

加速度センサを活用した新幹線 PRC 単純桁たわみの常時モニタリングについて

J R 東日本コンサルタンツ(株) 正会員 清水 保
 J R 東日本コンサルタンツ(株) 正会員 逸見 研二
 J R 東日本 高崎支社 正会員 荻原 裕貴
 J R 東日本 高崎支社 正会員 原田 悟

1. はじめに

北陸新幹線の PRC 単純桁において、列車通過時に共振現象が発生し、大きな桁たわみが発生していた。これまで、非接触型レーザードップラー計測機(以下、U ドップラー)やワイヤーを張った変位計を用いた現場計測により、定期的に列車通過時の桁中央部のたわみ量の計測を定期的に行ってきた。こうした中で、最大たわみ量が設計標準に定められている走行安全性の制限値に近い値に達したため、対策工事を進めることとなった。その間、複数の箇所で行った列車通過時の最大たわみ量を常に監視する必要性に迫られた。しかし、現場計測で複数箇所の常時監視を行うことは多大な労力を要するため、列車通過時の最大たわみ量を監視項目とした常時モニタリング手法の提案が求められた。そこで、加速度センサを用いて列車通過時の最大たわみ量を推定するモニタリングシステムの構築を行ったので報告する。

2. 常時モニタリング手法の検討

温度や歪みの変化を光波長の変化として検出することができる光ファイバーセンサ デジタルビデオカメラを用いて得られた画像(動画)を解析することで変位を直接計測することができる光学式変位計 計測した加速度を積分処理により速度、変位に変換することができる加速度センサ + 変換処理の3手法について検討した。各手法の長所と短所を表-1に示す。

表-1 モニタリング手法の検討

モニタリング手法	長所	短所
光ファイバーセンサ (DIMRO)	・たわみ波形を得ることが可能 ・故障しにくい	・リアルタイム計測への対応が困難 ・維持管理が困難 ・初期費用、ランニングコスト高価
光学式変位計 (BMCシステム 光学式)	・たわみ波形を得ることが可能 ・設置が容易	・計測誤差や欠測の可能性が高い ・維持管理の労力・費用が高む
加速度センサ (MEMS)	・初期費用、ランニングコスト安価 ・設置、データ取扱い、維持管理が容易 ・実績が多い	・2回積分のため積分誤差を大きく含む(固定点がなく変位計測が困難)

光ファイバーセンサと光学式変位計はたわみ量を直接計測することができるが、物理的に克服が困難な課題がある。一方で、加速度センサはコストが安価で取扱い等も容易であり、実績も多く利点が多いが、固定点がなく、積分誤差を大きく含むためたわみ量計測が困難とされていた。そこで、視点を変え2回積分ではなく、間接的な手法を取り入れることで、安価で複数箇所に設置できるモニタリング手法の構築を試みた。

3. 常時モニタリング手法の構築

(1) 原理

これまで共振桁に対して U ドップラーにより定期的に行ってきた計測の中で得られた「桁が大きくたわむ時には桁が速く動くこと(応答速度大)」に着目した。U ドップラーは応答速度を計測し、1回積分により変位に変換することで、たわみ量を計測することができる。図-1に1列車で得られた最大応答速度と積分で算定された最大たわみ量を複数列車分プロットした結果を示す。このように、最大応答加速度と最大応用速度には高い相関関係にあることがわかった。つまり、共振桁においては、あらかじめ実測値に基づく推定式(相関式)を設定しておけば、最大応答速度から、最大たわみ量を推定することができることとなる。

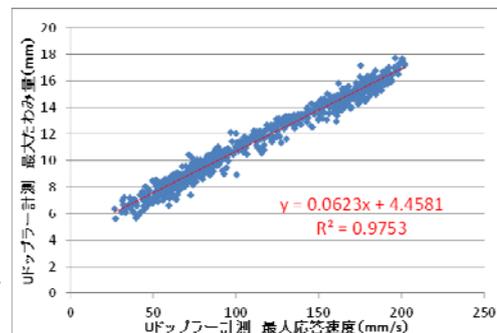


図-1 Uドップラーによる最大応答速度と最大たわみ量の関係

キーワード 共振, PRC 桁, 新幹線, モニタリング, 加速度センサ, MEMS

連絡先 〒172-0021 東京都品川区西品川一丁目1番1号 JR 東日本コンサルタンツ(株) TEL 03-5435-7635

(2) 推定式の構築

桁中央部に設置した加速度センサで列車通過時の加速度を計測すると同時に、Uドップラーにより応答速度を計測する。加速度センサで計測した応答加速度の積分処理により最大応答速度を算定し、Uドップラーで計測した応答速度から最大たわみ量を算定する。これらの関係図が図-2であり、この回帰直線を推定式とした。これにより、加速度から最大たわみ量を推定することを可能にした。

(3) モニタリング内容

モニタリングの条件およびモニタリング項目を表-2に示す。最大たわみ量以外の項目については、以下の方法で算定するシステムを構築した。

- 上下線自動判定：先頭車両が載荷した際の加速度差から上下線を判定
- 列車推定速度：変位の極小値から列車通過時間を算定し車両長から算出
- 固有振動数：車両通過後の5mm/s以下の残留振動についてスペクトル解析を行い算定されたピークを固有振動数と特定

以上のモニタリング項目について、図-3のようにブラウザ上でリアルタイムに閲覧、データのダウンロードが行えるようにした。

4. 常時モニタリングシステムによる効果

(1) 状態監視

これまでのモニタリング対象5箇所における約1年間の推定最大たわみ量と実測最大たわみ量(Uドップラー)の残差から、残差1mm以内のデータ数は94%と高い推定精度であった。これにより、現場計測の代替として常時モニタリングで最大たわみ量を常時監視することが可能であると判断した。さらに、自動警報発信システムにより管理値を超えた場合に即時対応が可能になり、列車の走行安全性の向上に貢献することができた。

(2) 応答曲線の温度依存関係の明瞭化

列車推定速度と推定たわみ量の常時監視により、大量のデータが蓄積された。この結果、列車推定速度と推定たわみ量の関係(応答曲線)について、12時間平均気温との関係(図-4)から、応答曲線が温度変動に依存して推移していることを明らかにした。

(3) 損傷の進行性の定量化の実現

たわみ量は列車速度と温度の影響を受けるため、単純に最大たわみ量からだけでは桁の損傷の進行性が評価できない。進行性を評価するためには列車速度や温度の影響を分離する必要がある。そこで、ある列車速度帯の推定たわみ量に着目し重回帰分析を実施した結果(図-5)、温度成分、列車速度成分とその他成分に分離することができた。その他成分は、経過日数に比例しており、損傷の進行性を表現していると考えられる。

5. おわりに

常時モニタリングにより、現場計測の代替となる常時監視が可能となった。今後は損傷の進行性の定量化が実現できれば、損傷を予測することが可能となり、さらに共振が懸念される桁への設置が拡大されれば、列車の走行安全性の更なる向上や維持管理費用の抑制につながると考えている。

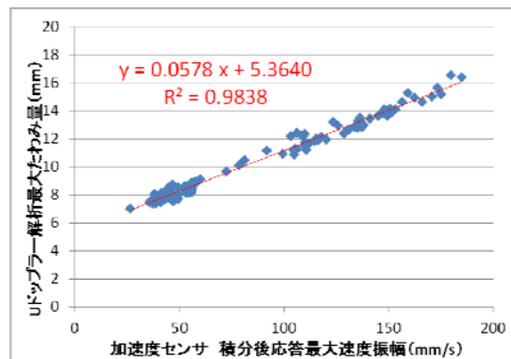


図-2 加速度センサによる最大応答速度とUドップラー最大たわみ量の関係

表-2 モニタリング内容

項目	内容
計測タイミング	上下線列車通過時
トリガレベル	25gal
サンプリング周波数	200Hz
収録時間	25秒
モニタリング項目	<ul style="list-style-type: none"> 最大たわみ量 上下線自動判定 列車推定速度 固有振動数

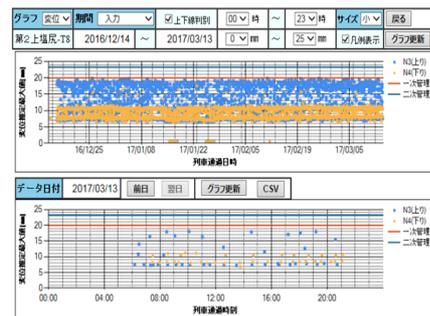


図-3 モニタリング WUI 画面

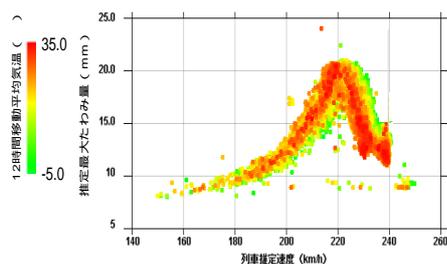


図-4 列車推定速度と推定たわみ量と12時間平均気温の関係

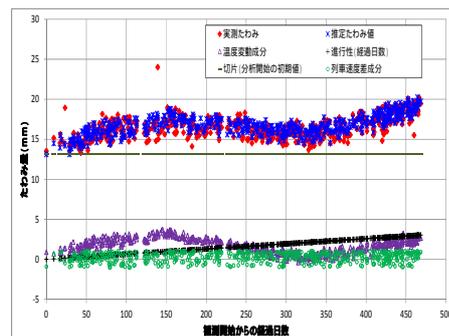


図-5 重回帰分析結果(各成分時系列)