

論文 高速鉄道橋梁における 非接触たわみ計測の適用性検証

朝長 光¹・阪田 暁²・加藤 積希³・松岡 弘大⁴・箕浦 慎太郎⁵

¹正会員 (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 設計部 設計第一課
(〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1)
E-mail: tomonaga.hik-5r2i@jrtr.go.jp

²正会員 (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 九州新幹線建設局 技術管理課
(〒812-8622 福岡市博多区祇園町2-1)
E-mail: sakata.aki-f8r4@jrtr.go.jp

³正会員 (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 北海道新幹線建設局 工事第二課
(〒060-0002 北海道札幌市中央区北二条西1-1)
E-mail: kato.tsu-wv26@jrtr.go.jp

⁴正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: matsuka.kodai.13@rtri.or.jp

⁵正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 (同上)
E-mail: minoura.shintaro.51@rtri.or.jp

これまで新線建設後の総合監査・検査時の桁のたわみ計測では、桁へのアクセスが必要となるリング式変位計測を基本とし、条件によりターゲット式ビデオカメラ計測を補間的に利用してきた。本研究では、近年発展が著しいレーザーや画像を用いた非接触変位測定技術に着目し、リング式とともに画像（モアレ法、産業用カメラ、デジタルカメラ）やレーザー（自己振動補正付きレーザードップラー速度計）による非接触変位計測を2連の高速鉄道橋で実施した。計測結果の比較分析により、反射材を要するもののレーザー計測の精度が高いこと、測定誤差の観点から画像計測の適用範囲は主に長大橋に限られることを明らかにした。

Key Words : laser measurement, optical measurement, high-speed railway, field test

1. はじめに

新線建設後の総合監査・検査（以下、開業監査と呼ぶ）時には、建設構造物の安全性および使用性の確認および初期状態の把握を目的とし、主に長大橋などの特殊橋梁を中心として、列車通過時の桁のたわみ測定が実施される。これまで開業監査時の桁のたわみ測定では、実績が豊富で計測精度も高いリング式たわみ計測を基本とし、桁下の条件によりリング式たわみ計測の適用が厳しい箇所ではターゲット式のビデオカメラ計測が補間的に採用されてきた¹⁾。しかしながら、リング式たわみ計測では、上述の通り、桁の計測箇所直下の土地を使用するため、河川や道路など桁下の状況によっては適用できない場合も多い。また、リング式たわみ計測やターゲット式のビデオカメラ計測では計測箇所の桁下面や側面に治具やタ

ーゲットを設置するための高所作業が必要となる場合が多く、桁下までの高所作業車のアクセス確保や作業場所使用許可をめぐる調整に多大な労力を要する場合も多い。したがって、より効率的に桁たわみを測定するため、桁へのアクセスが不要もしくは最小限となる非接触での桁たわみ計測の活用が求められている。

近年ではレーザーや画像などを用いた計測技術の発展が著しく、これらによる非接触での橋梁のたわみ計測事例も増加しつつある。

レーザー計測では、Uドップラーをはじめとする自己振動補正機能付きレーザードップラー速度計によるたわみ計測がすでに実用化されている²⁾。高精度な測定には反射シールなどを桁下面に設置する必要となる場合があるものの、ある程度の高さまではマジックハンドなどにより高所作業車なしで設置が可能である。また、夜間の

表-1 対象橋梁の諸元

橋梁名	形式	支間長
橋梁A	PCラーメン	89.2m
橋梁B	RC単純桁	8.3m

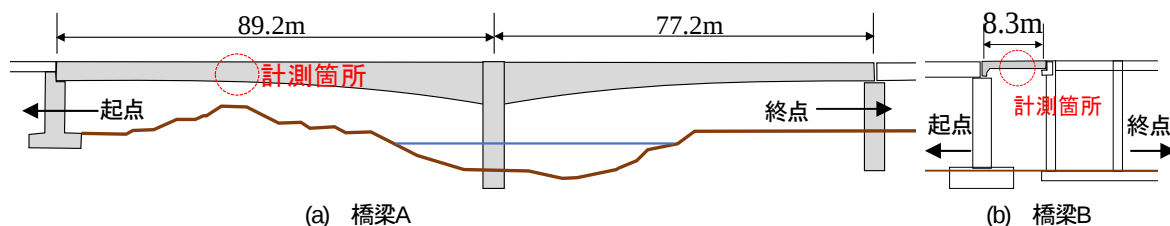


図-1 対象橋梁の側面図



図-2 対象橋梁の写真

計測も可能であり、高速鉄道橋のたわみ計測でも計測実績が増加しつつある。画像計測についても、近年のカメラ性能の向上、画像処理技術の発展と簡易化に伴い、急速に一般化しつつある³⁾。画像計測では、計測対象に設置したターゲットの動きを追跡することで変位を計測するターゲット式⁴⁾と、計測対象表面の光学模様の特徴を参照して変位を計測するノンターゲット式⁵⁾がある。ターゲット式には、ターゲットを単なる目印とする場合のほか、規則的な縞模様が生じるモアレ現象を利用し測定精度の向上を図るものがある⁴⁾。一方、ノンターゲット式では、対象物の表面模様を利用しデジタル画像相関法などにより変位を計測する。すでに橋梁などを対象としたターゲット式およびノンターゲット式によるたわみ計測事例や精度検証事例も報告されている⁹⁾。

開業監査においては列車走行本数も少なく、計測ミスや取り直しなどが許容されない。したがって、測定誤差や測定条件などに依存した各手法の適用範囲を明確にしておく必要がある。ただし、各種計測手法で同時に同じ桁を測定し、その適用性や精度について検討した事例は限られている。特に、高速鉄道における検証事例は少ないのが現状である。

以上を踏まえ、本研究では、開業監査における非接触たわみ計測の適用性について評価するため、従来より用いられてきたリング式たわみ計測に加え、自己振動補正機能付きレーザードップラー速度計、モアレ式画像計測、ノンターゲット式産業用カメラ画像計測、ノンターゲット式民生品カメラ画像計測⁹⁾の5種類のたわみ計測手法により、同じ橋梁を同時に計測し、比較分析によりその精

度について検証した。なお、以下では各手法を、①リング式、②レーザー、③モアレ式、④産業用カメラ、⑤デジタルカメラとそれぞれ表記する。なお、計測は実構造物での精度を調べるために、長大橋および短支間桁の2連の高速鉄道橋を対象に実施した。また、計測結果を踏まえ、画像計測の適用範囲について検討した。

2. 検討方法

(1) 対象橋梁

表-1、図-1および図-2に、計測対象とした橋梁Aおよび橋梁Bの諸元、平面図、写真をそれぞれ示す。橋梁Aは2径間連続のPCラーメン橋であり、計測対象とした支間は89.2mである。代表的な長大橋として選定した。橋梁BはRC単純桁の単純桁であり、支間は8.3mである。橋梁Bは高速鉄道における代表的な調整桁である。橋梁Bのような短支間の調整桁は、開業監査において対象とされることは少ない。ただし、たわみ量が小さいこと、たわみ波形が高周期であることから特に画像計測に対しては、最も厳しい計測条件となる。したがって、画像計測の適用限界を把握するうえで、橋梁Bを選定した。なお、橋梁Aおよび橋梁Bの位置する区間の最高速度は260km/hとなっており、それぞれ乗り心地に関するたわみの制限値は橋梁Aが52.5mm、橋梁Bが3.8mmである。

橋梁Aでは起点側支点から34.5m地点、橋梁Bでは支間中央をたわみ計測の対象箇所とした。地表面から桁下面までの高さは橋梁Aで5.7m、橋梁Bで14.5mである。

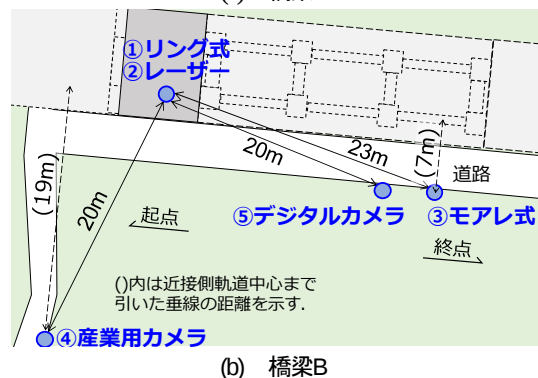
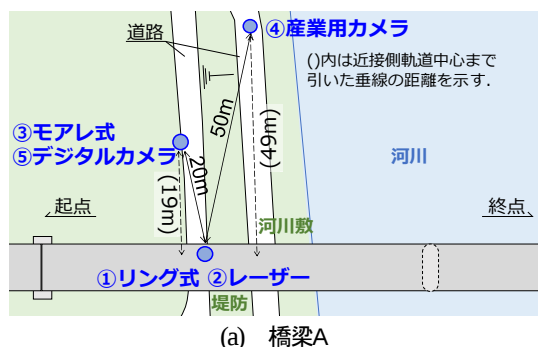


図-3 計測機器の配置

(2) 計測方法

①リング式、②レーザー、③モアレ式、④産業用カメラ、⑤デジタルカメラの5つの計測手法により、列車通過時のたわみを同時に測定した。

図-3に橋梁Aおよび橋梁Bにおける各手法の設置位置を示す。また、表-2に今回実施した各たわみ計測手法の機器および仕様と設置状況を示す。

計測手法のうち、①リング式、および②レーザーに関しては、計測箇所直下に機器を配置し計測した。①リング式では桁下面に治具を取り付け、リング式ゲージと治具の間にピアノ線を張ることで、ゲージ出力から列車通過時のたわみを計測した。ここで、ピアノ線は桁の上下に連動できるように経験的に10N程度の張力を与えて計測した。また、②レーザーでは、桁下面に反射シールを取り付け、反射シール直下に設置した自己振動補正機能付きレーザードップラー速度計により列車通過時の速度応答を計測し、積分することでたわみ波形を求めた。③モアレ式、④産業用カメラ、⑤デジタルカメラは、桁計測箇所から20m～50m離れた位置にカメラを設置し、桁側面を撮影した。③モアレ式では桁側面に設置した格子模様のターゲットを用いて、モアレ縞を推定し、ターゲットの変位量を算定する（モアレサンプリング法）。モアレサンプリング法では最大で格子間の1/500の変位を計測できることが報告されている⁷⁾。④産業用カメラ、⑤デジタルカメラに関しては桁へのターゲット設置は行わないノンターゲット式での計測を行った。④産業用カメラおよび⑤デジタルカメラでは、計測箇所（桁側面）の表面のコントラストからデジタル画像相関法⁹⁾により

表-2 各計測手法の概要

① リング式	
センサ	リング式ゲージ
サンプリング	1000 Hz
たわみ計測方法	ひずみから変換
設置状況	ピアノ線固定治具 リング式ゲージ  
② レーザー	
センサ	レーザードップラー速度計 He-Neレーザー、クラス2
サンプリング	1000 Hz
測定距離	0.1～100m
自己振動	自己振動補正機能付き
たわみ計測方法	速度応答の積分
設置状況	反射シール ドップラー速度計  
③ モアレ式	
センサ	CMOSモノクロカメラ (2048 x 1088)
サンプリング	170 fps
たわみ計測方法	画像処理 (モアレサンプリング法)
設置状況	5-30mm格子 CMOSカメラ  
④ 産業用カメラ	
センサ	Flare 4M180-MCX (4096 x 2160)
サンプリング	200 fps
レンズ	広角または標準
たわみ計測方法	画像処理 (デジタル画像相関法)
設置状況	広角および標準レンズカメラ 
⑤ デジタルカメラ	
センサ	DSC-RX100M4 (2048 x 1088)
サンプリング	60 fps
光学ズーム	2.9倍
たわみ計測方法	画像処理 (デジタル画像相関法)
設置状況	広角および標準レンズカメラ 

桁変位を推定する。デジタル画像相関法では、対象とする測定箇所が動画を構成する各画像上で、どの位置に移

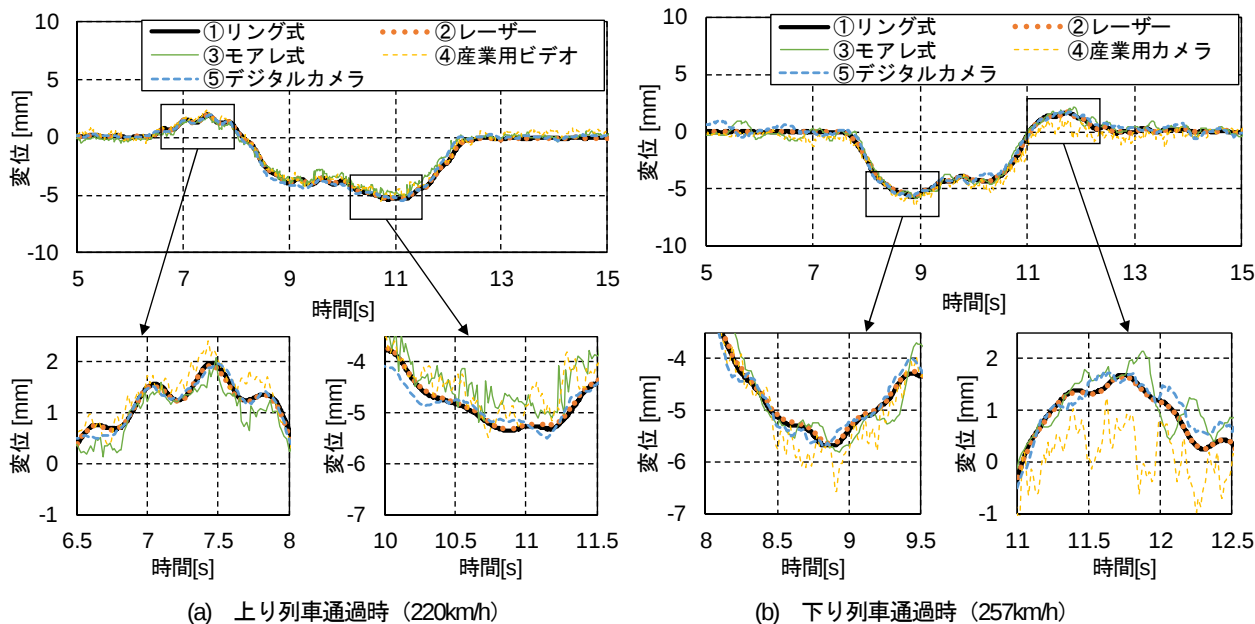


図-4 橋梁Aのたわみ波形の計測結果の比較

動したかを基準画像との相関により計算する。④産業用カメラおよび⑤デジタルカメラともに画像移動量には正規化相互相関を用いた。また、サブピクセル推定として、相関値が最も高くなる画素とその周辺8画素の相関値に対してパラボラ関数のフィッティングを行い、パラボラ関数に最大値を与える鉛直および水平移動量をサブピクセルでの位置的なずれ量として算出した。過去の研究^{5b)}によれば、④および⑤ともに1/30ピクセル程度までの変位を推定できる。

桁たわみのサンプリングは、①リング式、および②レーザーでは1kHzとし、③モアレ式は170fps、④産業用カメラは200fps、⑤デジタルカメラは60fpsとした。画像処理の手法は文献⁹⁾を参照されたい。

なお、⑤デジタルカメラ以外は、ノートPCに収録される。⑤デジタルカメラは内蔵したSDカードに記録し、撮影後にノートPCに動画を移行して画像処理を行った。

橋梁Aおよび橋梁Bともに、各計測手法により列車が通過した際の桁たわみを同時に計測した。列車は220から260km/h程度で走行するものを対象とし、上りおよび下りでそれぞれ4本程度を測定した。

計測は橋梁Aおよび橋梁Bで11時頃から15時頃まで実施した。天候はいずれも晴れ、ほぼ無風であった。

3. 計測結果

(1) 橋梁Aのたわみ計測結果

図-4に橋梁Aで計測した列車通過時のたわみ波形の例を示す。橋梁Aは2径間連続PCラーメン橋であるため、隣接支間通過時には上側に変位が生じるアップリフ

トが

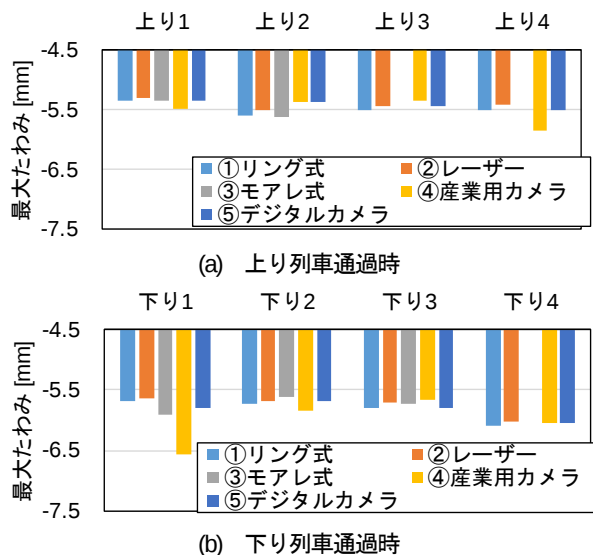
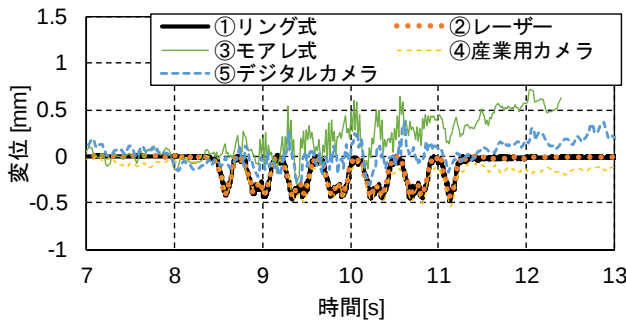


図-5 橋梁Aの最大たわみ計測結果の比較

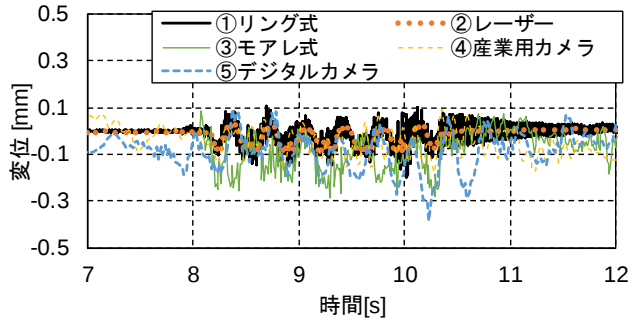
発生する。また、そのタイミングは上りと下りで逆になる。また、各図ではたわみ波形全体のほか、最大および最小変位発生時のたわみ計測結果の拡大図を合わせて示している。

たわみ波形の計測結果について、①リング式および②レーザーで計測されたたわみ波形は、ほぼ一致しており、①リング式を正解値とすれば、②レーザーにより高精度に列車通過時のたわみを計測できることが確認できる。一方、③モアレ式、④産業用カメラ、⑤デジタルカメラで計測したたわみ波形には、①リング式には見られない高周波のノイズ成分の混入が確認できる。画像計測で確認されるこのような高周波のノイズ成分は、列車進入前や退出後にも確認できる。したがって、列車通過に伴うカメラ自体の揺れなどが要因ではなく、画像処理による

ものであると推察される。各手法の計測精度をさらに分



(a) 上り列車通過時 (251km/h)



(b) 下り列車通過時 (260km/h)

図-6 橋梁Bのたわみ波形の計測結果

析するため、各列車通過時の最大たわみ値を整理した。

図-5 に橋梁 A の最大たわみを示す。なお、空白箇所はモアレ縞を正確に推定できず、たわみ波形を計測できなかった場合である。測定箇所は下り線側の桁端部としたため、下り列車通過時の方が最大たわみが若干大きい。

①リング式を正解値として考えると、②レーザーはリング式とほぼ同じ値で最大たわみを評価できていることを確認できる。③から⑤の画像計測に関して、④産業用カメラにおいて下り 1 のケースで誤差が -0.8mm 程度生じている。このケースは図-4(b)に測定波形を示しているが、最大たわみ発生時 (8.9 秒付近) でスパイク状のノイズが重複していることを確認できる。また、当該ケースの④産業用カメラのたわみ波形は全体的に下側にシフトする傾向にある。したがって、平滑化や 0 点・ドリフト補正を行うことで、計測後にこのような誤差を低減できる可能性がある。このような後処理に関しては、4 章で改めて考察する。上記のケースを除けば、いずれの画像計測手法でも①リング式に対して最大で $\pm 0.3\text{mm}$ 以下の誤差で最大たわみを評価可能であった。なお、③モアレ式～⑤デジタルカメラによる画像計測で見られた $\pm 0.3\text{mm}$ の誤差は、列車通過中のみならず列車進入前や退出後に生じていた高周波のノイズ成分の量とおおむね一致する。

(2) 橋梁Bのたわみ計測結果

図-6に橋梁Bで計測した列車通過時のたわみ波形の例を示す。

まず、図-6(a)の上り列車通過時に着目する。①リング式および②レーザーで計測されたたわみ波形は、ほぼ一致している。また、最大たわみは 0.5mm 程度であり、極めて小さい変位を正確に評価できていることがわかる。画像計測について、④産業用カメラは若干誤差が生じるものの、①リング式に近いたわみ波形が計測されている。一方で、③モアレ式、および⑤デジタルカメラで計測されたたわみ波形は、ドリフト成分が大きいこと、高周波のノイズが大きく他手法で計測されたたわみ波形にみられる各台車に対応したたわみ成分が確認しづらいことか

ら列車通過時のたわみを正確に計測できていない。③

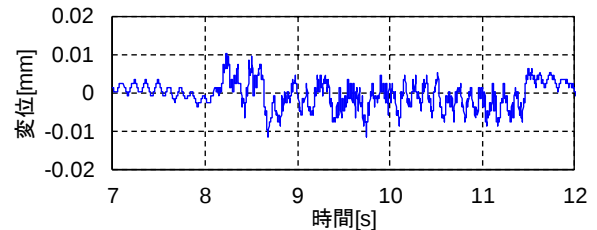


図-7 下り列車通過時の②レーザーの自己振動成分

モアレ式および⑤デジタルカメラは標準レンズもしくはデジタルカメラに付属の光学ズーム機能のみを用いたが、④産業用カメラは望遠レンズを利用したことで、図-6(a)の微小なたわみのある程度計測できたと考えられる。

次に、図-6(b)の下り列車通過時に着目する。測定箇所は上り線側の支間中央としたため、下り列車通過時は最大たわみ 0.1mm 程度と非常に小さい。また、これまで正解値としてきた①リング式と、①リング式とほぼ同じたわみ計測結果であった②レーザーのたわみ計測結果に差異が確認できる。①リング式には、②レーザーに見られる各台車通過に対応したたわみ波形のほか、高周波の振動成分が確認できる。この差異について分析するために、自己振動補正のために計測されたレーザードップラー速度計自体の自己振動成分を図-7 に示す。図-7 から列車進入後に測定器自体が振動しており、当該箇所では列車通過時に測定箇所の地盤が揺れていることがわかる。また、リング式ゲージのピアノ線はばねにより一定張力を保つ構造を有し、このばねの高周波振動が測定結果に混入する場合も多い。以上を踏まえると、①リング式で確認された高周波の振動成分は、列車通過時の地盤振動に伴うリング式ゲージ自体の振動であると推察される。なお、この高周波成分は上り列車通過時には確認できなかった。桁のねじり振動や起点側と終点側の下部構造の相違などが考えられるが、現時点では原因を特定できず、今後の課題としたい。

画像計測 (③モアレ式、④産業用カメラ、⑤デジタルカメラ) では精度よくたわみ波形を計測することが困難であることがわかる。望遠レンズを用いた④産業用カメラは比較的誤差が小さいが、それでもたわみ波形を高精

度に評価できるとは言い難い。③モアレ式および⑤デジタルカメラの計測結果は桁たわみが完全に誤差に埋もれ

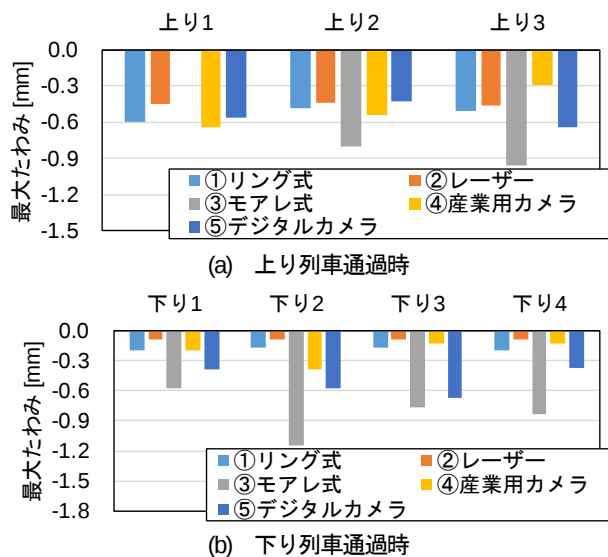


図-8 橋梁Bの最大たわみ計測結果の比較

てしまっている。したがって、画像計測では計測誤差と桁のたわみ量に依存して、適用限界が存在することがわかる。なお、線形補間の演算によりドリフト成分を除けば、③モアレ式および⑤デジタルカメラの誤差の量は、最大で 0.3mm 程度となっており、同じ 20m 位置から計測した橋梁 A の計測誤差とおおむね一致する。

図-8 に橋梁 B の最大たわみを示す。上述した測定機器自体の振動の影響から主に下り列車通過時の①リング式の最大たわみは、②レーザーよりも大きい。望遠レンズを用いた④産業用カメラは、画像計測の中では②レーザーの最大たわみに比較的近い値が得られている。一方で、③モアレ式および⑤デジタルカメラの最大たわみはほとんどがノイズ成分と考えられる。

以上の測定精度に関する比較分析結果を踏まえると、開業監査におけるたわみ計測手法として、これまでの①リング式に加え、②レーザーでの計測により、高精度に桁たわみを評価可能であると考えられる。特に、列車通過時に地盤振動などが予測される箇所では、②レーザーの自己振動補正機能が評価において重要な役割を果たす。

作業効率の大幅な向上が期待できるノンターゲットでの画像計測は、計測位置 20m で 0.2~0.3mm 程度の誤差が最大たわみに混入する。最低限の計測精度として、今回の橋梁 A のたわみ波形レベルを要求するのであれば、桁たわみが 5mm を超えるような比較的長い支間の橋梁に限定されることが考えられる。桁たわみが小さいことが予測される場合には、望遠レンズを利用するなど 1 画素あたりである程度の実寸法を確保することが必要である。また、画像計測に関しては、雨天や夜間など計測環境に基づく制限も受ける。したがって、画像計測は、開業監査におけるたわみ計測において、①リング式や②レーザ

ーが適用できない箇所への補助的な利用に留めることが現時点では望ましいと考えられる。

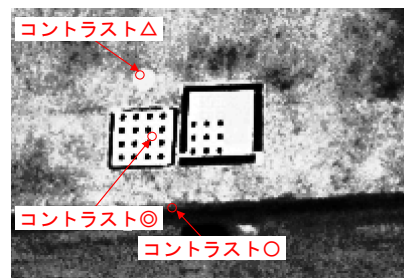


図-9 計測対象箇所のコントラストの違いの例 (橋梁A)

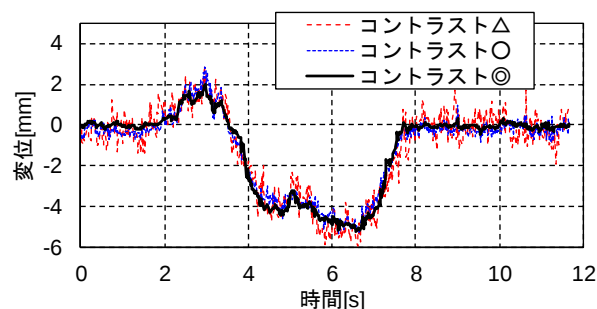


図-10 計測対象箇所のコントラストが画像処理に及ぼす影響 (橋梁A)

表-3 計測対象箇所のコントラストと誤差 (3 σ 値)

コントラスト	◎	○ (基準)	△
3 σ 値*	0.34mm	0.69 mm	1.74 mm
基準に対する増減率	49 %	100 %	252 %
平滑化 (0.1s移動平均)	0.27 mm	0.40 mm	1.18 mm

*列車通過時以外から算定

4. ノンターゲット画像計測の精度に関する考察

(1) 桁表面コントラストと計測精度

図-9に⑤デジタルカメラで対象とした桁側面の計測位置を示す。ここでは、コントラストが大きく異なる3か所を例に、コントラストが画像計測に及ぼす影響を検討した。図中の◎はモアレ用ターゲット箇所であり、白黒の明確な高いコントラストを有する。○箇所は実際に橋梁Aの⑤デジタルカメラの画像処理に用いた箇所であり、桁側面と下面の境界である。△箇所は桁側面のコンクリート表面箇所であり、白黒が明確でなくコントラストが低い。

図-10に各箇所を計測対象として算出した橋梁Aの列車通過時のたわみ波形を示す。コントラストの低下に従い、明確に誤差が増加することを確認できる。コントラストの高低に伴う誤差の増減を調べるため、列車通過時以外の本来たわみが0である区間を対象に、標準偏差を算出し、誤差の大きさを3 σ 値により整理した。

表-3に各箇所の3 σ 値を示す。図-4に示した結果は○に対応する。当該箇所の3 σ 値は約0.7mmである。これに対して、コントラストが低い△箇所では1.74mmと倍以上

にノイズが増大する。一方、モアレターゲットのように高コントラスト箇所の 3σ 値は0.34mmまで半減される。

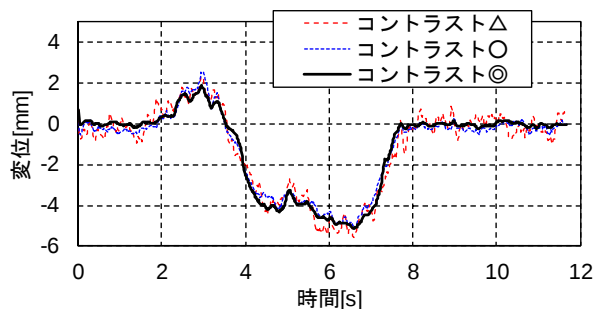


図-11 平滑化がノンターゲット画像計測の誤差に及ぼす影響 (橋梁A)

なお、ノンターゲット画像計測結果に混入するノイズがランダムであれば、移動平均などの平滑化により、一定程度の誤差を低減できる。ただし、平滑化は最大値や最小値を丸めてしまう可能性があるため、長くとも0.1秒程度までで用いることが前提と考えられる。これ以上の範囲で平滑化する場合や桁支間が短く高周波が卓越する場合は、移動平均を計算する長さに注意が必要である。

図-11は0.1秒の移動平均フィルタにより平滑化した結果を示す。また、列車通過時以外の本来たわみが0である区間で算出した 3σ 値を表-3に合わせて示す。コントラスト○および△など比較的高コントラストが高い場合に、ノイズ低減効果が高い傾向にある。一方で、△箇所では、平滑化後も 3σ 値1mm以上の誤差が残る。以上から、平滑化による精度向上に限界があることがわかる。

画像計測精度の向上には、上述の通り計測表面のコントラストの向上が大きく寄与する。したがって、ノンターゲット画像計測であってもコントラストがはっきりしたターゲットや構造的な特徴点があることが望ましく、桁のたわみを計測する予定がある橋梁では、建設時からターゲットなどを添付しておくことも有益である。

(2) 画像計測の適用範囲

図-10に示した⑤デジタルカメラ計測による桁たわみの誤差は 3σ 値で0.7mm程度である（最大たわみの誤差は0.2～0.3mm程度で 1σ 値すなわちばらつきの平均に対応している）。 3σ 値は橋梁Aの最大変位5.5mmの1/8程度ある。これを開業監査において許容されるたわみ計測精度の下限、すなわち 3σ 値の8倍以上の桁たわみが計測可能、と仮定し、過去の高速度鉄道用の桁たわみ計測結果を利用してノンターゲット画像計測の適用範囲について試算した。図-12に試算に利用した桁の最大たわみの実測値を示す。これらは高速鉄道における橋梁で計測されており、その大半がリング式変位計によって計測された全248ケースである。いずれも30km/h程度の低速走行時の最大たわみの実測値を用いた。たわみ計測に許容される誤差は上述

の通り、 3σ 値で最大たわみの1/8以下とした。 3σ 値の具体的な値は、望遠レンズやズーム機能の使用を前提に、

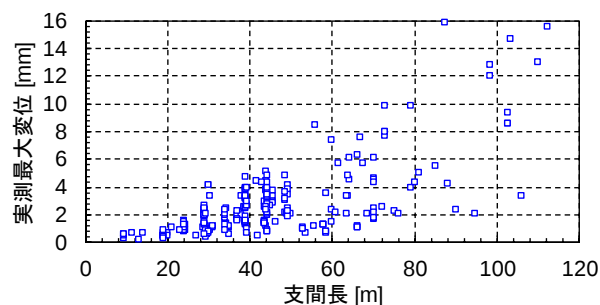


図-12 高速鉄道橋梁の最大たわみ実測値（低速走行時）

表-4 最大たわみが 3σ 値 $\times 8$ 以上の橋梁の割合：④産業用カメラ

		計測距離					
		5m	10m	20m	30m	40m	50m
桁支間長	10m 以下	100%	75%	0%	0%	0%	0%
	10～20m	93%	79%	7%	0%	0%	0%
	20～30m	100%	98%	79%	54%	35%	31%
	30～40m	100%	100%	95%	83%	68%	52%
	40～50m	100%	100%	96%	93%	84%	78%
	50m 以上	100%	100%	95%	86%	79%	73%

■：80%以上，□：30%未満，■：80～30%

表-5 最大たわみが 3σ 値 $\times 8$ 以上の橋梁の割合：⑤デジタルカメラ

		計測距離					
		5m	10m	20m	30m	40m	50m
桁支間長	10m 以下	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	10～20m	36%	0%	0%	0%	0%	0%
	20～30m	92%	54%	15%	4%	0%	0%
	30～40m	98%	83%	41%	20%	2%	0%
	40～50m	98%	93%	65%	42%	13%	0%
	50m 以上	100%	96%	75%	55%	45%	35%

■：80%以上，□：30%未満，■：80～30%

橋梁Bの測定結果から以下の通り設定した。④産業用カメラが20m位置で0.1mm、⑤デジタルカメラが20m位置で0.3mmである。また、（カメラから桁までの）計測距離に比例して測定誤差は増加すると仮定した。

表-4および表-5に各支間長の桁最大たわみ値が計測可能と判断される割合を、計測距離および桁支間長ごとに示す。なお、計測可能か否かは、上述の通り、各手法の計測誤差（ 3σ 値）の8倍よりも桁たわみ最大値が大きいか否かで判断した。全体的な傾向として、近い距離から計測するほど、また支間が長い桁ほど、画像計測を適用できる割合が高くなる。また、望遠レンズの効果もあり、④産業用カメラの方が適用可能な桁の割合が高い。

より具体的には、④産業用カメラの場合、支間30m以上の桁であれば、30m以内の測定距離から撮影することで、ほぼ計測可能である。一方で⑤デジタルカメラの場合、同じ計測距離20mでも支間長30m以上の桁の半数から3/4程度が測定可能であり、計測できない桁も一定程度存在する。運用上は、桁下から①リング式や②レーザ

一で測定できない長大橋に対して、計測距離30m以内で補助的に画像測定を用いるのがよいと考えられる。

5. まとめ

開業監査における非接触たわみ計測の適用性について評価するため、①リング式、②レーザー、③モアレ式、④産業用カメラ、⑤デジタルカメラの各手法により2連の高速鉄道橋を計測した。また、画像計測の精度や適用範囲について考察を加えた。得られた成果を以下に示す。

- (1) 最大変位が5.5mm程度の長大橋、および最大変位が0.1mm程度の短支間橋のいずれの場合も、②レーザー計測で得られたたわみ波形は、従来の①リング式計測の結果と良好に一致し、十分な精度でたわみを評価できることを実証した。
- (2) 画像計測（③、④、⑤）は望遠レンズやズーム機能を用いた場合でも、計測距離20mで0.1mmから0.3mm程度のノイズが生じ、たわみ波形を十分な精度で計測できない場合があった。
- (3) 過去のたわみ計測結果と画像計測の誤差から、④産業用カメラと⑤デジタルカメラの各計測手法の適用範囲を試算した。この結果、画像計測は、桁下から計測できない長大橋に対して、計測距離30m以内で補助的に用いるのがよいと考えられる。

本研究の結果を踏まえると、②レーザー計測の活用が望ましいが、桁のたわみを多点での同時計測する必要がある開業監査においては、専用の機器を必要数揃えることが困難な場合も予測されるため、計測法の選定にあたっては、対象との距離や想定するたわみ量のほか、汎用性も含めて総合的な判断が必要となる。また、いずれの計測にしても反射シールや反射板などのターゲットを設置する方が望ましく、建設時に貼付けておくことで将来の高所作業を省略することが可能となる。なお、画像計測については精度の問題のほか、夜間や雨天、強風によるカメラ自体の揺れ、カメラのキャリブレーションによ

るピクセル実寸換算の影響や、大容量データ移行に要する時間など、開業監査への適用上は、いくつか課題が残っており、順次研究を進めていく必要がある。

参考文献

- 1) 下津達也, 水谷哲也, 舟竹弘次, 進藤良則: 北陸新幹線の桁たわみ測定結果に関する考察, 鉄道工学シンポジウム論文集, No. 19, pp. 59-66, 2015.
- 2) 上半文昭: 構造物診断用非接触振動測定システム「Uドブラー」の開発, 鉄道総研報告, Vol. 21, No. 12, pp. 17-22, 2007.
- 3) 今井道男ほか: 高速撮影動画を用いたデジタル画像相関法によるコンクリート構造物の動的挙動把握, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 72, No. 1, pp. 279-289, 2016.
- 4) 藤垣元治, 原卓也, 生駒昇, 村田頼信: 列車通過時における鉄道橋の動的な変位計測へのサンプリングモアレカメラの適用, 実験力学, Vol. 12, No. 3, pp. 179-184, 2012.
- 5) 松岡弘大, 上半文昭, 日下博也, 今川太郎, 野田晃浩: ノンターゲット光学式測定による桁たわみ形状測定の精度検証と適用性検討, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 74, No. 2, pp. I_715-I_726, 2018.
- 6) 高橋康将, 坂本保彦, 御崎哲一, 内田修, 近藤健一, 小野徹: デジタルカメラを用いた非接触式たわみ測定手法の開発, 鉄道工学シンポジウム論文集, No. 16, pp. 117-124, 2012.
- 7) 箕浦慎太郎, 渡辺勉: 画像計測手法を用いたレール継目部におけるラダーマクラギの動的特性の検討, 日本鉄道施設協会誌, Vol. 55, No. 8, pp. 591-594, 2017.
- 8) 清水雅夫, 奥富正敏: 画像のマッチングにおける高精度なサブピクセル推定手法., 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 84, No. 7, pp. 1409-1418, 2001.
- 9) 松岡弘大, 渡辺勉, 箕浦慎太郎, 上半文昭: ノンターゲット画像測定によるレール・まくらぎ動的応答測定, 鉄道工学シンポジウム論文集, No. 23, pp. 105-112, 2019.

(2020.4.3 受付)

VERIFICATION OF APPLICABILITY OF NON-CONTACT DEFLECTION MEASUREMENT IN HIGH-SPEED RAILWAY BRIDGES

Hikari TOMONAGA, Akira SAKATA, Tsumiki KATO, Kodai MATSUOKA
and Shintaro MINOURA

On the preopening inspection of newly constructed Shinkansen, deflection of girders have been measured mainly by ring-type gauges setting them beneath the structures. So far, as the need arises on the situation, such as above the streets and rivers, optical measurement method has been adopted using target and video camera. In this study, the authors noticed state of the art non-contact displacement measurement technology, and conducted non-contact deflection measurement, such as Moire method, industrial camera, general-purpose digital camera and laser at two bridges of Shinkansen. At a time, deflection measured with conventional ring-type gauge, have been recorded as correct value. The authors examined the accuracy of each method by comparing the measured value to the data by ring-type gauges. The results clarified that the laser measurement method is superior to the others in terms of accuracy although it needs target, and optical measurement methods can be applied specified to long span bridge due to allowable error.