

動画と静止画によるハイブリッド遠隔 コミュニケーションシステム 山岳トンネル工事における切羽遠隔臨場の実証

有 田 真 一・山 田 大 樹

近年、建設現場では遠隔臨場による品質・出来形管理の効率化が進められているが、山岳トンネル坑内など高速で安定した通信環境の構築が困難な現場において、動画による遠隔臨場では、動画伝送に起因する画質低下や遅延などの課題があった。そこで、現場の通信状況に応じて動画と高解像度静止画を組み合わせ、限られた帯域でも詳細かつ円滑な情報共有を可能とするハイブリッド遠隔コミュニケーションシステムを開発した。本稿では、システムの概要と特長、山岳トンネル切羽での遠隔臨場における現場実証結果を報告する。

キーワード：遠隔臨場，DX，出来形管理，切羽，岩判定，カメラシステム，動画配信

1. はじめに

山岳トンネル工事では、受発注者の立会のもと、施工中にトンネル切羽の地質状況を確認・評価し、適切な施工方法や支保パターンを決定する必要がある。しかし、刻々と変化する施工や切羽の状況に合わせて関係者の立会時間の調整に手間がかかる。近年、建設現場では品質や出来形管理の立会において、動画を主体とした遠隔臨場による効率化が進められているが、多くの山岳トンネル坑内では高速かつ安定した通信環境の構築が難しく、切羽の地質状況を詳細に把握できる高解像度な動画のリアルタイム共有が実現できていなかった。そのため、限られたネットワーク帯域下でも現場と遠隔地が円滑に情報を共有し、現場の詳細な状態を把握できる遠隔臨場技術の開発が求められてきた。

このような背景から、現場の通信環境に応じて伝送可能な画質の動画と、細部の状況確認が可能な高解像度静止画を組み合わせることで、建設現場のネットワーク環境が良好でない場合においても、現場と遠隔地間で円滑かつ詳細な状態確認を可能とする「動画と静止画によるハイブリッド遠隔コミュニケーションシステム」を開発した。

2. 開発システムの概要と特長

(1) システムの概要

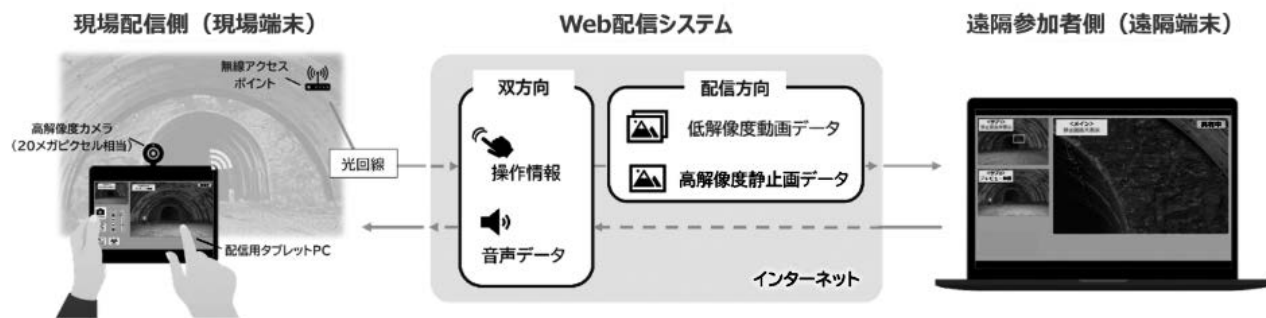
本システムは、動画と静止画の2つの確認手段を組み合わせることで、画質劣化や通信環境の影響を低減

した遠隔コミュニケーションを実現するものである。現場全体の状況把握には、現場の通信環境に応じて伝送可能な画質で配信される動画を用い、切羽の詳細な状態確認には高解像度な静止画を活用する。静止画は静止画ファイル（JPEG）として遠隔地と共有されるため、通信による画質低下の影響を受けず、高画質な画像で細部の状態を確認できる。また、静止画には視認性を高める画像処理を施し、トンネル坑内など照度の低い環境でも細かな凹凸や割れ目が鮮明に判別できるよう工夫している。

(2) システムの構成

システムの構成を図1に示す。現場配信側では、現場説明員がタブレットPCと高解像度カメラで構成された現場端末を用いて、撮影や表示操作を行う。撮影した動画はクラウドサーバー上のWeb配信システムにより、リアルタイムで配信され、現場説明員の操作により必要に応じて高解像度静止画を撮影し、動画配信と並行して静止画データが遠隔参加者側の遠隔端末に共有される。動画と高解像度静止画の撮影は1台の高解像度カメラを制御し、低解像度の動画配信中に静止画撮影操作を行うことで瞬時に高解像度静止画を取得し、動画データの伝送と同時に静止画データを送信する仕組みとなっている。

遠隔地の発注者等の参加者は、専用のソフトウェアを必要とせず、PCやタブレット等の端末からWebブラウザを利用して配信システムにアクセスでき、複数人が同時に閲覧することができる。さらに、現場端末



図—1 システム構成

と各遠隔端末間では、動画・静止画の共有に加え、画面操作情報や相互のポインタ位置の共有、双方向の音声通話も可能となっており、円滑なコミュニケーションを実現している。

(3) 動画と静止画の送信制御

トンネル坑内の無線LAN環境では、壁面反射による電波干渉等で通信速度が大きく変動する場合がある。特に切羽前周辺では通信機器の設置が難しく、切羽から離れた場所に設置したアクセスポイントに接続することが多く、通信への影響が生じやすい。本システムでは、このような通信環境が変動しやすいことを考慮し、以下のような撮影データの伝送制御を行っている。

- ・動画ストリーミング配信では、現場端末と配信サーバー間の通信状況を常時監視し、通信帯域に収まるデータ容量となるよう動画の画質を自動調整して伝送する。
- ・静止画ファイルの送信では、配信サーバーへの送信状況を監視し、通信の影響等で正常送信できなかった場合は自動で再送信を行う。また、サーバー側でファイルの破損を検出した場合は再送信を要求する。

(4) 表示画面構成

本システムの表示画面は、現場端末および遠隔端末の双方において、メインウィンドウとサブウィンドウを備え、動画と静止画の両方を表示できる構成となっており、2種類の撮影データを用いて現場状況を確認することができる。動画モードでは、メインウィンドウにリアルタイム配信された動画データを表示し、現場の状況把握に活用する。静止画モードでは、高解像度静止画をメインウィンドウに表示し、切羽の詳細な状態確認や評価に用いることができる。現場端末のボタン操作で動画モードと静止画モードの切り替えが可能で、現場端末の表示に応じて各遠隔端末の表示も連動するため、現場配信側と遠隔参加者側の双方で同じ

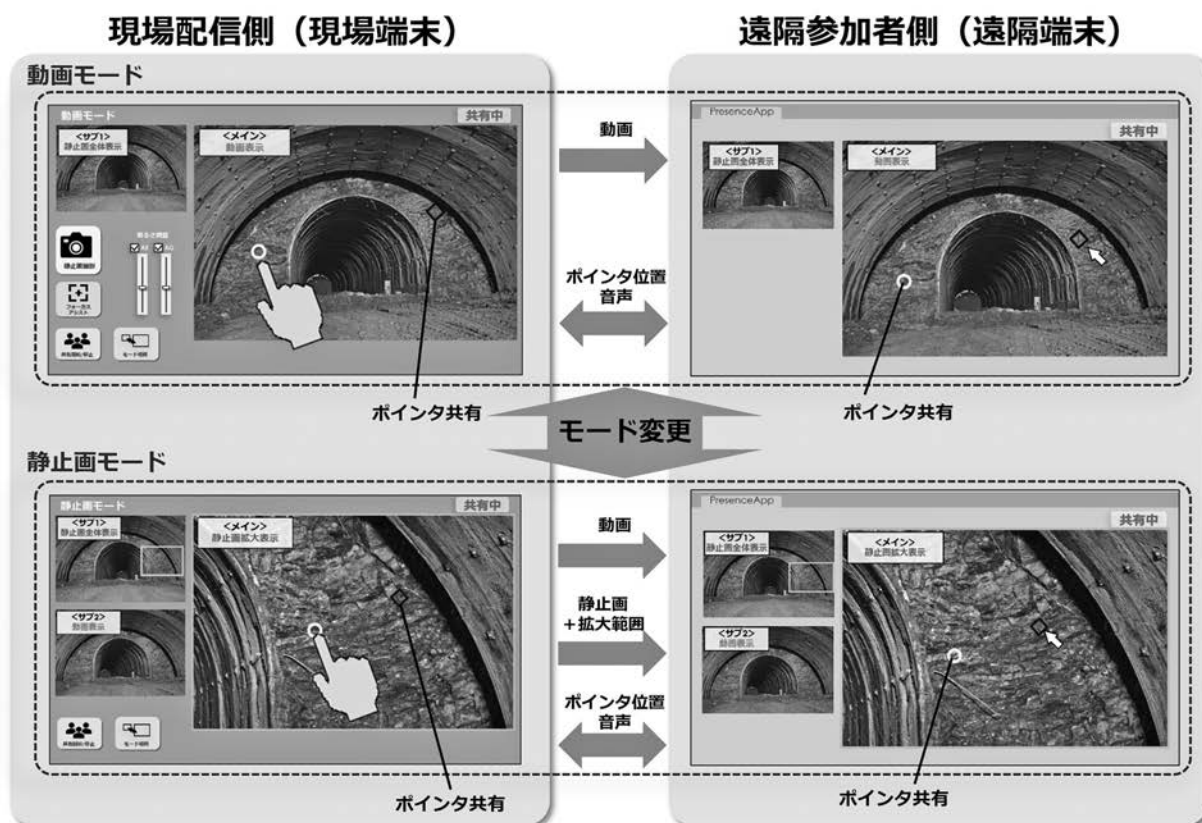
画面を見ながら確認できる（図—2 参照）。

(5) ユーザーインターフェースと操作性

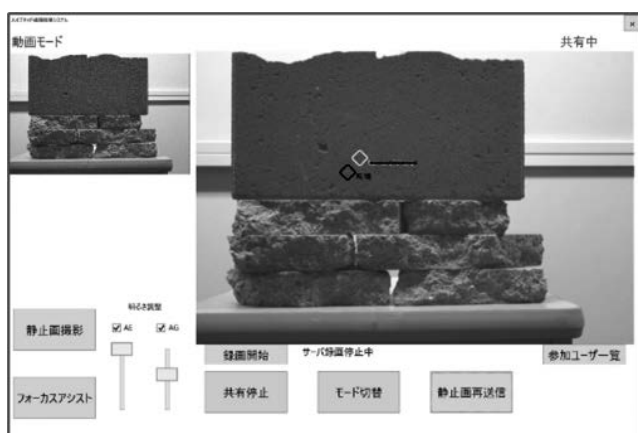
現場端末にはタブレットPCを採用し、タッチ操作による直感的なインターフェースを実装している。動画と静止画表示ウィンドウの下部には各種操作ボタンが配置されており、撮影操作、遠隔端末とのデータ共有・非共有の切り替え、Web配信サーバーへの接続ユーザーの確認、遠隔臨場の録画など、多様な機能をワンタッチで実行できる。また、動画や静止画内の特定位置を指示できるポインタ表示機能を備えており、ポインタにはユーザー名が表示されるため、指示しているユーザーが一目で把握できる（図—3 参照）。

動画モードでは、動画配信中に静止画の撮影が可能であり、撮影後に静止画内容を確認した上で送信操作を行うことで、遠隔端末にも静止画が共有される。なお、現場端末で撮影した静止画を確認し、遠隔端末と共有されるまでの間は、遠隔端末側では動画モードの表示が維持されるため、遠隔参加者の作業確認を妨げない設計となっている。

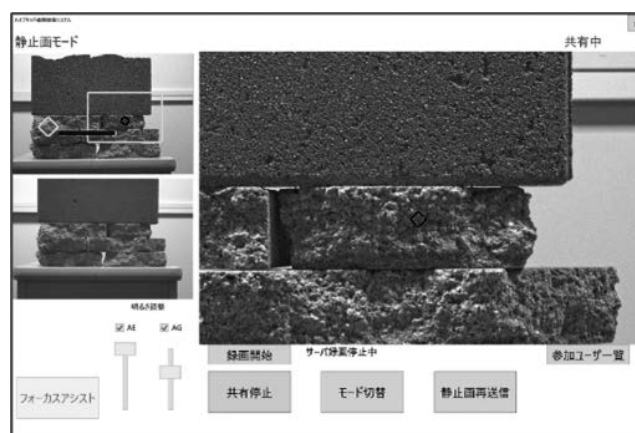
静止画モードでは、静止画の任意範囲を拡大表示できる機能を有している。メインウィンドウには拡大画像が、サブウィンドウには全体画像と拡大範囲枠が表示され、全体画像のうちどの範囲が拡大表示されているか把握しやすくしている（図—4 参照）。拡大表示範囲は現場端末の操作に連動し、リアルタイムで表示が切り替わる。この際、静止画データ自体は既に遠隔端末に共有されているため、最小限の操作情報のみで表示切り替えが実現できる。また、遠隔端末側でも任意範囲の拡大表示が可能であり、現場端末との表示連動を容易に切り替えることができる。静止画上のポインタは全体画像と拡大画像間で連動しており、拡大画像上で指示した位置は全体画像上にも表示される。さらに、拡大画像の範囲外を表示したい場合には、全体画像上でポインタを用いて指示することで、表示範囲を指示することもできる。



図ー２ 現場端末と遠隔端末の画面遷移構成



図ー３ 現場端末の表示画面例（動画モード）



図ー４ 現場端末の表示画面例（静止画モード）

このように、本システムは遠隔臨場を効率的に推進できるよう、現場端末と遠隔端末における情報共有と操作性、視認性を高める工夫をしている。

(6) データ保存とダウンロード機能

遠隔臨場で撮影した静止画や、立会いの様子はサーバー上で音声付きの動画データや高解像度静止画データとして保存でき、後からダウンロードすることができる。遠隔臨場の内容を撮影データとともに記録するため、検査記録としての利用だけでなく、多様な地質評価の教材としても活用できる。地質評価には専門

的な経験が必要だが、過去の立会記録を参照することで、知見の蓄積や教育への応用が期待される。

3. 山岳トンネル工事における切羽の遠隔臨場の現場実証

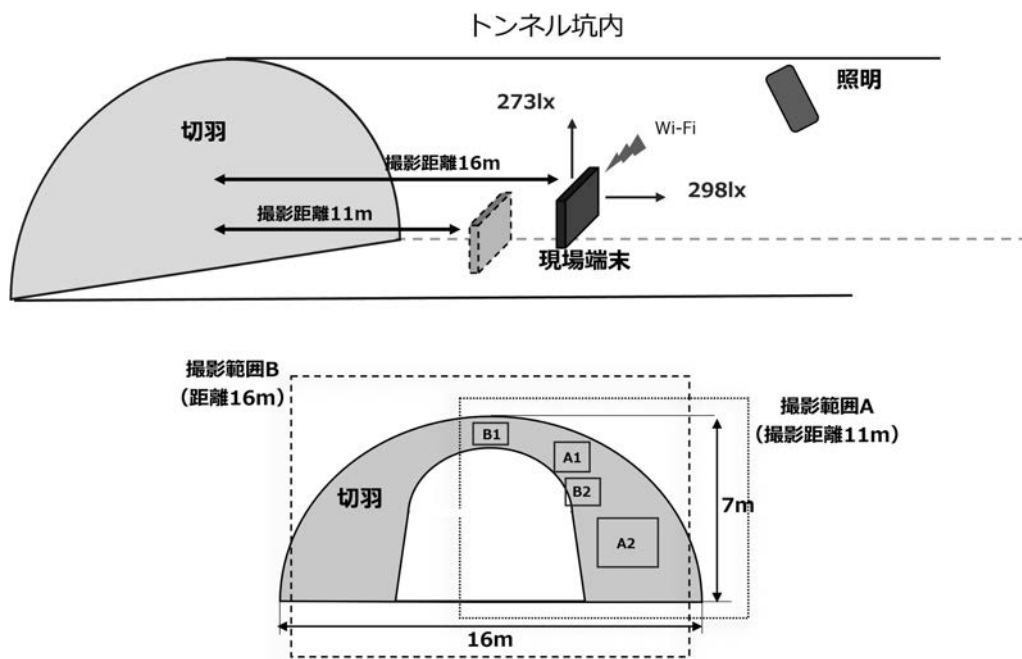
(1) 切羽撮影実験

本システムの現場実証は、滋賀県の新名神高速道路大津大石トンネル工事現場（山岳トンネル）で実施した。切羽は高さ約7m、幅約16m（インバート部除く）であり、日建連の安全対策指針では切羽天端から45°

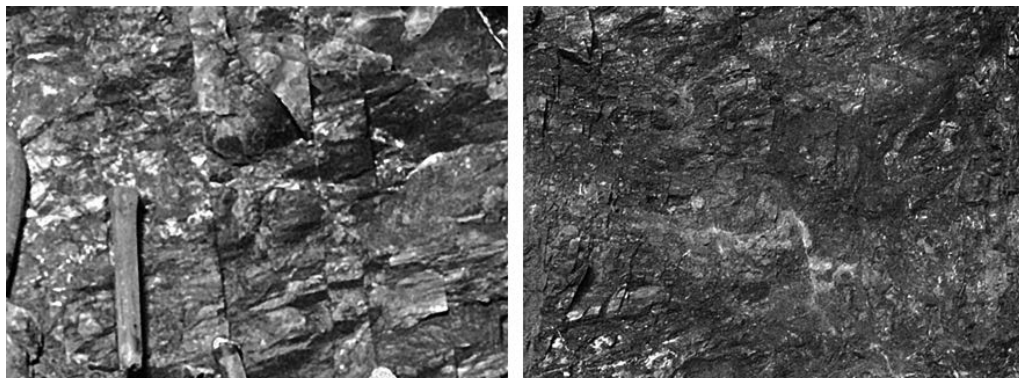
以内、すなわち切羽から7 m 以内は立入禁止区域と定められている。

切羽撮影実験では、立入禁止区域外から現場端末を用いて切羽を撮影し、そのデータをトンネル坑内の無線 LAN を介して Web 配信システムへ送信し、送信された撮影データを評価した。切羽前の撮影場所周辺の無線 LAN 環境は、電波強度や通信速度が変動しており、通信速度が低下する際には、1 Mbps を下回る場合もあった。切羽撮影実験の概要を図一5に示す。立入禁止範囲外の約11 m 地点から撮影した場合、切羽の約半分の範囲が撮影できた（撮影範囲 A）。切羽右肩部を撮影した静止画から領域 A1 と A2 を拡大した画像を図一6に示す。岩盤の凹凸や割れ目の方向など切羽の状態が鮮明に捉えられ、詳細な状態の把握が可能であった。さらに、撮影距離を約16 m まで延

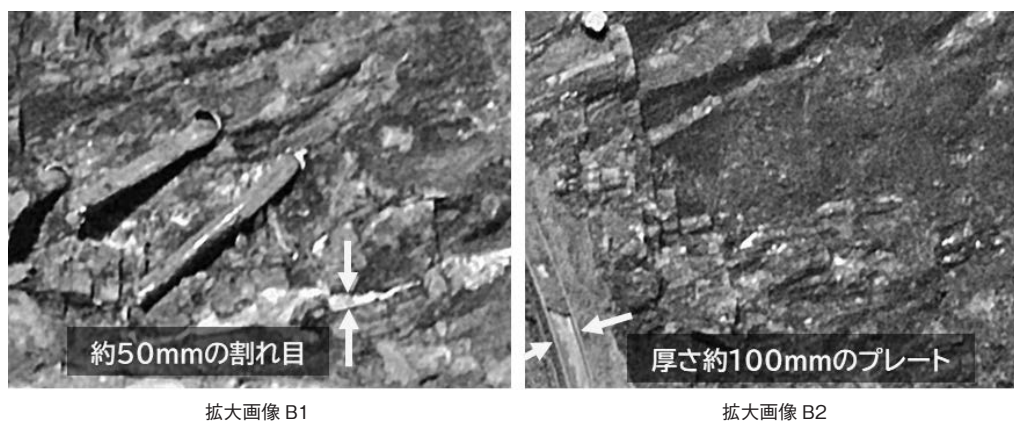
長し、切羽全体を画角内に収めた静止画を取得した（撮影範囲 B）。このとき、現場端末付近の照度は上向き273 lx、水平方向298 lxであった。図一7の拡大画像 B1 は、切羽の天端領域の拡大画像であり、画像から幅約50 mm の割れ目が確認できた。また、拡大画像 B2 は、切羽右肩部の領域の拡大画像であり、画像から厚さ100 mm のプレートが識別できた。切羽観察表の評価区分の一つである「割れ目の頻度」では、5 cm 間隔の割れ目の識別が求められるが、切羽全体を収めた画像においても5 cm 間隔の割れ目が明確に判別できた。トンネル坑内の照度下でも、視認性を向上させる画像処理を施した20メガピクセル相当の高解像度な静止画により、切羽の岩盤状態の詳細な観察や評価に必要な画質が確保されていることが確認できた。



図一5 切羽撮影実験概要



図一6 切羽撮影画像（撮影距離11 m）



拡大画像 B1

拡大画像 B2

図一七 切羽撮影画像（撮影距離 16 m）



図一八 遠隔臨場実証のようす（現場配信側）



図一九 遠隔臨場実証のようす（遠隔参加者側）



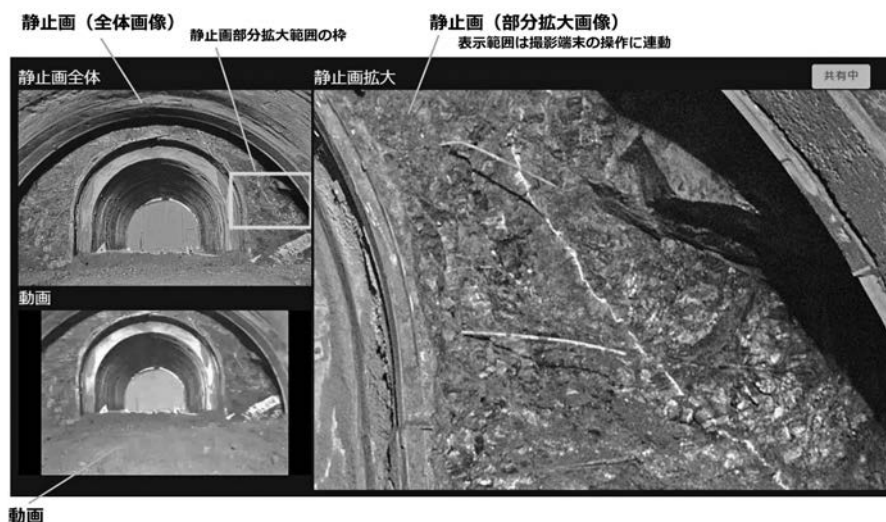
図一〇 遠隔端末画面（動画モード）〔開発中の画面〕

(2) 遠隔臨場の実証実験

遠隔臨場の実証実験では、西日本高速道路㈱の発注者立会のもと、実際の岩判定を模擬して行った。現場配信側では、立入禁止範囲よりも十分に離れ、切羽全体が収まるよう切羽面から16～18 m程度離れた位置から撮影を行った。

図一八には現場配信側、図一九には遠隔参加者側のようすを示す。図一〇は遠隔端末の動画モード表

示画面で、メインウィンドウに動画、左上サブウィンドウに静止画が表示される。動画・静止画上で双方向のポインタ表示が可能で、説明位置の指示や撮影希望箇所の指定も容易である。図一〇は遠隔端末の静止画モード表示画面で、左上サブウィンドウに静止画全体、メインウィンドウに拡大画像が表示される。現場端末のタッチパネル操作により任意範囲の拡大表示ができ、操作に応じてリアルタイムに拡大範囲が更新さ



図一 11 遠隔端末画面（静止画モード）[開発中の画面]

れる。高解像度静止画の共有により、切羽全体が収まるように撮影した場合にも拡大画像で細部の凹凸や割れ目などを詳細に確認できる。1回の撮影で広範囲な切羽面の確認が可能であり、拡大範囲を切り替えながら効率的に確認することができる。

(3) 現場実証の結果と効果

現場実証において、発注者から以下のような意見を得られ、本システムの有効性を確認した。

- ・静止画の画質は、岩判定に必要十分なものであった。
- ・実際の岩判定時も切羽面に近づくことは難しいため、画像が明るく肉眼より見やすかった。
- ・送風機や機械待機音が聞こえないため、説明の言葉もクリアに伝わった。

これらの結果から、本システムは山岳トンネル工事における切羽の遠隔臨場で、現場状況の詳細な把握と効率的なコミュニケーションに大きく寄与することが示された。また、切羽から離れた位置から1台の端末を用いて実施できるため、作業の安全性が確保できることも確認された。

本システムの岩判定への導入効果は、発注者・受注者で異なる。発注者には移動時間の削減、受注者には施工の待ち時間の削減が挙げられる。大津大石トンネルでは、発注者事務所と現場間の往復所要時間が1時間30分であり、切羽への移動や作業進捗による待ち時間（平均15分程度）も発生する。岩判定は合計65回実施されており、すべてを遠隔臨場で行えば発注者は移動や待ち時間にかかった約114時間を削減できる。特殊な岩層や崩落・抜け落ちなどの際は現地確認が必要であるため、すべての立会を本システムで代替

することはできないが、通常時は本システムを利用し、特殊な場合のみ現地立会を行うことで、入坑回数の低減、業務効率化および安全性の向上が期待できる。

4. おわりに

本稿では、現場の通信環境で伝送可能な画質の動画と、細部の状況確認が可能な高解像度静止画を用いることで、ネットワーク環境が良好でない場合においても、現場と遠隔地で円滑かつ詳細な状態確認を可能とする「動画と静止画によるハイブリッド遠隔コミュニケーションシステム」を紹介した。トンネル切羽の遠隔臨場実証において、本システムの有効性を確認できた。本システムは山岳トンネルにおける遠隔臨場の高度化に留まらず、限られた帯域で詳細確認が必要な遠隔臨場や点検、近接が困難な現場での確認、遠隔での安全パトロールなど、様々な遠隔コミュニケーションの高度化・効率化に寄与することが期待される。

J C M A

[筆者紹介]

有田 真一（ありた しんいち）

シャープ(株)

研究開発本部 ソサイエティイノベーション研究所

第三研究室

主任研究員



山田 大樹（やまだ たいき）

鹿島建設(株)

土木管理本部 土木技術部

