

垂井高架橋モニタリング評価委員会
最終報告書

2017年8月

目 次

序	3
1. はじめに	4
2. モニタリング概要	10
2. 1 モニタリングの目的	10
2. 2 計測器配置図	11
2. 3 ひび割れ点検箇所図	11
2. 4 システム構成図	12
2. 5 閾値の設定	13
3. モニタリングの結果	15
3. 1 10年間モニタリングした時点での垂井高架橋の状況	15
3. 2 モニタリングデータの概要	16
3. 3 その他	22
4. モニタリング方法に関する参考知見	24
4. 1 モニタリングシステムの構成について	24
4. 2 電気系統に講ずべき対策等	25
4. 3 水管式沈下計を使用する際の留意点	26
4. 4 光ファイバーセンサーを使用する際の留意点	27
4. 5 長期モニタリングを行う際の一般的な留意事項	27
5. 供用後10年間のモニタリングデータ	30
5. 1 たわみ	30
5. 2 桁の橋脚付け根部ウェブ変形	38
5. 3 支承の変位と橋の伸縮	43
5. 4 ひび割れの推移	47
5. 5 亀裂変位計（補修済みひび割れ付近の変位）	53
5. 6 上下床版平均ひずみ	55
5. 7 外ケーブルの張力	57
5. 8 衝撃振動試験の結果	59
5. 9 床版鉄筋の自然電位の推移	59
6. 今後この橋の橋梁点検を行う際の留意事項	62

序

本委員会の活動は、土木学会コンクリート委員会による平成17年4月からの「垂井高架橋損傷対策特別委員会」と、平成18年7月からの「垂井高架橋の損傷に関する調査特別委員会」の活動を受け平成19年から始まったものである。

「垂井高架橋損傷対策特別委員会」の中間報告書には次のように記されている。

“損傷対策としては、一般的には撤去・再構築による方法もあるが、本委員会では、これまでに得られた調査や解析結果をもとに技術的見地からの対策シナリオを設定し、補修・補強対策をまとめた。シナリオで想定した変状やその性能への影響については必要な対策を提案できたと考えている。ただし、施工時の状況が不明な点や骨材の長期的な品質などには不確定な要素があり、将来、さらに対策が必要となることは否定できない。”

本橋はこの報告を受けて、撤去・再構築と同等の対策である、補修・補強に加えて10年間のモニタリングを行うことで受発注者間の合意がなされ、本委員会が第三者委員会として10年間に渡って供用後のモニタリングの経過を確認してきた。その結果、モニタリングの値が供用後10年間を通して問題無く推移したことから、この橋の状態は以下の様に評価された。

- ・上記の中間報告書で設定した対策シナリオと補修・補強対策について、「垂井高架橋の損傷に関する調査特別委員会」が指導して実施した、補修・補強対策が有効に機能している。
- ・当時不確定な要素とされた事項は今後の懸案事項となる可能性は低く、さらなる対策（この段階からの撤去・再構築を含む）の必要性は無い。
- ・以上のことから本橋は10年間のモニタリングの終了とともに通常の維持管理に移行しても問題が無い。

また、既にひび割れが発生し、箱桁内外面とも補修が施されていることを踏まえたうえでの今後の橋梁点検方法を、点検・診断の実務の側からの意見も参考にとりまとめ本報告書に提案した。

これまで竣工後間もなく損傷が確認され、それに対して補修補強を行ったP R C橋を10年間に渡ってモニタリングを行った例はなく、本報告書の内容が今後補修・補強を行った構造物の点検手法の一助となれば幸いである。

本橋に関わる委員会の活動は12年間に及ぶものであり、この間、当該分野でわが国をリードする技術者・研究者に委員として参加していただいた。これらの活動の最終段階としての本報告書を結ぶに際し、本件にご尽力いただいた全ての方々に、この場をお借りして厚く感謝し、御礼を申し上げる。

平成29年8月

土木学会技術推進機構
垂井高架橋モニタリング評価委員会
委員長 鎌田敏郎

1. はじめに

国土交通省近畿地方整備局が和歌山県橋本市隅田町垂井に建設した垂井高架橋は、平成14年4月に竣工したが、1年半経過した平成15年10月、上部工にひび割れが発見された。

詳細な調査を行ったところ、上部工には多くのひび割れが発生しており、上部工自体も設計で想定していない変形を生じていた。この橋は、平成18年春に供用予定としていた京奈和自動車道、橋本道路の一部をなしており、国土交通省近畿地方整備局としては、早急に対応する必要があることから、土木学会に原因の究明、現時点での耐荷性能、補修・補強対策等に関する調査を委託した。

この委託を受けて、土木学会コンクリート委員会では、平成17年4月から「垂井高架橋損傷対策特別委員会」を組織し、学術的な観点から原因の究明、健全度の評価および補修・補強等の対策の検討を行い、平成17年9月に中間報告を公表した。

この中間報告をもとに、近畿地方整備局は日本高圧コンクリート（株）のかし修補工事を承認した。

土木学会コンクリート委員会では、「垂井高架橋の損傷に関する調査特別委員会」を組織し、工事に対する技術的な検証、審議、指導を行った。

垂井高架橋のかし修補工事は、平成18年10月より開始され、平成19年6月に完了、同年8月より供用が開始された。

近畿地方整備局では、供用後10年間モニタリングを実施することとしており、土木学会技術推進機構へモニタリング計測および評価の協力を要請した。これを受けて土木学会技術推進機構では「垂井高架橋モニタリング評価委員会」を組織し、平成19年度から活動することとなった。

本報告書を取りまとめる際のモニタリングデータの期間について

本報告書は日本高圧コンクリート株式会社の近畿地方整備局長に対する誓約事項に基づき、平成29年8月2日のモニタリング期間が終了する前に実施するモニタリング評価委員会に諮るため、平成29年4月30日時点までのデータに基づき作成したものである。

平成29年5月1日以降のデータを含めた10年間のデータは本報告書の資料編に示すものとする。

日 付	内 容
平成13年1月 ～平成14年4月	垂井高架橋上部工事
平成15年10月 ～平成16年12月	監督職員による、ひび割れの発生確認 ひび割れ調査等を実施
平成17年 1 月 ～4月	施工者と原因究明等について検討
平成17年4月	原因究明のため、土木学会へ委託 (垂井高架橋損傷対策特別委員会の設置)
平成17年9月	土木学会の特別委員会による中間報告
平成18年6月	近畿地方整備局が施工者の提案を承認 設計図書および施工計画書の作成を指示
平成18年7月 ～平成19年7月	垂井高架橋の損傷に関する調査特別委員会 (委員会3回、主査幹事会2回、各分科会のべ16回開催)
平成18年9月	施工者が設計図書および施工計画書を提出
平成18年10月	近畿地方整備局から施工者に指示事項を伝達 (施工管理体制、「垂井高架橋の損傷に関する調査特別委員会」からの指 摘・指導事項の対応、早期の工事着手等)
平成18年10月	設計図書および施工計画書について了承
平成18年10月	地元説明会を開催 かし修補工事着手
平成19年6月	かし修補工事完了
平成19年7月	近畿地方整備局が土木学会技術推進機構に供用後のモニタリング計測・評 価の協力を要請
平成 19 年 8 月	供用開始 (モニタリング開始)
平成 29 年 8 月	モニタリング終了

委員会活動経過

平成 20 年 3 月	第 1 回垂井高架橋モニタリング評価委員会
平成 20 年 10 月	第 2 回垂井高架橋モニタリング評価委員会
平成 21 年 11 月	現地見学会
	第 3 回垂井高架橋モニタリング評価委員会
平成 22 年 8 月	第 4 回垂井高架橋モニタリング評価委員会
平成 23 年 9 月	第 5 回垂井高架橋モニタリング評価委員会
平成 24 年 5 月	橋本道路垂井高架橋供用後モニタリング中間報告書作成
平成 24 年 9 月	第 6 回垂井高架橋モニタリング評価委員会
平成 25 年 1 月	ひび割れ注入工
平成 25 年 2 月	現地見学会
平成 25 年 10 月	第 7 回垂井高架橋モニタリング評価委員会
平成 26 年 10 月	第 8 回垂井高架橋モニタリング評価委員会
平成 27 年 9 月	第 9 回垂井高架橋モニタリング評価委員会
平成 28 年 10 月	第 10 回垂井高架橋モニタリング評価委員会
平成 29 年 1～2 月	ひび割れ注入工・表面含浸工
平成 29 年 6 月	橋本道路垂井高架橋供用後モニタリング最終報告書作成
平成 29 年 6 月	第 11 回垂井高架橋モニタリング評価委員会
平成 29 年 8 月	現地見学会

土木学会 技術推進機構/垂井高架橋モニタリング評価委員会 委員構成

委員長 鎌田 敏郎（大阪大学）
幹事長 国枝 稔（岐阜大学）※第6回～第11回

委 員

石橋 忠良（ジェイアール東日本コンサルタンツ(株)）
大島 義信（(国研)土木研究所構造物メンテナンス研究センター）※第6回～第11回
田辺 忠顯（(一社)社会基盤技術評価支援機構・中部）
二羽 淳一郎（東京工業大学）
前川 宏一（東京大学）
丸山 久一（長岡技術科学大学）
宮川 豊章（京都大学）
六郷 恵哲（岐阜大学）

協力委員

葛目 和宏（(株)国際建設技術研究所）
中野 聡（(株)福山コンサルタント）

委員長・幹事長の交代経緯

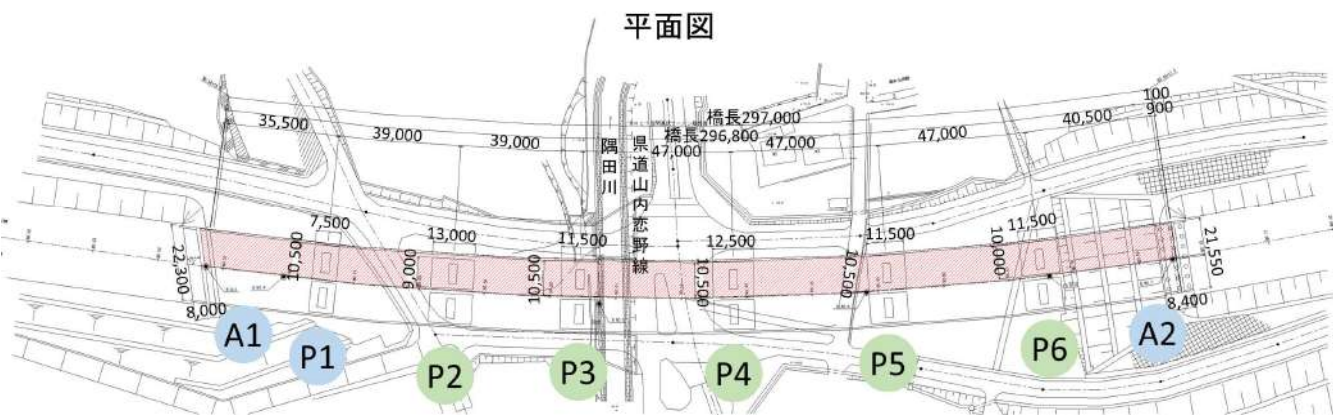
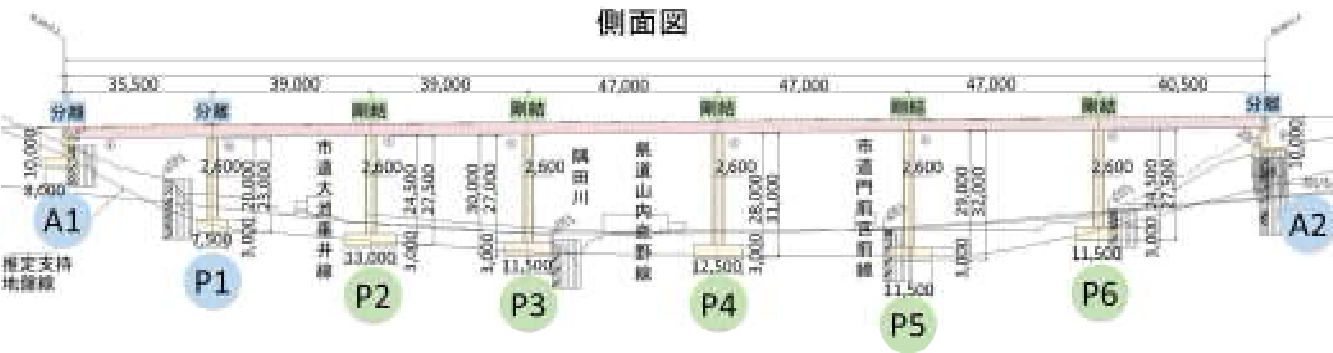
委員長

第1回～第2回 丸山 久一（長岡技術科学大学）
第3回～第5回 六郷 恵哲（岐阜大学）
第6回～第11回 鎌田 敏郎（大阪大学）

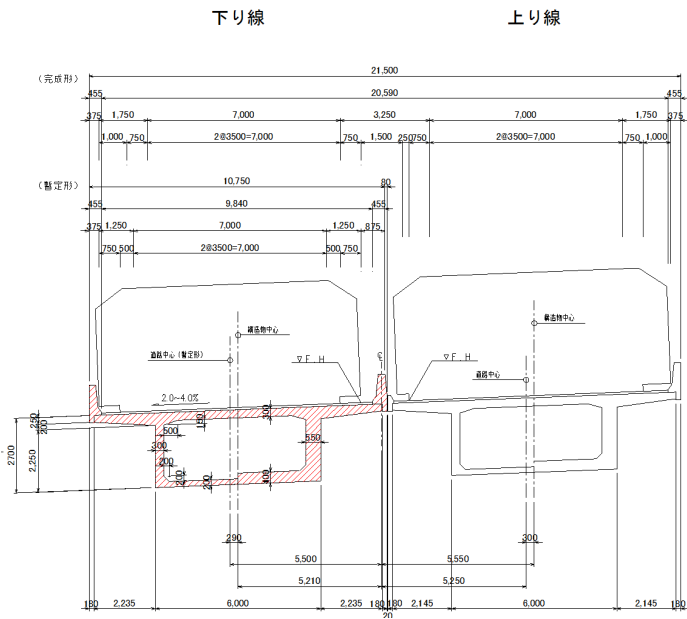
幹事長

第1回～第5回 二羽 淳一郎（東京工業大学）
第6回～第11回 国枝 稔（岐阜大学）

橋梁一般図



上部工標準断面図



設計条件	
道路規格	第1種第2級B規格（完成形） 第1種第3級B規格（暫定形）
橋長	297.000m
桁長	296.800m
設計荷重	B 活荷重
形式	上部工 PRC7径間連続ラーメン箱桁
下部工	R C 単柱橋脚
基礎工	杭基礎、直接基礎
矢間長	35.5+2469.0+3847.0+40.5
有効幅員	9.840（暫定形）
斜角	A1橋台75°、A2橋台90°
橋断面配	2.0%~4.0% 片勾配
縦断面配	0.84%
設計水平曲率	耐震性能B種（震度法：K=0.2）
使用材料	コンクリート 上部工 $\sigma_{ck}=38N/mm^2$ 下部工 $\sigma_{ck}=24N/mm^2$ 、基礎工 $\sigma_{ck}=24N/mm^2$
鉄筋	RC鋼材 縦筋12D12.7B（SRR7B）、横筋12D12.7B（SRR19）プレキャストPC鋼材
適用図書	設計便覧（案）（近畿地方整備局）平成7年4月 道路橋示方書1~9（日本道路協会）平成10年12月

2 モニタリング概要

2.1 モニタリングの目的

モニタリングは、下記に示す目的のために実施し、変状、変位、損傷状況の把握を行うことである。

- ① 対策効果の持続性の確認
- ② 供用後における想定外の事象に対する備え
- ③ 周辺住民に対する安全情報の提供

表 2.1 モニタリング項目一覧

種類	測定部位	主な目的	方法	頻度
常時監視	桁たわみ	桁のたわみの変化により変位を確認	水管式沈下計（7点）	常時 1時間毎 赤枠は当初から閾値を設定し監視する項目
	橋脚付け根部ウェブ変形	P2橋脚ウェブ付近の斜めひびわれの動きを観察し、変形の有無を確認	光ファイバー（12点）	
	支承の変位	支承の変位量により状態を確認	変位計（9点）	
	ひび割れ幅	新たなひびわれ発生の把握、既存ひびわれの進展を確認	亀裂変位計 ※1) （12点）	
	上下床版平均ひずみ	上下床版のひずみの動きを確認	光ファイバー ※1) （上下各2点）	
	外ケーブル張力	張力の変動を測定、予備ケーブル緊張の有無を判断	ロードセル（4点）	
	桁内外の温度	各種計測データーへ温度影響をインプット	熱電対（12点）	
定期点検	ひび割れ幅	新たなひびわれ発生の把握、既存ひびわれの進展を確認	目視	1回/年
	上床版下面の変位	上床版下面の変位から床版の状態を確認	目視 デジカメ	
	支承	支承本体・変位制限装置の状態確認	目視	
	剥落防止シートの状態	剥落防止シートの状態を確認	目視	
	鉄筋の腐食	上床版の鉄筋の腐食を計測する事により耐久性を確認	自然電位	2年に1回程度実施、また、臨時点検において異常があった場合にも実施
	橋体の振動特性	橋の振動特性を計測する事により剛性低下の有無を確認	加速度計	
臨時点検 * 震度4以上の地震時及び異常時	上床版下面の変位	上床版下面の変位から床版の状態を確認	目視	随時
	支承	支承本体・変位制限装置の状態確認	目視	
	剥落防止シートの状態	剥落防止シートの状態を確認	目視	

※1) 供用開始後1年程度で計測を終了する予定であったが、参考として引き続き計測を継続した項目

2. 2 計測器配置図

常時監視に用いる計測器の配置を以下に示す。

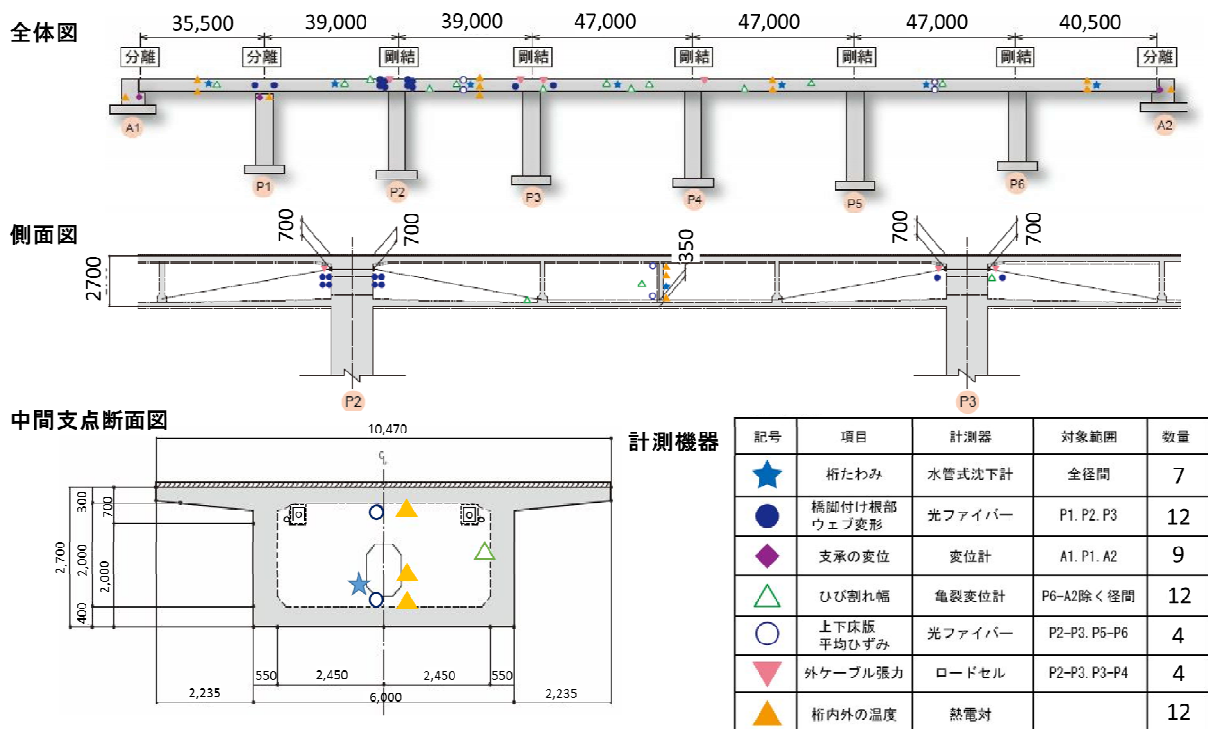


図 2.1 計測器配置図

2. 3 ひび割れ点検箇所図

定期点検で実施するひび割れ点検（目視）は、P2～P3・P6～A2を代表区間として1回/年、代表区間以外では1回/2年の頻度で点検を行う。

代表区間および代表区間以外の半断面（南側）においては、幅0.1mm以上のひび割れを記録する。また、代表区間以外の残りの半断面（北側）についても、幅の大きいひび割れ（0.2mm以上）を記録する。



図 2.2 ひび割れ点検箇所図

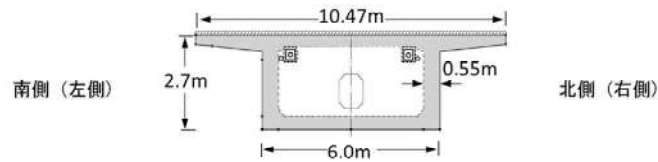


図 2.2 ひび割れ点検箇所図 (続き)

2. 4 システム構成図

常時監視データの収録、伝送、閾値超過時の警報のシステムのイメージ図を以下に示す。

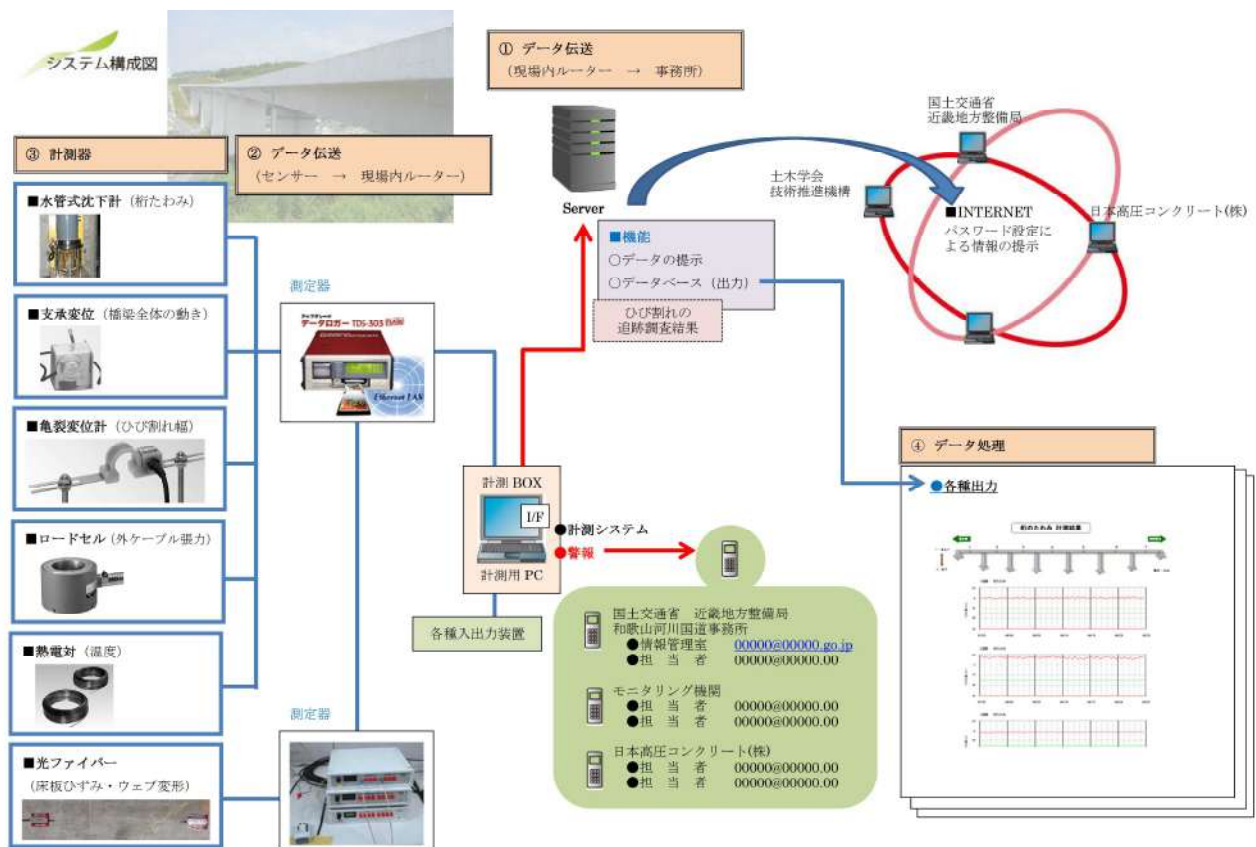


図 2.3 システム構成図

2. 5 閾値の設定

閾値はたわみと桁の橋脚付け根部ウェブ変形の項目に対し2段階で設定し、その他の参考計測項目には以下の管理基準値を設けた。

測定種別	項目	測定機器	初期値	管理基準値				設定根拠
				【閾値レベル1】	【閾値レベル2】	上限注意値	上限値	
閾値を設けて測定する項目	たわみ	水管式沈下計	供用開始時にゼロセット	15mm	30mm	—	—	事前の載荷試験のたわみに温度変化を加味した値を閾値レベル1、その2倍の値を閾値レベル2に設定
	桁の橋脚付け根部ウェブ変形	光ファイバー	舗装完了後に設置しゼロセット	—	—	0.10mm	0.20mm	0.2mm以上のひび割れが発生した場合を上限値、その1/2の値を注意値に設定

測定種別	項目	測定機器	初期値	管理基準値				設定根拠
				下限値	下限注意値	上限注意値	上限値	
参考計測項目	支承の変位 A1	巻取り式変位計	気温8℃、変形50mmの状態をゼロに設定		-30	55		補修補強施工中の計測値及び設計計算書から設定 A1、A2では桁が伸びる方向の、P1ではA2方向の変位を+とする
	支承の変位 P1	〃	気温8℃、変形15mmの状態をゼロに設定		-45	30		
	支承の変位 A2	〃	気温8℃、変形60mmの状態をゼロに設定		-30	50		
	ひび割れ幅 (注入補修済みのひび割れの変動)	亀裂変位計	舗装完了後に設置しゼロセット			0.10mm	0.20mm	0.2mm以上のひび割れが発生した場合を上限値、その1/2の値を注意値に設定
	上下床版の平均ひずみ	光ファイバー	舗装完了後に設置しゼロセット	—	—	0.10mm	0.20mm	
	外ケーブル張力	ロードセル	舗装完了後の2日間の平均値を初期値に設定	0	660kN	1163kN (0.6Pu)	1628kN (0.84Pu)	SEEE工法F-200PH Pu=1938kNより設定

たわみの閾値には、事前の載荷試験のたわみに温度変化を加味した値を【閾値レベル1】、その2倍の値を【閾値レベル2】とし、これらの値を超過した際は以下の対応を行うこととした。

【閾値レベル1】	本閾値を超えた場合には警報メールを発信し、何らかの変状が起きている可能性があるとして、その後の橋の状態を注意深く監視する
【閾値レベル2】	本閾値を超えた場合には警報メールを発信し、モニタリング評価委員会を開催し対応を検討する

たわみの閾値の算出方法は以下のとおり。

【閾値レベル1】

土木学会コンクリート委員会「垂井高架橋の損傷に関する調査特別委員会」維持管理分科会にて決定した値をそのまま使用した。

	(mm)							
	第1径間	第2径間	第3径間	第4径間	第5径間	第6径間	第7径間	
H18年載荷試験計測値(衝撃なし)	6.7	4.5	4.0	6.7	6.6	6.0	4.7	
同上(衝撃あり)	7.8	5.2	4.6	7.6	7.5	6.8	5.4	
p 2分布活荷重による計算値(Ec=2.66)	3.0	2.4	2.0	3.5	3.6	3.5	3.3	
温度変化を含む日変動計測値	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	
計測器誤差	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
合計	14.2	11.1	10.2	14.7	14.6	13.9	12.3	平均13mm
管理基準値(閾値レベル1)	補修前の安全監視データによれば、この他に各径間4mm程度の年変化が予測される事から各径間の閾値を 15mm とする。							

【閾値レベル 2】

【閾値レベル 2】の値＝【閾値レベル 1】の値×2

なお、これらの閾値や管理基準値は、供用後 1 年経過後のモニタリング評価委員会にて検討し、閾値を変更せずに計測を継続すること、光ファイバーや亀裂変位計の計測値がコンクリートの年間の温度変化により上限注意値や上限値を超過することがあっても、毎年の年間の動きが安定していれば問題が無いことが確認された。

3 モニタリングの結果

3. 1 10年間モニタリングした時点での垂井高架橋の状況

本橋は、コンクリート標準示方書（2012年制定版）に規定する値よりも収縮量が大きなコンクリートを使用したことにより、完成後間もなくその影響により多くのひび割れと変形が生じた。

土木学会コンクリート委員会「垂井高架橋損傷対策特別委員会中間報告書」には、事前の解析等により、この状態であっても、曲げ耐荷力にはほとんど影響せず、せん断耐荷力についても、コンクリートの寄与分を無視したとしても、設計せん断耐力の2倍以上の値であることが記されている。

このため本橋の損傷対策（かし修補工事）は、橋面出来形の修復として床版上面増厚およびその死荷重増に対する外ケーブル補強の実施、桁下への剥落防止として外面への剥落防止シートの設置、耐久性の確保としてひび割れ注入と表面含浸を実施している。

これらの対策を行ったうえで、供用開始後の橋全体の動きや各部の挙動、ひび割れや剛性の推移をモニタリングすることで、本橋がその機能を維持し続けることを10年にわたって確認してきた。

その結果は以下のとおり。

- 常時計測の各測定データは年間の気温の変化に伴った動きを毎年繰り返し、値が大きくなっていく傾向は見られず、データは設定した閾値内に収まっていた。
- ラーメン構造であるため橋の伸縮に連動して一定のたわみを繰り返し、当初は残留たわみが増加する傾向も見られたが、概ね5年目頃から落ち着いた。
- 箱桁内のひび割れの量は計測時の温度や計測者の判定の違いから若干変動したが、供用後新たなひび割れの発生は確認されなかった。
- 箱桁内に漏水やエフロレッセンスの滲出は発生しなかった。
- 橋体の振動測定では、剛性の低下を示す値の変動は見られなかった。
- 自然電位法の結果より上床版の鉄筋は健全な状態である。

モニタリング期間中には計測器や計測システムに生じた故障や欠測によって、一部検証に基づく解説を加える必要があるものも見受けられたが、この内容も委員会で審議済みである。

以上のことより、モニタリング最終年に行った最終補修を以て、本橋の設計当初に期待した性能や機能が供用後10年を経て満たされており、この時点で追加の対策は不要である。

したがって今後は、近接目視などの5年に一度の通常の橋梁点検に移行し、適切な維持管理を行っていくことが可能である。

なお、既にひび割れが発生し、箱桁内外面とも補修が施されており、橋梁点検の手法が通常と一部異なることが考えられることから、本橋の橋梁点検時の留意点を本書第6章に記すこととしたので参考とされたい。

3. 2 計測結果の概要

(1) 常時計測項目

常時計測は、気温、たわみ、桁の橋脚付け根部ウェブ変形、支承の変位、亀裂変位計、上下床版の平均ひずみ、外ケーブル張力について実施した。

常時計測の計測器の配置を図3.2.1に示す。

また、各項目の代表的な計測値の推移を図3.2.2～図3.2.8に示す。

常時計測の各測定データは、年間の気温の変化に伴う伸縮またはそれに連動した動きを毎年繰り返し、予め設定した閾値や管理値の範囲内で推移し、年々値が大きくなっていく傾向は見られなかった。

このことから、主桁の最終コンクリート打設後約17年、供用開始後約10年を経て、かし修補工事による対策効果が持続しているといえる。

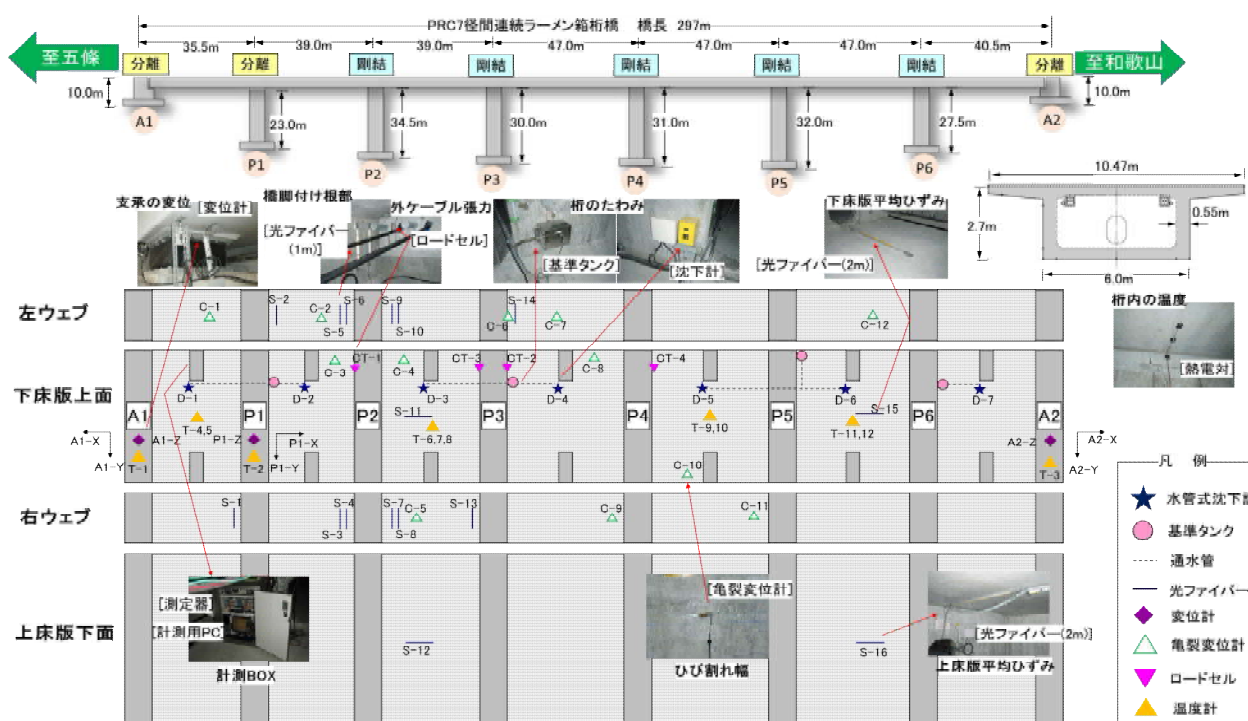


図 3.2.1 計測器配置図

a) 温度

ここでの温度は、3か所の支承付近で計測した外気温の平均値のうち0時の値を示したものである。

外気温および桁内温度は、毎年ほぼ一定の範囲で季節とともに増減を繰り返した。

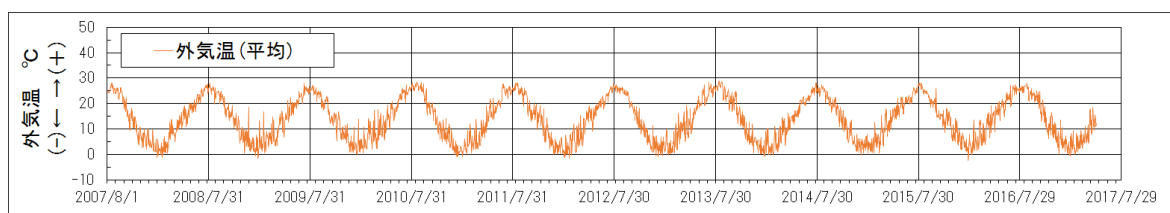


図3.2.2 温度 計測結果

b) たわみ

たわみは、供用開始時点での値をゼロとした各径間の支間中央と近接する支点との高低差を計測したものである。

たわみの閾値は、2.5に記したとおり【閾値レベル1】を15mm（この値を超えた場合、何らかの変状が起きている可能性があるとして注意深く監視するための値）としており、すべての径間においてこの値の50%以下の値で推移した。

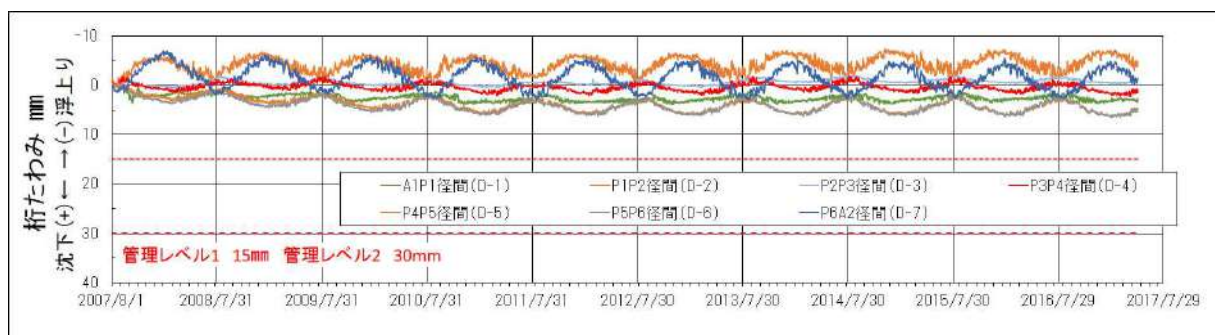


図3.2.3 たわみ 計測結果

c) 桁の橋脚付け根部ウェブ変形

桁の橋脚付け根部ウェブ変形は、P 2 橋脚付近の斜めひび割れの動きを観察するため、供用開始時点での値をゼロとしたウェブの鉛直方向の変形量を計測したものである。

なお、設置した12個の計測器のうちS-4については、後述する計測器の異常が生じたため、計測器を交換している。

本項目には閾値として、上限注意値を0.1mm、上限値を0.2mmとしていたが計測器の異常が生じたS-4以外はこの値を超過したものは無く、何れもこの範囲内で変動を繰り返した。

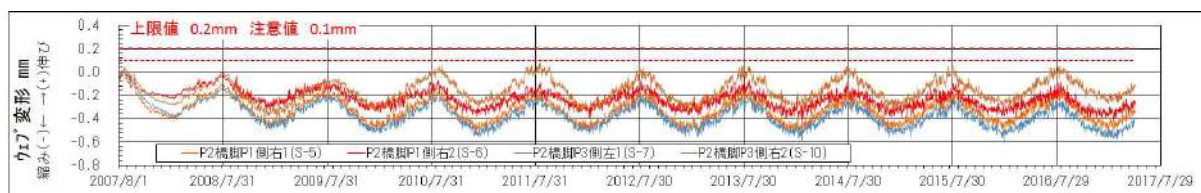


図3.2.4 桁の橋脚付け根部ウェブ変形 計測結果

d) 支承の変位

支承の変位は、供用開始時点以降の、支承の橋軸方向・橋軸直角方向・鉛直方向の変位量を計測したものである。

本項目の管理値は、橋軸方向の変位に対して上限注意値を55mm、下限注意値をA1及びA2では-30mm、P1では-45mmとしていたが、何れもこの範囲内で変動を繰り返した。

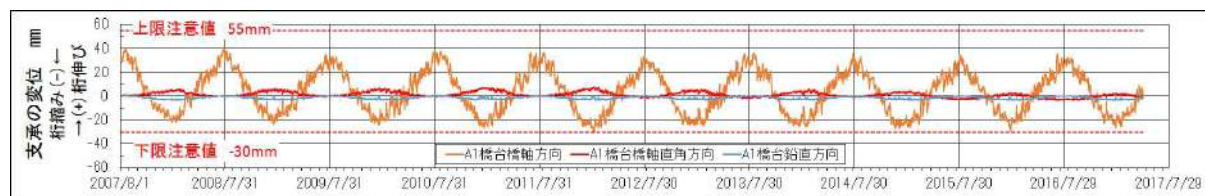


図3.2.5 支承の変位 計測結果

e) 亀裂変位計（補修済みひび割れ付近の変位）

亀裂変位計は、供用開始後にエポキシ樹脂注入補修したひび割れが再度開口することを懸念し、その検知を目的に、補修を施したひび割れに取付け、その標点間の変位量を、供用開始時点での値をゼロとして1年間監視したものである。

なお、2年目以降の計測値は参考的に計測を継続したものである。

本項目の管理値は、上限注意値を0.1mm、上限値を0.2mmとしていたが年間の温度変化による標点間の変位が大きかったため、モニタリング初年度からこの値を超過した。

この点について本委員会では、補修したひび割れ付近での開口が無いこと、他のモニタリングの状況から橋梁に異常は生じていないと考えられること、翌夏にほぼ同じ位置に値が戻ったことなどから、この計測値には問題が無いと判断した。

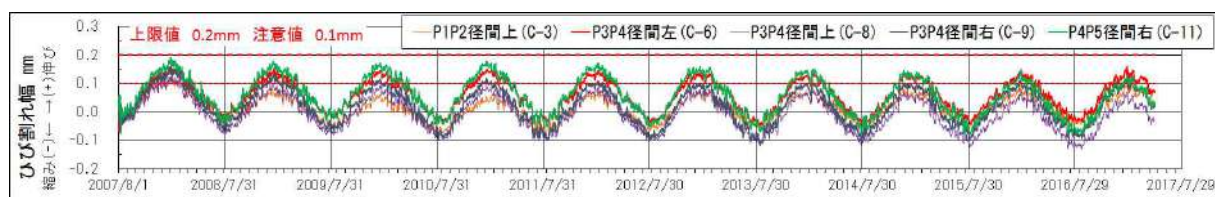


図3.2.6 ひび割れ幅 計測結果

f) 上下床版平均ひずみ

上下床版平均ひずみは、供用開始時点での値をゼロとした上下床版で計測した橋軸方向の変位量の計測結果を計測器の長さで除したものである。

本項目の管理値は、上限注意値を50 μ 、上限値を100 μ としていたが、何れもこの範囲内で変動を繰り返した。

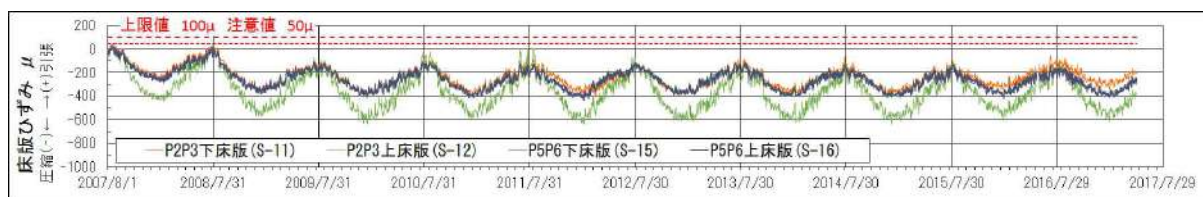


図3.2.7 上下床版平均ひずみ 計測結果

g) 外ケーブル張力

外ケーブル張力は、緊張力導入後の値の推移を、定着体に取り付けたロードセルで計測したものである。

本項目の管理値は、下限値を0kN、下限注意値を660kN、上限注意値を1163kN、上限値を1628kNとしていたが、何れもこの範囲内に十分収まっていた。

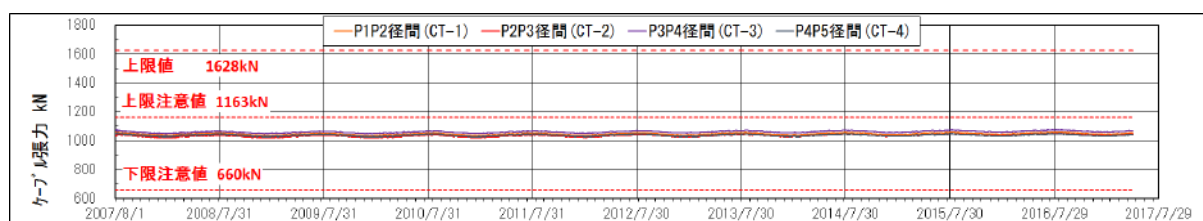


図3.2.8 外ケーブル張力 計測結果

なお、以上に示したそれぞれの値の推移は、計測器の故障等の際に生じた値の変動を補正したものである。

(2) 定期点検項目

a) ひび割れ点検

箱桁内面には多くのひび割れが発生していたが、当初より漏水浸水が無くひび割れから内部の鋼材が損傷する可能性が低かったことから、定期的なひび割れ補修と、最終段階での表面含浸補修を行うことを前提にモニタリングを行ってきた。

また、P R C 橋は供用開始後の活荷重や乾燥収縮等によりひび割れが発生または拡大するが、それらを適宜ひび割れ注入することで凡そ10年ほどで収まるという本委員会での提言に基づき、本橋では、10年のモニタリング期間中に2度ひび割れ注入を実施した。

モニタリング全期間において箱桁内への漏水浸水は見られず、供用開始以降の活荷重や桁の伸縮等によって、供用開始前に注入補修を施さなかった微細なひび割れの幅が広がるものは見られたが、ひび割れの発生していない箇所に新たなひび割れが発生していく状況は見られなかった。また、年々長さが伸長していくひび割れも見られなかった。

ひび割れ点検方法の変遷は第5章に詳しく記すが、より正確にひび割れの進展を把握するため、モニタリング開始後4年目以降からひび割れの点検方法を2.3に示した方法に改善した。

このことから本項では、点検方法改善後の平成23年以降のひび割れ総本数の推移を図

3.2.9に示す。

7回の点検結果、ひび割れの総本数はほぼ同一で推移し、その変動の程度は、ひび割れ補修（平成25年1月実施）前の2回では1%程度、ひび割れ注入後の4回では3%程度であった。

これらの変動は、ひび割れ点検時点の外気温の違い等により、ひび割れ幅が微妙に変化し、これを目視・クラックスケールで点検した際に、記録対象（幅0.1mm以上または幅0.2mm以上をカウントする）となったか否かの違いで生じた誤差であり、新たにひび割れが生じたことによるものではなかった。

このため図3.2.9には、ひび割れの点検開始日より半月前までの間の平均外気温を併記した。ひび割れ点検時点で外気温が低かった年はひび割れ本数が若干多めとなる傾向が見られている。

また、ひび割れ注入作業により、ひび割れ注入前とそれ以降では、数百本単位で本数が減少している。

この変動は、注入によることその他、注入作業後のケレンダストによる消失や幅の変化、ひび割れ注入後に他のひび割れの幅が変化したことによるものである。

以上のとおり、本橋に生じたひび割れは、点検時の温度や方法、点検時の状況によって変化はあったが、同一の条件下ではほぼ一定に推移しており、供用を続けることによって年々ひび割れが増加していく様な状況は見られなかった。



図3.2.9 計測ひび割れ総本数の推移

このことから本橋に生じたひび割れは、主にコンクリートの収縮に起因した初期ひび割れであり、供用に伴って進展を続けるひび割れではなかったものと判断できる。

次に、幅0.2mm以上のひび割れの本数の推移を図3.2.10に示す。

幅0.2mm以上のひび割れの本数は、平成25年1月のひび割れ注入前には408本あり、ひび割れ注入時に以下の理由で除外した82本を除く326本に対して注入補修を行っている。

- ・発生部位が上床版であるもの

- ・表面上は幅0.2mm以上であるが中が目詰まりしているもの
- ・ひび割れ長さが概ね50mm未満で注入してもエポキシ樹脂が鉄筋に到達しないもの
- ・注入時点ではひび割れ幅が0.2mm未満であったもの

ひび割れ注入後の4年間の推移は、ひび割れの点検開始日より半月前までの平均外気温の変化と、目視・クラックスケールによる点検方法からの誤差によって本数が少ない年もあるが、ひび割れ注入前に除外した本数とほぼ同一で推移した。

なお、これらの0.2mm以上のひび割れは、平成29年1月および計測器取外し後実施のひび割れ注入により補修済みとなる。

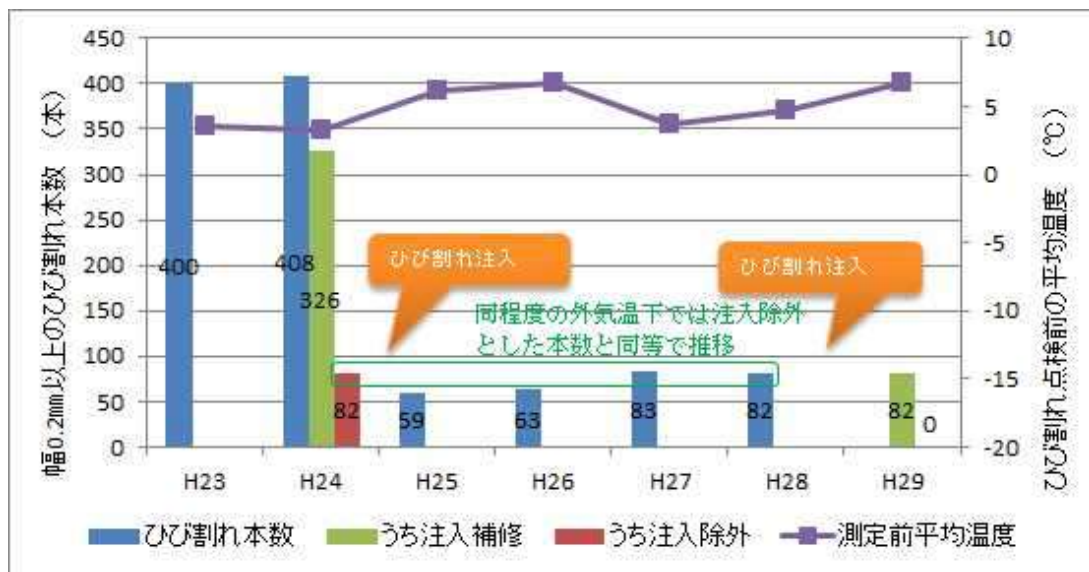


図3.2.10 幅0.2mm以上の計測ひび割れ本数の推移

b) 衝撃振動試験

衝撃振動法による振動計測は供用開始前から実施しており、供用開始後も約2年に1度実施した。

これらの結果を表3.2.1に示す。

各径間ごとに重錘を落下させた際の一次モードの固有振動数の値は、ひび割れ注入、床版増厚及び外ケーブル補強を行う段階では上昇し、供用開始後に約0.2Hz全径間で低下した状態で概ね安定している。

なおこの固有振動数の低下はその後施工された橋面舗装及び防音壁の荷重と供用開始によるものと推察される。

以上の結果から剛性の低下は生じていないものと考えられる。

表3.2.1 一次モードの固有振動数の推移

測定ステップ	第1径間 (A1-P1)	第2径間 (P1-P2)	第3径間 (P2-P3)	第4径間 (P3-P4)	第5径間 (P4-P5)	第6径間 (P5-P6)	第7径間 (P6-A2)
	スパン(m)						
補修対策前 H18.09	35.5	39	39	47	47	47	40.5
ひび割れ注入後 H18.12	3.8Hz	3.9Hz	5.1Hz	3.5Hz	3.5Hz	3.5Hz	4.4Hz
補修対策後 (床版増厚後) H19.06	4.3Hz	4.3Hz	5.4Hz	3.6Hz	3.6Hz	3.6Hz	4.6Hz
補修対策後 (床版増厚後) H19.06	4.0Hz	4.0Hz	5.2Hz	3.4Hz	3.4Hz	3.4Hz	4.4Hz
供用開始後 H19.09	—	—	5.0Hz	—	—	—	—
供用開始後 H21.07	—	—	4.9Hz	—	—	—	—
供用開始後 H23.05	3.5Hz	3.5Hz	4.9Hz	3.2Hz	3.2Hz	3.2Hz	4.2Hz
供用開始後 H25.02	3.8Hz	3.8Hz	5.0Hz	3.2Hz	3.2Hz	3.2Hz	4.2Hz
供用開始後 H27.02	3.8Hz	3.8Hz	4.9Hz	3.2Hz	3.2Hz	3.2Hz	4.2Hz
供用開始後 H29.03	3.8Hz	3.8Hz	4.9Hz	3.2Hz	3.2Hz	3.2Hz	4.2Hz

c) 自然電位

鉄筋の腐食に対する健全度を、今後の腐食が懸念される上床版の鉄筋に対して自然電位法によって定期的に計測した。

本モニタリングで実施した3回の計測結果を図3.2.11に示す。

計測値は何れも鉄筋腐食なしの範囲内で推移しており、鉄筋が健全な状態であることを確認した。

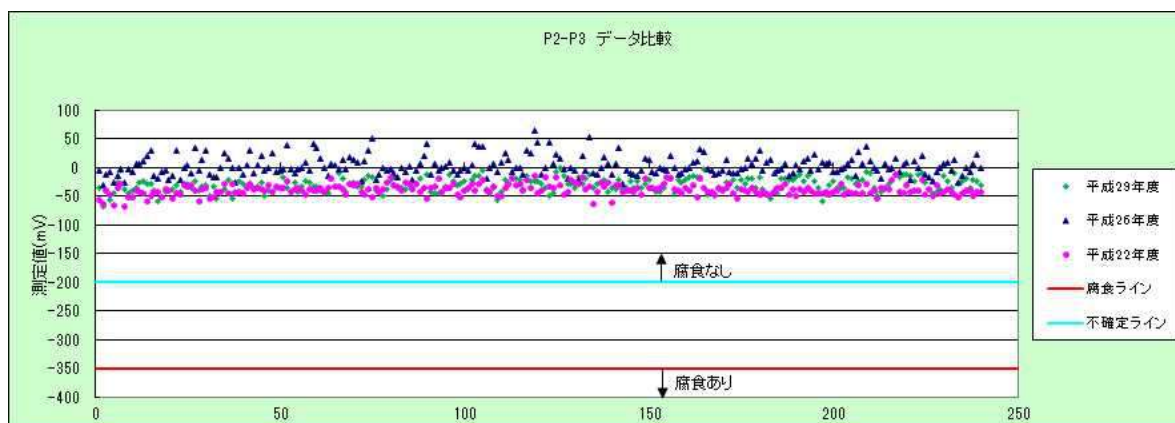


図3.2.11 鉄筋の自然電位の計測結果（P2-P3）

3.3 その他

(1) 供用後における想定外の事象に対する備えに対して

「供用後における想定外の事象に対する備え」を本モニタリングの目的とした理由は、特殊な骨材を使用したコンクリートであるため、繰返し荷重が作用した際に想定以上の事象が起きる可能性を懸念したことによる。

懸念された剛性低下に対しては、振動測定、たわみといったマクロ的な項目に加え、床版の平均ひずみや外ケーブル張力といった部分的な項目も実施し、多重の計測によってこれを補足した。

剛性低下の指標と考えられた固有振動数は概ね変化なく推移し、たわみの値も閾値を超える様な危険な状態は発生しなかった。

常時計測を行ったデータの温度との相関性も極めて高く、これらのことから想定外の事象は生じなかったと考える。

また、本橋では大地震の発生時の損傷を懸念し、震度4以上の地震が発生した際には臨時点検を行う用意もしていた。

幸いにもモニタリング期間中はこのような地震は発生せず、最大でも震度3の地震が一度であった。またこの地震による影響は常時計測のデータに影響を与えるものではなかった。

(2) 周辺住民に対する安全情報の提供に対して

「周辺住民に対する安全情報の提供」を本モニタリングの目的とした理由は、この橋梁が供用後も引き続き安全であるとの情報を繰り返し対外発信し続ける必要性が考えられたことによる。

このため、モニタリング評価委員会は年1回の頻度で開催し、現地見学会も2回実施し、安全であることを確認し続けた。

地域住民への安全情報の伝達方法は以下の4つの方法によって行った。

- ①発注者を通じたモニタリング経過の説明
- ②土木学会技術推進機構HPへの会議資料及び議事録の掲載
- ③専用HPによるリアルタイムデータの公開
- ④橋梁下に設置した電光掲示板による情報発信

発注者を通じた経過の説明は地元垂井区の求めに応じて実施され、現地見学会も開催された。

土木学会技術推進機構や、垂井高架橋独自の専用HPによる情報公開も継続して行ったが、HPを閲覧できない住民が居ることも考えられたことから、橋梁下に平時は時計と気温を表示し、たわみの値が閾値を超過した際に表示が変わる電光掲示板への安全情報の提供も行った。



図3.3.1 電光掲示板による情報提供状況

この電光掲示板は、落雷や局所的な大雨により度々停止したが、その都度地元住民から通報があるなど、この情報に対する関心の高さがうかがわれた。

4 モニタリング方法に関する参考知見

4. 1 モニタリングシステムの構成について

(1) 障害の発生を見込んだ多重の計測の必要性

■本モニタリングでは、多重の計測方法を採用したことで、計測器の故障や不具合などのトラブルが発生した際の検討に寄与した。

本モニタリングでは、以下の障害が計測値に影響を及ぼした。

- ①落雷等による停電
- ②水管式沈下計と給水ポンプの故障
- ③メンテナンスや計測器取替の際のシステムダウン
- ④光ファイバー計測器やオプトボックスの不調

本モニタリングでは、多重の計測方法を採用していたことから、これらの障害が生じた際にも、他の計測値を確認することで異常が生じていないことを確認し続けることができた。

また、このような障害が生じた場合は、計測データに欠測が生じ、復旧する際には障害発生前の値に合致すべく、仮定値を校正値に加えて計測値としていくため、計測システム上の不具合に伴う短期的な変動（ドリフト）が発生し、計測値にドリフトした値が含まれると、データの異常と混同する可能性がある。

本モニタリングでは、別の計測方法で他の計測値を検証することによって、このような値が異常であるかの検討に寄与した。

(2) モニタリング期間中に生じた障害

モニタリング期間中に生じた障害や故障、メンテナンスの経過を、今後このような長期モニタリングを行う際の参考に表4.1.1に示す。

また、表中本書後述項目とした障害に関して、モニタリングに関わる知見を以降の各項に記す。

表4.1.1 モニタリング中に生じたトラブル等一覧

発生時期	データの 影響範囲	障害内容	発生原因	データの変動	実施した是正処置	本書後述項目
2007/8	各種データ	システム不良による欠測	PCのフリーズ	無	システム手動再起動	
2007/8	各種データ	システム不良による欠測	PCのフリーズ	無	システム自動再起動	
2008/8	各種データ	停電	落雷による	有	避雷器の設置	第4章2項
2009/4	各種データ	システム不良による欠測	PCのフリーズ	無	システム自動再起動	
2009/6	橋脚付け根部 ウェブ変形	オプトボックスの不調	機器個体の故障	有	-	第4章4項
2009/7	各種データ	システム不良による欠測	PCのフリーズ	無	システム自動再起動	
2009/9	各種データ	システム不良による欠測	PCのフリーズ	無	システム自動再起動	
2010/10	橋脚付け根部 ウェブ変形	オプトボックスの不調	機器個体の故障	有	オプトボックス交換	第4章4項
2010/12	各種データ	システム不良による欠測	PCのフリーズ	無	システム自動再起動	
2011/4	データ送信 システム	データ送信用ファイバー ケーブルの断線	経年劣化及び草木の 繁殖による	無	配置の変更	
2011/5	データ送信 システム	データ送信用ファイバー ケーブルの断線	鳥獣による傷害	無	配置経路の保護	
2011/8	支承の変位	巻き取りワイヤーの外れ	-	無	計測ワイヤー張り直し	
2011/9	橋脚付け根部 ウェブ変形 上下床版ひずみ	計測器取替え等による データの欠測	計測器取替え等による システムダウン	有	-	第4章3項、第5章1項

表4.1.1 モニタリング中に生じたトラブル等一覧（続き）

2011/10	たわみ	給水ポンプ吐出しノズルの破損	取付け部位の経年劣化	有	水勢の低い給水ポンプへの交換	第4章3項、第5章1項
2011/10	支承の変位	巻き取りワイヤーの外れ	-	無	計測ワイヤー張り直し	
2012/2	たわみ他	自主メンテナンス	-	無	-	
2012/8	たわみ	給水ポンプの劣化	ポンプの経年劣化	有	給水ポンプの交換	
2013/6	各種データ	システム不良による欠測	PCのフリーズ	無	システム自動再起動	
2014/1	各種データ	システム不良による欠測	PCのフリーズ	無	システム自動再起動	
2014/4	たわみ	給水ポンプの劣化	ポンプの経年劣化	有	給水ポンプの交換	第4章3項、第5章1項
2014/8	支承の変位	巻き取りワイヤーの外れ	-	無	計測ワイヤー張り直し	
2014/11	各種データ	システム不良による欠測	PCのフリーズ	無	システム自動再起動	
2015/5	各種データ	電源工事による停電	計測システムの停止	有	システム手動再起動	
2015/6	各種データ	システム不良による欠測	PCのフリーズ	無	システム自動再起動	
2015/7	たわみ	沈下計の予防的交換	計測器の経年劣化の疑い	有	計測器の交換	第4章3項
2015/12	橋脚付け根部ウェブ変形	光ファイバー接続多芯ケーブルの損傷	外的要因と思われる	有	計測器全体の交換	第5章2項
2016/6	支承の変位	巻き取りワイヤーの外れ	-	無	計測ワイヤー張り直し	
2016/7	各種データ	システム不良による欠測	PCのフリーズ	無	システム手動再起動	
2017/3	各種データ	データロガーの故障	機器の経年劣化	有	計測器の交換	第4章5項

4. 2 電気系統に講ずべき対策等

（1）落雷対策

■長期的なモニタリングを行う際には、予め避雷器を設け、落雷により電源供給が途絶えることを防止することが重要である。

本モニタリングでは関西電力より供給される一般家庭用電源を常時計測の電源に使用したが、落雷によって停電が生じた場合、以下の異常が発生する。

- ①水管式沈下計の給水ポンプが停止し、たわみデータが変動する
- ②光ファイバーケーブルの変位データを変換するオプトボックスへの通電が途絶え、データが消失する
- ③データロガーやデータ収録用PCが強制シャットダウンされ、欠測が生じる

このため本橋では、落雷停電による障害が確認されたことをうけて図4.2.1のように避雷器を二重に設置し、その後の落雷停電による欠測を防止した。

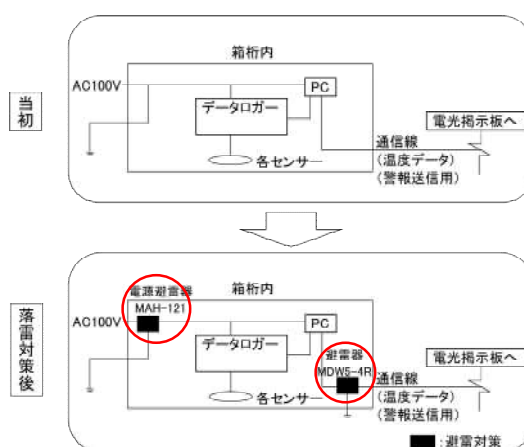


図4.2.1 避雷機設置の例

（2）通信回線に関する障害対策

■長期的なモニタリングを行う際には、将来的な草木の繁殖や鳥獣被害等を考慮し、

通信ケーブルを空中に浮かせて配置するなどの対策を講じておくことが望ましい。

本モニタリングシステムでは、計測したデータを取得するためデータロガーに読み込まれたデータを接続したPCにてデータを取り込み、そのPCからデータ収集場所までインターネット回線を用いて送信した。

このインターネット回線は有線で高架橋内に引き込んでいたが、モニタリング開始初期に、草木の繁殖や鳥獣による傷害を受けて破損し、通信が遮断される障害が生じた。

この障害の発生を受けて、図4.2.2に示すように通信ケーブルを空中に浮かせて配置することとし、その後の障害の発生を防止した。



図4.2.2 通信ケーブル等の配置方法の例

4. 3 水管式沈下計を使用する際の留意点

(1) 予備機器の用意について

■水管式沈下計を用いて長期的にたわみ計測を行う場合には、予備の沈下計（コンディショナーを含む）を用意しておくことが望ましい。

本モニタリングでは、設置した7基の沈下計のうち1基が8年目に故障の兆候が見られたため、沈下計を予防的に交換した。

比較的長期の計測が可能な計測器と考えられるものでも、長期計測を行っていく途中で劣化するものも生じることがあり、適宜交換できる体制としておくが良い。

(2) 基準タンクへの給水方法について

■水管式沈下計を用いて長期的にたわみ計測を行う場合には、水中ポンプを定期的に更新するなど、故障交換を極力回避する計画を作成することが望ましい。

本モニタリングでは、基準タンク内の水位を一定に保つための水中ポンプが度々故障したため基準タンクの水位が変動し、これを復旧する際に生じるデータのドリフトの影響は思いの外大きかった。

この点から、水中ポンプは定期的に更新し、故障による欠測期間を極力短く済ませること、ポンプ交換による水位変動を把握し、必要に応じドリフト量を適切に補正することが望ましい。

(3) たわみ計測値の検証手段について

■ 橋梁のモニタリングにおけるたわみの計測値は、その中でも重要な位置づけとなることが考えられ、たわみ計測値を検証するための備えに構造物測量の初期値を得ておくことは重要である。

本モニタリングではたわみの計測値の他に、床版のひずみ、外ケーブルの張力、支承の変位等様々な計測を行い、これらが異常値の発生の際の検証に寄与した。

しかし、モニタリングの手段には用いなかった測量によるたわみの初期値を念のため得ていれば、より容易に値を検証することが可能であった。

4. 4 光ファイバーセンサーを使用する際の留意点

(1) オプトボックスへの配線について

■ 長期的に光ファイバーセンサーを多数使用する際は、オプトボックスは一定の確率で故障することを前提とした配線とすることが望ましい。

オプトボックスは光ファイバーセンサーからの信号を変換し、データロガーに送信する機器である。

多数の光ファイバーセンサーを昇順にオプトボックスに接続していくと、近傍のセンサーが、同一のオプトボックスに配線される確率が高くなる。

本橋では光ファイバーセンサー変位計を16基使用し、これを4基のオプトボックスに接続した。

このうちの1基が不調となり、接続したS-1～S-4の値が夏場に不安定になる状況が見られ、4年目にこのオプトボックスを交換したところ、その後その状況は解消されたが、値が不安定となった期間は欠測と同様となった。

S-1～S-2は同一橋脚に配置したセンサーであり、これらを別のオプトボックスに接続していれば、どちらも欠測扱いとなることは回避できた。

4. 5 長期モニタリングを行う際の一般的な留意事項

(1) 計測器の故障の発生割合と正常に計測された割合

本モニタリング期間中に生じた計測機器の故障の発生回数と、故障によって正常な計測値が得られた期間の集計を表4.5.1に示す。

但しこの集計結果は、計測器の交換・計測値の欠測・計測値の異常が生じていない期間を正常としており、計測器撤去後の校正検査によって判定したものではない。

また、亀裂変位計は劣化時期の判定を行っていないため、二重計測によって異常を確認した結果のみを記載した。

表4.5.1 計測機器の故障の発生割合等

計測項目	計測器	構成機材	機器番号	設置数	故障回数		故障欠測を除く計測期間				期間累計		正常計測日数割合	
					個別	合計	日数1	日数2	日数3	日数4	日数	延べ日数	機器個体	機器種別
たわみ	水管式沈下計	沈下計	D-1	1	1	1	2775	779	0	0	3554	24908	100%	101%
			D-2	1	0		3559	0	0	0	3559		100%	
			D-3	1	0		3559	0	0	0	3559		100%	
			D-4	1	0		3559	0	0	0	3559		100%	
			D-5	1	0		3559	0	0	0	3559		100%	
			D-6	1	0		3559	0	0	0	3559		100%	
			D-7	1	0		3559	0	0	0	3559		100%	
		コンディショナー	No.1～5	5	0	0	3559	0	0	0	3559	17795	100%	101%
		基準タンク水中ポンプ	No.1 P1	1	1	7	1430	2049	0	0	3479	14067	98%	100%
			No.2 P3	1	1		1437	2049	0	0	3486		98%	
			No.3 P5	1	3		1506	329	622	1093	3550		100%	
			No.4 P6	1	2		1506	953	1093	0	3552		100%	
		導水管		7	0	0	3559	0	0	0	3559	24913	100%	101%
桁の橋脚付け根部 ウェブ変形 上下床版平均ひずみ	光ファイバー変位計	変位計 1m	S-1～10,13,14	12	0	0	3559	0	0	0	3559	42708	100%	101%
		変位計 2m	S-11,12,15,16	4	0	0	3559	0	0	0	3559	14236	100%	101%
		オプトボックス	No.1 S-1～4	1	1	1	2396	0	0	0	2396	13073	67%	93%
			No.2 S-5～8	1	0		3559	0	0	0	3559		100%	
			No.3 S-9～12	1	0		3559	0	0	0	3559		100%	
			No.4 S-13～16	1	0		3559	0	0	0	3559		100%	
		多芯ケーブル	S-4	1	1	1	1162	507	0	0	1669	55054	47%	98%
			S-1～3,5～16	15	0		3559	0	0	0	3559		100%	
支承の変位	巻取り式変位計		A1 X	1	2	3	1536	1039	979	0	3554	21334	100%	101%
			P1 X	1	0		3559	0	0	0	3559		100%	
			A2 X	1	0		3559	0	0	0	3559		100%	
			A1 Y	1	0		3559	0	0	0	3559		100%	
			P1 Y	1	1		1477	2067	0	0	3544		100%	
			A2 Y	1	0		3559	0	0	0	3559		100%	
		変位計	A1 Z,P1 Z,A2 Z	3	0	0	3559	0	0	0	3559	10677	100%	101%
ひび割れ幅	亀裂変位計			1	1	1								
外ケーブル張力	ロードセル		No.1～4	4	0	0	3559	0	0	0	3559	14236	100%	101%
各種データ	データロガー			1	1	1	3506	53	0	0	3559	7118	100%	101%
各種データ	パソコン			1	0		3559	0	0	0	3559		100%	
各種データ	パソコン			1	0	0	3559	0	0	0	3559	3559	100%	101%

集計期間：平成19年8月2日～平成29年4月30日

- ・計測機器の故障の判定は計測器を撤去回収し校正試験によって判定したものではない。
- ・計測機器が故障なく作動し続け、計測値にも異常が認められない期間を正常な計測期間とした。
- ・D-1沈下計は計測器異常の兆候が見られたため予防的に交換したものであるがこれを故障扱いとした。
- ・基準タンク水中ポンプのNo.3、No.4の最初の交換は故障ではなく予防的交換であるがこれを故障扱いとした。
- ・オプトボックスNo.1は、夏場に値が不安定となっていたため交換したところ値が安定したことから、オプトボックス交換後の期間を正常とした。
- ・S-4用の多芯ケーブルは、計測値の検証のためケーブルを交換した結果、オプトボックスを交換した際に損傷したものと推定されており、多芯ケーブル個体の耐久性の観点からの故障ではないが、オプトボックス交換後から多芯ケーブル交換までの間を故障とした。
- ・亀裂変位計は耐久性が期待される計測器ではないことから計測期間中に故障が生じているかの判定は行っていない。
- ・亀裂変位計全12個の計測器のうち、C-2について二重計測による検証を行い異常であることを確認していることからこれを故障とした。

この他に故障率を算出したので資料編の資料No.15を参照されたい。

(2) 長期モニタリングを行う際の一般的な留意事項

本橋のモニタリングに使用した計測器のうち、長期的な計測が可能と考え設置したもののうち「水管式沈下計」は7基設置していたが、1基が一定方向に変化する兆候が見られたことから、沈下計を予防的に交換した。

その他の「光ファイバー」「ロードセル」については、計測器本体の故障は生じず、長期的計測が可能であったといえる。

但し、これらを運用するための構成機材に一定の故障が生じたことから、今後同様のモニタリングを行う場合は、4. 3、4. 4に記した留意事項を参考に、その時点での技術革新も踏まえつつ計測方法を検討されると良い。

また、水管式沈下計によるたわみ計測で基準タンクの給水ポンプの故障が生じるなど

により、ドリフトが生じた場合のデータの補正方法を 5. 1 に記してあるので参照されたい。

またその際、計測器が雷サージによる故障が生じないよう 4. 2 の避雷対策を講じる必要がある。

本橋のモニタリングでは、継続的な支承の変位の計測が非常に有益であったが、計測器が外部に取付けられることもあって、故障の発生頻度が比較的多かった。

機械的な計測器であるため、故障が生じても復旧時に値の変動が生じないが、今後長期的に支承の変位をこの計測器を使用して計測する場合は、橋軸方向の計測器だけでも 3 か年毎に交換するといったメンテナンス計画を講じることが望ましい。

本モニタリングシステムでは、各計測器からのデータをデータロガーに収録し、その収録データを P C（パーソナルコンピュータ）に取り込み、インターネット通信を利用して外部に送信した。

データロガーは毎年の定期点検の際に絶縁抵抗の確認作業を行ったが、10年目の定期点検時の確認作業時に1台が動作しなくなり、別のデータロガーに交換した。

今後、長期的にモニタリングを行う際は、データロガーの予備機を用意しておくか、定期的に交換するといったメンテナンス計画を講じることが望ましい。

本橋は橋長297mの連続ラーメン橋であることから、たわみの計測値に疑念が生じた際に、外面から橋全体の変位やラーメン支点の各方向の変位を精度良く捉えることは困難であった。

4. 3 ではたわみの計測を補足する方法として測量による初期値の取得を紹介したが、測量による形状の把握も年変動や日変動が生じている中での或る一瞬を捉えた結果となることに留意が必要である。

本橋ではたわみの計測値の検証に用いなかったが、今後の計測への提案として、ラーメン支点付近に傾斜計を設置し、常時計測によりたわみ計測を補足することも有効と考えられる。

また閾値については、計測の目的に応じて適宜決めていく必要があるが、本橋の様に温度との相関性が非常に高い構造物では、一定期間の計測後、年間の温度変化に連動した計測結果に一定の上下限管理値を設ける方法も考えられる。

以上を本橋のモニタリングを経ての今後の長期モニタリングの際の留意点とする。

5 10年間のモニタリングデータ

5.1 たわみ

(1) モニタリングデータ

たわみの測定は図5.1.1に示すとおり各径間ごとに行った。

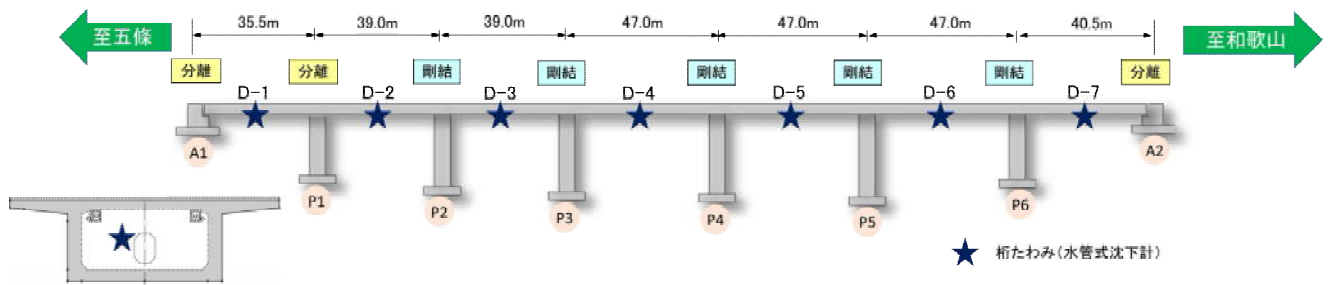


図5.1.1 たわみ計測器配置図

たわみのモニタリングデータを図5.1.2に示す。図中、橙色が計測値、青色が補正値を加味した値である。

たわみの閾値は、2.5に記したとおり15mmを【閾値レベル1】（この値を超えた場合、何らかの変状が起きている可能性があるとして注意深く監視するための値）としており、補正値を加味した値は、すべての径間において【閾値レベル1】の50%以下の値で推移した。また、年々値が増加していく傾向は見られなかった。

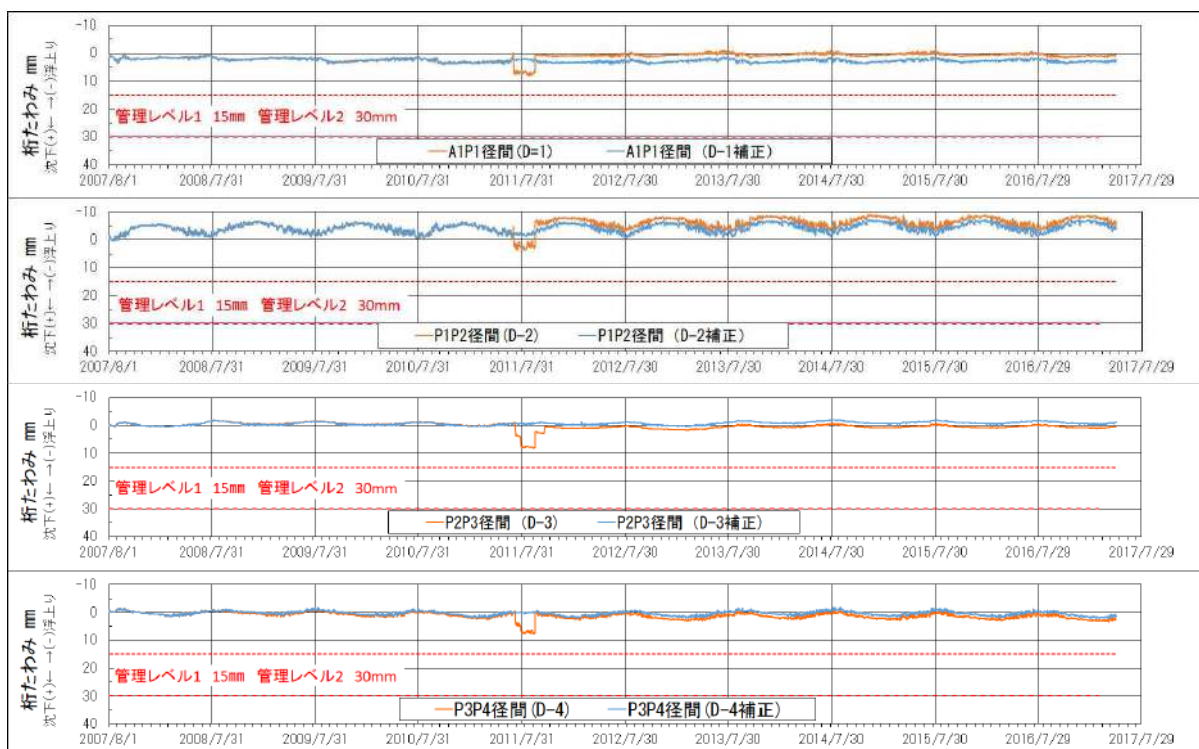


図5.1.2 モニタリングデータ

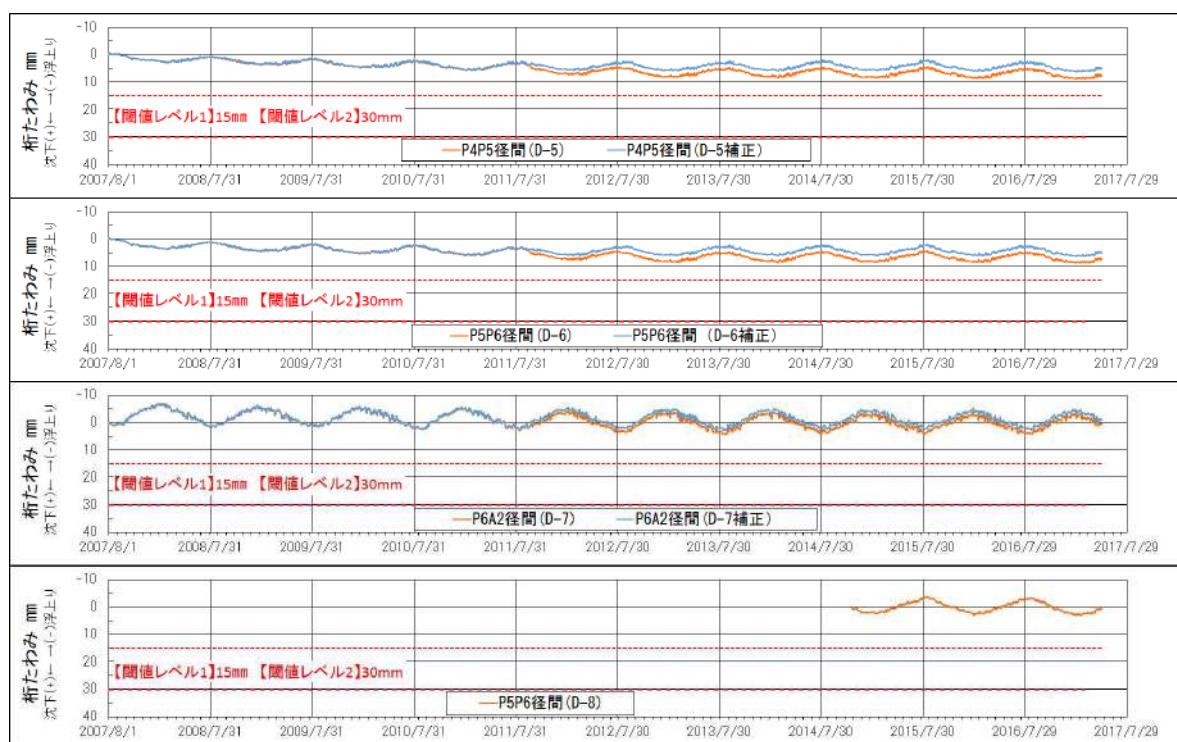


図5.1.2 モニタリングデータ（続き）

D-8はモニタリングデータの検証のために途中から設置したものである。

本橋は7径間連続のラーメン箱桁橋であるが、その支点構造は、A1～P1及びA2にゴム支承が配され、残るP1～P6はラーメン構造で下部工に剛結されており、橋体の中央4径間がラーメン構造、両端3径間が支承により移動可動な構造体となっている。

このため、ラーメン支点が含まれるP1～A2までの6径間では、年間の温度変化によってたわみが増減するため、温度との相関が非常に高い状態で推移した。

また本橋に発生する各径間のたわみの方向は、温度変化によって橋梁全体が冬場に収縮する際、中央4径間では桁がたわみ、ラーメン区間の両隣2径間は上側に反り上がる挙動となる（この検討の詳細は本委員会の中間報告書11頁3章2項にて解説済みである）。

（2）ドリフト量の補正

前項のたわみのモニタリングデータは、表5.1.1に示す故障の際に生じたドリフト量を補正したものである。

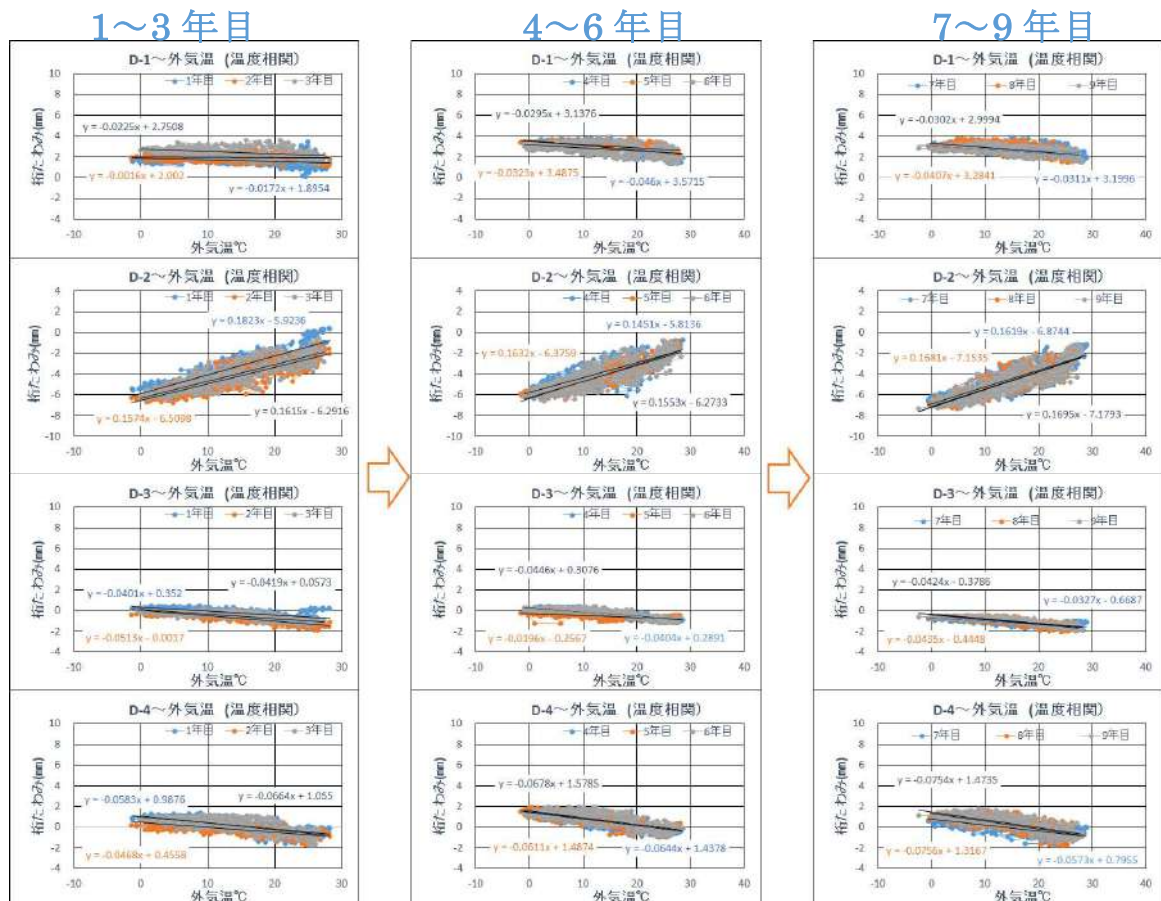
表5.1.1 たわみ計測値の補正値

計測イベント			補正量(mm)						
番号	原因	対象期間	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7
①	落雷停電発生によるデータの変動 D1-D7	2008/8/23 ～9/1	-0.08	0.01	0.09	-0.29	-0.11	-0.12	-0.36
②	基準タンクの水中ポンプ吐出し口破損に伴う 水中ポンプの交換 D1-D7	2011/7/2 ～9/20	2.47	1.89	-1.36	-0.17	-1.38	-1.42	-0.24
③	基準タンクの水中ポンプの破損に伴う水中ポンプ の交換 D5-D6	2012/8/14 ～8/16					-0.68	-0.73	
④	基準タンクの水中ポンプの破損に伴う水中ポンプ の交換 D5-D7	2014/4/30 ～5/3					-0.26	-0.03	-0.20
⑤	電源工事のための一時停電	2015/5/13	-0.02	-0.06	-0.01	0.01	0.06	-0.02	-0.07
⑥	D-1故障・交換	2015/7/8 ～7/13	-0.21						
⑦	ロガー故障・交換	2017/3/8	-0.12	-0.11	-0.01	-0.08	-0.07	-0.08	0.00

(3) 計測値の推移

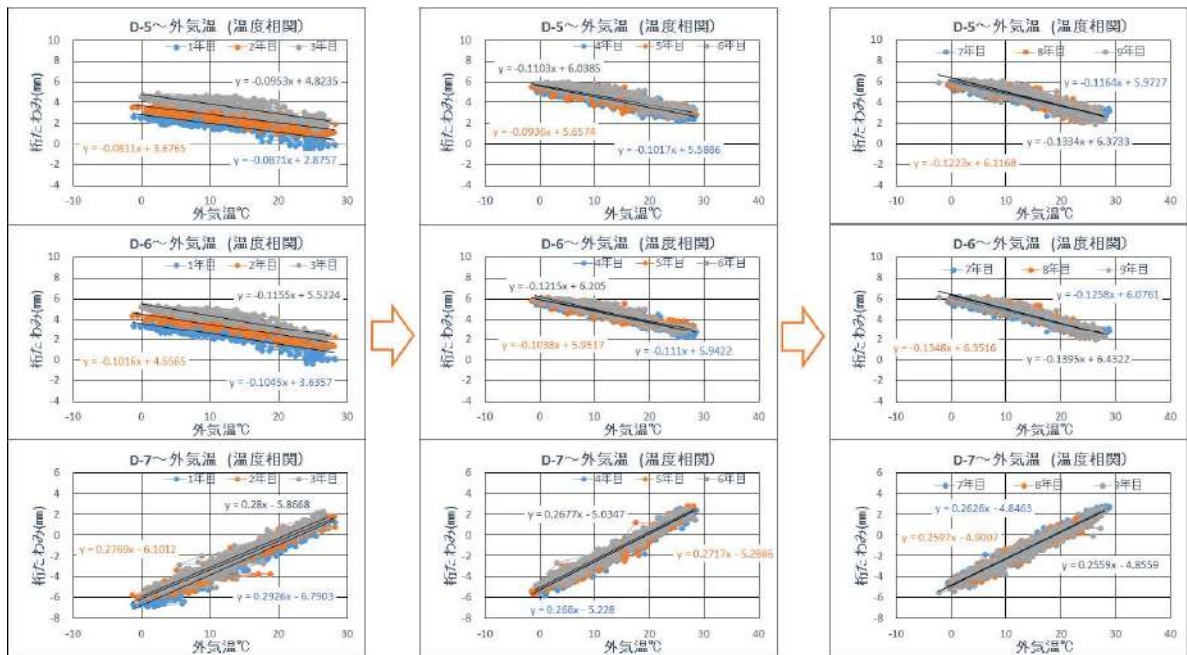
前項の補正値を加味した各年のデータと温度との相関関係の推移を図5.1.3に示す。

モニタリング開始当初は相関関係が変動しているが、概ね5年目頃より回帰式が重な
ってきていて変化のない状態となっている。



※10年目のデータは1年間に満たないため供用後9年間の推移で評価した。

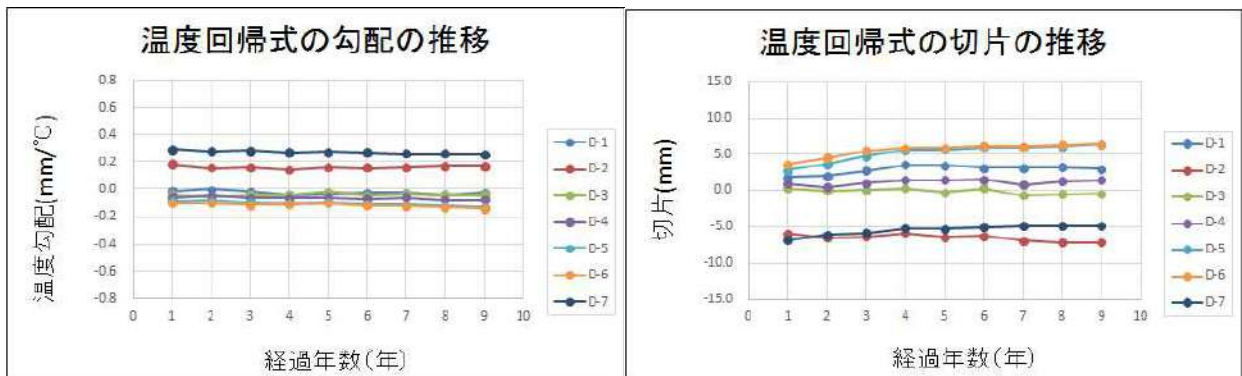
図5.1.3 たわみと温度の相関関係の推移



※10年目のデータは1年間に満たないため供用後9年間の推移で評価した。

図5.1.3 たわみと温度の相関関係の推移（続き）

上記の各年の回帰式の傾きと切片の推移を図5.1.4に示す。



※10年目のデータは1年間に満たないため供用後9年間の推移で評価した。

図5.1.4 温度回帰式の勾配と切片の推移

次に各年の夏場と冬場の月平均の値の推移を図5.1.5に示す。

たわみの値は夏場と冬場に最大最小化するが、これらの推移も5年目頃からほぼ横ばいである。

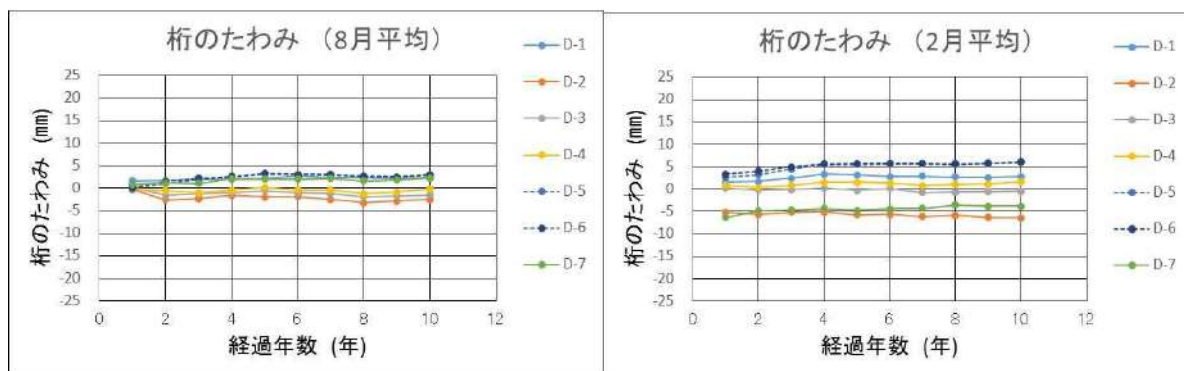


図5.1.5 桁たわみの夏場と冬場の値の推移

以上のように温度とたわみの回帰式、たわみが最大最小化する時期の推移の何れも5年目頃から落ち着いた挙動となっていることが分かる。

(4) たわみの異常値の検証・検討経過

a) 水管式沈下計の計測メカニズムと配置

たわみの計測には図5.1.6に示す水管式沈下計を使用した。



図5.1.6 水管式沈下計の概要図及び写真

水管式沈下計は水槽に水中ポンプで給水して常時水を溢れさせることで基準水位を一定に保つ「基準タンク」、基準タンクと沈下計とを繋ぐ「連通管」、水盛りの原理で基準水位を同等に保ちながら内部フロートの上下の変動を計測する「沈下計」で構成される沈下量計測システムである。

水管式沈下計は、連通管の長さの制約から基準タンクを4箇所にて、P1、P3、P5橋脚上の基準タンクでは起終点両側の支間中央にそれぞれ沈下計を、P6橋脚上の基準タンクにはA2側の支間中央に沈下計を配し、4系統の計測システムで7径間の支間中央の沈下量を計測した。

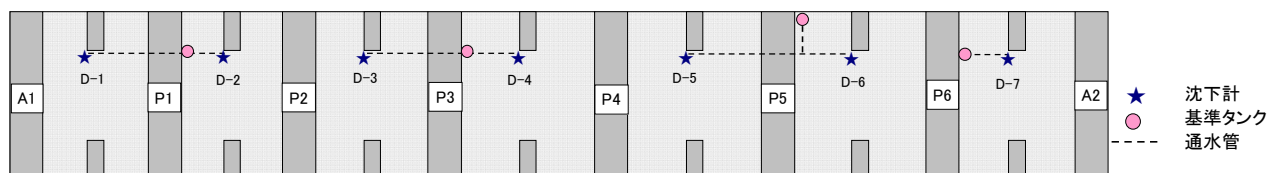


図5.1.7 水管式沈下計の配置図

b) たわみ計測値の検証・検討の経過

たわみの計測器に生じた故障とそれに伴う計測値の異常の検証の経過は以下のとおり。

- ・当初、基準タンク内に給水する水中ポンプは、耐久性の高い排水量の大きなものを用い、吐出し口にはノズルをビニールテープで取付けて水勢を緩和していたが、このノズル部分が、モニタリング4年目の2011年にたて続けに破損した。
- ・このため、4箇所の基準タンクすべての水中ポンプについて、耐久性は低いながらノズル調整が不要な排水量が小さなものに交換した。
- ・その後は、水中ポンプの耐久性から2度水中ポンプが停止する故障が生じ、その都度水中ポンプを交換した。
- ・この水中ポンプの故障の際には、故障前後にデータが不安定となり、ポンプの交換によって基準タンクの水位が変わることにより、データの値にドリフトを生じさせていることが、その後の検討で判明した。

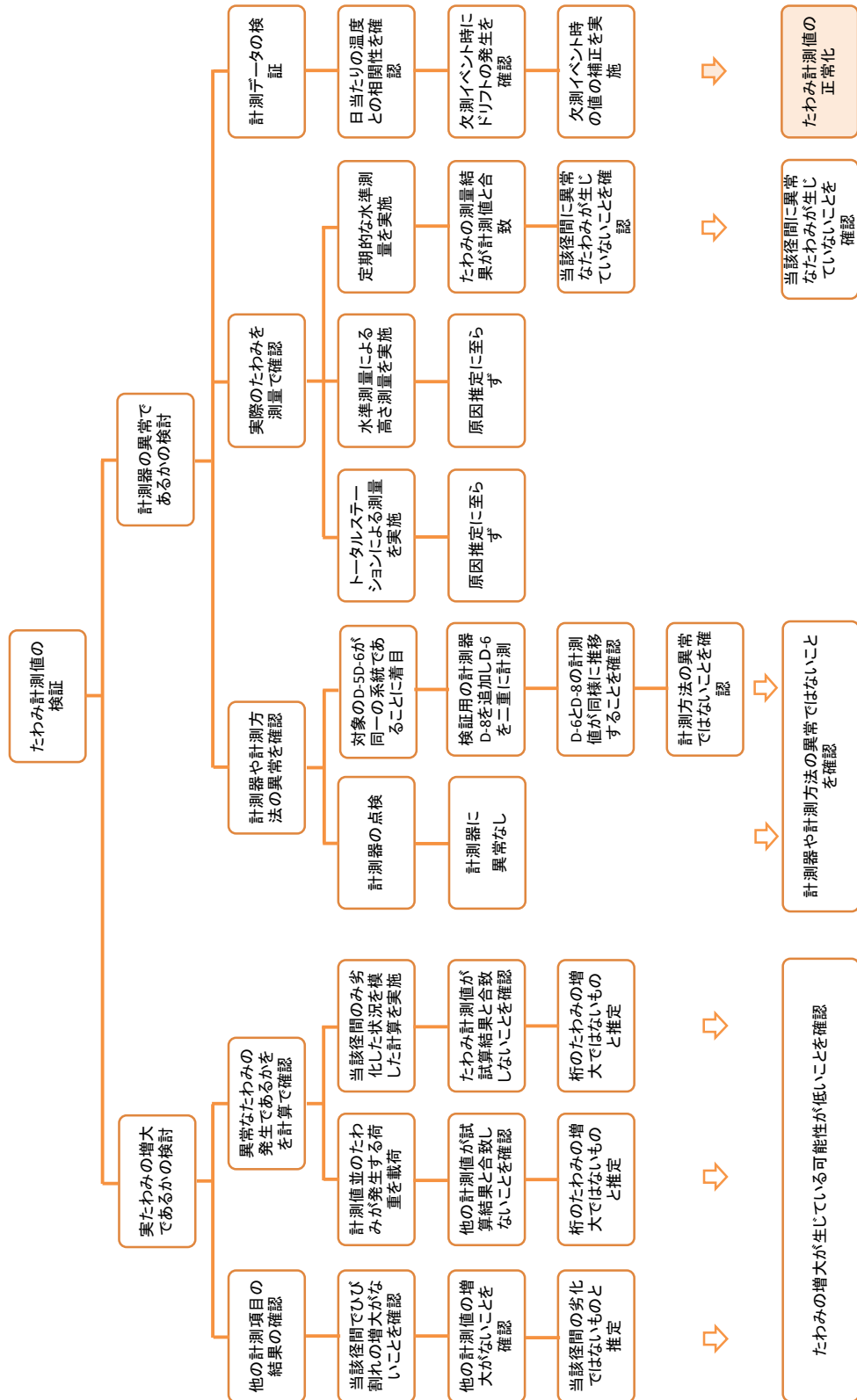
たわみの計測値にドリフトが生じていることの結論に至るまでの検討経過を図5.1.8に示す。

本橋はラーメン橋であるためたわみの年間の変動は大きくても3～4mm程度と非常に小さく、この水中ポンプの故障によるデータのドリフトの影響は思いの外大きかった。

なお、この現象の原因究明に至る過程においては、第8回及び第9回のモニタリング評価委員会では、5径間目と6径間目に取付けたD-5、D-6の値が、右肩下がりに推移していることについて、以下の検討を行い、異常なたわみが発生しているのではないことを確認した。

- ・当該径間に設置されたたわみ以外の計測器の値の傾向（他の径間との違いの有無）
- ・仮に当該2径間に計測値に相当するたわみを等分布荷重載荷で発生させた場合と上下床版ひずみの測定結果の照合
- ・仮に当該2径間が計測値に相当するたわみが発生した場合を模した弾性係数低下によるたわみの状況の確認

また、これらの結果から、何れも当該2径間のたわみが増大しているとは考え難かったが、明確な原因が不明であったため、供用8年目より6径間目に検証用の沈下計D-8を現行のD-6の隣に併設し、D-6とD-8の計測結果を補足するための現地測量も行った。



本橋のたわみ計測は、水管式沈下計の水管長を50m程度とするため、7径間を4系統に分けて計測している。
 1系統には基準タンク1基に対し沈下計を1〜2基接続しており、D-5・D-6は同一の基準タンクに接続されている。

実際のたわみを把握するための現地測量は、当初橋桁内でトータルステーションとレベルによる水準測量を実施した。
 この方法は、たわみのある箇所を計測したため、温度変化や活荷重の影響を受けた。
 これらの結果を踏まえ、その後行った定期的な水準測量では、同一箇所複数回測ることとし、その際活荷重による影響の少ない瞬間を測ることとした。また、これを冬場から夏場にかけて定期的に実施した。

図5.1.8 たわみ計測値の検証の経過

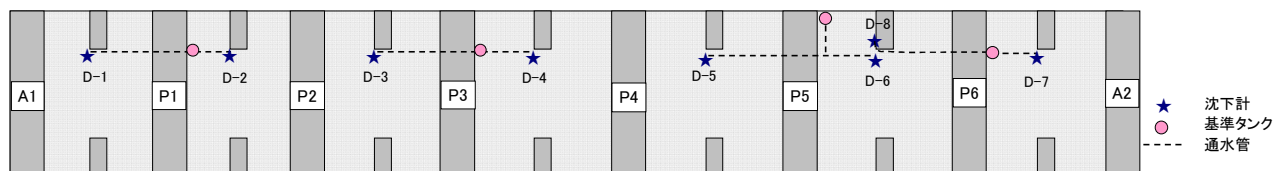


図5.1.9 検証用水管式沈下計の配置図

その後、この現象が水中ポンプの故障等の際に生じたデータのドリフトの累積であることが確認され、ドリフト値は補正することとなった。

c) ドリフト値の補正方法

本モニタリングで実施したデータのドリフト値の補正の例を以下に示す。

欠測やデータの変動が生じた前後のモニタリングデータのうち、基準タンク内の水中ポンプの故障・交換によってドリフトが生じた場合、図5.1.10に示す様にデータの連続性が途絶えている。

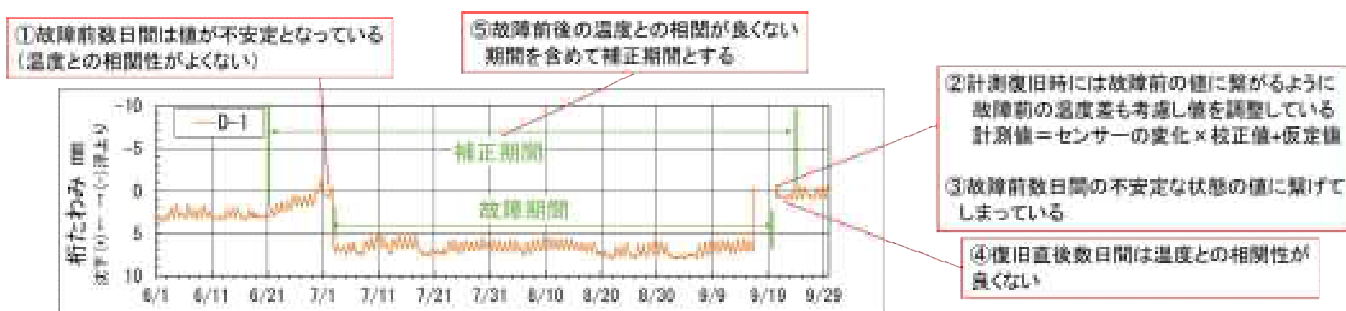


図5.1.10 ドリフト量の補正前の例

欠測やデータの変動の前後にはデータが不安定化することもある。

この場合は、前後数日の温度に対する日変動を確認し、故障期間にこの値が不安定となっている期間を含めて補正期間とする。

このように定めた補正期間の前後1日の状態を温度と計測値の相関図に表すと図5.1.11の様に補正期間の起終点日の温度とたわみの回帰式は温度勾配が平行移動した状態となる。

この二つの回帰式による同一温度のときの値の差異を補正值とする。

以上の補正值を用いて補正を施したモニタリングデータは図5.1.12のようになる。

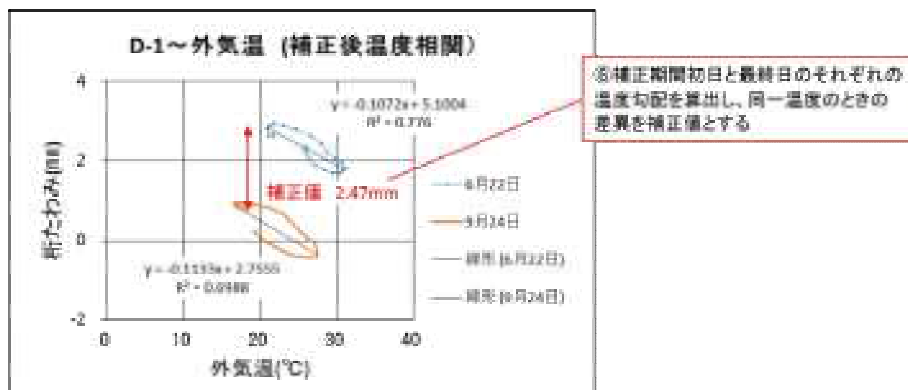


図5.1.11 ドリフト量の算出の例

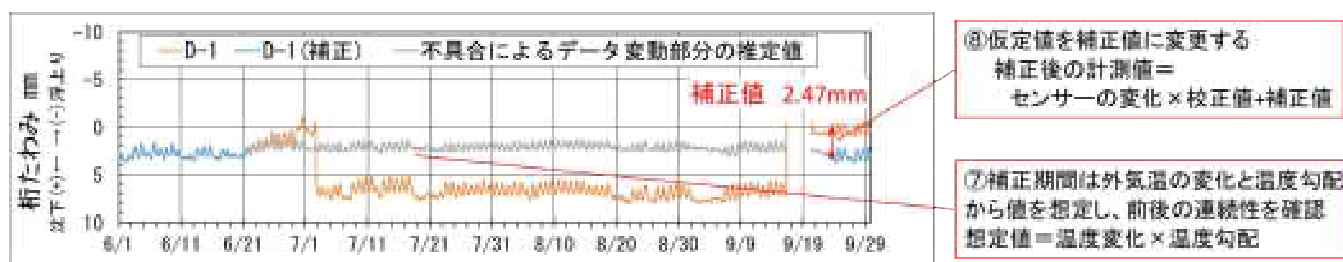


図5.1.12 ドリフト量の補正後の例

この補正期間の値を、補正に用いた回帰式と外気温データを用いて推定すると、前後の期間との連続性が保たれており補正値が適正であることが確認できる。

また本補正方法の妥当性の確認として、補正量を算出するデータの期間を1日、7日、15日の期間で算出した差を確認し、故障が生じていない正常区間の一定期間を仮の故障期間として算出した補正量の算出によって、この方法で十分な精度で補正が可能であることを確認済みである。検討の結果は資料編の資料No.14を参照されたい。

5. 2 桁の橋脚付け根部ウェブ変形

(1) モニタリングデータ

本橋は当初P2橋脚付近に斜めひび割れがあり、これらは供用前にエポキシ樹脂によって補修済みであったが、このひび割れにより、支点上のせん断力による変形が過大とならないことが重要な着目点であることから、光ファイバーセンサーを配して常時計測により監視を行った。

光ファイバーセンサーの長さは1mとし、図5.2.1に示すとおりP2橋脚の起点側終点側共に南北のウェブ面に2条ずつ鉛直に併設し、さらにP1、P3橋脚にも2条ずつ配置した。

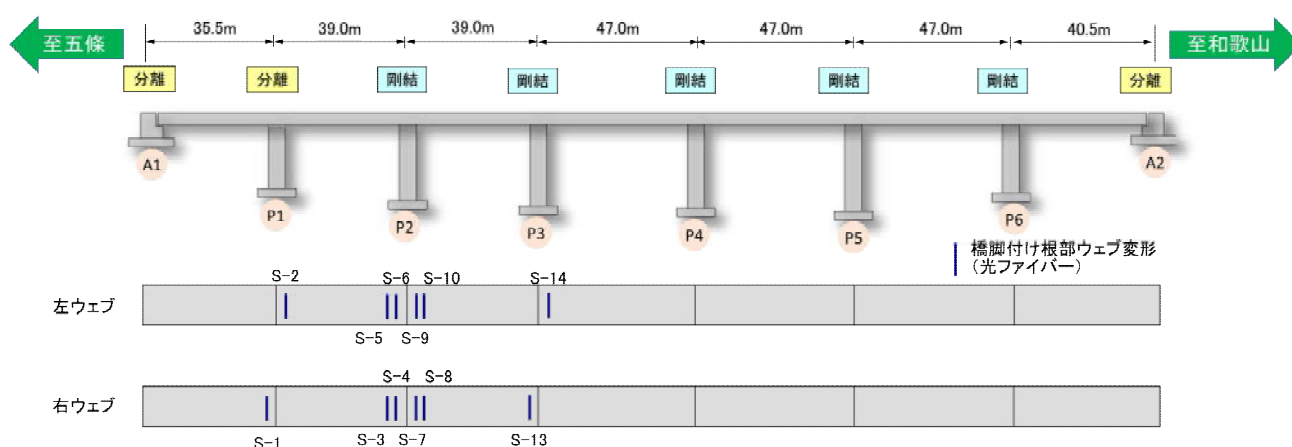


図5.2.1 光ファイバーセンサーの配置図

モニタリングデータを図5.2.2に示す。図中、橙色が計測値、青色が補正値を加味した値である。

本項目の管理値は0.1mmを上限注意値、0.2mmを上限値としていたが、故障したS-4を

除き、この値を超過したものは無かった。また年々値が増加していく傾向は見られなかった。

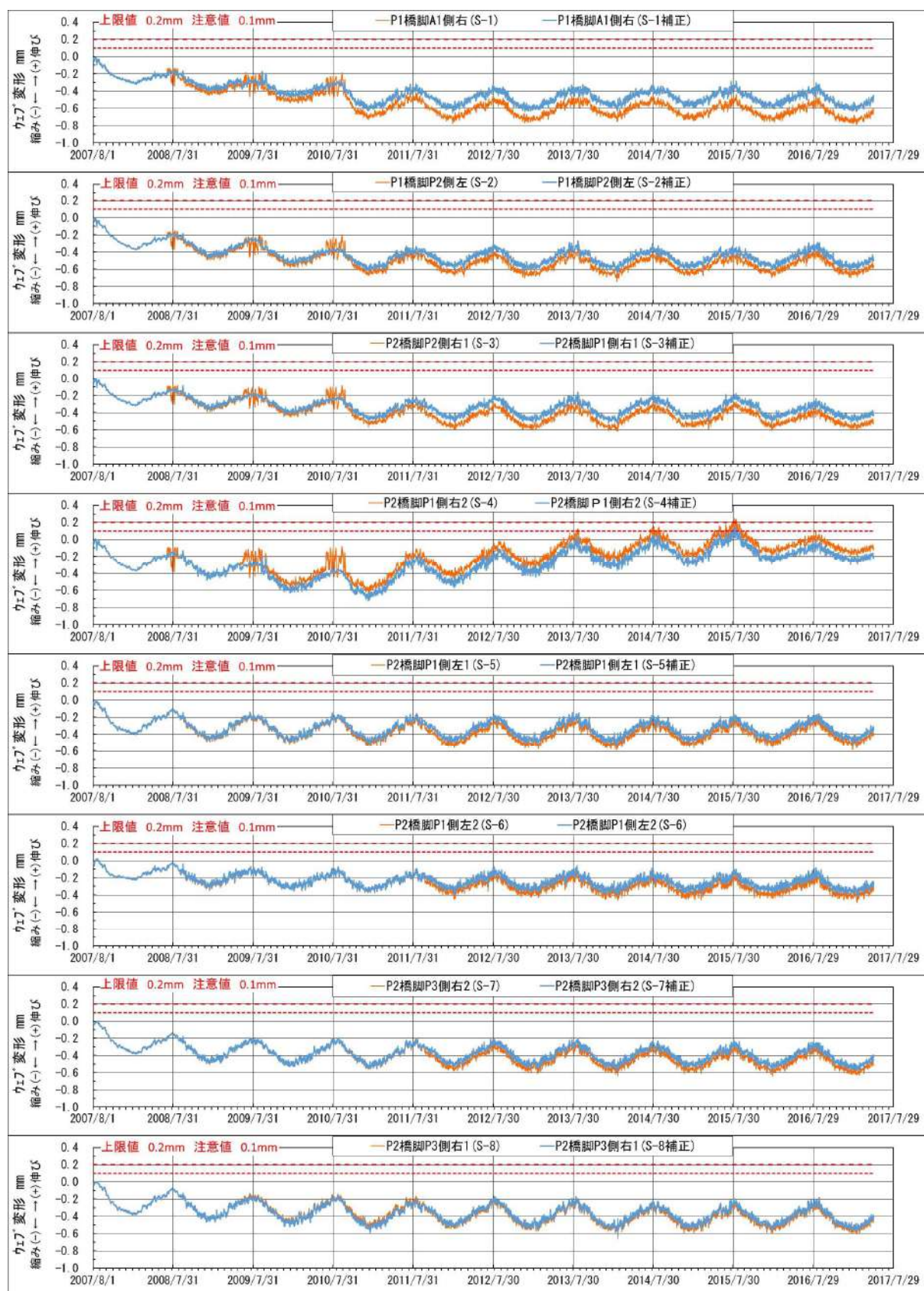


図5.2.2 モニタリングデータ

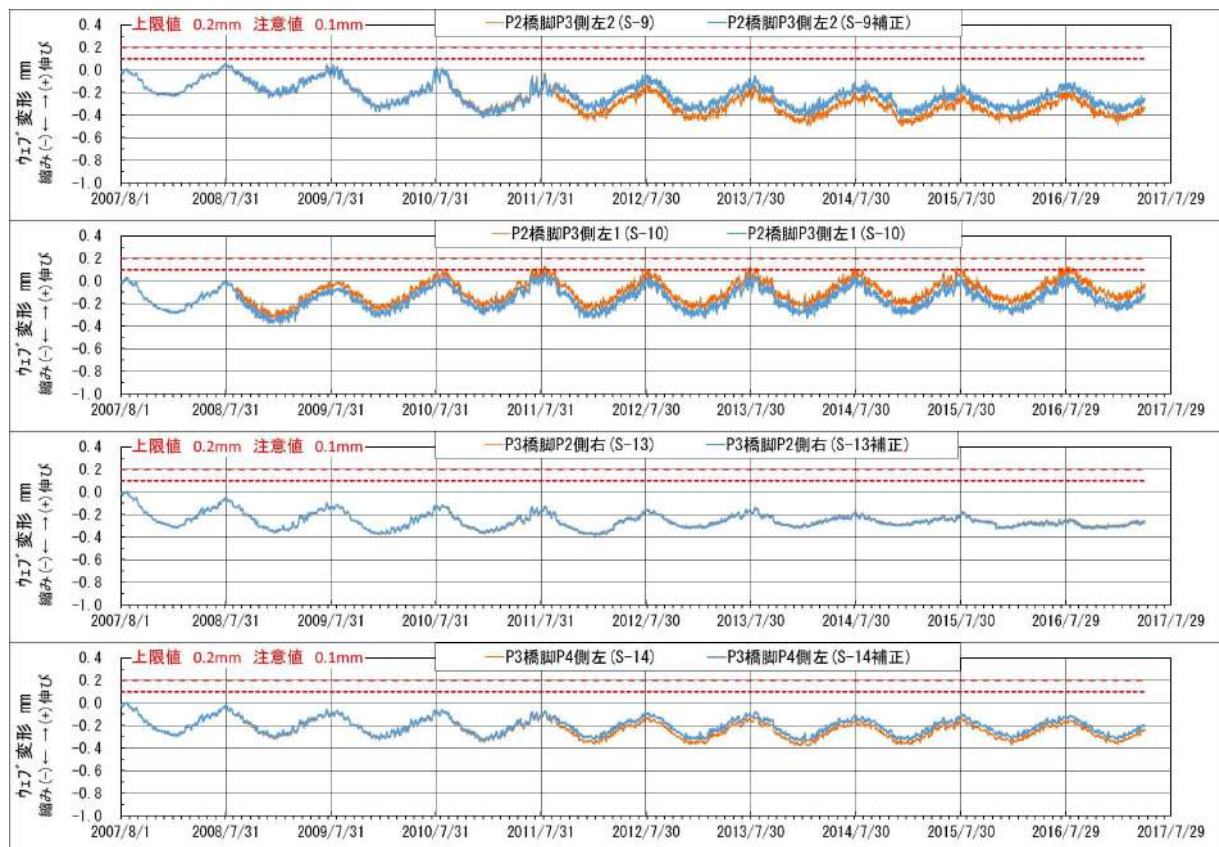


図5.2.2 モニタリングデータ（続き）

（２）ドリフト量の補正

前項の橋脚ウェブ付近の変形のモニタリングデータは、表5.2.1に示す故障の際に生じたドリフト量を5.1（４）の方法で補正したものである。

表5.2.1 橋脚付近のウェブ変形計測値の補正值

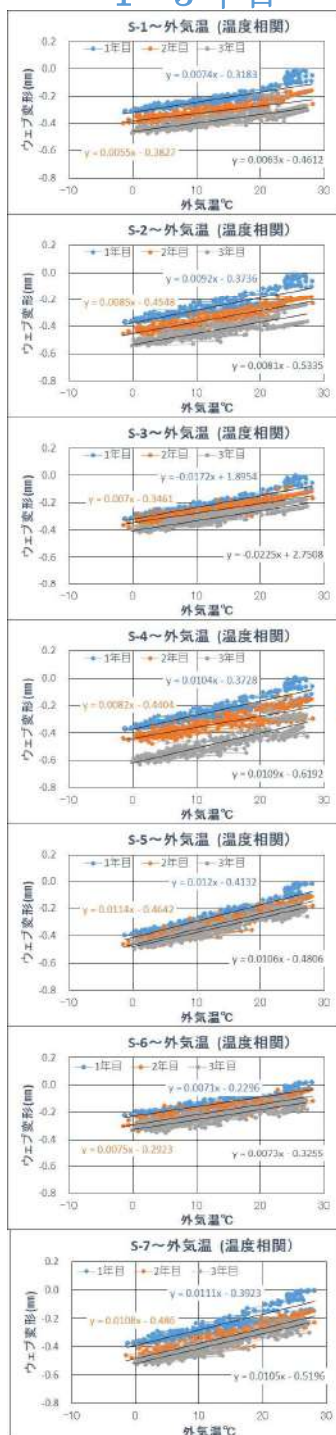
欠測イベント			補正量(mm)												
番号	原因	対象期間	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7	S-8	S-9	S-10	S-13	S-14	
①	落雷停電発生によるデータの変動	2008/8/23 ～9/1	0.044	0.024	0.020	0.003	0.017	0.012	0.005	0.002	0.006	-0.048	0.005	0.009	
②	オプトボックスの異状による欠測	2009/6/1 ～6/1	0.020	0.010	0.010	0.007	-0.003	-0.008	-0.001	-0.021	-0.011	-0.006	-0.006	-0.004	
③	オプトボックスの交換	2010/10/7 ～10/8	0.038	0.020	0.027	-0.017	0.019	0.002	0.006	-0.013	-0.011	-0.002	0.009	0.007	
④	計測器の交換に伴う欠測	2011/9/16 ～9/20	0.028	0.027	0.035	0.000	0.021	0.046	0.041	0.054	0.098	-0.013	-0.015	0.029	
⑤	電源工事のための一時停電	2015/5/13	-0.004	-0.006	-0.005	-0.003	-0.004	-0.008	-0.005	-0.007	-0.003	-0.006	-0.006	-0.005	
⑥	ロガー故障・交換	2017/3/8	-0.003	-0.002	-0.003	-0.002	-0.002	-0.005	-0.002	-0.003	-0.002	-0.003	-0.003	-0.002	

（３）計測値の温度との相関からの推移

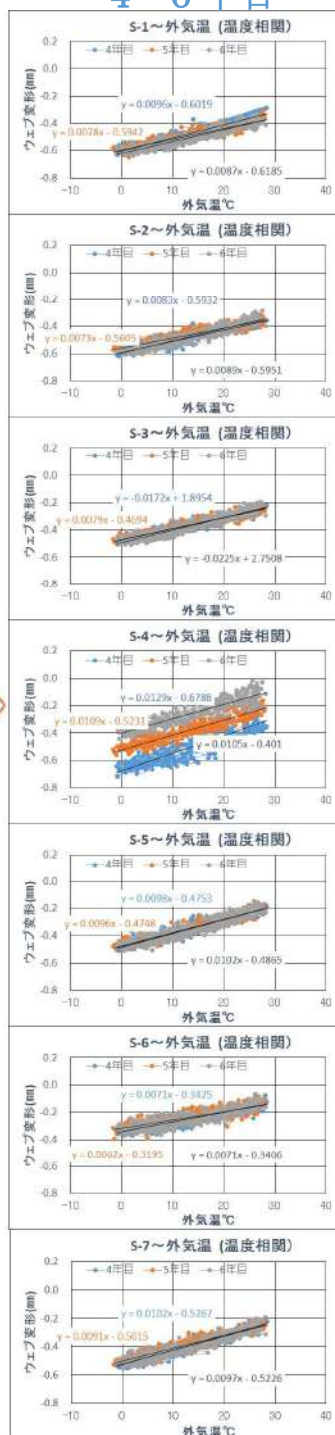
前項の補正値を加味した各年のデータと温度との相関関係の推移を図5.2.3に示す。

モニタリング開始当初は相関関係が変動しているが、計測器が故障したS-4を除き概ね5年目頃より回帰式が重なってきていて変化のない状態となっている。

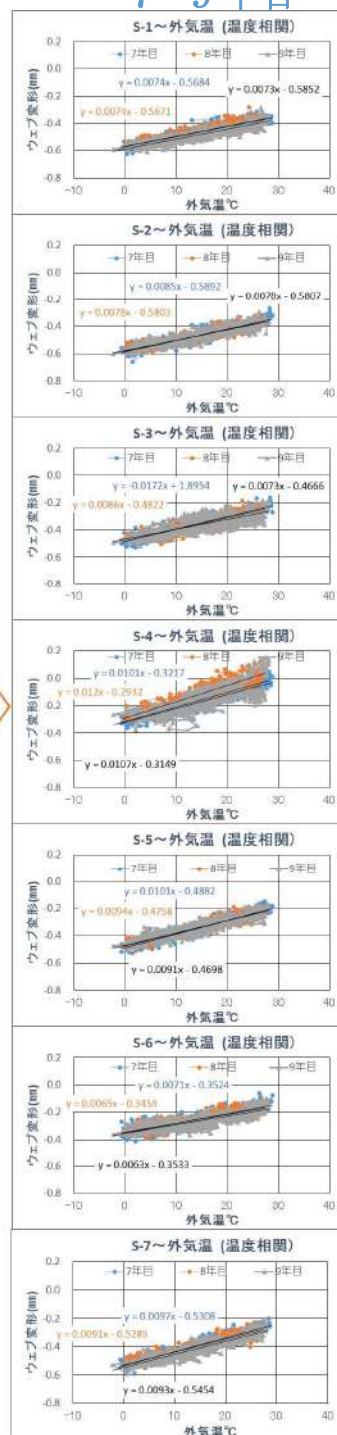
1～3 年目



4～6 年目



7～9 年目



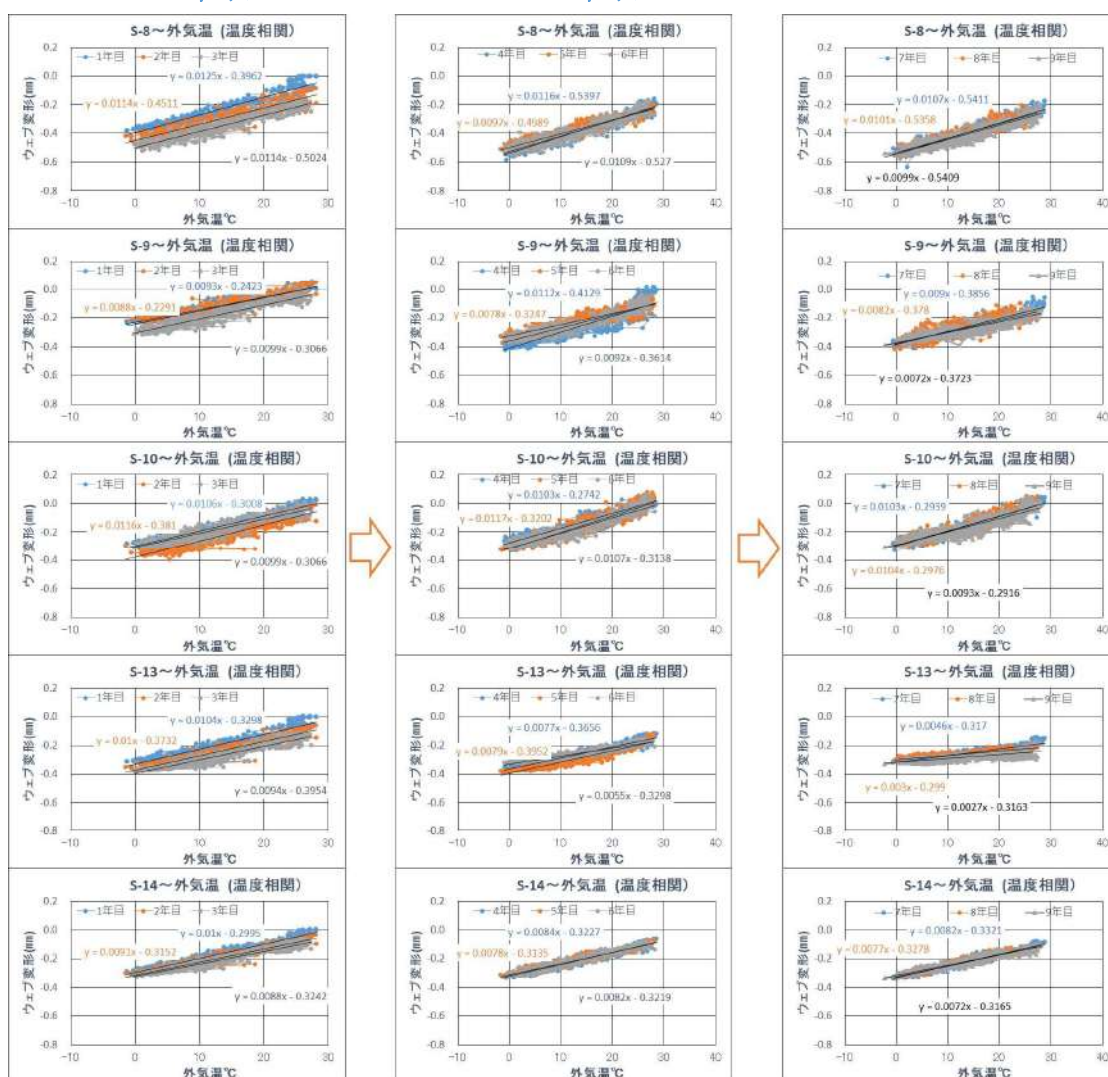
※10年目のデータは1年間に満たないため供用後9年間の推移で評価した。

図5.2.3 橋脚ウェブ付近の変形と温度の相関関係の推移

1～3 年目

4～6 年目

7～9 年目



※10 年目のデータは 1 年間に満たないため供用後 9 年間の推移で評価した。

図5.2.3 橋脚ウェブ付近の変形と温度の相関関係の推移 (続き)

次に各年の夏場と冬場の月平均の値の推移を図5.2.4に示す。

こちらも、S-4を除き概ね5年目頃から横ばい傾向である。

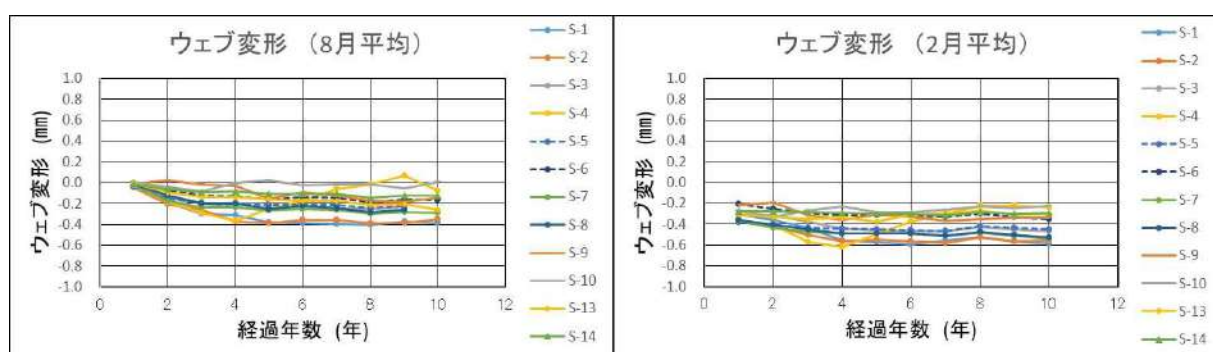


図5.2.4 橋脚ウェブ付近の夏場と冬場の値の推移

以上のように温度とたわみの回帰式、たわみの最大最小化する時期の推移の何れも5年目頃から落ち着いた挙動となっていることが分かる。

(4) 桁の橋脚付け根部ウェブ変形の異常値の検証・検討経過

a) オプトボックスの交換

モニタリング開始後の翌年の夏場から、S1～S4の値が夏場に変動が大きくなるなど、異常が見られた。

全12個のセンサーは、4個のオプトボックス（データ変換装置）を介してデータロガーに接続されていたが、これらのセンサーは同一のオプトボックスに繋がれていたことから、オプトボックスの異常が原因であると考えられた。

このため、該当するオプトボックスを2010年10月に交換した。この対応により、その後の計測値は改善した。

b) 光ファイバーセンサーの交換

P2橋脚上に設置した8個のセンサーのうち、S-4だけが前述のオプトボックス交換以降、毎年伸び方向に値がシフトする動きが見られた。

原因の切り分けのため、オプトボックスから出力される配線を他のセンサーと入れ替えることを試み、この部分には異常が無いことを確認した。

このことから、異常値が発生する原因が、センサー本体からオプトボックスまでの間にあることが考えられ、センサー（オプトボックスまでの配線を含む）を新品に交換した。この対応により、その後の計測値は改善した。

異常が発生した原因は、オプトボックスおよびデータロガーの入出力点検に異常がないこと、集積している他の測点に問題がないこと、センサーおよびオプトボックスまでの配線の交換後計測値が改善したことから、撤去したセンサーおよびオプトボックスまでの配線に使用された多芯ケーブルまでの間に異常があるものと考えられた。

さらに撤去したセンサーを再校正した際の短期的な挙動を確認し、異常がないことを確認した結果から、データの異常の原因は、このセンサーに繋がれた多芯ケーブルの故障であったと推定した。

5. 3 支承の変位と橋の伸縮

(1) モニタリングデータ

支承の変位は、橋の伸縮の観点から当委員会の中間報告書でも記した橋軸方向の変位について、その後の経過も含め以下に報告する。

支承の変位の測定は図5.3.1に示すとおり支承が配置された3支点において実施した。

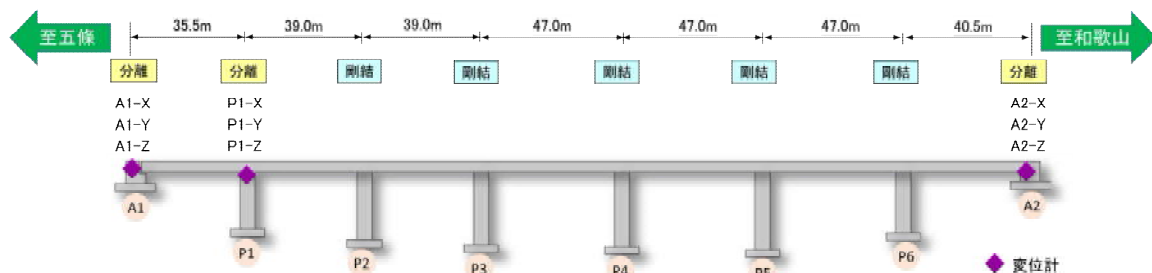


図5.3.1 支承の変位の計測位置

モニタリング全期間の支承の変位の計測結果を図5.3.2に示す。

本項目の管理値は、橋軸方向の変位に対して上限注意値を55mm、下限注意値をA1及びA2では-30mm、P1では-45mmとしていたが、何れもこの範囲内に収まっていた。

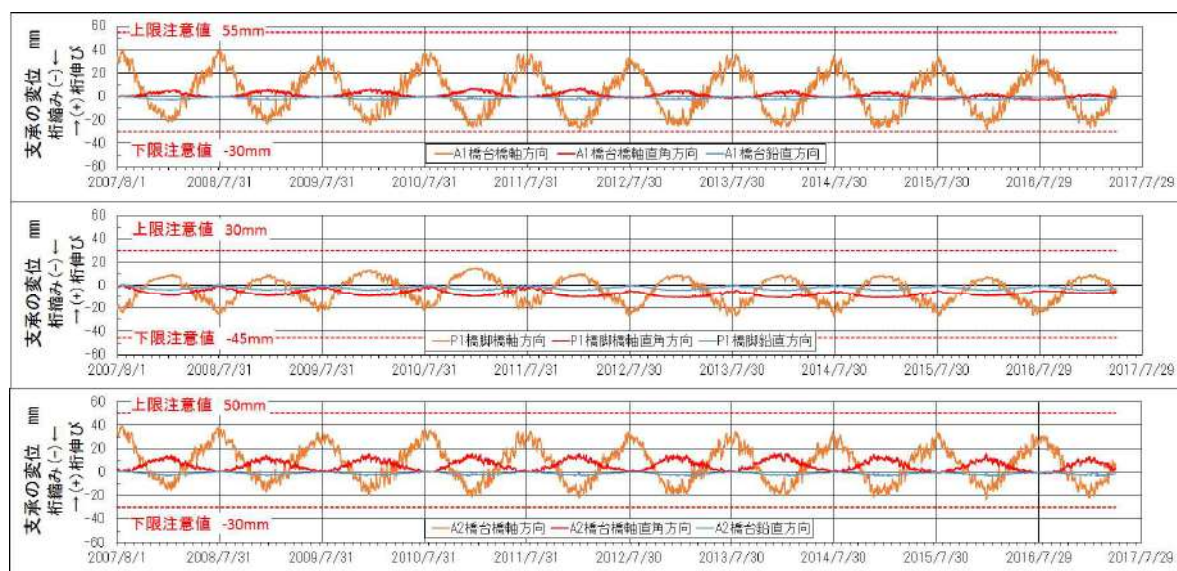


図5.3.2 モニタリングデータ

(2) 温度との相関係数の推移

本橋の支承の変位が温度との相関が非常に高かったことを示すため、各計測年の温度と計測値の相関係数を表5.3.1に示す。

相関係数は、A1、P1、A2各支点で何れも90%以上の高い相関性を計測開始から終了まで示した。

表5.3.1 支承の変位と温度の相関係数の推移

		A1-X	P1-X	A2-X
2007～08	1年	0.982	0.971	0.983
2008～09	2年	0.970	0.959	0.972
2009～10	3年	0.973	0.949	0.973
2010～11	4年	0.982	0.973	0.981
2011～12	5年	0.979	0.945	0.980
2012～13	6年	0.978	0.971	0.979
2013～14	7年	0.976	0.969	0.978
2014～15	8年	0.977	0.971	0.977
2015～16	9年	0.971	0.964	0.972

※10年目のデータは1年間に満たないため供用後9年間の推移で評価した。

(3) 橋の伸縮装置の推移

本橋の支承の変位イメージを図5.3.3に、A1、A2両橋台の支承の橋軸方向変位の計測データの合計の推移を、表5.3.2に示す。この結果より、桁全体は橋軸方向に年間約112～123mmの範囲で伸縮変動を繰り返しており、収縮の継続によって桁長が年々短くなる等の状況は見られなかった。

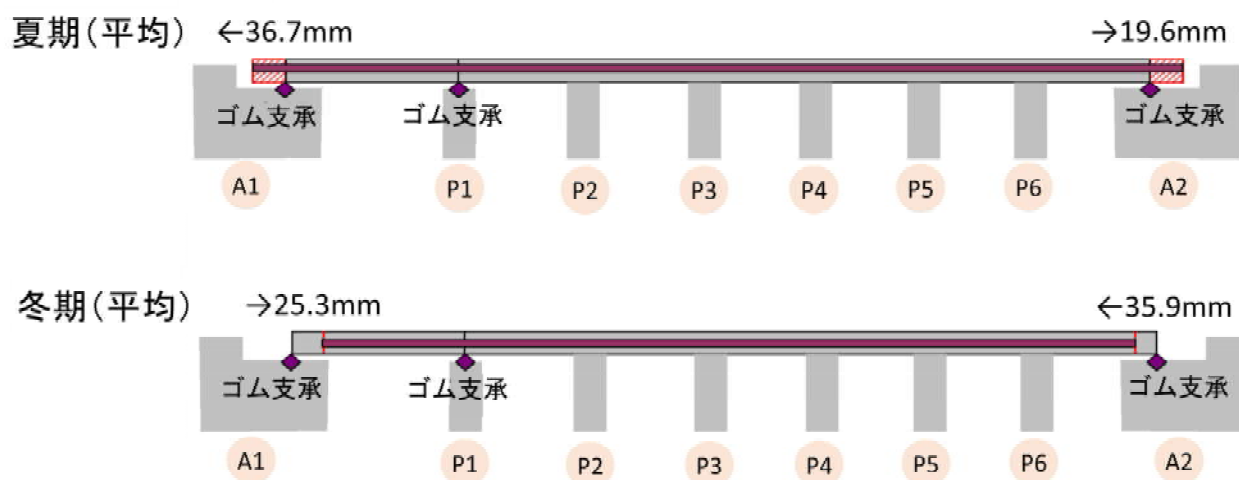


図5.3.3 支承の変位イメージ

表5.3.2 支承の橋軸方向変位の最大・最小値・合計値

計測データ		1年	2年	3年	4年	5年	6年	7年	8年	9年	10年
A1橋台橋軸	最大値	40.40	37.75	37.05	37.75	36.95	35.35	36.10	32.40	35.35	32.00
	最小値	-21.90	-23.30	-24.15	-26.45	-28.90	-24.85	-25.85	-27.20	-28.85	-26.30
A2橋台橋軸	最大値	39.90	37.03	35.60	35.75	34.90	33.20	34.58	31.30	34.13	31.08
	最小値	-15.65	-17.15	-19.70	-21.48	-22.10	-19.60	-20.13	-21.15	-23.33	-21.93

変動量	1年	2年	3年	4年	5年	6年	7年	8年	9年	10年
A1橋台橋軸	62.30	61.05	61.20	64.20	65.85	60.20	61.95	59.60	64.20	58.30
A2橋台橋軸	55.55	54.18	55.30	57.23	57.00	52.80	54.70	52.45	57.45	53.00
A1A2合計	117.85	115.23	116.50	121.43	122.85	113.00	116.65	112.05	121.65	111.30
平均 117.47										

(4) 線膨張係数に基づくひずみと実測値の関係

外気温の年変動は毎年約40℃であった。この40℃に対するコンクリートの線膨張係数(10 μ /℃)に基づく温度によるひずみは約400 μ となる。

これに対し、前項の桁の伸縮量から橋長297mあたりのひずみを計算すると394 μ となる。

また、P2-P3、P5-P6の2つの径間での床版のひずみ計測データからは、年間約360 μ (4測点の平均値)の伸縮が計測されている(表5.3.3参照)。

以上のことから、線膨張係数に基づく温度によるひずみは、支承の変位と床版ひずみとは概ね一致し、橋の挙動が温度変化による影響を受けていたことが確認できた。

表5.3.3 床版のひずみの最大最小値とその平均値

計測データ		単位 μ									
		1年	2年	3年	4年	5年	6年	7年	8年	9年	10年
P2-P3下床版	最大値	40.9	14.2	-95.8	-84.5	-83.7	-83.3	-61.7	-107.7	-57.9	-81.4
	最小値	-253.6	-366.8	-413.2	-386.9	-410.3	-387.5	-394.4	-398.0	-373.0	-343.9
P2-P3上床版	最大値	42.7	8.1	-33.2	-4.5	4.5	-103.5	-104.4	-116.5	-110.0	-122.9
	最小値	-448.8	-572.8	-633.6	-588.1	-635.7	-613.9	-620.5	-641.6	-608.8	-610.6
P5-P6下床版	最大値	31.6	-3.9	-103.3	-117.3	-114.1	-130.3	-132.4	-170.2	-161.7	-190.5
	最小値	-259.6	-359.4	-386.4	-402.4	-406.5	-377.4	-394.8	-409.6	-416.4	-413.2
P5-P6上床版	最大値	9.3	-20.8	-117.9	-117.5	-117.9	-121.0	-118.7	-156.9	-141.8	-155.7
	最小値	-286.0	-379.0	-406.7	-412.8	-428.4	-387.8	-404.3	-411.2	-418.6	-409.9

変動量	1年	2年	3年	4年	5年	6年	7年	8年	9年	10年
P2-P3下床版	294	381	317	302	327	304	333	290	315	263
P2-P3上床版	492	581	600	584	640	510	516	525	499	488
P5-P6下床版	291	356	283	285	292	247	262	239	255	223
P5-P6上床版	295	358	289	295	311	267	286	254	277	254
平 均	355									

5. 4 ひび割れの推移

5. 4. 1 調査方法の変遷

(1) 当初モニタリング計画

供用開始直後のひび割れ点検方法は以下のとおりであった。

- ①点検時期：供用後1ヶ月、3ヶ月、12ヶ月
以降毎年7月
- ②毎年点検：代表径間（P2～P3、P6～A2間）
代表径間以外の重点点検箇所（支点付
近、偏向部付近、支間中央付近、施工継目
付近）
- ③隔年点検：全径間
- ④対象幅：重点点検箇所は0.1mm以上
その他は0.2mm以上
- ⑤点検方法：目視及びクラックスケール

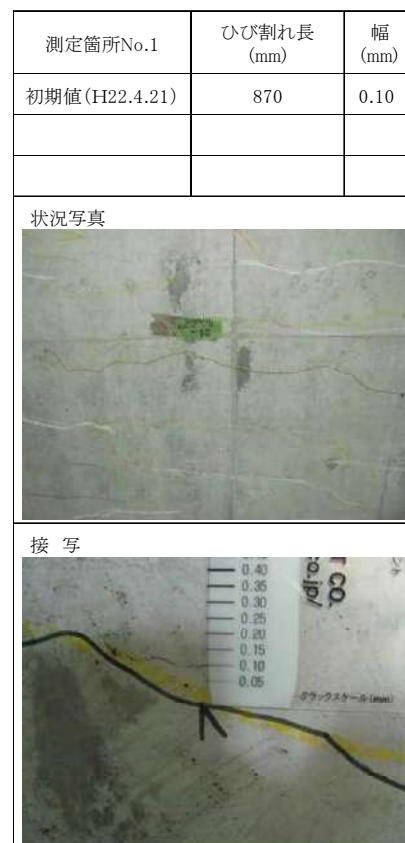


図5.4.1 点検調書の例

(2) 点検方法の修正

点検方法の推移を表5.4.1に示す。

ひび割れの点検方法は、モニタリング開始以降様々
な意見や要望を反映して改善を加えた。

表5.4.1 点検方法の推移

	変更に至る委員よりの指摘・意見等	測定するひび割れ幅	測定時期	マーキング法	その他
当初 H19年～		重点点検箇所→0.1mm以上 それ以外 →0.2mm以上	夏(7月)	チョークによる (クレヨンから変更)	代表区間P2～P3、P6～A2径間は毎年 それ以外の径間は隔年
H22修正	・ひび割れの拡がる冬場に測定する方が安全側で監視できる。 ・接触等によるマーキングの消滅が危惧される。 ・ひび割れの幅が0.1mm以上の端部の範囲をひび割れ長さとして測定	ひび割れの幅が0.1mm以上の端部の範囲をひび割れ長さとして測定	冬(2月→4月)	マジックペンによる (当初赤マジックペン→黒マジックペン)	
H23修正	・代表区間以外の径間に対しては大きな変状を見落とさず、また全径間の傾向は把握できるというスタンスでの測定内容とする。	同上	冬(2月)	同上	代表区間以外の径間については、南側判断面位について0.1mm以上のひび割れの測定を行い、北側については比較的大きな(0.2mm以上のひび割れ)についてのみ監視していく。
H27追加	・ひび割れ注入選定に遺漏が生じないようにする。	同上	冬(2月)	同上	クラックビューアによる客観的判断要素の追加

供用開始後3年目(平成22年)の修正では、供用開始後2年を経てひび割れの調査結果に殆ど変化が無かったこともあり、調査時期をひび割れ幅が最大化する冬場に行うべき等との指摘から、代表径間（P2～P3間、P6～A2間）に対して以下の点検方法を試行した。

- ①ひび割れ点検時期を7月から2月に変更
- ②ひび割れに対するマーキングをチョークからマジックペンに変更
- ③幅0.1mm以上のものを対象にひび割れが途切れるまでの長さを追跡

しかし、ひび割れが途切れるまでの追跡を行うと、複数のひび割れが接続し、ひび割

れの向きや最大幅が判別できない結果となり、再度以下の方法で点検を行った。

- ① ひび割れ点検を4月に再実施（以降は2月に実施する）
- ② ひび割れに対するマーキングはマジックペンとする
- ③ 幅0.1mm以上の範囲をひび割れ長さとし、現地に最大幅位置と端部位置を表示
- ④ ひび割れの整理番号、番号・幅・長さ・日付を記載したシールを現地に貼付

供用開始後4年目（平成23年）の修正においては、以上の経過を委員会に諮り、以降の点検方法を以下の様に定め再度初期値を取り直した。

- ① ひび割れ点検を2月に実施する
- ② ひび割れに対するマーキングはマジックペンとする
- ③ 点検対象とするひび割れ幅は代表径間（P2～P3間、P6～A2間）では幅0.1mm以上、その他5径間では南側半断面で幅0.1mm以上、北側半断面で幅0.2mm以上とする
- ④ いずれの幅を対象とする場合においても、幅0.1mm以上の範囲をひび割れ長さとし、現地に最大幅位置と端部位置を表示
- ⑤ ひび割れの整理番号、番号・幅・長さ・日付を記載したシールを現地に貼付
- ⑥ 現地にひび割れ調書を配置

現地でのマーキングの方法は図5.4.2のとおり。

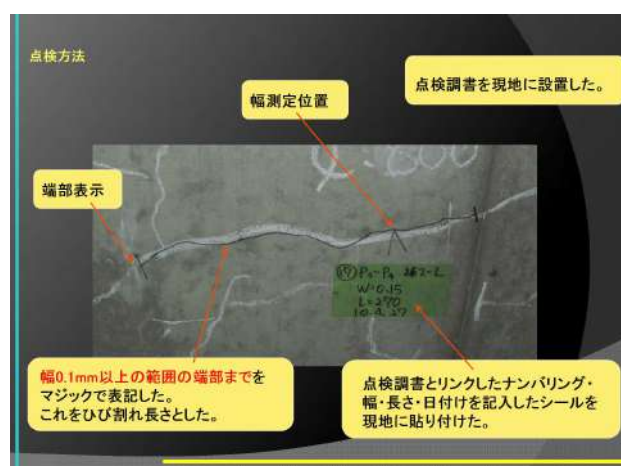


図5.4.2 点検方法

また、供用後8年目（平成27年）と9年目（平成28年）はCRACK_VIEWER による点検も並行して実施した。

CRACK_VIEWER は、ひび割れ幅を連続的に測定し、画像処理ソフトで統計的に処理してひび割れ幅を0.01mm単位で表示する計測器であり、個人差によるバラツキを解消し安定した測定が可能な計測方法である。

本モニタリングでは、このCRACK_VIEWER による点検結果が、目視及びクラックスケールによる点検結果に比べて安全側の傾向となったことから、最終年に実施するひび割

れ注入に遺漏が生じないことを目的に、これを採用した。



図5.4.3 ひび割れ幅測定器 (CRACK_VIEWER)

5. 4. 2 ひび割れの推移

前項で記したとおり、ひび割れの点検方法は度々修正を加えていることから、ここでは供用開始後4年目(平成23年)以降のひび割れ総本数総延長の推移を図5.4.4に、ひび割れ密度の推移を図5.4.5に示し、個々の点検結果や損傷図は資料編に掲載する。

ひび割れ密度は、当初より特に第3径間 (P2～P3間) にひび割れが多かったことから、密度も特段に大きくなっていった。

また、点検対象とするひび割れ幅が、代表径間 (P2～P3、P6～A2) では全域で0.1mm以上、その他5径間では南側半断面が0.1mm以上、北側半断面が0.2mm以上であるため、この5径間と代表径間との密度のレベルが大きく異なっている。

以上を踏まえたうえでのひび割れ密度の推移は、供用開始後6年目(平成25年)の点検直前に行ったひび割れ注入を境に減少する以外は、密度の大小に関わらず、点検時の気温の変化による多少の変動以外の増加傾向は見られなかった。

ウェブ・上下床版の部位ごとに分類した結果においても同様であった。

以上のことから、本橋に生じたひび割れは、主にコンクリートの収縮に起因した初期ひび割れであり、供用に伴って進展を続けるひび割れではなかったものと判断できる。

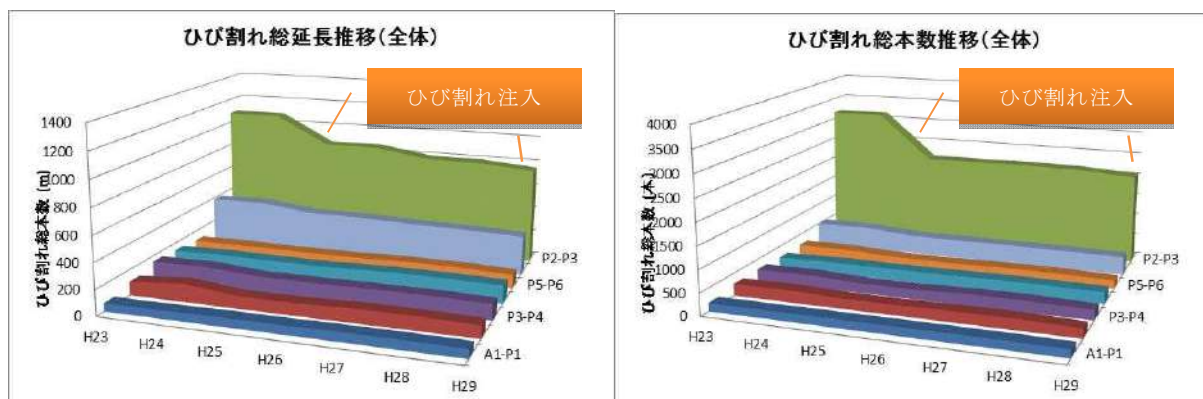


図5.4.4 ひび割れ総本数総延長の推移

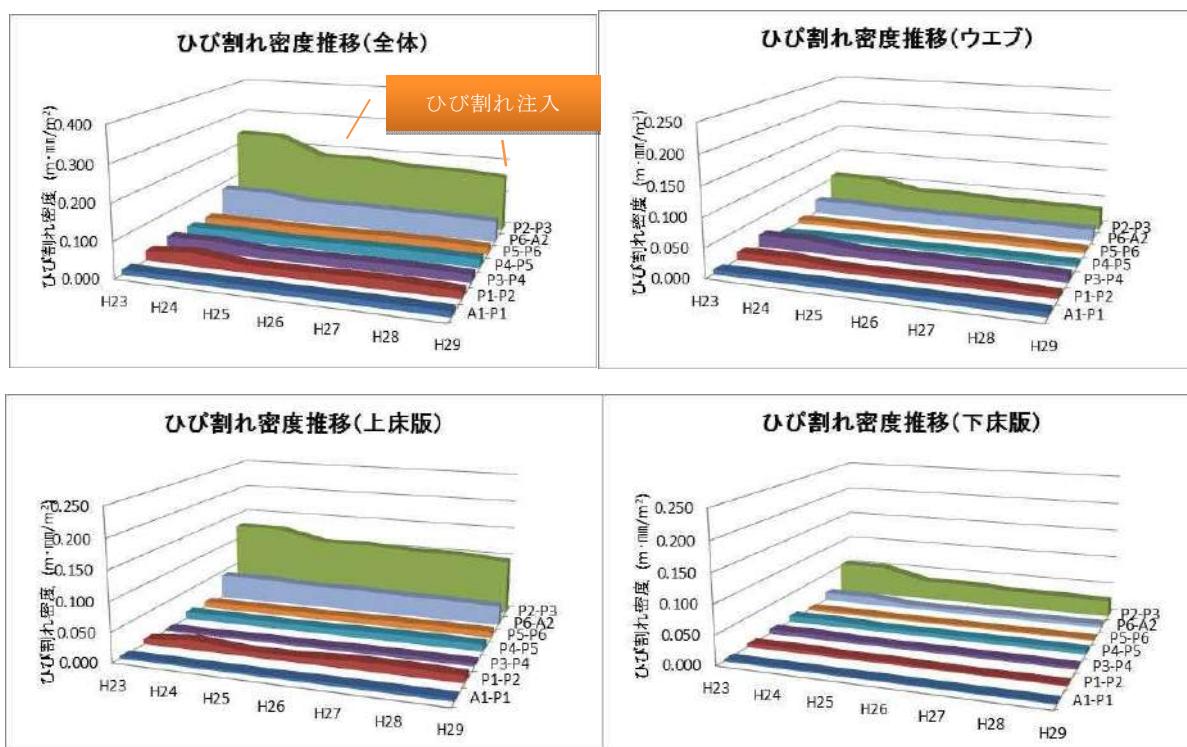


図5.4.5 ひび割れ密度の推移

5. 4. 3 ひび割れ幅の温度変化に対する変化量の傾向

本橋はラーメン橋であることから、支点の拘束により、温度変化で桁が収縮する冬場にひび割れ幅が最大化する。

本モニタリングでは、供用開始後4年目(平成23年)に点検時期を当初の夏場から冬場に変更して初期値を取り直しており、これと供用開始後2年目(平成21年)のひび割れ幅の変動を比較した結果、表5.4.2のとおり各径間の平均値は0.04~0.07mm冬場に増加した(本委員会の中間報告書より)。

表5.4.2 夏冬のひび割れ幅の変動量(クラックスケール)

	(mm)		
	H21(夏)	H23(冬)	幅の変動
A1-P1	0.09	0.14	0.05
P1-P2	0.08	0.14	0.06
P2-P3	0.09	0.15	0.06
P3-P4	0.08	0.15	0.07
P4-P5	0.07	0.14	0.07
P5-P6	0.08	0.13	0.05
P6-A2	0.08	0.12	0.04

この値は、目視及びクラックスケール(分解能0.05mm)によるものであるため、実際のひび割れの年変動はこの値より小さいものと考えられた。

そこで、供用開始後10年目(平成28年)の8月と同年2月に653本のひび割れに対して、CRACK_VIEWER(分解能0.01mm)を用いて年変動を測定した。

この結果によると、表5.4.3に示すとおりひび割れ幅の変動の平均は夏冬で約0.02mm

であった。

表5.4.3 夏冬のひび割れ幅の変動量 (CRACK_VIEWER)

	(mm)				
	H28(夏)	H28(冬)	幅の差	変化max	変化min
A1～P1	0.187	0.149	0.037	0.100	0.000
P1～P2	0.186	0.164	0.022	0.060	0.000
P2～P3	0.162	0.141	0.021	0.080	0.000
P3～P4	0.211	0.187	0.024	0.070	0.000
P4～P5	0.209	0.185	0.024	0.060	0.000
P5～P6	0.196	0.174	0.022	0.080	0.000
P6～A1	0.164	0.142	0.022	0.060	0.000
全平均	0.182	0.159	0.023		

前述のとおり、夏冬のひび割れ幅の変動量は平均値で0.02mm程度ではあったが、個々の変化の範囲は0.00～0.10mmとなっていた。

ここで、測定したひび割れ653本についてひび割れ幅の変化の状況を図5.4.6に、変化の割合の状況を図5.4.7a)に表すと、ひび割れ幅が変化しないものが約10%、0.05mm未満の範囲で変化するものが約80%、0.05～0.10mmの範囲で変化するものが約10%という結果となった。

このことから、ひび割れの9割近くは、夏冬の温度変化に伴って0.05mm未満の範囲で変動、若しくは変化しない状態であり、約1割程度が0.05～0.10mmの範囲で変動しているものと考えられた。

また、これらの変化をひび割れ幅0.2mm以上と0.2mm未満に分類した結果を図5.4.7b)～c)に表すと、ひび割れ幅が大きい方が、夏冬のひび割れ幅の変化量が大きかった。

このことから、外気温によるひび割れ幅の変化は、ひび割れ幅が大きいものほど大きく、計測時期の気温の変化による変動が生じやすいものと考えられた。

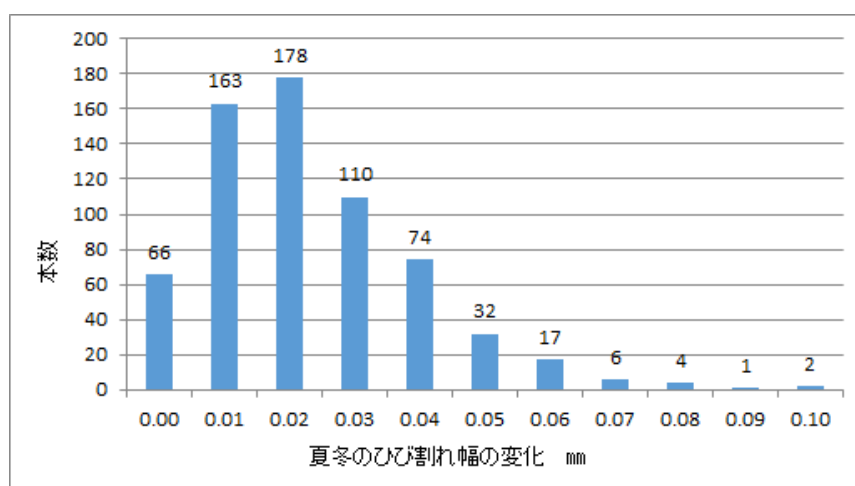


図5.4.6 夏冬のひび割れ幅の変化

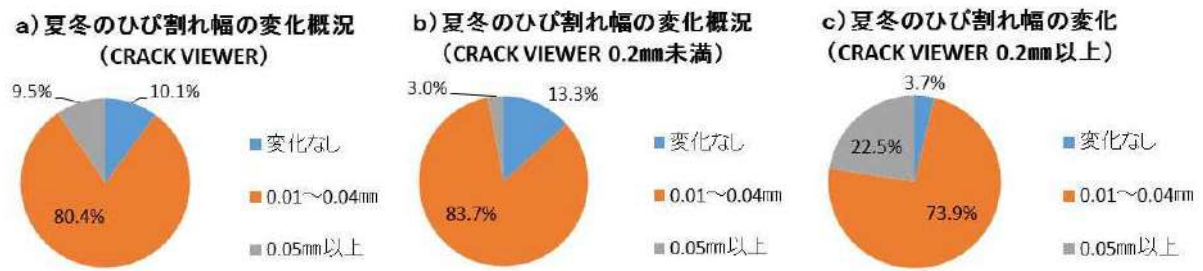


図5.4.7 夏冬のひび割れ幅の変化概況

5. 5 亀裂変位計（補修済みひび割れ付近の変位）

（1）計測値の取扱い

亀裂変位計（補修済みひび割れ付近の変位）の測定は図5.5.1に示す様に、橋長全体にわたり12個の補修済みのひび割れを任意に選択し、そこに亀裂変位計を設置して供用開始後1年間常時監視を行った。なお、本モニタリングではこの計測項目をひび割れ幅と表し、この他の資料においてはその表記となっている。

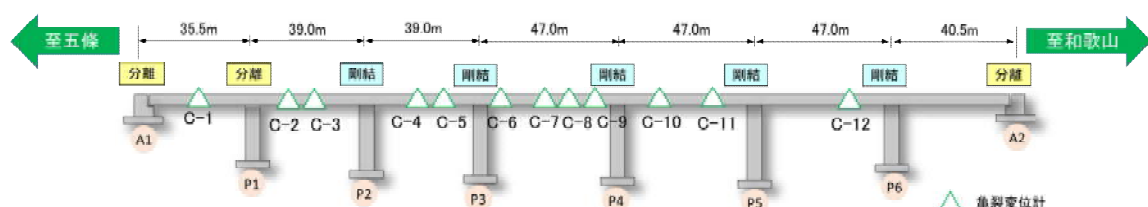


図5.5.1 亀裂変位計配置図

この計測の目的は、活荷重時のひび割れ幅を制御した設計であるPRC構造の本橋が、供用後の短期間に活荷重の载荷によってひび割れ補修箇所付近でひび割れが再発することを検知することであった。

常時監視の結果、計測値は温度の変化に伴って変動し、ひび割れ補修箇所付近でひび割れが再発する事象は現地では見られなかった。

本計測項目は、当初は供用開始後1年で計測を完了する予定で、計測器も耐久性の望めないものを使用しており、2年目以降の計測値は参考的に計測を継続したものである。

（2）モニタリングデータ

亀裂変位計のモニタリングデータを図5.5.2に示す。

本項目の管理値は0.1mmを上限注意値、0.2mmを上限值としていたがモニタリング初年度でこの値を超過した。

これについては、補修したひび割れ付近での開口が無いこと、他のモニタリングの状況から橋梁に異常は生じていないと考えられること、翌夏にはほぼ同じ位置に値が戻ったことなどから、この計測値には問題が無いと判断した。

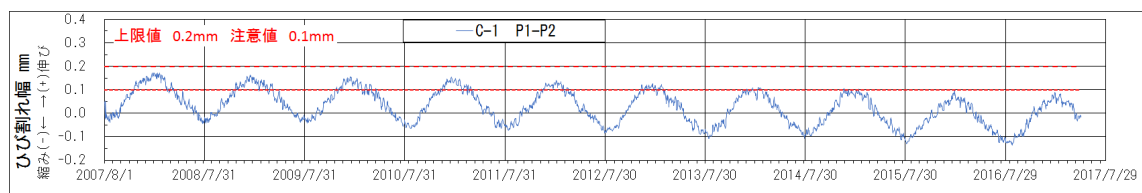


図5.5.2 モニタリングデータ

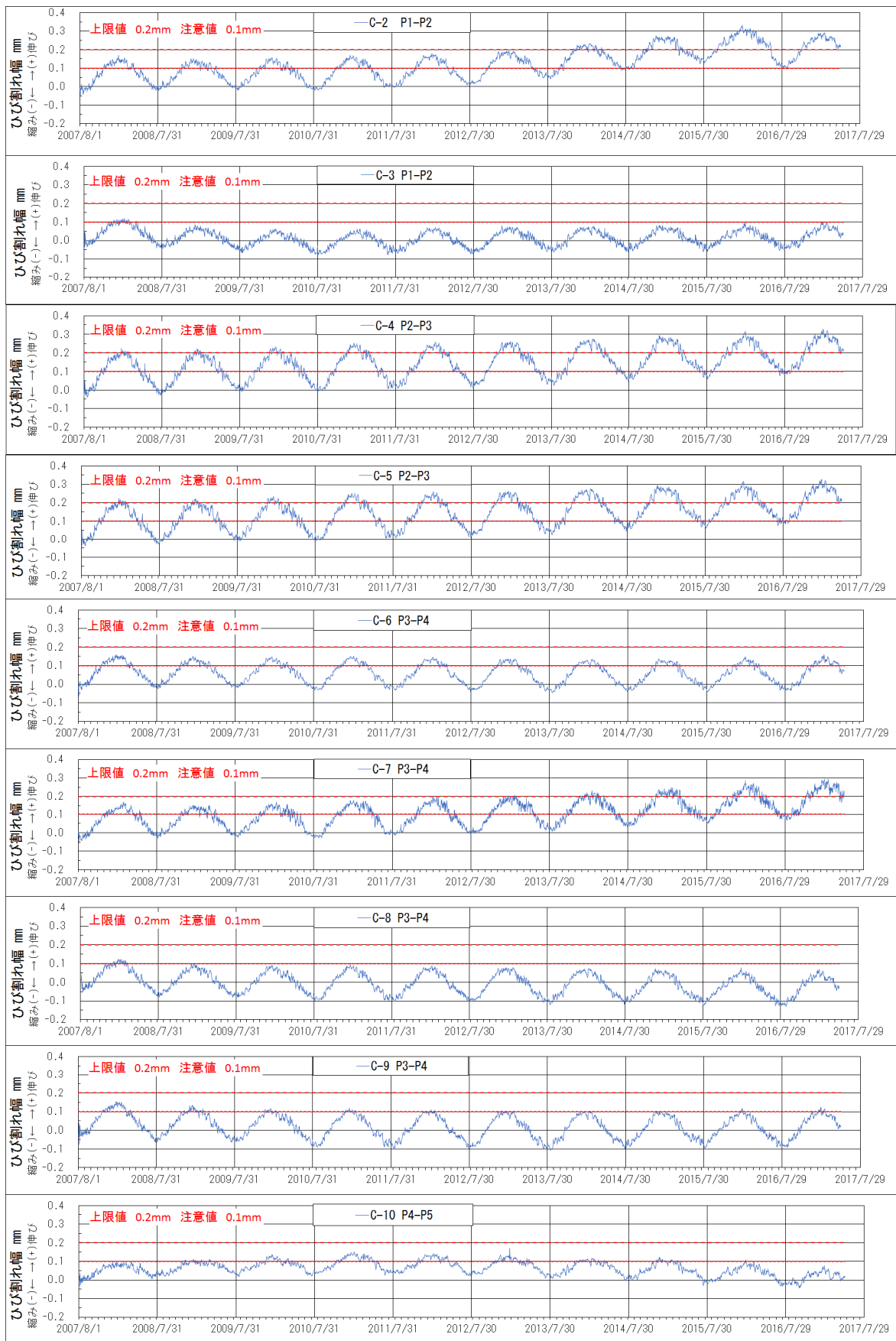


図5.5.2 モニタリングデータ（続き）

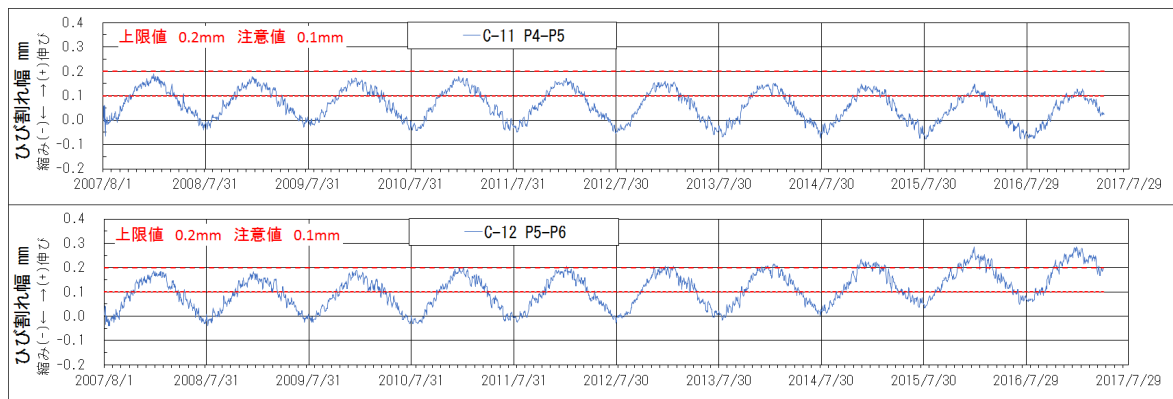


図5.5.2 モニタリングデータ（続き）

5. 6 上下床版平均ひずみ

(1) モニタリングデータ

橋軸方向の床版の変位を比較的長めの範囲で捉え、他の計測値を補完することを目的に、比較的長期に計測が可能な光ファイバーセンサーを用いて上下床版の橋軸方向のひずみの計測を行った。

図5.6.1に示すとおり、計測した径間はひび割れの多かったP2-P3間、比較的ひび割れの少なかったP5-P6間の2径間とし、計測器の配置は、支間中央付近の構造物中心付近に、上下床版各々に橋軸方向に2mの光ファイバーを1条設置した。

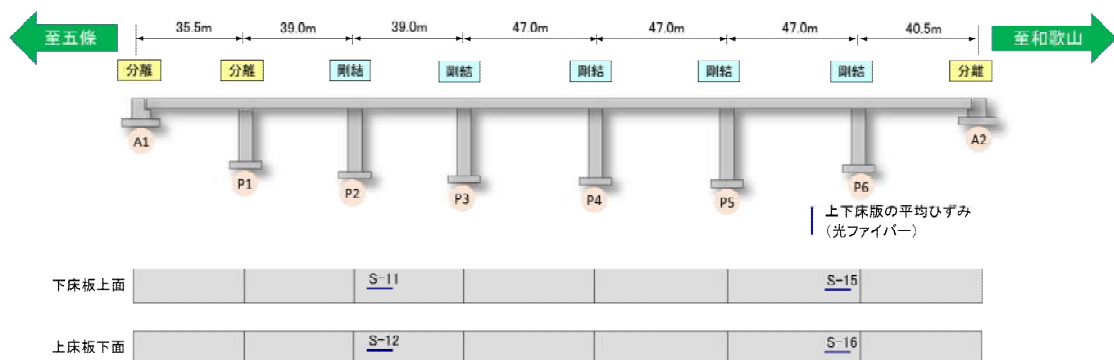


図5.6.1 光ファイバーセンサーの配置図

上下床版の平均ひずみのモニタリングデータを図5.6.2に示す。図中、橙色が計測値、青色が補正値を加味した値である。

上下床版の平均ひずみの値は、当初2mのセンサーの長さに対する変位量を計測していたが、途中からその変位量をセンサーの長さで除した平均ひずみでの計測に変更している。

このためモニタリングの管理値も、上限注意値を0.1mmから 50μ 、上限値を0.2mmから 100μ に変更したが、何れにおいてもこの値を超過することは無かった。

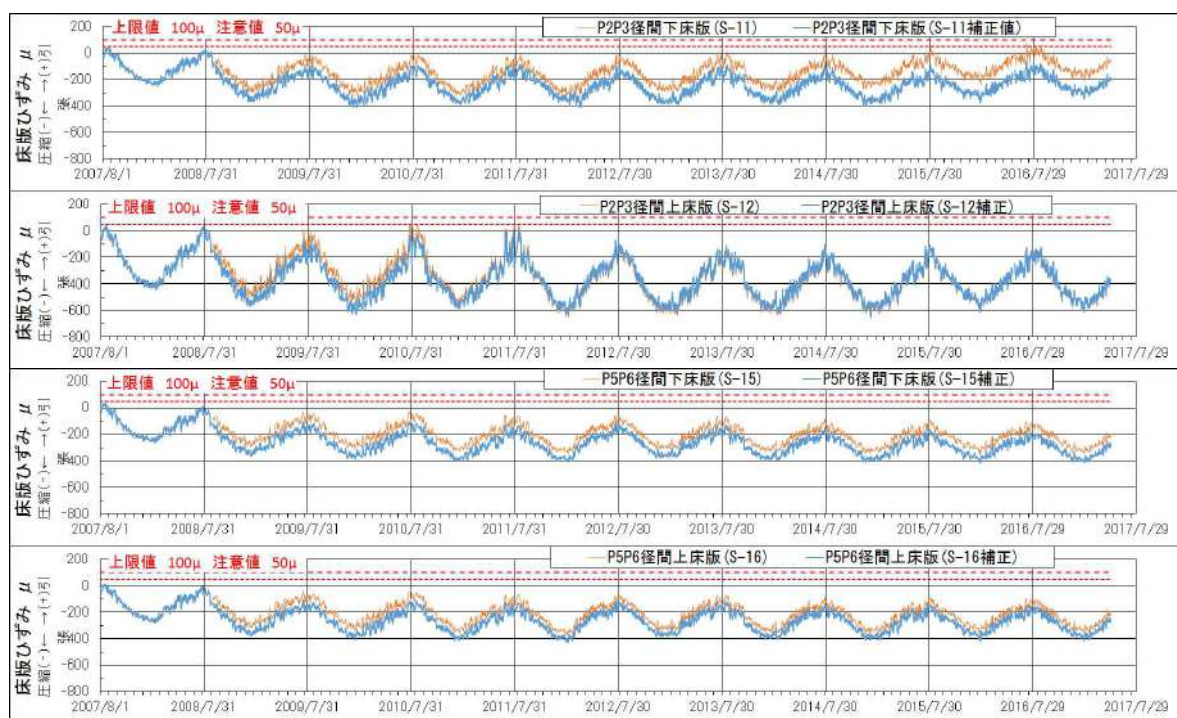


図5.6.2 モニタリングデータ

(2) ドリフト量の補正

前項の上下床版平均ひずみのモニタリングデータは、表5.6.1に示す故障の際に生じたドリフト量を5.1(4)の方法で補正したものである。

表5.6.1 上下床版平均ひずみ計測値の補正值

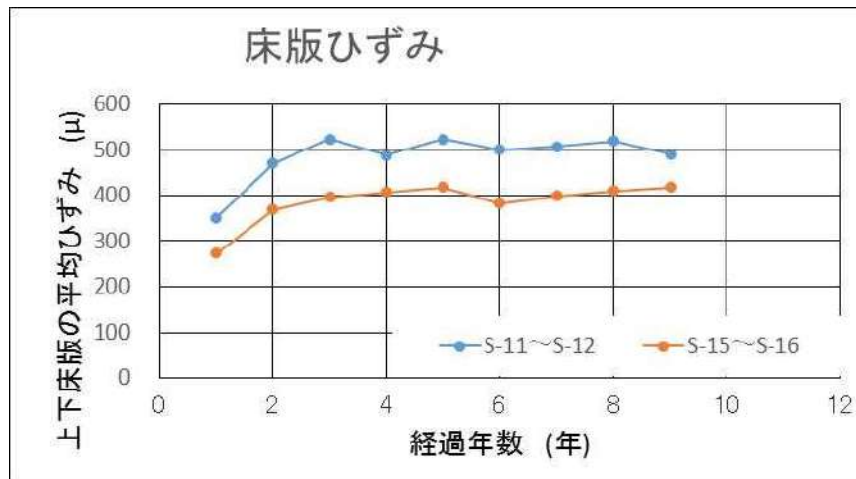
欠測イベント			補正量(μ)			
番号	原因	対象期間	S-11	S-12	S-15	S-16
①	落雷停電発生によるデータの変動	2008/8/23 ～9/1	-70.98	-69.83	-69.32	-62.48
②	オプトボックスの異状による欠測	2009/6/1 ～6/1	-11.94	-9.66	-7.33	-7.25
③	オプトボックスの交換	2010/10/7 ～10/8	15.66	11.30	2.02	10.71
④	計測器の交換に伴う欠測	2011/9/21 ～9/21	12.14	8.74	1.54	3.23
⑤	電源工事のための一時停電	2015/5/13	-7.13	-9.51	-6.17	-5.65
⑥	ロガー故障・交換	2017/3/8	-3.87	-5.58	-3.64	-2.97

(3) 計測値の推移

前項の補正値を加味した各年の上下床版の平均ひずみの年間の変動量の推移を図5.6.3に示す。

上下床版の平均ひずみの年間変動量（上下床版の値の平均値）は、若干の変動はあるもの3年目頃からほぼ横ばいである。

このことから、本橋の応力状態は供用開始以降3年目頃から安定して推移していたものと考えられる。



※10年目のデータは1年間に満たないため供用後9年間の推移で評価した。

図5.6.3 上下床版のひずみの平均値の推移

5.7 外ケーブルの張力

(1) モニタリングデータ

本橋は、床版天端高さの修正と剛性の強化を目的に床版増厚を施し、その荷重増分に対応するため外ケーブルによる補強を行っている。

この外ケーブルの張力を計測することで、たわみの増大や剛性の低下が生じた場合の兆候を検知することを目的に、定着体にロードセルを設置して、定着圧力の計測を行った。

計測器の配置は図5.7.1に示すとおりで、外ケーブルは各径間2本ずつ計14本配置されているが、このうちP2-P3及びP3-P4間に配置された4本を選択した。

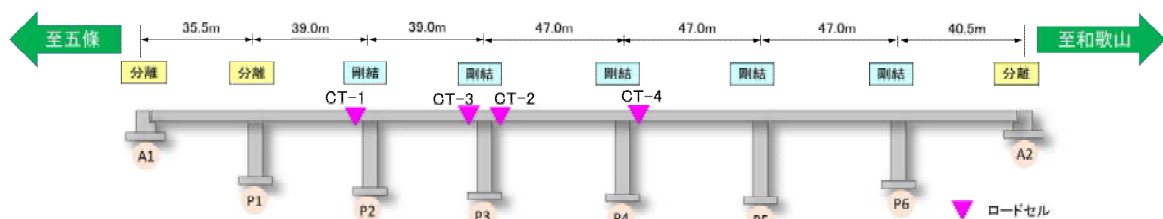


図5.7.1 ロードセルの配置図

外ケーブル張力のモニタリングデータを図5.7.2に示す。

計測値は全期間安定して年間の温度変化に伴って圧力の上昇下降を繰り返した。

この計測値には0kNを下限值、660kNを下限注意値、1163kNを上限注意値、1628kNを上限値と定めていたが、これらに抵触する値は発生しなかった。

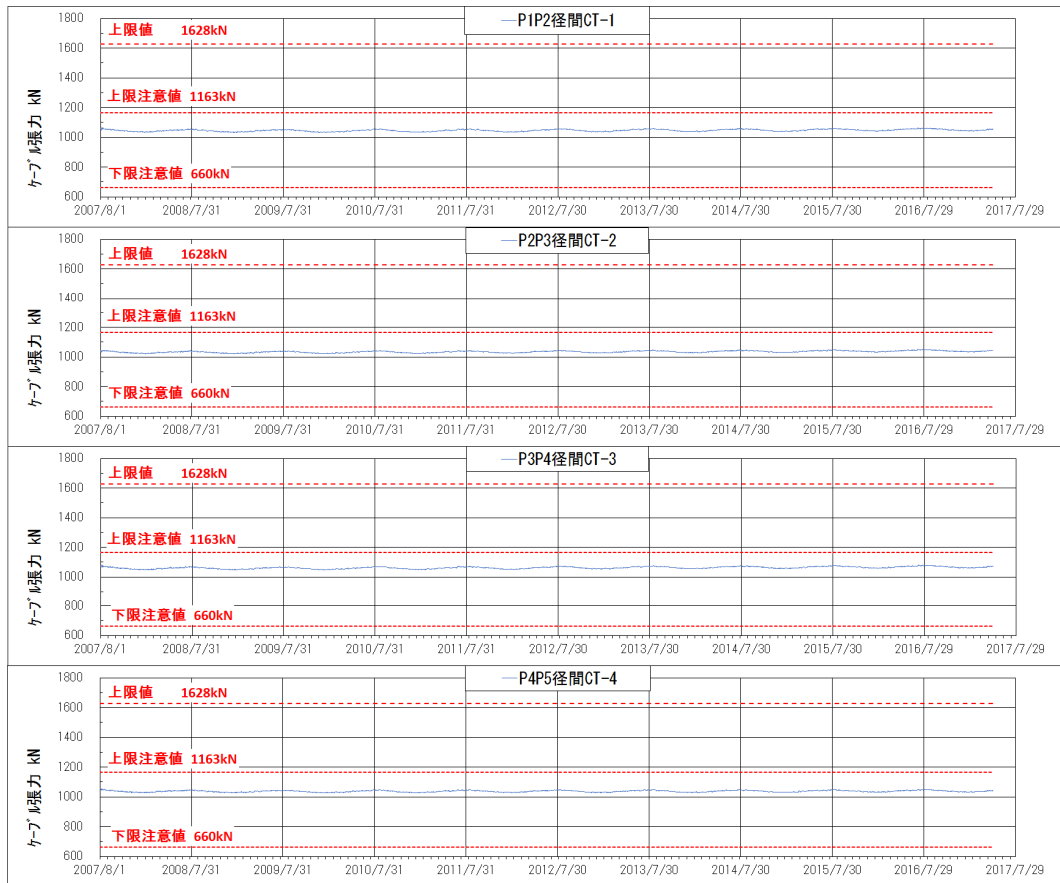
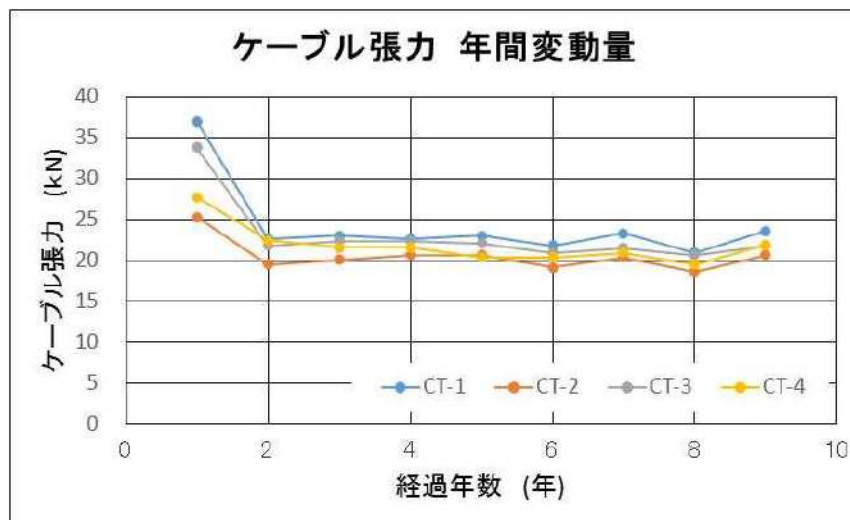


図5.7.2 モニタリングデータ

(2) 計測値の推移

計測期間中の年間の変動量の推移を図5.7.3に示す。

外ケーブル張力は、供用開始2年目以降は温度変化に伴い毎年約21kNの範囲で増減を繰り返した。



※10年目のデータは1年間に満たないため供用後9年間の推移で評価した。

図5.7.3 外ケーブル張力の年間の変動量

供用開始後1年目に変動量が大きく表れている理由は、緊張後初期の段階でリラクセーションによってプレストレスが低減したためと考えられる。

なお、緊張力導入からモニタリング開始までの間の計測値の変化は資料編の資料No.17を参照されたい。

5. 8 衝撃振動試験の結果

振動計測の測定値を表5. 8. 1に示す。

なお、測定時の波形等詳細な結果は資料編の資料No.10を参照されたい。

振動計測は当初、最もひび割れが多かったP2～P3間のみに対して実施し、その際の測定波数も1波であったが、この方法では特異値を拾う可能性があるとの委員会での指摘により、平成23年の計測より全径間に対して実施し、10波程度の測定を経たうえで、固有振動数を求めることとした。

また、当初は通過交通車両の通過時の振動をもとに算出していたが、次第に交通量が増え、通過交通車両単体の波形を得ることが難しくなったことから、同じく平成23年の計測時より土囊の落下による衝撃振動の波形をもとに算出することとした。

固有振動数の値は、供用前後でアスファルト舗装と防音壁の設置による死荷重増による変化は見られるが、供用後は殆ど変化なく推移しており、この計測結果から剛性の低下は生じていないものと考えられる。

表5. 8. 1 一次モードの固有振動数の推移（表3. 2. 1として前出）

測定ステップ		第1径間 (A1-P1)	第2径間 (P1-P2)	第3径間 (P2-P3)	第4径間 (P3-P4)	第5径間 (P4-P5)	第6径間 (P5-P6)	第7径間 (P6-A2)
	スパン(m)	35. 5	39	39	47	47	47	40. 5
補修対策前	H18. 09	3. 8Hz	3. 9Hz	5. 1Hz	3. 5Hz	3. 5Hz	3. 5Hz	4. 4Hz
ひび割れ注入後	H18. 12	4. 3Hz	4. 3Hz	5. 4Hz	3. 6Hz	3. 6Hz	3. 6Hz	4. 6Hz
補修対策後 (床版増厚後)	H19. 06	4. 0Hz	4. 0Hz	5. 2Hz	3. 4Hz	3. 4Hz	3. 4Hz	4. 4Hz
供用開始後	H19. 09	—	—	5. 0Hz	—	—	—	—
供用開始後	H21. 07	—	—	4. 9Hz	—	—	—	—
供用開始後	H23. 05	3. 5Hz	3. 5Hz	4. 9Hz	3. 2Hz	3. 2Hz	3. 2Hz	4. 2Hz
供用開始後	H25. 02	3. 8Hz	3. 8Hz	5. 0Hz	3. 2Hz	3. 2Hz	3. 2Hz	4. 2Hz
供用開始後	H27. 02	3. 8Hz	3. 8Hz	4. 9Hz	3. 2Hz	3. 2Hz	3. 2Hz	4. 2Hz
供用開始後	H29. 03	3. 8Hz	3. 8Hz	4. 9Hz	3. 2Hz	3. 2Hz	3. 2Hz	4. 2Hz

5. 9 床版鉄筋の自然電位の推移

床版鉄筋の自然電位の3回の測定値を図5. 9. 2に、この他の測定結果は資料編の資料No. 9に示す。

測定方法は、「コンクリート構造物における自然電位測定方法(JSCE-E 601-2007)」に準拠し、照合電極には銅－飽和硫酸銅電極を使用した。

測定点は、鉄筋探査により配筋状態を確認しメッシュ分割を行い、配筋メッシュの格子点において測定し自然電位の分布図を作成した。また、併せてコンクリート表面の水分量も測定し

た。

自然電位の最小値は-74mV であり、この値は ASTM C876 規格による判定基準で「90%以上の確率で腐食なし」と判定されるものである。

このことから、測定値は何れも鉄筋腐食なしの範囲内で推移しており、鉄筋が健全な状態であるものと判断した。

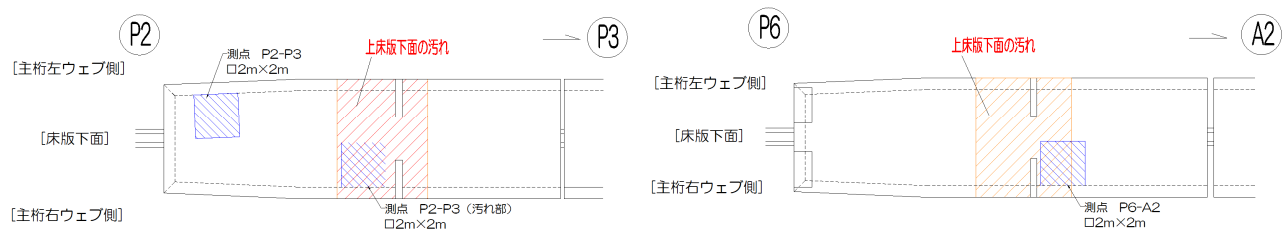


図5.9.1 自然電位 調査位置



写5.9.1 測定機器



写5.9.2 測定状況

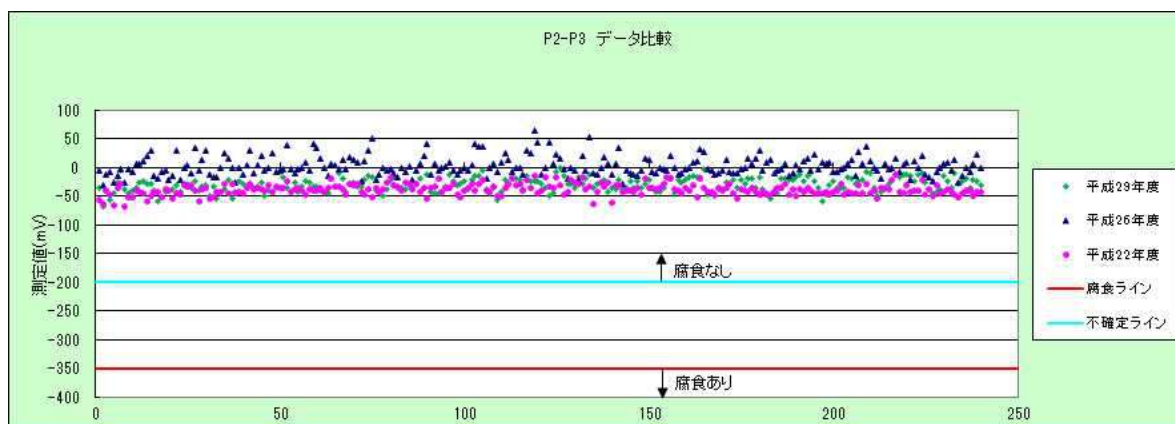


図5.9.2 鉄筋の自然電位の計測結果（P2-P3）（図3.2.11として前出）

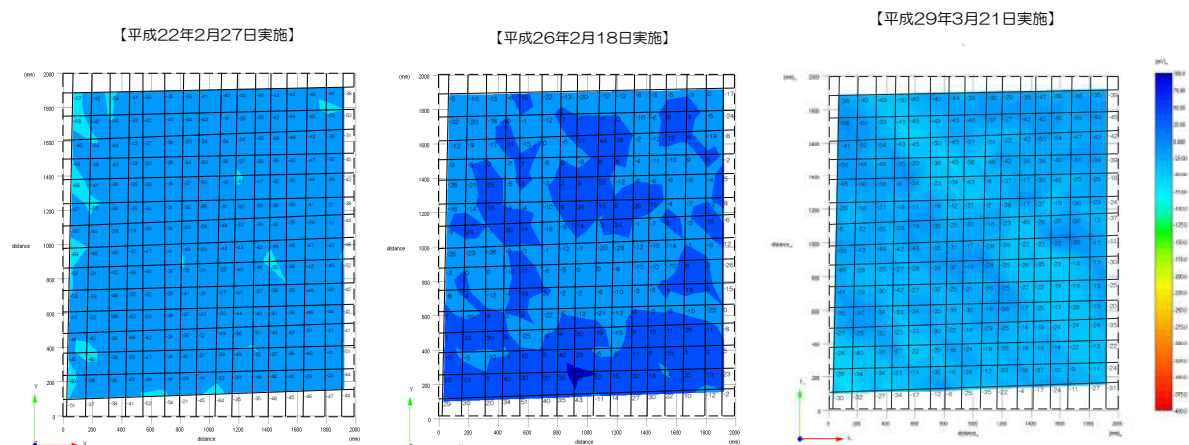


図5.9.3 自然電位測定結果コンター図

自然電位測定は、ひび割れ調査の代表区間であるP2～P3、P6～A2において実施し、表面に汚れが見えた場所を含め図5.9.1に示すとおり3か所で実施した。なお、1箇所当たりの測定範囲は2m×2mとした。

なお、自然電位計測用の端子は、P2～P3間及びP6～A2間に存置しており、本モニタリング終了後も計測することが可能である。

6. 今後この橋の橋梁点検を行う際の留意事項

(1) 本橋に施された補修・補強内容

本橋は平成14年度に完成し、供用前の平成19年度、モニタリング期間中の平成24年度、モニタリング終了前の平成28年度に表6.1に示す内容で損傷対策（かし修補工事）が施されている。

これらの対策は、土木学会コンクリート委員会「垂井高架橋損傷対策特別委員会中間報告書」の記述をもとに、土木学会コンクリート委員会「垂井高架橋の損傷に関する調査特別委員会」で実際の施工方法を審議された内容に基づくものである。

表6.1 垂井高架橋の補修補強事項

項目	実施年度	実施内容	部位	使用材料 の情報
上面増厚	平成19年	鋼繊維鉄筋コンクリート打設	上床版上面	委員会①最終報告書
外ケーブル補強	〃	外ケーブルの設置 （上面増厚の死荷重増大への対応）	箱桁内	
ひび割れ注入	〃	エポキシ樹脂注入	箱桁上床版上面、箱桁内上床版下面を除く全ての面	
ひび割れ再注入	平成24年	〃	箱桁内で上床版下面を除く全ての面	委員会①最終報告書 ※平成19年と同一の工法で実施した
〃	平成28年	〃	箱桁内全ての面	
表面保護工	平成19年	剥落防止シート貼付	箱型側面・底面（表面含浸補修を兼ねる）	委員会①最終報告書
表面含浸工	平成28年	けい酸塩・シラン複合型含浸材塗布	箱桁内で上床版下面を除く全ての面	委員会②平成28年度報告書

なお表中の委員会①は土木学会コンクリート委員会「垂井高架橋の損傷に関する調査特別委員会」を示し、委員会②は同「垂井高架橋モニタリング評価委員会」を示す。



写6.1 箱桁内面の状況



写6.2 箱桁外面の状況

なお、箱桁内面に施した表面含浸の方法は、当初、土木学会「表面保護工法 設計施工指針（案）」に基づき計画したものであったが、第9回モニタリング評価委員会での指摘により、土木学会「けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針（案）」の内容も考慮し、新しい材料・工法を含めて再検討した結果、エポキシによる工法からけい酸塩・シラン複合型の工法に変更して実施した。

（２）本橋の橋梁点検のポイント

10年間に及ぶ本モニタリングにより、桁の伸縮やこれに伴うたわみや変位、ひび割れの推移などから、前項に示した損傷対策が有効であることが確認されている。

このため、今後の橋梁点検においては、近接目視などの5年に一度の通常の橋梁点検によって、他の補修を施した構造物と同様に維持管理を行っていくことが可能である。

なお、本橋に生じているひび割れは、モニタリング期間中に新たに発生したものではなく、モニタリング終了時点で幅0.2mm以上のひび割れは全てエポキシ樹脂注入にて、それ以外の微細ひび割れについては上床版上面と箱桁内の上床版下面を除き表面含浸工法にて補修済みである。

このため、本橋の橋梁点検を合理的に行うためには、構造物全体を目視で効率的に見ていく必要があり、とくに以下の項目を重点的に確認する必要がある。

また実務に際しては、この橋に合った点検要領を整備し、それに基づき維持管理を行っていくと良い。

a) ひび割れ

箱桁内を目視点検し漏水・遊離石灰が生じていないかを点検する。

b) 剥落防止シート（外面）

モニタリング終了時点で、設置後約10年を経て、剥落防止シートの膨れや、漏水・遊離石灰といった変状は生じておらず、剥落防止シートは健全な状況である。

なお、モニタリング終了時点での外観写真を資料編の資料No.12に添付する。

c) 外ケーブル工

モニタリング終了時点で外ケーブル補強部材は健全な状況であり、今後の点検においても、ケーブルや定着装置、定着部あるいは偏向部コンクリートに変状が生じていないかを点検すると良い。

また、以下のモニタリング終了時点の状況を予め踏まえておくが良い。

- ・モニタリング期間中張力は安定していた。
- ・定着部に設置してあるロードセルは撤去が困難であるため、そのまま存置してある（スポット的な再計測が可能である）。
- ・外ケーブルは各径間4本ずつ設置されているが、現在所定の緊張力が導入されているのは両ウェブ側の2本だけであり、残りの2本は予備に配置したものであるため、弛みをとる程度の緊張力を与えている。
- ・外ケーブル設置のために後から打設した偏向部や定着部のコンクリートには、供

用後乾燥収縮等によるひび割れが発生したが、これらにもウェブや下床版の内面と同様の補修が施されている。

d) 上床版鉄筋の腐食状況

モニタリング終了時点で上床版鉄筋は健全な状況であり、今後の点検において、その兆候が見られた場合は以下を参考にとすると良い。

- ・本橋は、供用開始前からモニタリング終了時まで、上床版下面に漏水や遊離石灰は発生していなかった。
- ・モニタリング期間中に実施した3度の自然電位試験の結果からも、腐食が発生する状態ではなかった。
- ・モニタリング時に使用した3箇所の計測場所では、端子を残しており今後も計測が可能である(本モニタリングでの計測結果は資料編の資料No.10を参照されたい)。

e) 表面含浸工（箱桁内のウェブ・横桁・下床版・外ケーブル部材）

表面含浸工はモニタリング期間終了半年ほど前に実施したばかりである。表面含浸工の実施箇所は、箱桁内の壁面（ウェブ、横桁）、床面（下床版上面）、外ケーブルの定着部・偏向部であり、上床版の下面には実施していない。

なお、将来的に表面含浸工を施した箇所に錆汁やエフロレッセンスの滲出といった新たな変状が見られた場合は、その変状に応じた適切な対応を施す必要がある。