

数値解析による車上計測された軌道変位に 橋りょう支承あおりが及ぼす影響評価

服部 紘司* 松岡 弘大** 田中 博文***

Evaluation of the Effect of Loose Bearing of Bridge on Onboard Measured Track Geometry Using Numerical Analysis

Koji HATTORI Kodai MATSUOKA Hirofumi TANAKA

The occurrence of a bearing loosed with a gap in steel bridges is visually detected in situ, which is quite labor intensive. This study investigated the effect of a loose bearing on track geometry using a developed numerical calculation method as a basic investigation of detecting a loose bearing using the track geometry. A non-linear spring representing the loose bearing has been introduced into the existing calculation tool identifying the loaded track geometry considering the structural deformation. The result of the above simulation clarified that the displacement of the loose bearing appears on the track geometry as a local fluctuation with a half wavelength of about 5 m, regardless of the amount of loose.

キーワード：車上計測，橋りょう，支承あおり，軌道変位，軌道検測車

1. はじめに

鋼鉄道橋の維持管理では、支承のあおり¹⁾（以下、支承あおり）の検知が重要な検査項目の一つとなっている。支承あおりとは、杓座モルタルの損傷や杓の沈下、腐食や摩耗により、ソールプレートと下杓の間や、下杓と杓座の間に発生した隙間が、列車通過時につぶれてあおられる現象のことをいう。支承あおりにより、支承部や周辺部材の応力増大、これに伴う疲労亀裂発生、ボルト緩みの発生などが懸念される²⁾。このため、支承あおりの発生有無や状態を適切に検知・監視し、必要に応じて措置を行う必要がある³⁾。

支承あおりは桁下からの目視検査により検知されているが、多大な時間と費用を要する⁴⁾。また、支承あおりの有無は列車通過時の支承の動きから判断されるため、列車本数の少ない線区では待機時間が多く、検査に時間を要する。このようにコストのかかる支承あおりの目視検査を省力化するため、これまで桁下へ設置したセンサを利用した検知手法の開発などが行われてきた^{5) 6)}。一方、鋼鉄道橋は在来線において標準桁として多く建設された時代もあったため、現在でも膨大な数が存在する⁷⁾。このため、桁下への機器設置には依然として膨大な費用と手間を要する。

他方、走行する車両上のセンサにより車上計測されたデータから通過した橋りょうの性能を評価する研究が近年進展している⁸⁾。過去の研究ではレールの凹凸やゆが

みなどの静的軌道変位の除去と構造物変形成分の抽出が課題とされてきたが、車上計測された複数データに基づく松岡らの理論⁹⁾によりその一部が解決された。それにより車上計測された軌道変位から橋りょう共振状態や桁たわみの推定手法が開発され、実務で活用されている^{10) ~14)}。これらの手法は主に高速鉄道が対象であったが、近年では在来線を対象とした車上計測データの活用も検討が進みつつある。服部ら^{15) 16)}は多くの在来線で軌道検測に用いられる2台車方式の軌道検測車（以下、2台車検測車）で得られる2つの軌道変位を用いた桁たわみ推定法構築のため、橋りょう変形から動的軌道変位を算出する桁たわみ-軌道変位変換プログラムを開発した。また、これにより2台車検測車による桁たわみ推定で課題であった隣接橋りょうの影響を評価した。

上述の軌道変位を用いた桁たわみ推定法を改良し、車上計測された軌道変位から通過した橋りょうの支承あおりを検知できれば、桁下からの検査を大幅に省力化できる。ただし、軌道変位などの車上計測データによる支承あおりの検知は、これまでほとんど検討されておらず、そもそも支承あおりが軌道変位に及ぼす影響も解明されていない¹⁷⁾。このため、支承あおり挙動と軌道変位への影響および特徴を明らかにし、その特徴を利用して支承あおりの検知手法を構築していく必要がある。

以上を踏まえ、本研究では2台車検測車で得られる軌道変位から支承あおりを検知する手法構築のための基礎的検討として、まず、支承あおりを表す非線形ばねを考慮できるよう既存の桁たわみ-軌道変位変換プログラムを拡張する。つぎに、拡張した変換プログラムにより支間長12.3mの鋼鉄道橋を対象とした数値解析を行い、車

* 鉄道力学研究部 構造力学研究室

** 情報通信技術研究部 情報解析研究室

*** 軌道技術研究部 軌道管理研究室

両通過時の支承あおり挙動と軌道変位に及ぼす影響を明らかにする。具体的には、支承のばね変位、得られる軌道変位およびその波長の特性を分析する。なお、本稿は文献 18 を基に一部内容を削除し再構成したものである。

2. 検討方法

2.1 既存の解析方法

軌道変位から構造物の変形を計算できる、既存の桁たわみ-軌道変位変換プログラム¹⁵⁾について説明する。

図 1 に桁たわみ-軌道変位変換プログラムの計算フローを、図 2 に 2 台車検測車による軌道変位計測について示す。本プログラムは、図 2 に示す 2 台車検測車で計測される 2 つの軌道変位、すなわち 124 軸で計測される偏心矢軌道変位（以下、124 偏心矢軌道変位）と 134 軸で計測される偏心矢軌道変位（以下、134 偏心矢軌道変位）とが異なる荷重条件で計測されていることに着目し、その差分から桁たわみを推定するために構築した¹⁵⁾。

本プログラムは、2次元有限要素法（2DFEM）による構造解析モジュールと、軌道保守分野で用いられる軌道保守管理データベースシステム LABOCS¹⁹⁾ による信号処理モジュールの 2 つから構成され、数値解析ソフトウェアである MATLAB により全体制御を行う。構造解析モジュールでは、通常の FEM と同様に、ばねや梁などの 2D 要素により構造物をモデル化し、2 台車検測車と同じ軸配置と軸重を有する荷重列が走行した際の構造物の応答を計算する。なお、本構造解析モジュールは構造物の動的応答の影響は小さいと仮定し、荷重列の位置を少しずつ移動させて静的解析を繰り返すことで模擬的に車両通過時の構造物の応答を算出している。また、上記の動的および静的は Dynamic と Static の意味であり、後述する動的軌道変位および静的軌道変位で用いられる動的（Loaded）と静的（Unloaded）とは異なることに留意されたい。結果として 2 台車検測車で得られる 4 つの車軸位置レール変位から、動的軌道変位である 124 および 134 偏心矢軌道変位を計算する。124 および 134 偏心矢軌道変位は位相差が存在するため、これらをフィルタ処理により位相差のない 10m 弦正矢（124）軌道変位および 10m 弦正矢（134）軌道変位に変換する。図 3 に偏心矢から 10m 弦正矢軌道変位への変換フィルタの特性を示す。なお、今回は計算の対象としないが、桁たわみと 1 次関数の関係にある動的軌道変位を算出するために 10m 弦正矢（124）軌道変位と 10m 弦正矢（134）軌道変位の差分を計算して動的軌道変位差分を出力する機能を有する。一方、予備解析の結果、支承あおり挙動は車軸通過ごとの違いが小さいため、動的軌道変位差分への影響もわずかであった。このため、本論文では 10m 弦正矢軌道変位に着目した検討を進める。この場

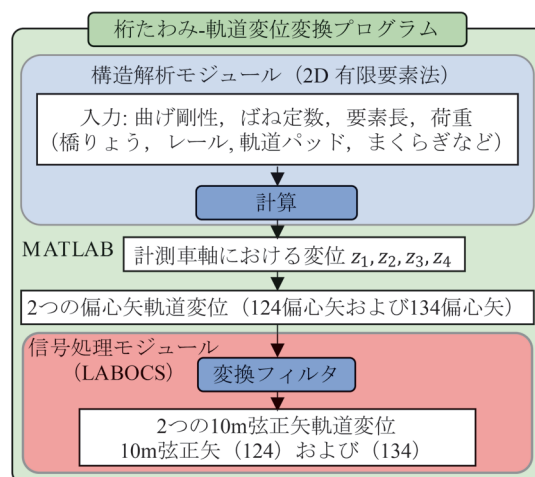


図 1 桁たわみ-軌道変位変換プログラムの計算フロー

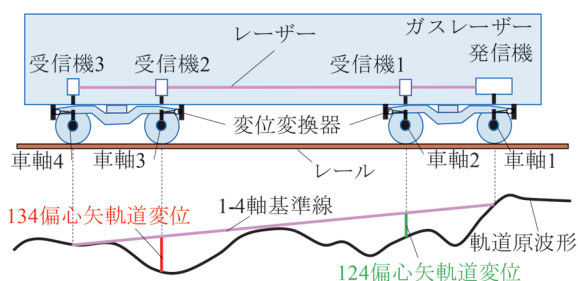


図 2 2 台車検測車による軌道変位計測

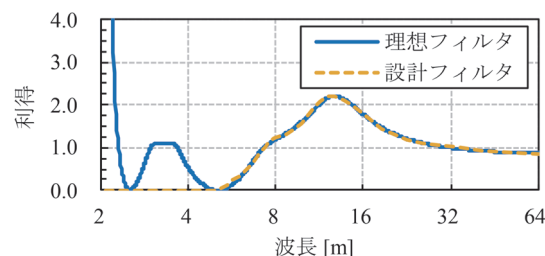


図 3 偏心矢軌道変位から 10m 弦正矢軌道変位への変換フィルタの特性

合、動的軌道変位差分では差分により除去される静的軌道変位を、10m 弦正矢軌道変位から別途除去する必要があるが、この点は 4 章にて詳述する。

2.2 変換プログラムの拡張：支承あおりの考慮

既存の桁たわみ-軌道変位変換プログラムの構造解析モジュールに非線形ばねを導入し、支承あおりを表現できるように拡張する。本論文では、あおりが発生している支承部の隙間のことを総称して浮きと呼びモデル化する。浮きがある場合は支承部の剛性が低い、荷重により浮きがつぶれると、浮きのない支承と同じ剛性に戻ると考えられる。そのため、1 つの折れ点を持つバイリニアの非線形ばねでモデル化する。今後開発を予定する逆

解析での計算量を抑えるため、上記非線形ばねを含む剛性方程式の解法として、収束計算を要さない以下の手法を用いた。また、以下では鉛直方向の荷重・変位を考える。

まず、1次剛性 k_1 および2次剛性 k_2 を有するバイリニア非線形ばねのうち1次剛性 k_1 のみを考慮した剛性行列 K_1 を作成し、剛性方程式から式(1)により外力ベクトル F が作用した際の全節点の仮の変位量 x^* を算出する。

$$x^* = K_1^{-1}F \quad (1)$$

x^* のうちの非線形ばねの両端節点の相対変位から、非線形ばねの仮の変位（非線形ばねが1次剛性 k_1 で線形だった場合の変位） δ^* が得られる。非線形ばねの折れ点変位を δ_1 とし、非線形ばねの仮の変位 δ^* との比 r を式(2)と定義する。

$$r = \frac{\delta^*}{\delta_1} \quad (2)$$

なお、 $r < 1$ の場合、非線形ばねは2次剛性領域に達せず、式(1)で得られた変位量 x^* が解となる。以降では $r \geq 1$ の場合における計算方法を示す。

ここまでの計算は線形系であるため、非線形ばねが折れ点に達するのに必要な外力ベクトル F_1 は、変位の比 r により式(3)として計算できる。

$$F_1 = \frac{F}{r} \quad (3)$$

この外力ベクトル F_1 が作用したとき、非線形ばねはちょうど折れ点に達する変位を有する。このときの全節点の変位ベクトル x_1 は式(4)から求まる。

$$x_1 = K_1^{-1}F_1 \quad (4)$$

$r \geq 1$ であるため荷重 F_1 は F の一部である。このため、外力ベクトル F から F_1 を除いた残りの荷重 F_2 に対応した変形を追加で算出する。荷重 F_2 は式(5)となる。

$$F_2 = F - F_1 = F - \frac{F}{r} = \frac{r-1}{r}F \quad (5)$$

非線形ばねの変位は F_1 载荷時点で折れ点変位 δ_1 となっているため、 F_2 が作用した際には非線形ばねの2次剛性のみが有効となる。このため、剛性行列 K_1 における1次剛性 k_1 を2次剛性 k_2 に変更した剛性行列 K_2 を用いて非線形ばねが δ_1 に達したのちの全節点の変位量 x_2 を

$$x_2 = K_2^{-1}F_2 \quad (6)$$

として計算できる。これを x_1 に加えることで、最終的な全節点の変位量 x' が式(7)により計算できる。

$$x' = x_1 + x_2 = K_1^{-1}\frac{F}{r} + K_2^{-1}\frac{r-1}{r}F \quad (7)$$

図4に、モデル化するバイリニアの非線形ばねの荷重変位関係を示す。ここで、図中の P 、 P_1 は荷重列がそれぞれ F 、 F_1 の時にばねに作用する荷重、 δ はばねの2次剛性を考慮した上での最終的なばねの変位量を表す。

2.3 解析対象

支承あおりが軌道変位に及ぼす影響を分析するうえで、支間長や曲げ剛性をパラメータとした解析も考えられるが、本研究ではすでに検知手法を適用したい実橋りょう区間を想定しているため、当該箇所⁷⁾を対象としたモデルによる検討を行うこととした。

図5に本研究で対象とした橋りょう区間のFEMモデルを示す。橋長13.1m、支間長12.3mの単純桁（鋼橋）

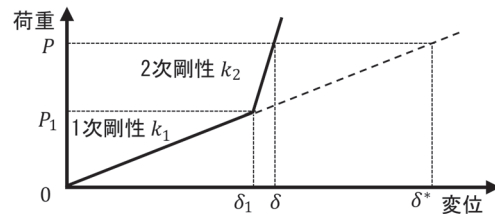


図4 モデル化するバイリニアのばねの荷重 - 変位関係

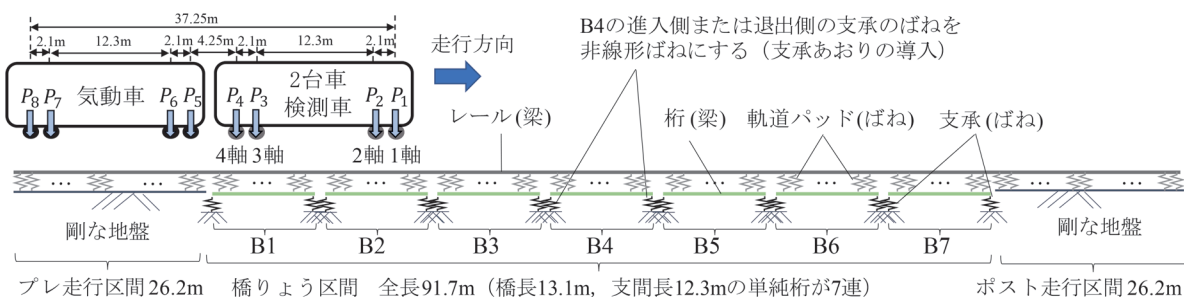


図5 本研究で解析対象とした橋りょう区間のFEMモデル

が連続する実在区間を想定し、そのうち7連の橋りょうをモデル化した。橋りょうを左から順にB1, B2, …, B7と呼ぶ。支承あおりを表す非線形ばねは中央のB4の列車進入側または退出側に配置した。軌道検測車は、当該区間を走行する2両編成列車を想定し、走行方向に対して1両目を2台車検測車、2両目を軌道検測車に付随する気動車としている。レール、橋りょうは片側のみをモデル化しており、荷重列は軌道検測車の静的な輪重を1レール分に換算した値を用いた。橋りょうとレールは梁要素、軌道パッドと橋りょう支承はばね要素によりモデル化した。FEMは鉛直成分のみのモデル化としたため、支承部の水平方向変位はモデル化していない。

表1に用いた橋りょうおよびレールの諸元を示す。桁とレール諸元は図面から、軌道パッドの剛性は材料試験結果²⁰⁾から設定した。

最左の橋りょうB1の左端から約25mの地点を先頭車軸の初期位置とし、図中右に0.1mずつ移動させ、最後尾荷重が最右の橋りょうB7を退出するまで、準静的な計算を繰り返した。各荷重位置における橋りょうの変位および車軸位置レール変位が記録され、124および134偏心矢軌道変位を算出した。さらに2つの偏心矢軌道変位から変換フィルタにより、10m弦正矢(124)軌道変位および10m弦正矢(134)軌道変位を算出した。

2.4 解析ケース

当該区間における支承あおり挙動と軌道変位に及ぼす影響を把握するため、中央の橋りょうB4を対象に、折れ点変位で表される支承の浮き量および進入側・退出側を変えて解析を行った。具体的には「浮きなし」に加えて、進入側もしくは退出側でそれぞれ浮き量1mm, 2mm, 5mmとした計7ケースで解析を実施した。図6に、支承あおりを表す非線形ばねの荷重変位関係を示す。2次剛性は浮きのない支承の剛性と同じように 1.0×10^{11} (N/m)とした。1次剛性の実態は不明な点が多い

表1 解析に用いた橋りょうおよびレールの諸元

レールの曲げ剛性	6.47×10^6 (N・m ²)
軌道パッドの剛性	4.00×10^7 (N/m)
桁の曲げ剛性	1.41×10^9 (N・m ²)
通常の支承の剛性	1.00×10^{11} (N/m)

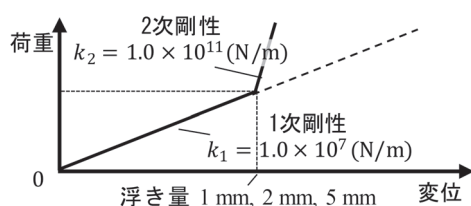


図6 解析で用いた非線形ばねの荷重変位関係

ため、通常の支承の支持剛性よりも剛性が十分小さくなるよう 1.0×10^7 (N/m)と設定した。浮き量について、鉄道構造物等維持管理標準¹⁾によれば走行安全性に支障する場合にAA判定となるが、具体的な浮き量の記載はない。支承変位に対する走行安全性に関しては鉄道構造物等設計標準・同解説の橋りょう編²¹⁾において軌道面の鉛直目違いとして整理されており、在来線における複数連条件での桁端目違いの設計限界値は4mmとなっている。なお、支承浮き量がそのまま桁端目違い量になるわけではない点に留意されたい。以上を踏まえ、桁端目違いの設計限界値を超え、確実に検知すべき量として浮き5mmを設定し、現実的な値として設計限界値の半分および1/4に相当する2mmおよび1mmを設定した。

3. 数値解析での検討結果

3.1 支承部のばね変位

図7に、B4進入側支承浮き1mm, 2mm, 5mmおよび浮きなしにおけるB4進入側支承部のばね変位を示す。浮きなしの場合は列車通過に伴い0.1mm以下のわずかなばね変位のみが生じる一方、浮きがある場合では列車通過時に計3回の下向き変位のピークが生じる。これら3回の変位ピークは、1両目(2台車検測車)前台車、1両目(2台車検測車)後台車と2両目(気動車)前台車、2両目(気動車)後台車が、それぞれ支承あおり箇所を通過した場合に対応する。浮き1mmおよび2mmの場合、支承のばね変位が設定した浮き量に達した後、ほぼ一定で推移する。なお、浮き5mmの場合には1回目のピークではばね変位が4mm未満で、浮きが残存する状態となる。また、2回目のピークでは1両目(2台車検測車)後台車と2両目(気動車)前台車が同時に橋りょうB4上に位置することでばね変位が浮き5mmに達し、2次剛性に移行した状態となる。

次に、ばね変位の傾きに注目する。支承の浮きがつぶれる方向にばね変位が増加する図7中①では傾きは -1.0×10^{-3} であるが、浮きが生じる方向にばね変位が減少する図7中②の場合は傾きは 4.0×10^{-4} となり、傾きの絶対値が異なる。本ケースの支承あおりは橋りょう

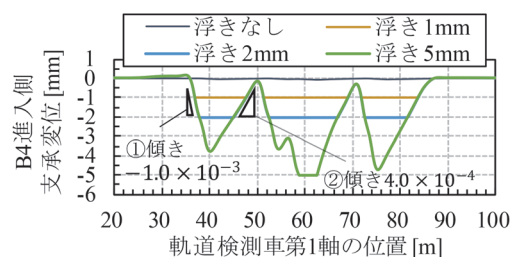


図7 B4進入側支承浮き1mm, 2mm, 5mmおよび浮きなしにおけるB4進入側支承変位

進入側であり、隣接橋りょう退出側から当該橋りょう進入側へ乗り移る際に支承への作用荷重が急増するため、ばね変位増加時の傾き絶対値が大きいと考えられる。

図8に、浮き2mmの解析結果のうち先頭車軸が支承あおり箇所を通過する際のレール、橋りょうおよび支承あおり部の変位分布を示す。先頭車軸が当該橋りょう進入直後に支承のばね変位が急増することを確認できる。支承のばね変位減少時（例えば図7中②）は、橋りょうの進入側から退出側への荷重移動に伴う進入側支承の荷重分担率の低下により生じるため、増加時に比べ傾きが小さい。浮き5mmでのピーク減少時の車軸移動距離が概ね支間長に対応する点も上記の考察を裏付けている。以上を踏まえ、列車通過時の支承あおり挙動としてばね変位が増加する（浮きがつぶれる）場合とばね変位が減少（浮きが生じる）場合とで異なる構造要素が関連することが想定される。ばね変位の増加は橋りょう間の乗り移りにより生じるため、橋りょう間のレールによる荷重分担が重要な役割を担うと考えられる。図8でも支承あおり箇所のレールで局所的に大きい変形が生じている。一方、ばね変位の減少は橋りょう内の支承の荷重分担によるため、主に橋りょう支間長と車軸配置に依存すると考えられる。

図9に、退出側に支承あおりを有する場合の当該支承のばね変位を示す。退出側に支承あおりが存在するため、支承のばね変位増加時（図中③）と減少時（図中④）の

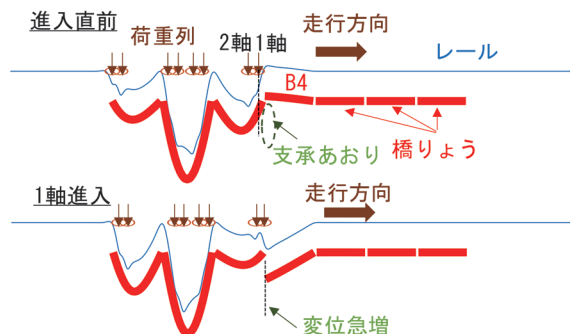


図8 橋りょう乗り移り時における支承あおり挙動 (B4 進入側支承浮き2mm)

傾きの大きさは図7の進入側のケースとおおむね逆になる。なお、浮き5mmの場合、2回目の下向き変位のピークにおける1軸位置70m以降で図6に比べて多少大きい変位が生じている。これは2両目の気動車が同時に載荷した影響である。

なお本論文では支承を進入側・退出側で区別しているが、仮に2両編成の軌道検測車の前後が反転して走行すると、本解析は静的なため進入側・退出側が反転した支承ばね変位が得られる。すなわち、現象を支配するのは進入側か退出側か否かではなく車両の軸配置と輪重の大きさである。本論文では便宜上進入側・退出側の表現を用い、2両編成の軌道検測車のうち2台車検測車を先頭車両とした場合の解析例であることに注意されたい。

3.2 軌道変位

図10に、B4 進入側支承あおりにおける10m弦正矢(124)軌道変位を、図11に、10m弦正矢(134)軌道変位をそれぞれ示す。浮きがない場合の10m弦正矢(124)軌道変位は桁たわみ形状に対応し、支承部で極大、支間中央付近で極小、波長がおおむね支間長と等しい波形となる。支承あおりがある場合、あおり箇所周辺に軌道変位の変動が生じる。具体的には、支承あおり箇所の上向きピーク位置が列車進入側に移動し、極大値も増加する。また、浮き量の増加に伴いB4支間中央での下向きピーク位置も進入側に推移し、こちらもピーク値が増加する。

図11に示す10m弦正矢(134)軌道変位は、支承あ

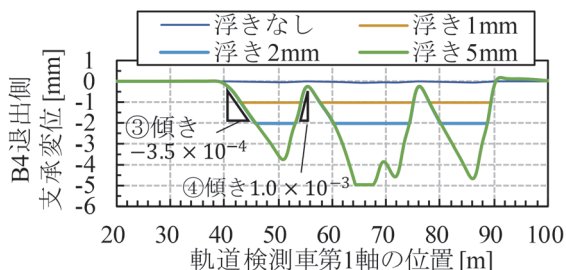


図9 B4 退出側支承浮き1mm, 2mm, 5mm および浮きなしにおける B4 退出側支承変位

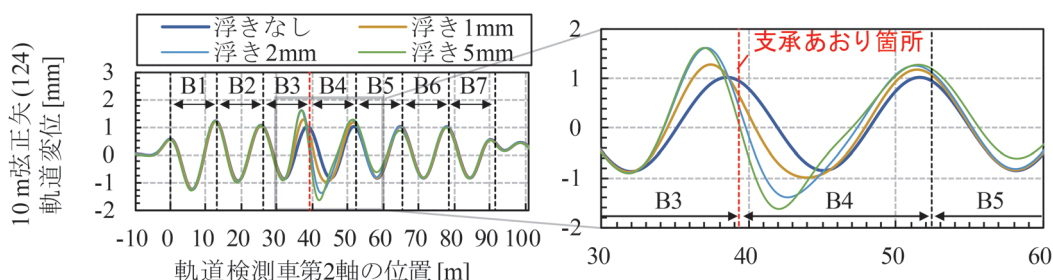


図10 B4 進入側支承浮き1mm, 2mm, 5mm および浮きなしにおける10m弦正矢(124)軌道変位

おり箇所周辺に生じるピーク位置の変動が浮き量の増加とともに進入側に推移する傾向は10m弦正矢(124)軌道変位と同じであるが、ピーク値は10m弦正矢(124)軌道変位と異なり大きく変化しない。これは10m弦正矢(134)軌道変位では第1軸と4軸に対する3軸位置の変位を算出するが、3軸が支承あり通過時には2軸がまだ橋りょう上に位置するため、1軸と4軸に対する3軸位置での支承ありによる変化が小さいためと考えられる。

図12に、支承ありをB4退出側に導入した場合の10m弦正矢(124)軌道変位を示す。進入側の場合と同様に支承あり箇所周辺にピーク位置およびピーク値の変動が生じる。浮き量の増加に伴い、支承あり箇所の上向きピークが、進入側の場合とは逆に退出側に移動する。極大値は浮き1mmでは変化しないが、浮き2mmおよび5mmの場合は増加する。概ね進入側の場合と同じ傾向が走行方向に対し逆向きに生じる。

以上の結果を整理すると、支承ありの浮き量により多少傾向が異なるものの、支承あり箇所で得られる10m弦正矢軌道変位では桁たわみに対応する軌道変位に加え、支承あり箇所の位相ずれおよび振幅の変動が重畳する。この変動は、支承あり箇所の浮き量により位相ずれ量および振幅の増加量が異なる。具体的には、対象とした範囲では浮き1mmの場合に位相が2m程度ずれのみであるが、浮き2mmおよび5mmでは位相ずれに加え振幅が0.4mm程度増大する。このため、軌道変位のこの特徴から支承ありを検知できる可能性がある。

3.3 支承ありと軌道変位の波長に関する分析

今回の数値解析では支承ありによる影響のほか、桁たわみの成分が含まれた状態の軌道変位を評価した。既往研究^{13) 15)}から桁たわみに起因する成分については動的軌道変位差分から評価が可能であるため、軌道変位のうち桁たわみに起因する成分を別途推定し、動的軌道変位から引くことができれば、支承ありの成分のみを高精度に抽出することができると考えられる。そのため、桁たわみの成分を除去した支承ありの影響のみについてさらなる分析を行う。

図13に、支承あり箇所における10m弦正矢軌道変位の解析結果から、支承ありなしの解析結果を差し引くことで算出した軌道変位の支承あり成分を示す。いずれの場合も支承あり箇所での変動成分が抽出され、その半波長(1ピーク分の距離)は浮きの程度に依らず概ね5m程度となっている。この要因として、10m弦正矢軌道変位のフィルタ特性とレールの荷重分散効果の2つが考えられる。まず、フィルタ特性に関して、今回指標とする10m弦正矢軌道変位は、図3に示すように半波長5m付近で利得が大きく、半波長2.5m以下で利得が0となる性質を持つ。そのため、支承ありによる支承箇所でのレール変位の急変が生じたとしても、10m弦正矢軌道変位として評価することで、利得のない半波長2.5m以下の短波長成分は除去され、半波長5m付近の成分が抽出されたと考えられる。このような10m弦正矢軌道変位のフィルタ特性に加え、レールの荷重分散効果も半波長5m程度の成分に影響を与えている可能性が考えられる。これは、レールにより列車の集中荷重が

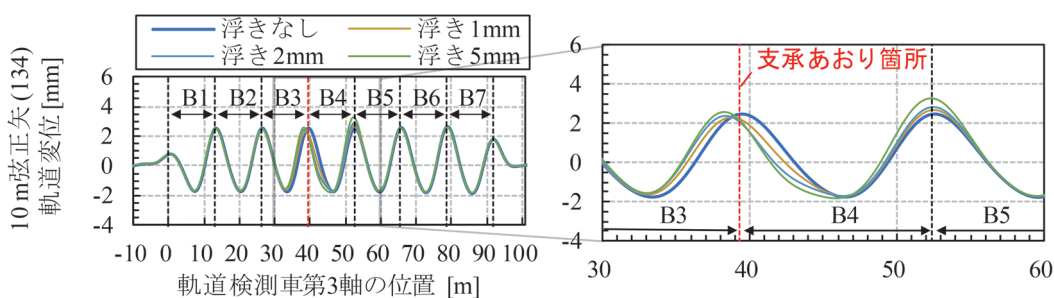


図11 B4 進入側支承浮き1mm, 2mm, 5mm および浮きなしにおける10m弦正矢(134)軌道変位

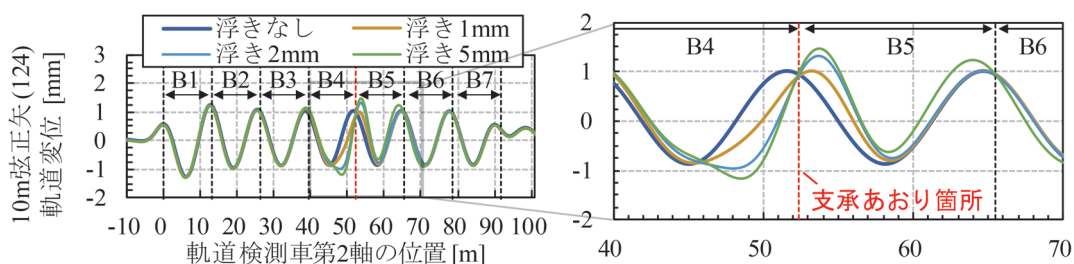
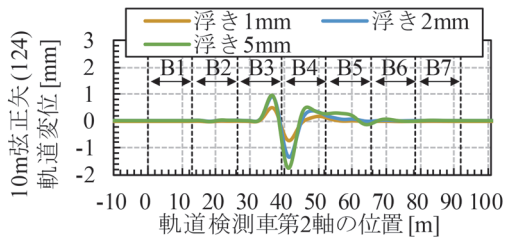
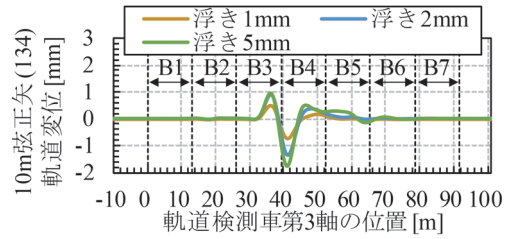


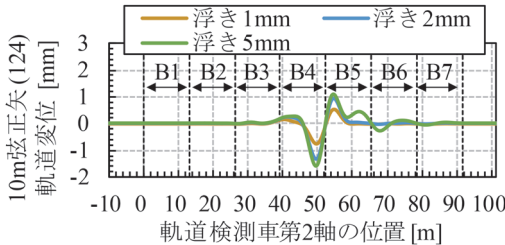
図12 B4 退出側支承浮き1mm, 2mm, 5mm および浮きなしにおける10m弦正矢(124)軌道変位



(a) B4 進入側支承浮き : 10m 弦正矢(124)軌道変位



(b) B4 進入側支承浮き : 10m 弦正矢(134)軌道変位



(c) B4 退出側支承浮き : 10m 弦正矢(124)軌道変位

図 13 桁たわみ成分を除いて算出した 10m 弦正矢軌道変位の支承あおり成分

分散することで、支承ばねの変位変化が緩やかになり、測定される軌道変位が不連続でないなめらかな波形となったと推測される。

4. まとめ

本研究で得られた成果を以下に整理する。

- ・既存の動的軌道変位の算出プログラム（桁たわみー軌道変位変換プログラム）に支承あおりを表すバイリニアの非線形ばねを導入し、支承あおり箇所での動的軌道変位を計算できるよう拡張した。
- ・支間長 12.3m の橋りょう 7 連の区間を対象とし、上記プログラムにより支承あおり時の 10m 弦正矢軌道変位を計算した結果、支承あおりは当該および隣接橋りょうの桁端部に半波長 5m 程度の変動として生じることを明らかにした。
- ・今回対象とした橋りょうでは、支承あおり箇所が生じる 10m 弦正矢軌道変位での変動波長は、支承浮き量に依らず、半波長 5m 程度の変動であるが、これはフィルタ特性とレールの荷重分散が要因となっていると考えられる。

なお、今回の解析では実際の適用対象を想定した特定の支間長の橋りょうのみ対象としているため、今後得られた知見の一般化を進める必要がある。また、今回の解析では静的軌道変位を考慮していないが、実際の動的軌道変位には今回の解析で検討した構造物の変形成分に加え、静的軌道変位が重畳する¹³⁾。静的軌道変位は支承あおりを検知するうえでは誤差となるため、これを除去する必要がある。例えば、軌道検測車とは別に静的軌道変位を計測し、これを動的軌道変位から差し引くことで動的軌道変位のうち、構造物の変形成分のみを抽出できる。

今後、提案した手法を実路線で計測された軌道変位に適用し、支承あおりを検知するとともに桁下での支承あおり量の計測結果との比較による検証を予定している。

文 献

- 1) 国土交通省鉄道局監修、鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編 鋼・合成構造物）－平成 29 年付属資料改訂版－，丸善出版，2017
- 2) 吉田善紀，小林裕介，小野秀一，宇田陽亮，勝山真規：支承のあおりを生じた溶接桁端補剛材の疲労き裂発生因子，土木学会年次学術講演会講演概要集，I-535，pp.1069-1070，2015
- 3) 川田真也，塚原高志，窪田利幸，松田芳範：JR 東日本における鉄道橋支承部の変状対策，インフラメンテナンス実践研究論文集，Vol.1，No.1，pp.445-451，2022
- 4) 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
- 5) 石澤俊希，滝澤彰宏，今井勉：鋼鉄道橋における支点部アオリモニタリング装置の開発，第 30 回鉄道技術連合シンポジウム（J-Rail2023）講演概要集，pp.132-133，2023
- 6) 森井広樹，栗林健一，小西俊之：振動発電を用いた鋼橋アオリ検知装置の開発，JR EAST Technical Review，No.55，pp.31-32，2016
- 7) 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
- 8) 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.
- 9) Matsuoka K. and Tanaka H.: Drive-by deflection estimation method for simple support bridges based on track irregularities measured on a traveling train, *Mechanical*

- Systems and Signal Processing*, Vol.182, No.109549, 2023.
- 10) Matsuoka, K., Tokunaga, M. and Kaito, K.: Bayesian estimation of instantaneous frequency reduction on cracked concrete railway bridges under high-speed train passage, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.161, No.107944, 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) 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, No.107667, 2021.
 - 13) 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
 - 14) 松岡弘大, 常本瑞樹, 川崎恭平, 田中博文: 車上計測された軌道変位を利用した高速鉄道橋りょう上の電車線路設備の要注意箇所抽出, AI・データサイエンス論文集, Vol.4, Issue 3, pp.125-134, 2023
 - 15) 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
 - 16) 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
 - 17) 秋山啓太, 秋山保行, 神谷弘志: 鋼橋支点部のアオリが軌道変位に与える影響の検討, 第75回土木学会年次学術講演会講演概要集, VI -328, 2020
 - 18) 服部紘司, 松岡弘大, 田中博文: 車上計測された軌道変位に基づく橋りょう支承あおり検知に向けた数値解析的検討, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.28, No.1, pp.84-91, 2024
 - 19) Yoshimura, A., Yoshida, Y. and Kamiyama, M.: Development of database system for railway track maintenance management, Micro LABOCS for Windows and its features, *Quarterly Report of RTRI*, Vol.38, No.2, pp.102-106, 1997.
 - 20) Matsuoka, K., Kajihara, K. and Tanaka, H.: Identification of Vibration Modes and Wave Propagation of Operational Rails by Multipoint Hammering and Reciprocity Theorem, *Materials*, Vol.15, No.3, pp.811, 2022.
 - 21) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物) 第II編 橋りょう, 丸善出版, 2023