な点検や修繕等の取組を実施する必要性が認められる全てのインフラでメンテナンスサイクルを構築・継続・発展させるための取組の方針(対象施設の現状と課題/維持管理・更新コストの見直し/必要施策に係る取組の方向性)等</li> </ul> <p><b>○個別施設毎の長寿命化計画(個別施設計画)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>施設毎のメンテナンスサイクルの実施計画(対策の優先順位の考え方/個別施設の状態等/対策内容と時期/対策費用)等</li> </ul>																
<h3>2. 基本的な考え方</h3> <p><b>○インフラ機能の確実かつ効率的な確保</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>メンテナンスサイクルの構築や多段階の対策により、安全・安心を確保</li> <li>予防保全型維持管理の導入、必要性の低い施設の統廃合等によりトータルコストを削減・平準化し、インフラ投資の持続可能性を確保</li> </ul> <p><b>○メンテナンス産業の育成</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>産学官連携の下、新技術の開発・積極公開により民間開発を活性化させ、世界の最先端へ誘導</li> </ul> <p><b>○多様な施策・主体との連携</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>防災・減災対策等との連携により、維持管理・更新を効率化</li> <li>政府・産学官・地域社会の相互連携を強化し、限られた予算や人材で安全性や利便性を維持・向上</li> </ul>	<h3>4. 必要施策の方向性</h3> <table border="1"> <tr> <td>点検・診断</td> <td>定期的な点検による劣化・損傷の程度や原因の把握 等</td> </tr> <tr> <td>修繕・更新</td> <td>優先順位に基づく効率的かつ効果的な修繕・更新の実施 等</td> </tr> <tr> <td>基準等の整備</td> <td>施設の特徴を踏まえたマニュアル等の整備、新たな知見の反映 等</td> </tr> <tr> <td>情報基盤の整備と活用</td> <td>電子化した維持管理情報の収集・集約、予防的な対策等への活用等</td> </tr> <tr> <td>新技術の開発・導入</td> <td>センサー、ロボット、非破壊検査、補修・補強、新材料等に 関する技術等の開発・積極的な活用 等</td> </tr> <tr> <td>予算管理</td> <td>新技術の活用やインフラ機能の適正化による維持管理・更新コストの削減、平準化 等</td> </tr> <tr> <td>体制の構築</td> <td>【国】技術等の支援体制の構築、資格・研修制度の充実 【地方公共団体等】維持管理・更新部門への人員の適正配置、 国の支援制度等の積極的な活用 等</td> </tr> <tr> <td>法令等の整備</td> <td>【民間企業】入札契約制度の改善 等 基準等の体系的な整備 等</td> </tr> </table>	点検・診断	定期的な点検による劣化・損傷の程度や原因の把握 等	修繕・更新	優先順位に基づく効率的かつ効果的な修繕・更新の実施 等	基準等の整備	施設の特徴を踏まえたマニュアル等の整備、新たな知見の反映 等	情報基盤の整備と活用	電子化した維持管理情報の収集・集約、予防的な対策等への活用等	新技術の開発・導入	センサー、ロボット、非破壊検査、補修・補強、新材料等に 関する技術等の開発・積極的な活用 等	予算管理	新技術の活用やインフラ機能の適正化による維持管理・更新コストの削減、平準化 等	体制の構築	【国】技術等の支援体制の構築、資格・研修制度の充実 【地方公共団体等】維持管理・更新部門への人員の適正配置、 国の支援制度等の積極的な活用 等	法令等の整備	【民間企業】入札契約制度の改善 等 基準等の体系的な整備 等
点検・診断	定期的な点検による劣化・損傷の程度や原因の把握 等																
修繕・更新	優先順位に基づく効率的かつ効果的な修繕・更新の実施 等																
基準等の整備	施設の特徴を踏まえたマニュアル等の整備、新たな知見の反映 等																
情報基盤の整備と活用	電子化した維持管理情報の収集・集約、予防的な対策等への活用等																
新技術の開発・導入	センサー、ロボット、非破壊検査、補修・補強、新材料等に 関する技術等の開発・積極的な活用 等																
予算管理	新技術の活用やインフラ機能の適正化による維持管理・更新コストの削減、平準化 等																
体制の構築	【国】技術等の支援体制の構築、資格・研修制度の充実 【地方公共団体等】維持管理・更新部門への人員の適正配置、 国の支援制度等の積極的な活用 等																
法令等の整備	【民間企業】入札契約制度の改善 等 基準等の体系的な整備 等																
<h3>5. その他</h3> <ul style="list-style-type: none"> <li>戦略的なインフラの維持管理・更新に向けた産学官の役割の明示</li> <li>計画のフォローアップの実施</li> </ul>																	

図-3 国土交通省インフラ長寿命化計画の概要

## 1-2 コンクリートの歴史<sup>3), 4)</sup>

現代における鉄筋コンクリートの一般的な寿命は、好条件では100年程度、海岸部等の悪条件では50年程度であり、無筋コンクリートでは30~50年程度といわれている。しかし、写真-1のように古代ローマ時代に造られた建造物は無筋コンクリートでありながら耐久性が高く、2000年近い年月を経た現在でも原形を保っている。このようなコンクリートはローマンコンクリートと言われ、詳細な原理は未だ解明されていない。しかし、米マサチューセッツ工科大学 (MIT) を中心とした研究チームが、コンクリート中に分散するミリメートル単位の白い石灰の塊である「ライムクラスト」の存在が主要な役割を果たしていることを明らかにした。ここで、ローマンコンクリートの耐久性が優れている要因の仮説を下記に述べる。(図-4)



写真-1 ローマンコンクリートで造られたパンテオン<sup>5)</sup>

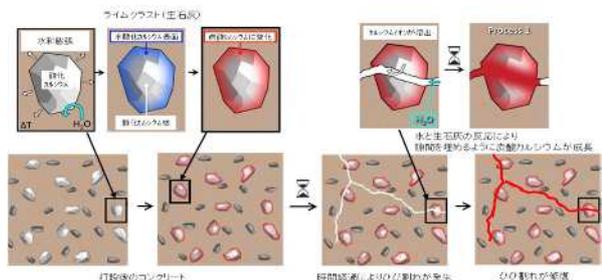


図-4 ライムクラストによる自己修復過程<sup>6)</sup>

- ① ライムクラストは他の微粒子よりも大きな表面積を持ち、その特徴に従って、コンクリートに生じたひび割れはライムクラストがある方向へ延びる。
- ② そこに水が染み込むことで石灰と反応して溶け出したカルシウムに化学反応が起こり、炭酸カルシウムへ変化する。
- ③ 炭酸カルシウムが乾燥・硬化することで、亀裂を接着してひび割れが広がらなくなる（自己修復機能）。このように、ローマンコンクリートは自己修復機能が備わっていたこと、それが優れた耐久性に繋がると考えられている。

したがって、自己治癒・修復コンクリートの技術は構造物を長寿命化し、今後開発される技術次第ではコンクリート修繕工事がなくなる可能性を秘めている。

## 2. 自己治癒・修復コンクリート技術

コンクリートには図-5のように自ら機能を回復する技術があり、「自然治癒」, 「自律治癒」, 「自己修復」の3つに分類される。

本章では、コンクリートの回復技術内容およびそれらの実験経過について紹介する。



図-5 コンクリート自らが機能回復する技術の分類<sup>8)</sup>

### 2-1 コンクリート自らが機能回復する技術<sup>7)</sup>

結合材のセメント、水、細骨材、粗骨材がコンクリートの基本構成材料であり、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュなどの結合材代替粉体や化学混和剤もコンクリート製造に使用される。また、鉄筋と組み合わせることで、鉄筋コンクリートとして使

用される。先述のように、コンクリート構造物は様々な材料から構成されるため、コンクリートのひび割れ修復技術は多様である。

コンクリートのひび割れ修復技術のうち、コンクリート自身がひび割れの発生を検知し、自ら補修の必要性を判断して、その決定にもとづき、補修を実行する機構を自己治癒コンクリートおよび自己修復コンクリートと呼ばれる。図-5 に示したコンクリート自らが機能を回復する技術の特徴を下記に示す。

#### ① 自然治癒

自然治癒とは、材料設計などに特別な配慮をしなくても、水分などが存在する環境下において、自然とひび割れが閉塞する機構を有するものである。

#### ② 自律治癒

自律治癒とは、混和材を使うなどして、材料設計したコンクリートで、水分などが存在する特定の環境の下、ひび割れを閉塞する機構を有するものである。

#### ③ 自己修復

自己修復は、あらかじめデバイス類をコンクリートに埋設し、その機構によってひび割れを閉塞する機構を有するものである。

## 2-2 自己治癒技術

### (1) バクテリアの生物代謝反応を活用した技術

世界で初めて現場に適用できた事例であり、3章で紹介する。

### (2) イースト菌、納豆菌を活用した技術<sup>9)</sup>

イースト菌、納豆菌を用いたコンクリートの治癒技術については、日本国内において研究されている。愛媛大学の研究チームでは、北海道大学の川崎教授の微生物を利用した地盤改良技術をベースに、イースト菌と納豆菌を利用して写真-2 のようにコンクリートのひび割れ中に炭酸カルシウムを蓄積させ、ひび割れを修復する研究を行っている。これはバクテリアの生物代謝反応を利用した技術とは異なり、ひび割れ中に菌類とカルシウム源、菌類の栄養素からなるバイオグラウト液を注入することで炭酸カルシウムを発生させ、ひび割れを埋めることで透水量が減少するとされている。また、使用する菌類で栄養源となる物質は異なり、イースト菌はスクロースで、納豆菌は尿素で活動する。イースト菌および納豆菌は食品の発酵作用に使用されていた。今後、菌類はコンクリートの治癒技術への可能性を期待されている。

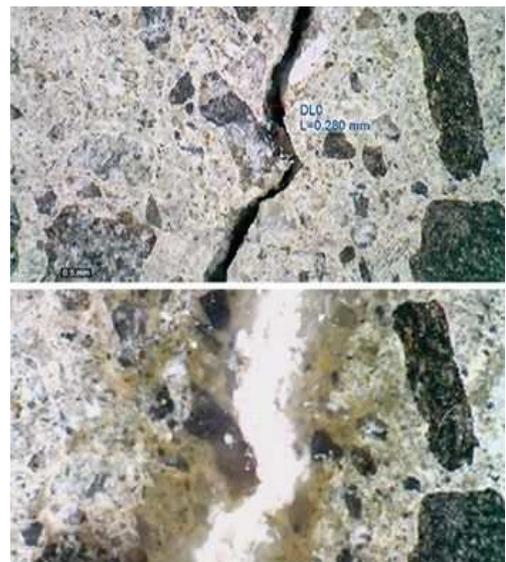


写真-2 イースト菌、納豆菌を用いたコンクリートの修復技術の一例<sup>10)</sup>

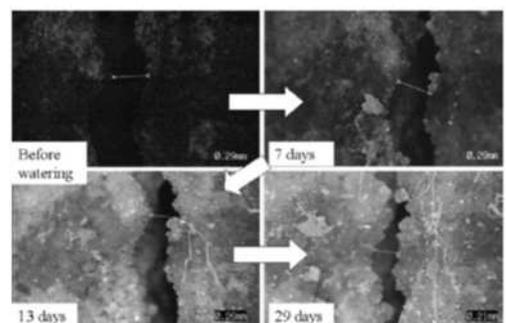


写真-3 低水セメント比普通コンクリート自己治癒の一例<sup>11)</sup>

### (3) 結合材の反応余力を活用した技術<sup>7)</sup>

短繊維を多量に混和した繊維補強高靱性セメント系複合材料は、ひび割れ発生後に数パーセントのひずみまで疑似ひずみ硬化特性を示すことが特徴である。また、水結合材比を 15%程度とし、通常のコンクリート (40~55%程度) に比較して、極めて小さいため、硬化後においても未反応の結合材が大量に残存している。そして、多数の微細ひび割れを分散させながら折れずに曲がり、個々のひび割れ幅は 0.05mm 程度と微小な範囲に抑制されるので、ひび割れ中に水が浸入した場合は、**写真-3** のようにセメントおよびフライアッシュ等の結合材の反応余力によってひび割れが閉塞する。

このような複数微細ひび割れ型繊維補強モルタルは、ひび割れの自己治癒効果が高く、0.05mm 程度のひび割れでは水を容易に通過しないが、自己治癒によってひび割れを通る空気の通過も抑制し、曲げ剛性も回復する。

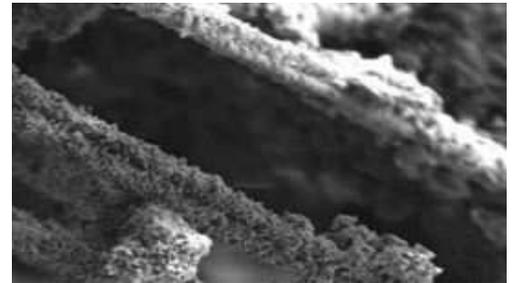


写真-4 強化繊維を活用した自己治癒の一例

### (4) 強化繊維を活用した技術<sup>12)</sup>

異形断面 (+型) ポリプロピレン繊維に、特殊な表面改質技術を組み合わせることで、炭酸カルシウムの析出しやすい状況を形成する。これにより、**写真-4** のようなコンクリートのひび割れを自己治癒することが可能となる。また、ひび割れ補修作業の軽減に加え、火災時に発生する水蒸気爆発防止効果も期待される。

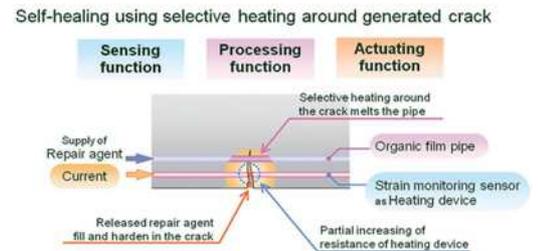


図-6 デバイス・装置系の自己修復技術の一例

## 2-3 自己修復技術

### (1) デバイス・装置系の自己修復技術<sup>7)</sup>

接着剤などに代表されるひび割れ修復のため、特化された補修剤を封入したパイプ等をコンクリート中に予め埋め込んでおくことで、ひび割れが発生した場合はパイプが割れ、自動でひび割れ中に補修剤が注入されて修復を図る。**図-6** のようにパイプをコンクリート中へ埋設することで、ひび割れ発生時に外部から補修剤を供給することも可能である。また、補修剤の供給量により、ひび割れの閉塞だけでなく、強度および剛性も回復する。現在は、主に建築分野で研究が進められている。

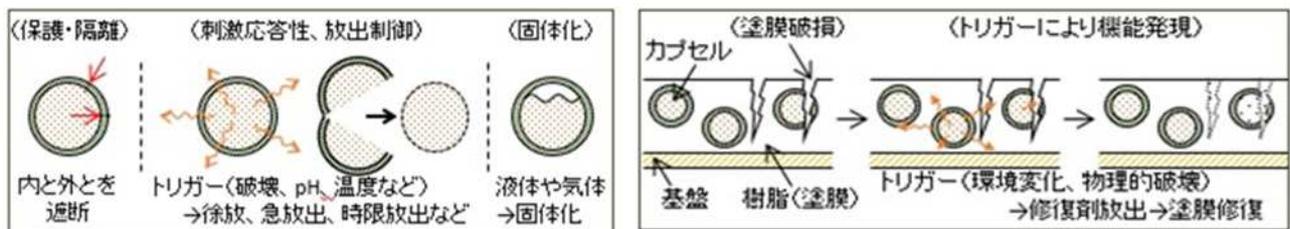


図-7 マイクロカプセル等による補修材を封入した自己修復技術の一例<sup>13)</sup>

### (2) マイクロカプセル等による補修材を封入した自己修復技術<sup>7)</sup>

**図-7** のような補修材を封入した微小な機能性材料をコンクリートに混和する自己修復技術もあ

り、中国・深セン大学のグループがマイクロカプセルに補修剤を封入した技術を研究している。また、ポーラスな人工軽量骨材を使用して、これに予め補修剤を吸収させておく技術も提案されている。

### 3. 自己治癒コンクリートの現場適用例<sup>14) 15)</sup>

前章では自己治癒・修復コンクリートの技術内容を紹介したが、現在自己修復コンクリートは研究段階である。本章はバクテリアの代謝機能を用いて、コンクリートの自己治癒を促した混和材の「Basilisk HA 自己治癒コンクリート」（以下 Basilisk HA とする）を紹介する。なお、Basilisk HA は自己治癒コンクリートで日本初の現場適用した混和材である。



写真-5 Basilisk HA

#### 3-1 Basilisk HA の概要

写真-5 が Basilisk HA であり、Basilisk HA はコンクリート構造物全般に適用され、二次製品も取り扱う。主な特徴は最大幅 1.0mm までのひび割れを修復できる性能であり、これは構造物の長寿命化および将来のメンテナンス低減に見込まれる。また、自己治癒コンクリート材料の他に Basilisk の商品は 2 種類あり、MR3 が自己治癒型補修モルタル、ER7 が自己治癒型液体補修材である。

Basilisk HA は高流動および高強度のコンクリート配合に適応可能であり、繊維や特殊混和剤（材）等と共に練り混ぜた際、過去に混和剤等と相性が悪かった事例はない。また、Basilisk HA に含まれるバクテリアは酸に弱いため、Basilisk HA の適用不可能な環境は下水道等である。そして、圧送の最長距離はコンクリート配合が 30-12-40BB で約 260m を水平圧送したケースである。

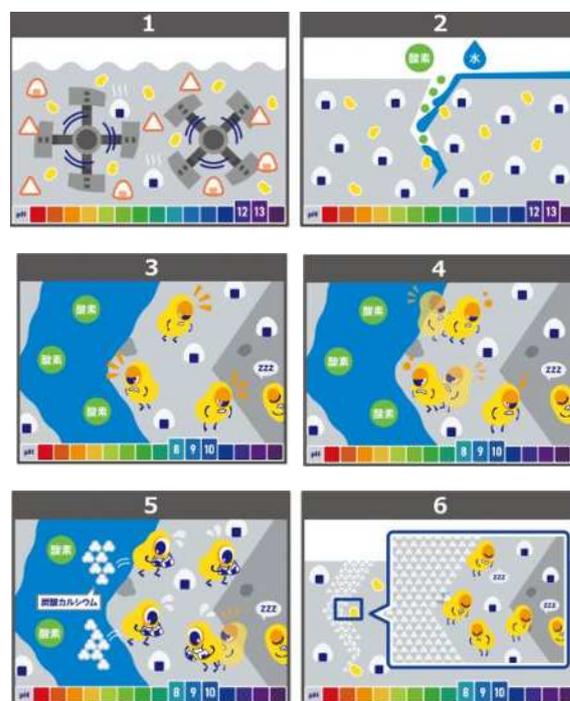


図-8 ひび割れ修復メカニズム (①~⑥)

#### 3-2 ひび割れ修復メカニズム

コンクリートプラントで Basilisk HA の投入からひび割れが修復されるまでの過程を図-8 に示す。  
 ①コンクリートミキサ内で生コンクリート製造時に Basilisk HA と他の原材料を同時に練り混ぜる。  
 ②コンクリートに入ったひび割れから雨水および酸素が浸入する。③ひび割れから侵入した水および酸素でひび割れ表面の pH が 8~10 程度に下がることでバクテリアが眠りから目覚める。④目覚めたバクテリアは分裂を繰り返し、ポリ乳酸カルシウム（餌）を摂取して、ひび割れ内をバクテリアが排出する炭酸カルシウムで充填させる。⑤バクテリアは炭酸カルシウムの他に、少量の水および二酸化炭素を排出する。これらはコンクリート内の未水和セメントを炭酸カルシウムに変え、小さな穴や細かいひび割れを充填させる。⑥炭酸カルシウムでひび割れが完全に充填されることで、水および酸素が完全に遮断され、バクテリアは再び休眠状態になり、次のひび割れに備える。

### 3-3 施工実績

2020年11月にBasilisk HAの専用プラントが完成したため、現在の施工実績は現場打ちコンクリートが8件、プレキャストコンクリートが19件と少ない。しかし、写真-6の豊平川水道水源水質保全管理センター新設工事では現場打ちコンクリートを5,000m<sup>3</sup>、森町役場ではプレキャストコンクリートを2,100tの実績がある。また、2022年7月にNETISへ登録されたため、今後の需要増加が考えられる。



写真-6 豊平川水道水源水質保全管理センター新設工事

## 4. 現場適用に向けた課題<sup>14) 15)</sup>

本章では、Basilisk HAの現場適用増加に向けた課題を考察した。

### 4-1 価格

Basilisk HA混入コンクリートの配合は、Basilisk HAをセメント等で置換の必要性がないため、配合計画書通りのコンクリートが出荷できる。しかし、Basilisk HA混入コンクリートの価格は、1m<sup>3</sup>当たり1万円（Basilisk HA添加量5kg）であり、Basilisk HAの投入費用（人件費）が別途必要であるため、トンネルおよび橋梁等の大規模構造物にBasilisk HAを適用する場合は高額になる。

### 4-2 Basilisk HA量産体制

バクテリアの代謝機能を用いてクラックを修復する技術は、2010年にオランダ・デルフト工科大学のヘンドリック M. ヨンカース博士が率いる研究チームが開発した。2016年より會澤高圧コンクリート(株)はオランダ研究チームと量産化技術について共同研究を始め、2020年に「Basilisk HA」を日本国内で量産化した。

現在の量産体制については、バクテリアはオランダで輸入し、ポリ乳酸カルシウム（バクテリアの餌）は国内で調達している。その後、北海道および福島の會澤高圧コンクリート(株)の工場でミキシングを行う。したがって、Basilisk HAは完全受注生産であり、大規模構造物等にBasilisk HAを適用する場合は早期注文が必要になる。

### 4-3 Basilisk HAを用いた現場打ちコンクリート

現在、Basilisk HAを扱うプラントは北海道のみである。そのため、Basilisk HAを適用したフレッシュコンクリートを日本全国の現場で打込む方法は「①地方現場は自前のプラントを製造する」、「②Basilisk HAを扱うプラントの普及を待つ」の2点である。

#### 4-4 耐久性

Basilisk HA の内訳は約 95%がポリ乳酸カルシウム（餌）約 5%がバクテリアであり、また、死亡したバクテリアは餌になるので、バクテリアの食料は尽きない。そして、バクテリアは寿命が長いため、Basilisk HA を用いた構造物のひび割れ対策は長期間保証される。しかし、ひび割れ対策で塩害を防止することは可能であるが、中性化や凍害等は劣化のメカニズムが異なるため、全ての劣化因子への耐久性は保証されない。

写真-7 のように Basilisk HA を用いて治癒したひび割れは炭酸カルシウムで埋まっているので、コンクリート（セメントペースト相・骨材相・境界相）とは完全に結合されていない。そのため、クラック治癒部分は強度が低いと考えられる。また、メーカーでは治癒部分において透気試験を行っていないため、中性化への抵抗性が確認できていない。



写真-7 Basilisk HA により補修されたコンクリート

### 5. 各学会の活動

Basilisk HA 混入コンクリートを現場で打ち込むための最大の課題は、Basilisk HA が JIS および JASS5（日本建築学会建築工事標準仕様書）の規格外品であることと考える。現場で規格外品を適用する際、土木は発注者に承諾を得ること、建築は大臣認定を取得し、その後施主の同意が必要となる。したがって、Basilisk HA 混入コンクリートの現場打込みを適用することは非常に難しい。本章では、各学会の自己治癒・修復コンクリートについての動きを紹介する。



写真-8 2023年度制定コンクリート標準示方書規準編

#### 5-1 コンクリート標準示方書（規準編）の追記（JSCE）<sup>16)</sup>

今年度改訂した写真-8 の「2023 年度制定コンクリート標準示方書 規定編（土木学会規準および関連基準規準）」には初めて自己治癒関連の試験方法が追加された。分野は「K. 補修材料」になり、試験名は「自己治癒充填材のひび割れ透水率試験方法（案）（JSCE-K 544-2022）」である。この規準で用いる「自己治癒充填材」の定義は、『コンクリート構造物のひび割れ部からの漏水を止める目的で使用する充填材のうち、充填材に生じたひび割れからの漏水に対して、水と反応する機構によって漏水を止める機能を持った材料を「自己治癒充填材」と定義する。なお、ここでいう充填材とは、ひび割れ注入材とは異なり、コンクリートのひび割れに V カットやドリル削孔を施し、そこに充填する材料である。』と記載されている。



写真-9 Basilisk MR3 を用いた補修（左：補修前、右：補修中）



写真-10 Basilisk MR3 を用いた補修後

写真-9 および写真-10 に Basilisk MR3 を用いた補修前から補修後の状況を示す。この試験は Basilisk HA 向けでなく、自己治癒型補修モルタルの Basilisk MR3 向けである。初めて自己治癒関連の試験方法が導入されたことで、土木学会内は自己治癒コンクリートについて好印象と考えられる。現時点では、補修分野だけの記載であるが現場適用に向けた課題を解決することで、コンクリート標準仕方書のフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリート分野でも記載されることが考えられる。

## 5-2 日本コンクリート工学会の委員会活動 (JCI)

日本コンクリート工学会の自己治癒・修復コンクリート技術の委員会活動は3回である。

### (1) セメント系材料の自己修復性の評価とその利用法研究専門委員会 (平成19~20年度)<sup>17)</sup>

第一回目に活動した「セメント系材料の自己修復性の評価とその利用法研究専門委員会」では、コンクリートの自己修復性に関する国内外の既往の研究および最先端の研究動向を整理して、今後の研究展開の明確化を目的に活動した。また、2年間の活動を報告書(写真-11)に取りまとめ、それを2009年7月に発刊した。現在はJCIのHP上で報告書の閲覧が可能である。報告書の各章の記載内容は下記の通りである。



写真-11 セメント系材料の自己修復性の評価とその利用法研究専門委員会報告書

- ①序論
- ②自己治癒／修復現象
- ③自己治癒／修復機構と技術の現状
- ④自己治癒／修復の材料科学的モデル
- ⑤自己治癒／修復効果の実験的評価
- ⑥自己治癒／修復機能の設計への取り込みと適用事例
- ⑦他分野における自己治癒（自己修復）現状
- ⑧セラミックスの自己き裂治癒現象
- ⑨研究集会 in 福岡
- ⑩まとめと今後の課題

第一回目の活動では詳細な文献調査および問題点の掘り起こしを行ったが、図-5 に示したような機能の回復技術として、自己治癒・修復技術は認知や利用されるまでには至らなかった。また、委員会が主体で自己修復性に関する実験および研究を推進し、具体的な研究成果として情報発信できなかった。

## (2) セメント系材料の自己治癒技術の体系化研究専門委員会（平成 21～22 年度）<sup>18) 19)</sup>

第二回目に活動した「セメント系材料の自己治癒技術の体系化研究専門委員会」では、第一回目の活動成果を元に研究ベースでの議論を行うことを主目的とした。また、第一回目と第二回目の成果を合わせ、自己治癒技術の体系化をはかり、自己治癒技術を補修技術として普及させること、本活動の結果を国際的に情報発信すること目的とした。そして、第二回目の活動も報告書に取りまとめ、それを 2011 年 6 月に発刊した。報告書の各章の記載内容は下記の通りである。

### 【第 1 部】 委員会報告書

#### ①序論

#### ②世界におけるセメント系材料の自己治癒技術の取り扱い

#### ③セメント系材料の自己治癒現象の実験的観察例

#### ④セメント系材料の自己治癒現象のメカニズムとその評価方法

#### ⑤セメント系材料の自己治癒の非破壊的評価方法の可能性

#### ⑥国際研究集会 in さいたま

〈付属資料〉セメント系材料の自己修復性とその利用法研究専門委員会報告書

### 【第 2 部】 シンポジウム論文集

シンポジウム論文集は、「セメント系の自己治癒に関するシンポジウム」で発表された最先端技術を紹介した論文が収められている。

第二回の委員会活動を通し、自己治癒技術を体系化して補修技術へ用いることは、実用化の射程内距離に到達していること、また、国内の研究および技術開発が国外の先頭集団に属し、実用化に最も近いことが分かった。そして、自己治癒に関する国外の研究活動は活発的であり、維持管理および持続可能性が問題となる現代においては、自己治癒に寄せられる期待も大きい。

## (3) コンクリート用自己治癒材の効果とその評価方法に関する FS 委員会（令和 5 年度～）<sup>20)</sup>

第三回目の「コンクリート用自己治癒材の効果とその評価方法に関する FS 委員会」は昨年度から活動している。本活動では、環境条件に応じた適切な自己治癒材の選定および適用性を整理して、その効果を実験室レベルで確認する方法や供用中の構造物における評価方法の確立を目的とした。その際、下記の点に着目して、自己治癒材を整理した。

#### ①自己治癒材とセメント硬化体との相互作用

#### ②環境ごとの自己治癒コンクリートの適用性

#### ③自己治癒材の効果の評価方法に関する既往の知見および最新の計測方法

#### ④ひび割れ補修や防食に特化した自己治癒効果の評価等に関する知見

## 6. 自己治癒コンクリートの有効性<sup>15)</sup>

本章までに自己治癒・修復コンクリートの技術および現場適用に向けた課題、各学会の活動等を紹介した。最後に、自己治癒コンクリートを用いることで発生する有効性を考察した。

## 6-1 脱炭素の有効性

老朽化したものを壊して、新しいものに置き換えることをスクラップ・アンド・ビルド方式という。日本の建設業界では、スクラップ・アンド・ビルド方式を多く採用してきた。自己治癒コンクリートを用いることで、スクラップ・アンド・ビルド方式によるコンクリートの使用量を根本的に低減することが可能になり、コンクリートの製造、構造物の建設および解体でのCO<sub>2</sub>排出量は、大幅な削減ができる。また、セメントを生産する際、1トン当たり約0.8トンのCO<sub>2</sub>が放出される。日本では、セメントの生産によって排出されるCO<sub>2</sub>は年間約3400万トンであり、全産業によるCO<sub>2</sub>排出量の5~7パーセントを占めていた。したがって、この排出量の抑制が長年の課題である。2020年11月より、「NET ZERO 2035」という脱炭素に向けた取り組みが行われている。図-9はNET ZERO 2035のロードマップを示す。図-9より、自己治癒コンクリートを長期的な施策で考えた場合は、CO<sub>2</sub>排出量削減への課題解決に貢献すると考えられる。

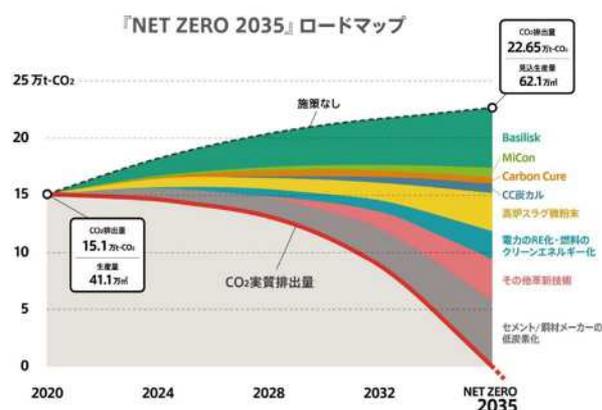


図-9 NET ZERO2035 ロードマップ

## 6-2 生産性向上の有効性

構造物のひび割れを早期に治癒させることで、コンクリートの長寿命化が実現できる。4章で紹介した細菌による自己治癒コンクリートは、コンクリート内で細菌が約200年間も生き続けることが可能である。つまり、コンクリートの自己治癒機能もその間は持続し、従来の鉄筋コンクリートの寿命が50年程度に対して、細菌による自己治癒コンクリートの寿命は飛躍的に伸びる。

従来のコンクリートと細菌による自己治癒コンクリートを比較した場合は、ひび割れや劣化の補修に要する労働力およびコストが格段に下がる。また、大規模補修や設備の更新などのメンテナンス作業にはサービス休止期間（道路の使用規制・大規模補修）が必要であり、休止期間が多数発生することは大きな経済損失を招く。したがって、細菌による自己治癒コンクリートを用いて、早期にひび割れを治癒させる方法は生産性向上の有効性が考えられる。そして、構造物の耐久性や持続性が長くなることは、改修工事や解体から再建築の頻度が減り、工事に出てくる廃棄物が減少し、人手不足と言われている建設業界にはとても有効的である。

## 7. おわりに

国土交通省は持続可能なインフラメンテナンスの実現を目指しているが、建設業界が担い手不足のため、将来は構造物の修繕工事待ちが起こると予想する。そのため、修繕工事の削減および構造物の長寿命化に対する技術開発が必要である。現在、国内外を問わず、自己治癒・修復コンクリートの研究が進められ、国内で自己治癒コンクリートの現場適用がされた。

自己治癒コンクリートの実現場拡大には多くの課題もあるが、国内の学会では自己治癒・修復コンクリートの脱炭素および生産性向上の有効性が期待される。今後は自己治癒・修復コンクリート

の課題を解決し、それを実現場で普及させることで改修工事に人を必要としない（無人化施工）長寿命構造物が開発されることを期待したい。

#### 【参考文献】

- 1) 例えば、トンネル設備の備忘録 HP, 維持管理における「修繕」、「更新」、「改修」とは, 2010
- 2) 例えば、国土交通省 HP, インフラメンテナンス情報 社会資本の老朽化対策情報ポータルサイト, 2016
- 3) 例えば、MEITEC HP, 数千年前の寿命の秘密-MIT、ローマンコンクリートが持つ「自己収縮性」を解明, 2023
- 4) 例えば、Lab BRAINS HP, ローマンコンクリートは自己修復する!ローマ帝国の建物が堅牢な理由を解明, 2023
- 5) 例えば、(株) 未来工事 HP, パンテオンとローマンコンクリート（古代コンクリート）とは解説! 2000年近く経ち続けるための秘密, 2023
- 6) 例えば、Hot mixing HP, Mechanistic insights into the durability of an - cient Roman concrete. powered by TREND MD, 2023
- 7) 岸利治: コンクリートのひび割れ自己修復/自己治癒, 日本画像学会誌, 第 54 巻, 第 3 号, pp. 236~242, 2015
- 8) 例えば、日経 XTECH HP, バクテリアが何度でもひび割れを修復、自己治癒コンクリート, 2018
- 9) 松下ゆかり, 岡崎慎一郎, 安原英昭, 氏家勲: 微生物代謝を利用したコンクリートのひび割れ補修工法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 1589~1594, 2010
- 10) 例えば、日経 XTECH HP, 納豆菌でコンクリートが長持ち 自己治癒に加え鉄筋腐食を抑制, 2021
- 11) 岸利治, 安台浩: 膨張剤-膨潤材-化学添加剤混合系ひび割れ自己治癒コンクリートの開発, 生研リーフレット, No. 345, 2011. 6
- 12) 例えば、日本経済新聞 HP, コンクリートのひび割れ自己修復 繊維の力, 2016
- 13) 田口佳成: 新潟大学 社会連携推進機構 HP, ナノ・マイクロカプセルの調製と用途開発~複合化、カプセル化、表面改質~, 2023
- 14) 酒井亨: バクテリアを使用した自己治癒コンクリートによる脱炭素効果, 環境バイオテクノロジー学会誌, Vol. 23, No. 1, pp. 23~27, 2023. 1
- 15) 例えば、會澤高圧コンクリート (株) HP, 事業・製品紹介, 2024
- 16) 公益財団法人 土木学会: 2023 年制定コンクリート標準示方書 [規準編], 2023. 9
- 17) 公益社団法人 日本コンクリート工学会 HP, セメント系材料の自己修復性の評価とその利用法研究専門委員会, 2008
- 18) 公益社団法人 日本コンクリート工学会 HP, セメント系材料の自己治癒技術の体系化研究専門委員会, 2010
- 19) 五十嵐心一, 細田暁, 人見尚, 今本啓一: 委員会報告 セメント系材料の自己治癒技術の体系化研究専門委員会, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 1~9, 2011
- 20) 公益社団法人 日本コンクリート工学会 HP, コンクリート用自己治癒材の効果とその評価方法に関する FS 委員会, 2023