

# MR 技術を活用したトンネル維持管理システムの開発

## Development of Tunnel Maintenance Management System Utilizing Mixed Reality Technology

若林 宏彰\*1  
Hiroaki Wakabayashi

長沼 諭\*2  
Satoshi Naganuma

### 要旨

MR 技術を活用したトンネル維持管理システム（トンネル MR）は、トンネルの維持管理に必要なデータを、実際の構造物の所定の位置に、ウェアラブル端末を介して 3 次元の仮想物体をホログラムで表示することによって、ひび割れなどの不具合や施工精度の確認を容易にしたものである。また、ウェアラブル端末の装着者がハンドジェスチャーで端末を操作しながら、現地でひび割れなどの進展状況を直接スケッチして記録できる作図機能を付加することによって、高精度な点検調書を迅速に作成することが可能になる。

本報告は、トンネル MR を用いて現場実証試験を実施し得られた知見を述べるとともに、今後の導入効果を検討した結果について報告したものである。

キーワード：トンネル MR ホログラム 維持管理

## 1. はじめに

我が国では、高度経済成長期に集中的に整備されたインフラが今後一斉に老朽化する。国土交通省が掲載しているインフラメンテナンス情報によると、道路トンネルに関しては現在使用されている約 1 万 1 千本のトンネルのうち、建設後 50 年以上経過するトンネルが、2023 年では約 27%、2033 年では約 42%と、今後 15 年以内に 1.5 倍以上増加することが判明しているため、効率的に維持管理を行っていく必要がある。一方、道路トンネルの点検は、国土交通省が定める「道路トンネル定期点検要領」に基づき、5 年に 1 回の頻度で近接目視と打音検査による定期点検が実施されている（写真 1）。しかし、実際のトンネル点検作業ではトンネル坑内が暗く、覆工表面が排気ガスやばい塵などで汚れている場合が多いため、不具合箇所を探すのに時間を要している。また、覆工の変状区分の判定においては、地形や地質、水圧などの外圧に起因する変状なのか、乾燥収縮や温度変化、中性化、アルカリ骨材反応などのコンクリートの劣化に起因する変状なのかを判定するのが困難な場合も多い。そのため、現地では、膨大な設計書、施工記録や維持管理記録から総合的な判定を実施するのが困難といった問題点もある。

今回開発した MR 技術を活用したトンネル維持管理システム（以下、トンネル MR）は、現地でウェアラブル端末を使用して、変状箇所と地質情報や維持管理情報を合わせて確認することで覆工の変状区分的確な判定を可能にするとともに、現地でひび割れなどの維持管理データを追加・更新することで維持管理業務の効率化を図るものである。

本報告では、トンネル MR の有意性を確認するために国道 371 号（仮称 新紀見トンネル）道路改良工事において実施した現場実証試験から得られた知見を述べるとともに、今後の導入効果を検討した結果について報告する。

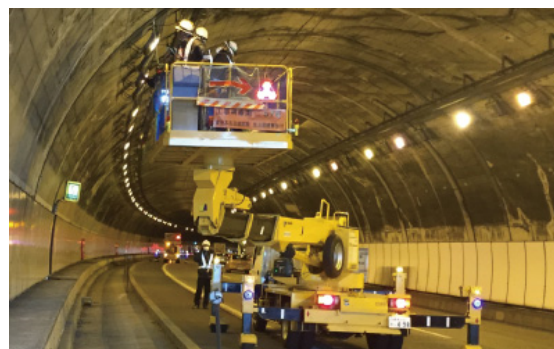


写真 1 トンネル点検状況

## 2. トンネル MR の概要

トンネル MR は、トンネルの点検や変状区分の判定に必要な維持管理データを、ウェアラブル端末を介して実構造物に投射するとともに、現地で維持管理データを追加・更新できるシステムである。

本システムは、事前に施工記録や維持管理データをウェアラブル端末に搭載された小型コンピューターに記録し、現地にて位置情報を付与したビーコンや AR マーカーから、ウェアラブル端末の各種センサーを用いて空間を認識させ、実構造物に 1 分の 1 スケールのホログラムとして 3 次元データを投射するものである（図 1）。また、現地においてひび割れや漏水などの不具合箇所を発見した場合、作図機能

\*1 技術本部 土木技術部 \*2 技術本部 技術企画部

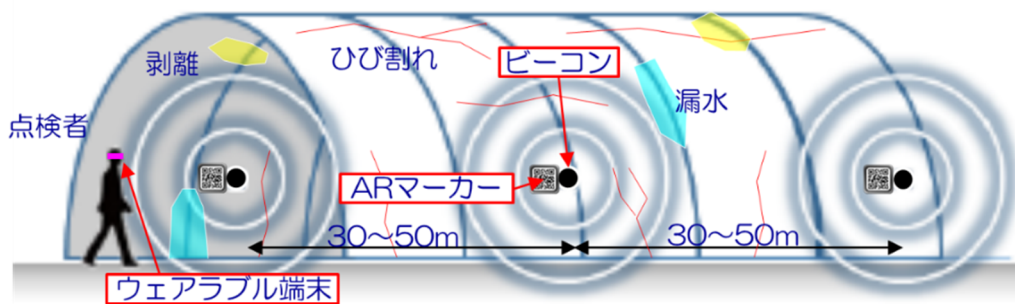


図1 トンネルMRの概要

を使用して維持管理データを追加・更新できる。

今回、トンネルMRにはウェアラブル端末にMicrosoft社製のMRデバイスである『HoloLens』を使用し、維持管理データの投射・更新には当社と共同開発を進めるインフォマティクス社のHoloLens対応の『GyroEye Holo』をカスタマイズしたシステムを使用した。

### 2.1 MRデバイス「HoloLens」

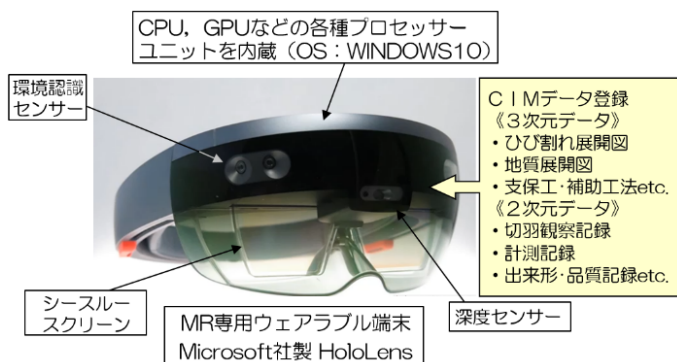
MRデバイスであるHoloLensが映し出すMRについて、VRやARと比較しながら説明する。

一般にビデオゲーム機などで広く使用されるVR (Virtual Reality) は「仮想現実」を意味し、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) などを使用して仮想世界にさまざまな3次元情報を表示するもので、装着者は現実世界から完全に切り離された仮想空間にいるように感じられる。また、AR (Augmented Reality) は「拡張現実」を意味し、タブレットやスマートフォンなどを使用して現実世界に2次元情報を重ね合わせて表示するもので、代表的なものとしては携帯ゲームアプリの「ポケモンGO」などがある。一方、MR (Mixed Reality) は「複合現実」を意味し、VRとARを融合したものであり、HMDなどを使用して現実世界に3次元情報を表示するもので、装着者は現実世界に仮想の物体があたかもそこにあるかのように感じられる。

MR技術を活用するためには、一般に外界の3次元情報をリアルタイムにスキャンする仕組みと、自己位置を正確に特定する仕組みとが必要とされ、これらをケーブルレスかつ周囲に外部センサー機器などが一切不要な単体で実現できるものがMicrosoft社製のHoloLensである(図2)。

HoloLensは、物体の形状や奥行きを認識できる深度センサー、周囲の映像から特徴点を認識する環境認識センサーといった外界センサーを搭載することによりSLAM技術 (Simultaneous Localization and Mapping) を活用できる。このSLAM技術は、深度センサーにより前方3m~5m程度の範囲の物体を3次元メッシュデータとしてスキャンしながら、環境認識センサーにより広範囲かつ高精度に映像

の特徴点を検出してトラッキングを行い、内部のIMU (Inertial Measurement Unit) センサーにより傾きを調整して装着者の自己位置を特定するものである。



使用ソフト: GyroEye Holo (インフォマティクス社) (skp, 3ds, fbx, ifc, dxf等のファイルに対応)

図2 HoloLensの概要

### 2.2 データ入力・表示ソフト「GyroEye Holo」

HoloLensに3次元データを入力・表示するためのソフトであるGyroEye Holoは、HoloLensがバックグラウンドでスキャンする現実空間の3次元メッシュデータ上に、専用のARマーカーを起点として、仮想の図面や3次元データを連結・固定して表示させる仕組みとなっている。さらにクラウドサーバーを介して、いつでも任意にユーザーがデータを変換し、HoloLensに取り込める流れが一連のパッケージとして採用されている。トンネルMRは、このGyroEye Holoをカスタマイズし、トンネル坑内で維持管理データを投射・更新できるようにシステム化したものである。

### 2.3 ホログラム表示機能

トンネルMRのホログラム表示機能は、HoloLensのSLAM技術により覆工表面に構築された3次元メッシュデータ上に、任意の維持管理データをトラッキングさせながら映し出す機能である。

ホログラム表示機能の使用手順を以下に示す。

- ① トンネルの点検および覆工の変状区分の判定に必要と

なる維持管理データを HoloLens に登録する。

- ② トンネル坑内の覆工 3~5BL 毎の任意の位置に、位置情報を付与した AR マーカーを設置する。
- ③ HoloLens により AR マーカーから位置情報を読み込み、位置情報とリンクした維持管理データを呼び出す。
- ④ HoloLens の外界センサーにより、トンネル覆工表面と装着者の位置を認識し、レイヤー一覧から呼び出した維持管理データを覆工表面の任意の位置にホログラムとして投射する (図 3~6)。
- ⑤ 移動中は、常時、HoloLens の外界センサーにより、前方 3~5m 程度の範囲の物体をスキャンしながら現在位置を測定・認識し、移動に合わせて覆工表面にホログラムを追随させる。
- ⑥ 2次元データは予め任意の位置に登録ポイントとして配置しておき、装着者が 1m 以内に接近すると自動的に展開するように設定する (図 7)。

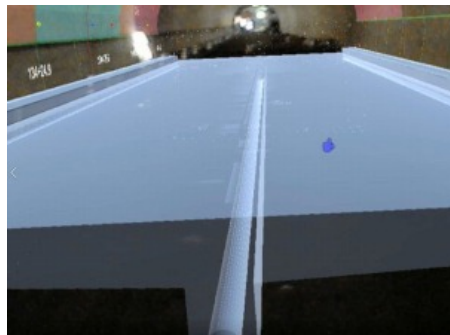


図 6 舗装コンクリート・排水表示例



図 7 2次元データ登録ポイント表示例



図 3 レイヤー一覧表示例

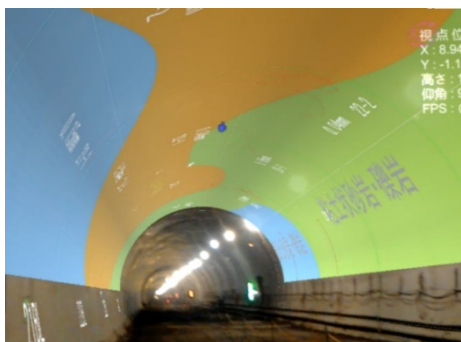


図 4 地質展開図表示例

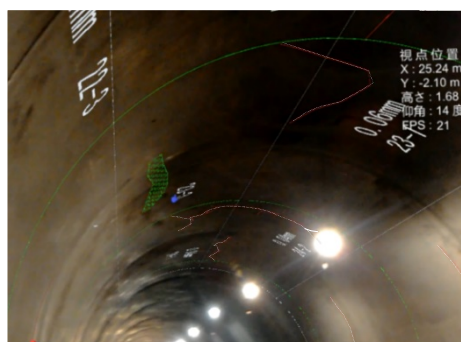


図 5 ひび割れ展開図表示例

## 2.4 作図機能の概要

作図機能は HoloLens のハンドジェスチャー認識機能を使用し、SLAM 技術により覆工表面に構築された 3 次元メッシュデータ上に、ひび割れのトレースや長さ計測、記号やコメントの貼付けを行うものである。今回使用したハンドジェスチャーは、Air Tap (人差し指を立てて、まっすぐ下に倒す動作。クリックに相当) と、Tap and Hold (Air Tap をしてから人差し指と親指で掴むような動作。ドラッグやスクロールに相当) の 2 種類で、装着者の指の動きを認識して指先の延長上にあるメッシュデータに作図を行うシステムである。

今回開発した作図機能の項目を以下に示す。

- ひび割れ朱書き機能：ひび割れの進展に合わせてひび割れをトレースする機能 (図 8)
- 計測機能：ひび割れや不具合箇所の高さや大きさを計測する機能 (図 9)
- 記号貼付け機能：現地の漏水箇所や剥離・剥落箇所などに記号を付記する機能 (図 10)
- コメント貼付け機能：現地のひび割れや不具合箇所に音声や文字を付記する機能
- CAD 出力機能：現地で作図した 3 次元の維持管理データを事務所に持ちかえり、2 次元展開図や 3 次元展開図として CAD データに出力する機能 (図 11~12)。



図 8 ひび割れ朱書き機能表示例

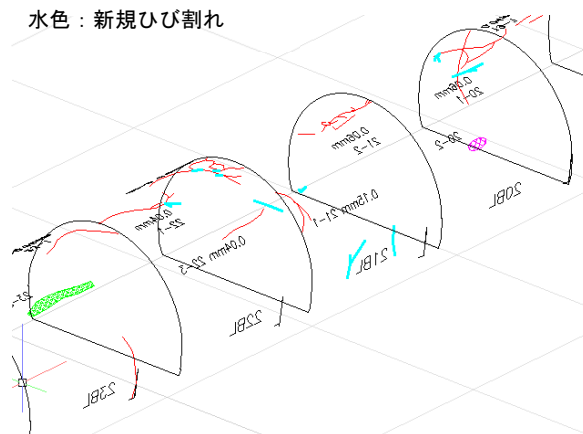


図 12 3次元ひび割れ展開図表示例

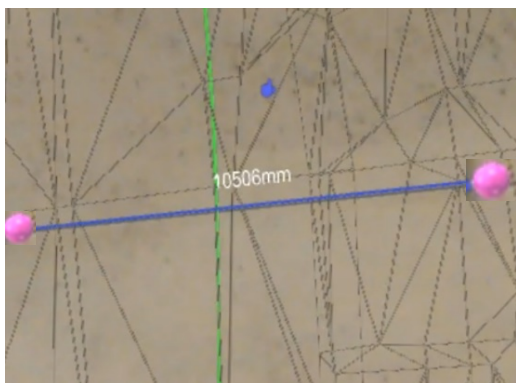


図 9 計測機能表示例



図 10 記号貼付け機能表示例

### 3. 現場実証試験

#### 3.1 現場実証試験の概要

トンネル MR の有意性を確認するため、国道 371 号（仮称新紀見トンネル）道路改良工事において現場実証試験を実施し、複数の維持管理データを投射・更新させた際のシステムの視認性や動作性、システム精度について確認した。今回使用した維持管理データを以下に示す。

- 2次元データ：断面図、切羽観察記録、内空変位計測結果、トンネル品質管理記録、覆工出来形調書
- 3次元データ：ひび割れ展開図、地質展開図、湧水展開図、支保パターン展開図、3次元モデル（舗装コンクリート・排水）

#### 3.2 システムの視認性と動作性の確認

トンネル坑内の照度環境と、特徴点の少ない覆工表面において、トンネル MR の視認性や動作性を確認した。

図 13 に、ひび割れ展開図、地質展開図および 2 次元データ登録ポイントを重ね合わせて表示させた装着者の視覚画像を示す。

HoloLens で投射されるホログラムは、坑外の明るい照度環境下においては視認しにくいことがあるが、トンネル坑内の 20~30 ルクス程度の暗い照度環境下においては鮮明に視認できることを確認できた。また、特徴点の少ない覆工表面において、自己位置を特定しながら地質展開図やひび割れ展開図など複数のホログラムを重ねて表示させても、装着者の動きや移動に対して、ずれや遅れを生じることなくスムーズに追従することを確認できた。

図 14、15 に作図機能によるひび割れ作図状況を示す。

HoloLens でスキャンした覆工表面の 3 次元メッシュデータ上に、装着者が外界センサーの認識距離となる 3~5m 離れた位置からひび割れや記号を作図できることを確認でき

水色：新規ひび割れ		
22-2 0.04mm		
0.04mm 22-1	0.06mm 21-2	0.06mm 20-1
22-3 0.04mm	21-1 0.15mm	20-2
22BL	21BL	20BL

図 11 2次元ひび割れ展開図表示例

た。また、一旦 HoloLens 内に外界センサーの認識距離内で 3 次元メッシュデータが記録されると、装着者の指先の延長上にある約 7m 先のトンネル天端のメッシュデータ上にも、ひび割れや記号などを作図できることも確認できた。

以上の結果より、トンネル MR を使用することにより、装着者が現地において移動しながら覆工表面にホログラムをスムーズに映し出し、覆工表面の離れた位置から維持管理データを追加・更新できることを確認できた。

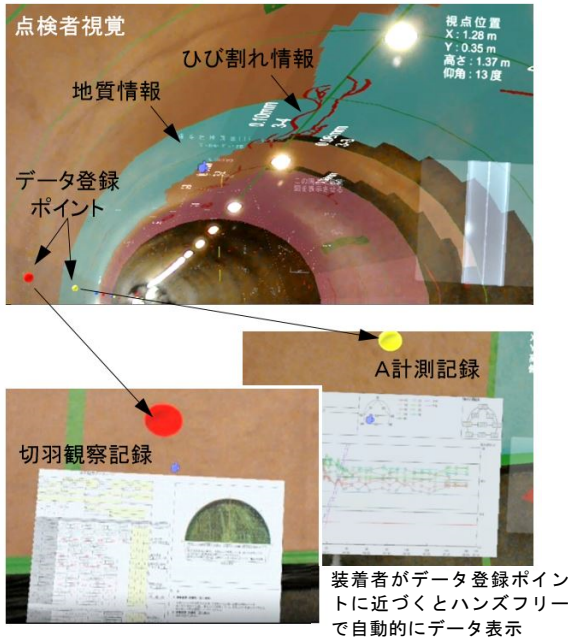


図 13 装着者の視覚画像

### 3.3 システム精度の確認

装着者の移動時や作図時に生じるトンネル MR のシステム精度を確認するため、トンネル側壁部やトンネル底盤部などの作図の位置、その他の条件に応じて生じるずれとの関係性や規則性について確認し、その要因を推定した。

システム精度の測定方法は、トンネル MR の作図機能を使用して 3 次元データによる計測ポイントを方眼紙の原点に重ね合わせ、装着者が 30m 移動した際の方眼紙の原点と HoloLens が映し出す計測ポイントとのずれを確認する方法とした。

図 16、17 にシステム精度確認用方眼紙の設置状況を示す。精度確認用の方眼紙は、トンネル側壁部 (GL+1.5m) およびトンネル底盤部 (GL±0m) の L 側、R 側の 30m 区間に 10m 間隔で合計 16 箇所設置した。

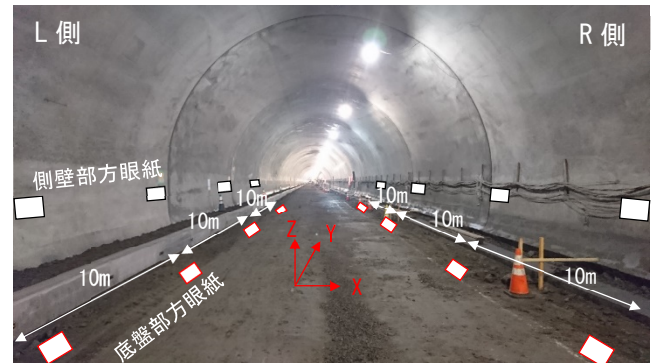


図 16 システム精度確認用方眼紙の設置状況



図 14 ひび割れ作図状況 (トンネル側壁部)

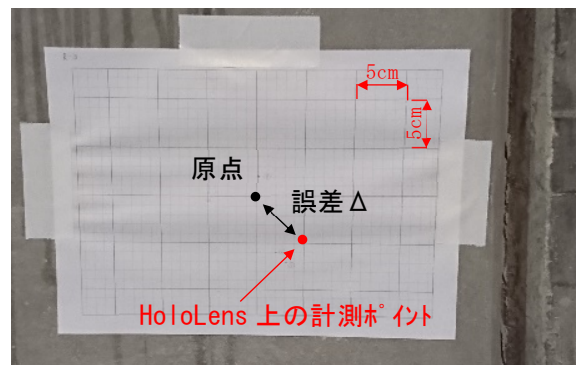


図 17 システム精度確認用方眼紙



図 15 ひび割れ作図状況 (トンネル天端部)

表 1、2 にシステム精度確認結果を示す。

30m 歩行時のずれは 8mm から 50mm の範囲にあり、最大値 50mm のずれが確認された箇所は、トンネル側壁部で 2 点/8 箇所、トンネル底盤部で 1 点/8 箇所であった。これにより、HoloLens のシステム精度は歩行距離を 30m とした場合に 0.17% 程度の小さい値であることを確認できた。また、これらの結果からは、作図の位置や測定回数との関係性や規則性は認められなかった。さらに、装着者の歩行速度が速い

場合や動作が大きい場合に、HoloLens の外界センサーにより 3 次元メッシュデータが新しく再構築され、HoloLens の映し出す計測ポイントにずれが生じる傾向が見られた。これらのことから、ずれの要因としては HoloLens の SLAM 技術を活用する際の自己位置を特定するための情報や、情報処理能力が不足していたことが考えられる。

維持管理業務の内、過去のひび割れと作図スケッチとを重ね合わせ、その進展状況を確認するような点検・調査業務では、ホログラムの表示精度が重要となってくる。そのため、今後はホログラムの表示精度や作図精度のさらなる向上を目指して、HoloLens の情報処理能力の向上、自己位置特定機能の改善や周囲環境情報の補填などについて開発を進める必要があると考えられる。

表 1 システム精度確認結果（トンネル側壁部）

測点	L-1			L-2			L-3			L-4				
坑内距離	0m			10m			20m			30m				
誤差 (mm)	方向	Y	Z	Δ	Y	Z	Δ	Y	Z	Δ	Y	Z	Δ	
	1回目	8	0	8	0	0	0	-15	-5	16	-15	0	15	
	2回目	-32	-25	41	-40	-20	45	-50	5	50	-50	0	50	
Δ最大値(mm)	41			45			50			50				
測点	R-1			R-2			R-3			R-4				
坑内距離	0m			10m			20m			30m				
誤差 (mm)	方向	Y	Z	Δ	Y	Z	Δ	Y	Z	Δ	Y	Z	Δ	
	1回目	-40	10	41	-20	10	22	0	20	20	10	10	14	
	2回目	0	-20	20	5	-20	21	15	-10	18	20	0	20	
Δ最大値(mm)	41			22			20			20				

表 2 システム精度確認結果（トンネル底盤部）

測点	LD-1			LD-2			LD-3			LD-4				
坑内距離	0m			10m			20m			30m				
誤差 (mm)	方向	X	Y	Δ	X	Y	Δ	X	Y	Δ	X	Y	Δ	
	1回目	-30	40	50	0	15	15	15	20	25	25	20	32	
	2回目	10	30	32	5	30	30	15	-20	25	38	20	43	
Δ最大値(mm)	50			30			25			43				
測点	RD-1			RD-2			RD-3			RD-4				
坑内距離	0m			10m			20m			30m				
誤差 (mm)	方向	X	Y	Δ	X	Y	Δ	X	Y	Δ	X	Y	Δ	
	1回目	5	-5	7	-10	-2	10	10	-10	14	35	-10	36	
	2回目	7	-5	8	-15	8	17	10	0	10	20	5	21	
Δ最大値(mm)	8			17			14			36				

### 3.4 トンネル MR における導入効果の検討

トンネル MR は、現場実証試験で得られた知見を踏まえて表示精度や作図精度をさらに向上させることにより、トンネル坑内の暗い照度条件下、かつ、特徴点の少ない覆工表面においても、高精度にホログラムを投射させて作図することが可能になる。

以下に、トンネル MR の現地での使用における今後の維持管理業務への導入効果について検討した結果を示す。

- ① ひび割れ展開図などの 3 次元データを実構造物に投射することでトンネル変状箇所を容易に認識でき、点検漏れや見落としを防止できる。
- ② 変状箇所と、地質や施工情報および維持管理情報などの登録したデータとを、紙媒体ではなく電子データとして、

その場で比較できるようになり、より多くの情報を手軽に確認できる。そのため、変状箇所と、設計・施工との因果関係や発生原因を的確かつ迅速に評価することが可能となる。

- ③ 内空断面や設計寸法が、その場で容易に確認できるとともに、排水管などの地下埋設物を 3 次元モデルとして現地に投射できるため、補修・補強工事実施時の支障物への損傷を防止できる。
- ④ 作図機能を使用して維持管理データを追加・更新し、2 次元展開図や 3 次元展開図として CAD データに出力できるため、点検調書の作成効率が向上する。
- ⑤ 計測機能を使用し、離れた場所から不具合箇所の範囲を確認しながら補修・補強工事の対策範囲を設定できるため、現地合わせなど材料加工の作業効率が向上する。
- ⑥ トンネル点検技術で広く導入されている MIS (Mobile Imaging Technology System) や MMS (Mobile Mapping System) で取得した 3 次元の正確なひび割れデータを、トンネル MR に取り込むことにより、さらに高精度な点検や評価を実施できる。

## 4. おわりに

今回、現場実証試験において得られた結果から、今後の維持管理業務におけるトンネル MR の有意性を確認することができた。

MR 技術を活用した HoloLens は、2017 年に日本国内でリリースされた新しい技術であり、さまざまな分野で活用の広がりを見せている。建設業界では、これらの MR 技術を活用することで維持管理段階のみならず、設計や施工段階の多種多様な業務においても効率化や省力化が図れることが期待されている。しかし、現地において不具合箇所と投射画像との整合性をとり、正確な点検や評価を実施するためには、MR 機器に入力し、表示するデータが正確なものでなければならない。また、トンネル MR の実用化に向けてソフト面では、今回開発した作図機能の項目選定や機能拡張に加え、国土交通省が進める CIM との連携や AI によるひび割れ自動抽出技術などの導入を進め、ハード面では、屋外作業時の気温や湿度変化への対応と防水性、防塵性の向上、バッテリー時間延長などへの対応が必要になる。こうした課題を着実に解決していくことでトンネル MR の適用範囲が広がっていくものと考えている。

今後、トンネルを含むインフラの点検や建設工事における業務の効率化に寄与できるよう、さらに MR 技術の活用を図り、技術開発を進めていく所存である。