

超高耐久床版を適用した蓼野第二橋（下り線）の挙動について

Structural Behavior of Tadeno No. 2 Bridge (outbound line) which Utilizes the Ultra-High Durable Slab

R&Dセンター ランコス チャミラ CHAMILA RANKOTH
土木技術部 内堀 裕之 HIROYUKI UCHIBORI

道路橋床版のライフサイクルコストを削減する目的として、鉄筋や PC 鋼材などの腐食する可能性のある鋼材を一切使用しない超高耐久床版を開発し、蓼野第二橋（下り線）の床版取替工事に初めて適用した。橋梁には、光ファイバーセンサを含む計測システムを設置し、静的載荷試験と車両走行試験により設計の妥当性および安全性を確認した。また、25 時間の連続ひずみ計測により橋の交通量を推定した。さらに、長期的な変化について常時モニタリングを実施した。

キーワード： 超高耐久床版、静的載荷試験、車両走行試験、常時モニタリング、光ファイバーセンサ

Ultra-High Durable Slab, which does not utilize any corrosion-prone components, was developed targeting to reduce the life cycle cost of highway bridge decks. The slab was first applied in the deck replacement in Tadeno No.2 Bridge (outbound line). A structural response measurement system, including optical fiber sensors, was installed in the bridge and the validity of the design was verified through a static load test and vehicle running tests. Furthermore, road traffic volume was estimated based on continuous strain measurements for 25 hours. Continuous structural monitoring was conducted to assess long-term behavior.

Key Words: Ultra-high durable deck slab, Static loading test, Vehicle running loading test, Continuous monitoring, Optical fiber sensors

1. はじめに

近年、日本では道路橋床版の劣化が深刻な社会問題になっており、長期間供用された道路橋の床版取替工事が大規模に実施されている。一方、技術者不足や維持管理・更新費の増加が今後問題になることが想定され、これらを解決する目的で、鉄筋や PC 鋼材などの腐食する可能性のある鋼材を一切使用しない超高耐久床版を開発した（図-1）。超高耐久床版は中国自動車道の島根県に位置する蓼野第二橋（下り線）の床版取替工事で初めて適用された。

本構造は、初適用であることから光ファイバーセンサを含む計測システムを設置し、供用開始前に静的載荷試験および供用開始後に車両走行試験により設計の妥当性および安全性を確認した。車両走行試験は、供用開始直後および供用開始から約 1 年後の 2 回実施した。また、25 時間連続でひずみ計測を行い、鋼桁のひずみ計測値

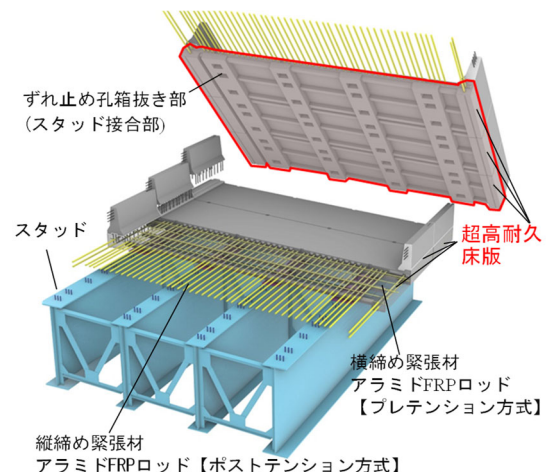


図-1 超高耐久床版の概要

より橋梁構造の挙動を確認し、その結果から道路の交通量を推定した。さらに、常時モニタリングを実施し、長期的な挙動変化についても確認を実施した。本報告では、静的載荷試験と車両走行試験の結果および供用から

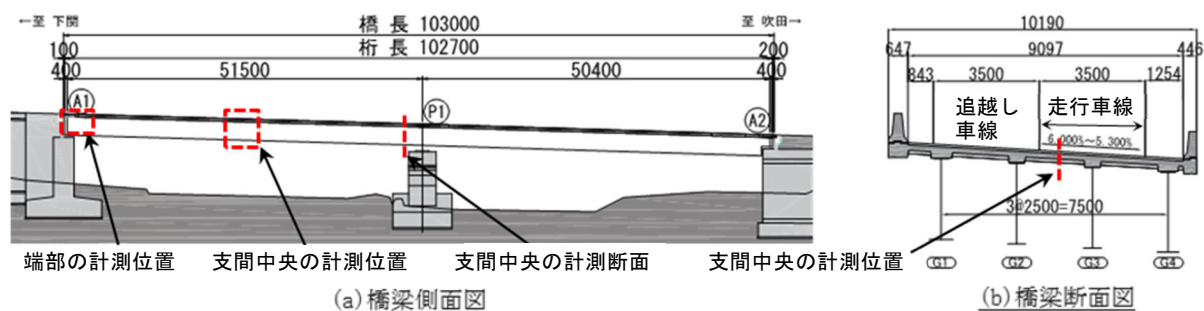


図-2 蓼野第二橋の寸法および計測位置

2024年1月までの約2年間の常時モニタリング結果について報告する。

2. 超高耐久床版および蓼野第二橋

蓼野第二橋は、中国自動車道の鹿野 IC～六日市 IC 区間に位置する橋長 103m、有効幅員 8.5m の 2 径間連続非合成鋼鈑桁橋である（図-2）。4 主桁を有し桁高 2.7m、桁間隔は 2.5m で構成されている。1982 年の供用開始から約 40 年経過しているとともに、寒冷地に位置していることから冬季には多量の凍結防止剤が散布されていた。更新前の床版には、これらに起因すると考えられる劣化が発生していたため、超高耐久床版への取替工事が行われた¹⁾。

超高耐久床版の概要を図-1 に示す。高強度 PVA 短繊維補強コンクリートを用いたリブ付き床版である。PC 鋼材の代わりにアラミド FRP ロッドで構成した緊張材を使用することで腐食劣化のリスクを完全に排除している。施工は、工場にて橋軸直角方向にアラミド FRP ロッドによりプレテンション方式でプレストレスを導入したプレキャスト床版を製作した。現場搬入後にアラミド FRP ロッドを橋軸方向に設けたダクト内に挿入し、ポストテンション方式により緊張することですべての床版が一体化される構造である。

3. 静的載荷試験および車両走行試験

(1) 試験の目的

構造性能を把握する目的で床版取替工事後の供用開始前に、静的載荷試験を実施した。また、車両走行試験は、開通してから約 5 か月後の 2022 年 3 月に実施し、2 回目を約 1.5 年後の 2023 年 4 月に実施した。なお、長期的な構造性能の変化の有無を確認するため、開通から 5 年目まで数回の車両走行試験を実施予定である。

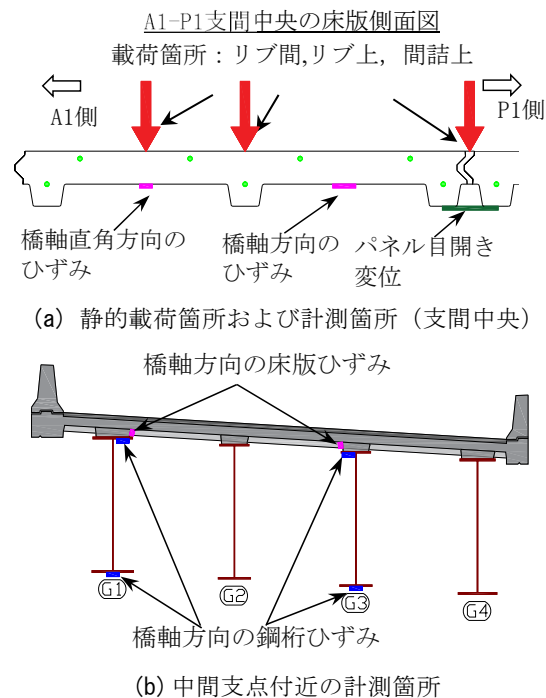


図-3 計測箇所



写真-1 静的載荷試験

(2) 静的載荷試験

静的載荷試験には、車重 41.3t のラフテレーンクレーンを用いた。載荷状況を写真-1 に示す。

計測位置を図-2 に示す。A1 側の端部、A1～P1 支間中央と中間支点である。計測箇所を図-3 に示す。本構造はリブ付き床版であることから、支間中央では、リブ間の床版ひずみに着目し、橋軸方向および橋軸直角方向の

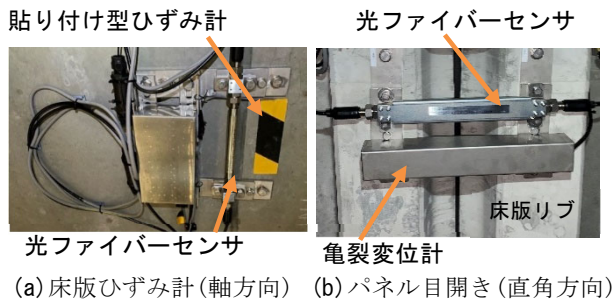


写真-2 計測機器

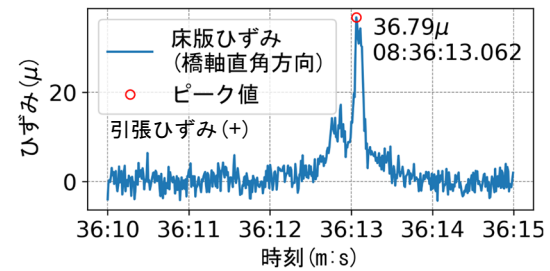


図-4 床版ひずみの変動



写真-3 車両走行試験

表-1 試験結果

走行車線走行									
計測箇所		計算値	静的載荷	車両走行試験第1回目(2022年)			車両走行試験第2回目(2023年)		
				①	②	③	①	②	③
床版ひずみ $\times 10^{-6}$	橋軸方向	12.6	11.3	20.6	12.3	20.1	6.5	-	11.2
	橋軸直角方向	24.0	31.3	36.8	32.3	41.7	18.2	14.4	24.3
中間支点部(G3桁) ひずみ $\times 10^{-6}$	下フランジ	-15.4	-24.6	-18.2	-19.6	-18.9	-19.1	-19.4	-20.4
	上フランジ	3.4	0.0	抽出不可					
G1桁ひずみ $\times 10^{-6}$	床版下縁	6.2	2.5						
	下フランジ	-6.0	-9.3	-16.9	-12.4	-15.9	-14.0	-13.3	-19.8
目開き変位(mm)		----	0.0064	0.0058	0.0047	0.0067	0.0029	0.0027	0.0043
追越車線走行									
G3桁ひずみ $\times 10^{-6}$	下フランジ	-5.1	-12.7	-7.3	-5.4	-8.5	-6.0	-5.2	-6.1
G1桁ひずみ $\times 10^{-6}$	下フランジ	-34.2	-39.0	-37.3	-35.5	-37.2	-45.6	-46.9	-47.6

ひずみを計測した。また、プレキャスト床版同士の間詰部の目開き変位を計測した。さらに、中間支点部 P1 では上端が引張縁となる負の曲げモーメントが作用し、設計では鋼桁と床版の合成断面として応力照査を実施していることから、鋼桁と床版の合成断面での挙動を確認するため、中間支点近傍の鋼桁の上下フランジおよび床版下面の橋軸方向のひずみと A1 側で鋼桁と床版のずれ変位の測定を行った。

(3) 車両走行試験

車両走行試験は長期間にわたって実施するため、長期的に安定して計測精度が確保できるFBG（Fiber Bragg Grating）光ファイバーセンサを用いることとした（写真-2）。FBG方式はポイント型であり、計測箇所のひずみや温度変化を高精度かつ動的に計測することが可能である。計測位置および計測箇所は、静的載荷試験と同様

に床版ひずみ、鋼桁フランジひずみおよび目開き変位とした。光ファイバーセンサを用いた場合は1,000Hzの最大サンプリング周波数で計測可能であるが、第1回の測定では、データ量を削減し床版の動的ひずみ反応を十分な精度で計測可能と考えられるサンプリング周波数100Hzで計測を行った。しかしながら、床版のひずみは車輪の位置がセンサの直上にある時の瞬間的なピーク値であるので高速（約100km/h以上）で走る車両の計測を精度よく取得するために、第2回では200Hzのサンプリング周波数で計測を行った。

走行車両は、2回とも同じ車両で、約12tのウェイトを搭載し、全車重が25tのトラックを用いた。車両は走行車線および追越し車線をそれぞれ3回ずつ走行（表-1、①～③）した。車両の走行速度は約80km/hであった。

また、さまざまな重量の車両による応力の発生状況

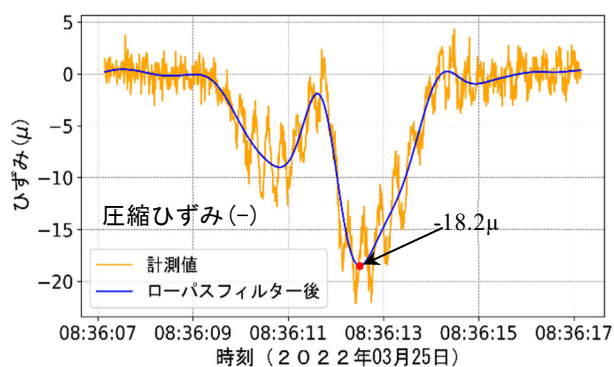


図-5 G3 桁下フランジのひずみ変化

を把握し、経年変化が生じるかを調査する目的で、車両走行試験時間を含む 25 時間の間は光ファイバーセンサ計測システムを用いて計測を行った。載荷車両が橋梁を通過する様子を写真-3 に示す。第 1 回の車両がセンサ付近を通過した時の床版橋軸直角方向のひずみ変動を図-4 に示す。車両通過による床版のひずみセンサの反応時間が 0.5 秒程度であり、一番重い後輪が通過するときのひずみが最大となる。

(4) 試験結果

a) 計測値の比較

静的載荷試験と走行車線を通過した車両走行試験の結果を表-1 に示す。鋼桁と床版ひずみの計算値は、3 次元 FEM 解析および格子骨組解析の結果である。また、試験用車両が追越し車線を走行した場合には、支間中央の床版のひずみと床版の目開きの計測位置が車輪の影響範囲から外れていたため反応していなかった。第 2 回の車両走行試験②の橋軸方向の床版のひずみは計測できず、床版の橋軸直角方向のひずみも小さい計測値になった。これは、車輪がセンサ位置から離れた箇所を通ったと推測される。さらに、車両走行試験の中間支点上の上フランジおよびコンクリート床版のひずみは応答値が小さかったため、 5μ 程度のノイズにより抽出できなかった。

車両走行試験による床版ひずみの結果は、走行時の車輪の位置や衝撃の影響と考えられるばらつきが認められるが、試験の計測値は概ね計算値と一致しており、設計手法の妥当性が確認された。なお、床版の目開きの計測値は、間詰上に荷重が載荷された際の弾性変形にほぼ一致しており目開きは発生していないと考えられる。

第 1 回と第 2 回の走行試験の結果において、鋼桁 (G1,G3) のひずみは、床版のひずみおよび目開きの計測値と比較して計測値のばらつきがかなり小さかった。床版のひずみおよび目開きの計測値は、走行時の車輪の位置に大きく影響されるが、鋼桁のひずみは車重および走行車線の影響が中心であり、計測値のばらつきが小さ

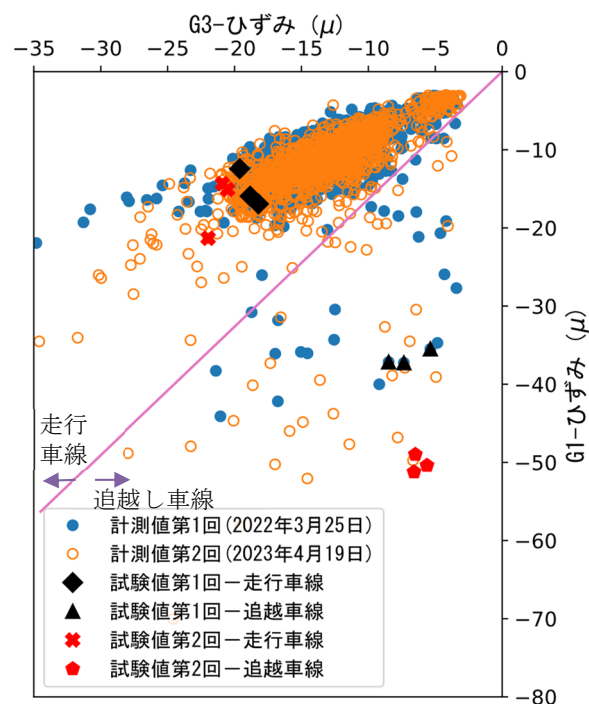


図-6 G1, G3 鋼桁ひずみのピーク値の関係

くなったと考えられる。車両走行試験の追越し車線載荷時の G1 鋼桁の下フランジのひずみは第 1 回に比べて第 2 回の場合に若干大きく、G3 桁は小さくなっていることから、走行車両が G1 側に寄っていたものと考えられる。

b) 鋼桁ひずみの挙動

車両走行試験時における鋼桁のひずみの挙動を図-5 に示す。鋼桁のひずみはノイズが比較的小さく 3μ 程度であったが、車両走行による鋼桁の振動が計測値に影響することが見られたため、ローパスフィルターにより高周波数成分を除去して検討した。

鋼桁のひずみが車両の重量および走行位置に関係すると考えられることから、車両走行により最もよい反応が見られた G1 および G3 の下フランジのひずみ値の挙動を検討した。橋梁の同じ断面の 2 箇所に付けたセンサから得られたデータを検討することで、車重および走行位置両方による橋梁構造の反応を把握できると考えた。ここでは、ローパスフィルター後の結果の中から 3μ 以上のピーク値を用いた。

図-6 に G1,G3 鋼桁ひずみのピーク値の関係を示す。鋼桁ひずみは、第 1 回と第 2 回で分布に大きな偏りがなく、ほぼ同様な分布であった。ただし、第 2 回の計測では、第 1 回の計測値よりも G1 のひずみが若干大きい結果が認められるが、走行車両の重量に関係する可能性があると思われる。また、表-1 では走行車線を走行する場合は、G1, G3 の鋼桁ひずみがほぼ同程度であり、追越し車線を走る場合には、G1 の計測ひずみ値が G3 より

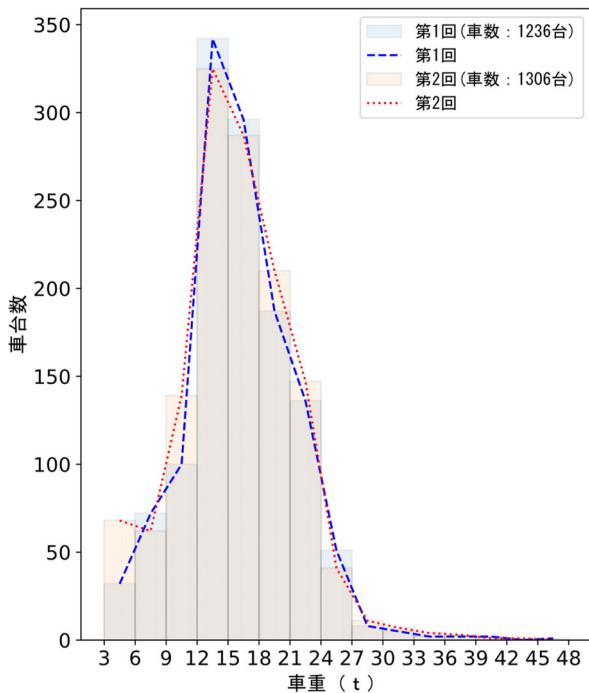


図-7 計測結果から交通量の推定

表-2 第2回計測日の実交通量

走行車両の 種類	車重の判定 (参考文献 ²⁾ より)	実交通量	
		2023/4/18	2023/4/19
特大車	8t以上	91	83
大型車	8t以上	839	872
中型車	8t以上	208	188
普通車	8t未満	396	398
軽自動車	8t未満	90	79
合計		1624	1620

大きいことが確認できる。なお、図-6 の図中の直線は、表-1 の車両走行試験での走行車線および追越し車線の計測値を参考に推定したものであり、直線の左側は走行車線を走行した車両、右側は追越し車線を走行した車両の計測値と考えられる。

今後も、超高耐久床版の長期的性能を確認するため車両走行試験を数回行う予定であり、構造性能の変化を確認する方法として、鋼桁のひずみ応答の経年変化を確認する予定である。

c) 連続計測結果から交通量の推定

交通量の推定にも前項で用いたG1,G3両桁に同時に発生する鋼桁ひずみを用いて、鋼桁ひずみと車重が線形関係を有すると想定し、車重および通過台数を算出した。車重と鋼桁ひずみの関係は3回ずつの走行試験結果の平均ひずみ値を用いた。ただし、検知できる最小の車重が3tであり、スパンに複数台の車両が通過している場合は合計重量として1台でカウントされる。なお、現地で交通量を観察した結果、計測期間では交通量が少なく、同

時に橋を通過した車両台数がわずかであると考えられる。

光ファイバーセンサを用いて25時間行った計測結果から交通量を推定した結果を図-7に示す。計測した25時間以内で検知できた走行車両台数は第1回の試験で1,236台であり、第2回では1,306台であった。検知できた車両台数がほぼ同じで重量分布にも大きな差が見られなかった。

交通量の算出結果の妥当性を確認するため、第2回の交通量の算出結果と高速道路の実際の交通量のデータとの比較を行った。交通量のデータは料金所の料金区分に基づくデータであり、車重の計測は行われていない。そのため、高速道路の基本的な料金車種区分分類データ²⁾をベースに車重を推定した。交通量を表-2に示す。なお、交通量のデータは1日当たりの合計台数である。連続計測の実施期間は、2023/4/18 13:00～2023/4/19 14:00の25時間であったため、2023年4月18、19日の1日当たりの交通量から実施期間を考慮して計算した8t以上の車の台数は1,188台であった。計測から推定した8t以上の走行車両台数は1,185台であり、ほぼ実際の走行車両台数と一致した結果となった。

4. 常設モニタリング

(1) 概要

蓼野第二橋は、超高耐久床版を適用した初めての橋梁であるため、長期的な安定性の検証を目的として、構造物に計測器を設置し常時モニタリングを実施している。計測項目は、静的載荷試験および車両走行試験と同様に床版および鋼桁のひずみ、床版の目開き変位、鋼桁と床版のずれ変位である。モニタリング結果はクラウドサーバー経由でウェブブラウザから常に確認できるようにし、一時間毎に自動的に計測が行われる。

超高耐久床版は、橋軸方向のアラミドFRPロッドを緊張することでプレストレスを導入している。アラミドFRPロッドに変状が生じた場合には、床版の目開きおよび橋軸方向の床版ひずみの影響が大きいと想定される。

(2) モニタリング結果

図-8に竣工から2024年1月10日までの約2年の床版表面温度、床版の目開き変位および床版橋軸方向のひずみのモニタリング結果を示す。モニタリングシステムの不具合により2022年5月～6月のほか、いくつかの期間はデータを収集できていない。また、載荷試験直前まで温度の計測データ以外にはノイズが発生していたが配線改良によりノイズが低減された。各計測値には、一日の温度変化の影響や季節による温度変化の影響も含まれて

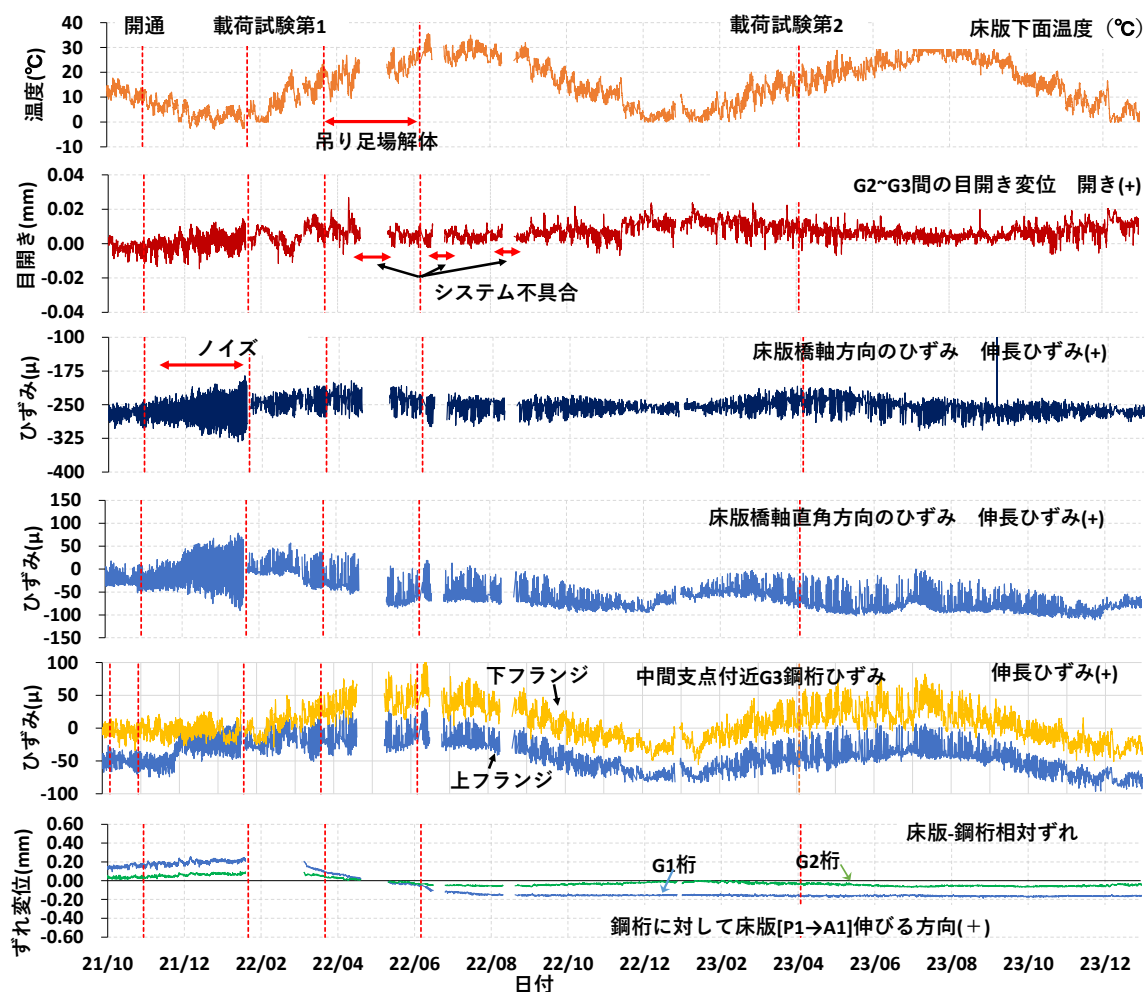


図-8 蓼野第二橋モニタリング結果

いる。目開き変位および橋軸方向の床版ひずみは温度変化以外のひずみ変化はほとんど確認できなかった。なお、床版の橋軸方向のひずみは、アラミド FRP ロッドの緊張前から計測していたため、プレストレスおよび舗装や壁高欄の後死荷重によりモニタリング開始時に -260μ の圧縮ひずみが発生しているが、現在までの変化量はほぼ無い。床版の橋軸直角方向のひずみは、主に作業用吊足場解体期間付近で変化しているが、その後は温度の影響を除くとほとんど変化していないと考えられる。鋼桁ひずみは温度の影響を受けているとみられ、鋼桁と床版のずれ変位は吊足場の解体に伴いわずかな変化が見られたが、その後は変化が無かった。上記のモニタリング結果より、計測期間を通して本構造が安定していることが確認された。

5. まとめ

腐食する材料を一切使用しない超高耐久床版を初め

て適用した蓼野第二橋において、安全性および設計との整合を確認するため車両载荷および常時モニタリングを行った。载荷試験により構造挙動はほぼ設計時に想定した状況であるとともに、想定外の挙動や急激な変化がないことをモニタリングにより確認した。約1年間隔で行った2回の車両走行試験に合わせて、車両通過による橋梁の主桁ひずみの分布を比較すると、ほぼ同じ傾向であることが確認できた。さらに、鋼桁ひずみから橋梁の交通量を算出し、高速道路の交通データと比較した結果、車重 8t 以上の通過車両台数はほぼ同じであり、実際の交通量を推定できた。

今後も、超高耐久床版の長期的な変化を把握するためモニタリングおよび車両走行試験を継続する予定である。

謝辞：本検討は、西日本高速道路（株）の工事および共同研究において実施しました。実橋の計測にあたりご協力をいただきました関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) ランコス チャミラ, 内堀裕之, 松尾祐典, 城戸靖彦: 超高耐久床版の開発と実用化ー蓼野第二橋（下り線）, 橋梁と基礎, Vol.56, No.7, pp.15-20, 2022.7
- 2) NEXCO 西日本「高速道路の車両区分」, <https://www.w-nexco.co.jp/search/carmodel/>, 2024.6.26 参照