

反射シールを利用した 在来線橋りょうの桁たわみの夜間画像計測

保木本 晟也* 松岡 弘大*

Image Measurement of Bridge Girder Deflections on Conventional Line at Night with Reflective Stickers

Seiya HOKIMOTO Kodai MATSUOKA

Image measurement of bridge girder deflection using a video camera has been used on actual railway. However, its applications are limited to daytime when illumination can be secured sufficiently. In this study, the authors investigated an image measurement method for bridge deflection at night using light, small, and simple reflective stickers in addition to a minimal amount of lighting equipment. As a result of the investigation, it was decided to make appropriate use of the contrast between the reflective sticker and the surroundings, and the effectiveness of the proposed method was confirmed by measuring the girder deflection of actual bridges on a conventional line. The result of the actual bridge measurement showed that the girder deflection of the bridge at a distance about 20 meters could be measured with the same accuracy as during the daytime.

キーワード：桁たわみ，画像計測，デジタル画像相関法，反射シール，橋りょう

1. はじめに

鉄道橋の列車通過時に発生する桁たわみは，橋りょうの性能を表す代表的な指標であり，設計および維持管理において広く利用されている¹⁾。古くから地上からの桁たわみの計測が行われてきたが，その計測には多大な労力と時間を要する場合が多い。このような背景から，簡易に列車通過時の桁たわみを計測する手法の開発が進められ，すでに多くの手法が実用化されている^{2)~5)}。

その中で，撮影機器の高性能化と低廉化，画像処理手法の発展に伴い，ビデオカメラと画像解析による非接触式の桁たわみ計測が注目されている。桁たわみの画像計測は，橋りょうにターゲットを設置してその動きを追跡することで変位を算出するターゲット方式と⁶⁾，橋りょう表面のテクスチャを利用して変位を推定するノンターゲット方式に大別される^{7) 8)}。特にノンターゲット方式は橋りょうにターゲットを設置するための高所作業や線路内立ち入りが不要であるため，精度の検証だけでなく，実際の鉄道橋での活用が既に進められている⁷⁾。

ただし，これまで検討されてきた屋外での桁たわみの画像計測手法は，十分な照度が確保できる日中に限定されていた。一方，特殊車両の走行，入線検討，速度向上試験などは営業列車の走行が終了した夜間に実施される場合が多く，このような場合にはこれまで検討されてきたノンターゲット方式の画像計測の適用が困難である²⁾。このため，高所作業などを要する伝統的なリング式変位計による計測が行われてきた。なお，近年では

LED式のターゲットを用いた画像計測手法も提案されているが，橋りょう上での電源確保やターゲットの重量増加に伴う設置作業が問題となる場合もある。このほか，ターゲットを設置せず，線路外から照明で計測対象橋りょうを照らすノンターゲット方式の画像計測も考えられる。しかし，この場合は多くの照明設備が別途必要になるほか，撮影距離が遠い場合は照明設備のみで橋りょう表面を十分に明るくできない可能性も高い。したがって，最小限の照明設備および電源不要の軽量かつ小型の簡易なターゲットにより，夜間の桁たわみの画像計測が可能となれば，これまで夜間に実施されてきた桁たわみ計測を省力化できると考えられる。

以上の問題意識のもと，本研究では夜間に実施可能なターゲット方式の桁たわみの画像計測手法について検討した。具体的には，橋りょうの桁側面に設置するターゲットとして再帰反射シール（以下，単に反射シールと記載）を用いた上で，地上からLED照明を照射することで反射シール部分の輝度を確保し，夜間における桁たわみの画像計測を可能とする。地上のLED照明は，橋りょう本体を明確に照らすほどの強度はないものの，反射シールとそれ以外の場所を区別可能なコントラストを生成できる。このコントラストを利用して，デジタル画像相関（Digital Image Correlation：DIC）法などの一般的な画像処理手法により，反射シール位置の画像上の移動量から桁たわみを計測できると考えられる。ただし，このようなコンセプトに基づくターゲット方式の夜間の画像計測手法の適用性について，実橋りょうで検証した事例は，著者の知る限り存在しない。本稿では，在来線における河川上の鋼鉄道橋を対象とし，日中は既存手法によって，

* 情報通信技術研究部 情報解析研究室

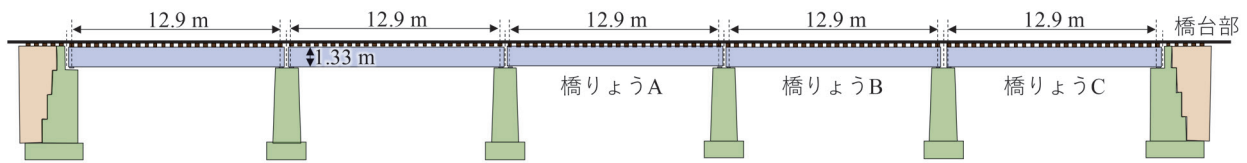


図1 対象橋りょうの側面図



図2 対象橋りょうの写真

夜間は提案手法を用いて、列車通過時の桁たわみ画像計測を実施した結果を報告する。また、反射シールと照明を用いた夜間における画像計測精度を計測結果から検証するとともに、得られた複数橋りょうの桁たわみの相对比较による性能評価結果に関する考察についても述べる。

2. 試験方法

2.1 対象橋りょう

本研究で計測対象とした橋りょうA、橋りょうBおよび橋りょうCの側面図を図1、写真を図2にそれぞれ示す。橋りょうAからCは河川を跨ぐ在来線単線区間における全5連の橋りょう区間のうちの3連である。いずれも橋長13.4m、支間長12.9m、桁高1334mmの鋼上路I桁橋である。当該区間の列車通過速度は60～100km/h程度である。建設年代が古いため当該橋りょうの詳細図面は残っていないが、過去の標準桁の一つであり全国に多く残っている達680号40フィート桁であると考えられる。開床式で床版はなく、橋りょう上フランジに木まくらぎが敷設され、その上にレールが締結装置により固定されている。橋りょうAおよびBは両端支承が橋脚上に設置されているが、橋りょうCの終点側支承のみ橋台上となっており、橋台上に端まくらぎが敷設され、橋台裏のバラスト軌道に接続されている。

2.2 使用機器

夜間での桁たわみ計測を行うために、線路外からビデオカメラで撮影する場合、比較的大規模な照明設備が必要であった。また、照明を設置可能な位置が橋りょうから遠い場合や、橋りょうへの電源を要する機器の設置を

表1 撮影機器の諸元

機器	ID	型番(メーカー)	主な仕様
ハンディカメラ 	SC-1	FDR-AX700 (SONY)	1920×1080 pixel 60 fps 光学ズーム 12倍
ハンディカメラ 高解像度カメラ	SC-2	同上	同上
	DC-1	Pocket Cinema Camera 6K (Blackmagicdesign)	4096×2160 pixel 120 fps / 60 fps
レンズ	-	SIGMA 150-600mm F5-6.3 DG OS HSM (SIGMA)	最大撮影倍率 1:4.9
	UD-II	U ドップラーII (鉄道総研開発)	He-Ne レーザ (クラス2) 周波数帯: DC~2kHz 計測距離: 0.1~100m 自己振動補正機能付き 反射シール使用

避けたい場合には、既存の手法の適用が困難である。以上を踏まえ、本研究では桁に反射シールを設置したうえで、持ち運び可能な1台の照明をビデオカメラと同様に線路外に設置し、橋りょうを照射したうえで撮影を行った。

本計測試験での使用機器は、カメラなどの撮影機器と、ターゲット方式に必要な設備に分けられる。

2.2.1 撮影機器

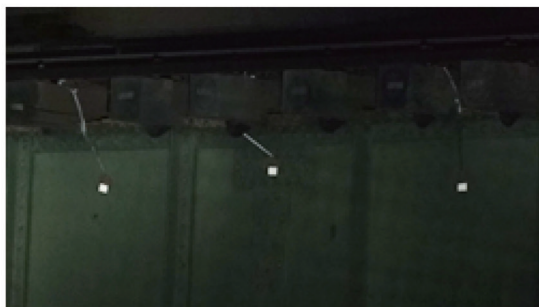
計測で使用した撮影機器の概要を表1に示す。ビデオカメラは民生品のハンディカメラを使用した。同じ列車走行時の複数橋りょうの桁たわみを計測するためここでは2台使用した。また、撮影距離が多少異なる橋りょうAとBを比較的近い精度で撮影できるように別の高解像度カメラも利用した。高解像度カメラは映像作品製作用のシネマカメラに望遠レンズを取り付けて使用した。これらのカメラはいずれも三脚を用いて安定した地面に設置し、60fpsで撮影した。さらに、カメラによる画像計測との比較対象として、高精度で桁たわみを計測可能であるUドップラー⁴⁾(UドップラーII)によるレーザ計測も実施した。Uドップラーの詳細については文献4を参照されたい。以下では、それぞれについて表1記載のID(ハンディカメラ:SC-1・SC-2、高解像度カメラ:DC-1、UドップラーII:UD-II)で呼称する。

2.2.2 ターゲットと照明

図3に橋りょうBにおける日中と夜間の撮影状況および照明の設置状況をそれぞれ示す。ターゲットには、50×50mmのマグネットシートタイプの反射シールを使用し、橋りょうAおよびBのウェブ上部に設置した。設置は橋りょう上保守用通路から実施したため、線路内立ち入りは必要となるが、高所作業車や足場設置は不要である。照明は図3(c)のようなLEDライトを、橋りょうAとBの間の橋脚が照射範囲の概ね中央となる方向で、橋りょうから20mから30m離れた撮影箇所の際に1台のみ設置した。照明の全光束は約28,080lm、照射角度は約40°である。夜間は光量が少ないため、日中の画像に見られた桁側面のボルトや補剛材などの特徴は不明瞭である。しかし、反射シール箇所は照明により輝度が十分に確保されており、反射シール以外の箇所との明確なコントラストを確認できる。



(a) 日中の反射シールの撮影状況



(b) 夜間の反射シールの撮影状況



(c) 照明の設置状況

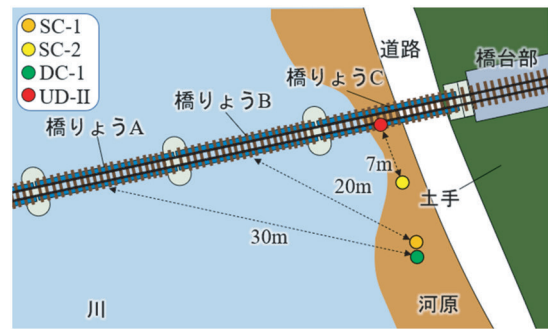
図3 照明の設置状況および橋りょうBにおける昼夜での反射シールの状況

2.3 計測ケース

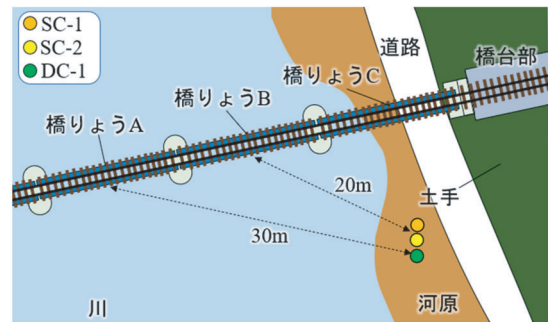
表2および図4に計測ケースおよび各ケースでの機器配置と撮影距離をそれぞれ示す。ケース1およびケース2は、本試験環境での画像計測の基本的な精度を確認するため、橋りょうCをUD-IIとSC-2により計測した。

表2 計測方法および使用機器と対象箇所

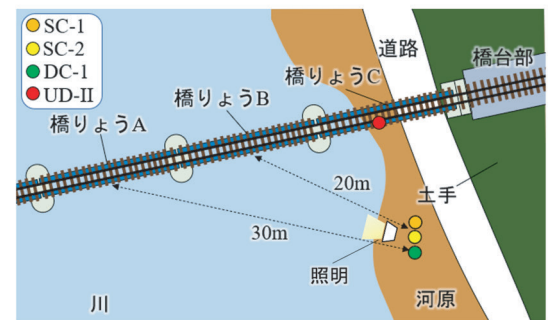
ケース	種別 車両	時刻	橋りょう			目的
			A	B	C	
1	普通 2両	13:41 日中	DC-1	SC-1	UD-II SC-2	SC-2とUD-II の比較
2	特急 7両	13:44 日中	DC-1	SC-1	UD-II SC-2	
3	普通 2両	14:42 日中	DC-1	SC-1 SC-2	-	SC-1による 昼夜での比較
4	普通 2両	21:33 夜間	DC-1	SC-1 SC-2	UD-II	
5	貨物 9両	23:30 夜間	DC-1	SC-1 SC-2	UD-II	3橋りょうの比較



(a) ケース1およびケース2



(b) ケース3



(c) ケース4およびケース5

図4 各ケースにおける機器配置と撮影距離

ケース3およびケース4では、反射シールを利用した夜間画像計測の精度を確認するため、同種同方向の列車通過時の橋りょうBを日中および夜間で計測した。ケース3は日中、ケース4は夜間である。以上により画像計測および夜間計測の精度を確認したうえで、橋りょうごとの桁たわみ量の違いを把握するために、ケース5では夜間に橋りょうA、B、およびCをそれぞれDC-1、SC-2、およびUD-IIで計測した。

3. 画像処理

撮影した映像を画像に分解した後、DIC法²⁾⁶⁾により画像内の任意箇所の変位を算出する。DIC法は、測定対象物の模様ランダム性を利用して複数画像内の対応箇所を抽出する手法であり、対象物の変位の算出に利用されている。物体追跡の代表的な手法であり、橋りょうの変位推定以外にも金属片のひずみ計測等⁹⁾で数多くの適用事例がある。本章では、具体的な画像処理手法について以下に説明する。

3.1 ヒストグラム均等化

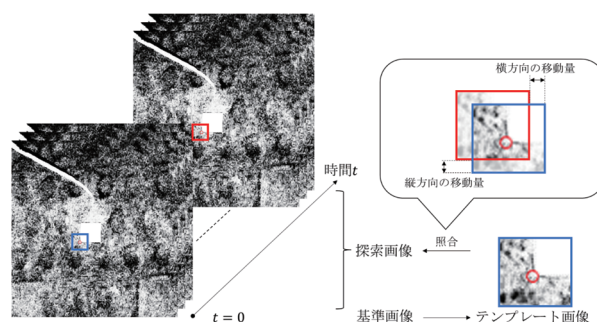
コンクリート橋などの構造物を日中に撮影すると、コントラストが低くなることもある。そのため、日中の画像に対してのみ、反射シールとそれ以外の箇所とのコントラストを大きくするためにヒストグラム均等化を行う。夜間の画像については、反射シールにより画像計測が適用可能なコントラストが生成されるため、ヒストグラム均等化は行わない¹⁰⁾。

3.2 テンプレートマッチング

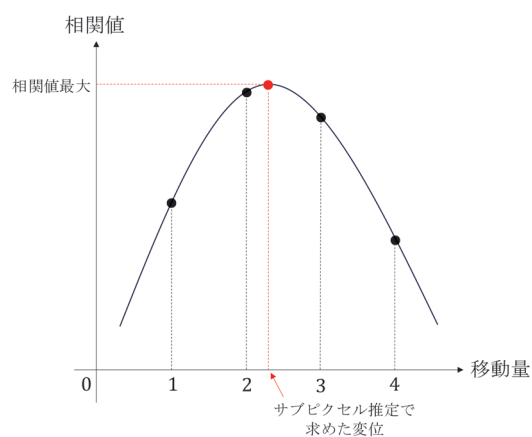
図5(a)に反射シールを含む桁側面の画像に対するテンプレートマッチングの処理を示す。テンプレートマッチングは、列車通過前の画像の一部を基準画像とし、列車通過中の参照画像の中で基準画像と最も類似する箇所を探索する手法である。基準画像の各移動位置での相関値を求めることで2次元相互相関関数が得られ、最大値を取る位置を移動量として算出する。列車通過時の主桁では、列車の影により画像上での明るさが変動する場合があります。濃度差やその2乗和を指標として用いると、明るさの変化から類似度の算定精度が低下する可能性がある。そこで、本研究では各画素における輝度値から領域全体における輝度値の平均を差し引いてから正規化した値である、零平均正規化相互相関ZNCC (Zero-mean Normalized Cross-Correlation)⁶⁾をテンプレートマッチングの指標とした。

3.3 サブピクセル推定

テンプレートマッチングで推定された移動量は1ピ



(a) テンプレートマッチング



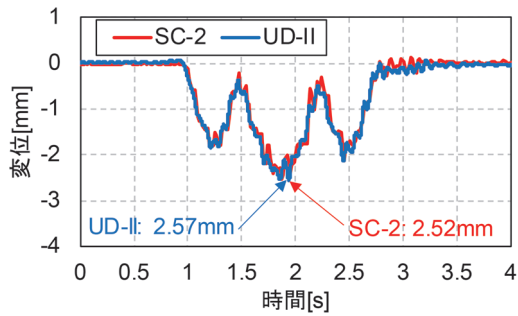
(b) 二次曲線によるサブピクセル推定

図5 画像処理手法

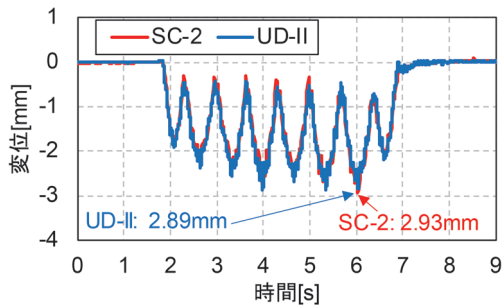
クセル単位であるため、カメラの設置位置が橋りょうから20mを超えるような場合には、桁たわみの計測精度として不十分となる場合が多い。そこで、サブピクセル推定により1ピクセル未満の移動量を推定する。図5(b)は、二次曲線で一次元の移動量をサブピクセル推定した場合の相関値のグラフである。本手法では、二次元の画像に対して移動量を計算するため、二次曲面を利用したサブピクセル推定を行う。相関値が最大になる移動量とその周囲8画素の移動量におけるZNCCに対して、最小二乗法による二次曲面のフィッティングを行い、二次曲面で最大値を与える1画素未満のサブピクセル移動量を推定する。

3.4 実寸値への変換

画像から上記のサブピクセル推定により得られる変位はピクセル単位で表されるため、実寸値への変換を行う。ターゲット方式の場合はターゲットの寸法を用いることで正確な換算が可能である。一方、ノンターゲット方式の画像計測では、画像上の実寸値が既知かつ撮影中に寸法が変化しない箇所による変換、もしくは事前のカメラ諸元の入手、キャリブレーションおよび正確な撮影距離が必要である。本研究では、反射シールを設置してい



(a) 計測ケース 1 (列車速度 : 106km/h)



(b) 計測ケース 2 (列車速度 : 107km/h)

図 6 画像計測およびレーザ計測の比較 (橋りょう C)

いケース 1 および 2 では橋りょうの桁高さ (1334mm)、ケース 3、ケース 4 およびケース 5 では反射シールの一辺の長さ (50mm) を用いて変換した。

4. 試験結果と考察

4.1 画像計測とレーザ計測の計測結果の比較

画像計測は、撮影環境や条件により日中であっても計測精度が変化する。そこでまず日中における画像計測の精度の確認を行うため、日中のケース 1 およびケース 2 において、UD-II および SC-2 により計測された橋りょう C の支間中央の変位を比較した。列車速度はいずれのケースでも 106km/h 程度であった。ピクセルから変位への寸法変換係数はケース 1、ケース 2 でそれぞれ 1.68mm/pixel および 1.66mm/pixel であった。

UD-II および SC-2 で計測されたケース 1 およびケース 2 の桁たわみ波形および最大値を図 6 に示す。SC-2 の波形は UD-II の波形と良好に一致している。両ケースの各波形で記録された桁たわみ最大値もほぼ同様の値 (ケース 1 では UD-II : 2.57mm, SC-2 : 2.52mm, ケース 2 では UD-II : 2.89mm, SC-2 : 2.93mm) であり、その差はいずれも 0.05mm 程度であった。一方、列車通過時における 2 つのカメラによる計測値の差の標準偏差は、ケース 1 で 0.12mm (0.75 秒~3.50 秒)、ケース 2 で 0.10mm (1.70 秒~7.50 秒) であり、桁たわみ最大値の差は両ケースで標準偏差よりも小さかった。以上か

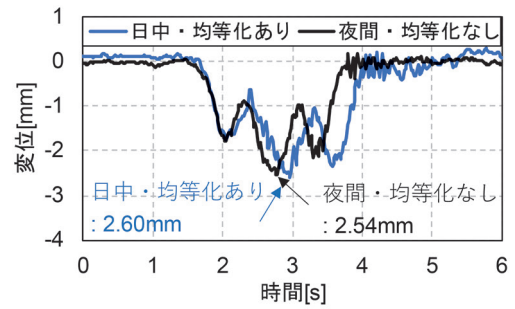


図 7 日中と夜間の計測結果の比較 (橋りょう B)

ら、今回の計測条件においても過去の研究結果^{2) 6)}と同様に、少なくとも日中においてはビデオカメラによる画像計測で、UD-II と同程度の精度で桁たわみを計測できることを確認した。

4.2 日中と夜間での計測結果の比較

画像解析による夜間の計測精度を確認するため、日中と夜間で計測結果の比較を行った。日中計測のケース 3 および夜間計測のケース 4 において同じ車種の 2 両編成列車がともに下り方向に通過した際に、両ケースで SC-1 により橋りょう B の支間中央を計測した。SC-1 による撮影の様子は、図 3 (a) および (b) の通りである。日中計測のケース 3 での照度は約 35,000lx であったが、夜間計測のケース 4 での照度は試験の都合上測定していない。なお、乗車率や列車速度 (ケース 3 は 82km/h, ケース 4 は 92km/h) の違いに起因する桁たわみの若干の相違が存在する。ピクセルから変位への寸法変換係数は、ケース 3 で 1.99mm/pixel およびケース 4 で 0.56mm/pixel であった。ケース 4 では橋りょう B 全体を広角に撮影したため、寸法変換係数は他ケースと比較して小さくなった。

ケース 3 (日中) およびケース 4 (夜間) の桁たわみ波形および最大値を図 7 に示す。3.1 節で述べた通り、日中の画像に対してのみヒストグラム均等化を適用している。列車速度が異なるため位相が若干異なるが、列車通過時の桁たわみ波形は概ね同じ傾向を示す。また、日中と夜間で桁たわみ最大値の差は 2.3% 程度 (0.06mm) と、4.1 節で示した画像計測とレーザ計測の誤差程度であり、概ね一致していると言える。以上から、反射シールと 1 台の照明を使用することで、20m 程度離れた橋りょうの桁たわみを日中と概ね同等の精度で夜間でも計測できることを確認した。

4.3 3 橋りょうでの比較

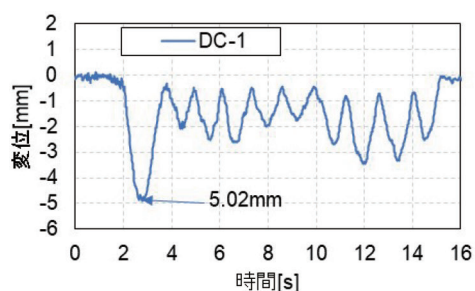
4.2 節の試験結果から、桁側面に反射シールを設置すれば、1 台の照明により夜間に桁たわみを日中と同程度の精度で計測できることが明らかとなった。そこで、よ

り簡易に計測できるようになった桁たわみを橋りょうの維持管理に活用する事例として、カメラとUドップラーIIによる3橋りょうの同時計測を行い、桁たわみの相对比较による性能評価、および今後の調査の優先順位付けについて検討した。本研究では夜間計測のケース5で、貨物列車通過時に3橋りょうを同時に計測した。対象橋りょうはDC-1が橋りょうA、SC-2が橋りょうB、UD-IIが橋りょうCであり、計測箇所はいずれも支間中央である。

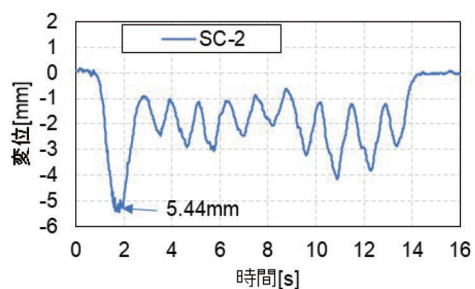
得られた桁たわみ波形および最大値を図8および表3にそれぞれ示す。いずれの橋りょうでもほぼ同様の桁たわみ波形が計測されていることを確認できる。また、いずれの橋りょうでも貨物列車の動力車である先頭車両通過時に最大変位が記録された。貨物列車は旅客列車より荷重が大きいため、ケース1からケース4と比較して桁たわみも倍程度となっている。

表3最右列は、3橋りょうに対する桁たわみ最大値の相对比较を示す。UD-IIにより計測した橋りょうCを1とした場合、橋りょうAは3% (0.17mm) ほど小さく、橋りょうBは5% (0.25mm) ほど大きい。これまでの検証結果から、UD-IIと画像計測との差および、日中と夜間の画像計測の差はいずれも0.06mm程度以下である。また、標準偏差は0.1mm程度であるため、その2倍の0.2mm以上で統計的に有意な差と言える。以上を踏まえると、橋りょうAとCの差は有意とは言えないが、橋りょうBとCの差(0.25mm)、橋りょうBとAの差(0.42mm)は誤差とは言えず、橋りょうの状態もしくは性能に起因するものと推察される。なお、これらの橋りょうの形式および支間長は同一である。ただし、橋りょうAおよびCには橋りょう上にレール継目が存在するため、橋りょうAおよびCではレール継目通過時に生じる衝撃力により桁たわみ最大値がレール継目のない橋りょうBよりも大きくなる可能性がある。しかしながら、実際には表3に示すようにレール継目のない橋りょうBの桁たわみ最大値がもっとも大きいため、橋りょうBには他の橋りょうAおよびCにはない構造的な特徴もしくは変状が想定される。なお、計測時に行った外観目視では橋りょうAの桁端部に腐食が確認されたが、橋りょうBおよびCでは桁たわみを増大させるような変状は確認できていない。今後、橋りょうBの桁たわみが大きい原因を明らかにするため、支承部の浮き・あおり¹¹⁾などの詳細な計測および調査を行う予定である。

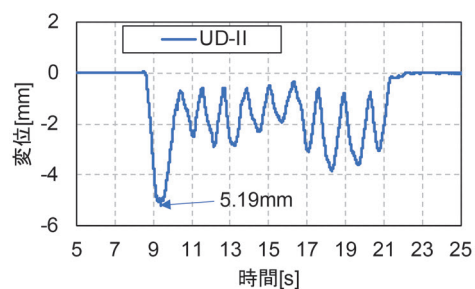
上記の例では各橋りょうで異なる計測方法を用いたが、比較的安価かつ容易に設置できる民生品のビデオカメラを複数台使用すれば、従来は費用や労力の面で困難であった複数橋りょうに対する桁たわみの計測および比較が可能である。加えて、反射シールと持ち運び可能な



(a) 橋りょう A (DC-1)



(b) 橋りょう B (SC-2)



(c) 橋りょう C (UD-II)

図8 貨物列車通過時の各橋りょうの桁たわみ計測結果

表3 貨物列車通過時の各橋りょう桁たわみ最大値

橋りょう	桁たわみ 最大値 [mm]	橋りょうCに 対する変位差 [mm]	橋りょうCに 対する比率
A	5.02	-0.17	0.97
B	5.44	0.25	1.05
C	5.19	-	1

照明を使用すれば、夜間であってもビデオカメラによる画像計測を実施できる。同時計測時は、上述の通り、各橋りょうに対して車両側の条件はほぼ一致するため、橋りょう間の性能の相对比较および詳細調査などの優先順位付けが容易となる。

5. まとめ

本研究では夜間におけるビデオカメラを利用した簡易な桁たわみの画像計測を実施した。得られた知見を以下にまとめる。

- ・橋りょう側面に反射シールを設置することで、橋りょうから 20m 程度離れた箇所に設置した照明およびビデオカメラにより、夜間でも列車通過時の 2.5mm 程度の桁たわみを 0.06mm 程度の誤差で画像計測できることを明らかにした。
- ・反射シールを使用することで橋りょう側面自体を撮影可能な明るさを確保できない場合でも、反射シール周辺の輝度分布を利用して画像計測が適用可能であることを確認した。
- ・同形式の 3 橋りょうを複数カメラで夜間に同時計測することで、同じ列車条件での対象橋りょう桁たわみの相対比較が可能となることを示した。

今回の計測時は雨風ともになく良好な撮影環境であったが、雨天や強風時には依然として画像計測が適用できない場合も多い。今後、風防など悪天候時に対応した撮影方法に加え、オプティカルフロー推定などと合わせた画像処理によるカメラや三脚の揺れの影響低減法について検討していく。また、今回桁たわみが相対的に大きかった橋りょう B については別途調査を実施し、その原因を明らかにする予定である。

謝 辞

本研究における計測試験では、四国旅客鉄道株式会社に多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚く御礼申し上げる。

文 献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説—変位制限, 丸善出版, 2006
- 2) Matsuoka, K., Uehan, F., Kusaka, H. and Tomonaga, H.: Experimental Validation of Non-Marker Simple Image Displacement Measurements for Railway Bridges, Applied Sciences, Vol.11, No.25, p.7032, 2021.
- 3) 徳永宗正, 池田学, 吉田幸司: 実測加速度積分による列車通過時の単純支持橋りょうの変位応答波形の復元, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.78, No.1, pp.47-60, 2022
- 4) Uehan, F.: Development of the U-Doppler non-contact vibration measuring system for diagnosis of railway structures, Quarterly Report of RTRI, Vol.49, No.3, pp.178-183, 2008.
- 5) 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.
- 6) 朝長光, 阪田暁, 加藤積希, 松岡弘大, 箕浦慎太郎: 高速鉄道橋りょうにおける非接触たわみ計測の適用性検証, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.24, pp.1-8, 2020
- 7) 四井陽貴, 松岡弘大, 貝戸清之: サブピクセル推定誤差発生メカニズムに着目した橋りょう変位の全視野画像計測の実用的改善法, 土木学会論文集, Vol.79, Issue.15, No.22-15054, 2023
- 8) 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
- 9) 出水亨, 松田浩, 戸次翔, 森崎雅俊, 内野正和, 伊藤幸広, 森田千尋: デジタル画像相関法のひずみ計測向上に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.68, No.2, pp.I_683-I_690, 2012
- 10) 保木本晟也, 松岡弘大, 石井貴大, 中田悠貴: 反射シールを利用した桁たわみの夜間画像計測, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.27, pp.111-118, 2023
- 11) 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