

|       |
|-------|
| 鉄道一般  |
| 車両    |
| 施設    |
| 電気    |
| 運転・輸送 |
| 防災    |
| 環境    |
| 人間科学  |
| 浮上式鉄道 |

# 鉄道橋りょうの経年変化をモニタリングする

鉄道橋りょうは経年化が進んだものも多く、維持管理の重点化が求められています。健全性の低下が懸念される橋りょうに対しては、変状の進行を監視し、適切な時期に対策していくことが重要になります。監視では、目視や衝撃振動試験などの調査方法が用いられていますが、モニタリングの考え方を導入することで、省力化や変状の早期検知による補修コスト低減が期待できます。これらのメリットを生かした維持管理の低コスト化を目的に、鉄道橋りょうのモニタリングシステムを開発しました。ここでは、開発したモニタリングシステムの特徴について紹介します。

## はじめに

鉄道橋りょうは、道路橋に比べて高度経済成長期だけでなく戦前に建設されたものも多く、経年90年を超えるものも存在します。そのような橋りょうは経年劣化が進んだものも多く、維持管理の重点化が求められています。特に健全性の低下が懸念される橋りょうに対しては、変状の進行を監視し、適切な時期に対策する必要があります。

鉄道橋りょうの監視は、現状、目視

や衝撃振動試験(☞参照)に代表される現地調査により行われていますが、これにモニタリングの考え方を導入することで、検査の省力化や異常の早期検知による補修コストの削減が期待できます。このメリットを生かした維持管理の低コスト化を目的に、鉄道橋りょうのモニタリングシステムを開発しました。ここでは、開発したモニタリングシステムの特徴について紹介します。

## 何をモニタリングするか

モニタリングの対象として、鉄道橋りょうの維持管理で特に重要で、目視による検査が困難な箇所が挙げられます。今回開発したモニタリングシステムでは、橋脚、支承およびスラブひび



**阿部 慶太**  
Keita Abe  
構造物技術研究部  
基礎・土構造研究室  
副主任研究員  
[専門分野]地盤工学



**吉田 善紀**  
Yoshinori Yoshida  
構造物技術研究部  
鋼・複合構造研究室  
研究員  
[専門分野]構造工学



**仁平 達也**  
Tatsuya Nihei  
構造物技術研究部  
コンクリート構造研究室  
主任研究員  
[専門分野]コンクリート工学



**野末 道子**  
Michiko Nozue  
信号・情報技術研究部  
ネットワーク・通信研究室  
主任研究員  
[専門分野]情報工学

### ☞ 衝撃振動試験

橋脚の天端を30kg程度の重錘で打撃し、その際に発生する橋脚の自由振動波形のスペクトルから固有振動数の大きさを求める試験法。

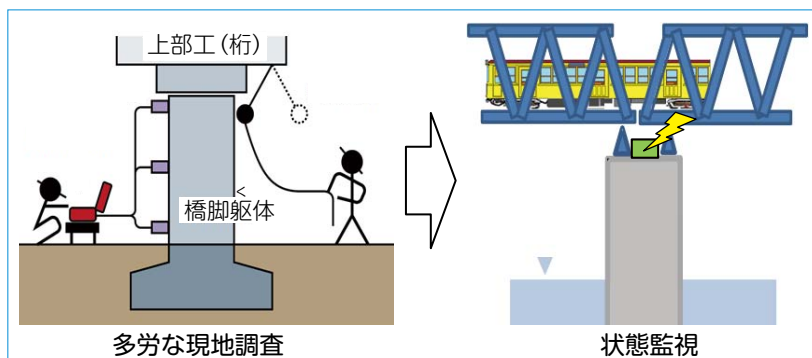


図1 橋脚の検査の省力化

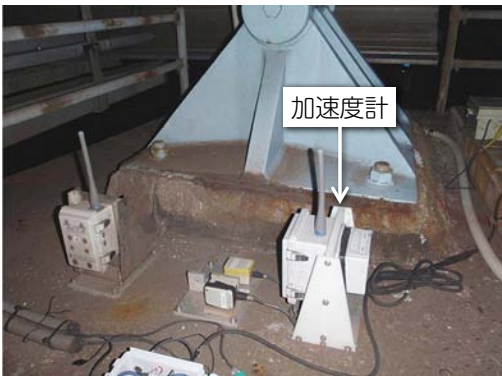


図2 橋脚上に設置した加速度計

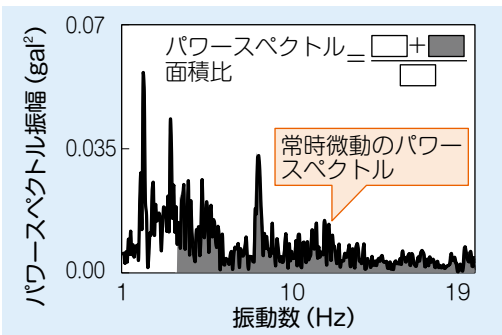


図3 常時微動のパワースペクトル面積比

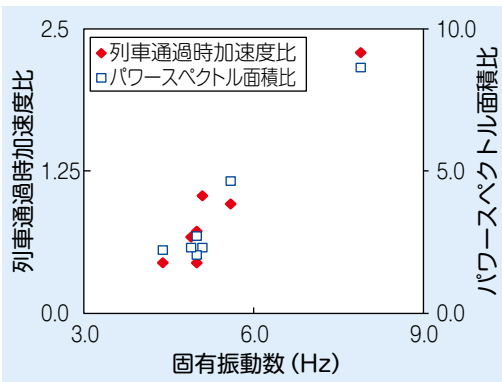


図4 指標と固有振動数の関係

割れの三項目を対象としました。橋脚では、特に河川橋りょうなどで、洗掘や河床低下で橋脚を支持する地盤が侵食され、目視では確認困難な地盤中の橋脚の安定性について検査する必要があります。この安定性の程度は、固有振動数の大きさを評価する衝撃振動試験による方法がありますが、図1に示すように固有振動数の代わりとなる指標を用いてモニタリングすることで検査の省力化が期待できます。

支承は、橋りょうの中でも特に変状の多い部位であり、その変状が進行した場合のほかの変状を誘発する原因に

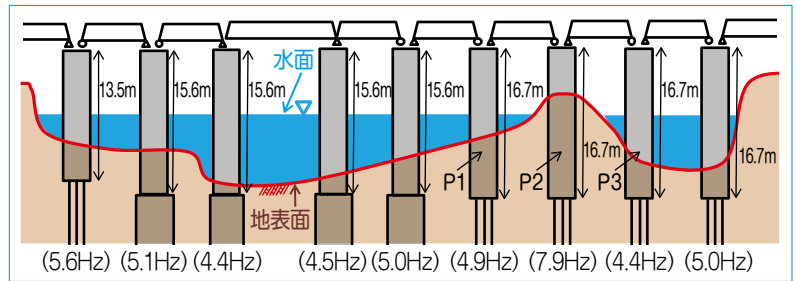


図5 実証試験に用いた橋りょうの側面図(括弧内は固有振動数(Hz))

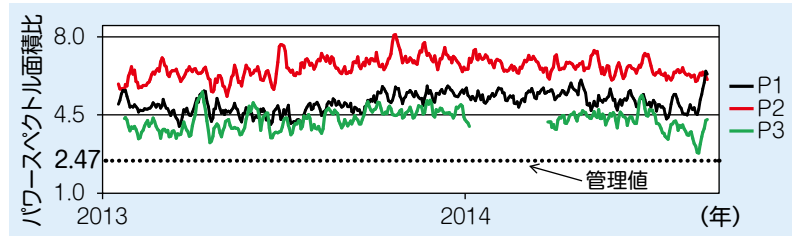


図6 P1, P2, P3橋脚のモニタリング結果

なります。通常、変状の進行を確認するために監視を行います。支承の変状は長年かけて徐々に進行する場合がありますが、目視による監視では進行を捉えにくい。継続的なモニタリングが監視の有効な手段になります。

スラブひび割れについては、かぶり剥落につながるコンクリート表面の腐食ひび割れを早期に検知し対策を実施することで維持管理コストの低減が期待できます。

### 橋脚のモニタリング

目標とする橋脚のモニタリングシステムを開発するためには、衝撃振動試験から得られる固有振動数の代わりとなり、図2に示すような橋脚に常設した加速度計単独で常時計測可能な指標が必要となります。そこで、列車通過時に生じる橋脚の加速度振幅の比(橋軸直角方向加速度の最大振幅と橋軸方

向加速度の最大振幅の比)と常時微動のパワースペクトル(参照)の面積比と低振動数域の面積比(図3)の二つの指標を提案しました。これらの指標の有効性を確認するため、1/40スケールの橋脚模型を用いた土被り掘削の再現実験と、実際の鉄道橋りょうで実証試験を行いました。図4に図5に示す橋りょうで実施した実証試験で得られた固有振動数と指標の関係を示します。両者に相関関係があることが分かります。この関係は模型実験の結果からも得られており、提案した指標は固有振動数の代替指標として有効であることを確認しました。

この指標を用いて、約2年間、図5に示す橋りょうで長期計測を実施しました。図6に土被り厚が顕著に異なる3橋脚(図5中のP1, P2, P3)での計測結果を示します。提案した指標(パワースペクトル面積比)を用いて、3橋脚の固有振動数の大きさの違い(P2 > P1 ≒ P3)を長期的にモニタリングできることを確認しました。図6には

#### 常時微動のパワースペクトル

風などの自然現象や人間活動による人工的な振動源により橋脚に生じる微小な振動を常時微動といいます。常時微動のスペクトルの縦軸を二乗にしたものをパワースペクトルといい、波形が振動数毎に含んでいるエネルギーを表します。

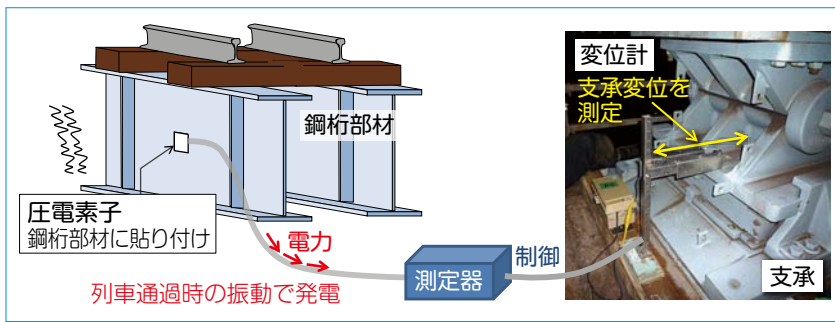


図7 支承のモニタリングシステムの概要

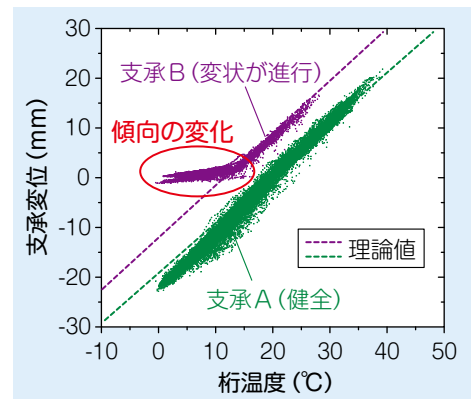


図9 支承変位と桁温度の相関

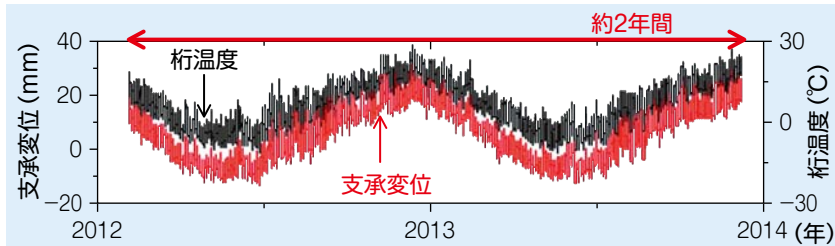


図8 支承のモニタリングによる測定結果の一例

指標の管理値も示しています。この管理値は、今回長期計測した9橋脚の指標の下限値と固有振動数の関係から、衝撃振動試験の標準値(☞参照)に対応する指標の値として求めたものです。このように管理値を設定することで、長期計測でのばらつきを考慮しつつ衝撃振動試験の標準値をベースに橋脚をモニタリングすることができます。なお、今回モニタリングで使用した加速度センサーには、MEMS(☞参照)のセンサーを用いました。このセンサーを用いることで、センサーの低コスト化、省電力化を図りました。

### 支承のモニタリング

支承の変状は、支点移動や支承の可動不良、あおりなどがあり、いずれも進行すると支承変位に変化が現れます。一方、その変化は数年かけて徐々に現れるもので、荷重や気温などの諸条件にも左右されるため、目視による監視では変位の進行を正確に捉えることが困難です。一方、モニタリングによる方法は、監視の有効な手段になりますが、電源を確保するための初期工事や電池交換などのメンテナンスのコストが、実務への導入を妨げる要因となっていました。

そこで、鋼桁部材の振動発電を利用して、温度変化や活荷重による支承変位をバッテリーレスで長期間測定するモニタリングシステムを開発しました(図7)。この振動発電は、列車通過時の鋼桁部材の振動を利用して、圧電素子(☞参照)による発電を行うもので、圧電素子を鋼桁部材に貼るだけなので導入が簡易なうえ、長期間のモニタリングにおいても電池交換などのメンテナンスを不要にします。

開発したモニタリングシステムを鉄道橋のように設置し、実環境における長期間の運用を検証しました。測定結

果の一例として、10分間隔で測定した支承変位と桁温度を図8に示します。この結果から、振動発電による電力のみで、支承変位や桁温度を約2年以上継続して測定できることを確認しました。また、支承変位と桁温度の測定結果より、支承の変状が進行した場合は両者の相関に変化が表れることを確認し(図9)、この相関を指標として支承の変状の進行を監視できることが分かりました。

### スラブひび割れのモニタリング

コンクリート構造物のかぶり剥落につながる腐食ひび割れの変状を予防保全的に検知することは、構造物の耐久性の向上、かぶり剥落による公衆災害の防止に向けて重要なことです。しかし、ラーメン高架橋のスラブは、高所に位置するため、目視やハンマーによる打音検査などの現地調査による方法では多くの労力とコストを要します。そこで、図10に示すような導電塗料を用いた腐食ひび割れのモニタリングシステムを開発しました。このシステムにより、図11に示すようにコンクリート表面に塗った電気を通す塗料にひび割れが貫通するかどうか確認することで、かぶり剥落が発生する前にひび割れを検知できます。このシステムの特徴は、導電塗料をスプレーガンで薄く均一に塗ることで、幅0.3mm程度の細いひび割れも検知できること、

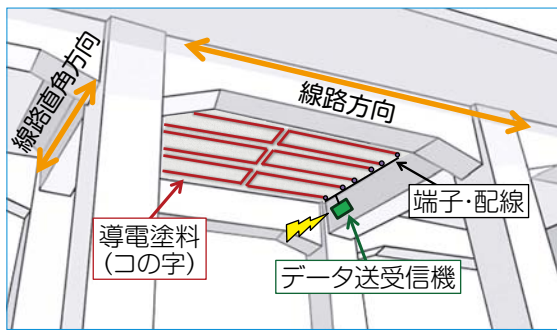


図10 スラブひび割れ検知システム

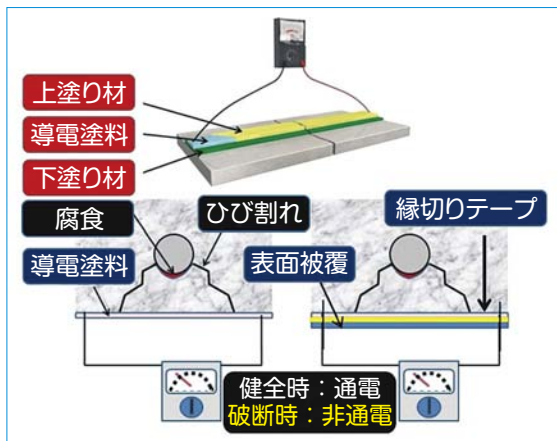


図11 導電塗料によるひび割れ検知

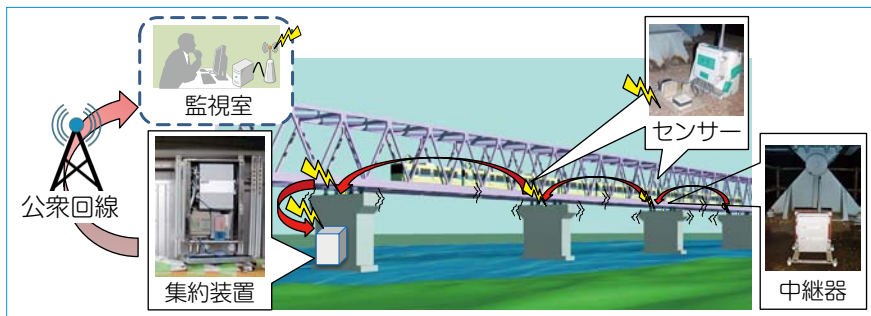


図13 無線伝送ネットワークによるモニタリングデータ伝送

縁切りテープを介することで表面被覆工法(☞参照)と併用して施工できることにあります。現在、図12に示すようなシステムのプロトタイプを構築し、耐久性試験を実施しています。

### モニタリングデータの伝送方法

モニタリングシステムの開発に向けてはデータの収集方法も検討する必要

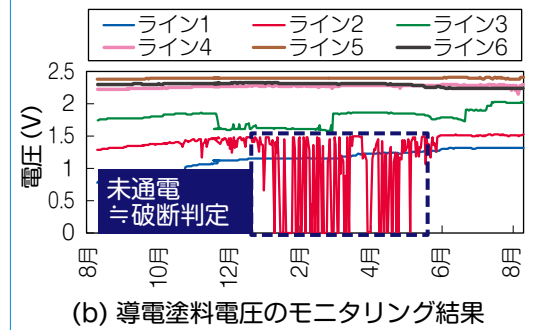
#### ☞ 表面被覆工法

コンクリートの劣化因子の浸入やかぶりの剥落の抑制・防止効果を有する被覆をコンクリート表面に形成させる工法。

があります。鉄道橋りょうでは、災害直後の橋りょうなどリアルタイムなデータ計測・伝送が求められる場合や、現地検査のタイミングでデータが取得できればよい場合があります。そこで今回開発したシステムでは、図13に示す、複数の中継器、集約装置、拠点間接続用の公衆回線からなる無線伝送ネットワークにより、データを無線で監視室まで伝送するシステムと、センサー付属のメモリーカードからデータを直接取得する方法を構築しました。前者は、無線伝送ネットワークの導入・運用コストがかかりますが、リアルタ



(a) プロトタイプ写真



(b) 導電塗料電圧のモニタリング結果

図12 検知システムのプロトタイプ

イムなデータ伝送が求められる場合に対応できます。後者は、データ取得のために直接現場に行かなければならないというデメリットがありますが、無線伝送ネットワークの導入・運用コストを抑えられます。データの取得目的と費用対効果を考えたモニタリングシステムの設計が重要です。

### おわりに

モニタリングシステムの導入による維持管理の低コスト化を主な目的に、鉄道橋りょうのモニタリングシステムの開発を行いました。また、無線伝送ネットワークを導入することでリアルタイムなデータ伝送が求められる場合にも対応したモニタリングシステムを構築しました。今後はさらなるシステムの実用化に向け検討していく予定です。

なお、本システムの一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて開発しました。また、本システムの開発を進める上で、東京地下鉄株式会社にご協力を頂きました。ここに、心から感謝の意を表します。RRR