トンネル・地下構造物の変状監視における無線センサの活用

中村 智哉[1*]・津野 究[1]・富樫 陽太[1]・蒲地 秀矢[2]・大木 裕久[2]

[1]公益財団法人 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）
[2]株式会社 ジェイアール総研情報システム　数理解析部（〒185-0034 東京都国分寺市光町2-8-38）
*E-mail: nakamura.tomoya.33@rtri.or.jp

トンネルや地下構造物は安定した環境である地中内に構築されるため，長寿命の構造物といわれているが，中には老朽化に伴う材料劣化や近接工事による影響などで変形，ひび割れの発生が報告されている．これらに対応するため，人力による変状監視を行うことが一般的であった．近年では有線による自動計測も行われているが，鉄道トンネルや地下構造物では配線が長距離におよぶ場合が多いため作業が煩雑となるほか，メンテナンスについても課題があった．そこで，計測機器から得た情報を無線で伝送することで，配線手間などを軽減した低コストでメンテナンス頻度の少ない計測システムを構築したため，本計測システムの概要説明とともに，これまでの検討事項や実際のトンネルで実施した計測について紹介する．

Key Words : *tunnel, underground structure, wireless sensor, deformation monitoring, in-situ test*

1. はじめに

トンネルをはじめとする地下構造物は安定した環境である地中内に構築されるため，長寿命の構造物と言われている．しかしながら，中には老朽化に伴う材料劣化や近接工事などによる土圧（偏圧）などの外力による変形，ひび割れの発生が報告されている．これらに対し，変状の常時監視ならびに長期に渡る計測が必要となる場合であっても，従来では，内空変位の手動計測や目視による状態監視が一般的だった．近年では，計測機器の計測データを有線で記録する自動計測も行われているが，鉄道トンネルなどのスパンの長い地下構造物では計測機器類に電力配給するための配線が長距離におよぶ場合が多いため，設置作業の効率が悪く，配線自体のメンテナンスやコストの観点からも非合理的であった．以上のことから，無線センサネットワークを活用し計測機器から得られた計測データを無線で伝送することで煩雑な配線手間を軽減し，低コストでメンテナンス頻度の少ない自動計測システムを構築した[1)~4)]．なお，**図-1**では鉄道トンネルの覆工に発生したひび割れをパイ型ひび割れ幅計を用いて変状監視をする無線センサシステムの一例を示したが，この他にも，傾斜計，地震計，接触式変位計，間隙水圧計，風速計などの計測機を子機に接続し，自動計測が可能である．

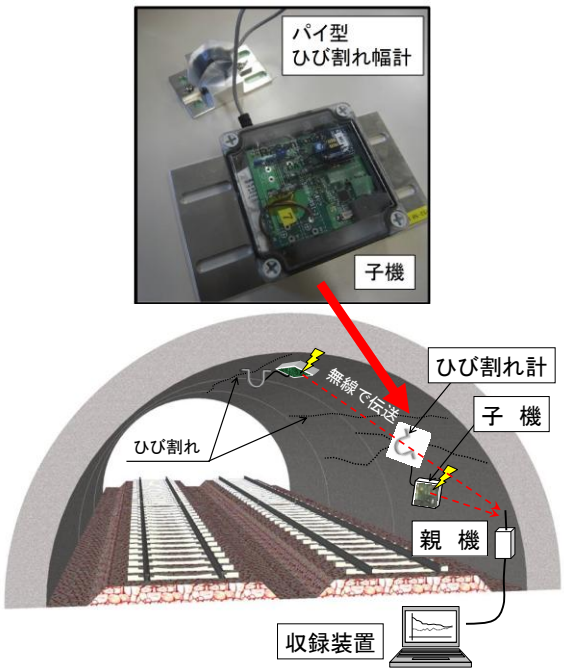

図-1　無線センサを用いた変状監視システム

本報告では，線路下横断構造物の非開削工事で仮設防護として鉄道盛土内に設置される矩形鋼管を対象とし，鋼管の接合継ぎ目の目開き計測を行った結果を，無線センサシステムの詳細な性能とともに示す。まず，予備検討として，均しコンクリート上に設置した接合鋼管で伝送試験を行った結果を示す。次に，予備検討に基づいて

実施工現場で適用した目開き計測について紹介した上で，狭隘な空間での計測のために改良した無線センサの収録装置について報告する．

2. 矩形鋼管内における伝送試験

著者らが開発した無線センサによる計測手法は，鉄道トンネルにおいて適用性を確認し，良好な結果が得られている[1]が，鋼管のように，鋼材で囲まれた狭隘な空間内での適用実績はなく，電波の反射等の影響が不明である．このような無線システムを用いた計測機器の最適な設置箇所を実挙動に合わせて選定することを目的とし，本試験では，実現場で使用するものと同様の矩形鋼管を用いて事前の伝送試験を実施した．

(1) 無線センサの概要

同システムは，ZigBee規格の無線を用いて，ひび割れ幅計測器などのひずみ式センサに接続した子機から収録装置を接続した親機まで，1～10分間隔でデータを伝送することができる．この子機は，単三形の一次リチウム電池で駆動し，無線機，ひずみアンプ，温度計を含めて，縦10cm，横10cm，高さ3.5cmの防水容器に格納した．なお，狭隘な空間での設置や長期間の計測を実現するため容器の小型化・軽量化を図った．一方で，一般的になシステムではネットワーク保持のため，子機を絶えず起動させておく必要があり，消費電力が大きいことが問題となっている．これに対して，本システムではデータ計測と伝送時のみにシステムが起動するスリープモードを採用することで省電力化を可能とした[1)~4)]．また，中継用の無線センサを用いることで長距離伝送する方法も開発している[3)]．

(2) 試験方法

図-2に示す線路下横断トンネル工事で使用する矩形鋼管（外寸：幅1000mm，高さ1000mm，長さ3000mm，部材厚25mm）3本をボルト接合し，長さ9000mmとした状態で均しコンクリート上に設置し，伝送試験を行った．

試験では，子機からの送信間隔を10秒/回として5分間（30回分）の測定を行い，デジタルデータ受信率と受信信号強度を測定した．ここで，デジタルデータ受信率とは，子機が30回送信したデータに対し，親機が正常に受信した回数の割合を示す．また，受信信号強度とは，親機が子機からのデータを受信したときの電波の強度を示し，その値が大きいほど外来のノイズに対して有利な条件となる．一般に目安としては，-80dBを下回らない位置に設置するのが望ましいとされる[3)]．

試験aでは，親機を鋼管端部に，2台の子機を鋼管接続部近傍に設置して鋼管壁面からの離れや高さおよびアンテナの種類を**図-3**のように変えた9ケースの試験を**表-1**に示すように行った．また，試験bでは，2台の子機を**図-4**に示すように試験aと同様に鋼管接続部近傍へ設置し，中継用無線センサおよび親機の位置を変えた4ケースの試験を**表-2**に示すように行った．

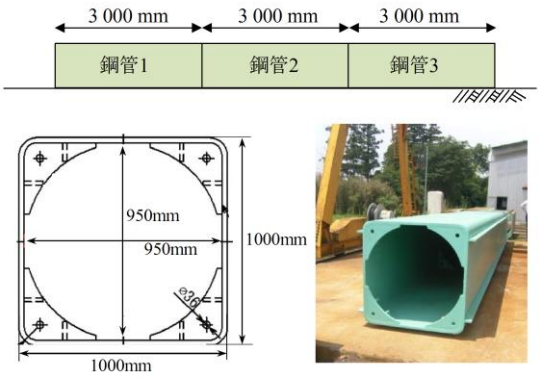

図-2 伝送試験で用いた矩形鋼管

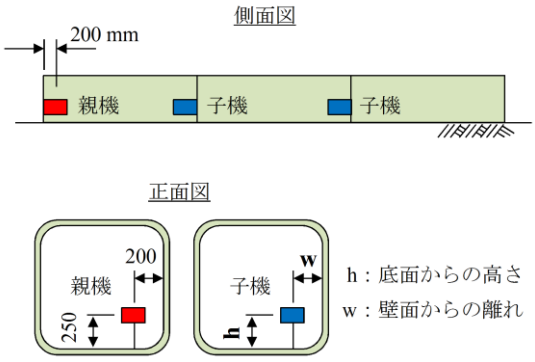

図-3 試験(a)，無線センサ設置位置

表-1 試験ケース 試験(a)

ケース	子機の位置		アンテナの種類
	底面から（：h）	壁面から（：a）	
A	100 mm	150 mm	チップアンテナ
B	250 mm	150 mm	〃
C	180 mm	100 mm	〃
D	180 mm	250 mm	〃
E	500 mm	250 mm	〃
F	500 mm	100 mm	〃
G	250 mm	150 mm	モノポールアンテナ
H	180 mm	250 mm	〃
I	0 mm	80 mm	チップアンテナ

表-2 試験ケース 試験(b)

ケース	子機の位置	アンテナの種類
	鋼管端部～中継機の距離（：L_1）	
J	10 000 mm	チップアンテナ
K	8 000 mm	〃
L	5 000 mm	〃
M	1 500 mm	〃

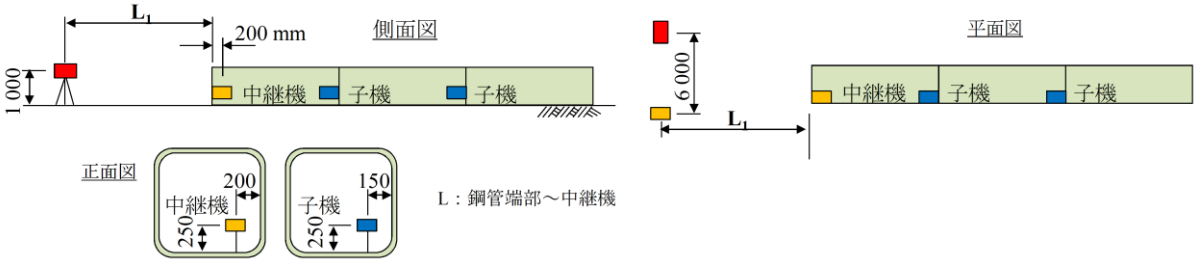

図-4　試験(b)，無線センサ設置位置

⑶ 試験結果

図-5に試験 a より得られた受信信号強度およびデジタルデータの受信率を示す．これより親機を鋼管端部へ設置した場合，受信信号強度は-42dB～-31dBの範囲であり，いずれのケースも計測を実施するのに十分な受信信号強度であることが把握できた．また，デジタルデータの受信率はケースDの83%が最低値である．中でもケースA, F，H，I は，デジタルデータの受信率が100%であり，受信信号強度に関しても良好な結果を得られた．このように鋼管内でも無線センサを用いて計測できることが示された．なお，チップアンテナとモノポールアンテナの違いによる受信信号強度に差異は見られなかった．続いて，図-6に試験 a と同様に試験 b においても受信信号強度およびデジタルデータの受信率を計測して得た結果を示す．これより，親機を鋼管の外に設置し，中継用無線センサ2台を用いて計測した場合，受信信号強度は試験 a の結果と比べ-72dB～-54dBと数値の低下がみられるが，デジタルデータの受信率はケースMの80%を最低値とした良好な結果が得られており，中継用無線センサを用いることで親機を離れた箇所へ設置した場合についても計測できることを示した．

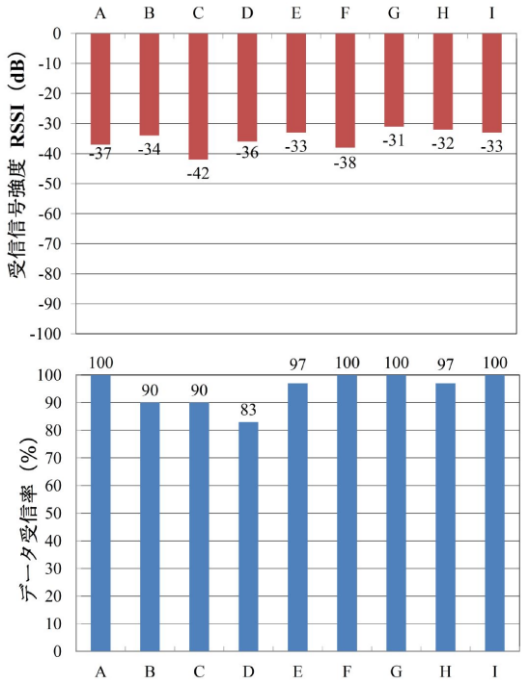

図-5　試験(a)，データ受信率および受信信号強度

⑷ 既往の伝送試験との比較

伝送距離と受信信号強度の関係について，河川敷および鉄道トンネルでこれまでに実施した伝送試験結果と今回の試験 a および b を加えた結果を図-7に示す．今回実施した鋼管内の伝送試験結果は，屋外やトンネルの場合と概ね合致することから狭隘な鋼管内での適用性が示されたと言える．次章では，以上の検討結果を考慮した上で，線路下横断構造物の実現場に開発したセンサを適用した一例を示す．

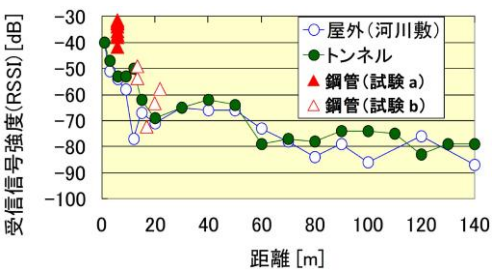

図-7　試験(a)，無線センサ設置位置

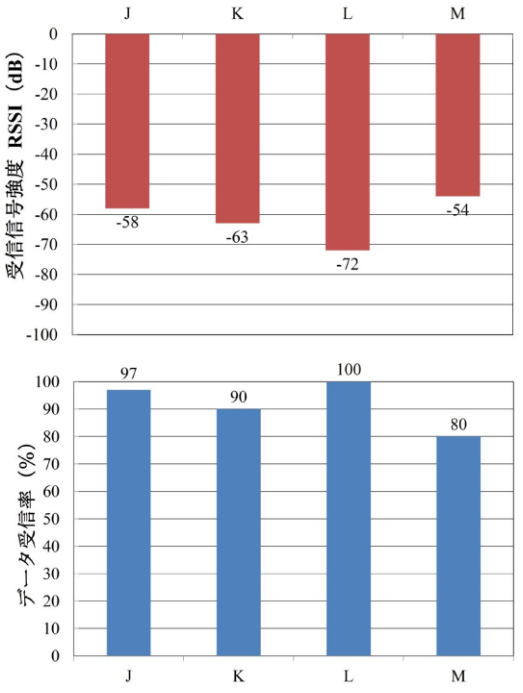

図-6　試験(b)，データ受信率および受信信号強度

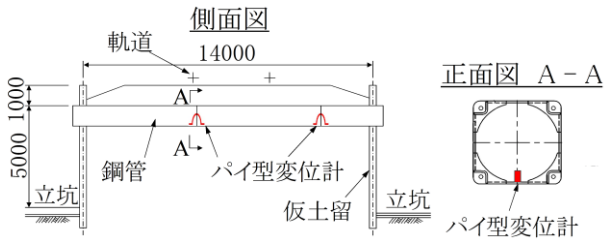

図-8　実現場における目開き計測位置図

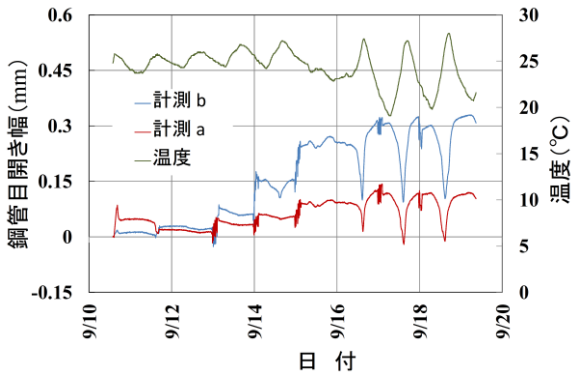

図-9　試験(a)，無線センサ設置位置

3. 線路下横断工事現場における計測

線路下横断構造物の施工においては，図-2に示した鋼管などを鉄道盛土や現地盤に打設して仮設防護を行った上で，ボックスカルバートを推進あるいはけん引し，アンダーパスの施工を行う．本報告では，図-8に国内のある実現場で打設された鋼管のボルト接続継ぎ目に，πゲージと呼ばれる目開き計を設置して，鋼管の変形を計測した事例を示す．なお，子機内には温度計を設置し，πゲージと同様のサンプリング周波数で計測を行った．また，現地試験計測で鋼管内に計測機器を設置するにあたり，鋼管内の人の往来に極力支障とならない配置を考慮し，子機内に収納できるチップアンテナを用い，壁面の近傍で足元に触れない位置とした．すなわち，鋼管内の子機および中継機を高さ250mm，壁面からの離れ150mm，チップアンテナの仕様として計測を行った．

図-9に計測結果の一例を示す．計測結果の全体的な傾向を見ると，日付が進むにつれ，目開き幅が拡大する傾向を示していることがわかる．これは，列車や鋼管周辺の地山から長期的に荷重を受けているためと考えられる．また，日変動の時系列では，鋼管内の温度の増減に伴って鋼材が収縮・膨張するため，目開き幅が増減していることがわかる．以上の計測結果から，本システムを用いて，力学的に解釈が可能な信頼性の高いデータが狭隘な空間の下で得られたことがわかる．4章では，ここで示した内容に加えて，実現場での汎用性を高めるべく，装置の小型化に取り組んだ検討例を示す．

図-10　親機一体型収録装置

4. 親機一体型収録装置の検討

今まで，データの収録装置として計測アプリを実行できるノートパソコンを用いていたが，鋼管内のような狭隘な空間に親機を設置する場合，データ収録装置を設置するスペースが確保できない可能性がある．また，鉄道トンネルにおいても，設置した計測機器などが建築限界に支障させないためには，開発したセンサシステムの中で最もサイズの大きい収録装置の小型化を図る必要があった．特に，計測に特化するならば，パソコンのディスプレイ，キーボード，光学ドライブなどの元々の仕様でサイズが大きいものは省略され，計測アプリを実行でき，かつデータが記録できるハードディスクのみを搭載した収録機が好ましい．また，電波の伝送状況の確認なども含めて，収録機はデータの受信装置も内蔵する必要がある．このような発想に基づいて，本研究では，子機または中継機からの計測データを受信する親機と，収録装置とを一体化させた，親機一体型収録装置を開発した（図-10）．本装置は，電池で駆動が可能なほか，データ収録装置についてもマイクロSDカードを採用することでさらなる小型化が図れた．なお，3章で示した実現場における計測においても，同一体型収録装置は実際に用いられ，計測機器設置の施工性や計測結果においても良好な結果を得ており，国内の山岳トンネルや都市トンネルを含めた他現場においても実施事例を着々と増やしている段階にある．

5. おわりに

本研究により，従来の手動計測や有線による計測データの取得方法から，無線を用いたセンサネットワークを構築することで，煩雑な配線手間を軽減し，低コストでメンテナンス頻度の少ない自動計測を可能とした．また，これまで適用実績の無かった線路下横断工事などで使用

される矩形鋼管のような鋼材で囲まれた狭隘な空間内での計測実験を行ったほか，実際の現場において安定した無線センサによる計測が可能であることが示せた．著者らが開発した同センサシステムは，本報告で示した線路下横断工法以外にも着々と適用事例を増やしてきている段階にあり，山岳トンネルや都市トンネルでの適用事例も含まれている．今後はさらに実現場での適用性を高めるための技術開発，並びに本センサで計測した種々の力学パラメータを施工・維持管理で活用する方法の開発を今後の課題として考えている．

参考文献

1) 津野究，蒲地秀矢，中西祐介，仲山貴司：無線センサを活用したトンネル監視システムの開発，トンネル工学報告集，Vol.19，pp.245-249，2009.2.
2) 津野究，平田亮，福司淳一，松本光矢，蒲地秀矢：トンネル変状監視システムの省電力化に関する検討，第67回土木学会年次学術講演会講演概要集，CS8，pp.33-34，2012.3.
3) 平田亮，津野究，角雄一郎，水落勝美，蒲地秀矢：中継用無線センサを用いた長距離計測データ伝送に関する検討，第67回土木学会年次学術講演会講演概要集，CS8，pp.35-36，2012.4.
4) 津野究，平田亮：無線センサネットワークを活用したトンネル変状監視手法の開発，鉄道総研報告，Vol.27，No.6，2013.

APPLYCATIONS OF WIRELESS SENSORS FOR MONITORING OF THE DEFORMATIONS OF UNDERGROUND CONSTRUCTIONS

Tomoya NAKAMURA, Kiwamu TSUNO,
Yota TOGASHI, Hideya KAMACHI and Yusuke OOKI

Underground structures (e.g., tunnel) can be very stable for a long period because the environment around the structures are almost stable. However, in some cases, the deformations and cracks of the lining concretes due to external forces are reported. Although these problems were previously investigated by the visual observation, it was very costly and time consuming. In this study, in order to solve these problems, a low cost wireless monitoring system is developed for the investigation of underground structures. In this report, the outline of the method is explained and some studies included field measurements are introduced.