

内径 1,000mm の小口径トンネルにおける 無線通信試験結果について

加藤 隼也¹・成島 照和²・東 伸一³・山本 淳弘⁴・山崎 晃佑⁵・
石野 祥太郎⁶

¹正会員 株式会社クボタ建設 工事技術本部 技術開発部 (〒518-1152 三重県伊賀市予野 2981-8)
E-mail: shunya.kato@kubota.com

²正会員 株式会社クボタ建設 工事技術本部 技術開発部 (〒518-1152 三重県伊賀市予野 2981-8)
E-mail: terukazu.narushima2@kubota.com

³株式会社クボタ建設 工事技術本部 技術開発部 (〒518-1152 三重県伊賀市予野 2981-8)
E-mail: shinichi.azuma@kubota.com

⁴古野電気株式会社 技術研究所 第2研究部 電波応用研究室
(〒662-0843 兵庫県西宮市神祇官町8番1号)
E-mail: atsuhiro.yamamoto.sy@furuno.co.jp

⁵古野電気株式会社 技術研究所 第2研究部 マーケティング室
(〒662-0843 兵庫県西宮市神祇官町8番1号)
E-mail: kohsuke.yamazaki.vx@furuno.co.jp

⁶古野電気株式会社 技術研究所 第2研究部 電波応用研究室
(〒662-0843 兵庫県西宮市神祇官町8番1号)
E-mail: shotaroh.ishino.qx@furuno.co.jp

本研究では、これまで殆ど知見の無かった内径 1,000 mm の小口径トンネル坑内における無線通信環境を把握するため、ミニシールド工法で施工中の小口径トンネル坑内で無線通信試験を行った。試験では、5.6 GHz 帯の周波数を使用して、鉄筋コンクリートセグメントで施工された直線区間および鋼製セグメントで施工された曲率半径 20 m の急曲線を含む曲線区間でのそれぞれの通信可能距離を求めた。その結果、直線区間では最大 170 m、曲線区間では最大 70 m の通信が可能であった。また、このときの直線区間における減衰定数は 0.22 dB/m であった。そして、小口径トンネル坑内においてはマルチパス環境による通信速度の低下が発生しやすい状況にあることが明らかになった。

Key Words: *small tunnel, wireless communication, signal strength, multipath, i-construction*

1. はじめに

近年、少子高齢化による建設業の担い手不足解消のため、3K(きつい, 汚い, 危険)に代表されるような建設現場特有の労働環境改善, および生産性向上を目的とした, ICT等を活用して現場の生産性向上を図る i-Construction が, 国土交通省を中心として推進されている。

これはシールドトンネルの施工現場においても例外ではなく, これまでにトータルステーションを用いたシールドマシン位置の自動測量¹⁾, 建設機器の遠隔操作, ウェアラブル端末を用いた坑内作業員の安全監視²⁾, および無線 LAN 測位技術を用いた作業員と建設機械の接触

を防ぐための自動監視システム³⁾など, 様々な試みが行われている。

一方, これらの技術の導入には, トンネル坑内の無線通信環境の構築が必要不可欠であり, これまでにトンネル坑内の無線通信に関する様々な研究が行われてきた。

例えば, 山崎ら⁴⁾は当時まだ無線通信の方式として一般に使用が可能となったばかりのスペクトラム拡散方式を用いて, トンネル坑内の状況やデータを事務所内のモニターで管理可能なシステムを提案し, 様々な断面形状のトンネルで実証試験を行うことで, トンネル坑内での無線通信の適用可能性を示した。また, 佐々木ら⁵⁾は導水路トンネル内での計測結果および既往の減衰定数を基

に、等価半径 0.8m から 4.55m における、無線周波数 200 MHz から 50 GHz の減衰定数を高い精度で求める実験式を提案した。加えて、笠嶋ら⁹⁾はトンネル断面寸法に比べて小さい波長電波のトンネル坑内での伝搬特性を理論解析によって計算し、施工中の岩盤トンネルでの計算結果と実測結果の比較検討を行った。そして、西田ら⁷⁾は地下鉄トンネルにおいて、トンネル完成直後と営業運転開始後に同一の場所で電波伝搬実験を実施し、列車運行に必要な各種設備が電波の減衰に与える影響について明らかにした。

しかし、これらの研究は、完成後の一般的な道路・鉄道トンネルの口径を対象としたものであり、本研究が対象とする、ミニシールド工法⁸⁾など内径 2,000 mm 以下の小口径トンネルの施工中の坑内における、無線通信環境に関する知見はこれまでに殆どない。そこで、本研究は施工中の小口径シールドトンネル坑内における、無線通信環境を明らかにするため、ミニシールド工法における、セグメント内径 $\phi 1,000$ mm の施工中のトンネル坑内で、無線通信試験を実施した結果、有用な知見を得られたので報告する。

2. ミニシールド工法概要

本研究が対象とするミニシールド工法について、簡潔に説明する。

ミニシールド工法とは、主に中・小口径の下水管きよの築造に用いられる密閉型泥土圧式シールド工法の一つである。適用範囲は内径 $\phi 1,000$ mm から 2,000 mm であり、三等分割の RC セグメントを使用する点が特徴である。施工中の坑内には、添加材や土砂積込用の配管、シールドマシンの動力線および軌条設備などが常時設置されている。その坑内を、セグメント運搬車および土砂運搬のためのずり鋼台車(以下、密閉土砂スキップと呼称)と、これらをけん引するバッテリー機関車が通過するため、特に内径 $\phi 1,000$ mm におけるの空間は非常に狭小となっている(写真-1 を参照)。

3. 坑内通信試験

(1) 試験現場概要

図-1 に、試験対象トンネルの線形概要図を示す。対象トンネルは、セグメント内径 $\phi 1,000$ mm、発進立坑から 20 m の位置で曲率半径 $R = 20$ m の曲線区間(i)が 21 m 続き、その後、直線区間が 97 m、曲率半径 $R = 300$ m の曲線区間(ii)が 9 m、直線区間が 24 m、曲率半径 $R = 200$ m の曲線区間(iii)が 24 m、直線区間が 10 m、曲率半径 R

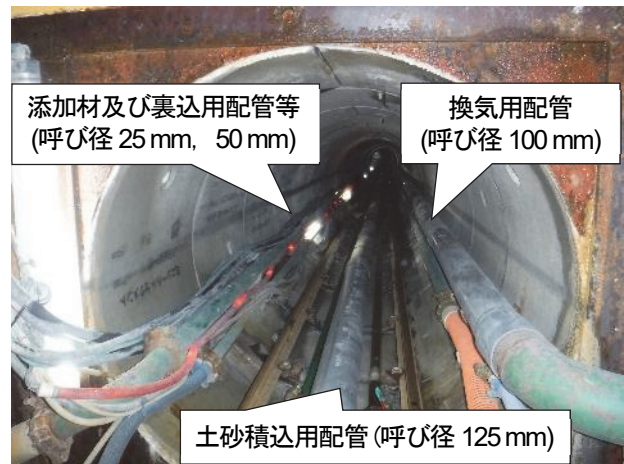


写真-1 坑内配管状況(内径 1000 mm)

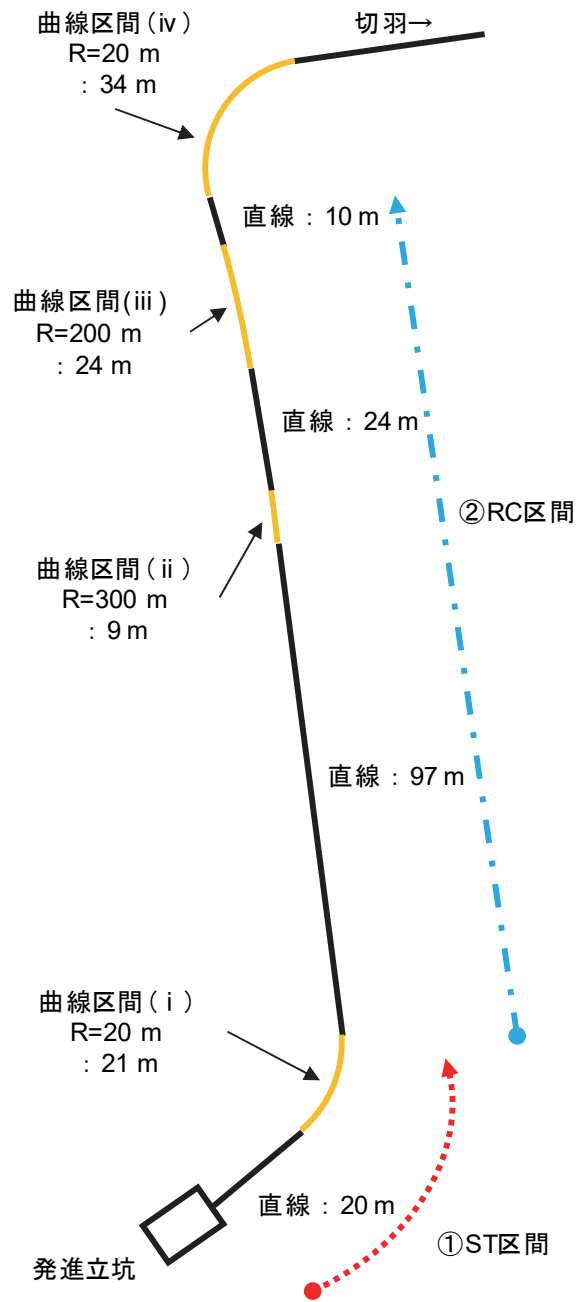


図-1 試験現場線形概要図



1リング目のアクセスポイント



100リング目のアクセスポイント

写真2 アクセスポイント設置状況

= 20 m の曲線区間(iv)が 34 m, と続く. 試験時は, 発進立坑から 430 m の直線区間を掘進中であった.

使用セグメント種類は, 直線および曲率半径 $R = 60$ m 以上の曲線区間は, 下水道ミニシールド工法用鉄筋コンクリートセグメント(JSWAS A-7⁹), 幅 0.6 m)を使用し, 曲率半径 $R = 60$ m 未満の曲線区間は, ボルトボックス以外をあらかじめコンクリートで打設した, コンポジットタイプの鋼製セグメント(本試験区間では, $R=20$ 区間のみ使用, 幅 0.3 m)となっている.

(2) 坑内通信環境の構築

無線通信試験では, 市販のアクセスポイント(以下, AP と呼称)製品(PCWL-0400, PicoCELA 社製)に, 高性能な指向性アンテナ(アンテナ利得 15.2 dBi, 古野電気社製)を接続して, ボックス(長さ 140 cm, 高さ 20 cm, 奥行き 10 cm)に収納したものを使用した.

写真-2 は, AP の坑内設置状況を示す. AP は, 発進立坑より 1 リング目および 100 リング目(発進立坑より 40 m)の換気用配管の上に設置した. インターネット回線は, 発進立坑下にモバイル Wi-Fi ルーターを設置し, 1 リング目の AP にはモバイル Wi-Fi ルーターから有線で接続, 100 リング目の AP には 1 リング目の AP から無線で中継し, それぞれ通信環境を構築した. また, 通信規格は, 5.6 GHz 帯の Wi-Fi を用いた.

(3) 試験方法

a) 項目および方法

計測項目は, 電波強度(以下 RSSI と呼称, 単位 dBm)および通信速度(単位 Mbps)とした. 計測方法は, ワイヤレスネットワークの詳細な情報が取得可能なフリーソフト「WifiInfoView」および通信速度の測定が可能なホームページ¹⁰を用い, 坑内移動用台車上に計測用のノートパソコンを設置し, 移動しながら計測した(写真-3 を



写真3 坑内計測状況

参照).

また, 実際の通信連絡手段を想定して, タブレット端末(Apple 社製)を用いた Web 会議ツール (Google meet) を使用した, 坑内と発進立坑下間の通話も試みた.

b) 坑内条件

試験は以下の条件で実施した.

- 条件 1) : 曲線区間(i)を含む曲線区間(図-1 中の①ST 区間)
- 条件 2) : 線区間(ii)及び(iii)を含む直線区間(図-1 中の②RC 区間)

4. 坑内通信試験結果

(1) 条件 1)の試験結果

図-2 は, ST 区間における, RSSI および通信速度の計測結果を示す.

ST 区間の RSSI は, -36 dBm から概ね線形的に減衰していき, 1 リング目の AP から 99 m の位置で, 接続に必要な

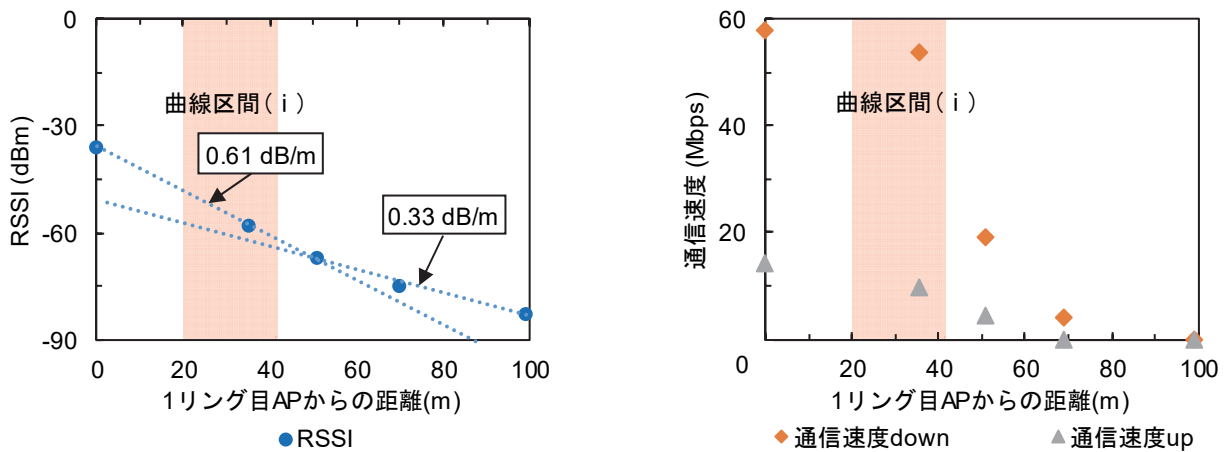


図-2 試験条件 1)における RSSIおよび通信速度計測結果

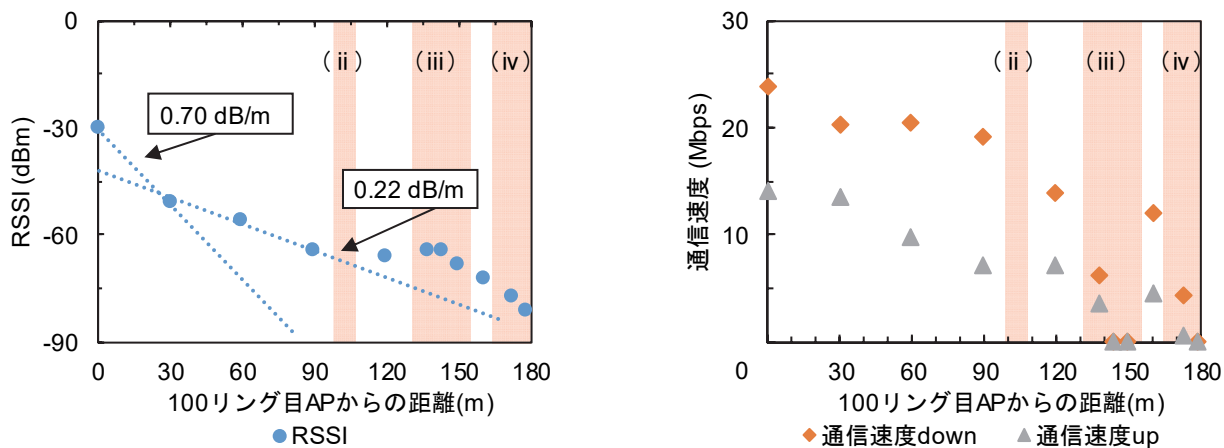


図-3 試験条件 2)における RSSIおよび通信速度計測結果

表-1 ST 区間における通信状況

1リング目APからの距離(m)	通信状況
51	通信安定
70	通信不安定
75	接続切断

表-2 RC 区間における通信状況

100リング目APからの距離 (m)	通信状況
149	通信不安定
158	通信復帰
161	接続切断

な最小限の強度と言われる値(-80 dBm 以下)¹⁾となった。このとき、曲線区間(i)における、減衰定数は0.61 dB/m、曲線区間(i)後の直線区間では0.33 dB/mであった。

また、通信速度は RSSI とは異なり、曲線区間(i)内より急激に低下し、1リング目の AP から 70 m の位置でアップロード側の通信速度が 0 となった。

(2) 条件 2)の試験結果

図-3 は、RC 区間における、RSSI および通信速度の計測結果を示す。

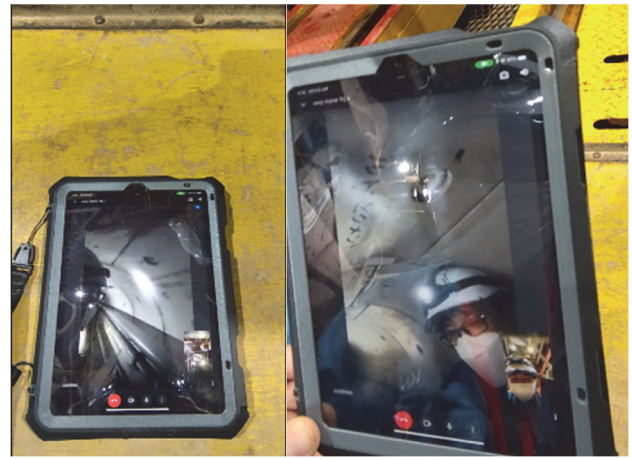
RC 区間の RSSI は、-30 dBm から 30 m で-51 dBm(0.70 dB/m)と大きく減衰したものの、その後の直線区間では、

概ね線形的に減衰(0.22 dB/m)していった。しかし、曲線区間(ii)から曲線区間(iii)では、RSSI は減衰せず、その後、曲線区間(ii)を過ぎたところで、RSSI は再び減衰し、100リング目の AP から 178 m で-80 dBm 以下となった。

一方、通信速度は RSSI と異なり、曲線区間(ii)から急激に低下し始め、100リング目の AP から 143 m の曲線区間(iii)途中で、ダウンロード側およびアップロード側ともに計測不能となった。しかしながら、曲線区間(iii)を過ぎたところで、通信速度はダウンロード側およびアップロード側ともに復活し、曲線区間(iv)に入ったところで、再び計測不能となった。



100 リング目 AP から 185 m での坑内の通話状況



100 リング目 AP から 185 m での発進立坑の通話状況

写真4 Web 会議ツールでの通話状況

(3) タブレット端末を用いた通信状況

表-1 および表-2 は、ST 区間および RC 区間における、タブレット端末を用いた坑内と発進立坑間の通信状況の一覧を、写真-4 は、100 リング目の AP から 185 m での、坑内と発進立坑の通話状況を示す。

ST 区間では、1 リング目の AP から 70 m 付近で、発進立坑との通信が不安定になり、75 m 付近でタブレット端末と Wi-Fi の接続が切断された。RC 区間では、100 リング目の AP から 137 m ~ 149 m 付近で、一度通信が不安定になったものの、158 m 付近で通信が復活し、161 m 付近で再びタブレット端末と Wi-Fi の接続が切断された。

また、坑内に密閉土砂スキップなどの電波を遮る障害物が AP とタブレットの間に存在する場合、通信は不可能であった。

以上の結果、ST 区間および RC 区間のどちらの場合においても、RSSI が -70 dBm ~ -80 dBm の地点で、タブレット端末と Wi-Fi の接続が切断されていることから、タブレット端末を用いた Web 会議ツールによる坑内と発進立坑間の安定的な通話を確立するためには、-70 dBm 以上の RSSI が必要であることが分かった。

5. 坑内の無線通信環境に関する考察

(1) 直線における RSSI の減衰定数

本現場は、最大直線距離が 97 m だったため、直線の場合の最大通信可能距離を計測することができなかった。しかしながら、直線区間においては、概ね線形的に RSSI が減衰していった。そのため、RC 区間での試験結果より得られた減衰定数 (0.22 dB/m) で RSSI が減衰していったと仮定すると、約 163 m で RSSI が -80 dBm となったと予想される。

また、減衰定数がトンネルの等価半径 (トンネルの断

面積と等しい面積を持つ円の半径) および電波の波長によって説明できることは、既往の研究^{12),13)}によって明らかになっているため、直線区間の減衰定数を、適用口径外ではあるものの、佐々木ら⁵⁾によって提案されている以下の実験式 (a) を用いて求め、本試験条件下での本式の適用可能性を検討した。

$$\alpha = 4175 \cdot \left(\frac{\lambda^2}{r^3} \right) + 64.4 \cdot \left(\frac{\lambda^{0.28}}{e^{0.66r}} \right) \quad (a)$$

ここに、 α : 減衰定数 (dB/km)、 λ : 波長 (m)、 r : 等価半径 (m) である。

その結果、減衰定数は 0.12 dB/m となり、本試験の結果と比較して小さい値となった。これは、佐々木らの実験式に坑内の配管などの電波の障害となるものの影響が考慮されておらず、小口径トンネルにおいては、トンネル断面が小さくなるにつれて、坑内配管などの影響を大きく受けるため、と考えられる。したがって、本試験条件においては、実験式 (a) を適用することはできないことが分かった。

式により減衰定数を計算することができれば、坑内の RSSI が -70 dBm を下回らないような AP の設置間隔を、設計上算出することが可能になるため、減衰定数の定式化については今後の課題としたい。

(2) 曲線区間が RSSI および通信速度に及ぼす影響

坑内通信試験では、ST 区間に見通しの悪い曲線区間 (i) があるにも関わらず、RC 区間の最初の減衰定数と比較して、大きな差が生じなかった。これは、鉄などの導体が電波を反射しやすい性質を有しているため、鋼製セグメントを使用している曲線区間 (i) では、鉄筋コンクリートよりも電波を反射しやすい環境にあったと考えられる。

また、RC 区間における、曲線区間 (ii) および曲線区間 (iii) では、RSSI が殆ど減衰しなかった。これは、曲線区

間(ii)および曲線区間(iii)が比較的緩やかな曲線であり、電波の反射効率の良い環境であったこと、または反射波同士による同位相の干渉が発生していたこと、などの要因が考えられる。

いずれの場合においても、鋼製セグメントや坑内の配管などの坑内設置物からの反射波により、計測地点へのマルチパス環境が形成され、電波が伝播するまでのタイムラグによって、それぞれの反射波の信号が一種のノイズの形で干渉しあうため、通信速度が急激に低下したと推察される。特に、坑内に障害物が存在する場合には、電波の殆どが障害物とセグメント間の隙間を反射しながら伝播したため、顕著に干渉が発生し、受信側でのデータ復元ができず、タブレットでの通話ができなかったと考えられる。

また、RC区間では通信速度が計測不能になったあと、再び通信速度が復活した区間が存在したが、これは上記のような干渉が局所的に発生していたためと思われる。

6. おわりに

本研究では、内径 $\phi 1,000$ mmの小口径トンネルにおける、坑内の無線通信環境を把握するため、施工中の現場にアクセスポイントを設置し、電波強度及び通信速度の計測を行った。その結果、本研究で実施した条件の範囲で得られた結論は以下の通りである。

- 1) 鉄筋コンクリートセグメントで構成された区間では、最大170mの通信が可能である。
- 2) 鋼製セグメントで構成された曲率半径 $R=20$ mを含む区間では、最大70 mの通信が可能である。
- 3) 鋼製セグメントを使用した曲線区間では、電波の反射効率が鉄筋コンクリートセグメントよりも良いため、電波強度が減衰しにくい可能性がある。
- 4) 曲線区間においては、マルチパスの影響で反射波のタイムラグによる信号同士の干渉が発生し、通信速度が急激に低下する。
- 5) 坑内では、マルチパスによる電波干渉が局所的に発生する可能性がある。

今後は、小口径トンネル坑内の安定的な無線通信状況の確立を目指し、現場での坑内通信試験をさらに実施し、小口径トンネル坑内に関する知見を深める。

謝辞：本論文の執筆にあたり、坑内通信試験にご協力いただいた株式会社クボタ建設 下川様および小菅様、ならびに加賀電子株式会社 佐々木様、木村様および山本様に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 株式会社大林組：“シールド坑内自動測量システム「OGENTS/SURVEY™」を開発しました”，株式会社大林組ホームページ，2019，https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20190117_1.html，2022年8月26日参照。
- 2) Wireless City Planning 株式会社，ソフトバンク株式会社，大成建設株式会社：“5Gを活用した i-Construction の実現に向けた実証実験を実施”，大成建設株式会社ホームページ，2020，https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2020/200128_4869.html，2022年8月26日参照。
- 3) 松田浩朗，松元和伸，筒井隆規，藤本克朗，武市直人：無線 LAN 坑内測位技術による位置情報に基づくトンネル坑内の建設機械接触災害に対する安全監視システムの開発，とびしま技報，No.62，pp.1-4，2013。
- 4) 山崎多賀一，芝司朗，飯島正和，岩崎次夫：トンネル坑内「無線テレメータシステム」の研究開発，トンネル工学研究発表論文報告集，第5巻，pp.273-278，1995。
- 5) 佐々木範雄，御供輝充，千葉二郎：導水路トンネルのマイクロ波帯における減衰定数の実験式，電気学会論文誌 C，Vol.121，No.2，pp.438-444，2001。
- 6) 笠嶋善憲，平井淳一：トンネル内電波伝搬特性の理論解析，鹿島建設技術研究所年報，第50号，pp.177-182，2002。
- 7) Satoshi NISHIDA, Jun-ichi TAKADA, Gilbert Sity CHING and Yukiko KISHIKI：Effect of the object inside a tunnel in the radio wave propagation of a subway tunnel, *IEE CE technical report*, vol.117, AP2017-157, No.382, pp.37-42, 2018。
- 8) ミニシールド工法研究会：ミニシールド工法ホームページ，<http://www.minishield.com/>，2022年8月26日参照。
- 9) 社団法人日本下水道協会：日本下水道協会規格 下水道ミニシールド工法用鉄筋コンクリートセグメント（呼び径900～2000）JSWAS A-7，2005。
- 10) 株式会社 USEN ICT Solutions：インターネット回線スピードテスト-USEN GATE 02，<https://speedtest.gate02.ne.jp/>，2022年8月26日参照。
- 11) MetaGeek, LLC：BASIC W-FI LESSONS - Understanding RSSI，<https://www.metageek.com/training/resources/understanding-rssi/>，2022年8月26日参照。
- 12) 稲葉龍夫，桑本良知，坂野収，千葉二郎，佐藤利三郎：円形コンクリートトンネルの減衰定数の実験式，電子通信学会論文誌 B，Vol.62，No.1，pp.85-86，1979。
- 13) 山口芳雄，阿部武雄，関口利男：任意断面をもつトンネル内電波減衰定数の近似式について，電子通信学会論文誌 B，Vol.67，No.3，pp.352-353，1984。

(2022. 8. 26 受付)

STUDY ON STATUS OF WIRELESS COMMUNICATION IN SMALL TUNNEL WITH 1,000MM INNER DIAMETER

Shunya KATO, Terukazu NARUSHIMA, Shinichi AZUMA, Atsuhiko YAMAMOTO,
Kohsuke YAMAZAKI and Shotaroh ISHINO

In order to understand the wireless communication status in a small diameter tunnel, status of Wi-Fi, which is one of the wireless communications was measured in a small tunnel with inner diameter of 1,000 mm under construction by MINI-SHIELD tunneling method. As a result, Wi-Fi communication in 5.6GHz frequency band was possible in the straight section about 170m constructed by reinforced concrete segments, and in the curved section (R=20m) about 70m constructed by steel segments. And the attenuation constant of the straight section was 0.22 dB/m. Furthermore, it was confirmed that communication speed was likely to decrease due to multipath environment in a small tunnel.