

2 台車検測車で計測された軌道変位に基づく 複数連橋りょう群の桁たわみ推定法

服部 紘司* 松岡 弘大* 田中 博文**

**A Method for Estimating Bridge Deflection of Multi-bridge Section Based on Track Geometries
Measured by 2- Bogie Track Inspection Vehicle**

Koji HATTORI Kodai MATSUOKA Hirofumi TANAKA

A drive-by methodology for estimating bridge deflection based on the difference between two track geometries (DTG) has been proposed. Through numerical simulations, this paper demonstrates that the DTG in a section of consecutive simply supported bridges is equal to the sum of the DTG of each bridge. Based on this property, we propose a simultaneous estimation method for each bridge deflection using linear regression. On-site verification on five consecutive bridges indicates that the proposed method can estimate bridge deflection with an error of 3% or less, provided that the bearings are defect-free.

キーワード：車上計測，桁たわみ，軌道変位，隣接橋りょうの影響

1. はじめに

橋りょうなどの大量の構造物の効率的な維持管理を実現するため、センサ等を利用した構造ヘルスマニタリングが広く検討されてきた^{1)~11)}。鉄道分野では橋りょう性能に関する代表的指標である桁たわみ⁹⁾の構造ヘルスマニタリングが検討されており、特にレールのゆがみや凹凸を管理するため走行車両上から日常的に計測される動的軌道変位を活用した方法論の構築が進展しつつある^{12)~15)}。ここでの軌道変位は、レール長手方向の軌道変位の鉛直方向成分である高低変位を指す。以下軌道変位と記載した場合も同様とする。

ここで、列車荷重載荷時に計測される軌道変位を動的軌道変位と一般に呼び¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾、静的軌道変位と呼ばれるレールのゆがみや凹凸といった軌道の形状成分と、桁たわみなどの構造物の変形成分の2つを含む。このため鉛直方向の動的軌道変位を用いた橋りょうの構造ヘルスマニタリングでは、静的軌道変位と構造物の変形成分との分離が課題であった⁴⁾。松岡らは、先頭と最後尾車両など2箇所計測された動的軌道変位の差分により両者の共通成分として静的軌道変位を相殺することで、荷重条件の違いにより生じる橋りょう変形成分のみを抽出する方法論を提案している¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾。また、荷重条件の異なる2つの動的軌道変位差分が列車通過時の桁たわみ最大値に比例することを理論的に導出している¹²⁾。

走行する車両上から動的軌道変位を計測する方法は慣性法と差分法に大別される¹⁹⁾。前者は加速度の2階積分および加速度計測位置とレールの相対変位を用いて、後者は着目点の前後位置を結ぶ直線と着目位置の相対変位として、それぞれ動的軌道変位を計測する。既存の桁たわみ推定法は前者の慣性法により得られた動的軌道変位の利用を前提としている¹²⁾。一方、在来線を中心に広く利用されている2台車方式の検測車両は差分法に基づき動的軌道変位を計測する¹³⁾。差分法では慣性法と同様に桁たわみ以外の静的軌道変位が混在するほか、前後位置の構造物の変形が動的軌道変位の計測値に影響する¹³⁾。このため、在来線橋りょうの桁たわみを車上から推定するためには、既存の慣性法を前提とした桁たわみ推定法で採用さ

* 鉄道力学研究部 構造力学研究室

** 軌道技術研究部 軌道管理研究室

れる 2 つの動的軌道変位の差分による静的軌道変位の除去だけでは不十分であり、差分法で計測された動的軌道変位に混入する隣接構造物の変形成分の評価と分離手法を新たに構築する必要がある。

本研究では、隣接橋りょうの影響を考慮した動的軌道変位差分に基づく複数連の橋りょう桁たわみ一括推定法の構築を目的とする。まず、重ね合わせによる動的軌道変位差分計算の可否を調べるため、複数の単純桁が連続する橋りょう区間に対して、全橋りょうをモデル化した場合と、1 橋りょうのみをモデル化して算出した軌道変位を重ね合わせて作成した動的軌道変位差分とを比較する。次に、上記比較の結果を踏まえ、動的軌道変位差分の各橋りょう成分を基準波形とその振幅を制御する振幅パラメータの積として表現し、各橋りょう成分の線形結合により橋りょう区間全体の動的軌道変位差分を定式化する。これにより、複数の単純桁が連続する区間の橋りょう群の桁たわみ推定を、各橋りょうの振幅パラメータを未知パラメータとした線形回帰問題に帰着させ、各橋りょう桁たわみの一括推定を可能とする。最後に、実路線での有効性を検証するため、瀬戸大橋区間における支間長約 13m の単純支持縦桁 5 連が連続する区間で計測された動的軌道変位差分に提案手法を適用することで推定した結果を地上計測結果と比較し、推定精度を検証する。

なお、本稿は文献 20 を基に一部内容を削除し再構成したものである。手法の詳細については文献 20 を参照されたい。

2. 桁たわみと軌道変位の関係

2.1 2 台車検測車で得られる動的軌道変位の特徴

日本では、3 台車 6 軸の特殊な車軸配置を有する検測車両だけでなく、一般的な 2 台車 4 軸車両で差分法による計測が可能な 2 台車検測車が広く普及している¹³⁾¹⁹⁾。

図 1 に、2 台車検測車による軌道変位の計測原理を示す。動的軌道変位の評価には 2 台車を有する 1 車両内 4 車軸のうち 3 軸の相対変位である偏心矢軌道変位 (Asymmetrical Chord offset Track Geometry : ACTG) が利用される¹⁹⁾。なお、以下単に ACTG と呼ぶが、軌道の形状成分と構造物の変形成分の両方を含む動的軌道変位である点に留意されたい。

同図には 2 台車検測車で一般的に計測される、車軸 1 および車軸 4 の変位を 0 とした場合の車軸 2 および車軸 3 の相対変位である 124ACTG および 134ACTG の関係を示す。形状成分である静的軌道変位は 2 つの ACTGs で変化しないが、変形成分である橋りょうの桁たわみは車軸 2 と車軸 3 に対する車軸 1 と車軸 4 の配置の違いにより変化する。したがって、124ACTG と 134ACTG の差は、静的軌道変位の影響を除去したうえでの構造物の変形成分、すなわち荷重配置の違いに起因した橋りょうの桁たわみの違いを表す。

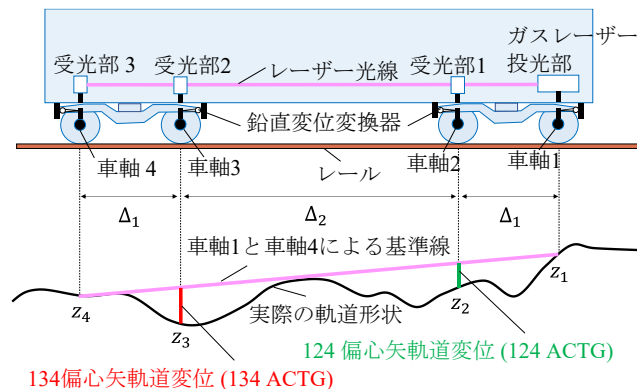


図 1 2 台車検測車による軌道変位の計測原理

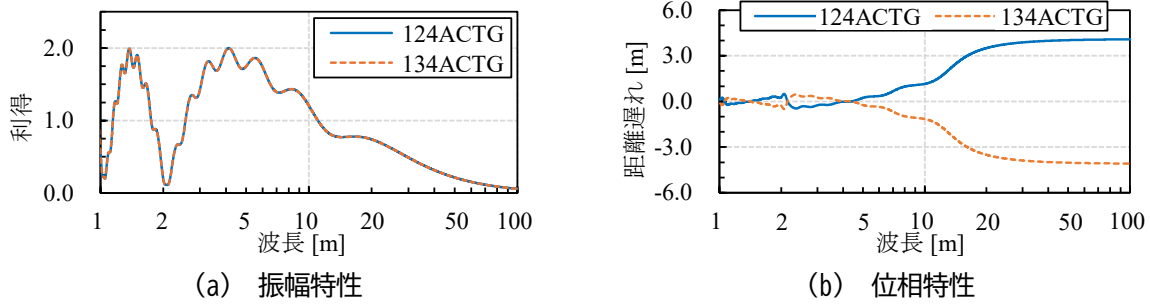


図2 2台車検測車で得られるACTGの検測特性

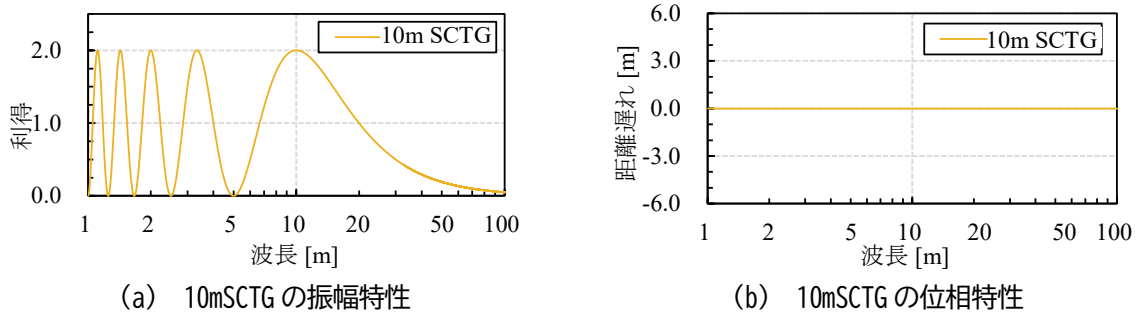


図3 10mSCTGの検測特性

図2に在来線で利用される一般的な2台車検測車（軸距 $\Delta_1 = 2.1\text{m}$ 、 $\Delta_2 = 12.3\text{m}$ （図1））における2つのACTGsの位相特性を示す。振幅特性は2つのACTGsで一致するが、位相は波長に応じて正負逆の遅れを有している。そのため、2つのACTGsの差分を計算するためには、ACTGの波長に応じた位相ずれ（距離遅れ）¹³⁾を除去する必要がある。ここで、2つのACTGsを位相がフラットな10m弦正矢軌道変位（10m Symmetrical Chord offset Track, Geometry：10mSCTG）に変換し位相特性を一致させれば、両者の差分を計算可能となる。

図3に、10mSCTGの検測特性を示す。ここで、10mSCTGは評価位置の前後5m位置の変位に対する相対変位であり、図3(b)に示すように10mSCTGではACTGで見られたような距離遅れがない性質を持つ。後述するフィルタ処理によりACTGから10mSCTGへ変換可能である。124ACTGおよび134ACTGを10m弦正矢に変換したものをそれぞれ10mSCTG(124)および10mSCTG(134)と呼び、これら2つの10mSCTGsの差分を動的軌道変位差分と呼ぶ¹³⁾。

こうして得られた動的軌道変位差分は、上述の原理から軌道変位の形状成分が除去された構造物の変形成分の一部であるため、桁たわみ推定における重要な指標となる。一方で、2台車検測車で得られる動的軌道変位差分は、対象とする橋りょう前後の構造物の変形の影響により、地上で計測される桁たわみとの単純な比例関係は成り立たない¹³⁾。

図4に、構造物の変形が差分法による動的軌道変位に与える影響を示す。差分法では、前後の基準位置のレール変位を結んだ線を基準線とし、基準線からレールまでの相対変位を計測位置での軌道変位として計測する。差分法は、軌道検測車の導入以前の人力で軌道変位計測と原理的に同じで、軌道の管理基準とも整合するため、先述した2台車検測車を含めた多くの軌道検測車が差分法に基づく計測方式を採用してきた。ただし、計測位置のほか、前後の基準位置において構造物の変形が生じる場合に、この影響が計測位置の軌道変位の評価値に影響する。同図の基準位置で構造物の変形が生じた場合、構造物の変形により基準線が下側に移動する。これにより計測位置でのレール鉛直変位に変化がないにも関わらず軌道変位は赤矢印から緑矢印へと変化する。

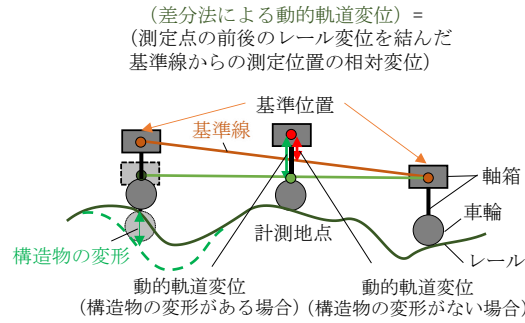


図4 構造物の変形が差分法による動的軌道変位に与える影響

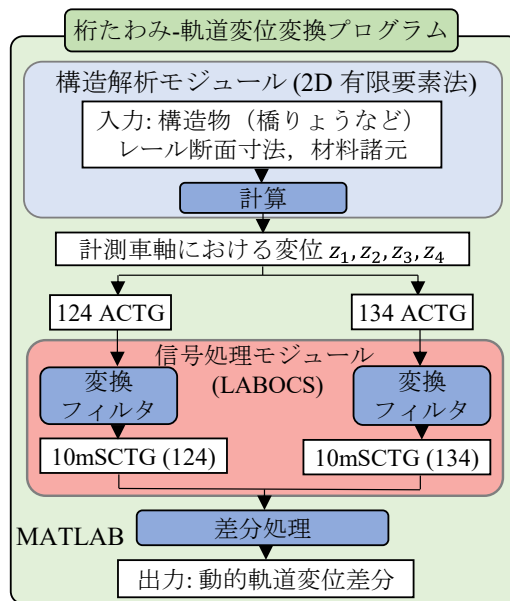


図5 桁たわみ - 軌道変位変換プログラム

以上の原理から、差分法により得られた動的軌道変位では、例えば計測位置が存在する橋りょうの桁たわみのほか、隣接橋りょうの桁たわみや橋台裏盛土の変形などが物理的に影響する。この影響が解明できれば桁たわみ推定法につながるため、次節において、動的軌道変位差分の橋りょうごとの独立性に着目した分析を行う。

2.2 隣接橋りょうの影響と独立性

動的軌道変位差分の橋りょうごとの独立性については文献 14 でも述べられているが、本研究での根幹となる内容であるのでここで再度詳述する。隣接橋りょうの影響に関する特徴を明らかにするため、桁たわみ-軌道変位変換プログラムと呼ばれるツールを利用した検討を行った。

図 5 に、桁たわみ-軌道変位変換プログラムの概要を示す。本プログラムは、構造解析モジュールおよび、軌道保守管理データベースシステム LABOCS²¹⁾を利用した信号処理モジュールから構成される。構造解析モジュールでは通常の有限要素解析と同様に、橋りょうとレールを 2D 有限要素によりモデル化し、軌道検測車と同じ軸配置と軸重を有する荷重列走行時の準静的な変位応答を計算する。出力結果として、4 つの車軸位置レール変位を記録し 1 軸と 4 軸に対する 2 軸位置の偏心矢軌道変位である 124ACTG および同 3 軸位置の偏心矢軌道変位である 134ACTG を計算する。その後信号処理モジュールとして LABOCS を呼び出し、124ACTG と 134ACTG に変換フィルタ処理を行い、位相特性がフラットな 2 つの 10m 弦正矢軌道変

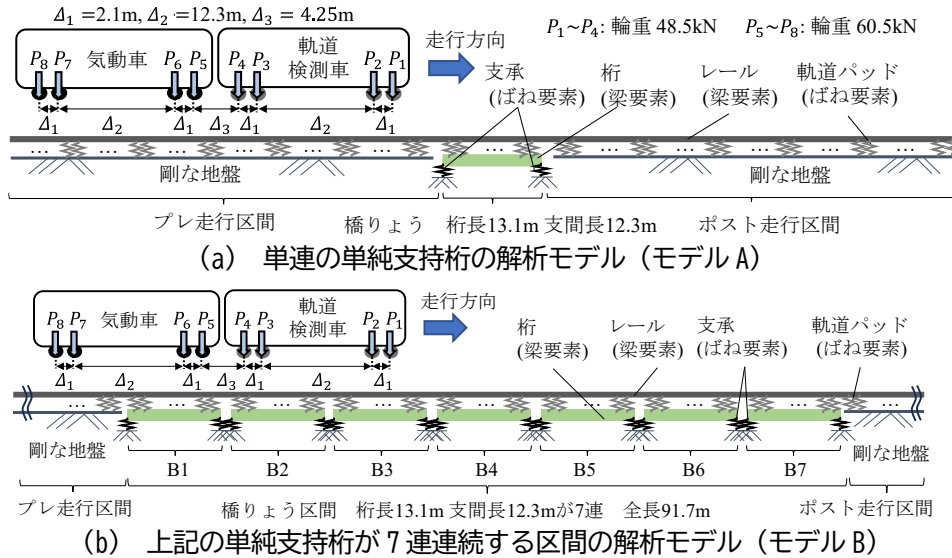


図6 軌道変位差分の橋りょうごとの独立性と重ね合わせに関する検討用モデル

表1 解析に用いた橋りょうおよび軌道の諸元

レールの曲げ剛性	$6.47 \times 10^6 \text{ (N} \cdot \text{m}^2)$
軌道パッドの鉛直ばね定数	$4.00 \times 10^7 \text{ (N/m)}$
桁の曲げ剛性	$1.41 \times 10^9 \text{ (N} \cdot \text{m}^2)$
支承の鉛直ばね定数	$1.00 \times 10^{11} \text{ (N/m)}$

位 (10mSCTG (124) および 10mSCTG (134)) が算出される。最後に、10mSCTG (124) および 10mSCTG (134) の差分を計算することで、静的軌道変位が除去され構造物の変形のみが含まれる軌道変位差分を出力する。

上記の計算ツールを用いて、図6に示す支間長 12.3m の単純支持桁のモデル A および B を用いて軌道変位差分の橋りょうごとの独立性と重ね合わせに関する分析を実施した。なお、当該橋りょうおよび車両は実在する在来線の単純支持桁連続区間を対象としたものである。ここでは、桁、レールを梁要素で、軌道パッド、支承をばね要素でモデル化している。表1に、解析に用いた橋りょうおよび軌道の諸元を示す。解析では、図中左から右へ二両編成の軌道検測車を模擬した荷重列を 0.1m ずつ移動させる準静的な計算を繰り返す。なお、解析の詳細は文献¹³⁾¹⁴⁾を参照されたい。

図7にモデル A で得られた軌道変位差分を示す。モデル A の結果では単連の単純支持桁にも関わらず、橋りょう区間以外でも小さくない軌道変位差分が生じる。モデル A により算出した単連の軌道変位差分を基準波形と呼び、モデル B と同様に位置をずらして7連分足し合わせる。図8はモデル A を7連分配置した結果を示す。ある1つの橋りょうに着目した場合でも1つ手前の橋りょうの軌道変位差分の影響を大きく受けることがわかる。図9はモデル A により算出した単連の軌道変位差分を重ね合わせた結果と単純支持桁7連分をモデル化したモデル B の軌道変位差分を示す。両者の軌道変位差分は良好に一致するため、隣接橋りょうの桁たわみが当該橋りょうの軌道変位差分に及ぼす影響は、隣接橋りょう単連の当該橋りょう位置における軌道変位差分が重畳したものである。したがって、高い計算負荷とモデル化労力を掛けてすべての橋りょうをモデル化する必要はなく、各橋りょうのモデルで計算した軌道変位差分を重ね合わせることで当該区間の軌道変位を再現できる。このような重ね合わせが可能であるといった性質は、各車軸でのレール変位計測から軌道変位差分までの処理がすべて線形変換であるために成立しており、本検討により初めて実証された。

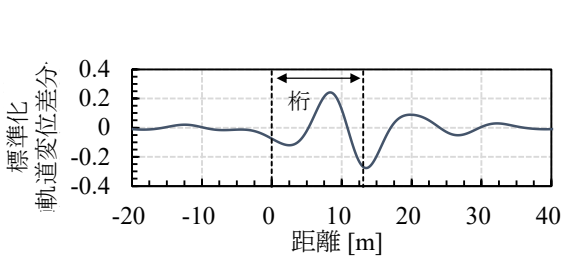


図7 モデルA (単連) の軌道変位差分

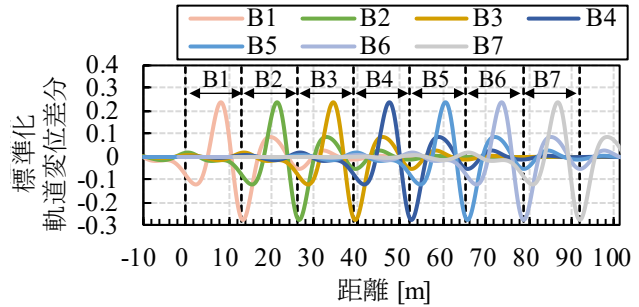


図8 モデルAの7連分の重ね合わせ

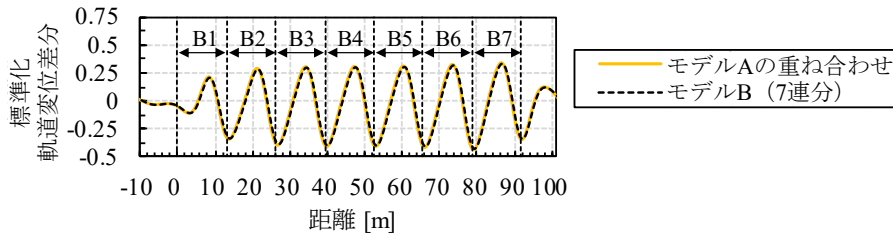


図9 軌道変位差分におけるモデルAの重ね合わせとモデルBの比較

以上より、少なくとも同じ支間長の桁が連続し、単純桁のように変形が橋りょう内で生じ線形性を持つ場合について、各橋りょうの桁たわみにより得られる基準波形は桁間で独立であり、1連の桁で算出した動的軌道変位差分の基準波形の重ね合わせにより複数連の橋りょう区間の動的軌道変位差分を再現できることを明らかにした。この特徴を利用することで複数連すべての橋りょうのFEMモデルを逆解析せずとも、各橋りょうの基準波形の振幅のみを求めることで桁たわみを推定できると考えられる。

3. 動的軌道変位差分に基づく桁たわみ推定手法

上記の通り、2台車検測車で計測された軌道変位差分が橋りょうごとに線形分離可能であれば、最小二乗法による線形回帰を用いて推定できる。 y を軌道変位差分が収納された $m \times 1$ の行ベクトル、 X を橋りょうごとに事前に解析して得られる軌道変位(図7の基準波形)から構成される $m \times n$ の特性行列、 a を各橋りょうの振幅パラメータを示す $1 \times n$ の列ベクトルとすると、

$$y = Xa \tag{1}$$

が成り立つ。ここで m は軌道変位のサンプル数、 n は橋りょう数である。

図10に、式(1)を構成する行列の要素について模式的に示す。特性行列 X は、基準波形 x_{ref} を1橋りょうあたりの軌道変位データ数 d_b だけ列方向にずらして橋りょう数 n 個分だけ配置する。ここでは、基準波形 x_{ref} のデータ数を r として $1 \times r$ の列ベクトルとしている。

式(1)において、 y, X を既知、振幅パラメータ a のみが未知とすると、複数連の橋りょう区間の桁たわみ推定問題は、被説明変数 y と説明変数 X の線形回帰問題となるため、 a の推定値を \hat{a} とすると、

$$\hat{a} = (X^T X)^{-1} X^T y \tag{2}$$

として求められる。基準波形の振幅は各橋りょうの桁たわみに比例するため、基準波形の大きさは各桁の桁たわみの大きさ(以下、 b とする)に比例するため、推定された \hat{a} に対して基準波形を算出した際の桁た

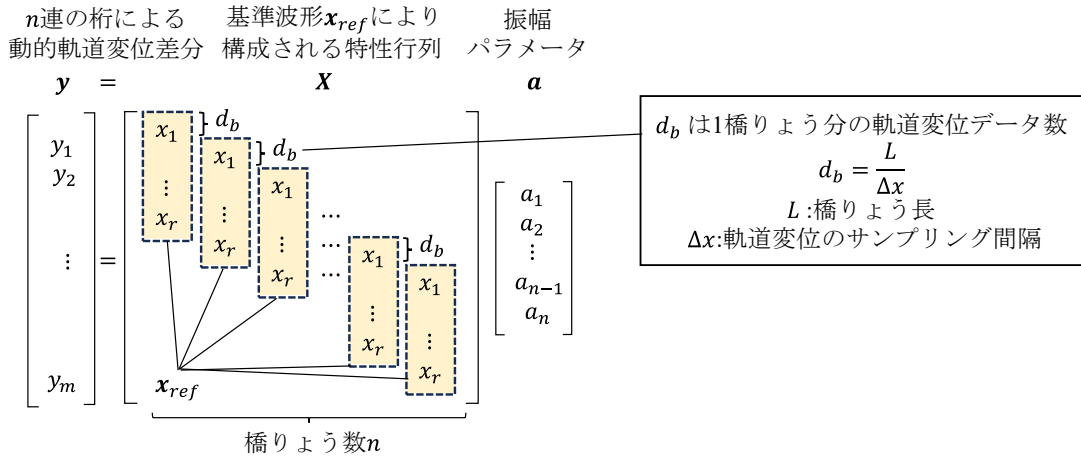


図 10 式(1)を構成する行列の要素

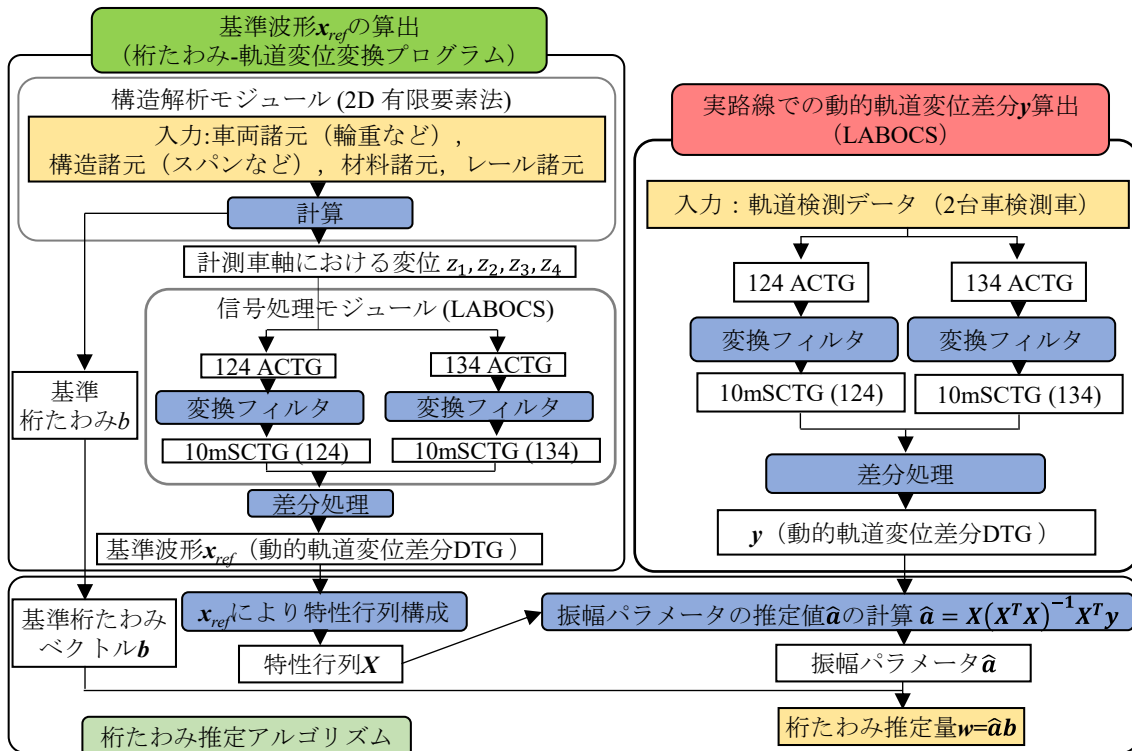


図 11 複数連の橋りょう区間における桁たわみの一括推定法の全体フロー

わみ b を乗じることで各桁の桁たわみを推定できる。ここで、桁たわみの推定値を以下 w とする。また、橋りょう種別と支間長が同じ場合には、推定された \hat{a} の各要素の比は桁たわみ最大値の比もしくは桁剛性の比と等価である。

図 11 に、今回提案する複数連の橋りょう区間における桁たわみの一括推定法の全体フローを示す。まず、図中左に示すように、桁たわみ-軌道変位変換プログラムにより対象とする橋りょうの諸条件を入力として基準波形 x_{ref} を算出する。同時に、構造解析モジュールから出力される桁たわみを基準桁たわみ b として記録する。その後、対象区間の支間長・橋りょう数に応じて、基準桁たわみベクトル b を基準桁たわみ b を用いて構成し、特性行列 X を基準波形 x_{ref} を用いて構成する。続いて、図右上で実路線での動的軌道変位差分 y の算出過程を示す。2 台車検測車で計測された軌道検測データをもとに、軌道保守管理データベースシステム LABOCS により動的軌道変位差分 y を算出する。以上の処理により、特性行列 X と動的軌道変位差

分 y が得られるため、式(2)に基づき、橋りょうの振幅パラメータの推定値 \hat{a} を求める。その後、振幅パラメータの推定値 \hat{a} に基準桁たわみベクトル b を乗じることで、たわみの推定値 w が得られる。

4. 実路線での検証

4.1 検証橋りょう

提案した桁たわみ一括推定法の実路線での有効性と精度を検証するために、瀬戸大橋区間において連続的に敷設されている鉄道縦桁²²⁾²³⁾を対象とした検討を実施した。瀬戸大橋では、同じ支間長・諸元の縦桁が数100連続して敷設されており、桁たわみの差異から推定される桁剛性の差異の評価が補修や検査の優先順位付けとして維持管理実務の効率化に直結する²²⁾。ここでは検証区間として、橋長13.1m、支間長12.3mの縦桁5連が隣接する区間を選定し、当該区間で過去に2台車検測車により計測された軌道変位に提案手法を適用して5連の桁たわみを一括推定するとともに、地上での桁たわみ計測試験を実施し、提案手法の桁たわみ推定精度を検証する。

図12に縦桁5連からなる橋りょう区間の概要を示す。当該橋りょうは単線桁であり、対象桁を含む5連の桁種別はいずれも鋼2主デッキガーダー形式²³⁾である。5連の桁は、列車進入側からT5、T4、…、T1と呼称する。軌道は鋼橋直結III型軌道であり、レールが軌道パッドを介して鋼桁上フランジに締結されている。支承は線支承であり、列車進入側が固定、列車退出側が可動となっている。なお、5連の桁にはいずれも顕著な腐食やき裂などの変状は確認されていない。また、本区間は瀬戸大橋区間における全長約1.6kmの吊橋の中央付近に位置している。

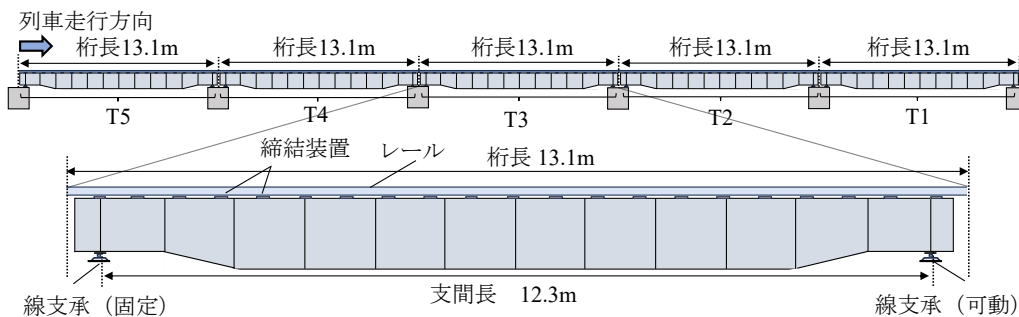


図12 測定対象橋りょうの模式図

4.2 桁たわみ一括推定法の適用結果

当該区間を走行する2台車検測車は1両目が軌道検測車、2両目が気動車となる2両編成で構成され、車軸配置は2章で示したとおりである。列車速度は約50km/hである。2台車検測車により計測された軌道変位は、地上子との通信記録をもとに位置が同定された後、0.25m刻みの距離系列データに変換される。計測された2つのACTGsである124ACTGと134ACTGは、桁たわみ-軌道変位変換プログラムと同様の変換フィルタにより、10mSCTG(124)および10mSCTG(134)に変換される。2つの10mSCTGsの差分をとることで、桁たわみ一括推定法を適用する動的軌道変位差分が算出される。また、今回の分析では軌道変位に含まれる長波長成分は不要であるため、波長25m-30mを遷移帯域としたフィルタにより概ね30m以上の波長を有する軌道変位を除去した。

図13に、桁たわみ推定手法の実路線検証結果を示す。図(a)に当該区間を走行した軌道検測車で得られた

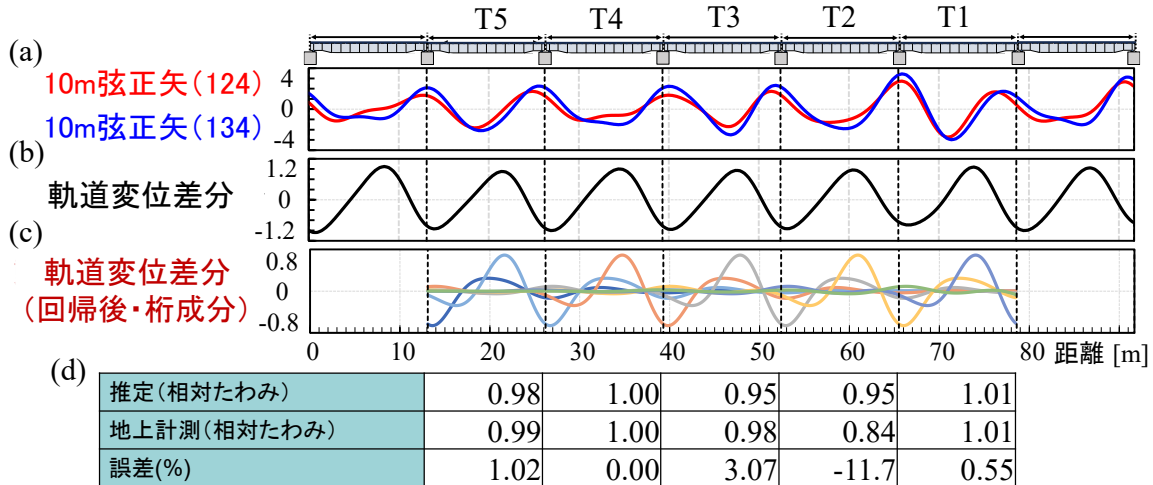


図 13 実路線における 5 連の単純支持桁での検証結果

2 つの偏心矢軌道変位から算出した 10mSCTG (124) および (134)を示す。桁たわみ以外の静的軌道変位が混在している影響により、同じ諸元の桁 T5~T1 であっても振幅および最大値が異なる。図(b)に、(a)の 2 つの 10m 弦正矢の差分である軌道変位差分を示す。軌道変位差分では静的軌道変位の影響は相殺され、波長や特徴がおおむね等しい波形が各橋りょうで得られる。図(c)に、提案した橋りょう群の桁たわみ一括推定手法により算出した橋りょうごとの軌道変位差分の成分を示す。図(d)に、桁 T1 から T5 の 5 連における桁たわみの推定結果、地上計測結果およびそれらの誤差を示す。なお、本検証では、T4 の桁たわみ基準とした相対たわみにより推定手法の精度を検証した。誤差は最大で桁 T2 の-11.7%であるが、その他は誤差 3%程度で桁たわみを推定できている。したがって、実路線でも本手法により隣接橋りょうの影響を考慮したうえで桁たわみを一定精度で推定できることがわかる。

なお、誤差が 12%程度生じた橋りょうは支承部に浮きが生じていることを地上計測により確認している。当該橋りょう支承部の振幅も他橋りょうに比べて小さい。支承浮きは今回の基準波形では考慮していないために誤差が増加した可能性が指摘できる。逆に言えば、この誤差と支承浮きの関係性を解明できれば、軌道変位差分により支承浮きを検知できる可能性がある。

5. まとめ

本研究では、計測値に隣接橋りょうの変形の影響が混入するため、これまで桁たわみ推定に利用できなかった 2 台車検測車で得られる動的軌道変位差分に着目し、隣接橋りょうの影響評価を含む桁連続区間の桁たわみ一括推定法を提案した。主な結果を以下にまとめる。橋りょう(支間長約 12m)連続区間の軌道変位差分が各単一橋りょうの軌道変位差分の重ね合わせであることを数値解析により明らかにし、各橋りょうの桁たわみの大きさと軌道変位差分の関係を定式化した。

- ・事前に計算した各橋りょう単一の軌道変位差分を説明変数とした線形回帰により隣接橋りょうの影響を考慮して、各橋りょう桁たわみを一括推定する方法を提案した。
- ・実際の長大橋区間における隣接 5 連の橋りょう通過時に計測された軌道変位差分に提案手法を適用し、各橋りょうの相対的な桁たわみを推定した。
- ・推定結果と地上計測結果を比較することで、橋りょう支承にあおりが無い場合、提案手法は地上計測と誤差 3%以内で各橋りょうの相対的な桁たわみを推定できることを実証的に示した。

今後の課題は以下である。

- ・実路線での検証においては支承あおりが存在する場合に桁たわみの推定精度が低下した。今後、別途開発を行っている支承あおり推定法との併用により、支承あおりを考慮した桁たわみ推定法を構築する必要がある。
- ・本研究では60km/h程度までの走行速度を前提としたため、橋りょうの動的応答²⁴⁾や走行車両の輪重変動²⁴⁾の影響は十分に小さいと仮定した。今回の結果にはこれらの影響は確認されていないが、今後、より高速で走行する場合を見据え、数値解析などによる検証が必要であると考え。
- ・本研究では実務的要請の高い特定の橋りょう区間を対象としたが、異なる支間長の橋りょうが連続する場合や、連続桁、橋りょうの前後に盛土区間を含む場合²⁵⁾など、より一般的な条件での提案手法の適用性を検討していく必要がある。

また、支間長が長い場合にはそもそもの桁たわみに対する動的軌道変位差分の感度が低下するため、適用範囲に制限が存在する可能性が高い¹⁵⁾。また、支承あおりの影響の検討においては本研究で対象とした片側レールだけでなく左右レールの変位差も重要な指標となる可能性がある。これらの課題については現在、別途検討を進めており、結果が整理でき次第、別稿にて論じることとしたい。

謝 辞

本研究の一部はデジタル技術を用いた設備等のメンテナンスに関する四国旅客鉄道株式会社・公益財団法人鉄道総合技術研究所による共同研究の一環として実施された。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

文 献

- 1) Fujino, Y. and Siringoringo, D. M.: Bridge monitoring in Japan: the needs and strategies, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.7, No. 7-8, pp. 597-611, 2011.
- 2) 小林潔司, 貝戸清之, 松岡弘大, 坂井康人: 時系列モニタリングデータ活用のための長期劣化進行モデリング, 土木学会論文集 F4(建設マネジメント), Vol.70, No.3, pp.91-108, 2014
- 3) Yang, Y. B., Lin, C. W. and Yau, J. D.: Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 272, No. 3-5, pp. 471-493, 2004.
- 4) Hester, D. and González, A.: A discussion on the merits and limitations of using drive-by monitoring to detect localized damage in a bridge, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 90, pp. 234-253, 2017.
- 5) Nagayama, T., Reksowardojo, A. P., Su, D. and Mizutani, T.: Bridge natural frequency estimation by extracting the common vibration component from the responses of two vehicles, *Engineering Structures*, Vol. 150, pp. 821-829, 2017.
- 6) Bernardini, L., Matsuoka, K. and Collina, A.: Indirect frequency estimation by time-shifted accelerations subtraction: generalization of the methodology and numerical application on a Warren truss bridge, *Journal of Sound and Vibration*, 118491, 2024.
- 7) 松岡弘大, 貝戸清之, 徳永宗正, 渡辺勉, 曾我部正道: 走行列車の車軸加速度応答を用いた橋梁振動特性の抽出, 土木学会論文集 F4(建設マネジメント), Vol.68, No.3, pp.175-192, 2012
- 8) Matsuoka, K., Kaito, K. and Sogabe, M.: Bayesian time-frequency analysis of the vehicle-bridge dynamic interaction effect on simple-supported resonant railway bridges. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 135, 106373, 2020.
- 9) Tokunaga, M.: Displacement response waveform restoration of simply supported bridge during train passage using measured acceleration integration based on linear vibration theory, *Structures*, Vol.64, 106462, 2024.
- 10) Matsuoka, K., Tanaka, H., Kawasaki, K., Somaschini, C. and Collina, A.: Drive-by methodology to identify resonant bridges using track irregularity measured by high-speed trains, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 158, 107667, 2021.
- 11) 松岡弘大, 川崎恭平, 田中博文, 常本瑞樹: 高速鉄道車両の車体上下加速度を利用した車上からの共振橋梁の検知手法, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 77, No. 1, pp. 146-164, 2021
- 12) 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
- 13) 服部紘司, 松岡弘大, 田中博文: 軌道変位に基づく桁たわみ推定のための桁たわみ-軌道変位変換プログラムの構築, 土木学会論文集, Vol.80, No.15, 23-15047, 2024
 - 14) 服部紘司, 松岡弘大, 田中博文, 軌道変位に基づく桁たわみ推定における隣接橋りょうの影響, 第 30 回鉄道技術連合シンポジウム (J-Rail2023) 講演概要集, pp. 134-137, 2023
 - 15) 松岡弘大, 服部紘司, 田中博文: 2 台車検測車で計測される高低検測差による鉄道橋たわみ推定法と実路線検証, 土木学会論文集, Vol.81, No.15, 24-15016, 2025
 - 16) 楠田将之, 松本麻美, 片岡宏夫: 軌道変位データに基づく浮きまくらぎ検出手法, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.74, No.2, pp.I_543-I_551, 2018
 - 17) Grassie, S. L.: Measurement of railhead longitudinal profiles: a comparison of different techniques, *Wear*, Vol. 191, No. 1-2, pp. 245-251, 1996.
 - 18) 吉村彰芳, 吉田康夫, 細川岳洋, 菊地勝浩: 軌道保守管理データベースシステム: マイクロ LABOCS-II+ の開発, 鉄道総研報告, Vol. 6, No. 11, pp.69-78, 1992.
 - 19) 坪川洋友: 車両からの軌道検測技術, 計測と制御, Vol.56, No.2, pp.105-110, 2017
 - 20) 服部紘司, 松岡弘大, 田中博文, 矢野貴洋: 2 台車検測車で車上計測された軌道変位差分に基づく複数連橋りょう群の桁たわみ一括推定法, 土木学会論文集, Vol. 81, No. 5, 24-00262, 2025
 - 21) 竹下邦夫, 矢澤英治: 慣性正矢法による軌道狂い検測装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.14, No.4, pp.25-30, 2000.
 - 22) 矢野貴洋, 岩本啓貴, 宇野匡和, 立花拓也, 松岡弘大: 鉄道土木系設備の保守効率化のための実態調査と課題, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.28, No.1, pp.124-127, 2024
 - 23) 櫛谷拓馬, 松岡弘大, 梶原和博, 成田顕次, 渡辺勉, 田中博文, 森健矢: 多点加振による I 形断面鋼鉄道橋の高次部材振動モードの同定と列車走行時の動的挙動, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 78, No. 2, pp. 269-286, 2022
 - 24) 徳永宗正, 松岡弘大, 池田学: 軌道変位の不確実性を考慮した鉄道橋りょうの列車通過時動的応答, 構造工学論文集 A, Vol. 68, pp. 146-157, 2022
 - 25) 保木本晟也, 松岡弘大, 服部紘司, 矢野貴洋, 四井陽貴: 複数カメラを利用した列車通過時の橋台裏レール変位分布の画像計測, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.28, No.1, pp.92-99, 2024