

無線センサを活用した トンネル変状監視システム

津野 究

構造物技術研究部
(トンネル 副主任研究員)

中西 祐介

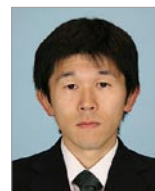
同
(同 副主任研究員)

仲山 貴司

総務部
(人事 課員)



つの きわむ



なかにし ゆうすけ



なかやま たかし

はじめに

トンネルが変形することを想像されたことはあるでしょうか？トンネルは周りを地山に囲まれており、地震にも強く、安定した構造物です。しかし、ごく稀に、地形や地質が特殊であるなどの理由で、長い年月をかけて年間数ミリのオーダーで少しずつ変形し、ひび割れなどの変状が発生することがあります。このような場合、人手による目視や打音調査（ハンマーでトンネルの覆工を叩いて浮きや剥離がないか確認する調査）のほか、計測器類をトンネル内部に取り付けて変状を監視し、これらの結果に応じて必要な時期に補強などの対策が施されます。

今回、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試みたので、報告します。

トンネルの変状と監視とは？

トンネルは、通常は丈夫で長持ちする構造物です。しかし、①硬い岩ではなく、軟らかい砂でできた地山の場合、②一見安定していても、一旦トンネルを掘ることによって乱されると徐々に弱くなる性質を持つ地山の場合、③不安

定な斜面中にトンネルを造った場合などには、何らかの拍子に、建設時に予期していなかった地圧を受けて、トンネルが変形したり、トンネルの覆工コンクリートにひび割れが入るなどの変状を起こすことがあります(図1)¹⁾。トンネルは、アーチ形状であるため、小さな引張りひび割れなら、直ちに列車走行に直接の影響を与えるものではありません。しかし、ある程度のひび割れになると、覆工の安定性が低下したり漏水が発生したりします。また、変形が進むと、覆工自体の強度が低下し、ますます変形が進むようになります。したがって、地圧の影響と思われる変状が見られる場合は、変形やひび割れの状況を計測により把握し、変状の進行性を監視することが重要になります。また、トンネルの近くに別の構造物が建設される場合においても、その影響で覆工が変形したりひび割れが発生することが懸念される場合は、計測による監視が必要になってきます。

鉄道トンネルの変状監視では、人の目や打音によって状況を把握するほか、計測器類を用いたりトンネル内部に取り付けたりして、変状の進行性を監視します。特に、トンネルの内空変位やひび割れ幅の計測は、変状原因の推定や健全性を判断するのに非常に役立ちます。

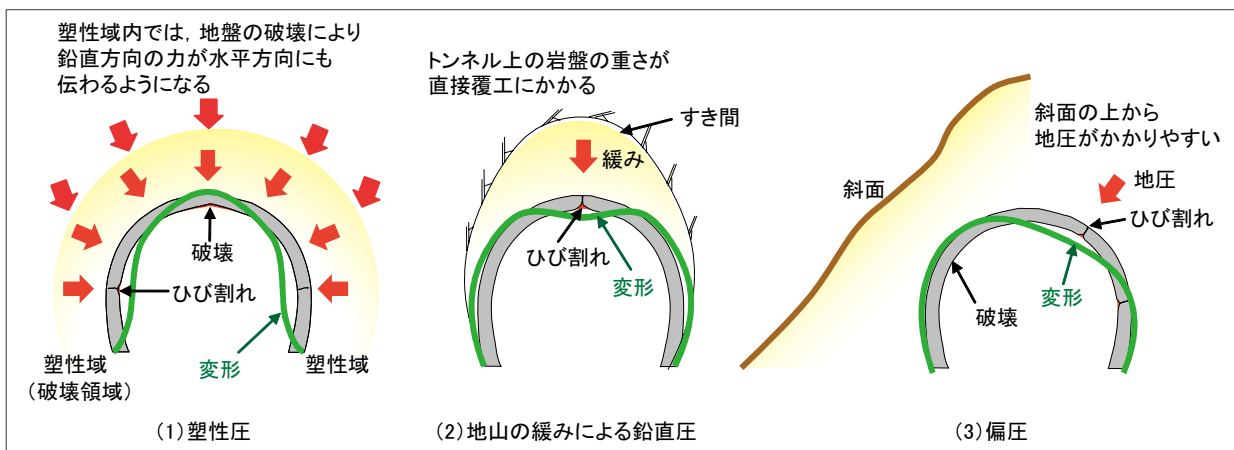


図1 トンネルに生じる代表的な地圧と変状例^{1)加筆修正}

これまで、鉄道トンネルの変状監視においては、人手による計測方法が主に用いられてきました(図2)。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、深夜などの列車が通らない限られた時間で計測を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、現状の人手による方法では計測頻度に制限がありました。また、トンネルの中に入ってデータを回収しなければいけない点も問題でありました。本来、地圧による変状などでは長期間にわたって少しずつ変状が進行することを考えると、変状の監視はリアルタイムで行うことが理想です。その実現のために、鉄道総研では光ファイバや導電塗料などといった新たな材料・技術も取り入れた変状監視システムの開発を進めてきました²⁾。しかし、これらの変状監視システムでは、計測器類を有線でネットワーク化していましたが、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ることもあり、これのメンテナンスも必要でした。また、作業時間が限られているため、配線の施工時間や配線の設置のために足場をかけるが必要になることが、導入のネックになることも少なからずありました。そこで、無線センサを活用し、計測機器で得られたデータを無線で伝送するシステムを開発することにしました。

無線センサを活用した変状監視システム

無線センサ

無線あるいはワイヤレス技術と言えば、日常生活に浸透している携帯電話や無線LANを思い起こす人が多いと思いますが、一般的に図3のように分類されます³⁾。インターネットをはじめこれまでの技術では、通信距離やデータ伝送速度が重視され、ワイヤレスWAN(携帯電話)やワイヤレスLAN(無線LAN)が主に用いられてきました。これらを用いた場合、ある程度の消費電力が必要となります。一方、トンネルの変状監視においては、無線センサ用に発電設備や大型のバッテリーを設置することは現実的ではなく、また給電用に配線を設けることは無線センサの利点を失うことになるので、消費電力を低くすることが重要となります。そこで、通信距離とデータ伝送速度をある程度犠牲にしても、低消費電力を確保することが重要と判断し、ワイヤレスPAN(近距離無線)の一種であるZigBee無線を用いることにしました。

また、トンネルで用いる場合、列車とトンネル覆工の間の狭い空間に取り付けることから、無線センサ部を軽量でかつ薄型にする必要があります。そこで、電池を用いて



図2 手動による内空変位の計測状況

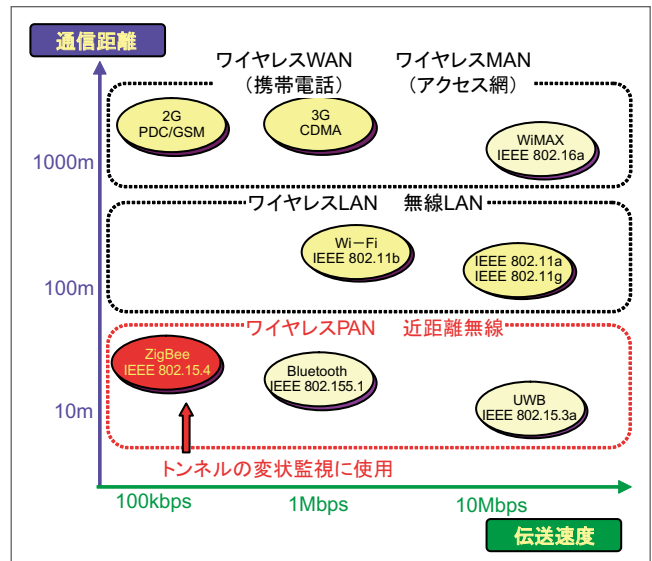


図3 ワイヤレス・ネットワークの分類³⁾加筆修正

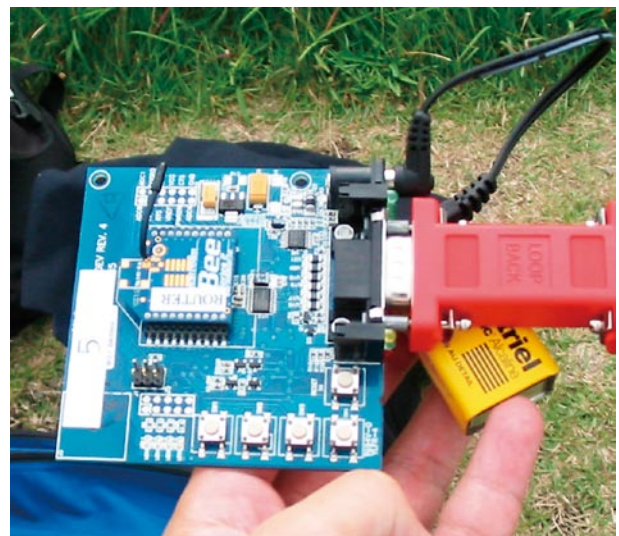


図4 無線センサ

電力を得るとともに、図4のようなセンサを作製しました。厚さは2cm以下、重量は50g程度であり、トンネル覆工に取り付けても問題のない重量およびサイズに仕上がっています。なお、単3電池2本で2年程度の計測が可能であることを確認しています。

変状監視システム

図5は、無線センサを活用したトンネル変状監視システムの概念図です。トンネル覆工には、ひび割れの進展や発生を検知する目的でひび割れ計を取り付けたり、導電塗料

を塗布したりします。計測機器から得られたデータは、計測機器に接続した無線センサからトンネルの入口に設置した収録機器を経て変状を監視している場所まで伝送され、監視モニター上にリアルタイムで表示されます。以下に、3つのステップに区分して無線センサの必要性能を説明します。

(1) 計測機器から中継用無線センサまでの通信

計測器に直接取り付けるセンサは、5~10m程度の短距離の通信ができれば十分ですが、トンネル覆工の高い位置

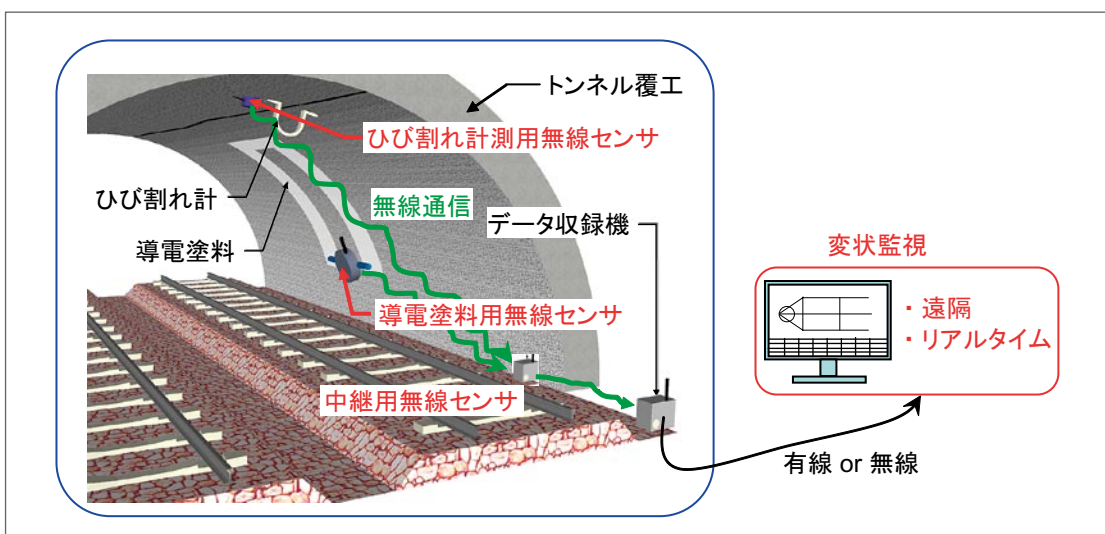


図5 無線センサを活用したトンネル変状監視システム^{4)加筆修正}

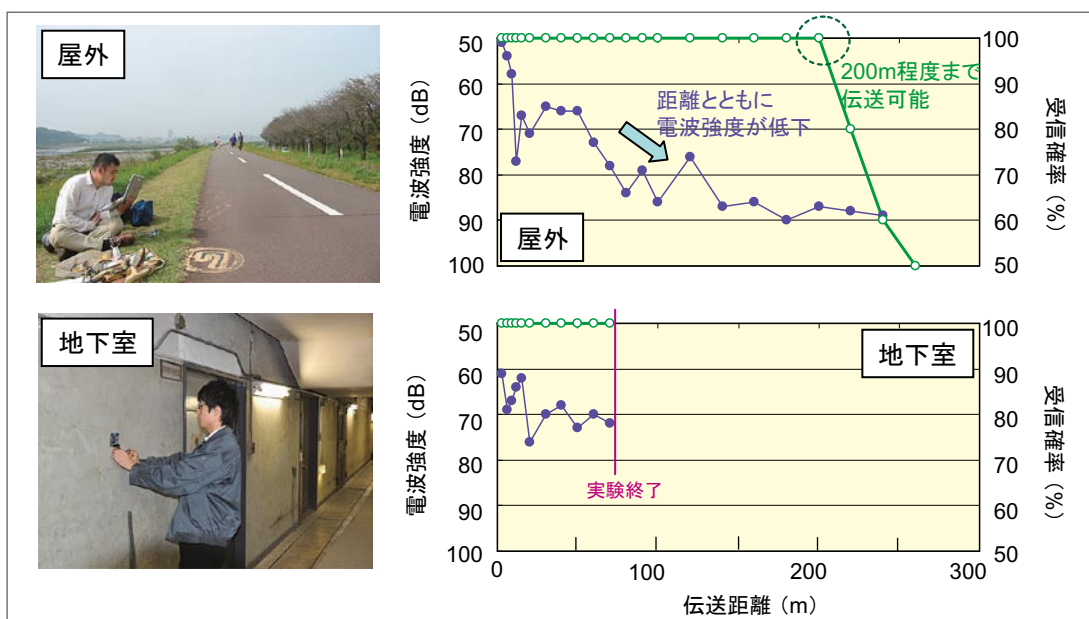


図6 無線センサの性能試験結果の例

に取り付けることもあることから、小型・軽量にする必要があります。また、高い位置に取り付けられた場合、電池交換が容易でないことから、特に長期間電池が持つようにする必要があります。これらの課題は、製作したセンサ(図4)でクリアできていると考えています。

(2) トンネル内からトンネルの入口までの通信

トンネルは筒状に長い構造物であり、計測機器を設置した位置からトンネルの入口まで、長距離の通信が必要となります。現在、中継用の無線センサについて検討しており、実際のトンネルにおいてより確実にデータを伝送する方法について提案する予定です。

(3) トンネルの入口から基地局までの通信

トンネルの外の通信であるため、無線LAN回線など、一般的な通信方法が使用可能となります。

無線センサの伝送性能は？

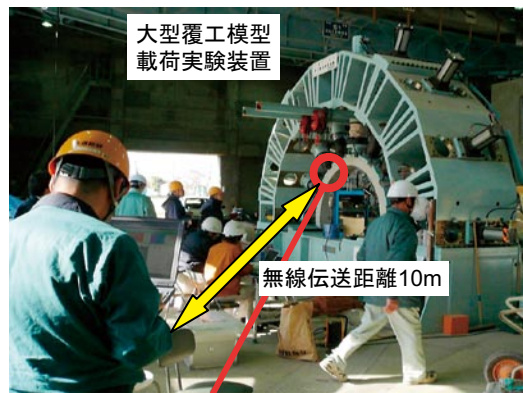
無線センサの伝送性能を確認するために、屋外およびトンネルの条件に近い地下室(廊下)で実験を行いました(図6)。屋外では、距離が大きくなるにつれ、電波強度が低下する傾向がみられましたが、200m程度までは受信確率が100%でありデータが伝送できることが確認できました。また、地下室(廊下)においては伝送距離70mまでしか実験できませんでしたが、70mまでは屋外とほぼ同じ傾向を示す結果となりました。以上より、計測機器から中継用無線センサまでの通信には十分な伝送性能があることが確認できました。

無線センサを活用した計測例

今回開発した無線センサを活用して計測を行った例を紹介します。図7は、新幹線トンネルの1/5スケールの覆工模型を載荷できる実験装置ですが、これを用いた載荷実験を行い、発生したひび割れの一部にひび割れ計を取り付け、覆工模型にはあらかじめひび割れの発生を検知する導電塗料を塗布しました。そして、これらの計測器を無線センサに接続させ、計測データを無線により10m離れた受信地点に伝送させました。載荷実験終了まで、データ伝送に問題は無く、良好な実験データが得られました。また、実験準備段階での配線作業が大幅に軽減されるとともに、乱雑な計測用の配線に気を配ること無く、覆工のひび割れの発生や進行状況を精度よく計測することができました。

おわりに

ここでは、トンネルの変状監視に関する概要と、計測デー



ひび割れ変位計および無線センサ

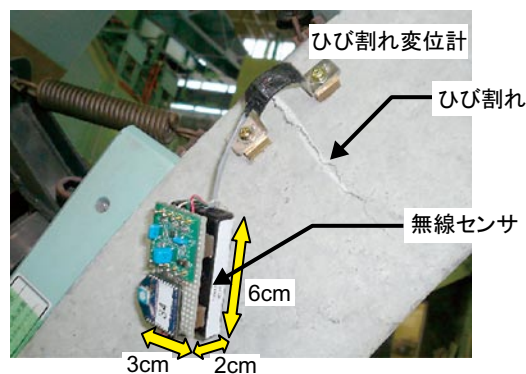


図7 模型実験におけるひび割れ変位計測

タデータ収集にかかる手間やコストを大幅に低下させるために構築した「無線センサを活用したトンネル変状監視システム」について紹介しました。トンネルにおいて無線センサを用いて計測データを伝送することは、技術的に可能であると判断しており、現在、実際に変状が見られる鉄道トンネルで試験的に計測することを計画しており、準備をしています。

なお、本研究は、国土交通省による補助金を受けて実施したものです。[RRR]

文献

- 1) 小島芳之, 野城一栄, 高橋徹: 丈夫で長持ちするトンネルに, RRR, 1998.4
- 2) 橋直毅, 小島芳之, 仲山貴司: トンネルの変状を監視する, RRR, 2007.4
- 3) 鄭立: ZigBee 開発ハンドブック, リックテレコム, 2006
- 4) 佐藤紀生他: 土木構造物センサデータ収集システムの開発, 鉄道総研報告, Vol.22, No.6, p.35-40, 2008