

LPWA を用いたトンネル無線 B 計測システム 「T-RIPPA® BK」の開発

古賀 快尚*¹・谷 卓也*¹・青木 智幸*²・宮本 真吾*³・宮永 隼太郎*⁴・堀留 知徳*⁵

Keywords : mountain tunnel, measurement-B, wireless, LPWA

山岳トンネル, B 計測, 無線化, LPWA

1. はじめに

山岳トンネルの施工においては、掘削中の計測による地山挙動の把握および支保の健全性の評価が重要である。地山安定性を日常の計測で評価し管理する A 計測に対し、支保の健全性等の評価を所定の断面で行う B 計測では、鋼製支保工応力計・吹付けコンクリート有効応力計・ロックボルト軸力計・地中変位計などの計測器を各支保部材および地山に埋設し、多チャンネルロガーを用いた自動計測を行う¹⁾。

図-1 に一般的な B 計測用の機器（以降「B 計測器」）の設置手順を示す。図-1 は鋼製支保工応力計・吹付け

コンクリート有効応力計・地中変位計・ロックボルト軸力計の設置作業を対象としている。図中の黒枠が通常の掘削サイクル中の作業、黄枠が B 計測を行うにあたって事前準備作業、赤枠が B 計測器設置作業である。これらの作業項目の一部は、掘削作業の途中で計測器を設置する必要があることから、地山の安定のための支保が十分に施されていない切羽近傍で設置を行う必要があり、危険作業となる。また、計測器の設置作業に加えて、計測器本体（センサー部）と多数の計測ケーブルには、発破や掘削に伴う飛び石による損傷から守る防護工の施工中は、掘削作業を停止する必要がある。その所要時間は 1 日以上に至ることもあり、その

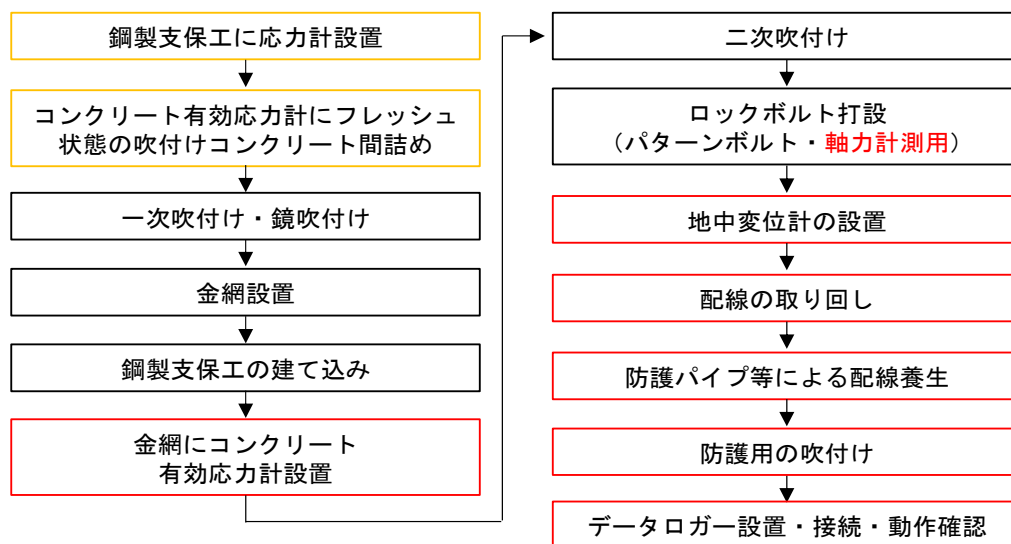


図-1 一般的な B 計測器の設置手順

Fig.1 General B measuring instrument installation procedure

* 1 技術センター 生産技術開発部 地下空間技術開発室
* 2 技術センター 社会基盤技術研究部
* 3 土木本部 土木技術部

* 4 技術センター 社会基盤技術研究部 地盤研究室
* 5 東亜エルメス株式会社 (株)

作業の効率化も課題であった。

そこで、B計測器設置作業の安全性と効率性の向上を目的に、吹付け支保内に埋め込み可能な小型の無線データロガーと機器防護方法の開発と、通常の掘削作業に極力影響を与えず迅速にB計測器の設置を実現する機器類の配置および設置手順を確立した。本稿では、開発した無線B計測システムの概要と計測器設置手順、現場実証実験の結果について述べる。

2. 従来のB計測器設置方法の課題

表-1にB計測の項目を、図-2に道路トンネル（支保パターン：DI）におけるB計測器の配置例を示す。計測項目は地中変位測定・ロックボルト軸力測定・吹付けコンクリート応力測定・鋼製支保工応力測定の4項目であり、1断面あたりの合計計測点数は68点である。各計測点それぞれにセンサー部とデータロガーを繋ぐ

表-1 計測項目

Table 1 Measurement items

計測項目	計測器名	仕様	数量	単位	計測点数	凡例
地中変位測定	ワイヤー式変位計	12m・6測点	3	台	18	E1~E3
ロックボルト軸力測定	ボルト軸力計	6m・6測点	5	台	30	M1~M5
吹付けコンクリート応力測定	コンクリート有効応力計	GK-36N-202	5	台	5	▲
鋼製支保工応力測定	鋼製支保工応力計	3断面力 (軸力・曲げ・せん断)	5	箇所	15	■

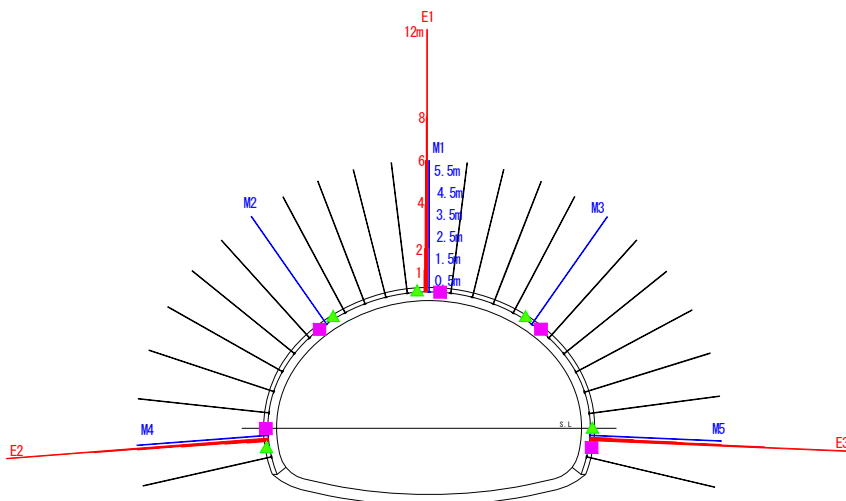
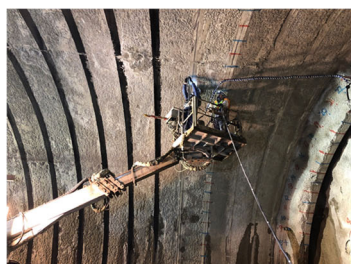


図-2 道路トンネルにおけるB計測配置例

Fig.2 Example of B measurement arrangement in a road tunnel



(a) 配線の取り回し状況



(b) 防護パイプによる養生状況



(c) 吹付けコンクリートによる防護工の施工状況

写真-1 配線作業状況

Photo.1 Wiring works

配線を必要とするが、データロガーは掘削作業の支障にならないよう計測器設置箇所から40~50m程度離隔を取る。そのため、計測器からの配線作業は、図-2の例に倣うと68本それぞれに延長50m必要となる。

写真-1にB計測設置作業における配線作業状況を示す。配線作業では、計測器を所定の位置に設置後、配線を取り回し(写真-1(a))、防護パイプなどに収納して養生を行い(写真-1(b))、掘削の飛び石による損傷から守るために吹付けコンクリートによる防護工を施す(写真-1(c))。これら数十本、数十mに及ぶ配線作業の改善が、B計測器設置作業の安全性・効率性の向上に向けた課題であった。

3. トンネル無線B計測システム「T-RIPPA BK」の概要

B計測器設置作業の安全性と効率性に関する課題は、計測器とデータロガー間を有線接続することに起因している。そこで、この課題を解決するために、無線B計測システム「T-RIPPA BK」を開発した。図-3にT-RIPPA BKの構成を示す。T-RIPPA BKは鋼製支保工応力計やコンクリート有効応力計といった従来の計測器・無線子機とデータロガーから成る無線データロガー・無線データロガーを飛び石による損傷から防護する防護工・通信親機で構成されている。

データロガーと通信親機間を無線接続することで、従来は数十本、数十mに及んでいた配線作業を削減し、B計測器設置作業の安全性・効率性の向上を図った。

3.1 無線通信システムの仕様²⁾

B計測器に無線技術を適用するにあたり、免許不要の基地局(ゲートウェイ)をトンネル内の任意の位置に設置し数kmの範囲を通信エリアとすることができる

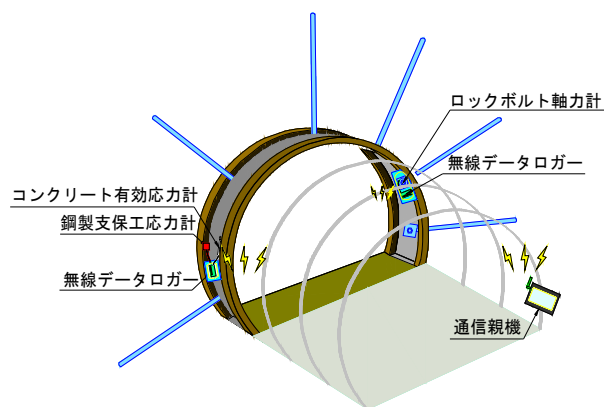


図-3 T-RIPPA BKの構成

Fig.3 Configuration of T-RIPPA BK

点、機器の消費電力が小さく小型のバッテリーで駆動できるという点から、LPWA (Low Power Wide Area) 無線技術の規格の一つである「Private LoRa」を採用した。表-2にT-RIPPA BKに採用した無線データロガーの仕様、写真-2に無線データロガーの外観を示す。この無線ロガーは計測器近傍に設置し、計測値をA/D変換し記録するデータロガー機能と通信親機へデータを送信する通信子機機能を有する。写真-3に通信親機の外観を示す。通信親機は、通信モジュールとタブレットPCにより構成され、防水防塵の筐体に収納されている。

無線データロガーについて、1台あたりのチャンネル数は6chであり、図-2および表-1の計測例に倣うと、1箇所の吹付けコンクリート応力測定(1ch)と鋼製支保

表-2 無線データロガーの仕様

Table 2 Wireless data logger specification

項目	仕様
測定チャンネル数	6ch
接続センサー	ひずみゲージ型
測定範囲	±40,000μ
測定間隔	10分~24時間
電源(電池)	単一型 3.6V
電池稼動時間	約1年以上 (測定間隔1時間の場合)
外径寸法	W175×H125×D79mm
筐体材質	ポリカーボネート
保護等級	IP65

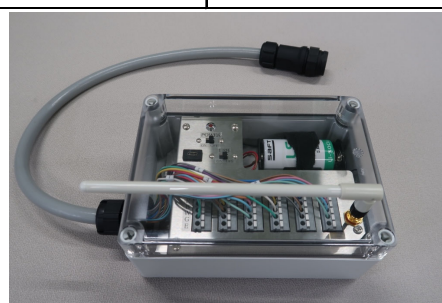


写真-2 無線データロガーの外観

Photo.2 Appearance of wireless data logger



写真-3 通信親機の外観

Photo.3 Appearance of communication master unit

工応力測定 (3ch) を合わせて 1 台, 地中変位測定・ロックボルト軸力測定 (6ch) はそれぞれ 1 台必要とし, 1 断面あたり合計 13 台のデータロガーが必要である。これに対して, 通信制御プログラムは同時に 15 台の無線データロガーと通信して計測を行うことが可能で, 通信親機 1 台で 1 断面フルスペックの B 計測に対応することができる。

また, 通信親機のタブレット PC は LAN 又は Wi-Fi にてトンネル坑外のサーバーと接続することができ, これにより遠隔で計測結果をモニタリングを可能としている。

3.2 防護工の構造と計測器設置手順

防護工について, 計測器を事前設置できるコンクリート有効応力計と鋼製支保工応力計, 切羽近傍で計測器の設置を必要とする地中変位計とロックボルト軸力計では構造と計測器設置手順が異なる。本節ではそれぞれ分けて詳細を述べる。

3.2.1 コンクリート有効応力計・鋼製支保工応力計³⁾

図-4 にコンクリート有効応力計・鋼製支保工応力計を対象とした防護工の構造 (縦断図), 図-5 に計測器設置

置手順, 写真-4 に防護工と設置状況を示す。本防護工は, 切羽近傍における設置作業を削減することを目的に, 事前に鋼製支保工や溶接金網に組み付けることを前提としている。

図-4 (a) の事前準備段階では, 鋼製支保工応力計を取り付け後, 若干離隔を確保して鋼製支保工の内側に無線データロガーを設置する。次にスタイロフォームで無線データロガーを添い付け, 鋼製支保工のフランジ部に長尺の U ボルトから成る浮き式アンカーを仕込んだポリカーボネート板を取り付ける (写真-4 (a))。後ほど吹付けコンクリートを施工することから, スタyroフォームは無線データロガーを吹付けコンクリートから防護する機能, 浮き式アンカーは吹付けコンクリートと付着しポリカーボネート板を固定する機能である。鋼製支保工のフランジ部に取り付けたポリカーボネート板は, 支保工建て込み・吹付けコンクリート施工後, 内空側の表面に位置し, 発破や掘削時の飛び

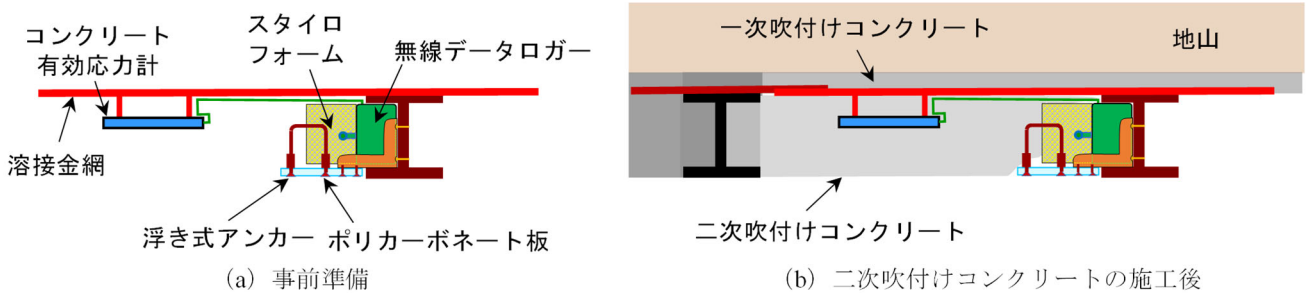


図-4 防護工の構造

Fig.4 Structure of protector

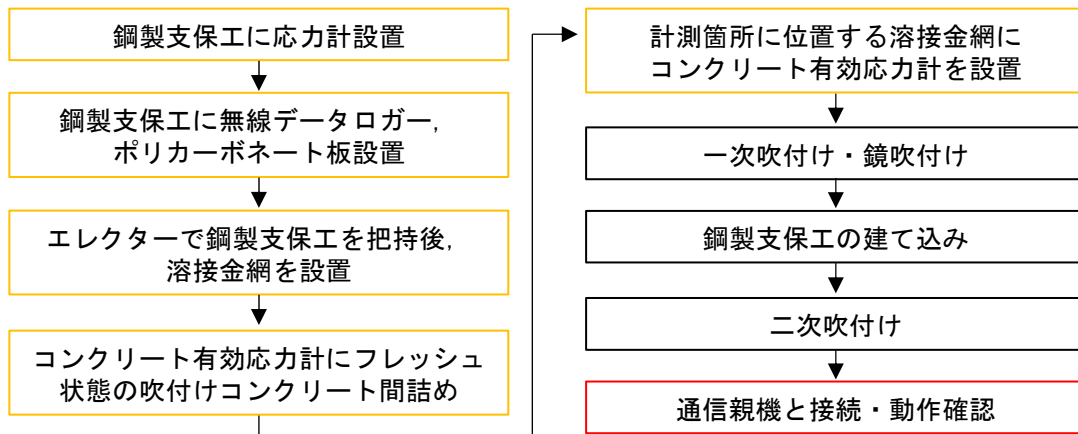
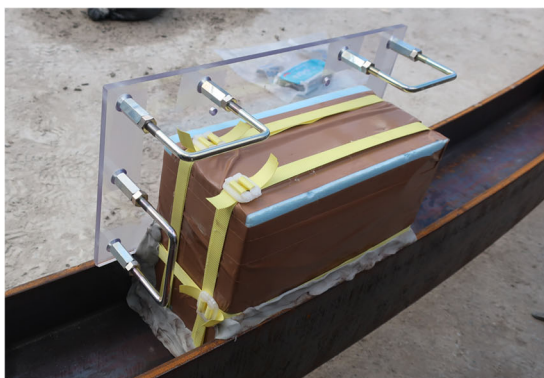


図-5 計測器設置手順

Fig.5 Measuring instrument installation procedure



(a) 無線データロガーと防護板の取り付け状況



(b) エレクターによる把持状況



(c) 支保工建て込み並びに計測器設置状況



(d) 吹付けコンクリートの施工状況

写真-4 防護工と設置状況

Photo.4 Works of Protection work and installation status

石からの防護工である。鋼製支保工は建て込む直前にエレクターによる把持を行うが(写真-4 (b)), その際に溶接金網を鋼製支保工に番線で取り付け、計測箇所位置する溶接金網にコンクリート有効応力計を結束線で固定する。その後、コンクリート有効応力計をデータロガーに接続し、事前準備とする。トンネル坑内の計測点への設置作業は、掘削サイクルの鋼製支保工の建て込み作業および吹付けコンクリートの施工と同時に完了する(写真-4 (c) (d))。これにより、切羽近傍における計測器設置作業とそれに伴う掘削作業の停止を完全に削減することができる。

3.2.2 地中変位計・ロックボルト軸力計⁴⁾

図-6 にロックボルト軸力計を対象とした防護工の構造、図-7 に計測器設置手順を示す。地中変位計とロックボルト軸力計の設置手順は概ね同じであるため、図-6 および図-7 ではロックボルト軸力計で説明する。

図-6 (a) の事前準備段階では、鋼製支保工に取り付けた溶接金網に硬質スポンジと浮き式アンカーを仕込んだポリカーボネート板を取り付ける。コンクリート有効応力計・鋼製支保工応力計の設置時と同様に、このまま吹付けコンクリートを施工するが、後にロックボルト軸力計と無線データロガーを収納するスペース

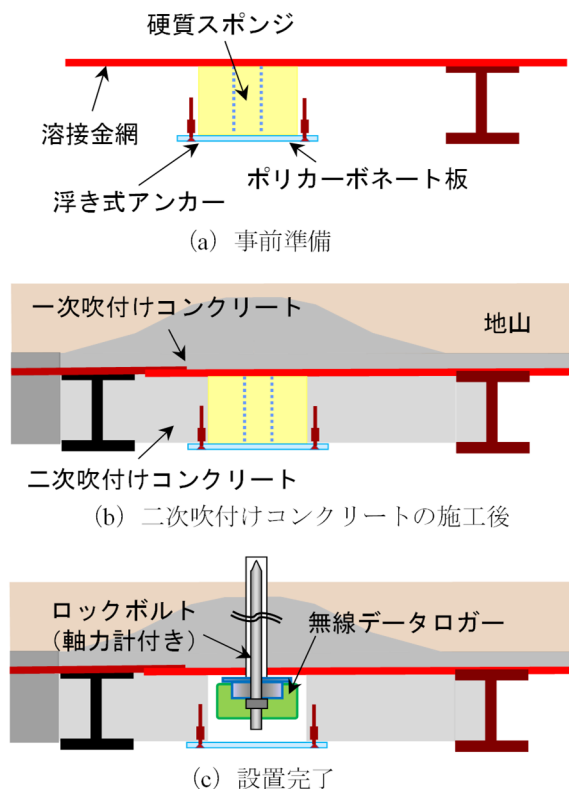


図-6 防護工の構造

Fig.6 Structure of protection

(≒箱抜き部)を設けることを目的に、硬質スポンジを取り付けている。吹付けコンクリートの施工後、ロックボルト打設作業の前に浮き式アンカーにネジ留めされているポリカーボネート板と硬質スポンジを取り外す。

このスペースにロックボルト孔を削孔し、計測用ボルトを打設する。その後、無線データロガーを設置し、ポリカーボネート板を再び取り付けることで計測器の設置作業を完了する。

4. 現場実験結果

無線 B 計測システム「T-RIPPA BK」を開発するにあたり、無線データロガーの仕様決定や施工性を確認す

ることを目的に、山岳トンネル現場で実験を行った。本章では現場実験を通じて明らかとなった知見について述べる。

4.1 無線データロガーのアンテナ・防護工選定と通信性能実験

無線データロガーのアンテナ・防護工の選定とトンネル坑内における通信性能を確認することを目的に、大分 212 号跡田トンネル(東工区)新設工事で現場実験を行った。ここでは初期の要素実験として、鋼製支保工応力計などのセンサーは用いずに無線データロガーのみを設置し、無線データロガー内温度・電池電圧・6ch 分の計測データに相当するダミーデータを 10 分間隔で通信する実験を行った。

実験は 3 種のアンテナと防護工の組み合わせを用い

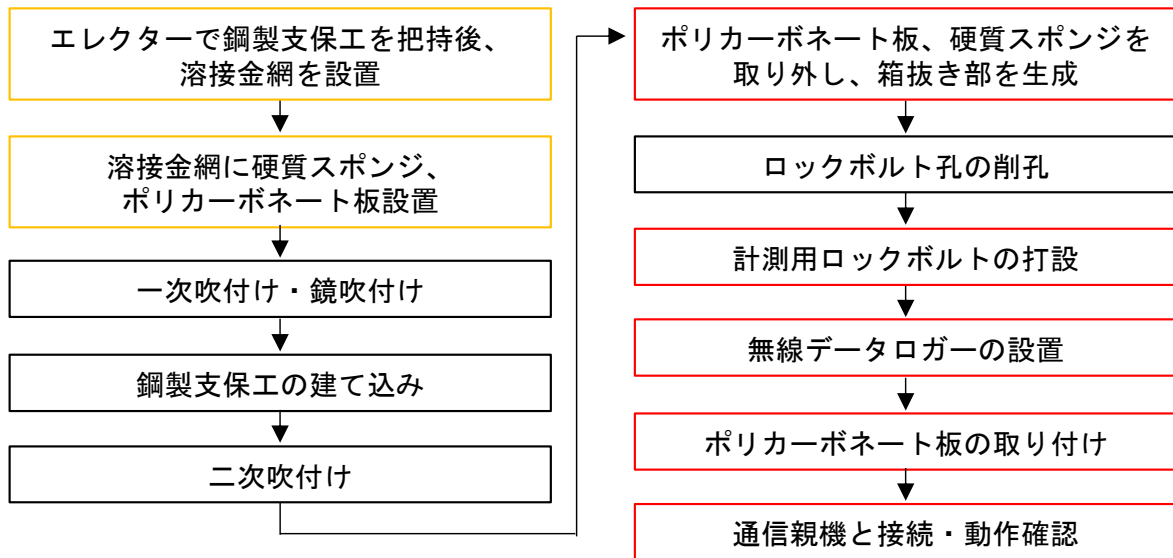
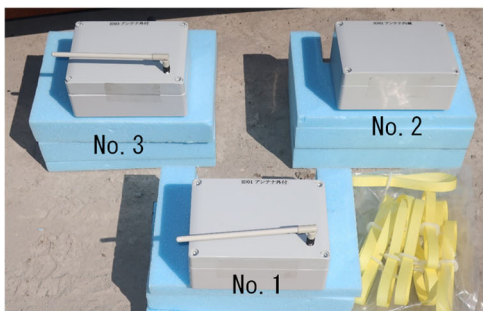
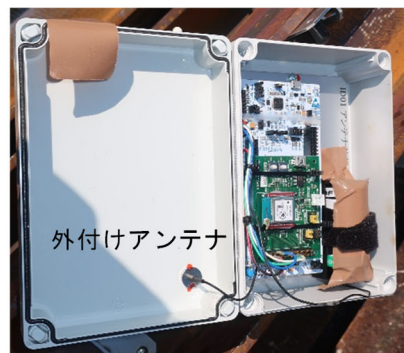


図-7 計測器設置手順

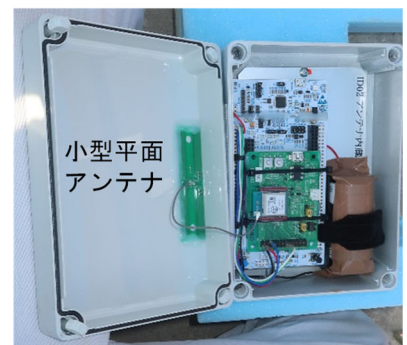
Fig.7 Measuring instrument installation procedures



(a) 無線データロガーの外観比較



(b) No. 1・No. 3の内部構造



(c) No. 2の内部構造

写真-5 無線データロガー

Photo.5 Wireless data logger

た。表-3 に実験ケース，写真-5 に実験に用いた無線データロガーを示す。No.1 は図-4 に示した防護工と無線データロガーの外側に取り付けた棒状のアンテナを用いた。No.2 はアンテナを検討するために，無線データロガー筐体に内蔵した小型平面アンテナを用いた。No.3 は防護工の構造を検討するために，図-4 の防護板を省略してスタイロフォーム部を直接 3cm 程度の薄い吹付けコンクリートでカバーする構造を試した。図-8 に無線データロガーの設置位置を示す。

実験では切羽で無線データロガーを設置した後に，

通信親機を移動して受信信号強度である RSSI の変化を測定した。図-9 に無線データロガーと通信親機間の通信距離と受信信号強度の関係を示す。通信距離と共に受信信号強度は低下するが，セントルを通過する所で低下量が比較的大きいものの，切羽から 800m 離れた坑口部まで問題なくデータ通信ができた。坑口部には鋼製の防音扉があり，その外側では通信できなかった。切羽から 800m 離れた地点までデータ通信できることから，運用上は通信親機を切羽より 100m~150m 後方に配置される電源台車に設置することにした。

表-3 実験ケース

Table.3 Experimental cases

No.	1	2	3
アンテナ	外付け・棒状	内蔵式・小型平面タイプ	外付け・棒状
防護工	ポリカーボネート板	ポリカーボネート板	吹付けコンクリート

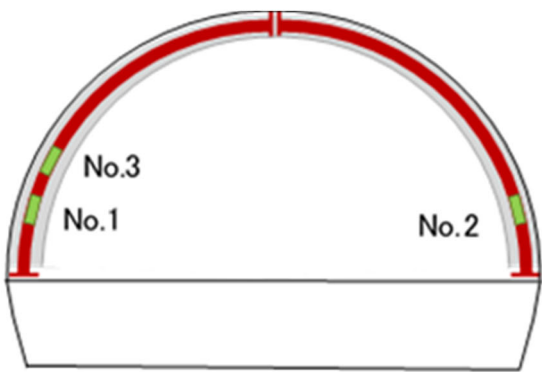


図-8 無線データロガーの設置位置

Fig.8 Installation location of wireless data logger



図-10 実験ケース別の受信信号強度

Fig.10 Received signal strength for each experimental case

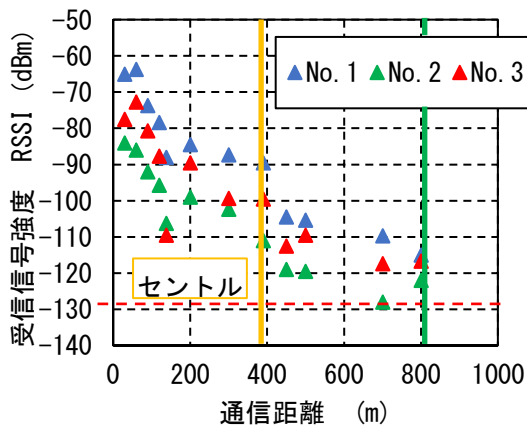


図-9 通信距離と受信信号強度

Fig.9 Communication distance and received signal strength

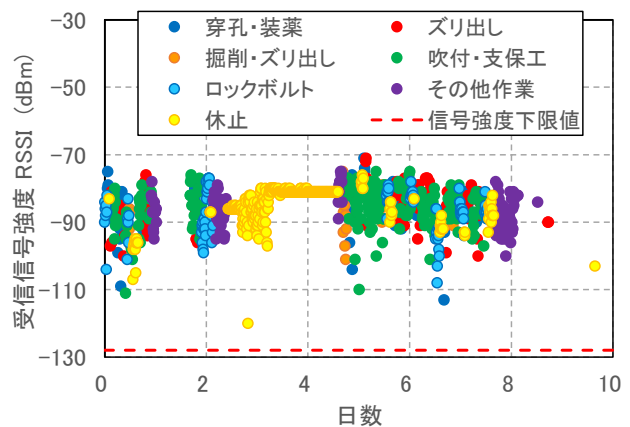


図-11 受信信号強度の推移

Fig.11 Transition of received signal strength

図-10 に実験ケース別の受信信号強度の関係を示す。内蔵アンテナ式の No.2 では、No.1 と比較して約 20dBm の信号強度低下が確認された。また、3cm 程度の吹付けコンクリートで防護した No.3 では、受信信号強度の低下がみられたが、通信可能な信号強度の下限値である -128dBm より十分大きな値であった。

図-11 には、約 10 日間の受信信号強度の推移を示す。ロックボルト施工など大型重機が切羽近傍を占有する作業のタイミングでは、掘削の休止時状態と比較して受信信号強度が 30dBm 以上低下することがあるが、その際でも、安定した通信に必要な十分な信号強度が確保できることが分かった。

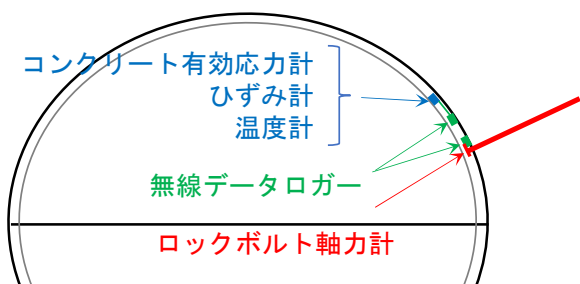


図-12 計測器設置位置

Fig.12 Installation location of measuring instrument



写真-6 計測器設置状況

Photo.6 Measuring instrument installation status



写真-7 設置完了後のデータロガー

Photo.7 Data logger after installation is complete

これらの結果から、受信信号強度の測定結果が一番良好であった No.1 の外付け・棒状アンテナとポリカーボネート板による防護工を選定した。

4.2 無線 B 計測システムの現場実証実験

防護工や無線 B 計測システムの施工性確認と B 計測への適用を目的に、国道 7 号鼠ヶ関トンネル工事にて実証実験を行った。図-12 に計測機器の設置位置の断面図を示す。実施した計測項目は、①鋼製支保工応力、②吹付けコンクリート応力、③吹付けコンクリートひずみ、④吹付けコンクリート温度、⑤ロックボルト軸力である。ロックボルト軸力計は実験用として、通常施工するロックボルトの間の位置に設置した。写真-6 に計測器の設置状況、写真-7 に設置が完了した 2 つのデータロガーの状況を示す。

実証実験は 36 日間とし、始めの 14 日間は 10 分間隔、次の 2 日間は 20 分間隔、以降は 1 時間間隔で、各無線データロガーより通信親機に計測データを送信した。

図-13 に鋼製支保工応力（軸力、せん断力）・吹付けコンクリートの応力・ひずみの経時変化を示す。掘削進行と共に鋼製支保工軸力と吹付けコンクリートひず

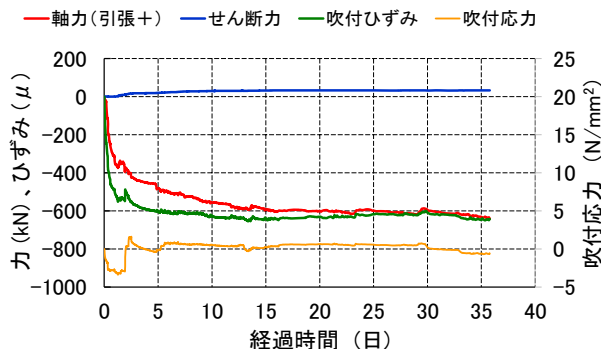


図-13 鋼製支保工応力・吹付けコンクリートの応力・ひずみの経時変化

Fig.13 Change of steel support stress, shotcrete stress and strain over time

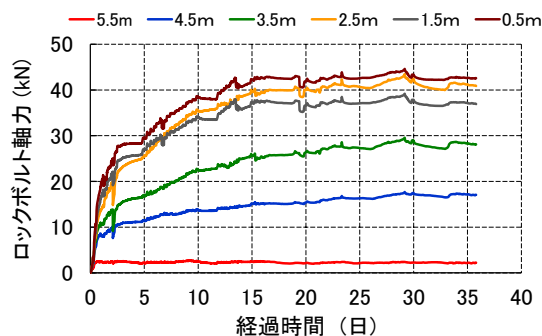


図-14 ロックボルト軸力計の経時変化図

Fig.14 Time change diagram of rock bolt axial forces

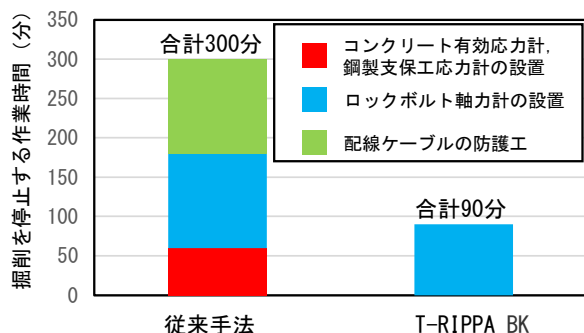


図-15 計測器設置作業時間の比較

Fig.15 Comparison of work time for measuring instrument installation while halting excavation routine

みは圧縮側 (-) に値が増加した。一方、吹付けコンクリート応力計の出力は初期に引張側に値が変化し、以降、変化量が少なかった。図-14 にロックボルト軸力計の経時変化を示す。掘削進行と共に、浅い深度の計測点の引張力が増加する挙動を示した。

また、防護工や無線 B 計測システムの施工性確認するために、切羽近傍で計測器の設置に要した作業時間を記録した。図-15 に図-2 に示した計測事例の実績と T-RIPPA BK の作業時間比較を示す。従来手法は 1 断面あたり 5 箇所 of B 計測の計測器設置時間であり、本実験では 1 箇所のみでの設置のため、T-RIPPA BK の作業時間は実測した値を 5 倍して比較した。従来手法は、計測器設置に伴い多数の延長が長い配線ケーブルを取り扱うため、設置に数時間要している。また吹付けコンクリートによる配線防護工は約 1 時間程度の作業を要する。これに対して T-RIPPA BK は、コンクリート有効応力計・鋼製支保工応力計の設置について切羽近傍の作業を削減している。また、ロックボルト軸力計の設置はケーブルを削減したため、従来手法と比較して 25% の作業時間が削減されたことを確認した。B 計測器設置作業全体の所要時間では、T-RIPPA BK は従来手法と比較して 70% の削減を達成し、掘削停止時間の短縮による効率性の向上を確認した。

また、支保が一次吹付けのみの環境で計測器設置作業を余儀なくされていたコンクリート有効応力計・鋼製支保工応力計に関して、T-RIPPA BK では切羽近傍作業を完全に削減し、安全性を向上させることができた。

5. まとめ

山岳トンネルの B 計測を対象に、LPWA による無線技術を適用し、無線 B 計測システム「T-RIPPA BK」を開発した。

T-RIPPA BK は鋼製支保工応力計やコンクリート有効応力計といった従来の計測器・無線子機とデータロガーから成る無線データロガー・無線データロガーを発破や掘削の飛び石による損傷から防護する防護工・通信親機で構成されている。計測器とデータロガー間を無線接続することで、従来は数十本、数十 m に及んでいた配線作業を削減し、B 計測器設置作業の安全性・効率性の向上を図った。

本開発では、現場通信性能実験等を通じて適切な無線データロガーのアンテナの配置や防護工の選定を行った。また、開発した技術の適用により従来手法と比較して切羽近傍における計測器設置作業を 70%削減できることを確認し、本システムの有効性を実証した。

また、従来安全のために実施する厚さ数 cm の一次吹付け状況下での計測器設置作業を余儀なくされていたコンクリート有効応力計・鋼製支保工応力計について、T-RIPPA BK ではこのような状況下での切羽近傍作業を行わずとも機器類を設置できるようにし、安全性を飛躍的に向上させることができた。

今後は社内の山岳トンネル工事での適用を行い、B 計測の適時かつ効果的な実施による施工品質の向上、生産性向上に貢献できるよう普及、展開していきたい。

参考文献

- 1) 土木学会 トンネル工学委員会：トンネル標準示方書 [共通編]・同解説/[山岳工法編]・同解説，公益社団法人土木学会，pp.250-253，2016。
- 2) 青木智幸・宮永隼太郎・古賀快尚・宮本真吾・谷卓也・堀留知徳：LPWA による山岳トンネル B 計測の効率性・安全性の向上 (1) -無線データロガーと発破防護構造の開発-，土木学会第 77 回年次学術講演会，VI，2022 (投稿中)。
- 3) 青木智幸・宮永隼太郎・古賀快尚・宮本真吾・松田一輝・堀留知徳：LPWA による山岳トンネル B 計測の効率性・安全性の向上 (2) -発破防護工の施工性と無線データロガーの通信性能の現場実験-，土木学会第 77 回年次学術講演会，VI，2022 (投稿中)。
- 4) 青木智幸・宮永隼太郎・古賀快尚・宮本真吾・藤木栄治・堀留知徳：LPWA による山岳トンネル B 計測の効率性・安全性の向上 (3) -トンネル B 計測の現場実証試験-，土木学会第 77 回年次学術講演会，VI，2022 (投稿中)。