

# 無線モニタリングによる伸縮継手 損傷検出の可能性

金川昌弘<sup>1</sup>・坂井康人<sup>2</sup>・貝戸清之<sup>3</sup>・小林潔司<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 京都大学大学院 工学研究科社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: masahiro.k@ay2.ecs.kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 阪神高速道路株式会社 建設事業本部 (〒590-0075 堺市堺区南花田口町2-3-20)

E-mail: yasuhito-sakai@hanshin-exp.co.jp

<sup>3</sup>正会員 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

E-mail: kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

<sup>4</sup>フェロー会員 京都大学経営管理大学院 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail: kkoba@psa.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

アセットマネジメントにおける目視点検の代替・補間技術という観点でモニタリング技術の実務への適用可能性を考えると、空間的に高密度にセンサーを配置することが重要である。空間的に高密度なセンサー配置を達成した次段階では、データ取得の効率性向上が課題となる。このとき、有効な解決策の1つとして無線モニタリングがあげられる。すでに著者等は実橋において無線モニタリングを用いた路車間通信試験を実施している。本研究においては、具体的な損傷として橋梁の伸縮継手損傷に着目し、伸縮継手損傷の検知指標として加速度応答およびパワースペクトルを取り上げた。さらに、実橋の伸縮継手を対象とした振動モニタリングを実施し、損傷検出の可能性に関する基礎的検討を行った。

**Key Words :** *wireless monitoring, RFID, expansion joint, acceleration, power spectrum*

## 1. はじめに

土木分野においては、土木施設の定量的な点検・検査を目指したヘルスマニタリング (Structural Health Monitoring) が試行的に実施されている。なかでも無線通信技術を利用した無線モニタリングは、空間的に高密度なモニタリングを想定した場合に、配線等の作業が軽減されるために近年急速に注目されつつある。実際に、目視点検の代替・補間という観点でモニタリング技術の実務への適用可能性を考えると、空間的に高密度なセンサー配置を達成した次段階では、データ取得の効率性向上が課題となる。例えば1回に取得される情報が高品質でなくとも、継続的に取得しつづけることで日常の変動範囲から逸脱する変化を相対的に捉えることができれば、目視点検を主体とした現時点のアセットマネジメントの枠組みの中でも相互補間的な実用化が期待される。

データ取得の効率性向上に関して、著者等<sup>1)</sup>は、構造物点検のための無線モニタリングにおいて、RFIDの適用可能性に着目し、通信容量の視点から検討を行った。また、大容量な通信を実現するためのシステムを開発し、実際の高速道路という実環境

において、そのシステムの有効性を検証するための通信試験を実施し、データを回収する車両の走行速度とデータ受信量の関係を実測した。その結果、車両走行速度が80km/hであっても、5kbytes程度のデータを受信することが可能であった。これは橋梁で計測した動的ひずみの時系列波形を受信することは困難であるが、動的ひずみを信号処理した結果、例えば頻度分布などを受信するには十分な通信容量である。したがって、RFIDを中心に路車間無線通信システム試作を行い、ハードウェアの改良とともに、運用方法などのソフトウェア面の検討も併せて実施することで、無線モニタリングシステムの実用化を図ることが望ましいと考えられる。さらに、そのシステムの有効性を検証するためには、比較的単純で空間的に多数設置された構造物、例えば標識柱や照明柱、ジョイント (伸縮継手) などを対象としたフィールド試験を実施することが重要である<sup>1)</sup>。

本研究では、高速道路橋に多数設置された伸縮継手を対象とし、従来の目視点検の補間技術として無線モニタリングを用いた場合、伸縮継手損傷検出の可能性について基礎的な検討を行う。以下、**2.**で本研究の基本的な考え方を述べる。**3.**で伸縮継手損傷

の検出方法について検討を行う。4.で本研究の内容をまとめ、今後の方向性を示す。

## 2. 本研究の基本的考え方

### (1) 伸縮継手について

高速道路橋において、伸縮継手が日常点検（路上点検）の最も重要な点検対象のひとつである。伸縮継手の損傷は、一般車両の走行性に影響を与えるだけでなく、万一飛散した場合重大な事故の原因にもなり、また、異常音の発生による周辺への騒音・振動公害の発生の原因となりうることから、早期発見が求められる。しかし、伸縮継手の損傷はボルトの欠損やゴム部の磨耗といった可視的なものだけでなく、ボルトの緩みや、内部鋼材の破断といった不可視な損傷が多い。これらの損傷の発見は路上点検時の音や振動により発見しているため、路上点検員の経験に大きく依存している<sup>2)</sup>。

しかし、上記のような従来の点検方法には次のような問題点が存在する。

- ① 損傷の発見精度は、路上点検員の技量に依存している。
- ② 熟練した路上点検員が少なく、点検員のいわゆる「長年の経験による職人技」に頼っている。また後継者への技術の継承が進んでいないのも現状である。
- ③ 重交通や過積載車両の増大のため、伸縮継手の劣化が早く、損傷の発生から進行が早い。一方で、点検頻度の低下により点検の機会が減少するにもかかわらず、伸縮継手の損傷の早期発見・早期補修の必要性が高まっている。

### (2) 最近の無線モニタリングに関する研究

無線モニタリングは、1) 配線が不要であるので、分散的に配置された複数施設を対象とするような場合でもセンサーネットワークを効率的に構築できること、2) センサーネットワーク上の1箇所でも障害が発生してもシステム全体が機能停止しないために事故・災害時であってもある程度の情報収集が可能であること、などの特長がある。しかし、1.に述べたように、実際に目視点検の代替・補間という観点でモニタリング技術の実務への適用可能性を考えると、空間的に高密度なセンサー配置を達成した次段階では、データ取得の効率性向上が課題となる。この課題な土木施設を対象として、対象施設に設置した計測機に対して、最近の研究では高速道路の高架橋のような点（RFIDタグなど）からモニタリングデータを無

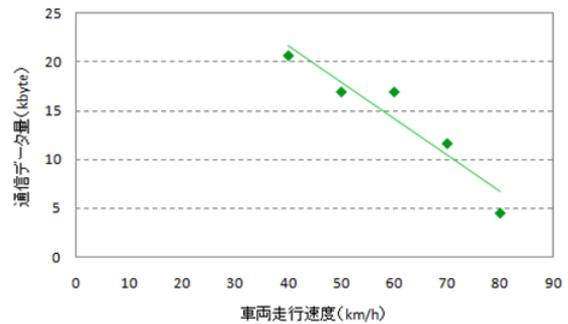


図-1. 車両走行速度とデータ受信量の関係<sup>1)</sup>

線通信により送信し、通常走行状態で巡回中の日常点検車両でそのデータを回収するという路車間無線通信手法を提案した。また、大容量な通信を実現するためのシステムも開発し、実際の高速道路という実環境において、そのシステムの有効性を検証するための通信試験を行い、データを回収する車両の走行速度とデータ受信量の関係を実測した。

実測した結果を図-1に示す。図示したように速度とデータ受信量の間には逆相関の関係を見て取ることができる。受信データ容量の最大値は40km/h走行時の20kbytesであった。これは走行速度が試験ケースの中で最も遅いために通信時間が最も長くなった結果である。しかし、80km/hにおいても、約5kbytes程度のデータを取得することに成功した。5kbytesは、例えばサンプリング周波数100Hzの1ch分のモニタリングデータに換算すると、約20数秒間のデータに相当する。したがって、現状の路車間無線モニタリングではRFIDタグで蓄積された長時間の時系列波形を取得することは困難であると言わざるを得ない。しかし、実務上、このような生波形を継続的に取得する必要性は少なく、生波形に対して何らかの信号処理を施した結果（1次分析データ）を送受信できれば十分であると考えられる（1次分析データに異常が確認された場合に車両を停車させて生波形を回収することが現実的である）。確認のため、著者らはモニタリング対象であった動的ひずみデータに対し（12時間連続データ）、1次分析データとして頻度分布を算出し、車両走行速度80km/h時の回収可能性について考察した。具体的に、上記動的ひずみデータに対し、ひずみ振幅を100のクラスに分類し、各クラスの頻度をレインフロー法によりカウントした頻度分布を1次分析データとして用いた。頻度分布のデータ容量は約300bytes程度であった。これは車両走行速度80km/hでのデータ受信量（約5kbytes）に比べ、データ容量的にはかなり小さく、車両走行速度80km/hであっても十分に回収可能であった。

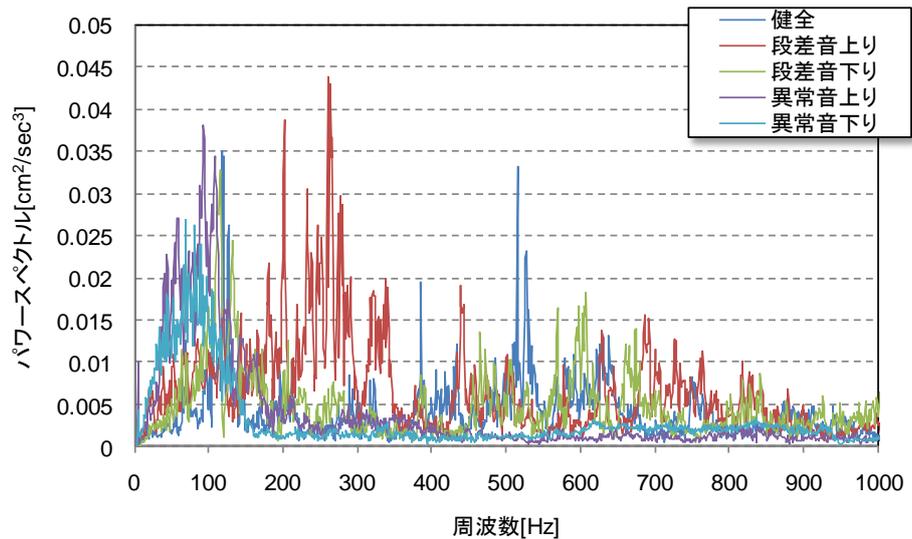


図-2. ch.1 (第一車線-水平方向)

### (3) 伸縮継手損傷検出への無線モニタリングの適用可能性

2.(1)で述べたように、現状、伸縮継手の損傷は点検員が路上点検時に、振動や異常音に基づき発見している。本研究では、著者等は無線モニタリングによる伸縮継手損傷の検出手法を提案する。具体的に、加速度センサーを内蔵する無線タグを伸縮継手に設置し、そのタグにより車両通過時の伸縮継手の振動加速度を定期的に計測し、計測した結果をフーリエ変換してピーク周波数を抽出することで、ピーク周波数と伸縮継手の健全状況の関係を明らかにすることができる。そして、加速度のような生データではなく、フーリエ変換データ（1次分析データ）を路車間無線通信で定期的かつ長期的に回収できれば、その後、回収したデータを統計的に分析することで、伸縮継手の損傷度を客観的に評価し、無線モニタリングによる伸縮継手の損傷検出および評価手法を確立することができる。3.にてその詳細を説明する。

## 3. 伸縮継手損傷の検出について

### (1) 損傷検知のための予備計測

伸縮継手の損傷状況（異常音あり・なし）と加速度フーリエ変換後のピーク周波数の関係を調べるために、損傷検知のための有線予備計測を行った。以下、その詳細を説明する。

実際の高速道路橋の伸縮継手を対象とし、健全1箇所、異常音あり1箇所、段差音（異常音として金属音を確認できなかった箇所は段差音として表記）あり1箇所の計3カ所において、加速度センサーを設

置し、サンプリング周波数2kHz、計測時間各10～20分程度で伸縮継手の水平方向および鉛直方向の加速度を計測した。

図-2、図-3はジョイント健全部、段差音あり、金属音ありの合計3箇所での加速度計測結果（水平・垂直2方向）からそれぞれの振幅が大きい上位3つの自由振動応答を抽出し、フーリエ変換した後に平均パワースペクトルを算出したものである。青色の健全部のピーク周波数は120-130Hz（図-2、図-3）であるが、赤色と緑色の段差音ありになると、250Hz（図-2、図-3）、600Hz（図-3）と高周波数へ推移することがわかる。段差音ありより損傷ランクが高い異常音ありのピークは残念ながら今回確認はできなかったが、1000Hz以上にピーク周波数が存在している可能性がある。したがって、今後サンプリング周波数4kHzまで上げて、さらなるピーク周波数の検証を行う必要がある。

### (2) 無線タグおよび長期モニタリングについて

実用化を実現するために、1) センサー機能（ここでは加速度計測）、2) 計測データに対する1次分析機能（ここでは加速度のフーリエ変換）、3) 無線通信機能（データを回収する車両内に設置される無線受信器へのデータ転送）、4) バッテリー機能（通常用電池またはソーラー電池）を1つの無線タグに集約する必要がある。この中で、最も課題となるのがバッテリーの使用可能時間である。また、データ収録するための無線タグに内蔵するメモリの容量も有限である（コストに関連する）。そのため、長期にわたっての無線モニタリングにおいて、運営方法を合理的に計画する必要がある。

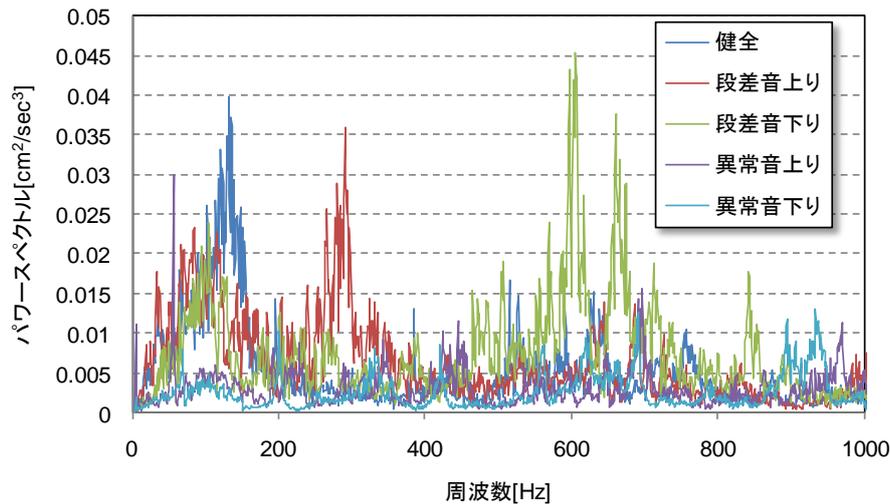


図-3. ch.2 (第一車線-鉛直方向)

例えば、最も交通量の多い時間帯において、週1回程度の頻度で無線タグを稼働し、そして5~10分程度の短い時間で伸縮継手の振動を計測し、フーリエ変換した後、変換した結果だけをメモリに収録する(メモリ使用量を節約するため)。また、データの回収も週1回または月1回の頻度で実施し、データ回収完了時点で無線タグのメモリデータをすべて消去するような運営方法を確立する必要がある。バッテリーの具体的な使用電量は、転送するデータの容量、無線のデータ転送速度、タグの消費電量で計算できる。現状、市販のソーラー電池を使用する場合、週1回の頻度であれば、そのうち、晴天日が1日あれば、ソーラー電池の再フル充電が十分できる。そして、週1回のデータ回収では長い時間を使用する必要がないため、ソーラー電池が持っている電量を1部しか消費しないと考えられる。そのため、再フル充電まで要する時間も少ないと考えられる。したがって、本研究の無線タグにはソーラー電池の使用が十分できると考える。ただし、市販のソーラー電池を使用する場合、現場においては設置に関する制限があると予測できるので、現場の実状況に合わせて具体的に検討する必要がある。一方、ソーラー電池の使用ができない場合、ビデオカメラなどに使用される高容量な電池の使用も考えられる。そして、前述の週1回でかつ5~10分間程度のわずかなデータ計測ならば、1年まで使用できる。

#### 4. おわりに

本研究では、無線モニタリングによる伸縮継手損傷検出の可能性に関して検討を行った。まず、損傷の特定方法について、伸縮継手の損傷状況(異常音あり・なし)と加速度の1次分析結果であるフーリエ変換後のピーク周波数の関係からピーク周波数で特定する方法を提案した。また、その提案の有効性を検証するために、加速度計測の予備試験も実施し、

フーリエ変換後のピーク周波数を求めた。その結果、段差音ありになると、ピーク周波数が250Hz、600Hzと高周波数へ推移することがわかった。しかし、段差音ありより損傷ランクが高い異常音ありのピーク周波数に関しては今回確認はできなかったため、今後さらに検証を行う必要がある。次に、データ回収の効率性向上を目指して、無線タグに内蔵されるバッテリーの使用可能時間を考慮した上で、加速度の生波形ではなく、加速度計測結果から振幅が大きい上位3つの自由振動応答を抽出し、フーリエ変換した後の平均パワースペクトル結果のみを転送するといった無線モニタリングの運営方法を提案した。1. で述べた通り、例え1回に取得される情報が高品質でなくとも、継続的に取得しつづけることで日常の変動範囲から逸脱する変化を相対的に捉えることができれば、目視点検を主体とした現時点のアセットマネジメントの枠組みの中でも相互補間的な実用化が期待できるという観点から、今後、上に提案した運営方法を用いて、長期にわたって伸縮継手の振動を無線モニタリングし、回収した1次分析データを用いて統計的な分析手法で伸縮継手の損傷を検出し評価することが重要である。

#### 参考文献

- 1) 金川昌弘, 坂井康人, 荒川貴之, 貝戸清之, 小林潔司: RFIDを用いた路車間無線通信によるマネジメントデータの効率的取得可能性, 土木学会論文集 F4 特集号, Vol.66, No.1, pp.101-108, 2010.
- 2) 塚本成昭, 山上哲示: 走行時の異常音による伸縮継手損傷検出の試み, 阪神高速道路第42回技術研究発表会論文

(2011.05.06受付)