

32 品質管理

渓谷に架かるスパンドレル・ブリースト・ バランスドアーチ橋の桁たわみ計測

日本橋梁建設土木施工管理技士会

エム・エム ブリッジ株式会社

設計担当

現場代理人

監理技術者

北川 淳一〇

森谷 和貴

梅林 栄治

1. はじめに

第一白川橋りょうは、一級河川白川に架かり、南阿蘇鉄道高森線 立野駅～長陽駅間に位置する全長166.3mの単線鉄道橋である。昭和2年に建設された本橋は、2ヒンジスパンドレル・ブリースト・バランスドアーチと呼ばれる国内でも数少ない橋梁形式を有しており、平成27年度には、選奨土木遺産として選出された。しかし、その翌年の平成28年4月に熊本地方を襲った最大震度7の地震により、この第一白川橋梁も大きな損傷を受け、架け替えを余儀なくされた。本工事では、旧橋の解体計画・新橋の詳細設計から始まり、旧橋の解体工事～新橋製作～新橋架設までの全てを行った。その中でも難関であった撤去工事に関しては、第26回 土木施工管理 技術論文にて紹介しているので参考されたい。図-1に、架け替え後の第一白川橋りょうを示す。新橋は、旧橋と同じ形式を踏襲し、色調も実際に旧橋と見比べ再現することで、多くの人に愛され記憶に残る土木遺産としての景観美を復活させた。

工事概要

- (1) 工事名：第一白川橋りょう復旧工事
- (2) 発注者：南阿蘇鉄道株式会社
- (3) 工事場所：熊本県阿蘇郡南阿蘇村
- (4) 工期：平成30年7月19日～
令和5年2月24日

鉄道橋では、開通前の最終検査として車両が走

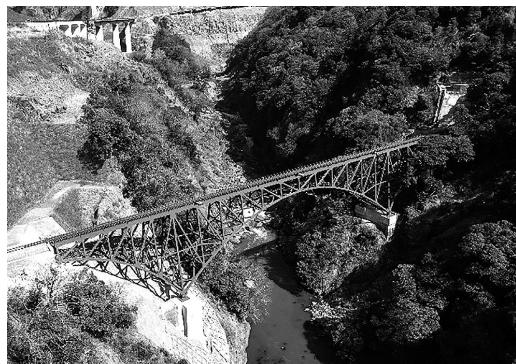


図-1 架け替え後の第一白川橋りょう
行した際のたわみを計測することとなっている。
本稿は、第一白川橋りょうでのたわみ計測における課題とその対策について述べるものである。

2. 車両走行時のたわみ計測

鉄道橋では、開業監査に伴い、桁たわみ測定を実施することが『開業監査における桁のたわみ測定の手引き』(独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構) に定められている。

たわみ測定とは、橋梁において列車通過時の鉛直方向の変位を時系列的に測定するものである。

たわみ測定の目的は、列車の走行安全性の確保、乗客の乗り心地の確保、実構造物の強度の確認、設計法の安全性の確認、設計法の改善資料の収集とされている。上記目的のため、鉄道橋である本橋も、桁たわみ測定を実施することとなった。

3. 試験車両における桁たわみ計算

今回の試験には、南阿蘇鉄道の復興に合わ

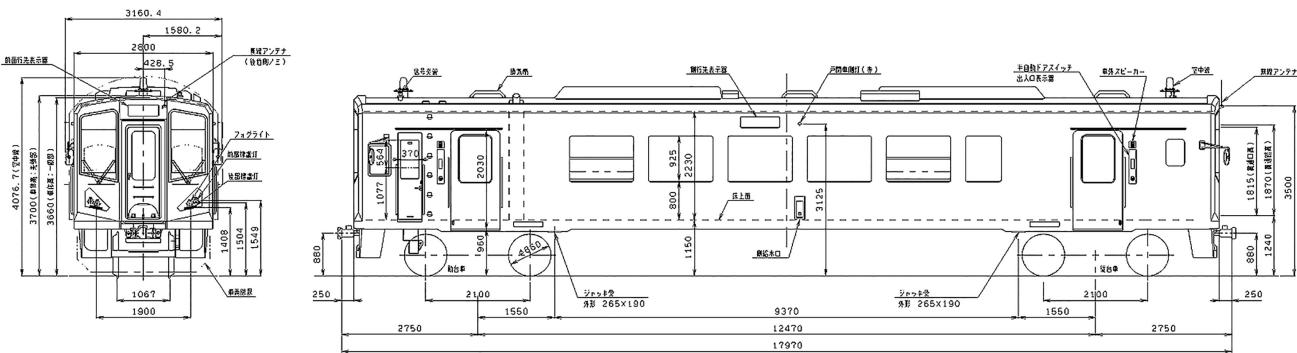


図-2 試験車両

表-1 試験車両諸元

車両形式	MT-4000 形	
車両重量	31.5(t)	
主要寸法	最大長	17.97(m)
	車体長	17.47(m)
	最大幅	3.1604(m)
	車体幅	2.8(m)
設計最高速度	95km/h	
運用速度	65km/h	

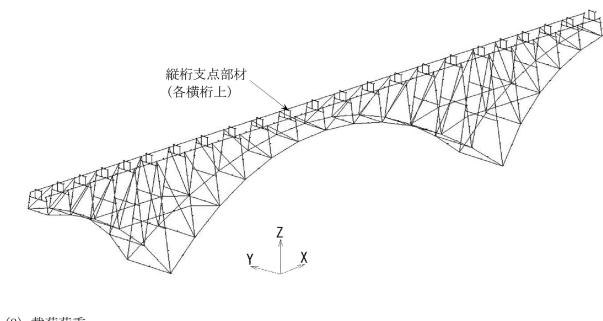


図-3 解析モデルと載荷図

せて製作された新型車両を用いることとした(表-1・図-2)。試験に用いる車両と設計列車荷重が異なるため、試験車両による桁のたわみを、立体骨組みモデルを用いて事前に計算し、試験時のたわみ限界値を求めた。対象位置(測定箇所)は、最大たわみ位置となる上弦材と縦桁の中央径間支間中央とし、計算にあたっては、本体設計に用いた立体骨組みモデルを用いた(図-3)。

たわみ計算の結果、上弦材における最大変位量は $\delta u = 5.807\text{mm}$ 、縦桁では、上弦材のたわみ量と足し合わせ $\delta st = 6.440\text{mm}$ となった。本橋はその橋梁形式から剛性が高く、たわみ量が非常に小さいのが特徴である。

4. 桁たわみ計測方法の選定と課題

本橋のたわみ量は上述のとおり、非常に微小であるため、より精度の高い計測方法が望まれた。また、架橋位置の条件からも適切な計測方法を選定することが課題であった。

現在までに実測または使用の妥当性が検証された測定方法として以下の方法が挙げられる。

- 1) ピアノ線方式
- 2) ビデオ方式
- 3) レーザードップラー方式
- 4) モアレ式画像解析方式
- 5) ノンターゲット方式

中でも、1) ピアノ線方式は、これまでの実績も多く、桁下に計器を設置可能な箇所であれば、精度および汎用性が高く経済的な手法である。しかし本橋は、白川の渓谷に位置するため、計器を桁下に設置することはできない。また、3) レーザードップラー方式も桁下面からの計測方法となるため適用することができない。

2) ビデオ方式および5) ノンターゲット方式については、非接触型の計測方法であり桁下の制約を受けないが、他に比べて精度が低い。そこで、同じく非接触型の計測方法で、精度の高い4) モアレ式画像解析方式(以下、モアレ方式と

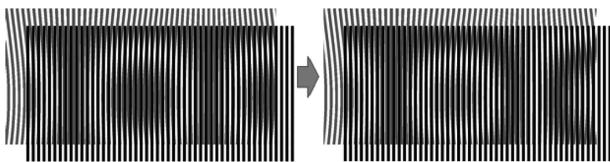


図-4 モアレ縞

称す)による計測を採用することとした。しかし、通常のモアレ方式では、橋に対して正対する必要があったが、それでは本橋のような渓谷にかかる橋では計測できない。そのため、今回は橋軸方向からの撮影でもたわみを計測できる方式(産総研方式)を採用することとした。

5. モアレ法とは

周期的な規則模様を持つ画像を二つ重ねると、図-4に示すような干渉模様(モアレ縞)が現れる。このとき、一方の画像をわずかに動かしただけでも、モアレ縞の模様が大きく変化する。(図の左側の画像を1%動かしたとき、右側の画像のようにモアレ縞が大きく変化することがわかる。)

モアレ縞の模様変化は、数学的には位相変化と呼ばれるが、モアレ縞を利用することで、わずかな変形を大きな位相変化として観察することができるため、それを構造物の変位計測に用いることができる。

周期的模様をデジタルカメラで撮影すると、規則的に配列されたイメージセンサーに周期的模様の輝度情報が記録される。この撮影画像に対して、間引きと輝度補間を行うことでモアレ縞を作成することができる。そこで、構造物が変位する前後の画像から作成したモアレ縞の位相分布変化を観測することで、構造物の変位分布を評価することができる。

6. 桁たわみ計測

6-1 使用機器とマーカー

計測用のカメラは、カメラ設置位置から計測対象までの距離と、計測要求精度によって決まる。今回の条件から、図-5(a)に示す6K相当のデジタルカメラとシネマレンズを採用することとした。



(a) 6Kカメラ (b) LEDライト

図-5 使用機器

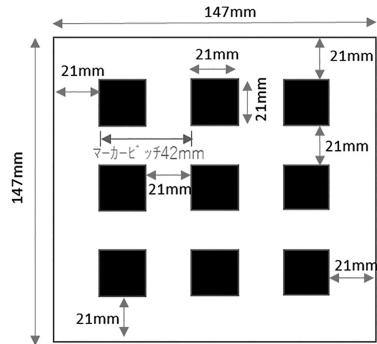


図-6 マーカーのパターン

マーカーは、図-6に示すパターンを印刷した再帰性反射フィルムをプラスティック板に貼り付け製作した。計測精度は、マーカーピッチの1/100～1/1000となる。そのため、このマーカーでは0.042mmから0.42mmの精度となる。また、再帰性反射フィルムを使用することで、マーカーの黑白の輝度勾配値(コントラスト)が高まり、カメラ位置から図-5(b)に示すLEDライトでマーカーを照射しながら計測を行うことでさらに精度を上げている。

6-2 マーカーとカメラの配置

マーカーとカメラの配置を図-7に示す。1A側(陸上部)に計測カメラを設置し、橋軸方向に撮影する。マーカーはさらに金属板に貼り付け、振動でずれないようCクランプにて上弦材、縦桁に固定した(図-8)。また、基準点となる固定マーカーをカメラと計測点の間に設置した。

6-3 計測ケースと計測結果

計測は以下の2ケースにて行った。

- 1) 中央部に静止した状態でのたわみ計測
- 2) 65km/hで走行中のたわみ計測

計測の手順は、①車両無載荷の状態でカメラ撮影②中央に車両が停車した状態でカメラ撮影③車

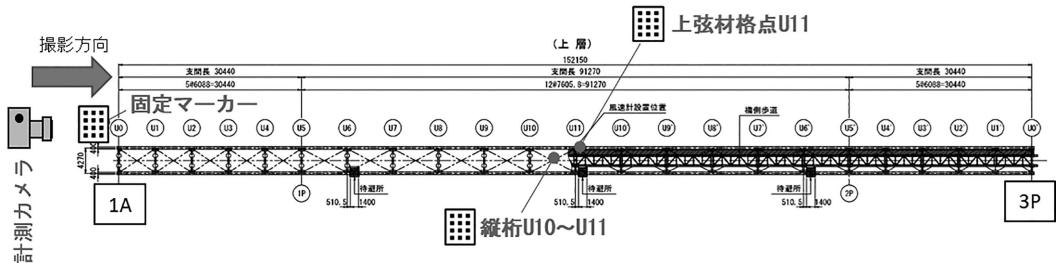


図-7 マーカーとカメラの全体配置

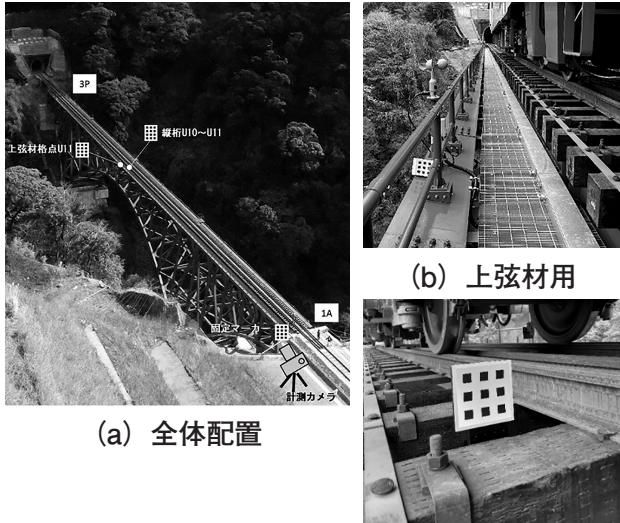
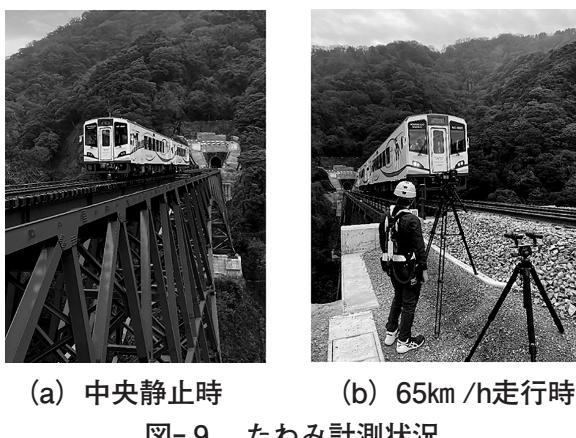


図-8 マーカーの固定状況



(a) 中央静止時 (b) 65km/h走行時
図-9 たわみ計測状況

両が65km/hで走行中にカメラ（ビデオ）撮影の順でを行い、それぞれのケースでのたわみ量を計測することとした（図-9）。計測した結果を図-10に示す。中央静止した状態では、上弦材の設計制限値4.64mmに対し、最大発生たわみは2.203mmであった。また、運用速度である65km/h走行時は、設計制限値5.43mmに対し、最大発生たわみは3.101mmであった。それぞれのケースで設計制限値以下のたわみ量であることを確認でき、本計測

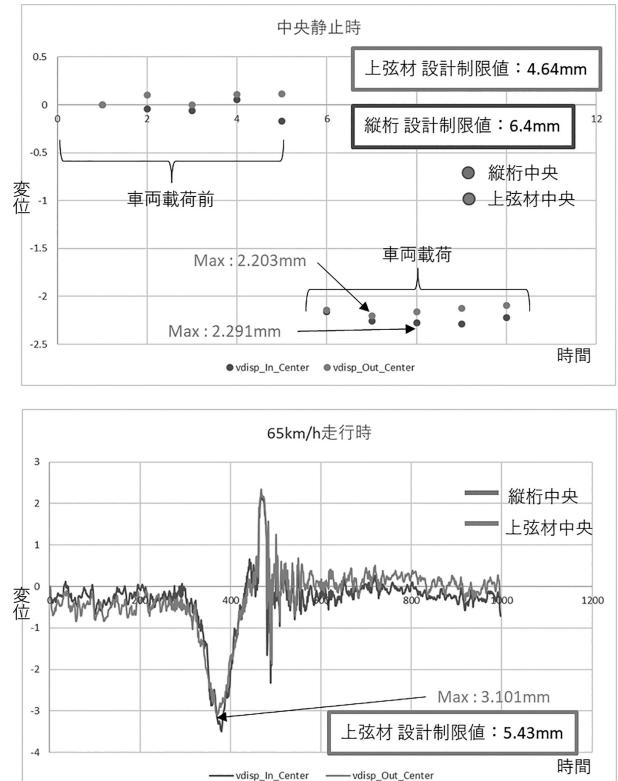


図-10 桁たわみ計測結果

の目的である、列車の走行安全性・乗客の乗り心地が確保されていること、実構造物の強度・設計法の安全性を確認することができた。

7. おわりに

今回、非常にたわみ量も小さく計測精度が求められ、かつ架橋位置も渓谷に位置することから、計測方法の選定に課題があった。橋軸方向からも計測できるモアレ方式を採用することでこの課題をクリアし、小さなたわみ量も計測することができた。たわみ量も制限値内に収まっており、安心して運行頂けることを確認した。

南阿蘇鉄道は令和5年7月に無事復興開通し、現在では多くの観光客で賑わっている。