

報告 北陸新幹線 PRC 桁の共振動現象に対する対策工事

荻原 裕貴*1・品田 卓也*2・原田 悟*3

要旨：新幹線の PRC 桁（桁長：30m，支間：29.2m）において，列車通過時に共振動現象が生じていることが確認され，それに伴い大きなたわみが発生していることが分かった。そのため，将来にわたって確実に共振動現象の解消が可能であると考えた下支え工法（鋼製アーチ構造および鉄筋コンクリート柱構造）を選定し施工した。鋼製アーチ構造は，気温変動に伴う桁のこう上等の課題があったが，杓構造の変更と桁の挙動を計測し計測結果に基づいた軌道整備を行うことで課題を解決した。対策後は共振動現象を解消し，たわみを低減することができた。

キーワード：PRC 単純 T 桁，共振動現象，たわみ，支点追加

1. はじめに

北陸新幹線（長野開業区間：高崎・長野駅間）の一部の PRC 単純 T 形 4 主桁において，橋りょう上の電化柱に支持された電力架線で損傷が見られる事象が発生した。調査の結果，列車通過時の桁の振動により電化柱が揺れ，電力架線に損傷を与えたことが判明した。そこで列車通過時の桁（以下，A 橋と B 橋）のたわみの計測を行った結果，特定の列車速度域において，共振動現象が生じていることが確認され，それに伴い大きなたわみが発生していることが分かった。その後さらに同種構造の 2 橋（以下，C 橋と D 橋）でも同様の事象が発生した。共振動現象による桁剛性の低下，たわみの増加の進行性が懸念されるため，レーザー式非接触振動測定器によるたわみの定期計測，加速度計によるたわみの常時監視および営業列車による軌道の動揺値の計測を実施し，経時変化を把握した。計測中にたわみが走行安全性の制限値²⁾に近い値を示し，軌道の動揺値も増加傾向にあることが確認されたため，共振動現象を避ける目的で速度制限を実施した。速度制限を解除するため，早急に共振動現象対策工を実施することが求められた。

本稿では，上述の 4 橋に対して実施した共振動現象対策工について報告する。

2. 対象構造物の概要

2.1 A 橋と B 橋

A 橋と B 橋は，図-1 に示すように複線桁である。また，桁長：30m，支間：29.2m の PRC 単純 T 形 4 主桁である。図-2 に概況写真を示す。A 橋と B 橋の橋脚高さは 26.5m であり，基礎形式はフーチングを有する場所打ち杭形式である。周辺環境は，A 橋では桁下利用は無いが田畑が近接しており，B 橋では桁下に市道がある。

2.2 C 橋と D 橋

C 橋と D 橋は A 橋と B 橋と同様の標準設計を用いられているため主桁断面等は，図-1 に示している構造と同様である。図-3 に，C 橋と D 橋の概況写真を示す。C 橋と D 橋の橋脚高さは 22.5m であり，基礎形式は直接基礎形式である。周辺環境は，C 橋では桁下に林道が横断しており，D 橋では桁下の利用は無いが，上り線側は自然斜面の山裾に位置している。

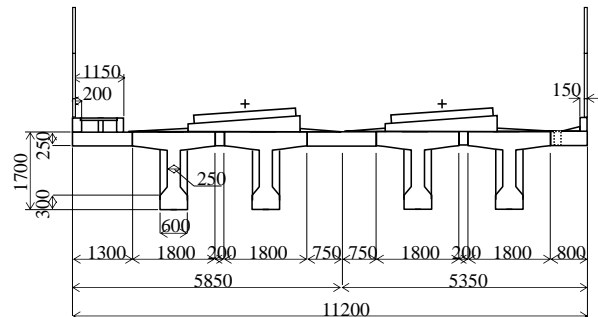


図-1 A 橋・B 橋 断面図



図-2 A 橋・B 橋 概況写真

*1 東日本旅客鉄道（株） 構造技術センター（正会員）

*2 東日本旅客鉄道（株） 高崎土木技術センター

*3 東日本旅客鉄道（株） 設備部



図-3 C橋・D橋 概況写真

3. 対象構造物のたわみ

表-1 に、レーザー式非接触振動測定器で測定した列車通過時の支間中央部におけるたわみを示す。A橋の下り線、D橋の上り線で、走行安全性の制限値 24.3mm²に近い値のたわみが確認されたため、210km/h の速度制限を実施した。図-4 に、A橋の列車通過時のたわみの時刻歴波形を示す。なお、この時刻歴波形は12両編成の列車が通過した際の波形である。共振動現象の特徴である加振毎のたわみ増加と上方へのたわみが発生していることが分かる。また、C橋とD橋の下り線では、軌道の動揺値が増加傾向にあったため、同様に210km/h の速度制限を実施した。

表-1 各桁のたわみ

高架橋名称	線別	最大たわみ(mm)	通過速度(km/h)
A橋	上	22.0	219
	下	23.8	229
B橋	上	22.1	225
	下	19.0	228
C橋	上	22.9	227
	下	21.8	233
D橋	上	23.8	238
	下	22.1	234

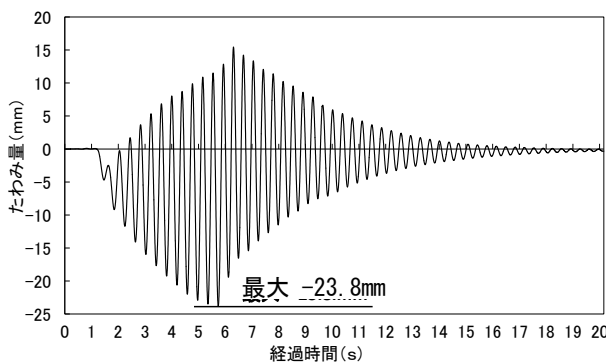


図-4 たわみの時刻歴波形

4. 対策工事

4.1 共振動現象対策工の比較検討

桁の共振動現象は、列車走行時の輪重による加振振動数が桁の固有振動数に近づくことで発生する。共振動現象を解消するためには、桁の固有振動数を変化させ、加振振動数から遠ざけることでたわみを抑制する必要がある。一般に桁の固有振動数は、ベルヌーイ・オイラー梁の弾性理論である式(1)から算出される。

$$n = \frac{\pi}{2L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI \cdot g}{D_1 + D_2}} \quad (1)$$

n : 桁の基本固有振動数(Hz) L : 支間長(m)

g : 重力加速度(m/sec²) I : 断面二次モーメント(m⁴)

E : コンクリートの弾性係数(kN/m²)

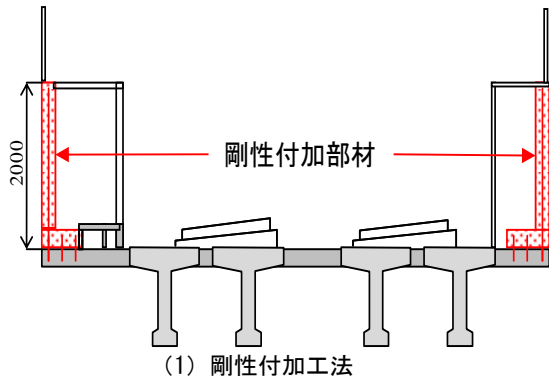
D₁ : 単位長さあたりの固定死荷重(kN/m)

D₂ : 単位長さあたりの付加死荷重(kN/m)

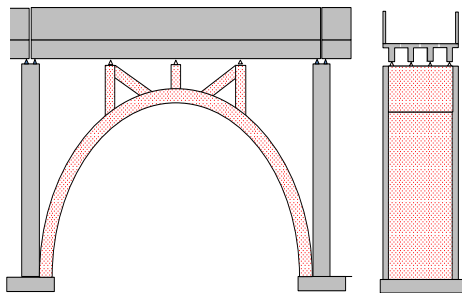
桁の固有振動数を変化させるための工法として、①曲げ剛性(EI)を向上させる剛性付加工法と、②支間長(L)を短縮する支点追加工法(下支え工法)を検討した。図-5 に、剛性付加工法と下支え工法の概要図を示す。剛性付加工法は、張出しスラブ上に場所打ちコンクリート高欄を打設し、張出しスラブとジベル鉄筋を一体化することで剛性を向上させる工法である。下支え工法は、桁下に架台を作ることで支点を追加し、支間を短縮する工法である。

2つの工法について比較検討を行った。剛性付加工法は、線路内作業になるため保守作業間合いで施工を完了させる必要があった。また、電化柱や信号ケーブルダクトが支障となるため工期の長期化と工事費が高くなることが想定された。さらに、現況の張出しスラブでは増設した高欄を支えることができないため、張出しスラブを補強する必要があり、さらに工期の長期化と工事費が高くなることが予想された。そこで、主に線路外からの昼間施工が可能で、支障移転が少なく、既設構造物の補強の必要が無い、下支え工法による補強を実施した。また、工法の検討時には共振動現象が発生する原因が不明確であったため、下支え工法であれば将来にわたって確実に共振動現象の解消が可能であると考えた。なお、共振動現象の原因については、千頭ら³⁾により報告されている。

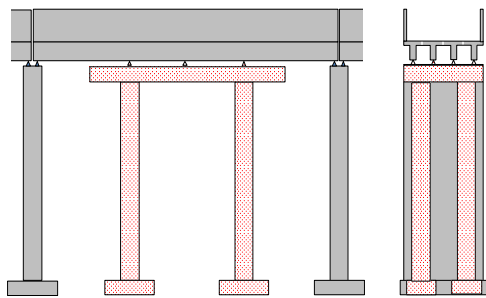
下支え工法は、桁下に道路等が交差する場合にこれらに支障を来さないようにアーチ構造を採用した。また、桁下を使用していない箇所は直柱構造による下支え工法を施工した。



(1) 剛性付加工法



(2) 下支え工法 (アーチ構造)



(3) 下支え工法 (直柱構造)

図-5 工法概要図

4.2 下支え工法の構造形式

下支え工法の構造形式は、A橋とB橋およびC橋は桁下の利用状況が同様で道路等があることから、道路空間を確保できるアーチ構造とした。また、各桁とも同構造で設計しており、これは対策の早期完了を目的とし、工期短縮を図るためである。

図-6 にアーチ構造のA橋の対策工一般図を、図-7 に直柱構造のD橋の対策工一般図を示す。アーチ工の基礎形式は、既設橋脚のフーチングを利用した基礎とした。これは、独立基礎では掘削土量が多くなるためである。また、本体構造は鋼構造とした。これは、工場製作が可能になるため品質確保が比較的容易であり、またコンクリート構造より重量が軽いため本体構造の重量増加による沈下を防ぐことができるためである。さらに、維持管理の軽減から材料は耐候性鋼板とした。主構造については、SMA490BWで製作した $\square 500 \times 500 \times 19$ の断面をもつアーチ部材を、主桁ごとに4本配置する構造とした。

一方、D橋は、桁下利用が無いため、アーチ構造ではなく、直柱構造とした。また、後述するアーチ構造(鋼部材)の温度変化による伸縮が桁に与える影響を無くするために鉄筋コンクリート柱($\phi 1,000\text{mm}$)構造とした。加えて、列車通過時に発生する桁上縁の引張応力を抑制するため、桁は鉄筋コンクリート柱で直接的に支持するのではなく、SMA400AWで製作した $\text{H}800 \times 500 \times 20 \times 25$ の鋼製横桁で支持する構造とした。鋼製横桁のたわみがバネとなる支持構造とすることで、列車通過時の反力を緩和することができる。なお、アーチ構造もアーチのたわみがバネとなり、桁への反力を緩和する効果が得られると考えた。基礎形式は支持地盤が深いため、杭形式とし、桁下空頭の制限があることから人力と小型の機械で施工可能な深礎杭($\phi 2,000\text{mm}$)とした。

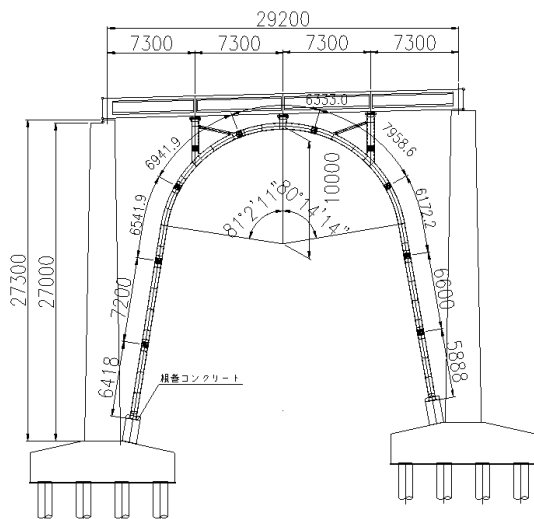


図-6 A橋 対策工一般図

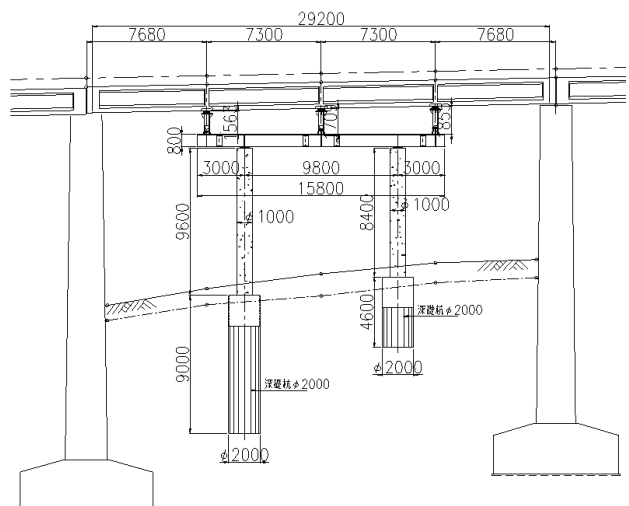


図-7 D橋 対策工一般図

4.3 アーチ構造 (A 橋, B 橋, C 橋)

(1) 施工手順

施工手順は、作業ヤード仮設工 (工事用通路仮設工) ・アーチ架設工 ・沓設置工 ・点検通路設置工である。

次項からは、施工において特に検討を要した内容を報告する。

(2) アーチ架設工

アーチ部材は桁下空頭の制限があることから、直接桁下に架設することはできなかった。そのため、図-8、図-9 に示すように、ロアリング架設工法と横取り工法の架設方法を比較検討した。ロアリング架設工法は、2 分割したアーチ部材を片方ずつ組み立て用ベントに架設し、ワイヤー等で引上げてアーチ頭頂部を接合する工法である。ロアリング架設工法は、分割してアーチを組立てることとなりベントなどの段取り替えが多いこと、ベントや付帯する足場等の仮設物が多くなり工期が長期化することと工事費が高くなることが想定された。一方で、横取り工法は桁側面に横取構台を設置して、アーチ部材を横引する工法である。各桁に横取構台を設置できるスペースがあり、アーチ部材を大きなブロックで架設できる。そのため、仮設物の段取り替えが少ないことから工期、工事費面で優位と考え横取り工法を採用した。

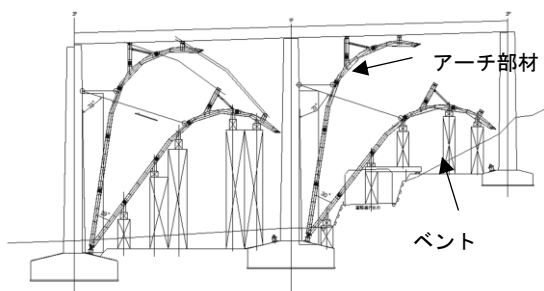


図-8 ロアリング架設工法

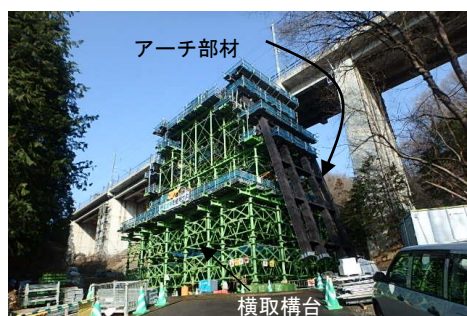


図-9 横取構台設置状況

(3) 沓設置工

(a) 鋼製アーチ部材の温度伸縮の影響

アーチ部材は鋼製であり気温の影響で伸縮する。そのため、冬期に気温が下がることで鋼材が縮み、桁からアーチ部材が離れるとたわみの抑制効果が薄れてしまう懸

念があった。そのため、図-10 に示すように沓部材であるゴム沓をフラットジャッキで押し当て軸力を導入しておくことで、冬期にアーチ部材が縮んでもゴム沓はアーチ部材から離れないとする計画であった。

しかし、フラットジャッキを使用してゴム沓の持ち上げを行ったが、その際に桁のこう上が確認された。このことから、夏期の温度上昇期にアーチ部材が伸びることで桁のこう上が発生し、軌道変位が発生することが懸念された。そこで、アーチ部材で桁を受ける前に、温度変化に対するアーチ部材の伸縮と桁高さ変位を常時計測することとした。図-11 に、計測箇所 (A 橋) を示す。計測方法は、上り線側と下り線側の 2 方向から、アーチ部材と桁および橋脚の高さを 1 時間に 1 回の頻度で自動計測を行った。また、アーチ部材の温度も計測した。

図-12 に、常時計測の結果を示す (計測期間は 2016 年 4 月~10 月)。図-12 は、桁とアーチ部材が接するアーチ温度から温度が上昇した際に、桁高さがどの程度変化するかを示したものである。ここでいう桁とアーチ部材が接する温度は、30℃程度に設定している。

しかしながら、設計上で想定したアーチ部材の温度変化 (-20℃~60℃) の範囲全てで計測を行うことができなかったため、計測できなかった範囲は近似線で算出した。測定の結果、バラつきを考慮した場合、最大で 8mm の桁高さ変位が発生することが分かった。桁が 8mm こう上し、軌道変位が生じた場合、当該線区の軌道整備目標値 (高低±7mm) を超過する可能性があった。なお、桁高さ変位と軌道変位は同等と想定している。

上記の計測結果から再検討した施工計画としては、気温が一番低い時期 (2017 年 2 月) に桁とアーチ部材を接地させ、桁が上がる方向にのみ変位する計画とした。その後、軌道変位の経時変化を確認後、アーチ温度が約 20℃の時期に軌道整備を行った。アーチ温度が約 20℃の際に軌道変位を 0mm とした場合、-20℃~60℃の範囲で桁高さが変位しても軌道の変位は±4mm 程度であり、軌道整備目標値内に納めることができる。



図-10 フラットジャッキ設置状況

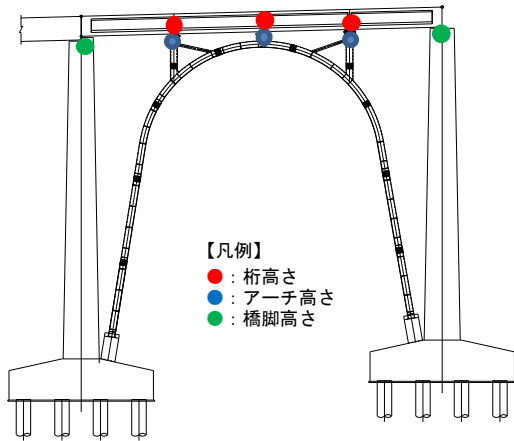


図-11 計測箇所位置図

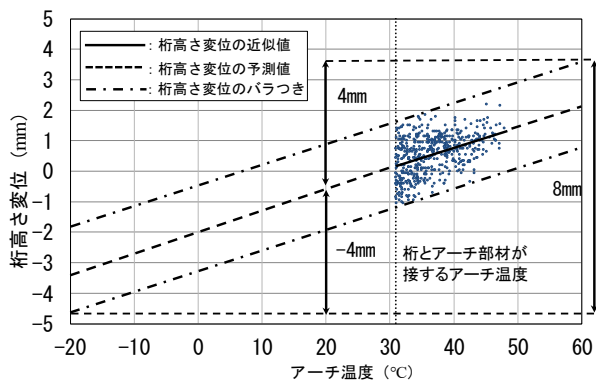


図-12 アーチ温度と桁高さ変位の関係

(b) 沓構造について

先述の通り、当初の沓構造はフラットジャッキを用いて、軸力を導入し、ジャッキにモルタルを注入して固定する構造であった。

しかしながら、今後の維持管理を考慮して、沓構造は図-13に示すように、沓の高さ調整が容易であるゴム沓と調整鋼板による構造に変更した。調整鋼板を挿入する作業は、夜間の保守作業間合いにおいてアーチ部材の沓にジャッキを設置し、桁を持ち上げて調整鋼板を挿入した。図-14と図-15に、A橋とB橋およびC橋の完成写真を示す。

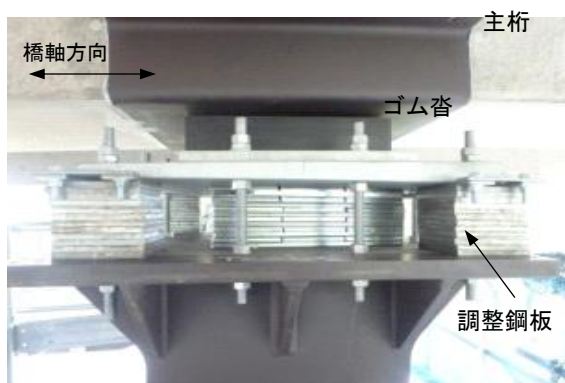


図-13 調整鋼板を用いた沓座構造



図-14 A橋, B橋 対策工完了写真



図-15 C橋 対策工完了写真

(4) アーチ工対策後の桁の挙動計測

アーチ工対策後も各桁において、レーザー式距離計でアーチ部材および桁の高さ変位を計測した。図-16に、計測概要図を示す。軌道の整備目標値（高低 ± 7 mm）を基準に、測定誤差1mmと余裕値1mmを差し引いた5mmを管理値として計測した。図-17に、計測結果を示す。桁の高さは夏期の温度上昇期に、管理値を超えることはなかった。なお、アーチ工対策後に、軌道検測車による軌道状態を確認したが、軌道変位は確認されていない。

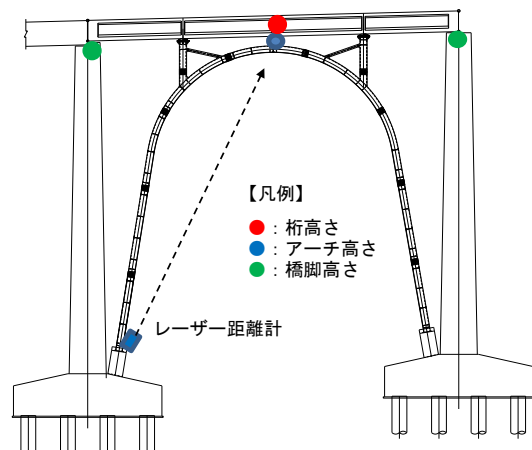


図-16 計測概要図

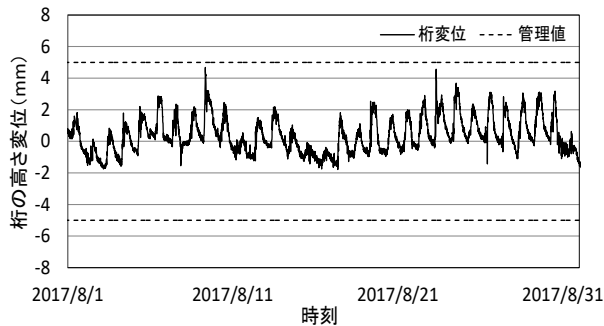


図-17 桁高さの変位

4.4 直柱構造 (D 橋)

(1) 施工手順

施工手順は、深礎杭工・鉄筋コンクリート柱工・鋼製横桁設置工である。

深礎杭の施工後、鉄筋コンクリート柱を施工した。桁を直接受ける鋼製横桁は桁側面から横引きし、桁下面に配置した後に、鉄筋コンクリート柱と接合した。直柱構造は、鉄筋コンクリートの柱であるため、鋼製のアーチ部材のように温度の伸縮による影響検討は不要とした。鋼製横桁と桁との隙間は、鋼板を挿入し高さ調整を行った。最終的な隙間調整は、夜間の保守作業時間間合いの中で、桁をジャッキアップしながら実施した。図-18 に、完成写真を示す。



図-18 D 橋 対策工完了写真

5. 効果検証

表-2 に、対策前後のたわみを示す。対策後のたわみは 3mm 程度まで解消された。また、図-19 に、A 橋の対策後のたわみ時刻歴波形を示す。上方へのたわみの発

生がなくなり、列車通過後の自由振動が解消され、対策後は非共振波形となった。

表-2 各桁の対策後のたわみ

高架橋名称	線別	たわみ (mm)			通過速度 (km/h)
		対策前	対策後 (設計)	対策後 (実測)	
A 橋	上	22.0	7.0	3.1	247
	下	23.8	7.0	2.9	211
B 橋	上	22.1	6.2	2.5	253
	下	19.0	6.2	2.5	213
C 橋	上	22.9	5.6	2.1	203
	下	21.8	5.6	2.0	196
D 橋	上	23.8	3.8	3.9	216
	下	22.1	2.8	2.9	189

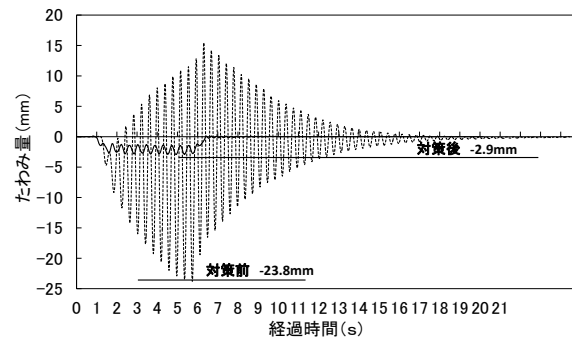


図-19 A 橋の対策後のたわみ時刻歴波形

6. まとめ

今回実施した対策工により、共振動現象を解消し、たわみを低減することができた。本対策工は、共振動現象対策において有効性が高いものである。また、共振動現象の解消が確認されたため、A 橋と B 橋および C 橋と D 橋で実施していた速度制限を解除した。なお、対策工実施以降に共振動現象は確認されていない。

参考文献

- 1) 藤江幸人, 井口重信, 古賀誠, 松田芳範, 大庭光尚 : 新幹線走行に伴う PRC 単純桁の振動について, SED, NO.33, 2010.1
- 2) (公財) 鉄道総合技術研究所 : 鉄道構造物設計標準・同解説 コンクリート構造物, 丸善, 2004
- 3) 千頭啓司, 杉田清隆, 築嶋大輔 : 新幹線 PRC 桁の共振動現象に関する調査分析, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.433-438, 2018