

## 国内初となる災害現場における砂防堰堤自動化施工

鹿島建設(株) 正会員 ○松本健太郎 鹿島建設(株) 正会員 江口 健治  
 鹿島建設(株) 正会員 森田 真幸 鹿島建設(株) 正会員 渡辺 大貴

### 1. はじめに

2011年9月に発生した台風12号は、紀伊半島の広い範囲で総降水量が1,000mmを超え、奈良県上北山村では総降水量が1,800mm超と平均年間降水量の6割に達するなど記録的な大雨となり、この大雨の影響により、奈良県五條市大塔町赤谷地区においても、大規模土砂崩壊が発生した。その結果、崩壊土砂により赤谷川が堰き止められ、河道閉塞が発生し、湛水池が形成された。発生した河道閉塞の特徴は、崩壊土砂量が約1,138万 $m^3$ および湛水容量が約100万 $m^3$ と過去最大規模となっている点である。さらに流域面積が約13.77 $km^2$ と大きく、降雨による湛水池の水位上昇が顕著であるため、2011年の発災以降、計19回の越流を繰り返している。

赤谷地区では、河道閉塞の決壊に伴う土石流による新たな土砂災害を防止するため、緊急対策工事として、越流水を安全に下流側に流下させる排水路の施工から着手した。その後、抜本対策工事として、砂防堰堤や床固工群、溪流保全工群などの砂防設備を下流側に向けて整備し、2020年2月より3号砂防堰堤の施工に着手した(図-1)。本稿では、崩壊斜面直下に位置する3号砂防堰堤工事において、安全性確保と施工の効率化を両立させるために実施した国内初となる災害現場における砂防堰堤の自動化施工の実績について報告する(写真-1)。



写真-1 施工状況(2021年6月)



図-1 赤谷地区対策工事全体概要図

キーワード 深層崩壊、湛水池、河道閉塞、砂防堰堤、遠隔操作施工、自動化施工

連絡先 〒540-0001 大阪府大阪市中央区城見 2-2-22 鹿島建設(株)関西支店土木部 TEL06-6946-3311

## 2. 工事概要

本工事の3次元設計データを図-2に示す。3号砂防堰堤は、河道閉塞箇所の下流側に位置し、河道閉塞脚部の安定化を図ることで、河道閉塞箇所全体の侵食による決壊の防止を目的としている。赤谷地区は発災以降、大規模な再崩壊を繰り返し、現在も斜面に不安定な土砂が堆積していることから、施工中の安全性を確保するため、出水期間中(6月15日～10月31日)は3号砂防堰堤施工箇所を立入規制区域に設定し、遠隔操作にて施工する必要がある。

そのため、3号砂防堰堤工事は、立入規制区域内の遠隔操作施工および自動化施工に対応した構造設計を完成させるため、設計段階において、施工者の技術・経験を取り入れる技術提案・交渉方式(ECI方式)の技術協力・施工タイプの対象工事として、工事を進めている。

3号砂防堰堤の堰堤本体は、下流側にコンクリートブロックの外部材設置後、その内部にソイルセメント(INSEMLレベルIII設計基準強度:  $3.0\text{N}/\text{mm}^2$ )を打設する構造となっており、袖部(コンクリート配合: 18-5-40BB)および水通し部(コンクリート配合: 21-5-40BB)はコンクリートの現場打ち構造となっている(図-3, 4)。

## 3. 遠隔操作施工の課題と対策

### (1) 施工効率の低下

出水期間中、3号砂防堰堤は立入規制区域内での施工となり、人が重機に搭乗し、施工箇所に入り込むことができないため、遠隔操作にて施工する必要がある。一般的に遠隔操作施工は、オペレータがモニタを確認しながらの操作となり、熟練したオペレータでも、通常の有人施工と比較して、60～70%に施工効率が低下する。そのため、砂防堰堤の構築が遅延し、出水時の被災リスクが増大することが懸念された。そこで、堰堤の通年施工を実現するとともに、出水期間中の作業の効率化を図り、被災リスクを低減させるために自動化施工を導入した。

### (2) 無線通信障害の発生

遠隔操作施工は、無線通信技術を使用し、重機操作の指令データや固定カメラの映像データを通信する環境を構築しなければならない。そのため、通信範囲が広範囲となり、稼働重機を増台させると無線の干渉やハンドオーバー(遠隔操作施工で稼働する重機が無線LAN基地局を移動中に自動で切り替える通信設定)に起因する無線通信障害の発生が懸念された。そこで、現場環境や作業特性に合わせて無線の周波数帯や配置を検討し、無線通信障害の防止に効果的な遠隔操作施工・自動化施工設備の配置計画を立案し実施した。

### (3) 遠隔操作現場密度測定方法の確立

ソイルセメントの品質管理の一つに現場密度の測定がある。従来、現場密度は、RI計測器を使用し、人力にて線源棒を打ち込み、測定することが一般的である。しかし本工事では、出水期間中は立入規制区域外から遠隔操作にてソイルセメントの現場密度の測定方法を確立する必要がある。

### (4) 遠隔操作出来形測定方法の確立

砂防堰堤の出来形管理では、設計上の必要断面を確保するために、ブロックの出来形精度を確保することが重要である。ここでも、出水期間中は立入規制区域外から遠隔操作にてブロックの出来形の測定方法を確立する必要がある。

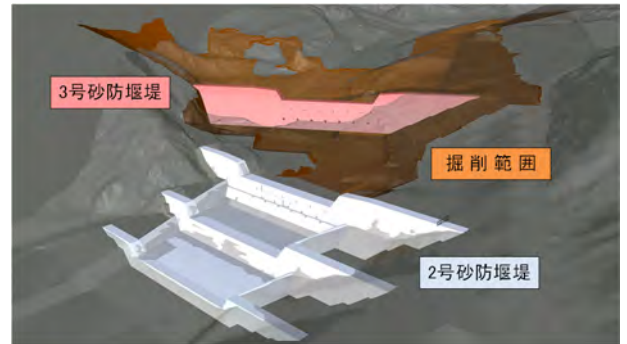


図-2 3次元設計データ

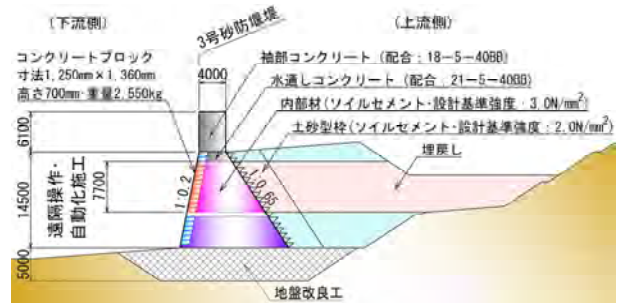


図-3 計画縦断面図

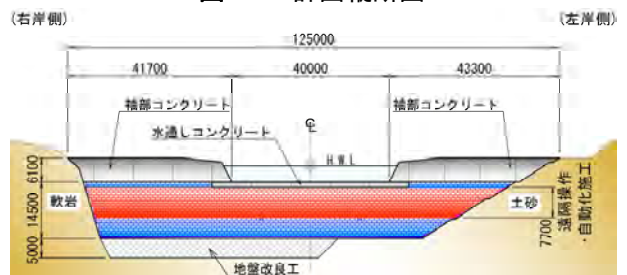


図-4 計画横断面図

## 4. 施工計画

### (1) 施工計画概要

本工事の施工フローを図-5に示す。砂防土工にて掘削後、2021年6月14日までの非出水期に地盤改良工および堰堤本体の下部を施工し、2021年6月15日から10月31日までの出水期に、砂防堰堤の遠隔操作施工・自動化施工を実施した。その後、非出水期に砂防堰堤の水通し部および袖部のコンクリートを打設し、砂防堰堤を完成させる計画である。

### (2) 自動化施工の導入

3号砂防堰堤の施工順序を図-6に示す。図-6に示す①～⑥の作業のうち、遠隔操作施工では作業に時間を要し、かつ精度の確保が困難なため、②ブロック設置、④ソイルセメント敷均し、⑤転圧作業において、自動化施工を導入する計画とした。

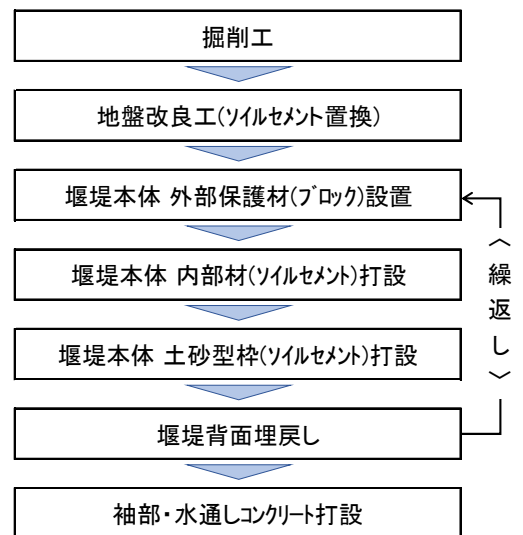


図-5 施工フロー



図-6 3号砂防堰堤施工順序

### (3) ブロック設置の自動化施工

砂防堰堤の下流側に設置する外部保護材は、厚さ15cm程度のコンクリート製の壁面材で、人が鋼材等で固定する方法が一般的な施工方法である。この外部保護材の設置作業を人力の助けなく、機械のみで設置するため、ブロック自体が自立し、ソイルセメント転圧時の側圧に抵抗できる形状で、かつ機械のみで揚重・設置できるブロックを開発した。ブロック形状の3Dデータを図-7に示す。



図-7 ブロック形状 (3D データ)

ブロックの形状は、寸法 1,250mm×1,360mm、高さ 700mm、重量 2,550kg で、重心位置に上部 φ270mm～下部 φ400mm の把持孔が開いている。ブロック底面の凹部は、下段のブロック上面の凸部と嵌合するため半円状となっており、ブロックの微調整が難しい自動化施工においても精度よく設置可能な構造とした(図-8)。

また、ブロックの形状に合わせてバックホウに取り付ける専用把持装置も併行して開発した(図-9)。把持装置は、φ180mm まで先鋭化した装置先端部をブロック中央に設けた把持孔に挿入することで容易にブロックを把持し、設置することが可能である。

図-10 にブロック設置の自動化施工で使用するバックホウの概要を示す。今回、新たに開発したブロック設置の自動化施工技術は、高価な自動化専用の建設機械を準備する必要がなく、汎用の 1.4m<sup>3</sup> バックホウの運転席に人工筋肉ロボット(コーワテック社製:アクティブロボット SAM)を搭載することで対応している。バックホウに装備した傾斜計、旋回角度計、距離計等の計測用センサで重機姿勢を高精度に計測し、キャビン上部に搭載した AR カメラ(4K カメラ)でブロックに貼付した A1 サイズの AR マーカを画像認識し、自動運転のために必要な相対座標を GNSS 位置情報に頼らず瞬時に計算可能である。



図-8 ブロック形状

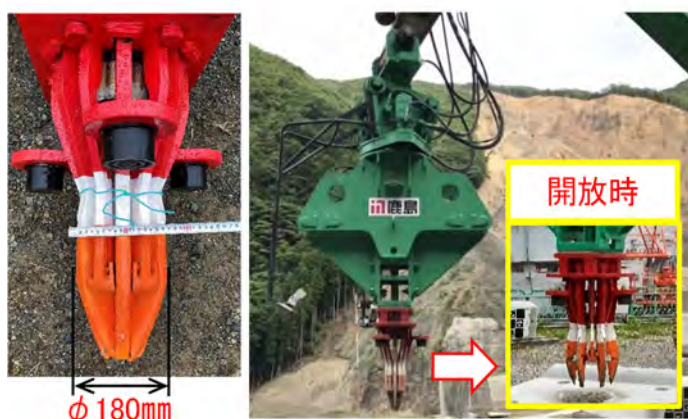


図-9 専用把持装置

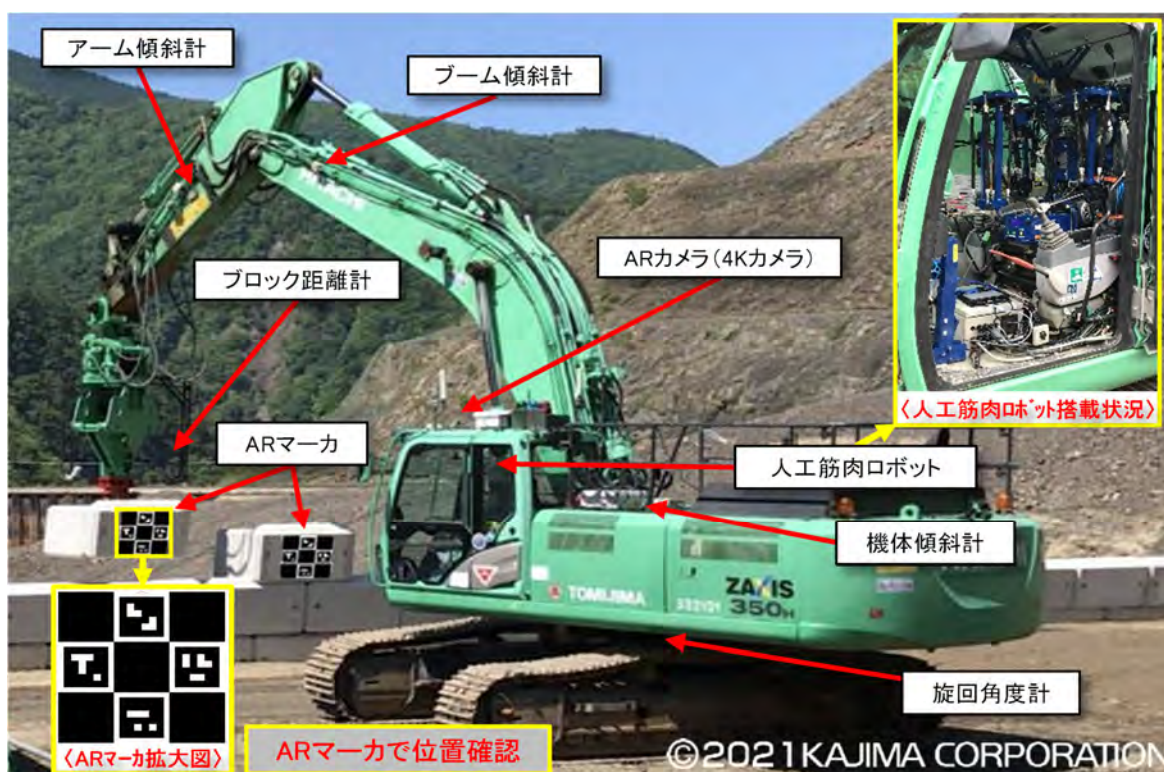


図-10 自動化施工仕様バックホウ概要図

#### (4) ソイルセメント敷均し・転圧の自動化施工

赤谷地区では、ソイルセメント敷均し・転圧の自動化施工に建設機械の自動運転を核とした次世代の建設生産システム「A<sup>4</sup>CSEL<sup>®</sup>」(クラウドアクセル)を導入した。

自動化施工に使用する重機は、21t ブルドーザ(敷均し)と 10t 振動ローラ(転圧)を使用した。これらの重機は、自動化機器や GNSS 装置を設置する必要があるため、約 1 ヶ月間、メーカーの工場にて機体改造後、約 3 ヶ月間、実験フィールドにて試験施工を行った。また、ソイルセメントは、11t 不整地運搬車を 5 台使用し、遠隔操作施工にて運搬した。

自動化施工では、最適な敷均し・転圧区画の設定、各作業の作業順序、それぞれの重機の走行経路パターンの作成が重要である。そこで、事前にソイルセメントに対応した計画策定のシミュレーションと実機での試験施工を繰り返すことで最適な重機の走行経路と施工スケジュールを決定した(図-11)。

自動化施工の敷均しは、ブルドーザのブレード幅を基準に、最少敷均し幅を 4.5m とし、敷均し幅に合わせて、不整地運搬車の荷下ろし台数を変更した(図-12)。また、積込重量計測機能を搭載したバックホウにてソイルセメントの積載量を一定に保ち、不整地運搬車の荷下ろし位置は、ブルドーザ前方に設置した車載カメラにて確認した。自動化施工の転圧は、ローラの隣接レーンへの最小移動距離を考慮し、延長 15m を一つの転圧区画に設定し、ソイルセメントの製造から転圧完了までを 120 分以内となるように施工スケジュールを作成した。

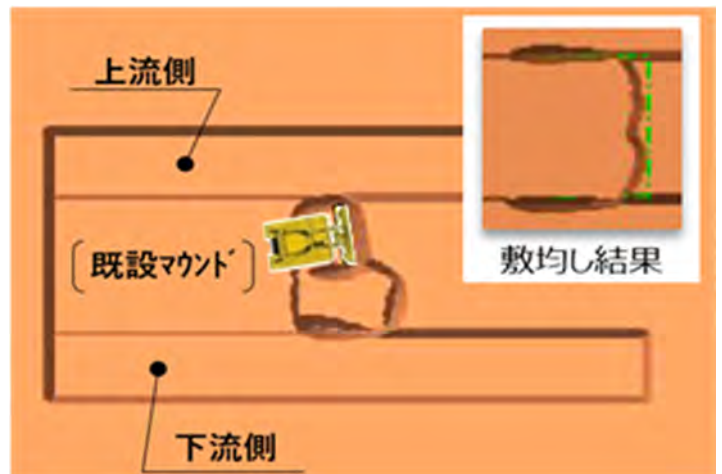


図-11 敷均しのシミュレーション図

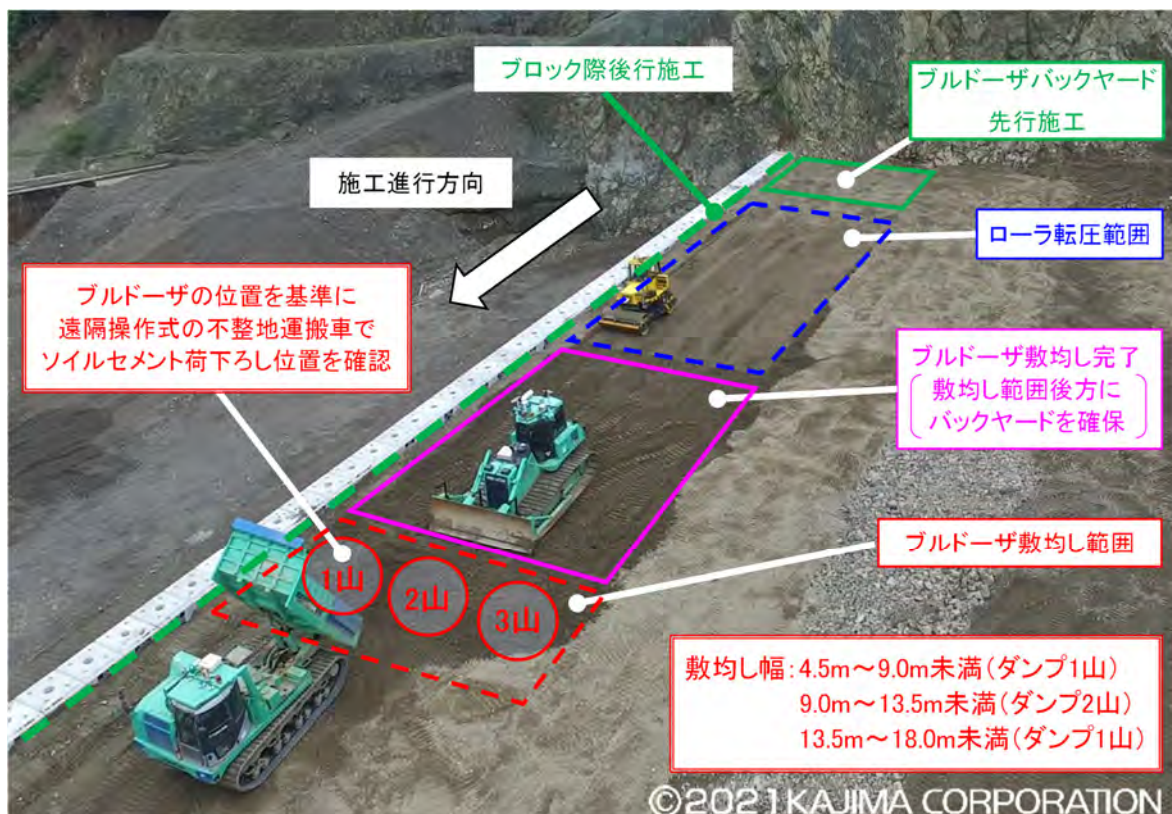


図-12 敷均し・転圧の自動化施工状況

### (5) 遠隔操作施工・自動化施工設備配置計画

遠隔操作施工・自動化施工の遠隔操作室は、立入規制区域より下流側の安全な場所に設置した(図-13)。重機オペレータは、遠隔操作室に設置したモニタを見ながら約 1km 離れた上流側にある施工ヤードの重機を遠隔操作する必要があった。そこで、施工箇所全域の現場状況が確認できるように 100m 間隔に固定カメラを設置するとともに、バックホウには重機の前方と足元が確認できるように、車載カメラを 2 カ所設置した。また、施工時に死角となる箇所や固定カメラからの映像で確認できない箇所については、その都度、移動カメラ車を移設し、重機オペレータの視界を確保した。

遠隔操作施工・自動化施工に必要な重機操作の指令データや固定カメラの映像データは、デジタル無線を採用した。具体的には、遠隔操作施工の通信には、移動体通信に特化した 5GHz 帯無線アクセスシステムを採用し、100m 間隔に無線 LAN 基地局を設けることで、広範囲に移動する複数の重機が円滑に操作可能な設定とした。自動化施工の通信には、2.4GHz 帯無線を採用し、遠隔操作施工用の無線と区別することで、電波干渉しない設定とした。また、固定カメラの映像データの通信には、大容量かつ高速通信が可能な 25GHz 帯対向性無線を採用し、ハイビジョン映像が遅延なく通信可能な設定とした。



図-13 遠隔操作施工・自動化施工設備配置計画図

### (6) 遠隔操作現場密度測定方法の確立

本工事では、ソイルセメントの現場密度を遠隔操作で測定するため、散乱型 RI 計測器(フィールドテック社製: FT-107R)を使用し、遠隔操作にて揚重、運搬、測定できる方法を検討した(図-14)。

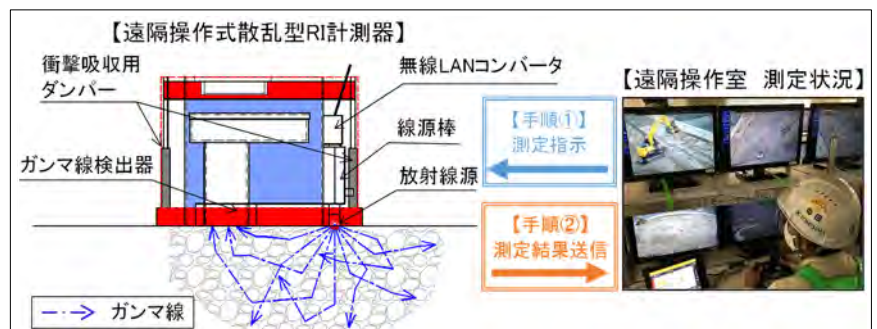


図-14 遠隔操作現場密度測定概要図

RI 計測器の遠隔操作は、本工事にて開発した遠隔制御用ソフトを使用し、遠隔操作室に設置した測定用のパソコンにて行った。遠隔操作に必要なデータの通信には、RI 計測器に無線 LAN コンバータを取り付け、遠隔操作施工で使用している 5GHz 帯無線アクセスシステムを使用した。

測定箇所までの RI 計測器の揚重および運搬は、本工事にて製作した専用の吊治具を使用し、移動式クレーン仕様の 0.45m<sup>3</sup> バックホウにて行った。また、RI 計測器は精密機械であるため、外側を鋼材で堅固に防護し、設置時の衝撃を緩和するために、RI 計測器の四隅に衝撃吸収用のダンパーを装着することで、耐衝撃性を向上させた(図-15)。

### (7) 遠隔操作出来形測定方法の確立

本工事では、ブロックの出来形を遠隔操作で測定するため、ブロック設置に使用している 1.4m<sup>3</sup> バックホウに GNSS 装置を取り付け、把持装置の先端部にて X・Y・Z 座標の測定が可能な設定とした。ブロック設置時は、3次元設計データにて位置を確認し、さらにブロック設置完了後は、ニコン・トリンプル社製の画像計測ソリューション (Nivo-i) でブロックの出来形を遠隔操作にて測定する一連の管理方法を確立した(図-16)。

## 5. 施工実績と成果

### (1) ブロック設置の自動化施工

ブロック設置の自動化施工では、今回、新たに開発した自動運転システムにより重機の操作指令データを作成し、このデータに従ってバックホウに搭載した人工筋肉ロボットを自動運転にて遠隔操作し、ブロックの把持から設置までの一連の作業の自動化が可能となった(図-17)。また、遠隔操作室からブロックの出来形を安全に測定し、高い出来形精度を確保することができた(ブロック設置数量：824 個)。



図-15 現場密度測定状況(遠隔操作室)



図-16 ブロック出来形測定状況(遠隔操作室)



図-17 ブロック設置の自動化施工状況

遠隔操作室のオペレータは、マウス操作および作業状況を管制するだけでよく、自動運転によりブロック設置の作業効率を約 25%向上させ、安全性の確保と施工の効率化を図ることができた(図-18)。

## (2) ソイルセメント敷均し・転圧の自動化施工

ソイルセメント敷均し・転圧の自動化施工では、事前に計画した施工スケジュールに従い、作業を進めることができた。そのため、狭隘な施工場所での重機輻輳による作業時間の遅延を防止でき、かつ所定の精度、設計上必要な現場密度を十分確保した施工が可能となった(ソイルセメント打設量：8,900m<sup>3</sup>)。

ここでもブロック設置と同様に遠隔操作室のオペレータは、マウス操作および作業状況を管制するのみで、自動運転によってソイルセメントの敷均し・転圧の作業効率を約 40%向上させ、安全性の確保と施工の効率化を図ることができた(図-19, 20)。

## 6. おわりに

国内初となる砂防堰堤の自動化施工に対し、技術提案・交渉方式(ETC方式)での技術協力業務における設計段階から国土交通省近畿地方整備局紀伊山系砂防事務所と連携を密に図ることにより、これまで安全および品質のトラブルもなく順調に工事が進み、2022年4月に3号砂防堰堤が完成した(写真-2)。本工事の実績が、類似工事の参考となれば幸いであり、今後も自動化施工技術の適用拡大を図ることで、人出不足や熟練労働者不足への対応、建設工事の生産性向上につながることを期待する。

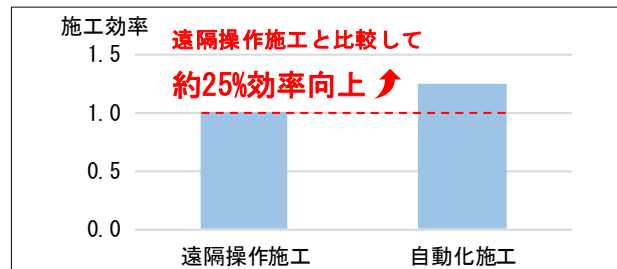


図-18 ブロック設置の自動化施工実績



図-19 敷均し・転圧の自動化施工状況

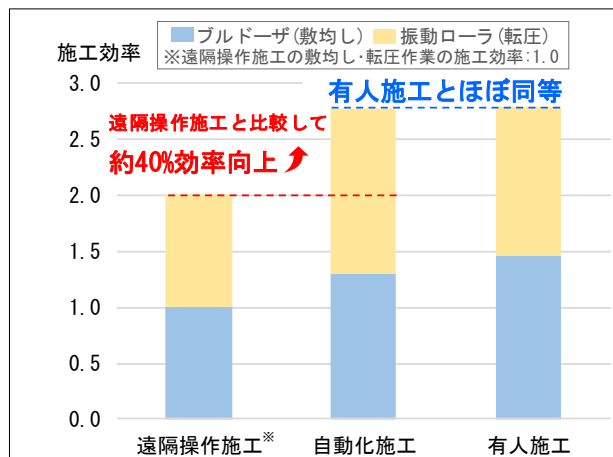


図-20 敷均し・転圧の自動化施工実績



写真-2 3号砂防堰堤完成(2022年4月)