

車上計測された軌道変位から構造物の変形を推定するための 桁たわみ - 軌道変位変換プログラムの構築

鉄道総合技術研究所 正会員 ○服部紘司
 鉄道総合技術研究所 正会員 松岡弘大
 鉄道総合技術研究所 正会員 田中博文

1. はじめに

膨大な構造物の維持管理のため、構造ヘルスマニタリングが広く検討されてきた。鉄道分野では、軌道の維持管理のために定期的に軌道検測車により軌道変位が車上から計測されるため、これを活用した橋りょうの状態評価が試行されている。松岡らは先頭と最後尾車両の2つの軌道変位の差分と桁たわみの比例関係に基づく桁たわみ推定法を提案した¹⁾。ただし、既存手法では単連梁理論と慣性法による軌道変位の計測が前提であり、適用範囲に限られる。適用範囲拡大のためには、後述するより一般的な2台車検測車²⁾で得られる軌道変位の活用が求められる。ただし、2台車検測車で検測された軌道変位は隣接橋りょうの桁たわみの影響を受ける。この点は既存の単連梁理論では評価が難しいため、任意の構造条件を考慮可能なFEMを用いる必要がある。そのため、軌道変位から桁たわみを求める逆解析の前に、隣接橋りょうの影響を考慮して桁たわみから軌道変位を評価する順解析法の構築が必要である。

こうした背景から本研究では、2台車検測車による桁たわみ推定法確立に必要となる、隣接橋りょうの桁たわみの影響を考慮可能な軌道変位算出手法を構築した。具体的には、2台車検測車による桁たわみを算出する構造解析モジュール(FEM)に、信号処理モジュール(軌道保守管理データベースシステム:LABOCS³⁾)を組み合わせた桁たわみ-軌道変位変換プログラムを開発した。

2. 2台車検測車の検測原理と高低検測差

図1に2台車検測車の検測原理を示す。2台車検測車は1軸と4軸を基準とした2軸と3軸の相対変位である124 偏心矢(124 asymmetric chord offset track irregularity: 124 ACTI)および134 偏心矢(134 ACTI)を計測する。124 ACTIと134 ACTIは荷重条件の異なる2つの軌道変位であるため、既往研究¹⁾で明らかにされた「荷重条件の異なる2つの軌道変位の差分と桁たわみは比例する」関係を利用できる。ただし、2つのACTIは位相特性が異なり、直接差分処理できない。そのため、本研究では偏心矢を位相特性がフラットな10m 弦正矢(10m symmetric chord track irregularity: 10m SCTI)に変換することで、2つの10m SCTIの差分波形(高低検測差, Difference between SCTIs: DTI)を算出可能とした。

3. 桁たわみ-軌道変位変換プログラム

図2にFEMとLABOCSから構成される桁たわみ-軌道変位変換プログラムの計算フローを示す。

(1) 構造解析モジュール(FEM)

図3に本プログラムでのFEMモデルを示す。FEMでは車両を荷重列、軌道、桁を梁、軌道パッドと支承をばねとしてモデル化する。各車軸の荷重はレール上を0.1mずつ移動し、桁およびレール変形が準静的に逐次計算

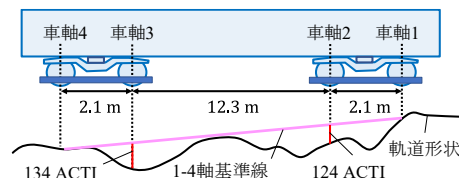


図1 2台車検測車の検測原理

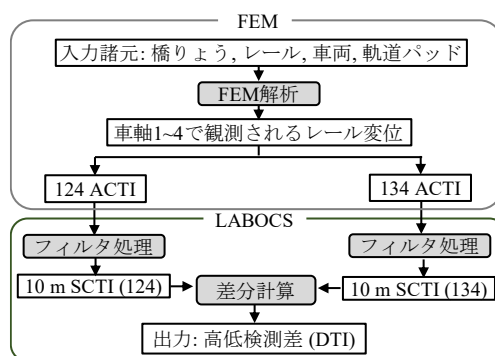


図2 桁たわみ-軌道変位変換プログラムの計算フロー

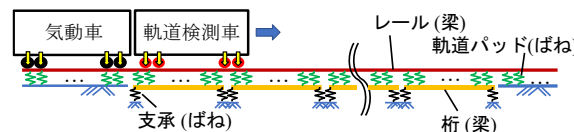


図3 FEMモデル

される。一般的な節点変位の他、軌道変位計算用に各車軸位置でのレール変位を出力する。さらに、後述の信号処理モジュールの入力データとするため、124 および134 ACTIが計算される。

(2) 信号処理モジュール(LABOCS)

LABOCSの弦長および位相変換フィルタを用いて、前述の構造解析モジュールから得られた124 および134 ACTIは2つの10m SCTIに変換される。2つの10m SCTIの差分を計算することで、橋りょう変形成分と関連するDTIが得られる。DTIは桁たわみに比例するほか、荷重位置により変化しない構造変形以外の軌道変位(静的軌道変位)を除去する効果がある。

4. モデル線区での計算結果

(1) 計算条件

開発プログラムの動作を確認するためモデル線区での計算を行った。ここでは、実構造物を参考に支間長13mの鋼桁が7連続する区間(B1~B7)を想定した。鋼直結式の軌道をレールおよび軌道パッドによりモデル化した。車両は2両編成の試験車を想定し、1両目を軌道検測車(軸重:小)、2両目を気動車(軸重:大)とした。桁以外の区間では剛構造物上にレールと軌道パッドを設置した。

キーワード: 車上計測, 構造ヘルスマニタリング, 軌道変位, 高低検測差, 鉄道構造物

連絡先: 〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 情報解析 TEL042-573-7309

(2) DTI 算出までの計算過程

図4に橋りょう B1, B4 および B7 の支間中央たわみ波形を示す。横軸は軌道検測車の先頭車軸の位置である。各台車に対応した変位が生じる2両編成車両通過時の典型的なたわみ波形を確認できる。なお、同図および以降の図は橋りょう支間中央最大変位を1として標準化した縦軸で示す。

図5に、得られた車軸位置レール変位から DTI 算出までの処理を示す。なお横軸については、図5(a)では各車軸の橋りょう B1 進入時点を0、図5(b)～(d)においては2軸の橋りょう B1 進入時点を0としている。

- ① 図5(a)の車軸位置レール変位は、軌道検測車のみの荷重分である1・2軸に比べ、機関車の荷重分も載荷される3・4軸の方が特に桁通過後半で大きい。
- ② 図5(b)に車軸位置レール変位から計算された2つの ACTI を示す。ACTI は1・4軸に対する相対変位であるため、橋りょう B1・B7 区間では前後の剛支持箇所の影響により橋りょう B2～B6 と波形が異なる。このように、2台車検測車では橋りょう前後の区間の影響を受けることがわかる。
- ③ 図5(c)に LABOCS によるフィルタ処理で得られた2つの10m SCTI を示す。2つの ACTI の位相が修正され、差分可能となる。ここでも橋りょうに隣接した区間の影響により橋りょう B1・B7 区間と橋りょう B2～B6 では波形が異なることがわかる。
- ④ 図5(d)に2つの10m SCTI の差分により得られた DTI を示す。ここでは考慮していないが、現実では避けることのできない桁たわみ以外の軌道変位の影響が差分処理により除去される。

以上より、構築した桁たわみー軌道変位変換プログラムにより、FEM で作成した任意条件の橋りょうにおいて2台車検測車により得られた軌道変位からの桁たわみ推定に必要な DTI を算出できることを確認した。

既往研究では DTI から桁たわみへの変換に単連の梁理論を利用している。ここで、既往研究との相違を示す。

図6に、既往研究と同様の条件として橋りょう B4 以外の橋りょうを剛とし、橋りょう B4 のみの桁たわみを考慮した場合の結果と図5の結果とを合わせて示す。隣接橋りょうがない場合の DTI は隣接橋りょうありの場合に比べ、特に起点(進入)側の下側振幅が大幅に小さいことを確認できる。既往研究と同様に DTI の最大振幅から桁たわみを推定する場合、複数連の橋りょうに対して単連に基づく DTI を利用すると、桁たわみを過小評価する。構築した桁たわみー軌道変位変換プログラムでは、既存手法では考慮できない隣接橋りょうの影響を含んだ DTI を算出できることがわかる。

5. 結論

軌道検測車として一般的な2台車検測車で得られる軌道変位から橋りょうのたわみを推定するために、隣接橋りょうの影響を考慮可能な桁たわみー軌道変位変換プログラムを構築し、軌道変位からの桁たわみ推定に必要な DTI を算出できることを確認した。今後、本プログラムを基に DTI から FEM モデルパラメータを更新し、桁たわみを推定する逆解析手法の構築を進めていく。

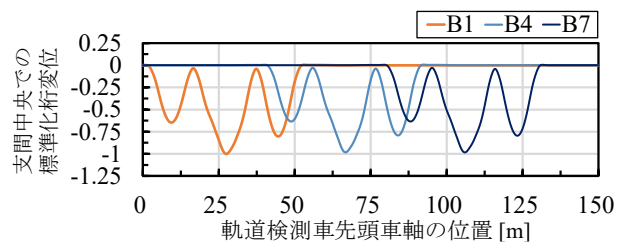


図4 橋りょう B1, B4 および B7 の支間中央変位

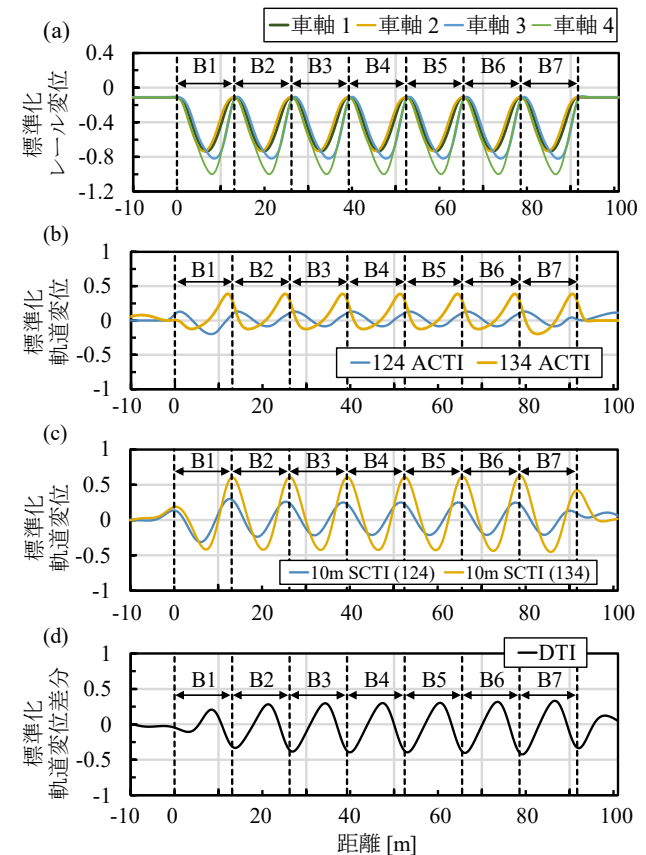


図5 DTI 算出までの計算過程：(a) 軌道検測車の車軸1～4の車軸位置レール変位、(b) 124 および 134 ACTI、(c) 124 および 134 ACTI から変換した 10m SCTI (124 および 134)、(d) DTI (SCTI (124) - SCTI (134))

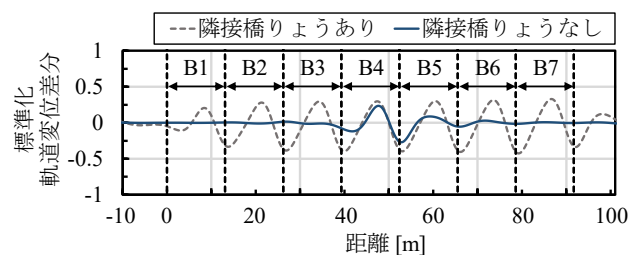


図6 隣接橋りょうの有無による DTI の比較

参考文献

- 1) 松岡弘大, 田中博文: 車上計測された軌道変位に基づく鉄道橋の準静的な桁たわみ推定法, 土木学会論文集, Vol. 79, No. 15, 22-15051, 2023.
- 2) 竹下邦夫: 軌道狂い検出手法に関する研究, 鉄道総研報告特別号, No.25, 1998.
- 3) 田中博文: 軌道保守管理データベースシステム LABOCS (ラボックス) の機能紹介と新バージョンのリリース, 新線路, Vol.69, No.7, pp.24-26, 2015.