

7. 大型プレキャストブロック据付の自動化施工

自動運転技術を災害現場の実施工に導入

鹿島建設株式会社
鹿島建設株式会社
鹿島建設株式会社

○ 大原 伸浩
土井原 美桜
増村 浩一

1. はじめに

赤谷 3 号砂防堰堤工事では、斜面崩落による二次災害を防止するため、出水期の施工は遠隔操作による無人化施工を計画していた。しかし、高い精度が要求されるプレキャストブロックの据付作業は、遠隔操作による作業では難易度が非常に高く、疲労による生産性の低下や作業ミスが予想された。この課題に対し、ブロック据付作業の繰り返し動作を自動化する次世代の建設生産システムの実現を目指した。

プレキャストブロック据付作業はキャリーダンプで運搬したプレキャストブロックの荷取り動作、据付位置までの旋回動作、据付位置への据付動作からなる。キャリーダンプ上のプレキャストブロック位置や据付予定位置の計測には AR (拡張現実) 技術を応用した画像解析による測量手法「AR 測量」を用い、汎用バックホウの自動制御にはキャビン搭載型ロボットを採用した。その結果、日本で初めてプレキャストブロック据付の自動化施工を実現し、高精度な据付と生産性向上 (遠隔操作施工と比較) を達成した。自動化施工の概要と実績について紹介する。

2. 開発の概要

赤谷 3 号砂防堰堤工事は、平成 23 年に大規模土砂崩壊が発生した奈良県五條市赤谷地区の砂防事業のうち、崩落斜面直下に砂防堰堤を構築するものである (写真-1 参照)。崩落斜面は平成 23 年以降も出水期に再崩落を繰り返しており、出水期にあたる 6 月 15 日から 10 月 31 日は二次災害防止のため、施工エリアは立入禁止となり無人化施工を前提条件としている。自動運転は次のように

- ・同じ動作を繰り返す作業は得意
- ・オペレータの技能によらず一定品質を確保
- ・長時間連続して一定速度による作業が可能

といった特徴があり、本工事では作業の特性に応じて部分的に自動運転を導入することによって工期やコストの低減、生産性と品質の向上を目指した。

堰堤の断面図を図-1 に示す。3 号砂防堰堤の施工は、大きく以下の 3 作業に分けられる。

- ・下流側のプレキャストブロック据付
- ・内部材 (ソイルセメント) と土砂型枠の盛立て
- ・上流側の土砂埋め戻し

これらのうち、高い作業精度を必要とするプレキャストブロックの据付と、内部材・土砂型枠の盛立てを自動化した。ただし、走行動作は遠隔操作でも比較的容易なため、プレキャストブロックやソイルセメントを運搬するキャリーダンプの走行は遠隔操作によって行った。本報文では、プレキャストブロック据付の自動化について述べる。



写真-1 災害発生直後の状況と堰堤施工場所

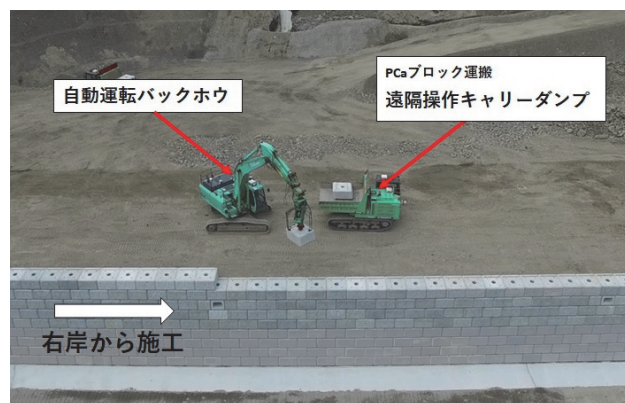


写真-2 自動化施工状況 (下流上空より)

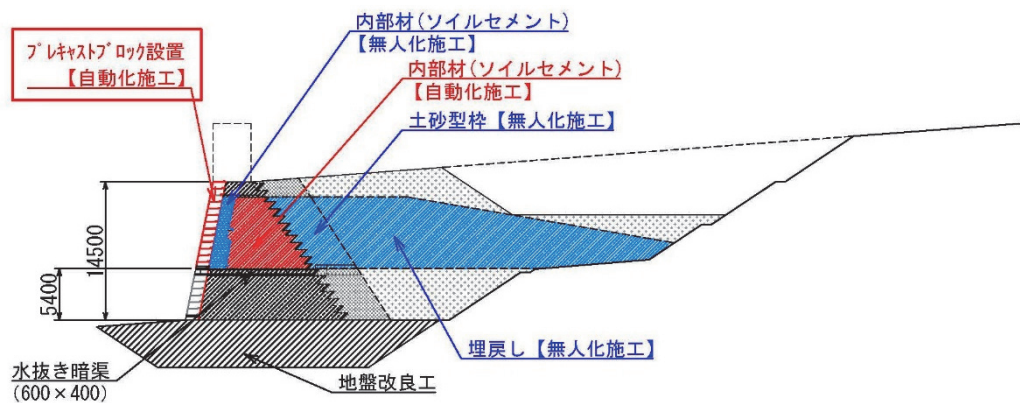


図-1 3号砂防堰堤標準断面図

3. 自動化施工の概要

プレキャストブロック(以下、ブロック)の据付は、専用アタッチメントを搭載したバックホウによる自動化施工により行った(写真-2 参照)。自動化施工の対象となるブロックは、出水期に施工する無人化施工対象の8段目から20段目の合計824個である。ブロックの据付は1段ずつ、右岸側から順に行い、ブロック1段を据え付けるごとにブロック天端まで内部材の盛り立てを行った。

3.1 自動把持動作

ブロックを据え付けるためには、キャリーダンプで搬入したブロックを把持する必要がある。把持対象ブロックの位置の計測には後述するARマーカとカメラを用いた測量手法(「AR測量」と呼称する)を導入した。ブロックの搬入は、遠隔操作のキャリーダンプをオペレータがカメラ画像を見ながら操作し、自動運転バックホウ付近の任意の場所に停止させた。

3.2 自動据付動作

据付動作の模式図を図-2に示す。自動据付は直前に据え付けた隣接ブロックの位置を計測し、その位置を基準に把持中のブロックの据付目標位置を算出した。ブロックの位置検出にも、AR測量を用いた。

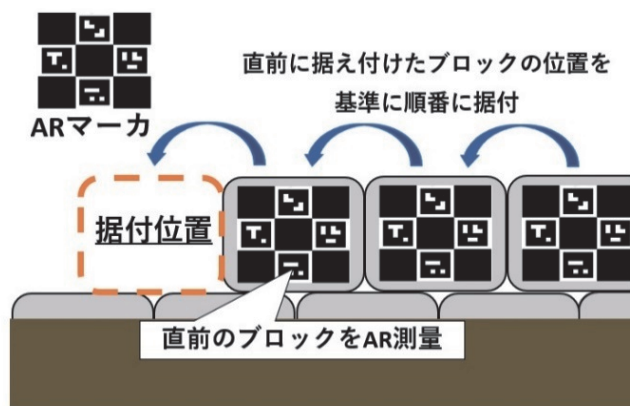


図-2 据付動作模式図

3.3 ブロックと専用アタッチメント

自動運転に最適なブロック(写真-3)と専用アタッチメント(写真-4)を製作した。ブロック寸法は、幅1,250mm×奥行1,360mm×高さ700mm、質量2,550kgである。ブロックの上部にはφ270mmのテーパ構造の把持孔を設け、アタッチメントをこの把持孔に挿入して先端を開閉することによって把持と把持開放を行った。さらに、据付精度の向上のため、ブロックの上流側にはかまぼこ型の嵌合構造を設けた。

アタッチメントは、動作の単純化のために重機のアーム先端にピン構造により取付け、常に鉛直下向きとなる構造とした。また、据付時にブロックの回転角度を調整する必要があるため、回転機能を備えた。

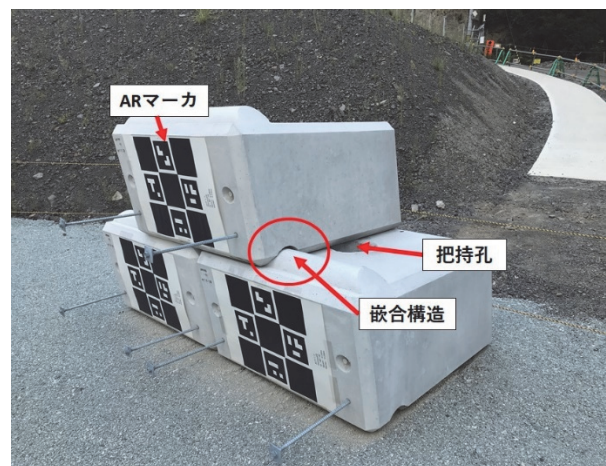


写真-3 プレキャストブロック



写真-4 専用アタッチメント

3.4 操作室

自動運転の監視・指示は、立入禁止エリア外に設けた操作室から行った。現場内には遠隔・自動化施工用に定置式カメラと移動式カメラ車を配置して、様々な角度から施工箇所を撮影できるようにし、操作室(写真-5 参照)に設置したモニターでカメラ画像を確認できるようにした。自動運転においてもカメラ映像を用いて、オペレータが重機や施工箇所を確認しながら自動運転の監視を行った。



写真-5 操作室状況

4. 自動運転要素技術

自動運転を構成する要素技術を述べる。

4.1 AR 測量

自動運転においては、把持対象ブロックの位置と据付目標位置を計測する必要があるが、合計800個以上のブロックすべてにGNSS受信機やプリズ

ム等を取付けることは現実的ではない。そこで、安価に多数のブロックを計測する方法として、紙に印刷したARマーカとカメラを用いて測量を行う手法を採用した。これを「AR測量」と呼称する。

(1) 把持AR測量の特徴

AR(拡張現実)の技術において、カメラ画像の上にCG画像を重ねる場合には、ARマーカ画像を認識して位置と向きを検出する。AR測量は、この機能を測量に応用したものである。これによりARマーカ中心の3次元座標(X,Y,Z)と面の向き(yaw, roll, pitch)を計測することができる。ARマーカの画像認識には、オープンソースソフトウェアが用意されており、今回はOpenCVを使用した。

座標・角度はカメラ固有の値による相対座標として出力されるため、任意の座標系で使用するには、キャリブレーションと座標変換を必要とする。本システムでは、重機の旋回中心を原点とする相対座標(重機座標)に変換して使用した。

また、ARマーカ面の向きの情報を活用することで、マーカ中心から離れた座標を算出することが可能である。本システムでは、自動運転の目標位置とするため、AR測量値を最終的に重機座標系上のブロック把持孔中心座標に換算した。

(2) 把持AR測量の精度

AR測量におけるマーカ認識性能は、カメラの解像度とマーカの大きさに依存する。本システムでは、想定された最大作業半径である約10m先のマーカを安定して測量できる組み合わせとして、4KカメラとA1サイズのマーカを採用し、以下の精度を確認した。

- ・撮影距離に対して誤差は約0.2%
- ・実施工における平均作業半径7.5mに対する精度は±15mm

(3) 把持画像処理速度

AR測量の画像処理は、1秒間に数回～数十回行うことができる。処理速度は、使用するPCのスペックと画像解像度によって決定される。本システムでは、ノート型PC(CPU:1.1GHz, クアッドコア, メモリ:2GB)と4K画像の組み合わせにより3.5fpsを実現した。特に据付動作でのブロックの回転角度調整では、リアルタイムでの計測を必要したが、十分な処理速度を確保することができた。

4.2 キャビン搭載型ロボット

本システムでは、キャビン搭載型ロボット(写真-6)を導入し、ロボットに汎用バックホウを操作させることにより自動運転を行った。これは、専用に開発した重機を使用する自動運転システムでは迅速な導入は難しく、今後の開発成果活用には不都合であると考えたためである。

今回使用したロボットはゴムチューブの人口筋肉をエアーによって伸縮させて重機レバーを操作することができる。バックホウに搭載したPCに

よる自動運転と操作室からのリモコン操作による遠隔運転を実施した。

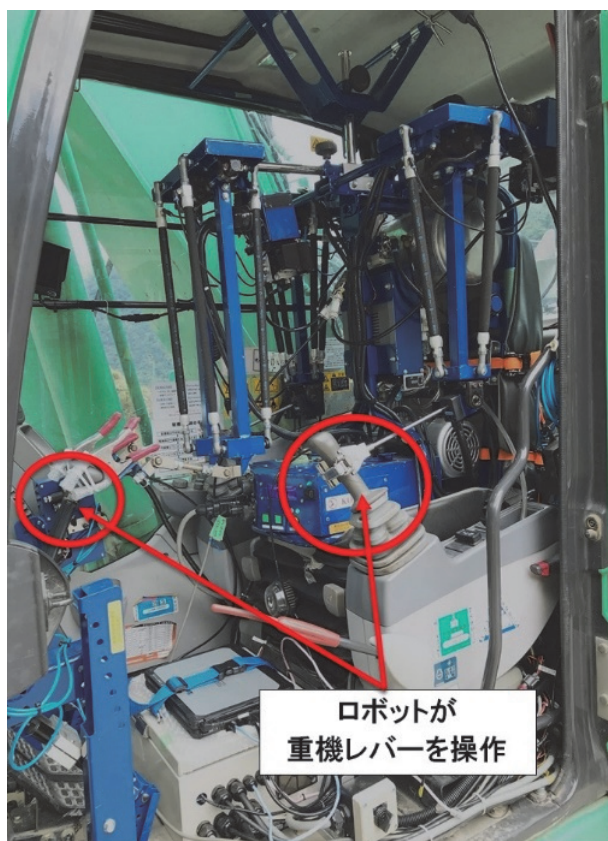


写真-6 重機キャビン内のロボット搭載状況

4.3 重機のリアルタイム姿勢計測

重機の自動運転では、重機の姿勢をリアルタイムに把握し制御を行う必要がある。そこで、本自動運転システムでは、ブームとアームの角度を計測する傾斜計と旋回角度を計測する旋回角度計（磁気スケール）を取付けた。また、アタッチメントは常に鉛直下向きとなる構造のため、路盤の不陸により重機が傾いている場合に、アタッチメント先端の算出位置を補正する機体傾斜計を取付けた。

5. 自動運転システム

5.1 自動運転システム構成

自動運転のシステム構成を図-3 に示す。自動運転の制御は下記の通り行った。

- ① バックホウのキャビン上部に取付けた4Kカメラにより、ブロックに貼り付けたARマーカを撮影
- ② カメラ画像を元に重機搭載PCにより目標ブロックの位置を計測
- ③ ②の位置を重機の自動動作の目標姿勢（ブーム角、アーム角、旋回角）に変換
- ④ ③の目標姿勢と重機姿勢計測センサ値から、ロボットへの動作指令を生成
- ⑤ ロボットは動作指令データに基づいて重機を自動操作

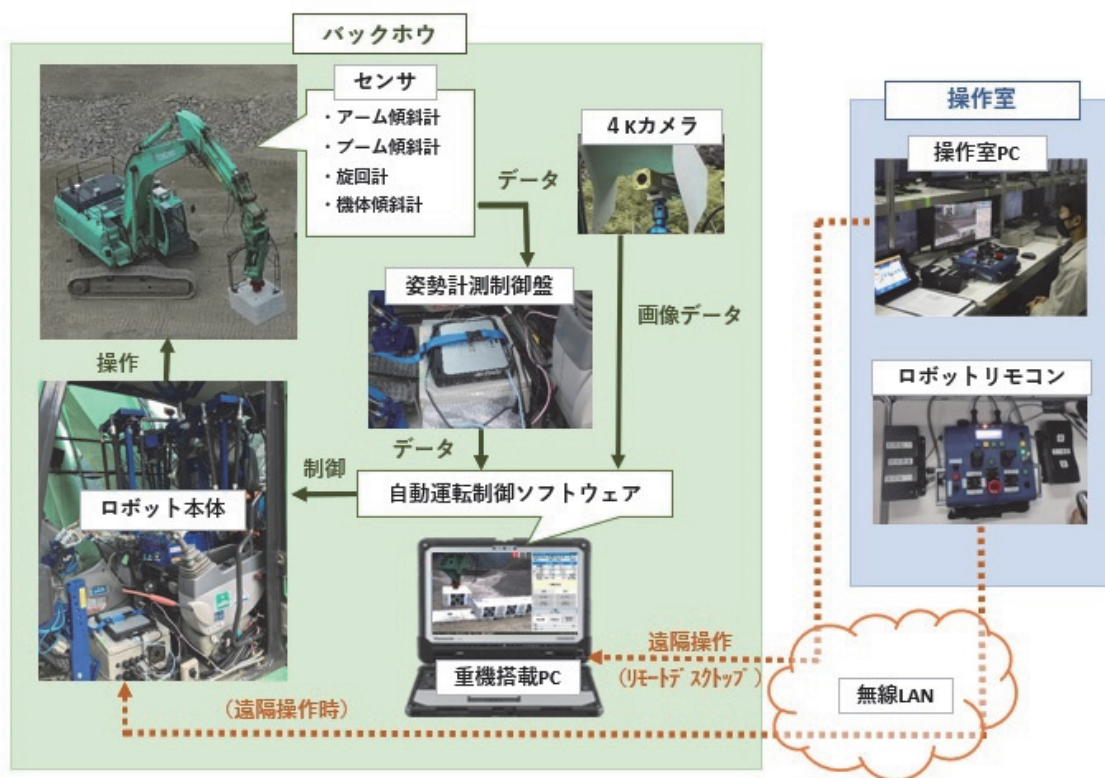


図-3 システム構成図

自動運転に関わるセンサやPC、ロボットは重機内において有線接続し、応答遅れの影響がない構成とした。操作室には操作用PCを設置し、リモートデスクトップを用いて重機搭載PCを監視、操作した。操作室と重機間の通信は無線LANとした。

自動運転のオペレータは、操作画面(写真-7,8)上で自動運転の開始や、表示される次動作の承認などをマウスのクリック操作により行った。

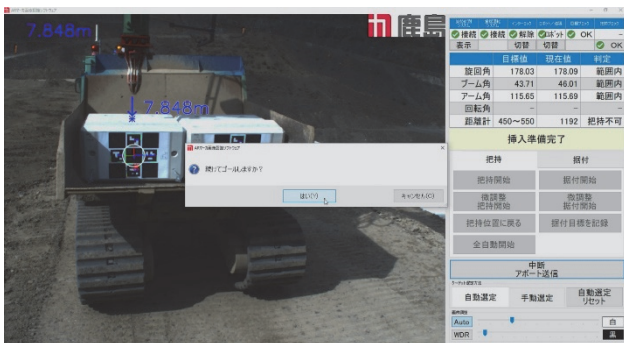


写真-7 操作画面（把持動作中）



写真-8 操作画面（据付動作中）

5.2 自動運転フロー

キャリーダンプ1台により搬入されるブロック2個を連続して据え付ける動作を1サイクルとして、自動運転を行った。図-4に自動運転のフローを示す。事前に目標位置のAR測量と記録を行うことにより、スムーズな連続動作を実現した。また、ブロックを2個据えるごとに重機を走行移動させる動作はオペレータの遠隔操作により行った。

5.3 動作の精度向上と効率化

本システムでは、把持・据付ともに自動動作に「サブゴール」という考え方を取り入れた。サブゴールは、写真-9と写真-10に示すように、把持対象ブロックまたは据付基準ブロックから約0.5m離れた位置である。これにより、以下の自動動作の精度向上と効率化を実現した。

- ・自動動作中にサブゴール位置において再測量を行い、必要に応じて自動微調整動作を行うことにより精度を向上

- ・サブゴールまでは速度重視の高速動作、サブゴール以降は精度重視の低速動作とすることによりサイクルタイムと精度を両立

加えて、把持動作、据付動作においてそれぞれ以下のような工夫を行った。

(1) 把持動作

サブゴール以降はブーム下げのみとして把持孔にアタッチメントを挿入した。単一かつ単純な動作とすることによって、サイクルタイムの短縮と精度の向上を図った。

(2) 据付動作

サブゴール位置において把持中ブロックと据付位置の基準となる既設ブロックの回転角度を合わせる動作を行い、据付精度を向上させた。回転角度の計測と制御には、専用のセンサは使用せずに

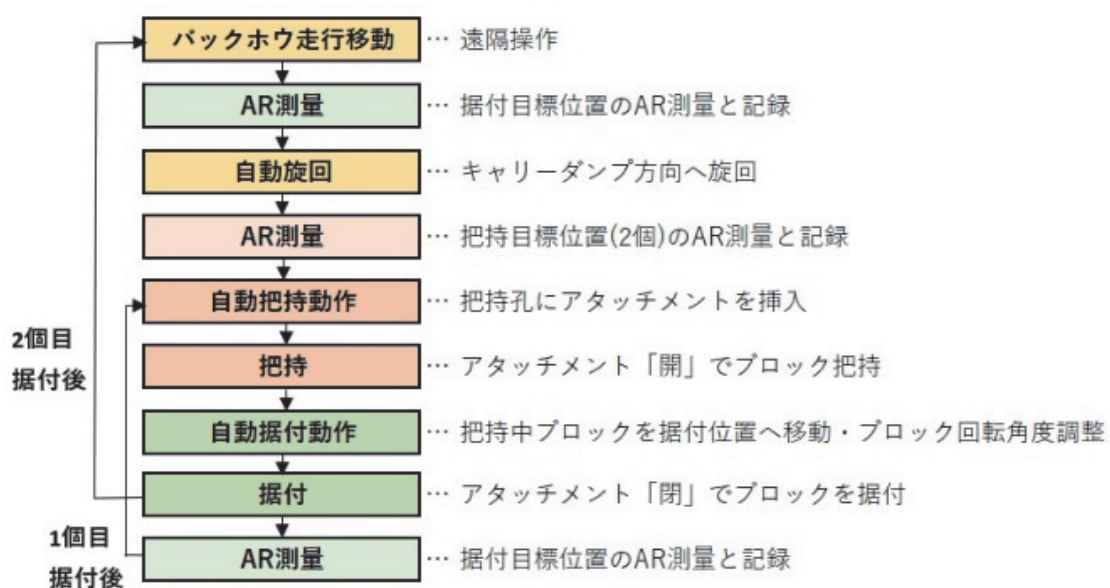


図-4 自動運転フロー

AR 測量のマーカ面角度計測機能を用いた。実施工において、1 度以下の誤差内に回転角度を計測できることを確認した。

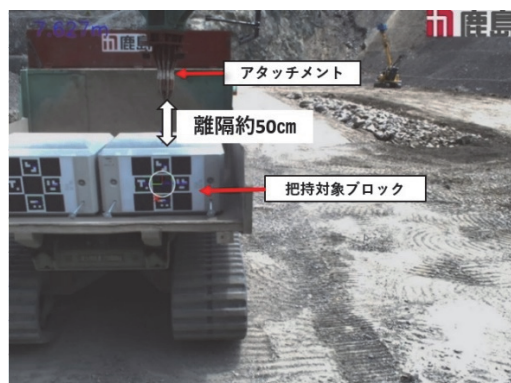


写真-9 自動把持サブゴール位置

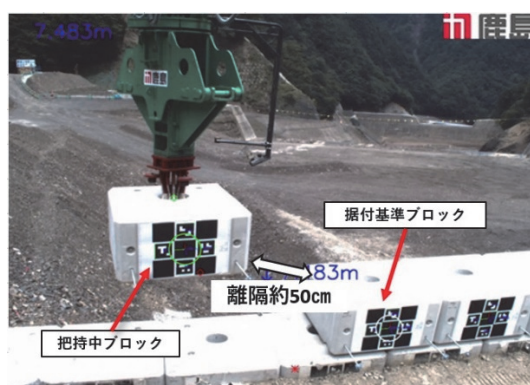


写真-10 自動据付サブゴール位置

6. 施工実績

6.1 精度

把持動作に関しては、実施工の過程において自動動作の調整を行って動作精度の向上を図り、アタッチメント挿入動作の成功率は 100%を達成した。

据付動作に関しては、据付位置の基準となる既設ブロックとの隙間を 10mm 以下として据え付けられることを確認した。把持中ブロックを既設ブロックの低い位置に軽く押し当ててから降ろすような動作としたことと、嵌合構造の働きにより高精度の据付を実現させた。

6.2 サイクルタイム

自動運転の 1 サイクル（ブロック 2 個分の把持と据付）にかかる時間は、自動運転では 7 分 13 秒、遠隔操作では 9 分 16 秒となり、自動運転により約 20%のサイクルタイム短縮を実現した。把持動作の所要時間は自動運転と遠隔操作においてほぼ同じだったが、据付動作については遠隔操作の場合に約 1 分所要時間は長くなった。把持動作では $\phi 270\text{mm}$ の把持孔にアタッチメントを挿入するための許容誤差は大きいのにに対し、据付動作では把持中ブロックの位置と回転角度を高精度に合わせて据え付ける必要があり、遠隔操作の場合は頻繁

にやり直し動作が発生してサイクルタイムに影響した。

また、遠隔操作ではオペレータに大きな負担をかけるため、作業効率の低下や休憩を必要とするのに対して、自動運転では一定の作業効率による作業を継続できることから、1 サイクルあたりのサイクルタイム短縮実績である 20%以上の生産性向上効果を期待できる。

7. おわりに

プレキャストブロック据付の自動運転システムを開発して実施工に導入し、作業の生産性向上を実現した。

今回の施工ではオペレータ 1 名に対して自動運転重機 1 台の運用であったが、複数重機を使用して同時施工を行う場合は、オペレータ 1 名により複数重機の自動運転を監視することも可能であると考えられ、さらなる生産性向上を期待できる。

また、AR マーカとキャビン搭載型ロボットを組み合わせた自動運転は、プレキャストブロックの据付にとどまらず、多種多様な作業にも応用可能な技術であるとする。今後も自動化施工の拡大を目指して、応用と改良を進めていく所存である。