

無線センサを活用した トンネル変状監視システムの開発

津野 究¹・蒲地 秀矢²・中西 祐介³・仲山 貴司⁴

¹正会員 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail:tsuno@rtri.or.jp

²正会員 (株) ジェイアール総研情報システム 数理解析部 (〒160-0004 東京都国立市北1-7-23)

³正会員 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

⁴正会員 (財) 鉄道総合技術研究所 総務部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

鉄道トンネルの変状監視において、計測機器で得られたデータを無線で転送することにより、データ収集にかかる手間やコストを大幅に低下させることを目的として、小型、軽量かつ省電力の無線センサを試作した。これを用いた性能試験を実施し、親機および子機の2台の無線センサでトンネル内で通信距離140mまで伝送可能であることや、中継用無線センサを用いてこれ以上の距離でも伝送可能であることを確認した。また、無線センサを用いたトンネル変状監視システムを用いて、実際の鉄道トンネルにおいてひび割れの計測を行った。本報では、試作した無線センサの概要、性能確認試験の概要および結果、実際の鉄道トンネルにおける現地試験について記述する。

Key Words : tunnel, wireless sensor, monitoring system, tunnel deformation

1. はじめに

鉄道トンネルの変状監視においては、内空変位の手動計測など人手による計測方法が主に用いられてきた。しかし、延長方向に長く広範囲にわたるトンネル覆工に対して、深夜の列車間合いなど限られてた時間で行わなければならない、多くの人手や日数を要することから、計測頻度の制約があった。一方、光波やレーザーを用いた自動計測システムを用いるなど、リアルタイムで変状監視を行う場合もあり¹⁾、光ファイバや導電塗料などといった新たな材料・技術を取り入れた変状監視システムも開発されている²⁾。しかし、これらの変状監視システムでは、計測器類を有線で接続してデータを送っているが、計測器自体が簡便なものであっても、配線が大がかりなものになり、これらのメンテナンスも必要であった。

そこで、鉄道トンネルの変状監視において、計測機器で得られたデータを無線センサで転送することにより、データ収集にかかる手間やコストを大幅に低下させることを目的として、研究開発を行った^{3) ~5)}。本報では、無線センサの概要、性能確認試験の結果および実際のトンネルにおける計測について報告する。

2. 無線センサの試作

無線センサネットワークを鉄道トンネルの変状監視に活用するためには、①建築限界を支障しないよう小型であること、②ごく狭い限られた範囲に多数の無線機を設置できるよう電波の干渉や混信に強いこと、③電池交換などのメンテナンスを最小限にするために省電力であること、等の条件が必要となる。また、延長方向に長い鉄道トンネルで使用することを考慮すると、無線機間の中継を行うことが必須条件となる。これらを踏まえて、IEEE 802.15.4 ZigBee Pro規格に準拠した無線機を選定した。使用した無線センサの無線出力は2mWである。本研究では、ひずみ式ひび割れ幅計を無線センサに接続し、プロトタイプシステムを構築した(図-1)。ここで、ひずみ式のセンサは微弱な電圧を扱うことから、小型で省電力のシグナルコンディショナーを開発した。

無線機はスリープモードにより省電力化を図っており、単3型電池2本(二酸化マンガンリチウム電池)で動作可能となった。これにより、電池も含めてサイズが7×3.5×4cmと小型で軽量の無線センサとなり、トンネル内での設置施工性の向上を図ることができた。

一方、スリープモードを活用したことに起因して電源立ち上がり直後にアナログ信号が安定しない現象が発生した。そこで、シグナルコンディショナーの定電圧回路が安定する時間においてデータ収録を行い、さらに平均化処理によりSN比を上げて対処した。

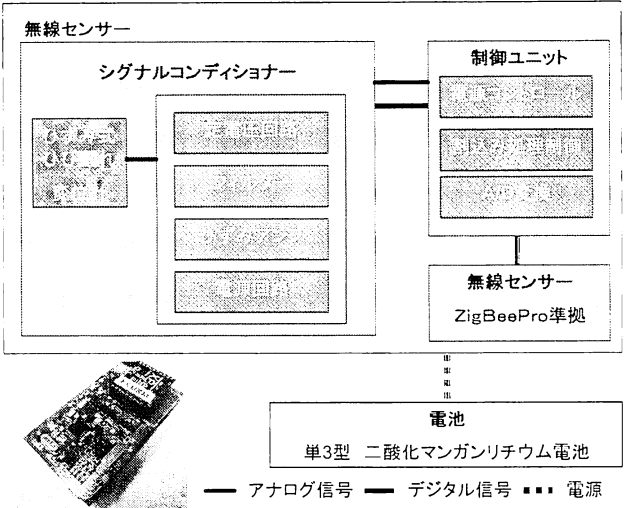
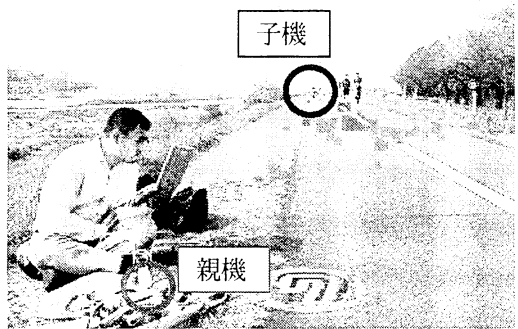
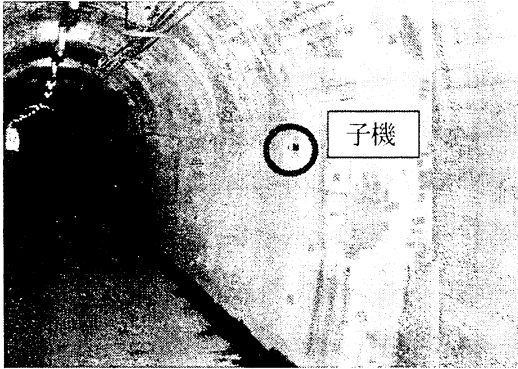


図-1 無線センサの概要⁵⁾



(a) 屋外（河川敷）



(b) トンネル

図-2 伝送性能確認試験を実施した箇所の概要

3. 性能確認試験

(1) 伝送性能確認試験

今回開発した無線センサの伝送性能を確認するために、屋外（河川敷）およびトンネル（鉄道廃線トンネル、単線）において確認試験を行った。試験箇所の状況を図-2に示す。屋外（河川敷）については、付近に民家や建物が無く、無線LAN等の無線機の影響を受けない箇所を選定した。

試験は、親無線機（コーディネータ）と子機（エンドデバイス）の2台の無線機を用い、親無線機と子機の上に40byteのデジタル情報の往復を10回繰り返して、デジタル情報の欠落発生率と電波の減衰を表す電波強度（RSSI）を計測した。ここで、無線機は、地表より1.3mの高さに設置した。試験は、デジタル情報の欠落発生率が100%になるまで、親無線機と子機間の距離を等間隔で大きくしながら行った。

試験より得られた距離とデジタル情報の欠落発生率の関係を図-3に示す。これより、屋外（河川敷）では通信距離が200mまで欠落発生率が0%であり、データの損失がないことを確認した。一方、トンネル内では通信距離140mまで欠落発生率が0%であり、150mの地点で70%となったが、トンネルの延長が156mであったことから、150m地点で実験を終了した。これより、トンネル内でも通信距離140mまで伝送可能であることを確認した。

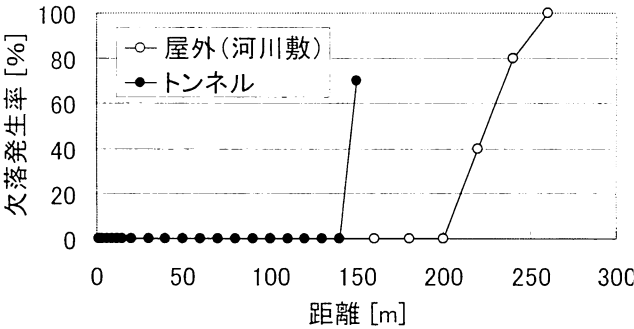


図-3 距離と欠落発生率の関係

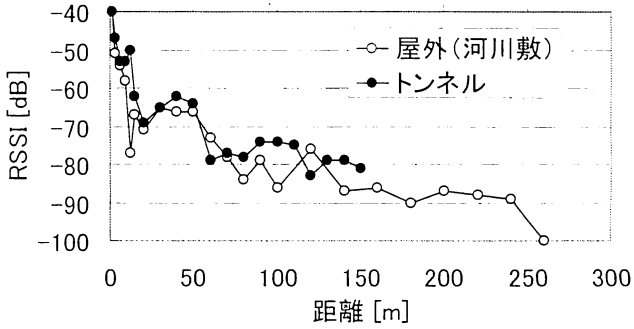


図-4 距離と電波強度（RSSI）の関係

図-4に、距離と電波強度（RSSI）の関係を示す。これより、屋外（河川敷），トンネル内とも距離の増加とともに電波強度が低下する傾向となることを確認した。そこで、この距離と電波強度の関係を次式で表し、最小二乗法により経路品質係数 n を求めた。

$$RSSI = -(10n \log_{10} r + A) \quad (1)$$

ただし、 $RSSI$ ：電波強度[dB]， r ：通信距離[m]
 n ：経路品質係数， A ：係数

この結果、経路品質係数 n は、自由空間で $n = 2$ とされている⁶⁾が、屋外（河川敷）で2.1，トンネル内で1.8となり、これと近い値となることが分かった。

(2) 長期稼働試験

今回開発した無線センサネットワークを鉄道トンネルの変状監視に活用するためには、長期的に稼働することが必要となる。そこで、無線センサが長期的に稼働することを確認するために、子機（エンドデバイス）に校正器を接続して常時 -2000μ のひずみを電氣的に発生させ、親機（コーディネータ）にパソコンを接続して長期的にデータを収録した。ここでは、収録間隔を30秒間隔と短い周期に設定し、電池の消耗とひずみの推移を100日間程度計測した。試験は冬季室内で実施した。

実験結果を図-5に示す。これより、3ヶ月以上の間、収録されたひずみの精度は $\pm 7\mu$ （変位換算 0.004mm ）程度であり、温度変化や電池の消耗から受ける影響が少なく、電池電圧が 2.5V に減圧するまで安定して収録できることが確認できた。

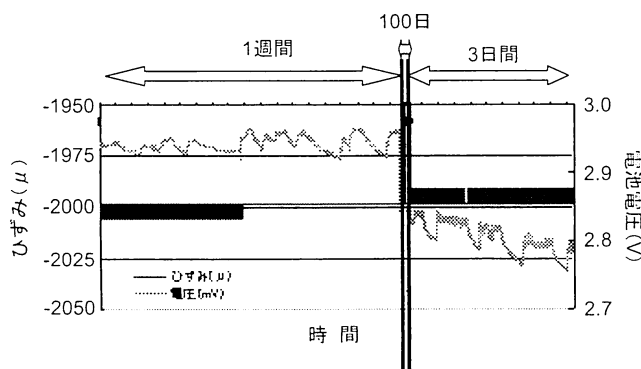


図-5 長期稼働試験結果（ひずみ，電池電圧）

(3) 耐寒性確認試験

トンネル内は一般的に屋外と比較して気温差が小さいが、今回開発した無線センサを寒冷地にあるトンネルの坑口付近で使用することも想定し、耐寒性の確認試験を行った。試験は、子機（エンドデバイス）に温度計およびひずみ校正器を接続したものを容器に格納して冷凍庫（設定温度：摂氏 -15°C ）に入れ、冷蔵庫から 5m 離れた位置に親機（コーディネータ）を設置して3日間データ収集を取った。これより、5時間後には摂氏 -15°C を下回ったが、ひずみのばらつきは $\pm 7\mu$ （変位換算 0.003mm ）程度であり、寒冷地での使用可能性が確認できた。

(4) 中継試験

性能確認試験で、今回試作した無線センサを用いてトンネル内で延長 140m まで伝送可能であることを確認したが、延長方向に長いトンネルでこれ以上の伝送性能が必要となる場合においては、中継用無線センサを使用して通信距離を延長する必要がある。

そこで、図-6に示す連続した2本のトンネル（鉄道廃線トンネル，単線）および明かり区間（延長 47m ）で中継用無線センサを用いた試験を行った。子機（エンドデバイス）に π 型のひずみ式ひび割れ幅計を接続し、図中のBトンネルに設置した。一方、図中のBトンネルに親機（コーディネータ）を設置し、子機と親機の間の中継用無線センサ3台を設置した。そして、ひび割れ幅計に強制的に変位を与えて計測し、計測値とノギスを用いて測定した値とを比較した。なお、無線センサは、地表より 1.3m の高さの側壁に、アンテナがトンネル坑内に向くように設置した。

試験の結果、計測値とノギスの測定値は一致し、通信の距離が 265m 間でも中継用無線センサを使用すれば通信可能であることが確認できた。これより、親機および子機の2台で通信できる距離よりも伝送距離が長くなった場合でも、中継用無線センサを用いて伝送可能であることがわかった。

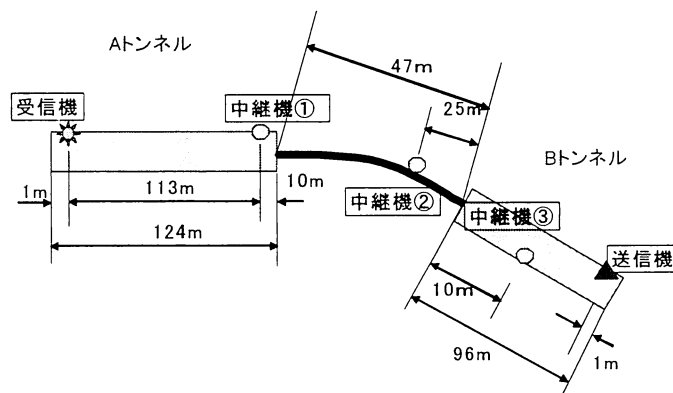


図-6 中継試験の概要⁴⁾

4 実際の鉄道トンネルにおける計測

(1) 計測概要

今回開発した無線センサを実際の鉄道トンネル（単線断面）に設置し、ひび割れ幅の経時計測を行った。計測概要を図-7に示す。終点方坑口付近、坑口から15mおよび坑口から87mにあるひび割れにπ型のひずみ式ひび割れ幅計を設置し、これに子機（エンドデバイス）を接続した。一方、坑口付近に親機（コーディネータ）を設置し、坑外の小屋に設置したパソコンをUSBケーブルで接続してパソコンに計測データを収録した。坑口付近に設置することも想定し、子機および親機は、幅10cm、奥行き10cm、高さ3.5cmの防水・防塵容器に格納し、アンカーでトンネル覆工に取り付けた。なお、子機には温度センサも内蔵させ、ひび割れ幅のデータと同時に温度データも伝送して収録した。

データの伝送間隔と使用電池を表-1に示す。性能確認試験では、単3型電池2本（二酸化マンガンリチウム電池、3V）を用いたが、今回計測を行ったトンネルが寒冷地に位置することから単3型電池4本とし、坑口に近いひび割れ幅計①および②に接続した子機については塩化チオニルリチウム電池（3.6V）を用いた。子機の設置状況を図-8に、親機の設置状況を図-9に示す。

(2) 設置状況

ひび割れ幅計および無線センサは、昼間の列車間合い（1時間程度）で行った。無線センサの設置作業は、アンカー孔の位置だし、削孔および取付け（ネジ止め）の手順で、1箇所あたり10分程度であった。

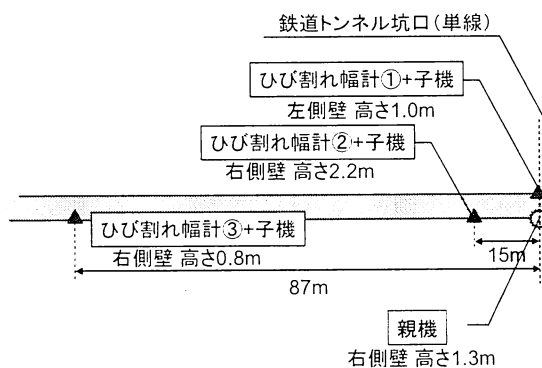


図-7 実際のトンネルにおける計測概要

表-1 伝送間隔と使用電池

計測点	伝送間隔	使用電池
ひび割れ幅計①	10 分	塩化チオニルリチウム電池
ひび割れ幅計②	1 分	塩化チオニルリチウム電池
ひび割れ幅計③	1 分	二酸化マンガンリチウム電池

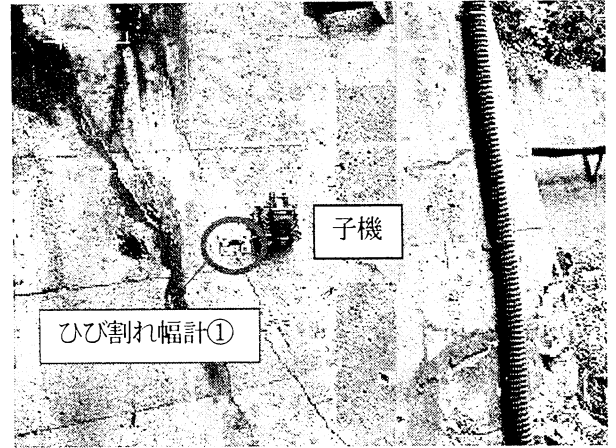


図-8 ひび割れ幅計および子機の設置状況



図-9 親機の設置状況

(3) 計測結果

計測により得られた温度およびひび割れ幅の経時変化を図-10に示す。ここで、ひび割れ幅の変化は、計測開始時点（0（基準））とし、ひび割れ幅が拡大した場合にマイナスになるよう図示している。

図-10では、計測開始後17日間の結果を示しているが、この期間データの欠落も無く、実際の鉄道トンネルでも良好にデータが取得できることが確認できた。

温度変化に着目すると、坑口付近（ひび割れ計①の設置位置）では温度の日変化が顕著であり、15℃程度ある日も見受けられる。一方、坑口から87mの位置（ひび割れ計③の設置位置）では、日変化が最大でも6℃であり、トンネル内部は坑口付近と比較して温度変化が小さいことを把握した。また、ひび割れ計①のデータを見ると、温度の日変化に合わせてひび割れ幅が±0.1mm以下のオーダーで変化しており、坑口付近のひび割れは温度上昇とともにひび割れ幅が小さくなる（プラス方向になる）

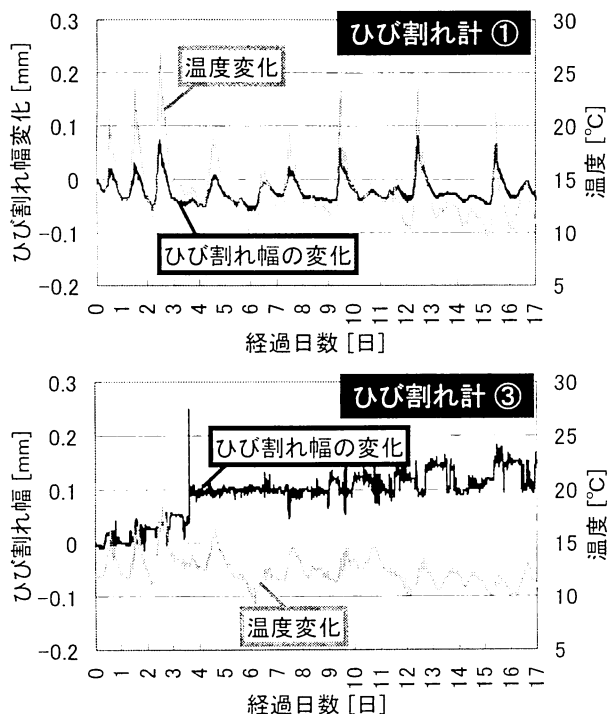


図-10 計測結果

傾向が確認できた。一方、坑口から 87m の位置のひび割れ計③のデータを見るとひび割れ幅の日変化は確認できなかった。

5. おわりに

鉄道トンネルの変状監視において、計測機器で得られたデータを無線で転送させるための無線センサを試作した。そして、性能確認試験および実際のトンネルにおける現地試験を実施した。得られた成果は、以下の通りで

ある。

- ・鉄道トンネルの変状監視に使用するための、小型かつ軽量の無線センサを開発した。
- ・親機および子機の2台の無線センサを用いて、屋外では通信距離が200mまで、トンネル内では通信距離140mまで伝送可能であることを確認した。
- ・乾電池2本で3ヶ月以上、リアルタイムの測定が可能であることを確認した。
- ・通信距離が150mを超える場合でも、中継用無線センサを用いて伝送可能であることを確認した。
- ・実際の鉄道トンネルにおいても、今回開発した無線センサを用いて計測データが取得できることを確認した。

謝辞：今回実施した現地計測において、北海道旅客鉄道株式会社の方々には多大なる御協力を頂いた。ここに記して謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 国土交通省鉄道局：鉄道構造物等維持管理標準・同解説，トンネル，pp.113-115，丸善，2007。
- 2) 橘直毅，小島芳之，仲山貴司：トンネルの変状を監視する，RRR2007年4月号，pp.10-13，2007。
- 3) 津野究，中西祐介，仲山貴司：無線センサを活用したトンネル変状監視システム，RRR2009年2月号，pp.18-21，2009。
- 4) 山内郁人，津野究，中西祐介，蒲地秀矢：無線センサを用いたトンネル変状計測の検討，第44回地盤工学研究発表会講演集，2009。
- 5) 蒲地秀矢，中西祐介，津野究，仲山貴司：トンネルの維持管理に活用するワイヤレスセンサーネットワークシステムの開発，第64回土木学会年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-400，2009。
- 6) 鄭立：zigbee 開発ハンドブック，株式会社リックテレコム，2006。

MONITORING SYSTEM FOR DEFORMED TUNNEL USING WIRELESS SENSOR NETWORK

Kiwamu TSUNO, Hideya KAMACHI, Yusuke NAKANISHI and Takashi NAKAYAMA

Compact and light wireless sensors with electric power saving are developed for the monitoring of deformed tunnels, which lighten the work of data acquisition and reduce the monitoring cost. Performance tests using preproduction prototypes show that it is possible to transmit measurement data up to the distance of 140m in tunnels and to utilize the sensors at longer distance with repeater sensors. The developed wireless sensors are also used to monitor a deformed railway tunnel. This paper describes the outline of wireless sensors, the performance tests and the monitoring in the railway tunnel.