

トンネル内無線センサネットワークの性能評価

構造物技術研究部 基礎・土構造研究室
研究員 阿部 慶太

1. はじめに

列車が走る線路は、橋梁、高架橋、トンネル、盛土、擁壁など多くの土木構造物によって支えられている。これらの鉄道土木構造物（以下、鉄道構造物）は、長い年月を経た古い構造物が多く、材料の劣化や周辺の外力・環境の変化により、ひび割れや傾斜などの変状が多く見られるようになってきている。このような背景を鑑み、鉄道総研では、国土交通省監修の下「鉄道構造物等維持管理標準・同解説¹⁾」（以下、維持管理標準）を刊行し鉄道構造物の維持管理の体系化を図っている。図1に維持管理標準に示される標準的な維持管理の手順を示す。維持管理は大きく、全般検査、個別検査および措置により行われる。全般検査で概略的な調査を行い健全度に問題がある構造物のスクリーニングを行い、個別検査では、詳細な調査を行い変状の推定・予測を含めた健全度の判定を行う。措置では、個別検査の判定結果を下に監視、補修・補強、使用制限および改築・取替のいずれかを選択する。一方で、これらの手順を的確に行うためには、調査、監視、補修・補強に関する検査ツール、措置対策ツールの開発が必要不可欠であり、情報技術や非破壊検査技術など、一般的な土木技術に囚われない幅広い分野で研究開発が求められている。特にトンネルでは、変状が長期的に進行する 경우가多く監視ツールの開発が重要である。しかしながら、浮き・ひび割れ測定、内空計測などの監視項目に対し、電源の確保が難しい、監視範囲が広い、計測器やケーブルの設置箇所が限られるなどツール開発上の制約が多い。本報告は、この点を考慮し、大きな設備やケーブルを必要としない無線センサネットワークシステムを活用した鉄道トンネルの劣化監視技術の構築を目的としたものである。地下鉄トンネルに導入した無線センサネットワークシステムの設備の状態監視に向けた適用性ととも、トンネル内で形成されたネットワーク構成とデータ損失量の変化から得られた、当システムの通信特性と性能評価について報告する。

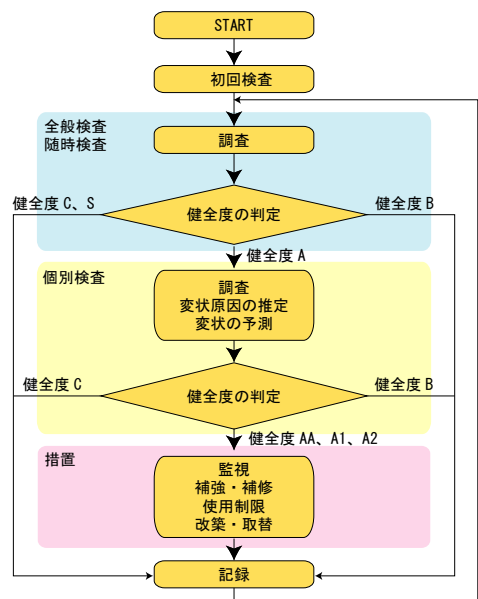


図1 鉄道構造物の維持管理の手順¹⁾

2. 無線センサネットワークシステムの概要^{2,3)}

本検討で導入した無線センサネットワークシステムの設置箇所を図2に示す。設置箇所は、英国のロンドン地下鉄ジュビリー線ボンドストリート駅・ベイカーストリート駅間(以下、箇所①)、チェコ共和国のプラハ地下鉄C線ホルソビス駅・ヴルトゥボフスカ駅間(以下、箇所②)の二箇所である。箇所①は1979年開業の比較的新しい路線であるが、他の路線との交差箇所であるため地中深くトンネルが建設されており、周辺地盤より大きい土圧を受けトンネル外壁に変状が発生

している。箇所②は1974年開業で、箇所①同様比較的新しい路線であるが2002年のヨーロッパ水害時に浸水被害を受け、トンネル外壁などに変状が見られる箇所である。

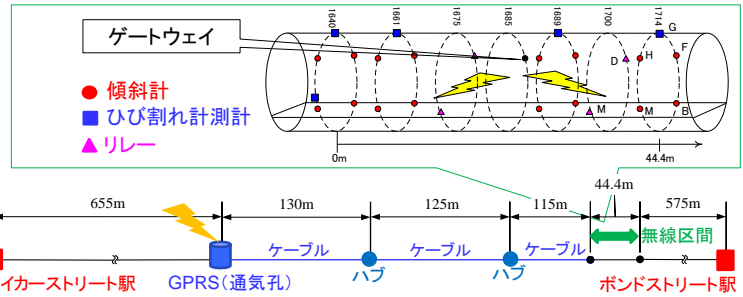
図3に各箇所のシステム構成を示す。センサ（傾斜計、ひび割れ計測計）、リレー、ゲートウェイと、データを携帯電話網に送信するGPRSからなる。センサからのデータはリレーを通してゲートウェイに集められた後、携帯電話の電波を通して英国ケンブリッジ大学に設置されたパソコンに送られ、セグメント（トンネルの外壁となるブロック）の傾斜角とひび割れ幅について常時モニタリングされる。

図3に示すように箇所①では、無線区間は約44mであり、無線区間から365m離れた携帯電話の電波が受信可能な通気孔近傍に設置したGPRSまで有線でデータ伝送する。一方、箇所②では270m離れた携帯電話の電波を受信可能なホルソビス駅近傍まで複数のセンサとリレーを経由したマルチホップ伝送を一部用いてGPRSまでデータ伝送する。なお、箇所①では計25個（傾斜計：16個、ひび割れ計測計：5個、リレー：4個）、箇所②では計28個（傾斜計：10個、ひび割れ計測計：2個、リレー：16個）のセンサとリレーを取り付け、データ伝送間隔を両者とも3分とした。

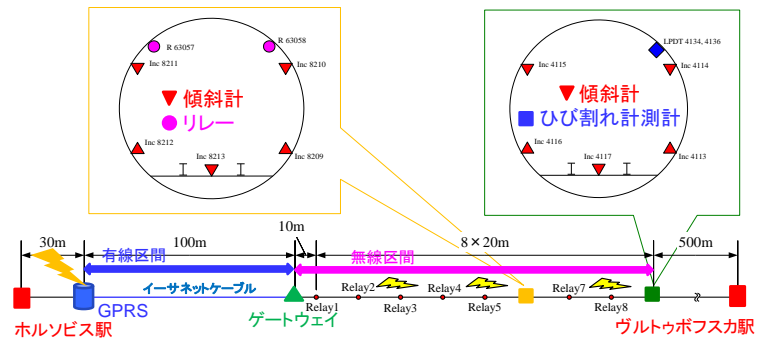
図4に本システムに用いたハードウェア（センサ・リレー）の写真を示す。センサおよびリレーの基本構成にはクロスボー社製のMOTEを用いた。無線端末に周波数帯を2.4GHzとしたMicaz、プロトコルにXMeshを用い、ネットワーク形成、マルチホップ機能、通信経路自己修復機能を装備させた。また、ネットワーク構成とデータ損失量を確認できるように、ネットワークおよびデータ送受信に関する情報を受信できるようにした。センサのインターフェイスには、低コスト・省電力を考慮しMEMS（微小電気機械素子）技術による半導体型の傾斜計と、ひび割れ計測計を取り



図2 無線センサネットワークシステムの設置箇所（路線図はロンドン地下鉄、プラハ地下鉄ホームページより引用）



a) ジュビリー線ボンドストリート～ベイカーストリート（箇所①）



b) C線ホルソビス～ヴルトウボフスカ（箇所②）

図3 無線センサネットワークシステムの構成

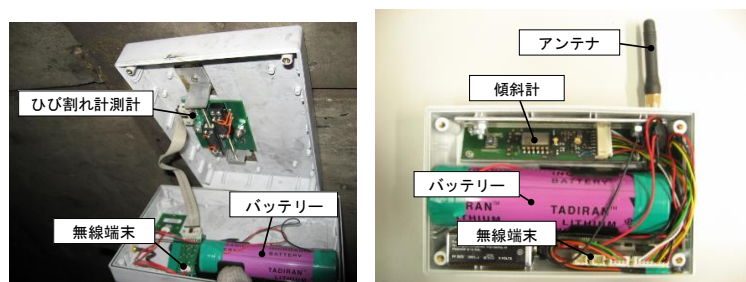


図4 ハードウェア（センサ・リレー）

付けた。ゲートウェイにはクロスボー社製 MIB600 を使い、アンテナには無線区間の大きさを考慮し、箇所①では 2dBi、箇所②には 5dBi のものを、バッテリーにはタディラン社製リチウム電池（公称電圧：3.6V）を用いた。有線区間はイーサネットケーブルと複数のハブにより構成し、GPRS にケーブルを USB 接続した。なお、これらの機器は、実際、トンネル内での耐久性が良くなく、システムの弱点箇所の一つとなった。今後改善が必要であると考えている。

図 5 に箇所①でのトンネル変形に関する常時モニタリング結果（無線区間の左端より 44.4m 離れたトンネル断面）の一例を示す。傾斜計の結果よりトンネルが縦方向に圧縮される長期的な変形挙動を計測することができた。なお、一バッテリーにより最大約 6 ヶ月間連続してモニタリング可能であることを確認している。

3. トンネル内で形成されたネットワーク構成とデータ損失量の変化^{2,3)}

図 6 に受信データより作成したネットワーク構成を示す。図中の実線は各センサ、リレー間で比較的頻度が高い経路である。箇所①では無線区間が狭いため、センサとリレーからゲートウェイに直結している経路が多い。一方、箇所②では無線区間が広い

ため、複数個のセンサとリレーを経由したマルチホップ伝送によりゲートウェイまでデータが送られる傾向がある。ここで、データ損失率は式(1)により求められる。

$$\text{データ損失率 (\%)} = (E_i - N_i) \times 100 / E_i \quad \text{式(1)}$$

E_i はセンサまたはリレー i でのデータ量の期待値（= 計測時間 / 伝送間隔）、 N_i はセンサまたはリレー i で実際に送信したデータ量である。図 7 に、営業時間帯と非営業時間帯における、あるセンサ・リレーでのデータ損失率の時刻歴を示す。なお、全センサ・リレーにおいても同様な傾向が得られている。箇所①、②ともに営業時間帯の方が非営業時間帯に比べデータ損失率が大きくその差は約 15% であることが分かる。これは、営業時間帯での列車通過がデータ損失率に影響したものと考えられる。また、箇所①、②のデータ損失率は営業時間帯でそれぞれ 20~25%、25~35% であり、箇所②のデータ損失率の方が大きいことが分かる。

図 8 は、各箇所でのデータ損失率とマルチホップ伝送におけるホップ数の関係（営業時間帯・非営業時間帯）を示したものである。最大ホップ数について、箇所①では 2 であるが、箇所②で

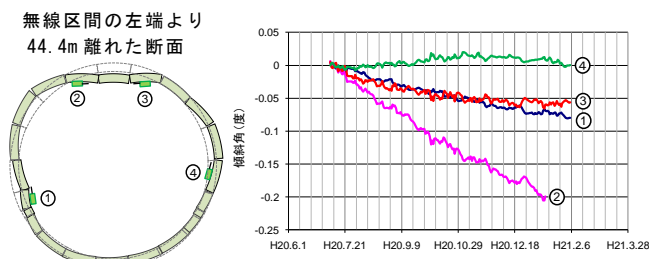
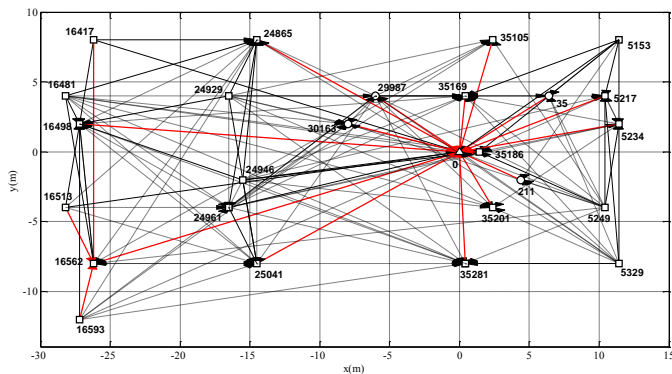
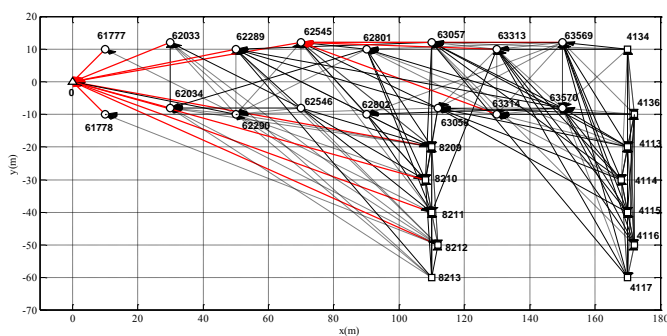


図 5 モニタリング結果例（変形図は強調表示したもの）



a) 箇所①のネットワーク構成



b) 箇所②のネットワーク構成

図 6 ネットワーク構成（□：センサ，○：リレー，△：ゲートウェイ，赤太実線：比率 50%以上の経路，細実線：比率 10~50%の経路，細点線：比率 10%以下の経路）

は3でありマルチホップ伝送が多いことが分かる。また、ホップ数が多くなるほどデータ損失率が大きくなる傾向がある。このことから、箇所②ではマルチホップ伝送がデータ損失量に影響し、箇所②においてデータ損失率が大きくなることに影響したものと考えられる。

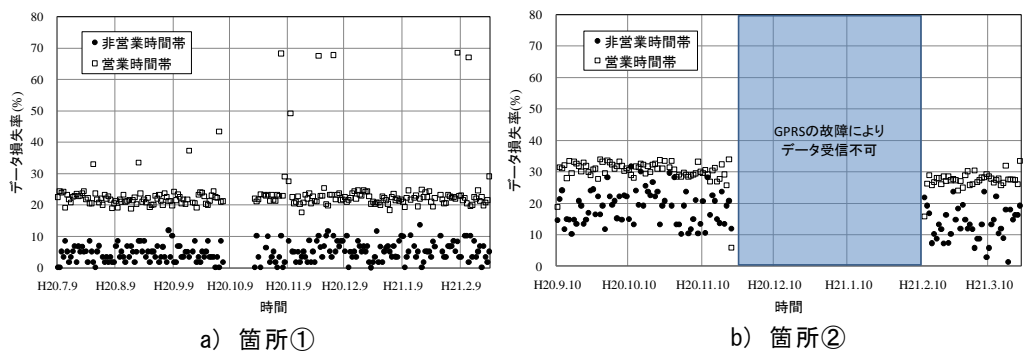


図7 センサ・リレーにおけるデータ損失率の時刻歴

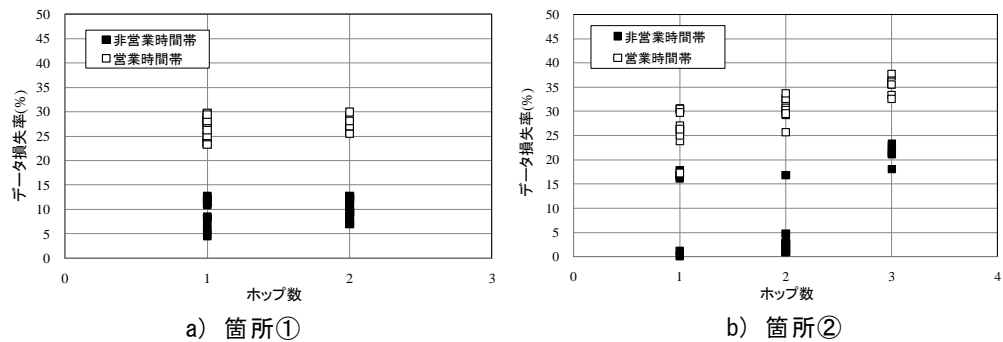


図8 データ損失率とホップ数の関係

なお、前述したように、トンネルの長期的な変形挙動を把握できたことを考慮すると、この程度のデータ損失率では、地下鉄トンネルの常時モニタリングを目的とする上で大きな支障がない可能性が考えられる。一方で、ホップ数や伝送間隔を制御することで、ある程度のデータ損失を許容した、より効率的な無線データ伝送が可能になることも考えられる。今後、無線センサネットワークによるモニタリングの実用化に向けた検討課題の一つと考えられる。

4. おわりに

地下鉄トンネルおよび沿線に無線センサネットワークシステムを導入し、トンネル内で形成されたネットワーク構成とデータ損失量の変化から通信特性と性能の評価を行った。今後、無線センサネットワークによるモニタリングの実用化に向けた知見として活用していく予定である。

謝辞：本研究は、英国ケンブリッジ大学との共同研究「ワイヤレスセンサネットワーク等による土木構造物等の状態監視システムの構築に関する研究」の成果として得られたものです。ケンブリッジ大学曾我健一教授はじめ関係者の皆様に、感謝の意を申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）トンネル，2007，1，丸善。
- 2) Keita Abe, Yusuke Kobayashi, Chikara Hirai, Kenichi Soga, Ian J. Wassell： “Wireless Sensor Networks for Underground Railway Applications and Its Network Topology and Performance,” Proceedings of the 5th World Conference on Structural Control and Monitoring (5WCSCM), 12-14 July, 2010, Tokyo, Japan.
- 3) Bennett, P.J., Soga, K., Wassell, I.J., Fidler, P., Abe, K., Kobayashi, Y. and Vanicek, M.： “Wireless Sensor Networks for Underground Railway Applications: Case studies in Prague and London,” Smart Structures and Systems, Vol. 6, No. 5-6, pp. 619-639, 2010.