

# 土木構造物センサデータ収集システムの開発

佐藤 紀生\* 仁平 達也\*\* 磯野 純治# 仲山 貴司## 渡辺 義大\*

## Development of a Sensor Data Collecting System for Health Monitoring of Railway Structures

Norio SATO Tatsuya NIHEI Junji ISONO Takashi NAKAYAMA Yoshihiro WATANABE

We have developed a sensor data collecting system for health monitoring of railway structures such as viaduct and tunnel. In this system, we can select an appropriate way to collect data depending on deformation of structure: by RF-ID tag or low-power radio. This system deals with damage of RC frame, damage of foundation structure, and crack of tunnel. The collected data can be easily referred to and analyzed with PC of the management district. By using this system, the inspection work of the railway structures can be streamlined and the inspection precision can be improved.

キーワード：土木構造物，ヘルスマonitoring，センサ，RFID タグ，省電力無線

### 1. はじめに

列車走行の安全を確保するために、鉄道構造物の維持管理は多くの保守要員と時間をかけて行われている。その検査周期は、2年に1度の全般検査及び必要に応じて実施される詳細な個別検査等と決められている。全般検査は検査担当者の目視検査が主となっており、その検査精度は担当者の経験や知識により差が生じているのが現状である。そのため鉄道総研では、鉄道構造物の検査業務に関する支援及び検査・診断精度の向上を目的として、土木構造物センサデータ収集システムを開発している。このシステムでは高架橋、トンネル等土木構造物のヘルスマonitoringを目的として、監視するセンサやそれが監視する変状に応じてRFIDタグ又は省電力無線機を使い分けて、センサデータを収集することができる。

本稿では、開発したセンサデータ収集システムの特徴及び土木構造物への適用例について述べる。

### 2. センサデータ収集システムの特徴

センサネットワークによる構造物ヘルスマonitoringのシステム

- \* 輸送情報技術研究部（設備システム）
- \*\* 構造物技術研究部（コンクリート構造）
- # 構造物技術研究部（基礎・土構造）
- ## 構造物技術研究部（トンネル）

の試みは、これまでもされており<sup>1), 2)</sup>、その重要性和システム化による効果に関する期待は非常に大きなものである。今回開発したシステムでは、センサデータの収集方式として、図1に示すシステムイメージのように、RFIDタグリーダと携帯端末（PDA）によるデータ収集方式及び省電力無線（ZigBee無線）と携帯電話網を利用した無線伝送によるデータ収集方式の2方式を使い分けることができる。

#### 2.1 RFIDタグによるセンサデータ収集

使用するRFIDタグは電源の不要なパッシブタグとし、測定時に必要な電力は、タグリーダからの電磁誘導方式により供給する。また、使用する周波数帯は、水や金属

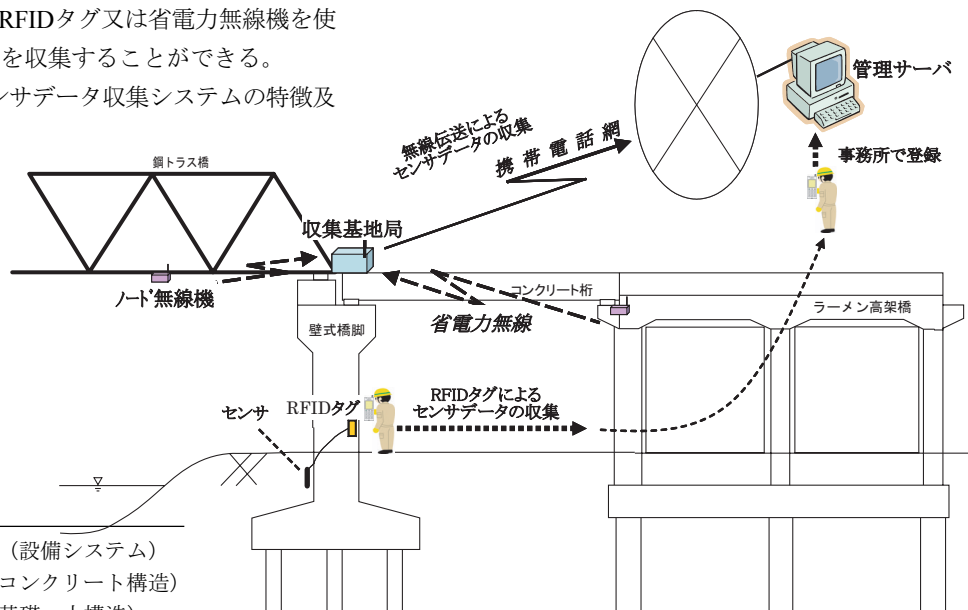


図1 システムイメージ

特集：輸送情報技術



図2 損傷検知センサ



図3 RFID タグリーダ及びPDA

が近くに存在しても比較的影響を受け難い125KHz帯の周波数を採用している。図2に損傷検知センサの例を示す。3個の歪みゲージとRFIDタグをリード線で接続した構成となっている。また、図3に使用するRFIDタグリーダ及びPDAの外観を示す。タグリーダとPDAはRS-232Cケーブルで接続され、タグリーダから供給する電力により、3箇所の歪みゲージの測定値をPDAに取り込むことができる。

2.2 無線伝送によるセンサデータ収集

橋梁、高架橋等の設置環境を考慮すると、一般の商用電源を対象とする無線機では省電力であることが前提となる。表1に検討の対象とした無線機の種類と仕様を示す。これらの無線機を対象として、性能比較試験を行った。試験項目としては、基本伝搬性能試験及び鉄道高架橋における無線通信試験を行った。図4に基本性能試験でのスループット試験結果を示す。

この試験結果では、ZigBee無線は全般的に優れている結果が得られた。伝送上の問題として、鉄道沿線で一般的に使用されている無線LANとの干渉が考えられるが、

表1 省電力無線機の仕様

無線機種類	周波数帯	伝送距離 (m)	伝送速度 (kbps)	消費電力 (mW)
ZigBee無線	2.4 GHz	30	250.0	60
特定小電力無線	429 MHz	30～300	2.4	59
微弱無線	315 MHz	30～200	2.0	66

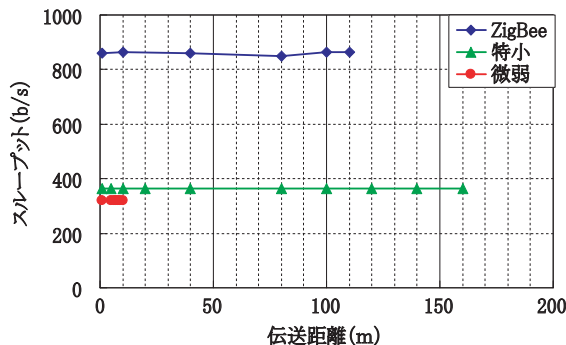


図4 スループット試験結果

受信C/Nを10dB程度確保すれば無線LANによる影響は生じないことが確認できた。干渉を避ける別の方法として、無線LANで使用されていないチャンネルを使用することも考えられる。またZigBee無線によるデータ伝送はデータ送信が終わるとスリープモードになるため、無線LANに与える影響は無視できる。そして無線によるデータ

伝送時間は短いため、無線LANの空いている時間帯にすばやく伝送できる。橋脚～高架上への伝送を直接行うことができない場所の場合は、マルチホップにより伝送を行うことができる。これらのことからスループットが高く、伝送距離も100m程度は確保できるZigBee無線を採用することとした。図5にラーメン高架橋の損傷レベル検知用ノード無線機、図6にπ型変位計用ノード無線機の例を示す。ノード無線機は電池駆動により定期的にセンサから測定データを取込み、図7に示す収集基地局へデータを伝送する。収集基地局は太陽電池あるいは100V商用電源で稼働し、各ノード無線機から伝送されたセンサデータが一定の量になるまで蓄積するか、または一定の周期で一括して携帯電話網により管理区内のデータベースサーバへ無線伝送する。



図5 損傷レベル検知用ノード無線機



図6 π型変位計用ノード無線機

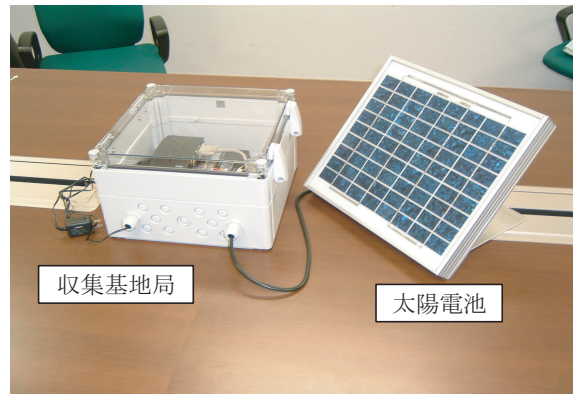


図7 収集基地局

2.3 収集基地局のインテリジェント化

無線伝送システムで一番の問題点は、電源の確保と、スループットである。開発したシステムでは、省電力無

線機を使い、更に測定及び伝送時間以外は待機状態とすることによる消費電力の削減を行っている。これに加えて、伝送容量を極力抑えるために、送信データの圧縮及び測定値が前回の測定値と同様であれば測定データの送信を省くことにより、伝送容量の削減を図っている。また、異常時の緊急情報として、測定データが一定の閾値を超えた場合、あるいは前回との変化値が一定の閾値を超えた場合に、定期的なデータ伝送によらず、すぐにデータ伝送を行うこととしている。端末無線機のバッテリー電圧も常時監視しており、使用不可能になる前に警告を発することができる。

## 2.4 収集データの参照

収集したデータは管理サーバへ登録され、管理区のPCから随時参照することになる。その主な機能としては、①データ参照、②データ登録、③マスタメンテナンス、④データ分析の4つの機能がある。

### (1) データ参照機能

収集したセンサデータの参照及び、センサを設置している構造物の諸元の参照が可能である。図8に示すように構造物の配置略図からの検索と検索条件によるデータベース検索の2つの方法で、センサデータ及び構造物の諸元、写真、図面等の参照が可能となっている(図9)。

### (2) データ登録機能

RFIDタグにより収集されたデータは、PDAをクライ

アントPCに接続することによってデータベースへ登録される。無線伝送により収集されたデータは、携帯電話網により、サーバからデータベースに直接登録される。

### (3) マスタメンテナンス機能

構造物の諸元情報や管理対象のセンサの種類と測定内容、設置箇所等のマスタ情報の更新、追加、削除を行う。

### (4) データ分析機能

登録された測定データを使ったセンサ及び、構造物毎の経年グラフによる標準的な分析や、個別の分析として、鉄筋コンクリート(RC)ラーメン高架橋柱の復元モデル(図10)を計算し、実際の測定結果と比較することにより、対象とする構造物の損傷レベルを評価することができる。

## 3. 土木構造物への適用

現在システムで対象としている高架橋及びトンネルに関する3種類のセンサの概要について以下に述べる。

### 3.1 ラーメン高架橋損傷レベル検知

RCラーメン高架橋は、大きな地震により、ある程度損傷することを前提に設計され、柱は特に損傷が集中しやすい部材である。柱の損傷は通常、被災後の随時検査において目視により確認するが、近年は柱の脆性的な破壊(せん断破壊)を防ぎ、より粘り強く抵抗するために、柱

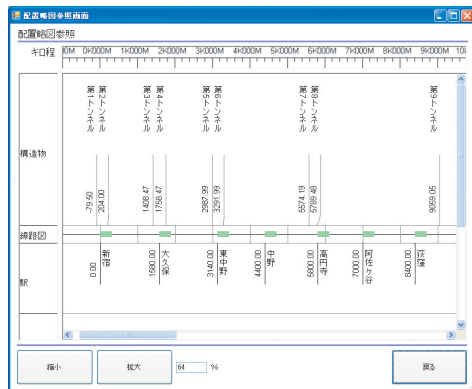


図8 構造物配置略図表示



図9 構造物諸元の参照

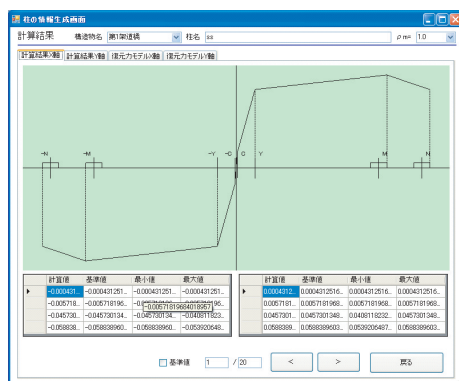


図10 復元モデル計算結果

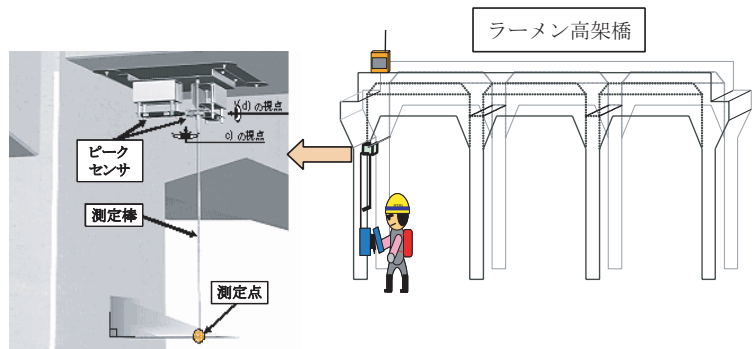


図11 部材角測定装置・設置位置

特集：輸送情報技術

に鋼板を巻きつける「鋼板補強」が施される事例が増加している。この場合、目視による損傷の把握が困難となる。

一方、地震時に柱端部に生じる最大の柱の傾き（最大応答部材角）と柱に発生する損傷（損傷レベル）の関係は概ね把握されており、最大応答部材角を測定出来れば、地震後早期に柱の損傷レベルの評価が可能となり、被災後の復旧作業の効率化や、地震発生から列車運行再開までの時間短縮が期待できる。

(1) RFID タグによるセンサデータ収集

部材角測定装置は、図 11 に示すように高架橋に設置し、測定棒は、測定点より柱に垂直に設置した治具を介して、地震時の柱の応答に追従する。測定点は、損傷が集中する範囲（塑性ヒンジ区間）を避けた位置としている。センサは、正負方向の最大変位を測定、記録できるピークセンサを用いており、このセンサは機械式で常時電源が不要で、安価で耐久性に優れている等の特長がある。センサは、線路方向と線路直角方向に配置するが、地震時に柱は任意方向に応答するため、ピークセンサに 1 方向成分の変位量を抽出する治具を取り付け測定棒と接触させている。これにより、損傷レベルの検知において重要なデータである、両方向の最大応答部材角を一度に測定することができる。最大応答部材角は、測定棒が傾くことにより計測位置に生じる最大変位を、ピークセンサにより測定し、計測した変位と支点から計測位置までの長さから求められる。ピークセンサは、RC ラーメン高架橋柱の上部に設置されるため、その測定データを地上の RFID タグを介して読み取るために、図 12 のようにピークセンサと RFID タグ間を 10m のリード線で接続している。センサデータは図 3 のタグリーダーと PDA により読み取る。図 13 に PDA での測定画面を示す。測定結果は X 方向成分に対する最大値（正）と最小値（負）、及び Y 方向成分に対する最大値と最小値で表示される。PDA に蓄積されたデータは、管理区へ戻ってサーバへ登録することになる。

(2) 無線伝送によるセンサデータ収集

図 5 の損傷レベル検知用ノード無線機を 2 台組み合わせて、上記「RFID タグによるセンサデータ収集」と同様に測定した部材角データを図 7 の収集基地局を介して、管理区内のデータベースサーバへ無線伝送する。ノード

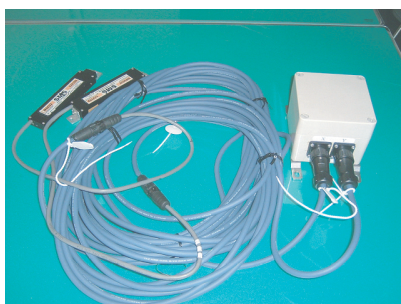


図 12 ピークセンサと RFID タグ

無線機によるデータの測定周期及び、収集基地局からサーバへ伝送する周期については、任意に設定可能となっている。

3.2 高架橋地中部材の損傷自己検知

建造物の基礎は通常、地中に構築されているため、また流水部に位置する橋脚では橋脚躯体の下部が水中に没しているため、基礎および橋脚躯体下部の状態を直接目で確かめることは困難である。鉄道に多い構造形式であるラーメン高架橋に関しても橋脚同様、基礎や地中梁、さらに柱下端部が地中にあることから、その状態を目視することが困難となっている。このような構造物では、地震やその他の異常時外力によって損傷が生じたかどうかを確認するためには、地上部にある建造物を入念に目視し、この結果、地中部に変状が発生しているおそれがあると判断されたものについては非破壊検査が適用されるが、最終的には掘削し直接目視することを余儀なくされる。ここで「掘削し目視する」と言っても、列車が往来する時間帯に建造物の基礎を掘削することは安全上制約があり、そのため夜間の僅かな時間帯に行わなければならない、現実的には著しく困難なことが想像できる。このように直接目視することが困難な土木建造物の検査・診断をサポートすることを目的として、RFID タグを活用した「地中部材の損傷自己検知システム」を開発

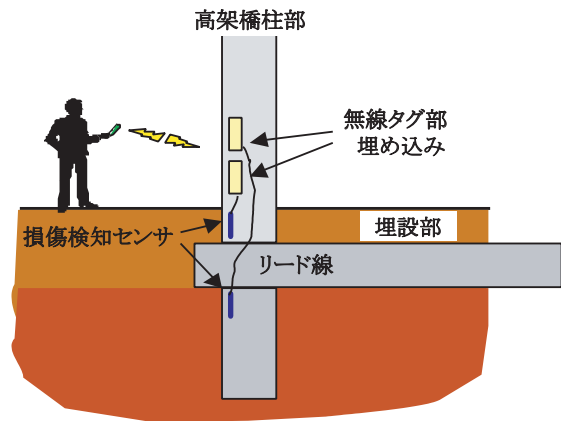


図 14 損傷検知センサ設置イメージ



図 13 PDA 測定画面



図 15 PDA 測定画面

した。図14に、システムの設置イメージを示す。

図14にあるように、損傷検知部（損傷検知センサ）を損傷が生じやすい部位にあらかじめ埋め込み、このセンサからリード線を伸ばし、地上部の部位に埋め込んだRFIDタグから検査担当者が構造物の情報を非接触で受け取ることとなる。センサデータはラーメン高架橋損傷レベル検知に使用するリーダと同じものを使用して読み取ることができる。図15にPDAの読み取り画面を示す。

なお、駅部においては店舗が設けられるため、柱は化粧壁等で覆われることとなるが、開発したシステムはその壁を剥ぎ取ることなく対象構造物の損傷の有無、程度を知ることが可能である。

### 3.3 トンネルのひび割れ検知

鉄道トンネルでは日々の列車走行の安全を確保するため、目視、打音を主体とした定期検査や監視が実施されている。広範囲にわたるトンネル覆工に対して定期検査、監視をするためには、技量を持った検査員の不足、コスト、時間的制約（線路閉鎖の時間等）等の問題点があり、その解決のために、これまで光ファイバや導電塗料による変状監視システムの開発が進められてきた。

現状のこれらの変状監視システムでは、計測器類を有線にてネットワーク化していることから、計測器自体が簡便なものであっても、それらが他の施設の障害になることが多く、また、施工時に足場や配線にかかる費用、安全性の問題が発生する。そこで、この変状監視システム開発の一環としてトンネル坑内での無線通信の適用性の検討を行い、他の施設への障害の軽減、施工時のコスト

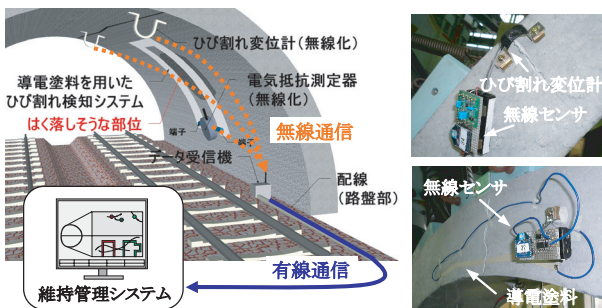


図16 トンネルの計測システム概念図



図17 試験状況

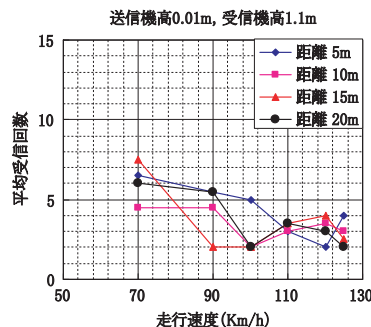


図18 走行速度による受信回数

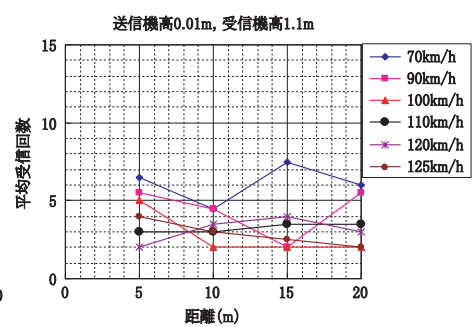


図19 送信距離による受信回数

の軽減を目指している。トンネル坑内での用途や組み合わせる計測器等に応じて、以下のように無線システムの仕様を区分して研究を進めている。図16にトンネル計測システム概念図を示す。

#### (1) 小型計測器の計測器間の通信

トンネルでは変状の進展を確認するため、ひび割れが発生している個所にπ型変位計等の小型計測器を設置する。この場合、小型計測器間の短距離の通信でよいが、トンネル覆工（特に天端付近）に直接設置することから小型・軽量であり、長期間電池が持つシステムとする必要がある。

#### (2) トンネル坑内から坑口までの通信

長大なトンネル坑内に設置した計測器から坑口まで、中継器を介して計測データを通信するためには、長距離の通信が必要とされる。この場合、通信にはトンネルにカーブ区間があることや、迷走電流などの弊害がある。

#### (3) トンネル坑口から基地局までの通信

トンネル坑外の通信で、一般的な通信手法（無線LAN回線など）が使用可能である。

## 4. 今後の課題

### 4.1 センサデータの鉄道車両による収集の検討

土木構造物に設置されたセンサデータの収集方法として、特別な無線ネットワークを構築したり、また人が現地へ行って収集しようとするればかなりのコストがかかることになる。そこで、定期的に線路上を走行する鉄道車両によりデータを収集することができれば、保守業務としてかなりのコストダウンが見込める。そのため、営業車両相当の走行速度でセンサデータの無線受信が可能であるか、基礎的な試験を行った。

試験は地上側に特定小電力無線機の送信機を置き、6byteデータを1パケットとして2秒間隔で送信し、乗用車の運転席の背もたれに取り付けた受信機で受信した（図17）。試験結果として、受信回数の走行速度による変化を図18、送信距離による変化を図19に示す。

図18より、走行速度が速くなると受信回数は減ってゆくが、125km/hでも確実に受信可能であった。無線機の応答範囲は距離毎に一定と考えられるため、走行速度が

