

土木 省メンテナンス技術 (次世代検査技術)

小林 裕介

財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部

1. はじめに

鉄道構造物は他の社会基盤と比べて老朽化が著しく、例えば鋼橋については、半数以上の橋梁の供用年数が設計耐用年数である60年を超えている。人口減少や高速道路無料化等の近年の社会情勢を鑑みると、鉄道構造物についてはこれらを更新し続けることは極めて困難であり、ストック型社会に見られるように、現状の資産をより長期にわたって供用し続ける必要があり、このための効率化・省力化した維持管理手法が求められている。

鉄道総合技術研究所では、このような維持管理に向けた鉄道構造物モニタリングシステムの開発を行っている。このシステムは二つの大きな特徴を有している。一つは、トンネルや橋梁を個別に管理するのではなく、鉄道構造物を統合して監視することを目指していることである。

もう一つは、条件に応じたメニューを用意していることである。例えば列車本数の多い線区では、列車荷重の繰返しによる構造物の性能の低下程度を監視し、効果的な補修・補強のタイミングを模索する高価なモニタリング手法があるのに対し、列車本数の少ない線区では、地震などの突発的な外力による異常のみを安価なシステムで検知し、列車の走行安全性を確保するモニタリング手法もある。構造物の立地環境、維持管理費の大小などによって、適用できる、もしくは必要となるモニタリングの形態は多岐にわたり、これに見合った使用センサ、データ伝送手段を取捨選択可能なのが特徴である。

本稿では、現在開発を進めているモニタリングシステムのセンサ、およびデータ伝送手段のメニューを紹介するとともに、鋼橋を対象とした疲労き裂検知システムの開発状況を紹介する。

2. センサについて

2.1 異常時を対象としたセンサ

ここでは、主に地震などの突発的な外力が作用した場合の構造物の健全性を把握するためのセンサについて一部を紹介する。

ORC高架橋柱の損傷レベル検知(ピークセンサ)¹⁾

RCラーメン高架橋柱の損傷レベルをピークセンサにより検知するものである。地震時に柱端部に発生する最大応答部材角をセンサ自身が記憶することにより、柱の損傷レベルを地震後でも把握することができる(図1)。目視では損傷レベルを判断することが困難な鋼板巻き補強された箇所などに有効なセンサである。また、最大応答部材角は機械的に記憶されるため、常時電力が不要という特徴もある。

○基礎の損傷検知センサ

通電カプセルやひずみゲージを利用し、地震時に橋台躯体基部・杭基礎の上端に生じる大変形を検知することを目的としている。通電カプセルとは、カプセル内にある内管に電解質溶液を充填しておき、大きな変形が生じた場合にこの内管が破損し、電解質溶液が漏れたことに

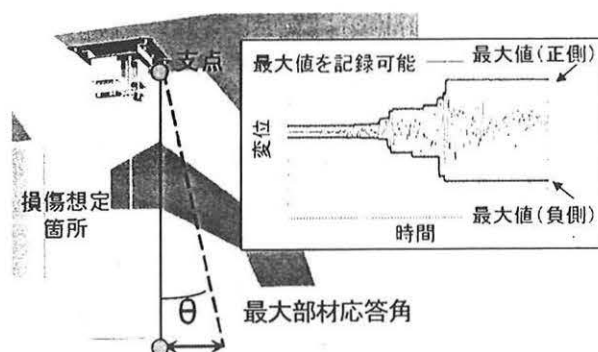


図1 ピークセンサによる異常検知

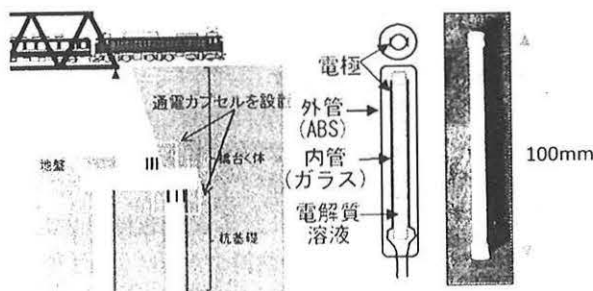


図2 通電カプセルによる異常検知

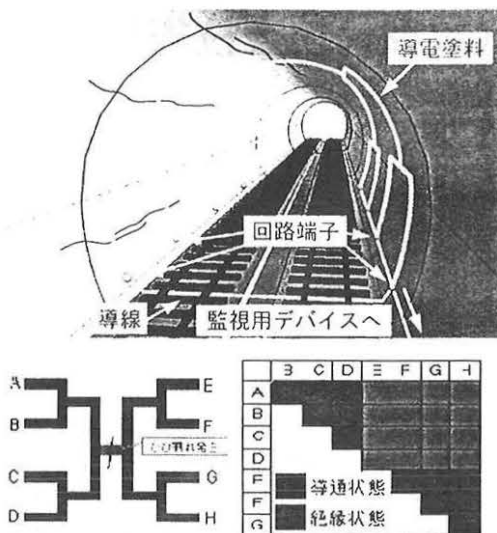


図3 導電塗料によるき裂検知

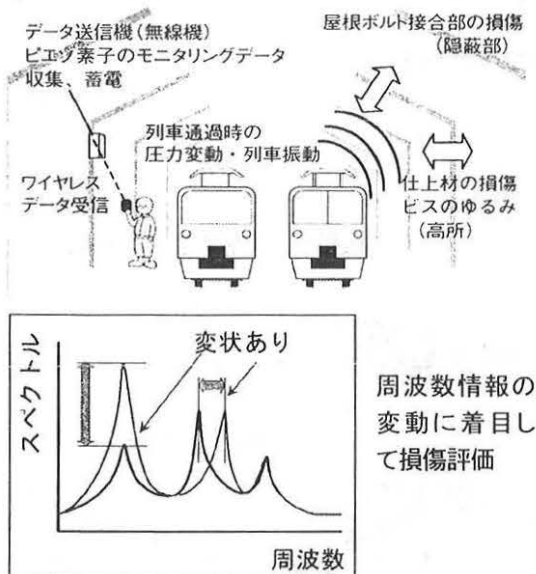


図4 ピエゾ素子による損傷検知

による通電情報を検知し、構造物の大変形の有無を確認するセンサである(図2)。ひずみゲージについては、後述するRF-IDタグと組み合わせたことにより、無電源にてセンシングが可能という特徴を有している。

2. 2 常時を対象としたセンサ

ここでは、常時の構造物の性能低下もしくは劣化について監視するためのセンサを一部紹介する。

○導電性表面材料によるき裂検知³⁾

トンネルの覆工や鋼橋の部材において導電性の塗料を細線状に塗布し、覆工や鋼桁の塗料がき裂によって断線させられたことを、通電情報により把握し、き裂の発生を検知する。

トンネルの覆工に対しては、トーナメント状に塗料を塗布することによって、き裂の発生のみならずその発生

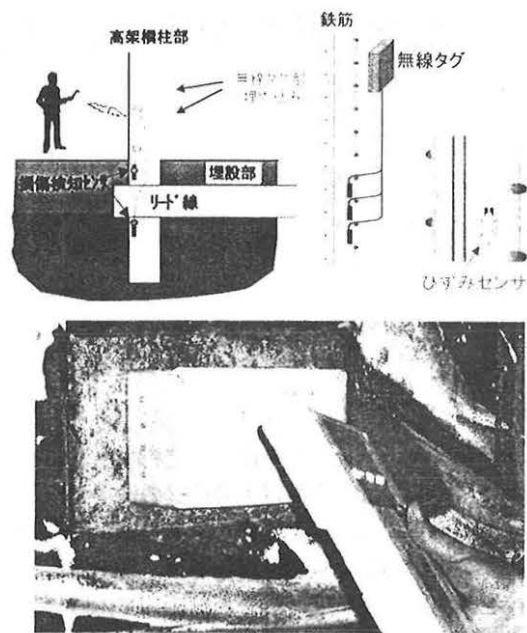


図5 RF-IDによる鉄筋のひずみ測定

位置についても同定することが可能である(図3)。また、鋼桁については、ある程度の面状に塗布することによって疲労き裂の進展長さについても検知することが可能である³⁾。

○ピエゾ素子による損傷検知⁴⁾

ピエゾ素子はひずみが加わると電圧を生じる。この特性を利用すると、センサに対しては電力を供給することなく、被測定物のひずみ等を測定することができる。ここでは、駅などの屋根材や意匠材の列車風圧による振動をピエゾ素子により測定し、その振動特性の変化からそれら材料に生じる損傷を検知する(図4)。

3. データ伝送について

3. 1 携帯端末を利用する方法¹⁾

本システムではRF-IDタグを利用している。身近なRF-IDタグとしてはICカード(SUICA等)が挙げられ、このICカードを改札機にかざすことにより、非接触にてICカードの情報が読み取られる。これとは逆に、センサを有するICカードを構造物に埋め込み、携帯可能なリーダー(改札機に相当)をICカードにかざすことによりセンサの情報を読み取るものである(図5)。これにより、センサが常時電源供給を受ける必要がなく、安価にシステムを構成できる。

実際の運用では、普段の点検作業時に検査員がリーダーを携帯してデータを収集したり、地震などの震災後に検査員がデータを収集することなどが考えられるが、このときに、従来は目視の範囲でしか情報が得られなかったのが、地中の構造物などの状態を簡易にかつ定量的に把握できる利点がある。

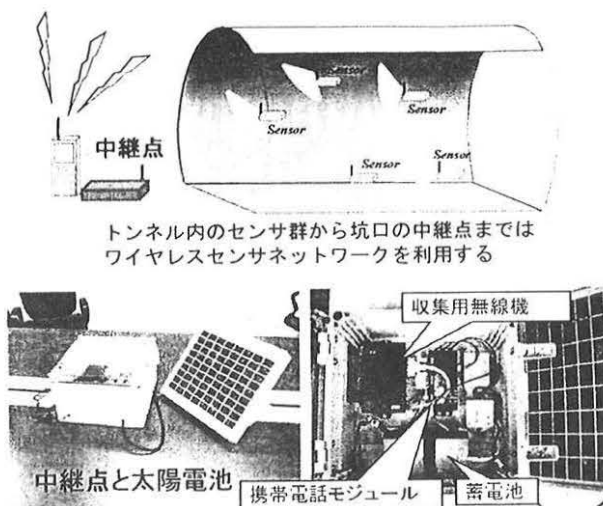


図6 中継点を介した自動伝送

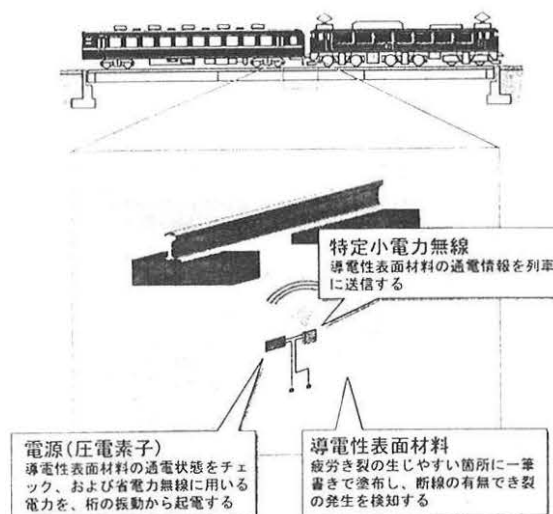


図7 中継点を介した自動伝送

3. 2 中継点を介した自動伝送

構造物に対するモニタリングの場合、構造物の大きさからセンサが散在しているケースが多い。これら個々のセンサから測定データをどのように集約するかが、システムの構成上重要となる。ここではその一つの方法として、個々のセンサからまず中継点にデータを集約し、その中でリアルタイムに必要な情報については、携帯電話等を利用して基地局に伝送される方法を開発している。なお、中継点に関してはソーラーパネルを用いることにより、商用電源を必要としないシステムとしている(図6)。

個々のセンサから中継点については、省電力な無線であるワイヤレスセンサネットワークを利用する。これによって配線が不要であり、また構成されたメッシュネットワークにより冗長性の高いシステムとすることができる⁵⁾。

3. 3 列車によるデータ収集

鉄道構造物の大きな利点は、構造物上をその管理者である事業者の列車が毎日頻繁に通過し、ある地点まで必ず運行されていることにある。つまり、緊急性を要しないモニタリングデータであれば、列車によって収集し基地局まで運ぶといった手法を選択することができる。これにより、構造物から基地局までの通信などに要していた費用を削減することができる。

今回のシステムでは、車上収集の方法として特定小電力無線を使用することを考えている。特定小電力無線は簡易である反面、通信距離や通信頻度に制限があるため、どの程度離れたセンサから、どの程度の速さの列車であれば、車上でデータを受信可能かといったことについても検討を行っている⁶⁾。

4. 鋼橋を対象とした疲労き裂検知システム

鋼橋における疲労き裂発生を検知を目的としたシステ

ムの概要を図7に示す。本システムでは、疲労き裂の生じやすい箇所に、前述の導電性表面材料を細線状に一筆書きで塗布し、断線(通電状態ではなくなる)によって疲労き裂の発生を検知する。き裂の有無の情報は特定小電力無線により列車に送信し、列車にて情報を収集する。

本システムにおける最大の特徴は、導電性表面材料の通電状態のチェック、および無線に使用する電力を、圧電素子によって列車通過時の桁の振動から発電することにある。これにより、商用電源が不要であることに加えて、センシング・データ送信・列車通過が必然と同タイミングになり、列車の通過を検知するための機能等を必要としないシンプルなシステムとすることができる。

以降、鋼桁における無線通信および圧電素子を用いた発電について記載する。導電性表面材料については、文献3), 7)を参照されたい。

4. 1 鋼桁における無線通信の検討

鋼橋では橋梁部材に設置された送信器からの無線を鋼板が遮る可能性がある。また、高圧の架線や列車に搭載されているインバーターもしくは無線機などが、使用する無線の障害となる可能性がある。そこで、研究所内の試験線に架設されている橋梁において、無線の送受信試験を実施した。試験に利用した橋梁の概要と、アンテナを設置した箇所と向きを図8に示す。

今回使用した特定小電力無線の送信出力は1mWであり、ARIB-STD67に準拠したものである。送信データは16bitのID番号と1bitの検知情報(き裂のあり/なし)である。試験は、アンテナの設置箇所および向きごとに、受信機的位置を橋梁から離していくことによって行った。

結果グラフにおける理想受信レベルとはデータの送信を一回しか行わない場合に必要とされる受信レベルを、可能受信レベルとはデータの送信を複数回行なうのであれば、そのうち少なくとも一回は受信が可能であるレベ

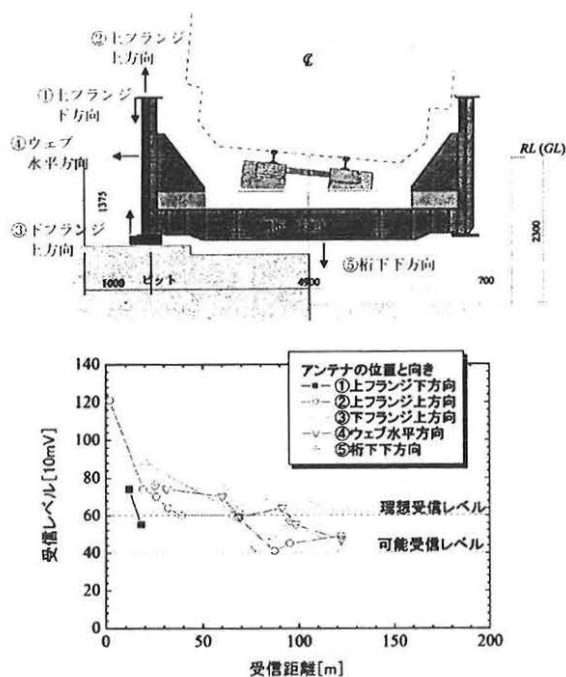


図8 鋼桁内からの送信

ルを表わす。

結果より、いずれの位置にアンテナを設置した場合でも、桁から離れた位置で受信可能であり、鋼桁が無線の障害にはなっていないことが分かる。

4. 2 鋼桁における圧電素子による発電

圧電素子はひずみを加えると電荷を発生する。本システムでは整流回路（ブリッジ）を通してコンデンサで蓄えた後に、無線送信に利用する。今回のシステムでは、圧電素子を鋼桁に直接貼り付けるのではなく、鋼桁の振動を機械的な振り子により増幅し、最終的には球体が高周波で圧電素子を叩く機構を考案している。

この機構を実橋梁の鋼桁ウェブに設置したときの、鋼桁の振動加速度および発電電圧（コンデンサでの両端電圧）を図9に示す。なお、本試験では4.1で試験した無線機も接続して試験している。試験条件としては、レール継目直下での試験であるため、振動加速度としては一般的な箇所よりも大きいものとなっている。

結果では、列車が通過し始めて2秒程度で1回目の無線送信を行っており、その後も1列車が通過する間に合計4回の無線送信が行われている。このことから、鋼桁の振動から圧電素子を利用して発電し、無線送信までが行えていることが分かる。今後は、橋梁の構造形式、利用する部材、列車の通過速度などを変えて、発電性能についてさらに検討を実施していく予定である。

5. まとめ

本稿では、鉄道総合技術研究所で開発を行っている鉄

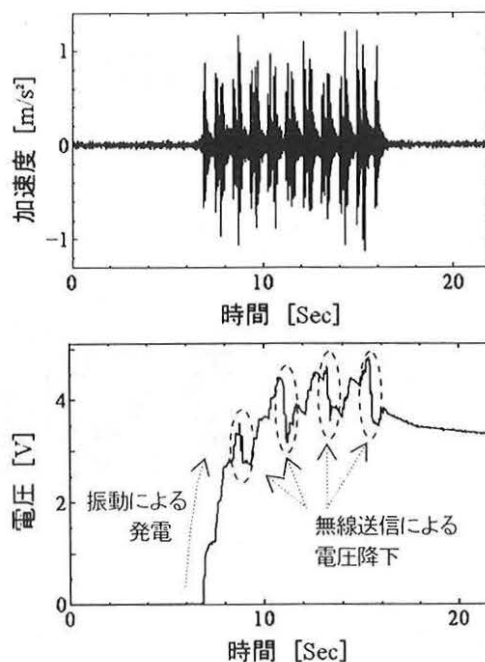


図9 鋼桁の振動加速度と発電電圧

道構造物を統合して監視することのできるモニタリングシステムの概要として、使用センサおよびデータ伝送方法をいくつか紹介した。また、その中でも鋼桁を対象とした疲労き裂検知システムの特小電力無線および圧電素子を利用した発電機構についての検討を紹介した。今後も、本稿で紹介したシステムも含めて、より利便性が良く、様々な条件において取捨選択することが可能なオプションをもつシステムを開発していく予定である。

文 献

- 1) 仁平達也ほか：鉄道構造物におけるヘルスモニタリングシステムの開発，検査技術，Vol. 12 No. 11，pp. 15-21，2007. 11.
- 2) 小西真治ほか：導電塗料を用いたひび割れ検知システムの研究，トンネル工学研究論文・報告集第12巻，pp. 437-440，2002. 11.
- 3) 小林裕介：鋼鉄道橋におけるモニタリングの試み，非破壊検査，Vol. 56，No. 3，pp. 129-133，2007.
- 4) 山田聖治ほか：鉄道建築物における損傷モニタリングシステムの開発その3 環境要因を考慮した損傷検知，本建築学会大会（東北）学術講演梗概集，B-2，pp. 691-692，2009. 8.
- 5) 小林裕介，平井力：センサネットワークで構造物を監視する，RRR，Vol. 66 No. 11，pp. 2-5，2009. 11.
- 6) 佐藤紀生ほか：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，第22巻 第6号，pp. 35-40，2008. 6.
- 7) 坂本達朗ほか：き裂検知可能な導電性表面材料の開発，土木学会第61回年次学術講演会概要集，pp. 769-770，2006.