

LPWA を用いたトンネル 無線 B 計測システムの開発

古賀 快尚¹・青木 智幸²・宮本 真吾³・谷 卓也⁴・
宮永 隼太郎⁵・堀留 知徳⁶

¹正会員 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1)
E-mail: kg-yst00@pub.taisei.co.jp

²フェロー会員 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1)
E-mail: aoki@sakura.taisei.co.jp

³正会員 大成建設株式会社 土木本部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1 丁目 25-1)
E-mail: mymsng00@pub.taisei.co.jp

⁴正会員 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1)
E-mail: takuya.tani@sakura.taisei.co.jp

⁵正会員 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1)
E-mail: mynsnt00@pub.taisei.co.jp

⁶非会員 東亜エルメス株式会社 (〒816-0921 福岡県大野城市仲畑 1 丁目 6-20 号 3 号室)
E-mail: horidome@toaelmes.co.jp

山岳トンネル工事の 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機器を支保工又は地山に埋設して計測を行う。これらの計測器設置作業は、切羽近傍で多数の配線作業と配線防護工を行う必要があり、安全性と効率性に課題があった。そこで B 計測器設置作業の安全性・効率性向上を目的として、無線 B 計測システムを開発した。山岳トンネル現場で施工性に関する検証を行った結果、計測器設置作業時間は従来手法と比較して 70%削減し、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、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。

Key Words: mountain tunnel, measurement-B, wireless, 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

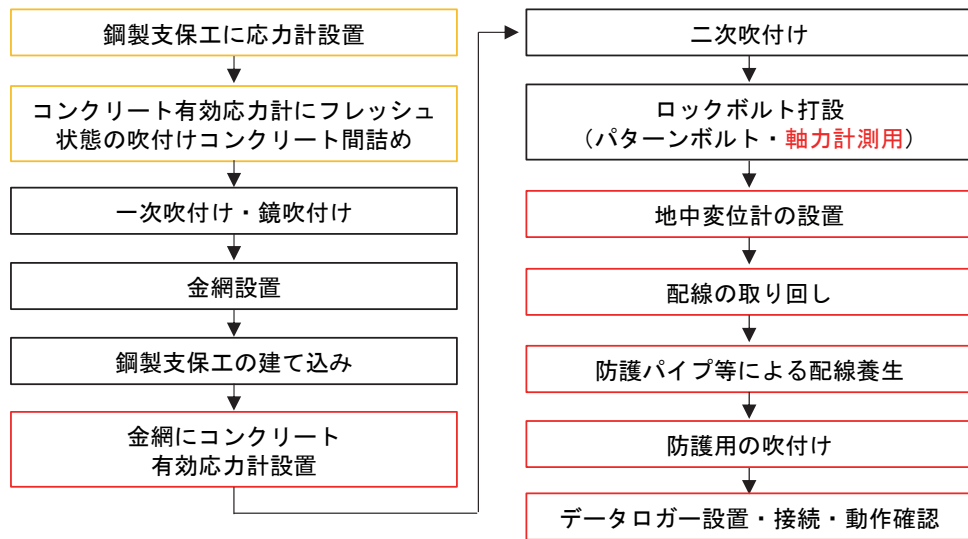


図-1 一般的なB計測器の設置手順

表-1 計測項目

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	■

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配線が必要とするが、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。

図-3にB計測器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（図-3（a））、防護パイプなどに収納して養生を行い（図-3（b））、掘削の飛び石による損傷から守

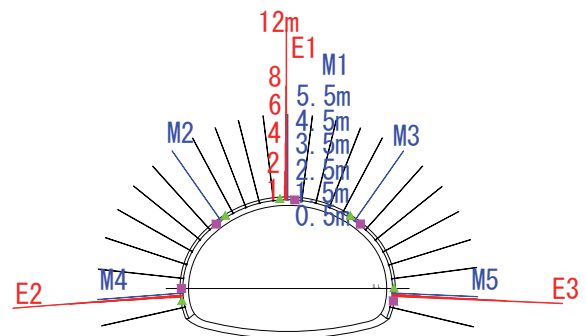


図-2 道路トンネルにおけるB計測配置例

るために吹付けコンクリートによる防護工を施す（図-3（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

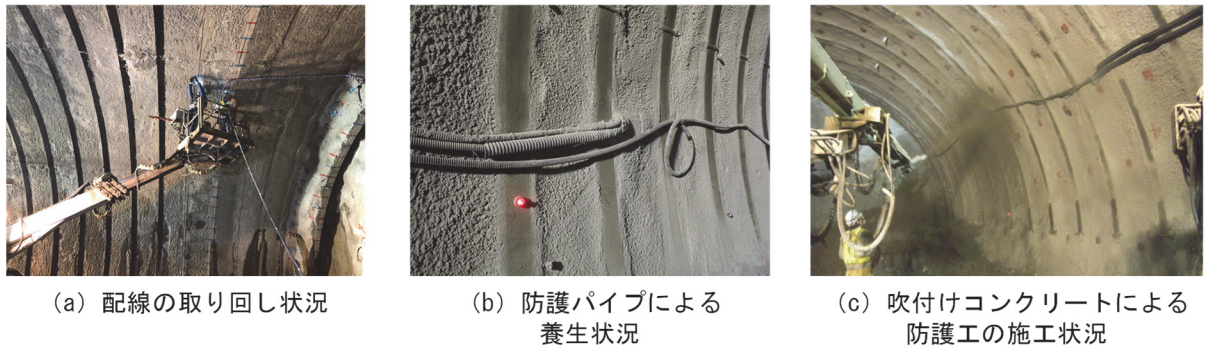


図-3 B計測器設置作業における配線作業状況

いる。そこで、この課題を解決するために、無線B計測システムを開発した。図4に無線B計測システムの構成を示す。無線B計測システム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。

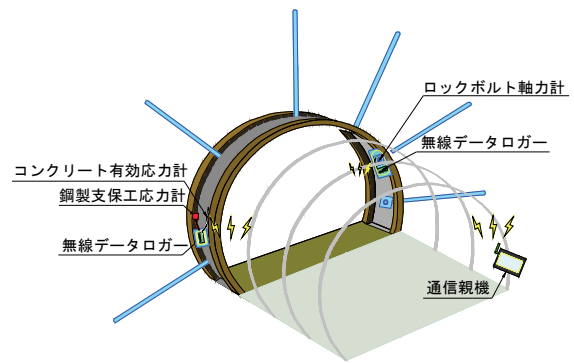


図-4 無線B計測システムの構成

(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。図5に無線通信におけるLPWAの位置づけ³⁾に一部加筆、表2に採用した無線データロガーの仕様、図6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。図7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

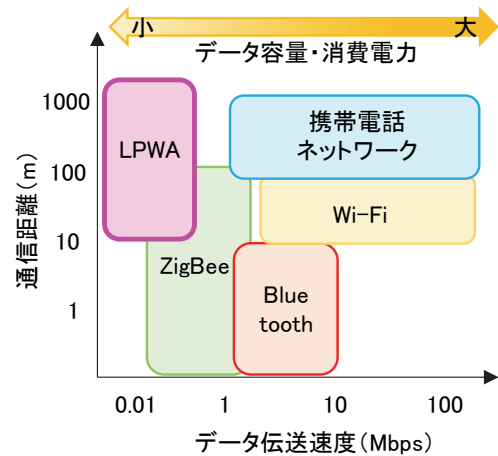


図-5 無線通信におけるLPWAの位置づけ

表-2 無線データロガーの仕様

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

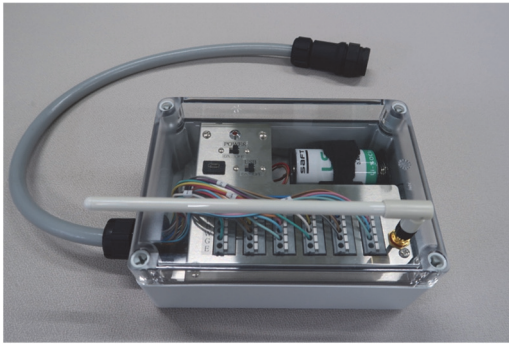


図-6 無線データロガーの外観



図-7 通信親機の外観

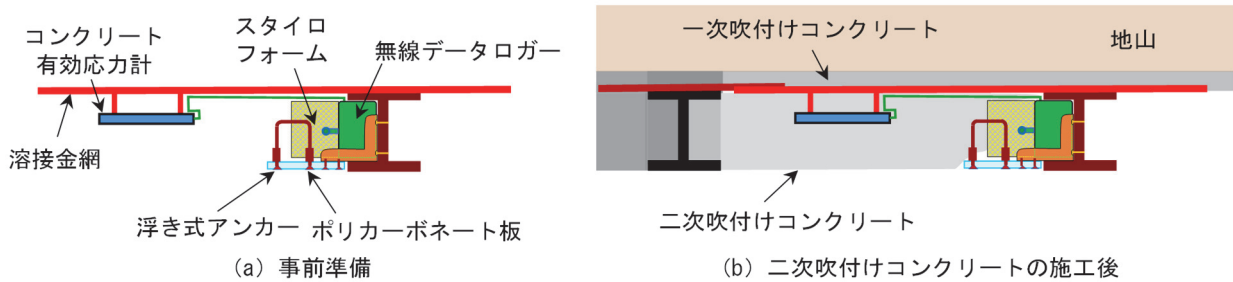


図-8 防護工の構造

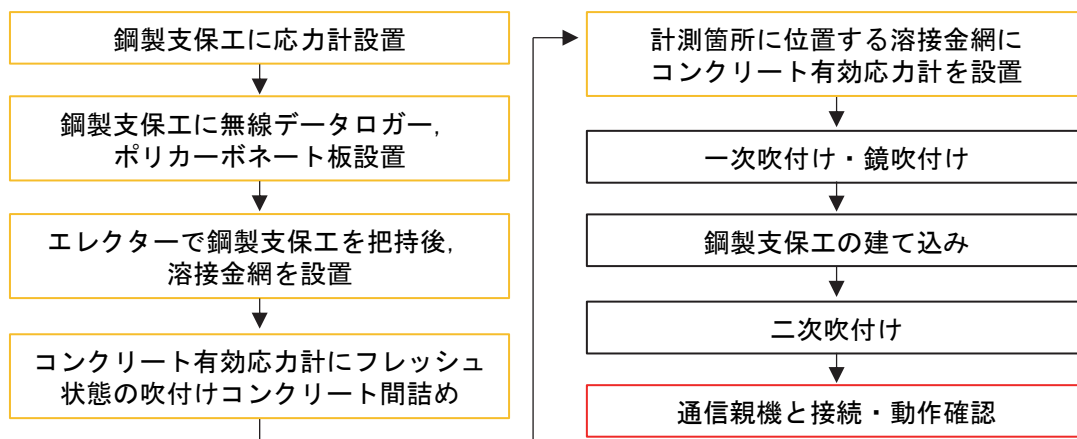


図-9 計測器設置手順

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。

(2) 防護工の構造と計測器設置手順

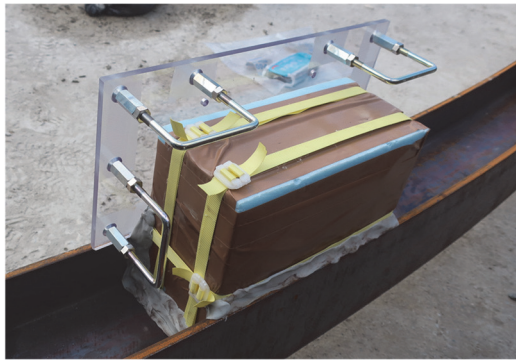
防護工について、計測器を事前設置できるコンクリート有効応力計と鋼製支保工応力計、切羽近傍で計測器の設置を必要とする地中変位計とロックボルト軸力計では構造と計測器設置手順が異なる。本節ではそれぞれ分けて詳細を述べる。

a) コンクリート有効応力計・鋼製支保工応力計⁴⁾

図-8 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-9 に計測器設置手順，図-10 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-8 (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（図-10 (a)）。後ほど吹付けコンクリートを施工することから、スタイロ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



(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

図-10 防護工と設置構造

に位置し、発破や掘削時の飛び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(図-10 (b))、その際に溶接金網を鋼製支保工に番線に取り付け、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(図-10 (c)、図-10 (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。

b) 地中変位計・ロックボルト軸力計⁵⁾

図-11 にロックボルト軸力計を対象とした防護工の構造、図-12 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-11 および図-12 ではロックボルト軸力計で説明する。

図-11 (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(≒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

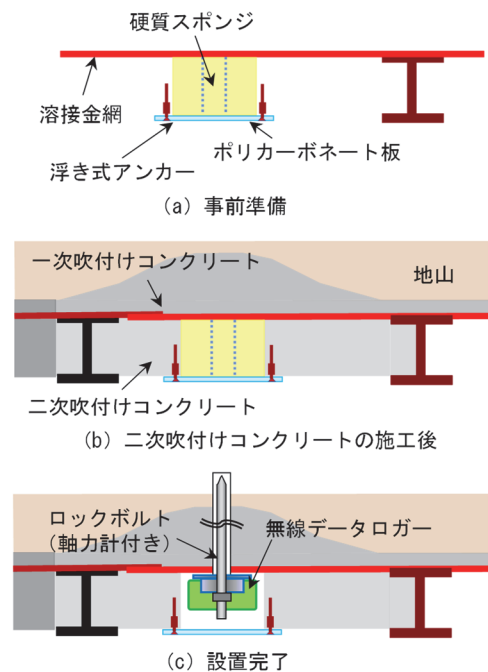


図-11 ロックボルト軸力計を対象とした防護工の構造

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、デー

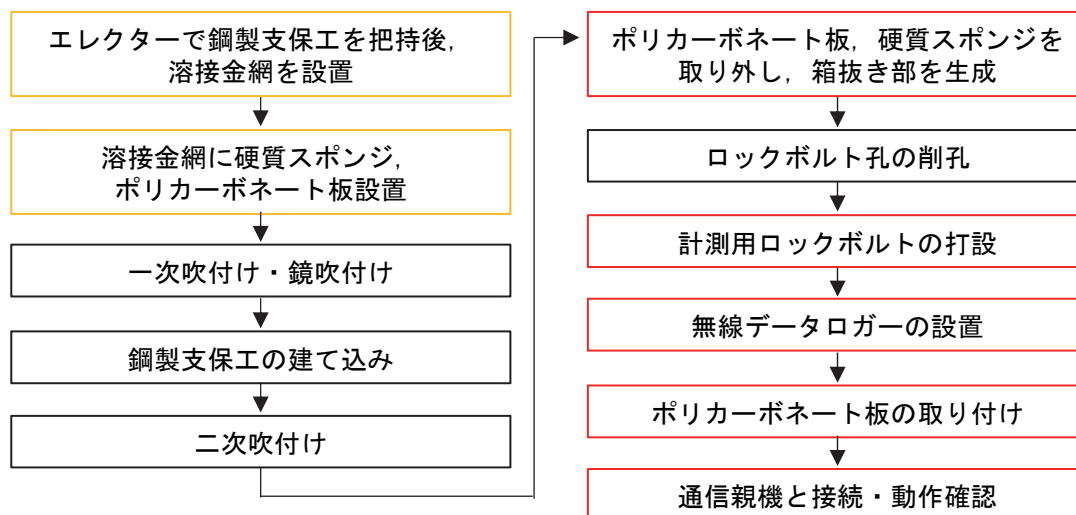
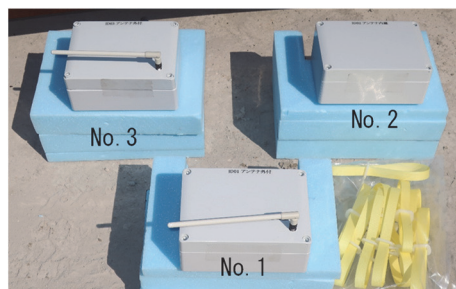


図-12 ロックボルト軸力計の設置手順

表-3 実験ケース

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



(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

図-13 無線データロガー

タロガーと計測器を接続後、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。

(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た。表-3に実験ケース、図-13に実験に用いた無線データロガーを示す。No.1は図-8に示した防護工と無線データロガーの外側に取り付けられ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-8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-14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

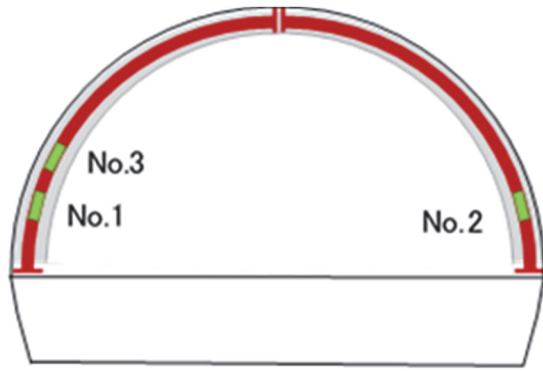


図-14 無線データロガーの設置位置

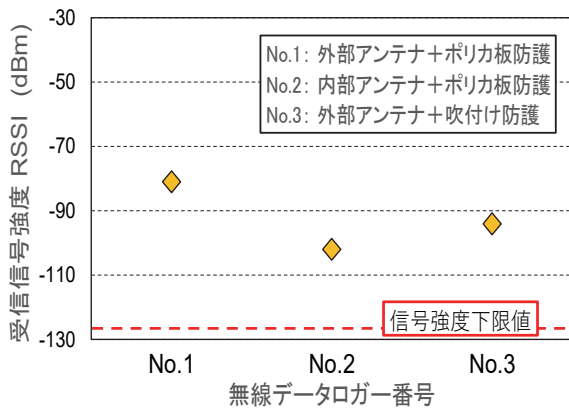


図-16 実験ケース別の受信信号強度

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-15 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。

図-16 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-17 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。

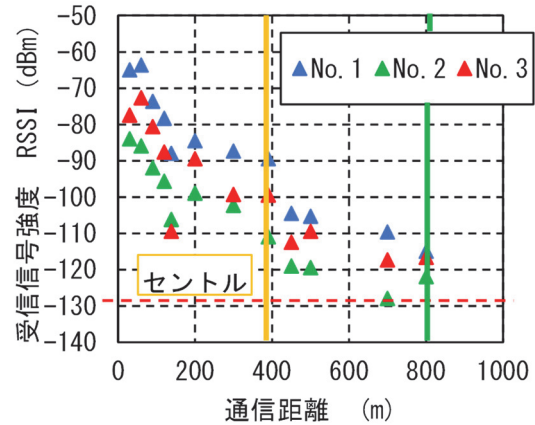


図-15 通信距離と受信信号強度

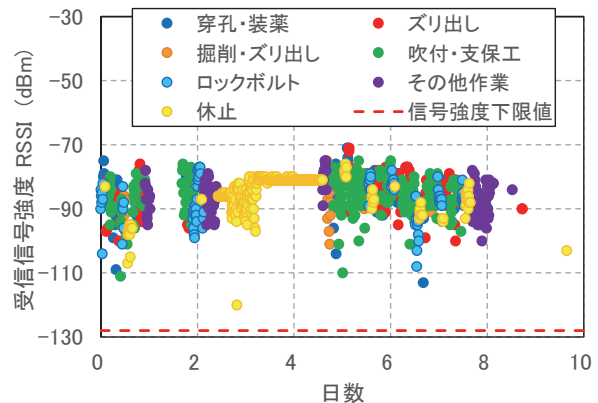


図-17 受信信号強度の水位

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。

(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-18 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。図-19 に計測器の設置状況、図-20 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-21 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みは圧縮側 (-) に値が増加した。一方、吹付けコンクリート応

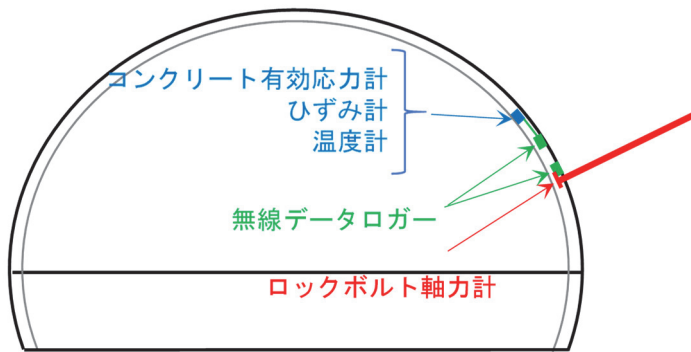


図-18 計測器設置位置

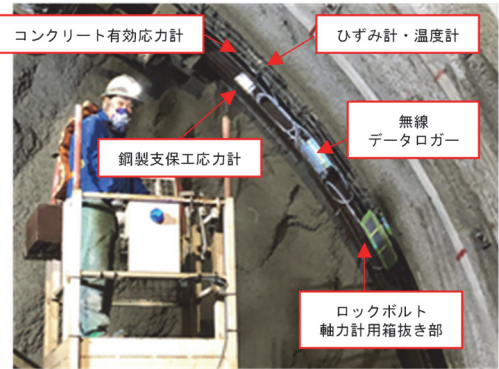


図-19 計測器設置状況

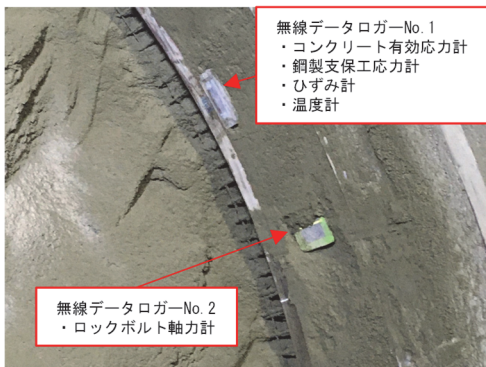


図-20 設置完了後のデータロガー

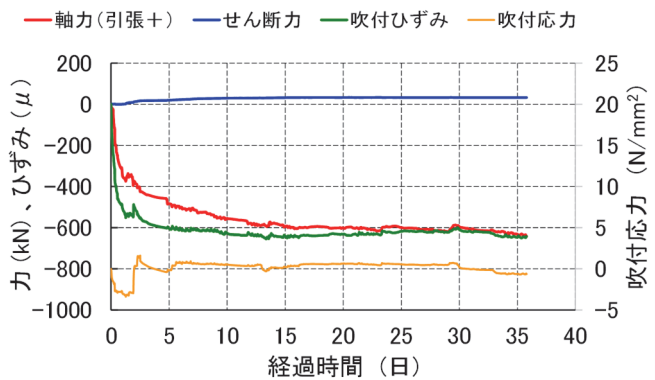


図-21 鋼製支保工応力・吹付けコンクリート応力・ひずみの経時変化

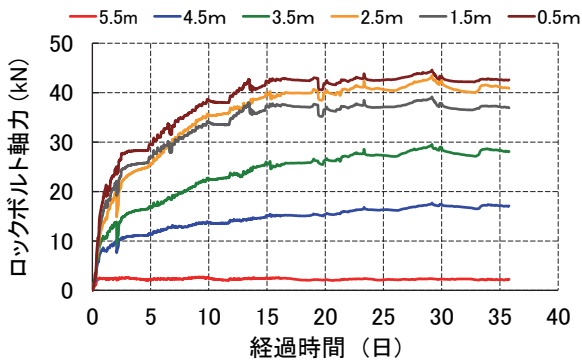


図-22 ロックボルト軸力計の経時変化図

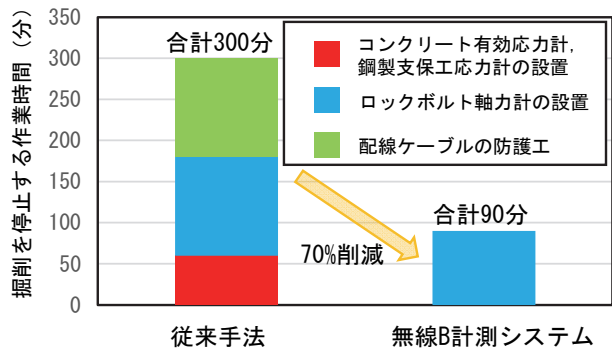


図-23 従来手法と無線B計測システムの作業時間比較

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-22 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-23 に図-2 に示した計測事例の実績と無線B計測システムの作業時間比較を示す。従来手法は1断面あたり5箇所B計測の計測器設置時間であり、本実験では1箇所のみ設置のため、無線B計測システム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。これに対して無線B計測システムは、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、無線B計測システム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、無線B計測システム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による無線技術を活用し、無線B計測システムを開発した。

無線B計測システムは、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、無線B計測システム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-295，2022.
- 3) 鄭立，IoTネットワークLPWAの基礎，リックテレコム，2017.
- 4) 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-296，2022.
- 5) 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-297，2022.

(2022. 8. 26 受付)

DEVELOPMENT OF WIRELESS B MEASUREMENT SYSTEM USING LPWA

Yoshitaka KOGA, Tomoyuki AOKI, Shingo MIYAMOTO, Takuya TANI,
Syuntaro MIYANAGA and Tomonori HORIDOME

In B measurement of mountain tunnel construction, measuring equipment such as steel support stress meter, shotcrete effective stress meter, rock bolt axial force meter, underground displacement meter is buried in support or ground, and it is a multi-channel logger. These measuring instrument installation work must be performed near the tunnel face where the support of is not sufficiently performed, and in addition, a large amount of wiring work and wiring protection work are required, so there are problems in safety and efficiency. Therefore, we have developed a wireless B measurement system for the purpose of improving the safety and efficiency of B measuring instrument installation work. As a result of verifying the workability at the mountain tunnel site, it was confirmed that the measuring instrument installation work time was reduced by 70% compared to the conventional method, and the efficiency was improved by shortening the excavation stop time. In addition, with regard to concrete effective stress meters and steel support stress meters, which had to be installed with measuring instruments in an environment where the support was only primary shotcrete, the work near the tunnel face could be completely reduced and safety could be improved.