

# NATM トンネル施工における遠隔臨場環境の構築と運用について

独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 瀧谷 俊哉  
独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 正会員 若公 雅敏  
株式会社 安藤・間 佐藤 正  
株式会社 安藤・間 正会員 ○星加 夢輝

## 1. はじめに

近年、建設現場における受注者および発注者双方の業務効率化の観点から、発注者が現場に臨場せず遠隔で材料確認および施工段階確認、立会を行う「遠隔臨場」の実施が活発化している。遠隔臨場の実施は、ウェアラブル端末でリモート会議ソフトウェアを実行し、Wi-Fiなどの無線通信技術を用いてリモート会議サービスに接続する方法が一般的である。一方で、発注者が現地確認と遜色ない監督業務を遠隔環境で実現するには、リモート会議サービスのポテンシャルを十分に引き出せる通信環境の構築、とくに無線環境の構築が重要であることが先行事例で明らかになっている<sup>1)2)</sup>。

明かり工事などでは、遠隔臨場の実施地点において電波を送受信できるように一つ以上の無線局を設置し、数ヶ月間ないしは工期完了まで移設しないことが多い。一方、山岳トンネルの施工時は、切羽の前進に伴っておおそ数日ごとに約数十m遠隔臨場の実施地点が前進する。加えてトンネルの内空断面積が60~120m<sup>2</sup>程度と明かり工事に比べて空間が小さく電波が遠くまで広がらない。よって、円滑な遠隔臨場を行うためには、無線局の電波が弱くならない範囲に遠隔臨場の実施地点を常に収める必要がある。電波が弱くなる前に無線局を移設しない場合は、回線の切断やリモート会議サービスの画質・音質が低下し、遠隔臨場を満足に行うための通信品質を維持することが難しくなる。加えて、トンネル坑内に設けられる台車や棧橋は電波を遮る鋼製部材が多用されており、狭い箇所も多く通信環境を劣化させる要因が多くある。本発表では、施工中のNATMトンネルにおいて遠隔臨場の実施が想定されていない現場の現況調査を行い、山岳トンネル施工特有の通信環境の変化を考慮した遠隔臨場環境の改良と通信設備の運用について報告する。

## 2. 既存通信設備の問題点

通信環境の改良を実施した施工現場は、北海道新幹線の渡島トンネル(上ノ湯工区)で全長約5,300m、掘削断面積が約80m<sup>2</sup>のトンネルであり、トンネル掘削の開始から約2年後に遠隔臨場の実証を行うためのモデル現場に発注者内で初めて選定された。一方、トンネル坑内の既存通信設備は遠隔臨場の過渡期に設計、敷設されたものである(図-1)。これらの設備は、トンネル坑内の工事システムの死活監視(稼働状況を継続的に確認すること)や監視カメラ、非常電話などの低容量かつ高遅延での利用を許容しているため、既存通信設備が十分に遠隔臨場を行える性能を有しているかが明らかではないという問題がある。また、既存通信設備が遠隔臨場に対する十分な性能を有していない場合は、既存通信設備を撤去するか一部の設備を入れ替えることを検討しなければならない。このことから、既存通信設備の構成変更や部分的な設備入れ替えを想定した既存通信設備の性能調査と評価を実施した。

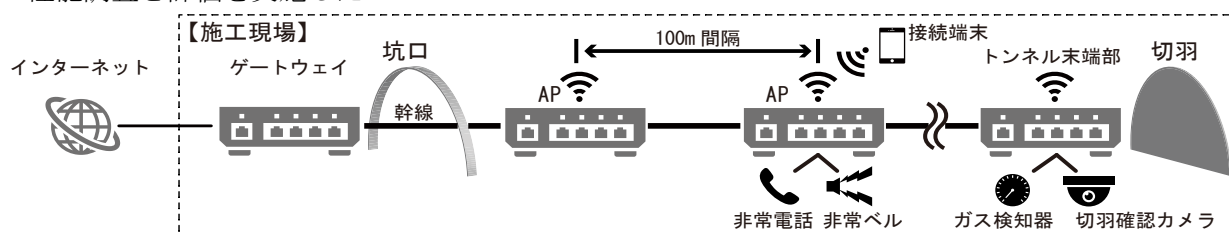


図-1 既存通信設備の構成

キーワード トンネル, 遠隔臨場, Wi-Fi, リモート会議, DX

連絡先 〒305-0831 茨城県つくば市荏間5 1 5-1 安藤・間技術研究所 フロンティア研究部 TEL029-858-8800

### 3. 回線の種別およびリモート会議システム性能の評価方法

表-1 に、回線の種別およびリモート会議システム性能の調査箇所や評価基準などを示す。

表-1 回線種別およびリモート会議システム性能の評価方法について

回線種別と評価区間		計測項目	計測回数	評価の基準	計測機器／使用サービス	
ネットワーク回線	①WAN(インターネット回線)	回線速度	日8回×10日	平均値が上下3Mbps以上	回線計測サービス (Speedtest CLI)	
		遅延時間	日8回×10日	平均値の合計が50ms以内 (WAN/LANの遅延時間の合算)		
	②LAN(現場内)	A 幹線	回線速度	1GB(通信データ量) ×5回/地点	平均値が上下3Mbps以上	回線計測ツール (iPerf3)
			遅延時間	5回/地点	平均値の合計が50ms以内 (WAN/LANの遅延時間の合算)	
	B Wi-Fi	回線速度	地点ごとに1回	平均値が上下3Mbps以上	Wi-Fiサーベイツール (TamoSoft TamoGraph Pro) スペクトルアナライザー (Metageek Wi-SpyDBx)	
		遅延時間	地点ごとに1回	平均値の合計が50ms以内 (WAN/LANの遅延時間の合算)		
リモート会議サービス		解像度	複数地点で 5分×3回	HD画質(1280pixel×720pixel)以上	Microsoft Teams	

#### (1) 回線種別の違いによる性能評価と評価の基準

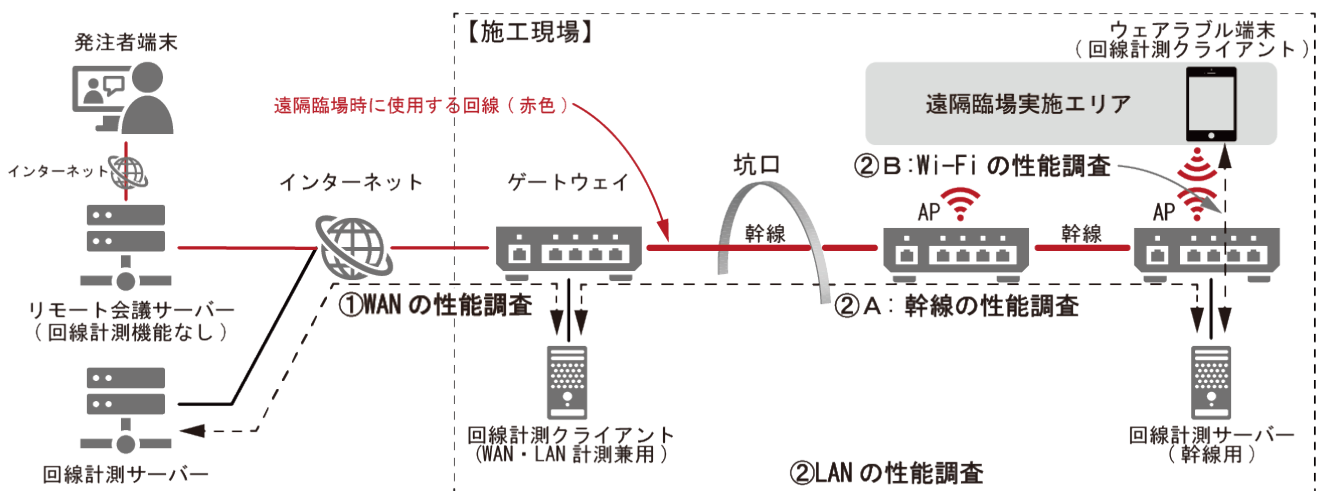


図-2 既存通信設備の構成と回線性能の評価区間の関係

通信回線の性能は、一般的に通信速度や応答時間(Ping 値)を用いて評価するため、本評価でも同様に回線の性能を評価した。調査区間は、回線の「WAN (Wide Area Network) の性能調査(図-2 中の①)」と「LAN(Local Area Network)の性能調査(図-2 中の②)」とする。「WAN の性能調査」は、施工現場のゲートウェイの直下に回線の品質を計測する端末(回線速度と遅延時間を計測)を接続する構成とした。この調査は、インターネット上のリモート会議サーバーに接続する際の回線性能を評価することを目的とした。本来、回線の品質計測はリモート会議サーバーと回線計測端末の間で実施すべきだが、リモート会議サーバーに回線性能を計測する機能がないため、近似値を取得できる回線計測サーバー間で行った。「LAN の性能調査」は、計測値がインターネット網の影響を受けないようにするため、インターネット上の回線の品質計測サービスは使用せず、LAN内に回線の品質計測サーバーを2地点に設けて実施した。LAN内の調査区間は、幹線の性能調査(図-2 中の②A)とWi-Fiの性能調査(図-2の②B)である。幹線の性能調査は、掘進によりトンネル延長が増すことで回線長が増し、この回線長の増加にともなう幹線の性能低下を評価する目的で実施した。無線の性能調査は、遠隔臨場を行う地点での無線回線の性能を評価する目的で実施した。

回線速度は、後述の「リモート会議サービスの性能評価と評価の基準」で示す遠隔臨場で必要とされる[映像解像度の最低基準](#)から、回線速度が 1.5Mbps 以上であれば問題ないと判断した。そのため、回線速度の評価基準は、速度の変動などを考慮して最低基準の 2 倍である 3Mbps 以上を確保することを評価の基準とした。遅延時間 (Ping 値) は、一般的にオンライン会議で許容される遅延の目安が 50ms (ミリ秒) であることから、「WAN の性能調査」と「LAN の性能調査」で得られた遅延時間の合算が 50ms 以下であれば遠隔臨場に支障がないと判断した。無線通信 (Wi-Fi) の性能については、無線局である AP (アクセスポイント) とウェアラブル端末との離隔に応じて複数点で計測し、地点ごとの通信速度や応答速度を評価した。

## (2) リモート会議サービスの性能評価と評価の基準

遠隔臨場で求められる映像品質は、少なくとも検査者が用いるスケールの mm 単位の目盛を映像で判別できる解像度を確保する必要がある。必要な解像度を検討するため、ウェアラブル端末とスケールの離隔と解像度の関係について検証した。検証の結果、データ量にもよるが地上波デジタル放送と同じ解像度であるフル HD (1920p×1080p) の半分の画質である HD 画質 (1280p×720p) 以上を確保すれば、離隔が約 30cm でも mm 単位目盛が十分に判別できることが分かった。HD 画質以下でも離隔を小さくすれば目盛を判読できるが、離隔が 30cm 未満になると端末の自動ピント調整機能が上手く作動せず映像が不鮮明になるだけでなく、ウェアラブル端末の陰が目盛に重なり目盛が判読しづらくなるなどの現象が多く発生した。このことから、ピント不良や陰の影響が生じにくい離隔 30cm 以上で、mm 単位目盛が判読できる最低限の画質である HD 画質以上を確保できることを映像の評価基準とした。音声品質は事前の検証で音声に途切れやかすれがなければ、検査者との意思疎通が十分に図れることが分かったため、音声に途切れやゆらぎが発生しなければ遠隔臨場に支障がないと判断した。

## 4. 既存通信環境の評価結果

既存通信設備の評価結果の一覧を表-2 に示す。回線の性能評価の結果から、回線速度は WAN 回線と LAN 回線ともに評価基準を上回っている。遅延時間は、WAN 回線の遅延分だけで基準値を越えており、さらに LAN 回線の遅延時間を加えると、遠隔臨場の実施に支障をきたす恐れがある結果となった。また、実際にリモート会議サービスで遠隔臨場を実施したところ、リモート会議サービスが推奨する回線速度を確保していても、既存通信設備の AP 近傍以外で HD 画質以上を得られないことが明らかになった。以下に評価の詳細を示す。

表-2 既存通信設備の評価結果の一覧

回線種別と調査区間		計測項目	計測値	評価の基準 (Metageek社の基準)	評価結果	
ネットワーク回線	① WAN (インターネット回線)	回線速度	55Mbps	平均値が上下3Mbps以上	基準値以上	
		遅延時間	50ms	平均値の合計が50ms以内 (WAN/LANの遅延時間の合算)	基準値以上	
	② LAN (現場内)	A 幹線	回線速度	40Mbps~500Mbps (平均: 270Mbps)	平均値が上下3Mbps以上	基準値以上
			遅延時間	10ms~90ms	平均値の合計が50ms以内 (WAN/LANの遅延時間の合算)	基準値未満
	B Wi-Fi	回線速度	5Mbps~30Mbps (平均: 18Mbps)	平均値が上下3Mbps以上	基準値以上	
		遅延時間	5ms	平均値の合計が50ms以内 (WAN/LANの遅延時間の合算)	基準値以上	
リモート会議サービス		解像度	VGA画質 (640pixel × 480pixel)	HD画質 (1280pixel × 720pixel) 以上	基準値未満	

### (1) WAN 回線の評価

WAN 回線の速度計測を実施した結果、上下回線ともに通信速度の平均値は約 55Mbps で遅延時間の平均は 50ms であることが分かった。WAN の回線速度は評価基準を十分に満たしているが、遅延時間は、WAN 回線と LAN 回線の合算で評価するため、WAN 回線の遅延分だけで基準値を越えており、LAN 回線の応答時間が長



いと特に音声コミュニケーションに支障をきたす可能性がある。

## (2) LAN 回線の評価

### a) 幹線の調査

坑口から複数の地点で通信速度や応答時間を計測した結果、**図-3** に示すように通信速度は TD (坑口からの距離) 0m で約 500Mbps で、以降は約 1,000m ごとに約 90Mbps 減衰し、トンネルの到達点である TD5,000m 付近で約 40Mbps の速度になると予測される。このことから、回線速度自体は、評価基準値である 3Mbps 以上を確保できるものと予測されるが、遠隔臨場以外の通信で常時 50Mbps 程度を使用するため、TD4500m 以降で幹線がボトルネックとなり遠隔臨場に必要の回線速度を将来的に確保できない可能性があることが判明した。応答時間は、TD0m で約 10ms で TD2,500 付近では基準値の 50ms に達し、トンネルの到達点付近である TD5,000m では約 90ms の遅延が予測される。すなわち、WAN 回線の遅延時間である 50ms に加えて、LAN 回線で推定される遅延時間である 10ms~90ms が合算されると最大で 140ms の遅延が発生することが想定され、特に音声コミュニケーションに影響が生じることが予想される。

### b) 無線区間の評価

本坑のセンターライン付近で回線速度の計測を行ったところ、計測地点によって異なるが 5Mbps~30Mbps の範囲で速度が推移した。計測値は、WAN 回線の速度をやや下回るが、評価基準値である 3Mbps 以上を確保しているため、遠隔臨場の実施では問題にならないと判断した。遅延時間は幹線の回線長によるが幹線分の遅延時間の影響を差し引くと無線区間の遅延時間は数 ms 以内に収まる。このことから、少なくとも本坑のセンターライン付近で無線の性能が遠隔臨場の実施に影響を与える可能性は低いと考えた。

## (3) リモート会議サービスの画質・音質

**図-4** に示すように、遠隔臨場を実施する 2 つの地点で遠隔臨場を模したリモート会議を実施した。

**図-4** の計測点 A のように AP の近傍(離隔約 10m 以内)で HD 画質による映像と音声の配信を発注者側端末と同様の環境で確認した(**図-5** 中の A)。しかし、AP との離隔が大きくなるとともに映像や音声が悪化した。また、**図-4** の計測点 B のような台車や栈橋の狭い箇所(**図-5** 中の B)は AP の離隔にかかわらず映像や音声に断続的な途切れが発生した。また、計測時に最も回線長が長い TD2,500m 地点で 0.5 秒程度の映像や音

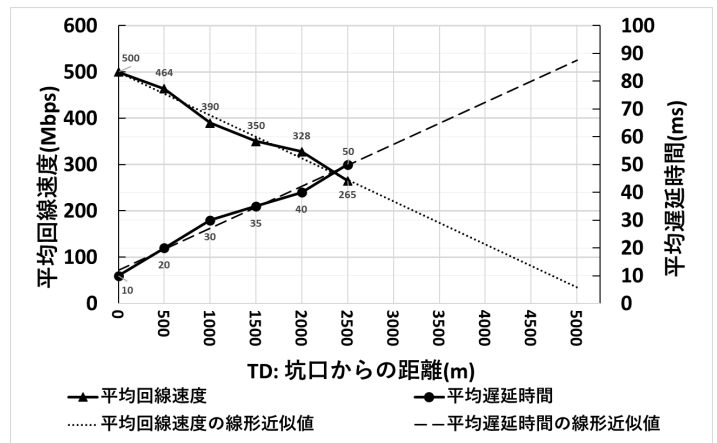


図-3 幹線の性能と回線長による変化

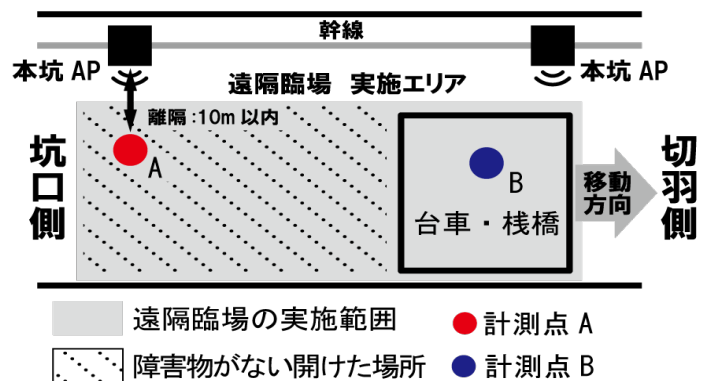


図-4 リモート会議サービスの評価地点の例

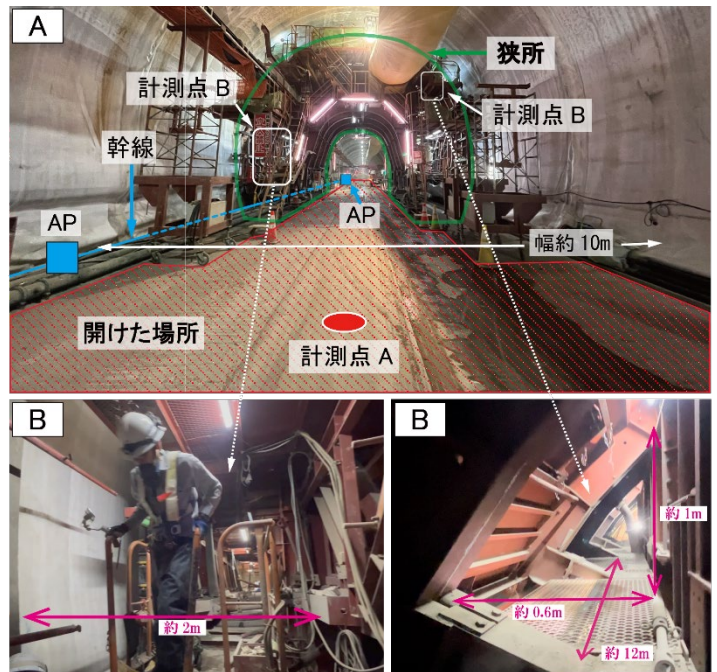


図-5 計測地点の現況

声の遅延が認められた。一方で、遠隔臨場の場合は音声会話が頻繁ではなく、発注者による遅延時間の定性的な評価でも気にならないとの評価を受けたため、遠隔臨場では許容できる遅延時間である判断した。

## 5. 追加調査と設備の改良

4章の評価結果から、将来的に幹線の速度が不足することが示唆されたため、TD2,000mまで光ファイバーケーブルを新たに敷設した。光ファイバーケーブルへの設備変更により、TD2,000mで回線速度750Mbps、応答時間1.5ms以内を確保し、トンネル延伸によって生じる幹線のボトルネックを解消した。この対策後にリモート会議サービスの画質・音質について追加の調査を実施したところ、HD画質以上の映像配信ができなかった原因として、リモート会議サービスが回線速度の揺らぎを検知して、映像解像度を低下させることで回線速度が遅くてもビデオ会議セッションの切断がないようにする通信の最適化を行っていることが分かった。また、台車の狭あい箇所での映像・音声の途切れは、無線区間のWi-Fi電波が台車や栈橋の鋼製部材により遮られて遠隔臨場実施地点の電波強度が不足することに加えて、遠隔臨場時に検尺などを行う職員や補助者などでこの空間が閉塞することが原因であることが明らかになった。以上のことから、回線速度の揺らぎの主因と考えられる無線通信の速度を安定化する改良と、台車等の狭あい箇所でも十分な電波強度を確保するための改良を行った。以下にその概要を示す。

### (1) 回線速度の揺らぎをなくす改良

回線速度の揺らぎは、リモート会議サービスを実行するウェアラブル端末とAPの間の見通しが確保できていないとき、検尺時のウェアラブル端末の接写や移動などにより端末の電波受信感度が急激に変化することで発生した。このことから、リモート会議端末を台車などに固定設置し、リモート会議サーバー間の経路に有線LANと長距離の無線拠点間通信機器を使用することで回線速度の揺らぎの解消を試みた。リモート会議端末を台車などに固定するとカメラやマイクの移動ができず、遠隔臨場の実施箇所が制限されるため、映像制作などで使用されるワイヤレス映像・音声伝送システムを用いて、固定したリモート会議端末へワイヤレスで映像や音声を伝送することにした。これにより、たとえ映像や音声のワイヤレス通信が電波状況や遮蔽物により不安定化しても、リモート会議端末とリモート会議サーバー間の通信にゆらぎの影響が生じないものと推定した。

### (2) 電波強度の改良

電波強度は、数値が大きいほど安定した受信ができること示す数値の一つであるRSSI (Received Signal Strength Indicator) を指標として、評価基準は [Metageek 社の基準](#) に沿って実施した。このMetageek社の基準は、無線通信の評価基準として通信業界で広く知られている。Metageek社の基準では、Wi-Fiによる音声通話やビデオストリーミングを行うためには、少なくとも-67dBmが必要とされることから、狭あい箇所でもRSSIが-67dBm以上を確保することを目標とした。また、APの設置数が少ない場合は鋼材に遮られて電波が到達しないブラインドゾーンが増加するため、台車や栈橋と幹線間を拠点間通信APで接続し、複数台のAPを最適な位置に設置することで、ブラインドゾーンを減少させることを試みた。

## 6. 設備の改良による回線性能の向上の効果と運用の省力化効果

### (1) 回線速度の揺らぎをなくす改良の効果

図-6の設備改良後の構成に示すようにリモート会議端末を台車などに固定設置し、リモート会議サーバー間の経路に有線LANと安定した拠点間通信APを用いたことで回線速度の揺らぎが解消され、安定してHD画質以上の映像配信が行えるようになった。一方で、ワイヤレス映像・音声伝送システムは通信する機器の組合せを容易に変更することができないという課題があるため、障害物のない開放された空間でのみ使用し、台車や栈橋の内部では、引き続きウェアラブル端末による遠隔臨場を実施した。

設備改良後の運用の効果として、回線環境の改善という本来の目的に加えて、長距離の無線拠点間通信機器を使用したことにより、幹線のAPから発せられた電波を中継する目的で設置していた中継APを頻りに移動する作業の回数が軽減され、これまで10日に1回程度の設備移動の頻度が1.5ヶ月に1回程度に減らすこと



ができた。これにより、職員や作業員の設備メンテナンスの労力を大きく軽減することができた。

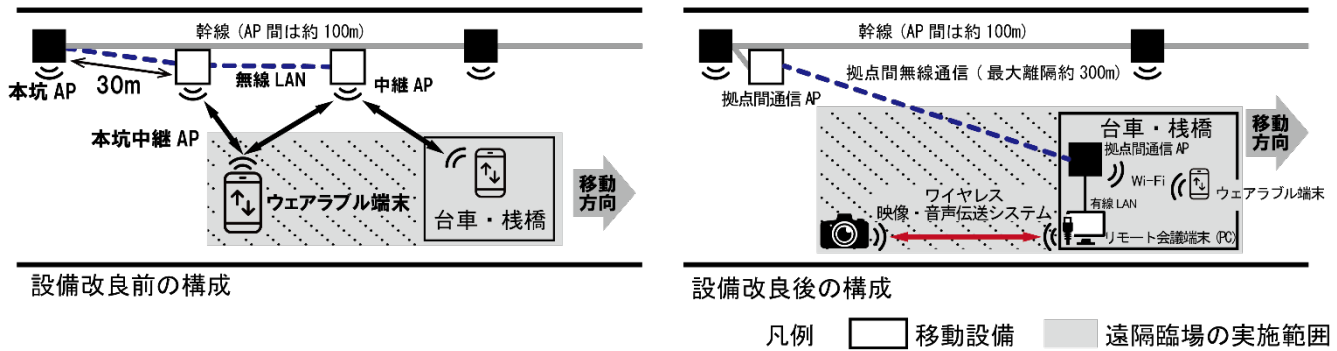
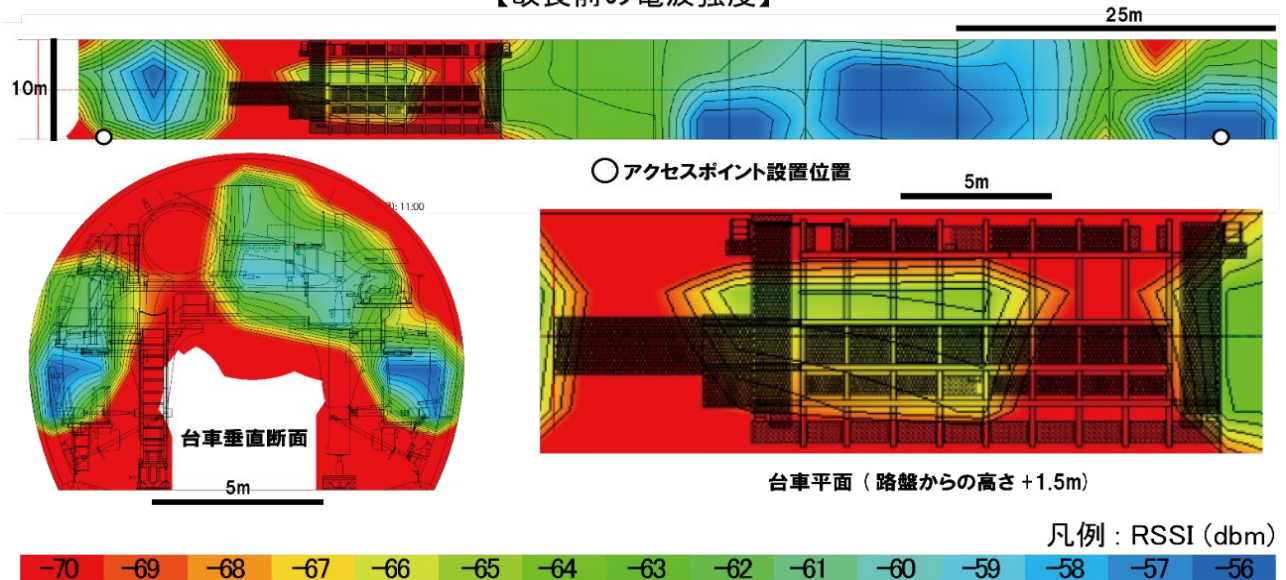


図-6 設備改良前後の機器構成

(1) 電波強度の改良効果

図-7 に示すように、電波が弱かった台車内部などに複数の AP を設置したことで電波強度が改善され、安定して HD 画質以上の映像配信が行えるようになった。改良前は台車付近や内部で RSSI が -70dbm 程度であったが、改良後は台車内でも -57dbm 程度を確保しており、評価基準を上回るだけでなく、RSSI の一般的な評価基準から見ても十分な強度を確保した。台車内ではワイヤレス映像・音声伝送システムを使用せずにウェアラ

【改良前の電波強度】



【改良後の電波強度】

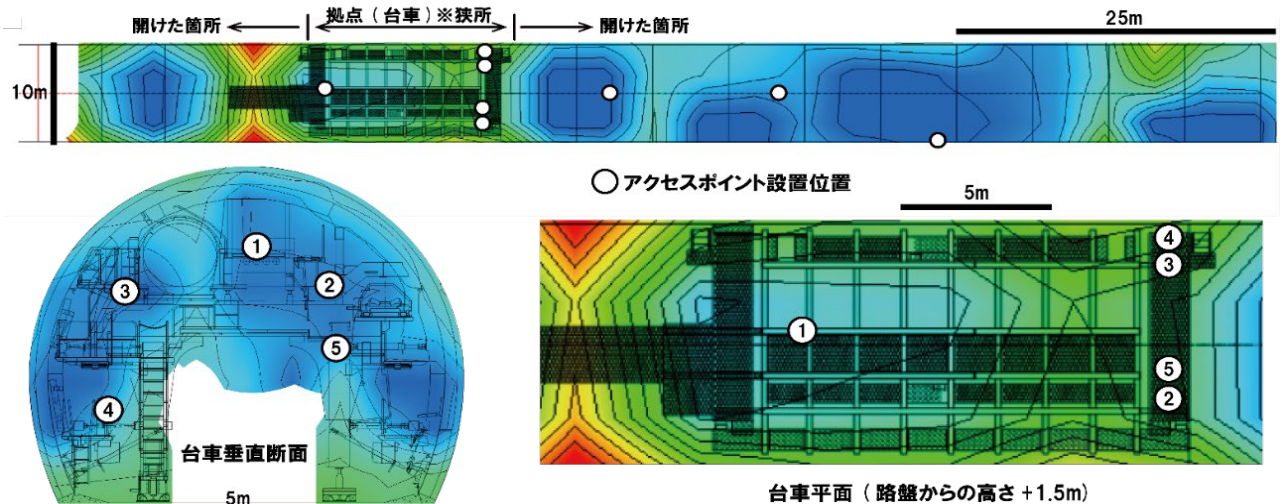


図-7 設備改良前後の電波強度の変化

ブル端末のリモート会議サービスを使用するため、回線の揺らぎによる画質の低下が懸念されたが、この影響は認められなかった。回線の揺らぎによる画質低下が発生しなかった理由として、ウェアラブル端末と AP の離隔が 10m 以内と小さいことが挙げられる。

## 7. 通信設備の運用に関する工夫について

坑内では粉塵や湧水、結露などが頻繁に発生するため設備故障のリスクが大きく、通信ケーブルも台車や栈橋の移動に伴って移設するため、移動の際にケーブルが断線するなどの障害が発生しやすい。また、電気設備のブレーカーが作動し電源が喪失することもある。上述のようなトラブルは週 1 回ないし月 1 回程度の頻度で発生するため、トラブルが発生した際にすぐに原因箇所を確認し解消することに加えて、トラブルが発生しても全ての通信経路が絶たれない冗長性を維持することが重要である。下記に運用の工夫について述べる。

### (1) 通信設備の死活監視と発報システム

現場内にある数百台の通信設備の状態を常に監視し、設置機器の位置関係と接続状態を可視化した画面を現場詰所の大型モニターに表示し、職員が設備の状態を常に確認できるようにした。また、監視の状態はメンテナンスを担う通信設備会社とも常に共有されるようにした。トラブルが発生した場合は、該当機器がモニター上で警告表示される。特に対処の緊急性が高い設備に不具合があったときは、現場詰所に設置したパトライトの発光パターンとアラート音による警報に加えて、職員や通信設備会社などにインターネット経由で通知する仕組みを構築した。これにより、現場職員は異常をすぐに把握し、通信設備会社と同じ情報を共有することで、通信設備会社から迅速かつ的確な支援を受けることができる。

### (2) 回線の冗長化

上述したように、現場においては様々な要因により回線が切断されることがあるため、設備の通信経路を複数設けることで回線の冗長性を確保した。切断されていない経路からインターネット回線の接続が行えるため、トラブル対応の最中でもトラブルがない箇所ではインターネット接続を維持することが可能となる。

## 8. まとめ

NATM トンネルの工事現場において、既存の通信設備を用いて遠隔臨場の実施が可能かどうか、通信回線の速度や遅延時間に関する指標およびリモート会議サービスが推奨する仕様にに基づき定量的に評価した。評価の結果、トンネル掘進に伴って通信距離が増大し、遠隔臨場に必要通信設備の仕様を満たさなくなることや、十分に通信設備の仕様を満たしていても、遠隔臨場に必要解像度を得られない場合があることが分かった。このうち、遠隔臨場に必要通信設備の仕様を満たさなくなる点については、光ファイバーを用いた通信設備に改修することで十分な性能を確保した。また、遠隔臨場に必要解像度を得られない点については、回線速度の揺らぎを抑制する機器構成と AP の追加設置を実施することで、遠隔臨場に必要画質を十分に確保しただけでなく、職員や作業員の設備メンテナンスの労力を軽減できた。通信設備の運用面では機器の死活監視を実施し、監視状況をメンテナンス業者と共有することで、迅速にトラブル対応を行える体制を構築した。また、回線を冗長化することで、トラブルが発生してもすぐにインターネット回線の接続を維持できる回線設計を行った。遠隔臨場環境の構築と運用により、発注者としては検査員の現場までの移動時間(当現場だけで往復約 1.5 時間)が削減された。また、受注者としては立会時に検査員を待つ時間がなくなり、すぐに次工程の作業が実施できるようになったことで施工サイクルが効率化した。今後は、目視確認と同じ水準で岩判定など遠隔で行えるように、幹線や無線区間の回線速度を大容量化した環境の構築について検討していきたい。

## 参考文献

- 1) 柏原宏輔, 玉野達: トンネル工事における WEB 会議システムを活用した遠隔岩判定の試行について, 近畿地方整備局研究発表会論文集(Web), イノベーション部門 I No08.
- 2) 山田信人, 西尾彰宣: トンネル岩判定における遠隔臨場の適用について, 近畿地方整備局研究発表会論文集(Web), イノベーション部門 I No16.